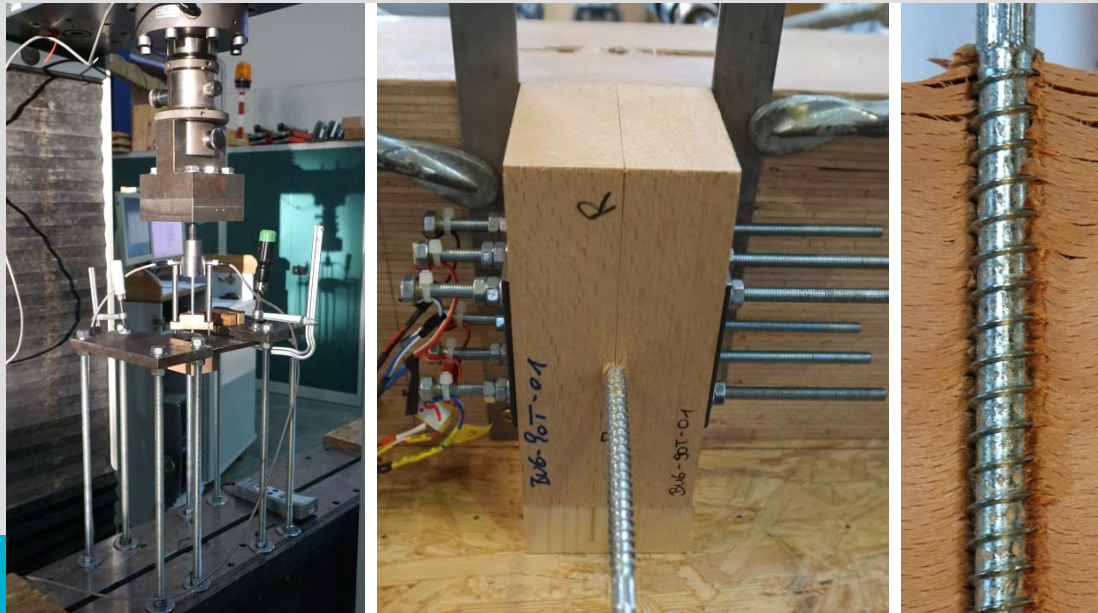


# Ausgewählte Untersuchungen zum Tragverhalten einer für Hartlaubholz optimierten Holzbauschraube

M-4-09/2017



**Tobias REICHINGER**

Institut für Holzbau und Holztechnologie  
Technische Universität Graz





Tobias Reichinger, BSc

# **Ausgewählte Untersuchungen zum Tragverhalten einer für Hartlaubholz optimierten Holzbauschraube**

## **MASTERARBEIT**

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

Eingereicht an der  
**Technischen Universität Graz**

Betreuer  
Ass.Prof. Dipl.-Ing.(FH) Dr.techn. Reinhard Brandner  
Institut für Holzbau und Holztechnologie

Dipl.-Ing. Dr.techn. Andreas Ringhofer  
Institut für Holzbau und Holztechnologie

Graz, August 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

Mit den folgenden Zeilen möchte ich mich bei all jenen Personen bedanken, die mich während meines Studiums und dieser Arbeit begleitet, unterstützt und motiviert haben.

So möchte ich mich bei Univ.-Prof. Gerhard Schickhofer für die interessante, kurzweilige und ansprechende Gestaltung der Vorlesungen bedanken. So konnte mein Interesse für den Holzbau geweckt und in weiterer Folge in zahlreichen Lehrveranstaltungen mehr über den Baustoff Holz und seine verschiedensten Anwendungsmöglichkeiten in Erfahrung gebracht werden.

Ein großer Dank geht an meine beiden Betreuer Ass.Prof. Reinhard Brandner und Andreas Ringhofer, auf deren Vorschlag hin ich zur Bearbeitung dieses spannenden Themengebietes kam. Sie boten mir zu jederzeit ein offenes Ohr für meine Fragen und Anliegen und nahmen sich die notwendige Zeit für eine ausführliche und zufriedenstellende Beantwortung. An dieser Stelle möchte ich mich für die überragende und stets termingerechte Betreuung während der Verfassung dieser Masterarbeit bedanken.

Des Weiteren geht ein besonderer Dank an O.Revident Bernd Heissenberger, der mir vor allem bei der Herstellung der Prüfkörper und dem Aufbau der Prüfkfigurationen von sehr großer Hilfe war. Auch bei Severin Zimmer und Raimund Sieder, welche mich bei der Durchführung der Prüfungen mit den Messschrauben und der Auswertung der Ergebnisse unterstützen, möchte ich mich an dieser Stelle sehr herzlich bedanken.

Am Ende meiner bzw. unserer gemeinsamen 5-jährigen Studienzeit angelangt, möchte ich mich auch besonders bei meinen Studienkollegen und Freunden, Georg Baumann, Bernhard Harrer und Thomas Harringer bedanken. Ohne sie hätte ich das Studium nicht in dieser kurzen Zeit und mit diesem Tiefgang abschließen können. Gemeinsam konnten wir die sehr kurzweilige, lustige und vor allem lehrreiche Zeit genießen und werden viele gemeinsame Erinnerungen aus unserer Zeit in Graz wohl nie vergessen.

Auch meinen Kollegen im Diplomandenzimmer möchte ich für das tolle Klima, die außerordentlichen Hilfsbereitschaft und die interessanten Diskussionen danken.

Des Weiteren gilt den am Forschungsprojekt FFG BRIDGE Projekt "hardwood screws" teilnehmenden Partnerfirmen besonderer Dank. Den Firmen Schmid Schrauben Hainfeld GmbH und Pollmeier Furnierwerkstoffe GmbH sei für die Zurverfügungstellung der Schrauben und eines Großteils des Holzmaterials gedankt. Ein Dank geht auch an die Landeskammer für Land- und Forstwirtschaft Steiermark (ARGE Holzwerbebeitrag), ohne deren finanzielle Unterstützung das Projekt nicht möglich gewesen wäre.

Insbesondere gilt mein Dank meinen Eltern Ferdinand und Maria Reichinger, die mir das Studium zu den besten erdenklichen Rahmenbedingungen ermöglichten. Sie unterstützten mich in all meinen Entscheidungen und das mehr als man in Worten fassen kann. Auch meinem jüngeren Bruder Simon, der in den letzten Jahren oft auf mich verzichten musste, sei an dieser Stelle versprochen, in Zukunft wieder mehr Zeit für ihn zu haben.

Auch meiner Freundin, Simone Wiesinger, sei für das entgegengebrachte Verständnis während meiner gesamten Studienzeit sowie hinsichtlich der Anfertigung dieser Arbeit gedankt. Sie sorgte in all der Zeit mit ihrer positiven Grundeinstellung stets für ausreichend Motivation.

**Danke!**



## Kurzfassung

Derzeit steigen die Anteile an Laubholz in den Wäldern Österreichs, Deutschlands und der Schweiz an, während die Fichtenbestände rückläufig sind. Aus diesem Grund führt kein Weg an dem zukünftig vermehrten Einsatz von Laubholz im konstruktiven Holzbau vorbei. Durch die hervorragenden Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften der Laubhölzer eröffnen sich neue Einsatzmöglichkeiten und erhebliche Querschnittsminderungen. Um dies auch entsprechend nutzen zu können, sind leistungsfähige Verbindungsmittel notwendig, welche zum Beispiel durch selbstbohrende Holzbauschrauben ausgeführt werden können. Aufgrund der hohen Tragfähigkeit bei axialer Beanspruchung sowie der einfachen und kostengünstigen Montage sind selbstbohrende Holzschrauben aus dem modernen Ingenieurholzbau nicht mehr wegzudenken. Die derzeitigen Bemessungsmodelle von Holzbauschrauben basieren allerdings überwiegend auf Untersuchungen in Nadelholz und sind daher nicht in der Lage die für die Laubhölzer notwendige Leistungsfähigkeit zu erbringen.

Die vorliegende Masterarbeit befasst sich daher mit der versuchsgestützten Bestimmung ausgewählter Kennwerte einer für Hartlaubholzprodukte optimierten Schraube im Vergleich zu einer herkömmlichen Standard-Holzbauschraube. Dabei wird in Eindreh- und Ausziehprüfungen der Einfluss holzanatomischer Gruppen, verschiedener Rohdichtebereiche und Holzarten ermittelt. Als Ergebnis zeigt sich insbesondere bei den Ausziehkenngößen der deutlich größere Einfluss der Rohdichte bei den Laubhölzern im Vergleich zu den Nadelhölzern. Weiters werden für die Holzart Buche und die Pollmeier BauBuche die Einflüsse des Achs-Faserwinkels auf die Kenngrößen der Eindreh- und Ausziehprüfungen dargestellt. Es zeigt sich bis zu einem Achs-Faserwinkel von  $30^\circ$  kein signifikanter Abfall der Ausziehfestigkeiten. Neben dem Einfluss eines möglichen Vorbohrdurchmessers werden auch die auftretenden Spaltkräfte im Holz infolge des Appliziervorganges, der Ausziehprüfung, sowie deren zeitliches Abklingverhalten ermittelt. Die Ergebnisse zeigen für die auftretende Spaltkraft im Prüfkörper, dass sowohl während des Eindrehvorganges als auch infolge der Ausziehprüfung der Maximalwert auftreten kann. Dieser kann in Abhängigkeit von der Prüfkonfiguration und vom zeitlichen Verlauf der Prüfungen unterschiedlich hoch ausfallen.

Insgesamt wurden 1.944 Prüfungen durchgeführt um die genannten Einflüsse zu ermitteln. Neben vergleichenden Betrachtungen mit bekannten Publikationen werden auch Empfehlungen zum Umgang mit den untersuchten Parametern gegeben. Die Arbeit stellt somit einen wesentlichen Beitrag für die Entwicklung eines Bemessungsmodells, für in Laubholz applizierte Schrauben, dar.

## Abstract

The proportion of hardwood is actually rising in Austrians, Germans and Swiss forests, while the amount of Norway spruce is falling. That's why in the future the amount of hardwood applications in timber constructions has to increase. The excellent high mechanical properties of hardwood enable new applications in conjunction with a significant cross section reduction. For utilizing these benefits it is necessary to use an efficient connection technology, for example self-tapping timber screws. Due to their high load-carrying capacity if axially loaded, as well as the easy and reasonable assembly, self-tapping screws have a fixed place in contemporary timber engineering constructions. However, current design models for self-tapping screws base primary on investigations in softwood. Thus, it is not possible to utilize their efficiency also in hardwood.

This master thesis aims on determining basic insertion and withdrawal properties for a self-tapping screw optimised for hardwood applications in benchmark with a reference screw for softwood applications. The influences of the anatomical group of wood, the density and the wood species are examined by means of screwing-in and withdrawal tests. In comparison to softwood, in hardwood a higher influence of density on the withdrawal properties is observed. Furthermore, the influence of the thread-grain angle on the same properties is shown for beech and the "Pollmeier BauBuche". For thread-grain angles from 90° down to 30° no significant reduction of the withdrawal strength is observed. Besides the influence of pre-drilling, the forces transverse the insertion direction, induced by screwing-in and withdrawal, were examined during screwing-in and withdrawal as well as over more than 24 h after screwing-in. The results indicate a maximum of transverse forces either during screwing-in or during withdrawal exposure; the outcome depends on the test configuration and the time-span between screwing-in and withdrawal.

Altogether 1,944 tests were carried out to investigate the mentioned influences. Apart from comparisons of the outcomes with well-known international literature, models are provided and recommendations are made for a quantitative treatment of examined parameters. The work therefore represents an essential contribution to the development of models for screws applied in hardwood.

# Inhaltsverzeichnis

<b>KAPITEL 1: EINLEITUNG</b> .....	<b>1</b>
1-1 MOTIVATION.....	1
1-2 ZIELSETZUNG .....	3
1-3 GLIEDERUNG DER ARBEIT .....	5
<b>KAPITEL 2: LITERATURERCHE</b> .....	<b>6</b>
2-1 HOLZ .....	6
2-1.1 Anatomische Strukturebenen.....	8
2-1.2 Holzanatomie & mechanische Eigenschaften .....	20
2-2 SCHRAUBE.....	23
2-3 EINDREHMOMENT .....	27
2-4 AUSZIEHWIDERSTAND.....	30
2-4.1 Versagensmechanismus.....	32
2-4.2 Modelle Ausziehverhalten.....	34
2-4.3 Einflüsse auf die Ausziehkenngößen .....	37
2-5 SPALTKRÄFTE .....	52
2-5.2 Spaltkräfte durch Eindrehvorgang.....	55
2-5.3 Spaltkräfte durch Ausziehvorgang .....	62
<b>KAPITEL 3: MATERIAL &amp; METHODEN</b> .....	<b>65</b>
3-1 PRÜFPLANUNG .....	65
3-2 MATERIAL .....	68
3-2.1 Schraube .....	68
3-2.2 Holz .....	69
3-3 METHODEN.....	77
3-3.1 Prüfverfahren.....	77
3-3.2 Auswertemethodik.....	84
<b>KAPITEL 4: PRÜFAUSWERTUNG &amp; INTERPRETATION</b> .....	<b>92</b>
4-1 PRÜFBEOBACHTUNGEN.....	92
4-1.1 Serie 1: Variation der Holzarten, holzanatomischen Gruppen & Rohdichte.....	92
4-1.2 Serie 2: Variation des Einschraubwinkels .....	93
4-1.3 Serie 3: Variation des Vorbohrdurchmessers .....	94
4-1.4 Serie 4: Bestimmung von Spaltkräften.....	95
4-2 SERIE 1: VARIATION DER HOLZARTEN, HOLZA. GRUPPEN & ROHDICHTE ...	98
4-2.1 Materialkennwerte .....	98
4-2.2 Auswertung Eindrehprüfungen.....	103
4-2.3 Auswertung Ausziehprüfungen .....	108

4-2.4	Zusammenhang Eindrehmoment und Ausziehfestigkeit .....	120
4-2.5	Korrelation der Modellparameter .....	124
4-2.6	Vergleich der Modellparameter bzw. Arbeitslinien.....	131
4-3	<b>SERIE 2: VARIATION DES EINSCHRAUBWINKELS .....</b>	<b>135</b>
4-3.1	Materialkennwerte .....	135
4-3.2	Auswertung Eindrehprüfungen.....	138
4-3.3	Auswertung Ausziehprüfungen .....	141
4-3.4	Zusammenhang Eindrehmoment und Ausziehfestigkeit .....	151
4-4	<b>SERIE 3: VARIATION DES VORBOHRDURCHMESSERS .....</b>	<b>152</b>
4-4.1	Materialkennwerte .....	152
4-4.2	Auswertung Eindrehprüfungen.....	156
4-4.3	Auswertung Ausziehprüfungen .....	159
4-5	<b>SERIE 4: BESTIMMUNG DER SPALTKRÄFTE.....</b>	<b>168</b>
4-5.1	Materialkennwerte .....	169
4-5.2	Auswertung Eindrehprüfungen.....	173
4-5.3	Auswertung Ausziehprüfungen .....	175
4-5.4	Spaltkräfte.....	180
4-5.5	Diskussion zu den Spaltkräften.....	201
	<b>KAPITEL 5: ZUSAMMENFASSUNG, CONCLUSIO &amp; AUSBLICK .....</b>	<b>206</b>
5-1	ZUSAMMENFASSUNG .....	206
5-2	CONCLUSIO.....	214
5-3	AUSBLICK .....	217
	<b>ANHANG A VERZEICHNISSE.....</b>	<b>I</b>
A-1	Literaturverzeichnis .....	I
A-2	Abkürzungsverzeichnis.....	VII
	<b>ANHANG B HOLZARTENBESCHREIBUNG.....</b>	<b>VIII</b>
B-1	Vorkommen, Merkmale und Verwendung .....	VIII
B-2	Mechanische Kenngrößen.....	XI
	<b>ANHANG C PRÜFAUSWERTUNG.....</b>	<b>XIII</b>
C-1	Ausgeschlossene Prüfdaten.....	XIII
C-2	Unerwartete Versagensfälle.....	XVI
C-3	Potenzfaktoren für die Holzarten .....	XVII
C-4	Korrelationsmatrizen der Holzarten.....	XVIII
C-5	Abklingen der Spaltkräfte.....	XXX



# KAPITEL 1: EINLEITUNG

## 1-1 MOTIVATION

---

Von den über 30.000 weltweit bekannten Holzarten und bis zu 5.000 für die gewerbliche Nutzung geeigneten Hölzern werden rund 600 auch tatsächlich gehandelt (Wagenführ, 2007). Den in etwa 600 Nadelholzarten stehen dabei 40- bis 50-mal so viele Laubholzarten gegenüber. Die Laubhölzer zeichnen sich dabei vor allem durch eine hohe Mannigfaltigkeit und damit verbunden mit sehr breit gefächerten Eigenschaften aus (Hübner, 2013a).

Wie aus der letzten Waldinventur 2007/09 hervorgeht, werden 24 % der 3.367.000 ha großen Ertragswaldfläche in Österreich von Laubhölzern eingenommen. Dabei sind die Rotbuche, mit einem Flächenanteil von etwa 10 %, und die Eiche (nur knapp über 2 %) die am häufigsten vertretenen Laubholzarten (BFW, 2011). Auch bei den Österreichischen Bundesforsten bilden 23 % der 511.000 ha großen Gesamtwaldfläche Laubholzbestände. Davon decken die drei Holzarten Buche (78 %), Esche (6 %) und Eiche (5 %) den Großteil dieser Laubholzflächen ab (Holzforschung Austria, 2014). Durch die waldbauliche Situation und der damit verbundenen, weiteren Zunahme des Laubholzanteiles aufgrund des Klimawandels, wird eine vermehrte Verwendung der Laubhölzer notwendig sein. Denn vom jährlich zuwachsenden Laubholzvorrat werden in Österreich, der Schweiz, in Deutschland und auch in Frankreich derzeit lt. Hübner (2013a) nur zwei Drittel genutzt. Da Verwendungsmöglichkeiten für mittlere Laubholzqualitäten bisher weder im Baubereich noch in anderen Branchen gegeben waren, wurden bis zu 70 % des Laubrohholzes ausschließlich energetisch verwertet, vgl. Hübner (2013a).

Die vielfältigen optischen Erscheinungsformen in Verbindung mit der edlen Ästhetik, welche durch die hervorragenden mechanischen Eigenschaften (vor allem Steifigkeiten als auch Festigkeiten parallel zur Faser) ermöglicht wird, sprechen für den vermehrten zukünftigen Einsatz von einheimischen Laubhölzern für lastabtragende Bauteile im Bauwesen, vgl. Hübner (2013a). So ist durch die Entwicklung von neuen Bauprodukten in den letzten Jahren, welche die hervorragenden mechanischen Kenngrößen der Laubhölzer zu deren Vorteil nutzen, der Anteil der energetischen Verwertung rückläufig. Gehri (2010) nennt als Gründe für den erhöhten zukünftigen Laubholzeinsatz die weitere Ressourcenerhöhung durch stetige Umschichtung zu mehr Laubholzwäldern und die guten bautechnischen Eigenschaften der Laubhölzer, welche Holzwerkstoffe mit ausgezeichneter Leistungsfähigkeit ermöglichen. Allerdings wird auch erwähnt, dass es noch Schwierigkeiten durch ungenügende Erfahrungen und fehlende, den Anforderungen entsprechende, Verbindungsmitteltechnologie gibt.

Insbesondere in Mitteleuropa wurden aufgrund der historischen Entwicklung im Holzbau bisher fast ausschließlich Bauprodukte aus Nadelholz (dabei vor allem aus Fichte) eingesetzt (Gehri, 2010). Dementsprechend sind bestehende Prüf- und Produktnormen sowie die gesamte holzverarbeitende Industrie auf die Verwendung von Nadelholz abgestimmt und optimiert (Enders-Comberg, 2015). Aufgrund der höheren Steifigkeiten und Festigkeiten im Vergleich zu Nadelhölzern, sind bei Bauprodukten aus Laubholz beachtliche Querschnittsreduktionen umsetzbar (Ringhofer, 2017). Um die besondere Leistungsfähigkeit auch im Anschlussbereich gewährleisten zu können, reichen allerdings die bisher bei Nadelhölzern standardmäßig eingesetzten Verbindungsmittel nicht mehr aus.

Mit Fokus auf axial beanspruchte Verbindungsmittel und im Hinblick auf die allgemeinen hohen Anforderungen bezüglich der Tragfähigkeit kommen daher nur mehr wenige Verbindungsmöglichkeiten in Frage. So können neben eingeklebten Gewindestangen und Lochblechen vor allem Schraubenverbindungen mehr als nur eine Alternative darstellen (Blaß et al., 2006). Während bei eingeklebten Verbindungsmitteln ein beträchtlicher Fertigungsaufwand und somit eine erhöhte Fehleranfälligkeit sowie (teilweise)

eine größere Querschnittsschwächung gegeben sind, zeichnen sich Holzbauschrauben (kurz: Schrauben) genau durch die gegenteiligen Eigenschaften aus (Meyer, 2016). Als Hauptgrund für ihren weit verbreiteten Einsatz sind die einfache und wirtschaftliche Montage (oftmals ohne Vorbohren) sowie eine ganze Reihe unterschiedlichster Anwendungsgebiete zu nennen. Aus diesen Gründen konnten sich selbstbohrende Holzbauschrauben in den letzten 25 Jahren die Stellung, als wahrscheinlich wichtigstes Verbindungsmittel im modernen Ingenieurholzbau, sichern (Ringhofer, 2017).

Die derzeitigen Bemessungsmodelle für die axiale Tragfähigkeit von Holzbauschrauben basieren fast ausschließlich auf Untersuchungen in Nadelholz. Deshalb dürfen die für Nadelhölzer und Nadelholzprodukte optimierten Holzbauschrauben nur mit wenigen Ausnahmen – und hier sehr konservativ und basierend auf den vorliegenden einschlägigen Erkenntnissen im Nadelholz – auch in Laubholzprodukten eingesetzt werden. So zeigt Pöll (2017) in einer Recherche unter 34 Europäischen Technischen Bewertungen (European Technical Assessment; ETA), dass lediglich in vier Dokumenten eine Anwendung der Holzbauschraube (meist nur in wenigen und bestimmten Laubhölzern) zulässig ist. Zusätzlich wird dabei in drei der vier ETAs die maximal zulässige Rohdichte auf  $590 \text{ kg/m}^3$  begrenzt, was eine Verwendung in hochleistungsfähigen Hartlaubholzprodukten ausschließt. Für die Berechnung der Tragfähigkeiten von Holzbauschrauben in Laubholz wird dabei lt. Pöll (2017) in allen vier Bewertungen das Modell für Nadelholz verwendet und nur der Rohdichtebereich erweitert. Dem gegenüberzustellen sind Forschungsarbeiten von Newlin und Gahagan (1938), Eckelman (1975) und insbesondere von Hübner (2013a) welche zeigen, dass das Ausziehverhalten bzw. die Einflüsse darauf in Laubhölzern grundsätzlich von jenem in Nadelhölzern zu unterscheiden sind. Neben der fehlenden Kenntnis zum Tragverhalten von Holzbauschrauben in Laubhölzern sorgen somit auch die normativen Regelungen dafür, dass Holzbauschrauben nur unter Einschränkung von deren eigentlicher Leistungsfähigkeit in Laubhölzern eingesetzt werden können.

Durch die vergleichsweise hohe Tragfähigkeit auf Herausziehen, welche im Normalfall die maßgebende holztechnologische Kenngröße derartiger Verbindungsmittel darstellt (Schickhofer et al., 2007), ist bereits bei geringen Einschraubtiefen in Laubhölzern ein hohes Kraftniveau bei axialer Beanspruchung zu erreichen (Meyer, 2016); d. h., dass bereits bei geringen Einschraubtiefen die Tragfähigkeit der Schraube durch die Stahlzugtragfähigkeit dieser und nicht durch die Ausziehtragfähigkeit aus dem Holz limitiert ist. Zudem ist festzuhalten, dass gegenwärtige Applikationen, aufgrund des gegenüber Nadelhölzern höheren Eindrehwiderstandes, nur in Verbindung mit Vorbohren zulässig sind. Es sollte daher das primäre Ziel sein, die noch nicht umsetzbare Applizierung von Holzbauschrauben ohne Vorbohrung zu realisieren (Meyer, 2016) und die Stahlzugtragfähigkeit der Schraube zu erhöhen. Aus den angeführten Gründen ist es daher naheliegend, dass sowohl die Holzbauschraube in deren Geometrie, wie von Pöll (2017) durchgeführt, sowie die dazugehörigen Bemessungsmodelle für die Anwendung in Laubholzprodukten einer (Weiter-) Entwicklung bedürfen. Nur somit könnte in Zukunft die höhere Leistungsfähigkeit der Holzbauschrauben in Laubhölzern auch entsprechend genützt werden. Bevor allerdings ein umfassendes und ganzheitliches Bemessungsmodell für Holzbauschrauben in Laubholz festgelegt werden kann, müssen grundsätzliche Fragestellungen dazu beantwortet werden, welche im nachfolgenden Abschnitt erläutert werden.

## 1-2 ZIELSETZUNG

---

Wie bereits eingangs erwähnt, ist das Ziel der Arbeit der Gewinn von Erkenntnissen, um den Einsatz von Holzbauschrauben auch in Laubhölzern und Laubholzprodukten mit den damit verbundenen, höheren Leistungsfähigkeiten zu ermöglichen. Die Bereitstellung der an Leistungsfähigkeit mit dem Holzbauprodukt mithaltenden Verbindungstechnik soll einen Beitrag zur weiteren Verbreitung der Anwendung von Laubholzprodukten leisten. Im Rahmen dieser Arbeit soll daher einigen konkreten Fragestellungen nachgegangen werden.

### **Holzarten, holzanatomische Gruppen, Rohdichte & Winkelvariation**

In Ringhofer (2017) wird das Ausziehverhalten von Verschraubungen in Faserrichtung mit einem Überschreiten der lokalen Schubfestigkeit in Längsrichtung entlang des Schraubengewindes beschrieben. Die Ausziehcharakteristik quer zur Faserrichtung hingegen stellt eine komplexe Interaktion dar. Je nach betrachteter Schnittebene hängt diese von den Schub-, Rollschub-, Querzug- und Querdruckeigenschaften ab.

Um dieses Verhalten zu beschreiben und dem Anwender eine Berechnungsmöglichkeit zur Dimensionierung eines derartigen Verbindungsmittels zu geben, wird bisher in den meisten Fällen auf Modelle beruhend auf Regressionsanalysen zurückgegriffen; diese Daten stammen dabei von Prüfungen u. a. der Ausziehfestigkeit. Erwähnt seien an dieser Stelle die Modelle von Bejtka (2005), Blaß et al. (2006), Pirnbacher et al. (2009), Frese et al. (2010) und Ringhofer (2017). Sie alle bestimmen die Ausziehfestigkeit für Nadelhölzer mit verschiedenen starken Einflüssen und Abhängigkeiten unter anderem von der Rohdichte, vom Gewindeaußendurchmesser (in weiterer Folge auch als Schraubendurchmesser bezeichnet), von der Verankerungslänge und vom Einschraubwinkel.

Bei Laubhölzern reicht der Rohdichtebereich vor allem nach oben hin weit über die Grenzen der bekannten Nadelholzmodelle hinaus, während es im unteren Rohdichtebereich zu Überschneidungen mit den Nadelhölzern kommt. Zusätzlich ist bei den Laubhölzern in Hinblick auf ihren im Vergleich zu Nadelhölzern differenten holzanatomischen Aufbau, ein dahingehender Einfluss auf das Ausziehverhalten noch nicht gänzlich geklärt. Zudem sind die Laubhölzer untereinander in ringporige, halbringporige und zerstreutporige Hölzer zu unterscheiden (Schickhofer, 2007). Wie Hübner (2013a) bereits für drei verschiedene Laubhölzer (Buche, Esche und Robinie) gezeigt hat, sind gänzlich andere Potenzfaktoren für den Einfluss der Rohdichte im Vergleich zu Nadelholzmodellen zu erwarten.

Aus Versuchsreihen von Eckelman (1975) geht zusätzlich hervor, dass für Laubhölzer die Schubfestigkeit eine bessere Korrelation mit der Ausziehfestigkeit aufweist als die Rohdichte. In überprüfenden Untersuchungen von Taj et al. (2009) wurden trotz nahezu gleicher Rohdichten bei Buche und Hainbuche für die Hainbuche, welche um rund 30 % geringere Schubfestigkeitswerte aufwies, eine höhere Ausziehfestigkeit erzielt. Die unerwarteten Ergebnisse werden in diesem Zusammenhang dabei auf die komplexeren Strukturen sowie die anatomischen Unterschiede in den beiden Laubholzarten zurückgeführt.

Aufgrund der im folgenden untersuchten Abhängigkeiten der Ausziehfestigkeiten von unterschiedlichen Holzarten mit verschiedenen Rohdichtebereichen sowie dem Einfluss des Einschraubwinkels, soll festgestellt werden, ob die anatomischen Unterschiede der Laubhölzer über die Rohdichte entsprechend und ausreichend abgebildet werden können oder ob die von Hübner (2013a) beobachteten Potenzfaktoren nur aufgrund der erhöhten Rohdichten seiner Prüfserien zustande gekommen sind. Außerdem soll auf Basis der ermittelten Ausziehfestigkeiten der Einfluss des Einschraubwinkels bei Laubhölzern untersucht werden.

## Vorbohrdurchmesser

Aufgrund der Festlegungen in der ÖNORM EN 14592 (2012) bzw. im EAD 130118-00-0603 (2016), welche ein Verhältnis der charakteristischen Torsionsfestigkeit der Schraube zum maximalen Torsionswiderstand beim Eindrehen (Eindrehmoment) von 1,5 fordern, kommt es für aktuelle Schraubenzulassungen zu einer Begrenzung des Einsatzbereiches. Da die Torsionseindrehwiderstände beim Eindrehen mit zunehmender Rohdichte größer werden (Meyer, 2016), sind in den Europäischen Technischen Bewertungen, welche für Laubhölzer zugelassen sind, Beschränkungen auf eine maximale Rohdichte von  $590 \text{ kg/m}^3$  ohne Vorbohren vorgesehen. Deshalb ist für Holzbauschrauben in Laubhölzern in ÖNORM EN 1995-1-1 (2015) zwingend das Vorbohren vorgeschrieben. Dadurch soll das maximale Eindrehmoment soweit reduziert werden, dass das vorgegebene Verhältnis zur charakteristischen Torsionsfestigkeit eingehalten werden kann (Meyer, 2016).

Während in früheren Untersuchungen noch von der generellen Erfordernis einer Vorbohrung für sämtliche Schrauben in allen Hölzern ausgegangen wurde, verlagerte sich der Schwerpunkt der Untersuchungen in der jüngeren Vergangenheit in Richtung der Fragestellung: Mit welchem Vorbohrdurchmesser kann vorgebohrt werden ohne an Tragfähigkeit zu verlieren? Dabei wurden vor allem größere Durchmesserbereiche, welche als Querzugverstärkungen in Frage kommen, betrachtet. Wie Nakatani und Komatsu (2005) in Untersuchungen in Douglasien-Brettschichtholz festgestellt haben, ist der Abfall der Tragfähigkeiten auch bei der Wahl des Vorbohrdurchmessers, welcher größer als der Kerndurchmesser ist, nur sehr gering. Es wird daher aufgrund des deutlich sinkenden Einschraubmomentes die Wahl eines eher größeren Vorbohrdurchmessers empfohlen. Auch von Ringhofer (2017) wurde kein wesentlicher Abfall der Ausziehtragfähigkeit in Fichte bis zu einem Vorbohrdurchmesser, welcher dem 1,1-fachen des Kerndurchmessers von Holzbauschrauben entspricht, festgestellt.

In dieser Arbeit soll, in Anlehnung an die oben angeführten Beobachtungen, dies für Buche und Pollmeier BauBuche bei Achs-Faserwinkeln von  $0^\circ$  und  $90^\circ$  für zwei verschiedene Schraubentypen verifiziert werden. Neben dem maximalen Vorbohrdurchmesser ohne signifikanten Abfall der Tragfähigkeit soll auch die damit verbundene Reduktion des Torsionswiderstandes beim Eindrehen ermittelt werden.

## Messung von Spaltkräften

Wie aus der Arbeit von Blaß und Uibel (2009) hervorgeht, entstehen beim Applizieren von Schrauben, insbesondere ohne Vorbohren, quer zur Einschraubrichtung Kräfte infolge des zu verdrängenden Holzvolumens. Es wurde dazu eine Prüfmethode entwickelt, die es erlaubt die Spaltkräfte qualitativ und quantitativ zu erfassen. Die Versuchsergebnisse bilden dabei die Grundlage für die Bewertung von verbindungsmitteleinspezifischen Einflüssen der Schrauben auf die Spaltkräfte, welche in weiterer Folge für die Bestimmung der erforderlichen Mindestabstände herangezogen werden können. Die unterschiedlichen Einflussfaktoren auf die auftretenden Spaltkräfte wurden von Blaß und Uibel (2009) und Uibel (2012) für Fichte und Tanne bereits ausführlich untersucht.

Die Mehrzahl der älteren Erkenntnisse zum Spaltverhalten von Holz beschränkt sich auf das Einschlagen von Nägeln. Dabei wird davon ausgegangen, dass ein Aufspalten des Holzes nur während des Einbringens des Verbindungsmittels möglich ist, was durch Schmid (2002) auch so bestätigt wird. Wie aus der Arbeit von Blaß et al. (2006) hervorgeht, kann bei selbstbohrenden Schrauben allerdings auch erst die Belastung des Verbindungsmittels zum Aufspalten und somit zum Versagen führen.

Folglich werden in dieser Arbeit die Spaltkräfte für Buche und Pollmeier BauBuche mit den Ergebnissen von Uibel (2012) (für Fichte) verglichen. Es wird untersucht, ob die erwartete Erhöhung der Spaltkräfte durch die höheren Rohdichten der Laubhölzer im Vergleich zur Fichte gegeben ist und in welcher Größenordnung die Spaltkräfte auftreten. Außerdem werden der zeitliche Verlauf sowie der jeweilige Kraftanstieg der Spaltkräfte infolge des Eindreh- sowie anschließenden Ausziehvorganges dargestellt. Ergänzende Langzeitmessungen zum Abklingverhalten (Kriechen bzw. Relaxation) der Spaltkräfte sollen Aufschluss darüber geben, ob bzw. ab wann eine Schraube ohne weitere Spaltgefahr der berechneten Maximallast ausgesetzt werden kann.

### **Überblick der Fragestellungen, welche im Rahmen dieser Arbeit bearbeitet werden:**

- Einfluss der holzanatomischen Gruppen auf das Eindrehmoment, die Ausziehfestigkeit, die Verbindungsmittelsteifigkeit sowie das Ausziehverhalten für verschiedene Rohdichtebereiche und Holzarten
- Abhängigkeit der oben genannten Kenngrößen vom Achs-Faserwinkel für verschiedene Holzwerkstoffe
- Einfluss des Vorbohrdurchmessers auf das Eindrehmoment, die Ausziehfestigkeit, Steifigkeit für Buche und Pollmeier BauBuche bei Einschraubwinkeln von 0° und 90° zur Faser
- Spaltkräfte infolge des Applizierens und während der Ausziehprüfung sowie deren zeitliches Abklingverhalten bei Buche und Pollmeier BauBuche für 0° und 90° zur Faser

## **1-3 GLIEDERUNG DER ARBEIT**

---

Die Arbeit gliedert sich in die folgenden Hauptkapitel:

### **Kapitel 1: Einleitung**

Die Einleitung enthält eine kurze Einführung in die Thematik und die Zieldefinition der Arbeit.

### **Kapitel 2: Literaturrecherche**

Das zweite Kapitel beschäftigt sich mit dem aktuellen Stand des Wissens der für die vorliegende Arbeit relevantesten Themenbereiche. Es werden neben den bereits bekannten Erkenntnissen zu Holzbauschrauben in Laubhölzern in Hinblick auf Eindrehen, Herausziehen und dem Auftreten der Spaltkräfte auch Parallelen zu Forschungsprojekten für Nadelhölzer gezogen. Außerdem wird auf den unterschiedlichen Aufbau von Nadel- und Laubhölzern eingegangen. Der Inhalt dieses Kapitels dient der Vertiefung des Themengebietes und als Grundlage für die weiteren Untersuchungen.

### **Kapitel 3: Material & Methoden**

Das dritte Kapitel stellt mit der Beschreibung der für die Laboruntersuchungen verwendeten Materialien und Methoden einen Hauptblock dar. Es werden darin zum einen die im Rahmen der vorliegenden Masterarbeit durchgeführten Eindreh-, Auszieh-, und Spaltkraftprüfungen erläutert und zum anderen auch die verwendeten Materialien (Holz & Schraube) beschrieben. Außerdem sind in dem Kapitel die Prüfplanung sowie Hinweise zur Auswertemethodik und Generierung der Prüfdaten zu finden.

### **Kapitel 4: Prüfauswertung & Interpretation**

In Kapitel vier sind die Ergebnisse der einzelnen Prüfserien tabellarisch und graphisch dargestellt. Hinzu kommen ergänzende Erklärungen und Ausführungen zu den Prüfergebnissen. Eine Interpretation und Diskussion der Ergebnisse mit bekannten und/oder erwarteten Ergebnissen wird in diesem Kapitel ebenso vorgenommen. Es werden die in der Zielsetzung definierten Einflussparameter anhand statistischer Methoden analysiert und beschrieben.

### **Kapitel 5: Zusammenfassung, Conclusio & Ausblick**

Im letzten Kapitel folgt eine abschließende Betrachtung und Zusammenfassung der Ergebnisse, wobei neben den gewonnenen Erkenntnissen auch ein Ausblick auf zukünftige Forschungsaufgaben im Bereich der Holzbauschrauben für den Einsatz in Laubholz gegeben wird.



## KAPITEL 2: LITERATURRECHERCHE

In diesem Kapitel werden die Grundlagen erläutert und diskutiert, welche in weiterer Folge für die Planung und Durchführung der Prüfungen sowie für die Interpretation der Ergebnisse von Bedeutung sind.

Zuerst wird die Anatomie des Roh- und Werkstoffes Holz kurz dargelegt, welche dessen anisotrope Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften begründet. Außerdem wird auf den unterschiedlichen Aufbau der Nadel- und Laubhölzer eingegangen, sowie die Auswirkung davon auf ausgewählte physikalische und mechanische Eigenschaften erläutert.

Im zweiten Unterpunkt wird auf die Holzbauschraube selbst sowie auf ihre Geometrie und Herstellung eingegangen. Es folgen sowohl aktuelle als auch ältere Erkenntnisse zum Appliziervorgang (Eindrehen) und dem Auszieh Widerstand von Holzbauschrauben. Den Abschluss dieses Kapitels bildet die Zusammenfassung der Erkenntnisse bezüglich der Spaltkräfte im Holz durch den Eindreh- bzw. Ausziehvorgang.

Zu Beginn sei an dieser Stelle erwähnt, dass es sich bei den folgenden Betrachtungen der einzelnen Komponenten bzw. Mechanismen um keine abgegrenzten Themen handelt. Vielmehr kommt es bei der Verbindung von Holz und Schraube zu einem Verbund der beiden Komponenten. Aus diesem Grund ist in weiterer Folge für den Eindreh- und Ausziehvorgang von einer Verbundtragwirkung der daraus entstehenden Verbindung auszugehen (Ringhofer, 2017).

### 2-1 HOLZ

---

Die mechanischen Eigenschaften von Holz sind mit dessen Aufbau eng verknüpft. Neben der mechanischen Funktion, der Festigung, müssen auch die physiologischen Funktionen wie Wasser- und Nährstofftransport sowie die Nährstoffspeicherung erfüllt sein. Während der grundsätzliche Aufbau von Holz immer sehr ähnlich ist, können die Anteile und Ausprägungen der Komponenten in unterschiedlicher Häufigkeit vorliegen. Dadurch war es den Bäumen in der Vergangenheit immer möglich, deren Eigenschaften gut an die an sie gestellten Anforderungen anzupassen (Schickhofer, 2007).

Unter Holz versteht man das sekundäre Dauergewebe von Stämmen, Ästen und Wurzeln der Bäume und Sträucher. Das Kambium, eine makroskopisch nicht sichtbare Wachstumsschicht (Meristem) unter der Rinde, scheidet nach innen Holzzellen (Xylem) und nach außen Rindenzellen (Phloem) ab. Dabei fällt der Rindenzuwachs gegenüber dem Holzzuwachs viel geringer aus (Grosser, 1977).

#### **Hartlaubholz**

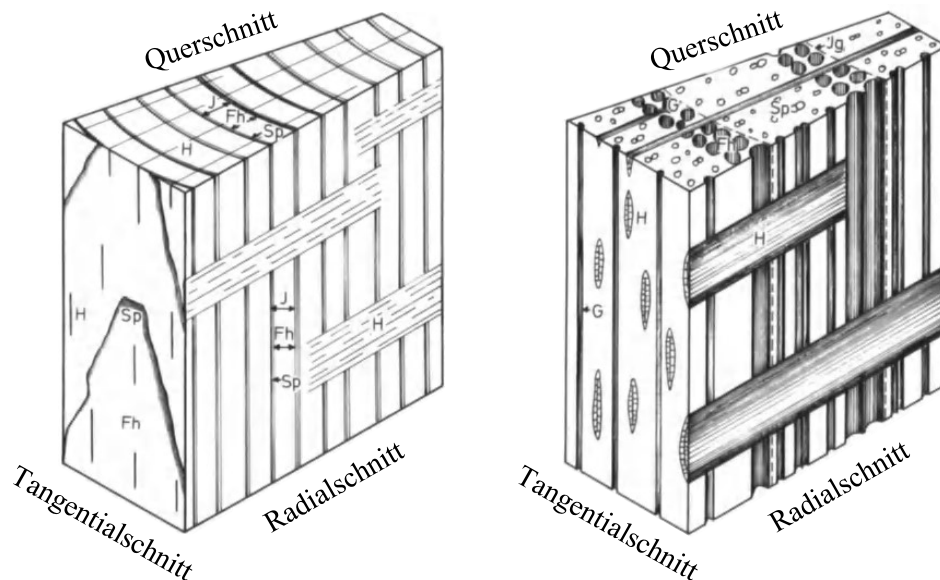
Grundsätzlich kann eine Unterscheidung in Weich- und Hartholz vorgenommen werden. Die Grenze zwischen diesen beiden Zuordnungsklassen liegt bei einer Darrdichte von  $550 \text{ kg/m}^3$  (Mombächer, 1988). Bis auf wenige Ausnahmen sind die heimischen Nadelhölzer dem Weichholz zuzuschreiben. Bei den Laubhölzern gibt es mit der Pappel, Erle, Weide, Linde, usw. einige Holzarten, welche eine Darrdichte von weniger als  $550 \text{ kg/m}^3$  aufweisen und daher den Weichhölzern zuzuordnen sind. Bei der Verwendung des Begriffes Hartlaubholz, welcher grundsätzlich auf die überwiegende Anzahl der einheimischen Laubhölzer zutrifft, wird in weiterer Folge von Laubholz mit einer Darrdichte von über  $550 \text{ kg/m}^3$  ausgegangen.

## Hauptschnittrichtungen

Wie in Abbildung 1 ersichtlich ist, gibt es drei für die Holzanatomie übliche Schnittrichtungen:

- Querschnitt
- Tangentialschnitt
- Radialschnitt

Aus diesen drei Schnitten ist es möglich ein räumliches Bild vom Aufbau des Holzes zu erlangen und somit jedes Holz eindeutig zu charakterisieren (Grosser, 1977).



J ... Jahrring    Jg ... Jahrringgrenze    Fh ... Frühholz    Sp ... Spätholz    H ... Holzstrahl    G ... Gefäß

**Abbildung 1:** *Hauptschnittrichtungen mit makroanatomischen Erkennungsmerkmalen für Nadelholz (links) und ringporiges Laubholz (rechts) (Grosser, 1977)*

Der Querschnitt vermittelt den umfassendsten Einblick in den anatomischen Bau einer Holzart. Aus diesem Grund wird er im Zuge der makroskopischen Holzbestimmung meist als Erstes geprüft. Er wird senkrecht zur Stammachse und in Richtung der Holzstrahlen geführt, wodurch alle axial verlaufenden Zellen freigelegt werden.

Mit dem Tangentialschnitt, welcher längs der Stammachse führt und der den gewöhnlichen Bretterschnitt darstellt, werden die Holzstrahlen im rechten Winkel durchtrennt. Dadurch ergibt sich eine gefladerte Struktur in welcher sich die Abmessungen der Holzstrahlen besonders gut ermitteln lassen.

Im Radialschnitt sind die sich kreuzenden Zellsysteme des Holzes gut zu erkennen. Der Schnitt führt dabei parallel zur Stammachse und in Richtung der Holzstrahlen. Die Holzstrahlen werden dabei längs durchtrennt und erscheinen somit als Bänder.

## Strukturebenen

Die Eigenschaften des Holzes sind vor allem vom Aufbau der mikroskopischen und makroskopischen Ebene abhängig. Diese beiden Ebenen bestehen aus den chemischen Grundbausteinen des Holzes. Insgesamt kann in fünf Strukturebenen, welche in Abbildung 2 gezeigt sind, unterschieden werden (Schickhofer, 2007):

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

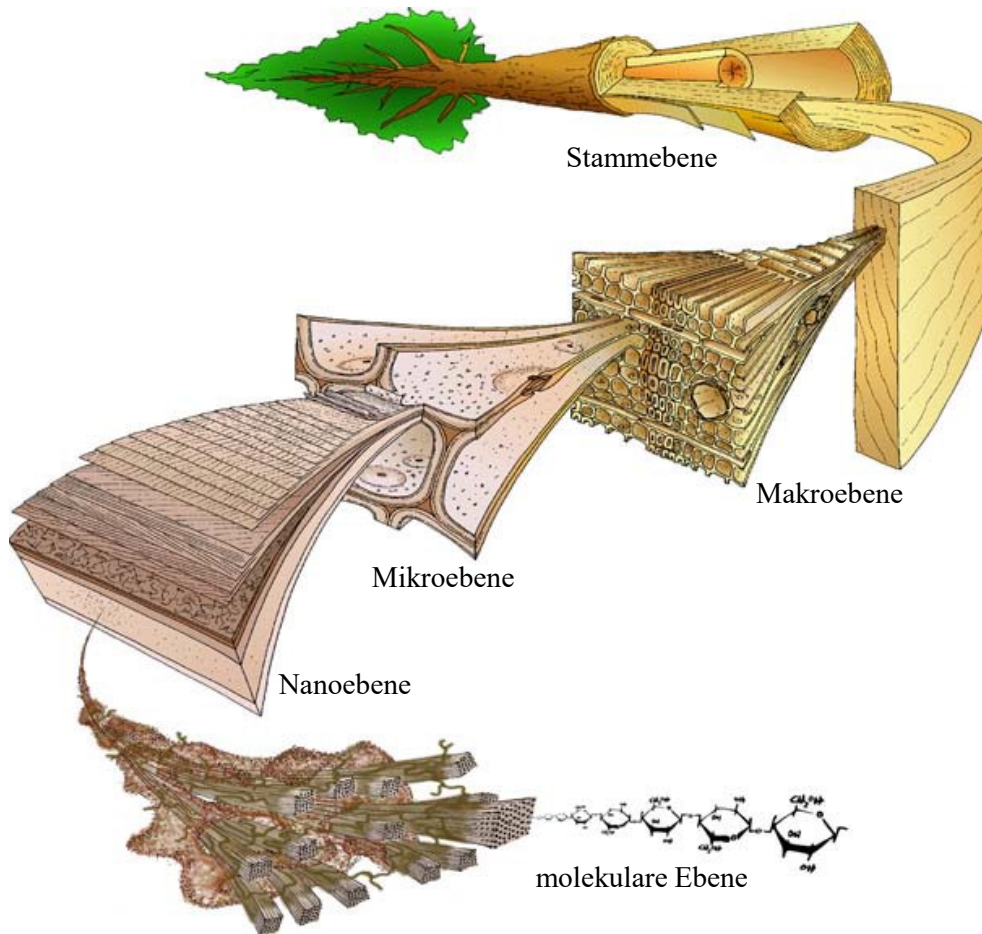


Abbildung 2: Strukturebenen des Holzes (Wimmer, 2002)

## 2-1.1 ANATOMISCHE STRUKTUREBENEN

### Molekulare Ebene

Die genaue Zusammensetzung von Holz ist von der Baumart abhängig und schwankt auch geringfügig innerhalb des Stammes. Im Wesentlichen besteht es, entsprechend Bariska (2002), zu

- 50 % aus Kohlenstoff (C),
- 43 % aus Sauerstoff (O),
- 6 % aus Wasserstoff (H),
- < 1 % aus Stickstoff (N) und
- < 1 % aus Mineralstoffen.

Alle Holzarten besitzen in etwa den gleichen Prozentsatz an chemischen Elementen. Die unterschiedlichen Eigenschaften basieren auf den verschiedenen chemischen und physikalischen Bindungen dieser Elemente. Aus den angeführten Elementen ergeben sich die Hauptbaustoffe des Holzes zu

- Cellulose,
- Hemicellulose (Polyose),
- Lignin,
- Pektine und akzessorische Bestandteile.

Als Holz im eigentlichen Sinn bezeichnet man den Verbundwerkstoff aus den vorwiegend vorkommenden, makromolekularen, Zellwandkomponenten Cellulose, Hemicellulosen (Polyosen) und Lignin (auch bekannt als Kittsubstanz), die Pektine, und den anteilmäßig weniger vorkommenden, niedermolekularen



akzessorischen Bestandteilen. Die Tabelle 1 zeigt eine Übersicht der chemischen Bestandteile des Holzes sowie deren Hauptfunktionen.

**Tabelle 1: Übersicht über die chemischen Holzbestandteile und deren Hauptfunktionen (Schickhofer, 2007)**

	<b>Komponenten und Anteil an der Holzmenge</b>	<b>Hauptfunktion</b>
<b>Hauptbestandteile</b>	<b>Cellulose:</b> langkettiges, unverzweigtes Makromolekül 41–51 %	Gerüstsubstanz der Zellwand; Aufnahme der mechanischen Zugkräfte
	<b>Hemicellulose:</b> kurzkettiges, verzweigtes Makromolekül 25–30 % in Nadelholz 27–40 % in Laubholz	Gerüstsubstanz und Vernetzer der Zellwand; Flexibilisator
	<b>Lignin:</b> dreidimensionales, unelast. Makromolekül 28–41 % in Nadelholz 18–25 % in Laubholz	Kittsubstanz im Cellulosegrundgerüst; Einlagerung bei Verholzung der Zellwände; Aufnahme der mechanischen Druckkräfte
	<b>Pektine:</b> dreidimensionales Makromolekül 0,5 % in Nadelholz 1–2 % in Laubholz	Kittsubstanz (hält die Zellen im Gewebeverband zusammen) (fast ausschließlich in der Mittellamelle)
<b>akzessorische Bestandteile</b>	niedermolekular, organisch oder anorganisch 1–10 % in Hölzern der gemäßigten Zone 2–30 % in tropischen Hölzern	Einfluss auf die chemischen, biologischen und physikalischen Holzeigenschaften (Brennbarkeit, Geruch, Dauerhaftigkeit,...)

Wie der Tabelle 1 entnommen werden kann, weisen sowohl Nadel- als auch Laubholzarten den gleichen Anteil an Cellulose auf. Die Anteile an Hemicellulosen, Lignin und Pektinen variieren hingegen zwischen den Nadel- und Laubhölzern. Die ebenfalls mit sehr unterschiedlicher Häufigkeit vorkommenden akzessorischen Bestandteile können vereinfacht in organische (Harze, Fette, Terpene, ...) und anorganische Stoffe (Spurenelemente) unterteilt werden. Trotz deren mengenmäßig geringer Anteile ist der Einfluss auf chemische, biologische und physikalische Eigenschaften des Holzes sehr groß. Auf die mechanischen Eigenschaften des Holzes haben sie allerdings keinen bzw. nur einen geringen direkten Einfluss (Schickhofer, 2007).

Die folgenden Ausführungen zu den einzelnen chemischen Hauptbestandteilen von Holz entstammen (Grosser, 1977), (Bariska, 2002) und (Schickhofer, 2007).

Cellulose, gekennzeichnet durch eine unverzweigte, kettenförmige Molekülstruktur, bildet den charakteristischen Bestandteil von pflanzlichen Zellwänden und sorgt für eine hohe Formstabilität sowie Zug- und Biegefestigkeit. Die Verteilung der Cellulose in der Zellwand zeigt eine hierarchische fibrilläre Struktur, welche mit Pektinen und Hemicellulosen zu einer Matrix verbunden ist (bildet die Gerüstsubstanz der Zellwand). Über Wasserstoffbrückenbindungen verbinden sich ca. 100 Celluloseketten zu Elementarfibrillen, welche wiederum zu zwanzigst eine Mikrofibrille ergeben. Zwischen den Makrofibrillen, bestehend aus 50 bis 100 Mikrofibrillen, bleiben bereits interfibrilläre Räume, welche ausreichen, um Hemicellulosen und Lignin einzulagern.

Hemicellulosen sind kürzere, leicht verzweigte Polysaccharide, die im Wesentlichen aus fünf Zuckerbausteinen aufgebaut sind und sich überwiegend amorph verhalten. Durch die im Vergleich zu Cellulose geringere Anzahl an Wasserstoffbrückenbindungen sind sie weniger starr und leichter deformierbar. Sie sorgen im Verbundstoff aus Hemicellulosen und Cellulose für Flexibilität, stützen im Zellwandgerüst und sorgen für eine Verkittung der Zellmembran. Nadel- und Laubhölzer unterscheiden sich im Anteil von Hemicellulosen an der Gesamtstruktur.

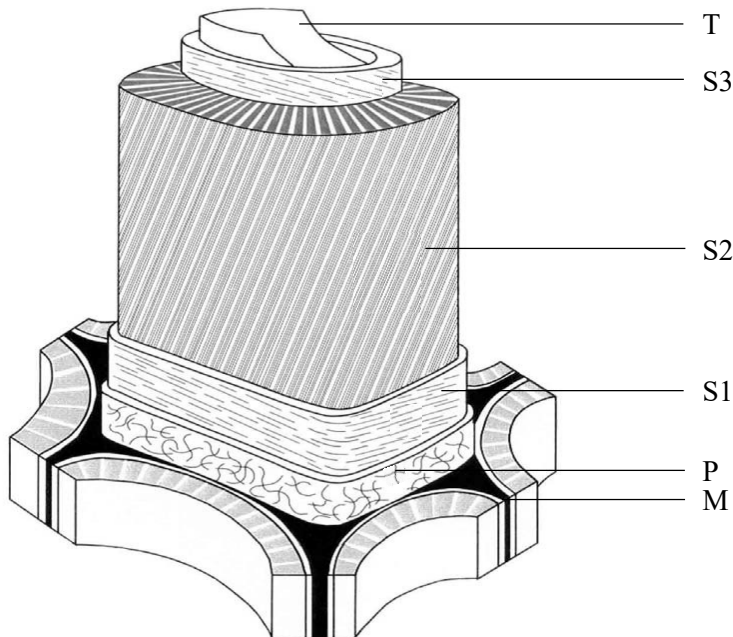
Lignin, ein dreidimensionales, amorphes und unelastisches Makromolekül, verleiht der Zellwand Druckfestigkeit und Steifigkeit. Es wird bei der Verholzung in die interfibrillären Räume zwischen den Fibrillen eingelagert und tritt dementsprechend nicht als selbständiger Baustein auf. Der Großteil des Lignins ist in der Mittellamelle, der Primärwand (siehe Abbildung 3) und in den Zwickeln der aneinandergrenzenden Zellen vorhanden; auch im Baumstamm selbst ist Lignin unterschiedlich verteilt.

Pektin, eine hochpolymere Substanz, hat die Aufgabe, benachbarte Zellen miteinander zu verbinden. Deshalb ist deren Vorkommen auf die Mittellamelle beschränkt, wo es die Zellen im Gewebeverband zusammenhält.

Auf die akzessorischen Bestandteile wird hier nicht weiter eingegangen, da diese nicht zu den Strukturelementen der Zellwände gehören und somit auch keinen bzw. nur einen geringen direkten Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften haben. Sie beeinflussen vor allem die chemischen, biologischen und physikalischen Eigenschaften des Holzes (Dauerhaftigkeit, Brennbarkeit, ...).

### **Nanoebene**

Die Nanoebene ist die erste Strukturebene nach der molekularen Ebene und beschreibt den Zellwandaufbau des Holzgewebes. Während Funktion, Form und Aussehen der Holzzellen sehr unterschiedlich sind, folgt der Aufbau der verholzten Zellwand (siehe Abbildung 3) einem weitgehend gleichbleibenden Muster. Die Mittellamelle (M), Primärwand (P), Sekundärwand (bestehend aus den drei Schichten S1, S2 und S3) und Tertiärwand (T), welche konzentrisch um das Lumen angeordnet sind, bilden, die wie einen faserartigen Verbundwerkstoff aufgebaute, Zellwand. Die einzelnen Schichten unterscheiden sich in ihrer chemischen Zusammensetzung und in der Orientierung der Cellulose-Mikrofibrillen (Niemz, 2006).



**Abbildung 3:** Zellwandmodell mit radialer Gefügeorientierung der Schicht S2 (Zimmermann und Sell, 1997)

Die folgenden Ausführungen zu den einzelnen Schichten der Zellwände basieren auf (Niemz, 2006) und (Schickhofer, 2007).

Die Mittellamelle, welche aneinandergrenzende Zellen miteinander verbindet, wird schon im Rahmen der Zellteilung gebildet. Während sie zu Beginn eine amorphe Matrix aus Pektin und Hemicellulosen ist, kommt es durch die Verholzung zu einer fast vollständigen Lignifizierung (bis zu 90 % Ligninanteil). Daraus resultiert die hohe Druckfestigkeit der Mittellamelle.

Ebenfalls noch während der Zellteilung lagert sich die Primärwand an die Mittellamelle an. Neben Lignin, Pektin und Hemicellulose (Streungstextur) befindet sich auch eine Gerüstsubstanz aus wahllos

verstreuten Cellulose-Mikrofibrillen in der Primärwand. Während die Abstände zwischen den Cellulosefibrillen durch die sehr weite Streuungstextur sehr groß sind, verleiht diese der ausgewachsenen Zelle trotzdem eine hohe Formstabilität. Gemeinsam mit den beidseitigen Primärwänden wird die Mittellamelle aufgrund der mikroskopisch schwierigen Unterscheidung oftmals als Mittelschicht bezeichnet.

Auf die Mittellamelle und die Primärwand folgt die Sekundärwand mit Celluloseanteilen von bis zu 94%. Die anteilmäßig mächtigste Zellwandkomponente besitzt einen lamellaren dreischichtigen Aufbau. Die einzelnen Schichten werden dabei hinsichtlich Dicke, Cellulosegehalt und Mikrofibrillenwinkel unterschieden. Der Mikrofibrillenwinkel gibt den Winkel zwischen der Längsrichtung der Holzzelle und der Orientierung der Cellulosefibrillen an.

Die äußere Sekundärwand schließt direkt an die Primärwand an. Die Cellulosefibrillen weisen dabei einen Winkel von 50° bis 80° zur Längsachse auf.

Die in der Mitte liegende Sekundärwand ist die stärkste Wandschicht und macht im Mittel 80% der gesamten Zellwanddicke aus. Die eng gepackten und unter einem Fibrillenwinkel von 10° bis 30° parallel verlaufenden Fibrillen bestimmen wesentlich die Festigkeit und Steifigkeit des Holzes. Über die Anordnung der Fibrillen innerhalb des S2-Zellwandquerschnittes herrscht in der Literatur keine einheitliche Vorstellung. Während beim konventionellen Modell von einer konzentrischen Anordnung der Cellulosefibrillen ausgegangen wird, wurde von Zimmermann und Sell (1997) eine radiale Struktur der Cellulosefibrillen über den Zellwandquerschnitt beobachtet.

Die innere Sekundärwand (S3) kommt nur bei Parenchymzellen (siehe Mikroebene) vor. Diese Schicht ähnelt in der Zusammensetzung und dem Mikrofibrillenwinkel der Primärwand.

Die Abgrenzung zum Lumen hin wird von der Tertiärwand gebildet. Diese weist einen hohen Ligningehalt auf, wodurch die Widerstandsfähigkeit gegenüber enzymatischen und chemischen Einwirkungen sehr hoch ist.

Der Mikrofibrillenwinkel der S2-Schicht besitzt einen großen Einfluss auf die mechanischen und bruchmechanischen Eigenschaften des Holzes. Je größer dieser Winkel ist, desto geringer sind der E-Modul in Längsrichtung, die Zugfestigkeit und die Streckgrenze. Die maximale longitudinale Dehnung, die Kerbzugfestigkeit und die spezifische Bruchenergie steigen mit flacherem Mikrofibrillenwinkel hingegen an.

In Abhängigkeit der Funktion der Zellen und je nach Baumarten variieren die Zellwandschichten insgesamt und zueinander und auch deren Bestandteile sehr stark.

- Gefäße, welche in Laubhölzern für den Wassertransport zuständig sind, besitzen meist vergleichsweise dünne Zellwände und sind stark ligninhaltig. Durch das hydrophobe Lignin wird ein guter Wassertransport ermöglicht.
- Die für die Festigkeit zuständigen Fasern der Laubhölzer weisen im Allgemeinen einen sehr hohen Celluloseanteil auf.
- Außerdem weisen nicht alle Zellen sämtliche erwähnten Wandschichten auf. So kommt die S3-Schicht zum Beispiel nur in Parenchymzellen (Speichergewebe) vor.
- Fasern, welche die Struktur von Zugreaktionszugholz bilden, besitzen eine zusätzliche Zellschicht (Gel-Schicht), welche fast ausschließlich aus Cellulose besteht. Des Weiteren ist deren Ligningehalt in Summe deutlich geringer und es fehlen manchmal die S2- und S3-Schicht vollständig.
- Die Zellen des Druckholzes sind im Vergleich dazu beim Reaktionsholz runder, dickwandiger, ligninreicher und kürzer als im normalen Holz.

## Mikroebene

Wie bereits eingangs erwähnt, beruhen die unterschiedlichen Eigenschaften der Holzarten vor allem auf den in Mikro- und Makroebenen entstehenden unterschiedlichen Strukturen. Bei der Beschreibung der Mikrostruktur muss grundsätzlich zwischen den entwicklungsgeschichtlich älteren Nadelhölzern mit ihrem vergleichsweise einfachen, regelmäßigem Aufbau und den deutlich jüngeren, komplexer aufgebauten Laubhölzern unterschieden werden (Hübner, 2013a).

Die in Art, Größe, Form und Zusammensetzung unterschiedlichen Zellen bilden den Holzkörper. Treten gleichartige Zellen in größeren Verbänden auf, so spricht man von Gewebe. Es wird dabei in die drei Hauptgewebearten Festigungs-, Leit- und Speichergewebe sowie zusätzliches Exkret- (z. B. Harzkanäle) und Sondergewebe (z. B. Reaktionsholz) unterschieden (Schickhofer, 2007).

Die nachfolgende Tabelle 2 gibt einen Überblick über die Holzgewebe mit den darin vorkommenden Holzzellen bei Nadel- und Laubholz.

**Tabelle 2:** Holzgewebe und die darin vorkommenden Holzzellen für Nadel- und Laubholz (Schickhofer, 2007)

Gewebetyp	Nadelholz	Laubholz
Leitgewebe	Frühholztracheiden (dünnwandig)	Gefäße, Gefäßtracheiden und vasizentrische Tracheiden
Speichergewebe	Parenchymzellen	Parenchymzellen
Festigungsgewebe	Spätholztracheiden (dickwandig)	Fasern (Libriformfasern und Fasertracheiden)
Exkretgewebe	Epithelzellen	Epithelzellen
Sondergewebe/Reaktionsholz	Druckholztracheiden	Zugholzfäsern

Die Hauptmenge der Holzzellen verläuft parallel zur Stammachse. Rechtwinklig dazu sind die als Holzstrahlen bezeichneten liegenden Zellbänder vorhanden, welche in der Regel die radiale Leitung und Speicherung von organischen Stoffen sicherstellen (Schickhofer, 2007).

Die Lumen der benachbarten Zellen stehen über Öffnungen in den Zellwänden miteinander in Verbindung. Diese Öffnungen werden als Tüpfel bezeichnet und dienen dem Wasser- und Nährstofftransport. Grundsätzlich lassen sich zwei Tüpfelgrundtypen unterscheiden: einfache Tüpfel und Hoftüpfel (Grosser, 1977).

### **Mikroebene der Nadelhölzer**

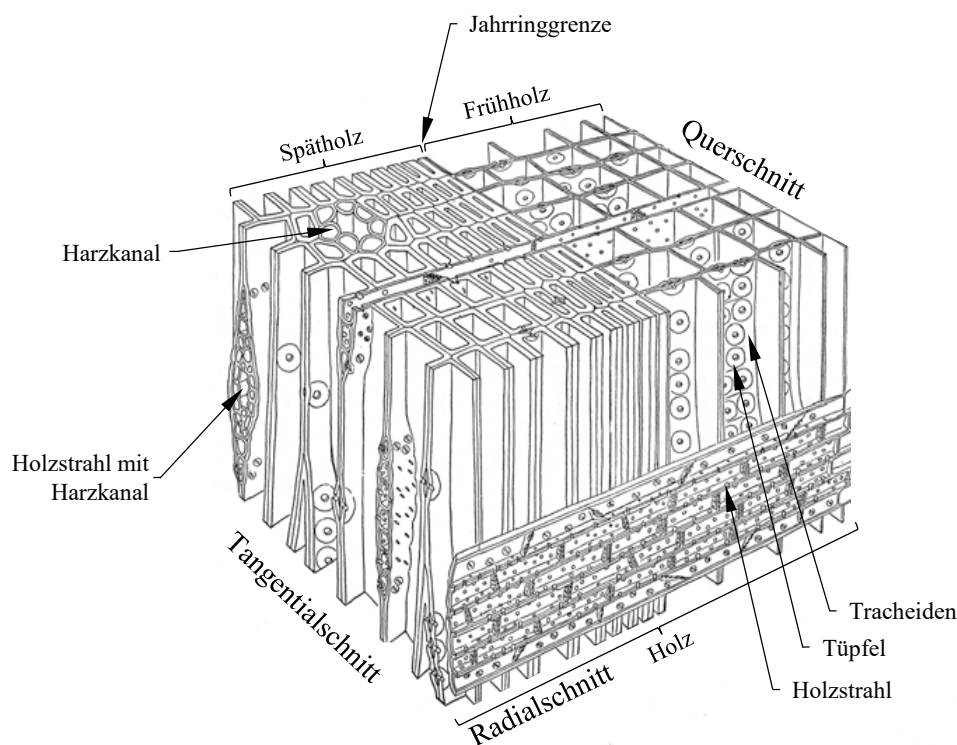
Die Nadelhölzer weisen einen einfachen und regelmäßigen Holzaufbau auf. Ihr Gewebe setzt sich weitgehend nur aus zwei unterschiedlichen Zellarten zusammen: den Tracheiden und den Parenchymzellen (Schickhofer, 2007).

Durch die Anordnung in ein axiales und radiales System wird bei den Tracheiden zwischen Längs- und Quertracheiden (auch: Holzstrahltracheiden) und beim Parenchym zwischen Längs- und Strahlparenchym unterschieden. Die Längstracheiden bilden bei allen Nadelhölzern rund 90–95 % des Holzkörpers. Die übrigen Gewebesysteme (Holzstrahlen, Längsparenchym und Epithelzellen der Harzkanäle) nehmen mit 5–10 % nur einen vergleichsweise kleinen Anteil ein (Grosser, 1977).

In Tabelle 3 sind die Anordnung, Beschreibung und die Funktion der Nadelholzzellen aufgelistet.

**Tabelle 3:** Anordnung, Beschreibung und Funktion der Nadelholzzellen nach (Schickhofer, 2007), in Anlehnung an (Grosser, 1977)

Anordnung	Zelltyp	Beschreibung	Hauptfunktion
axial	Frühholztracheiden	Bildung unmittelbar nach der Vegetationsruhe; dünnwandig und weitleumig	Wasserleitung
	Spätholztracheiden	Bildung vor der Vegetationsruhe; dickwandig und englumig	Festigung
	Längsparenchym	tritt nur spärlich oder gar nicht auf; dünnwandige, strangartig zusammengesetzte Zellen mit dunklen Inhaltsstoffen	Speicherung
	Epithelzellen der Harzkanäle	parenchymatische Zellen, welche die längs verlaufenden Harzkanäle auskleiden (überwiegend im Spätholz)	Harzausscheidung
radial (Holzstrahl)	Holzstrahltracheiden	verlaufen radial am Rand oder zwischen den parenchymatischen Holzstrahlen	Wasserleitung
	Holzstrahlparenchym	durchziehen den Holzkörper als schmale radiale Bändchen	Speicherung
	Epithelzellen der Harzkanäle	parenchymatische Zellen, welche die quer verlaufenden Harzkanäle auskleiden (überwiegend im Spätholz)	Harzausscheidung



**Abbildung 4:** Ausschnitt eines Jahringes einer Lärche (Mägdefrau, 1951)

Es folgt eine Beschreibung der einzelnen Zellentypen der Nadelhölzer nach Grosser (1977), welche in Tabelle 3 und Abbildung 4 zu sehen sind.

Längstracheiden sind die Urform der Holzzellen und werden mehrere Millimeter lang. Ihre Funktion ist die Wasserleitung und Festigung. Die im Querschnitt regelmäßigen radial angeordneten Reihen nehmen



in ihrer radialen Ausdehnung vom Früh- zum Spätholz hin ab, während die Wanddicken zunehmen. Diese strukturellen Unterschiede sind deutlich an den makroskopisch erkennbaren Jahringgrenzen sichtbar. Die Hoftüpfel, welche ausschließlich auf den Radialwänden der Tracheiden auftreten, sind ein Charakteristikum.

Die Längsparenchyme (auch nur Parenchym genannt) bestehen aus dünnwandigen, meist rechteckig-prismatischen Zellen, welche für die Speicherspeicherung zuständig sind. Bei den einheimischen Nadelhölzern ist das Parenchym allerdings nur sehr schwach ausgebildet.

Die Holzstrahlen sind für die Stoffleitung und Speicherung zuständig und durchziehen den Holzkörper als schmale radiale Bänder. Sie bestehen entweder ausschließlich aus Parenchymzellen oder wie bei der Fichte auch noch zusätzlich aus Quertracheiden (Holzstrahltracheiden). Von besonderer Bedeutung für die Identifizierung von Nadelhölzern sind noch spezielle Tüpfelausformungen im Kreuzungsbereich von Strahlparenchymzellen und Längstracheiden.

Bei vielen Nadelholzarten ist der Holzkörper mit einem dreidimensionalen Netz von Harzkanälen, welche längs im Spätholz und quer zur Stammachse in Holzstrahlen verlaufen, durchzogen. Diese langgestreckten Kanäle entstehen durch das Auseinanderweichen parenchymatischer Zellen, und sind innen mit harzausscheidenden Epithelzellen ausgekleidet. Das Harz dient den Nadelholzarten zum Abschotten von Wunden und als Gegenmaßnahme bei Insekten- und/oder Pilzbefall.

### Mikroebene der Laubhölzer

Die entwicklungsgeschichtlich jüngeren Laubhölzer zeigen in ihrem Aufbau eine größere Vielfalt als die Nadelhölzer. So existieren keine Gewebetypen mehr mit Doppelfunktionen, weshalb weitere Zellelemente wie die Gefäße und Libriformfasern hinzukommen. Durch den unterschiedlichen Aufbau der Laubhölzer mit ihren variierenden Größen der Zellen und Anordnungen der Gewebe sind die Holzarten eindeutig charakterisierbar (Schickhofer, 2007).

Die Gefäße, welche in Laubhölzern gegenüber Nadelhölzern zusätzlich vorkommen, dienen der Wasserleitung. Bei bestimmten Holzarten kommen außerdem noch weitere Zellen wie Gefäßtracheiden (unvollständige Gefäßglieder oder vaskuläre Tracheiden) und vasizentrische Tracheiden hinzu. Die beiden letztgenannten Zellarten stellen dabei eine Zwischenstufe von Tracheiden und speziellen Wasserleitelementen dar. Das Festigungsgewebe übernehmen die Libriformfasern und Fasertracheiden (beide zusammen als Fasern bezeichnet). Die Parenchyme übernehmen auch beim Laubholz die Speicherung der Nährstoffe, wobei deren Anteil am Holzkörper deutlich höher ist als bei den Nadelhölzern. Für die Anordnung der Tüpfel an den Zellwänden ist ebenfalls eine höhere Vielfalt im Vergleich zu den Nadelhölzern gegeben.

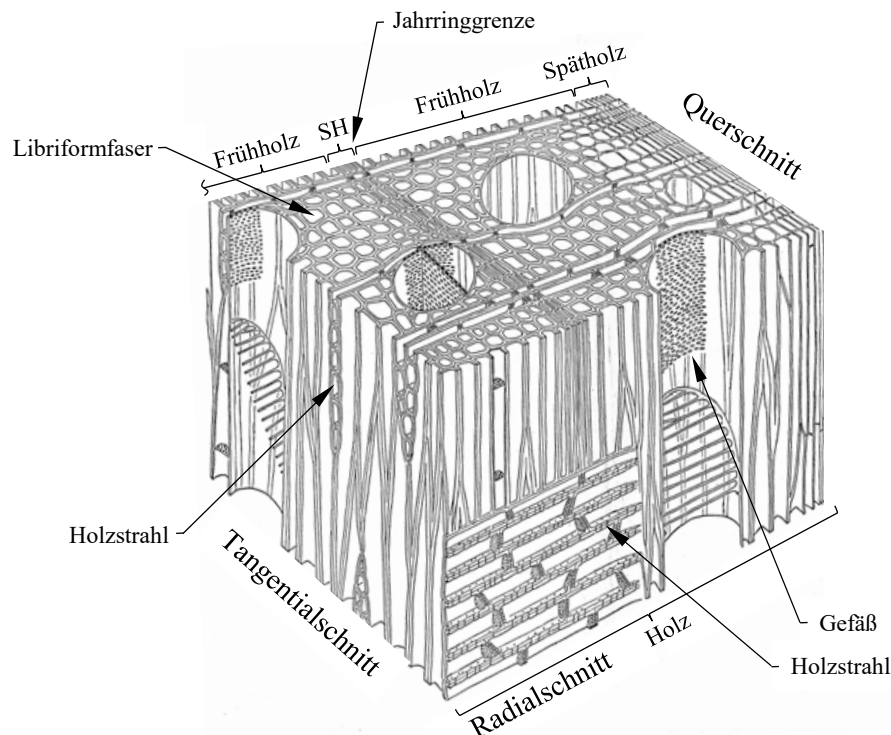
In der Tabelle 4 sind die Anordnung, Beschreibung und die Funktion der Laubholzzellen aufgelistet.

**Tabelle 4:** *Anordnung, Beschreibung und Funktion der Laubholzzellen nach (Schickhofer, 2007), in Anlehnung an (Grosser, 1977)*

Anordnung	Zelltyp	Beschreibung	Hauptfunktion
axial	Gefäße	röhrenförm. Vereinigung von axial verlaufenden Gefäßgliedern; weitleumige, an den Enden perforierte, tote, verholzte Zellen	Wasserleitung
	Gefäßtracheiden (vaskuläre Tracheiden)	sind unvollständige Gefäßglieder; ähneln in Form und Größe den schmalen Gefäßgliedern, sind seitlich geschlossen und begleiten die Gefäße	Wasserleitung
	vasizentrische Tracheiden	kurze, in unmittelbarer Nähe der Gefäße oder des Fasergrundgewebes auftretendes Gewebe	Wasserleitung

<b>Fortsetzung: axial</b>	<b>Fasertracheiden</b>	langgestreckte, mehr oder weniger dickwandige, meist englumige Zellen	Festigung
	<b>Libriformfasern</b>	langgestreckte, mehr oder weniger dickwandige, meist englumige Zellen (Anteile zwischen 50 %-60 %)	Festigung
	<b>Längs-parenchym</b>	zwei verschiedene Zellformen: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ fusiforme Zellen: querwandlos, faserförmig &amp; oft stockwerkartig geordnet</li> <li>▪ Parenchymstränge: fusiforme Parenchymzellen mit Querteilungen</li> </ul>	Speicherung
	<b>Epithelzellen der Harzkanäle*</b>	parenchymatische Zellen, welche die längs verlaufenden Harzkanäle auskleiden	Harzausscheidung
<b>radial (Holzstrahl)</b>	<b>Holzstrahl-parenchym</b>	radial ausgerichtet, bandartig aufgehäufte Holzstrahlzellen; → wichtiges Bestimmungsmerkmal	Speicherung
	<b>Epithelzellen der Harzkanäle</b>	parenchymatische Zellen, welche die quer verlaufenden Harzkanäle auskleiden	Harzausscheidung

\* Harzkanäle kommen nur bei tropischen Holzarten vor



**Abbildung 5:** Ausschnitt eines Jahresringes einer Birke (Mügdefrau, 1951)

Es folgt eine Beschreibung der einzelnen Zellwandtypen der Laubhölzer nach Grosser (1977), welche in Tabelle 4 und Abbildung 5 zu sehen sind.

Die Gefäße werden durch vereinigte, röhrenförmige und axial verlaufende Gefäßglieder charakterisiert, wodurch das Wasser ungehindert von Element zu Element fließen kann (keine Engstellen durch Tüpfel). Die toten und verholzten Zellstrukturen der Gefäße sind weitlumig und an den Enden perforiert. Die Länge der Gefäße variiert je nach Holzart von wenigen Zentimetern bis hin zu Gefäßen, welche sich über die gesamte Baumhöhe erstrecken können. Die Wände der Gefäßglieder sind meist zahlreich mit unterschiedlichen Tüpfeln versehen. Die Verteilung und Größe der Gefäße ist in weiterer Folge für die Bestimmung der holzanatomischen Gruppe (siehe Makroebene) bzw. der Holzart von Bedeutung.

Gefäßtracheiden (gegliedert in unvollständige Gefäßglieder und vaskuläre Tracheiden) sind allseitig geschlossene Zellen und weisen keine Enddurchbrechungen auf; die Verbindung zu anderen Zellen

erfolgt über behöftete Tüpfel. In Lage und Form gleichen die Gefäßtracheiden, welche ebenso für die Wasserleitung herangezogen werden, kleinen Gefäßen.

Unter vasizentrischen Tracheiden werden kurze, unregelmäßig geformte Tracheiden, in unmittelbarer Nachbarschaft zu den Gefäßen, verstanden. Diese Zelltypen bilden keine eigenen axialen Leitbahnen, dienen aber ebenso der Wasserleitung.

Längsparenchym (kurz: Parenchym) kommt in den Laubhölzern viel öfter als in den Nadelhölzern vor; aber meist auch nur spärlich. Bezüglich der Form ist zwischen Parenchymsträngen und fusiformen Parenchymzellen zu unterscheiden. Diese erst bei der Verkernung absterbenden Zellen besitzen einfache Tüpfel und dienen der Speicherung von Nährstoffen.

Die Zusammensetzung, Form und Dimension der Holzstrahlen (Holzstrahlenparenchym) variieren bei den Laubhölzern im Gegensatz zu den Nadelholzarten sehr stark. Sie kommen meist über eine Breite von 4 bis 10 Zellreihen vor und auch deren Höhe variiert je nach Holzart beträchtlich. Die radial ausgerichteten Holzstrahlen können zu den Gefäßen hin unterschiedliche Tüpfel aufweisen, welche somit ein wichtiges Bestimmungsmerkmal darstellen.

Die Fasern (Fasertracheiden und Libriformfasern) bilden mit 50–75 % bei den meisten Laubholzarten den Hauptanteil der Holzmasse. Der Anteil der Fasern bestimmt weitestgehend die Rohdichte sowie die Festigkeitseigenschaften. Die meist dickwandigen, gewöhnlich englumigen Fasertracheiden übernehmen Festigungs- und Leitungsfunktion. Sie stellen eine Übergangsform zwischen Tracheide und Libriformfaser dar. Die Libriformfasern, welche noch etwas dickwandiger und englumiger ausfallen, sind das eigentliche Festigungselement der Laubhölzer.

Harzkanäle kommen fast ausschließlich bei Laubhölzern in tropischen Hölzern vor. Diese sind, wie bei den Nadelhölzern, innen mit harzausscheidenden Epithelzellen ausgekleidet.

## **Makroebene**

Die makroskopisch (mit bloßem Auge oder mit Lupenvergrößerung) erkennbare Struktur des Holzes wird durch die Aufbaucharakteristik, Anordnung, Form und Größe der Gewebe bzw. deren Grundbausteine, den Zellen, bestimmt. Die einzelnen Zellen bleiben ohne die Zuhilfenahme eines Mikroskops zumeist verborgen. Nur die wasserleitenden Gefäßzellen erreichen bei zahlreichen Hölzern solche Größen, dass diese auf dem Querschnitt als Poren und auf den Längsschnitten als Porenrillen makroskopisch erkennbar sind. Neben den Gefäßen können bei entsprechender Größe auch Holzstrahlen, bei reichlichem Vorkommen auch das Längsparenchym sowie Harzkanäle oder Markflecken, makroskopisch wahrgenommen werden (Schickhofer, 2007).

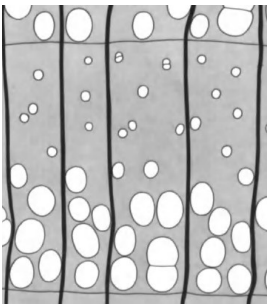
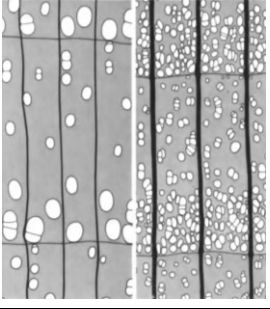
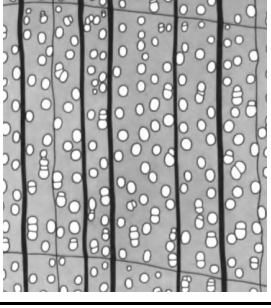
## **Zuwachszonen und Jahrringe**

Die Jahrringe entsprechen in Klimagebieten mit ausgeprägten Jahreszeiten und somit winterlicher Vegetationsruhe den jährlichen Zuwachsraten. Aufgrund der unterschiedlichen Art, Größe, Anzahl und Verteilung der Zellen zu Beginn der Vegetationsperiode und zum Ende wird dementsprechend in Früh- und Spätholz unterschieden. Dem Frühholz kommt die Aufgabe der Wasserleitung zu, während das Spätholz der Festigung der Struktur dient. Dementsprechend weist das Letztgenannte auch eine höhere Rohdichte und Festigkeit als das Frühholz, aber auch höhere Quell- und Schwindwerte, auf. Aus den anatomischen Unterschieden zwischen Früh- und Spätholz (vor allem in den Nadel- und ringporigen Laubhölzern) resultieren auch dementsprechende Schwankungen der mechanischen Eigenschaften in den jeweiligen Jahrringabschnitten (Grosser, 1977).

Im Frühholz von Nadelhölzern sind weitleumige, dünnwandige und im Spätholz englumige, dickwandige Zellen ausgebildet. Diese Unterschiede im Zellaufbau führen zu den bekannten Farb- (helles Frühholz und dunkleres Spätholz) und Härteunterschieden innerhalb des Jahrringes. Wie bereits angedeutet, wird bei den Laubhölzern aufgrund der unterschiedlichen Anordnung und Größe der Gefäße über die Jahrringbreite in drei holzanatomische Gruppen unterschieden: ringporige, zerstreutporige und halbringporige Hölzer (Grosser, 1977).



**Tabelle 5: Porigkeit der Laubhölzer in Anlehnung an (Grosser, 1977; Schickhofer, 2007)**

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

\* alle Abbildungen aus (Grosser, 1977)

Die Unterschiede zwischen ringporigen und zerstreutporigen Laubhölzern sind am markantesten ausgeprägt. Halbringporige Laubhölzer findet man zum überwiegenden Teil bei Obstbäumen und tropischen Holzarten vor, welche grundsätzlich nicht zu den im Baubereich relevanten Holzarten zählen (Schickhofer, 2007). Aus diesem Grund wird auch bei der weiteren Betrachtung nur zwischen ring- und zerstreutporigen Laubhölzern unterschieden.

Bei ringporigen Holzarten beginnt das Frühholz mit einem auffallenden Ring großer Gefäße, dem kleinere Spätholzgefäße folgen. Der Frühholzporenkreis kann ein- oder mehrreihig ausgebildet sein. Es folgt ein nahezu übergangsloser Wechsel zu den anschließenden engen Spätholzgefäßen hin. Die in diesem Übergang auftretenden Unterschiede in den tangentialen Durchmessern der Gefäße können den Faktor 10 erreichen (Wagenführ, 2007).

Die Gefäße der zerstreutporigen Laubhölzer sind über die gesamte Jahrringbreite zirka gleich groß und annähernd gleichmäßig verteilt. Eine Mittelstellung nehmen die halbringporigen Laubholzarten ein. Bei ihnen sind die Gefäße des Frühholzes entweder etwas größer als die im Spätholz oder sie sind in diesem Teil der Zuwachzone besonders dicht angeordnet (Wagenführ, 2007).

Zu erwähnen sei an dieser Stelle noch, dass es auch innerhalb der drei Hauptgruppen zu sehr unterschiedlichen Ausbildungen und Gruppierungen der Gefäße kommt. Die Anordnung ist in einzelnen, paarigen, radialen, schrägen und tangentialen Reihen oder Nestern möglich (Grosser, 1977).

## Stammebene

Bei der Betrachtung eines Querschnittes eines berindeten Holzstammes kann mit freiem Auge der allgemeine Aufbau des Holzes erkannt werden. Hierzu zählen, wie in Abbildung 6 dargestellt, von außen nach innen betrachtet (Grosser, 1977):

- die aus Borke und Bast bestehende Rinde
- das Kambium (nur mikroskopisch wahrnehmbar)
- der Holzkörper, bestehend aus Splintholz und Kernholz
- das größtenteils mittig liegende Mark

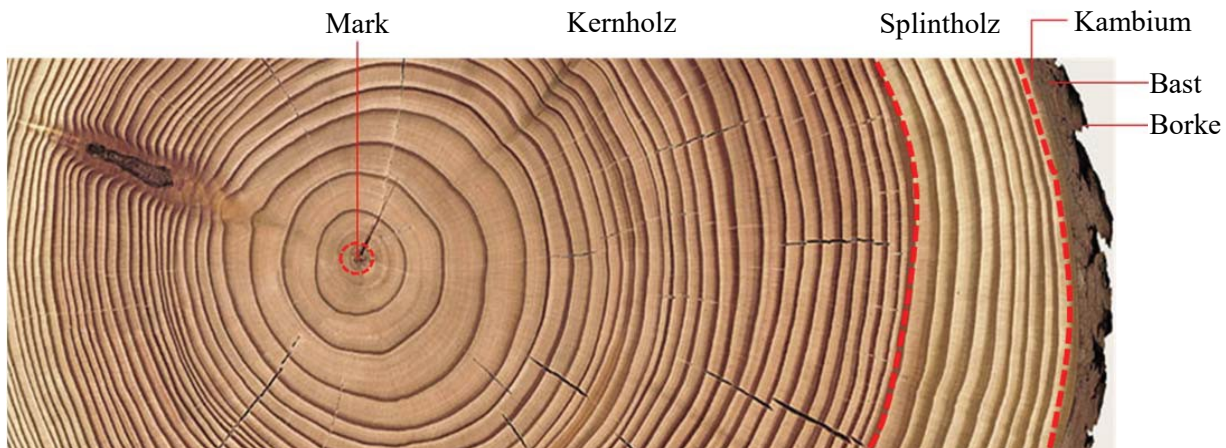


Abbildung 6: Stammquerschnitt eines Nadelholzes (pro:holz, 2017)

### Juveniles und adultes Holz

Das unmittelbar um die Markröhre gebildete Holz im Zentrum des Stammes wird als juveniles Holz bezeichnet. Dabei sind die ersten 5–20 Jahrringe, insbesondere in Nadelhölzern, von deutlichen jährlichen Eigenschaftsänderungen gekennzeichnet. Die Rohdichte steigt kontinuierlich an, da die Zellwände dicker, die Lumen kleiner und die Spätholzanteile von Jahr zu Jahr größer werden. Das juvenile Holz ist außerdem durch einen geringeren Cellulose- und höheren Ligningehalt sowie einem höheren Mikrofibrillenwinkel gekennzeichnet. Die Steifigkeiten und Festigkeiten im juvenilen, kernnahen Holz betragen nur 50–70 % des adulten Holzes. Für die mechanischen Eigenschaften bedeutet dies eine ständige Verbesserung und eine Ausbildung von adultem, in den Eigenschaften gleichbleibendem, Holz ab dem ungefähr 20. Wachstumsjahr (Schickhofer, 2007). In der Abbildung 7 sind die Änderungen der Eigenschaften während des Wachstums schematisch für Nadelholz dargestellt.

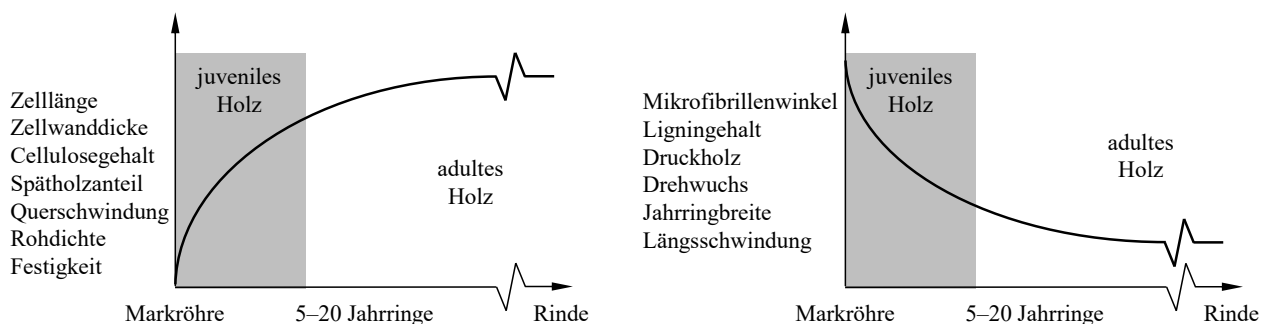


Abbildung 7: Eigenschaften von juvenilem und adultem Holz nach (Schickhofer, 2007), in Anlehnung an (Kretschmann, 1998)

In weiteren Untersuchungen der mechanischen Eigenschaften von juvenilem und adultem Robinienholz wurden von Koch und Dünisch (2008) die Rohdichte, die Druck- und Biegefestigkeit, der Biege-Elastizitätsmodul, die Bruchschlagarbeit, die Brinell-Härte und die Ausziehfestigkeit von Schrauben geprüft. Dabei wurde allerdings keine signifikante Änderung bzw. Abweichung der technologischen Eigenschaften von juvenilem zu adultem Holz festgestellt.

### **Splint- und Kernholz**

Wie in Abbildung 6 dargestellt, wird der Großteil des Holzkörpers in Splint- und Kernholz aufgetrennt. Durch Verkernungsvorgänge, welche mit dem Altern des Holzes vonstattengehen, erfolgt eine Trennung in Splint- und Kernholz.

Der um das Kernholz angeordnete Splint weist in der Regel einen helleren Farbton als das innere Kernholz auf. Im Splint sind die noch lebenden physiologisch aktiven Holzzellen für die Wasserleitung und Speicherung zuständig (Hübner, 2013a), weshalb auch dessen Feuchtegehalt höher als im Kernholz ist.

Die Bildung von Kernholz geschieht bei allen Bäumen und umfasst die inneren, kernnahen Zonen des Holzes. Die Zellen in diesem Bereich sind bereits tot und die Verkernung erfolgt durch anatomisch-physiologische Veränderungen (Hoftüpfelverschluss bei Nadelholztracheiden, Thyllenbildung bei Laubholzgefäßen, Anlagerung von oft gefärbten Kernstoffen in oder an die Zellwand). Die Verkernung beginnt bei entsprechender Splintbreite und hat das Absterben der parenchymatischen Zellen zur Folge. Das Kernholz trägt somit nur noch zur Standsicherheit des Baumes bei (Festigungsfunktion). Farbkernholz verfügt gegenüber dem Splintholz über veränderte physikalisch-mechanische Eigenschaften (trockener, schwerer, härter, dauerhafter) (Schickhofer, 2007).

### **Sondergewebe**

Falls erforderlich, reagiert der Baum mit der Bildung von sogenanntem Sondergewebe, welches vom vorher beschriebenen Normalholz abweichende Eigenschaften aufweist. Die folgenden Ausführungen zu den Sondergeweben sind Schickhofer (2007) entnommen:

Unter Reaktionsholz wird die Bildung von aktivem Richtgewebe verstanden. Dadurch werden aus der Normalstellung gebrachte Baumteile durch exzentrisches Dickenwachstum wieder in die Ausgangslage zurückgebracht. Zu unterscheiden ist dabei, dass bei Laubholz z. B. an der Oberseite von Ästen (allg. auf der auf Zug beanspruchten Seite) Zugholz und bei Nadelholz an der Unterseite von Ästen (allg. auf der auf Druck beanspruchten Seite) Druckholz gebildet wird. Die anatomischen, chemischen, physikalischen und mechanischen Eigenschaften von Reaktionsholz unterscheiden sich vom Normalholz.

Auch das Wundholz, welches der Baum bei Zerstörung des Kambiums neben der verletzten Stelle bildet, zählt zu den Sondergeweben. Im Wundholzbereich ist bei Laubhölzern der Parenchymzellenanteil höher und der Anteil an Gefäßen und Fasern entsprechend geringer. Im Vergleich dazu fallen bei Nadelhölzern traumatische Harzkanäle sowie ein höherer Parenchymanteil und Betüpfelungsgrad auf.

## 2-1.2 HOLZANATOMIE & MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN

Aufgrund des im vorigen Abschnitt beschriebenen holzanatomischen Aufbaus kann für mechanische Betrachtungen vereinfacht von einem inhomogenen, radial-anisotropen Material ausgegangen werden. Infolgedessen ist die Einführung eines zylindrischen Koordinatensystems mit longitudinaler, radialer und tangentialer Richtung zur Beschreibung von Festigkeiten und Steifigkeiten zweckmäßig. In der Regel wird Holz im Ingenieurwesen allerdings als orthotropes Material beschrieben, wobei die Richtungen der Achsen ebenso longitudinal, radial und tangential ausgerichtet sind. Für die baustatische Berechnung in der Praxis ist eine weitere Vereinfachung, bei welcher die beiden Richtungen tangential und radial in eine Querrichtung zusammengefasst werden, durchaus üblich und vertretbar.

Die folgenden Ausführungen entstammen (Götz, 2000) und (Schickhofer, 2007):

Die mechanischen Eigenschaften von Holz sind eng mit dessen anatomischen Aufbau verknüpft. Eine genaue Einschätzung der Werkstoffkennwerte aufgrund des Aufbaus von Holz ist allerdings kaum möglich. Während die Prüfung von globalen Kenngrößen zur gängigen Praxis gehört, ist jene von Holzstrahlen oder einzelnen Holzfasern um ein Vielfaches schwieriger.

Bekannt und immer gleich bleiben hingegen die mechanischen Aufgaben der einzelnen Zellbausteine. Mithilfe dem von Mattheck (1994) entwickelten biomechanischen Ersatzmodell von Holz ist es möglich, die mechanischen Eigenschaften beziehungsweise den lastgerechten Aufbau von Holz stark vereinfacht zu erklären. Von besonderem Interesse für dieses Modell sind die beiden Hauptbestandteile des Zellwandaufbaus, die Cellulose und das Lignin. Der Aufbau kann von außen nach innen vereinfacht wie folgt beschrieben werden: Die Mittellamelle aus Pektin verklebt die Holzzellen untereinander, welche aus der ligninreichen Primärwand (druckfest und spröde) und der cellulosereichen Sekundärwand (zugfest und elastisch) bestehen.

Im Modell (siehe Abbildung 8) bilden die Mittellamelle und die Primärwand einen Ligninschornstein, in welchem die Cellulosehohlseile (Sekundärwand) eingeschlossen sind. Diese Hohlseile nehmen die Zugspannungen (longitudinal und radial) und die Ligninschornsteine die Druckspannungen auf. Die Holzstrahlen hingegen dienen der Querarmierung des Holzkörpers. Da die Gefäße keine mechanische Funktion übernehmen, bleiben sie im Holzmodell unberücksichtigt. Die Holzfasern werden somit in radialer Richtung zusammengehalten und ein Ausknicken wird verhindert. Zusätzlich dienen die Holzstrahlen als radiale Verdübelung, welche benachbarte Jahrringe gegen longitudinalen Schub sperren.

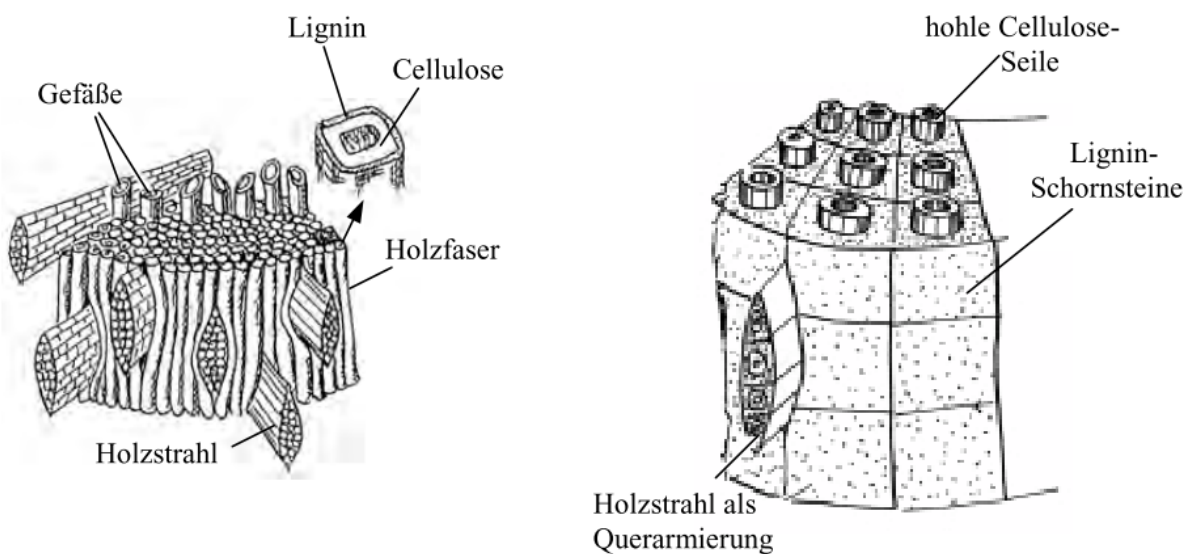


Abbildung 8: Vereinfachtes biomechanisches Ersatzmodell (Mattheck, 1994)

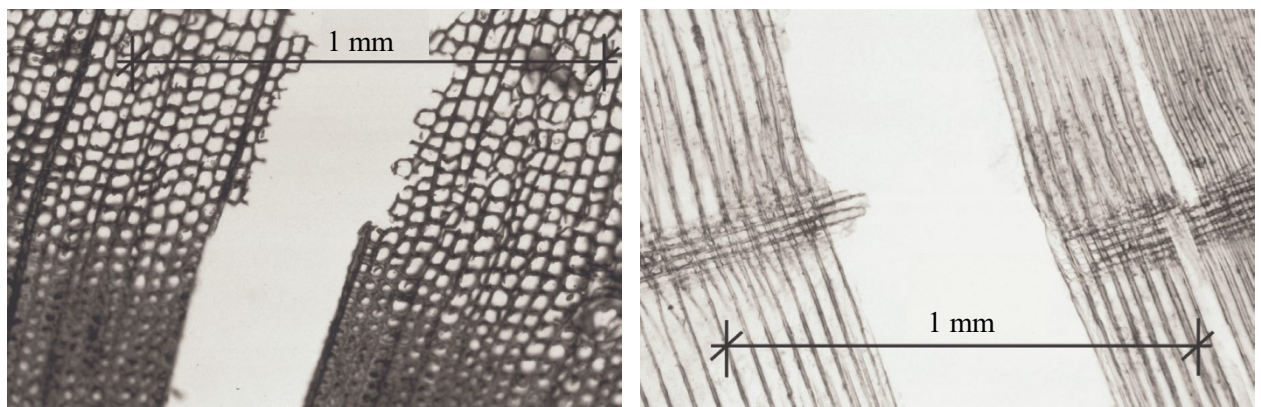


Außerdem lässt sich die oben angeführte Richtungsabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften des Holzes mit diesem Modell gut erklären. Die Steifigkeit und Festigkeit sind in Längsrichtung am größten (allerdings unterschiedlich bei Zug- und Druckbelastung). In radialer Richtung sind Festigkeit und Steifigkeit deutlich geringer und von Größe und Häufigkeit der Holzstrahlen abhängig. Die Festigkeiten in tangentialer Richtung weisen die geringsten Werte auf, da jede Armierung fehlt.

Neben dem eben angeführten biomechanischen Ersatzmodell gibt es auch noch zahlreiche Untersuchungen, wovon einige in weiterer Folge vorgestellt werden und den Einfluss der Holz Anatomie auf mechanische und physikalische Kenngrößen beleuchten.

Ein Einfluss des holzanatomischen Aufbaus auf die mechanischen Eigenschaften scheint, vor allem auch für Rollschubbelastungen, naheliegend, da davon auszugehen ist, dass die Holzstrahlen je nach Ausbildung in der jeweiligen Holzart einen Verdübelungseffekt zwischen den Jahrringen aufweisen. Dahingehend wurden von Bendtsen im Jahr 1976 neun Nadelhölzer hinsichtlich ihrer Rollschubeigenschaften untersucht. Verschiedene Fichten-, Tannen-, Kiefern- und Zedernarten wurden dabei Rollschubprüfungen unterzogen. Die dabei ermittelten Rollschubfestigkeiten und –moduln weisen nach erneuter Datenaufbereitung von Ehrhart (2014) Variationskoeffizienten (COV, engl.: coefficient of variation) innerhalb der Holzarten von bis zu 29 % für die Festigkeiten auf. Für die Rollschubmoduln ergeben sich COV-Werte von bis zu 45 % innerhalb der Holzarten, weshalb davon auszugehen ist, dass weitere nicht berücksichtigte Parameter maßgebenden Einfluss auf die Prüfungen hatten. Wie ebenfalls aus der Arbeit von Ehrhart (2014) hervorgeht, wurden bisher noch keine größeren Versuchsreihen betreffend des unterschiedlichen anatomischen Aufbaus von Laub- und Nadelhölzer sowie dessen Auswirkungen auf die Rollschubeigenschaften durchgeführt.

In der Arbeit von Schmid (2002) wurde die Tragfähigkeit von Verbindungen im Holzbau mit mechanischen Verbindungsmitteln im Hinblick auf die Ausbildung eines spröden Bruches bestimmt. Der Großteil der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen beschränkte sich dabei auf die Nadelholzarten Fichte und Kiefer.



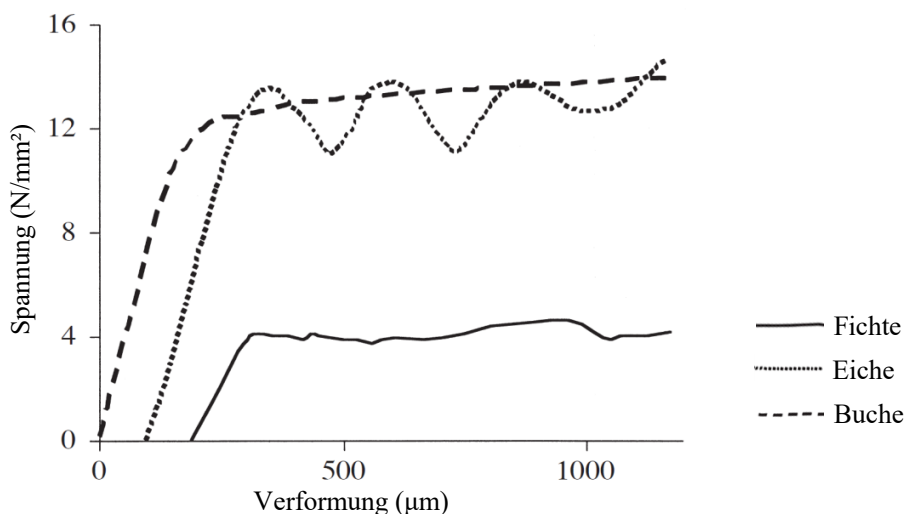
**Abbildung 9:** Quer- (links) und Radialschnitt (rechts) im Rissbereich (Schmid, 2002)

Es wurde vor dem Auftreten des Sprödebruchs in makroskopischen Beobachtungen häufig ein stabiles Risswachstum festgestellt. Wie im Querschnitt in Abbildung 9 gut zu erkennen ist, führt das Risswachstum zuerst entlang eines Holzstrahles im Spätholz und setzt sich im Frühholz durch die Zerstörung der Tracheiden fort. Im Radialschnitt kann die Bedeutung der Holzstrahlen bei Beanspruchungen quer zur Faser gut erkannt werden. Die Holzstrahlzellen werden aus den angrenzenden Tracheiden herausgezogen. Als Schlussfolgerung gibt Schmid (2002) an, dass der Verbund zwischen Holzstrahlen und Tracheiden sowie der Aufbau der Holzstrahlen selbst auf die Energiefreisetzungsraten (relevant bei der Spaltung infolge dem Einbringen von Verbindungsmitteln in Holz) und die Querkzugfestigkeit einen entscheidenden Einfluss haben können.

Außerdem werden laut Grosser (1977) die Rohdichte sowie die Festigkeitseigenschaften der Laubholzarten weitgehend vom Faseranteil bestimmt. Unter Fasern sind in diesem Zusammenhang sowohl die Fasertracheiden als auch die Librifasern zu verstehen.

Im Hinblick auf die aktuelle Arbeit wird hier kurz auf den Zusammenhang der Rohdichte mit der axialen Ausziehfestigkeit eingegangen (weitere Ausführungen dazu siehe 2-4.3). Die für die Bemessung maßgebenden Faktoren für die Bestimmung von Ausziehfestigkeiten von Holzbauschrauben sind, wie von Ringhofer et al. (2015c) angeführt, die effektive Länge  $l_{ef}$ , der Schraubendurchmesser  $d$  und die Rohdichte  $\rho$ . Die Rohdichte stellt dabei den einzigen Parameter dar, welcher nicht die geometrischen Abmessungen der Verbindungen beschreibt. Da das Ausziehverhalten, vor allem bei einem Achs-Faserwinkel von  $0^\circ$ , prinzipiell mit einem Schubversagen in der Mikroebene des Holzes beschrieben werden kann (vgl. Abschnitt 2-4.1), sollte eigentlich eine Schubkenngröße mit der Ausziehfestigkeit besser korrelieren. Allerdings ist bekannt, dass die Schubfestigkeit nur eine geringe Korrelation mit der Rohdichte aufweist (Müller et al., 2004; Pöll, 2017). Trotzdem wird nach wie vor nur die Rohdichte als materialeitige Eingangsgröße für die Ausziehfestigkeit von Schrauben angesehen. Tatsächlich kann auch ein Ansteigen der Ausziehfestigkeiten bei zunehmender Dichte beobachtet werden, wogegen jedoch die Schubfestigkeit keinen oder keinen signifikanten Zusammenhang mit der Rohdichte innerhalb einer Holzart aufweist (Ringhofer et al., 2015c).

Wie Müller et al. (2003) in Untersuchungen zeigen konnten, unterscheidet sich das Verformungsverhalten von Hölzern mit verschiedenen holzanatomischem Aufbau, bei radialer Querdruckbelastung, sehr deutlich. Vor allem der Übergang von elastischer zu plastischer Verformung sowie die Verformungen bei gleichbleibendem Festigkeitsniveau zeigen für die jeweilige Holzart charakteristische Ausprägungen. Wie in Abbildung 10 zu erkennen ist, verhalten sich die Holzarten Fichte, Eiche und Buche je nach Holz Anatomie und Zellwandstruktur unterschiedlich. Der Übergang vom elastischen in den plastischen Verformungsbereich ist dabei vor allem von den mechanischen Eigenschaften der Zellwände abhängig. Ein eventuell anzunehmender Zusammenhang der Rohdichte mit der Proportionalitätsgrenze der Querdruckfestigkeit konnte durch Alexiou et al. (1991) bereits ausgeschlossen werden.



**Abbildung 10:** Last-Verformungsverhalten bei radialem Querdruck (Müller et al., 2003)

Die Untersuchungen liefern dabei folgende Ergebnisse: Das Querdruckverhalten von Eiche wird vom Beulen der Frühholzgefäße und der vasizentrischen Tracheiden bestimmt, während es bei der Buche zu einer Verdichtung der Gefäße und großer plastischer Verformung kommt. Bei der Fichte hingegen kommt es zum Knickversagen von nur wenigen Zellen im Bereich der Jahrringgrenze, was zu einem geringeren Querdruckfestigkeitsniveau führt (Müller et al., 2003).

Wie aus den angegebenen Punkten zu erkennen ist, bildet sich der holzanatomische Aufbau einmal mehr und einmal weniger gut in den mechanischen Eigenschaften der Holzarten ab. Zusätzlich muss bei kleinen Prüfserien die lokale Änderung der Steifigkeits- und Festigkeitskennwerte berücksichtigt werden. Zusätzlich ist eine Beurteilung hinsichtlich der vorliegenden Messwerte und deren Zuordnung zu Minimal-, Maximal- oder Mittelwerten für die jeweilige Holzart sehr schwierig.

Im Hinblick auf den Einfluss von unterschiedlichen holzanatomischen Gruppen auf die Ausziehfestigkeit bzw. Ausziehkenngrößen sind noch keine umfangreichen Untersuchungen durchgeführt worden.

## 2-2 SCHRAUBE

---

Für hochleistungsfähige Verbindungen mit axialer Beanspruchung stehen im Holzbau prinzipiell zwei Möglichkeiten zur Verfügung. Einerseits die geklebten Verbindungen (eingeklebte Stahlstäbe bzw. eingeklebte Bleche) und andererseits die geschraubten Verbindungen (Meyer, 2016), welche in weiterer Folge in dieser Arbeit behandelt werden.

Während Holzbauschrauben bereits seit längerer Zeit im Möbelbau eingesetzt werden, sind diese heutzutage auch im konstruktiven Ingenieurholzbau in ihrer innovativen neuen Ausführung nicht mehr wegzudenken. Die bis 1990 durchgeführten Arbeiten zum Thema Schrauben sind dabei noch größtenteils der Grundlagenforschung für den nicht-tragenden oder nur untergeordnet lastabtragenden Bereich zuzuordnen. Selbstbohrende Holzbauschrauben wie sie heute eingesetzt werden, sind erst seit rund 20 Jahren am Markt (Ringhofer, 2017). Vor allem erreichbare Zugfestigkeiten von über 1.000 N/mm<sup>2</sup>, der einfache Appliziervorgang von selbstbohrenden Schrauben sowie deren vielseitiger Einsatz verhalfen ihnen zur derzeitigen Stellung im Bereich der Verbindungsmittel.

Die Verwendung und Bemessung von Schrauben wird dabei im Wesentlichen über technische Zulassungen geregelt. Da jeder Hersteller individuelle Schrauben produziert, um sich durch spezifische Eigenschaften von den Mitbewerbern abzuheben, ist somit auch für jede Schraube eine eigene Zulassung erforderlich (Pirnbacher und Schickhofer, 2007).

In einer aktuellen Recherche (2016) unter 34 Europäisch Technischen Bewertungen (European Technical Assessments; ETA), wird dabei festgehalten, dass lediglich für vier Schraubentypen auch eine, wenn auch eingeschränkte, Verwendung in Laubholz möglich ist (Pöll, 2017). Im Vergleich dazu war von den 28 Europäisch Technischen Zulassungen, welche im Jahr 2013 in der Datenbank des Österreichischen Instituts für Bautechnik eingetragen waren, noch keine einzige Holzbauschraube für die Verwendung in Laubholz zugelassen. Allerdings erlaubten auch zu diesem Zeitpunkt bereits drei deutsche Allgemeine Bauaufsichtliche Zulassungen die Verwendung von Holzbauschrauben in Laubhölzern (Hübner, 2013a). Wie von Ringhofer (2017) ausgeführt wird, waren im Jahr 2014 insgesamt sieben ETAs gültig, welche die Verwendung der jeweiligen Schrauben in Laubhölzern berücksichtigten. Dabei war in sechs Bewertungen Eichen- und Buchen-Vollholz (VH) und -BSH und in drei Bewertungen Eschen-BSH für die Verwendung zugelassen.

### **Geometrie und Produktion**

Grundsätzlich können Holzbauschrauben als Teilgewindeschrauben oder als Vollgewindeschrauben mit durchgehendem Gewinde zwischen Schraubenkopf und Schraubenspitze hergestellt werden.

Obwohl durch die Forschungstätigkeiten an Holzbauschrauben in den vergangenen Jahren viele Entwicklungen umgesetzt und Optimierungspotenziale für Spezialanwendungen ausgenutzt werden konnten, sind deren grundsätzlicher Aufbau und die Geometrie gleich geblieben.

Das „System Schraube“ besteht dabei, wie in Abbildung 11 zu sehen ist, aus den folgenden Bausteinen (Pirnbacher und Schickhofer, 2007) mit den jeweiligen geometrischen Bezeichnungen in Anlehnung an Ringhofer (2017):

- Antrieb
- Kopf
- Schaft (optional)
- Reibschaft (optional)
- Gewinde
- Spitze inkl. optionaler Modifikation
- Passivierung bzw. Beschichtung

**Tabelle 6: Bausteine der Schraube mit den jeweiligen Ausprägungen, Parametern und Aufgaben; modifiziert nach (Pöll, 2017) und in Anlehnung an (Pirnbacher und Schickhofer, 2007)**

Baustein	Ausprägung bzw. Parameter	Aufgabe
Antrieb	intern, extern oder kombiniert möglich; in der Regel TORX-Antrieb	zur Kraftübertragung beim Eindrehen
Kopf	Zylinderkopf, Senkkopf, Scheibenkopf, etc.	als Widerstand gegen Kopfdurchziehen
Schaft	kann entfallen (bei Vollgewindeschrauben)	zur Verbindung des Kopfes mit dem Gewinde
Reibschaft	kann entfallen; ähnliche Parameter wie das Gewinde	Sicherstellung des Freilaufs des Schaftbereiches zur Minderung des Eindrehwiderstandes
Gewinde	definiert über Verhältnis Außen- zu Kerndurchmesser, Ganghöhe, Flanken- neigung, Flankenform und Gewindelänge	zur Kraftübertragung Schraube/Holz
Spitzen- modifikation	kann entfallen; Verdichter, Rippen, Gegengewinde, ...	Verdichter: zur Verdichtung des Bohrmaterials und Reduzierung des Eindrehwiderstandes
Spitze	Vollspitze, Halbspitze, Bohrspitze, Cut-Spitze, etc.	zur Erleichterung des Applizierens, Reduktion der Spaltkräfte beim Eindrehen, Zerkleinerung des Bohrmaterials, Reduktion des Eindrehwiderstandes
Passivierung bzw. Beschichtung	unterschiedliche Ausführung der Verzinkung; Überzug mit Gleitmitteln (Wachs, Silikon, ...)	zur Reduktion des Eindrehwiderstandes durch Herabsetzung des Reibwiderstandes und zum Korrosionsschutz

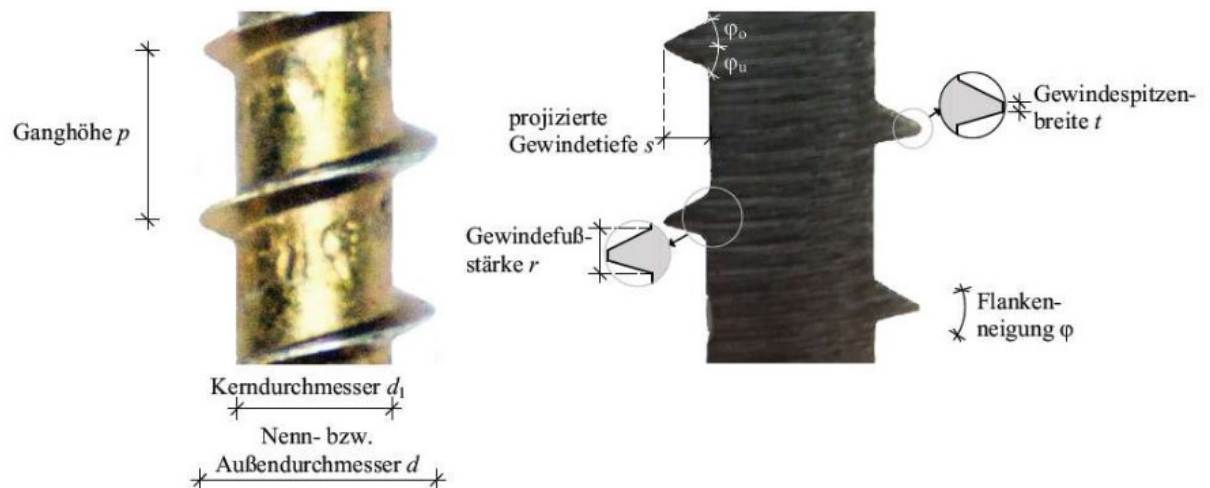


**Abbildung 11: Bausteine mit dazugehörigen Abmessungen für das "System Schraube"**

Die Ausführungen der einzelnen Bausteine beeinflussen wesentlich die Verarbeitbarkeit, den Einsatzbereich und somit natürlich den wirtschaftlichen Gesamtaufwand für den Einsatz der Schraube. In diesem Zusammenhang ist zusätzlich zum Stückpreis vor allem die Verarbeitungszeit wesentlich. Neben den zeitlichen Komponenten wie der Ansetz- und Eindrehzeit (abhängig von der Gewindeganghöhe) ist auch das aufzubringende Eindrehmoment (Einfluss von Reibschicht- und Spitzenausbildung bzw. Beschichtung) eine relevante Einflussgröße (Pirnbacher und Schickhofer, 2007). Die Ausstattung von Schrauben mit speziellen Bohrspitzen oder einem Reibschicht zwischen dem Schaft- und dem Gewindebereich zielen darauf ab, das Eindrehmoment und die Spaltgefährdung des Holzes zu reduzieren (Blaß, 2007).

Allerdings sind der Variation bzw. Ausbildung der Schraubengeometrie einerseits Grenzen hinsichtlich der Fertigungstechnik und andererseits hinsichtlich normativer Vorgaben Grenzen gesetzt. So müssen die Anforderungen an Holzbauschrauben für den Einsatz in Bauholz für tragende Zwecke entweder ÖNORM EN 14592 (2012) oder "Screws for use in timber constructions" (EAD 130118-00-0603, 2016) eingehalten werden. In diesen Dokumenten sind zum Beispiel Größenordnungen der Gewindeaußendurchmesser und für das Verhältnis von Gewindeinnen- zu Gewindeaußendurchmesser festgelegt.





**Abbildung 12:** Geometrieparameter des Gewindes (Pöll, 2017)

Wie allerdings Pöll (2017) in seinen Untersuchungen zeigen konnte, variieren die gegenwärtigen Ausführungen von Holzbauschrauben, trotz der Vielzahl an Herstellern, nur sehr gering und liegen im Mittelbereich der zulässigen Grenzen.

Ein Auszug der Schraubenmorphologien unterschiedlicher Hersteller ist (Pirnbacher und Schickhofer, 2007) zu entnehmen. Genaue Ausführungsmöglichkeiten der einzelnen Bausteine sind für die Spitzen-, Schaft-, Reibschaff-, Kopf- und Antriebsbildung sowie für die Beschichtungen (Ringhofer, 2017) zu entnehmen. Die Arbeiten von Hübner (2013a) und Pöll (2017) beleuchten historische und aktuelle Ausführungen der Gewindegeometrie und geben Auskunft über die Anforderungen an das Gewinde für die Verwendung in Laubhölzern.

Von Ringhofer (2017) werden für die Herstellung von selbstbohrenden Holzbauschrauben die folgenden maßgebenden Produktionsschritte angegeben:

- Auswahl und Vorbehandlung des Rohmaterials
- Formung der Schraubengeometrie
- Härtingsprozess
- Aufbringen zusätzlicher Schutzbeschichtungen
- Nachbehandlung

Die Walzdrähte, welche zur Schraubenherstellung verwendet werden, sind in der Regel Kohlenstoffstähle mit bestimmter chemischer Zusammensetzung und entsprechenden mechanischen Eigenschaften. Nach der Entfernung von Oxidschichten werden die Stahlstränge mechanisch gezogen, um den gewünschten Ausgangsdurchmesser für den Walzprozess zu erhalten.

Die Formgebung der Schraubengeometrie, welche als Kaltumformung durchgeführt wird, beginnt mit dem Aufpressen des Schraubenkopfes auf die abgelängten Rohlinge. Anschließend werden in einem zweiten Schritt das Gewinde sowie die Schraubenspitze über Stahl-Walzbacken aufgewalzt.

Im nachfolgenden Härtingsprozess kann der Wert des Fließmomentes sowie die Zug- und Torsionsfestigkeit der Schrauben erheblich gesteigert werden. In diesem mehrstufigen Prozess erfolgt zunächst eine Erhitzung auf ca. 900 °C, welche eine bestimmte Zeit gehalten wird, und eine anschließende rasche Abkühlung, wodurch die Erhöhung der Härte, Festigkeit und Sprödigkeit miteinhergeht. Ein optionales Anlassen bei ca. 300 °C sorgt für einen Wiedergewinn an Zähigkeit bei geringen Festigkeitseinbußen.

Als Korrosionsschutz wird die Schraube entweder metallurgisch modifiziert oder mit einer zusätzlichen Schutzbeschichtung überzogen. Die Aufbringung einer galvanischen Verzinkung stellt derzeit die häufigste Form des Korrosionsschutzes dar.

Abschließend werden die Schrauben mit einer Gleitbeschichtung versehen, um das Eindrehmoment zu reduzieren (Ringhofer, 2017).

Aktuelle Entwicklungen im Hinblick auf die Schraubengeometrie zielen auf die Optimierung einer für höhere Rohdichten optimierten Schraube ab. Dabei sollte möglichst der herkömmliche Herstellungsprozess für die Produktion beibehalten werden, während eine höhere Leistungsfähigkeit der Schraube selbst erzielt werden soll.

So wird unter anderem an der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine am Karlsruher Institut für Technologie die Entwicklung einer Schraube, welche ohne Vorbohren in Laubhölzern, und somit in Hölzern mit höheren Rohdichten, eingebracht werden kann, geforscht (Meyer, 2016). Auch an der Technischen Universität Graz wurde am Institut für Holzbau und Holztechnologie im Rahmen der Masterarbeit von Pöll (2017) die Geometrie einer Schraube so konzipiert, dass die Applikation auch in Hartlaubholz (-produkten) ohne Vorbohrung erfolgen kann und gleichzeitig die Stahlzugtragfähigkeit und somit die Leistungsfähigkeit des Verbindungsmittels ansteigt. Diese Schraube ist in weiterer Folge auch Teil der Untersuchungen in dieser Arbeit und wird deshalb im Abschnitt 3-2.1 kurz beschrieben.

### **Versagensmechanismen**

Um den in weiterer Folge betrachteten Auszieh Widerstand zuordnen zu können, werden zunächst sämtliche Versagensmechanismen aufgelistet. Prinzipiell ist dabei neben dem Versagen der Einzelschraube auch das Versagen von Schraubengruppen zu beachten. Außerdem darf nicht außer Acht gelassen werden, dass auch bereits beim Appliziervorgang ein Aufspalten des Holzes sowie ein Torsionsversagen der Schraube auftreten können.

Die möglichen Versagensmechanismen laut Brandner et al. (2015) und Pöll (2017) sind in Tabelle 7 für selbstbohrende Schrauben angeführt.

**Tabelle 7: Versagensmechanismen von axial beanspruchten Schrauben in Anlehnung an (Pöll, 2017)**

Versagensmechanismus	Versagensmaterial
Herausziehen des Gewindes	Holz
Kopfdurchziehen	Holz
Schraubenversagen (Zug und Torsion)	Stahl
Stabilitätsversagen	Stahl
Aufspalten (Applikation und Belastung auf Zug und / oder Abscheren)	Holz
Blockscheren	Holz
Linienischeren	Holz

## 2-3 EINDREHMOMENT

---

Der Einschraubvorgang stellt eine durchaus maßgebende Belastung sowohl für den Holzkörper als auch für die Schraube selbst dar. Während auf den Holzkörper durch den Eindrehvorgang Spaltkräfte durch das verdrängte Holzvolumen wirken, muss die Schraube die Torsionsbelastung aus dem Eindrehmoment aufnehmen können. Durch die Festlegung von entsprechenden Mindestabständen wird ein Aufspalten des Holzkörpers verhindert. Die Schraube muss eine größere Torsionstragfähigkeit als die auftretenden Eindrehmomente aufweisen, um ein Abreißen bzw. Abdrehen beim Applizieren zu verhindern.

Bereits frühe Untersuchungen, wie von Fairchild (1926) oder Newlin und Gahagan (1938), beschäftigten sich mit dem optimalen Vorbohrdurchmesser für unterschiedliche Holzarten. Deren Grundgedanke war allerdings damals nicht die Reduktion des Eindrehmomentes, sondern vielmehr war das Vorbohren notwendig, um ein Aufspalten des Holzes aufgrund der nicht selbstbohrenden Schrauben zu vermeiden. Trotzdem wurde in diesen Untersuchungen bereits die Auswirkung des Vorbohrdurchmessers auf das Eindrehmoment behandelt.

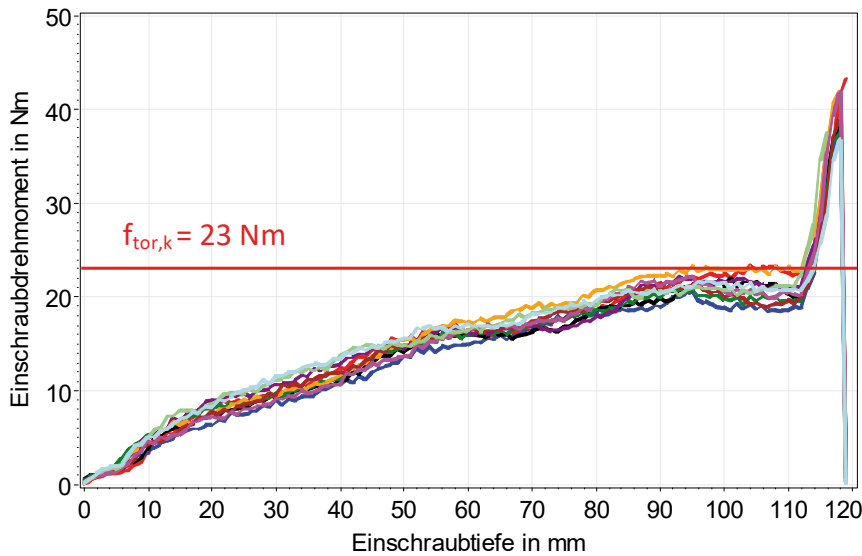
Wie in der Einleitung bereits erwähnt wird, wurden fast alle bisher ausgestellten Europäischen Technischen Bewertungen mit wenigen Ausnahmen nur für Nadelhölzer ausgestellt. Die auch für Laubhölzer zulässigen Bewertungen sind auf ausgewählte Laubholzarten und definierte Rohdichtebereiche begrenzt (Pöll, 2017). Die Einschränkung auf entsprechend geringe Rohdichten war dabei notwendig, da noch keine Bemessungsmodelle für das axiale Tragverhalten von Holzbauschrauben bekannt waren.

Das Eindrehmoment entsteht durch den Bohrwiderstand und der Reibung zwischen dem Holz und der Schraubenoberfläche. Dies führt zu einer Torsionsbeanspruchung der Holzbauschraube, welche in ihrer Größe von der Rohdichte des Holzes, einer eventuellen Vorbohrung, der Oberflächenbeschichtung der Holzbauschraube sowie deren Geometrie (Gewinde, Schaft & Spitze) abhängig ist (Hübner, 2013a).

Durch die im Regelfall höhere Rohdichte von Laubhölzern im Vergleich zu Nadelhölzern ist beim Applizieren der Schraube ein höheres Eindrehmoment zu erwarten. Gleichzeitig resultiert damit auch eine größere Torsionsbelastung des Stahlquerschnittes der Holzbauschraube (Pöll, 2017). Durch die Festlegung in den entsprechenden Bewertungen, dass für eine Applikation in Laubholz zugelassene Schrauben ausschließlich mit Vorbohrung eingesetzt werden dürfen (ÖNORM EN 1995-1-1, 2015), wird das maximal zu erwartende Eindrehmoment auf ein zulässiges Niveau beschränkt. Bei großen Durchmessern treten dennoch erhebliche Widerstände auf (Hübner, 2013a), welche allerdings durch die einhergehenden, deutlich höheren Torsionswiderstände dieser Schrauben im zulässigen Bereich verbleiben.

Die Annahme von Pöll (2017), dass das Eindrehmoment mit der Rohdichte ansteigt, konnte durch seine eigenen, später durchgeführten Untersuchungen auch bestätigt werden.

In Untersuchungen von Meyer (2016) wurde, wie in Abbildung 13 dargestellt, der Verlauf des Einschraubdrehmomentes über die gesamte Länge einer 120 mm langen Teilgewindeschraube mit 80 mm langem Gewinde ( $d = 8$  mm, inkl. Reibenschaft) bei der Applizierung in Buchen-Furnierschichtholz (Buchen-FSH) ermittelt. Es zeigt sich, dass das Einschraubdrehmoment über die Länge des Gewindes immer weiter aufbaut wird und sich nach dem Versenken des Reibenschaftes bei ca. 80 mm degressiv verhält.



**Abbildung 13:** Verlauf des Eindrehmomentes einer Schraube über die Einschraubtiefe (Meyer, 2016)

Das charakteristische Bruchdrehmoment der Schraube  $f_{\text{tor,k}} = 23 \text{ Nm}$  wird bereits vor dem Versenken des Kopfes (schlagartiger Anstieg ab 110 mm Einschraubtiefe) erreicht. Damit ist ein Abdrehen bzw. Abreißen besonders bei noch größeren Einschraubtiefen bereits vor dem Versenken möglich (Meyer, 2016).

Um ein Abdrehen bzw. Abreißen während des Eindrehvorganges zu vermeiden, muss deshalb für Schrauben für die Verwendung in tragenden Holzbauwerken das Verhältnis der charakteristischen Torsionsfestigkeit  $f_{\text{tor,k}}$  zum mittleren Eindrehwiderstand  $M_{\text{tor,mean}}$  entsprechend Gleichung (2.1) laut EAD 130118-00-0603 (2016) eingehalten werden.

$$\frac{f_{\text{tor,k}}}{M_{\text{tor,mean}}} \geq 1,5 \quad (2.1)$$

$f_{\text{tor,k}}$  charakteristische Torsionsfestigkeit der Schraube [Nm]  
 $M_{\text{tor,mean}}$  mittlerer Eindrehwiderstand der Schraube [Nm]

Die charakteristische Torsionsfestigkeit, welche eigentlich ein Bruchdrehmoment darstellt, muss dabei wie in ÖNORM EN ISO 10666 (1999) vorgegeben bestimmt werden. Der charakteristische Wert ist dabei nach ÖNORM EN 14358 (2010) zu ermitteln. Das Eindrehmoment der Schraube in Vollholz oder Brettschichtholz (BSH) ist entsprechend ÖNORM EN 15737 (2009) zu bestimmen, wobei das Eindrehmoment mit dem Faktor entsprechend Gleichung (2.2) anzupassen ist.

$$k_{\rho E} = \frac{480}{\rho} \quad (2.2)$$

$k_{\rho E}$  Korrekturfaktor für das Eindrehmoment [-]  
 $\rho$  Rohdichte der geprüften Probe [ $\text{kg/m}^3$ ]

In der aktuellen Fassung der ÖNORM EN 14592 (2012) wurde der Anhang B, welcher unter anderem die Normen für die Bestimmung des Eindrehwiderstandes beim Eindrehen festlegt, im Rahmen einer Überarbeitung entfernt, weshalb sich aktuell darin keine diesbezüglichen Ausführungen mehr finden (Hübner, 2013a). Aktuell ist die nunmehrige Prüfnorm ÖNORM EN 15737 (2009) in Kombination mit Verweisen aus ÖNORM EN 14592 (2012) zur Bestimmung des Torsionswiderstands gegen das Eindrehen von Schrauben in Holz heranzuziehen.

Neben einer experimentellen Ermittlung der charakteristischen Torsionsfestigkeit kann diese für Schrauben mit symmetrischen Gewindeflanken gemäß Ringhofer (2017), auch wie den nachfolgenden Gl. (2.3) bis (2.5) zu entnehmen ist, berechnet werden.

$$f_{\text{tor,pl,k}} = W_{\text{pl}} \cdot \frac{f_{y,k}}{\sqrt{3}} \quad (2.3)$$

mit

$$W_{\text{pl}} = \left( -\frac{2}{3} \cdot \frac{d_1}{d} + 1,93 \right) \cdot W_{\text{el}} \cdot \lambda^{\frac{-0,2108}{(d_1/d)^{1,7105}}} \quad \text{und} \quad W_{\text{el}} = \frac{d_1^3 \cdot \pi}{16} \quad (2.4)$$

mit

$$\lambda = \left[ \frac{p}{2} - \frac{d}{2} \cdot \left( 1 - \frac{d_1}{d} \right) \cdot \tan\left(\frac{\varphi}{2}\right) \right] \cdot \frac{2}{p} \quad (2.5)$$

$f_{\text{tor,pl,k}}$	charakteristisches plastisches Bruchdrehmoment [Nmm]
$W_{\text{pl}}$	plastisches Torsionswiderstandsmoment [mm <sup>3</sup> ]
$W_{\text{el}}$	elastisches Torsionswiderstandsmoment [mm <sup>3</sup> ]
$f_{y,k}$	charakteristische Streckgrenze [N/mm <sup>2</sup> ]
$d_1$	Gewindekerndurchmesser [mm]
$d$	Nenn- bzw. Außendurchmesser [mm]
$p$	Ganghöhe [mm]
$\varphi$	Flankenneigung [°]

Bereits sehr frühe Untersuchungen von Fairchild (1926) beschäftigten sich mit der optimalen Wahl des erforderlichen Vorbohrdurchmessers aber auch mit der Frage, ob die als Eindrehhilfe verwendete Seife die Ausziehtragfestigkeit verringert. Auch damals war also die Verringerung des Eindrehmomentes bereits von Bedeutung und wurde deshalb an verschiedenen, hauptsächlich in Amerika beheimateten, Holzarten geprüft. Die Verwendung der Seife zur Verringerung des Eindrehmomentes stellt dabei den Ergebnissen zufolge keine Minderung der Tragfähigkeit der Schrauben dar (Fairchild, 1926). Ergebnisse zu einer damit verbundenen Abnahme des Eindrehmomentes werden allerdings nicht angeführt.

Umfangreichere und aktuellere Untersuchungen hinsichtlich des Eindrehmomentes wurden von Pöll (2017) im Zuge von Voruntersuchungen zur Festlegung einer für Laubhölzer optimierten Schraubengeometrie durchgeführt:

In den Versuchen, welche in Brettschichtholz aus Birke durchgeführt wurden, kamen fünf unterschiedliche Schrauben mit verschiedenen geometrischen Merkmalen mit Einschraubwinkeln von 0° und 90° zur Faser zum Einsatz, um deren Auswirkungen auf das Eindrehmoment zu untersuchen. Hinsichtlich des Einschraubmomentes wurde sowohl für 0° als auch bei 90° festgestellt, dass eine größere Ganghöhe  $p$  sowie die Verwendung eines Verdichters zu einem größeren Einschraubdrehmoment führen. Die höheren Eindrehmomente bei steigender Ganghöhe werden dabei mit dem größeren Widerstand bzw. dem schnelleren Eindrehvorgang bei gleichen Drehzahlen begründet. Die Verwendung von Gewindegeometrien mit einem symmetrischen Flankenwinkel führen zu kleineren Eindrehmomenten als sie für einen Schraubentyp mit asymmetrischen Flankenwinkeln beobachtet wurden. Zusätzlich wurde für symmetrische Flankenwinkel und Schrauben ohne Verdichter eine höhere Ausziehtragfähigkeit beobachtet.

Es wurde mit Potenzfunktionen jeweils ein Regressionsmodell für die unterschiedlichen Abhängigkeiten aufgestellt. Dabei zeigt das Eindrehmoment  $M_{\text{max}}$  eine eindeutige Abhängigkeit von der Rohdichte sowie einen signifikanten Zusammenhang mit der Ausziehfestigkeit  $f_{\text{ax}}$ .

Nachfolgende umfangreiche Prüfungen von Buche und BauBuche mit Einschraubwinkeln von ebenfalls 0° und 90° hinsichtlich dem Zusammenhang des Eindrehmomentes mit der Rohdichte liefern ein ähnliches Bild (Pöll, 2017).

Tabelle 8 zeigt die Potenzfaktoren für die Zusammenhänge der Eindrehmomente mit der Rohdichte und den Ausziehfestigkeiten:

**Tabelle 8: Potenzfaktoren und Bestimmtheitsmaße für die Abhängigkeiten des Eindrehmomentes (Pöll, 2017)**

$\alpha$	Beziehung	Buche-VH		BauBuche		Birke	
		Potenz	$r^2$	Potenz	$r^2$	Potenz	$r^2$
0°	$M_{\max}$ vs. $\rho_{12}$	1,83–1,98	0,73–0,78	–	–	–	–
	$f_{ax}$ vs. $M_{\max}$	0,87–0,94	0,71–0,81	–	–	0,47–0,88	0,36–0,77
90°	$M_{\max}$ vs. $\rho_{12}$	1,90–1,95	0,86–0,91	1,74–2,35	0,15–0,24	1,53–3,02	0,34–0,68
	$f_{ax}$ vs. $M_{\max}$	0,78–0,85	0,69–0,83	0,46–0,63	0,34–0,36	0,46–0,62	0,54–0,75

Den Ausführungen von Pöll (2017) zufolge sind für einen Einschraubwinkel von 0° bei BauBuche und Birke keine signifikanten Einflüsse der Rohdichte auf die Eindrehmomente zu erkennen. Dies kann auch daran liegen, dass der geprüfte Rohdichtebereich nicht sehr groß war. Quer zur Faser können durchaus Einflüsse erkannt werden, wobei auch für einen einzelnen Schraubentyp bei den Prüfungen mit Birke kein signifikanter Einfluss mit zufriedenstellendem Bestimmtheitsmaß festgestellt werden kann. Der Zusammenhang der Ausziehfestigkeit mit dem Eindrehmoment ist für 0° und 90° ähnlich stark ausgeprägt.

Für die Bestimmung der Potenzfaktoren bei Buche und BauBuche wurden drei verschiedene Schraubentypen untersucht. Für BauBuche ist es aufgrund des sehr homogenen Materials und den damit verbundenen geringen und unregelmäßigen Streuungen, vor allem für Einschraubwinkel von 0°, sehr schwierig, Potenzparameter mit zufriedenstellenden Bestimmtheitsmaßen anzugeben. Die Potenzparameter der Buche liegen für die Abhängigkeiten bei 0° und 90° in etwa auf demselben Niveau.

Im Rahmen der Arbeit von Uibel (2012) wurde der Verlauf der Spaltkräfte während des Einschraubvorganges ermittelt. Dabei wurden das Einschraubdrehmoment und die Einschraubtiefe während des Einschraubens kontinuierlich gemessen. Leider wurde allerdings keine Auswertung der gemessenen Eindrehmomente vorgenommen bzw. publiziert.

Wie Meyer (2016) berichtet, wird auch am Karlsruher Institut für Technologie im Speziellen an der Entwicklung von Schrauben für Laubhölzer, welche ohne Vorbohrung und gleichzeitiger Reduzierung des Einschraubdrehmomentes appliziert werden können, geforscht. Zusätzlich wird speziell für Laubhölzer hervorgehoben, dass bereits bei vergleichsweise geringen Einschraubtiefen die Tragfähigkeit der Schrauben erreicht werden kann. Durch die damit verbundenen geringeren erforderlichen Einschraubtiefen ist auch bereits wieder ein deutlich kleineres Einschraubdrehmoment zu erwarten. Ein Abreißen der Schraube wird somit verhindert und die Einhaltung des für die Ausstellung einer ETA notwendigen Verhältnisses von  $f_{tor,k}/M_{tor,mean} \geq 1,5$  erleichtert. Allerdings liegen dem Verfasser derzeit noch keine Ergebnisse dieser Forschungen vor. Auch sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass neben einer Tragfähigkeitssteigerung auch andere Gründe für eine tiefere Verschraubung vorliegen können (z. B. Querzug- oder Auflagerverstärkungen).

## 2-4 AUSZIEHWIDERSTAND

Aufgrund der in der Praxis hauptsächlich anzutreffenden axialen Beanspruchung ist das Ausziehpotenzial von Schrauben die maßgebende holztechnologische Kenngröße derartiger Verbindungsmittel (Schickhofer et al., 2007).

Grundsätzlich muss der Ausziehvorgang von Holzbauschrauben dabei als eine Interaktion des Holzkörpers mit der darin verankerten Schraube gesehen werden. Das Ausziehversagen der Schraube, bei Erreichen des maximalen Auszieh Widerstandes, wird dabei als lokales Versagen des umgebenden Holzes angesehen (Ringhofer, 2017). Dieser Versagensmechanismus stellt dabei, wie der Tabelle 7 zu entnehmen



ist, nur einen von mehreren möglichen Versagensfällen dar. Im Rahmen dieser Arbeit kommt es allerdings nur zur genaueren Beleuchtung des Auszieh Widerstandes bei Laubhölzern.

Während in ÖNORM EN 14592 (2012) und ÖNORM EN 1382 (2016) (beides für die Prüfung des Ausziehpotenziales relevante Normen) vom sogenannten Ausziehparameter gesprochen wird, kommt häufig in der Literatur und auch in dieser Arbeit, eine abweichende Bezeichnung und Definition für die mechanische Kenngröße des Auszieh Widerstandes zum Gebrauch – die Ausziehfestigkeit. Der Unterschied der beiden Kenngrößen liegt in der Berechnung. Für den Ausziehparameter wird als Bezugsfläche die Projektionsfläche der Schraube herangezogen, während für die Berechnung der Ausziehfestigkeit die Mantelfläche als Bezugsfläche zum Einsatz kommt, siehe Gleichung (2.6) (Schickhofer et al., 2007).

$$f_{ax} = \frac{F_{max}}{d \cdot \pi \cdot l_{ef}} \quad (2.6)$$

$f_{ax}$	Wert der Ausziehfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
$F_{max}$	maximale Ausziehkraft [N]
$d$	Nenn Durchmesser bzw. Gewindeaußendurchmesser der Schraube [mm]
$l_{ef}$	effektive Verankerungslänge des Gewindes [mm]

Die Ermittlung der maximal ertragbaren Last von axial beanspruchten Holzbauschrauben für baustatische Berechnungen kann über die ÖNORM EN 1995-1-1 (2015), eine für die jeweilige Schraube ausgestellte ETA oder auf Basis von Handbüchern, welche den Stand der Technik wiedergeben, erfolgen. Ergänzend muss allerdings angemerkt werden, dass nicht nur die maximal ertragbare Last, sondern auch die Verbundsteifigkeit  $K_{ser,ax}$  sowie die Duktilität  $D$  der Verbindung notwendig sind, um eine solche vollständig zu charakterisieren. Alle drei Kennwerte werden dabei signifikant von den Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften des Holzes beeinflusst, konnten allerdings trotzdem bisher in noch keinem Modell mit den lokalen "clear-wood"-Eigenschaften schlüssig in Verbindung gebracht werden (Ringhofer, 2017).

Die Beschreibung des axialen Tragverhaltens von Holzbauschrauben erfolgt heutzutage vorwiegend durch die Bestimmung von empirischen Regressionsmodellen (Ringhofer et al., 2014a). Diese beinhalten in der Regel einige wenige Einflussparameter, wie etwa den Schraubendurchmesser, die Verankerungslänge, die Rohdichte des Holzes und den Einschraubwinkel zwischen Schraubenachse und Faserrichtung.

Nach ÖNORM EN 1995-1-1 (2015) sind für die Ermittlung des charakteristischen Auszieh Widerstandes für eine Schraube (Ausziehkraft) nach Gleichung (2.7) die folgenden Bedingungen einzuhalten:

- $\alpha \geq 30^\circ$
- $6 \text{ mm} \leq d \leq 12 \text{ mm}$
- $0,6 \leq d_1/d \leq 0,75$
- $l_{ef} \geq 6 d$
- $t \geq 12 d$  & Einhaltung der Rand- und Mindestabstände

$$F_{ax,\alpha,Rk} = \frac{f_{ax,k} \cdot d \cdot l_{ef} \cdot k_d}{1,2 \cdot \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha} \quad (2.7)$$

mit

$$f_{ax,k} = 0,52 \cdot d^{-0,5} \cdot l_{ef}^{-0,1} \cdot \rho_k^{0,8} \quad \text{und} \quad k_d = \min \left\{ \frac{d}{8}; 1 \right\} \quad (2.8)$$

$F_{ax,\alpha,Rk}$	charakteristischer Wert der Ausziehkraft [N]
$f_{ax,k}$	charakteristischer Wert der Ausziehfestigkeit rechtwinkelig zur Faserrichtung [N/mm <sup>2</sup> ]
$d$	Nenn Durchmesser bzw. Gewindeaußendurchmesser der Schraube [mm]
$l_{ef}$	effektive Verankerungslänge des Gewindes [mm]
$k_d$	Faktor zur Berücksichtigung eines zusätzlichen Durchmesser einflusses [-]
$\alpha$	Winkel zwischen der Schraubenachse und der Faserrichtung [°]
$\rho_k$	charakteristischer Wert der Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]

Neben der nicht mehr gültigen DIN 1052 (2008) basieren auch in den aktuellen Fassungen der SIA 265 (2012) und der ÖNORM EN 1995-1-1 (2015) die Modelle zur Berechnung des Auszieh widerstandes auf Untersuchungen in Nadelholz (Hübner, 2013a). In der alten deutschen Norm ist dabei zusätzlich die charakteristische Rohdichte auf  $500 \text{ kg/m}^3$  beschränkt. Für die Bemessungsmodelle in der schweizer und europäischen Norm finden sich hingegen keine Grenzen der charakteristischen Rohdichten. Separate Bemessungsmodelle für die Berechnung des Auszieh widerstands von Holzbauschrauben in Laubholz sind in keiner der drei angeführten Normen zu finden.

Im amerikanischen Raum führten Autoren bereits Anfang des 20. Jahrhunderts Untersuchungen zum Auszieh widerstand von Holzbauschrauben in Laubhölzern durch. Infolge der Weiterentwicklung zu selbstbohrenden Holzbauschrauben revolutionierte sich die Verbindungsmitteltechnik mit Schrauben vor allem für die Anwendung in Nadelhölzern um die Jahrtausendwende. In zahlreichen Publikationen zum Auszieh widerstand wurde seither das Verhalten von Holzbauschrauben in Nadelhölzern beschrieben. Untersuchungen zum Auszieh widerstand von Holzbauschrauben in Laubhölzern wurden hingegen nur vereinzelt durchgeführt (Hübner, 2013a).

In Untersuchungen von Eckelman (1975), Jablonkay (1999) und Schneider (1999) wird zum Beispiel auf die Leistungsfähigkeit von Holzbauschrauben in Laubhölzern hingewiesen (Hübner, 2013b). Allerdings wurden meist nur wenige Holzarten, Schraubendurchmesser und Einschraubwinkel untersucht. Außerdem kamen bei den Prüfungen nur selten moderne Holzbauschrauben, wie man sie heute kennt, zum Einsatz. Somit fehlte lange Zeit ein vollständiges Modell, welches das Tragverhalten bzw. die Auszieh festigkeit von Holzbauschrauben in Laubholz beschreibt. Erst durch umfangreiche Prüfungen von Hübner (2013a) war es möglich, ein Regressionsmodell für die Auszieh festigkeit bzw. Auszieh tragfähigkeit von Schrauben in Laubhölzern zu erstellen; basierend auf Untersuchungen an drei ausgewählten Hartlaubholzarten. Die Untersuchungen umfassten hauptsächlich Prüfungen in ringporiger Esche, welche mit Prüfdaten von zerstreutporiger Buche und ringporiger Robinie ergänzt wurden. Dadurch konnte die Auszieh festigkeit von modernen Holzbauschrauben in unterschiedlichen anatomischen Holzgruppen mit verschiedenen Rohdichtebereichen erstmals zufriedenstellend erfasst werden.

Nachfolgend wird zuerst der Versagensmechanismus von Holzbauschrauben beim Auszieh vorgang beschrieben. Danach werden die im Rahmen dieser Arbeit näher betrachteten Einflüsse auf die Auszieh tragfähigkeit diskutiert, ehe eine Zusammenfassung von verschiedenen Auszieh modellen sowie eine Übersicht der unterschiedlichen Einflussparameter den Abschluss in diesem Unterkapitel bilden.

## 2-4.1 VERSAGENSMECHANISMUS

Um sich den Versagensmechanismus des die Schraube umgebenden Holzes bei Erreichen des maximalen Auszieh potenzials besser vorstellen zu können, wurden dazu von Ringhofer (2017) entsprechende Untersuchungen durchgeführt. Dabei wurden die Probekörper vor der Prüfung aufgetrennt, anschließend zusammengeklemt und, um eine exakte Führung der Schraube in der Trennfuge der beiden Holzhälften zu erreichen, vorgebohrt. Die anschließend in der Vorbohrung applizierte Schraube wurde einer Auszieh prüfung unterzogen, welche sofort nach Erreichen der Maximalkraft abgebrochen wurde. Die Holzhälften wurden wieder auseinandergenommen und eingescannt (siehe Abbildung 14). Der Versagensmechanismus, welcher durch die Einwirkungen der Schraube auf das Holz wirksam wird, kann dadurch sichtbar gemacht werden (Ringhofer, 2017).

Vereinfachend kann dabei von den beiden Grenzfällen mit Achs-Faserwinkeln  $\alpha$  von  $0^\circ$  und  $90^\circ$  ausgegangen werden. Allerdings wäre aufgrund der orthotropen Materialeigenschaften auch eine Unterscheidung hinsichtlich radialer und tangentialer Einschraubrichtung notwendig, auf welche an dieser Stelle verzichtet wird.

Das erreichbare Auszieh potenzial wird dabei je nach Einschraubwinkel von ganz unterschiedlichen Versagensbildern bestimmt. Die nachfolgenden Modellvorstellungen entstammen den Arbeiten von Hübner (2013a), Hübner (2013b) und Ringhofer (2017).



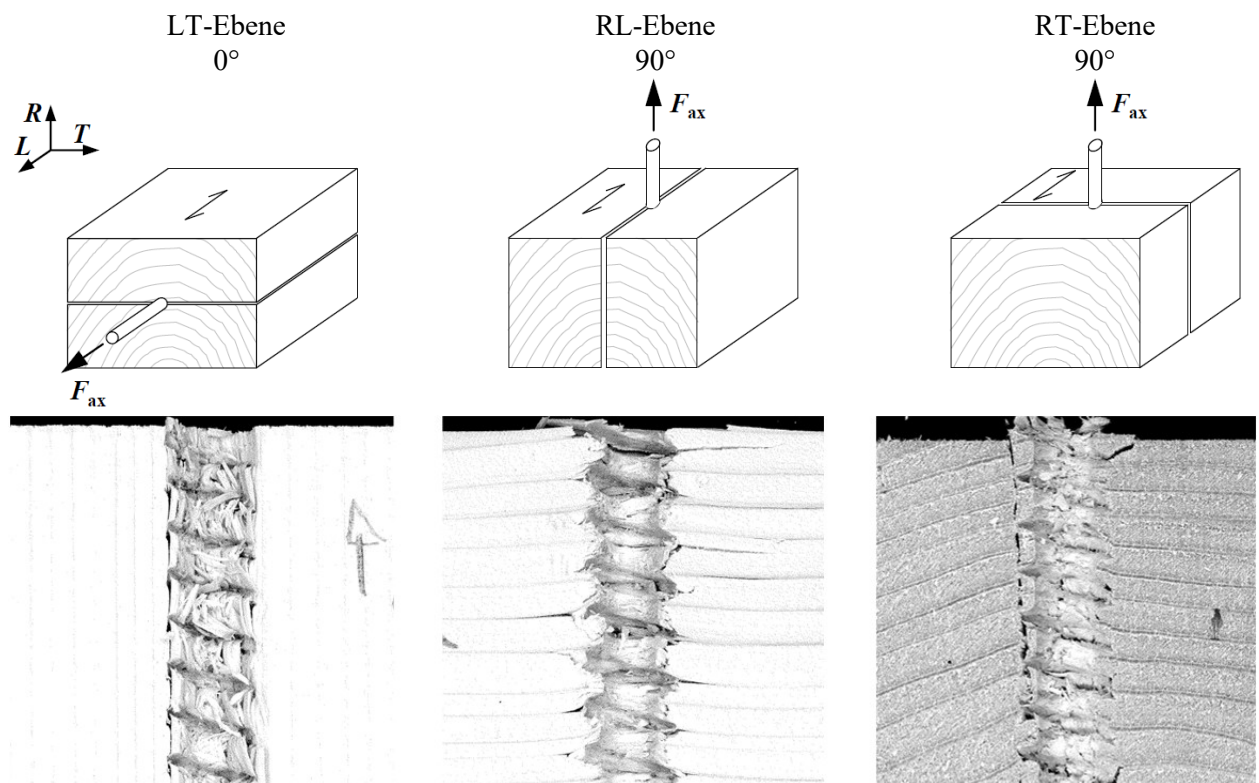


Abbildung 14: Schematische Darstellung der Schnittebenen zur Beschreibung des Ausziehversagens in Fichte; links: LT-Ebene; mittig: RL-Ebene; rechts: RT-Ebene; in Anlehnung an (Ringhofer, 2017)

### 0° zur Faser

Für Holzbauschrauben, welche parallel zur Faserrichtung eingebracht und mit einer axialen Last bis zum Versagen belastet werden, sind die Schubfestigkeiten in LR- ( $f_{v,LR}$ ) und in LT-Richtung ( $f_{v,LT}$ ) jene Materialkenngrößen, mit denen am ehesten der Versagensmechanismus beschrieben werden kann. Es zeigt sich eine Rissausbildung parallel zur Schraubenachse im Übergangsbereich des Gewindes zum umgebenden Holz. Das die Schraube umgebende Holz bleibt allem Anschein nach unbeschädigt, während jenes zwischen den Gewindeflanken große Deformationen aufweist. Zusätzlich tritt durch die Kraftübertragung von der Schraube auf das Holz eine Querbelastung auf, welche allerdings durch die Wahl von entsprechenden Randabständen ohne Probleme aufgenommen werden kann. Demzufolge würde die Rohdichte keinen unmittelbaren Einfluss auf den Ausziehversagen zeigen. Die Schubfestigkeit in den verschiedenen Ebenen und die dazugehörigen Schubmoduln würden die Ausziehfestigkeit demnach sehr wohl beeinflussen (vgl. Kapitel 2-4.3).

### 90° zur Faser

Durch die Dehnung einer auf Zug beanspruchten, radial eingeschraubten und belasteten Holzbauschraube treten theoretisch im Bereich der ersten, der Oberseite zugewandten, Gewindegänge im Holz Risse in der LT-Ebene aufgrund von Quersugversagen auf. Tatsächlich zeigt sich in Untersuchungen allerdings bereits zu Beginn ein zufälliges Auftreten dieser Risse entlang der gesamten Schraubenachse in der genannten Ebene. Bei weiterem Anstieg der Zugkraft nimmt die Dehnung der Schraube zu und die Risse im oberen Bereich der Einschraublänge werden größer, während sich in tieferen Bereichen neue Risse in der LT-Ebene ausbilden. Durch den nachgiebigen Verbund der Schraube mit dem Holz kann sich die Zugkraft in der Schraube über die Einschraublänge nahezu gleichmäßig verteilen. Die temporär entstehenden Spannungsspitzen werden durch Quersug- oder Schubrisse abgebaut.

Die longitudinalen Fasern werden durch den Schraubenkern unterbrochen. Die zwischen den Gewindegängen eingreifenden Kragsscheiben (aus Faserbündeln) und die neben den Gewindekern durchlaufenden

Fasern werden in Krafrichtung aufgebogen. Die Gewindespitzen induzieren quer zur Faserrichtung Querdruck- ( $\sigma_{c,90}$ ) und Schubbeanspruchung ( $\tau_{v,RT}$  und  $\tau_{v,RL}$ ).

Aufgrund der Steifigkeitsverteilung der Schubmoduln kommt es zu einem größeren übertragenen Kraftanteil in longitudinaler Richtung als quer zur Faser (Rollschub). Der Ausziehverhalten bei einem Einschraubwinkel von  $90^\circ$  zur Faserrichtung setzt sich aus mehreren unterschiedlichen Faktoren zusammen: Die maximale Ausziehungskraft im Versagensfall ist das Produkt aus Schubbrissen in Faserrichtung aufgrund der Biegung von Faserbündeln, Rollschub, Querdruck- und Querkraftbeanspruchung. Eine offensichtliche Zuordnung des Versagensmechanismus zu einer einzigen mechanischen Kenngröße, wie dies bei  $0^\circ$  zur Faser möglich erscheint, ist in diesem Fall nicht mehr gegeben.

## 2-4.2 MODELLE AUSZIEHVERHALTEN

### Bemessungsmodelle

Die empirischen Bemessungsmodelle, welche das Ergebnis von Regressionsanalysen darstellen, sollen das Ausziehverhalten für die gewünschten Randbedingungen bestmöglich abbilden. Als Randbedingungen gelten dabei unter anderem die Gewinde- und Schraubengeometrie der Holzbauschraube, die Holzarten und der Zerlegungsgrad, die Umgebungsbedingungen, die Beanspruchungssituation sowie die geometrischen Abmessungen und der Winkel der Verbindung von Schraube und Holz (Ringhofer, 2017). Dabei wird je nach Bemessungsmodell entweder der zulässige Einsatzbereich entsprechend eingegrenzt oder wenn notwendig werden Korrekturfaktoren eingeführt, um somit den Anwendungsbereich zu erweitern.

In Hinblick auf die Ausziehfestigkeit, gibt es besonders erwähnenswerte empirische Regressionsmodelle (vier bzw. fünf für Nadelhölzer und eines für Laubhölzer), deren Modellgrenzen in Tabelle 9 zusammengefasst sind.

**Tabelle 9: Modellgrenzen und Prüfumfang von modernen Modellen zur Berechnung der Ausziehfestigkeit  $f_{ax}$**

Quelle	Modellgrenzen			Prüfumfang		
	$\alpha$ [°]	Holzart [-]	Produkt [-]	$\rho_{12}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$d$ [mm]	$l_{ef}$ [mm]
Bejtka (2005)	0–90	Fichte	VH	320–560	6–12	4 $d$
Blaß et al. (2006)	0–90	Fichte	VH	320–560	6–12	4 $d$
Frese et al. (2010)	$\geq 45$	Nadelholz	VH (Annahme)	325–602	4–14	18,8–140
Pirnbacher et al. (2009)	0 & 90	Fichte	VH, BSH	340–600	8–12	4 $d$ –15 $d$
Ringhofer (2017)	0–90	Fichte	VH, BSH, BSP	310–621	4–12	2,5 $d$ –15 $d$
Hübner (2013a)	0–90	Buche, Esche Robinie	VH, BSH	575–905	4–20	4 $d$ –7 $d$

Das Modell von Blaß et al. (2006), welches als eines der ersten speziell für selbstbohrende Schrauben gilt (Ringhofer, 2017), bildet auch die Grundlage für die Berechnung der Ausziehfestigkeit nach ÖNORM EN 1995-1-1 (2015).

Die unterschiedlichen Einflussparameter und deren Auswirkungen für die erwähnten Modelle zur Bestimmung der Ausziehfestigkeit sind in der Arbeit von Pöll (2017) zu finden.

## **Modell zur Beschreibung des Ausziehverhaltens**

Die folgenden Ausführungen in diesem Abschnitt entstammen der Publikation von Brandner et al. (2017 (in print)), welche das Ausziehverhalten von einzelnen selbstbohrenden Holzschrauben in den Schmalseiten von BSP thematisiert.

Um das Tragverhalten und die Tragfähigkeit von Systemverbindern und Gruppen von Verbindungsmitteln, bei denen einzelne Verbindungsmittel zusammenwirken, optimieren zu können, ist die Kenntnis der Last-Verformungscharakteristik, der Variabilität sowie der möglichen bzw. erzielbaren Arbeitsausführung für die Einzelelemente notwendig. Obwohl für einige Verbindungsmittel (z. B. Stabdübel) bereits seit längerer Zeit entsprechende probabilistische Modelle zur Verfügung stehen, beschreibt das Modell nach Brandner et al. (2017 (in print)) erstmals das Last-Verformungsverhalten für axial belastete selbstbohrende Holzbauschrauben. In den bisherigen Modellen, definiert für primär auf Abscheren beanspruchte Verbindungsmittel (bereits bekannt seit Mitte der 80er Jahre), wird von einem plastischen Fließplateau ab dem Erreichen der Maximalkraft ausgegangen. Im Modell von Brandner et al. (2017 (in print)) wird zusätzlich die bei Prüfungen beobachtete nichtlineare Entfestigung (Kraftabfall) nach dem Erreichen der Maximallast berücksichtigt; dies war in den bisherigen Modellen nicht der Fall.

Das von Brandner et al. (2017 (in print)) entwickelte Modell setzt dabei grundsätzlich auf jenem von Glos (1978) zur Beschreibung von Druckbeanspruchung in Faserrichtung bei Brettschichtholz auf. Letzteres, bestehend aus fünf Parametern, beschreibt das bei dieser Beanspruchung beobachtbare linear-nichtlineare Last-Verformungsverhalten. Die Anfangssteifigkeit  $K_{\text{ser}}$ , die Maximallast  $F_{\text{max}}$  und die zugehörige Verformung  $w_f$  sowie die verbleibende Endfestigkeit  $F_{\text{asym}}$  (für  $w \rightarrow \infty$ ) und ein Formfaktor  $c$  bilden die Grundlage für die Beschreibung der Last-Verformungskurve nach Glos (1978). Im Modell nach Brandner et al. (2017 (in print)) wurden folgende wichtige Änderungen bzw. Ergänzungen eingeführt:

- $F_{\text{asym}} = 0$ , da bei unendlicher Verformung (Ausziehen) der axial beanspruchten Schraube keine Restkraft verbleiben kann;
- Einführung einer horizontalen Anfangsverformung  $\Delta w_{\text{ini}}$  (mit  $F_{\text{ini}} = 0$  N), um das bei Prüfungen beobachtbare nichtlineare Verbundverhalten von Schraube und Holz bei geringen Belastungen abbilden zu können;
- definierter linear-elastischer Bereich, im Gegensatz zu Glos mit Ausmaß  $> 0$ ;
- Bestimmung der Steifigkeit  $K_{\text{ser}}$  auf Basis eines konstanten Quotienten aus Kraftänderung und lokaler Wegänderung der Schraube anstatt Verwendung der Anfangssteifigkeit oder Steifigkeit lt. ÖNORM EN 26891 (1991)
- Auswertung und Prüfung bis zu einem Kraftabfall auf 75% von  $F_{\text{max}}$  mit  $w > w_f$

Anmerkung: Für den Begriff der Steifigkeit wird in den obigen Betrachtungen und auch für die weiteren Ausführungen in dieser Arbeit die Verbundsteifigkeiten des im Holz eingebetteten Verbindungsmittels verstanden, sofern nicht anders angegeben. Die Bezeichnung davon erfolgt mit  $K_{\text{ser,ax}}$  bzw. kurz als  $K_{\text{ser}}$ .

Wie in Abbildung 15 ersichtlich ist, ergibt sich dadurch die folgende Last-Verformungscharakteristik für das Ausziehverhalten von axial belasteten selbstbohrenden Schrauben.

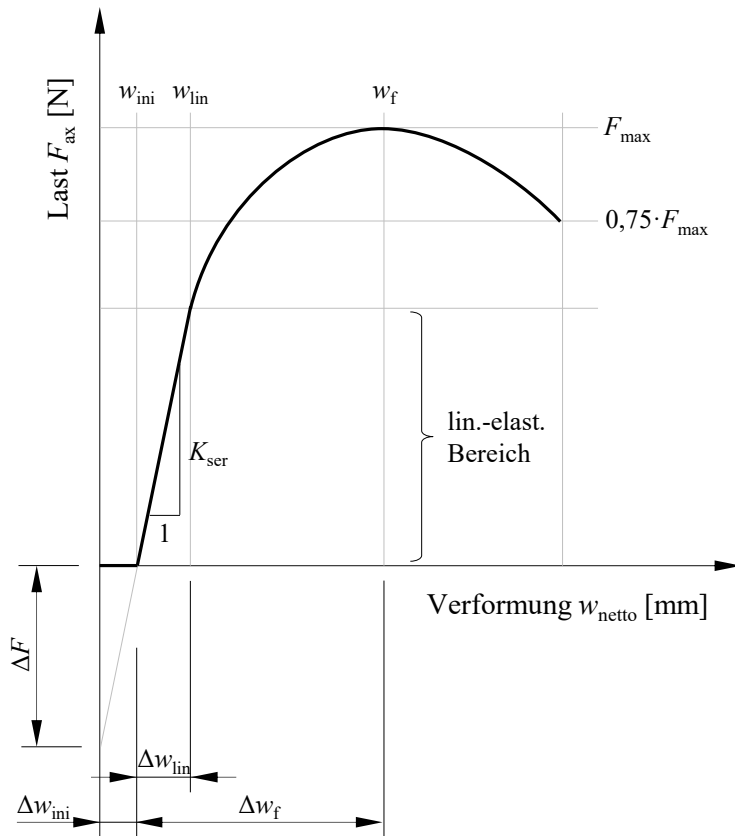


Abbildung 15: Last-Verformungsverhalten einer einzelnen selbstbohrenden Holzbauschrauben in Anlehnung an (Brandner et al., 2017 (in print))

In den Gleichungen (2.9) bis (2.11) sind die Formeln zur Bestimmung der Modellparameter bzw. zur Beschreibung des Last-Verformungsverhaltens von auf Herausziehen belasteten Holzbauschrauben angegeben. Die Ausziehkraft wird bestimmt durch

$$F_{ax}(w) = \begin{cases} 0 & w \leq w_{ini} \\ K_{ser} \cdot w + \Delta F & w_{ini} \leq w \leq w_{lin} \\ \frac{w_x}{(k_1 + k_2 \cdot w_x + k_3 \cdot w_x^c)} + (K_{ser} \cdot w_{lin} + \Delta F) & w \geq w_{lin} \end{cases} \quad (2.9)$$

mit

$$\begin{aligned} w_x &= w - w_{lin} \\ \Delta F &= -K_{ser} \cdot w_{ini} \end{aligned} \quad (2.10)$$

und den Parametern

$$\begin{aligned} k_1 &= \frac{1}{K_{ser}} \\ k_2 &= \frac{1}{F_{max} - (K_{ser} \cdot w_{lin} + \Delta F)} - \frac{c}{(c-1) \cdot K_{ser} \cdot (w_f - w_{lin})} \\ k_3 &= \frac{1}{(c-1) \cdot K_{ser} \cdot (w_f - w_{lin})^c} \end{aligned} \quad (2.11)$$

Nach der Bestimmung der einzelnen Modellparameter für jeden Ausziehversuch können diese statistisch ausgewertet werden (Brandner et al., 2017 (in print)). So werden die Mittelwerte, Mediane, Minima und Maxima der Parameter  $\{F_{\max}, K_{\text{ser}}, \Delta w_{\text{lin}}, \Delta w_{\text{f}} \text{ und } c\}$  zum Beispiel in Brandner et al. (2017 (in print)) für jeden Einschraubwinkel einzeln betrachtet. Außerdem werden die Potenzfaktoren für die Abhängigkeit jedes Parameters von der Rohdichte bestimmt.

Zusätzlich werden Korrelationsmatrizen für jeden Winkel aufgestellt, in denen für die Parameter  $X = (\rho_{12}, F_{\max}, K_{\text{ser}}, c, \Delta w_{\text{lin}}, \Delta w_{\text{f}})$  die jeweiligen Korrelationskoeffizienten eingetragen werden. Die Berechnung der Korrelationskoeffizienten (nach Pearson) erfolgt dabei, unter der Annahme einer Lognormalverteilung (siehe 3-3.2), für die logarithmierten Daten. Diese werden in weiterer Folge auf signifikante Unterschiede untersucht und auf Plausibilität geprüft, um schlussendlich die verbleibenden Korrelationskoeffizienten zu mitteln und eine positiv definite Korrelationsmatrix zu erhalten.

Durch Ermittlung der Hauptstatistiken, Verteilungsmodelle und Korrelationskoeffizienten für die Modellparameter sowie Beschreibung des Einflusses vom Winkel ist es möglich, einen multivariaten Ansatz zu wählen, welcher eine komplette stochastische Charakterisierung der Einzelschraube ermöglicht (Brandner et al., 2017 (in print)).

Anmerkung: Eine Vorstellung dieses Modells erfolgt an dieser Stelle, da es später verwendet wird, um das Ausziehverhalten für die verschiedenen Holzarten bzw. holzanatomischen Gruppen zu beschreiben. Das Modell wird dabei so angepasst, dass die aus den Prüfungen ermittelten Kraft- und Wegdaten bestmöglich wiedergegeben werden. In weiterer Folge werden die Korrelationsmatrizen für die Modellparameter der verschiedenen holzanatomischen Gruppen erstellt. Somit können mögliche Unterschiede in der gegenseitigen Abhängigkeit der Parameter bzw. im Last-Verformungsverhalten ermittelt werden.

## 2-4.3 EINFLÜSSE AUF DIE AUSZIEHKENNGRÖSSEN

Ein Großteil der Publikationen, welche sich mit den Ausziehkenngößen von Holzbauschrauben befassen, ist den Nadelhölzern gewidmet. Nur in wenigen Arbeiten wird auf die Ausziehkenngößen von Holzbauschrauben für tragende Bauteile aus Laubholz Bezug genommen. In diesem Abschnitt werden die für den Auszieh widerstand (bzw. für die Verbundsteifigkeit der im Holz eingebetteten Holzbauschraube) relevanten und in dieser Arbeit behandelten Einflüsse auf diese Kennwerte erläutert und zusammengefasst. Dabei wird vor allem der Auszieh widerstand von Holzbauschrauben in Laubholz in einem Durchmesserbereich, welcher im Bauwesen Anwendung findet, betrachtet. Die Ergebnisse von mehreren, oftmals älteren Arbeiten beziehen sich häufig auf Schrauben, welche im Möbelbau eingesetzt werden. Der Schwerpunkt der betrachteten Forschungsarbeiten liegt dabei, falls vorhanden, auf Prüfungen von modernen Schrauben. Von deren Verwendung kann laut Ringhofer (2017) bei Publikation ab dem Jahr 2000 ausgegangen werden.

Die Abbildung 16 zeigt einen Überblick der zahlreichen Einflussparameter auf die Ausziehfestigkeit von Holzbauschrauben (die Reihenfolge der Parameter stellt keine Reihung bzgl. deren Einfluss dar).

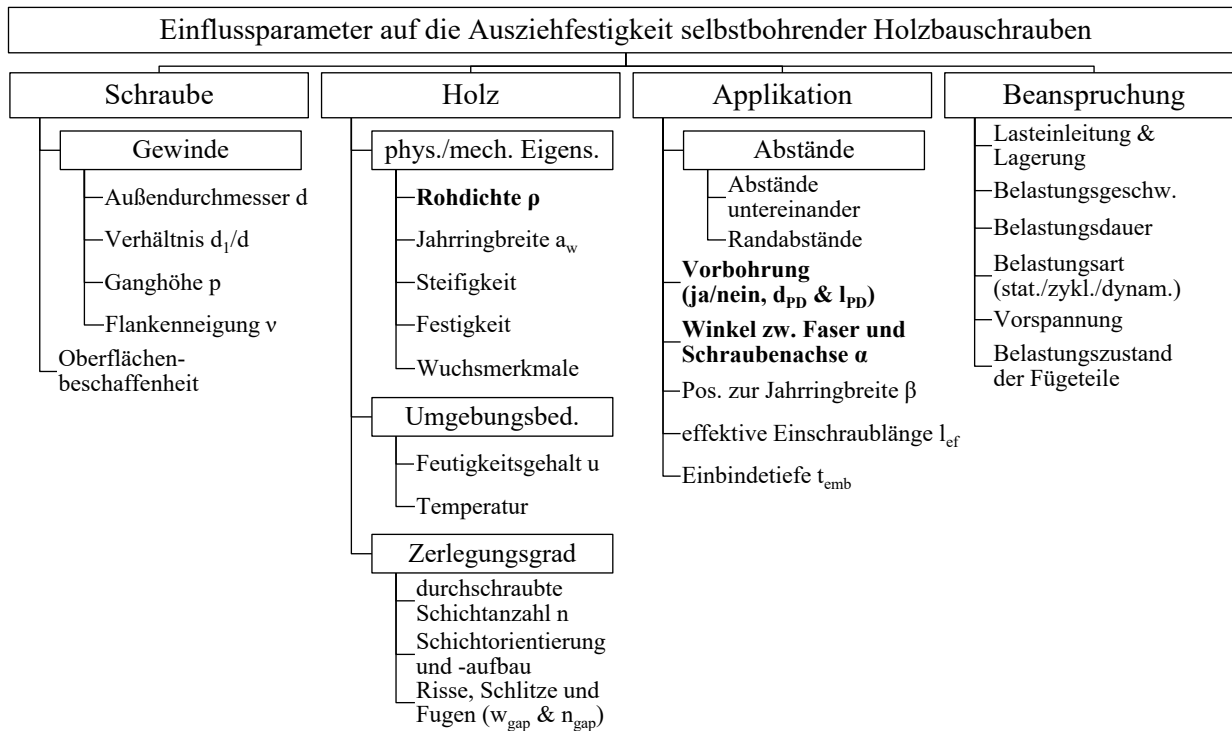


Abbildung 16: Überblick der Einflussparameter auf die Ausziehfestigkeit, in Anlehnung an (Ringhofer, 2017)

## Rohdichte

Grundsätzlich gilt für die Festigkeit von Holz, dass diese wesentlich von der Rohdichte beeinflusst wird. Besonders für „merkmalsfreies Holz“ („clear-wood“) gilt dieser Zusammenhang noch stärker (hohe Korrelationskoeffizienten) als für Holz in Bauteilabmessungen. Je größer die Rohdichte, umso größer sind im Regelfall die einzelnen Festigkeiten (Schickhofer, 2007).

Sowohl in der Normung als auch in den meisten weiteren Modellen zur Bestimmung des charakteristischen Auszieh Widerstandes ist die Rohdichte des Holzes oft der einzige holzseitige Einflussfaktor (Blaß, 2007). Das liegt laut Ringhofer (2017) daran, dass die Rohdichte einerseits vergleichsweise leicht zu ermitteln ist und andererseits auch eine signifikant positive Korrelation zwischen Rohdichte und den mechanischen Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften feststellbar ist. Folglich wird auch der Wert der Ausziehfestigkeit  $f_{ax}$  (sowie unter Umständen auch die Verbindungsmittelsteifigkeit  $K_{ser,ax}$ ) von axial belasteten Schrauben auf Basis der Rohdichte des Holzes, welche die mechanischen Eigenschaften repräsentiert, bestimmt.

Der Rohdichteeinfluss auf die Ausziehfestigkeit wird dabei in den meisten Fällen mittels eines Exponenten einer Potenzfunktion für die Rohdichte beschrieben (siehe Gleichungen (2.12) bis (2.19)). Wie aus der folgenden Literaturrecherche hervorgeht, nimmt dieser Faktor je nach Quelle dabei Werte größer, kleiner oder exakt 1,0 an.

In Untersuchungen von Newlin und Gahagan (1938) wurde unter anderem der Einfluss des Durchmessers und der Rohdichte auf die Ausziehfestigkeit je Eindrehlänge für eine Referenzlänge von einem Zoll ermittelt (25,4 mm). Unter den untersuchten Holzarten waren mit Amerikanischer Weiß-Eiche (*Quercus alba* L.,  $\rho_0 = 683 \text{ kg/m}^3$ , Laubholz (LH) ringporig), Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* (Mirbel) Franco,  $\rho_0 = 477 \text{ kg/m}^3$ , Nadelholz (NH)), Redwood (*Sequoia sempervirens* Endl.,  $\rho_0 = 419 \text{ kg/m}^3$ , NH), Weymouths-Kiefer (*Pinus strobus* L.,  $\rho_0 = 404 \text{ kg/m}^3$ , NH) und Gelbkiefer (*Pinus palustris* Mill.,  $\rho_0 = 601 \text{ kg/m}^3$ , NH) vier Nadelholzarten und eine Laubholzart. Als Schrauben kamen sogenannte „lag screws“ zum Einsatz. Diese traditionellen Holzbauschrauben verfügen über ein Teilgewinde über zwei



Drittel der Gesamtlänge sowie einem Schaftdurchmesser, welcher dem Gewindeaußendurchmesser entspricht. Grundsätzlich sind diese mit der heutigen DIN-Schraube vergleichbaren “lag screws“ mit einem Vier- oder Sechskantkopf ausgebildet. Die Durchmesser der Schrauben für die Prüfungen reichten von 7,94 mm bis 25,4 mm und es wurde entsprechend der jeweiligen Prüfserie mit verschiedenen Durchmessern vorgebohrt. Für die Auswertung der Ausziehversuche wurde keine Trennung der Ergebnisse nach Nadel- und Laubholz (je ca. 9 % Holzfeuchtigkeit) durchgeführt. Somit ergibt sich die Gleichung (2.12) für den mittleren axialen Auszieh widerstand für eine Länge von einem Zoll.

$$r_{ax,90,mean} = 7500 \cdot d^{0,75} \cdot \rho_0^{1,5} \quad (2.12)$$

$r_{ax,90,mean}$       mittlerer axialer Auszieh widerstand für  $\alpha = 90^\circ$  [Pfund/Zoll] ( $\cong 453,6$  g/25,4 mm)  
 $d$                       Schraubendurchmesser [Zoll] ( $\cong 25,4$  mm)  
 $\rho_0$                       Darrrohdichte [ $g/cm^3$ ]

Auch Schneider (1999) führte umfangreiche Untersuchungen zur Bestimmung des Einflusses der eingeschraubten Gewindelänge, der Holzfeuchte, des Einschraubwinkels und der Rohdichte auf den Auszieh widerstand von EJOT<sup>®</sup> Rahmenschrauben (heute im Handel als EJOT<sup>®</sup> Rahmenanker erhältlich) durch. Die aus einer hochfesten Stahllegierung bestehenden Rahmenschrauben wiesen einen Nenndurchmesser von 7,5 mm und einen Kerndurchmesser von 5,5 mm auf. Das Verhältnis von Kern- zu Außendurchmesser  $d_1/d = 0,73$  erfüllt die heutige Bedingung entsprechend ÖNORM EN 1995-1-1 (2015), womit auch bereits von modernen Holzbauschrauben gesprochen werden kann. Die Holzprüfkörper wurden über die gesamte Einschraublänge mit 5,5 mm vorgebohrt; dies entspricht dem Kerndurchmesser.

Es wurden 203 Ausziehprüfungen an den Laubhölzern Azobé (*Lophira alata Banks ex C. F. Gaertn.*, zerstreutporig), Buche (*Fagus sylvatica L.*, zerstreutporig), Edelkastanie (*Castanea sativa Mill.*, ringporig), Esche (*Fraxinus excelsior L.*, ringporig) und Robinie (*Robinia pseudoacacia L.*, ringporig) sowie 552 Ausziehprüfungen mit den Nadelhölzern Douglasie (*Pseudotsuga menziesii (Mirbel) Franco*), Fichte (*Picea abies Karst.*) und Kiefer (*Pinus sylvestris L.*) durchgeführt. Der Potenzfaktor der Laubhölzer ergab sich durch Mittelwertbildung der jeweiligen potentiellen Regression für die Winkelabstufungen  $\{30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ\}$ . Für den Winkel von  $0^\circ$  wurden vergleichsweise große Streuungen und niedrige Auszieh kennwerte ermittelt, weshalb die Ergebnisse dieser Winkelgruppe nicht in die Auswertung einfließen. Begründet wurde dies durch die geringen Einbindelängen von teilweise 40 mm und der Möglichkeit, dass die Schraube bei einem Einschraubwinkel von  $0^\circ$  unter Umständen zu einem Großteil im Frühholz zu liegen kommen könnte.

$$f_{ax,mean}(\rho; \alpha) = \frac{f_{ax}(\alpha) \cdot \rho_{12}^{1,78}}{110.120} \quad (2.13)$$

$f_{ax,mean}(\rho; \alpha)$       Bemessungswert der Schubspannung auf Ausziehen oder Eindrücken, in Abhängigkeit der Rohdichte und des Achs-Faserwinkels [ $N/mm^2$ ]  
 $f_{ax}(\alpha)$               Grundwert der Schubspannung, in Abhängigkeit des Achs-Faserwinkels [ $N/mm^2$ ]  
 $\rho_{12}$                       Mittelwert der Rohdichte bei einer Holzfeuchte von 12 % [ $g/cm^3$ ]

In Hübner (2013a) wird ein Bemessungsmodell zur Bestimmung der axialen Ausziehtragfähigkeit von Holzbauschrauben in Laubhölzern angegeben. Dazu wurden von Holzbauschrauben mit 4 mm Durchmesser bis hin zu Gewindestangen mit 20 mm Durchmesser unter verschiedenen Einschraubwinkeln Ausziehprüfungen unterzogen. Die Prüfungen erfolgten in Brettschichtholz aus Esche (*Fraxinus excelsior L.*, LH ringporig) und Robinie (*Robinia pseudoacacia L.*, LH ringporig), sowie Buchen-Vollholz (*Fagus sylvatica L.*, LH zerstreutporig). Es wurden die Einflüsse des Einschraubwinkels  $\alpha$ , der Einschraublänge inkl. des Einflusses der Schraubenspitze, der Holzfeuchte und der Rohdichte an insgesamt 2.622 Ausziehprüfungen untersucht.

Aus den Prüfdaten der Esche alleine ergibt sich durch eine Regressionsanalyse das Modell für die Ausziehtragfähigkeit, welches in Gleichung (2.14) für die Ausziehfestigkeit adaptiert dargestellt ist.

$$f_{ax,90,mean} = 0,608 \cdot 10^{-3} \cdot l_{ef}^{0,01} \cdot \rho_{12}^{1,63} \cdot d^{-0,366} \quad (2.14)$$

Für die um die Buche und Robinie erweiterten Prüfdaten, verändert sich die Gleichung (2.14) geringfügig und führt zu Gleichung (2.15).

$$f_{ax,90,mean} = 0,735 \cdot 10^{-3} \cdot l_{ef}^{0,06} \cdot \rho_{12}^{1,59} \cdot d^{-0,415} \quad (2.15)$$

Zusätzlich kann für den gesamten Datensatz durch Einsetzen der charakteristischen Rohdichte  $\rho_k$  und Änderung des Vorfaktors auch die charakteristische Ausziehfestigkeit  $f_{ax,90,k}$  nach Gleichung (2.16) bestimmt werden.

$$f_{ax,90,k} = 0,675 \cdot 10^{-3} \cdot l_{ef}^{0,06} \cdot \rho_k^{1,59} \cdot d^{-0,415} \quad (2.16)$$

$f_{ax,90,mean/k}$	Mittelwert bzw. charakteristischer Wert der Ausziehfestigkeit bei einem Achs-Faserwinkel von 90° und einer Holzfeuchte von 12 % [N/mm <sup>2</sup> ]
$l_{ef}$	wirksame Länge des Regelgewindes ohne die Länge der Schraubenspitze [mm]
$\rho_{12/k}$	mittlere bzw. charakteristische Rohdichte bei einer Holzfeuchte von 12 % [kg/m <sup>3</sup> ]
$d$	Schraubendurchmesser [mm]

In weiteren, aus den vorher genannten Prüfdaten, leicht veränderten und vereinfachten abgeleiteten Modellen, welche in (Hübner, 2013b) publiziert wurden, stellen sich die Gleichungen für die Bestimmung der mittleren bzw. charakteristischen Ausziehfestigkeit wie folgt dar:

$$f_{ax,90,mean} = 0,761 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_{12}^{1,6} \cdot d^{-0,34} \quad (2.17)$$

$$f_{ax,90,k} = 0,700 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_k^{1,6} \cdot d^{-0,34} \quad (2.18)$$

$f_{ax,90,mean/k}$	Mittelwert bzw. charakteristischer Wert der Ausziehfestigkeit bei einem Achs-Faserwinkel von 90° und einer Holzfeuchte von 12 % [N/mm <sup>2</sup> ]
$l_{ef}$	wirksame Länge des Regelgewindes ohne die Länge der Schraubenspitze [mm]
$\rho_{12/k}$	mittlere bzw. charakteristische Rohdichte bei einer Holzfeuchte von 12 % [kg/m <sup>3</sup> ]
$d$	Schraubendurchmesser [mm]

Wie den beiden Gleichungen (2.14) und (2.15) zu entnehmen ist, kommt es zu keiner signifikanten Änderung des Einflusses der Rohdichte. Wie Hübner (2013b) ausführt, kann der Einfluss der unterschiedlichen holzanatomischen Gruppen von der Rohdichte abgedeckt werden. Diese Aussage kann allerdings auch der im Prüfumfang großen Überlegenheit der Esche (1.942 Prüfungen) geschuldet sein, womit die Daten der Robinie und Buche (292 bzw. 362 Prüfungen) kaum eine Auswirkung zeigen würden.

Wie in den gezeigten Modellen von Newlin und Gahagan (1938), Schneider (1999) und Hübner (2013a) zu erkennen ist, kommt es mit steigender Rohdichte zu einer wesentlich stärkeren Erhöhung des Ausziehwerkstandes als nach Gleichung (2.8) in ÖNORM EN 1995-1-1 (2015). Dies ist darauf zurückzuführen, dass bis auf Newlin und Gahagan (1938), deren Modelle ausschließlich auf Prüfdaten in Laubhölzern basieren, das Modell in der Norm aus Nadelholzprüfungen resultiert.

Ergänzend werden an dieser Stelle noch die Potenzparameter von aktuellen Modellen für die Rohdichte, welche allerdings ausschließlich auf Nadelholzprüfungen basieren, aufgelistet. Die Potenzfaktoren für die Rohdichte sowie die Modellgrenzen bzw. der Umfang der Prüfungen sind in Tabelle 10 angegeben.

**Tabelle 10:** Potenzparameter für die Rohdichte und zugehörige Modellgrenzen basierend auf Ausziehprüfungen in Nadelholz, in Anlehnung an (Pöll, 2017)

Quelle	Potenzparameter für die Rohdichte	Modellgrenzen			
		$\rho_{12}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$d$ [mm]	$l_{ef}$ [mm]	$\alpha$ [°]
Blaß et al. (2006)	0,80	320–560	6–12	4 $d$	0–90
Frese et al. (2010)	1,00	325–602	4–14	18,8–140	≥ 45
Pirnbacher et al. (2009)	1,00	340–600	8–12	4 $d$ –15 $d$	0–90
Ringhofer (2017)	1,11*	310–621	4–12	2,5 $d$ –15 $d$	0–90

\* zusätzlicher Faktor  $k_p$  berücksichtigt einen veränderlichen Potenzparameter bei unterschiedlichen Achs-Faserwinkeln

Wie in Tabelle 10 zu erkennen ist, liegen die Potenzparameter der Nadelholzmodelle deutlich unter jenen der Laubholz- und gemischten Modelle, welche zuvor betrachtet wurden. In allen betrachteten Modellen wird, mit Ausnahme von Ringhofer (2017), der Potenzparameter für die Rohdichte für alle Achs-Faserwinkel als konstant angesehen. Vor allem der sehr stark schwankende Rohdichteinfluss bei den Nadelhölzern, welcher so nicht zu erwarten wäre, von 0,79 bis 1,11, fällt auf. Dies resultiert gemäß Ringhofer et al. (2014a) aus der Abhängigkeit des Rohdichtepotenzparameters vom Einschraubwinkel und Nenndurchmesser der Schraube. Dieser Einfluss kann mit einem konstanten Faktor nicht abgebildet werden und führt somit je nach geprüften Einschraubwinkeln und Schraubendurchmessern für die jeweiligen Modelle zu den unterschiedlichen Potenzfaktoren für die Rohdichte.

Um den Einfluss des veränderlichen Potenzparameters für die Rohdichte zu erfassen, wurde im Modell von Ringhofer (2017) zur Berechnung der Ausziehfestigkeit ein zusätzlicher Term mit dem Potenzfaktor  $k_p$  eingeführt. Die Ausziehfestigkeit ergibt sich somit nach Gleichung (2.19).

$$f_{ax} = f_{ax,ref} \cdot k_{ax} \cdot \left( \frac{\rho}{\rho_{ref}} \right)^{k_p(k_{90}; \alpha; d)} \quad (2.19)$$

$f_{ax}$	Ausziehfestigkeit für die Rohdichte $\rho$ [N/mm <sup>2</sup> ]
$f_{ax,ref}$	Referenzausziehfestigkeit für $\alpha = 90^\circ$ , $\rho_{ref}$ und Schraubendurchmesser $d$ [N/mm <sup>2</sup> ]
$k_{ax}$	Einfluss des Einschraubwinkels auf die Ausziehfestigkeit
$\rho$	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{ref}$	Referenzrohichte [kg/m <sup>3</sup> ]
$k_p$	nichtlinearer Potenzfaktor zur Berücksichtigung des veränderlichen Rohdichteinflusses in Abhängigkeit von $\alpha$ , $d$ und $k_{90} = f_{ax,90}/f_{ax,0}$ (mit z. B. $k_{90} = 1,10$ für Fichte)

Wie Ringhofer et al. (2015b) festgestellt haben, ist tendenziell ein Abfall von  $k_p$  mit abnehmendem Einschraubwinkel  $\alpha$  sowie ein ausgeprägter negativ linearer Trend mit zunehmendem Schraubendurchmesser  $d$  festzustellen. Vereinfacht kann  $k_p$  entsprechend Ringhofer (2017) mit folgender Gleichung angenommen werden:

$$k_p = \begin{cases} 1,10 & 0^\circ < \alpha \leq 90^\circ \\ 1,25 - 0,05 \cdot d & \alpha = 0^\circ \end{cases} \quad (2.20)$$

Wie der Gleichung (2.20) zur Bestimmung von  $k_p$  zu entnehmen ist, wird hier nur mehr die Abnahme des Rohdichteinflusses bei einer Verschraubung parallel zur Faser berücksichtigt.

Bei Betrachtung des Einflusses der Rohdichte auf die Ausziehsteifigkeit  $K_{ser,ax}$  sei an dieser Stelle angemerkt, dass es sowohl Modelle mit aber auch ohne einen Einfluss der Rohdichte gibt. Tendenzuell ist der

Einfluss allerdings geringer als bei der Ausziehfestigkeit, was zu Potenzfaktoren im Bereich von 0,2 (Blaß et al., 2006) führt. Generell zeigt Ringhofer (2017) in seiner Arbeit, dass es bei den unterschiedlichen Ansätzen für die Berechnung der Steifigkeiten entsprechend der jeweiligen ETA zu Unterschieden in Größenordnungsbereichen von über 400 % kommt. Dies ist auch darauf zurückzuführen, dass mögliche Einflussfaktoren aus der Gewindegeometrie (insbesondere Gewindeaußendurchmesser und Ganghöhe) oder des Einschraubwinkels  $\alpha$  oftmals nicht berücksichtigt werden. Es ist daher davon auszugehen, dass nicht mit allen ETAs die korrekte Abbildung der Steifigkeit der Schraube erfolgen kann. Außerdem wurde von Ringhofer (2017) festgehalten, dass bei derzeitigem Wissensstand für die Ermittlung der Steifigkeiten von quer bzw. parallel zur Faser eingebrachten Holzbauschrauben in Hinblick auf den Rohdichteinfluss keine vom Einschraubwinkel abhängige Anpassung des Potenzparameters erforderlich ist.

## Schubkenngrößen

Wie bereits in Kapitel 2-2 bei der Beschreibung der Versagensmechanismen diskutiert, ist vor allem die Eignung der Rohdichte als Indikator für die Leistungsfähigkeit des Materials Holz für die Ermittlung der Ausziehfestigkeit bei faserparalleler Verschraubung grundsätzlich zu hinterfragen. Vielmehr deutet das Versagensbild auf eine signifikante Korrelation mit der Schubfestigkeit in Faserrichtung hin. Somit muss geklärt werden, ob die Rohdichte einen geeigneten Materialindikator für sämtliche Modelle, welche faserparallele Verschraubungen berücksichtigen, darstellen kann (Ringhofer et al., 2014a).

Tatsächlich liegen einige Publikationen vor, welche von der Rohdichte als Materialindikator für die Ausziehfestigkeit abweichen. In einer Publikation von Eckelman (1975) wird die Ausziehtragfähigkeit von "sheet metal screws number 10 type A" mit einem Gewindeaußendurchmesser von 4,8 mm beschrieben. Von den insgesamt 110 Prüfungen in Vollhölzern wurden mit 44 in Sweet gum (*Liquidambar styraciflua* L., LH zerstreutporig), 12 in Tupelobäumen (*Nyssa Gronov. ex L.*, LH zerstreutporig) und 13 in Roteichen (*Quercus rubra* L., LH ringporig) der Großteil in diesen drei Laubholzarten durchgeführt. Die restlichen Prüfungen wurden an 14 weiteren verschiedenen nordamerikanischen Holzarten, wobei zwischen einem und sieben Prüfkörper je Holzart geprüft wurden, bewerkstelligt. Durch die Vielzahl an Holzarten konnte ein Darrohdichtebereich von 370 bis 720 kg/m<sup>3</sup> abgedeckt werden.

Wie Eckelman (1975) in der Auswertung seiner Prüfungen feststellen konnte, korreliert die Ausziehtragfähigkeit, bei Einschraubwinkeln von 0° und 90° zur Faser, besser mit der Schubfestigkeit parallel zur Faserrichtung als mit der Rohdichte. Für die Berechnung der Korrelationskoeffizienten verwendete er dazu für die Schubfestigkeit und die Rohdichte Werte aus einem "Wood Handbook", da diese auch dem Ingenieur zur Bemessung zur Verfügung stehen würden. Die beiden Gleichungen (2.21) und (2.22) für die Berechnungen des Auszieh widerstandes sind aus der Regressionsanalyse der Prüfdaten hervorgegangen und weisen Bestimmtheitsmaße von  $r^2 = 0,93$  bzw.  $0,90$  auf.

$$R_{ax,0,mean} = 8,75 \cdot d^{1,75} \cdot (l_{nom} - d)^{0,75} \cdot f_{v,mean} \quad \text{für VH und } \alpha = 0^\circ \quad (2.21)$$

$$R_{ax,90,mean} = 3,20 \cdot d \cdot (l_{nom} - d)^{0,75} \cdot f_{v,mean} \quad \text{für VH und } \alpha = 90^\circ \quad (2.22)$$

$R_{ax,0/90,mean}$	Auszieh widerstand für $\alpha = 0^\circ$ bzw. $90^\circ$ [Pfund $\approx 453,6$ g]
$l_{nom}$	nominelle Einschraublänge [Zoll $\approx 25,4$ mm]
$d$	Schraubendurchmesser [Zoll $\approx 25,4$ mm]
$f_{v,mean}$	Schubfestigkeit parallel zur Faser [Pfund je Zoll; "pound force per square inch"; psi $\approx 6,895$ MPa]

In Versuchen von Divos et al. (1998), deren eigentliches Ziel es war, Möglichkeiten der Schubmodulbestimmung zu analysieren, wurden auch Ausziehversuche an Fichtenprobestkörpern durchgeführt. Dabei wurden 25 mm tief eingeschraubte Holzbauschrauben mit einem Gewindeaußendurchmesser von 5 mm ausgezogen. Es zeigte sich ein Bestimmtheitsmaß bei der Einbeziehung aller Proben zwischen Schubmodul und Ausziehkraft von 0,68. Eine Korrelationsanalyse zur Beurteilung der Beziehungsstärke zwischen Ausziehkraft und Rohdichte erfolgte im Rahmen dieser Untersuchungen allerdings nicht.

Wie von Hübner (2013a) dargelegt wird, wurden bei Untersuchungen von Müller et al. (2004) der Einfluss der Rohdichte, der Faserneigung und des Schubmoduls auf die Schubfestigkeit ermittelt. Zur Anwendung kamen dabei fehlerfreie Kleinproben aus Fichte (*Picea abies Karst.*) und Lärche (*Larix decidua Mill.*). Für den Fall, dass der Ausziehwiiderstand parallel zur Faser als Überschreitung der Schubfestigkeit angesehen wird, so stellt sich die Frage, welche andere, zerstörungsfrei ermittelbare, mechanische bzw. physikalische Kenngröße gut mit dem Ausziehwiiderstand korreliert. Für die Beziehung zwischen Rohdichte und Schubfestigkeit in Faserrichtung wurde von Müller et al. (2004) ein Bestimmtheitsmaß von 0,48 ermittelt, allerdings unter Berücksichtigung von Normal- und Druckholz der Fichte sowie der Lärche; innerhalb einer Holzart bzw. eines Gewebetyps lässt sich kein deutlicher Zusammenhang erkennen. Für die Korrelation des Schubmoduls (keine nennenswerten Unterschiede zwischen  $G_{LR}$  &  $G_{LT}$ ) mit der Schubfestigkeit konnte ein deutlich höheres Bestimmtheitsmaß von 0,69 festgestellt werden. Somit wäre es auch aus dieser Sicht naheliegender, die Schubmoduln ( $G_{LR}$  &  $G_{LT}$ ) zur Berechnung des Ausziehwiiderstands parallel zur Faser heranzuziehen als die Rohdichte.

Untersuchungen von Taj et al. (2009) hatten das Ziel, die Ergebnisse von Eckelman (1975) zu überprüfen bzw. zu validieren. Es wurde dazu das Tragverhalten auf Herausziehen von Holzbauschrauben ( $d = 4,8$  mm und  $d_i/d = 0,79$ ) rechtwinklig zur Faserrichtung geprüft. Die verwendeten Laubholzarten Orient-Buche (*Fagus orientalis Lipsky*,  $\rho_{\text{mean}} = 640$  kg/m<sup>3</sup>, zerstreutporig), Hainbuche (*Carpinus betulus L.*,  $\rho_{\text{mean}} = 640$  kg/m<sup>3</sup>, zerstreutporig) und Schwarzpappel (*Populus deltoides 75/51 Lipsky*,  $\rho_{\text{mean}} = 420$  kg/m<sup>3</sup>, zerstreutporig) wiesen dabei eine Holzfeuchte von  $u_{\text{mean}} = (7 \pm 1)$  % auf. Der rechnerische Ausziehwiiderstand wurde nach Gleichung (2.22) und nach NDS (2005), bei welcher die Rohdichte mit einem Potenzparameter von 2,0 berücksichtigt wird (siehe Gleichung (2.23)), ermittelt.

$$R_{\text{ax},90,d} = 98,1 \cdot \rho_0^2 \cdot d_s \cdot l \quad (2.23)$$

$R_{\text{ax},90,d}$	Designwert der Ausziehwiiderstand für $\alpha = 90^\circ$ [kg]
$\rho_0$	spezifische Darrrohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]
$d_s$	Schaftdurchmesser [mm]
$l$	Einschraublänge [cm]

**Tabelle 11: Zusammenfassung der Prüfkörpereigenschaften und der Prüfergebnisse nach (Taj et al., 2009)**

Holzart	$\rho_{12,\text{mean}}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$f_{v,\text{mean}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$R_{\text{ax},\text{mean}}$ [N]	COV[ $R_{\text{ax},\text{mean}}$ ] [%]	NDS (2005) [N]	Eckelman (1975) [N]
<b>Buche</b>	640	13,3	2.690	10,6	3.410	3.070
<b>Hainbuche</b>	640	10,7	3.000	9,9	3.410	2.470
<b>Pappel</b>	420	7,1	1.750	10,7	1.400	1.640

Wie der Tabelle 11 zu entnehmen ist, wiesen die gemessenen Ausziehfestigkeiten in Buche und Hainbuche, trotz der annähernd gleichen Rohdichten, deutliche Unterschiede auf. Zudem wurde für die Hainbuche, trotz der rund 30 % geringeren Scherfestigkeit, ein höherer Ausziehwiiderstand gegenüber der Buche ermittelt. Dies ist lt. Taj et al. (2009) nur durch die unterschiedliche anatomische Struktur der beiden Holzarten zu erklären. Die Kernaussage der Untersuchungen schließt damit ab, dass die Versuchsergebnisse und die berechneten Ausziehfestigkeit nach der Gleichung (2.22) von Eckelman (1975) weniger voneinander abweichen als von den Berechnungsergebnissen nach NDS (2005). Allerdings handelt es sich bei der Publikation von Eckelman (1975) um Mittelwerte für die Ausziehfestigkeit, während es nach der Formel entsprechend NDS (2005) wohl zur Bestimmung von Designwerten kommt. Ein Vergleich der Prüfergebnisse mit den Werten aus der Norm ist daher sehr kritisch zu betrachten, weshalb es naheliegend ist, dass die Werte mehr abweichen als jene nach Eckelman (1975).

In den Untersuchungen der Holzart Fichte von Ringhofer (2017) wurden ebenfalls die Pearson-Korrelationskoeffizienten für die Zusammenhänge der Ausziehfestigkeit mit verschiedenen Kenngrößen ermit-



telt. Dabei zeigt sich für einen Achs-Faserwinkel von  $0^\circ$  für die Rohdichte ein Wert für  $r_{XY,PE}$  von 0,44 und für den Schubmodul  $G_{LR}$  von 0,61. Demzufolge ist in diesem Fall der Zusammenhang der Ausziehfestigkeit mit dem Schubmodul stärker ausgeprägt als mit der Rohdichte. Für Achs-Faserwinkel von  $90^\circ$  zeigt allerdings, sowohl bei radialer als auch bei tangentialer Applikation der Schraube, die Rohdichte die höchsten Korrelationskoeffizienten (radial: 0,73; tangential: 0,82) im Vergleich zu den übrigen betrachteten möglichen Einflussgrößen.

Alle hier angeführten Studien zeigen, dass bei einem Achs-Faserwinkel von  $0^\circ$  die Schubfestigkeit bzw. teilweise auch der Schubmodul eine höhere Korrelation mit der Ausziehfestigkeit aufweist als die Rohdichte. Trotzdem wird weiterhin von der Rohdichte als ausreichender Indikator für die Ausziehfestigkeit für Einschraubwinkel von  $0^\circ$  bis  $90^\circ$  zur Faser ausgegangen. Außerdem stellt die Rohdichte eine vergleichsweise einfach ermittelbare Kenngröße dar (Ringhofer, 2017).

In allen bisher behandelten Modellen zur Berechnung der Ausziehfestigkeit (bzw. -kraft) kommt es mit steigender Rohdichte auch zu einer Zunahme der Ausziehfestigkeit. Dies wird auch von Pöll (2017) in einer zusammenfassenden Betrachtung so festgestellt. Auswertungen von "clear-wood"-Werkstoffkenngrößen aus (Wagenführ, 2000) und (ÖNORM B 3012, 2003), welche von Pöll (2017) aufbereitet wurden, zeigen, dass es tendenziell, aber nicht zwingend für alle Holzarten, zu einer Zunahme der Schubfestigkeit mit steigender Rohdichte kommt. Diese Beobachtung wurde zuvor auch von Müller et al. (2004) gemacht, wo sich für diesen Zusammenhang nur ein Bestimmtheitsmaß von 0,48 ergab. Dabei wurde allerdings Normal- und Druckholz der Fichte und Lärche berücksichtigt, da sich innerhalb einer Holzart bzw. eines Gewebetyps kein deutlicher Zusammenhang erkennen ließ. Für den Fall einer Holzart, welche trotz der höheren Rohdichten vergleichsweise geringe Schubfestigkeiten aufweist, würde dies eine geringe Ausziehfestigkeit nach sich ziehen, was allerdings nicht immer tatsächlich so auftritt. Auch sei an dieser Stelle noch angemerkt, dass durch die Zerstörung der Holzstruktur aufgrund des Einschraubvorganges die Kenngröße der Schubfestigkeit, welche an ungestörten Prüfkörpern ermittelt wird, nicht eins zu eins auf die erzielbare Schubfestigkeit im Verschraubungsbereich umgelegt werden kann. Zudem sind Effekte aus der Verdichtung und die Interaktion Querdruck/Querzug mit Schub in einem sehr lokalen Bereich zwischen den Gewindeflanken zu beachten; Wirkungsweise im Sinne eines einseitig gebetteten Kragträgers.

## Winkel

Einen großen Einfluss auf die wesentlichen Festigkeits- und Steifigkeitskenngrößen von Holz hat der Winkel zwischen Belastungs- und Faserrichtung. Dabei kommt es zu keinem linearen Abfall zwischen  $90^\circ$  und  $0^\circ$  zur Faser, sondern es folgt der anfangs relativ steil abfallenden Funktion ein flach auslaufender Ast (Schickhofer, 2007). Dieser Zusammenhang wurde bereits vor fast 100 Jahren durch Hankinson (1921) entdeckt und in der nach ihm benannten Formel, wie in Gleichung (2.24) dargestellt, beschrieben:

$$f_\alpha = \frac{f_0 \cdot f_{90}}{f_0 \cdot \sin \alpha^k + f_{90} \cdot \cos \alpha^k} \quad (2.24)$$

$f_\alpha$	Festigkeitswert bei Beanspruchung schräg zur Faserrichtung [N/mm <sup>2</sup> ]
$f_0$	Festigkeitswert bei Beanspruchung in Faserlängsrichtung [N/mm <sup>2</sup> ]
$f_{90}$	Festigkeitswert bei Beanspruchung normal zur Faserlängsrichtung [N/mm <sup>2</sup> ]
$\alpha$	Winkel zwischen Faser- und Belastungsrichtung [°]
$k$	Koeffizient (im Allgemeinen $k = 2$ für Festigkeitskennwerte)

Wie der Beschreibung der Versagensmechanismen von axial belasteten Schrauben (siehe Kapitel 2-4.1) zu entnehmen ist, kommt es aufgrund des orthotropen Materialverhaltens von Holz auch zu einem großen Einfluss auf die Ausziehcharakteristik bzw. den Auszieh Widerstand in Abhängigkeit vom Achs-Faserwinkel. Deshalb bildet der Einschraubwinkel von axial belasteten Holzbauschrauben neben der Rohdichte und dem Durchmesser einen der maßgebendsten Einflussfaktoren auf die Auszieheigenschaften von Holzbauschrauben. Alle bekannten Modelle zur Abbildung der Winkelabhängigkeit haben gemeinsam, dass für einen Einschraubwinkel von  $0^\circ$  der Minimalwert und für einen Winkel von  $90^\circ$  der Maximalwert



der Ausziehfestigkeit angesetzt wird (Ringhofer, 2017). Der Verlauf der Abnahme von 90° bis zu 0° kann, wie nachfolgend dargestellt, neben dem Ansatz von Hankinson (1921) auch durch andere Funktionen beschrieben werden. Im Vergleich dazu zeigen die Festigkeitseigenschaften von fehlerfreien Holzproben ein genau gegenteiliges Verhalten. Deren Maximalwerte treten bei 0° zur Faserrichtung auf, während quer zur Faser nur viel kleinere Festigkeitswerte erreicht werden können.

Das abnehmende Tragverhalten von Schrauben bei kleiner werdenden Achs-Faserwinkeln resultiert dabei aus den Unterschieden der in Kapitel 2-4.1 dargestellten Versagensmechanismen bei 0° und 90°. So trägt bei einem Einschraubwinkel von 0° lediglich das direkt am Gewindeaußendurchmesser liegende Holz zum Auszieh widerstand bei; quasi reines Schubversagen. Im Gegensatz dazu zeigt sich für von 0° abweichende Achs-Faserwinkel kein reines Schubversagen mehr. Die Interaktion der Anteile der dabei mitwirkenden Festigkeits- und Steifigkeitskenngrößen ist dabei jedoch noch nicht restlos geklärt. Erkennbar ist allerdings, dass dieser Versagensmechanismus ein größeres Holzvolumen beansprucht.

In allen nachfolgenden Modellen erfolgt die Beschreibung der Winkelabhängigkeit durch das Verhältnis der Ausziehfestigkeiten bei 90° und 0°, welches wie in Gleichung (2.25) definiert ist. Der Verlauf der Funktion wird noch vom Einschraubwinkel und vom verwendeten Modell, welches entweder auf Hankinson (1921) oder einem bilinearen Ansatz mit einer Diskontinuitätsstelle bei 30° oder 45° beruht, festgelegt. Des Weiteren gibt es laut Ringhofer (2017) eine Abhängigkeit von  $k_{90}$  vom Gewindeaußendurchmesser  $d$  und von der Rohdichte  $\rho$  des Holzes. So kommt es bei steigenden  $d$  und  $\rho$  zu einem erhöhten  $k_{90}$ -Faktor, was auf einen größeren Abfall der Ausziehfestigkeiten bei einem Einschraubwinkel von 0° im Vergleich zu 90° für die Laubhölzer mit höheren Rohdichten hinweisen würde. Dieses Verhalten kann für Hartlaubhölzer in den Ergebnissen von Hübner (2013a) und Pöll (2017) allerdings nicht beobachtet werden.

Im Vergleich dazu berücksichtigt das Modell nach Frese et al. (2010), welches ausschließlich Einschraubwinkel zwischen 90° und 45° zulässt, die Winkelabhängigkeit der Ausziehfestigkeit gar nicht. Für die nachfolgend beschriebenen Modelle wird der Wert für  $k_{ax}$  jeweils auf dem Niveau der charakteristischen Kenngrößen angegeben. Dadurch ist es möglich, eine größere Streuung der Prüfdaten bei kleinen Einschraubwinkeln zu berücksichtigen.

$$k_{90} = \frac{f_{ax,90}}{f_{ax,0}} \quad (2.25)$$

$k_{90}$	Verhältniszahl der Ausziehfestigkeiten für 90° und 0° zur Faser [-]
$f_{ax,90}$	Ausziehfestigkeit bei einem Einschraubwinkel von 90° zur Faser [N/mm <sup>2</sup> ]
$f_{ax,0}$	Ausziehfestigkeit bei einem Einschraubwinkel von 0° zur Faser [N/mm <sup>2</sup> ]

Einige Modelle, wie jenes von Blaß et al. (2006), verwenden den Ansatz nach Hankinson (1921). Diese Möglichkeit ist auch in ÖNORM EN 1995-1-1 (2015) für die Berücksichtigung der Winkelabhängigkeit bei der Berechnung der Ausziehfestigkeit so festgelegt. Um eine zusätzliche Berechnung von  $f_{ax,0}$  zu vermeiden, wird dabei, wie in Gleichung (2.26) zu sehen ist, die Verhältniszahl  $k_{90}$  (siehe Gl. (2.25)) eingeführt.

$$f_{ax,\alpha} = \frac{f_{ax,90}}{\sin \alpha^k + f_{ax,90}/f_{ax,0} \cdot \cos \alpha^k} = \frac{f_{ax,90}}{\sin \alpha^k + k_{90} \cdot \cos \alpha^k} \quad (2.26)$$

Wird in weiterer Folge nur noch ausschließlich das Verhältnis dieser Festigkeiten betrachtet, spricht man vom Faktor  $k_{ax}$ , welcher wie in Gleichung (2.27) in Anlehnung an Hankinson (1921) definiert sein kann.

$$k_{ax} = \frac{1}{\sin \alpha^k + k_{90} \cdot \cos \alpha^k} \quad (2.27)$$

$k_{ax}$	Faktor zur Beschreibung der Ausziehfestigkeit in Abhängigkeit vom Einschraubwinkel [-]
----------	--

Der Wert für  $k_{90}$  auf Basis der charakteristischen Werte in ÖNORM EN 1995-1-1 (2015) ist dabei mit 1,20 stark an die Prüfergebnisse von Bejtka (2005) und Blaß et al. (2006), welche Werte von 1,19 bzw. 1,20 ermittelten, angelehnt. Auch aus den Prüfungen von Laubhölzern in (Hübner, 2013a) wird ein Modell unter Verwendung dieses Ansatzes definiert. Es ergibt sich dabei ebenfalls  $k_{90} = 1,20$ . Die Hochzahl  $k$  für die Winkelfunktionen wird in allen betrachteten Modellen mit 2,0 angenommen.

Geringfügig abweichende Ergebnisse für die Abhängigkeit der Ausziehfestigkeit ergibt das Modell, welches von Pirnbacher et al. (2009) aufgestellt wurde. Während für  $k_{90}$  ein Wert von 1,35 gewählt wird, wird für den Potenzfaktor  $k$  der Wert 2,2 anstatt 2,0 empfohlen. Dadurch wird entsprechend den Autoren eine bessere Beschreibung des 5 %-Quantils, wie sie in Versuchen beobachtet wurde, ermöglicht. Auch in sehr frühen Untersuchungen des Auszieh Widerstandes von Fairchild (1926) stellt dieser für parallel zur Faserrichtung eingeschraubte Holzbauschrauben eine Tragfähigkeit von 52 % bis 108 % der 90° zur Faserrichtung eingebrachten Schrauben fest. Im Mittel geht er von einer Tragfähigkeit von 75 %, der faserparallel zu den quer zur Faser eingebrachten Holzschrauben, aus (entspricht  $k_{90}$  von 1,33).

In den Modellen von Hübner (2013a) und Ringhofer et al. (2015b) wird ein bilinearer Ansatz verwendet. Der Faktor  $k_{ax}$  nimmt dabei bis zur Diskontinuitätsstelle den Wert 1,0 an und fällt anschließend linear auf  $c = k_{90}^{-1}$  ab. Die Werte für  $k_{90}$  liegen dabei im Modell von Ringhofer et al. (2015b) bei  $\{1,35; 1,56\}$  für das Verhältnis der Mittel- bzw. der charakteristischen 5 %-Fraktilwerte. Somit ergeben sich  $c$ -Werte von  $\{0,74; 0,64\}$  mit der Diskontinuitätsstelle bei  $\alpha_1 = 45^\circ$ . Nach Hübner (2013a) wird  $c$  für das Modell für Laubholz mit 0,70 festgelegt, während die Diskontinuitätsstelle erst bei  $\alpha_1 = 30^\circ$  auftritt.

$$k_{ax} = \begin{cases} 1,00 & \alpha_1 \leq \alpha \leq 90^\circ \\ c + \frac{1-c}{\alpha_1} \cdot \alpha & 0^\circ \leq \alpha < \alpha_1 \end{cases} \quad (2.28)$$

- $k_{ax}$  Faktor zur Beschreibung der Ausziehfestigkeit in Abhängigkeit vom Achs-Faserwinkel [-]
- $\alpha$  Achs-Faserwinkel (Winkel zwischen Schraubenachse und Faserorientierung) [°]
- $\alpha_1$  Winkel beim Auftreten der Diskontinuitätsstelle [°]
- $c$  Anteil der Ausziehfestigkeit bei 0° im Vergleich zu jener bei 90° [%/100]

Im Vergleich dazu zeigt der Verlauf des Modelles nach Schneider (1999) sogar einen Anstieg von  $k_{ax}$  bei kleiner werdenden Einschraubwinkeln bis 45°. Bei einem Einschraubwinkel von 15° liegt der Wert für  $k_{ax}$  noch mehr als 30 % über all den anderen beschriebenen Modellen, ehe dort ein Sprung auftritt, von welchem ein horizontaler Ast (kein weiterer Winkeleinfluss mehr berücksichtigt) bis zur faserparallelen Verschraubung führt. In der Veröffentlichung von Schneider (1999) gibt es keine Angaben dazu, ob das Modell für charakteristische oder Mittelwerte aufgestellt wurde.

Um den Winkeleinfluss der unterschiedlichen Modelle noch besser darzulegen, wird der Faktor  $k_{ax}$  über die Winkel von 0° bis 90° in der Abbildung 17 dargestellt.

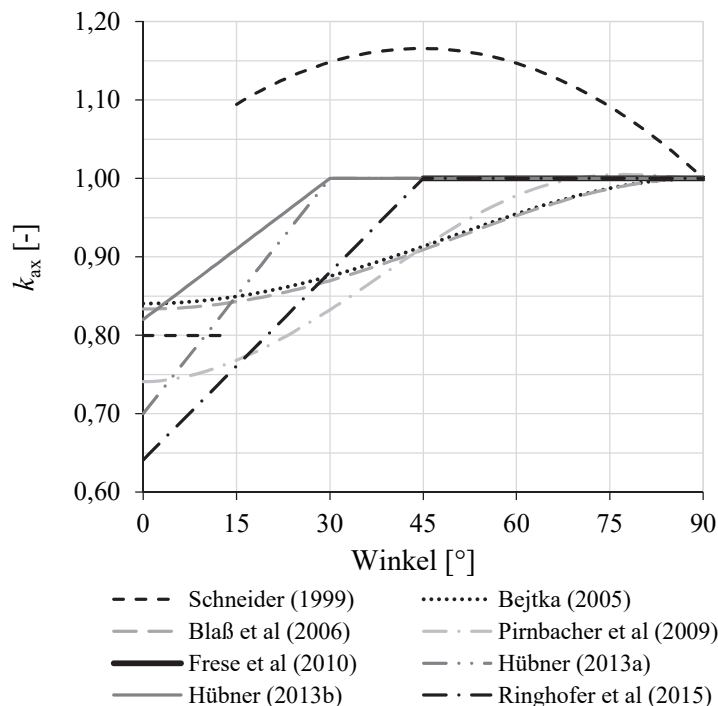


Abbildung 17:  $k_{ax}$  in Abhängigkeit vom Achs-Faserwinkel für unterschiedliche Modelle

Die beiden Modelle von Hübner (2013a) und Ringhofer et al. (2015b) grenzen sich bei einem Einschraubwinkel von etwa  $0^\circ$  deutlich von den Modellen von Bejtka (2005) und Blaß et al. (2006) ab. Dies ist auch an den  $k_{90}$ -Werten, von  $\{1,43; 1,56\}$  für die ersten beiden Modelle bzw.  $\{1,19; 1,20\}$  für die Letztgenannten, zu erkennen. Außerdem ist durch die bilineare Funktion eine größere Steigung von  $k_{ax}$  ersichtlich, was sich für Ringhofer et al. (2015b) allerdings erst ab einem Einschraubwinkel von über  $30^\circ$  in höhere Ausziehfestigkeiten niederschlägt.

Während der Einfluss der Winkel auf die Ausziehfestigkeiten also weitestgehend bekannt und umfangreich untersucht ist, gilt dies für den Einfluss des Winkels auf die Steifigkeit und Duktilität noch nicht. Gemäß Ringhofer (2017) ist von einer geringfügigen Erhöhung der Steifigkeit und Abnahme der Duktilität bei kleiner werdenden Einschraubwinkeln auszugehen, was aber in den bisherigen Modellen noch nicht berücksichtigt wird (generell kaum ein Winkeleinfluss feststellbar).

## Vorbohrdurchmesser

Aufgrund der historischen Entwicklung der Holzbauschrauben wurde vor allem bei früheren Untersuchungen ein Hauptaugenmerk auf die Wahl des richtigen Vorbohrdurchmessers gelegt. Nachdem allerdings durch die Weiterentwicklung dieser Verbindungsmittel ein Vorbohren nicht mehr zwingend notwendig ist, wird heute – wenn möglich – darauf verzichtet. Es kommt so zum Wegfall eines Arbeitsschrittes, was zu einer Zeit- und Kostenersparnis führt und somit ein Grundstein für die häufige Verwendung dieses Verbindungsmittels ist. In wenigen Fällen ist ein Vorbohren allerdings auch heute noch unumgänglich. So zum Beispiel bei kompakten, gedrunenen Systemverbindern oder bei der exakten Positionierung von Holzbauschrauben bei der Verwendung als Verstärkungselement (Ringhofer, 2017). Da beim Einbringen von Holzbauschrauben in Hölzer mit höheren Rohdichten bzw. bei großen Verankerungslängen die Eindrehmomente eine Begrenzung bei der Anwendbarkeit darstellen, ist trotz allem auch heute noch der maximale Vorbohrdurchmesser ohne Verlust der Ausziehfestigkeit von Interesse.

Fairchild (1926) führte als einer der Ersten sehr umfangreiche Prüfungen zum optimalen Vorbohrdurchmesser mit Bezug zur Ausziehfestigkeit durch. In über 10.000 Prüfungen mit Holzbauschrauben (Durchmesser zwischen 2,18 mm und 9,45 mm) untersuchte er in Summe 7 unterschiedliche amerikanische Nadel- und Laubholzarten. Es wird dabei ein mittlerer Rohdichtebereich von 410 bis 720 kg/m<sup>3</sup> abgedeckt. In der Schlussbetrachtung empfiehlt Fairchild (1926) für Weichhölzer einen Vorbohrdurchmesser,

von 70 % des Gewindekerndurchmessers. Für Harthölzern schlägt er 90 % des Gewindekerndurchmessers vor.

Von Newlin und Gahagan (1938) wurde unter anderem der Einfluss des Vorbohrdurchmessers auf die Ausziehfestigkeit untersucht. Es wurden mit Amerikanischer Weiß-Eiche (*Quercus alba L.*,  $\rho_0 = 683 \text{ kg/m}^3$ , ringporiges LH), Douglasie (*Pseudotsuga menziesii (Mirbel) Franco*,  $\rho_0 = 477 \text{ kg/m}^3$ , NH), Redwood (*Sequoia semperivrens Endl.*,  $\rho_0 = 419 \text{ kg/m}^3$ , NH), Weymouths-Kiefer (*Pinus strobus L.*,  $\rho_0 = 404 \text{ kg/m}^3$ , NH) und Gelbkiefer (*Pinus palustris Mill.*,  $\rho_0 = 601 \text{ kg/m}^3$ , NH) vier Nadel- und eine Laubholzart für die Prüfungen verwendet. Es konnte so ein Rohdichtebereich von 420–680  $\text{kg/m}^3$  abgedeckt werden. Über die unterschiedlichen Versuchsreihen hinweg kamen Schrauben mit Durchmessern von 7,94 mm bis 25,40 mm zum Einsatz. Der optimale Vorbohrdurchmesser, bei welchem die volle Ausziehfestigkeit eines nicht vorgebohrte Zustandes weiterhin erreicht werden kann, stellt den Autoren zufolge dabei keinen fixen Wert dar, sondern ist in einem Wertebereich möglich. So liegt der optimale Vorbohrdurchmesser für Amerikanische Weiß-Eiche bei 65 bis 85 % des Schaftdurchmessers (entspricht dem Gewindeaußendurchmesser), für Douglasie bei 60 bis 75 %; für Weymouths-Kiefer und Redwood werden Vorbohrdurchmesser mit 40 bis 70 % des Schaftdurchmessers empfohlen. Dabei wird für größere Schraubendurchmesser ein prozentuell höherer Vorbohrdurchmesser empfohlen. Dadurch kann das bei zunehmendem Schraubendurchmesser trotz Vorbohrung ansteigende, zu verdrängende Volumen etwas reduziert werden.

Auch Nakatani und Komatsu (2005) beschäftigten sich mit dem Auszieh Widerstand von “lagscrewbolts“ (traditionelle Holzschrauben) in Abhängigkeit vom Vorbohrdurchmesser. Diese Untersuchung verwendet Schrauben mit einem Außen- bzw. Kerndurchmesser von 30 mm bzw. 25 mm, weshalb ein Vorbohren notwendig ist. Bei den Prüfungen in Douglasien-Brettschichtholz ( $\rho_{\text{mean}} = 525 \text{ kg/m}^3$ ,  $u_{\text{mean}} = 13 \%$ ) wird der Vorbohrdurchmesser zwischen 26 und 29 mm in Millimeterabstufungen variiert. Die Auszieh Widerstände bei Vorbohrdurchmessern von 26 und 27 mm liegen nahezu auf demselben Niveau, während das Einschraubdrehmoment bei größeren Vorbohrdurchmessern jedoch deutlich abnimmt. Deshalb wird von Nakatani und Komatsu (2005) ein Vorbohrdurchmesser von 27 mm, bei einem Kerndurchmesser von 25 mm, empfohlen (entspricht 90 % des Gewindeaußendurchmessers bzw. 108 % des Kerndurchmessers).

Eine Auswahl von bisherigen Untersuchungen an der TU Graz zum Vorbohrdurchmesser bzw. dessen Auswirkung auf die Ausziehfestigkeit, welche ausschließlich in Fichtenholz durchgeführt wurden, zeigt die Abbildung 18. Dabei wurde neben der Anzahl  $N$  der durchdrungenen Schichten, auch das Material (ST: Solid Timber = Vollholz; GLT: glued laminated timber = Brettschichtholz; CLT: cross laminated timber = Brettsperrholz) und der Winkel variiert.

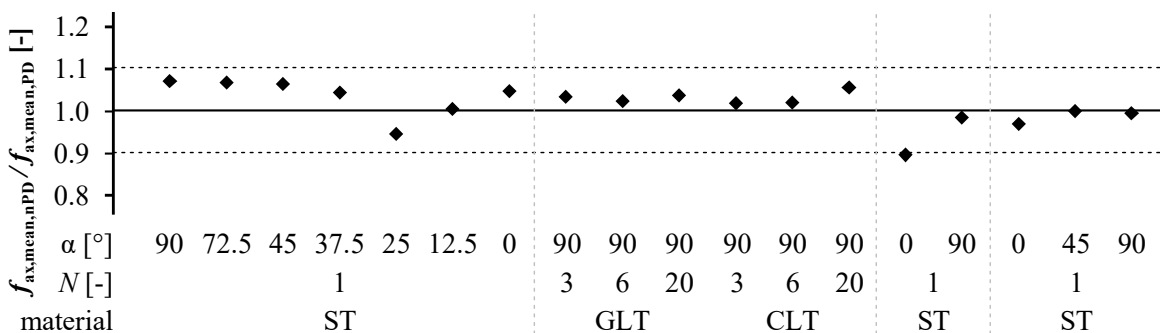


Abbildung 18: Mittelwerte der Auszieh Widerstände ausgewählter Untersuchungen an der TU Graz mit und ohne Vorbohrung im Vergleich;  $d = 8 \text{ mm}$  (Ringhofer, 2017)

Wie aus der Abbildung 18 hervorgeht, kann kein nennenswerter Unterschied der Ausziehfestigkeiten mit und ohne Vorbohrung festgestellt werden, sofern der Vorbohrdurchmesser dem Kerndurchmesser gleich oder fast gleich ist. Auch die Anzahl der durchdrungenen Schichten und unterschiedliche Einschraubwinkel führen zu keinem nennenswerten Einfluss (Pirnbacher, 2009; Ringhofer, 2017).

Weitere Untersuchungen von Ringhofer (2017) in Fichtenholz haben gezeigt, dass bis zu einem Vorbohrdurchmesser  $d_{\text{PD}}$  von 1,1 mal dem Kerndurchmesser kein Abfall der Ausziehfestigkeit zu erwarten ist. Ein

bilineares Modell, welches auf dieser Erkenntnis beruht und diesen Umstand beschreibt, ist in Gleichung (2.29) dargestellt. Dabei kommt es bei weiterer Zunahme des Vorbohrdurchmessers in Abhängigkeit des jeweiligen Kern- und Nenndurchmessers der Schraube zu einem linearen Abfall der Ausziehfestigkeit.

$$\eta_{PD} = \begin{cases} 1,00 & d_{PD} \leq 1,1 \cdot \eta \cdot d \\ 1,0 - \frac{1}{d \cdot (1 - 1,1 \cdot \eta)} \cdot (d_{PD} - 1,1 \cdot \eta \cdot d) & 1,1 \cdot \eta \cdot d \leq d_{PD} \leq d \end{cases} \quad (2.29)$$

$\eta_{PD}$	Verhältnis der Ausziehfestigkeit mit zu ohne Vorbohrung $\eta_{PD} = f_{ax,PD}/f_{ax,nPD}$ [-]
$\eta$	Verhältnis von Kern- zu Gewindenenn- bzw. Außendurchmesser $\eta = d_1/d$ [-]
$d$	Gewindeaußen- bzw. Nenndurchmesser der Schraube [mm]
$d_{PD}$	Vorbohrdurchmesser [mm]
$d_1$	Kerndurchmesser der Schraube [mm]

Während für den Einfluss des Vorbohrdurchmessers auf die Ausziehfestigkeiten zahlreiche Publikationen vorliegen, ist der Einfluss auf die Steifigkeit und Duktilität auch hier noch weniger bekannt. Ringhofer (2017) berichtet von einem Abfall der Steifigkeit bei zunehmendem Vorbohrdurchmesser, welcher ebenfalls durch die Gleichung (2.29) beschrieben werden kann. Zugleich wird bei größeren Vorbohrdurchmessern eine Zunahme der Duktilität für die durchgeführten Prüfungen in CLT und GLT bei Einschraubwinkeln von 90° zur Faser beobachtet.

Außerdem wird in Ringhofer (2017) festgehalten, dass das Verhältnis von  $K_{ser,ax,ref}$  zu  $K_{ser,ax,PD}$  vom Winkel unabhängig ist. Allerdings sind die Steifigkeiten ohne Vorbohrung um etwa 20 % höher als mit Vorbohrung, weshalb die Steifigkeiten mit den kleinsten Vorbohrdurchmessern als Referenz herangezogen werden. Diese Steifigkeitseinbußen könnten aus der lokalen Verdichtung des Materials beim Eindrehen der Schraube, welche nur ohne Vorbohrung in diesem Ausmaß auftritt, resultieren (Ringhofer, 2017).

### **Weitere Einflussfaktoren**

Wie Abbildung 16 zu entnehmen ist, gibt es noch zahlreiche weitere Einflussfaktoren, welche auszugswise in diesem Abschnitt noch kurz behandelt werden. Diese sind allerdings im Rahmen dieser Arbeit nicht von weiterer relevanter Bedeutung.

Wie Pirnbacher (2009) zeigt, hat die Einbindtiefe bei Fichte eine signifikante Auswirkung auf den Auszieh widerstand von Holzbauschrauben. Ab einer Einbindtiefe von 15 mm (entspricht zirka 2  $d$ ) ist eine Erhöhung der Tragfähigkeit von mindestens 15 % für Achs-Faserwinkel von 90° zu erwarten. Deshalb wird in der Arbeit von Pirnbacher (2009) die Berücksichtigung davon mit dem Faktor  $k_{emb} = 1,15$  für  $l_{emb} \geq 2 d$  sichergestellt. Wie Ringhofer et al. (2015a) in weiteren Untersuchungen feststellt, nimmt der Effekt der Einbindtiefe mit flacher werdendem Achs-Faserwinkel allerdings ab.

Bei Holzbauschrauben mit einem Achs-Faserwinkel von 0° sind auch die Jahrringbreiten sowie die Lage der Schraube in Bezug zum Früh- und Spätholz von Bedeutung. Da eine steigende Rohdichte zu einer höheren Ausziehfestigkeit führt (siehe Abschnitt Rohdichte), sollte eine Schraube, welche größtenteils von Frühholz umgeben ist, eine geringere Ausziehfestigkeit aufweisen, als bei Einbettung in Spätholz mit höherer Rohdichte. Laut Hübner (2013a) wäre damit vor allem bei kleinen Schraubendurchmessern in Vollholzprüfkörpern, wo eine Anordnung mehrheitlich im Früh- oder im Spätholz möglich ist, eine größere Streubreite zu erwarten; tatsächlich ist allerdings eine Anordnung nur im Spätholzbereich kaum möglich. Durch größere Einschraubängen oder eine Änderung der Einschraubwinkel lässt sich ebenfalls eine Homogenisierung des durchgeschraubten Materials und Abnahme der Streuung erreichen (Durchdringung sowohl von Früh- und Spätholzbereichen).

Bei Kiefer (*Pinus sylvestris L.*) treten in Kollmann (1951), je nach Ursprungsquelle, Verhältnisse zwischen der Spätholz- und Frühholzdichte zwischen 2,4–3,1 und bei Fichte (*Picea abies Karst.*) zwischen 2,0 und 2,8 auf. Auch für die ringporigen Laubhölzer wird ein ähnlicher Wert angegeben. Für Eiche wird ein Wert von 2,8 und für die Esche ein Wert von 2,2 für das Verhältnis der Früh- und Spätholzdichten



angegeben. Für die zerstreutporige Buche wird ein noch geringes Verhältnis von 1,86 für den Rohdichteunterschied zwischen Spät- zu Frühholz angeführt.

Wie Hübner (2013a) aus den unterschiedlichen Dichteverhältnissen von Früh- und Spätholz in den Nadel- und Laubhölzern folgert, sollte die Streuung der Auszieh widerstände vor allem bei kleinen Durchmessern parallel zur Faserrichtung in Laubhölzern (vor allem in zerstreutporigen Laubhölzern und in Eschenholz) kleiner ausfallen als bei Kiefer oder Fichte. Entsprechend Ringhofer (2017) beeinflussen die Jahrringbreiten die Auszieheigenschaften nur bei Orientierung der Schraubenachse entlang der tangentialen Richtung des Holzes signifikant. Jedoch ist auch in diesem Fall der Einfluss im Vergleich zum Rohdichte einfluss vernachlässigbar gering ausgeprägt.

In Hübner (2013a) wird der Einfluss der radialen bzw. tangentialen Richtung der Holzbauschrauben behandelt. Die darin aufbereiteten Daten nach Cockrell (1933) zeigen für die mittleren Auszieh widerstände – ermittelt an Schrauben mit Achsorientierung in radialer und tangentialer Richtung – keine Unterschiede sowohl im Exponenten des Rohdichte einflusses als auch in den Absolutwerten. Für faserparallel angeordnete Schrauben hingegen sind sowohl geringere Ausziehkräfte als auch ein reduzierter Rohdichte einfluss festgestellt worden. Es kann laut Hübner (2013a) also davon ausgegangen werden, dass kein Unterschied zwischen radialer und tangentialer Einschraubrichtung vorliegt. Dies wurde auch in Untersuchungen von Hübner (2013a) in Buchen- und Robinienholz nochmals bestätigt.

Auch Ringhofer (2017) bestätigt in seinen Untersuchungen, dass für Fichtenholz keine feststellbaren Unterschiede der Ausziehfestigkeit zwischen tangentialer und radialer Anordnung ( $\alpha = 90^\circ$ ) der Schrauben auftreten. Für Schrauben parallel zur Faser wird ebenfalls auf den abfallenden Potenzfaktor  $k_p$  sowie den damit verbundenen abfallenden Korrelationskoeffizienten hingewiesen.

Koch und Dünisch (2008) führten Untersuchungen durch, um mögliche Unterschiede in den mechanischen Eigenschaften von juvenilem und adultem Robinienholz zu ermitteln. Sie betrachteten dabei die Rohdichte, Druck- und Biegefestigkeit, Biege-Elastizitätsmodul, Bruchschlagarbeit und Brinell-Härte. Außerdem wurde der Auszieh widerstand von Vollgewinde-Holzbauschrauben (VG) mit einem Durchmesser von 4 mm geprüft. Generell konnten hierbei jedoch keine technologisch relevanten Unterschiede zwischen juvenilem und adultem Robinienholz erkannt werden. Auch für die in radialer und tangentialer Richtung eingeschraubten Holzbauschrauben wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen juvenilem und adultem Robinienholz festgestellt (siehe Tabelle 12). Die Autoren führen an, dass die vorhandenen Unterschiede zwischen den Mittelwerten im Bereich der Streuungen liegen und daher kein Einfluss der betrachteten Faktoren auftritt. Eine Information zu den Rohdichten, die für die Ausziehprüfungen verwendeten Prüfkörper, ist der Veröffentlichung leider nicht zu entnehmen.

**Tabelle 12: Zusammenfassung der Prüfergebnisse nach (Koch und Dünisch, 2008)**

Serie	$n$	$R_{ax,mean}$	COV
	[–]	[N]	[%]
radial, adult	125	3.280	13,6
radial, juvenil	121	3.206	11,0
tangential, adult	124	3.190	12,1
tangential, juvenil	130	2.929	14,8

Um den Einfluss der Holzfeuchte auf die mechanischen Eigenschaften des Holzes und auch speziell für die Ausziehfestigkeit zu ermitteln, wurden bereits zahlreiche Untersuchungen durchgeführt. Durch Prüfung von Fichtenvollholz und Fichten-BSH mit Einschraubwinkeln sowohl parallel als auch rechtwinklig zur Faser und mit Feuchtegehalten von 0 %, 9 %, 14 % und 19 % wurde von Pirnbacher et al. (2009) der Einfluss auf die Ausziehfestigkeit analysiert.



Dabei wurde von Pirnbacher et al. (2009) eine deutliche Trennung in zwei Versagensmodi festgestellt:

- unterhalb von 10 % Feuchtegehalt tritt ein starker Anstieg des Anteiles der Sprödbrüche auf und es kommt oft zu einer vollständigen Spaltung der Prüfkörper; frühe Risse sorgen für eine Abnahme der Tragfähigkeit;
- oberhalb von 10 % Feuchtegehalt kommt es zu einer stetigen Abnahme der Ausziehfestigkeit, welche mit einer linearen Funktion beschrieben werden kann.

Da ein Feuchtegehalt unter 8 % nur selten auftritt, wurde als Ergebnis einer Regressionsanalyse die bilineare Gleichung (2.30) zur Berücksichtigung des Feuchtegehaltes vorgeschlagen. Die ursprünglich von Pirnbacher et al. (2009) angegebene Gleichung weist dabei allerdings nur eine sehr geringe Abhängigkeit der Ausziehfestigkeit von der Holzfeuchte auf (Abnahme von 0,65 % pro Prozent Zunahme der Holzfeuchtigkeit über der Referenzfeuchte von 12 %). Die in Gleichung (2.30) angegebenen Werte stammen aus einer erneuten Aufbereitung der selben Daten sowie aus einem erheblich erweiterten Datensatz durch Ringhofer et al. (2014b), wobei ein Fehler bei der Messwertermittlung durch eine rechts-zensierte Datenanalyse ausgeglichen wurde.

$$k_{mc} = \begin{cases} 1,0 & 8\% \leq u \leq 12\% \\ 1,0 - 0,034 \cdot (u - 12) & 12\% < u \leq 20\% \end{cases} \quad (2.30)$$

$k_{mc}$  Faktor zur Beschreibung des Einflusses der Holzfeuchtigkeit auf die Ausziehfestigkeit [–]  
 $u$  im Prüfkörper vorhandene Holzfeuchtigkeit zum Zeitpunkt der Prüfung [%]

Von Ringhofer et al. (2015a) wurde auch die Abhängigkeit der Steifigkeit von der Holzfeuchte analysiert. Dabei wird für die auf die umschriebene Mantelfläche der Schraube bezogene Steifigkeit  $k_{ser}$  die Abnahme mit zunehmendem Feuchtigkeitsgehalt des Holzes auch nach der in Gleichung (2.30) angeführten Form bestimmt. Lediglich der Vorfaktor für die Abnahme ändert sich von 0,034 auf 0,016. Die Abnahme der Steifigkeit bei zunehmendem Feuchtigkeitsgehalt fällt demzufolge deutlich schwächer als für die Ausziehfestigkeit aus.

Neben diesen bilinearen Modellen wird von Ringhofer et al. (2014a) auch ein nichtlineares, kontinuierliches Modell vorgestellt, welches die Abhängigkeit der Ausziehfestigkeit vom Feuchtegehalt für die Fichte beschreibt.

Der Einfluss der Holzfeuchtigkeit auf die Ausziehtragfähigkeit für die Esche (*Fraxinus excelsior L.*) wurde von Hübner (2013a) bestimmt. Dabei wurde eine Abnahme für eine faserparallele Verschraubung von 2,7 % und für eine Verschraubung quer zur Faser von 2,4 % je Prozentpunkt steigender Holzfeuchte über  $u_{ref} = 12$  % festgestellt.

Einen ebenso wichtigen und wesentlichen Einfluss auf das Ausziehverhalten scheint die Schraubengeometrie zu haben. Die Durchführung und Analyse mittels einer Parameterstudie in der Masterarbeit von Pöll (2017) befasst sich im Grunde mit dem Ziel, die Lastübertragungsfläche der Schraube (abgewinkelte Oberfläche der lastzugewandten Gewindeflanke) zu maximieren. Die entsprechende Hypothese sieht dabei eine Steigerung der Ausziehfestigkeit mit zunehmender verankerter Gewindefläche vor. Allerdings kann bereits aus den bekannten Untersuchungen zum Vorbohrdurchmesser abgeleitet werden, dass auch bei geringeren Verankerungsflächen (Vorbohrdurchmesser etwas größer als der Schraubenkerndurchmesser) noch die Ausziehfestigkeit, welche ohne Vorbohrung erzielt wird, erreicht werden kann.

Eine Übersicht der Auswirkungen auf die Lastübertragungsfläche bzw. auf das verdrängte Holzvolumen bei Variation der Schraubengeometrie, sowie der Bereich der aktuellen Zulassungen, sind in der Arbeit von Pöll (2017) dargestellt.

In einer Untersuchung von Pirnbacher und Schickhofer (2007) wurden die Ausziehfestigkeiten von Holzbauschrauben verschiedener Hersteller mit unterschiedlichen Merkmalsausprägungen und Schraubengeometrien geprüft. Dabei wurden nur vergleichsweise geringfügige Unterschiede (rd.  $\pm 10$  %) zwischen den Ausziehfestigkeiten der verschiedenen Schrauben festgestellt, wodurch lt. den Autoren für Ausziehprüfungen der Einsatz eines Referenzproduktes keine wesentlichen Abweichungen verursacht.

---

## 2-5 SPALTKRÄFTE

---

Beim Eindrehen von selbstbohrenden Holzbauschrauben entstehen Spaltkräfte. Diese Kräfte resultieren aus dem Verdrängen jenes Holzvolumens quer zur Einschraubrichtung, welches als Raum für Schraubenkern und Gewindeflanken beansprucht wird. Unter Umständen kann es beim Eindrehen von Holzbauschrauben in das Holzbauteil ohne Vorbohren bereits zu einer Rissbildung oder auch und bereits vorzeitig zum völligen Aufspalten kommen. Dadurch wird die Tragfähigkeit so stark reduziert, dass das Bauteil nicht mehr eingesetzt werden kann. Auch feine Risse, welche keine offensichtliche Schädigung vermuten lassen, können bei weiterem Risswachstum unter Belastung zu einem Aufspalten des Holzes führen (Blaß und Uibel, 2009). Wie auch den Ausführungen von Enders-Comberg (2015) zu entnehmen ist, entstehen beim Ausziehen von eingeklebten Gewindestangen bei axialer Belastung entsprechend hohe Spaltkräfte, welche zu einem Aufspalten des Holzbauteiles führen können. Im Vergleich dazu wurde von Schmid (2002) festgestellt, dass bei Nägeln und Nagelverbindungen dieser Versagensmechanismus in der Regel nicht maßgebend werden kann, da es in diesem Fall bereits beim Einschlagen der Nägel zu einem völligen Aufspalten kommen würde. Kommt es beim Einschlagen zu keinem Aufspalten, so kann in weiterer Folge von einem duktilen Verhalten des genagelten Anschlusses ausgegangen werden.

Jedenfalls sind Prüfungen zur Festlegung der Mindestabstände (Rand- und Zwischenabstände), welche ein Aufspalten verhindern sollen, notwendig. Die verschiedenen Schraubentypen sind dabei zumeist durch ein unterschiedliches Spaltverhalten gekennzeichnet. Deshalb sind für einen Schraubentyp ermittelte Mindestabstände nicht als allgemeingültig anzusehen (Blaß und Uibel, 2007). Um die durch Einschraub- und Einfärbeversuche ermittelten Mindestabstände als ausreichend festzulegen, wurden deshalb auch im Rahmen von Untersuchungen von Blaß und Uibel (2007), welche die Ermittlung der Mindestabstände von Holzbauschrauben in BSP zum Ziel hatten, noch Belastungsversuche (Zug-Scherprüfungen) durchgeführt. Für den Fall eines Versagens durch Aufspalten unterhalb des Erwartungswertes müssen die Mindestabstände somit in weiterer Folge entsprechend erhöht werden.

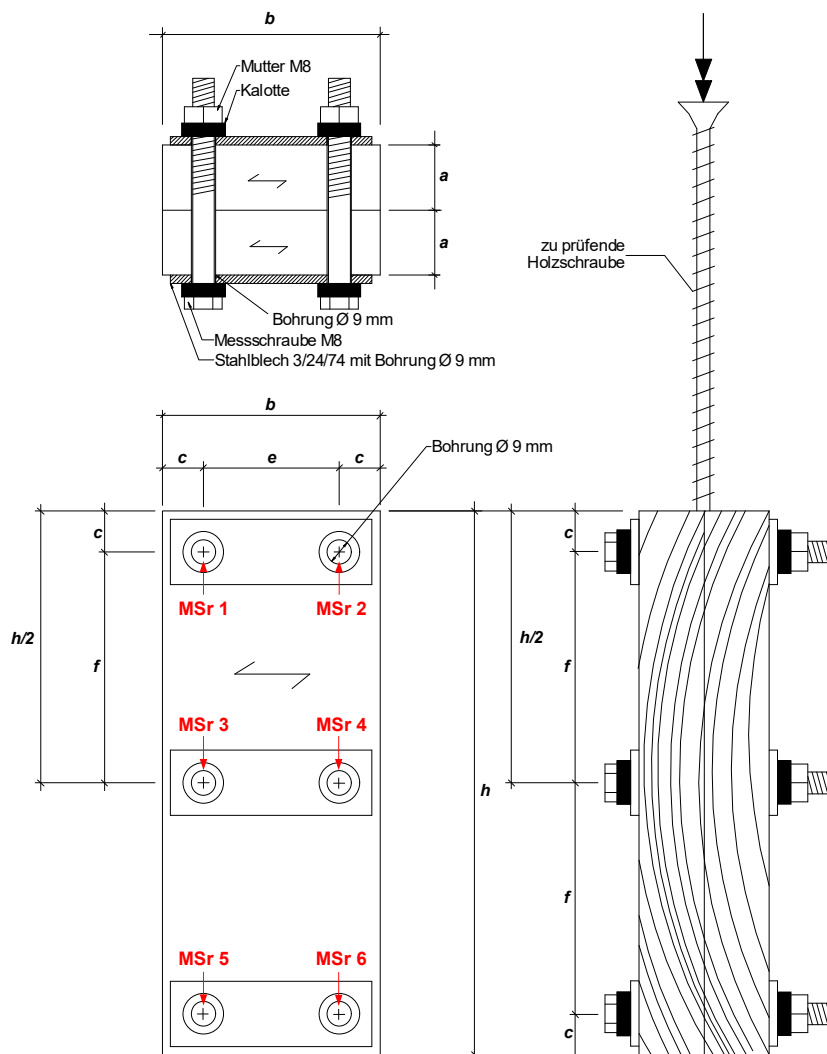
In bisherigen Publikationen zum Spaltverhalten von Holz ohne Vorbohren wurde größtenteils das Einschlagen von Nägeln betrachtet (Blaß und Uibel, 2009). Diese Ergebnisse beruhen dabei vor allem auf experimentellen Untersuchungen, wie unter anderem von Schmid (2002). In Untersuchungen von Blaß und Uibel (2007) wurde speziell der Fokus auch auf die Tragfähigkeit von stiftförmigen Verbindungsmitteln in Brettsperrholz gelegt. Im Rahmen dieser Forschungstätigkeiten wurden Einschraubtests von Holzbauschrauben zur Beurteilung der Rissausbreitung und Festlegung von Mindest-, Zwischen- und Randabständen ermittelt.

In nachfolgenden Projekten wurden für die Entwicklung einer Berechnungsmethode zur Bestimmung des Spaltverhaltens von Holz beim Applizieren von selbstbohrenden Schrauben von Uibel (2012) auch noch weitere Untersuchungen der Spaltkräfte durchgeführt. Das Ziel der Forschungen war, den Aufwand der notwendigen konventionellen Einschraubversuche zur Bestimmung von Mindestrand- und Zwischenabständen weitestgehend zu reduzieren. Trotzdem sollten damit ausreichende Aussagen über das Spaltverhalten gegeben werden können. Dafür müssen alle nicht modellierbaren Einflüsse, welche einen wesentlichen Einfluss auf das Spaltverhalten beim Eindrehen haben, entweder über allgemeingültige Gesetze beschrieben oder durch entsprechende Referenzversuche weiterhin ermittelt werden. Deshalb wurden in einem ersten Schritt materialspezifische Einflüsse im Rahmen von umfangreichen Prüfungen erfasst. So zum Beispiel der Einfluss der Rohdichte, der Breite und Lage der Jahrringe, der Holzfeuchte oder des Einschraubwinkels. Auch verbindungsmittelspezifische Einflüsse, welche nicht unmittelbar mit der Geometrie des Verbindungsmittels in Zusammenhang stehen müssen, wurden über Referenzversuche der gesamten Schraube ermittelt. Dazu zählen unter anderem spaltreduzierende Maßnahmen durch entsprechende Spitzen-, Kopf-, Schaft- und Gewindeausbildung oder die Vorbohrwirkung von selbstbohrenden Holzbauschrauben (Uibel, 2012).

Zur Ermittlung der oben genannten Einflüsse auf die Spaltkräfte wurde von Blaß und Uibel (2009) eine Versuchseinrichtung entwickelt. Dafür müssen die Prüfkörper zunächst aufgetrennt werden. Quer zur aufgetrennten Ebene werden Bohrungen ausgeführt, durch welche die beiden Hälften anschließend mit Messschrauben wieder zusammengespannt werden. Die Messschrauben, welche mit innenliegenden

Dehnungsmessstreifen (DMS) versehen sind, werden mit einer festgelegten Vorspannkraft über außenliegende Muttern angezogen. Durch das Eindrehen der zu prüfenden Holzschraube mittig zwischen den hintereinanderliegenden Messschrauben werden die beiden Prüfkörperhälften auseinandergedrückt. Die dabei entstehenden Spaltkräfte werden durch die DMS der Messschrauben in Form von Dehnungen aufgenommen und bei Beanspruchung im linear-elastischen Bereich in Kräfte umgewandelt. Die konstante Umdrehungszahl für das Eindrehen der Schraube wurde von Blaß und Uibel (2009) mit 50 U/min und die Vorspannkraft der Messschrauben mit je 100 N festgelegt. Die Prüfkonfiguration ist in Abbildung 19 zu sehen. Die Abmessungen der Prüfkörper bzw. die Lage der Schrauben wurden dabei variiert (Blaß und Uibel, 2009). Als Ergebnis wurde festgehalten:

*„Die Einflüsse der schraubenspezifischen Merkmale auf das Spaltverhalten können somit [Anm. des Autors: mit der entwickelten Versuchseinrichtung] qualitativ und quantitativ erfasst werden. Durch Vergleiche mit Referenzschrauben erlaubt die Methode eine Beurteilung der Schrauben im Hinblick auf die erforderlichen Mindestholzdicken in Abhängigkeit von den Mindestabständen durch objektive Messgrößen.“ (Uibel, 2012)*



**Abbildung 19: Prüfkonfiguration zur Ermittlung der Spaltkräfte (Blaß und Uibel, 2009)**

Wie Blaß und Uibel (2009) und Uibel (2012) allerdings auch festhalten, sind die Kräfte, welche mit dieser Prüfmethode gemessen werden, nicht die tatsächlichen Kräfte, welche beim Einschrauben in ein intaktes Holzbauteil auftreten, sondern stellen nur eine Abschätzung dieser Kräfte dar. Es handelt sich dabei also ausschließlich um Kräfte, welche eine qualitative bzw. relative Charakterisierung der betrachteten Einflüsse zulassen. Dementsprechend wird auch nicht die tatsächlich im Holzkörper auftretende Spannungsverteilung wiedergeben.

## Holzanatomie

Für Holz lässt sich für die tangential Richtung eine geringere Querkzugfestigkeit als für die radiale Richtung beobachten. Dies geht u. a. aus Untersuchungen von Blaß und Schmid (2001) hervor, welche die Querkzugfestigkeiten von Fichtenprüfkörpern (VH und BSH) bestimmten. So ergeben sich mittlere Querkzugfestigkeiten bei einer radialen Beanspruchung von  $2,55 \text{ N/mm}^2$  und für die tangential Richtung von  $1,80 \text{ N/mm}^2$ . In weiteren Untersuchungen der Laubhölzer zeigen sich die qualitativ gleichen Ergebnisse mit höheren Festigkeiten und Steifigkeiten in radialer Richtung im Vergleich zur tangentialen Richtung (Burgert et al., 2001).

Der Grund für die unterschiedlichen Querkzugfestigkeiten und Steifigkeiten in radialer und tangentialer Richtung ist für die Nadel- und Laubhölzer unterschiedlich und die Gründe hierfür werden in der Literatur kontrovers diskutiert. Burgert et al. (2001) fasst folgende zwei Ursachen für die Unterschiede zusammen: Für Nadelholz wird überwiegend davon ausgegangen, dass aufgrund der homogenen Holzstruktur im Vergleich zu den Laubhölzern vor allem die Jahrring- und Zellstruktur eine transversale Anisotropie bewirkt. Als zweiten Punkt wird oftmals zusätzlich von einem signifikanten Einfluss der Holzstrahlen auf die Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften ausgegangen.

Für die Laubhölzer, welche einen wesentlich komplexeren Aufbau der Holzstruktur aufweisen sind nach Burgert et al. (2001) die Holzstrahlen der maßgebende Einfluss für die unterschiedlichen Eigenschaften in radialer und tangentialer Richtung. Durch den wesentlich höheren Volumenanteil der Holzstrahlen am Gesamtvolumen des Holzes in Laubholz vs. Nadelholz ist in Laubhölzern ein höherer Einfluss der Holzstrahlen auf die radialen Eigenschaften zu erwarten. In der Publikation von Burgert et al. (2000) wird außerdem davon berichtet, dass übermäßig querkzugbelastetes Holz im Zuge des Wuchsprozesses dieser Beanspruchung mit einer Steigerung des Holzstrahlenanteils entgegenwirkt. Deshalb wird davon ausgegangen, dass die radiale Festigkeit des Holzes am stehenden Baum durch den Anteil der Holzstrahlen gesteuert wird.

Dieser Effekt der Holzstrahlen wurde auch in Prüfungen von Burgert et al. (2001) untersucht. Dabei wurde für sieben zerstreutporige und fünf ringporige Laubhölzer jeweils der radiale und tangential E-Modul, die Rohdichte und der Anteil der Holzstrahlen am Gesamtholzvolumen ermittelt.

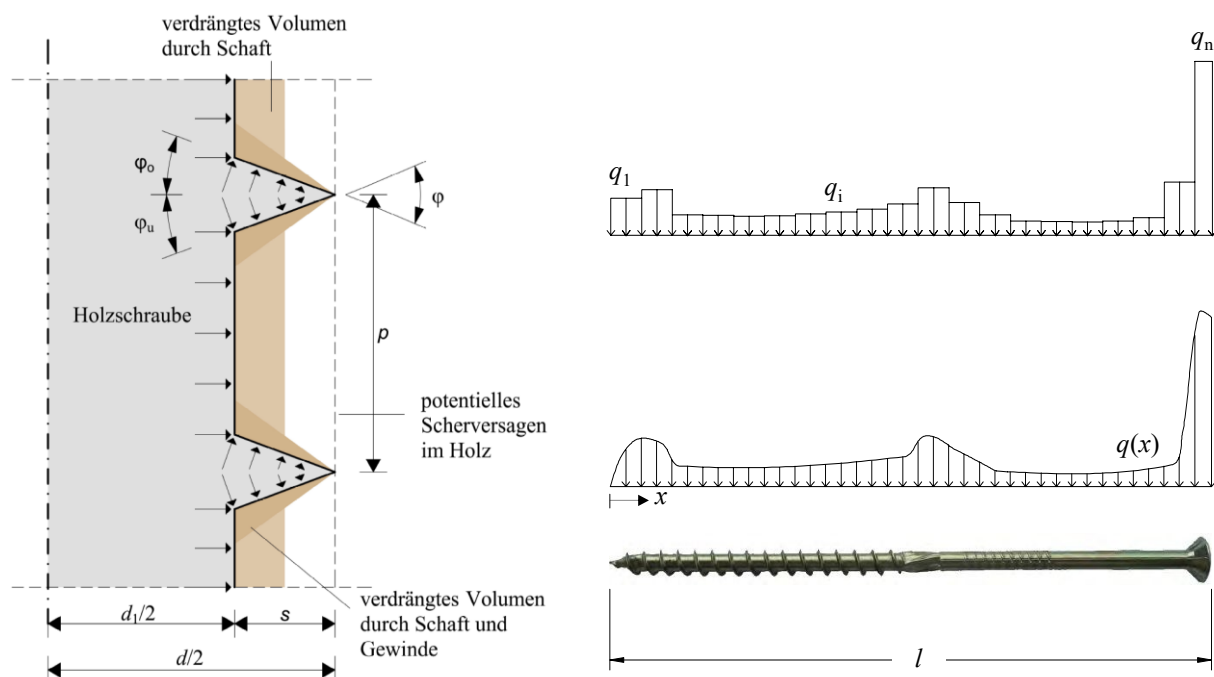
Die beiden E-Module in Querrichtung weisen dabei eine relativ hohe Korrelationen mit der Rohdichte auf (radial: 0,71; tangential: 0,85). Für die radiale Richtung wird beim Ausschluss einer Holzart, welche als Ausreißer identifiziert wurde, eine sehr hohe Korrelation des E-Moduls mit dem Holzstrahlvolumen bzw. dem Anteil der Holzstrahlen festgestellt (0,72). Die Ergebnisse bestätigen damit die oben angeführten Annahme von Burgert et al. (2000), dass das Holzstrahlvolumen einen maßgebenden Einfluss auf die radiale Zugfestigkeit aufweist, da zwischen der Festigkeit und Steifigkeit eine entsprechende positive Korrelation beobachtet werden kann (Stuefer, 2011).

Die geringere Festigkeit in tangentialer Richtung spiegelt sich in der erhöhten Spaltneigung radial. Für spezielle Holzprodukte, wie etwa die BauBuche, kommt es im Rahmen des Produktionsprozesses zur Herstellung des Ausgangsproduktes Furnier im Schälprozess zu einer weiteren unvermeidbaren Mikrorissbildung. Die damit ohnehin bereits geringen Querkzugfestigkeiten in tangentialer Richtung erfahren somit zusätzlich eine Reduktion, welche auch durch den Systemeffekt bei der Fügung der einzelnen Furniere zum Furnierschichtholz durch Verklebung nur bedingt gemindert werden kann. Dies führt wie im Fall der BauBuche zu einer besonders geringen charakteristischen Querkzugfestigkeit  $f_{t,90,k} = 0,6 \text{ N/mm}^2$  (ETA-14/0354, 2015), welche somit trotz des bedeutend besseren Ausgangsmaterials der Buche, nur geringfügig über den Werten der Fichte ( $f_{t,90,k} = 0,4 \text{ N/mm}^2$  (ÖNORM EN 338, 2016)) zu liegen kommt. In der Arbeit von Hübner (2013a) wird für Buchen-BSH (Ausgangsmaterial: Buche mit der Sortierqualität *superior colour* der Firma Pollmeier Furnierwerkstoffe GmbH) ein Wert für  $f_{t,90,k}$  von  $2,30 \text{ N/mm}^2$  ermittelt. Allgemein ist allerdings festzuhalten, dass die Zulassungswerte nicht unbedingt den Prüfwerten entsprechen müssen.

## 2-5.2 SPALTKRÄFTE DURCH EINDREHVORGANG

Von Pöll (2017) wird in einer Parameterstudie zur Schraubengeometrie die Hypothese, dass mit zunehmendem verdrängten Holzvolumen eine Zunahme der Spaltkraft (folglich erhöhte Rissinitiation bzw. Rissbildung) einhergeht, untersucht. In der Studie wurde der Einfluss der Schraubengeometrie auf das verdrängte Holzvolumen analysiert, wobei letzteres als Summe des Volumens des Schraubenkerns und des Gewindes definiert wurde.

Die Kräfte, welche durch den Einschraubvorgang auf das umgebende Holz wirken, sind in Abbildung 20 (links) dargestellt. Der Verlauf dieser Kräfte über die Schraubenlänge wurde von Blaß und Uibel (2009) untersucht und ist in Abbildung 20 (rechts) dargestellt. Dazu wurde ein FE-Modell, welches die beiden zusammengespannten Prüfkörperhälften beinhaltet und im Bereich der Schraubenachse die Spaltkräfte durch eine Streckenlast aufbringt, erstellt. Die quasi-statische Ersatzlast (Streckenlast entlang der Schraubenachse siehe mittig in Abbildung 20, rechts) wird im Anschluss so lange variiert, bis die Kräfte in den Messpunkten (Anordnung entsprechend den Messschrauben) mit den Versuchsergebnissen übereinstimmen. Für eine einfachere Berechnung werden in weiterer Folge anstatt der Streckenlast konstante Lastabschnitte  $q_i$  über eine definierte Lastabschnitte aufgebracht (siehe in Abbildung 20 rechts oben). Es ist dabei gut ersichtlich, dass es im Bereich der Schraubenspitze und des Reibschafes zu einer höheren Kraftwirkung auf das umgebende Holz kommt. Vor allem der Schraubenkopf, welcher hier als Senkkopf ausgebildet ist, kann beim Versenken zu erheblich größeren Spaltkräften führen als der Rest der Schraube. Entsprechend ist davon auszugehen, dass bei einer Abminderung des Schraubenkerndurchmessers über die Länge auch eine Reduktion der daraus resultierenden Spaltkräfte folgt (Pöll, 2017).



**Abbildung 20:** Links: Kräfte auf das Holz infolge Einschraubvorgang (Pöll, 2017)  
Rechts: Verlauf der Ersatzlasten für Rissberechnungen (Blaß und Uibel, 2009)

Wie Untersuchungen von Ringhofer und Schickhofer (2014b) zeigen, wird durch den konstanten und somit linearen Abfall der Normalkraft  $N_{ax}(x)$  über die Schraubenlängsachse nur im Bereich des Schraubenkopfes der Kerndurchmesser tatsächlich benötigt. Allerdings muss auch die Aufnahme des Eindrehmomentes der Norm entsprechend sichergestellt werden. Es könnte durch einen konischen Verlauf des Schraubenkerndurchmessers zur Spitze hin der zu verdrängende Volumenanteil des Kerns reduziert werden, um die Spaltwirkung ebenfalls zu reduzieren und Material zu sparen. Wie Pöll (2017) in seiner Arbeit schreibt, konnten für eine solche Kerengeometrie diese Effekte für Knochenschrauben bereits bestätigt werden.



Eine Vielzahl von unterschiedlichen Einflüssen auf die Spaltkräfte beim Eindrehen von selbstbohrenden Holzbauschrauben wurden von Blaß und Uibel (2009) und Uibel (2012) untersucht und publiziert. Es wurde dabei die bereits oben beschriebene und in Abbildung 19 dargestellte Versuchskonfiguration verwendet. Mit drei unterschiedlichen selbstbohrenden Holzbauschrauben {A, B, C} wurden die Versuchsreihen (Bezeichnung mit Schraubenabkürzung und Rohdichtegruppe {1, 2, 3}) durchgeführt. Während in den Versuchsreihen A-1 bis C-1 die Schraubenspitze wieder aus den Versuchskörpern ausgetreten ist (hindurchgeschraubt), kam bei den restlichen Serien die Schraubenspitze im Prüfkörper zu liegen.

Als Vergleichsgröße für die einzelnen Versuche bzw. Versuchsreihen wird die mittlere Gesamtkraft  $F_{m,tot}$ , bei welcher die Vorspannung der Messschrauben nicht berücksichtigt wird, herangezogen. Die Ermittlung erfolgt dabei durch Integration der Messschraubenkräfte über die Einschraubtiefe (siehe Gl. (2.31)) und nachfolgender Division durch eine Referenzlänge der Schraube ermittelt (Prinzip äquivalenter Flächen bzw. Energieäquivalenz).

$$F_{m,tot} = \frac{1}{l_{S,ref}} \cdot \int_0^l (F_{MS,1}(x) + F_{MS,2}(x) + \dots + F_{MS,i}(x) + \dots + F_{MS,n}(x)) dx \quad (2.31)$$

$F_{m,tot}$	mittlere Gesamtkraft zur Beurteilung des Spaltverhaltens [N]
$l$	Einschraubtiefe bzw. Einschraubweg [mm]
$l_{S,ref}$	Referenzlänge der Schraube, bezogene Schraubenlänge [mm]
$F_{MS,i}(x)$	Wert der gemessenen Kraft an der $i$ -ten Messschraube [N]

## Rohdichteinfluss

Das Spaltverhalten von Holz und die damit verbundenen Spaltkräfte beim Einschrauben von Holzbauschrauben werden maßgeblich von der Rohdichte beeinflusst. Somit stellt die Rohdichte lt. Uibel (2012) einen der wichtigsten materialspezifischen Einflüsse dar.

In Abbildung 21 sind die mittleren Gesamtkräfte  $F_{m,tot}$  für die Versuchsreihen 1 bis 3 eingetragen. Die unterschiedlichen Rohdichtebereiche, welche die Versuchsreihen abdecken, geben dabei Aufschluss über den Einfluss der Rohdichte auf die Spaltkräfte. Es wird für alle drei Schraubentypen {A, B, C} eine deutliche positive Korrelation zwischen mittlerer Gesamtkraft und der Rohdichte festgestellt. Die verwendeten Schrauben weisen dabei die in der nachfolgenden Tabelle 13 angegebenen Eigenschaften auf.

**Tabelle 13: Übersicht geometrischer Eigenschaften der untersuchten Schraubentypen nach (Uibel, 2012)**

Schraubentyp	Ausführung	$l$	$d$	$d_1$	$d_1/d$	$d_k$	Bohrspitze
	[–]	[mm]	[mm]	[mm]	[–]	[mm]	[–]
A	VG	200	8	5,00	0,63	15,1	ja
B	VG	200	8	4,90	0,61	9,80	ja
C	TG	200	8	5,25*	0,66	14,8	ja

\* Schaftdurchmesser der Teilgewindeschraube  $d_s = 5,70$  mm

Die unterschiedlichen Potenz- und Vorfaktoren für den Rohdichteinfluss lassen Uibel (2012) darauf schließen, dass die Unterschiede von der Gestaltung der Schraube abhängig sind. Die ermittelten Potenzfunktionen mit den zugehörigen Korrelationskoeffizienten sind in Abbildung 21 dargestellt.

Damit kann die Hypothese von Pöll (2017), welche einen Anstieg der Spaltkraft bei zunehmendem verdrängtem Holzvolumen durch die Schraube (Kern und Gewinde) beinhaltet, teilweise bestätigt werden. Bei der Annahme, dass die Gewindeausführungen für alle Schraubentypen in Tabelle 13 grundsätzlich identisch sind (es liegt keine Information dazu vor), müsste der Schraubentyp mit der Bezeichnung C aufgrund des größten Kerndurchmessers auch die größten Spaltkräfte verursachen. Allerdings ist durch



die Ausführung dieser Schraube als Teilgewindeschraube und der Anordnung eines Reibschafes im Übergangsbereich des Gewindes zum Schaft eine andere Charakteristik der Spaltkräfte im Vergleich zu den Schraubentypen A und B zu erwarten. Deshalb ist es durchaus plausibel, dass für den Schraubentyp C lediglich reduzierte Spaltkräfte auftreten.

Der Vergleich der ermittelten Spaltkräfte für die Schraubentypen A und B (siehe Abbildung 21) bestätigt den Ansatz von Pöll (2017). Für den Schraubentyp A ( $d_1 = 5,0$  mm) treten bedeutend größere Spaltkräfte als für den Schraubentyp B ( $d_1 = 4,9$  mm) auf. Der große Unterschied, welcher nahezu den Faktor 2,0 annimmt, fällt allerdings doch sehr bzw. etwas zu deutlich aus. Weitere, nicht bekannte Eigenschaften der beiden Schraubentypen könnten einen entsprechenden Einfluss aufweisen.

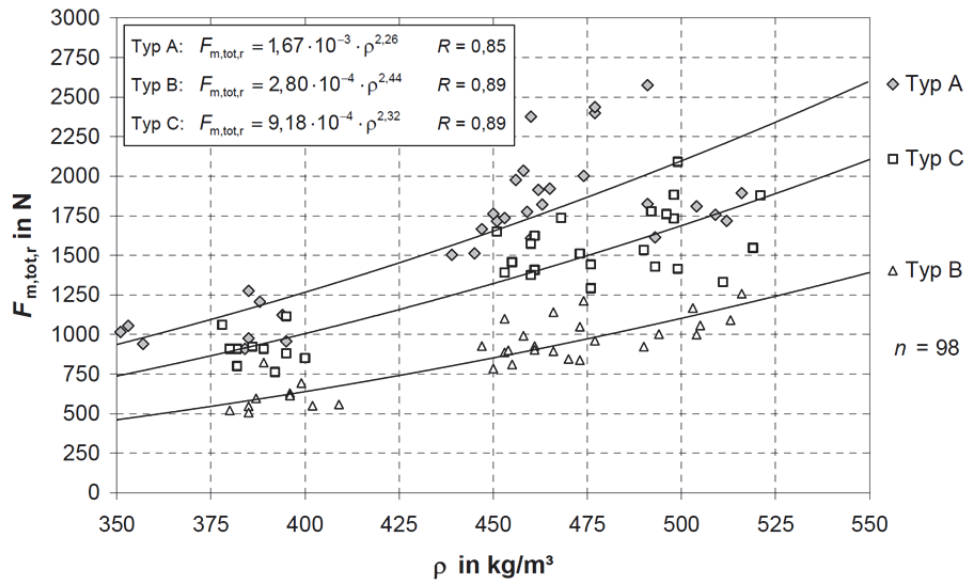


Abbildung 21: Mittlere Gesamtkraft  $F_{m,tot,r}$  in Abhängigkeit der Rohdichte und des Schraubentyps (Uibel, 2012)

### Einfluss des Schraubentyps bzw. der Schraubenmerkmale

Wie bereits in Abbildung 21 zu erkennen ist und auch von Uibel (2012) angeführt wird, ist das Spaltverhalten von Holzbauteilen bzw. die resultierende Spaltkraft beim Eindrehen maßgebend durch die Gestaltung der Schraubenmerkmale und der Gewindegeometrie beeinflusst.

Auch bei Holzbauschrauben mit gleichen Nennmaßen wurden in den Untersuchungen deutliche Differenzen bezüglich der Spaltkräfte festgestellt. Diese Unterschiede werden dabei auf die sogenannten verbindungsmitteilspezifischen Einflüsse zurückgeführt. Ein Rückschluss auf das Spaltverhalten von anderen Schraubentypen, auch bei gleichen Nennmaßen, ist lt. Uibel (2012) deshalb nicht möglich. Deshalb ist für jeden Schraubentyp bzw. jede Schraubenabmessung die Bewertung und Interpretation der Spaltkraftverläufe separat vorzunehmen.

In der Abbildung 22 ist ein charakteristischer Verlauf der Messschraubenkräfte (Positionierung siehe Abbildung 19) beim Eindrehen einer 8 x 200 mm Schraube in Fichten-VH nach Prüfdaten von Uibel (2012) zu sehen. Dargestellt sind dabei die sechs gemessenen Kräfte abzüglich der Vorspannung, welche auf die einzelnen Messschrauben wirken.

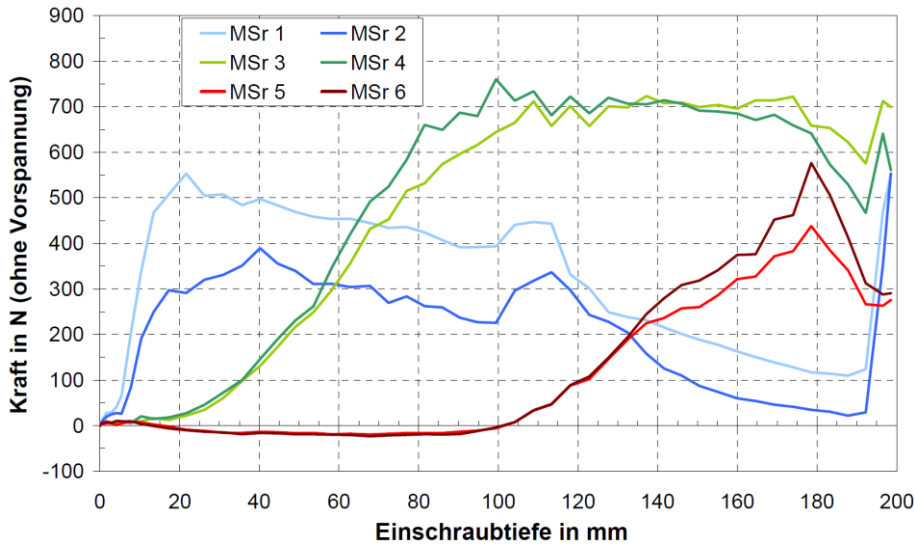


Abbildung 22: Kräfte in den Messschrauben für eine Teilgewindeschraube (Uibel, 2012)

Die folgende Beschreibung bzw. Interpretation des Kräfteverlaufes bildet eine Zusammenfassung der Ausführungen in der Publikation von Uibel (2012):

Wie gut zu erkennen ist, bilden diejenigen Messschrauben, welche in Einschraubrichtung in einer gemeinsam liegenden Tiefe angeordnet sind, immer ein Messschraubenpaar und weisen deshalb einen ähnlichen Kräfteverlauf auf. Ansonsten unterscheiden sich die Messschraubenkräfte über den Einschraubweg durch die verschiedenartig ausgeprägten Merkmale signifikant.

Für die Messschrauben 1 und 2 wird neben der maximalen Spaltkraft während des Bohrvorganges der Schraubenspitze in diesem Bereich auch bei einer Einschraubtiefe von 100 bis 120 mm ein weiteres Kräfte maximum erreicht. Dieses lokale Maximum zeigt das Eindringen des Reibschafes, angeordnet zwischen Gewinde und Schaftbereich.

Bis zu einer Einschraubtiefe von 100 mm wird in den Messschrauben 5 und 6 ein geringfügiges Absinken der Spaltkräfte beobachtet. Dies resultiert aus der kinematischen Beziehung, dass die Probekörperhälften zu Beginn des Einschraubvorganges im Anfangsbereich auseinander und folglich im Endbereich zusammen gedrückt werden. Die leicht negativen Spaltkräfte treten ausschließlich durch den Abbau der Vorspannkräfte auf.

Der starke Anstieg der Messschraubenkräfte 1 und 2 wenige Millimeter vor Erreichen der maximalen Einschraubtiefe ist auf das Versenken des Schraubenkopfes zurückzuführen. Dementsprechend ist die Höhe und Charakteristik dieser Ausprägung je nach Schraubentyp bzw. Schraubenkopfausbildung unterschiedlich.

## Winkel

Auch der Einfluss des Winkels zwischen Schraubenachse und Faserrichtung wurde von Uibel (2012) untersucht. Dabei wurde für den Schraubentyp C festgestellt, dass die mittlere Gesamtkraft bei  $0^\circ$  und  $45^\circ$  zur Faser nur 60 % des Wertes von einem Einschraubwinkel von  $90^\circ$  zur Faserrichtung beträgt. Für den Schraubentyp B hingegen wurden aufgrund einer sehr wirkungsvollen Bohrspitze kaum Unterschiede durch Veränderung der Winkel festgestellt. Uibel (2012) geht davon aus, dass aufgrund einer um 50 % geringeren mittleren Gesamtkraft quer zur Faser im Vergleich zum Typ C bereits ein Minimum der Spaltkräfte erreicht ist und es deshalb zu keiner Beeinflussung durch den Winkel mehr kommt.

## Weitere Einflüsse

Uibel (2012) hat einige weitere Einflüsse auf die Spaltkräfte untersucht, welche im Rahmen dieser Arbeit allerdings keine Rolle spielen, da diese nicht variiert werden oder generell nur geringfügige Auswirkungen auf die Ergebnisse zeigen.

So zeigt der Winkel zwischen Jahrringtangente und Schraubenachse einen Einfluss auf die Spaltkräfte. Bei liegenden Jahrringen (90° bzw. radial) treten größere Spaltkräfte im Vergleich zu stehenden Jahrringen (0° bzw. tangential) auf, wo die Schraube mehr in den Frühholzbereichen verlaufen kann. Wie groß die Steigerung der Spaltkräfte ausfällt ist vom Schraubentyp abhängig; kann bis zu 20 % ausmachen. Von Uibel (2012) wird dieser Einfluss im Vergleich zur Rohdichte bzw. zur verbleibenden Reststreuung allerdings als gering eingestuft.

Die mittleren Gesamtkräfte bei der Verwendung von Schrauben, welche über vergleichbare Geometrie-Verhältnisse und äquivalent wirkende Schraubenmerkmale aber variable Durchmesser verfügen, ergeben sich bei höheren Schraubendurchmessern auch zu höheren Werten (Anstieg der Spaltkraft durch größere Schraubendurchmesser) (Uibel, 2012). Ein nichtlinearer degressiver Anstieg, welcher aus dem abnehmenden Verhältnis von  $d_1/d$  bei ansteigendem Schraubendurchmesser resultiert bzw. zu erwarten ist, scheint dabei naheliegend. In den Ergebnissen von Uibel (2012), wo Schrauben vom Typ C mit Durchmessern von 6, 8 und 10 mm untersucht wurden ( $d_1/d$  von 0,63, 0,66 und 0,64), zeigt sich ein nahezu linearer Anstieg der mittleren Gesamtkraft für diesen Schraubentyp.

Die Variation der Messschraubenanzahl zwischen 6, 8 und 10 Stück führt zu Abweichungen der mittleren Gesamtkraft zwischen 4,6 % und 10,6 %. Auch dieser Einfluss kann daher im Vergleich zur Reststreuung vernachlässigt werden. Auch der Vergleich der Kraft-Weg-Diagramme aus den Berechnungen von Uibel (2012) ergibt für den kumulierten Spaltkräfteverlauf keine nennenswerten Unterschiede.

Die Variation der Vorspannkraft zwischen 50, 100 und 150 N zeigt ebenso kaum Unterschiede in den Ergebnissen wie die Veränderung der Einschraubgeschwindigkeit. Es wird darauf hingewiesen, dass sowohl eine zu hohe Vorspannkraft (Überschreitung der Querdruckfestigkeit des Holzes) als auch eine zu geringe Vorspannkraft (Auseinanderklaffen der beiden Prüfkörperhälften während des Eindrehvorganges) vermieden werden soll (Uibel, 2012). Auch bei Erhöhung der Einschraubgeschwindigkeit kommt es aufgrund des schnelleren Eindrehvorganges zu geringfügig höheren Spaltkräften (empfohlen 50 U/min). Eine Information zu einer möglicherweise einhergehenden Änderung des Eindrehwiderstandes liegt unterdessen nicht vor.

Auch eine Variation der Prüfkörpergeometrie wurde in den Untersuchungen von Uibel (2012) betrachtet. Dabei ergaben sich innerhalb der untersuchten Geometrien nur Einflüsse von untergeordneter Bedeutung auf die mittlere Gesamtkraft.

In Pöll (2017) wurde auf Basis der Ergebnisse von Blaß und Uibel (2009) versucht, durch die Spaltkräfte, welche beim Eindrehen der Holzschraube in Fichte durch das Verdrängen des Volumens entstehen, auf die zu erwartenden Spaltkräfte für Laubholz (exemplarisch für Buche der Festigkeitsklasse D50) hoch zu skalieren. Dabei wurde ein linear-elastischer Ansatz verwendet, bei welchem ausschließlich das Verhältnis der E-Module die Erhöhung der zu erwartenden Spaltkräfte beschreibt. So ergeben sich entsprechend der Tabelle 14 die folgenden Werte:

**Tabelle 14: Verhältnisse der Rohdichten und E-Moduln von Buche und Fichte**

Holzart bzw. Festigkeitsklasse			$E_{0,mean}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E_{90,mean}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\rho_{mean}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$F_{MS}$ [N]
LH	Buche	D50	14.000	930	740	2.500
NH	Fichte	C30	12.000	400	460*	1.000
<b>Verhältnis</b>			1,17	2,33		

\* vorh. Rohdichte der Fichtenprobekörper aus den Prüfungen von Blaß und Uibel (2009); alle restlichen Kenngrößen lt. ÖNORM EN 338 (2016)

Auf Basis der in Blaß und Uibel (2009) auftretenden maximalen Messschraubenkräfte, welche in Fichte mit einer mittleren Rohdichte von  $460 \text{ kg/m}^3$  ermittelt wurden (etwa  $1.000 \text{ N}$ ), kann auf die zu erwartenden Messschraubenkräfte hochextrapoliert werden (Pöll, 2017). Die zu erwartenden in radialer und tangentialer Richtung auftretenden Spaltkräfte für Buche (D50) lassen sich über das Verhältnis für die E-Moduln quer zur Faserrichtung ( $E_{90,\text{mean},D50}/E_{90,\text{mean},C24} = 2,33$ ) mit rd.  $2.330 \text{ N}$  abschätzen.

Auch eine Abschätzung ausschließlich über den zuvor beschriebenen Einfluss der Rohdichte auf die Spaltkräfte liefert einen Wert in vergleichbarer Größenordnung. Bei Verwendung der Fichte mit der dazugehörigen Spaltkraft (ca.  $1.000 \text{ N}$ ) und Rohdichte ( $460 \text{ kg/m}^3$ ) als Ausgangspunkt und dem gemittelten Potenzfaktor der Rohdichte der drei Schraubentypen A, B und C nach Uibel (2012), welcher sich zu  $2,34$  ergibt (siehe Abbildung 21), führt dies entsprechend Gleichung (2.32) zu einer erwarteten Spaltkraft von  $3.042 \text{ N}$ .

$$F_{\text{MS},D50} = F_{\text{MS},C24} \cdot \left( \frac{\rho_{D50,\text{mean}}}{\rho_{C24,\text{vorh.}}} \right)^{2,34} = 1.000 \cdot \left( \frac{740}{460} \right)^{2,34} = 3.042 \text{ N} \quad (2.32)$$

$F_{\text{MS},D50}$	maximale erwartete Messschraubenkraft in Buche (Festigkeitsklasse D50) [N]
$F_{\text{MS},C24}$	maximale gemessene Messschraubenkraft in Fichte (Festigkeitsklasse C24) [N]
$\rho_{D50,\text{mean}}$	mittlere Rohdichte für Buche (Festigkeitsklasse D50) lt. ÖNORM EN 338 (2016) [ $\text{kg/m}^3$ ]
$\rho_{C24,\text{vorh.}}$	vorhandene Rohdichte der Fichtenprobekörper [ $\text{kg/m}^3$ ]

Die Berücksichtigung von weiteren Einflussfaktoren, wie die Verwendung von Schraubentypen mit anderen Merkmalsausprägungen, ist hierbei jedoch nicht berücksichtigt.

### **Abklingen der Spaltkräfte**

Aufgrund des kombinierten elastischen und viskosen, zeitabhängigen Verhaltens von Holz wird es auch als viskoelastischer Werkstoff bezeichnet (Blaß und Sandhaas, 2016). Das Abklingen der Spaltkräfte, welche durch das Applizieren der Schraube in den Holzkörper entstehen, wird dabei maßgeblich von diesem viskoelastischen Materialverhalten beeinflusst. Dabei wird im Allgemeinen zwischen den drei folgenden Hauptgruppen unterschieden (rheologische Eigenschaften):

- Kriechen
- Spannungsrelaxation
- Dauerstandfestigkeit

#### **Kriechen**

Unter Kriechen versteht man dabei die zeitliche Zunahme einer Verformung unter einer ständig wirkenden Belastung (konstante Spannung; Berücksichtigung in der Bemessung durch  $k_{\text{def}}$ ). Wie bereits aus dem Modell von Mattheck (1994) (siehe Kapitel 2-1.2) hervorgeht, werden für die Aufnahme der Zug- und Druckkräfte unterschiedliche Zellbestandteile herangezogen. So zeigt das Holz durch die kristallinen Celluloseketten eine hohe Festigkeit sowie geringe Kriechneigung bei einer Zugbeanspruchung parallel zur Faser. Bei einer Druckbeanspruchung wird die Last hingegen fast ausschließlich durch das amorphe Lignin übernommen. Dieses neigt im Gegensatz zu kristallinen Festkörpern zu einem starken Kriechverhalten (Schickhofer, 2007).

Das Kriechverhalten kann generell in drei Bereiche unterteilt werden: Nach dem Aufbringen der Kraft steigt die Kriechverformung rasch an. Dabei kommt es zu einem Ausrichten der Moleküle und zu ersten Mikrobrüchen (Niemz, 2011). Im nachfolgenden zweiten Bereich stellt sich eine konstante Kriechgeschwindigkeit ein.

Bei anschließender Änderung der Belastung und somit Spannungsänderung (Definition mit konstanter Spannung für den Kriechvorgang ist somit nicht mehr eingehalten) kommt es für den dritten Bereich zu zwei unterschiedlichen Möglichkeiten: (1) Es stellt sich im Fall einer Entlastung auch eine Rückverformung eines Teils der Kriechverformung ein (abhängig von der Belastungsart und -dauer, allerdings nicht

vollständig, was auf eine Schädigung des Holzes im mikroskopischen Bereich hindeutet; Holz ist kein ideal viskoelastischer Werkstoff) (Blaß und Sandhaas, 2016). (2) Für den Fall, dass die Spannung erhöht wird, kommt es zu einem Tertiärkriechen, welches durch einen progressiven Anstieg der Kriechverformung erkennbar wird und in weiterer Folge zum Bruch führt (Niemz, 2011).

Das Kriechverhalten wird maßgebend von den folgenden Parametern beeinflusst (Blaß und Sandhaas, 2016):

- Holzfeuchte bzw. Holzfeuchteänderungen
- Belastungsdauer
- Temperatur
- Höhe und Art der Spannung

Dabei weisen die ersten beiden Faktoren den größten Einfluss auf das Kriechen auf. Außerdem zeigt sich für verschiedene Werkstoffe bzw. Holzprodukte ein stark unterschiedliches Kriechverhalten. In der Regel steigen mit dem Zerlegungsgrad die Kriechverformungen auch entsprechend an, weshalb Holzwerkstoffe generell stärker kriechen als Vollholz. Allerdings kommt es dabei auch auf den Aufbau bzw. die Schichtung des Holzproduktes an (unterschiedliches Kriechverhalten von BSH und BSP). Mit steigender Last und Temperatur kommt es ebenfalls zu einem stärkeren Kriechverhalten. Der Temperatureinfluss resultiert dabei aus der polymeren Struktur des Holzes (Blaß und Sandhaas, 2016).

Aufgrund des eingangs beschriebenen Verhaltens der Zellwandkomponenten kommt es für Druckbeanspruchungen zu stärkeren Kriechverformungen als bei vergleichbaren Zug- oder Biegebeanspruchungen. Die größten Kriechverformungen sind bei Torsionsbeanspruchungen zu beobachten (Schickhofer, 2007).

Auch der Last-Faserwinkel weist für die Kriechverformung einen maßgebenden Einfluss auf. So zeigen sich für Lasten quer zur Faser etwa die 8-fachen Kriechverformungen im Vergleich zu einer Belastung parallel zur Faser (Niemz, 2011).

### **Relaxation**

Im Gegensatz zum Kriechen kommt es bei der Relaxation zu einer zeitabhängigen Spannungsabnahme bei behinderter, somit konstanter, Verformung. Der Effekt der Spannungsrelaxation ist vor allem für Klebefugen und vorgespannte Holzkonstruktionen von Bedeutung und liegt in der Größenordnung der Kriechverformungen (für eine relative Betrachtung). Es ist deshalb für vorgespannte Bauteile oftmals ein Nachspannen erforderlich (Schickhofer, 2007; Blaß und Sandhaas, 2016).

Besonders eine Änderung der Holzfeuchte bzw. die damit einhergehenden Quell- und Schwindverformungen wirken sich für vorgespannte Bauteile erheblich auf die Spannungen aus. Während in der Trocknungsphase die Spannungen sinken (Schwinden des Holzes), kommt es in der Befeuchtungsphase zu einer Zunahme der Spannungen (Niemz, 2006). Inwieweit dieses Verhalten allerdings einer alleinigen Relaxation zuzuschreiben ist sei dahingestellt.

### **Dauerstandfestigkeit**

Die ebenfalls zu den rheologischen Eigenschaften zählende Dauerstandfestigkeit ist jene Spannung, mit der ein Werkstoff unendlich lange belastet werden kann ohne zu versagen. Die maßgebenden Einflussparameter sind mit jenen für das Kriechen und die Relaxation ident. Die Dauerstandfestigkeit von Holz, welche erheblich vom Feuchtegehalt abhängig ist, liegt im Normalklima bei etwa 60 % der Kurzzeitfestigkeit (Niemz, 2011).

Dieser für die Bemessung von Holzbauteilen äußerst wichtige Einfluss der Dauerstandfestigkeit wird über den sogenannten  $k_{\text{mod}}$ -Faktor (abhängig von der Klasse der Lasteinwirkungsdauer und der Nutzungsklasse) berücksichtigt (Schickhofer, 2007).

### 2-5.3 SPALTKRÄFTE DURCH AUSZIEHVORGANG

In den Untersuchungen von Blaß und Uibel (2007) erfolgt zur Überprüfung der Mindestabstände, welche auf der Grundlage von Eindrehversuchen ermittelt wurden, noch eine Zug-Scherbelastung (Schrauben dabei auf Abscheren belastet) der Verbindungsmittel. Wie Enders-Comberg (2015) und Pöll (2017) zu entnehmen ist, entstehen auch bei axialer Belastung von Verbindungsmitteln entsprechend hohe Spaltkräfte. Durch die Abstützwirkung des Gewindes auf der Holzmatrix wird eine Spaltkraft im Holz induziert (Enders-Comberg, 2015). Deshalb resultiert nicht nur aus dem Einschraubvorgang, sondern auch aus der axialen Belastung heraus eine über die Kontaktfläche der Gewindeflanken induzierte Spaltkraft, welche ein Aufspalten verursachen kann.

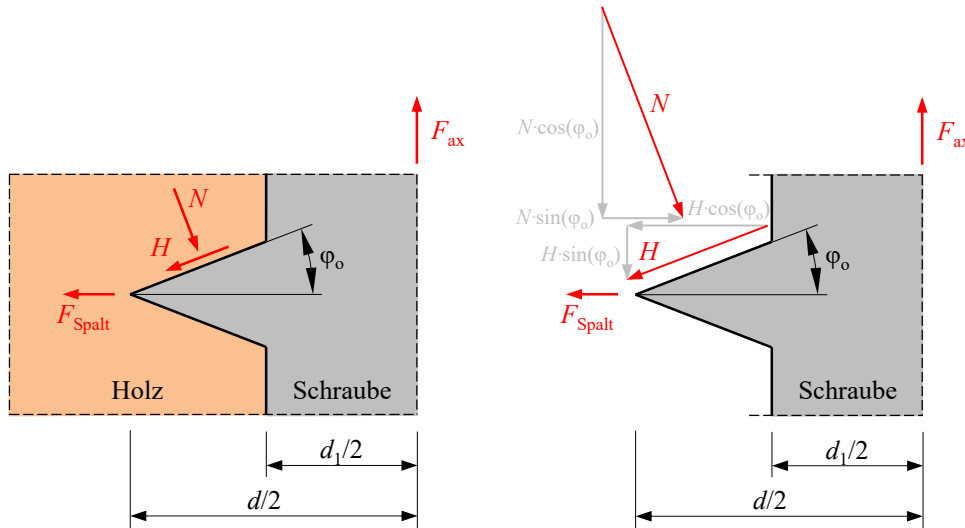


Abbildung 23: Einwirkende Kräfte auf die Gewindeflanke und mechanisches 2D-Modell nach (Pöll, 2017), in Anlehnung an (Enders-Comberg, 2015)

Entsprechend Enders-Comberg (2015) kann mithilfe eines einfachen mechanischen zweidimensionalen Modells eine quantitative Abschätzung dieser Spaltkraft erfolgen. Bei Betrachtung von lediglich einer Gewindeflanke wird jene horizontal wirkende Spaltkraft  $F_{\text{Spalt}}$  bestimmt, welche ausreicht, um den Verbund zwischen Gewinde und Holz zu gewährleisten. Dafür wird den beiden beteiligten Werkstoffen ein rein linear-elastisches Materialverhalten unterstellt. In Abbildung 23 sind die Kräfte, welche aus der axialen Belastung  $F_{\text{ax}}$  resultieren, dargestellt. Eine Aufteilung der Kräfte in normale und parallele Anteile zur lastzugewandten Gewindeflanke (Kontaktfläche) lässt die Aufstellung der Gleichgewichtsbedingungen und Berechnung von  $F_{\text{Spalt}}$  zu. So ergibt sich aus den Gleichungen (2.33) bis (2.34) die Formel für die Spaltkraft, welche in Gleichung (2.37) zu sehen ist.

$$\sum H = 0: F_{\text{Spalt}} - N \cdot \sin \varphi_0 + H \cdot \cos \varphi_0 = 0 \quad (2.33)$$

$$\sum V = 0: F_{\text{ax}} - N \cdot \cos \varphi_0 - H \cdot \sin \varphi_0 = 0 \quad (2.34)$$

$$\text{Annahme: } H = N \cdot \mu \quad (2.35)$$

mit (2.35) in (2.34)

$$\Rightarrow N = \frac{F_{\text{ax}}}{\cos \varphi_0 + \mu \cdot \sin \varphi_0} \quad (2.36)$$

einsetzen von (2.36) und (2.35) in (2.33)

$$\begin{aligned} F_{\text{Spalt}} &= N \cdot \sin \varphi_0 - H \cdot \cos \varphi_0 \\ \Rightarrow F_{\text{Spalt}} &= F_{\text{ax}} \cdot \left( \frac{\sin \varphi_0 - \mu \cdot \cos \varphi_0}{\cos \varphi_0 + \mu \cdot \sin \varphi_0} \right) \end{aligned} \quad (2.37)$$



Das nachfolgende Diagramm in Abbildung 24 zeigt den Anteil der Spaltkraft in Abhängigkeit von der axialen Belastung. Es wird darin für fünf verschiedene Reibbeiwerte  $\mu = \{0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5\}$  das Verhältnis von  $F_{\text{Spalt}}/F_{\text{ax}}$  in Abhängigkeit von der Flankenneigung  $\varphi_0$  dargestellt.

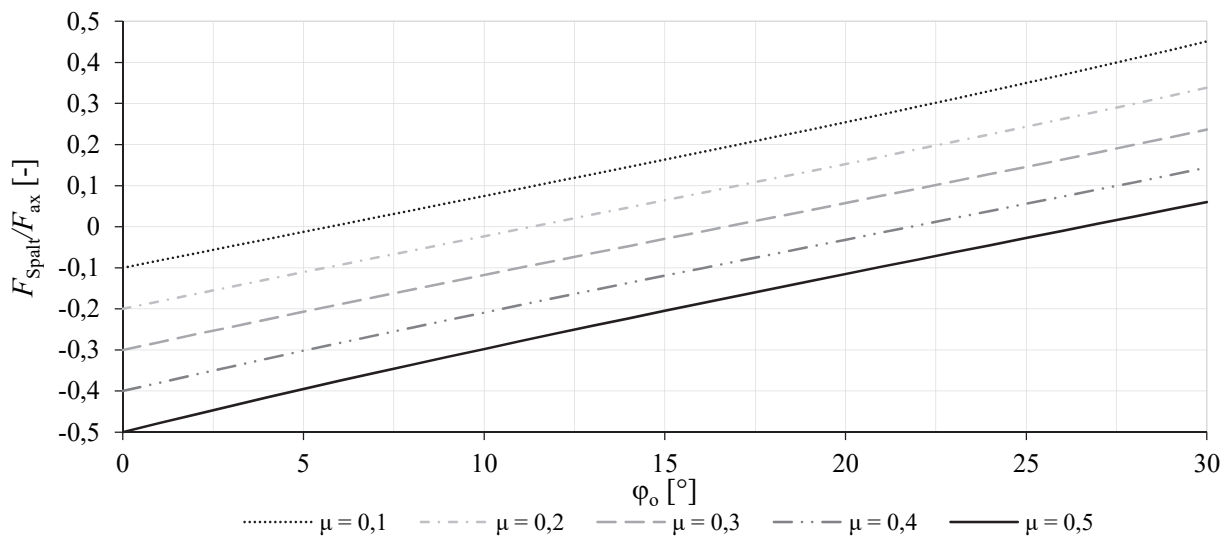


Abbildung 24: Spaltkraft in Abhängigkeit von der Flankenneigung  $\varphi_0$  für verschiedene Reibbeiwerte

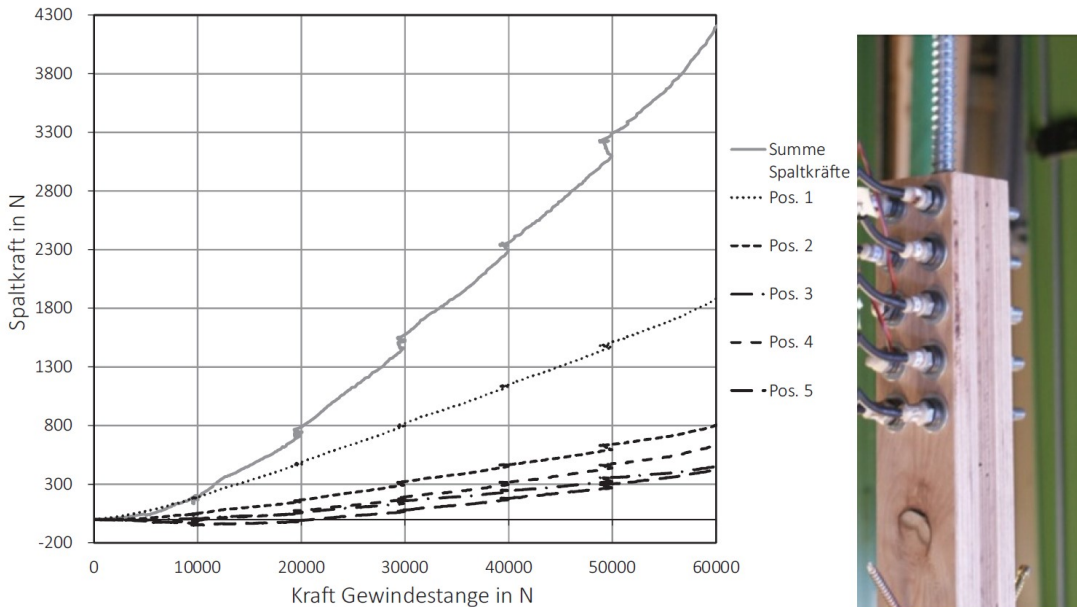
Wie der Abbildung 24 zu entnehmen ist, kommt es bei einem konservativen Reibbeiwert von 0,2 ab einer Flankenneigung von  $11^\circ$  zu einer Querzugbelastung. Für  $\mu = 0,3$  tritt der Übergang von einer theoretischen Querdruck- zu einer Querzugbelastung bei einer Flankenneigung von  $17^\circ$  auf. Somit wäre für die häufig ausgeführte Flankenneigung von  $20^\circ$  bereits eine Querzugbelastung für den Holzkörper zu erwarten. Für einen Reibbeiwert von 0,4 hingegen würde es erst bei Flankenneigungen, welche mehr als  $22^\circ$  betragen, zu einem theoretischen Auftreten von Querzugbelastungen aufgrund einer axialen Belastung kommen.

Die bereits vorhin betrachtete Komponente der Spaltkraft, welche durch den Einschraubvorgang induziert wird, ist in Abbildung 24 nicht enthalten. Darin lässt sich außerdem gut erkennen, dass mit zunehmender Flankenneigung und abnehmendem Reibbeiwert die zu erwartende Spaltkraft zunimmt.

Zur Überprüfung des mechanischen Modells wurde von Enders-Comberg (2015) auch ein entsprechender Versuch durchgeführt. Für die Messkonfiguration, welche in Abbildung 25 dargestellt ist, wurde eine Gewindestange in einen längs aufgetrennten Probekörper eingebracht, welcher durch Messschrauben zusammengehalten wurde; ähnlich wie in (Uibel, 2012). Für die eingesetzte Gewindestange, welche ein Gewinde mit einer Flankenneigung von  $\varphi_0 = 30^\circ$  aufwies, wurde der Reibbeiwert lt. Enders-Comberg (2015) mit  $\mu = 0,3$  als eher konservativer Wert angenommen. Die Summe aller Spaltkräfte für den dreidimensionalen Raum ergibt sich somit nach Gleichung (2.37) zu  $F_{\text{Spalt}} = 0,24 \cdot F_{\text{ax}}$ . Durch die Anordnung einer sperrenden Querlage in der Probekörperhälfte (siehe Abbildung 25) bzw. der Auftrennung des Prüfkörpers in lediglich einer Ebene, muss so maximal die Hälfte der gesamten Spaltkräfte von den Messschrauben aufgenommen werden (also  $F_{\text{Spalt,MS}} = 0,12 \cdot F_{\text{ax}}$ ). Die Spaltkraft, welche quer zu den Messschrauben wirkt, wird direkt vom Holz aufgenommen.

Die Abbildung 25 zeigt die Ergebnisse eines repräsentativen Versuchs, welcher die Wirkungsweise veranschaulichen soll. Im Diagramm ist die schrittweise Belastung mit den dazwischenliegenden Halbeintervallen bis zu einer Maximallast von 60 kN gut zu erkennen. Bei der Höchstlast beträgt die Summe der horizontalen Spaltkräfte, welche von den Messschrauben gemessen werden, 4,2 kN und somit rund 7 % der axialen Belastung. Außerdem ist gut zu erkennen, dass etwa die Hälfte der gesamten Spaltkraft an der obersten Schraubenreihe auftritt, während die weiter unten liegenden Messschrauben immer weniger Kräfte aufnehmen müssen. Die Verteilung der Messschraubenkräfte ist allerdings auch von der Lasteinleitungs- und Lagerungssituation (hier "pull-pull") abhängig. Außerdem wird vom Autor angeführt, dass mit zunehmender Axialkraft der Spaltkraftanstieg progressiv verläuft. Damit würde es an der theoretischen Grenze der Tragfähigkeit vermutlich zu einem Spaltkraftanteil von über 7 % der axialen Belastung

kommen. Weitere Ausführungen zur Bedeutung oder Interpretation der Ergebnisse von Enders-Comberg (2015) sind nicht vorhanden. Die Abweichung zu den vorhin berechneten 12 % der Axiallast kann durch eine Änderung des Reibbeiwertes von 0,3 auf 0,4 bereits erreicht werden, was zeigt, dass dieser Versuch ausschließlich der Abschätzung bzw. Kontrolle der Überlegungen dienen kann.



**Abbildung 25:** Auswertung und Prüfkongfiguration bei einem Spaltkraftversuch einer Schraubstange (Enders-Comberg, 2015)

In seiner Schlussbetrachtung führt Enders-Comberg (2015) an, dass es unter Umständen sinnvoll wäre, wenn Bewehrung (z. B. in Form von Schrauben) zum Verhindern eines Spaltverhaltens bei in Faserrichtung höchst belasteten Verbindungen (vor allem bei Gewindestangen) eingesetzt wird.

In den Untersuchungen von Pöll (2017), welcher die Spaltkräfte mittels einer geringfügig adaptierten Prüfkongfiguration im Vergleich zu Uibel (2012) bestimmt hat, zeigen die Spaltkräfte, welche beim Eindrehen bestimmt wurden, zu jenen beim anschließenden Herausziehen der zuvor applizierten Schrauben, eine große Differenz. Demzufolge erreichten die Spaltkräfte beim Einschraubvorgang ein 2- bis 4-fach höheres Niveau als bei axialer Belastung auf Herausziehen. Außerdem wurde festgehalten, dass bereits während der ersten Stunde nach Applikation der Schrauben ein Abfall der Spaltkraft um 30 %, ausgehend von den Spaltkräften beim Auftreten des maximalen Eindrehmomentes, zu beobachten war (Pöll, 2017).

Zusammenfassend kann für die Spaltkräfte festgehalten werden, dass sowohl beim Eindrehen als auch beim Herausziehen von Holzbauschrauben oder eingeschraubten Gewindestangen Spaltkräfte auftreten. Während bisher oftmals die Mindestabstände (Zwischen- und Randabstände) lediglich auf Basis von Einschraubversuchen, z. T. in Kombination mit Einfärbetests, festgelegt wurden, sollte geklärt werden, ob diese nicht eventuell durch eine mögliche Überlagerung von zusätzlichen Spaltkräften im Zuge einer axialen Zugbeanspruchung der applizierten Schraube größer sind. Der Effekt, dass bei zusätzlicher, wenn auch nicht axialer Belastung der Verbindungsmittel, die Mindestabstände aus den Eindrehversuchen auch zu gering ausfallen können, wurde bereits von Blaß und Uibel (2007) beobachtet.

Wie von Pöll (2017) bereits in ersten Untersuchungen festgestellt wurde, kommt es für die Spaltkräfte, welche aus der Applikation resultieren, zu einem Abfall über die Zeit (Kombination aus Kriechen und Relaxation). Insbesondere die Zeitkomponente (Abnahme der Spaltkräfte über die Zeit) wurde in bisherigen Untersuchungen allerdings nur punktuell betrachtet. Auch die Überlagerung der zeitlich hintereinander auftretenden Spaltkräfte aus Eindreh- und Ausziehprüfung sowie einem möglichen dazwischen liegenden Abfall ist deshalb für diese Arbeit besonders interessant und soll Aufschluss über den für die Bestimmung der Mindestabstände maßgebenden Fall geben.

## KAPITEL 3: MATERIAL & METHODEN

Im ersten Abschnitt dieses Kapitels wird auf die Prüfplanung eingegangen. Dazu wird eine Übersicht der variierten Parameter jeder Prüfserie (Prüfprogramm) dargestellt. Im nachfolgenden Abschnitt 3-2 werden die bei den Prüfungen verwendeten Materialien erläutert. Hierzu zählen die für die Prüfungen verwendeten Schraubentypen sowie die unterschiedlichen Holzarten. Abschließend werden alle verwendeten Prüfverfahren, sofern notwendig, detaillierter erläutert und ein Überblick über die angewandte Auswertemethodik gegeben. Es werden der generelle Ablauf der Prüfung und die jeweilige Prüfkonfiguration inklusive der dazugehörigen Messeinrichtung beschrieben.

### 3-1 PRÜFPLANUNG

Dieses Kapitel beinhaltet die Planung der Prüfungen, welche im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden, und gibt einen Überblick über die Prüfserien sowie die dabei jeweils variierten Parameter. Prinzipiell wird dabei in vier verschiedene Prüfserien unterschieden, wobei jede einem speziellen Ziel zugeordnet werden kann. Allerdings werden in manchen Fällen die aus den Prüfungen ermittelten Daten auch für mehr als nur eine Prüfserienauswertung herangezogen.

Es kommt zu folgenden vier Hauptprüfserien, bei welchen speziell die folgenden Parameter betrachtet werden:

- Holzarten
- Achs-Faserwinkel
- Vorbohrdurchmesser
- Spaltkräfte

Die nachfolgenden Tabellen 15 bis 18 zeigen jeweils die Matrix, welche zur Ermittlung der Prüfkörperanzahl erforderlich ist. Zudem ist die Variation der Parameter für die jeweiligen Prüfserien in den Tabellen gut erkennbar. Allen Prüfungen gemeinsam ist, dass jede Prüfkonfiguration sowohl mit der Referenzschraube (RF) als auch mit der Prototypschraube (P1) durchgeführt wurde.

#### **Serie 1: Variation der Holzarten, holzanatomischen Gruppen & Rohdichte**

Die Serie 1 dient zur Ermittlung des Einflusses des holzanatomischen Aufbaus von unterschiedlichen Holzarten auf ausgewählte Kenngrößen des Eindreh- und Ausziehverhaltens von Schrauben. Dazu kamen für die Nadelhölzer drei verschiedene Rohdichtegruppen der Fichte {FI-A, FI-B, FI-C}, für die zerstreuporigen Laubhölzer Pappel (PA), Birke (BI) und Buche (BU) und für die ringporigen Laubhölzer Edelkastanie (KA), Esche (ES) und Eiche (EI) zum Einsatz. Die verwendeten Holzarten wurden primär aufgrund ihrer derzeitigen bautechnischen Bedeutung für den Holzbau ausgewählt. Die Einschraubwinkel wurden für die Laubhölzer mit 0°, 45° und 90° und für die Fichte lediglich mit 0° und 90° festgelegt. Die Probekörperanzahl sollte für jede Parameterkonfiguration mindestens 20 Stk. betragen, um, unter Berücksichtigung der üblichen Streuungen, statistisch ausreichend stabile Mittelwerte zu erhalten. Die Prüfwerte der Buche für 0° und 90° konnten aus den vorhandenen Prüfergebnissen von Pöll (2017) verwendet werden. Dadurch kommt es allerdings zur Verwendung von unterschiedlichem Kantholzgangsmaterial, was geringfügige Abweichung der Eigenschaften mit sich zieht; obwohl aus einer Lieferung stammend.

**Tabelle 15: Serie 1: Prüfplan für die Variation der Holzarten**

Parameter	Parameterausprägung	
	Laubholz	Nadelholz
Einschraubwinkel $\alpha$	0°, 45°, 90°	0°, 90°
Holzart bzw. Rohdichtegruppe	KA, ES, EI, PA, BI, BU	FI-A, FI-B, FI-C
Prüfkörperanzahl $n$	21	24
Schraubentyp	RF, P1	RF, P1

Wie in der Tabelle 15 zu erkennen ist, finden sich für die Fichte drei unterschiedliche Rohdichtegruppen für die Prüfungen wieder. Damit soll ein möglichst großer Rohdichtebereich der Nadelhölzer abgedeckt werden.

Es ergibt sich aus der festgelegten Parametervariation eine Prüfkörperanzahl von 1.044 Stück für die Bestimmung des Einflusses von verschiedenen Holzarten bzw. holzanatomischen Gruppen und Rohdichten.

### **Serie 2: Variation des Einschraubwinkels**

Für die Untersuchung des Einflusses des Last-Faserwinkels (entspricht dem Achs-Faserwinkel bei axialer Belastung) auf die Ausziehkenngößen und unter Berücksichtigung bisheriger Erkenntnisse (zwischen 45° und 90° nur geringfügige Änderungen im Verhalten), wurde der Bereich von 0° und 45° einer genaueren Betrachtung unterzogen. Folglich wurden für Buche und BauBuche Prüfungen mit Einschraubwinkeln von 0°, 15°, 30°, 45° und 90° durchgeführt.

**Tabelle 16: Serie 2: Prüfplan zur Untersuchung des Einflusses seitens des Last-Faserwinkels**

Parameter	Parameterausprägung
Einschraubwinkel $\alpha$	0°, 15°, 30°, 45°, 90°
Holzprodukt	BU, BB
Prüfkörperanzahl $n$	21 bzw. 20
Schraubentyp	RF, P1

Es ergibt sich aus der festgelegten Parametervariation eine Prüfkörperanzahl von 410 Stück. Davon können die Prüfkörper bzw. die Prüfergebnisse für die Buche und BauBuche für 0°, 45° und 90° allerdings bereits aus der Serie 1 verwendet werden. Wobei davon wiederum auf bereits auf bestehende Daten für Einschraubwinkel von 0° und 90° aus der Arbeit von Pöll (2017) zurückgegriffen werden kann.

Anmerkung: Die Prüfkörper der BauBuche für die Serie 2 wurden für den Achs-Faserwinkel von 90° ausschließlich so zugeschnitten, dass die Schraube in radialer Richtung (90°R) appliziert wurde.

### **Serie 3: Variation des Vorbohrdurchmessers**

Um den Einfluss des Vorbohrdurchmessers auf das Eindreh- und Ausziehverhalten zu bestimmen, wurde dieser im Verhältnis zum konstanten Außen- bzw. Nenndurchmesser von  $d = 8$  mm (RF) bzw. 8,1 mm (P1) variiert. Neben den Vorbohrdurchmessern von 5,5 mm, 6,0 mm, 6,5 mm und 7,0 mm wurde auch eine Prüfung ohne Vorbohrung durchgeführt. Jene Prüfwerte ohne Vorbohrung wurden dabei bereits in den Serien 1 bzw. 2 ermittelt.

**Tabelle 17: Serie 3: Prüfplan zur Ermittlung eines geeigneten Vorbohrdurchmessers**

Parameter	Parameterausprägung
Einschraubwinkel $\alpha$	0°, 90°
Holzprodukt	BU, BB
Prüfkörperanzahl $n$	20
Vorbohrdurchmesser $d$	0; 5,5; 6,0; 6,5; 7,0 mm
Schraubentyp	RF, P1

Auf Basis der gewählten Prüfvariationen ergibt sich eine Prüfkörperanzahl von 800 Stück, wobei, wie oben erwähnt, die Prüfergebnisse ohne Vorbohrung bereits vorliegen. Für weiterführende Betrachtungen wird Serie 3 zudem um den Vorbohrdurchmesser von 8 mm (für die RF) bzw. 8,1 mm (für den P1) theoretisch ergänzt; die mechanischen Kenngrößen aus Eindreh- und Ausziehprüfungen werden entsprechend zu Null angesetzt.

Anmerkung: Die Prüfkörper der BauBuche für die Serie 3 wurden für den Achs-Faserwinkel von 90° ausschließlich so zugeschnitten, dass die Schraube in radialer Richtung (90°R) appliziert wurde.

### **Serie 4: Messung von Spaltkräften**

Zur Bestimmung der Auswirkungen bzw. des Verlaufes der Spaltkräfte während des Eindreh- und Ausziehvorganges wurden Kurzzeitversuche in Buche und BauBuche durchgeführt. Zusätzlich galt es, mögliche Unterschiede zwischen radialer und tangentialer Orientierung der Jahrringe bei einem Einschraubwinkel von 90° zur Faser zu betrachten. Neben den Kurzzeitversuchen (KZ) waren auch Langzeitversuche (LZ) mit einer Prüfdauer von 24 h vorgesehen. Damit wurde das Abklingverhalten der Spaltkräfte nach dem Eindrehvorgang untersucht.

**Tabelle 18: Serie 4: Prüfplan für Bestimmung der Spaltkräfte**

Parameter	Parameterausprägung
Einschraubwinkel $\alpha$	0°, 90° radial, 90° tangential
Holzprodukt	BU, BB
Prüfkörperanzahl $n$	Kurzzeit (KZ) 10, Langzeit (LZ) 5
Schraubentyp	RF, P1

Auf Basis der gewählten Prüfvariationen ergibt sich eine Prüfkörperanzahl von 180 Stück. Von den 120 Kurzzeitprüfungen konnten jene für Buche und BauBuche mit einem Einschraubwinkel von 0° zur Faser ebenfalls bereits aus den von Pöll (2017) durchgeführten Prüfungen entnommen werden. Somit verbleiben effektiv 80 Kurzzeit- und 60 Langzeitprüfungen, welche im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt werden mussten.

Anmerkung: Die Bezeichnung der mit einem Achs-Faserwinkel von 90° und radialer bzw. tangentialer Applikation der Holzbauschraube versehenen Prüfkörper erfolgt in weiterer Folge durch die Abkürzungen 90°R und 90°T.

## 3-2 MATERIAL

### 3-2.1 SCHRAUBE

Für die umfangreichen Untersuchungen und die damit verbundenen Prüfserien wurden zwei verschiedene Holzbauschrauben verwendet.

Dabei wird einerseits eine Schraube der Firma Schmid Schrauben Hainfeld GmbH gemäß ETA-12/0373 (2012) eingesetzt. Es handelt sich dabei um eine dem Standardsortiment zugehörige Schraube aus Kohlenstoffstahl vom Typ Rapid® mit Vollgewinde (VG), Senkkopf und galvanischer Gelbverzinkung. Wie in Abbildung 26 zu sehen ist, ist im Bereich der Schraubenspitze (Vollspitze) ein Verdichter angeordnet. Der Nenndurchmesser ist mit 8 mm und die Nennlänge mit 240 mm gewählt. Diese Schraube weist, wie der Tabelle 19 zu entnehmen ist, übliche Gewindeabmessungen im Vergleich zu den derzeitigen handelsüblichen selbstbohrenden Holzbauschrauben auf. Da laut Pirnbacher und Schickhofer (2007) beim Vergleich von unterschiedlichen Schraubentypen keine wesentlichen Unterschiede in Bezug auf die Ausziehfestigkeiten auftreten, wird diese Schraube als Stellvertreter der derzeit üblichen Holzbauschrauben angesehen. Die Bezeichnung erfolgt somit in weiterer Folge mit Referenzschraube (RF).

Die zweite für die Prüfung verwendete Schraube entstammt der Masterarbeit von Pöll (2017), welche derzeit noch nicht Gegenstand einer ETA ist. Es wurden auf Basis einer umfangreichen Recherche verschiedene Überlegungen zu einfachen mechanischen Modellen und ebenso numerische Berechnungen zur Festlegung der Schraubengeometrie durchgeführt. Die Geometrie der Schraube wurde dabei hinsichtlich einer möglichen Anwendung in Hartlaubhölzern ohne Vorbohrung optimiert. Außerdem wurde auch auf die Sicherstellung der industriell durchführbaren Fertigung geachtet. Die Ausführung der Schraube (Parameter siehe in Tabelle 19) führt im Vergleich zu handelsüblichen Schraubenausführungen zu einer höheren Stahlzugtragfähigkeit und einem höheren Torsionswiderstand. Diese ebenfalls von der Firma Schmid Schrauben Hainfeld GmbH produzierte Teilgewindeschraube mit Abmessungen von 8,1 x 240 / 100 mm wird in weiterer Folge mit der Bezeichnung Prototyp 1 (P1) geführt. Die Schraube weist ebenfalls, wie in der Abbildung 26 zu erkennen ist, eine Vollspitze mit Verdichter sowie eine galvanischen Blauverzinkung (ChromVI-frei) auf. Zusätzlich folgt an das 100 mm lange Gewinde ein 10 mm langer Verdichter, welcher anstatt eines Reibschafes den Eindrehwiderstand des nachlaufenden Schaftes verringern soll.



**Abbildung 26: Gewinde und Spitze von Referenzschraube und Prototyp 1**

Die nachfolgenden, in Tabelle 19 angegebenen Abmessungen entstammen für die Referenzschraube den Angaben aus ETA-12/0373 (2012) und wurden mit einem elektronischen Messschieber anhand der im Zuge der Arbeit aus einer Produktionscharge entnommenen Schrauben kontrolliert und gegebenenfalls angepasst. Alle Abmessungen liegen dabei im Rahmen der zulässigen Abweichungen lt. EAD 130118-00-0603 (2016). Für den Prototyp 1 sind ausschließlich die gemessenen Werte, welche durch Bestimmung mit einem elektronischen Messschieber ermittelt wurden, eingetragen. Dabei wurden aus den für die Prüfungen verwendeten Chargen der Schraube stichprobenartig mehrere Schrauben vermessen und die Werte anschließend gemittelt.



**Tabelle 19: Abmessungen und Ausführung der Schrauben für die Prüfungen**

Parameter	Referenzschraube (RF)	Prototyp 1 (P1)
$d$ [mm]	8,00	8,10
$d_1$ [mm]	5,20	6,08
$p$ [mm]	3,70	4,00
$\varphi_o = \varphi_u$ [°]	20	20
Verdichter	JA	JA
Spitze	Vollspitze	Vollspitze
Gewinde	Vollgewinde	Teilgewinde (100 mm)
Kopf	Senkkopf	Senkkopf

## 3-2.2 HOLZ

Bei der Auswahl der Holzarten wurde versucht, einerseits in Mitteleuropa häufig vorkommende Arten und andererseits Hölzer mit bereits gegebener Relevanz für den Einsatz im konstruktiven Ingenieurholzbau zu verwenden. Zudem wurde auf die Abdeckung einer möglichst hohen Rohdichtebandbreite je holzanatomischer Gruppe geachtet. Die Berücksichtigung von weiteren Holzarten, wie z. B. der Robinie, welche durch ihr besonders hohes mechanisches Potenzial besticht, konnte somit nicht erfolgen.

Das Vorkommen sowie umfangreiche Erläuterungen zu den Eigenschaften und Strukturmerkmalen der hier betrachteten Holzarten nach Wagenführ (2007) sind im Anhang B-1 zu finden. Eine Auflistung der mechanischen Kenngrößen der nachfolgende genannten Nadel- und Laubholzarten auf Basis von “clearwood“-Proben, welche in unterschiedlichen Literaturangaben recherchiert wurden, ist im Anhang B-2 zu finden.

### 3-2.2.1 Verwendete Holzarten

Je nach Zielsetzung und der daraus resultierenden Prüfplanung (siehe Abschnitt 3-1) kamen für die durchgeführten Eindreh- und Ausziehprüfungen unterschiedliche Holzarten zum Einsatz. Nachfolgend werden alle für die Prüfungen verwendeten Holzarten im Hinblick auf deren Anwendungsgebiet bzw. Relevanz im konstruktiven Ingenieurholzbau kurz vorgestellt. Im nächsten Abschnitt 3-2.2.2 wird dann auf die entsprechende Vorbereitung der Prüfkörper eingegangen.

#### Fichte

Die Fichte (*Picea abies Karst.*), welche die in Europa am häufigsten verwendete Holzart im konstruktiven Ingenieurholzbau darstellt, kommt dementsprechend in nahezu jeder ETA für selbstbohrende Holzbauschrauben als zugelassene Holzart vor. Neben dem Hauptanwendungsgebiet als Brettschichtholz (BSH), entsprechend ÖNORM EN 14080 (2013), werden auch Brettsperrholzprodukte (BSP), keilgezinktes Konstruktionsvollholz (KVH) und viele weitere Produkte aus Fichte hergestellt. Da für die Fichte bereits eine Vielzahl an Untersuchungen durchgeführt wurde und somit eine große Menge an Daten dazu vorliegt, erfolgt deren Prüfung vor allem als Referenz und Kontrolle der Prüfergebnisse der anderen Holzarten.

#### Edelkastanie

Die Edelkastanie (*Castanea sativa Mill.*) gehört zu den ringporigen Laubhölzern, dessen mittlere Rohdichte der Prüfkörper bei  $530 \text{ kg/m}^3$  liegt. Aufgrund der wärmeliebenden Umgebungsbedingungen liegt das Verbreitungsgebiet dieses Baumes vor allem in West- und Südeuropa (Wagenführ, 2007). Edelkasta-

nienbäume haben in dieser Region auch aufgrund ihrer ansprechenden optischen Erscheinung und der guten, natürlichen Dauerhaftigkeit des Kernholzes gegenüber Pilzen (Klasse 2 nach ÖNORM EN 350 (2016)) große Bedeutung.

Wie Hübner (2013a) schreibt, tritt im modernen Ingenieurholzbau unter anderem immer öfter auch die Edelkastanie auf. Er berichtet in diesem Zusammenhang auch davon, dass es für ihn notwendig scheint, für diese Holzart den Auszieh Widerstand für übliche Schrauben zu bestimmen. Als Beispiel für die Anwendung der Edelkastanie im konstruktiven Ingenieurholz ist das nordspanische Unternehmen Sierolam zu nennen, welches seit 2013 eine ETA (ETA-13/0646, 2013), für das von ihnen hergestellte BSH aus Edelkastanienholz, inne hat.

## Esche

Die ringporige Esche (*Fraxinus excelsior L.*, mittlere Rohdichte der im Rahmen dieser Arbeit geprüften Probekörper von ca. 660 kg/m<sup>3</sup>) ist nach Buche und Eiche die dritthäufigste Laubbaumart Österreichs. Das Vorkommen der Esche reicht von Europa bis Mittelrussland (Wagenführ, 2007).

Im Allgemeinen liegen die technologischen Materialkennwerte der Esche etwas über jenen der Buche (Hübner, 2009). Wie Ehrhart (2014) zeigen konnte, liegt auch bei der Esche, wie bei der Buche, die Rollschubfestigkeit um den Faktor drei über jener der Fichte. Diese Holzart zeichnet sich außerdem durch die vergleichsweise geringeren Quell- und Schwindmaße sowie keinerlei die Verklebung beeinträchtigenden Inhaltsstoffe aus. Dieser Umstand führt dazu, dass die im Vergleich zur Buche leichter durchzuführende Verklebung auch eine bessere Dauerhaftigkeit aufweist (Hübner, 2009). Allerdings zeigen aktuelle Untersuchungen von Knorz et al. (2014) und Ammann et al. (2016), dass durchaus nicht zu vernachlässigende Probleme bei der Verklebung von Eschenholz auftreten können. Dabei wurden Scher-, Zugscher- und Delaminierungsprüfungen für unterschiedliche Klebstoffe durchgeführt. Die Scherprüfungen von Knorz et al. (2014) erreichen dabei für alle getesteten Klebstoffe generell hohe Holzbruchanteile und Scherfestigkeiten, welche an die Festigkeit des Holzes heranreichen. In den Zugscherprüfungen, welche von Ammann et al. (2016) durchgeführt wurden, erreichen im trockenen Zustand (Konditionierung bei 20 °C und 65 % relative Luftfeuchtigkeit) lediglich 80 % der Eschen-Prüfkörper die normativen Anforderungen. In beiden Publikationen wird dabei davon berichtet, dass die normativen Anforderungen an die Delaminierungsbeständigkeit von Eschenholzverklebungen von keinem Klebstoff erreicht werden.

Aufgrund der ausgezeichneten mechanischen Eigenschaften wurde die Esche schon früh als Konstruktionsholz im Fahrzeug-, Schiffs-, Flugzeug- und Maschinenbau genutzt (Kollmann, 1941). ETAs, welche die Verwendung von geklebten Produkten aus Eschenholz (BSH, BSP, ...) zulassen, sind bisher in Österreich und Deutschland noch nicht vorhanden. Aufgrund eines liberaleren Baurechts ist der Einsatz von BSH aus Esche in der Schweiz aber trotzdem möglich. Die Firma Neue Holzbau AG, aus Lungern in der Schweiz, setzt Eschen-Brettschichtholz bereits seit über einem Jahrzehnt ein (Hübner, 2013a). Es wurde dort bereits an mehreren Bauwerken die Leistungsfähigkeit dieser Holzart, z. B. in Form von BSH-Träger der Festigkeitsklasse GL48 (neue Holzbau AG, 2017) unter Beweis gestellt. Auch die Kombination von Esche und Fichte innerhalb eines BSH-Trägers ist bei ausreichenden Kenntnissen zu der Verklebbarkeit und aufgrund der vergleichbaren Quell- und Schwindmaße möglich und lässt eine beanspruchungsgerechte Bauteildimensionierung zu.

Aktuell ist in Österreich die Esche nach der Sortierklasse LS10 oder höher entsprechend ÖNORM EN 1912 (2013) in die Festigkeitsklasse D40 einzuordnen.

## Eiche

Die Eiche (Stieleiche, *Quercus robur L.*; Traubeneiche, *Quercus petraea (Matt.) Liebl.*) stellt die zweithäufigste europäische Laubholzart dar (mittlere Rohdichte der geprüften Probekörper ca. 760 kg/m<sup>3</sup>). Das Verbreitungsgebiet dieser sehr alt werdenden Laubholzart reicht von Europa bis nach Kleinasien (Wagenführ, 2007).

Die Eiche wird des Öfteren bei der Instandsetzung von historischen Dachtragwerken angetroffen. Dort fand sie in der Vergangenheit vor allem aufgrund der Dauerhaftigkeit (bis zu Klasse 2 nach ÖNORM EN

350 (2016)) Verwendung. Um im Rahmen der Sanierungen dieser Dachkonstruktionen Bemessungswerte für die Ausziehfestigkeiten von Holzbauschrauben bereitzustellen, ist es allerdings erst erforderlich, entsprechende Versuche durchzuführen (Hübner, 2013a). Die mechanischen Eigenschaften können hingegen nicht die Werte, wie sie bei Buche oder Esche angetroffen werden, erreichen.

Seit 2012 gibt es auch eine Zulassung (Z-9.1-704) bzw. seit 2013 eine ETA (ETA-13/0642, 2013) für sogenanntes „VIGAM BSH aus Eiche“ vom Hersteller Gamiz, Santa Cruz De Campezo/Spain. Dieses BSH besteht dabei aus mindestens vier aufeinanderfolgenden Eichenlamellen, die miteinander verklebt sind (Informationsverein Holz e.V., 2016). Ebenfalls seit 2013 verfügt die Firma Holz Schiller, Regen/Deutschland, über eine Zulassung (Z-9.1-821) für Eichenbrettschichtholz für Fenster und Riegel.

Der Einsatz von Eiche ist hinsichtlich der Festigkeits- und der Steifigkeitskenngrößen weniger attraktiv, da Eiche der Sortierklasse LS10 nach ÖNORM EN 1912 (2013) in die Festigkeitsklasse D30 einzuordnen ist. Esche der gleichen Sortierklasse kann hingegen in die Festigkeitsklasse D40 eingeordnet werden.

## **Pappel**

Die für die Prüfungen verwendete Pappel (Schwarzpappel, *Populus nigra L.*) mit einer mittleren Rohdichte von etwa 480 kg/m<sup>3</sup> zählt zu den zerstreutporigen Laubhölzern. Das Hauptverbreitungsgebiet liegt in Mittel- und Südeuropa, wo aufgrund des schnellen Wachstums auch eine Anpflanzung in Plantagenform vorkommt (Wagenführ, 2007). Diese sehr raschwüchsige Holzart ist deshalb nach 30 bis 50 Jahren bereits ausgereift (Brandner und Spitzer, 2015).

Untersuchungen zum Potenzial der Pappel ergaben bei etwa gleichen Rohdichten im Vergleich zur Fichte allgemein etwas geringere mechanische Eigenschaften. Im Bereich der Schubkenngrößen liegen die Werte allerdings ca. 50 % über jenen der Fichte (Ehrhart, 2014), was unter anderem auf die Verfilzung der Fasern zurückgeführt wird. Diese holzanatomische Struktur führt in weiterer Folge auch zu einem, auf die Rohdichte bezogenen, vergleichsweise hohen Widerstand gegen Abnutzung an der Oberfläche (Brandner und Spitzer, 2015).

Wie Ehrhart (2014) in seiner Schlussbetrachtung schreibt, ist ein Einsatz von Pappel in den Querlagen von Brettsperrholz durchaus interessant und zweckmäßig. Durch ihre guten Rollschubkennwerte bietet sich die Pappel als ökonomische und günstige Holzart dafür an. Auch Brandner und Spitzer (2015) verweisen auf das, im Vergleich zu anderen Laubhölzern, enorme Festigkeits- bzw. Steifigkeits- zu Dichte-Verhältnis der Pappel. Dieses wurde auch in zahlreichen Publikationen zur Verwendung der Pappel als BSH, KVH, VH oder OSB bereits nachgewiesen.

Im konstruktiven Ingenieurholzbau kommt der Holzart Pappel auch zugute, dass sie in vielen Normen (z. B. ÖNORM EN 338 (2016) & ÖNORM EN 14080 (2013)) mit dem Nadelholz gleichgestellt wird.

## **Birke**

Die mittlere Rohdichte der für die Prüfungen verwendeten Birke (Weißbirke bzw. Hängebirke, *Betula pendula Roth.*) liegt bei zirka 635 kg/m<sup>3</sup>. Die Birke, ebenfalls ein zerstreutporiges Laubholz, ist vor allem in Russland und Finnland von großer forstwirtschaftlicher Bedeutung. In diesen Regionen sind zudem reine Birkenbestände gegeben. Das Verbreitungsgebiet dieser Holzart selbst reicht aber darüber hinaus; sie gilt auch in Europa und Asien als heimisch (Wagenführ, 2007).

Untersuchungen von Ehrhart (2014) zeigen für die Birke im Vergleich zur Fichte Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften, welche parallel zur Faser um 50 bis 100 % höher liegen. Das Verhältnis der Schub- und Rollschubfestigkeiten von Birke zu Fichte wird mit 1,8 angegeben. Es können die mechanischen Kenngrößen der Birke somit zusammenfassend mit 1,5 bis 2-facher Größe im Vergleich zur Fichte angegeben werden.

Wie Eberhardsteiner et al. (2016) zu entnehmen ist, gibt es im Bereich der Laubhölzer vor allem in Bezug auf die Birke aktuell umfangreiche Forschungsvorhaben. So sind neben weiteren Grundlagenuntersuchungen betreffend die Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften auch Projekte zur Ermittlung der

Eigenschaften von BSH, BSP und Furnierschichtholz (FSH) aus Birke bereits durchgeführt worden bzw. noch aktuell laufend.

Außerdem ist von Metsä Wood bereits ein Furniersperrholzprodukt gemäß ÖNORM EN 13986 (2015) (Holzwerkstoffe zur Verwendung im Bauwesen), welches als konstruktives Birkensperrholz vertrieben wird, auf dem Markt. Zusätzlich strebt die Firma Hasslacher Norica Timber, Sachsenburg, die Zulassung für BSH und BSP aus Birke an. In ausgewählten Objekten wurden diese beiden Produkte bereits erfolgreich eingesetzt (Hasslacher Timber, 2016).

## **Buche**

Die in den Prüfungen verwendete, zerstreutporige Buche (Rotbuche, *Fagus sylvatica L.*) weist eine mittlere Rohdichte von etwa  $730 \text{ kg/m}^3$  auf. Sie stellt, mit einer Gesamtwaldfläche von 10 % in Europa (Wagenführ, 2007), die häufigste Laubholzart in Mitteleuropa und z. B. in Österreich die zweithäufigste Baumart dar. Die geprüften Materialkenngrößen der Buche von Ehrhart (2014) liegen in etwa auf dem Niveau der Esche und sind somit deutlich über jenen der Fichte angesiedelt (ca. 50 bis 100 % höhere Werte). Die Rollschubfestigkeit liegt sogar beim 3-fachen Wert von jener der Fichte (Ehrhart, 2014).

Aufgrund der hohen Quell- und Schwindmaße sowie die Klebung behindernde Holzinhaltsstoffe war eine zufriedenstellende Verklebung lange Zeit nicht möglich. Die Sicherstellung einer dauerhaften Verklebung dieser Laubholzart konnte erst nach langjähriger Forschung und Entwicklung realisiert werden (Hübner, 2013a). Auch dem Verwendungspotenzial der Buche für tragende Bauteile oder zum Einsatz als Holzwerkstoff wurden, aufgrund des hohen Buchenvorkommens und der guten mechanischen Eigenschaften, in der Vergangenheit dieser Holzart bereits umfangreiche Forschungsprojekte gewidmet (Hübner, 2013a).

Buche der Sortierklasse LS13 darf nach ÖNORM EN 1912 (2013) der Festigkeitsklasse D40 zugeordnet werden. Um aber der zunehmenden Bedeutung der Buche gerecht zu werden und der bis dahin geringen Nutzung entgegenzuwirken, mussten erst Buchenprodukte entwickelt werden, welche auch die Verarbeitung von Buchensortimenten mit mittlerer Qualität ermöglichten. So wurde mit der Erteilung der ersten allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung Z-9.1-679 (2013) für BSH aus Buche für die NKL 1 im Jahr 2009 auch die Machbarkeit einer dauerhaften Verklebung als erbracht angesehen.

Die Firma Pollmeier Furnierwerkstoffe GmbH, Creuzburg in Thüringen, ist seit Ende 2013 im Besitz zweier bauaufsichtlicher Zulassungen für Bauprodukte aus Buchen-Furnierschichtholz (FSH). Die unter dem Namen „BauBuche“ vertriebenen Produkte werden sowohl als Träger (ETA-14/0354, 2015) als auch als Platten (Z-9.1-838, 2016) angeboten. Durch die für die BauBuchen-Träger erzielbare, charakteristische Biegefestigkeit von  $70 \text{ N/mm}^2$  und einem mittleren E-Modul von  $16.700 \text{ N/mm}^2$  wurde damit ein sehr hochleistungsfähiges Bauprodukt geschaffen, welches ebenfalls Gegenstand der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Prüfungen ist.

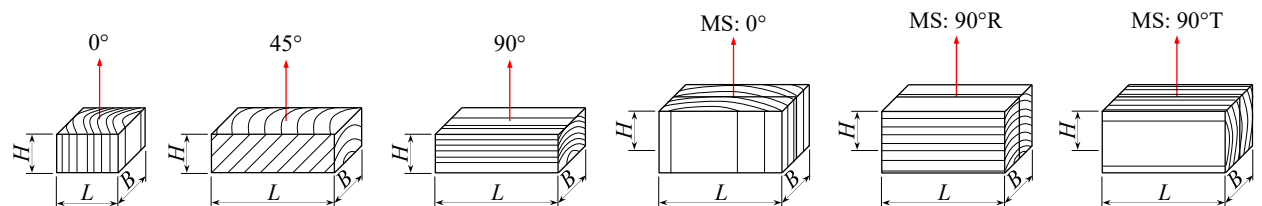
## 3-2.2.2 Prüfkörpervorbereitung

### Herstellung

Die Kanthölzer für die Fichtenprobekörper wurden vorab bereits einer Rohdichtesortierung unterzogen, um damit drei verschiedene Rohdichtegruppen zu erhalten. Außerdem wurde darauf geachtet, dass möglichst wenige zu vermeidende Holzmerkmale, wie etwa Äste und Reaktionsholz für die Herstellung der Prüfkörper in den Kanthölzern zu liegen kamen. Der Großteil der Rohware (Edelkastanie, Esche, Eiche, Pappel, Birke und Buche), welche für die Herstellung der übrigen Prüfkörper Verwendung fand, wurde als Tischlerware eingekauft und somit keiner Festigkeitsortierung unterzogen. Das Rohmaterial bestand demzufolge auch zum Großteil aus unbesäumter Schnittware, welche in einem ersten Schritt zu Kanthölzern geschnitten wurde. In weiterer Folge wurden diese je nach Bedarf abgerichtet und auf die erforderlichen Dicken gehobelt.

Die Prüfkörper wurden im Anschluss entsprechend den Anforderungen für die jeweiligen Prüfungen zugeschnitten. Das gesamte Material wurde dabei so zugeschnitten, dass keinerlei Merkmale in den Prüfkörpern zu liegen kamen und somit für nahezu alle Prüfkörper von "clear-wood"-Qualität ausgegangen werden konnte. In Abbildung 27 sind die verschiedenen Prüfkörpergeometrien für die Standardprüfungen (links) und die Prüfungen mit Messschrauben (rechts) dargestellt. Die dazugehörigen Abmessungen für die einzelnen Prüfserien sind den nachfolgenden Tabellen 20 bis 23 zu entnehmen.

Da die Dimension des Rohmaterials bei einigen Hölzern nicht ausreichend war, mussten die Prüfkörper für einige Holzarten kleiner als nach ÖNORM EN 1382 (1999) erforderlich zugeschnitten werden (siehe Tabelle 20 bis 23).



**Abbildung 27:** Abmessungsbezeichnungen und Überblick über die Prüfkörper

Die geplanten Abmessungen der Prüfkörper für den Schraubendurchmesser  $d = 8$  mm wurden für die Ausziehprüfungen bei einem Winkel von  $0^\circ$  zwischen Schraubenachse und Faserrichtung entsprechend der ÖNORM EN 1382 (1999, 2016) mit  $80 \times 80$  mm<sup>2</sup> und einer Prüfkörperhöhe, welche abweichend von dieser Norm gewählt wurde, mit 50 mm festgelegt. Die Prüfkörperhöhe wurde so festgelegt, dass ein Durchschrauben des Probekörpers möglich ist. Somit konnte auch ein Einfluss der Schraubenspitze auf die Ausziehprüfergebnisse weitgehend ausgeschlossen und die effektive Verankerungslänge identisch der Prüfkörperhöhe eindeutig zugeordnet werden. Außerdem würde eine größere Verankerungslänge zu einer höheren Ausziehkraft führen, welche damit für einige Prüfserien mit Hölzern hoher Rohdichte, insbesondere bei Verwendung der Referenzschrauben, bereits über der (Stahl-)Zugtragfähigkeit der Schraube liegen würde. Für alle Achs-Faserwinkel von größer  $0^\circ$  wurden die Prüfkörperabmessung gleichbleibend mit  $160 \times 80 \times 50$  mm<sup>3</sup> gewählt.

Als letzter Bearbeitungsschritt der Prüfkörperherstellung wurden die erforderlichenfalls notwendigen Bohrungen für die Variation des Vorbohrdurchmessers vorgenommen (Prüfserie 3).

Für die Prüfungen, bei welchen die auftretenden Spaltkräfte durch die Messschrauben erfasst wurden (Prüfserie 4), wurden nahezu alle Prüfkörper mit Abmessungen von  $160 \times 80 \times 80$  mm<sup>3</sup> zugeschnitten. Zusätzlich mussten diese Prüfkörper faserparallel aufgetrennt und quer zur Einschraubrichtung mit Bohrungen für die Messschrauben versehen werden (Abmessungen bzw. Anordnung der Messschrauben siehe Kapitel 3-3.1.2). Die Herstellung der Bohrungen, welche mit einem Durchmesser von 7 mm ausgeführt wurden, stellte dabei den letzten Arbeitsschritt dar.

**Tabelle 20: Serie 1: Prüfkörperabmessungen für die Variation der Holzarten**

Holzart	Achs-Faserwinkel	Anzahl	Länge	Breite	Höhe
	$\alpha$	$n$	$L$	$B$	$H$
	[°]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]
Fichte (A, B, C)	0	48	76	76	50
	90	48	160	76	50
Edelkastanie	0	42	80	58	50
	45	42	160	58	50
	90	42	160	80	50
Esche	0	42	80	75	50
	45	42	160	75	50
	90	42	160	80	50
Eiche	0	42	80	70	50
	45	42	160	70	50
	90	42	160	80	50
Pappel	0	42	80	80	50
	45	42	160	80	50
	90	42	160	80	50
Birke	0	42	80	75	50
	45	42	160	75	50
	90	42	160	80	50
Buche	0	44	80	70	50
	45	42	160	70	50
	90	44	160	70	50

**Tabelle 21: Serie 2: Prüfkörperabmessungen für die Variation des Einschraubwinkels**

Holzart	Achs-Faserwinkel	Anzahl	Länge	Breite	Höhe
	$\alpha$	$n$	$L$	$B$	$H$
	[°]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]
Buche	0	44	80	70	50
	15, 30, 45	je 42	160	70v	50
	90	44	160	70	50
BauBuche	0	43	80	74	50
	15, 30, 45	je 40	150 bzw. 160	74	50
	90	43	160	74	50



**Tabelle 22: Serie 3: Prüfkörperabmessungen für die Variation des Vorbohrdurchmessers**

Holzart	Achs-Faserwinkel	Anzahl	Länge	Breite	Höhe
	$\alpha$	$n$	$L$	$B$	$H$
	[°]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]
Buche	0	160	80	80	50
	90	160	160	80	50
BauBuche	0	160	80	80	50
	90	160	160	80	50

**Tabelle 23: Serie 4: Prüfkörperabmessungen für die Bestimmung der Spaltkräfte**

Holzart	Achs-Faserwinkel	Anzahl	Länge	Breite	Höhe
	$\alpha$	$n$	$L$	$B$	$H$
	[°]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]
Buche	0	15	160	70	80
	90°R, 90°T	je 15	160	80	80
BauBuche	0	15	160	80	80
	90°R, 90°T	je 15	160	80	80

Um eine möglichst hohe Variabilität der Rohdichte zu erreichen, wurden möglichst alle vorhandenen Kanthölzer für die einzelnen Prüfkörperserien verwendet. Zusätzlich wurde darauf geachtet, dass aus den verwendeten Kanthölzern immer gleich viele Prüfkörper für die jeweiligen Prüferien zugeschnitten wurden. In weiterer Folge wurden die Prüfkörper möglichst homogen auf die einzelnen Untergruppen aufgeteilt. Somit sollte sichergestellt werden, über die Parametervariation und ihre Auswirkungen möglichst eindeutige Aussagen tätigen zu können.

Um die Zuordnung der Prüfkörper zu den jeweiligen Prüferien auch später noch erfassen zu können, wurde bereits beim Zuschnitt für jeden Probekörper eine eindeutige Benennung vergeben. Diese setzt sich wie folgt zusammen und ist dazwischen jeweils mit Bindestrichen getrennt:

- 2 Buchstaben für die Holzart {FI, PA, BI, BU, KA, ES, EI, BB}
- nur bei der Fichte: 1 Buchstabe für die Zuordnung zu einer Rohdichtegruppe {A, B, C}
- 2 Zahlen für die Nummer des Kantholzes der jeweiligen Holzart {01, 02, ...}
- 2 Zahlen für die Angabe des Achs-Faserwinkels bzw. evtl. zusätzliche Angabe zur Einschraubrichtung radial (R) oder tangential (T) {00, 15, 30, 45, 90 bzw. 90R, 90T}
- 2 Zahlen für den Vorbohrdurchmesser (nur für die Serie 3) {55, 60, 65 70}
- 2 Zahlen als fortlaufende Probennummer je Kantholz {01, 02, ... 25, 26}
- 2 Zeichen für die Abkürzung der für die Prüfung verwendeten Schraube {RF, P1}

**Beispiel:** BU13-00-55-01-P1 (Buche vom Kantholz 13, Einschraubwinkel 0° zur Faser, 5,5 mm Vorbohrdurchmesser, erster Probekörper vom Kantholz 13, Verwendung vom Schraubentyp P1)

## Konditionierung

Wie in ÖNORM EN 1382 (1999, 2016) für Befestigungsmittel mit nicht glattem Schaft vorgeschrieben, sind die Prüfkörper aus Holz oder Holzwerkstoffen mit einer Gleichgewichtsfeuchte bezogen auf das Referenzklima von  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$  und  $(65 \pm 5)\%$  relativer Luftfeuchte herzustellen. Deshalb sind die Prüfkörper im Referenzklima solange zu lagern, bis diese ausreichend konditioniert sind. Dies gilt als erreicht, wenn die Massen von zwei, im Abstand von 6 Stunden, aufeinanderfolgenden Wägungen nicht um mehr als 0,1 % voneinander abweichen.

Nachdem das Rohmaterial bereits vor dem Zuschnitt und auch danach bis zur Prüfung für mehrere Wochen bzw. Monate in der Klimakammer gelagert wurde, konnte für alle Prüfkörper diese Bedingung erreicht werden.

Es ergibt sich für Fichtenholz, entsprechend der Gleichung (2.30) nach Ringhofer et al. (2014b), für die maximal auftretende Holzfeuchte von 14,5 % ein Korrekturfaktor  $k_{mc}$  von 0,92 zur Abminderung der Ausziehfestigkeit. Für die Steifigkeitseigenschaften hingegen tritt durch die unterschiedlichen Holzfeuchtigkeiten ein maximaler Einfluss von etwa 4 % auf (Ringhofer et al., 2015a). Für alle Holzfeuchten von 8 % bis 12 % wird von einer konstanten Ausziehfestigkeit bzw. auch Steifigkeit ausgegangen. Der Einfluss unterschiedlicher Holzfeuchtigkeit muss, trotz des Auftretens derart hoher Werte nur bei einigen wenigen Prüfkörpern, berücksichtigt werden. Aus diesem Grund wird ein möglicher Einfluss auf die Ergebnisse für jede Prüfserie separat betrachtet.

## Rohdichte und Holzfeuchtigkeit

Vor der Prüfung wurde für alle Prüfkörper die Normalrohndichte  $\rho_u$  des gesamten Prüfkörpers entsprechend ÖNORM ISO 3131 (1996) nach Gleichung (3.1) bestimmt. Dies erfolgte bereits vor der Ausführung von etwaigen Bohrungen, wodurch keine Korrektur der Volumina durchgeführt werden musste.

$$\rho_u = \frac{m_u}{l_u \cdot b_u \cdot h_u} = \frac{m_u}{V_u} \quad (3.1)$$

$\rho_u$	Rohdichte des Prüfkörpers beim Feuchtegehalt $u$ zum Zeitpunkt der Prüfung [kg/m <sup>3</sup> ]
$m_u$	Masse des Prüfkörpers beim Feuchtegehalt $u$ [kg]
$l_u, b_u, h_u$	Abmessungen des Prüfkörpers beim Feuchtegehalt $u$ [m]
$V_u$	Volumen des Prüfkörpers beim Feuchtegehalt $u$ [m <sup>3</sup> ]

Nach der Durchführung der Prüfung wurden die Prüfkörper als Gesamtes in den Darrofen gegeben und bis zur Massenkonstanz bei  $(103 \pm 2)^\circ\text{C}$  getrocknet. Die Proben gelten als darrtrocken, wenn der Masseunterschied zwischen zwei Abwägungen im Abstand von zwei Stunden geringer als 0,1 % ist. Der Feuchtegehalt der Prüfkörper wird nach erneuter, unmittelbarer Abwägung der darrtrockenen Prüfkörper gemäß ÖNORM EN 13183-1 (2004) mittels Gleichung (3.2) bestimmt. Für den Fall, dass die Proben mit Bohrungen versehen wurden, wurde das dadurch entfernte Holzvolumen über die bereits bekannte Rohdichte für die Ausgangsmasse berücksichtigt.

$$u = \frac{m_u - m_0}{m_0} \cdot 100 \quad (3.2)$$

$u$	Feuchtegehalt des Prüfkörpers zum Zeitpunkt der Prüfung [%]
$m_u$	Masse des Prüfkörpers vor dem Trocknen / während der Prüfung [g]
$m_0$	Masse des Prüfkörpers nach dem Trocknen [g]

Da die Schrauben auch wieder aus den Prüfkörpern heraus geschraubt wurden, ging damit kein bzw. kaum Holzmaterial verloren; dieses wurde lediglich verdichtet. Somit musste keine Korrektur für die Masse  $m_0$  bei der Ermittlung der Holzfeuchtigkeit berücksichtigt werden.

Für die verschiedenen Holzarten stellen sich trotz Lagerung bei gleichen Klimabedingungen unterschiedliche Ausgleichsfeuchten ein. Um die Rohdichten der unterschiedlichen Holzarten besser vergleichen zu

können, wurden deshalb die ermittelten Rohdichten korrigiert. Die Korrektur der Rohdichte auf eine Referenzholzfeuchte (im Regelfall 12 %) kann dabei gemäß ÖNORM EN 384 (2016), wie in Gleichung (3.3) gezeigt wird, durchgeführt werden.

$$\rho_{\text{ref}} = \rho_u \cdot (1 - 0,005 \cdot (u - u_{\text{ref}})) \quad (3.3)$$

$\rho_{\text{ref}}$	umgerechnete Rohdichte bei Referenzholzfeuchte [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_u$	Rohdichte des Prüfkörpers beim Feuchtegehalt $u$ [kg/m <sup>3</sup> ]
$u$	vorhandene Holzfeuchte bei der Prüfung ( $8\% \leq u \leq 18\%$ )
$u_{\text{ref}}$	Referenzholzfeuchte [%]

## **Prüfkörperauswahl**

Die Prüfkörper wurden so ausgewählt, dass solche vergleichbarer Lage und aus ein und demselben Kantholz auf die beiden Schraubentypen (RF & P1) gleichmäßig aufgeteilt wurden. Dies wurde durch eine abwechselnde Zuordnung der unmittelbar hinter- oder nebeneinander liegenden Prüfkörper zu den Schraubentypen umgesetzt. Für den Fall, dass jeweils nur ein Prüfkörper aus einem Kantholz geschnitten wurde, wurde auf eine gleichmäßige Aufteilung dieser mit ähnlichen Eigenschaften auf die beiden Schraubentypen geachtet. Dadurch sollte es möglich sein, die wesentlichen Effekte und Unterschiede zwischen den Prüfserien durch gezielte Variation einzelner Parameter bestmöglich zu erfassen und relevante Effekte zu erkennen sowie quantifizieren zu können.

Eine gleichmäßige Verteilung aller Prüfkörper war allerdings nicht immer möglich, da manche Prüfkörperserien zwangsweise aus anderen Kanthölzern zugeschnitten werden mussten und somit geringfügig andere Eigenschaften aufweisen. Zusätzlich kommt es bei der Einbeziehung von älteren Prüfdaten (u. a. von Pöll (2017)) auch teilweise zwangsweise zur Verwendung von Daten aus einem abweichenden Rohmaterial. Es sei allerdings darauf hingewiesen, dass das Probenmaterial in Pöll (2017) und jenes, welches in dieser Arbeit verwendet wurde, aus der gleichen Materiallieferung entstammen.

Es wurde grundsätzlich versucht, über alle Prüfserien hinweg möglichst gleiche oder zumindest ähnliche Eigenschaften im Hinblick auf die Rohdichte und die Jahrringlage (radial oder tangential) zu erhalten. Durch eine gleichmäßige Aufteilung der Prüfkörper bezüglich radialer und tangentialer Jahrringlage bei Einschraubwinkeln größer 0° muss in weiterer Folge im Allgemeinen auch keine Unterscheidung zwischen diesen beiden Fällen getroffen werden. Einflüsse seitens radialer bzw. tangentialer Jahrringlage werden auch von Hübner (2013b) und Ringhofer (2017) als vernachlässigbar bezeichnet.

## **3-3 METHODEN**

### **3-3.1 PRÜFVERFAHREN**

Im Rahmen dieser Arbeit wurden auf Basis von vier unterschiedlichen Prüfserien die Eigenschaften und die Leistungsfähigkeit der untersuchten Holzbauschrauben durch die gezielte Variation von Parametern ermittelt. Dabei kamen die nachfolgenden Prüfkonfigurationen zum Einsatz:

- Eindrehprüfungen
- Ausziehprüfungen
- Eindrehprüfungen mit Spaltkraftmessung
- Ausziehprüfungen mit Spaltkraftmessung

#### **3-3.1.1 Vor- und Nachbereitung**

Die Bestimmung der Rohdichte der Prüfkörper gemäß ÖNORM ISO 3131 (1996) wurde bereits vor der Durchführung der eigentlichen Prüfungen vorgenommen (siehe Abschnitt 3-2.2.2). Somit waren nur zwei Arbeitsschritte direkt vor der Prüfung selbst zu tätigen. Einerseits die Kennzeichnung des Ansatz- bzw.

Einschraubpunktes am Prüfkörper und andererseits die Anbringung der Markierung für die notwendige Einschraubtiefe auf der Schraube.

Nach der Prüfung wurden die Probekörper noch einer Trocknung im Darrofen und anschließend einer Rückwägung zur Bestimmung der Holzfeuchte (siehe 3-2.2.2) gemäß ÖNORM EN 13183-1 (2004) unterzogen. Zusätzlich wurden solche mit statistisch auffälligen Prüfwerten noch aufgetrennt, um mögliche, von außen nicht erkennbare, Holzmerkmale zu identifizieren.

### 3-3.1.2 Prüfkonfiguration & Prüfdurchführung

Die verwendeten Schrauben hatten alle einen Nenndurchmesser von 8 mm (RF) bzw. 8,1 mm (P1). Die einzelnen Prüfserien bestanden jeweils aus mindestens 20 Prüfungen, bei denen idente Voraussetzungen entsprechend Abschnitt 3-1 vorherrschten. Abzüglich der bereits in Pöll (2017) durchgeführten Prüfungen und die sich überschneidenden Prüfserien wurden somit 1.944 einzelne Probekörper geprüft. Bei 60 Stück davon wurden nur die Spaltkräfte aus dem Eindrehvorgang sowie das Abklingen der Spaltkräfte über zumindest 24 h untersucht. Sämtliche Schrauben, sowohl mit aber auch ohne Vorbohrung, wurden maschinell eingeschraubt und nur in axialer Richtung bei der Ausziehprüfung belastet.

#### Einschrauben

Der Verlauf des Einschraubwiderstandes bzw. das maximale Einschraubdrehmoment der Schrauben wurde, wie in im EAD 130118-00-0603 (2016) festgelegt, nach ÖNORM EN 15737 (2009) ermittelt.

#### **Prüfaufbau**

Die Prüfmaschine, an welcher die Eindrehprüfungen durchgeführt wurden, ist eine Eigenkonstruktion des Institutes für Holzbau und Holztechnologie an der TU Graz (siehe Abbildung 28 links) und wurde in der Vergangenheit bereits für derartige Prüfungen eingesetzt. Die Maschine besteht aus einem mittels Pneumatikzylinder beweglichen Schlitten – inklusive dazugehöriger Wegmessung – und einem festsitzenden Elektromotor mit Drehmomentenmessaufnehmer. Der Prüfkörper, welcher durch seitliche Anschläge / Führungsleisten gegen ein Verdrehen gesichert ist (siehe Abbildung 28 rechts), wird dabei in die vorgegebene Position in den Schlitten eingelegt. Durch den Anpressdruck des Pneumatikzylinders wird der Schlitten gegen die Schraube, welche vom Elektromotor über den Kopf angetrieben wird, gedrückt. Durch die Rotation des Elektromotors wird die Schraube kontinuierlich in den Prüfkörper, bis auf die erforderliche Einschraubtiefe, eingeschraubt.



*Abbildung 28: Prüfaufbau für die Eindrehprüfungen*

#### **Prüfeinstellungen**

Die Schrauben wurden dabei mit einer konstanten Drehzahl von 50 U/min eingeschraubt. Gleichzeitig erfolgte die Aufzeichnung des Einschraubmomentes in Abhängigkeit der Einschraubtiefe mit einer Messfrequenz von 5 Hz. Für die Aufzeichnung der Daten wurde das Programm catman Easy V3.3.5 der Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH (Darmstadt / Deutschland) verwendet.

Der Anpressdruck des pneumatischen Zylinders (Kolbendurchmesser 50 mm) wurde mit 2 bar festgelegt. Daraus ergibt sich eine konstante Anpresskraft von 393 N während des gesamten Eindrehvorganges.

Lediglich bei den Prüfungen mit bereits vorgebohrten Schraubkanälen wurde dieser Anpressdruck auf 1 bar reduziert, wodurch auch die Anpresskraft auf 196 N abnahm.

Bei der Prüfung des Eindrehwiderstandes wurden die Schrauben so weit in den Prüfkörper eingedreht, bis die Schraubenspitze und der Verdichter an der gegenüberliegenden Seite wieder austraten. Dadurch konnten Einflüsse des Verdichters sowie der Schraubenspitze auf die Ausziehfestigkeit ausgeschlossen werden. Somit ergaben sich für Prüfkörper mit einer Höhe von 50 mm eine Einschraubtiefe bzw. ein Einschraubweg von ca. 80 mm und für die Prüfkörper mit einer Höhe von 80 mm eine Einschraubweg von ca. 110 mm. Bei der Applizierung des Schraubentyps P1 für Prüfkörperhöhen von 80 mm ergab sich aufgrund der Ausführung als Teilgewindeschraube und der damit verbundenen Gewindelänge von knapp über 100 mm lediglich ein Einschraubweg von 105 mm. Damit konnte ein Einfluss des an das Gewinde anschließenden Verdichters ausgeschlossen werden, und gleichzeitig der Verdichter im Bereich der Schraubenspitze weitgehend aus dem Probekörper austreten. Trotzdem ist ein Teil des Verdichters an der Schraubenspitze noch in das Holz eingebunden. Die effektiven Gewindelängen für alle Proben wurden trotzdem entsprechend den Prüfkörperhöhen festgelegt.

## **Ausziehen**

Die Prüfungen wurden im Allgemeinen entsprechend ÖNORM EN 1382 (1999), der Norm zur Bestimmung der Ausziehtragfähigkeit von Holzverbindungsmitteln, wie dies in EAD 130118-00-0603 (2016) vorgesehen ist, durchgeführt. An dieser Stelle sei allerdings erwähnt, dass diese Norm nicht mehr gültig ist und bereits von der ÖNORM EN 1382 (2016) abgelöst wurde. Aufgrund der geringen Unterschiede zwischen den beiden Prüfnormen und zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit mit bereits in der Vergangenheit durchgeführten Prüfungen, wird der Prüfung nach ÖNORM EN 1382 (1999) der Vorzug gegeben.

### **Prüfaufbau**

Die Ausziehprüfungen wurden auf der Universalprüfmaschine Zwick Roell Z250 der Firma Zwick GmbH & Co. KG (Ulm / Deutschland) durchgeführt. Die Maschine, mit einer Maximalkraft von 275 kN, besteht aus einem Rahmen mit einer feststehenden unteren und einer mittels Spindelantrieb beweglichen oberen Traverse.

Die Prüfkonfiguration (siehe Abbildung 29) wurde dabei so gewählt, dass die Prüfungen als “push-pull“-Versuche durchgeführt wurden. Die Schraube mitsamt dem Prüfkörper wird dabei in eine, mit einer Senkkopffräsung versehene, zylindrische Aufnahme an die obere Traverse angehängt. Dabei wurde beim Anheben der beweglichen Traverse eine axiale Belastung in der Schraube aufgebaut und infolgedessen aus dem Prüfkörper gezogen. Die Oberseite des Probekörpers wird dabei gegen eine Stahlplatte mit einer zentrischen Bohrung (Durchmesser von 41 mm  $\cong$  5  $d$ ) gedrückt. Dadurch wird der erforderliche Mindestabstand von 3  $d$  lt. ÖNORM EN 1382 (1999) der Schraube zu allen Teilen der Auflagerung nicht eingehalten. Wie Untersuchungen in (Ringhofer und Schickhofer, 2014a) gezeigt haben, führt dies sowohl für Einschraubwinkel von 0° als auch 90° zur Faser zu keinen signifikanten Auswirkungen auf die Ausziehfestigkeit. Die Stahlplatte des unteren Widerlagers wurde von zwei weiteren Stützplatten, welche über jeweils vier Gewindestangen ( $\varnothing$ 16 mm) mit dem unteren Biegebalken der Prüfmaschine verbunden waren, aufgenommen.

Zur Bestimmung des lokalen relativen Weges der Schraube zum Holzkörper während des Ausziehvorganges wurden zusätzlich zwei induktive Wegaufnehmer (W10TK der Firma Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, maximaler Weg 10 mm, siehe Abbildung 29 rechts) gegenüberliegend an der Schraube oberhalb des unteren Widerlagers angebracht. Diese bestimmten die vertikalen Verschiebungen zwischen der Stahlplatte, welche zur Auflagerung diente, und jenem Punkt an der Schraube, an welchem die Wegaufnehmer über eine Klemmvorrichtung befestigt waren. Dadurch konnte in weiterer Folge im Rahmen der Auswertung die Verbundsteifigkeit des im Holz eingebetteten Verbindungsmittels ermittelt werden.





Abbildung 29: Prüfaufbau für die Ausziehprüfungen

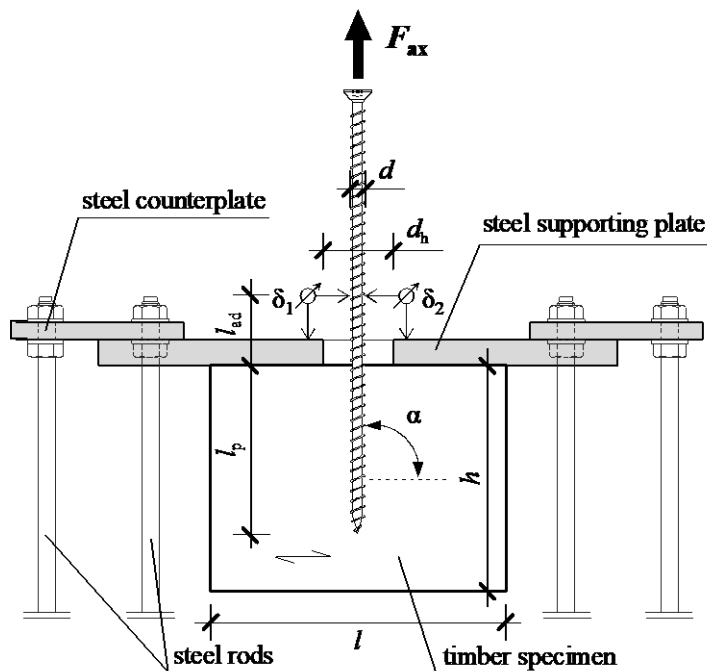


Abbildung 30: Schema des Prüfaufbaus und Anordnung der Messtechnik (Ringhofer, 2017)

### Prüfablauf

Zuerst wurden die Prüfkörper mitsamt den bereits zuvor eingedrehten Schrauben in die Prüfvorrichtung eingehängt. Es folgte die Aufbringung einer Vorlast von 150 N, wodurch eine Positionierung und Fixierung des Prüfkörpers bzw. der Schraube mittig in der Öffnung der Gegenplatte ermöglicht wurde. Diese Positionierung erfolgte mit freiem Auge und durch die Zuhilfenahme von Markierungen an der Auflagerplatte. Erst danach begann die Belastung mit der voreingestellten Traversengeschwindigkeit. Die weggesteuerte Prüfung mit konstantem Traversenweg wurde dabei so durchgeführt, dass das Versagen nach  $(90 \pm 30)$  s eintrat. Die Belastungs- bzw. Traversengeschwindigkeit musste dabei je nach Prüferie im Bereich zwischen 0,8 mm/min und 3,2 mm/min variiert werden. Entsprechend dem Eintreten des Versagens innerhalb dieser kurzen Belastungszeit werden die ermittelten Festigkeitskennwerte auch Kurzzeitfestigkeiten genannt. Die weggesteuerte Prüfung ermöglichte die Beobachtung des Verhaltens nach Überschreiten der Maximallast (Nachbruchverhalten). Im Regelfall wurde nach dem Erreichen der Maximallast die Prüfung bis zu einem Lastabfall auf 75 % der Maximallast fortgesetzt.



Nach Beendigung der Prüfung wurden die Schrauben wieder maschinell aus den Prüfkörpern herausgeschraubt, um eine Massenentnahme aus dem Probekörper zu vermeiden. Es folgte die Darrtrocknung der Prüfkörper und in Folge die Bestimmung des Feuchtegehaltes wie in Abschnitt 3-3.1.1 beschrieben.

### **Datenaufzeichnung**

Die interne Messeinrichtung der Prüfmaschine zeichnete während der Prüfung die aufgebrachte Kraft mittels Kraftmessdose in [N], die Zeit in [s] und den Maschinen- bzw. Traversenweg in [mm] auf. Durch die beiden zusätzlichen Wegaufnehmer konnten auch noch die Wege zwischen Stahlplatte und Aufnahmepunkt der Klemmvorrichtung in [mm] ermittelt werden. Für die Aufzeichnung dieser Daten, aber auch zur Steuerung der Prüfmaschine, wurde das Programm testXpert V11.02 der Firma Zwick GmbH & Co. KG verwendet. Die Prüfdaten wurden mit einer Messfrequenz von 5 Hz erfasst.

### **Messschrauben**

Der generelle Prüfaufbau und der Prüfablauf waren sowohl bei den Eindrehprüfungen als auch bei den Ausziehprüfungen weitgehend identisch zu jenen ohne Messschrauben. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle lediglich auf die Abweichungen davon und auf die Besonderheiten, welche sich durch die Verwendung der Messschrauben ergeben, eingegangen.



**Abbildung 31: Prüfaufbau zur Bestimmung der Spaltkräfte mit den Messschrauben**

Gleichzeitig sei an dieser Stelle nochmals erwähnt, dass diese Prüfung mittels Messschrauben, welche im Grunde von Uibel (2012) entwickelt wurde, in erster Linie zur qualitativen Ermittlung von verbindungs-mittelspezifischen Einflüssen bzw. zum Vergleich derer zwischen unterschiedlichen Schrauben dient. Inwieweit eine Aussage über die tatsächlich auftretenden Spaltkräfte beim Einschraub- bzw. Ausziehvorgang auf Grundlage dieser invasiven Prüfmethode getätigt werden kann, ist noch zu klären.

Durch den Kreissägeschnitt, welcher zur Auftrennung der Prüfkörper bereits vor der Prüfung notwendig war, wurden die Abmessungen der beiden Prüfkörperhälften jeweils um 2 mm abgemindert, was allerdings in weiterer Folge keinen wesentlichen Umstand darstellt. In der Abbildung 32 sind die Anordnung der Messschrauben bzw. der Messschraubenreihen und die Abmessungen der Prüfkörper dargestellt. In der dazugehörigen Tabelle 24 sind die Abmessungen, welche in Abbildung 32 mit Buchstaben bezeichnet sind, für die durchgeführten Prüfungen angeführt.

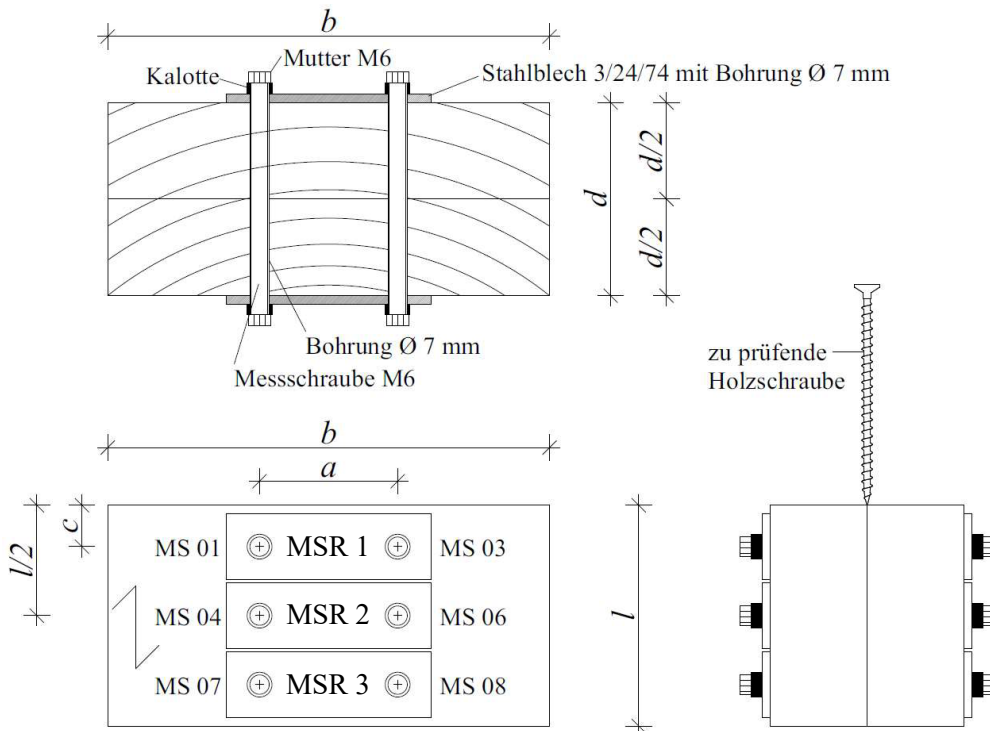


Abbildung 32: Anordnung der Messschrauben nach (Pöll, 2017), in Anlehnung an (Blaß und Uibel, 2007)

Tabelle 24: Kenndaten aus der Kalibrierung zur Bestimmung der Kennlinien der Messschrauben

$a$	$b$	$c$	$d$	$l$
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
50	160	15	80*	80

\* abzüglich des Kreissägeschnittes ca. 76 mm verbleibend; bei Buche 0° lediglich 70 mm und abzüglich des Kreissägeschnittes ca. 66 mm verbleibend

Als erster Schritt des Prüfablaufes wurden die beiden Prüfkörperhälften mit den Messschrauben sowie dem zugehörigen Zubehör (Unterlegbleche und -scheiben) lose verbunden. Die Messschrauben, welche aus metrischen Gewindestangen hergestellt wurden, besitzen innenliegende Dehnungsmessstreifen und liefern über eine entsprechende Auswerteelektronik eine Auskunft über die jeweils vorhandene axiale Belastung der einzelnen Messschraube. Die Dimensionierung, Kalibrierung und Herstellung der Messschrauben wird in der Arbeit von Pöll (2017) eingehend beschrieben. Die Werte aus der Kalibrierung, welche die Gleichung der linearen Kennlinie (siehe Gleichung (3.4); Zusammenhang Spannungsänderung zu Kraftänderung) der einzelnen verwendeten Messschrauben beschreiben, sind in Tabelle 25 dargestellt.

$$F = k \cdot x + d \quad (3.4)$$

- $F$  Kraft in der Messschraube [N]
- $k$  Steigung der Kennlinie [N/mV/V]
- $x$  Messwert der Spannung durch Kraftänderung [mV/V]
- $d$  Verschiebung vom Nulldurchgang bzw. Achsenabschnitt der linearen Gleichung [N]

**Tabelle 25: Kenndaten aus der Kalibrierung zur Bestimmung der Kennlinien der Messschrauben**

Messschrauben- bezeichnung	Steigung	Verschiebung
	$k$	$d$
	[N/mV/V]	[N]
MS 01	5.593	-29,34
MS 03	5.534	1,61
MS 04	5.634	80,90
MS 06	5.602	189,04
MS 07	5.721	-83,55
MS 08	5.676	-83,36

Anschließend erfolgten die Verbindung der Messschrauben mit den Anschlusskabeln und die Positionierung des Prüfkörpers in der Eindrehprüfmaschine. Nach dem Start der Messaufzeichnung wurden die Schrauben auf jeweils  $(300_{-10}^{+25})$  N vorgespannt. Durch die Nullpunktverschiebung der Kennlinien der Messschrauben, welche der Nichtlinearität bei geringen Kräften geschuldet ist, ergab sich je nach Messschraube eine davon abweichende tatsächliche Vorspannkraft. Trotzdem war deren Verhältnis für alle Versuche gleich und ein Vergleich der Ergebnisse somit möglich. Das für die Vorspannung notwendige Drehmoment kann mit einfachen Werkzeugen von Hand aufgebracht werden. Das möglichst exakte Einstellen der Vorspannkraft war aufgrund der gegenseitigen Beeinflussung der Messschrauben nur nach mehreren Durchgängen je Prüfkörper möglich und in Folge sehr zeitintensiv.

Die gewählte Vorspannkraft wurde in Anlehnung an die Untersuchungen in Uibel (2012) gewählt. Dieser stellte bei Prüfungen an Fichte keine signifikanten Unterschiede zwischen den Messwerten bei Wahl von Vorspannkräften zwischen 100 N und 150 N fest. Da, wie in Abschnitt 2-5.1 festgehalten wurde, für Buche um fast den Faktor 2,5 höhere Spaltkräfte als für Fichte erwartet wurden, wurde die Vorspannkraft der Messschrauben um diesen Faktor erhöht. Somit ergab sich eine Zielvorspannung der Schrauben von etwa 300 N. Die daraus resultierende Kontaktspannung der beiden Prüfkörperhälften ergab sich dabei unter der Annahme einer konstanten Pressung zu ca.  $0,14 \text{ N/mm}^2$ . Damit möglichst realistische Randbedingungen gegeben bleiben, musste die Kontaktspannung entsprechend Uibel (2012) deutlich unter der Querkzugfestigkeit des Holzes bleiben. Durch die gewählte Vorspannkraft sollte dabei vor allem ein vollflächiges Anliegen der beiden Prüfkörperhälften gewährleistet werden. Zusätzlich wurde somit während des Eindrehvorganges eine übermäßige Öffnung bzw. Klaffung der Prüfkörperhälften verhindert, was sich durch ein vollständiges Einschneiden des Gewindes und Verdrängung des Holzes zeigte.

Da aufgrund der Distanz zwischen der Eindreh- und Ausziehprüfmaschine eine zwischenzeitliche Unterbrechung der Messung und ein Abstecken bzw. Umklemmen der Messschrauben notwendig war, konnten während dieser Zeitspanne keine Messdaten ermittelt werden. Um diese Zeitspanne nachher mit Prüfdaten von den Langzeitversuchen ergänzen zu können, wurde darauf geachtet, dass immer die gleiche Zeitspanne von der Beendigung der Messung auf der Einschraubprüfmaschine bis zum Start der Messung der Spaltkräfte auf der Ausziehprüfmaschine vergeht. Dieses Zeitfenster wurde mit  $(90 \pm 2)$  s festgelegt und konnte auch für alle Prüfungen innerhalb einer geringen Toleranz eingehalten werden.

Für die Ausziehprüfungen wurde aufgrund der größeren effektiven Verankerungslänge von 80 mm eine Vorsorge gegen möglicherweise auftretende Schraubenbrüche getroffen. So wurde unter dem Prüfkörper, welcher bei Belastung gegen die Auflagerstahlplatte gedrückt wurde, eine Unterstellung angeordnet. Damit konnte der Prüfkörper im Falle eines Schraubenbruches aufgefangen und Beschädigungen der Anschlussdrähte der Messschrauben bzw. der induktiven Wegaufnehmer verhindert werden.

Außerdem wurde bei einer Ausziehkraft, welche jeweils ca. 1,5 kN unter der charakteristischen Zugtragfähigkeit der Schraube lag, eine Unterbrechung der Ausziehprüfung vorgesehen, um die Wegaufnehmer

abnehmen zu können. Dadurch konnte eine Beschädigung der Wegaufnehmer im Falle eines Schraubenbruchs ausgeschlossen werden.

Die Datenerfassung musste bei der Ausziehprüfung auch über das Messwerverfassungsprogramm catman Easy V3.3.5 erfolgen, da es nur so möglich war, die Werte der Messschrauben mit den standardmäßig ermittelten Werten der Prüfmaschine zusammenzufügen. Die Steuerung der Universalprüfmaschine Zwick erfolgte weiterhin über das Programm testXpert V11.02.

Für die durchgeführten Langzeitversuche wurde die Messfrequenz im Messwerverfassungsprogramm catman Easy, während der Eindrehprüfung und für die nachfolgende Messung der Spaltkräfte über 24 Stunden, auf ein Hertz reduziert. Dadurch wurde der Umfang der Messfiles bei ausreichender Auflösung auf ein erträgliches Maß reduziert. Außerdem wurde eine halbstündliche Datensicherung voreingestellt, um bei einem möglichen Ausfall der Messung die bereits erfassten Daten nicht zu verlieren.

Zusätzlich sei speziell für die Messung der abklingenden Spaltkräfte (bei den Langzeitversuchen) festgehalten, dass die Abschätzung der Spaltkräfte auf der Erfassung der Verformung der Messschrauben basiert. Über die Messschraubenkräfte werden dabei gleich nach der Beendigung des Eindrehvorganges überwiegend die Relaxations- und Kriecherscheinungen der Schraube bzw. des umgebenden Schraubenkanals gemessen, da dort im Vergleich zum restlichen Prüfkörper verhältnismäßig große lokale Spannungen auftreten. In weiterer Folge zeigt allerdings auch der gesamte Holzprüfkörper selbst eine Kriechverformung unter der Belastung der Messschraubenkräfte.

### 3-3.2 AUSWERTEMETHODIK

#### Datenerfassung

Während der Prüfungen wurde für jede Serie ein handschriftliches Prüfprotokoll mitgeführt. Für die Eindrehprüfungen wurden darin die Prüfkörperbezeichnung bzw. der Dateiname, das maximale Eindrehmoment, die Einschraubtiefe und Bemerkungen (z. B. bei Aufspaltung, Rissbildung, Schiefstellung der Schraubenachse, stark ausfransende Fasern) festgehalten. Für die Ausziehprüfungen wurden Prüfkörperbezeichnung bzw. Dateiname, die maximale Ausziehkraft, die Prüfgeschwindigkeit und sonstige Bemerkungen bzw. besondere Versagensmechanismen notiert. Für die Versuche mitsamt den Messschrauben wurde außerdem der Verlauf der Schraubenachse in der Fuge der beiden Prüfkörperhälften sowie Auffälligkeiten bei den Messschraubenkräften vermerkt. Gleichzeitig erfolgte für alle Probekörper eine entsprechende Fotodokumentation nach der Versuchsdurchführung.

Für sämtliche manuell ermittelten und aus den Prüfungen generierten Daten erfolgte eine Datenaufbereitung, Vorauswertung und statistische Analyse. Dazu wurden die Software-Applikationen Microsoft Excel (Version: 14.0.7182.5000) und R (Version: 3.4.0) verwendet. So wurden unter anderem die Rohdichte und die Holzfeuchte berechnet aber auch die Ausziehfestigkeiten bzw. Steifigkeitskennwerte und Modelle zur Abbildung des Ausziehverhaltens darin aufbereitet.

#### Ermittlung von Kenngrößen

Die beiden wichtigsten mechanischen Kennwerte, welche aus den Prüfergebnissen für jeden Prüfkörper ermittelt wurden, sind die Ausziehfestigkeit  $f_{ax}$  und die axiale Verbundsteifigkeit  $K_{ser,ax}$ . Auf die Berechnung der beiden Kenngrößen wird an dieser Stelle kurz eingegangen.

Die Bestimmung des Ausziehparameters ist in ÖNORM EN 1382 (1999) nach Gleichung (3.5) geregelt.

$$f = \frac{F_{max}}{d \cdot l_p} \quad (3.5)$$

$f$	Ausziehparameter [N/mm <sup>2</sup> ]
$F_{max}$	maximale Ausziehkraft [N]
$d$	Nenndurchmesser der Schraube [mm]
$l_p$	Eindringtiefe des profilierten Schaftteiles inklusive Schraubenspitze [mm]

Allerdings ist für die Untersuchungen nicht der Ausziehparameter, sondern die Ausziehfestigkeit von Bedeutung (Unterschied siehe Kapitel 2-4). Diese ist entsprechend Gleichung (3.6) festgelegt und bezieht sich dabei auf die Mantelfläche der effektiven Gewindelänge.

$$f_{ax} = \frac{F_{max}}{d \cdot \pi \cdot l_{ef}} \quad (3.6) \text{ vgl. (2.6)}$$

$f_{ax}$	Ausziehfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
$F_{max}$	maximale Ausziehungskraft [N]
$d$	Nenn Durchmesser der Schraube [mm]
$l_{ef}$	effektiv wirksame Gewindelänge abzüglich der Schraubenspitze [mm]

Wie Gehri (1993) ausführt, wird die Steifigkeit  $K_{ser}$  eines Knotens und folglich auch eines Verbindungsmittels als Quotient zwischen der Kraft  $F$  und der Deformation  $w$  im linear-elastischen Bereich der Kraft-Verformungskurve festgelegt.

Im Rahmen dieser Arbeit wird die axiale Verbundsteifigkeit der im Holz eingebetteten Holzbauschraube  $K_{ser,ax}$  (kurz:  $K_{ser}$ ) durch ein lineares Regressionsmodell der Kraft-Verformungskennlinie im linear-elastischen Bereich, wie von Brandner et al. (2017 (in print)) vorgeschlagen, definiert. Der Bereich, für welchen die Steifigkeit berechnet wird, ist dabei für jeden Prüfkörper geringfügig unterschiedlich. Die Festlegung davon erfolgt durch die Ermittlung der Korrelation für einen möglichst großen Bereich (siehe Abbildung 33). Die Steifigkeit wird also abweichend von der ÖNORM EN 26891 (1991) nicht exakt innerhalb der Grenzen von 10 % und 40 % der maximalen Tragfähigkeit bestimmt.

Die Kräfte, welche die Belastung der Schraube während der Ausziehprüfung darstellen, werden dabei den relativen Verschiebungen ( $w_{netto}$ ) der Schraube zum Holzprüfkörper gegenübergestellt. Die relative Verschiebung  $w_{netto}$  ergibt sich dabei aus dem Mittelwert der gemessenen Wege der induktiven Wegaufnehmer abzüglich der Dehnung der Schraube bis zum Befestigungspunkt der Klemmvorrichtung der Sensorenaufnahme nach Gleichung (3.7).

$$w_{netto,i} = \frac{\delta_{1,i} - \delta_{2,i}}{2} - w_i(l_{sk}) = \frac{\delta_{1,i} - \delta_{2,i}}{2} - \frac{\sigma_{ax,i}}{E_s} \cdot l_{sk} \quad (3.7)$$

mit

$$\sigma_{ax,i} = \frac{F_i}{\frac{d_i^2 \cdot \pi}{4}} \quad (3.8)$$

$w_{netto,i}$	Verschiebung Holzkörper zu Schraube an Oberseite des Prüfkörpers zum Zeitschritt $i$ [mm]
$\delta_{1/2,i}$	gemessene Verschiebungen der Wegaufnehmer zum Zeitschritt $i$ [mm]
$w_i$	Kompensationswert der Schraubendehnung an den gemessenen Verschiebungen [mm]
$l_{sk}$	Schraubenskompenationslänge: Abstand von Oberkante Prüfkörper bis Achse der Befestigungsschraube der Klemmvorrichtung für die Wegaufnehmer [mm]
$\sigma_{ax,i}$	vorhandene Spannung in der Schraube zum Zeitschritt $i$ [N/mm <sup>2</sup> ]
$E_s$	E-Modul der Schraube [N/mm <sup>2</sup> ]
$F_i$	vorhandene Kraft in der Schraube zum Zeitschritt $i$ [N]
$d_1$	Kerndurchmesser der Schraube [mm]

Diese Korrektur der Schraubendehnung für den tatsächlichen Nettoweg  $w_{netto,i}$  funktioniert allerdings nur solange sich die Schrauben im linear-elastischen Bereich befinden. Dieser kann entsprechend den Prüfungen der Zugtragfähigkeit von Pöll (2017) für die Referenzschraube (RF) bis zu einer Last von 18.000 N und für die Prototypschraube (P1) für eine maximale Last von 26.000 N gewährleistet werden. Die Verschiebungen zwischen Schraube und Holzkörper über diese Belastungen hinaus können für keine weiteren Auswertungen, wie z. B. im Abschnitt 2-4.2 erfolgt, verwendet werden.



Der Bereich, welcher das beste linear-elastische Verhalten über eine größere Prüfkraftzunahme zeigt, wird dabei für die Bestimmung von  $K_{ser}$  herangezogen. Um diesen Bereich festzulegen, wird der Quotient der Lastdifferenzen  $F_{i+1} - F_i$  mit den Wegdifferenzen  $w_{netto+1} - w_{netto}$  gebildet und über die Zeitschritte aufgetragen. Es handelt sich dabei um Steifigkeiten für den jeweiligen Zeitschritt  $K_{ser,ax,i}$ . Es wird damit eine abweichende Bedingung zur Festlegung des Bestimmungsbereich für  $K_{ser,ax}$  als in (Ringhofer, 2017) und (Brandner et al., 2017 (in print)) gewählt. Die Festlegung des Bereiches mit der besten Korrelation bei möglichst großen Wertebereichen erfolgt manuell nach optischen Kriterien. In diesem Bereich wird nachfolgend eine lineare Regressionsgerade nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate ("least square method"; LSM) an die Daten angepasst, welche als Steigung die Verbindungsmittelsteifigkeit  $K_{ser,ax}$  ausgibt. In Abbildung 33 ist der Zusammenhang der Verbindungsmittelsteifigkeit für einen Zeitschritt  $K_{ser,ax,i}$  zur Festlegung des Bestimmungsbereiches und der daraus resultierenden Steifigkeit  $K_{ser,ax}$  für die Schraube dargestellt.

$$K_{ser,ax,i} = \frac{F_{i+1} - F_i}{w_{netto+1} - w_{netto}} \quad (3.9)$$

$K_{ser,ax,i}$  axiale Steifigkeit (Verbundsteifigkeit) zum Zeitschritt  $i$  [N/mm]  
 $F_{i+1}, F_i$  vorhandene Kraft in der Schraube zum Zeitschritt  $i$  bzw.  $i + 1$  [N]  
 $w_{netto+1}, w_{netto}$  Verschiebung des Holzkörpers zur Schraube an Oberseite des Prüfkörpers zum Zeitschritt  $i$  bzw.  $i + 1$  [mm]

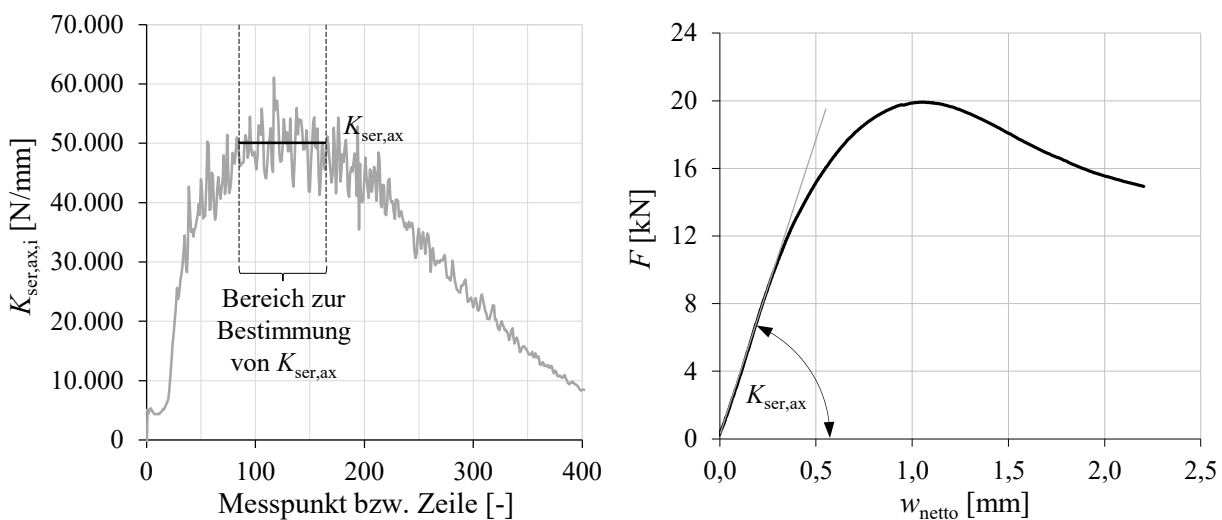


Abbildung 33: Bestimmung von  $K_{ser,ax}$  (links) und das zugehörige Last-Verformungsverhalten (rechts)

## Datenkorrektur

Aufgrund der geringen Unterschiede in der Holzfeuchtigkeit (siehe Kapitel 4) der Prüfkörper sowie der fehlenden Kenntnis des Feuchtigkeitseinfluss bei den unterschiedlichen Laubhölzern auf die Ausziehfestigkeit wird auf eine diesbezügliche Korrektur verzichtet. Auch eine Korrektur der Ausziehfestigkeiten im Hinblick auf die Rohdichte wird im ersten Auswertungsschritt nicht durchgeführt; dies, um die Prüfergebnisse weitgehend unbeeinflusst zu erhalten.

Auf die Korrektur von anderen mechanischen Kennwerten wie der Steifigkeit wird aufgrund von nicht bekannten Korrekturfunktionen (für Rohdichte oder Feuchtigkeitsgehalt) ebenso verzichtet. Lediglich für die Rohdichte wurde für alle Hölzer eine Referenzierung, wie in Gleichung (3.3) dargestellt, durchgeführt. Diese wurde dabei auch unterhalb des eigentlich dafür vorgesehenen Holzfeuchtebereichs von mindestens 8 % angewendet.



## **Ausreißerelimination**

Um statistisch aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, wurden alle ermittelten Werte und Kenngrößen serienweise und für jeden Parameter einer Analyse unterzogen. Dabei wurde vor allem auf Extremwerte sowie deren Lage zum Mittelwert und zum nächstgelegenen Wert der jeweiligen Datenreihe geachtet. So mussten teilweise die Daten von ganzen Prüfkörpern aber manchmal auch nur einzelne Kennwerte aufgrund von technologischen oder statistischen Einflüssen ausgeschlossen werden.

Die Ergebnisse der Prüfungen wurden aufgrund technologischer Ausreißer für die Ermittlung der statistischen Kenngrößen ausgeschlossen, wenn zumindest einer der nachfolgenden Punkte zutrifft:

- Detektion von auffälligen Holzmerkmalen nach der Prüfung (vor allem Äste);
- bekannte Messfehler oder Abweichungen in der Prüfdurchführung (unsymmetrische Schraubenposition bei Prüfungen mit Messschrauben);
- offensichtlich von der restlichen Serie abweichende Kennwerte (qualitativ), verbunden mit vom Mittel stark abweichenden Materialeigenschaften (hauptsächlich der Rohdichte).

Für den Fall, dass es keinen technologisch begründbaren Einfluss für abweichende Messwerte gab, wurde unter Berücksichtigung des Stichprobenumfangs, der Streuung der anderen Proben sowie der absoluten und relativen Abweichung vom Mittelwert und Median entschieden, ob der betreffende Probekörper ausgeschlossen werden muss. Um die natürliche Streuung der Materialeigenschaften dabei nicht zu verfälschen, sollte dies allerdings nur in äußerst geringem Umfang erfolgen.

Da teilweise nur einzelne Kennwerte (z. B.  $f_{ax}$  oder  $K_{ser}$ ) und nicht immer der ganze Prüfkörper für die spätere Auswertung entfernt werden mussten, ist in den Diagrammen im Regelfall die Anzahl der jeweils berücksichtigten Prüfkörper angeführt.

Für Prüfungen, bei denen ein anderer als vorhergesehener Versagensfall auftrat bevor das eigentliche Prüfungsende erreicht war (z. B. Aufspalten des Prüfkörpers bereits bei der Eindrehprüfung oder frühzeitiger Schraubenbruch bei der Ausziehprüfung), konnten die ermittelten Daten noch teilweise dahingehend verwendet werden, ihre bis zum vorzeitigen Versagen erbrachte Leistungsfähigkeit in der Auswertung zu berücksichtigen. Die Analyse dieser rechts-zensierten Daten mittels „Maximum Likelihood for right-censored data“ (MLerc) wird nachfolgend noch beschrieben.

Im Anhang C-1 sind in den Tabellen 90 bis 92 alle Ausreißer mit dazugehöriger Begründung aufgeführt.

## **Statistische Verteilung der Daten**

Für multiplikative, singuläre Mechanismen (Ausziehfestigkeit, ...) gilt grundsätzlich die Lognormalverteilung (LND) als geeignetes Verteilungsmodell. Bei additiven, singulären Mechanismen (Rohdichte, ...) wird hingegen gemäß wahrscheinlichkeitstheoretischer Grundsätze eine Normalverteilung (ND) erwartet. Zahlreichen Publikationen zufolge, wird allerdings für die Rohdichte von Holz eine bessere Beschreibung der Verteilungsfunktion durch eine Lognormalverteilung erreicht (Brandner, 2017).

Im Rahmen der Auswertung wird allerdings für alle physikalischen und mechanischen Kenngrößen von einer LND der Daten ausgegangen. Es gibt vier Hauptfaktoren, welche diese Annahme zulassen:

- Erstens ist der Definitionsbereich der ND nicht auf den positiven Zahlenbereich begrenzt (von  $-\infty$  bis  $+\infty$ ), was für die ermittelten mechanischen und physikalischen Größen praktisch nicht zutreffend ist. Die LND zum Vergleich ist nur im positiven Bereich definiert (von 0 bis  $+\infty$ ), in welchem die Kenngrößen tatsächlich auftreten.
- Zweitens gelten die Eigenschaften eines hierarchischen Systems (gekennzeichnet durch sukzessive Bruchausbildung), welche bei vielen Kenngrößen des Holzes beobachtet werden können, als mit der LND besser beschreibbar (ähnlich zum vorherigen Punkt) (Brandner, 2013).
- Drittens wird auch in ÖNORM EN 14358 (2010), welche die Berechnung der charakteristischen Werte für Vollholz, Holzwerkstoffe und Verbindungsmittel sowie Verbindungen regelt, für den Standardfall von einer LND der Festigkeitseigenschaften ausgegangen. Zusätzlich ist der Unterschied zwischen den beiden Verteilungsformen bei geringen Streuungen der Parameter (Variati-

onskoeffizienten (COV) von 15 bis 20 %) und Werten, welche deutlich im positiven Bereich liegen, sehr gering (Brandner, 2013).

- Viertens wird in zahlreichen Publikationen gezeigt, dass die LND sowohl für die Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften als auch für die Rohdichte weniger häufig abgelehnt wird als die ND (Brandner, 2013; Ringhofer und Schickhofer, 2014a; Ringhofer und Schickhofer, 2014b; Ringhofer et al., 2015c; Brandner et al., 2017 (in print)).

Wie der Arbeit von Brandner (2013) zu entnehmen ist, resultiert aus einer lognormalverteilten Variable  $X$ , von welcher der natürliche Logarithmus gebildet wird, eine Normalverteilung der Variable.

$$X \sim \text{LND falls } Y = \ln(X) \sim \text{ND} \quad (3.10)$$

Die Hochzahlen, wie diese zum Beispiel für die Rohdichtekorrektur der Ausziehfestigkeit in den Bemessungsmodellen bekannt sind (siehe Abschnitt 2-4.3, Rohdichte), entsprechen dem Steigungsparameter einer einfachen, linearen Regression zwischen den logarithmierten Werten. Da allerdings die lognormalverteilten Daten für die Bestimmung der Regression herangezogen werden, wird die entsprechende Regression mit Hilfe einer Potenzfunktion abgebildet. Die Gleichung (3.10) beschreibt die Transformation einer linearen Regression der logarithmierten Werte hin zu einer Regression mittels Potenzfunktion der Originaldaten.

$$\ln(Z) = k \cdot \ln(X) + d \rightarrow Z = X^k \cdot \exp(d) \quad (3.11)$$

Sämtliche in Kapitel 4 durchgeführten statistischen Datenanalysen und Auswertungen basieren auf der grundlegenden Annahme von lognormalverteilten (LND) Daten (Rohdichte, Eindrehmoment, Ausziehfestigkeit, Verbindungsmittelsteifigkeit sowie alle Parameter für das Modell lt. (Brandner et al., 2017 (in print))). Es werden zudem oftmals Mittelwerte, Median, Extremwerte, Standardabweichung und Quantilwerte für die Datensätze berechnet und ausgewertet.

### **Bestimmung von Potenzfunktionen/-faktoren**

Durch die soeben beschriebenen Verteilungsfunktionen der ermittelten Daten ergeben sich für deren Zusammenhänge Potenzfunktionen. Die damit verbundenen Potenzfaktoren, welche den Zusammenhang der Werte auf der Abszissenachse und der Ordinatenachse wiedergeben, lassen sich unterschiedlich ermitteln.

Eine häufig verwendete Methode stellt dabei die Methode der kleinsten Fehlerquadrate (LSM) dar. Damit ist es möglich, eine Anpassung einer vorher vom Typus (z. B. lineare Funktion, Exponential- oder Potenzfunktion) festgelegten Funktion an die empirischen Daten zu erzielen. Dies geschieht durch Optimierung der Funktionsparameter für den beobachteten oder zu beschreibenden Bereich und zielt auf eine theoretisch am besten approximierten Funktion für die ausgewählten Daten ab. Die nachfolgende Gleichung (3.12) beschreibt die dabei durchgeführte Ermittlung der Fehlerquadrate. Diese entstehen aus der Abweichung der Funktionswerte von den zugehörigen Werten auf der Ordinatenachse (Brandner, 2013; Strutz, 2016).

$$\chi^2 = \min \sum_{i=1}^n w_i \cdot \varepsilon_i^2 = \min \sum_{i=1}^n w_i (y_i - f(x_i | a))^2 \quad (3.12)$$

mit z. B. der Potenzfunktion

$$f(x_i | a) = a_1 \cdot x^{a_2} \quad (3.13)$$

- $\chi^2$  gibt gewichteten Wert der quadratischen Abweichung zwischen Daten und Funktion an
- $w_i$  Gewichtungsfaktor
- $\varepsilon_i$  Residuum (Abweichung des beobachteten Wertes von der Regressionsfunktion)
- $x_i, y_i$  Koordinaten der Datenpunkte (z. B. aus Prüfungen)
- $a, a_j$  Parameter der Regressionsfunktion

Um einen möglichst stabilen Potenzfaktor zu erhalten, ist ein entsprechender Umfang an Prüfwerten erforderlich, da ansonsten einzelne Faktoren, wie z. B. der Potenzfaktor, sehr sensibel auf neue Informationen bzw. Daten reagiert.

Obwohl diese Potenzfunktionen (bzw. Potenzfaktoren) sehr einfach durch die Festlegung einer automatischen Trendlinie in den Diagrammen der Software-Applikationen Microsoft Excel ermittelt werden können, wird dies aus folgendem Grund nicht genutzt: Für die Bestimmung der Potenzfunktion werden die Daten in den logarithmischen Raum transformiert und mithilfe einer linearen Funktion mit Hilfe der LSM angenähert. Dies ist für die Funktion selbst, wie in Gleichung (3.11) zu sehen ist, die korrekte Vorgehensweise und führt zu einem Minimum der Fehlerquadrate.

Allerdings kommt es durch das Logarithmieren der Daten zu einer Verzerrung der Fehlerquadrate. Die stärker von der Regressionsfunktion abweichenden Werte gehen nun mit einer geringeren „Gewichtung“ bzw. mit einem scheinbar kleineren Fehler durch die Abweichung in die LSM ein. Im Zuge der Rücktransformation in den linearen Raum kommt es dann dazu, dass die festgelegte Funktion das Minimum der Fehlerquadrate, entsprechend Gleichung (3.12), bei einer anderen Funktionsparameterkombination aufweist als durch die Trendlinie vorgegeben; diese Abweichung ist vor allem bei wenigen Stützpunkten stärker ausgeprägt.

Aus diesem Grund wird im Rahmen dieser Arbeit die Bestimmung der Potenzfunktionen für die jeweiligen Daten manuell mithilfe des Analysetools Solver im Microsoft Excel für die Werte im linearen Raum durchgeführt. Nur so kann gewährleistet werden, dass die entsprechende Funktion auch die tatsächlichen Messwerte bestmöglich abbildet.

### **Berechnung des Konfidenzintervalls**

Die Berechnung des Konfidenzintervalls (CI) für den Mittelwert kann mit Hilfe der Student'schen t-Verteilung erfolgen. Es handelt sich dabei um ein Schätzverfahren zur Bestimmung des Konfidenzintervalls eines normalverteilten Mittelwertes einer Grundgesamtheit. Dabei wird von dem statistisch stabilen Mittelwert der Daten ausgegangen und aufgrund des geringen Umfanges der Proben ( $n < 30$ ) die Varianz der Grundgesamtheit als unbekannt angenommen. Das Konfidenzintervall für den Mittelwert einer ND im linearen Raum ergibt sich nach Gleichung (3.14).

$$CI = \bar{x} \pm t_{\left(1-\frac{\alpha}{2}; n-1\right)} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (3.14)$$

CI	Konfidenzintervall für den Mittelwert der Stichprobe
$\bar{x}$	Mittelwert der Stichprobe
$t$	Quantil der t-Verteilung, in Abhängigkeit vom Stichprobenumfang $n$ und der Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha$
$s$	Standardabweichung des Stichprobenumfangs
$n$	Stichprobenumfang

Für die in dieser Arbeit betrachteten Fällen wird die Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha$  mit 5 % festgelegt. Damit kann korrekterweise davon ausgegangen werden, dass der wahre Mittelwert im Durchschnitt in 95 % der so geschätzten Intervalle enthalten ist, von welchen das berechnete lediglich eines davon darstellt.

Da allerdings, wie vorhin beschrieben, davon ausgegangen wird, dass die Daten nicht normalverteilt sondern lognormalverteilt sind, ist eine modifizierte Vorgehensweise zur Berechnung des Konfidenzintervalls für den Mittelwert notwendig. Es muss dazu im ersten Schritt für die logarithmierten Daten der Mittelwert  $\bar{y}$  und die Standardabweichung  $s_y$  berechnet werden. Mithilfe der modifizierten COX-Methode von Olsson (2005) wird die Rücktransformation des Konfidenzintervalls vom logarithmischen in den linearen Raum möglich. Diese nicht analytische Näherung der Transformation und die Berechnung des CI im linearen Raum sind in den Gleichungen (3.15) und (3.16) gezeigt.

$$CI_{1,2,COX-mod.}(\bar{y}) = \bar{y} + \frac{s_y^2}{2} \pm t_{\left(1-\frac{\alpha}{2}; n-1\right)} \cdot \sqrt{\frac{s_y^2}{n} + \frac{s_y^4}{2 \cdot (n-1)}} \quad (3.15)$$

mit (3.16) folgt die Umrechnung in den linearen Raum

$$CI_{1,2,COX-mod.}(\bar{x}) = \exp\left[CI_{1,2,COX-mod.}(\bar{y})\right] \quad (3.16)$$

$CI_{1,2,COX-mod.}$	Konfidenzintervall für den Mittelwert auf Basis der modifizierten COX-Methode
$\bar{y}$	Mittelwert der logarithmierten Stichprobe
$t$	Quantil der t-Verteilung, in Abhängigkeit vom Stichprobenumfang $n$ und der Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha$
$s_y$	Standardabweichung der logarithmierten Stichprobe
$n$	Stichprobenumfang

Auch für die Berechnung des Konfidenzintervalls für die 5 %-Fraktile der lognormalverteilten Prüfergebnisse wird nochmals eine andere Vorgehensweise notwendig. Entsprechend der parametrischen Berechnung nach ÖNORM EN 14358 (2010) werden dabei nach Gleichung (3.18) die obere und die untere Grenze des Konfidenzintervalls berechnet. Der jeweilige Multiplikationsfaktor für die Ober- und Untergrenze des Konfidenzintervalls ergibt sich dabei nach Gleichung (3.18). Dazu ist der in Gleichung (3.18) vorkommende Parameter  $k_\alpha(n)$  notwendig, welcher das Quantil der nichtzentralen t-Verteilung darstellt, und aus  $(n - 1)$  Freiheitsgraden und dem Nichtzentralitätsparameter  $\lambda$  resultiert (siehe Gl.(3.19)).

$$CI_{5\%} = \exp\left[\bar{y} - k_s(n) \cdot s_y\right] \quad (3.17)$$

$CI_{5\%}$	Konfidenzintervall für die 5 %-Fraktile einer lognormalverteilten Stichprobe
$\bar{y}$	Mittelwert der logarithmierten Stichprobe
$s_y$	Standardabweichung der logarithmierten Stichprobe
$k_s(n)$	Faktor zur Berechnung der Ober- und Untergrenze des Konfidenzintervalls der 5 %-Fraktile

$$k_s(n) = \frac{k_\alpha(n)}{\sqrt{n}} \quad (3.18)$$

mit

$$k_\alpha(n) \text{ mit } (n-1; \lambda = u_{1-p} \cdot \sqrt{n}) \quad (3.19)$$

$k_\alpha(n)$	$\alpha$ -Quantil der nichtzentralen t-Verteilung in Abhängigkeit vom Freiheitsgrad $(n - 1)$ und $\lambda$
$n$	Anzahl der Stichproben
$\lambda$	Nichtzentralitätsparameter
$u_{1-p}$	$(1 - p)$ -Quantil der standardisierten Normalverteilungsfunktion
$\alpha$	Signifikanzniveau

Für die in dieser Arbeit berechneten Konfidenzintervalle für Fraktile wurde durchgehend das 5 %-Quantil bei einem Signifikanzniveau von 5 % betrachtet.

## **MLErc**

Für den Fall, dass ein Versagen auftritt, welches bereits vor dem eigentlich angestrebten Versagensfall zu einem Abbruch der Prüfung führt (Aufspalten der Probe beim Eindrehen vor dem Maximum des Eindrehmomentes oder Schraubenbruch bei Ausziehprüfungen bzw. allgemein ein Versagen vor Eintritt des Zielversagens oder außerhalb des Zielversagensbereichs), wurde eine rechts-zensierte Datenanalyse durchgeführt. Die bis zu diesem Zeitpunkt ermittelten Kräfte bzw. Momente stellen dabei einen unteren Schätzer der jeweiligen wahren Kenngröße dar. Dieser Umstand kann mittels einer Datenanalyse, welche

als Maximum-Likelihood-Methode für rechts-zensierte Daten (MLErc) bekannt ist, in der statistischen Auswertung berücksichtigt werden. Die Kenngrößen der Verteilungsfunktion werden dabei so geschätzt, dass diese am verträglichsten mit der den Daten zugrundeliegenden Verteilungsinformation sind. Es kommt dabei unter der Annahme lognormalverteilter Prüfwerte zu einer Schätzung der Parameter  $\theta = (\mu_y, \sigma_y)$  entsprechend einer ND mit  $Y = \ln(X)$  der jeweiligen Lognormalverteilung  $F_{X(x|\theta)}$ . Dies geschieht durch Maximierung der log-Likelihood-Funktion entsprechend Gleichung (3.20) mit  $d_i = 1$  für einen Versagensmechanismus, welcher dem Zielversagen entspricht und andernfalls  $d_i = 0$  (Brandner, 2013, 2017).

$$\ln[L(\hat{\theta}|x_i)] = \max_{\theta} [\ln[L(\theta|x_i)]] \quad (3.20)$$

mit

$$L(\hat{\theta}|x_i) = \prod_{i=1}^n f_{X_i}(x_i|\theta)^{d_i} \cdot [1 - F_{X_i}(x_i|\theta)]^{1-d_i} \quad (3.21)$$

Durch die Anwendung der MLErc für die Daten von Teilen der Prüfserien, welche durch nicht gewollte Versagensmechanismen beeinflusst wurden, wurde somit der Mittelwert noch etwas angehoben, während allerdings im Regelfall auch eine Zunahme der Streuung miteinhergeht.

Um mit dieser Methode noch entsprechend gute Ergebnisse zu erhalten, sollten im Allgemeinen und bei üblichen Stichprobenumfängen sowie Streuungen rund 50 % der Prüfdaten den angestrebten Versagensmechanismus aufweisen.

### **Korrelationskoeffizient**

Für die Analyse bzw. Interpretation der Korrelationskoeffizienten im Kapitel 4-2.5 wird die von Stadlober und Schauer (2007) angegebene Faustformel verwendet:

- $0 \leq |r| < 0,5$  schwache Korrelation
- $0,5 \leq |r| < 0,8$  mittlere Korrelation
- $0,8 \leq |r| \leq 1,0$  starke Korrelation

Allerdings wird von Stadlober und Schauer (2007) auch ergänzt, dass sich die Werte für die Korrelation nur im Zusammenhang mit der entsprechenden Punktwolke richtig interpretieren lassen.

## KAPITEL 4: PRÜFAUSWERTUNG & INTERPRETATION

Am Anfang dieses Kapitels werden verschiedene Beobachtungen, welche im Rahmen der Durchführung der Prüfungen getätigt wurden, kurz erläutert. In weiterer Folge finden sich die Auswertung und Interpretation der Prüfergebnisse für die geprüften Serien (Erläuterungen zur Detektion der Ausreißer siehe Kapitel 3-3.2 bzw. Auflistung im Anhang C-1). Dabei ist zu Beginn jedes Unterpunktes jeweils eine Tabelle mit den Ergebnissen aus den Prüfungen, welche entsprechend statistisch aufbereitet wurden, vorangestellt. Zuerst werden für jede Prüfserie die Rohdichte und die Holzfeuchte kurz ausgewiesen. Nachfolgend werden die Erkenntnisse hinsichtlich der in den jeweiligen Prüfserien schwerpunktmäßig untersuchten Parameter diskutiert und Schlüsse gezogen. Dies erfolgt unter Zuhilfenahme von explorativen und induktiven Methoden der Statistik. Zudem werden auch Parallelen und Unterschiede zu bekannter Fachliteratur aufgezeigt und diskutiert.

### 4-1 PRÜFBEOBSACHTUNGEN

---

In diesem Abschnitt werden die in den jeweiligen Prüfserien auffälligen Beobachtungen kurz beschrieben. Einige Punkte werden in der nachfolgenden Auswertung bzw. Interpretation nochmals aufgegriffen.

#### 4-1.1 SERIE 1: VARIATION DER HOLZARTEN, HOLZANATOMISCHEN GRUPPEN & ROHDICHTE

Im Rahmen der Ausziehversuche kam es wie erwartet für die verschiedenen Holzarten zu sehr unterschiedlichen maximalen axialen Ausziehkräften (Prüfkräften). Neben der variierenden maximalen Ausziehungskraft fiel allerdings auch eine differente Versagenscharakteristik für die unterschiedlichen Holzarten auf. Dies wird in den folgenden Kraft-Weg-Diagrammen in Abbildung 34 für die Fichte (Rohdichtegruppe A) und Esche exemplarisch dargestellt. Es handelt sich bei den dargestellten Kennlinien um einen für die jeweilige Holzart repräsentativen Verlauf der Kraft-Weg-Charakteristik.

So war neben der differierenden maximalen Ausziehungskraft vor allem die unterschiedliche Charakteristik nach dem Überschreiten der maximalen Ausziehungskraft deutlich in den Prüfungen zu erkennen. Während für die Esche bei einem Einschraubwinkel von  $0^\circ$  zur Faser ein sehr sprödes Verhalten mit einem sehr schnellen Kraftabfall auftrat, wurde für die Fichte die Ausbildung eines nahezu stabilen Plateaus mit einem langsamen Kraftabfall beobachtet. Die Ausbildung eines solchen Plateaus kann dabei nur bei weggesteuerten Versuchen auftreten. Auch bei einem Einschraubwinkel von  $90^\circ$  zeigte sich für die Esche nach dem Erreichen der maximalen Ausziehungskraft ein zügiger Kraftabfall, während für die Fichte auch hier bei stark zunehmendem Weg kaum eine Abnahme der Prüfkraft einherging.

Diese unterschiedlichen Arten des Verhaltens nach dem Überschreiten der maximalen Ausziehungskraft (Entfestigung) sind auch dem anatomischen Aufbau der Hölzer geschuldet. So kann zum „duktileren“ Verhalten nach dem Überschreiten der Maximalkraft bei der Fichte, welches auch sehr auffällig bei der Pappel beobachtet wurde, bei einem Einschraubwinkel von  $90^\circ$  (Versagensmechanismus siehe 2-4.1) unter anderem der Umstand beitragen, dass die Faserlängen der Fichte (1300 ... 2800 ... 4800  $\mu\text{m}$ ) bedeutend höher sind als jene der Esche (150 ... 1600  $\mu\text{m}$ ). Die Faserlänge der Pappel mit 300 ... 1300 ... 2100  $\mu\text{m}$  ist im Vergleich zu den weiteren geprüften Laubholzarten am höchsten.



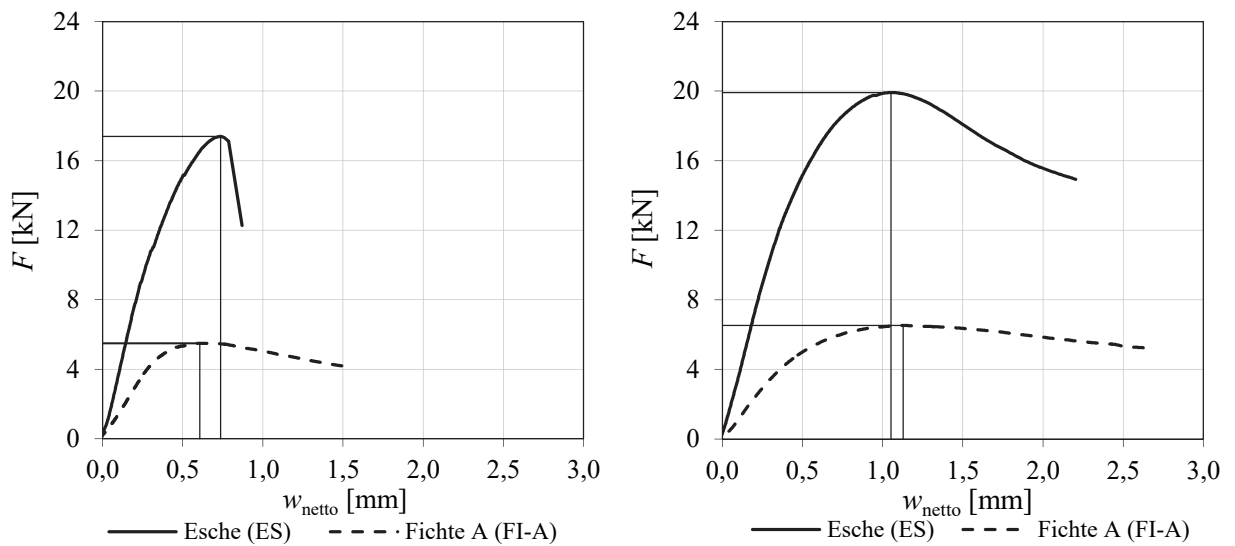


Abbildung 34: Kraft-Weg-Diagramme für RF in FI-A und ES für  $\alpha = 0^\circ$  (links) und  $90^\circ$  (rechts)

Trotz der durchaus unterschiedlichen Ausbildung der Nachbruchcharakteristik stellt sich für beide Holzarten die maximale Ausziehkraft bei annähernd gleichen Verformungen ein. Dies erfordert allerdings jeweils zur Ausziehkraft umgekehrt proportionale Steifigkeiten. Für  $0^\circ$  tritt die maximale Ausziehkraft bei einem Weg von ca. 0,6–0,7 mm und bei  $90^\circ$  bei 1,0–1,1 mm auf. Die größeren Verformungen bei einem Einschraubwinkel von  $90^\circ$  im Vergleich zu  $0^\circ$  sind durch den abweichenden Versagensmechanismus naheliegend (vgl. Kapitel 2-4.1).

#### 4-1.2 SERIE 2: VARIATION DES EINSCHRAUBWINKELS

Für die Serie 2 fiel bereits während der Eindrehprüfungen ein Unterschied zwischen den Eindrehwiderstandskennlinien der Buchen- und BauBuchen-Prüfkörper auf. In Abbildung 35 sind die Verläufe der Eindrehwiderstände über die Einschraubtiefe für die Referenzschraube in Buchen-Vollholz und BauBuche dargestellt. Es sind dabei die Eindrehwiderstandskennlinien für unterschiedliche Einschraubwinkel in stellvertretenden, für die Untergruppe repräsentativen, Prüfkörpern dargestellt. Die Höhe der Prüfkörper betrug dabei jeweils 50 mm und die Einschraubtiefe bzw. der Einschraubweg variierte zwischen 70 und 80 mm.

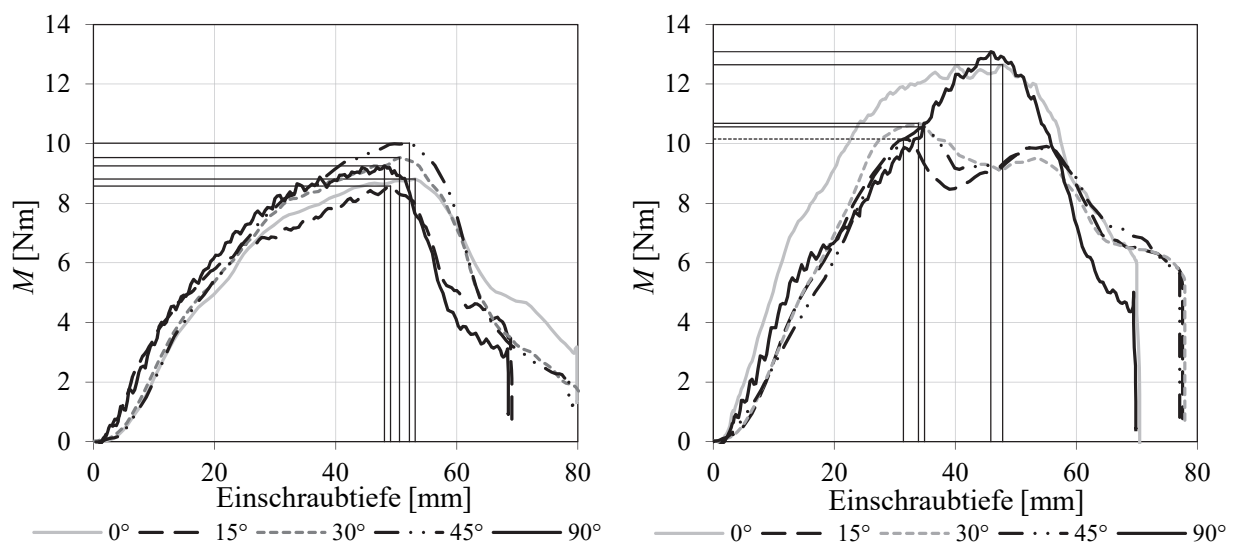
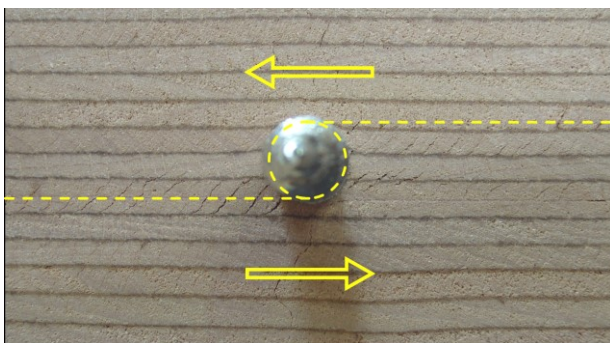


Abbildung 35: Eindrehwiderstand  $M$  über die Einschraubtiefe für die RF in Buche (links) und BauBuche (rechts) bei unterschiedlichen Einschraubwinkeln

Wie der Abbildung 35 (links) zu entnehmen ist, ergaben sich für die Buche die maximalen Eindrehmomente kurz vor oder direkt beim Austreten (Einschraubtiefe ca. 50 mm) der Schraubenspitze aus dem Prüfkörper. Bis dahin zeigte die Eindrehwiderstandskennlinie eine stetige Zunahme, welche nach dem Austreten der Schraubenspitze in einen steilen Abfall überging. Diese Charakteristik zeigt sich dabei für alle Einschraubwinkel nahezu identisch.

Der Verlauf des Eindrehwiderstandes der BauBuche (siehe Abbildung 35 rechts) zeigt hingegen für Einschraubwinkel von 15°, 30° und 45° eine deutliche Abweichung zu jenen bei 0° und 90°. Bei Achs-Faserwinkeln von 0° und 90° ist ein ähnliches Verhalten wie in der Buche beobachtbar. Es kommt zu einem stetigen Anstieg des Eindrehmomentes bis zum Austritt der Schraubenspitze aus dem Prüfkörper und einem anschließenden steilen Abfall. Im Vergleich dazu wird das maximale Einschraubmoment bei Einschraubwinkeln von 15°, 30° und 45° bereits bei einer Einschraubtiefe von 30–35 mm erreicht. Bis zu dieser Einschraubtiefe zeigt die Kennlinie keine Unterschiede zu den anderen Einschraubwinkeln. Obwohl das maximale Eindrehmoment an dieser Stelle deutlich geringer ausfällt folgt ein geringer Abfall der Kennlinie ehe beim Austritt der Schraubenspitze nochmals ein Anstieg auf annähernd das bereits zuvor erreichte Niveau vonstattengeht. Die Abnahme des Eindrehwiderstandes verläuft im anschließenden abfallenden Bereich annähernd identisch wie bei den Einschraubwinkeln von 0° und 90°.

Woher diese Charakteristik in BauBuche bei von 0° und 90° abweichenden Einschraubwinkeln resultiert, kann nicht schlüssig und vollständig begründet werden. Allerdings wurde bei eben jenen Versuchskörpern aus BauBuche mit Achs-Faserwinkeln von 15°, 30° und 45° des Öfteren im Anschluss an den Eindrehvorgang ein lokales Rollschubversagen beobachtet. Dabei kommt es durch die hohen Spaltkräfte, welche durch den Eindrehvorgang in den Prüfkörper eingebracht werden, zu einem lokalen Rollschubversagen in den Furnierschichten. Der Prüfkörper wird in zwei Hälften „aufgetrennt“, welche geringfügig gegeneinander verschoben werden. In Abbildung 36 ist ein solcher Prüfkörper, bei welchem die feinen Risse aufgrund der hohen Rollschubbeanspruchung entstehen, dargestellt. Die Überlegung in Zusammenhang mit den Verläufen der Eindrehwiderstände geht dahin, dass dieses lokale Rollschubversagen bei einer Einschraubtiefe von ca. 30–35 mm auftritt und deshalb zu einer „Entspannung“ des Prüfkörpers führt, weshalb keine weitere Zunahme des Eindrehmomentes erfolgt. Der nachfolgende erneute Anstieg des Eindrehmomentes würde entsprechend diesen Überlegungen daraus resultieren, dass mit der kontinuierlichen Zunahme der Einschraubtiefe in Verbindung mit dem Austreten der Schraubenspitze aus dem Prüfkörper das erforderliche Eindrehmoment nochmals ansteigt.



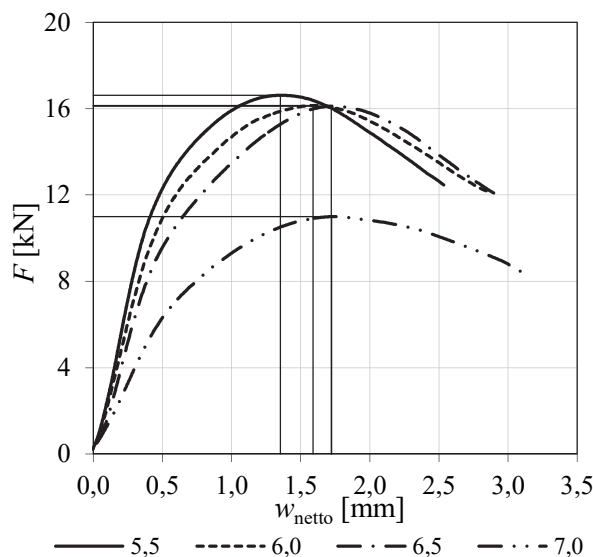
**Abbildung 36:** Lokales Rollschubversagen in Furnierschichten infolge des Eindrehvorganges auf der Seite der ausgetretenen Spitze

In einer weiteren Beobachtung bei den Prüfungen der Serie 2 konnte ein sehr ähnliches Verhalten bzw. optisches Erscheinungsbild für die Ausziehprüfungen bei Einschraubwinkeln von 0° und 15° auf der Kopfseite festgestellt werden. Auch für Einschraubwinkel von 30° und 45° zeigt sich ein optisch kaum zu unterscheidendes Versagensbild der Prüfkörper, bzw. in Kombination mit den Holzschrauben, nach Beendigung der Ausziehprüfungen.

### 4-1.3 SERIE 3: VARIATION DES VORBOHRDURCHMESSERS

Für die Variation der Vorbohrdurchmesser wurde für manche, allerdings nicht für alle Prüfungen, ebenfalls eine besondere Charakteristik bei den Ausziehprüfungen festgestellt. So bildete sich oftmals eine

Unstetigkeit im Kraft-Weg-Diagramm am Ende des linear-elastischen Bereiches aus. Allerdings zeigt das anschließende Verhalten ebenfalls einen nahezu linearen, aber mit geringerer Steifigkeit ansteigenden Verlauf bis zum Übergang in die plastische Verformung. Dies wurde vor allem bei Vorbohrdurchmessern von 6,0–7,0 mm beobachtet und trat dabei vor allem bei einem Einschraubwinkel von 90° sowohl in Buche als auch in BauBuche und bei RF & P1 auf. In Abbildung 37 sind die Kraft-Weg-Diagramme von Prüfkörpern, welche aus einem Kantholz hergestellt wurden, angegeben. Darin sind die soeben erläuterten Beobachtungen vor allem bei Vorbohrdurchmessern von 6,5 mm und auch in schwächerer Form bei 7,0 mm ersichtlich.



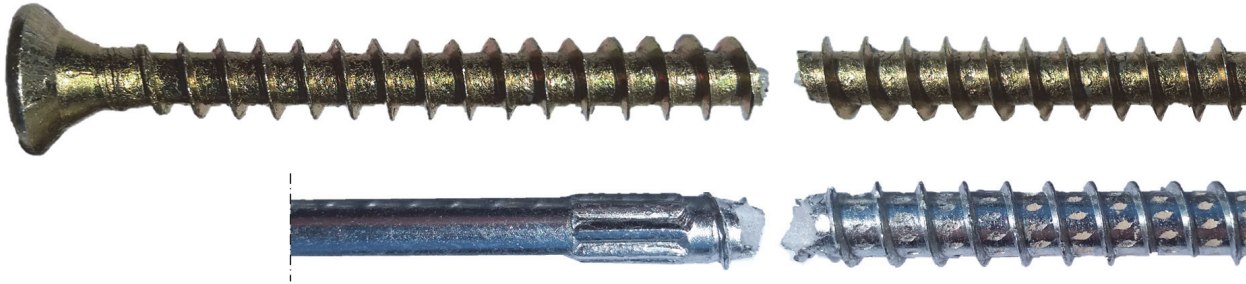
**Abbildung 37:** Kraft-Weg-Diagramme für RF in Buche bei unterschiedlichen Vorbohrdurchmessern ( $\alpha = 90^\circ$ )

Eine mögliche Begründung für die Abnahme der Steifigkeit ab einer entsprechenden Belastung bei größeren Vorbohrdurchmessern wäre, dass es zu einer Umlagerung der Kräfte bzw. Aktivierung eines neuen Tragemechanismus kommt, vergleichbar mit einer Setzung der Schraube im Prüfkörper bei einer entsprechenden Belastung. Da die Schraube vor allem bei größeren Vorbohrdurchmessern „lockerer“ bzw. „einseitig“ im Prüfkörper sitzt, kommt es aufgrund der Belastung zu einem Teilversagen. Infolgedessen kommt es zu einer Umlagerung der Last und zu einer Veränderung der Steifigkeit.

#### 4-1.4 SERIE 4: BESTIMMUNG VON SPALTKRÄFTEN

Aufgrund der erforderlichen Prüfkörpergeometrie, welche für eine entsprechende Anordnung der Messschrauben erforderlich war, kam es für die Holzbauschrauben zu einer größeren effektiven Verankerungslänge (80 mm anstatt der bisherigen 50 mm). Durch die vergleichsweise hohen Ausziehfestigkeiten in den Laubhölzern kommt es deshalb zu Ausziehkräften, welche durchaus in der Größenordnung der Zugtragfähigkeit der Schraube liegen (vor allem für die Referenzschraube). Die Zugtragfähigkeit der Schrauben beträgt ca. 36 kN für den Prototypen 1 und 28 kN für die Referenzschraube. Diese liegen damit etwas abweichend von jenen von Pöll (2017) ermittelten Werten, welche im Rahmen von Stahlversuchen ermittelt wurden ( $F_{\text{tens,mean}}$  für RF ca. 26,8 kN und für P1 ca. 36,5 kN). Die abweichenden Werte für die Referenzschraube sind auf die Verwendung von zwei unterschiedlichen Schraubenprodukten (bei identer Gewindegeometrie) zurückzuführen, welche zum Einsatz kamen.

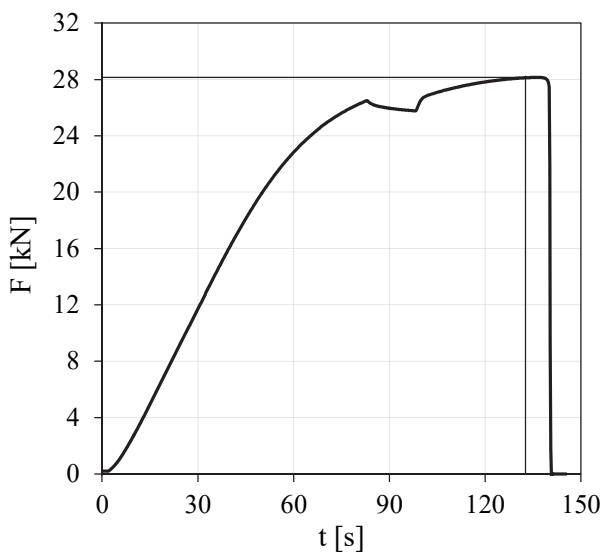
Im Falle eines Schraubenbruches trat dieser stets für die jeweilige Schraube an derselben Stelle auf. Wie in Abbildung 38 zu sehen ist, kam es für die Referenzschraube immer zu einem Versagen der Schraube etwas über der Klemmvorrichtung der Wegaufnehmer. Für den Prototyp 1 hingegen trat der Schraubenbruch immer im Übergangsbereich zwischen Gewindeende und dem am Schaft angebrachten Verdichter auf. Diese an der Oberkante des Prüfkörpers liegende Stelle entspricht dabei auch jenem Bereich der Schraube, ab welchem die volle Zuglast von der Schraube aufgenommen werden muss.



**Abbildung 38:** *Bruchbilder der Referenzschraube (oben) und des Prototypen 1 (unten)*

Durch die hohen Ausziehkräfte kam es bereits zu einem Plastifizieren des Stahls und daher auch zu verhältnismäßig großen Verformungen. Außerdem mussten zur Schonung der Wegaufnehmer, für den Fall eines Schraubenbruchs, diese ab dem Erreichen eines bestimmten Lastniveaus entfernt werden (siehe Kapitel 3-3.1.2). Um dies durchführen zu können, war eine Unterbrechung der Prüfung erforderlich.

Aufgrund der Abnahme der Wegaufnehmer und dem unterschiedlichen Einfluss der plastischen Verformung der Schraube je nach Prüflast kam es zu differierenden Prüfzeiten. Deshalb war es schwierig, das festgelegte Zeitfenster von  $(90 \pm 30)$  s bis zum Erreichen der Maximallast für die Ausziehprüfungen der Serie 4 einzuhalten. In Abbildung 39 wird exemplarisch das Kraft-Zeit-Diagramm für einen Prüfkörper gezeigt. Darin gut zu erkennen ist die Unterbrechung der Prüfung bei dem Lastniveau, bei welchem die Wegaufnehmer abgenommen wurden. Im weiteren Prüfungsverlauf kam es zu einer sehr langsamen Kraftzunahme (plastisches Verhalten der Schraube), ehe schlussendlich ein Schraubenbruch auftrat.

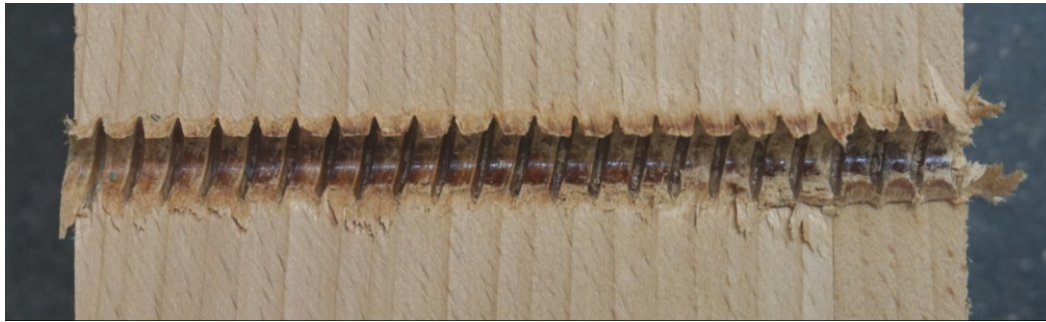


**Abbildung 39:** *Kraft-Zeit-Diagramm inkl. Abnahme der Wegaufnehmer (BauBuche, RF, 90°T)*

Wie in Untersuchungen von Ringhofer (2017) für die Fichte allerdings gezeigt wurde, kommt es bei unterschiedlichen Zeitspannen (45–300 Sek.) bis zum Eintreten des Versagens zu keinem signifikanten Einfluss auf den Mittelwert der Ausziehfestigkeit. Auch für die Ermittlung der Steifigkeit spielt die Zeitspanne bis zum Eintreten des Versagens, sofern diese größer als 90 Sekunden ist, keine Rolle. Auf Basis dieser Erkenntnisse kann davon ausgegangen werden, dass die erhöhten Prüfzeiten zu keinen signifikanten Abweichungen der zu bestimmenden Parameter führen.

Zusätzlich wurde vor allem für die Prüfserie 4 beobachtet, dass es bei einem Einschraubwinkel von  $0^\circ$  zur Faser zu einem schnellen Abklingen und einer generell geringeren Spaltkraft kommt. Dies deckt sich mit den Prüfungen und Erkenntnissen von Pöll (2017). Außerdem stellte es sich als sehr schwierig dar, die Schrauben bei einem Achs-Faserwinkel von  $0^\circ$  über die gesamte Einschraublänge genau in der Mitte der beiden Prüfkörperhälften zu positionieren. Mehrfach wurde beobachtet, dass die Schraube einseitig in eine Prüfkörperhälfte abdriftete.

Bei einem Achs-Faserwinkel von  $90^\circ$  wurde ein Abdriften von Schrauben in eine der beiden Prüfkörperhälften weitaus weniger oft beobachtet; dies sowohl bei der Buche als auch bei der BauBuche. Allerdings kam es durch die Komprimierung bzw. Verdrängung des Holzvolumens bei einem Einschraubwinkel von  $90^\circ$  zu sehr hohen Spaltkräften und resultierend aus der Reibung und Materialverformung zu einer großen Hitzeeinwirkung. Es wurde dabei so heiß, dass es zu einer oberflächlichen Verfärbung des Holzes im Schraubenkanal kam. Dies wurde ausschließlich bei einem Einschraubwinkel von  $90^\circ$ , dabei allerdings sowohl für Buche als auch für BauBuche (RF & P1) beobachtet und ist in Abbildung 40 dargestellt. Das Auftreten dieses Merkmals in anderen Prüfserien konnte nur durch eine Auftrennung der Prüfkörper nach der Prüfung sichtbar gemacht werden.



**Abbildung 40:** *Schraubenkanal in Buchenholz bei Applikation  $90^\circ$  zur Faser: Verfärbungen in Folge großer Hitzeentwicklungen während des Einschraubprozesses*

Anmerkung 1: An dieser Stelle sei noch angemerkt, dass es bei sämtlichen Ausziehprüfungen für die Serien 1, 2 und 3 nur zu reinem Ausziehversagen gekommen ist. Es trat bei keiner Prüfung ein Aufspalten oder Schraubenbruch auf. Lediglich in der Prüfserie 4 kam es aufgrund der größeren effektiven Verankerungslängen zu einigen Schraubenstahlbrüchen.

Anmerkung 2: Die in den nachfolgenden Ausführungen angegebenen Prozentangaben beziehen sich, sofern nicht anders ausgewiesen, immer auf die Referenzschraube bzw. in der Serie 4 auch auf die Referenzprüfungen.



## 4-2 SERIE 1: VARIATION DER HOLZARTEN, HOLZANATOMISCHEN GRUPPEN & ROHDICHTE

Nach den Prüfkörpereigenschaften (Rohdichte und Holzfeuchtigkeit) für die Serie 1 werden in der Folge die Zusammenhänge des Eindrehmomentes, der Ausziehfestigkeit und der Verbundsteifigkeit mit der Rohdichte betrachtet. Außerdem wird der Zusammenhang der Ausziehfestigkeit mit dem Eindrehmoment ermittelt und analysiert. Für alle Betrachtungen wird dabei immer zwischen Referenzschraube und der Schraube mit der Bezeichnung Prototyp 1 sowie für jeden Achs-Faserwinkel  $\{0^\circ; 45^\circ; 90^\circ\}$  unterschieden. Abschließend werden die Korrelationsmatrizen für die Modellparameter (siehe Kapitel 2-4.2) aufgestellt. Außerdem sollen die Unterschiede und Parallelen der Ausziehcharakteristik für die unterschiedlichen holzanatomischen Gruppen bei verschiedenen Einschraubwinkeln gezeigt werden.

### 4-2.1 MATERIALKENNWERTE

In den folgenden Tabellen und Abbildungen werden die ermittelten Kenngrößen hinsichtlich der beobachteten, materialabhängigen Messgrößen Rohdichte und Holzfeuchtigkeit dargelegt. Die Grundlage bildet dabei der Datensatz, bei welchem bereits eine Datenbereinigung durchgeführt wurde. Angeführt werden jedoch auch jene Prüfkörper, bei denen in weiterer Folge lediglich eine einzelne Kenngröße als Ausreißer identifiziert wurde. Prinzipiell darf für alle Prüfkörper von "clear-wood"-Eigenschaften ausgegangen werden, weshalb keine besonderen Merkmale, welche die Rohdichte oder Holzfeuchte stark beeinflussen würden, zu erwarten sind.

#### Holzfeuchtigkeit

In Tabelle 26 sind die statistisch relevanten Kenngrößen der Holzfeuchtigkeit für die Serie 1 dargestellt.

**Tabelle 26:** Serie 1: Holzfeuchte  $u$  in Abhängigkeit von der Holzart bzw. Rohdichtegruppe, dem Achs-Faserwinkel und vom Schraubentyp

Holzart bzw. Gruppe	$\alpha$	Referenzschraube (RF)					Prototyp 1 (P1)				
		$n$	mean	COV	min	max	$n$	mean	COV	min	max
		[-]	[%]	[%]	[%]	[%]	[-]	[%]	[%]	[%]	[%]
Fichte A	0°	24	12,6	2,6	11,9	13,1	23	12,5	3,1	11,8	13,1
	90°	23	12,9	2,5	12,4	13,6	24	12,8	2,2	12,4	13,4
Fichte B	0°	24	13,0	3,5	12,1	13,7	24	13,0	3,2	11,9	13,8
	90°	24	13,0	3,3	12,2	13,8	24	13,1	2,9	12,3	14,0
Fichte C	0°	24	13,0	4,6	12,1	14,0	24	13,0	5,3	11,9	14,0
	90°	24	13,2	3,5	12,2	13,7	23	13,1	3,8	12,0	13,9
Edelkastanie	0°	21	11,8	4,7	11,1	12,8	21	11,8	4,4	11,0	12,6
	45°	21	11,9	4,7	11,1	12,7	21	11,9	4,2	11,2	12,7
	90°	20	11,6	4,5	10,7	12,4	21	11,5	4,8	10,8	12,4
Esche	0°	21	10,3	4,5	9,90	11,2	21	10,3	4,7	9,77	11,3
	45°	21	10,5	4,3	9,99	11,4	21	10,5	4,4	10,0	11,3
	90°	20	10,2	4,5	9,79	11,2	20	10,2	4,8	9,75	11,2



<b>Eiche</b>	<b>0°</b>	21	10,4	4,9	9,27	11,1	21	10,5	4,3	9,50	11,3
	<b>45°</b>	21	10,4	3,0	9,82	10,9	21	10,4	3,0	9,88	10,9
	<b>90°</b>	21	10,1	4,9	8,65	11,0	21	10,0	5,7	8,70	11,0
<b>Pappel</b>	<b>0°</b>	21	10,8	3,4	10,5	11,8	20	10,8	3,1	10,5	11,9
	<b>45°</b>	21	10,7	3,8	10,2	11,8	21	10,7	2,9	10,3	11,5
	<b>90°</b>	21	10,9	2,8	10,5	11,5	21	10,9	2,6	10,4	11,4
<b>Birke</b>	<b>0°</b>	21	10,9	2,4	10,6	11,4	21	10,9	2,4	10,6	11,4
	<b>45°</b>	21	11,0	2,7	10,6	11,5	21	10,9	2,5	10,5	11,5
	<b>90°</b>	20	10,9	2,2	10,5	11,3	20	10,9	2,3	10,4	11,4
<b>Buche</b>	<b>0°</b>	22	8,50	3,5	8,06	9,05	22	9,32	2,5	9,02	9,77
	<b>45°</b>	19	9,57	5,1	8,53	10,3	20	9,67	4,5	8,92	10,5
	<b>90°</b>	20	8,32	2,8	8,04	8,82	22	9,19	3,3	8,68	10,1

Der minimal auftretende Wert der gesamten Serie ist mit einer Holzfeuchte von 8,04 % bei Buche zu finden. Der Maximalwert hingegen tritt sowohl bei Fichte B und C mit einer Holzfeuchtigkeit von jeweils 14,0 % auf. Die Mittelwerte liegen in einem Bereich zwischen 8,5 % (Buche) und 13,2 % (Fichte C). Mit Ausnahme der Buche wurden alle Prüfkörper bis zur Massenkonstanz konditioniert, weshalb die Holzfeuchtigkeit für die Buchen-Prüfkörper im Vergleich zu den anderen Holzarten geringer ausfällt (Ausgleichsfeuchte für 20°C und 65 % Luftfeuchtigkeit noch nicht erreicht). Die Variationskoeffizienten (kurz: COV) der Holzfeuchtigkeit liegen mit einem maximalen Wert von 5,7 % (Eiche) auf einem für die Holzfeuchtigkeit, wie erwartet, entsprechend geringem Niveau.

Die nachfolgenden drei Boxplotserien (Abbildung 41 bis Abbildung 43) zeigen die in Tabelle 26 dargestellten Daten in grafisch aufbereiteter Form. Dabei sind die einzelnen Untergruppen (Variation der Holzarten bzw. Rohdichtegruppe) nebeneinander dargestellt. Dabei ist gut zu erkennen, dass die Untergruppen für die Nadelhölzer und ringporige Laubhölzer keine signifikanten Abweichungen voneinander aufweisen. Lediglich die erhöhte Holzfeuchtigkeit für die Edelkastanie, welche etwa 1,5 % über den anderen ringporigen Laubhölzern liegt, fällt etwas auf. Für die zerstreutporigen Laubhölzer zeigt sich lediglich für die Buche eine abweichende Holzfeuchtigkeit.

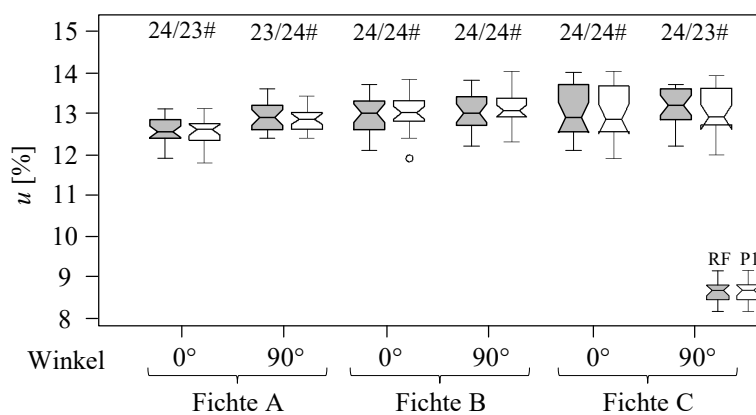


Abbildung 41: Serie 1: Boxplot Holzfeuchtigkeit  $u$  für die Nadelhölzer in Abhängigkeit vom Achs-Faserwinkel und Schraubentyp

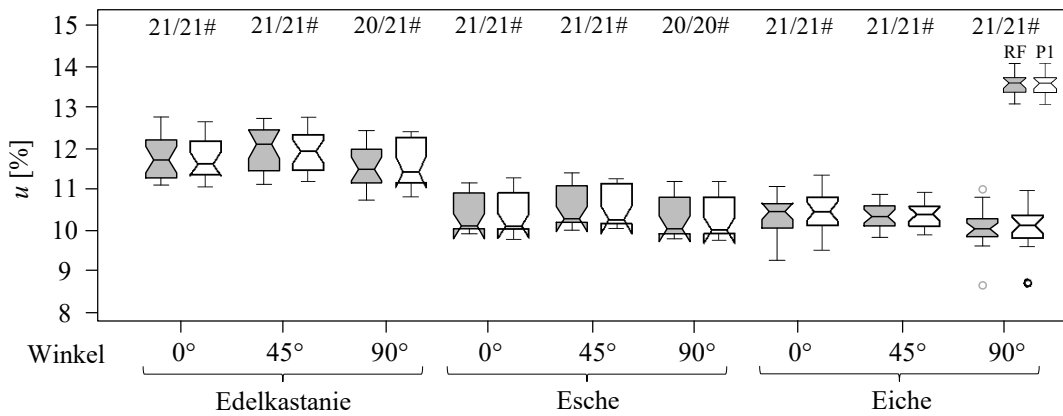


Abbildung 42: Serie 1: Boxplot Holzfeuchtigkeit  $u$  für die ringporigen Laubhölzer in Abhängigkeit vom Achs-Faserwinkel und Schraubentyp

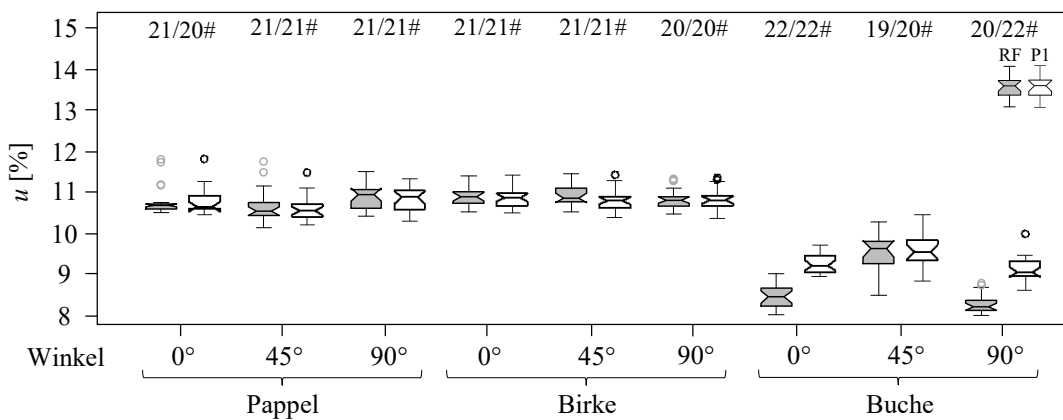


Abbildung 43: Serie 1: Boxplot Holzfeuchtigkeit  $u$  für die zerstreuporigen Laubhölzer in Abhängigkeit vom Achs-Faserwinkel und Schraubentyp

Nachfolgend werden in Abbildung 44 die einzelnen Untergruppen für die jeweilige Holzart zusammengefasst. Wie darin zu erkennen ist, stellt sich bei den Fichtenrohrichtegruppen eine mittlere Holzfeuchtigkeit von etwa 13 % ein. Diese liegt deutlich über jener mittleren Holzfeuchtigkeit der Laubhölzer, welche im Bereich von 11 % angesiedelt ist. Eine Ausnahme stellt dabei die Buche dar, welche insgesamt nur eine mittlere Holzfeuchtigkeit von ca. 9 % aufweist. Diese Prüfkörper bzw. auch die Prüfergebnisse stammen teilweise aus den Prüfungen von Pöll (2017), wo dieser auch anmerkt, dass aus Zeitgründen keine Konditionierung bis zur Massenkonstanz möglich war.

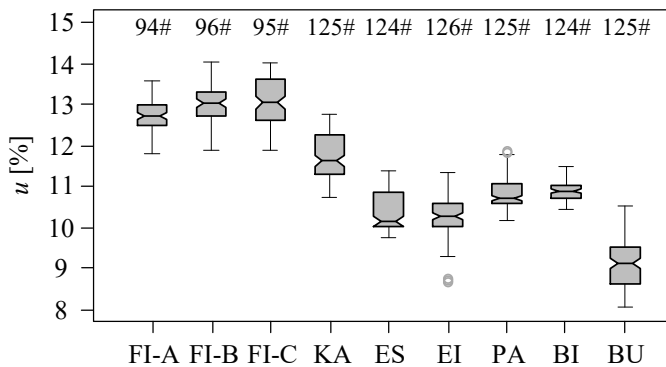


Abbildung 44: Serie 1: Boxplot Vergleich der Holzfeuchtigkeit  $u$  aller Holzarten

Für die Abweichungen der Holzfeuchtigkeit der betrachteten Untergruppen zueinander kann festgehalten werden, dass diese klein genug sind, um keinen signifikanten Einfluss auf die betrachteten mechanischen Kennwerte aufzuweisen (siehe Kapitel 3-2.2.2, Rohdichte und Holzfeuchtigkeit). Eine Korrektur der

nachfolgenden Kennwerte auf eine Referenzholzfeuchte von 12 % wird deshalb ausschließlich für die Rohdichte durchgeführt.

## Rohdichte

Die in Tabelle 27 dargestellten Rohdichtedaten sind auf eine Referenzholzfeuchte von 12 % bezogen. Die Berechnung erfolgte dabei entsprechend Kapitel 3-2.2.2 nach Gleichung (3.3).

**Tabelle 27:** Serie 1: Rohdichte  $\rho_{12}$  in Abhängigkeit von der Holzart bzw. Rohdichtegruppe, dem Achs-Faserwinkel und vom Schraubentyp

Holzart bzw. Gruppe	$\alpha$	Referenzschraube (RF)					Prototyp 1 (P1)				
		<i>n</i>	mean	COV	min	max	<i>n</i>	mean	COV	min	max
		[-]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[%]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[-]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[%]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]
Fichte A	0°	24	358	4,3	334	388	23	359	3,1	343	376
	90°	23	371	5,4	336	415	24	368	5,7	337	399
Fichte B	0°	24	441	2,4	421	455	24	442	2,6	419	461
	90°	24	450	4,2	421	490	24	447	3,4	423	483
Fichte C	0°	24	539	6,3	488	593	24	536	6,7	485	599
	90°	24	543	7,0	488	624	23	538	6,4	482	619
Edelkastanie	0°	21	536	6,2	492	626	21	530	6,1	488	617
	45°	21	539	7,0	473	624	21	530	7,1	474	623
	90°	20	529	6,3	475	633	21	530	6,6	472	625
Esche	0°	21	660	4,4	601	720	21	660	4,8	605	732
	45°	21	656	4,6	572	703	21	654	4,1	591	689
	90°	20	665	4,6	592	723	20	660	4,5	587	692
Eiche	0°	21	755	7,3	676	907	21	757	8,2	678	917
	45°	21	767	7,3	693	867	21	762	8,1	692	869
	90°	21	765	6,4	690	877	21	766	6,5	702	855
Pappel	0°	21	484	6,3	442	546	20	480	5,3	435	525
	45°	21	484	6,3	434	533	21	485	5,9	436	537
	90°	21	487	5,8	446	541	21	484	6,3	441	542
Birke	0°	21	637	10,0	538	746	21	636	10,2	524	747
	45°	21	632	10,4	545	743	21	632	10,4	546	744
	90°	20	646	10,0	569	757	20	646	10,0	569	762
Buche	0°	22	740	7,7	660	861	22	742	7,6	660	851
	45°	19	744	5,9	698	844	20	753	6,2	673	856
	90°	20	728	6,8	654	839	22	734	7,4	657	851

Wie der Tabelle 27 zu entnehmen ist, liegt der minimale Wert der Rohdichte aller Prüfkörper bei 334 kg/m<sup>3</sup> (Fichte A), während der Maximalwert bei Eiche mit 917 kg/m<sup>3</sup> auftritt. Es kann somit nahezu

der gesamte Rohdichtebereich der einheimischen Holzarten abgedeckt werden. Der Variationskoeffizient kommt für alle Prüfgruppen zwischen 2,4 % (Fichte B) und 10,4 % (Birke) zu liegen. Diese unterschiedlich starke Ausprägung ist auch in den folgenden Boxplots zu erkennen und ist auf die Probenentnahme zurückzuführen. Vor allem jene Holzarten, für welche nur wenige Kanthölzer zur Herstellung der Prüfkörper zur Verfügung standen, weisen dementsprechend geringere COV-Werte auf. Zusätzlich ist nicht für alle Kanthölzer bekannt, ob diese aus dem gleichen oder von unterschiedlichen Baumstämmen stammen.

Für die gesamte Serie der Variation der Holzarten wurden somit für die Auswertung 285 Nadelholzprüfkörper sowie 375 ringporige und 374 zerstreutporige Laubholzprüfkörper herangezogen (in Summe 1.034 Prüfkörper). Die nachfolgenden drei Abbildungen 45 bis 47 zeigen die in Tabelle 27 dargestellten Daten.

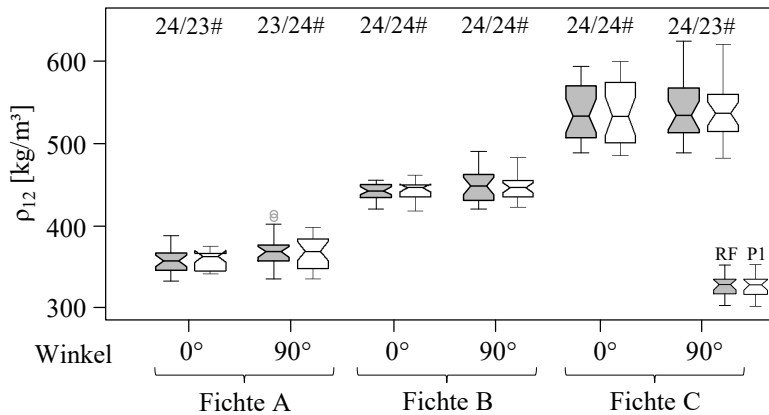


Abbildung 45: Serie 1: Boxplot Rohdichte  $\rho_{12}$  für die Nadelhölzer in Abhängigkeit vom Achs-Faserwinkel und Schraubentyp

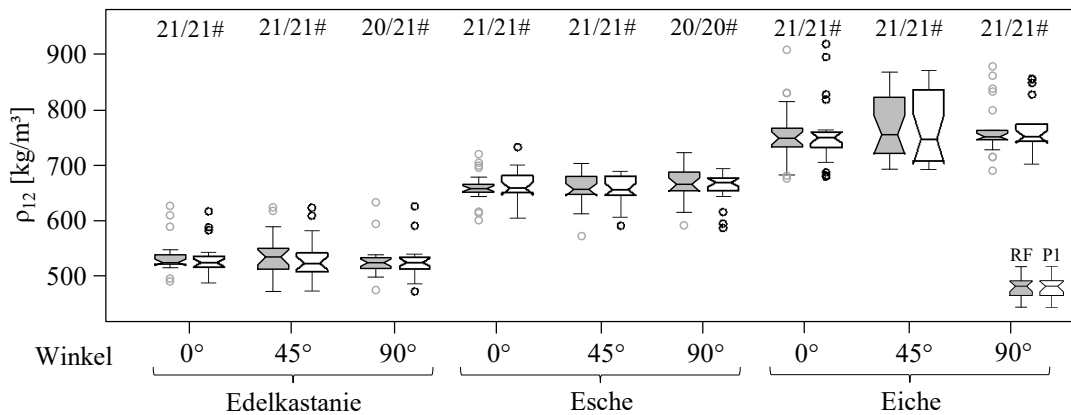


Abbildung 46: Serie 1: Boxplot Rohdichte  $\rho_{12}$  für die ringporigen Laubhölzer in Abhängigkeit vom Achs-Faserwinkel und Schraubentyp

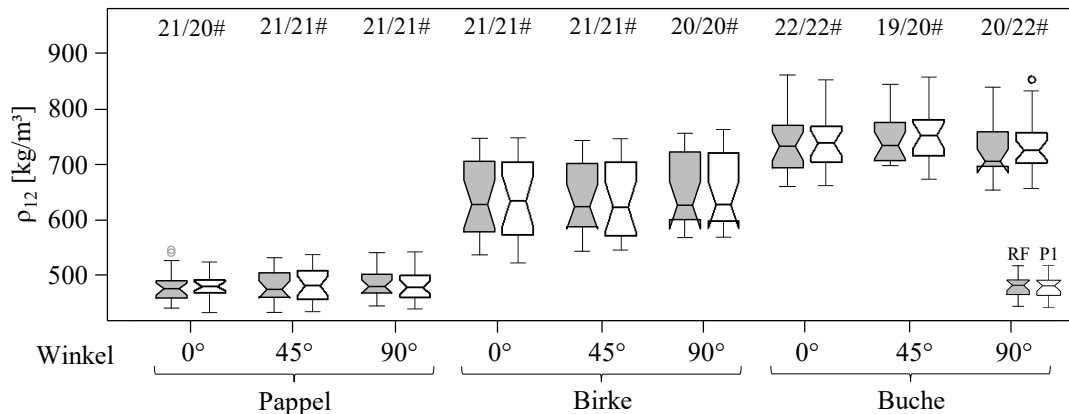


Abbildung 47: Serie 1: Boxplot Rohdichte  $\rho_{12}$  für die zerstreuporigen Laubhölzer in Abhängigkeit vom Achs-Faserwinkel und Schraubentyp

Wie in den Abbildungen 45 bis 47 zu erkennen ist, sind die Prüfkörper der einzelnen Holzarten jeweils sehr gleichmäßig auf die Untergruppen mit verschiedenen Achs-Faserwinkeln verteilt. Somit kann festgehalten werden, dass für alle Untergruppen (Variation des Schraubentyps, des Einschraubwinkels und der Holzart bzw. Rohdichtegruppe) die Abweichungen der mittleren Rohdichte untereinander so gering sind, dass diese keinen signifikanten Einfluss aufweisen.

Wie der Rohdichtevergleich der jeweiligen Holzarten (bzw. Rohdichtegruppen) in Abbildung 48 zeigt, ist eine sehr gute Abdeckung eines möglichst großen Rohdichtebereiches für die ringporigen und zerstreuporigen Laubhölzer gegeben. Außerdem ist für die einzelnen holzanatomischen Gruppen eine annähernd konstante Abdeckung des jeweiligen Rohdichtebereiches gegeben. Zusätzlich kommt es in den unteren Rohdichtebereichen der Laubhölzer zu Überschneidungen mit der Rohdichte der Holzart Fichte.

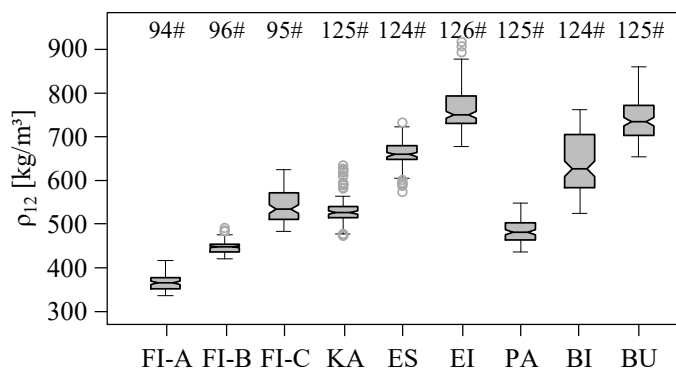


Abbildung 48: Serie 1: Boxplot Vergleich der Rohdichte  $\rho_{12}$  aller Holzarten

## 4-2.2 AUSWERTUNG EINDREHPRÜFUNGEN

In der Tabelle 28 und den anschließenden Abbildungen sind die Kenngrößen hinsichtlich des gemessenen maximalen Eindrehmomentes angeführt. Die Daten in der Tabelle entsprechen den vollständig bereinigten Datensätzen (siehe Abschnitt 3-3.2) für das maximale Eindrehmoment  $M_{\max}$ . Zusätzlich sind für alle Prüfkörper, welche im Zuge der Eindrehprüfung aufgespalten wurden, die Daten aus der rechts-zensierten Datenanalyse (mittels MLE; siehe Anhang C-2) in Klammern angeführt. Für die nachfolgenden Diagramme zur Bestimmung der Potenzfunktionen werden diese Daten herangezogen.

**Tabelle 28:** Serie 1: maximales Eindrehmoment  $M_{max}$  in Abhängigkeit von der Holzart bzw. Rohdichtegruppe, dem Achs-Faserwinkel und vom Schraubentyp

Holzart bzw. Gruppe	$\alpha$	Referenzschraube (RF)					Prototyp 1 (P1)					Verhältnis mean[P1]/ mean[RF] [%]
		<i>n</i> [-]	mean [Nm]	COV [%]	min [Nm]	max [Nm]	<i>n</i> [-]	mean [Nm]	COV [%]	min [Nm]	max [Nm]	
Fichte A	0°	24	2,75	11,3	2,26	3,47	23	2,86	12,1	2,35	3,70	104
	90°	23	2,72	18,1	2,04	3,53	24	3,22	12,7	2,33	3,89	118
Fichte B	0°	24	3,31	10,6	2,60	4,15	24	3,43	7,9	2,94	3,98	104
	90°	24	4,01	14,2	3,41	5,66	23 (24)	4,57 (4,57)	9,9 (9,6)	3,71	5,64	114
Fichte C	0°	24	4,85	20,4	3,55	6,73	23 (24)	4,84 (4,90)	24,8 (24,1)	3,06	7,34	100
	90°	24	5,39	18,1	3,85	6,94	20 (23)	6,16 (6,21)	16,6 (15,9)	4,57	8,03	114
Edelkastanie	0°	21	5,00	11,0	4,07	5,99	20 (21)	5,30 (5,37)	14,0 (14,8)	3,91	6,76	106
	45°	21	5,27	16,6	4,02	7,02	21	5,71	16,0	4,48	7,51	108
	90°	20	5,15	6,7	4,70	6,19	21	5,63	11,3	4,42	6,86	109
Esche	0°	21	8,55	12,6	6,66	11,1	21	9,82	12,1	8,24	12,6	115
	45°	21	8,65	11,1	6,40	9,83	21	9,90	12,1	8,02	12,4	114
	90°	20	9,25	7,9	8,29	10,7	20	10,5	9,4	8,50	12,3	114
Eiche	0°	11 (21)	7,71 (8,48)	12,7 (17,1)	5,90	8,86	1 (21)	6,91 (14,5)	– (35,3)	6,91	6,91	90
	45°	21	9,24	14,3	6,84	11,9	19 (21)	10,2 (10,6)	17,7 (19,6)	8,05	13,1	110
	90°	20 (21)	9,63 (9,64)	10,3 (10,5)	7,28	11,0	16 (21)	10,7 (11,0)	9,2 (10,9)	9,17	12,2	111
Pappel	0°	21	4,26	9,8	3,67	5,15	20	5,02	12,2	4,32	6,47	118
	45°	21	4,43	11,7	3,66	5,30	21	5,19	10,8	3,85	6,16	117
	90°	21	4,43	11,5	3,44	5,21	21	4,98	14,2	3,73	6,34	112
Birke	0°	21	6,35	21,5	4,42	9,13	21	6,36	19,6	4,20	8,33	100
	45°	21	6,53	22,4	4,55	8,96	21	7,02	19,1	5,14	9,58	108
	90°	20	6,91	18,6	5,36	9,60	20	7,83	14,8	6,52	9,79	113
Buche	0°	22	8,48	17,3	6,43	11,4	22	9,65	16,5	7,51	14,0	114
	45°	19	10,1	10,6	7,97	12,5	20	12,1	13,3	8,41	15,3	120
	90°	20	8,91	14,6	7,18	12,1	22	10,2	15,7	7,94	14,5	114

Wie der Tabelle 28 zu entnehmen ist, treten für die Referenzschraube Eindrehmomente zwischen 2,04 Nm und 12,5 Nm (im Mittel 2,7–10,1 Nm) auf. Für den Prototyp 1 liegen die minimalen und maximalen Eindrehmomente bei Werten von 2,33 Nm und 15,3 Nm (im Mittel 2,9–12,1 Nm) für die nicht aufgespaltenen Prüfkörper. Die Variationskoeffizienten weisen in weiterer Folge Werte zwischen 6,7 % (Edelkastanie, 90°) und 24,8 % (Fichte C, 0°) auf. Die hohen Variationskoeffizienten für Fichte C und Birke sind auf die bereits größeren Streuungen der Rohdichte der Prüfkörper (Fichte C ca. 7 % und Birke ca. 10 %) zurückzuführen, welche aber beide in einem durchaus erwartbaren Bereich liegen.



Das Aufspalten von Prüfkörpern, welches in einzelnen Serien vereinzelt, in anderen gehäuft auftrat, ereignete sich in den meisten Fällen zum Zeitpunkt des Austretens der Schraubenspitze aus dem Prüfkörper. Lediglich bei den Eichenprüfkörpern kam es teilweise auch zu einem früheren Versagen; teilweise bereits nach wenigen Millimetern Einschraubtiefe. Da es bei insgesamt zwanzig Eichenprüfkörpern mit einem Einschraubwinkel von  $0^\circ$  zur Faser und Verwendung des Prototypen 1 zu einer Aufspaltung kam, verblieb lediglich ein intakter Prüfkörper für die Auswertung. Im Zuge der rechts-zensierten Datenanalyse kommt es aufgrund der großen Anzahl an Versagensfällen im Vergleich zu den gültigen Werten zu einer starken Überschätzung des daraus resultierenden Mittelwertes (MLErc ist eigentlich nicht mehr adäquat). Wie in Abschnitt 3-3.2 angegeben ist, sollte die Anzahl der gültigen Prüfwerte, für eine entsprechende Schätzung des Mittelwertes und der Standardabweichung mittels MLE, bei mindestens 50 % liegen. Da dies im vorliegenden Fall nicht gegeben ist, und eine damit verbundene große Unsicherheit (große Standardabweichung, siehe Abbildung 50) einhergeht, müssen die auf diesen Werten aufbauenden Kennwerte in weiterer Folge mit großer Vorsicht betrachtet bzw. gänzlich ausgeschlossen werden. Realistisch betrachtet handelt es sich hier um einen Totalausfall einer gesamten Untergruppe der Prüfsérie.

Bei Betrachtung der aus den Prüfungen ermittelten Daten (ohne MLErc) liegen bei den Nadelhölzern im Durchschnitt die Mittelwerte der maximalen Eindrehmomente für den Prototyp 1 bei  $0^\circ$  um 2,5 % und bei  $90^\circ$  um 15,5 % über jenen der Referenzschrauben. Bei den ringporigen Laubhölzern sind die mittleren maximalen Eindrehmomente des Prototypen 1 bei  $0^\circ$  um 10,4 % (Eiche nicht berücksichtigt aufgrund der geringen Anzahl an gültigen Proben:  $n = 1$ ), bei  $45^\circ$  um 11,1 % und bei  $90^\circ$  um 11,3 % über jenen der Referenzschraube. Bei den zerstreutporigen Laubhölzern liegen die Eindrehmomente des P1 für  $0^\circ$  um 10,6 %, für  $45^\circ$  um 14,8 % und für  $90^\circ$  um 13,4 % über jenen der RF.

Bei den Laubhölzern fällt die Zunahme der maximalen Einschraubmomente, bei Verwendung des P1 im Vergleich zur RF, somit nahezu konstant für die unterschiedlichen Einschraubwinkeln (im Mittel bei  $0^\circ$  10,5 %, bei  $45^\circ$  13,0 % und bei  $90^\circ$  12,4 %) aus. Im Vergleich dazu ist bei den Nadelhölzern bei einem Einschraubwinkel von  $0^\circ$  nahezu keine Zunahme zu erkennen, wohingegen bei  $90^\circ$  diese ähnlich den Laubhölzern ausfällt. In Summe kann man vereinfachend von im Mittel 10 % bis 15 % höheren Eindrehmomenten bei P1 gegenüber RF ausgehen.

In den nachfolgenden Abbildungen sind die rechts-zensierten Mittelwerte der maximalen Eindrehmomente  $M_{\max}$  über die jeweiligen Rohdichten  $\rho_{12}$  dargestellt. Damit kann der Potenzfaktor einer passenden Potenzfunktion durch die Approximation mittels der Methode der kleinsten Fehlerquadrate (LSM) ermittelt werden. Um eine ausgeglichene Gewichtung zu erhalten, wird dabei lediglich der Mittelwert aller Prüfkörper einer Untergruppe als Repräsentant herangezogen. Eine Aussage über das zugehörige Bestimmtheitsmaß ist dementsprechend wenig aussagekräftig; dieses wird daher nicht angeführt.

Anmerkung: Die horizontalen und vertikalen Balken stellen in den folgenden Abbildungen die Standardabweichungen für die Variablen der Ordinaten- und Abszissenachse dar.

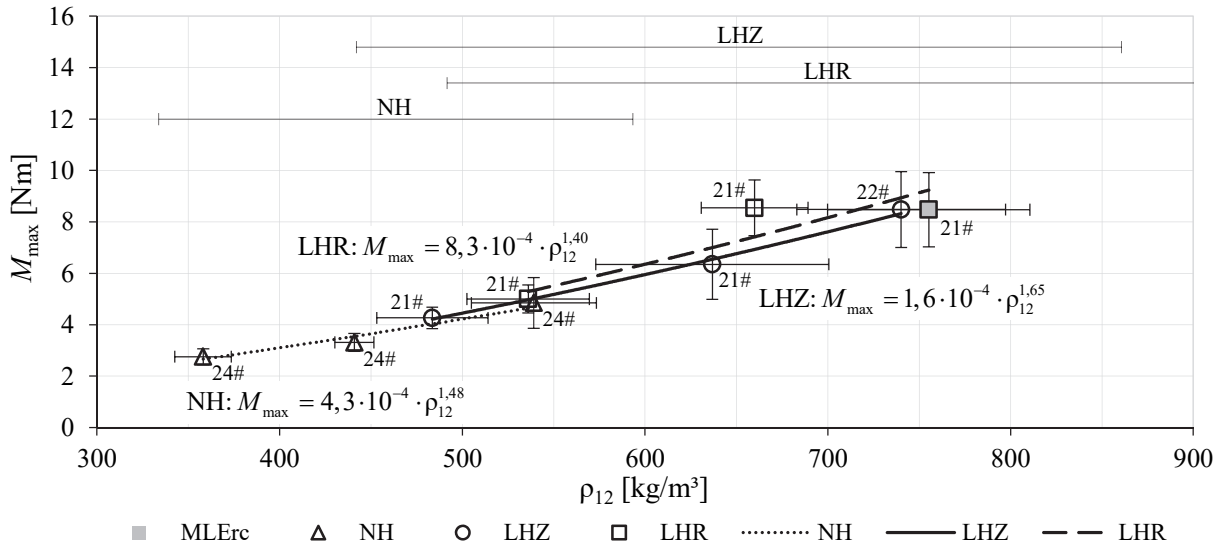


Abbildung 49: Serie 1:  $M_{max}$  vs.  $\rho_{12}$  für  $\alpha = 0^\circ$  und die Referenzschraube (RF)

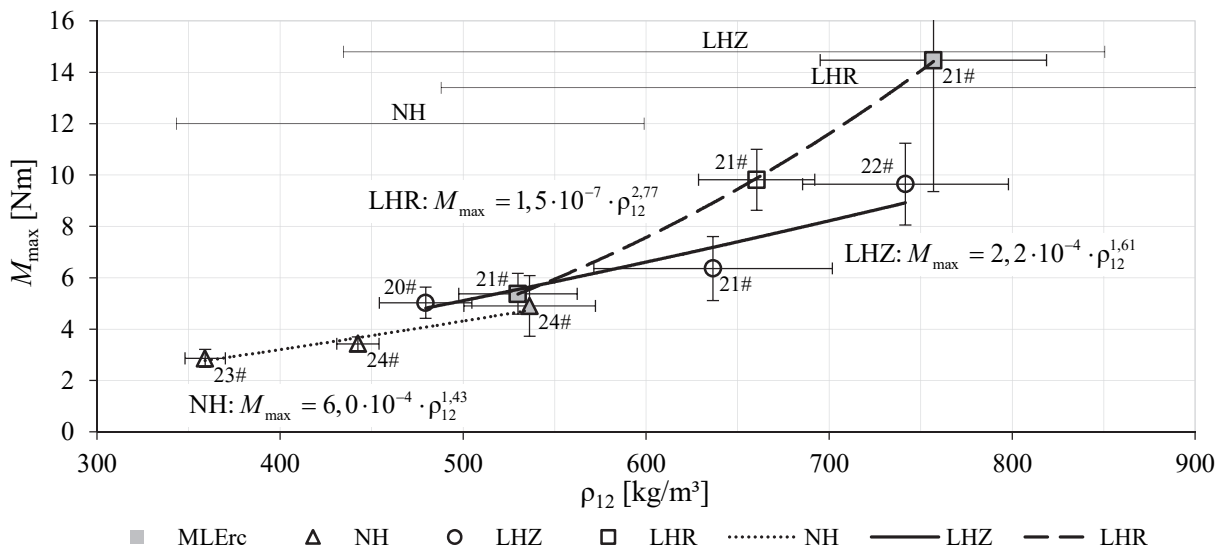


Abbildung 50: Serie 1:  $M_{max}$  vs.  $\rho_{12}$  für  $\alpha = 0^\circ$  und den Prototyp 1 (P1)

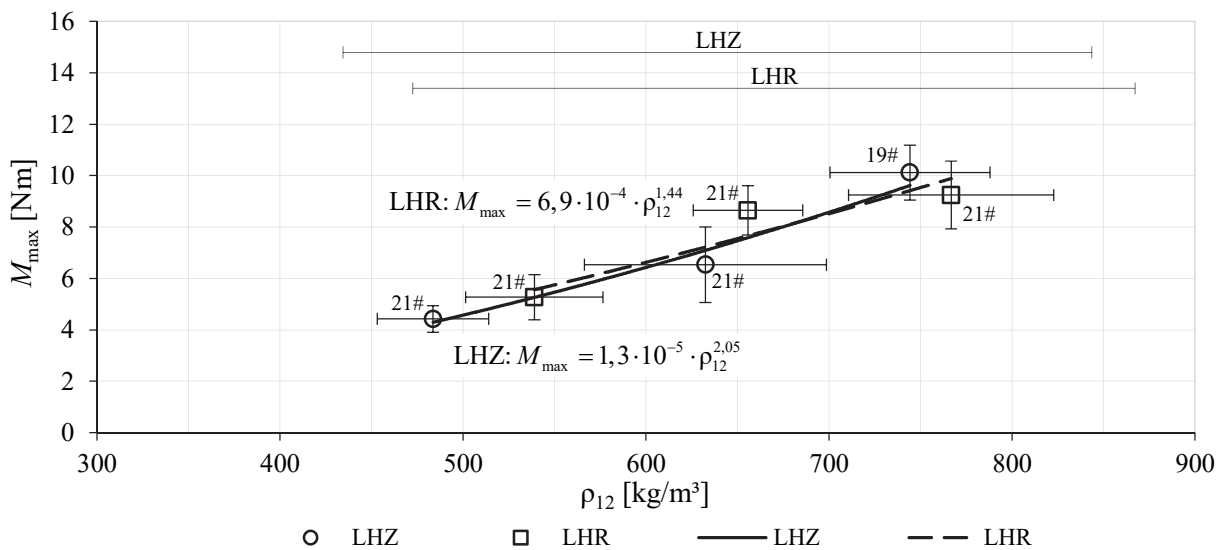


Abbildung 51: Serie 1:  $M_{max}$  vs.  $\rho_{12}$  für  $\alpha = 45^\circ$  und die Referenzschraube (RF)

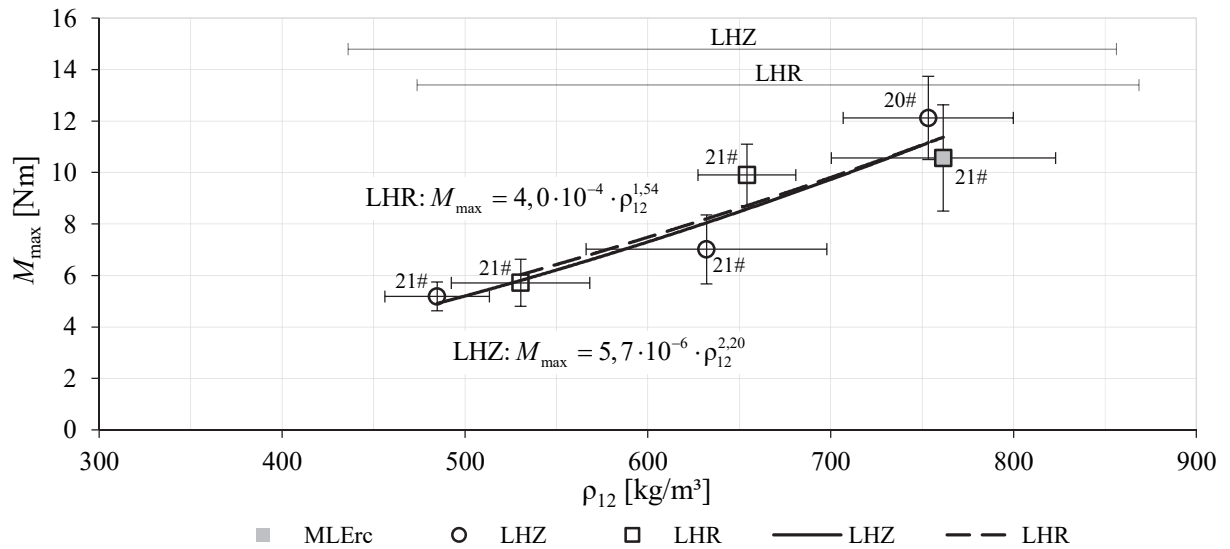


Abbildung 52: Serie 1:  $M_{max}$  vs.  $\rho_{12}$  für  $\alpha = 45^\circ$  und den Prototyp 1 (P1)

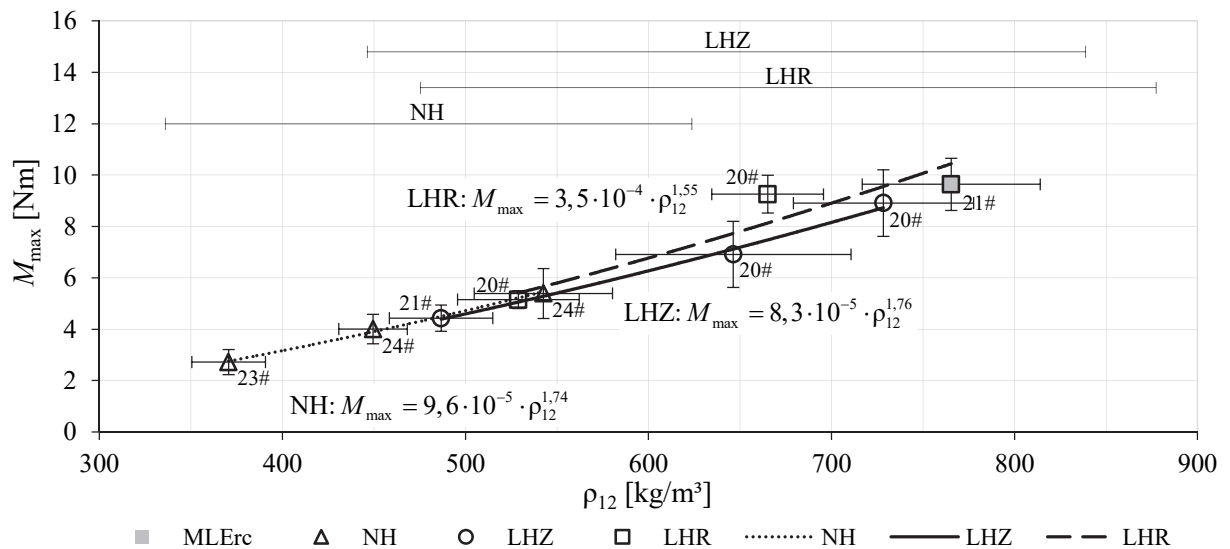


Abbildung 53: Serie 1:  $M_{max}$  vs.  $\rho_{12}$  für  $\alpha = 90^\circ$  und die Referenzschraube (RF)

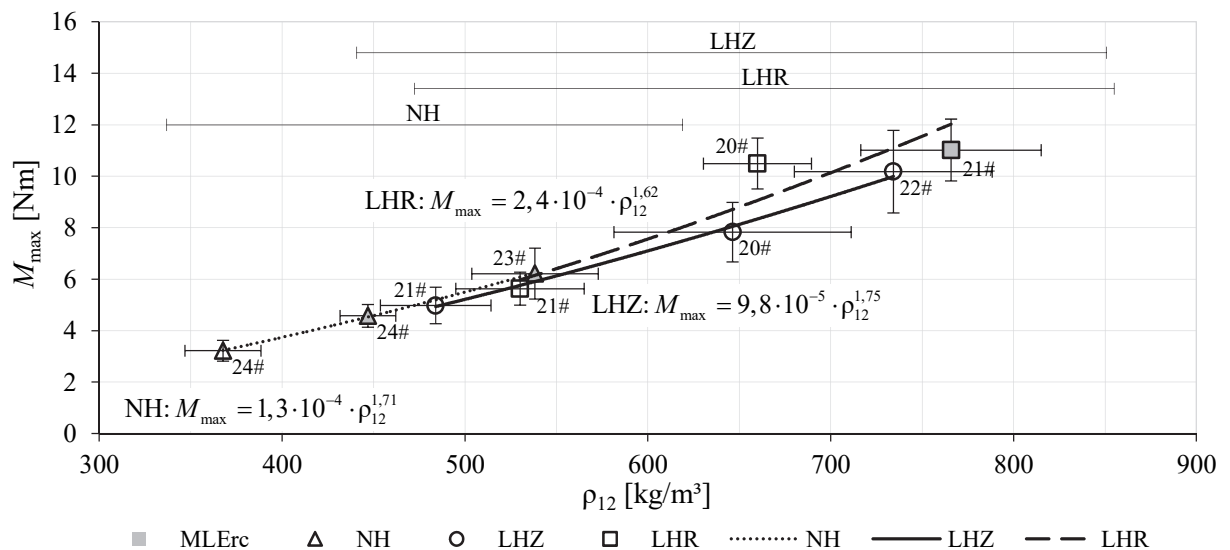


Abbildung 54: Serie 1:  $M_{max}$  vs.  $\rho_{12}$  für  $\alpha = 90^\circ$  und den Prototyp 1 (P1)

In der Tabelle 29 sind neben den Potenzparametern, welche aus den gezeigten Abbildungen 49 bis 54 hervorgehen, auch die Potenzparameter aus einer Regressionsberechnung für alle ermittelten Prüfwerte eingetragen. Um keine Verfälschung durch unterschiedliche Prüfkörperanzahlen in den Serien der einzelnen Holzarten bzw. Rohdichtegruppen zu erhalten, sollten diese möglichst gleich sein.

Mit der Ausnahme der Ergebnisse der ringporigen Laubhölzer bei einem Einschraubwinkel von 0° (Vergleich Abbildung 49 und Abbildung 50) verhalten sich die beiden Schraubentypen RF und P1 immer sehr ähnlich. Deshalb wurde im Rahmen der Regressionsrechnung für die einzelnen Prüfwerte der jeweiligen holzanatomischen Gruppen in weiterer Folge auch ein Potenzparameter für RF und P1 gemeinsam berechnet.

**Tabelle 29: Serie 1: Potenzfaktoren der Rohdichte für das maximale Eindrehmoment  $M_{max}$  in Abhängigkeit von den zur Regression herangezogenen Daten, der holzanatomischen Gruppe, dem Achs-Faserwinkel und vom Schraubentyp**

Ermittlung über ...		Mittelwerte		Einzelprüfwerte		
holzanatomische Gruppe	$\alpha$	$M_{max}$ vs. $\rho_{12}$		$M_{max}$ vs. $\rho_{12}$		
		RF	P1	RF	P1	RF & P1
Nadelholz (NH)	0°	1,48	1,43	1,62	1,61	1,62
	90°	1,74	1,71	1,81	1,72	1,73
ringporiges Laubholz (LHR)	0°	1,40	2,77*	1,63	2,47	1,93
	45°	1,44	1,54	1,46	1,46	1,43
	90°	1,55	1,62	1,49	1,81	1,55
zerstreutporiges Laubholz (LHZ)	0°	1,65	1,61	1,72	1,67	1,70
	45°	2,05	2,20	1,89	2,02	1,98
	90°	1,76	1,75	1,78	1,74	1,76

\* stark erhöhter Faktor aufgrund rechts-zensierter Daten der Eichenprüfungen (nur 1 Prüfkörper ohne Aufspaltung)

Wie der Tabelle 29 zu entnehmen ist, sind für die Eindrehmomente Potenzfaktoren zwischen 1,40 und 2,20 für die Rohdichte zu erwarten. Mit der Ausnahme des Ergebnisses des P1 bei 0° (mit Eiche) liegen alle Ergebnisse der jeweiligen holzanatomischen Gruppen sehr nahe zusammen. Die Nadelhölzer (ca. 1,65), Ringporer (ca. 1,55) und Zerstreuporer (ca. 1,80) weisen dabei jedoch unterschiedliche gemittelte Potenzfaktoren auf. In Pöll (2017) wurden im Vergleich dazu für Buchen-Vollholz bei 0° und 90° Potenzfaktoren zwischen 1,83 und 1,98 für die Rohdichte festgestellt. Diese wurden allerdings aufgrund der nicht korrekten Vorgangsweise zur Bestimmung der Potenzfunktion (siehe Kapitel 3-3.2) für die Serie 2 neuerlich ausgewertet und so ergaben sich daraus Werte zwischen 1,90 und 2,01.

Für den Fall, dass sowohl die ringporigen als auch für die zerstreutporigen Laubhölzer für die Ermittlung eines gemeinsamen Potenzfaktors zusammengefasst werden, kommen diese für 0° bei 1,66, für 45° bei 1,70 und für 90° bei 1,68 zu liegen. Es ist dabei – und auch anhand der Einzelwerte in Tabelle 29 – kein, für alle holzanatomischen Gruppen durchgehender, Trend zu erkennen.

### 4-2.3 AUSWERTUNG AUSZIEHPRÜFUNGEN

Im Zuge der Ausziehprüfungen sind vor allem die Ausziehfestigkeit  $f_{ax}$  und die Steifigkeit  $K_{ser}$  des Verbindungsmittels von Bedeutung. In den anschließenden Tabellen 30 und 33 sind die statistischen Kenngrößen hinsichtlich der beiden Parameter angeführt. Die Daten in den Tabellen entsprechen den bereinigten Datensätzen für die jeweilige Kenngröße. In weiterer Folge werden diese Daten auch für die Bestimmung der Potenzfunktionen in Abhängigkeit der Rohdichte herangezogen. Es wird dabei für jeden

Einschraubwinkel und für jeden Schraubentyp ein Diagramm dargestellt. Im Zuge der Ausziehprüfungen trat kein unerwarteter Versagensfall ein, weshalb keine rechts-zensierte Datenanalyse notwendig war.

### Ausziehfestigkeit

In Tabelle 30 sind Prüfkörperanzahl, Mittelwert, Variationskoeffizient und Extremwerte für die Ausziehfestigkeiten der jeweiligen Untergruppen der Prüfserie 1 angegeben.

**Tabelle 30:** Serie 1: Ausziehfestigkeit  $f_{ax}$  in Abhängigkeit von der Holzart bzw. Rohdichtegruppe, dem Achs-Faserwinkel und vom Schraubentyp

Holzart bzw. Gruppe	$\alpha$	Referenzschraube (RF)					Prototyp 1 (P1)					Verhältnis mean[P1]/ mean[RF] [%]
		$n$	mean	COV	min	max	$n$	mean	COV	min	max	
		[-]	[Nm]	[%]	[Nm]	[Nm]	[-]	[Nm]	[%]	[Nm]	[Nm]	
Fichte A	0°	24	4,91	16,4	3,16	6,52	22	4,23	18,3	2,94	5,78	86
	90°	23	5,04	6,3	4,24	5,58	24	5,03	8,1	4,23	5,73	100
Fichte B	0°	24	4,39	17,9	3,10	5,49	24	3,86	11,7	3,09	4,67	88
	90°	23	6,17	7,8	5,28	6,94	22	6,25	9,7	4,91	7,28	101
Fichte C	0°	22	6,61	25,3	4,30	10,0	22	5,75	26,2	3,99	8,50	87
	90°	24	7,82	14,6	6,19	9,72	19	8,08	16,3	6,21	10,5	103
Edelkastanie	0°	21	6,96	22,3	4,24	10,3	20	6,44	13,8	5,04	7,93	92
	45°	21	9,49	9,5	7,76	10,9	21	9,08	14,2	7,48	12,0	96
	90°	20	9,02	7,1	7,83	10,2	21	9,06	8,3	8,06	10,7	100
Esche	0°	21	15,3	15,2	12,5	20,0	21	14,7	15,0	12,3	19,3	96
	45°	20	16,4	9,3	14,5	19,2	21	16,7	10,2	13,2	19,9	101
	90°	20	16,2	11,0	13,0	19,0	20	16,9	11,7	13,7	20,4	104
Eiche	0°	11	9,04	10,2	7,72	10,7	1	8,13	–	8,13	8,13	90
	45°	20	16,7	12,4	14,4	20,2	16	15,3	7,2	13,9	17,0	92
	90°	20	15,7	11,5	13,0	19,9	16	15,3	6,2	13,7	17,0	98
Pappel	0°	21	6,15	15,8	4,41	7,72	20	5,77	10,8	4,96	6,70	94
	45°	21	7,94	11,0	6,44	9,97	21	7,93	9,7	6,43	9,06	100
	90°	21	7,48	10,6	6,41	8,81	21	7,72	8,9	6,49	8,73	103
Birke	0°	21	9,45	23,7	6,34	13,9	21	8,26	23,3	4,93	11,4	87
	45°	21	11,9	21,9	8,33	16,5	21	12,0	21,3	8,33	16,7	101
	90°	20	12,5	19,2	8,76	16,9	20	12,7	16,9	9,98	16,7	102
Buche	0°	22	12,6	17,4	9,57	17,7	22	11,2	17,0	8,38	15,3	89
	45°	19	16,4	7,9	14,5	18,7	20	17,2	10,9	13,3	21,1	105
	90°	20	15,8	13,4	13,1	20,9	22	15,7	13,1	12,8	19,6	99

Die mittlere Ausziehfestigkeit für alle Achs-Faserwinkel liegt lt. Tabelle 30 für die Referenzschraube zwischen 4,39 N/mm<sup>2</sup> und 16,7 N/mm<sup>2</sup> und für den Prototyp 1 zwischen 3,86 N/mm<sup>2</sup> und 17,2 N/mm<sup>2</sup>. Die Minimalwerte treten dabei für beide Schraubentypen bei einem Einschraubwinkel von 0° in der Rohdichtegruppe B der Fichte auf. Die Maximalwerte hingegen stammen aus Prüfungen mit einem Einschraubwinkel von 45° in Esche (RF) und Buche (P1).

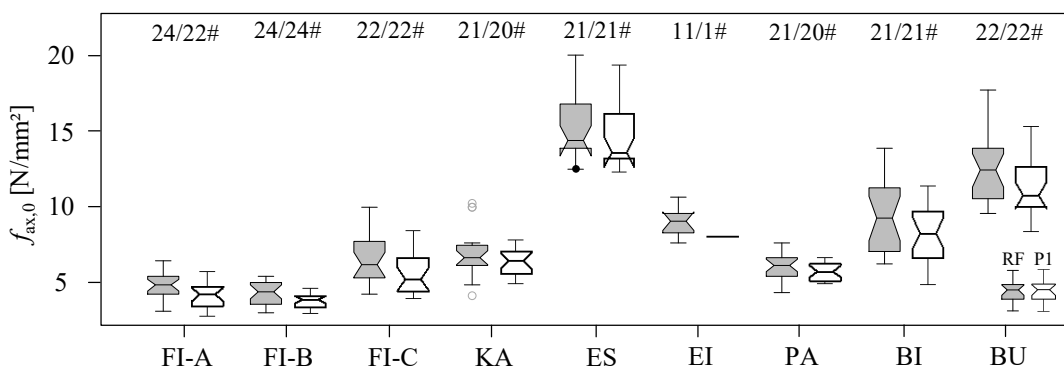
Die Variationskoeffizienten reichen für die unterschiedlichen Versuchsgruppen von 6,2 % (Eiche,  $\alpha = 90^\circ$ ) bis 26,2 % (Fichte C,  $\alpha = 0^\circ$ ). Die hohen Variationskoeffizienten (vor allem bei Fichte C und Birke) sind zum Teil auf die große Variabilität der Rohdichten der einzelnen Holzarten zurückzuführen. Grundsätzlich fällt auf, dass vor allem die Prüfungen mit einem Einschraubwinkel von 0° eine entsprechend größere Streuung aufweisen. Deshalb sind die Variationskoeffizienten für Einschraubwinkel von 0° für nahezu alle Prüfgruppen – teilweise bedeutend – höher als für jene mit einem Einschraubwinkel von 90°. Diese Beobachtung deckt sich dabei mit den Untersuchungen von Ringhofer et al. (2015b) bzw. Ringhofer (2017).

Wie der Tabelle 30 zu entnehmen ist, wird für einen Achs-Faserwinkel von 0° durchgehend eine geringe Ausziehfestigkeit als für 90° erreicht. Eine weitere Betrachtung der Thematik der Winkelabhängigkeit wird in weiterer Folge vor allem in Kapitel 4-3 durchgeführt. An dieser Stelle seien lediglich die Verhältnisse der Ausziehfestigkeit  $f_{ax,0,mean}$  von  $f_{ax,90,mean}$  angegeben (Kehrwerte von  $k_{90}$  lt. Gleichung (2.25)).

**Tabelle 31: Serie 1: Zusammenfassung der  $k_{90}$ -Kehrwerte für die unterschiedlichen Holzarten in Abhängigkeit vom Schraubentyp**

		Nadelhölzer			ringporige Laubhölzer			zerstreutporige Laubhölzer		
		FI-A	FI-B	FI-C	KA	ES	EI	PA	BI	BU
$1/k_{90}$	RF	0,97	0,71	0,85	0,77	0,94	0,58	0,82	0,75	0,80
	P1	0,84	0,62	0,71	0,71	0,87	0,53	0,75	0,65	0,72

Beim Vergleich der beiden Schraubentypen RF und P1 ist ein durchschnittlicher Abfall der Ausziehfestigkeit bei einem Einschraubwinkel von 0° von 10,0 % für alle holzanatomischen Gruppen für den Prototypen 1 zu beobachten. Dieser Trend ist auch in Abbildung 55 und in den geringeren Werten von  $1/k_{90}$  in Tabelle 31 für die Prototypschraube im Vergleich zur Referenzschraube zu erkennen. Dies impliziert allerdings bereits die Feststellung von gleichen Ausziehfestigkeiten der Referenzschraube und des Prototypen 1 für einen Achs-Faserwinkel von 90° (siehe Abbildung 56).



**Abbildung 55: Serie 1: Boxplot Ausziehfestigkeit  $f_{ax}$  für  $\alpha = 0^\circ$  in Abhängigkeit von der Holzart bzw. Rohdichtegruppe und vom Schraubentyp**

Für Einschraubwinkel von 45° und 90° ist der Unterschied für die beiden Schraubentypen nicht signifikant. Es kommt für manche Untergruppen sogar für den Prototypen 1 zu geringfügig höheren Mittelwerten der Ausziehfestigkeit als für die Referenzschraube. Diese Tatsache wird auch in der Abbildung 56 deutlich.

Da in den Abbildungen 55 und 56 die Ausziehfestigkeit der ringporigen Holzart Esche deutlich über jener der ebenfalls ringporigen, aber mit höherer Dichte ausgestatteten, Eiche zu liegen kommt, wird hier eine



Besonderheit für diese beiden Holzarten festgestellt. Wird ein positiver, linearer Einfluss der Rohdichte auf die Ausziehfestigkeit vorausgesetzt, wären die Prüfergebnisse genau umgekehrt zu erwarten gewesen. Aus diesem Grund werden für die Bestimmung bzw. zur Kontrolle der Potenzfaktoren zusätzliche Prüfwerte aus den Ausziehprüfungen von Hübner (2013a) hinzugefügt. Die Mittelwerte der Ausziehfestigkeiten aus den Untersuchungen von Hübner (2013a) sind in den Abbildungen 55 und 56 (ausgefüllte schwarze Punkte ●) eingetragen. Diese ergeben sich für die Esche bei einem Einschraubwinkel von  $0^\circ$  zu  $12,5 \text{ N/mm}^2$  (56 Prüfungen,  $\rho_{\text{mean}} = 725 \text{ kg/m}^3$ ) und bei  $90^\circ$  zu  $16,2 \text{ N/mm}^2$  (66 Prüfungen,  $\rho_{\text{mean}} = 753 \text{ kg/m}^3$ ). Dabei fällt auf, dass die Rohdichten deutlich über den mittleren Rohdichten der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Prüfungen für die Esche liegen ( $\rho_{\text{mean}} = 659 \text{ kg/m}^3$ ), während die Ausziehfestigkeiten in den Untersuchungen von Hübner (2013a) geringer ausfallen. Es ist deshalb davon auszugehen, dass die für dieses Projekt zur Verfügung stehende Esche generell überdurchschnittliche Ergebnisse liefert.

Mit den zusätzlichen Prüfdaten soll der Einfluss der “zu guten“ Esche bzw. “der zu schlechten“ Eiche (evtl. auch aufgrund der Aufspaltungen der Prüfkörper mit den höchsten Rohdichten beim Eindrehvorgang und somit keine Möglichkeit die Ausziehfestigkeit zu prüfen) ausgeglichen werden. Die Prüfergebnisse von Hübner (2013a) wurden mit Schrauben, welche mit der Referenzschraube vergleichbar sind, durchgeführt. Deshalb werden dessen Prüfergebnisse auch dieser Untergruppe zugeordnet. Die Potenzfunktionen mit den erweiterten Daten sind in den nachfolgenden Diagrammen ebenfalls dargestellt (grau).

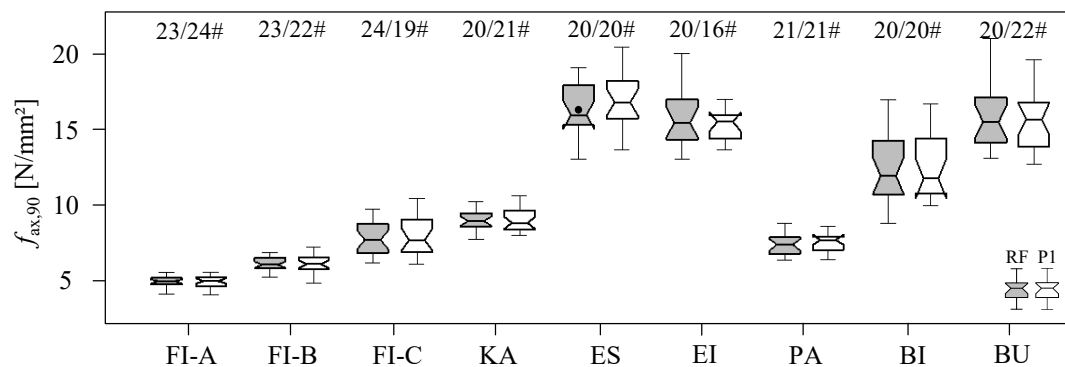


Abbildung 56: Serie 1: Boxplot Ausziehfestigkeit  $f_{ax,90}$  für  $\alpha = 90^\circ$  in Abhängigkeit von der Holzart bzw. Rohdichtegruppe und vom Schraubentyp

Durch die Abnahme des aktivierbaren Holzvolumens (Volumen zwischen den Gewindeflanken) für den Prototypen 1 im Vergleich zur Referenzschraube von rund 21 % sowie der kleineren Verankerungsfläche durch die Zunahme des Schraubenkerndurchmessers (Abnahme von 24 % von RF auf P1), wäre auch eine entsprechende Abnahme der Ausziehfestigkeit zu erwarten (Pöll, 2017). Wie die Ergebnisse in Tabelle 30 allerdings zeigen, fällt die Abnahme bei einem Einschraubwinkel von  $0^\circ$  mit durchschnittlich 10 % aus (siehe Abbildung 55). Für die Einschraubwinkel von  $45^\circ$  und  $90^\circ$  konnte für den Prototyp 1 keine Abnahme der Ausziehfestigkeit beobachtet werden (siehe Abbildung 56). Wie Pöll (2017) ausführt, könnte die Verdichtung des Materials durch das Applizieren der Schraube einen ebenso wesentlichen Beitrag für das Gesamtverhalten der Verbindung der Schraube im Holz haben, weshalb keine bzw. nur eine geringere Abnahme der Ausziehfestigkeit, als zu erwarten wäre, auftritt.

Es wird nachfolgend für jeden geprüften Einschraubwinkel und dazugehörigen Schraubentyp ein Diagramm zur Bestimmung der Potenzfaktoren für die Rohdichte der jeweiligen holzanatomischen Gruppen dargestellt. Dabei erfolgt eine Ergänzung für die ringporigen Holzarten mit den Werten von Hübner (2013a), um damit die oben genannten Anomalien in den Prüfdaten der Esche und Eiche auszugleichen.

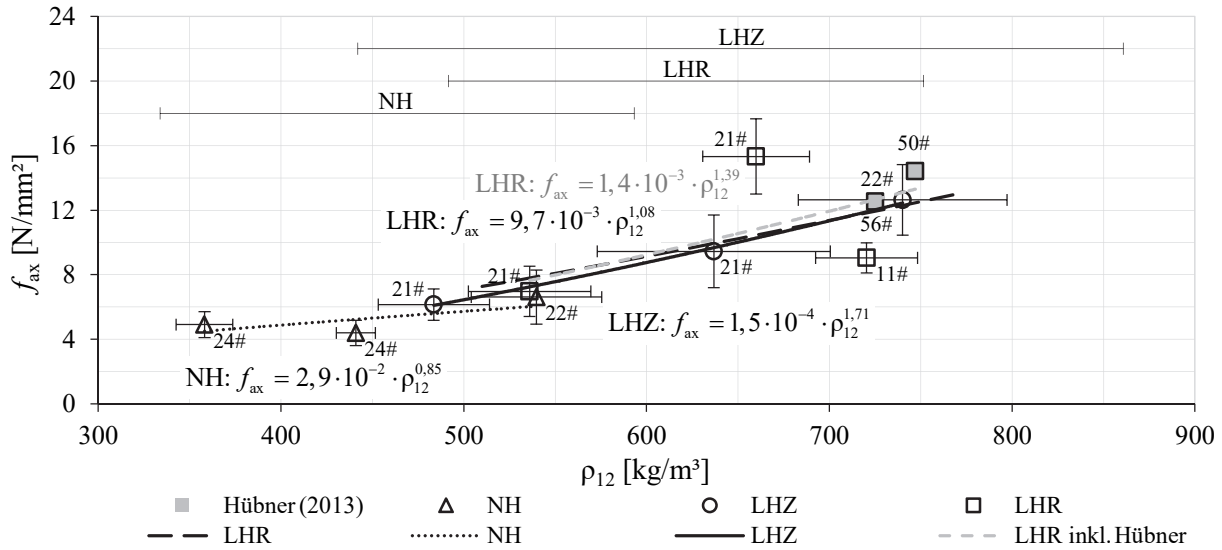


Abbildung 57: Serie 1:  $f_{ax}$  vs.  $\rho_{12}$  für  $\alpha = 0^\circ$  und die Referenzschraube (RF)

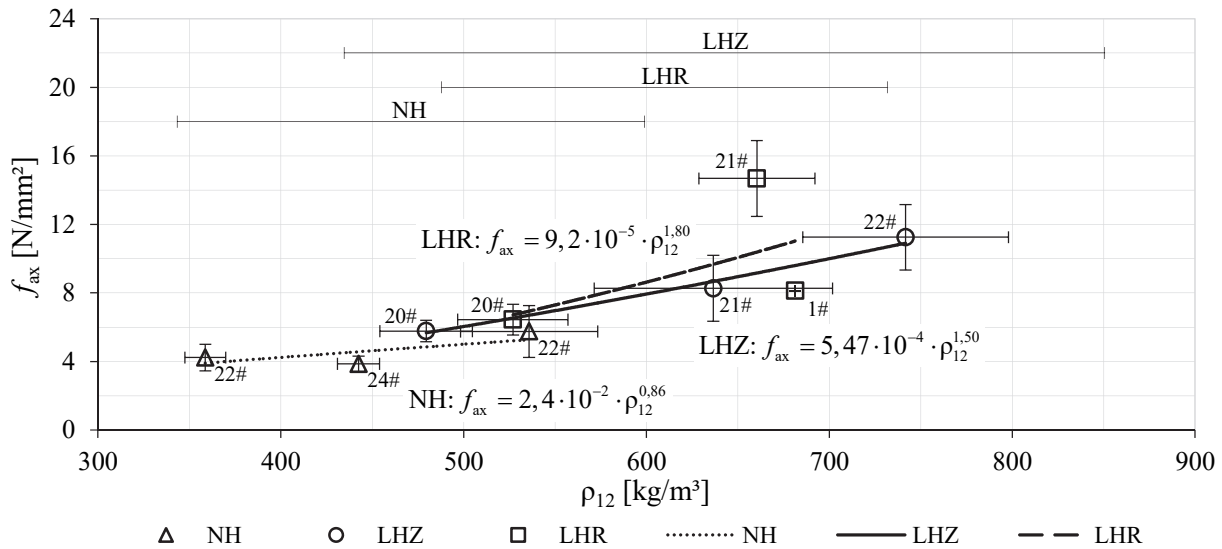


Abbildung 58: Serie 1:  $f_{ax}$  vs.  $\rho_{12}$  für  $\alpha = 0^\circ$  und den Prototyp 1 (P1)

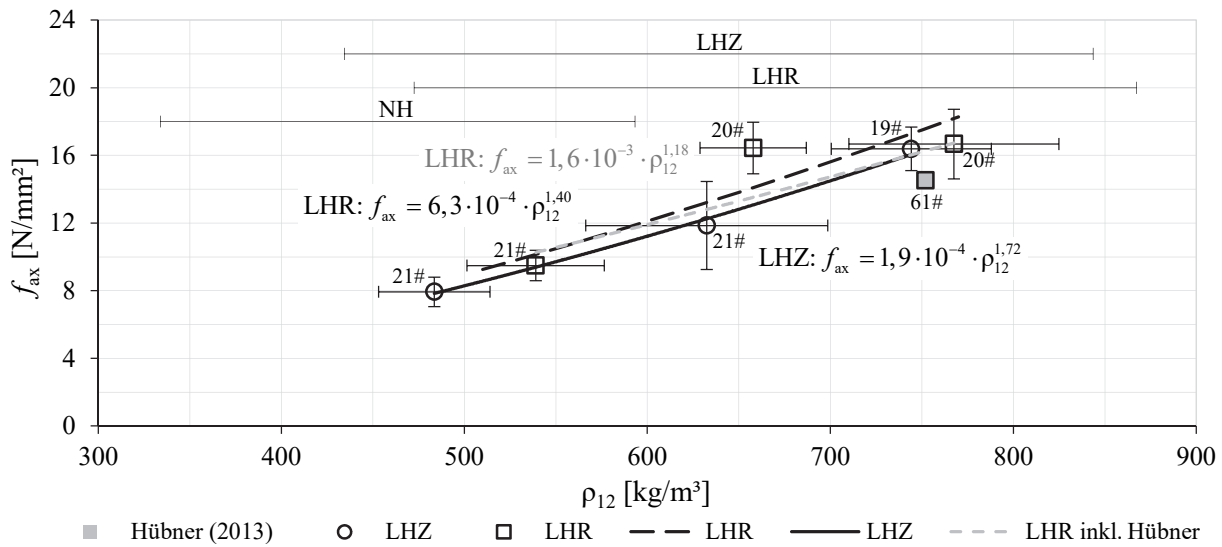


Abbildung 59: Serie 1:  $f_{ax}$  vs.  $\rho_{12}$  für  $\alpha = 45^\circ$  und die Referenzschraube (RF)

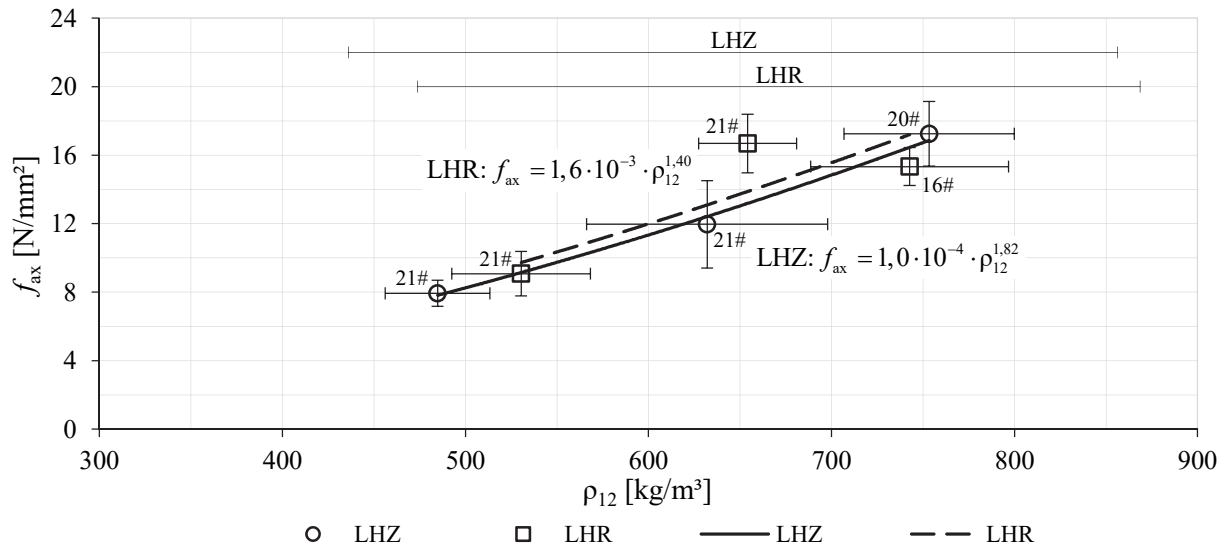


Abbildung 60: Serie 1:  $f_{ax}$  vs.  $\rho_{12}$  für  $\alpha = 45^\circ$  und den Prototyp 1 (P1)

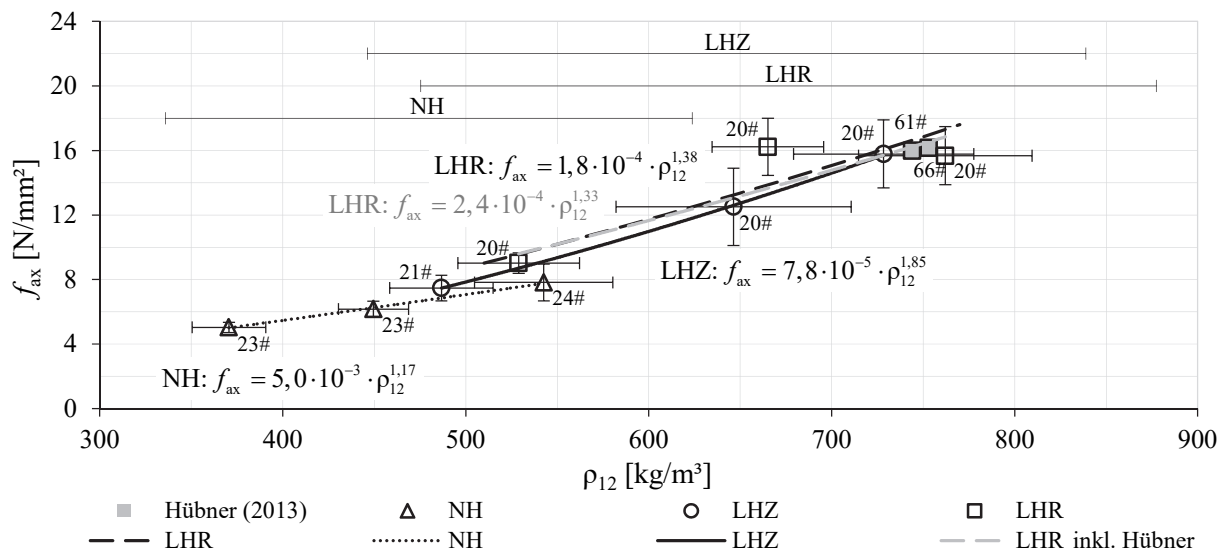


Abbildung 61: Serie 1:  $f_{ax}$  vs.  $\rho_{12}$  für  $\alpha = 90^\circ$  und die Referenzschraube (RF)

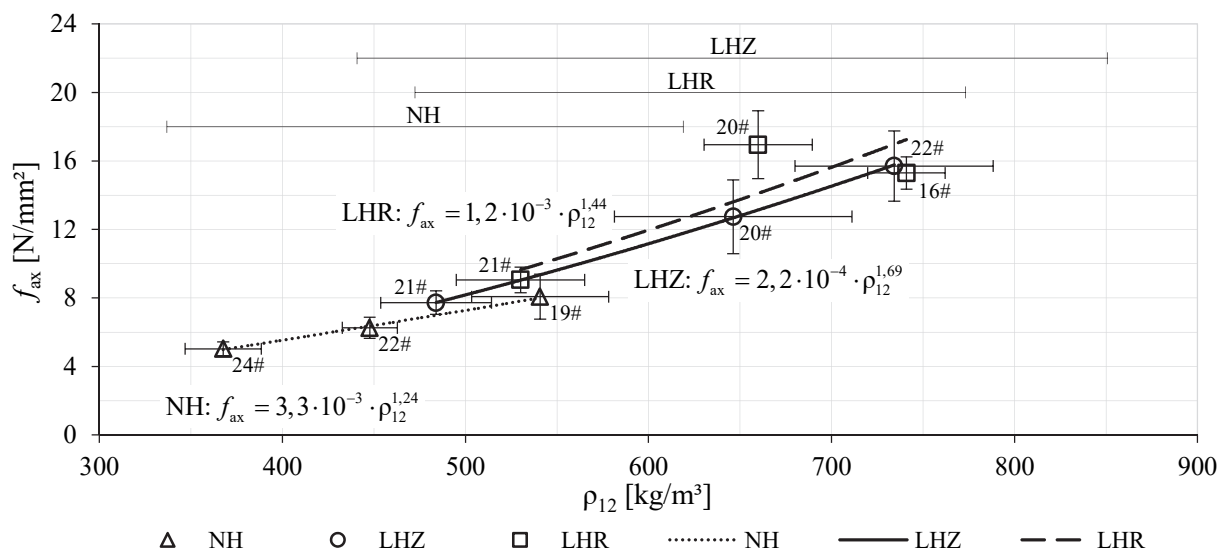


Abbildung 62: Serie 1:  $f_{ax}$  vs.  $\rho_{12}$  für  $\alpha = 90^\circ$  und den Prototyp 1 (P1)

Wie in den Abbildungen 57 bis 62 zu erkennen ist, verlaufen die Potenzfunktionen für die Laubhölzer auf ähnlich hohem Niveau. Dies zeigt, dass grundsätzlich keine markanten Abweichungen der Ausziehfestigkeiten zwischen den ringporigen und zerstreutporigen Holzarten zu erwarten sind. Dies ist für einen Einschraubwinkel von 90° exemplarisch auch in Abbildung 63 nochmals dargestellt. Es zeigen sich nahezu keine Abweichungen zwischen den Ergebnissen der RF (schwarz) und des P1 (grau) für die unterschiedlichen holzanatomischen Gruppen.

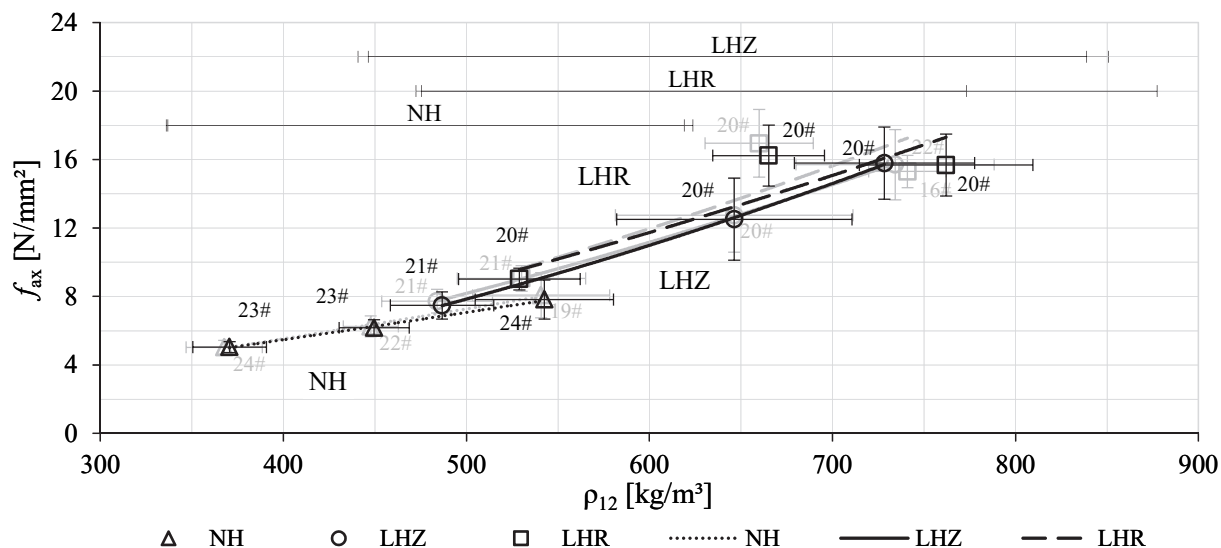


Abbildung 63: Serie 1: Vergleich von  $f_{ax}$  vs.  $\rho_{12}$  für  $\alpha = 90^\circ$  für die RF (schwarz) und den P1 (grau)

Allerdings zeigen die Potenzfaktoren für die Rohdichte, welche in Tabelle 32 zusammengefasst sind, durchaus unterschiedliche Tendenzen. Neben den Potenzfaktoren aus den obigen Abbildungen sind nachfolgend auch jene aus den Regressionsrechnungen, welche die Werte der jeweiligen Einzelprüfungen verwenden (identisch wie im vorhergehenden Kapitel 4-2.2) angeführt.

Tabelle 32: Serie 1: Potenzfaktoren der Rohdichte für die Ausziehfestigkeit  $f_{ax}$  in Abhängigkeit von den zur Regression herangezogenen Daten, der holzanatomischen Gruppe, dem Achs-Faserwinkel und vom Schraubentyp

Ermittlung über ...		Mittelwerte			Einzelprüfwerte		
holzanatomische Gruppe	$\alpha$	$f_{ax}$ vs. $\rho_{12}$			$f_{ax}$ vs. $\rho_{12}$		
		RF	P1	RF inkl. Hübner (2013a)* <sup>1)</sup>	RF	P1	RF & P1
Nadelholz (NH)	0°	0,85	0,86	-	1,05	1,14	1,09
	90°	1,17	1,24	-	1,24	1,31	1,27
ringporiges Laubholz (LHR)	0°	1,08	1,80* <sup>2)</sup>	1,38	1,53	3,09* <sup>2)</sup>	2,27* <sup>2)</sup>
	45°	1,40	1,40	1,18	1,36	1,36	1,36
	90°	1,38	1,44	1,33	1,39	1,54	1,43
zerstreutporiges Laubholz (LHZ)	0°	1,71	1,58	-	1,77	1,67	1,73
	45°	1,72	1,82	-	1,69	1,78	1,73
	90°	1,85	1,69	-	1,83	1,66	1,74

\*<sup>1)</sup> zusätzliche Einbeziehung von Prüfergebnissen für Esche und Robinie aus (Hübner, 2013a)

\*<sup>2)</sup> maßgebender Einfluss der Eiche mit nur wenigen, dafür verhältnismäßig tiefen, und der Esche mit vielen, aber sehr hohen, Prüfwerten

Die Potenzfaktoren reagieren bei einer Regressionsrechnung mit nur drei Stützpunkten (bzw. vier oder fünf Stützpunkten unter Einbeziehung von zusätzlichen Daten von Hübner (2013a)) pro Potenzfunktion sehr sensitiv auf geringfügige Änderungen. Deshalb sollten diese als Bereich bzw. Tendenz gewertet werden.

Nichtsdestotrotz ist eine klare Unterscheidung zwischen den Nadelhölzern und den Laubhölzern zu erkennen. Im Bemessungsmodell nach Ringhofer (2017) werden für die Fichte Potenzfaktoren von 0,85 bei 0° und 1,10 bei 90° für die Anpassung an die jeweilige Rohdichte vorgeschlagen. Diese beiden Werte werden bei Betrachtung der aus den Mittelwerten ermittelten Potenzfaktoren mit im Durchschnitt 0,85 für 0° und 1,21 für 90° geringfügig höher ermittelt. Eine Zunahme des Rohdichteeinflusses bei größer werdenden Winkeln für die Nadelhölzer kann somit erneut bestätigt werden.

Die in Kapitel 2-4.3 diskutierten Potenzfaktoren für Laubhölzer liegen über jenen der Nadelhölzer, was auch in den durchgeführten Prüfungen so ersichtlich ist. So zeigen sich in Tabelle 32 durchgehend sehr ähnliche Potenzfaktoren für RF und P1 für ringporige und zerstreuporige Laubhölzer bei jeweils gleichen Einschraubwinkeln. Ein Anstieg der Potenzfaktoren mit steigendem Einschraubwinkel, wie dies für die Nadelhölzer ersichtlich ist, kann für die Laubhölzer allerdings nicht beobachtet werden. Vielmehr liegen die Potenzfaktoren auf annähernd konstantem Niveau. Allerdings zeigt sich für die Laubhölzer auch eine Trennung der Potenzfaktoren in Ringporer und Zerstreuporer. Die Ringporer weisen im Mittel für alle Werte, welche nicht unter zu starkem Einfluss der abweichenden Holzarten stehen, einen Potenzfaktor von etwa 1,40 auf. Im Vergleich dazu ergibt sich ein mittlerer Potenzfaktor für die Zerstreuporer von 1,73.

Werden allerdings alle Prüfergebnisse der Laubhölzer (RF & P1), welche von der Anzahl in etwa gleich auf beide holzanatomischen Gruppen verteilt sind, für eine Regressionsrechnung herangezogen, so ergeben sich Potenzfaktoren von 1,65 für 0°, 1,56 für 45° und 1,60 für 90°. Damit würde eine Überschätzung des Rohdichteeinflusses für die Ringporer miteinhergehen.

Die in Kapitel 2-4.3 vorgestellten Modelle weisen Potenzfaktoren von 1,5 (Newlin und Gahagan, 1938) (Mischung von Nadel- und Laubholz), 1,78 (Schneider, 1999) (zerstreuporige und ringporige Laubhölzer) und 1,59 bzw. 1,63 (Hübner, 2013a) (hauptsächlich ringporige Esche und geringe Anzahl an Robinie und zerstreuporiger Buche) auf. Vor allem die Ergebnisse von Hübner (2013a) passen sehr gut mit den aus den Mittelwerten aller holzanatomischen Gruppen gebildeten Potenzfaktoren zusammen. Generell kommen die Potenzfaktoren in Tabelle 32 den aus der Literatur bekannten sehr nahe. Ein direkter Vergleich ist allerdings nur bedingt möglich, da, wie oben erläutert, eine Trennung zwischen Ringporern und Zerstreuporern empfohlen wird. Dies wurde in der dargelegten Literatur allerdings bis dato nicht vorgenommen, weshalb sich der Potenzfaktor in Abhängigkeit der Anzahl der Prüfkörper für die jeweilige holzanatomische Gruppe zusammensetzt.

## Steifigkeit

Die in der Tabelle 33 angegebenen Steifigkeiten basieren auf einer Auswertung der Prüfdaten wie in Kapitel 3-3.2 beschrieben. Die fehlenden Steifigkeitswerte für Buche bei Einschraubwinkeln von 0° und 90° sind auf die nicht durchgeführte Wegmessung bei diesen Prüfungen zurückzuführen.

**Tabelle 33:** Serie 1: Steifigkeit  $K_{ser}$  in Abhängigkeit von der Holzart bzw. Rohdichtegruppe, dem Achs-Faserwinkel und vom Schraubentyp

Holzart bzw. Gruppe	$\alpha$	Referenzschraube (RF)					Prototyp 1 (P1)					Verhältnis mean[P1]/ mean[RF] [%]
		$n$	mean	COV	min	max	$n$	mean	COV	min	max	
		[-]	[N/mm]	[%]	[N/mm]	[N/mm]	[-]	[N/mm]	[%]	[N/mm]	[N/mm]	
Fichte A	0°	24	17.961	14,2	12.997	21.912	23	22.889	19,7	14.408	30.597	127
	90°	23	11.246	11,8	8.533	13.687	24	13.130	14,2	9.818	16.894	117

<b>Fichte B</b>	0°	24	18.289	16,9	13.424	25.340	24	21.320	17,6	16.088	27.828	117
	90°	23	14.200	9,1	12.427	16.774	22	15.980	12,1	13.374	19.585	113
<b>Fichte C</b>	0°	23	26.579	21,2	18.636	35.636	22	31.524	20,9	19.982	43.295	119
	90°	24	18.118	22,5	12.128	25.418	19	23.411	19,9	15.142	32.669	129
<b>Edelkastanie</b>	0°	21	28.038	11,0	23.789	35.032	20	36.654	10,3	28.205	41.216	131
	45°	21	27.213	11,3	21.008	32.745	21	31.545	13,7	21.686	38.149	116
	90°	20	26.999	7,9	23.200	29.881	21	32.931	10,8	28.752	40.828	122
<b>Esche</b>	0°	21	42.147	7,4	36.914	50.066	21	60.731	10,5	50.128	70.772	144
	45°	21	35.213	12,7	28.131	46.366	21	44.372	10,6	36.392	53.159	126
	90°	20	35.210	10,9	28.953	43.940	20	44.500	14,6	36.677	56.287	126
<b>Eiche</b>	0°	11	39.755	8,3	33.356	43.295	1	43.290	–	43.290	43.290	109
	45°	20	36.758	10,2	32.473	45.645	17	42.835	9,4	34.336	50.721	117
	90°	20	32.453	11,1	24.996	39.196	16	40.370	11,2	33.760	50.769	124
<b>Pappel</b>	0°	21	22.465	15,9	14.949	29.671	20	27.541	21,1	17.767	35.252	123
	45°	21	21.034	12,1	16.975	26.771	21	24.911	12,5	19.593	30.697	118
	90°	21	19.121	14,1	14.275	24.168	20	22.105	12,8	15.810	26.351	116
<b>Birke</b>	0°	21	36.599	19,0	25.146	50.338	21	43.942	21,0	24.828	60.036	120
	45°	21	27.347	20,9	19.764	40.232	21	32.632	16,2	25.515	45.874	119
	90°	20	30.359	13,8	24.632	37.240	20	35.792	9,9	30.085	41.313	118
<b>Buche</b>	0°	–	–	–	–	–	22	45.416	11,0	37.363	52.967	–
	45°	19	35.684	8,7	31.027	42.551	20	43.372	9,9	35.134	50.953	122
	90°	–	–	–	–	–	21	53.270	11,0	42.716	67.178	–

Die Steifigkeit für die Referenzschraube liegt zwischen 11.246 N/mm und 42.147 N/mm und für den Prototyp 1 zwischen 13.130 N/mm und 60.731 N/mm. Die jeweiligen Extremwerte treten für beide Schrauben in Fichte A bei einem Einschraubwinkel von 90° (Minima) und in Esche bei 0° (Maxima) auf. Die Größenordnung der Streuungen ist ähnlich jenen der Ausziehfestigkeiten. Sie reichen für die unterschiedlichen Versuchsgruppen von 7,4 % bis 22,5 % und weisen keine erkennbare Abhängigkeit auf.

Die Verbundsteifigkeiten, welche mit dem Prototypen 1 erzielt werden, sind im Durchschnitt (für alle Winkel und alle Holzarten) um etwa 20 % höher als für die Referenzschraube. Ein Teil davon resultiert bereits aus der höheren Eigensteifigkeit der P1-Schraube im Vergleich zur Referenzschraube, da aus dem größeren Kernquerschnitt im Vergleich zur RF eine um 37 % höhere Dehnsteifigkeit für die Schraube resultiert.

Wie der Tabelle 33 zu entnehmen ist, wird für Einschraubwinkel von 0° durchgehend eine höhere Steifigkeit als für 90° erzielt (ausgenommen P1 in Buche). Diese Charakteristik zeigt einen Abfall der Steifigkeit mit zunehmenden Einschraubwinkeln und wird auch in der Arbeit von Brandner et al. (2017 (in print)) so dargelegt. So beträgt die Steifigkeit bei einem Einschraubwinkel von 90° durchschnittlich 70 % bei Nadelhölzern und 80–85 % bei Laubhölzern der Steifigkeit bei der Ausziehprüfung des Verbindungsmittels parallel zur Faser. Auf die Winkelabhängigkeit der Steifigkeit wird allerdings in Kapitel 4-3 noch detaillierter eingegangen.



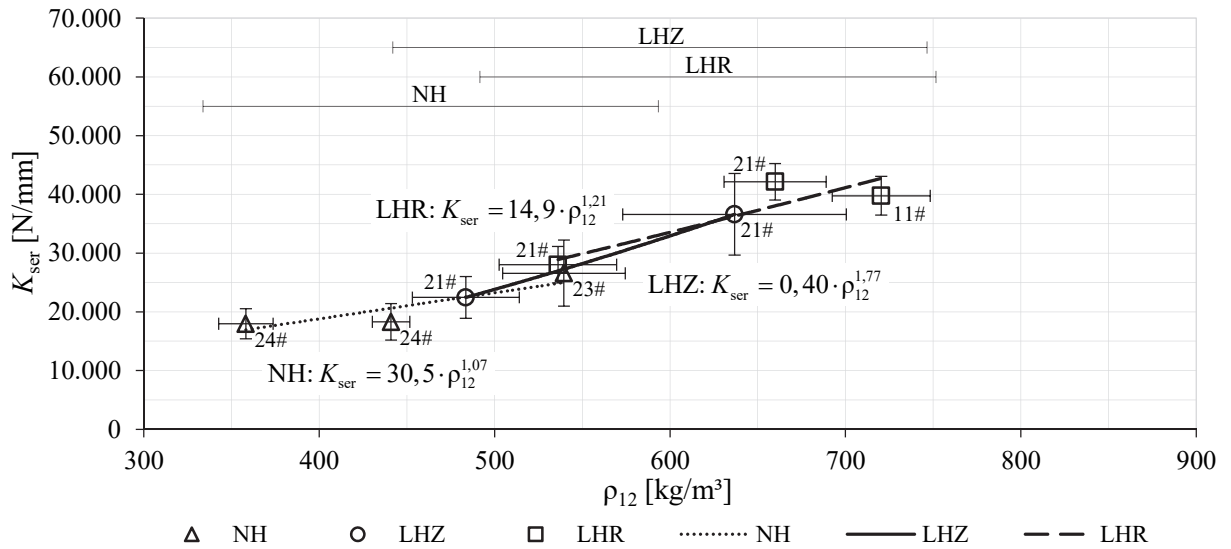


Abbildung 64: Serie 1:  $K_{ser}$  vs.  $\rho_{12}$  für  $\alpha = 0^\circ$  und die Referenzschraube (RF)

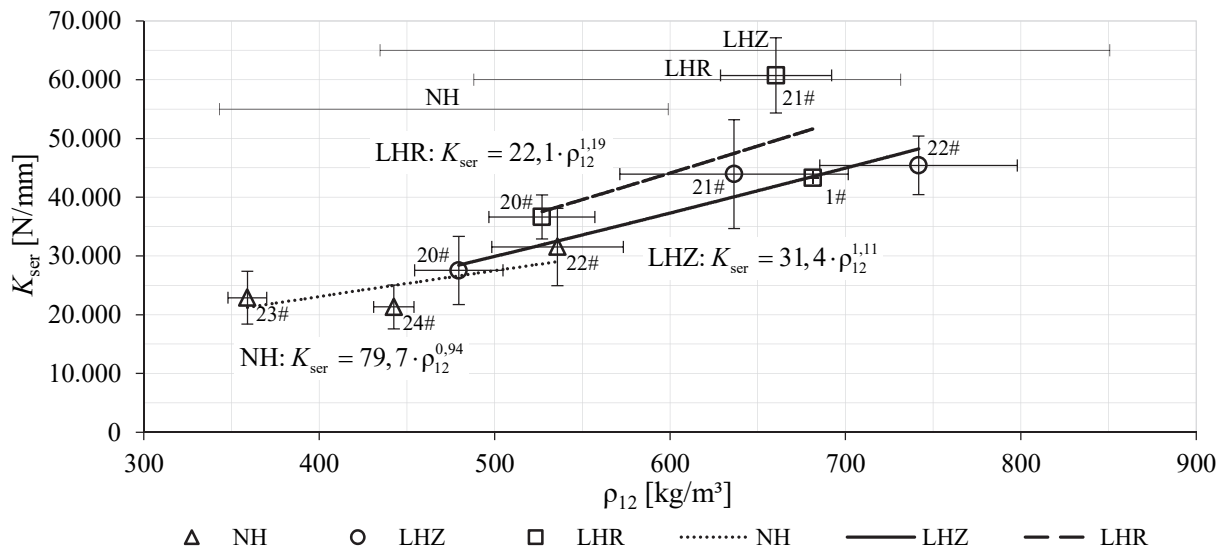


Abbildung 65: Serie 1:  $K_{ser}$  vs.  $\rho_{12}$  für  $\alpha = 0^\circ$  und den Prototyp 1 (P1)

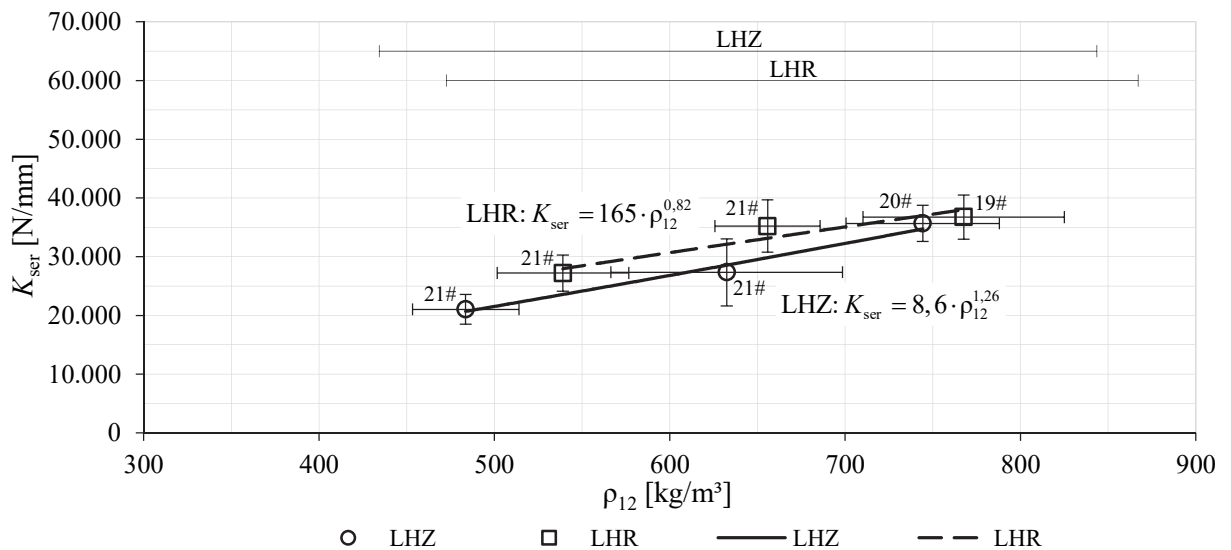


Abbildung 66: Serie 1:  $K_{ser}$  vs.  $\rho_{12}$  für  $\alpha = 45^\circ$  und die Referenzschraube (RF)

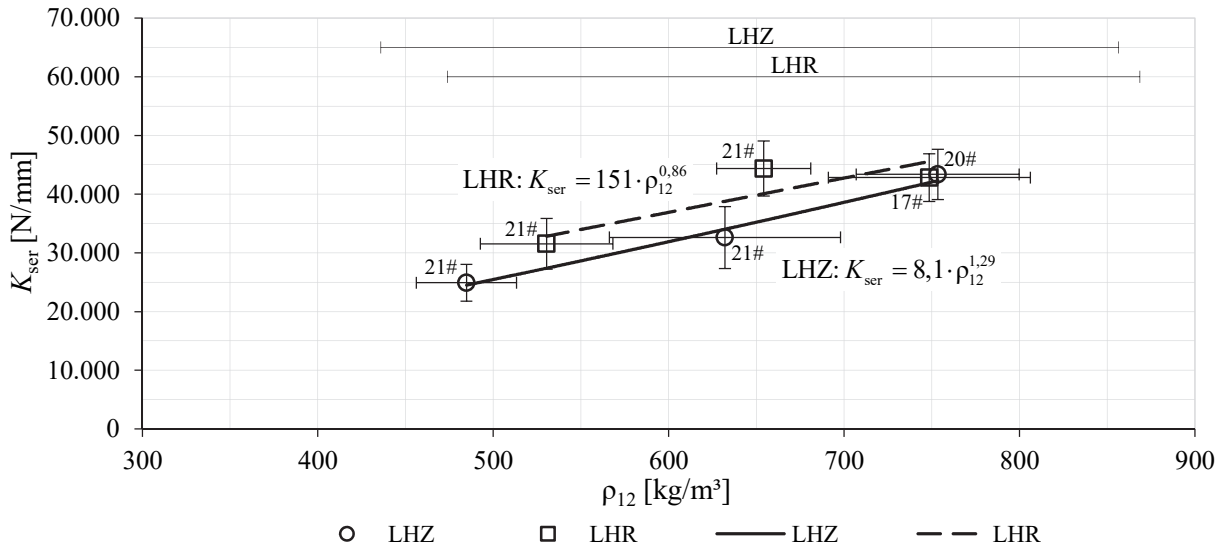


Abbildung 67: Serie 1:  $K_{ser}$  vs.  $\rho_{12}$  für  $\alpha = 45^\circ$  und den Prototyp 1 (P1)

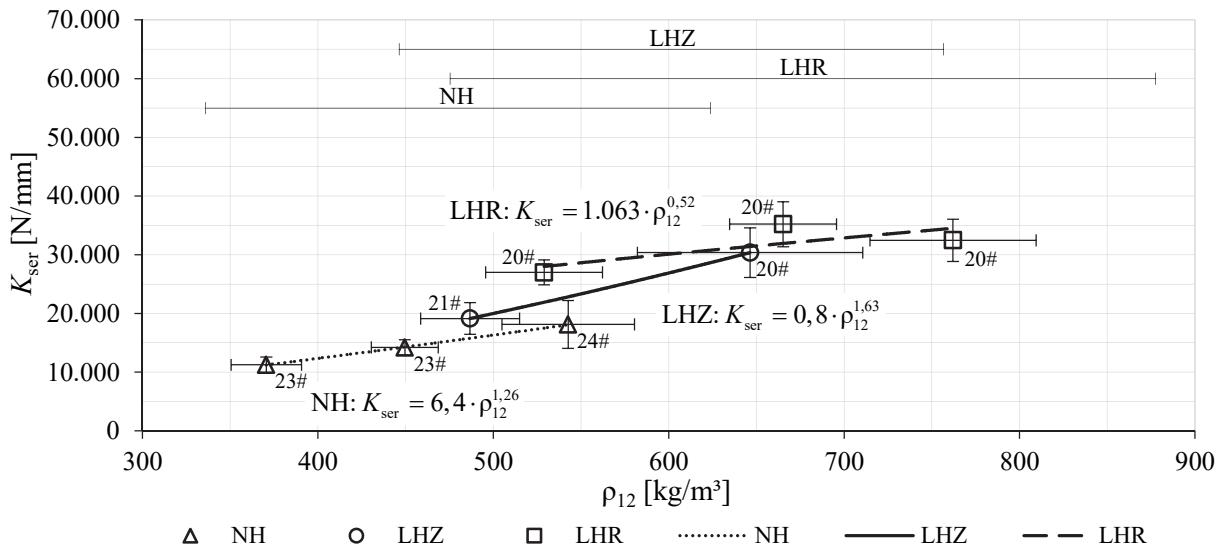


Abbildung 68: Serie 1:  $K_{ser}$  vs.  $\rho_{12}$  für  $\alpha = 90^\circ$  und die Referenzschraube (RF)

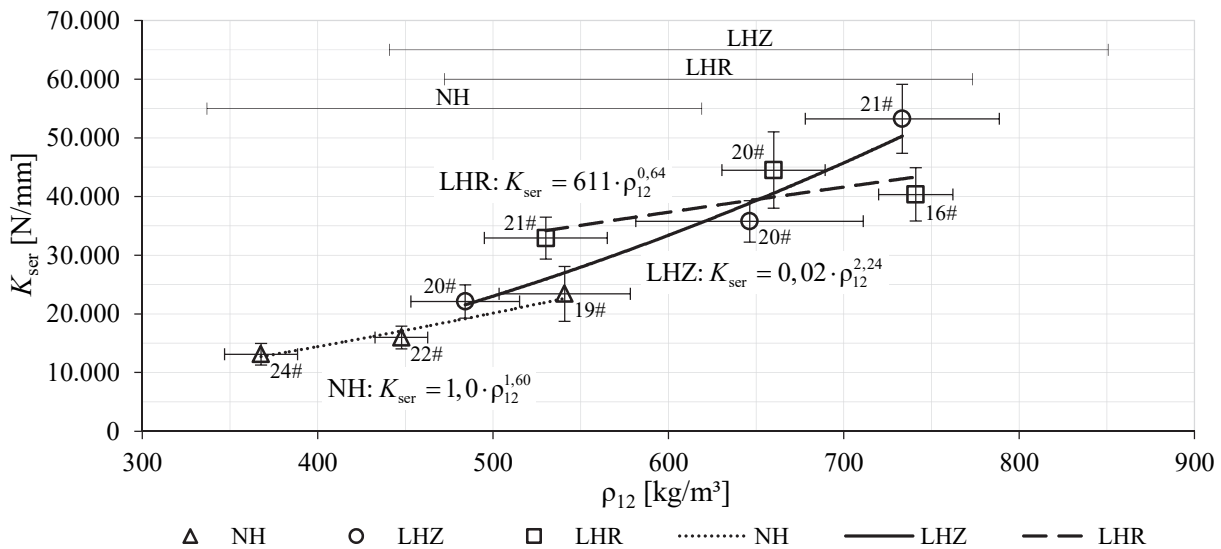


Abbildung 69: Serie 1:  $K_{ser}$  vs.  $\rho_{12}$  für  $\alpha = 90^\circ$  und den Prototyp 1 (P1)

Wie den Abbildungen 64 bis 67 zu entnehmen ist, verlaufen die Regressionsfunktionen der zerstreutporigen und ringporigen Laubhölzer für Einschraubwinkel von 0° und 45° sowie RF und P1 in weiten Teilen ähnlich bzw. annähernd parallel. Im Vergleich dazu ist bei einem Einschraubwinkel von 90° (siehe Abbildungen 68 und 69) eine unterschiedliche Ausprägung des Rohdichteinflusses bei den Laubhölzern zu beobachten. Die ringporigen Laubhölzer zeigen eine weniger starke Abhängigkeit von der Rohdichte als die Zerstreutporer. Zu berücksichtigen ist bei den Potenzfaktoren der zerstreutporigen Holzarten, dass diese für die RF bei 0° und 90° ausschließlich auf Basis von zwei Stützpunkten ermittelt wurden (keine Messung der Verformungen bei der Buche).

**Tabelle 34:** Serie 1: Potenzfaktoren der Rohdichte für die Steifigkeit  $K_{ser}$  in Abhängigkeit von den zur Regression herangezogenen Daten, der holzanatomischen Gruppe, dem Achs-Faserwinkel und vom Schraubentyp

Ermittlung über ...		Mittelwerte		Einzelprüfwerte		
holzanatomische Gruppe	$\alpha$	$K_{ser}$ vs. $\rho_{12}$		$K_{ser}$ vs. $\rho_{12}$		
		RF	P1	RF	P1	RF & P1
Nadelholz (NH)	0°	1,07	0,94	1,23	1,05	1,13
	90°	1,26	1,60	1,40	1,64	1,48
ringporiges Laubholz (LHR)	0°	1,21	1,19	1,25	1,93	1,37
	45°	0,82	0,86	0,81	0,90	0,80
	90°	0,52	0,64	0,59	0,78	0,61
zerstreutporiges Laubholz (LHZ)	0°	1,77	1,11	1,72	1,04	1,32
	45°	1,26	1,29	1,30	1,27	1,31
	90°	1,63	2,24	1,48	1,85	1,96

Der Einfluss der Einschraubwinkel auf den Verlauf der Potenzfaktoren ist von der jeweiligen holzanatomischen Gruppe abhängig. Für die Nadelhölzer ist in Tabelle 34 eine Zunahme des Rohdichteinflusses auf die Steifigkeit bei größer werdenden Achs-Faserwinkeln zu erkennen. Bei den ringporigen Laubhölzern nehmen die Potenzfaktoren mit zunehmendem Einschraubwinkel hingegen ab. Für die zerstreutporigen Laubholzarten zeigen sich für die Referenzschraube und den Prototypen 1 jeweils entgegengesetzte Trends, weshalb keine Aussage möglich ist. Jedenfalls zeigen sich für Einschraubwinkel von 45° und 90° bedeutend höhere Potenzfaktoren als für die ringporigen Laubhölzer.

Wie der Tabelle 34 zu entnehmen ist, liegen sämtliche Potenzfaktoren in einem Bereich von 0,52 bis 1,77 für RF und 0,64 bis 2,24 für P1. Auch für die Fichte treten die Potenzfaktoren für beide Schraubentypen in einer Größenordnung zwischen 0,94 und 1,60 auf. Damit ist auf jeden Fall ein größerer Einfluss der Rohdichte auf die Steifigkeit zu erkennen, als dieser im Modell nach Blaß et al. (2006) mit 0,2 für Fichte angegeben wird. In Ringhofer et al. (2015a) hingegen wird, ebenfalls für Prüfungen der Holzart Fichte, ein Potenzfaktor von 0,75 angegeben. Den höchsten Potenzfaktor für Untersuchungen der Holzart Fichte zeigen die Ergebnisse von Brandner et al. (2017 (in print)). Dabei wird für den Potenzfaktor ein Wert von 1,42 angegeben, welcher mit jenen Werten, welche aus den hier durchgeführten Prüfungen ermittelt wurden, sehr gut übereinstimmt.

### 4-2.4 ZUSAMMENHANG EINDREHMOMENT UND AUSZIEHFESTIGKEIT

Ein Vergleich der Ausziehfestigkeit  $f_{ax}$  mit dem maximalen Einschraubdrehmoment  $M_{max}$  ist vor allem im Hinblick auf eine mögliche Abschätzung der Tragfähigkeit der Schraube auf Basis des Eindrehvorganges interessant. Dadurch wäre es theoretisch möglich, die Tragfähigkeit einer Schraube bzw. einer Schraubenverbindung auf Basis der ermittelten Eindrehmomente genau vorherzusagen oder durch eine entsprechende Schraubenanzahl auf die tatsächliche Tragfähigkeit bzw. die erwartete Einwirkung abzustimmen.

Die nachfolgenden Diagramme zeigen den Zusammenhang zwischen diesen beiden Kenngrößen auf Basis der Daten in den Tabellen 28 und 30. Es wird ebenfalls für jede holzanatomische Gruppe und für verschiedene Einschraubwinkel eine Regressionsanalyse mittels einer Potenzfunktion durchgeführt. Diese Ergebnisse sowie der Zusammenhang der Ausziehfestigkeit und des Eindrehmomentes sind in den Abbildungen 70 bis 75 dargestellt.

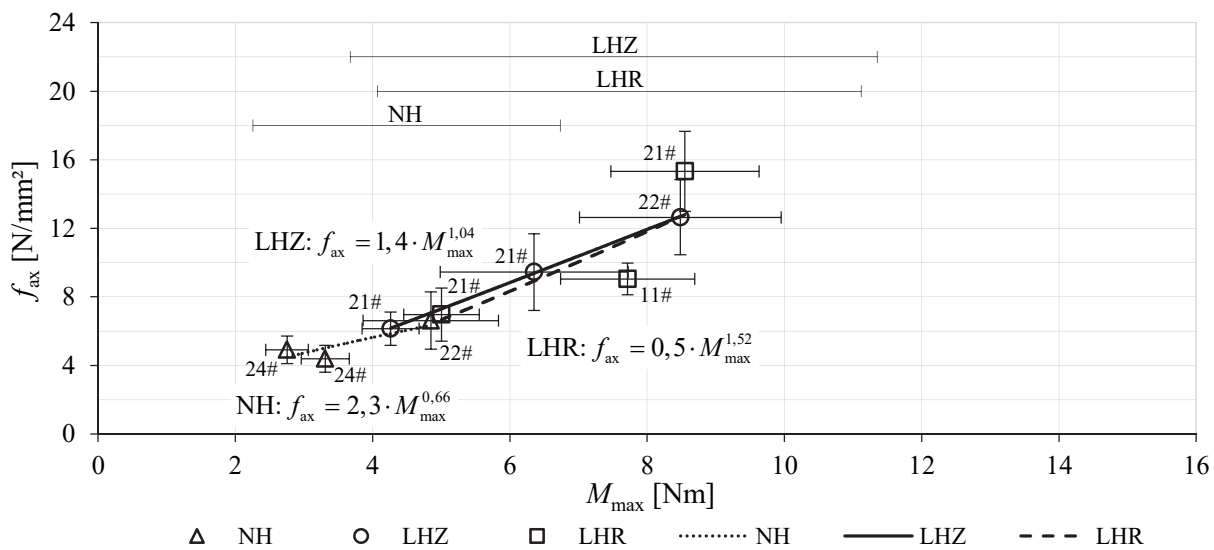


Abbildung 70: Serie 1:  $f_{ax}$  vs.  $M_{max}$  für  $\alpha = 0^\circ$  und die Referenzschraube (RF)

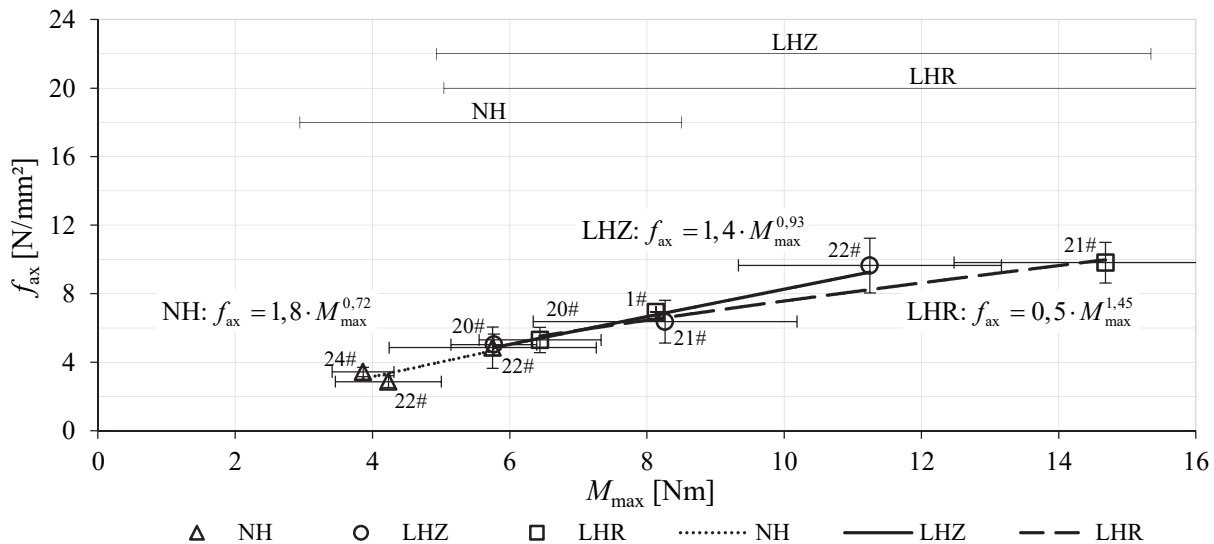


Abbildung 71: Serie 1:  $f_{ax}$  vs.  $M_{max}$  für  $\alpha = 0^\circ$  und den Prototyp 1 (P1)

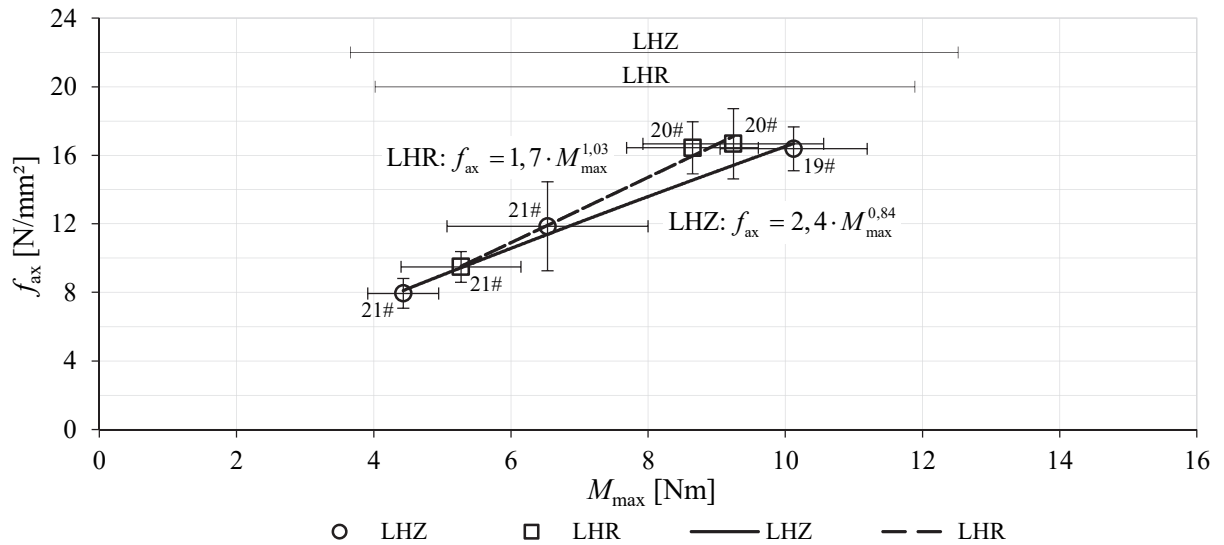


Abbildung 72: Serie 1:  $f_{ax}$  vs.  $M_{max}$  für  $\alpha = 45^\circ$  und die Referenzschraube (RF)

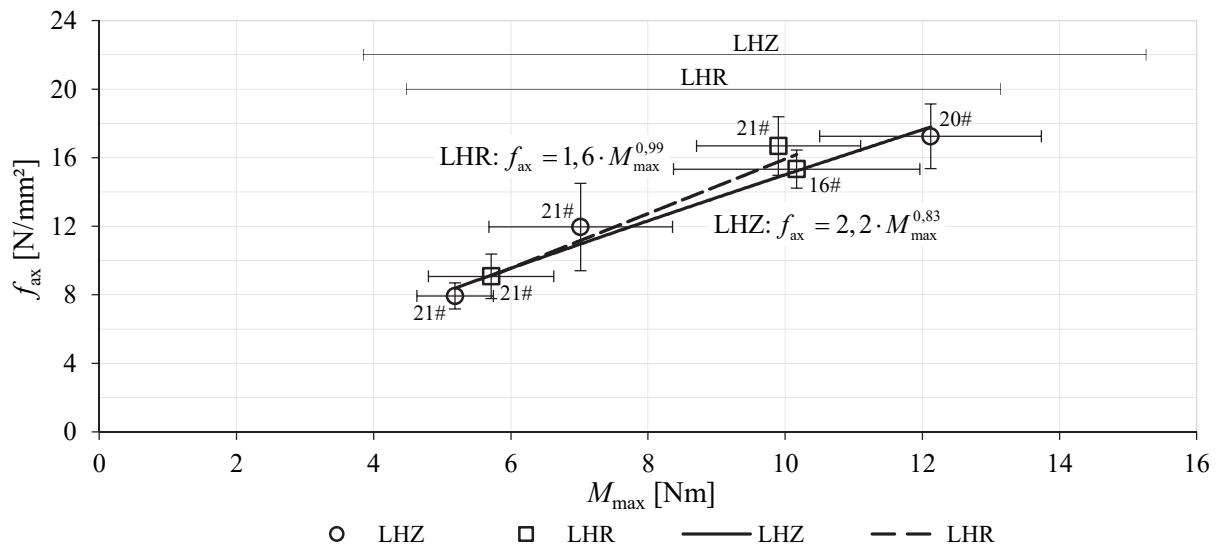


Abbildung 73: Serie 1:  $f_{ax}$  vs.  $M_{max}$  für  $\alpha = 45^\circ$  und den Prototyp 1 (P1)

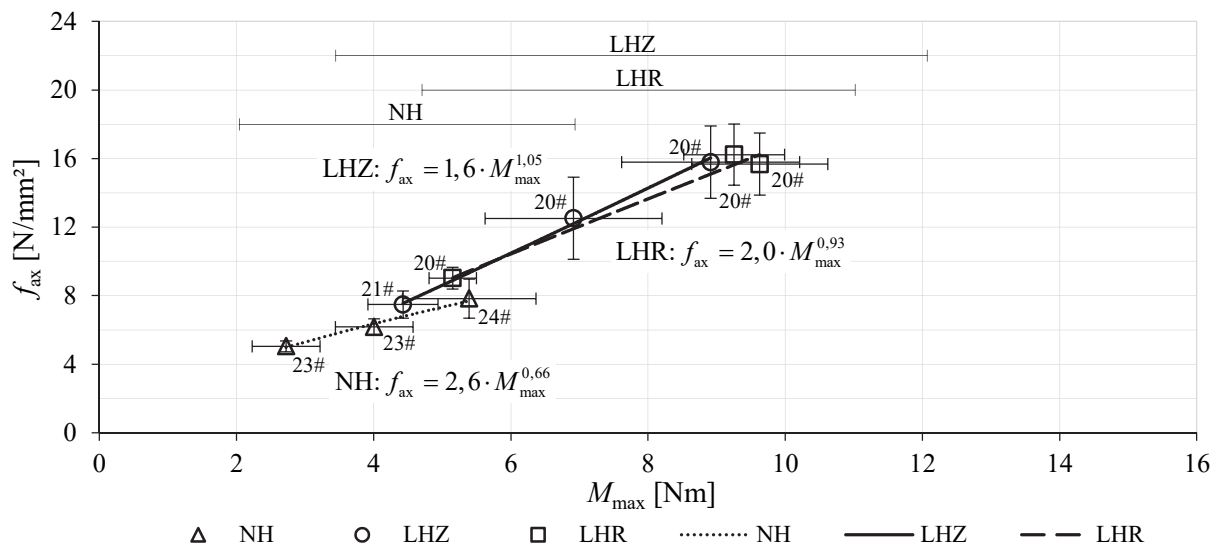


Abbildung 74: Serie 1:  $f_{ax}$  vs.  $M_{max}$  für  $\alpha = 90^\circ$  und die Referenzschraube (RF)

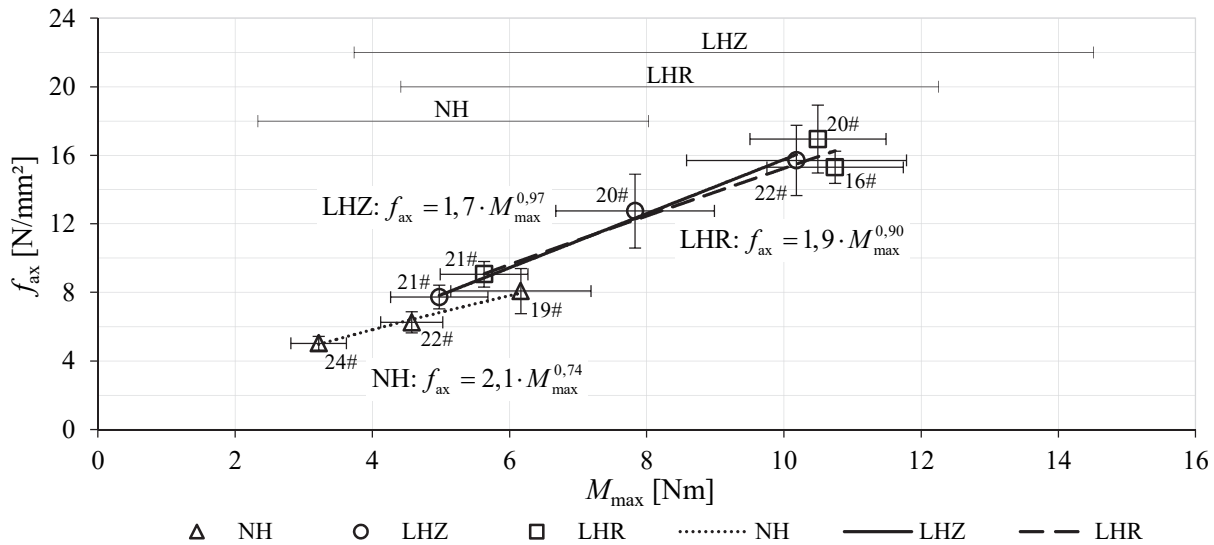


Abbildung 75: Serie 1:  $f_{ax}$  vs.  $M_{max}$  für  $\alpha = 90^\circ$  und den Prototyp 1 (P1)

Wie den vorhergehenden Abbildungen 70 bis 75 und der nachstehenden Tabelle 35 entnommen werden kann, stellt sich ein deutlicher Zusammenhang zwischen Ausziehfestigkeit und Eindrehmoment ein. In der Tabelle 35 sind die Potenzfaktoren der obigen Abbildungen sowie jene aus einer Regressionsrechnung auf Basis der Einzelprüfdaten zusammengefasst.

Tabelle 35: Serie 1: Potenzfaktoren des Eindrehmomentes für die Ausziehfestigkeit  $f_{ax}$  in Abhängigkeit von den zur Regression herangezogenen Daten, der holzanatomischen Gruppe, dem Achs-Faserwinkel und vom Schraubentyp

Ermittlung über ...		Mittelwerte		Einzelprüfwerte		
holzanatomische Gruppe	$\alpha$	$f_{ax}$ vs. $M_{max}$		$f_{ax}$ vs. $M_{max}$		
		RF	P1	RF	P1	RF & P1
Nadelholz (NH)	$0^\circ$	0,66	0,72	0,76	0,81	0,78
	$90^\circ$	0,66	0,74	0,63	0,76	0,67
ringporiges Laubholz (LHR)	$0^\circ$	1,52	1,45	1,30	1,27	1,20
	$45^\circ$	1,03	0,99	0,91	0,89	0,86
	$90^\circ$	0,93	0,89	0,89	0,86	0,84
zerstreutporiges Laubholz (LHZ)	$0^\circ$	1,04	0,93	0,98	0,92	0,90
	$45^\circ$	0,84	0,83	0,83	0,83	0,81
	$90^\circ$	1,05	0,97	1,00	0,93	0,92

Die beobachteten Potenzfaktoren für die Eindrehmomente ergeben dabei für die Nadelhölzer Werte von 0,63 bis 0,81 und für die Laubhölzer Werte von 0,83 bis 1,04, sofern sämtliche ringporigen Laubhölzer mit einem Einschraubwinkel von  $0^\circ$  nicht berücksichtigt werden (1,27 bis 1,52). Die höheren Werte für diese Untergruppen, welche sich bei der Regressionsrechnung für den Potenzfaktor ergeben, sind wiederum (vor allem durch  $M_{max}$  vom P1 bei der Eiche) durch die rechts-zensierte Datenanalyse beeinflusst. Eine Trennung in ring- und zerstreutporige Laubhölzer ist aufgrund des sich in weiten Bereichen überlappenden Wertebereichs für beide holzanatomischen Gruppen nicht erforderlich.

Für die Nadelhölzer zeigt sich mit einer Größenordnung von ca. 0,7–0,8 ein etwas geringerer Potenzfaktor als für die Laubhölzer. Für die Laubhölzer zeigt sich ein nahezu linearer Zusammenhang (Potenzfaktor



tor von im Mittel knapp unter 1,0) zwischen den beiden Kennwerten  $f_{ax}$  und  $M_{max}$ . Es wäre also sehr gut möglich, die Tragfähigkeit einer Schraube über das maximale Eindrehmoment abzuschätzen.

Im Anhang C-3 sind die Potenzfaktoren für sämtliche durchgeführten Betrachtungen bzw. Abhängigkeiten für die einzelnen Holzarten angeführt.

## 4-2.5 KORRELATION DER MODELLPARAMETER

Im Rahmen der Auswertung der Modellparameter, welche zur Beschreibung des Ausziehverhaltens (Kraft-Weg-Kennlinie) herangezogen werden, sollen auch die Korrelationskoeffizienten zwischen den Parametern  $\{\rho_{12}, F_{\max}, \Delta w_f, K_{\text{ser}}, \Delta w_{\text{lin}}, c\}$  betrachtet werden. Dadurch sollen mögliche Unterschiede im Tragverhalten bzw. Versagensmechanismus zwischen den holzanatomischen Gruppen ermittelt werden.

Durch die Annahme der Lognormalverteilung als passende Verteilungsfunktion für die ermittelten Parameter (vgl. Kapitel 3-3.2) wird der Korrelationskoeffizient nach Pearson für die logarithmierten Daten berechnet. Es werden dabei ausschließlich Prüfkörper, bei denen die vollständigen Modelldaten vorhanden sind, in der Auswertung berücksichtigt. Außerdem werden jene Modelle, bei welchen die linear-elastische Korrektur des tatsächlichen Ausziehweges ( $w_{\text{netto}}$ ) aufgrund der hohen Ausziehkraft nicht mehr möglich ist, zusätzlich entfernt (für RF über 18 kN und für P1 über 26 kN). Für die Korrelationsmatrizen der jeweiligen holzanatomischen Gruppe werden dabei die Mittelwerte der Korrelationsmatrizen der einzelnen Holzarten bzw. Schraubentypen (Berücksichtigung nur von Holzarten mit mehr als fünf vollständigen Datensätzen) gemittelt. Eine generelle Unterscheidung zwischen Referenzschraube und Prototyp 1 wurde nach einem vorab durchgeführten Vergleich als nicht notwendig erachtet. Die dafür verwendeten Korrelationsmatrizen (getrennt nach Schraubentyp, Holzart bzw. Rohdichtegruppe und Einschraubwinkel) sind dem Anhang C-4 zu entnehmen.

Es werden nachfolgend für jede holzanatomische Gruppe {LHZ, LHR, NH} und für jeden Achs-Faserwinkel  $\{0^\circ, 45^\circ, 90^\circ\}$  die wesentlichen Statistiken der Modellparameter zusammengefasst und jeweils eine Korrelationsmatrix aufgestellt. Bei den Einträgen handelt es sich um den Pearson-Korrelationskoeffizienten. Die Einträge aller Matrizen werden auch auf signifikante Unterschiede und Plausibilität untersucht. Für die Interpretation der Korrelationskoeffizienten wird die von Stadlober und Schauer (2007) in Kapitel 3-3.2 angegebene Faustformel verwendet.

### Nadelhölzer

**Tabelle 36:** Serie 1: Zusammenfassung der wesentlichen Statistiken der Modellparameter für die Nadelhölzer in Abhängigkeit vom Achs-Faserwinkel

		<i>n</i>	min[X]	median[X]	mean[X]	max[X]	COV [%]
$\rho_{12}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	0°	127	335	447	447	597	17,1
	90°	125	337	448	453	629	16,8
$F_{\max}$ [N]	0°	127	3.780	5.999	6.270	12.775	28,3
	90°	125	5.338	7.796	8.024	13.212	22,2
$\Delta w_f$ [mm]	0°	127	0,29	0,52	0,51	0,79	21,0
	90°	125	0,74	1,18	1,24	1,99	17,2
$K_{\text{ser}}$ [N/mm]	0°	127	12.997	20.930	22.819	43.295	28,2
	90°	125	8.533	14.627	15.789	32.669	29,7
$\Delta w_{\text{lin}}$ [mm]	0°	127	0,01	0,14	0,13	0,23	34,8
	90°	125	0,02	0,15	0,17	0,39	55,0
<i>c</i> [-]	0°	127	1,20	2,38	2,73	7,53	46,3
	90°	125	1,20	1,70	2,30	5,91	48,5

Erläuterungen zur Rohdichte  $\rho_{12}$ , der maximalen Ausziehkraft  $F_{\max}$  (nahezu proportional mit der Ausziehfestigkeit  $f_{\text{ax}}$ ) und der Steifigkeit  $K_{\text{ser}}$  sind den vorhergehenden Kapiteln 4-2.1 und 4-2.3 zu entnehmen.

Die Wegkenngröße  $\Delta w_f$ , welche die Verformung beim Erreichen der maximalen Ausziehkraft  $F_{\max}$  kennzeichnet, ist bei einem Einschraubwinkel von  $0^\circ$  nur etwa die Hälfte von jener bei einem Einschraubwinkel von  $90^\circ$  (vgl. mit den Prüfbeobachtungen in Kapitel 4-1.1). Der Bereich im Modell, bei welchem von einem linearen Anstieg der Kraft-Weg-Kennlinie ausgegangen wird ( $\Delta w_{\text{lin}}$ ), reicht für beide Einschraubwinkel von ca. 0 mm bis zu 0,4 mm. Tendenziell ist dieser Bereich allerdings auch bei einem Einschraubwinkel von  $90^\circ$  stärker ausgeprägt. Für den Parameter  $c$ , welcher den Verlauf der Kurve nach dem Überschreiten des linear-elastischen Bereiches beschreibt, werden für einen Einschraubwinkel von  $0^\circ$  im Mittel und auch bei den Maximalwerten größere Werte erreicht. Ein höherer  $c$ -Faktor ist dabei in der Regel kennzeichnend für ein spröderes Versagen (schnellerer Abfall der Kennlinie nach Überschreiten der maximalen Belastbarkeit). Die kleineren Werte für Einschraubwinkel von  $90^\circ$  (langsamerer Kraftabfall) sind dabei vor allem auf den komplexeren Versagensmechanismus (siehe Kapitel 2-4.1) zurückzuführen. Für  $\Delta w_{\text{lin}}$  und  $c$  weisen die Variationskoeffizienten extrem große Werte auf, was allerdings hinsichtlich der Zusammenfassung von verschiedenen Holzarten auch so zu erwarten ist.

Nachfolgend sind die Korrelationsmatrizen für die unterschiedlichen Achs-Faserwinkel dargestellt. Es handelt sich dabei zwingend um symmetrische Matrizen, sodass lediglich eine Hälfte davon dargestellt wird.

**Tabelle 37:** Serie 1: Gemittelte Korrelationskoeffizienten zwischen den logarithmierten Parametern gemäß Pearson für die Nadelhölzer bei einem Achs-Faserwinkel von  $\alpha = 0^\circ$

NH $0^\circ$	$\ln(\rho_{12})$	$\ln(F_{\max})$	$\ln(\Delta w_f)$	$\ln(K_{\text{ser}})$	$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	$\ln(c)$
$\ln(\rho_{12})$	1,00	0,34	0,09	0,36	-0,22	0,20
$\ln(F_{\max})$	–	1,00	0,22	0,86	-0,16	0,37
$\ln(\Delta w_f)$	–	–	1,00	-0,08	-0,13	0,51
$\ln(K_{\text{ser}})$	–	–	–	1,00	-0,21	0,26
$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	–	–	–	–	1,00	0,12
$\ln(c)$	–	–	–	–	–	1,00
<b>Info</b>	Anzahl RF:	65	Anzahl P1:	62	Gruppen:	6

**Tabelle 38:** Serie 1: Gemittelte Korrelationskoeffizienten zwischen den logarithmierten Parametern gemäß Pearson für die Nadelhölzer bei einem Achs-Faserwinkel von  $\alpha = 90^\circ$

NH $90^\circ$	$\ln(\rho_{12})$	$\ln(F_{\max})$	$\ln(\Delta w_f)$	$\ln(K_{\text{ser}})$	$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	$\ln(c)$
$\ln(\rho_{12})$	1,00	0,69	-0,03	0,50	0,07	-0,04
$\ln(F_{\max})$	–	1,00	-0,11	0,78	-0,05	-0,04
$\ln(\Delta w_f)$	–	–	1,00	-0,44	0,11	0,43
$\ln(K_{\text{ser}})$	–	–	–	1,00	-0,13	-0,12
$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	–	–	–	–	1,00	0,66
$\ln(c)$	–	–	–	–	–	1,00
<b>Info</b>	Anzahl RF:	64	Anzahl P1:	61	Gruppen:	6

Auffallend sind die positiven Korrelationen der bereits in den vorherigen Kapiteln betrachteten Zusammenhänge zwischen  $\ln(\rho_{12})$  und  $\ln(F_{\max})$  bzw.  $\ln(K_{\text{ser}})$ . Diese kommen an der Grenze zwischen einer schwachen und mittleren Korrelation zu liegen. Besonders die geringer ausgeprägten Korrelationskoeffizienten bei einem Einschraubwinkel von  $0^\circ$  zeigen eine geringere Abhängigkeit der Steifigkeit und Ausziehkraft (demzufolge auch von der Ausziehfestigkeit) von der Rohdichte als quer zur Faser. Eine besonders starke positive Korrelation weisen allerdings  $\ln(F_{\max})$  und  $\ln(K_{\text{ser}})$  auf. Durch den Eintritt des Versagens bei ähnlichen Verformungen gehen deshalb mit den höheren Ausziehkräften auch entsprechend höhere Steifigkeiten einher. Ebenso auffallend für beide Einschraubwinkel sind die positiven

Korrelationskoeffizienten zwischen  $\ln(\Delta w_f)$  und  $\ln(c)$ , was auf ein spröderes Verhalten bei größeren Verformungen bei Erreichen der maximalen Ausziehkraft hindeutet. Alle weiteren Korrelationskoeffizienten sind für den Einschraubwinkel von  $0^\circ$  nur sehr schwach oder nahezu gar nicht korreliert. Für  $\alpha = 90^\circ$  fallen noch die schwach negative Korrelation zwischen  $\ln(\Delta w_f)$  und  $\ln(K_{ser})$  und die mittlere positive Korrelation zwischen  $\ln(\Delta w_{in})$  und  $\ln(c)$  auf. Eine kleinere Verformung bei Maximaltragfähigkeit bedingt dementsprechend eine größere Steifigkeit, während ein größerer Bereich des linearen Verformungsverhaltens zu größeren  $c$ -Faktoren führt.

### Ringporige Laubhölzer

**Tabelle 39:** Serie 1: Zusammenfassung der wesentlichen Statistiken der Modellparameter für die ringporigen Laubhölzer in Abhängigkeit vom Achs-Faserwinkel

	$n$	min[X]	median[X]	mean[X]	max[X]	COV [%]	
$\rho_{12}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$0^\circ$	78	487	603	599	744	13,2
	$45^\circ$	78	474	597	605	863	15,0
	$90^\circ$	74	471	596	609	765	14,9
$F_{max}$ [N]	$0^\circ$	78	5.392	10.478	12.385	24.785	39,8
	$45^\circ$	78	9.604	13.609	15.861	25.464	29,6
	$90^\circ$	74	9.875	16.431	15.794	25.819	29,4
$\Delta w_f$ [mm]	$0^\circ$	78	0,26	0,43	0,47	0,81	29,5
	$45^\circ$	78	0,50	0,70	0,73	1,13	19,9
	$90^\circ$	74	0,54	0,77	0,80	1,27	23,2
$K_{ser}$ [N/mm]	$0^\circ$	78	23.789	39.441	41.510	70.772	31,6
	$45^\circ$	78	21.008	35.879	35.977	53.159	23,3
	$90^\circ$	74	23.200	34.218	35.135	56.287	22,3
$\Delta w_{in}$ [mm]	$0^\circ$	78	0,04	0,13	0,13	0,29	41,7
	$45^\circ$	78	0,04	0,17	0,17	0,30	36,2
	$90^\circ$	74	0,00	0,16	0,17	0,42	42,0
$c$ [-]	$0^\circ$	78	1,36	3,70	4,11	15,2	56,9
	$45^\circ$	78	1,70	2,46	2,49	3,40	14,9
	$90^\circ$	74	1,51	2,35	2,52	5,01	28,6

Auch für die ringporigen Laubhölzer wurden die Ausführungen zur Rohdichte  $\rho_{12}$ , maximalen Ausziehkraft  $F_{max}$  (vergleichbar mit der Ausziehfestigkeit  $f_{ax}$ ) und zur Steifigkeit  $K_{ser}$  bereits in den vorhergehenden Kapiteln erläutert. Gleich wie bei den Nadelhölzern ist die mittlere Wegkenngröße  $\Delta w_f$  bei einem Achs-Faserwinkel von  $0^\circ$  nur etwas mehr als die Hälfte von jener bei Einschraubwinkeln von  $45^\circ$  bzw.  $90^\circ$ . Der Bereich des linearen Anstieges der Kraft-Weg-Kennlinie liegt für alle Einschraubwinkel im Durchschnitt zwischen 0,13 mm und 0,17 mm. Allerdings treten für einen Einschraubwinkel von  $90^\circ$  durchaus größere Maximalwerte auf. Der Parameter  $c$  zeigt bei einem Einschraubwinkel von  $0^\circ$  sowohl im Mittel und als auch beim Maximalwert deutlich größere Werte. Dieses Verhalten ist auch bei den Nadelhölzern bereits so festgestellt worden. Zwischen den Einschraubwinkeln von  $45^\circ$  und  $90^\circ$  treten hingegen kaum Unterschiede auf. Die angegebenen Variationskoeffizienten sind nur mehr bedingt für die

Beurteilung der Daten heranzuziehen, da durch die große Vielfalt des Ausgangsmaterials diese auch entsprechend hoch zu liegen kommen.

Nachfolgend sind die Korrelationsmatrizen für die unterschiedlichen Achs-Faserwinkel von 0°, 45° und 90° dargestellt.

**Tabelle 40:** Serie 1: Gemittelte Korrelationskoeffizienten zwischen den logarithmierten Parametern gemäß Pearson für die ringporigen Laubhölzer bei einem Achs-Faserwinkel von  $\alpha = 0^\circ$

LHR 0°	$\ln(\rho_{12})$	$\ln(F_{\max})$	$\ln(\Delta w_f)$	$\ln(K_{\text{ser}})$	$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	$\ln(c)$
$\ln(\rho_{12})$	1,00	0,26	0,10	0,41	-0,20	0,26
$\ln(F_{\max})$	–	1,00	0,81	0,39	0,26	0,43
$\ln(\Delta w_f)$	–	–	1,00	-0,06	0,34	0,19
$\ln(K_{\text{ser}})$	–	–	–	1,00	-0,47	0,32
$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	–	–	–	–	1,00	0,06
$\ln(c)$	–	–	–	–	–	1,00
<b>Info</b>	Anzahl RF:	39	Anzahl P1	39	Gruppen:	5

**Tabelle 41:** Serie 1: Gemittelte Korrelationskoeffizienten zwischen den logarithmierten Parametern gemäß Pearson für die ringporigen Laubhölzer bei einem Achs-Faserwinkel von  $\alpha = 45^\circ$

LHR 45°	$\ln(\rho_{12})$	$\ln(F_{\max})$	$\ln(\Delta w_f)$	$\ln(K_{\text{ser}})$	$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	$\ln(c)$
$\ln(\rho_{12})$	1,00	0,68	0,01	0,53	0,00	0,10
$\ln(F_{\max})$	–	1,00	0,36	0,45	0,14	0,11
$\ln(\Delta w_f)$	–	–	1,00	-0,42	0,19	-0,11
$\ln(K_{\text{ser}})$	–	–	–	1,00	-0,40	0,04
$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	–	–	–	–	1,00	0,00
$\ln(c)$	–	–	–	–	–	1,00
<b>Info</b>	Anzahl RF:	21	Anzahl P1:	57	Gruppen:	4

**Tabelle 42:** Serie 1: Gemittelte Korrelationskoeffizienten zwischen den logarithmierten Parametern gemäß Pearson für die ringporigen Laubhölzer bei einem Achs-Faserwinkel von  $\alpha = 90^\circ$

LHR 90°	$\ln(\rho_{12})$	$\ln(F_{\max})$	$\ln(\Delta w_f)$	$\ln(K_{\text{ser}})$	$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	$\ln(c)$
$\ln(\rho_{12})$	1,00	0,75	0,27	0,56	-0,20	-0,18
$\ln(F_{\max})$	–	1,00	0,42	0,72	-0,37	-0,20
$\ln(\Delta w_f)$	–	–	1,00	0,13	-0,17	-0,30
$\ln(K_{\text{ser}})$	–	–	–	1,00	-0,63	-0,26
$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	–	–	–	–	1,00	0,28
$\ln(c)$	–	–	–	–	–	1,00
<b>Info</b>	Anzahl RF:	20	Anzahl P1:	54	Gruppen:	4

Auch für die ringporigen Laubhölzer sind für die bereits betrachteten Zusammenhänge (siehe vorhergehendes Kapitel 4-2.3) positive Korrelationen zwischen  $\ln(\rho_{12})$  und  $\ln(F_{\max})$  bzw.  $\ln(K_{\text{ser}})$ , welche zwischen schwacher und mittlerer Korrelation einzustufen sind, zu erkennen. Zusätzlich zeigt sich für die Ringporer eine durchgehende positive Korrelation zwischen  $\ln(F_{\max})$  und  $\ln(\Delta w_f)$ . Ähnlich wie bei den Nadelhölzern weisen auch  $\ln(F_{\max})$  und  $\ln(K_{\text{ser}})$  eine positive, allerdings weniger stark ausgeprägte Korrelation auf. Eine negative Korrelation zwischen  $\ln(\Delta w_f)$  und  $\ln(K_{\text{ser}})$  fällt bei den ringporigen Laubhölzern für

einen Einschraubwinkel von 45° auf. Dieser Zusammenhang zeigt die bei höheren Steifigkeiten kleineren Verformungen bis zum Erreichen der maximalen Tragfähigkeit. Bei Achs-Faserwinkeln von 0° und 90° zeigen die Korrelationskoeffizienten nahezu keinen Zusammenhang. Für alle Einschraubwinkel zeigt der Korrelationskoeffizient zwischen  $\ln(\Delta w_{lin})$  und  $\ln(K_{ser})$  eine schwache bis mittlere Abhängigkeit. Mit steigender Steifigkeit für das Modell geht demzufolge ein abnehmender Bereich, in welchem diese auftreten, einher. Damit bleibt die erreichte Last am Ende des linear-elastischen Anstiegs nahezu konstant.

Für alle weiteren Abhängigkeiten sind nur sehr schwache oder schwach ausgeprägte und im Vorzeichen wechselnde Korrelationskoeffizienten ersichtlich.

### Zerstreutporige Laubhölzer

**Tabelle 43:** Serie 1: Zusammenfassung der wesentlichen Statistiken der Modellparameter für die zerstreutporigen Laubhölzer in Abhängigkeit vom Achs-Faserwinkel

	<i>n</i>	min[X]	median[X]	mean[X]	max[X]	COV [%]	
$\rho_{12}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	0°	104	432	597	595	840	18,7
	45°	91	431	554	581	846	18,6
	90°	94	438	575	587	840	18,2
$F_{max}$ [N]	0°	104	5.596	9.861	10.566	19.757	32,0
	45°	91	8.157	12.241	13.989	25.925	34,3
	90°	94	8.091	13.358	13.978	25.350	33,4
$\Delta w_f$ [mm]	0°	104	0,28	0,43	0,45	0,76	21,8
	45°	91	0,69	0,83	0,85	1,13	11,2
	90°	94	0,70	0,89	0,92	1,25	13,3
$K_{ser}$ [N/mm]	0°	104	14.949	35.024	35.471	60.036	31,0
	45°	91	16.975	26.363	29.010	50.953	29,9
	90°	94	14.275	27.488	31.791	67.178	41,6
$\Delta w_{lin}$ [mm]	0°	104	0,01	0,15	0,15	0,27	38,6
	45°	91	0,02	0,15	0,16	0,35	42,7
	90°	94	0,00	0,13	0,14	0,31	55,3
<i>c</i> [-]	0°	104	1,33	3,25	3,70	21,87	74,2
	45°	91	1,58	2,41	2,45	3,83	19,3
	90°	94	1,28	1,89	1,96	3,35	19,0

Identisch wie bei den beiden vorhergehenden holzanatomischen Gruppen werden auch für die zerstreutporigen Laubhölzer die Rohdichte  $\rho_{12}$ , die maximale Ausziehkraft  $F_{max}$  (vergleichbar mit der Ausziehfestigkeit  $f_{ax}$ ) und die Steifigkeit  $K_{ser}$  bereits in den vorhergehenden Kapiteln eingehend erläutert. Für die Zerstreutporer ist der mittlere Weg bei Erreichen der Maximalkraft  $\Delta w_f$  bei einem Einschraubwinkel von 0° ebenso nur in etwa die Hälfte von den beiden Einschraubwinkeln von 45° oder 90°. Der lineare Bereich, der einen Anstieg mit der ermittelten Steifigkeit  $K_{ser}$  aufweist, liegt für alle Einschraubwinkel bei einem Mittelwert von 0,14 mm bis 0,16 mm. Auch die Minimalwerte für  $\Delta w_{lin}$  (nahezu 0 mm) und die



Maximalwerte (zwischen 0,27 mm und 0,35 mm) liegen für alle Einschraubwinkel sehr nahe zusammen. Der Modellparameter  $c$  zeigt bei einem Einschraubwinkel von  $0^\circ$  sowohl im Mittel und als auch beim Maximalwert deutlich größere Werte. Für die Einschraubwinkel von  $45^\circ$  und  $90^\circ$  treten hingegen kaum Unterschiede auf. Der besonders hohe maximale  $c$ -Faktor von 21,87 ergibt sich durch ein besonders abruptes Versagen der Birkenprüfkörper. Durch die bereits hohen Variationskoeffizienten der Rohdichte, sind die COV-Werte der Modellparameter je nach Sensitivität und Streuung noch größer. Deshalb ist es nur mehr bedingt sinnvoll, diese für die Beurteilung der Daten heranzuziehen.

In den nachfolgenden Tabellen sind die Korrelationsmatrizen für die unterschiedlichen Achs-Faserwinkel dargestellt.

**Tabelle 44:** Serie 1: Gemittelte Korrelationskoeffizienten zwischen den logarithmierten Parametern gemäß Pearson für die zerstreutporigen Laubhölzer bei einem Achs-Faserwinkel von  $\alpha = 0^\circ$

LHZ $0^\circ$	$\ln(\rho_{12})$	$\ln(F_{\max})$	$\ln(\Delta w_f)$	$\ln(K_{\text{ser}})$	$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	$\ln(c)$
$\ln(\rho_{12})$	1,00	0,74	0,42	0,31	0,06	0,35
$\ln(F_{\max})$	–	1,00	0,32	0,61	0,02	0,43
$\ln(\Delta w_f)$	–	–	1,00	-0,24	-0,10	0,18
$\ln(K_{\text{ser}})$	–	–	–	1,00	-0,29	0,10
$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	–	–	–	–	1,00	0,17
$\ln(c)$	–	–	–	–	–	1,00
<b>Info</b>	Anzahl RF:	41	Anzahl P1:	63	Gruppen:	5

**Tabelle 45:** Serie 1: Gemittelte Korrelationskoeffizienten zwischen den logarithmierten Parametern gemäß Pearson für die zerstreutporigen Laubhölzer bei einem Achs-Faserwinkel von  $\alpha = 45^\circ$

LHZ $45^\circ$	$\ln(\rho_{12})$	$\ln(F_{\max})$	$\ln(\Delta w_f)$	$\ln(K_{\text{ser}})$	$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	$\ln(c)$
$\ln(\rho_{12})$	1,00	0,81	0,53	0,66	-0,08	-0,25
$\ln(F_{\max})$	–	1,00	0,55	0,81	-0,14	-0,18
$\ln(\Delta w_f)$	–	–	1,00	0,17	-0,07	-0,21
$\ln(K_{\text{ser}})$	–	–	–	1,00	-0,30	-0,10
$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	–	–	–	–	1,00	0,11
$\ln(c)$	–	–	–	–	–	1,00
<b>Info</b>	Anzahl RF:	36	Anzahl P1:	55	Gruppen:	5

**Tabelle 46:** Serie 1: Gemittelte Korrelationskoeffizienten zwischen den logarithmierten Parametern gemäß Pearson für die zerstreutporigen Laubhölzer bei einem Achs-Faserwinkel von  $\alpha = 90^\circ$

LHZ $90^\circ$	$\ln(\rho_{12})$	$\ln(F_{\max})$	$\ln(\Delta w_f)$	$\ln(K_{\text{ser}})$	$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	$\ln(c)$
$\ln(\rho_{12})$	1,00	0,78	0,60	0,52	0,03	0,01
$\ln(F_{\max})$	–	1,00	0,46	0,76	-0,06	0,19
$\ln(\Delta w_f)$	–	–	1,00	0,09	0,04	0,18
$\ln(K_{\text{ser}})$	–	–	–	1,00	-0,25	0,10
$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	–	–	–	–	1,00	0,18
$\ln(c)$	–	–	–	–	–	1,00
<b>Info</b>	Anzahl RF:	36	Anzahl P1:	58	Gruppen:	5

Für die zerstreutporigen Laubhölzer wurden die Zusammenhänge, welche eine mittlere bis starke positive Korrelation zwischen  $\ln(\rho_{12})$  und  $\ln(F_{\max})$  und  $\ln(K_{\text{ser}})$  aufweisen, ebenso bereits am Anfang der Auswertung der Serie 1 betrachtet. Anhand der Korrelationskoeffizienten ist dabei auch für die Zerstreutporer wiederum zu erkennen, dass die Koeffizienten bei einem Einschraubwinkel von  $0^\circ$  die geringsten Werte aufweisen. Speziell für diese holzanatomische Gruppe ist auch eine zusätzliche ausgeprägte positive Korrelation zwischen  $\ln(\Delta w_f)$  und  $\ln(\rho_{12})$  zu beobachten. Außerdem zeigt sich für die Zerstreutporer eine durchgehende positive Korrelation zwischen  $\ln(F_{\max})$  und  $\ln(\Delta w_f)$  bzw.  $\ln(K_{\text{ser}})$ . Diese ist für die Steifigkeit stärker ausgeprägt als für die Verformungen. Wie bei den ringporigen Laubhölzern ist auch zwischen  $\ln(\Delta w_{\text{lin}})$  und  $\ln(K_{\text{ser}})$  eine schwache negative Korrelation, welche allerdings geringer ausfällt, zu beobachten. Mit steigender Steifigkeit sinkt damit der Verformungsbereich in dem das linear-elastische Verformungsverhalten zu beobachten ist.

Für alle weiteren Abhängigkeiten treten innerhalb der zerstreutporigen Laubhölzer nur sehr schwache oder schwach ausgeprägte und im Vorzeichen wechselnde Korrelationskoeffizienten auf.

### **Gesamtbetrachtung der Korrelation**

Wie bereits vermutet wurde und bekannt war, konnte für alle holzanatomischen Gruppen eine entsprechend hohe Korrelation zwischen  $\ln(F_{\max})$  und  $\ln(\rho_{12})$  ermittelt werden. Gut zu erkennen ist dabei allerdings die geringere Korrelation dieser beiden Parameter in LHR und NH bei Einschraubwinkeln von  $0^\circ$ . Dies wurde bereits im Kapitel 2-4.3 diskutiert, wo die Schubfestigkeit bzw. der Schubmodul als besserer Indikator für die maximale Last bzw. die Ausziehfestigkeit für die Belastung in Faserrichtung angesehen wird (Eckelman, 1975). Durch eine überwiegende Lage der Schraube im Frühholzbereich (sofern entsprechend große Jahrringabstände vorhanden sind, wie z. B. bei der Edelkastanie) kann eine für den Prüfkörper höhere Rohdichte nur bedingt zu höheren Ausziehfestigkeiten beitragen.

Auch die eindeutigen positiven Korrelationskoeffizienten zwischen  $\ln(K_{\text{ser}})$  und  $\ln(\rho_{12})$  bzw.  $\ln(F_{\max})$  sind bereits aus den vorherigen Auswertungen (siehe Kapitel 4-2.3) zu erwarten. Diese zeigen sich für alle holzanatomischen Gruppen und sind nahezu unabhängig vom Einschraubwinkel (vereinzelt geringere Korrelationskoeffizienten bei einem Achs-Faserwinkel von  $0^\circ$ ). Im Regelfall ist die Korrelation zwischen  $\ln(K_{\text{ser}})$  und  $\ln(F_{\max})$  höher als zwischen  $\ln(K_{\text{ser}})$  zu  $\ln(\rho_{12})$ .

Für LHZ bei  $0^\circ$ , LHR bei  $0^\circ$  &  $45^\circ$  und alle NH geht mit der Zunahme von  $\ln(K_{\text{ser}})$  eine Abnahme von  $\ln(\Delta w_f)$  einher; restliche Korrelationsmatrizen zeigen sehr geringe positive Korrelationskoeffizienten. Die negativen Korrelationskoeffizienten sind für Achs-Faserwinkel von  $0^\circ$  allerdings nur sehr schwach ausgeprägt. Allgemein bedeutet dies, dass mit höherer Verbundsteifigkeit zwischen Holz und Verbindungsmittel die Verformung bei maximaler Ausziehkraft abnimmt.

Für alle untersuchten Prüfkörpergruppen (ausgenommen NH mit  $\alpha = 90^\circ$ , dort nahezu keine Korrelation) ist eine schwache bis mittlere positive Korrelation der verschiedenen holzanatomischen Gruppen für  $\ln(\Delta w_f)$  mit  $\ln(\rho_{12})$  und  $\ln(F_{\max})$  ersichtlich. Die höheren Ausziehkraften gehen demzufolge auch mit höheren Verformungen beim Erreichen der maximalen Traglast einher.

Für  $\ln(\Delta w_{\text{lin}})$  zeigt sich ausschließlich mit  $\ln(K_{\text{ser}})$  eine durchgehende schwache bis mittlere negative Korrelation. Je steifer das Verbindungsmittel, desto kleiner der Bereich, in welchem die Last-Verformungskennlinie einen linearen Anstieg zeigt. Auffallend sind dabei insbesondere die höheren Werte der Korrelationskoeffizienten bei den ringporigen Laubhölzern.

Für den Formparameter  $\ln(c)$  zeigt sich eine positive Korrelation (Werte zwischen 0,00 und 0,66) mit  $\ln(\Delta w_{\text{lin}})$ . Bei der Ausbildung eines größeren linearen Bereichs  $\Delta w_{\text{lin}}$  zeigt sich somit ein höherer Formfaktor  $\ln(c)$ . Höhere Formfaktoren führen zu einem stärkeren Kraftabfall nach Erreichen der Maximallast (Beschreibung des Nachbruchverhaltens; Entfestigung).

Für alle holzanatomischen Gruppen zeigt sich lediglich bei einem Achs-Faserwinkel von  $0^\circ$  eine mittlere Korrelation zwischen  $\ln(F_{\max})$  und  $\ln(c)$ . Damit zeigt sich das bei höheren Kräften tendenziell raschere Abfallen der Prüfkraft. Bei Einschraubwinkeln von  $45^\circ$  und  $90^\circ$  kann sich dies aufgrund des komplexeren Versagensmechanismus (siehe Kapitel 2-4.1) nicht festgestellt werden. Außerdem kann für einen Ein-

schraubwinkel von  $0^\circ$  für alle holzanatomischen Gruppen generell eine sehr geringe, aber durchgehend ausgeprägte, positive Korrelation von  $\ln(c)$  mit  $\ln(\rho_{12})$ ,  $\ln(\Delta w_f)$  und  $\ln(K_{ser})$  beobachtet werden.

Auffallend ist noch die im Vergleich zu den Laubhölzern bei den Nadelhölzern deutlich stärkere positive Korrelation zwischen  $\ln(c)$  und  $\ln(\Delta w_f)$ . Dies zeigt wiederum, dass es bei größeren Verformungen zu einem anschließenden schnelleren Abfall der Kraft-Verformungs-Kennlinie kommt.

Für alle weiteren nicht genannten Korrelationskoeffizienten zeigen sich keine Strukturen in deren Ergebnissen – weder für die Einschraubwinkel, noch für die holzanatomischen Gruppen. Außerdem sind deren Werte so gering, dass keine signifikanten Aussagen getätigt werden können.

Wie von Brandner et al. (2017 (in print)) in Untersuchungen von Nadelholz festgestellt wurde, lassen die negativen Korrelationskoeffizienten von  $\ln(K_{ser})$  mit  $\ln(\Delta w_{lin})$  und  $\ln(\Delta w_f)$  die Folgerung zu, dass bei höherer Steifigkeit ein spröderes Bruchverhalten (kleinere Verformungen) zu erwarten ist. Diese Beobachtung kann in den aufgestellten Korrelationsmatrizen in allen bis auf drei von insgesamt 16 Korrelationskoeffizienten beobachtet werden. Die in den Vorzeichen unterschiedlich und nur sehr schwach ausgeprägten Korrelationskoeffizienten zwischen  $\ln(\Delta w_f)$  und  $\ln(\Delta w_{lin})$  zeigen dahingehend ebenso keine eindeutige Abhängigkeit.

Anmerkung: Ein abruptes Versagen bei den Ausziehprüfungen, welches so lediglich bei einem Einschraubwinkel von  $0^\circ$  beobachtet werden konnte, zeichnet sich in den Modellparametern durch einen  $c$ -Faktor von mindestens 7,0 aus. Der rapide Abfall der Kraft auf weniger als 75 % der Maximallast, was auch zu einem Abbruch der Prüfung führt, erfolgt dabei innerhalb einer Messperiode (0,2 Sekunden).

#### 4-2.6 VERGLEICH DER MODELLPARAMETER BZW. ARBEITSLINIEN

In den Abbildungen 76 bis 79 sind die sich aus den Mittelwerten der Prüfungen ergebenden Kraft-Weg-Linien (Arbeitslinie) für die unterschiedlichen Holzarten bzw. Rohdichtegruppen bei Achs-Faserwinkeln für  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  und  $90^\circ$  dargestellt; es wird zwischen der Referenzschraube (links) und dem Prototypen 1 (rechts) unterschieden. Es werden dabei, wie in der vorherigen Betrachtung für die Korrelationskoeffizienten, lediglich Proben mit vollständigen Modelldaten für die Ermittlung der jeweiligen Mittelwerte der Untergruppen herangezogen. Allerdings werden Modelle, bei denen die Ausziehkraft bereits eine plastische Verformung der Schraube verursacht, nicht ausgeschlossen, da ansonsten für die Buche, Esche und Eiche bei Achs-Faserwinkeln von  $45^\circ$  und  $90^\circ$  keine Kraft-Weg-Kennlinien eingetragen werden könnten; damit werden auch geringe Abweichungen der Wege in Kauf genommen (allerdings kam es zu keinem Auftreten eines Schraubenstahlbruches).

Zusätzlich werden an dieser Stelle die im Zuge der Serie 2 ermittelten Daten für die BauBuche ebenfalls eingetragen. Um einen einheitlichen und vergleichbaren Verlauf der Kennlinien zu erreichen, wurden die Anfangsverformungen  $w_{ini}$  mit null angesetzt.

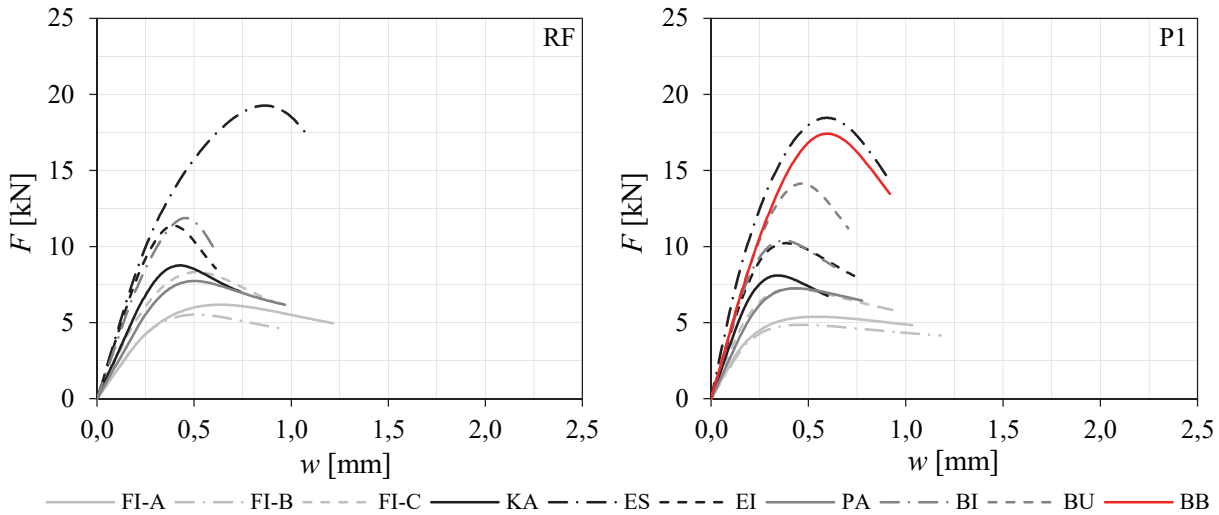


Abbildung 76: Serie 1: Mittlere Kraft-Weg-Kennlinien für die Holzarten bzw. Rohdichtegruppen bei einem Achs-Faserwinkel von  $\alpha = 0^\circ$  und für RF (links) und P1 (rechts)

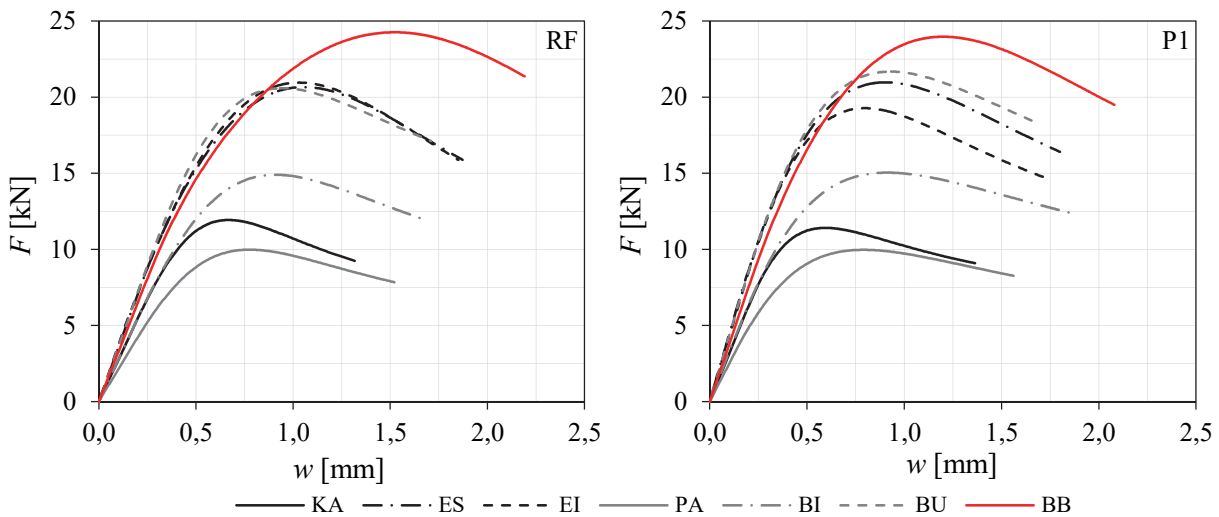


Abbildung 77: Serie 1: Mittlere Kraft-Weg-Kennlinien für die Holzarten bzw. Rohdichtegruppen bei einem Achs-Faserwinkel von  $\alpha = 45^\circ$  und für RF (links) und P1 (rechts)

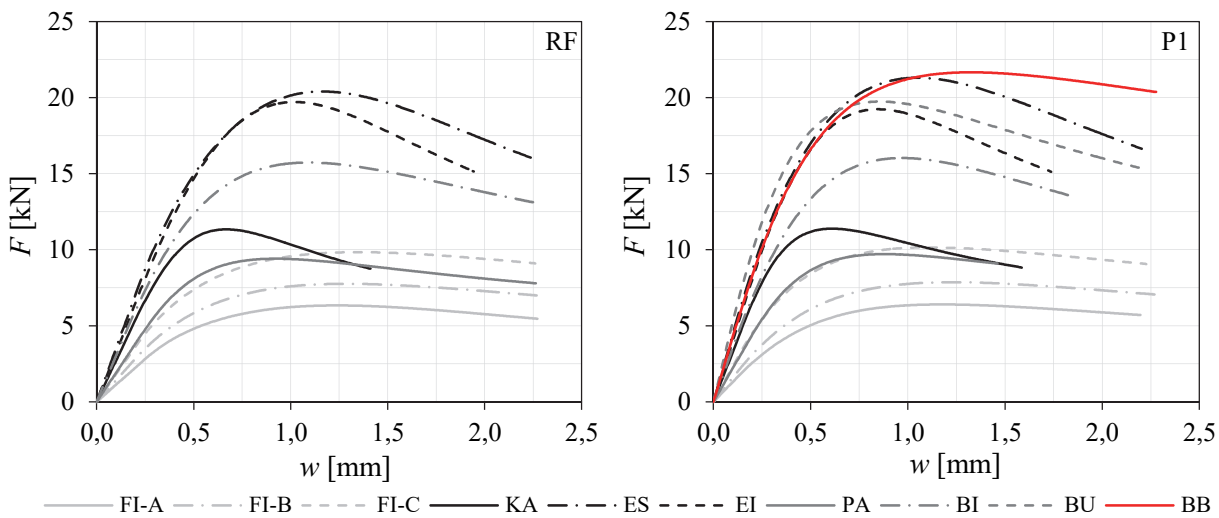


Abbildung 78: Serie 1: Mittlere Kraft-Weg-Kennlinien für die Holzarten bzw. Rohdichtegruppen bei einem Achs-Faserwinkel von  $\alpha = 90^\circ$  und für RF (links) und P1 (rechts)

In den Abbildungen 76 bis 78 ist zu erkennen, dass die Unterschiede zwischen den beiden Schraubentypen RF und P1 nur gering ausfallen. Für die unterschiedlichen Achs-Faserwinkel hingegen sind deutliche Unterschiede zwischen  $0^\circ$  und  $45^\circ$  bzw.  $90^\circ$  zu erkennen. Neben den höheren Prüflasten und damit auch Ausziehfestigkeiten bei Achs-Faserwinkeln von  $90^\circ$  zeigen sich auch größere damit einhergehende Verformungen. Für Achs-Faserwinkel von  $45^\circ$  zeigen sich sehr ähnliche Ausprägungen der Kraft-Weg-Kennlinien wie bei  $90^\circ$ . Auch ist für einen Einschraubwinkel von  $90^\circ$  ein weniger steiler Kraftabfall nach dem Erreichen der Maximallast zu erkennen. So fällt die Last in weiterer Folge erst bei größeren Verformungen (meist über 2 mm Nettoverformung) auf 75 % von  $F_{\max}$  ab. Diese Charakteristik resultiert aus dem für Achs-Faserwinkel von  $90^\circ$  komplexeren Versagensmechanismus beim Herausziehen der Schraube aus dem Holzprüfkörper (siehe Kapitel 2-4.2) im Vergleich zu einem Achs-Faserwinkel von  $0^\circ$ .

Auffallend ist dabei das bereits im Kapitel 4-1.1 erläuterte Verhalten, dass bei gleichem Achs-Faserwinkel die Nadelhölzer und die Laubhölzer mit den höchsten Ausziehtragfähigkeiten gleiche Verformungen beim Erreichen der maximalen Belastung aufweisen.

In den nachfolgenden Abbildungen 79 bis 81 sind die relativen Kraft-Weg-Kennlinien für die Untergruppen der Prüferserie 1 dargestellt. Dabei werden die Kraft auf die Maximalkraft und der Weg auf jenen zum Zeitpunkt der Maximalkraft bezogen.

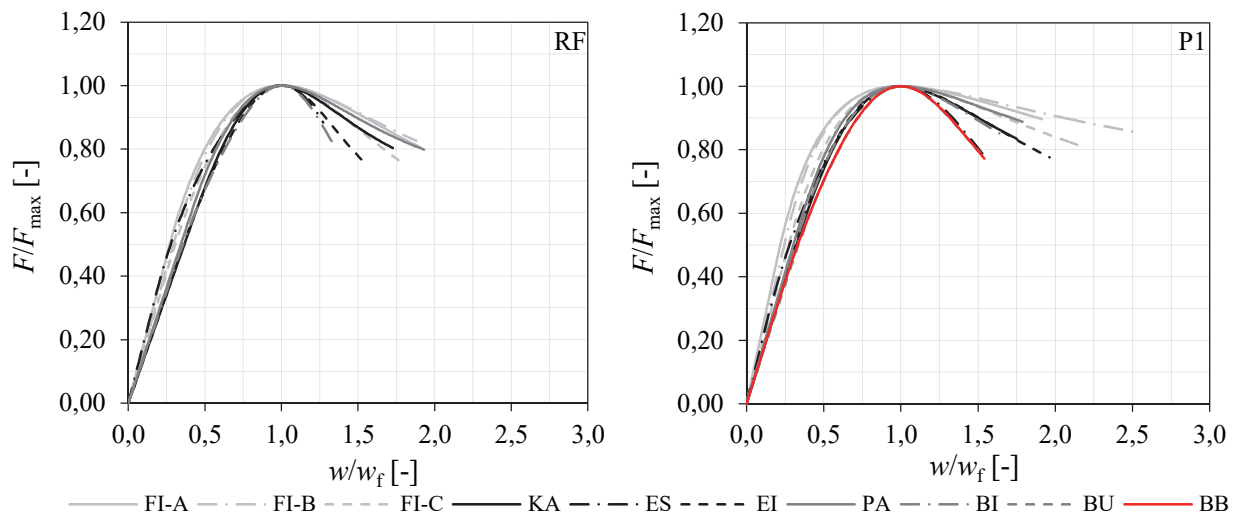


Abbildung 79: Serie 1: Mittlere relative Kraft-Weg-Kennlinien für die Holzarten bzw. Rohdichtegruppen bei einem Achs-Faserwinkel von  $\alpha = 0^\circ$  und für RF (links) und P1 (rechts)

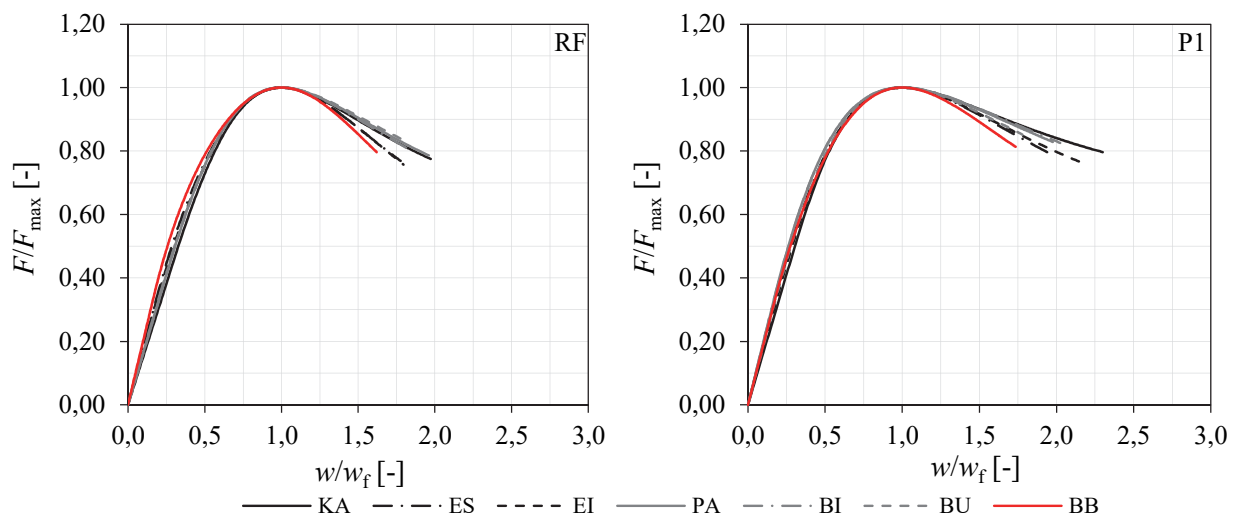
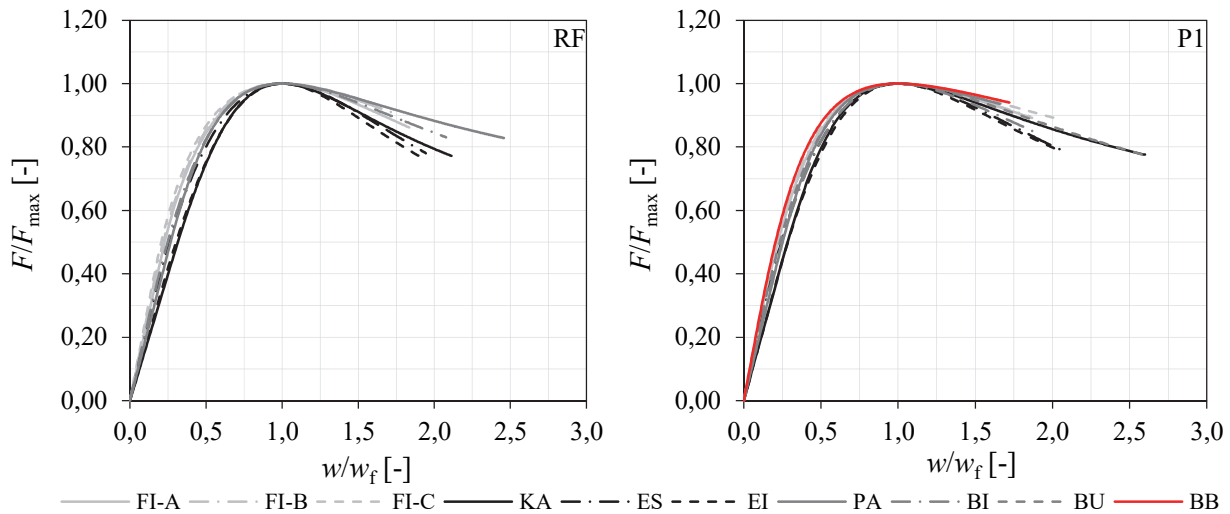


Abbildung 80: Serie 1: Mittlere relative Kraft-Weg-Kennlinien für die Holzarten bzw. Rohdichtegruppen bei einem Achs-Faserwinkel von  $\alpha = 45^\circ$  und für RF (links) und P1 (rechts)



**Abbildung 81:** Serie 1: Mittlere relative Kraft-Weg-Kennlinien für die Holzarten bzw. Rohdichtegruppen bei einem Achs-Faserwinkel von  $\alpha = 90^\circ$  und für RF (links) und P1 (rechts)

Wie in den relativen Verläufen der Kraft-Weg-Kennlinien zu erkennen ist, zeigen sich für die Laubhölzer kaum signifikante Unterschiede. Für Achs-Faserwinkel von  $0^\circ$  und  $90^\circ$ , wo auch Modelle für die Nadelhölzer erfasst wurden, zeigen diese im Vergleich zu den Laubhölzern einen schnelleren Anstieg der Kraft im Vergleich zu den Verformungen. Dies spricht für eine höhere Steifigkeit im Verhältnis zur maximalen Belastung im Vergleich zu den Laubholzarten.



## 4-3 SERIE 2: VARIATION DES EINSCHRAUBWINKELS

Neben den zu Beginn dargestellten Prüfkörpereigenschaften (Rohdichte und Holzfeuchtigkeit) werden für diese Serie die Eindrehmomente, die Ausziehfestigkeiten und die Verbindungsmittelsteifigkeiten in Abhängigkeit vom Achs-Faserwinkel untersucht. Auch eine Betrachtung des Zusammenhangs zwischen den genannten Kenngrößen und der Rohdichte für die Buche und BauBuche findet im Rahmen der Auswertung statt. Bei sämtlichen Betrachtungen erfolgt eine Trennung zwischen der Referenzschraube und dem Prototypen 1 sowie dem eingesetzten Holzprodukt (Buche-Vollholz und BauBuche).

Anmerkung: Für die nachfolgend dargestellten Prüfungen der BauBuche der Serie 2 werden beim Achs-Faserwinkel von 90° ausschließlich radial eingebrachte Schrauben geprüft.

### 4-3.1 MATERIALKENNWERTE

In den folgenden dargestellten Tabellen und Abbildungen werden die aufbereiteten statistischen Kenngrößen hinsichtlich der beobachteten Rohdichte und Holzfeuchtigkeit angeführt. Dabei kommt bereits der bereinigte Datensatz zum Einsatz. Der Ausschluss von einzelnen Prüfwerten wird erst bei der jeweiligen Auswertung berücksichtigt, weshalb diese Daten für die Materialkennwerte noch beinhaltet sind.

#### Holzfeuchtigkeit

In Tabelle 47 sind die statistischen Kennwerte für die Holzfeuchtigkeit der Prüfsérie 2 dargestellt.

*Tabelle 47: Serie 2: Holzfeuchte u in Abhängigkeit vom Holzprodukt, Achs-Faserwinkel und Schraubentyp*

Holzart bzw. Gruppe	$\alpha$	Referenzschraube (RF)					Prototyp 1 (P1)				
		<i>n</i>	mean	COV	min	max	<i>n</i>	mean	COV	min	max
		[-]	[%]	[%]	[%]	[%]	[-]	[%]	[%]	[%]	[%]
Buche	0°	22	8,50	3,5	8,06	9,05	22	9,32	2,5	9,02	9,77
	15°	19	9,88	4,2	9,21	10,7	20	10,0	4,6	9,11	11,0
	30°	20	10,0	3,3	9,29	10,7	19	9,86	3,4	9,17	10,6
	45°	19	9,57	5,1	8,53	10,3	20	9,67	4,5	8,92	10,5
	90°	20	8,32	2,8	8,04	8,82	22	9,19	3,3	8,68	10,1
BauBuche	0°	22	6,86	1,5	6,70	7,07	22	7,63	2,1	7,30	7,90
	15°	20	8,52	4,1	8,06	9,17	20	8,47	2,8	8,11	9,14
	30°	20	8,38	2,9	7,94	8,80	20	8,53	3,7	7,89	9,06
	45°	20	8,53	3,3	8,20	9,09	20	8,51	3,2	8,14	8,95
	90°	21	6,71	2,0	6,47	6,98	22	7,85	0,8	7,76	8,04

Die Mittelwerte der Holzfeuchtigkeit für die Buchen-Prüfkörper, welche von Pöll (2017) geprüft wurden (0° und 90°), kommen zwischen 8,32 % und 9,32 % zu liegen. Bei den Prüfkörpern, welche im Rahmen dieser Arbeit geprüft wurden, ist der Mittelwert der Holzfeuchte zwischen 9,57 % und 10,0 %. Auch bei den BauBuchen-Prüfkörpern stellen sich ähnliche Holzfeuchtigkeitsverhältnisse zwischen den Prüfungen von Pöll (2017) (Mittelwerte zwischen 6,86 % und 7,85 %) und den für diese Arbeit verwendeten Prüfkörpern (Mittelwerte zwischen 8,38 % und 8,53 %) ein. Die Variationskoeffizienten für die einzelnen Untergruppen liegen in einem Bereich zwischen 0,8 % und 5,1 %.

Die Abbildung 82 zeigt die in Tabelle 47 dargestellten Daten in Form eines Boxplots. Es wird neben der Auftrennung in Buche und BauBuche auch eine Unterscheidung in die verschiedenen Achs-Faserwinkel durchgeführt. Die für jeden Einschraubwinkel dargestellten beiden Plots zeigen dabei jeweils die Referenzschraube (links) und den Prototyp 1 (rechts).

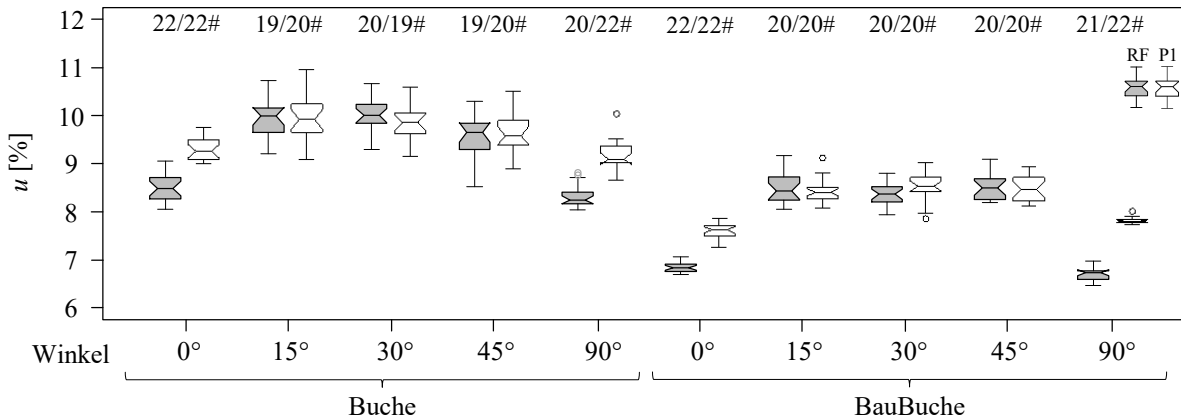


Abbildung 82: Serie 2: Boxplot Holzfeuchtigkeit  $u$  in Abhängigkeit vom Achs-Faserwinkel, Holzprodukt und Schraubentyp

Wie in der Abbildung 82 gut zu erkennen ist, stellt sich für die Buche eine grundsätzlich höhere Ausgleichsfeuchte als für das Buchen-Holzwerkstoffprodukt BauBuche ein. Außerdem ist erkennbar, dass für Einschraubwinkel von  $0^\circ$  und  $90^\circ$  bei beiden Werkstoffen die Prüfkörper nicht bis zur Massekonstanz klimatisiert wurden.

Aufgrund der fehlenden Kenntnis des exakten Einflusses der Holzfeuchtigkeit auf die nachfolgend betrachteten Kenngrößen wie das Einschraubmoment, die Ausziehfestigkeit oder die Verbindungsmittelsteifigkeit für Buche und BauBuche muss auf eine entsprechende Korrektur auf eine Referenzfeuchte verzichtet werden. Eine Korrektur wird deshalb ausschließlich für die Rohdichte (für  $u = 12\%$ ) durchgeführt.

Ein Vergleich der Ergebnisse aus den Prüfungen dieses Kapitels ist durch die ähnlichen Holzfeuchtigkeiten trotzdem möglich. Lediglich beim Vergleich der BauBuche mit den Ergebnissen von Prüfungen aus den anderen Serien (mit teilweise deutlich höherer Holzfeuchtigkeit) muss dies bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden.

## Rohdichte

Die in Tabelle 48 angegebenen Ergebnisse der Rohdichte sind auf eine Referenzholzfeuchte von  $12\%$  bezogen.

Tabelle 48: Serie 2: Rohdichte  $\rho_{12}$  in Abhängigkeit vom Holzprodukt, Achs-Faserwinkel und Schraubentyp

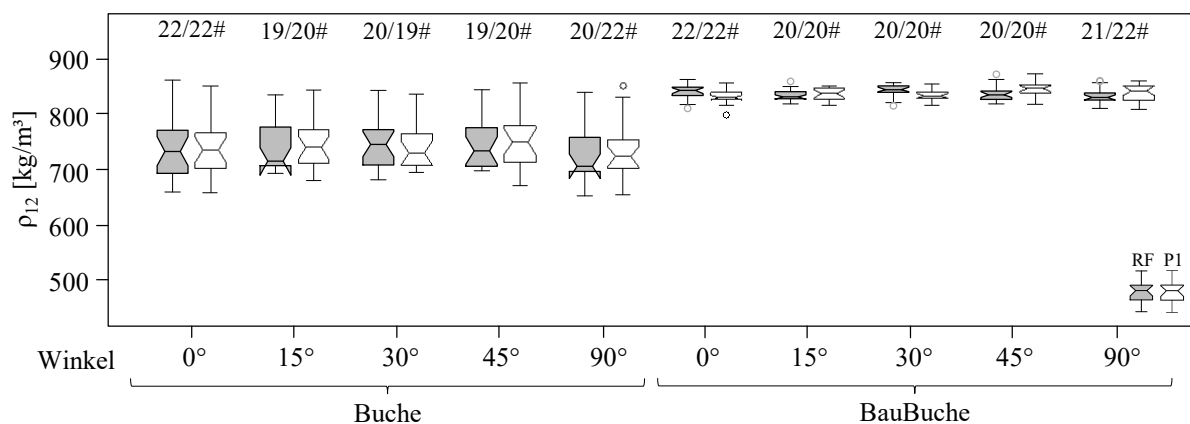
Holzart bzw. Gruppe	$\alpha$	Referenzschraube (RF)					Prototyp 1 (P1)				
		$n$	mean	COV	min	max	$n$	mean	COV	min	max
		[-]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[%]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[-]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[%]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]
Buche	$0^\circ$	22	740	7,7	660	861	22	742	7,6	660	851
	$15^\circ$	19	740	5,8	693	834	20	748	5,9	682	842
	$30^\circ$	20	748	5,9	682	843	19	742	5,6	696	835
	$45^\circ$	19	744	5,9	698	844	20	753	6,2	673	856
	$90^\circ$	20	728	6,8	654	839	22	734	7,4	657	851

<b>BauBuche</b>	<b>0°</b>	22	840	1,5	810	862	22	832	1,7	799	856
	<b>15°</b>	20	834	1,2	818	859	20	836	1,4	816	851
	<b>30°</b>	20	843	1,3	814	856	20	834	1,2	815	854
	<b>45°</b>	20	837	1,6	818	871	20	844	1,5	817	872
	<b>90°</b>	21	832	1,7	810	860	22	838	1,8	808	860

Wie der Tabelle 48 zu entnehmen ist, liegen für die Buche die Rohdichten zwischen 660 kg/m<sup>3</sup> und 861 kg/m<sup>3</sup>, wobei sich ein Mittelwert von 742 kg/m<sup>3</sup> einstellt. Die Variationskoeffizienten liegen für alle Untergruppen zwischen 5,6 % und 7,7 %.

Im Vergleich dazu zeigt sich für die BauBuche ein deutlich engerer Rohdichtebereich mit den Extremwerten von 799 kg/m<sup>3</sup> und 872 kg/m<sup>3</sup>. Der Mittelwert von 837 kg/m<sup>3</sup> weist lediglich einen Variationskoeffizienten von 1,5 % auf. Der stark eingegrenzte Rohdichtebereich der BauBuche im Vergleich zur Buche ist in der Abbildung 83 deutlich zu erkennen.

Die gleichmäßige Aufteilung der Prüfkörper auf die einzelnen Untergruppen wird in Abbildung 83 ersichtlich. Dadurch soll die Variabilität in den einzelnen Untergruppen möglichst groß, allerdings untereinander vergleichbar sein. Bei der Gegenüberstellung der Daten ist somit kein signifikanter Einfluss aufgrund unterschiedlicher Rohdichten der Untergruppen zu erwarten. Durch den sehr eingeschränkten Rohdichtebereich der BauBuche kann allerdings nicht wirklich von einer großen Variabilität ausgegangen werden. Dahingehend sei bereits an dieser Stelle angemerkt, dass Aussagen zu einem möglichen Rohdichteinfluss auf verschiedene Kenngrößen schwierig zu ermitteln bzw. mit großer Unsicherheit behaftet sind.



**Abbildung 83: Serie 2: Boxplot Rohdichte  $\rho_{12}$  in Abhängigkeit vom Achs-Faserwinkel, Holzprodukt und Schraubentyp**

Für die gesamte Serie der Variation der Einschraubwinkel kamen für die Auswertung 203 Prüfkörper aus Buche und 207 Prüfkörper aus BauBuche zum Einsatz (insgesamt 410 Prüfkörper).

### 4-3.2 AUSWERTUNG EINDREHPRÜFUNGEN

Nachfolgend sind die statistischen Kennwerte hinsichtlich der gemessenen maximalen Eindrehmomente in Tabelle 49 angeführt. Dabei wurde eine zusätzliche Bereinigung des Datensatzes, wie in Kapitel 3-3.2 beschrieben, durchgeführt. Für die aufgespaltenen Prüfkörper war eine rechts-zensierte Datenanalyse (mittels MLE) notwendig. Die daraus resultierenden Mittelwerte und Streuungen bzw. Variationskoeffizienten sind in der Tabelle in Klammer zusätzlich angeführt.

**Tabelle 49: Serie 2: maximales Eindrehmoment  $M_{max}$  in Abhängigkeit vom Holzprodukt, Achs-Faserwinkel und Schraubentyp**

Holzart bzw. Gruppe	$\alpha$	Referenzschraube (RF)					Prototyp 1 (P1)					Verhältnis mean[P1]/ mean[RF] [%]
		<i>n</i> [-]	mean [Nm]	COV [%]	min [Nm]	max [Nm]	<i>n</i> [-]	mean [Nm]	COV [%]	min [Nm]	max [Nm]	
Buche	0°	22	8,48	17,3	6,43	11,4	22	9,65	16,5	7,51	14,0	114
	15°	19	8,90	12,5	7,19	10,8	19 (20)	11,1 (11,2)	15,2 (13,9)	9,02	14,6	125
	30°	20	9,54	12,2	7,37	11,7	19	11,1	13,3	9,46	14,4	116
	45°	19	10,1	10,6	7,97	12,5	20	12,1	13,3	8,41	15,3	120
	90°	20	8,91	14,6	7,18	12,1	22	10,2	15,7	7,94	14,5	114
BauBuche	0°	22	12,4	6,5	10,5	13,7	14 (22)	13,6 (14,1)	5,7 (7,6)	12,1	15,1	110
	15°	16 (20)	10,1 (10,2)	7,3 (7,5)	8,72	11,8	10 (20)	10,1 (11,4)	4,9 (14,8)	9,41	10,9	100
	30°	20	10,3	6,5	9,10	11,6	19 (20)	11,4 (11,4)	4,3 (4,2)	10,6	12,4	111
	45°	20	10,4	3,5	9,84	11,1	19	11,7	4,3	10,9	12,5	113
	90°	21	12,7	3,5	11,6	13,5	21 (22)	15,0 (15,0)	5,4 (5,3)	13,4	16,4	119

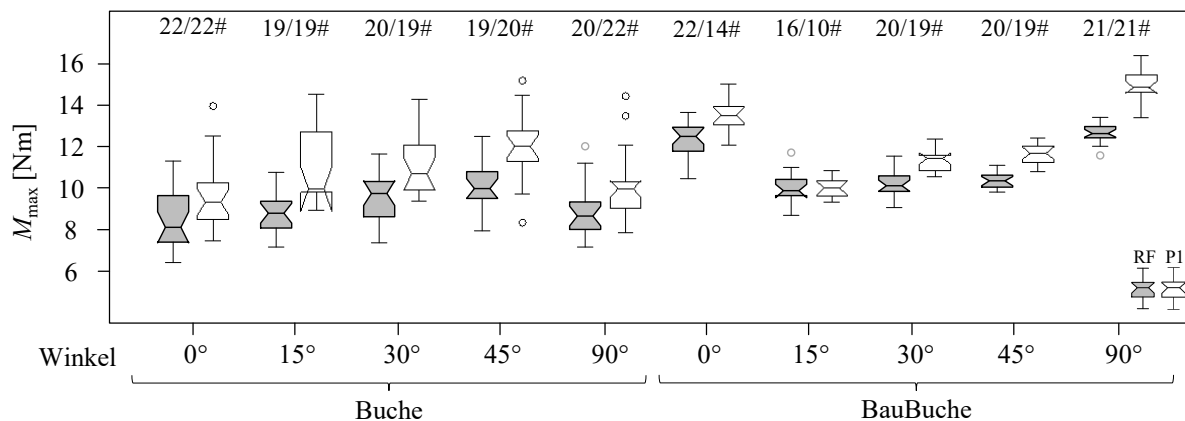
Die Mittelwerte der maximalen Eindrehmomente der Buche zeigen für RF und P1 kaum eine Änderung bei variierendem Achs-Faserwinkel (alle Werte für RF zwischen 8,48–10,1 Nm und für P1 zwischen 9,65–12,1 Nm). Die Maximalwerte treten allerdings sowohl für die RF als auch für den P1 bei einem Einschraubwinkel von 45° auf. Die Variationskoeffizienten liegen für die Buche zwischen 10,6 % und 17,3 %.

Die Mittelwerte der maximalen Einschraubmomente sind für die BauBuche bei Einschraubwinkeln von 15°, 30° und 45° für RF und P1 nahezu gleich jenen der Buche. Wie in Kapitel 4-1.2 erläutert wird, kommt es bei diesen Prüfungen bereits zum maximalen Eindrehmoment bei einer Einschraubtiefe von 30–35 mm. Die eventuell in weiterer Folge auftretende Rissbildung zufolge lokalen Rollschubversagens sorgt dafür, dass die Eindrehmomente in der BauBuche bei Einschraubwinkeln von 15°, 30° und 45° lediglich auf dem Niveau der Buche liegen. Die Zunahmen, welche aufgrund der vergleichsweise höheren Rohdichte der BauBuche zu erwarten wäre, stellen sich somit nicht ein. Lediglich für die beiden Grenzfälle der Einschraubwinkel bei 0° und 90° zeigen sich die erwarteten, deutlich höheren maximalen Einschraubmomente (12,4–15,0 Nm), welche nur bedingt auf die vorhin erwähnte, geringere Holzfeuchte zurückzuführen sind. Insgesamt liegen die Variationskoeffizienten der empirischen Prüfdaten der BauBuche zwischen 3,5 % und 7,3 % und somit deutlich unter jenen der Buche.

Es kann die Zunahme der Eindrehmomente für den Prototyp 1 im Vergleich zur Referenzschraube mit durchschnittlich 14 % angegeben werden. Der Unterschied der Eindrehmomente zwischen der Buche und BauBuche fällt bei Achs-Faserwinkeln von 0° und 90° bedeutend stärker aus (ca. 44 %) als bei den restlichen Winkeln, bei denen kein Unterschied erkennbar ist; vor allem aufgrund der vorher beschriebenen Beobachtungen.

Die Aufspaltung der Prüfkörper trat in den meisten Fällen kurz vor dem Austreten der Schraubenspitze an der Unterseite des Holzkörpers auf. Vereinzelt wurden in BauBuchen-Prüfkörpern allerdings auch Aufspaltungen bereits bei geringen Einschraubtiefen beobachtet.

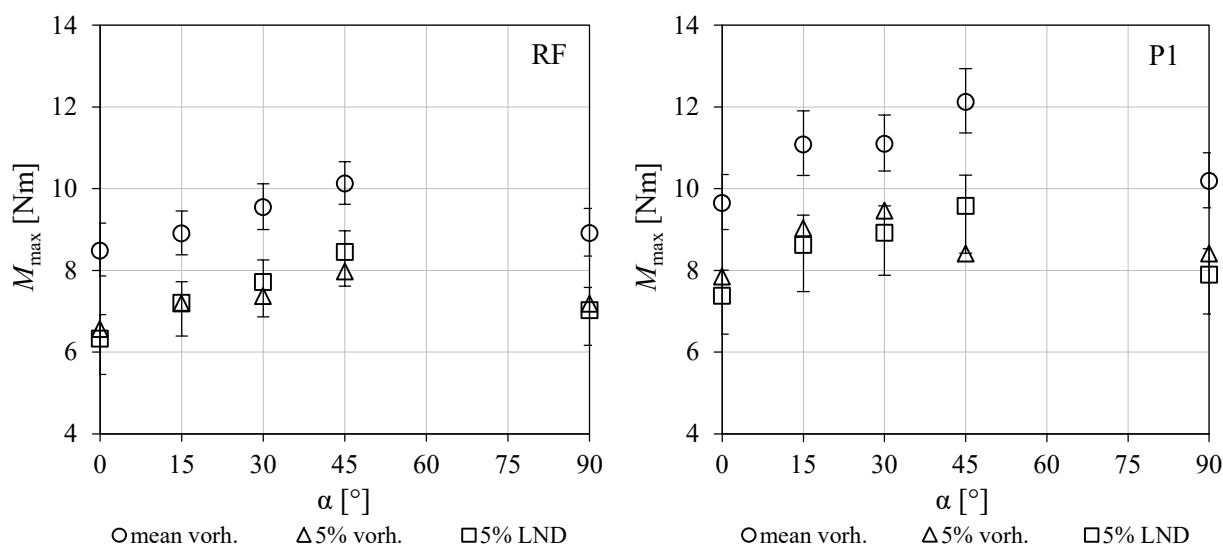
In der nachfolgenden Abbildung 84 sind die in den Prüfungen ermittelten Daten (ohne MLerc), welche auch in Tabelle 49 angegeben sind, durch Boxplots dargestellt. Es sind darin die beschriebenen Ausführungen gut zu erkennen.



**Abbildung 84:** Serie 2: Boxplot maximales Eindrehmoment  $M_{max}$  in Abhängigkeit vom Achs-Faserwinkel, Holzprodukt und Schraubentyp

In der Abbildung 85 ist das maximale Eindrehmoment für die Referenzschraube (links) und den Prototyp 1 (rechts) bei unterschiedlichen Einschraubwinkeln für die Buche dargestellt. Dabei ist gut zu erkennen, dass sich bei einem Einschraubwinkel von 45° für die RF und den P1 die maximalen Einschraubmomente ergeben. Im Gegensatz dazu zeigt sich für die BauBuche (siehe Abbildung 86) das maximale Einschraubmoment bei Einschraubwinkeln von 0° und 90°. Diese Eindrehmomente kommen auch deutlich über jenen der anderen Achs-Faserwinkeln zu liegen.

Anmerkung: Die Balken zu den jeweiligen Mittelwerten und den 5 %-Quantilen stellen in den gezeigten Abbildungen die Konfidenzintervalle (CI) für ein Signifikanzniveau von 5 % dar.



**Abbildung 85:** Serie 2:  $M_{max}$  vs.  $\alpha$  für die Buche für RF (links) und P1 (rechts)

Um für die Abhängigkeit des Eindrehmomentes vom Einschraubwinkel eine quantitative Beziehung angeben zu können, wären, wie in den Abbildungen 85 und 86 ersichtlich, noch zusätzliche Untersuchungen mit variierenden Einschraubwinkeln erforderlich.

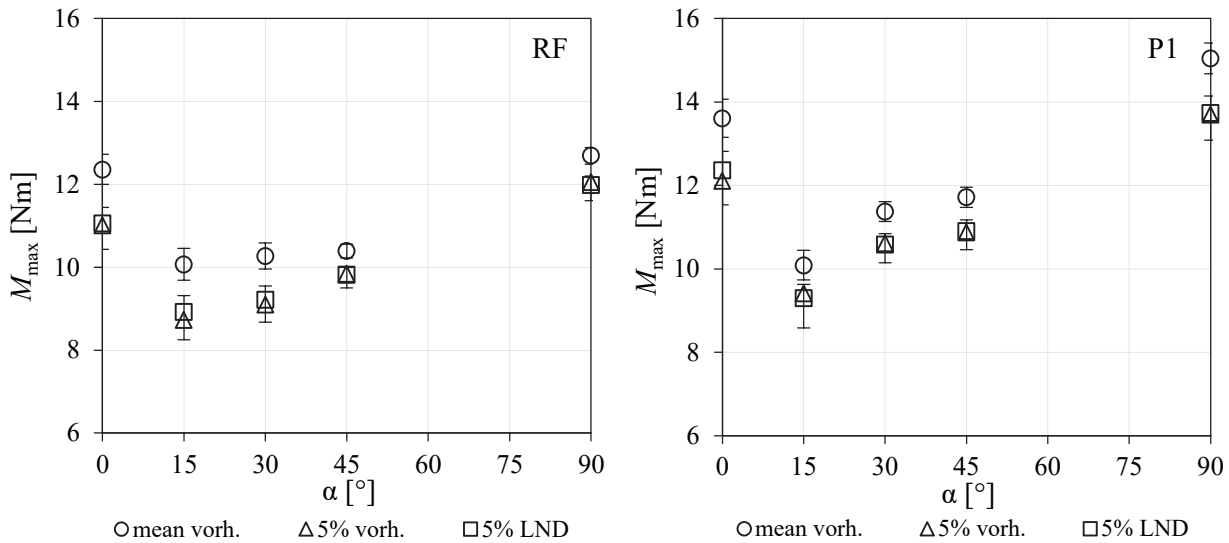


Abbildung 86: Serie 2:  $M_{max}$  vs.  $\alpha$  für die BauBuche für RF (links) und P1 (rechts)

In der Tabelle 50 sind die Potenzfaktoren, welche sich aus einer Regressionsrechnung mit einer Potenzfunktion für die Rohdichte ergeben, dargestellt (gleich wie für die Prüfserie 1, allerdings ausschließlich auf Basis der Einzelprüfergebnisse). Es sei darauf hingewiesen, dass die betreffenden Werte für die BauBuche aufgrund ihres extrem begrenzten Rohdichtebereiches der Prüfkörper nur eine beschränkte Aussagekraft und Stabilität aufweisen. So ist es durchaus realistisch, dass die lokale Rohdichte um den Schraubkanal eine größere Abweichung von der ermittelten Rohdichte zeigt als für die Streuung aller Prüfkörper untereinander ermittelt wurde.

Tabelle 50: Serie 2: Potenzfaktoren der Rohdichte für das maximale Eindrehmoment  $M_{max}$  in Abhängigkeit vom Holzprodukt, Achs-Faserwinkel und Schraubentyp

Holzart bzw. Holzprodukt	$\alpha$	$M_{max}$ vs. $\rho_{12}$		
		RF	P1	RF & P1
Buche	0°	1,95	1,90	1,93
	15°	1,51	1,98	1,93
	30°	1,58	2,00	1,65
	45°	0,95	1,73	1,55
	90°	1,97	2,01	2,05
BauBuche	0°	1,49	1,18	0,14
	15°	-0,10	1,36	0,56
	30°	1,58	1,39	-0,06
	45°	1,10	0,56	2,06
	90°	0,81	2,13	2,79

Wie der Tabelle 50 zu entnehmen ist, kommt es für die Buche zu einem relativ stabilen Potenzfaktor in der Größenordnung von 1,51 bis 2,05. Lediglich für einen Achs-Faserwinkel von 45° für die Referenzschraube führt die Regression zu einem vom Mittel stärker abweichenden Potenzfaktor von 0,95. Ein allgemeiner deutlicher Einfluss des Einschraubwinkels kann nicht festgestellt werden. Die Potenzfaktoren sind ähnlich jenen der zerstreutporigen Hölzer der Serie 1 (siehe Kapitel 4-2.2).



Für die BauBuche resultieren im Durchschnitt etwas geringere Potenzfaktoren bei getrennter Betrachtung der einzelnen Schraubentypen als bei der Buche (0,56–1,58; mit der Ausnahme von RF bei 15° und P1 bei 90°). Bei der Bestimmung der Potenzfunktion für die Prüfdaten aus der RF und den P1 gemeinsam zeigt sich bis zu einem Einschraubwinkel von 30° kein oder nur ein geringer Einfluss der Rohdichte auf das Eindrehmoment. Für Achs-Faserwinkel von 45° und 90° kommt es hingegen zu sehr hohen Potenzfaktoren. Dieser markante Unterschied sollte allerdings auf den vorhin erwähnten Effekt zurückzuführen sein, dass einzelne oder wenige Furnierschichten, in welchen das Schraubengewinde zu liegen kommt, eine gänzlich andere Rohdichte aufweisen können als dies für den gesamten Prüfkörper der Fall ist. Mit zunehmendem Einschraubwinkel steigt bei der BauBuche auch die Anzahl der durchtrennten Furnierschichten und es kommt zu einer zunehmenden Homogenisierung.

### 4-3.3 AUSWERTUNG AUSZIEHPRÜFUNGEN

Von den im Rahmen der Ausziehprüfungen ermittelten Werten sind vor allem die Ausziehfestigkeit  $f_{ax}$  und die Steifigkeit  $K_{ser}$  für die nachfolgende Darstellung von Bedeutung. Die folgenden Tabellen 51 und 54 mitsamt den dazugehörigen Abbildungen 87 bis 93 zeigen die ermittelten statistischen Kenngrößen hinsichtlich dieser beiden Parameter. Im Speziellen wird in diesem Kapitel die Abhängigkeit der beiden Kenngrößen vom Einschraubwinkel betrachtet. In weiterer Folge werden auch noch die Abhängigkeiten von der Rohdichte ermittelt. Im Zuge der Ausziehprüfungen trat kein unerwarteter Versagensfall ein, weshalb keine rechts-zensierte Datenanalyse notwendig war.

#### Ausziehfestigkeit

In Tabelle 51 sind Prüfkörperanzahl, Mittelwert, Variationskoeffizienten und Extremwerte für die Ausziehfestigkeiten der jeweiligen Untergruppen der Prüfserie 2 angegeben. In der nachfolgenden Abbildung 87 sind die Prüfwerte in Boxplots dargestellt.

**Tabelle 51:** Serie 2: Ausziehfestigkeit  $f_{ax}$  in Abhängigkeit vom Holzprodukt, Achs-Faserwinkel und Schraubentyp

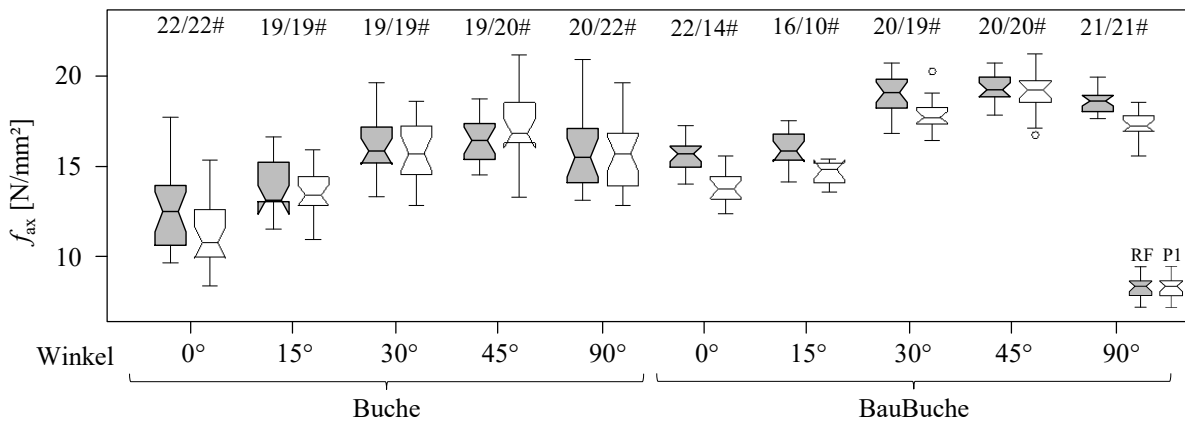
Holzart bzw. Gruppe	$\alpha$	Referenzschraube (RF)					Prototyp 1 (P1)					Verhältnis mean[P1]/ mean[RF] [%]
		$n$ [-]	mean [Nm]	COV [%]	min [Nm]	max [Nm]	$n$ [-]	mean [Nm]	COV [%]	min [Nm]	max [Nm]	
Buche	0°	22	12,6	17,4	9,57	17,7	22	11,2	17,0	8,38	15,3	89
	15°	19	14,0	10,5	11,5	16,6	19	13,6	9,9	11,0	15,9	97
	30°	19	16,2	9,9	13,3	19,6	19	15,8	11,0	12,8	18,6	98
	45°	19	16,4	7,9	14,5	18,7	20	17,2	10,9	13,3	21,1	105
	90°	20	15,8	13,4	13,1	20,9	22	15,7	13,1	12,8	19,6	99
BauBuche	0°	22	15,6	5,4	14,0	17,2	14	13,9	6,7	12,4	15,6	89
	15°	16	15,9	5,7	14,1	17,5	10	14,6	4,6	13,6	15,4	92
	30°	20	18,9	5,6	16,8	20,7	19	17,9	5,0	16,4	20,2	94
	45°	20	19,3	3,9	17,8	20,7	20	19,1	5,8	16,7	21,2	99
	90°	21	18,5	3,7	17,6	19,9	21	17,2	4,2	15,6	18,5	93

Wie aus den Ergebnissen der Tabelle 51 zu entnehmen ist, zeigen die in Kapitel 4-1.2 erläuterten Risse infolge eines lokalen Rollschubversagens, welche bei Einschraubwinkeln von 15° und 30° im Zuge des Applikationsvorganges in der BauBuche entstehen, die folgende Auswirkungen:

Bei einem Achs-Faserwinkel von 30° zeigt sich für keine derartige Untergruppe ein signifikanter Abfall der Ausziehfestigkeit im Vergleich zu den Prüfungen mit Achs-Faserwinkeln von 45° und 90°. Eine Schädigung des Holzes durch die feinen Risse kann daher nicht bestätigt werden. Auch ein mögliches Risswachstum, welches unter Belastung zu einem Aufspalten des Holzes führen kann (Blaß und Uibel, 2009), war nicht zu beobachten.

Für Achs-Faserwinkel von 15° wird bereits ein signifikanter Abfall der Ausziehfestigkeit festgestellt. Dieser ist allerdings nicht ausschließlich durch die Risse bedingt, sondern wird auch von der generellen Winkelabhängigkeit der Ausziehfestigkeiten beeinflusst; dieser Abfall der Ausziehfestigkeit tritt auch in der Buche, wo keine Risse infolge der Applikation zu erkennen waren, auf.

Die in Abbildung 87 dargestellten Boxplots zeigen die Ausziehfestigkeiten der Buche und BauBuche bei unterschiedlichen Achs-Faserwinkeln zwischen 0° und 90°.



**Abbildung 87: Serie 2: Boxplot Ausziehfestigkeit  $f_{ax}$  in Abhängigkeit vom Achs-Faserwinkel, Holzprodukt und Schraubentyp**

Die gemittelten Ausziehfestigkeiten für beide Schraubentypen über alle Einschraubwinkel liegen entsprechend Tabelle 51 für die Buche zwischen 11,2 N/mm<sup>2</sup> und 17,2 N/mm<sup>2</sup> und für BauBuche zwischen 13,9 N/mm<sup>2</sup> und 19,3 N/mm<sup>2</sup>. Die Minimalwerte treten dabei sowohl in der Buche als auch in der BauBuche bei einem Einschraubwinkel von 0° auf. Die Maximalwerte werden jeweils bei einem Einschraubwinkel von 45° erzielt. Die Variationskoeffizienten der Ausziehfestigkeiten der Buche liegen für die unterschiedlichen Versuchsgruppen zwischen 7,9 % und 17,4 %. Für die BauBuche zeigt sich eine geringere Bandbreite des Variationskoeffizienten von 3,7 % bis 6,7 %.

Wie der Abbildung 87 zu entnehmen ist, kommen die Ausziehfestigkeiten für die Referenzschraube und den Prototyp 1 bei der Buche unabhängig vom Einschraubwinkel (ausgenommen 0°) auf demselben Niveau zu liegen. Für einen Einschraubwinkel von 0° ist in der Buche ein Abfall von 11 % für den Prototyp 1 zu erkennen. In der BauBuche hingegen zeigt sich, mit der Ausnahme bei einem Einschraubwinkel von 45°, durchgehend eine geringere Ausziehfestigkeit des Prototypen 1 im Vergleich zur RF (zwischen 5,7 % und 11,0 %). Bei einem Achs-Faserwinkel von 45° zeigt sich in der Buche sogar eine höhere und in BauBuche eine gleich große Ausziehfestigkeit des Prototypen 1 verglichen mit der Referenzschraube.

Das in Kapitel 4-1.2 beschriebene Versagensverhalten spiegelt sich auch in den Ergebnissen der Ausziehfestigkeiten wider. So sind vor allem für die BauBuche die Ausziehfestigkeiten für Einschraubwinkel von 0° und 15° annähernd auf demselben Niveau. Auch für Einschraubwinkel von 30° ist im Vergleich zu 45° weder in der Buche noch in der BauBuche ein Abfall der Ausziehfestigkeit zu erkennen.

Wie bereits in der Serie 1 festgestellt, resultiert aus dem Abfall der Ausziehfestigkeit für den P1 im Vergleich zur RF bei einem Einschraubwinkel von 0° ein etwas höherer Wert für  $k_{90}$  für die Prototypschraube im Vergleich zur Referenzschraube. In der nachfolgenden Tabelle 52 sind die  $k_{90}$ -Werte für die Prüfschraube 1 und 2 auf Basis der Mittelwerte zusammengefasst.

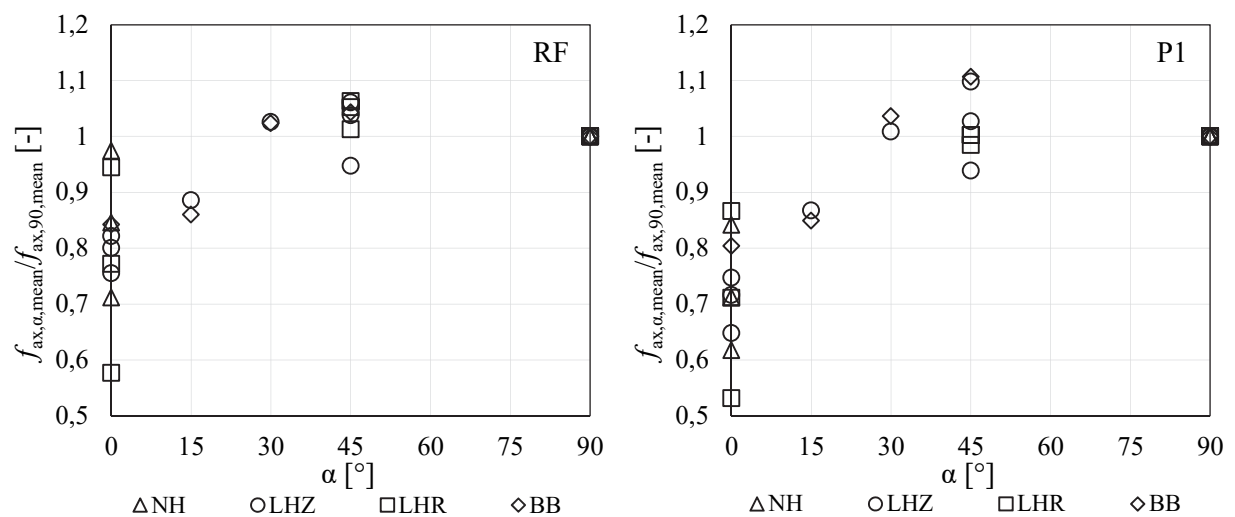
**Tabelle 52:**  $k_{90}$ -Werte für die unterschiedlichen Holzarten bzw. Rohdichtegruppen für die RF und den P1

		Nadelhölzer			ringporige Laubhölzer			zerstreutp. Laubhölzer			EWP
		FI-A	FI-B	FI-C	KA	ES	EI	PA	BI	BU	BB
$k_{90}$	RF	1,03	1,41	1,18	1,30	1,06	1,73	1,22	1,32	1,25	1,19
	P1	1,19	1,62	1,40	1,41	1,15	1,88	1,34	1,54	1,40	1,24

Zum Vergleich ist der Wert für  $k_{90}$  in der ÖNORM EN 1995-1-1 (2015) für axial belastete Schrauben mit 1,2 festgelegt. Dieser für Nadelholz normierte Wert stimmt auch mit dem Mittelwert der aus den Fichtenprüfungen ermittelten  $k_{90}$ -Werte für die Referenzschraube überein.

Wie von Ringhofer (2017) in den Ergebnissen seiner Nadelholzprüfungen (Fichte; *Picea abies* Karst.) beobachtet werden konnte, geht mit steigender Rohdichte auch eine Zunahme des  $k_{90}$ -Faktors einher. Dieser Effekt kann auf Basis der Ergebnisse, welche im Rahmen der hier durchgeführten Prüfungen resultieren, nicht eindeutig bestätigt werden. Ein einheitlicher Trend der  $k_{90}$ -Faktoren bei steigenden Rohdichten für die jeweiligen holzanatomischen Gruppen ist nicht erkennbar.

Wie in der Abbildung 88 zu erkennen ist, kommt es für das Verhältnis der mittleren Ausziehfestigkeiten bei unterschiedlichen Einschraubwinkeln ( $f_{ax,\alpha,mean}$ ) mit der Ausziehfestigkeit bei einem Einschraubwinkel von  $90^\circ$  ( $f_{ax,90,mean}$ ) zu stark streuenden Werten. Eindeutig erkennbar ist dabei für den Prototyp 1 bei einem Einschraubwinkel von  $0^\circ$  eine Verschiebung der Verhältniszahlen zu geringeren Werten im Vergleich zur Referenzschraube. Diese Verschiebung resultiert aus der Abnahme der Ausziehfestigkeiten des P1 bei einem Einschraubwinkel von  $0^\circ$  im Vergleich zur RF. Die weiteren Verhältniszahlen (für Einschraubwinkel von  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ) liegen für den P1 und die RF auf sehr ähnlichem Niveau. Jedoch lässt sich für beide Schraubentypen bis zu einem Achs-Faserwinkel von größer  $30^\circ$  ein nahezu konstanter Wert für  $k_{ax}$  von 1,0 erkennen.



**Abbildung 88:** Serie 2: Verhältnisse der Ausziehfestigkeit  $f_{ax,\alpha,mean}$  zu  $f_{ax,90,mean}$  für RF (links) und P1 (rechts)

Zur Bestimmung einer Funktion, welche die Ausziehfestigkeit in Abhängigkeit vom Einschraubwinkel beschreibt, werden nachfolgend ausschließlich die Prüfergebnisse der Buche und BauBuche herangezogen. In den Abbildungen 89 und 90 sind die Mittelwerte und die 5%-Quantile (sowohl unter Annahme von LND als auch empirisch aus den Prüfdaten bestimmt) der Prüfungen angegeben. Zusätzlich werden die mit dem Modell von Hübner (2013b) für das Niveau der Mittelwerte und der 5%-Quantile abgeschätzten Ausziehfestigkeiten eingetragen (vgl. Gleichungen (2.17) und (2.18) in Kapitel 2-4.3). Für den Einfluss des Achs-Faserwinkels auf die Ausziehfestigkeit wird von Hübner (2013b) dabei ein bilineares Modell vorgeschlagen, welches sich für die Kurzzeitfestigkeiten (ohne Berücksichtigung des DoL-Effekts für  $\alpha = 0^\circ$ ) wie folgt zusammensetzt:

$$k_{ax} = \begin{cases} 1 - 0,006 \cdot (30 - \alpha) & 0^\circ \leq \alpha < 30^\circ \\ 1,00 & 30^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ \end{cases} \quad (4.1)$$

$k_{ax}$  Faktor zur Beschreibung der Ausziehfestigkeit in Abhängigkeit vom Achs-Faserwinkel [-]  
 $\alpha$  Achs-Faserwinkel [°]

In Anlehnung an dieses Modell und aufgrund des Verlaufes der ermittelten Prüfdaten bei verschiedenen Einschraubwinkeln (siehe Abbildung 88) wird ebenso ein bilinearer Ansatz für die Beschreibung des Einflusses des Einschraubwinkels für die Buche und BauBuche gewählt (Modell ist dabei an die Mittelwerte angepasst). Für die konstant angenommene Ausziehfestigkeit zwischen den Einschraubwinkeln von 30° und 90° wird dabei die Ausziehfestigkeit bei 90° als Referenz verwendet. In weiterer Folge kommt es bei einem Einschraubwinkel von 30° zu einem Knick und anschließendem Abfall. Dieser Abfall wird für einen Achs-Faserwinkel von 0° bei der Buche und BauBuche identisch mit 75 % der Ausziehfestigkeit bei einem Einschraubwinkel von 90° angenommen. Der damit einhergehende Wert für  $k_{90}$  von 1,33 deckt sich mit dem von Fairchild (1926) vorgeschlagenen Wert für Laubhölzer. Aus der beschriebenen Charakteristik resultiert der in Gleichung (4.2) dargestellte Verlauf für  $k_{ax}$ .

$$k_{ax} = \begin{cases} 1 - 0,00833 \cdot (30 - \alpha) & 0^\circ \leq \alpha < 30^\circ \\ 1,00 & 30^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ \end{cases} \quad (4.2)$$

$k_{ax}$  Faktor zur Beschreibung der Ausziehfestigkeit in Abhängigkeit vom Achs-Faserwinkel [-]  
 $\alpha$  Achs-Faserwinkel [°]

Der Verlauf der Ausziehfestigkeiten in Abhängigkeit vom Achs-Faserwinkel durch das vorgeschlagene Modell in der Gleichung (4.2) ist in den Abbildungen 89 und 90 dargestellt. Für das 5 %-Quantil wird für Einschraubwinkel zwischen 30° und 90° von einem konstanten Variationskoeffizient von 10 % für die Buche und 5 % für die BauBuche ausgegangen. Für Einschraubwinkel von 0° kommt es jeweils zu einer höheren Streuung, weshalb die COV für Buche mit 15 % und für die BauBuche mit 6 % aufgrund der Prüfdaten ausgewählt werden (entsprechen den jeweiligen Mittelwerten).

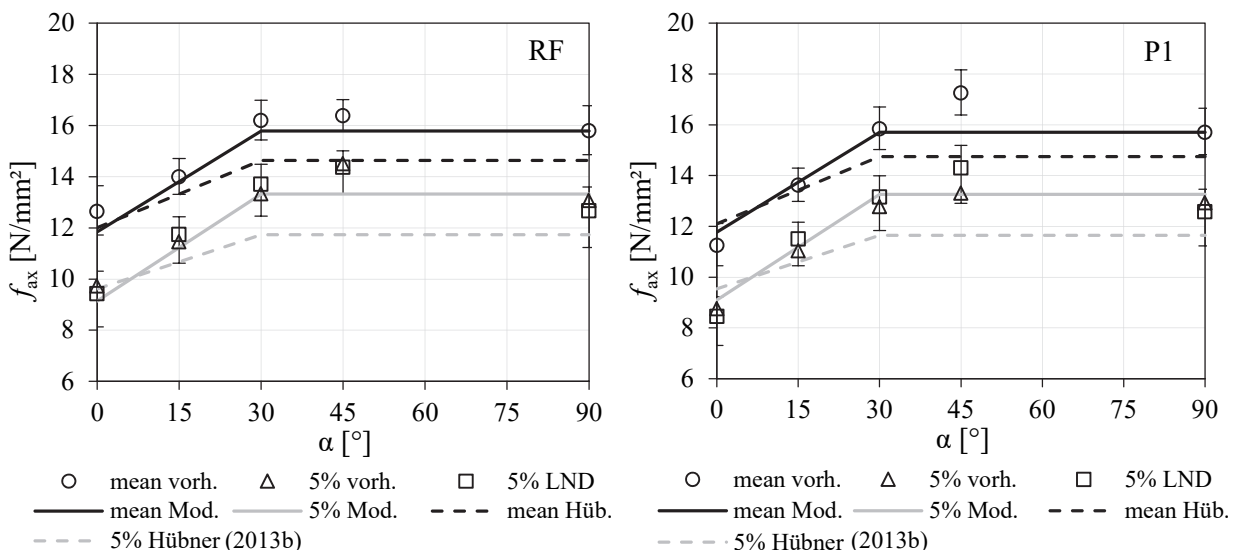


Abbildung 89: Serie 2:  $f_{ax}$  vs.  $\alpha$  für die Buche für RF (links) und P1 (rechts)

Wie sich in der Abbildung 89 zeigt, beschreibt das Modell nach Gleichung (4.2) den Verlauf der Ausziehfestigkeiten bei unterschiedlichen Einschraubwinkeln aufgrund der Festlegung auf Basis dieser Daten sehr gut. Die Werte aus dem Modell (Mittelwert und 5 %-Quantil) kommen immer (Ausnahme bei P1 45°, dort allerdings unterhalb der tatsächlichen Ausziehfestigkeit) innerhalb des Konfidenzintervalls zu liegen.

Im Allgemeinen zeigen die Ergebnisse des Bemessungsmodells von Hübner (2013b) für Einschraubwinkel bis ca. 8°, sowohl auf dem Niveau der Mittelwerte als auch für das 5 %-Quantil, geringere Ausziehfestigkeiten als im Rahmen dieser Prüfungen ermittelt wurden. Für flache Achs-Faserwinkel (unter 8°) wurden allerdings in den Prüfungen Ausziehfestigkeiten ermittelt, welche unterhalb jenen des Bemessungsmodelles von Hübner (2013b) liegen.

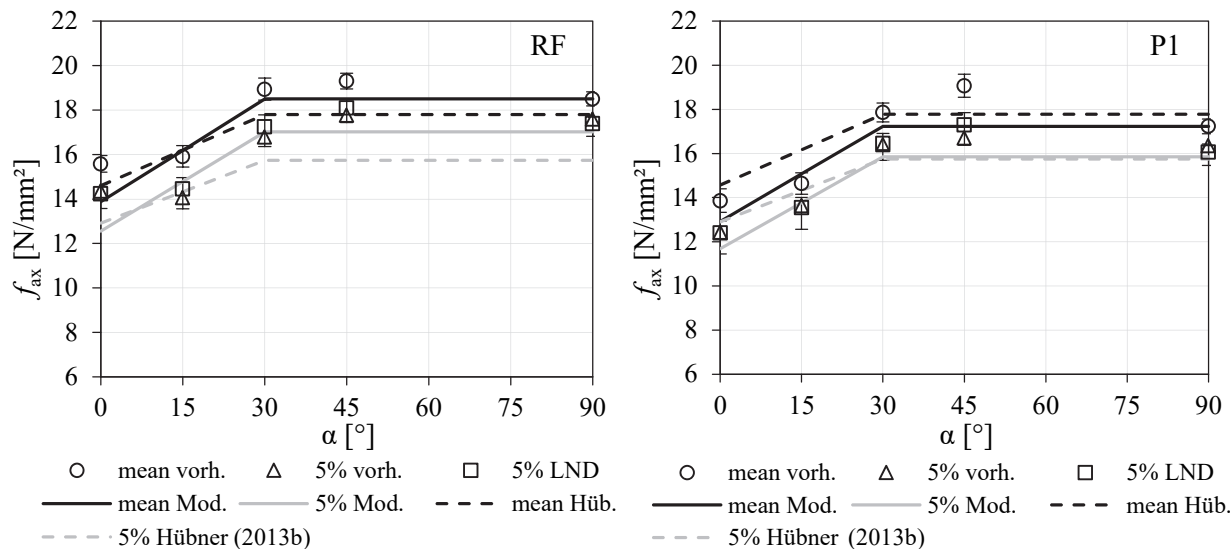


Abbildung 90: Serie 2:  $f_{ax}$  vs.  $\alpha$  für die BauBuche für RF (links) und P1 (rechts)

Vor allem aufgrund der BauBuche, bei welcher die Ausziehfestigkeit bei einem Einschraubwinkel von 15° bereits annähernd auf dem Niveau von 0° liegt, musste die Neigung des abfallenden Astes entsprechend steiler gewählt werden. Es kommt dadurch allerdings zu einer Unterschätzung der Ausziehfestigkeit bei einem Achs-Faserwinkel von 0°. Trotzdem wurde der Einfachheit halber lediglich eine bilineare Funktion verwendet, anstatt einer noch besser passenden trilinearen Funktion. Somit liegen die nach dem Modell ermittelten Ausziehfestigkeiten allesamt innerhalb oder über den aus den Prüfungen ermittelten Prüfergebnissen bzw. deren Konfidenzintervalle. Für den Achs-Faserwinkel von 15° kann ein Einfluss der Risse infolge der hohen Rollschubbeanspruchung, welche im Zuge des Eindrehvorganges (siehe Kapitel 4-1.2) entstehen, auf die Ausziehfestigkeit nicht ausgeschlossen werden.

Das Modell von Hübner (2013b) liegt für den Prototyp 1 in der BauBuche, welcher in den Prüfungen etwas geringere Ausziehfestigkeiten als die RF erreichen konnte, sogar etwas über den ermittelten Mittelwerten (siehe Abbildung 90 rechts). Durch die geringere Streuung der BauBuche im Vergleich zu den Messdaten von Hübner (2013b) ist die 5 %-Quantile jedoch wiederum nahezu identisch mit dem vorgeschlagenen Modell. Für Achs-Faserwinkel von 0° tritt sowohl für die RF als auch für den P1 neuerlich eine Überschätzung der Ausziehfestigkeiten auf. Die Ausziehfestigkeiten der Referenzschraube in der BauBuche liegen hingegen über jenen, welche das Modell nach Hübner (2013b) ermitteln würde (Ausnahme wiederum bei 0°).

Allgemein kann festgehalten werden, dass das Modell von Hübner (2013b) grundsätzlich sehr gut mit den ermittelten Prüfergebnissen in der Buche und BauBuche übereinstimmt. Die in dessen Prüfungen eingesetzten Schrauben mit einem Gewindeaußendurchmesser von 8 mm sind dabei den Referenzschrauben sehr ähnlich. Es kommt zu maximalen Abweichungen von 10 %, bei welchen allerdings die Prüfergebnisse höher ausfallen als das Modell angibt. Für einen Einschraubwinkel von 0° tritt allerdings durchgehend eine geringe Überschätzung der Tragfähigkeit auf. Dieser Effekt wird in weiteren Modellen, wie in Hübner (2013a) angeführt, durch einen darin beschriebenen stärkeren Abfall ( $f_{ax,0,mean}/f_{ax,90,mean} = 0,70$ ) bei einem Einschraubwinkel von 0° bereits kompensiert. Diese Modelle wurden nicht zum Vergleich herangezogen, da Hübner (2013a) darin bereits eine entsprechende Langzeitwirkung berücksichtigt und deshalb nicht die Regression der Kurzzeitprüfungen darstellt.

In der Tabelle 50 sind die Potenzfaktoren, welche sich für die Prüfwerte mittels LSM einer Potenzfunktion der Rohdichte ergeben, zusammengefasst. Wie im vorherigen Abschnitt 4-2.3 ist vor allem für die BauBuche aufgrund des begrenzten Rohdichtebereiches auf die dadurch resultierenden Streuungen der Potenzfaktoren hinzuweisen.

**Tabelle 53: Serie 2: Potenzfaktoren der Rohdichte für die Ausziehfestigkeit  $f_{ax}$  in Abhängigkeit vom Holzprodukt, Achs-Faserwinkel und Schraubentyp**

Holzart bzw. Holzprodukt	$\alpha$	$f_{ax}$ vs. $\rho_{12}$		
		RF	P1	RF & P1
Buche	0°	1,90	1,87	1,88
	15°	1,61	1,07	1,30
	30°	1,35	1,69	1,52
	45°	1,14	1,47	1,36
	90°	1,82	1,60	1,69
BauBuche	0°	0,67	3,99	2,80
	15°	0,72	0,87	0,96
	30°	-0,14	0,84	1,05
	45°	0,45	-0,72	-0,22
	90°	1,87	1,69	1,16

Wie der Tabelle 53 zu entnehmen ist, kommt es für die Buche zu einem relativ stabilen Bereich des Potenzfaktors zwischen 1,07 und 1,90. Auch der Vergleich der Potenzfaktoren für die RF und den P1 zeigt größtenteils sehr ähnliche Werte. Ein eindeutiger Einfluss des Einschraubwinkels auf die Potenzfaktoren kann nicht festgestellt werden. Im Vergleich zu den Potenzfaktoren für die holzanatomische Gruppe der zerstreutporigen Laubhölzer der Serie 1 (siehe Kapitel 4-2.3) liegen diese allesamt im für die Holzart Buche ermittelten Bereich.

Für die BauBuche resultieren Potenzfaktoren zwischen -0,22 und 3,99. Die damit verbundenen Bestimmtheitsmaße sind auf so niedrigem Niveau, dass an dieser Stelle eine Aussage über einen möglichen Rohdichteinfluss nicht mehr sinnvoll erscheint.



## Steifigkeit

In Tabelle 54 sind die für die Auswertung wesentlichen Werte der Steifigkeiten für die Untergruppen der Prüfsérie 2 angegeben.

**Tabelle 54: Serie 2: Steifigkeit  $K_{ser}$  in Abhängigkeit vom Holzprodukt, Achs-Faserwinkel und Schraubentyp**

Holzart bzw. Gruppe	$\alpha$	Referenzschraube (RF)					Prototyp 1 (P1)					Verhältnis mean[P1]/ mean[RF] [%]
		n	mean [N/mm]	COV [%]	min [N/mm]	max [N/mm]	n	mean [N/mm]	COV [%]	min [N/mm]	max [N/mm]	
Buche	0°	–	–	–	–	–	22	45.416	11,0	37.363	52.967	–
	15°	19	39.578	8,4	31.549	45.300	19	47.830	11,5	37.634	56.467	121
	30°	19	39.829	9,4	32.756	48.867	19	47.995	9,9	37.361	55.681	121
	45°	19	35.684	8,7	31.027	42.551	20	43.372	9,9	35.134	50.953	122
	90°	–	–	–	–	–	21	53.270	11,0	42.716	67.178	–
BauBuche	0°	–	–	–	–	–	13	45.365	12,8	37.034	57.185	–
	15°	15	36.794	6,2	32.061	41.032	9	40.713	10,2	35.823	47.661	111
	30°	20	36.458	10,5	29.915	45.270	19	38.590	9,7	32.044	48.371	106
	45°	20	32.337	10,6	22.796	36.545	20	37.732	5,7	34.609	40.976	117
	90°	–	–	–	–	–	21	42.806	7,7	35.423	47.501	–

Da für Einschraubwinkel von 0° und 90° keine Werte für die Steifigkeiten der Referenzschraube vorliegen, ist nur für den Prototypen 1 eine vollständige Beschreibung der Steifigkeiten bei den unterschiedlichen Achs-Faserwinkeln möglich.

Für die Einschraubwinkel von 15°, 30° und 45° ergeben sich für den Prototyp 1 um 21,0 % für die Buche und um 11,1 % für die BauBuche höhere Steifigkeiten als für die Referenzschraube. Dieser Anstieg ist dabei vor allem auf die größere Steifigkeit der Schraube selbst zufolge ihres größeren Gewindekernquerschnittes zurückzuführen (siehe Kapitel 4-2.3). Anders als aus den Ergebnissen der Serie 1 anzunehmen wäre, wo die Steifigkeiten der Laubhölzer mit steigender Rohdichte zunehmen, zeigt sich dieses Verhalten beim Vergleich der Buche mit der BauBuche nicht. Die BauBuche weist für die RF sogar um 8,3 % und für den P1 um 13,5 % geringere Steifigkeiten als die Buche auf.

Die Steifigkeiten der Referenzschrauben (nur 15°, 30° und 45° vorhanden) decken einen Bereich von 32.337 N/mm bis 39.829 N/mm für beide Holzprodukte ab. Für den Prototyp 1 reicht die Steifigkeit von 37.732 N/mm bis 53.270 N/mm. Auch der Variationskoeffizient weist bei der BauBuche (5,7–12,8 %) größere Maximalwerte und Wertebereiche als bei der Buche (8,4–11,5 %) auf. Dies wurde für alle anderen bisher betrachteten Kenngrößen gegenteilig beobachtet.

Anmerkung: Die teilweise größeren Variationskoeffizienten der BauBuche resultieren eventuell aus der oftmals leichten Schiefstellung der Schraube, da es bei Achs-Faserwinkeln von 15°, 30° und 45° eine Schwierigkeit darstellte, die Schrauben exakt rechtwinkelig zur Prüfkörperoberseite einzubringen. Für die ebenfalls ähnlich hohen Streuungen bei Achs-Faserwinkeln von 0° und 90° bleibt die Ursache allerdings offen.

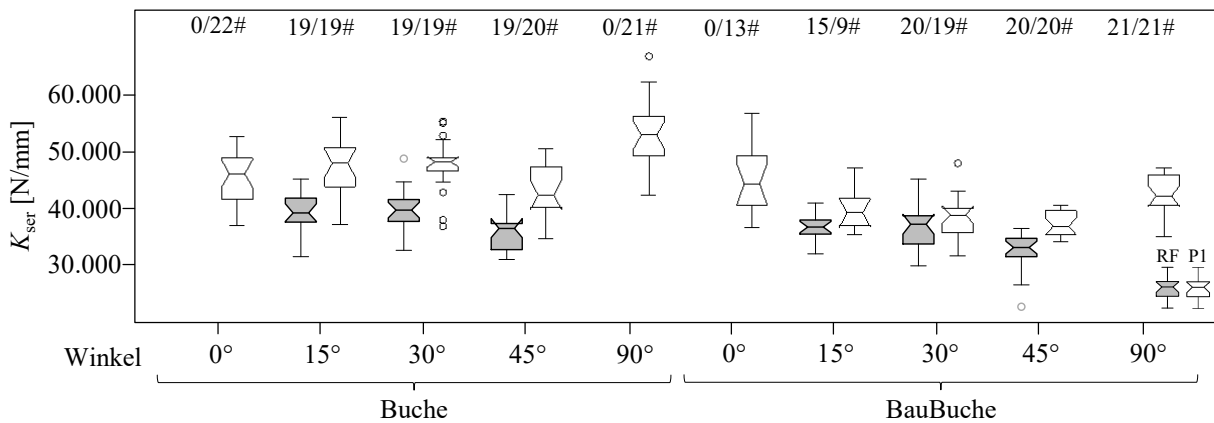
Wie Abbildung 91 zu entnehmen ist, liegt ein ähnlicher Verlauf der Steifigkeiten bei variierenden Einschraubwinkeln für die Referenzschraube und den Prototypen 1 in der Buche vor. So ist für beide Schraubentypen bei Einschraubwinkeln zwischen 0° und 45° eine annähernd konstante Steifigkeit gegeben. Für

einen Einschraubwinkel von 90° resultiert für den P1 eine vergleichsweise höhere Steifigkeit, während für die RF keine Daten vorhanden sind.

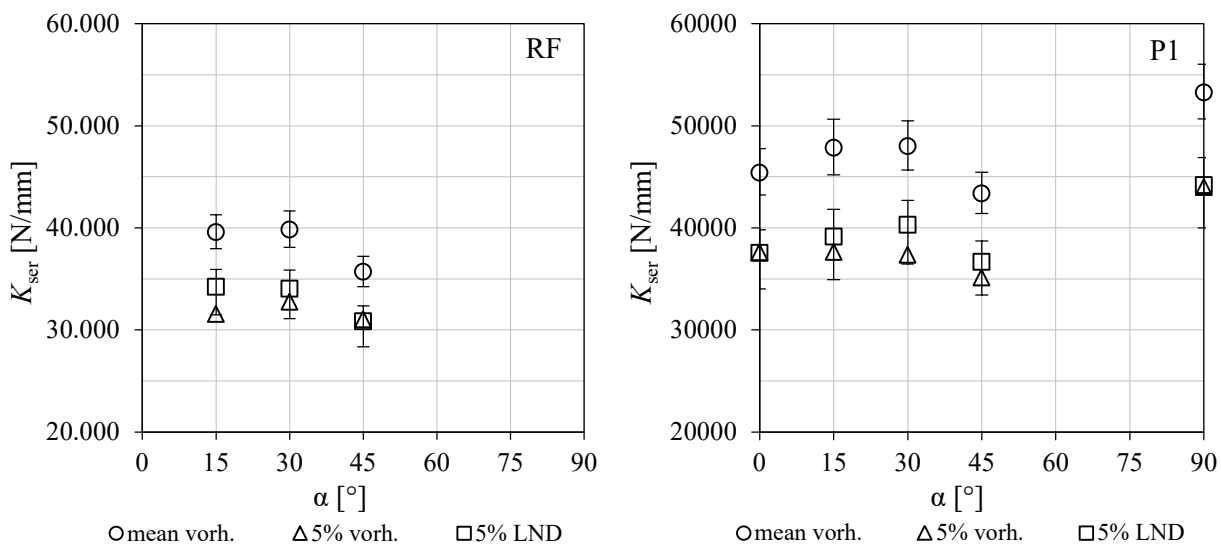
In der BauBuche sind die Steifigkeiten zwischen 15° und 45° für die RF und den P1 annähernd konstant bzw. leicht abfallend für den Fall eines zunehmenden Achs-Faserwinkels. Für Einschraubwinkel von 0° und 90° zeigt sich hingegen eine zirka 10–15 % höhere Steifigkeit.

Auch für die BauBuche bestätigt sich die bereits in Serie 1 beobachtete Charakteristik, dass die Steifigkeit bei 0° größer ausfällt als bei 90°. Der in Brandner et al. (2017 (in print)) beschriebene Verlauf, welcher von einer stetigen Abnahme der Steifigkeit bei größer werdenden Einschraubwinkeln ausgeht und ab 45° konstant ist, kann hier allerdings nicht beobachtet werden. Vielmehr zeigt sich bei 90° ein wiederum sehr ausgeprägter Anstieg der Steifigkeit. Dieser Anstieg konnte im Rahmen der Auswertung der Serie 1 lediglich für die Buche beobachtet werden. Dabei liegt die Steifigkeit der Buche bei einem Achs-Faserwinkel von 90° sogar deutlich über jener bei 0°. Ein möglicher Einfluss der unterschiedlichen Feuchtegehalte (geringere Holzfeuchtigkeit bei 0° und 90° in Buche und BauBuche), kann nach einer Abschätzung nach Ringhofer et al. (2015a) (siehe Gleichung (2.30) in Kapitel 2-4.3), bei welcher sich ein Einfluss in der Größenordnung von weniger als drei Prozent ergibt, auch ausgeschlossen werden.

**Anmerkung:** In den folgenden Abbildungen 92 und 93 sind die Mittelwerte und 5 %-Quantile mitsamt den dazugehörigen Konfidenzintervallen angegeben.



**Abbildung 91:** Serie 2: Boxplot Steifigkeit  $K_{ser}$  in Abhängigkeit vom Achs-Faserwinkel, Holzprodukt und Schraubentyp



**Abbildung 92:** Serie 2:  $K_{ser}$  vs.  $\alpha$  für die Buche für RF (links) und P1 (rechts)

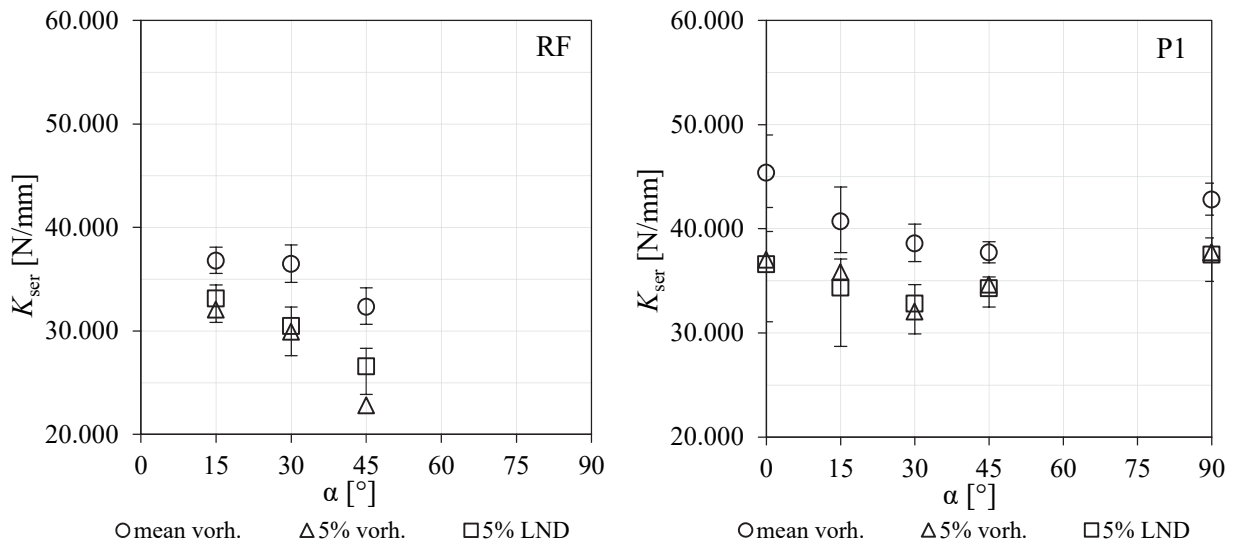


Abbildung 93: Serie 2:  $K_{ser}$  vs.  $\alpha$  für die BauBuche für RF (links) und P1 (rechts)

In den Untersuchungen von Ringhofer (2017) und Brandner et al. (2017 (in print)) für Nadelholz wird eine abnehmende Steifigkeit mit zunehmendem Einschraubwinkel beobachtet. Dieser Trend scheint sich für die Referenzschraube als auch für den Prototypen 1 in Buche und BauBuche bis zu einem Einschraubwinkel von 45° grundsätzlich zu bestätigen. Lediglich für den P1 in Buche fällt die etwas tiefer liegende Steifigkeit bei einem Einschraubwinkel von 0° in Buche auf. Für die restlichen in Kapitel 4-2.3 durchgeführten Prüfungen (Serie 1) zeigen sich für die Laubhölzer allerdings durchgehend höhere Steifigkeiten bei einem Achs-Faserwinkel von 0° im Vergleich zu 90°.

Für den Prototyp 1 weisen die Steifigkeiten bei einem Einschraubwinkel von 90° allerdings in der Buche und in der BauBuche einen signifikant größeren Wert auf. Für die Referenzschraube stehen dahingehend keine Prüfergebnisse zur Verfügung.

In der nachfolgenden Tabelle 55 werden die Schubmoduln und Schubfestigkeiten von Fichten- und Buchenholz verglichen. Es erfolgt dabei eine Unterscheidung in Schub längs der Faser und quer zur Faser (Rollschub). Die angegebenen gemittelten Kennwerte stammen dabei für die Betrachtungen längs zur Faser aus ÖNORM B 3012 (2003) sowie den Büchern von Sell (1989) und Wagenführ (2007). Für den Schubmodul und die Schubfestigkeit quer zur Faser (Rollschub) wurden die Ergebnisse der Prüfungen von Ehrhart (2014) herangezogen.

Tabelle 55: Schubsteifigkeiten und Schubfestigkeiten für Fichte und Buche längs und quer zur Faser

Holzart	Längsrichtung			Querrichtung		Verhältnisse		
	$G_{LR,mean}$	$G_{LT,mean}$	$f_{v,mean}$	$G_{RT,mean}$	$f_{r,mean}$	$G_{LT,mean}/G_{LR,mean}$	$G_{LR/LT,mean}/G_{RT,mean}$	$f_{v,mean}/f_{r,mean}$
	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]	[-]	[-]
<b>Fichte</b>	600	650	5–8	95	1,88	1,08	6,3 / 6,8	2,7–4,3
<b>Buche</b>	1640	1080	7–10	344	5,38	0,66	4,8 / 3,1	1,3–1,9

Wie Tabelle 55 zu entnehmen ist, zeigt sich für die Fichte ein Verhältnis der Längs- zur Quersteifigkeit von 6,3 bzw. 6,8, während sich dieses für die Buche mit 3,1 bzw. 4,8 ergibt. Dementsprechend ist die höhere Steifigkeit bei einem Einschraubwinkel von 90° zumindest mit diesen Erkenntnissen konform. Die für die Buche verhältnismäßig größeren Steifigkeiten in Querrichtung als jene der Fichte, lassen auf deren Beitrag auf die Verbundsteifigkeit zwischen Holz und dem eingebettetem Verbindungsmittel bei einem Achs-Faserwinkel von 90° schließen.

In der Tabelle 56 sind die Potenzfaktoren, welche die Abhängigkeit der Steifigkeit von der Rohdichte beschreiben, dargestellt. Allerdings kommt es aufgrund des begrenzten Rohdichtebereiches der BauBuche

(bedingt durch geringe Variabilität) auch hier zu sehr großen Streuungen der Potenzfaktoren. Es ist deshalb keine eindeutige Aussage hinsichtlich der BauBuche möglich. Für die Buche hingegen können die Potenzfaktoren aufgrund der größeren Rohdichtebereiche durchaus einer Interpretation dienen.

**Tabelle 56: Serie 2: Potenzfaktoren der Rohdichte für die Steifigkeit  $K_{ser}$  in Abhängigkeit vom Holzprodukt, Achs-Faserwinkel und Schraubentyp**

Holzart bzw. Holzprodukt	$\alpha$	$K_{ser}$ vs. $\rho_{12}$		
		RF	P1	RF & P1
Buche	0°	–	-0,32	-0,32
	15°	0,58	1,11	1,05
	30°	1,06	0,95	0,81
	45°	1,20	1,05	1,29
	90°	–	1,22	1,22
BauBuche	0°	–	3,95	3,95
	15°	1,38	2,95	2,05
	30°	-0,41	0,03	-0,94
	45°	0,61	-1,00	1,26
	90°	–	0,50	0,50

Die Potenzfaktoren der Buche für alle geprüften Achs-Faserwinkel größer als 0° reichen von 0,58 bis 1,29. Bei einem Einschraubwinkel von 0° zeigt sich hingegen ein negativer Potenzialfaktor von -0,32. Ein klarer Trend in Bezug auf die unterschiedlichen Einschraubwinkel kann nicht erkannt werden. Eine leichte Zunahme des Potenzialfaktors bei steigendem Einschraubwinkel, wie dies in der Prüfsérie 1 für die zerstreutporigen Laubbölzer wahrnehmbar ist, kann für die Holzart Buche nicht bestätigt werden.

### 4-3.4 ZUSAMMENHANG EINDREHMOMENT UND AUSZIEHFESTIGKEIT

An dieser Stelle werden die Ausziehfestigkeit  $f_{ax}$  und das maximale Einschraubdrehmoment  $M_{max}$  verglichen. Dies geschieht, wie bereits für die Serie 1, auch hier durch eine Regressionsrechnung, einer Potenzfunktion mittels LSM.

In Serie 1 wurde für die Laubhölzer im Mittel ein Potenzfaktor von annähernd 1,0 ermittelt. Eine ebensolche Auswertung wird nun nochmals für die Buche und die BauBuche durchgeführt. Aufgrund der feineren Winkelabstufung kann eine Aussage hinsichtlich eines möglichen Winkeleinflusses getroffen werden. Dazu werden die Daten, welche auch die Grundlage für die Tabellen 49 und 51 bilden, herangezogen. Aus der Regressionsrechnung resultieren in weiterer Folge die Potenzfaktoren für das Eindrehmoment zur Beschreibung der Abhängigkeit der Ausziehfestigkeit, siehe Tabelle 57.

**Tabelle 57:** Serie 2: Potenzfaktoren des Eindrehmomentes für die Ausziehfestigkeit  $f_{ax}$  in Abhängigkeit vom Holzprodukt, Achs-Faserwinkel und Schraubentyp

Holzart bzw. Holzprodukt	$\alpha$	$f_{ax}$ vs. $M_{max}$		
		RF	P1	RF & P1
Buche	0°	0,89	0,85	0,64
	15°	0,64	0,41	0,25
	30°	0,70	0,67	0,47
	45°	0,48	0,73	0,51
	90°	0,86	0,75	0,65
BauBuche	0°	0,35	0,13	-0,27
	15°	0,20	0,66	0,28
	30°	0,41	0,73	0,02
	45°	0,63	0,80	0,01
	90°	0,63	0,47	-0,22

Wie im vorherigen Abschnitt 4-3.3 ist auch an dieser Stelle für die BauBuche, aufgrund des stark begrenzten Rohdichtebereichs, keine Aussage möglich.

Für die Buche sind in Tabelle 57 wesentlich größere und einheitlichere Potenzfaktoren ersichtlich. Im Vergleich zu der jeweiligen Betrachtung eines einzigen Schraubentyps sind die Potenzfaktoren bei gemeinsamer Betrachtung beider Schraubentypen oftmals kleiner. Die Potenzfaktoren nehmen für die Einzelbetrachtungen der Schraubentypen Werte zwischen 0,41 bis 0,89 an. Somit scheint der Zusammenhang zwischen Eindrehmoment und Ausziehfestigkeit in der Buche etwas geringer auszufallen als für die Summe aller zerstreutporigen Laubhölzer (Mittelwert ca. 0,90). Trotzdem ist für die Holzart Buche der gleiche Trend wie für die gesamte dazugehörige holzanatomische Gruppe der Zerstreutporer erkennbar.

## 4-4 SERIE 3: VARIATION DES VORBOHRDURCHMESSERS

Auch für die Serie 3 werden zuerst die Prüfkörpereigenschaften (Rohdichte und Holzfeuchtigkeit) dargestellt. Nachfolgend erfolgt eine Darlegung und Diskussion der Ergebnisse für das Eindrehmoment, die Ausziehfestigkeit und die Verbindungsmittelsteifigkeit in Abhängigkeit vom Vorbohrdurchmesser. Dazu werden die zusammengefassten, tabellarisch angeführten Prüfergebnisse in Diagrammen und Plots dargestellt. Neben einer Unterscheidung zwischen der Referenzschraube und dem Prototypen 1 wurden diese Untersuchungen für Einschraubwinkel von 0° und 90° in Buche und BauBuche durchgeführt.

Anmerkung: Für die nachfolgend dargestellten Prüfungen der BauBuche der Serie 3 wurden beim Achs-Faserwinkel von 90° ausschließlich radial eingebrachte Schrauben geprüft.

### 4-4.1 MATERIALKENNWERTE

In den nachfolgend dargestellten Tabellen 58 und 59 sowie den dazugehörigen Abbildungen 94 bis 97 werden die Rohdichte und Holzfeuchtigkeit der Serie 3 analysiert. Dabei werden lediglich jene Daten verwendet, bei denen die Prüfkörper, welche generell abweichende Eigenschaften zeigen, bereits ausgeschlossen wurden.

#### Holzfeuchtigkeit

In Tabelle 58 sind die statistischen Kenngrößen der Holzfeuchtigkeit für die Serie 3 dargestellt. Neben den Achs-Faserwinkeln kommt hier der Vorbohrdurchmesser als zusätzliche Variable zum Einsatz.

**Tabelle 58:** *Serie 3: Holzfeuchte u in Abhängigkeit vom Holzprodukt, Achs-Faserwinkel, Vorbohrdurchmesser und Schraubentyp*

Holzart bzw. Gruppe und Winkel	VB- DM [mm]	Referenzschraube (RF)					Prototyp 1 (P1)					
		n	mean	COV	min	max	n	mean	COV	min	max	
		[-]	[%]	[%]	[%]	[%]	[-]	[%]	[%]	[%]	[%]	
Buche	nPD	22	8,50	3,5	8,06	9,05	22	9,32	2,5	9,02	9,77	
	0°	5,5	19	9,80	3,3	9,11	10,6	19	9,84	3,1	9,19	10,4
		6,0	19	9,64	4,0	8,80	10,3	19	9,61	4,8	8,65	10,6
		6,5	18	9,68	4,3	9,13	10,5	19	9,69	4,5	8,62	10,5
		7,0	19	9,85	3,2	9,15	10,5	19	9,88	5,9	9,04	11,7
		nPD	20	8,32	2,8	8,04	8,82	22	9,19	3,3	8,68	10,1
	90°	5,5	20	10,1	2,8	9,58	10,5	19	10,0	2,8	9,55	10,6
		6,0	19	9,78	2,8	9,36	10,3	20	9,90	2,7	9,36	10,4
		6,5	19	9,78	2,9	9,11	10,1	19	9,72	3,0	9,20	10,2
		7,0	19	9,68	3,6	8,73	10,2	19	9,80	2,6	9,21	10,2
nPD		22	6,86	1,5	6,70	7,07	22	7,63	2,1	7,30	7,90	
BauBuche	5,5	20	8,16	2,6	7,81	8,64	18	8,14	2,6	7,82	8,49	
	6,0	20	7,86	4,4	7,42	8,55	19	7,89	4,1	7,42	8,53	
	6,5	20	7,73	3,7	7,40	8,28	20	7,71	3,7	7,20	8,37	
	7,0	20	7,77	3,5	7,36	8,31	19	7,79	2,6	7,38	8,24	
	nPD	22	6,86	1,5	6,70	7,07	22	7,63	2,1	7,30	7,90	



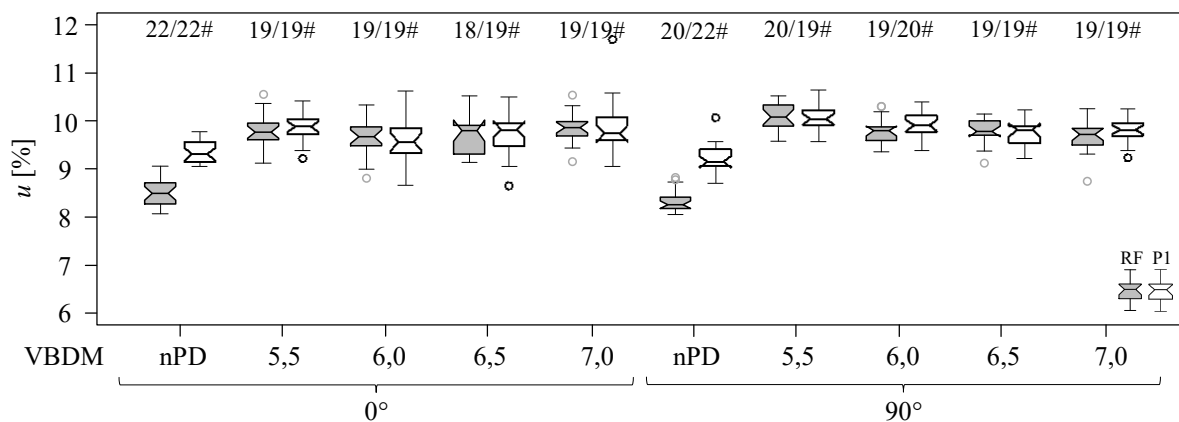
<b>BauBuche</b>		<b>nPD</b>	21	6,71	2,0	6,47	6,98	22	7,85	0,8	7,76	8,04	
		<b>5,5</b>	20	8,28	2,1	7,98	8,55	20	8,26	3,0	7,84	8,60	
		<b>90°</b>	<b>6,0</b>	20	8,42	2,1	8,15	8,75	20	8,42	3,2	7,97	9,08
			<b>6,5</b>	20	8,11	3,0	7,78	8,57	20	8,14	4,2	7,57	8,73
			<b>7,0</b>	20	8,15	3,0	7,79	8,55	20	8,11	3,4	7,58	8,55

Wie auch in den beiden vorherigen Serien kommen auch an dieser Stelle die bereits von Pöll (2017) ermittelten Werte zur Verwendung (für BU & BB mit 0° & 90° und RF & P1; nPD). Die Holzfeuchtigkeit dieser Prüfkörper liegt im Mittel um etwa ein Prozent niedriger als bei den weiteren Untergruppen (siehe Kapitel 4-2.1 und 4-3.1).

Für alle mit Vorbohrungen versehenen Buchen-Prüfkörper ergibt sich eine durchschnittliche Holzfeuchtigkeit von 9,8 %. Die geringste auftretende Holzfeuchtigkeit aller Untergruppen liegt dabei bei 8,62 % und die maximale bei 11,7 %. Der mittlere Variationskoeffizient ergibt sich zu 3,5 %.

Für die vorgebohrten BauBuchen-Prüfkörper liegt die durchschnittliche Holzfeuchtigkeit bei 8,1 %. Der Minimalwert (7,2 %) und der Maximalwert (9,1 %) liegen dabei enger als bei der Buche, weshalb der Variationskoeffizient mit 3,2 % noch geringer ausfällt.

Die nachfolgenden Abbildungen 94 (für Buche) und 95 (für BauBuche) zeigen die Ausgangsdaten der Holzfeuchtigkeit der in Tabelle 58 angeführten statistischen Werte in Form von Boxplots. Für jede Untergruppe der Buche und BauBuche (Variation des Vorbohrdurchmessers und Einschraubwinkels) ist dabei ein eigener Plot dargestellt. Dabei sind bis auf die Daten ohne Vorbohrung keine signifikanten Unterschiede in der Höhe der Holzfeuchte erkennbar.



**Abbildung 94:** Serie 3: Boxplot Holzfeuchtigkeit  $u$  für die Buche in Abhängigkeit vom Vorbohrdurchmesser, Achs-Faserwinkel und Schraubentyp

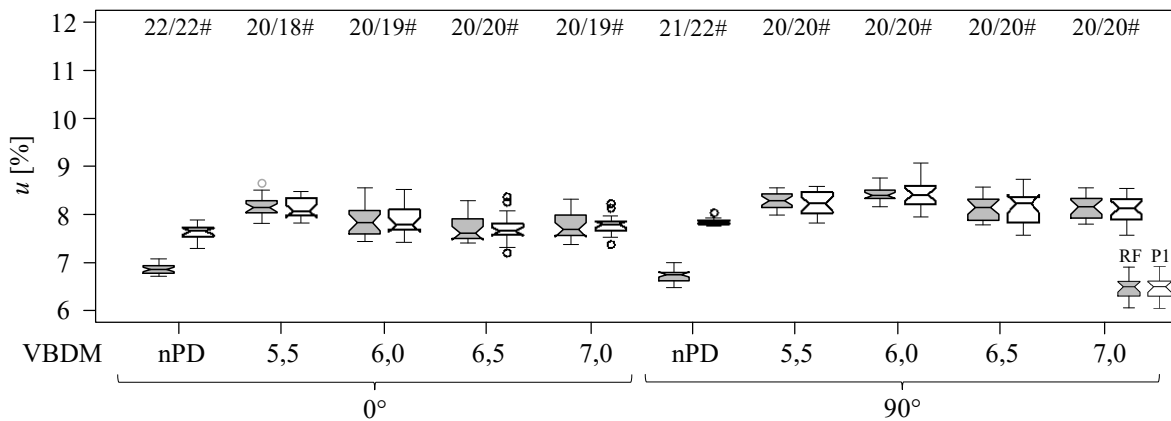


Abbildung 95: Serie 3: Boxplot Holzfeuchtigkeit  $u$  für die BauBuche in Abhängigkeit vom Vorbohrdurchmesser, Achs-Faserwinkel und Schraubentyp

Für die Abweichungen der Holzfeuchtigkeit der betrachteten Untergruppen zueinander kann festgehalten werden, dass diese klein genug sind, um auf eine Korrektur der nachfolgenden mechanischen Kennwerte auf eine Referenzholzfeuchte zu verzichten.

### Rohdichte

Die in Tabelle 59 angegebenen Rohdichten sind auf eine Referenzholzfeuchte von 12 % bezogen.

Tabelle 59: Serie 3: Rohdichte  $\rho_{12}$  in Abhängigkeit vom Holzprodukt, Achs-Faserwinkel, Vorbohrdurchmesser und Schraubentyp

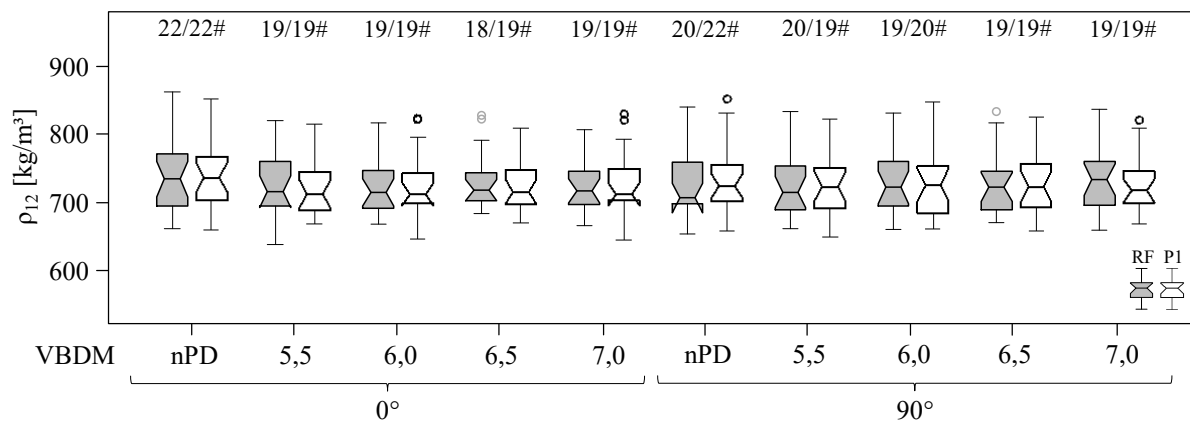
Holzart bzw. Gruppe und Winkel	VB-DM [mm]	Referenzschraube (RF)					Prototyp 1 (P1)					
		$n$	mean	COV	min	max	$n$	mean	COV	min	max	
		[-]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[%]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[-]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[%]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	
Buche	0°	nPD	22	740	7,7	660	861	22	742	7,6	660	851
		5,5	19	732	7,6	637	867	19	722	5,5	668	814
		6,0	19	723	5,5	668	816	19	728	6,4	646	822
		6,5	18	733	5,9	683	827	19	725	5,3	670	808
		7,0	19	725	5,5	666	806	19	729	6,5	645	829
	90°	nPD	20	728	6,8	654	839	22	734	7,4	657	851
		5,5	20	729	6,8	661	832	19	728	6,6	648	822
		6,0	19	734	6,9	660	830	20	731	7,5	661	846
		6,5	19	726	6,5	670	832	19	731	7,0	658	824
		7,0	19	734	7,2	659	836	19	728	5,9	668	820
BauBuche	0°	nPD	22	840	1,5	810	862	22	832	1,7	799	856
		5,5	20	836	1,3	820	866	18	835	1,3	810	852
		6,0	20	836	1,4	814	872	19	831	1,3	811	851
		6,5	20	835	1,5	815	861	20	838	1,2	818	860
		7,0	20	836	1,0	819	847	19	836	1,3	817	859

<b>BauBuche</b>	<b>nPD</b>	21	832	1,7	810	860	22	838	1,8	808	860
	<b>5,5</b>	20	845	1,4	827	865	20	846	1,8	819	881
	<b>90° 6,0</b>	20	847	1,7	821	868	20	848	1,7	821	874
	<b>6,5</b>	20	848	1,4	825	874	20	847	2,1	823	890
	<b>7,0</b>	20	846	1,6	824	874	20	848	1,6	828	883

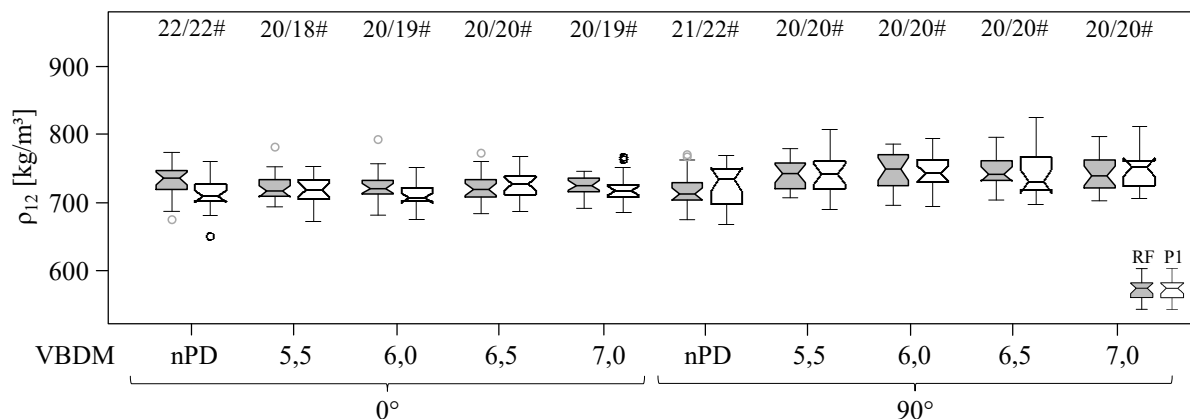
Wie der Tabelle 59 zu entnehmen ist, liegt der minimale Wert der Rohdichte aller Prüfkörper der Buche bei 637 kg/m<sup>3</sup>, während der Maximalwert bei 867 kg/m<sup>3</sup> zu liegen kommt. Es ergeben sich durchschnittliche Werte für die Rohdichte von 730 kg/m<sup>3</sup> und für den Variationskoeffizienten von 6,6 % für die insgesamt 391 Prüfkörper aus Buche.

Für die BauBuche liegt der minimale Wert der Rohdichte aller 403 Prüfkörper bei 799 kg/m<sup>3</sup>, während der Maximalwert bei 890 kg/m<sup>3</sup> zu liegen kommt. Die mittlere Rohdichte der BauBuche liegt bei 840 kg/m<sup>3</sup> und der Variationskoeffizient ergibt sich zu durchschnittlich 1,5 %.

In den nachfolgenden beiden Boxplotserien (Abbildung 96 und Abbildung 97) werden die auf die Referenzholzfeuchte von 12 % berechneten Rohdichten dargestellt. Es ist jede Untergruppe durch einen eigenen Plot dargestellt, womit ein Vergleich der Rohdichten zwischen den Untergruppen möglich ist.



**Abbildung 96:** Serie 3: Boxplot Rohdichte  $\rho_{12}$  für die Buche in Abhängigkeit vom Vorbohrdurchmesser, Achs-Faserwinkel und Schraubentyp



**Abbildung 97:** Serie 3: Boxplot Rohdichte  $\rho_{12}$  für die BauBuche in Abhängigkeit vom Vorbohrdurchmesser, Achs-Faserwinkel und Schraubentyp

Wie in den beiden Abbildungen zu erkennen ist, sind die Rohdichten bzw. die Prüfkörper zwischen den einzelnen Untergruppen sehr gleichmäßig verteilt. Dies wird auch bereits beim Vergleich der Mittelwerte und Variationskoeffizienten in Tabelle 59 ersichtlich. Die Rohdichteunterschiede für die einzelnen

Untergruppen (Variation des Schraubentyps, Einschraubwinkels und Vorbohrdurchmessers) fallen dabei so gering aus, dass keine signifikanten Einflüsse daraus zu erwarten sind.

## 4-4.2 AUSWERTUNG EINDREHPRÜFUNGEN

In der Tabelle 60 und den nachfolgenden Diagrammen sind die statistischen Kenngrößen des gemessenen maximalen Eindrehmomentes angeführt. Die Daten in der Tabelle entsprechen dem bereinigten Datensatz für das maximale Eindrehmoment  $M_{max}$ . Zur Berücksichtigung jener Prüfkörper, welche im Rahmen der Eindrehprüfung aufgespalten sind, werden die Mittelwerte und Variationskoeffizienten aus der rechts-zensierten Datenanalyse (mittels MLE) in Klammern angeführt; war lediglich bei den nicht vorgebohrten Prüfkörpern notwendig.

**Tabelle 60:** Serie 3: Auswertung Eindrehmoment  $M_{max}$  in Abhängigkeit vom Holzprodukt, Achs-Faserwinkel, Vorbohrdurchmesser und Schraubentyp

Holzart bzw. Gruppe und Winkel	VB-DM [mm]	Referenzschraube (RF)					Prototyp 1 (P1)					Verhältnis mean[P1]/ mean[RF] [%]	
		<i>n</i>	mean [Nm]	COV [%]	min [Nm]	max [Nm]	<i>n</i>	mean [Nm]	COV [%]	min [Nm]	max [Nm]		
Buche	0°	nPD	22	8,48	17,3	6,43	11,4	22	9,65	16,5	7,51	14,0	114
		5,5	19	4,17	13,4	3,38	5,46	19	6,55	14,7	5,14	8,47	157
		6,0	19	3,64	11,6	2,89	4,37	19	5,93	11,1	4,63	7,43	163
		6,5	18	2,48	16,1	1,99	3,49	19	4,22	12,4	3,36	5,04	170
		7,0	19	1,74	12,6	1,46	2,32	19	3,16	18,2	2,00	4,21	182
	90°	nPD	20	8,91	14,6	7,18	12,1	22	10,2	15,7	7,94	14,5	114
		5,5	20	4,40	10,1	3,61	5,10	19	6,80	10,6	5,09	8,04	155
		6,0	19	3,59	11,7	2,98	4,60	20	6,19	19,1	4,56	8,86	172
		6,5	19	2,09	12,3	1,68	2,64	19	3,65	14,3	2,92	4,70	175
		7,0	19	1,39	12,9	1,04	1,72	19	1,92	19,1	1,50	2,62	138
BauBuche	0°	nPD	22	12,4	6,5	10,5	13,7	14 (22)	13,6 (14,1)	5,7 (7,6)	12,1	15,1	110
		5,5	20	6,13	10,2	5,11	7,14	18	9,90	11,4	7,82	12,1	162
		6,0	20	5,21	11,4	4,50	7,06	19	8,56	8,9	7,10	9,60	164
		6,5	20	3,65	9,8	3,17	4,32	20	6,28	8,1	5,36	7,22	172
		7,0	20	2,53	11,1	1,94	2,95	19	4,66	9,7	4,01	5,53	184
	90°	nPD	21	12,7	3,5	11,6	13,5	21 (22)	15,0 (15,0)	5,4 (5,3)	13,4	16,4	119
		5,5	20	6,24	7,6	5,26	7,13	20	11,3	10,7	9,43	13,9	181
		6,0	20	5,15	7,1	4,54	5,75	20	9,17	10,0	7,58	10,7	178
		6,5	20	3,06	8,8	2,48	3,52	20	5,10	9,4	4,34	6,48	167
		7,0	20	2,05	9,9	1,74	2,58	20	3,17	9,8	2,53	3,66	154

Die Mittelwerte der maximalen Eindrehmomente in der Tabelle 60 zeigen für die Referenzschraube und den Prototypen 1 jeweils eine klare Abnahme bei zunehmenden Vorbohrdurchmessern. Es ergeben sich in der Buche und BauBuche ohne Vorbohrung für den Prototyp 1 im Durchschnitt um 14 % größere Eindrehmomente als für die Referenzschraube. Im Vergleich dazu sind die Eindrehmomente mit Vorbohrungen für den P1 um durchschnittlich 67 % größer als für die RF. Dies ist für alle Vorbohrdurchmesser und beide Achs-Faserwinkel von 0° und 90° sowohl in Buche als auch in BauBuche zu beobachten (siehe Abbildung 98 und Abbildung 99).

Die Variationskoeffizienten liegen für die Buche sowohl mit als auch ohne Vorbohrung annähernd konstant bei etwa 14 %. Für die BauBuche weisen die Variationskoeffizienten mit Vorbohrung Werte von durchschnittlich 9,6 % auf, während die Variationskoeffizienten ohne Vorbohrung bei 5,3 % liegen.

In den nachfolgenden Abbildungen 98 (für Buche) und 99 (für BauBuche) sind die in den Prüfungen ermittelten Daten (ohne MLerc) dargestellt. Die Balken für den jeweiligen Mittelwert und das 5 %-Quantil stellen in den folgenden Abbildungen die Konfidenzintervalle (CI) für ein Signifikanzniveau von 5 % dar.

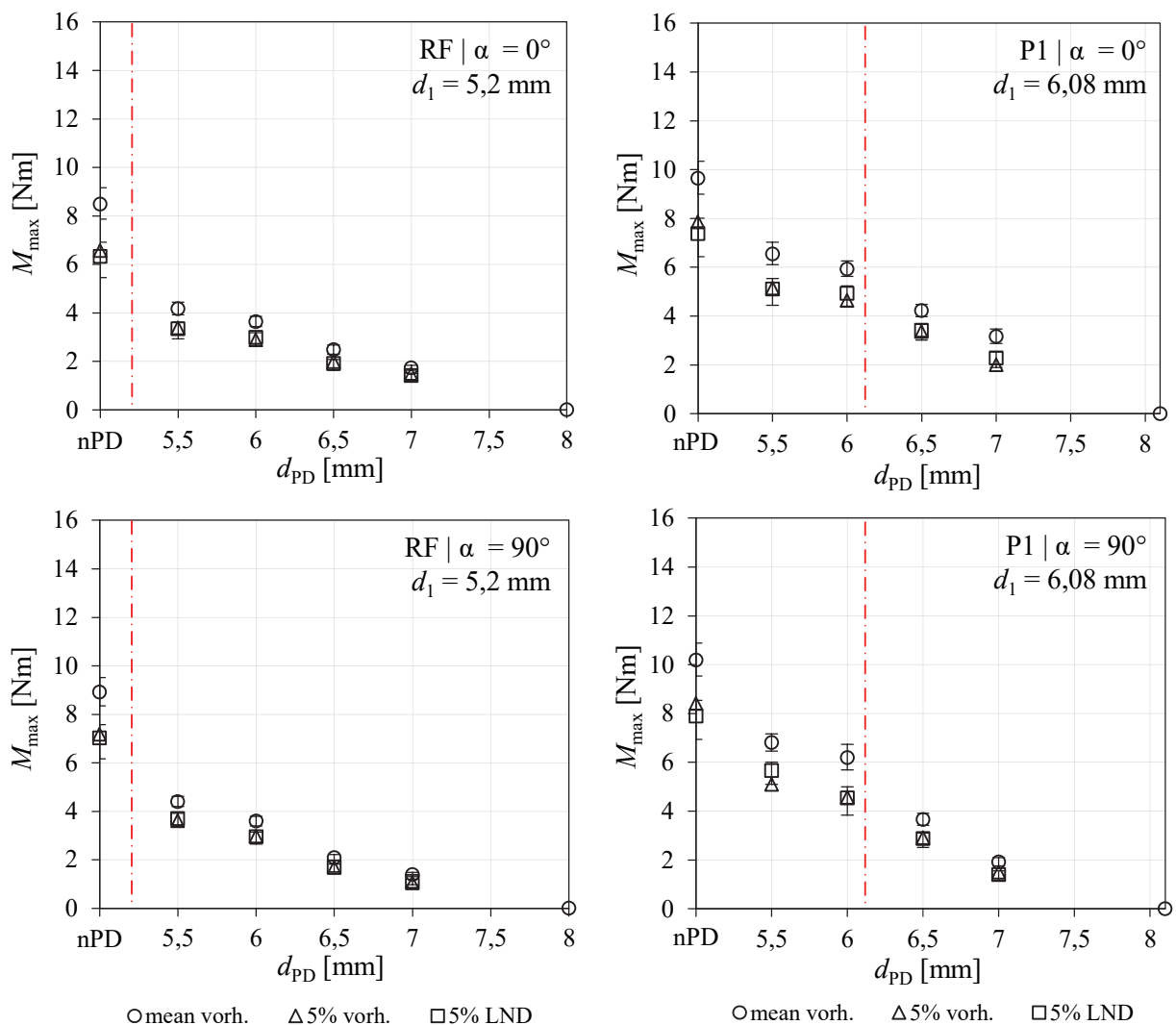


Abbildung 98:  $M_{max}$  vs.  $d_{PD}$  für die Buche, RF (links) & P1 (rechts) bzw. 0° (oben) und 90° (unten)

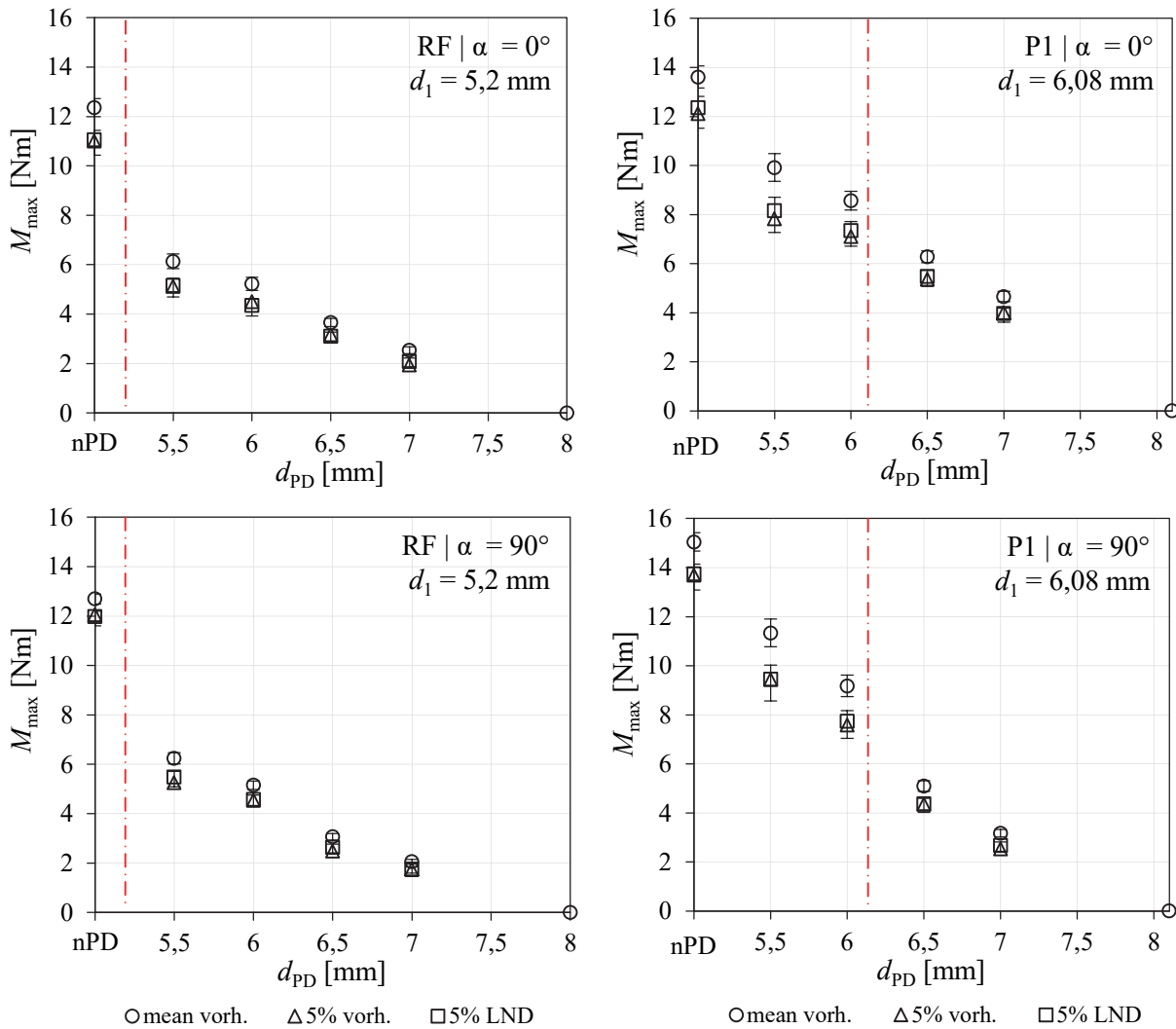


Abbildung 99:  $M_{max}$  vs.  $d_{PD}$  für die BauBuche, RF (links) & P1 (rechts) bzw. 0° (oben) und 90° (unten)

Wie in den Abbildungen 98 und 99 zu erkennen ist, kommt es mit zunehmendem Vorbohrdurchmesser für die Referenzschraube zu einem deutlich größeren Abfall des Eindrehmomentes als für den Prototyp 1 bei der Betrachtung der absoluten Werte. Im Vergleich zum maximalen Einschraubmoment  $M_{max}$  ohne Vorbohrung liegt jenes bei einem Vorbohrdurchmesser von 5,5 mm für die RF bei etwa 49,3 % davon. Für den Prototypen 1 fällt der Wert des maximalen Einschraubmomentes bei einer Vorbohrung von 5,5 mm mit 70,7 % im Vergleich zum Eindrehmoment ohne Vorbohrung deutlich höher aus. Durch diesen unterschiedlich stark ausgeprägten Abfall des Eindrehmomentes der beiden Schraubentypen bei zunehmenden Vorbohrdurchmessern kommt es auch zum oben genannten größer werdenden prozentuellen Unterschied zwischen der RF und dem P1 bei einer Vorbohrung. Diese Unterschiede resultieren dabei aus den unterschiedlichen Kerndurchmessern der Schrauben. So kommt es bei einem VBDM von 5,5 mm für den P1 noch zu einer Mantelreibung des Kerndurchmessers der Schraube, während dies für die RF nicht zutrifft.

Bei einem Relativvergleich der Vorbohrdurchmesser  $d_{PD}$  in Bezug auf die Kerndurchmesser  $d_1$  der Schrauben zeigt sich hingegen ein sehr ähnliches Verhalten für die beiden Schraubentypen. Wird das Eindrehmoment als Referenz herangezogen, bei dem der Vorbohrdurchmesser erstmals größer als der Schraubenkerndurchmesser ist, liegt die Abnahme für die Referenzschraube im Vergleich zu nPD bei 49,3 % (für  $d_{PD} = 5,5$  mm bei  $d_1 = 5,20$  mm) und für den Prototypen 1 bei 39,9 % (für  $d_{PD} = 6,5$  mm bei  $d_1 = 6,08$  mm). Die in diesem Fall geringfügig stärkere Abnahme für den Prototypen 1 resultiert dabei allem Anschein nach aus der geringeren Verankerungs- bzw. Eindringtiefe des Gewindes in das Holz, infolge des größeren Vorbohrdurchmessers.



Wie aus dem nächsten Abschnitt 4-4.3 hervorgeht, ist bis zu einem Vorbohrdurchmesser von etwa 6,5 mm für beide Schraubentypen kaum eine Abminderung der Ausziehfestigkeit zu erwarten. Die maximalen Eindrehmomente liegen dabei für die RF bei 26,6 % und für den P1 bei 39,9 % der jeweiligen maximalen Eindrehmomente ohne Vorbohrung.

### 4-4.3 AUSWERTUNG AUSZIEHPRÜFUNGEN

#### Ausziehfestigkeit

In Tabelle 61 sind die Prüfkörperanzahl, der Mittelwert, der Variationskoeffizient und die Extremwerte für die Ausziehfestigkeit der jeweiligen Untergruppen angegeben.

**Tabelle 61:** Serie 3: Ausziehfestigkeit  $f_{ax}$  in Abhängigkeit vom Holzprodukt, Achs-Faserwinkel, Vorbohrdurchmesser und Schraubentyp

Holzart bzw. Gruppe und Winkel	VB-DM [mm]	Referenzschraube (RF)					Prototyp 1 (P1)					Verhältnis mean[P1]/mean[RF] [%]
		<i>n</i>	mean	COV	min	max	<i>n</i>	mean	COV	min	max	
		[-]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	
Buche	nPD	22	12,6	17,4	9,57	17,7	22	11,2	17,0	8,38	15,3	89
	5,5	18	12,7	12,8	9,80	16,4	19	12,0	14,3	9,08	15,2	95
	0° 6,0	19	12,0	13,6	9,12	14,6	18	11,9	14,1	9,63	14,9	99
	6,5	18	12,6	14,2	10,0	16,6	19	11,5	12,3	9,94	14,4	92
	7,0	18	8,67	7,9	7,55	9,86	19	9,16	18,8	6,21	12,0	106
	nPD	20	15,8	13,4	13,1	20,9	22	15,7	13,1	12,8	19,6	99
	5,5	20	14,3	11,5	12,0	17,2	19	14,7	12,1	12,0	17,9	103
	90° 6,0	19	14,2	12,6	12,0	17,5	19	14,1	11,4	12,1	17,6	99
	6,5	19	13,2	12,1	10,8	16,8	19	13,8	13,0	11,5	17,5	105
	7,0	19	10,2	15,9	7,94	14,1	19	10,7	11,7	8,96	13,1	105
BauBuche	nPD	22	15,6	5,4	14,0	17,2	14	13,9	6,7	12,4	15,6	89
	5,5	20	15,0	9,4	11,7	18,1	18	15,1	7,4	12,8	17,3	100
	0° 6,0	20	14,7	10,5	12,5	18,8	19	15,0	8,3	13,2	16,9	102
	6,5	20	14,8	7,0	13,2	16,6	20	15,0	7,3	13,0	16,6	102
	7,0	20	12,4	8,8	10,3	14,8	19	12,7	7,5	11,1	14,4	103
	nPD	21	18,5	3,7	17,6	19,9	21	17,2	4,2	15,6	18,5	93
	5,5	20	15,9	4,3	14,7	17,6	20	16,7	5,3	15,5	18,9	105
	90° 6,0	20	15,8	3,8	14,9	16,8	20	16,1	4,2	14,7	17,5	102
	6,5	20	15,7	3,5	14,7	16,7	20	15,8	5,5	14,3	17,8	101
	7,0	20	13,0	6,4	11,1	14,7	20	14,4	3,6	13,7	15,9	111

Wie den Daten der Tabelle 61 zu entnehmen ist, kommt es für die Buche zum bekannten Abfall der Ausziehfestigkeit des Prototypen 1 im Vergleich zur Referenzschraube von ca. 10 % bei einem Einschraubwinkel von 0° lediglich bei den nicht vorgebohrten Prüfkörpern (siehe Kapitel 4-3.3). Für die Buchen-Probekörper mit Vorbohrung ( $\alpha = 0^\circ$ ) treten allgemein nur geringe Differenzen zwischen den beiden Schraubentypen auf. Dabei zeigt der Prototyp 1 eine maximale Abnahme von 8,4 % allerdings auch eine Zunahme der Ausziehfestigkeit von bis zu 5,6 % im Vergleich zur Referenzschraube.

Für einen Einschraubwinkel von 90° zeigt die Buche für den Prototyp 1 ebenfalls nahezu idente Ausziehfestigkeiten wie für die Referenzschraube (Abweichungen zwischen -0,8 % bis +4,8 %).

Wie aus der Serie 2 bereits hervorgeht, sind auch hier die Ausziehfestigkeiten des Prototypen 1 in der BauBuche ohne Vorbohrung etwas niedriger als die der Referenzschraube (im Durchschnitt 11,0 % bei 0° und 6,9 % bei 90°). Bei der Applizierung der Schraube in vorgebohrten Prüfkörpern zeigt sich allerdings eine durchgehende, für alle Vorbohrdurchmesser und beide Einschraubwinkel, höhere Ausziehfestigkeit für den P1 im Vergleich zur Referenzschraube (teilweise allerdings von weniger als 0,5 %). Somit ist für die BauBuche bei allen vorgebohrten Prüfkörpern eine Steigerung der Ausziehfestigkeit für den Prototypen 1 zu beobachten.

Die Variationskoeffizienten sind für die jeweilige Holzart vergleichbar und nicht von den Vorbohrdurchmessern beeinflusst. Sie liegen für die Buche bei durchschnittlich 13,5 % und für die BauBuche bei 6,1 %.

Wie bereits in den Serien 1 und 2 (ohne Vorbohrung) festgestellt, resultiert aus dem Abfall der Ausziehfestigkeit für den P1 im Vergleich zur RF bei einem Einschraubwinkel von 0° ein etwas höherer Wert für  $k_{90}$  für die Prototypenschraube. In der nachfolgenden Tabelle 63 sind die  $k_{90}$ -Werte für die Prüfserie 3 auf Basis der Mittelwerte zusammengefasst. Es zeigen sich insbesondere für die BauBuche  $k_{90}$ -Werte bei Durchführung einer Vorbohrung, welche nahe 1,0 zu liegen kommen. Der Einfluss des Einschraubwinkels auf die Ausziehfestigkeit ist demzufolge für diese Betrachtungen sehr gering.

**Tabelle 62: Serie 3:  $k_{90}$ -Werte für die Buche und BauBuche in Abhängigkeit vom Holzprodukt, Vorbohrdurchmesser und Schraubentyp**

VBDM [mm]		Buche					BauBuche				
		nPD	5,5	6,0	6,5	7,0	nPD	5,5	6,0	6,5	7,0
$k_{90}$	RF	1,25	1,13	1,19	1,05	1,18	1,19	1,06	1,07	1,06	1,04
	P1	1,40	1,22	1,19	1,20	1,17	1,24	1,11	1,07	1,05	1,13

Zur Bestimmung eines Abminderungsfaktors  $\eta_{PD}$ , welcher die Ausziehfestigkeit in Abhängigkeit vom Vorbohrdurchmesser beschreibt, werden in weiterer Folge die Prüfergebnisse der Buche und BauBuche herangezogen.

$$\eta_{PD} = \frac{f_{ax,PD}}{f_{ax,nPD}} \text{ bzw. } \frac{f_{ax,PD}}{f_{ax,ref}} \quad (4.3)$$

$\eta_{PD}$  Faktor zur Bestimmung des Einflusses des Vorbohrdurchmessers [-]

$f_{ax,PD}$  Wert der Ausziehfestigkeit mit Vorbohrung [N/mm<sup>2</sup>]

$f_{ax,nPD/ref}$  Wert der Ausziehfestigkeit ohne Vorbohrung bzw. mit dem Referenzvorbohrdurchm. [N/mm<sup>2</sup>]

In den Abbildungen 100 und 101 sind die Mittelwerte und die 5 %-Quantile (sowohl unter der Annahme einer LND als auch empirisch aus den ermittelten Prüfdaten bestimmt) der Ausziehfestigkeiten der Prüfungen angegeben.

Zusätzlich konnten die erwarteten Ausziehfestigkeiten  $f_{ax,PD}$  über  $\eta_{PD}$ -Werte, welche von Ringhofer (2017) für Nadelholz ermittelt wurden, durch eine entsprechende Umformung von Gleichung (4.3) eingetragen werden. Es handelt sich beim Modell von Ringhofer (2017) (siehe Gleichung (4.4)) für  $\eta_{PD}$  um eine bilineare Funktion, welche bis zu einem Vorbohrdurchmesser von  $1,1 \cdot d_1$  keine Abminderung der

Ausziehfestigkeit berücksichtigt. Im Anschluss folgt ein linearer Abfall bis hin zum Gewindeaußendurchmesser  $d$ , bei welchem die Ausziehfestigkeit mit  $0 \text{ N/mm}^2$  festgelegt ist. Als Referenz werden dabei allerdings anstatt der nicht vorgebohrten Prüfungen (nPD) jene herangezogen, welche einen Vorbohrdurchmesser kleiner als der Kerndurchmesser der Schraube aufweisen.

$$\eta_{\text{PD}} = \begin{cases} 1,00 & d_{\text{PD}} \leq 1,1 \cdot \eta \cdot d \\ 1,0 - \frac{1}{d \cdot (1 - 1,1 \cdot \eta)} \cdot (d_{\text{PD}} - 1,1 \cdot \eta \cdot d) & 1,1 \cdot \eta \cdot d \leq d_{\text{PD}} \leq d \end{cases} \quad (4.4)$$

- $\eta_{\text{PD}}$  Verhältnis der Ausziehfestigkeit mit zu ohne Vorbohrung  $\eta_{\text{PD}} = f_{\text{ax,PD}}/f_{\text{ax,nPD}} [-]$   
 $\eta$  Verhältnis von Kern- zu Gewindenenn(außen)durchmesser  $\eta = d_1/d [-]$   
 $d$  Gewindeaußen- bzw. Nenndurchmesser der Schraube [mm]  
 $d_{\text{PD}}$  Vorbohrdurchmesser [mm]  
 $d_1$  Kerndurchmesser der Schraube [mm]

Zur bestmöglichen Beschreibung der Abhängigkeit der Ausziehfestigkeit vom Vorbohrdurchmesser für die ermittelten Daten aus den durchgeführten Prüfungen wird auf deren Basis ein in Anlehnung an Ringhofer (2017) modifiziertes Modell gewählt. Es handelt sich dabei ebenso um eine bilineare Funktion, welche allerdings andere Randbedingungen, entsprechend Gleichung (4.5), vorsieht. Dabei gelten für die beiden eingesetzten Schraubentypen folgende Randbedingungen: Referenzschraube mit  $d = 8 \text{ mm}$  und  $d_1 = 5,2 \text{ mm}$ ; Prototyp 1 mit  $d = 8,1 \text{ mm}$  und  $d_c = 6,08 \text{ mm}$ .

$$\eta_{\text{PD,mod.}} = \begin{cases} 1,00 & d_{\text{PD}} \leq 0,8 \cdot d \\ 1,0 - \frac{1}{0,2 \cdot d} \cdot (d_{\text{PD}} - 0,8 \cdot d) & 0,8 \cdot d \leq d_{\text{PD}} \leq d \end{cases} \quad (4.5)$$

- $\eta_{\text{PD,mod.}}$  Verhältnis der Ausziehfestigkeit mit zu ohne Vorbohrung nach dem modifizierten Modell [-]  
 $d$  Gewindeaußen- bzw. Nenndurchmesser der Schraube [mm]  
 $d_{\text{PD}}$  Vorbohrdurchmesser [mm]

Wie in Gleichung (4.5) dargestellt ist, wird beim modifizierten Modell von einer konstanten Ausziehfestigkeit bis zu einem Vorbohrdurchmesser von 80 % des Gewindeaußendurchmessers ausgegangen. Als Referenz wird dabei die Ausziehfestigkeit, welche bei den nicht vorgebohrten Prüfungen ermittelt wird, herangezogen. Anschließend folgt ein linearer Tragfähigkeitsverlust bis zu einem Vorbohrdurchmesser welcher dem Gewindeaußendurchmesser entspricht, bei welchem die Ausziehfestigkeit mit  $0 \text{ N/mm}^2$  festgelegt ist.

In den Abbildungen 100 und 101 sind die Mittelwerte und die 5 %-Quantile, welche aus der Multiplikation von  $\eta_{\text{PD,mod.}}$  mit  $f_{\text{ax,nPD}}$  resultieren, eingetragen. Für das 5 %-Quantil wird dabei für die Buche von einem konstanten COV-Wert von 13,5 % und für die BauBuche von 6,0 % ausgegangen (Werte entsprechen den Mittelwerten der vorherigen Auswertung der COV aus Tabelle 61).

Wie in den Abbildungen 100 und 101 ersichtlich ist, zeigen sich für die Buche bei einem Einschraubwinkel von  $90^\circ$  für die RF und den P1 höhere Ausziehfestigkeiten ohne Vorbohrung (nPD) als bei den Prüfungen mit einer Vorbohrung von 5,5 mm. Auch für die BauBuche kommt es bei den Prüfungen ohne Vorbohrung für die RF & den P1 bei  $90^\circ$  (zu hoch) und den P1 bei  $0^\circ$  (zu tief) zu Abweichungen von den Prüfergebnissen mit 5,5 mm mit Vorbohrung (PD). Diese sind in Anbetracht des unterschiedlichen Ausgangsmaterials für die nPD-Prüfkörper im Vergleich zu jenen mit Vorbohrung auch nicht weiter von besonderer Bedeutung. Für Achs-Faserwinkel von  $0^\circ$  ergeben sich hingegen im Vergleich zu den Prüfergebnissen ohne Vorbohrung sogar geringfügig höhere Ausziehfestigkeiten; es resultiert somit ein kleinerer Wert für  $k_{90}$ . Auch die in Kapitel 4-4.1 (siehe Tabelle 59) dargestellten, geringfügigen Abweichungen der Holzfeuchtigkeit der nPD-Prüfkörper haben einen geringen, allerdings zu vernachlässigenden Einfluss. Deshalb wird in weiterer Folge eher auf den Funktionsverlauf geachtet als auf die absoluten Abweichungen vom Modell, welches die „abweichende“ Ausziehfestigkeit  $f_{\text{ax,nPD}}$  als Basis nutzt.

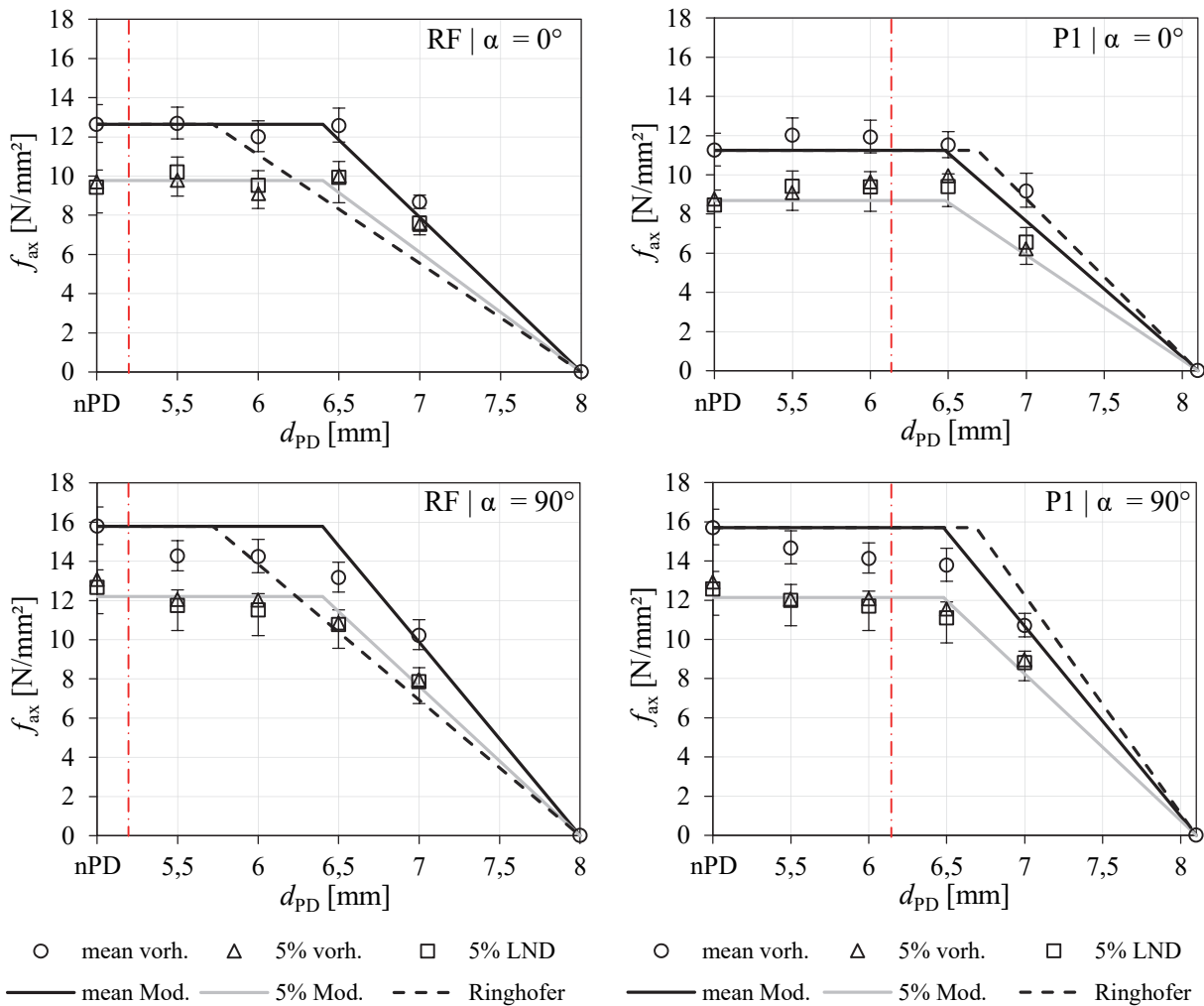


Abbildung 100:  $f_{ax}$  vs.  $d_{PD}$  für die Buche, RF (links) & P1 (rechts) bzw.  $0^\circ$  (oben) und  $90^\circ$  (unten)

Wie in der Abbildung 100 für Buche ersichtlich ist, zeigt die Funktion von Ringhofer (2017) für die Referenzschraube einen zu frühen Übergang in den Bereich des konstanten Abfalls. Für den Prototypen 1 hingegen würde diese Funktion bereits bessere Ergebnisse erzielen.

Im Vergleich dazu beschreibt das modifizierte Modell nach Gleichung (4.5) den Verlauf der Ausziehfestigkeiten bei unterschiedlichen Vorbohrdurchmessern durchgehend sehr gut. Die Werte aus dem Modell (Mittelwert und 5 %-Quantil) kommen sehr häufig im eingetragenen Konfidenzintervall zu liegen. Die vorhandenen Abweichungen resultieren Größtenteils aus den abweichenden Ausziehfestigkeiten ohne Vorbohrung.

Die Festlegung des Modells entsprechend der Gleichung (4.5) hat allerdings den Nachteil, dass man die Beziehung zum Kerndurchmesser verliert. Im Allgemeinen wird ein Vorbohrdurchmesser jedoch als Verhältnis zum Kerndurchmesser angegeben.

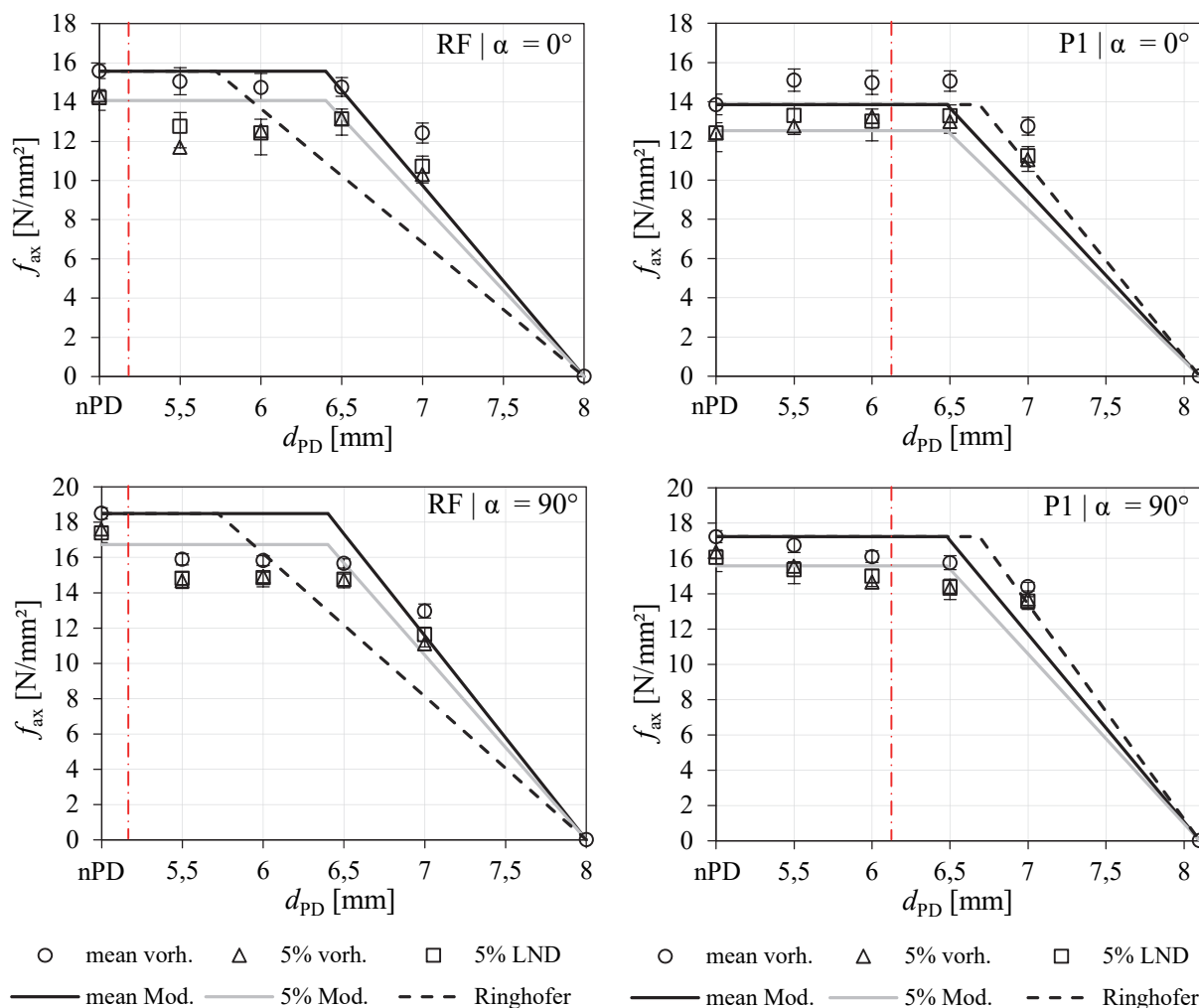


Abbildung 101:  $f_{ax}$  vs.  $d_{PD}$  für die BauBuche, RF (links) & P1 (rechts) bzw.  $0^\circ$  (oben) und  $90^\circ$  (unten)

Die in Abbildung 101 gezeigten Ausziehfestigkeiten in Abhängigkeit vom Vorbohrdurchmesser für die BauBuche zeigen aufgrund der geringen Streuungen besonders enge Konfidenzintervalle. Die Funktion von Ringhofer (2017) führt für die Referenzschraube auch hier zu einem zu frühen Übergang in den Bereich des konstanten Abfalls. Für den Prototypen 1 hingegen liefert diese Funktion wie bei der Buche eine bessere Anpassung an die Ergebnisse.

Die Werte aus dem modifizierten Modell (Mittelwert und 5 %-Quantil) kommen hier allerdings kaum im eingetragenen Konfidenzintervall zu liegen, beschreiben aber den Abfall bei größeren Vorbohrdurchmessern als 6,5 mm sehr gut. Auch hier resultieren die vorhandenen Abweichungen größtenteils aus den Abweichungen der Ausziehfestigkeiten ohne Vorbohrung von jenen mit Vorbohrung.

Im Allgemeinen zeigt das Modell von Ringhofer (2017) für die Referenzschraube durchgehend eine zu frühe Abminderung der Ausziehfestigkeit (ab einem Vorbohrdurchmesser von 5,72 mm; entspricht lediglich 72 % des Gewindeaußendurchmessers), während für den Prototyp 1 diese erst bei 6,69 mm Vorbohrdurchmesser einsetzt (entspricht 83 % des Gewindeaußendurchmessers). Für konventionelle Holzbauschrauben wie die Referenzschraube, welche für die Anwendung in Nadelholz optimiert sind, zeigen die Untersuchungen von Ringhofer (2017) auf jeden Fall für die Laubhölzer Ergebnisse, welche auf der sehr sicheren Seite zu liegen kommen. Für den P1 hingegen liefert das referenzierte Modell sehr gut passende Ergebnisse.

Wie aus den Prüfungen für die Laubhölzer ersichtlich wird, scheint der Abminderungsfaktor  $\eta_{PD}$  nicht vom Kerndurchmesser abhängig zu sein, da sowohl für die RF als auch für den P1 ab einem Vorbohrdurchmesser von 7,0 mm eine Abnahme der Ausziehfestigkeit zu erkennen ist. Die beiden Kerndurch-

messer sind dabei mit 5,20 mm für die RF bzw. 6,08 mm für den P1 doch sehr unterschiedlich ausgeprägt.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass für beide Schraubentypen und sowohl für die Buche als auch für die BauBuche bei einem Vorbohrdurchmesser von 7,0 mm jedenfalls bereits ein Abfall der Ausziehfestigkeit zu beobachten ist. Für alle anderen, kleineren Vorbohrdurchmesser zeigen sich noch keine signifikanten Unterschiede.

Dies bestätigt die Annahme, welche von Ringhofer (2017) bereits erläutert wurde, dass die tatsächlich verankerte Gewindefläche kein guter Indikator für die Bestimmung der Ausziehfestigkeit ist. Die Prüfergebnisse zeigen nämlich auch bei Vorbohrdurchmessern, welche größer als der Gewindekerndurchmesser sind, keinen Abfall der Ausziehfestigkeiten.

Dahingehend sei die Überlegung in Richtung einer minimalen Verankerungstiefe angebracht. Darunter wird jene Tiefe verstanden, welche die Gewindeflanken in den Holzkörper hineinragen. Bei zunehmenden Vorbohrdurchmessern, welche größer als die Gewindekerndurchmesser sind, nehmen diese Mindestverankerungstiefen ab. Sie lassen sich entsprechend Gleichung (4.7) berechnen.

$$t = \begin{cases} (d - d_1) / 2 & d_{PD} \leq d_1 \\ (d - d_{PD}) / 2 & d_1 \leq d_{PD} \leq d \end{cases} \quad (4.6)$$

- $t$  Verankerungstiefe der Gewindeflanke im Holz [mm]
- $d$  Gewindeaußen- bzw. Nenndurchmesser der Schraube [mm]
- $d_{PD}$  Vorbohrdurchmesser [mm]
- $d_1$  Kerndurchmesser der Schraube [mm]

So kann möglicherweise von einer Mindestverankerungstiefe ausgegangen werden, welche zum Erreichen der maximalen Ausziehfestigkeit ohne Vorbohrung ausreicht. Für die beiden Schraubentypen ergeben sich bei einem Vorbohrdurchmesser von 6,5 mm somit Mindestverankerungstiefen von 0,75 mm (RF) bzw. 0,80 mm (P1). Allerdings ist aufgrund zu geringer Parametervariation (Schraubenaußendurchmesser, Flankenneigung, Gewindeganghöhe) keine allgemeine Aussage zu möglichen Einflüssen möglich. Es ist auch nicht bekannt, ob sich die Mindestverankerungstiefe als absolute Größe oder als relative Kenngröße in einem Verhältnis zur Schraubengeometrie einstellt. Deshalb kann auch ein möglicher Einfluss des Schraubendurchmessers bzw. der Gewindegometrie nicht ausgeschlossen werden.

### Steifigkeit

In Tabelle 63 sind die für die Auswertung wesentlichen Werte der Steifigkeiten der Prüfserie 3 zusammengefasst.

**Tabelle 63: Serie 3: Steifigkeit  $K_{ser}$  in Abhängigkeit vom Holzprodukt, Achs-Faserwinkel, Vorbohrdurchmesser und Schraubentyp**

Holzart bzw. Gruppe und Winkel	VB-DM [mm]	Referenzschraube (RF)					Prototyp 1 (P1)					Verhältnis mean[P1]/mean[RF] [%]
		$n$ [-]	mean [kg/m <sup>3</sup> ]	COV [%]	min [kg/m <sup>3</sup> ]	max [kg/m <sup>3</sup> ]	$n$ [-]	mean [kg/m <sup>3</sup> ]	COV [%]	min [kg/m <sup>3</sup> ]	max [kg/m <sup>3</sup> ]	
Buche	nPD	–	–	–	–	–	22	45.416	11,0	37.363	52.967	–
	5,5	19	37.735	8,6	32.674	41.914	19	47.022	11,8	34.563	55.880	125
	6,0	19	35.454	8,8	30.926	42.352	19	46.178	12,6	36.695	58.465	130
	6,5	18	32.615	12,6	25.403	42.300	18	40.580	12,5	31.121	47.747	124
	7,0	19	24.596	18,7	18.331	36.773	19	34.706	19,7	21.588	46.235	141



<b>Fortsetzung: Buche</b>	<b>nPD</b>	–	–	–	–	–	21	53.270	11,0	42.716	67.178	–
	<b>5,5</b>	20	32.151	10,9	24.900	39.136	19	38.282	11,1	30.940	45.638	119
	<b>90° 6,0</b>	19	30.618	11,2	26.055	39.519	20	37.559	10,9	29.038	44.511	123
	<b>6,5</b>	19	26.251	12,8	20.918	32.069	19	33.650	16,0	25.203	43.026	128
	<b>7,0</b>	19	18.967	19,4	13.466	27.038	19	27.050	19,5	16.894	38.068	143
<b>BauBuche</b>	<b>nPD</b>	–	–	–	–	–	13	45.365	12,8	37.034	57.185	–
	<b>5,5</b>	20	35.518	6,9	31.175	40.267	18	46.105	8,7	37.979	51.777	130
	<b>0° 6,0</b>	20	34.584	7,4	30.118	39.035	19	44.904	11,8	35.451	51.930	130
	<b>6,5</b>	20	33.386	6,6	29.481	37.387	20	43.825	7,6	38.656	51.835	131
	<b>7,0</b>	20	28.333	9,0	24.263	34.241	19	37.586	9,4	32.622	45.912	133
	<b>nPD</b>	–	–	–	–	–	21	42.806	7,7	35.423	47.501	–
	<b>5,5</b>	20	30.101	5,5	26.753	32.830	20	35.174	9,1	28.832	41.049	117
	<b>90° 6,0</b>	20	29.552	7,1	26.788	35.886	20	34.938	7,0	28.174	39.523	118
	<b>6,5</b>	20	26.657	3,0	25.301	27.750	20	33.433	11,8	24.362	41.956	125
	<b>7,0</b>	20	23.698	8,1	21.059	27.503	20	32.278	9,4	25.260	40.015	136

Wie der Tabelle 63 zu entnehmen ist, sind die Steifigkeiten bei einem Einschraubwinkel von 90° immer kleiner als bei einem Einschraubwinkel von 0°. So betragen diese quer zur Faser durchschnittlich 83 % der ermittelten Steifigkeit längs zur Faser (wiederum ausgenommen Buche nPD bei P1).

Für die gesamte Serie 3 sind die Steifigkeiten unter Verwendung des P1 im Mittel um 28 % höher als für die Referenzschraube. Im Vergleich dazu wurde für die Serie 2 ein Anstieg von 21 % bei der Buche und 11 % bei der BauBuche festgestellt. In der Serie 1 hingegen wurde als Mittelwert für alle Holzarten bzw. holzanatomischen Gruppen eine Steifigkeitszunahme von 20 % für alle Holzarten festgestellt.

Wird eine Unterscheidung der Steifigkeitsverhältnisse für die Vorbohrdurchmesser der Serie 3 durchgeführt, so zeigt sich für einen Vorbohrdurchmesser von 5,5 mm ein Anstieg von der RF zum P1 von 23 %, für 6,0 mm von 25 %, für 6,5 mm von 27 % und für 7,0 mm von 38 %. Es ist somit mit steigendem Vorbohrdurchmesser eine höhere Steifigkeitszunahme für den P1 im Vergleich zur RF zu erkennen. Diese Zunahme deckt sich bei einem Vorbohrdurchmesser von 7,0 mm bereits mit dem Dehnsteifigkeitsunterschied von 37 % zwischen den beiden Schraubentypen. Bei einem entsprechend großen Vorbohrdurchmesser hat der Holzprüfkörper also kaum noch einen Einfluss auf die Steifigkeitsunterschiede zwischen den beiden Schraubentypen; lediglich die Schraube beeinflusst dabei scheinbar das Verhältnis.

Außerdem ist in Tabelle 63 bzw. in den Abbildungen 102 und 103 ein stetiger Abfall des Mittelwertes der Steifigkeit bei zunehmendem Vorbohrdurchmesser zu erkennen. Allerdings ist diese Abnahme bis zu einem Vorbohrdurchmesser von durchschnittlich 6,5 mm noch eher schwach ausgeprägt und erst ab dann deutlicher. Für den überwiegenden Teil der Daten in der obigen Tabelle liegen die Mittelwerte der Steifigkeiten der Buche über jenen der BauBuche.

Wie der Abbildung 102 zu entnehmen ist, zeigt sich der Verlauf der Steifigkeiten für die Buche bei veränderlichem Einschraubwinkel für beide Schraubentypen sehr ähnlich. Es kommt für beide Schraubentypen bei Einschraubwinkeln von 0° und 90° zu einer stetigen Abnahme der Steifigkeit bei zunehmendem Vorbohrdurchmesser. Erst ein Vorbohrdurchmesser von 7,0 mm zeigt eine im Vergleich zu den weiteren Steifigkeiten stärkere Abnahme. Wie allerdings bereits mehrfach erwähnt, sticht die im Verhältnis viel zu hohe Steifigkeit bei nPD bei einem Einschraubwinkel von 90° hervor. Warum diese Prüfkörper

eine derart hohe Steifigkeit aufweisen, kann gegenwärtig nicht vollständig geklärt werden. Es kam für die Prüfung zwar ein abweichendes Kantholz Ausgangsmaterial zum Einsatz, welches aber entsprechend den Materialkenngrößen keine signifikanten Abweichungen erwarten lassen würde. Auch für die Ausziehfestigkeiten werden bei weitem keine so großen Abweichungen für diese Untergruppe festgestellt.

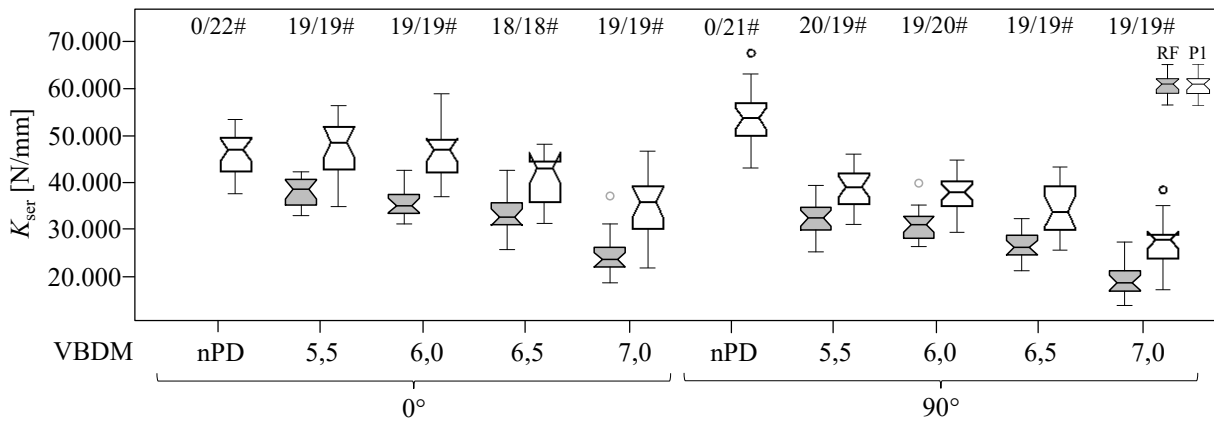


Abbildung 102: Serie 3: Boxplot Steifigkeiten  $K_{ser}$  für die Buche in Abhängigkeit vom Vorbohrdurchmesser, Achs-Faserwinkel und Schraubentyp

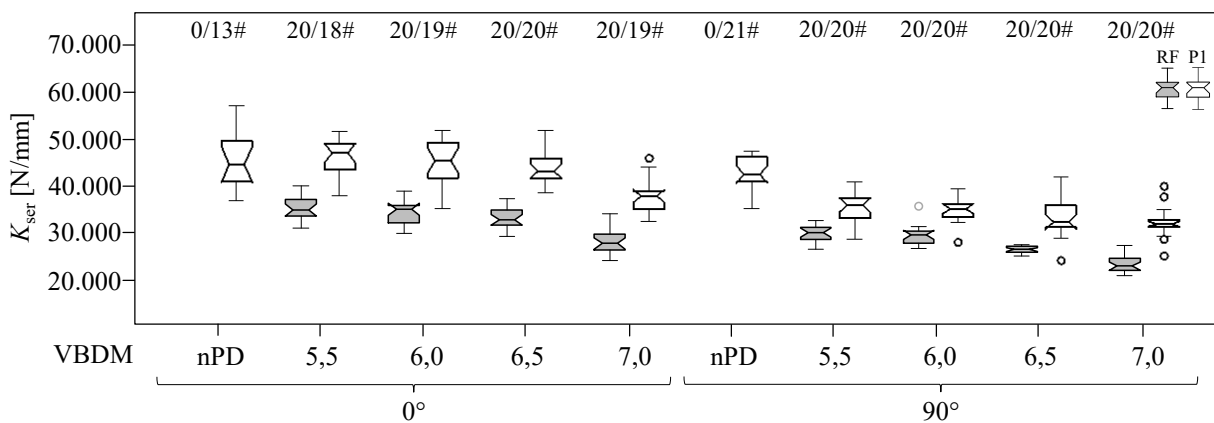


Abbildung 103: Serie 3: Boxplot Steifigkeiten  $K_{ser}$  für die BauBuche in Abhängigkeit vom Vorbohrdurchmesser, Achs-Faserwinkel und Schraubentyp

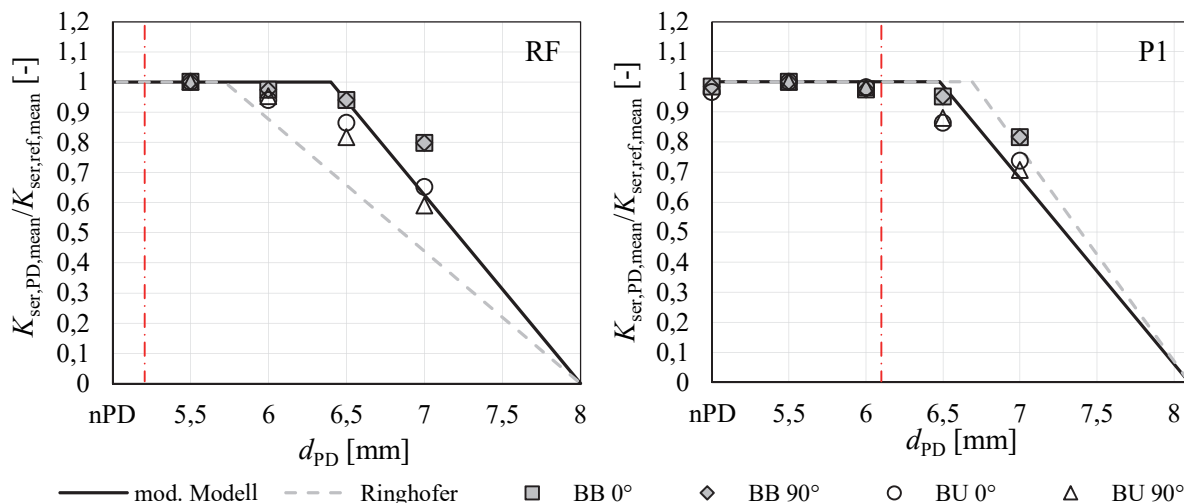
Auch für die BauBuche (siehe Abbildung 103) zeigt sich ein Abfall der Steifigkeit bei zunehmendem Vorbohrdurchmesser. Dieser ist allerdings bei einem Vorbohrdurchmesser von 7,0 mm noch nicht so markant ausgeprägt wie das bei der Buche der Fall ist.

Nachdem sich aus den vorhergehenden Beobachtungen und in den Untersuchungen von Ringhofer (2017) zeigt, dass sich die Steifigkeiten in Abhängigkeit vom Vorbohrdurchmesser ähnlich wie die Ausziehfestigkeiten verhalten, wird der in Gleichung (4.3) angegebene Zusammenhang um die Steifigkeiten erweitert. Dabei wird von Ringhofer (2017) bereits angeführt, dass mit Vorbohrung um ca. 20 % geringere Steifigkeiten als ohne Vorbohrung zu erwarten sind und deshalb die Steifigkeiten mit dem geringsten Vorbohrdurchmesser als Referenz herangezogen werden. Somit ergibt sich die in Gleichung (4.7) dargestellte Abhängigkeit.

$$\eta_{PD} = \frac{K_{ser,PD}}{K_{ser,nPD}} \text{ bzw. } \frac{K_{ser,PD}}{K_{ser,ref}} \quad (4.7)$$

- $\eta_{PD}$  Faktor zur Bestimmung des Einflusses des Vorbohrdurchmessers [-]
- $K_{ser,PD}$  Wert der Steifigkeit mit Vorbohrung [N/mm]
- $K_{ser,nPD,ref}$  Wert der Steifigkeit ohne Vorbohrung bzw. mit dem Referenzvorbohrdurchm. [N/mm]

Die in Abbildung 104 dargestellten Diagramme zeigen den Verlauf der Steifigkeiten in Abhängigkeit vom Vorbohrdurchmesser. Dabei sind die Mittelwerte der Steifigkeiten jeweils auf die mittlere Steifigkeit bei einem Vorbohrdurchmesser von 5,5 mm bezogen. Da für die Referenzschraube keine Steifigkeitskennwerte ohne Vorbohrung zur Verfügung stehen, wurde dies als Referenzwert festgelegt. Zusätzlich ist neben den Ergebnissen der Prüfung auch das Modell von Ringhofer (2017) entsprechend Gleichung (4.4) und das für die Ergebnisse modifizierte Modell nach Gleichung (4.5) eingetragen.



**Abbildung 104:** Verhältnis  $K_{ser,PD,mean}/K_{ser,ref,mean}$  vs.  $d_{PD}$  für die Buche und die BauBuche, RF (links) & P1 (rechts)

Für die Referenzschraube (Abbildung 104 links) weist das Modell von Ringhofer (2017) auch für die Steifigkeiten einen zu frühen Abfall und somit in weiterer Folge zu geringe Werte auf. Mit dem modifizierten Modell wird der Verlauf der Steifigkeiten bedeutend besser beschrieben.

Für den Prototypen 1 (Abbildung 104 rechts) hingegen zeigen beide Modelle eine grundsätzlich sehr gute Anpassung an die Prüfergebnisse bzw. die Verhältniszahl nach Gleichung (4.7). Lediglich die hohe Steifigkeit der Buche bei einem Einschraubwinkel von 90° ohne Vorbohrung wird mit einem Verhältniszwert von 1,39 nicht mehr dargestellt und weist die größte Abweichung auf.

Der Verlauf der Steifigkeiten und der Verlauf der Ausziehfestigkeiten gleichen sich sehr gut. Die Beschreibung des Verlaufes für die beiden Kenngrößen Ausziehfestigkeit und Steifigkeit durch einen Faktor  $\eta_{PD}$  scheint daher durchaus praktikabel. Für die Beschreibung der Steifigkeit wird in Ringhofer (2017) allerdings festgehalten, dass die Steifigkeiten ohne Vorbohrung oftmals höher ausfallen als mit Vorbohrung; auch wenn diese kleiner als der Gewindekerndurchmesser ausgeführt werden. Aus diesem Grund wird von Ringhofer (2017) als Bezugssteifigkeit generell jene Steifigkeit verwendet, welche mit dem kleinsten Vorbohrdurchmesser ermittelt wird.

## 4-5 SERIE 4: BESTIMMUNG DER SPALTKRÄFTE

---

Wie bereits in Kapitel 3-3.1.2 angeführt, werden zur Bestimmung der Spaltkräfte Messschrauben angeordnet. Aus diesem Grund veränderte sich auch die Herstellung der Prüfkörper bzw. die Prüfkonfiguration dahingehend, dass die Prüfkörper zuerst mittig aufgetrennt und anschließend durch die Vorspannung der Messschrauben wieder zusammengespannt wurden. Außerdem war aufgrund der Anordnung der drei hintereinander liegenden Messschraubenreihen (MSR) eine veränderte Prüfkörpergeometrie (Prüfkörperhöhe von 80 mm) notwendig.

Zu Beginn dieses Unterabschnittes sind die Rohdichte und die Holzfeuchtigkeit der für die Auswertung herangezogenen Prüfkörper angeführt. Im Gegensatz zu den bisherigen Serien erfolgt dabei allerdings bereits zuvor eine vollständige Elimination jener Prüfkörper, welche als Ausreißer identifiziert werden. Es wird dabei, ähnlich wie in den Untersuchungen von Uibel (2012), vor allem auf das Kriterium einer mittig eingebrachten Schraube geachtet. Dabei werden jene Prüfkörper ausgeschieden, bei denen die Schraube beim Eindrehen ein so starkes Verlaufen in eine der beiden Prüfkörperhälften zeigt, dass damit einhergehend von einer signifikanten Beeinflussung der Spaltkräfte ausgegangen werden kann (Auflistung inkl. Bezeichnungen der ausgeschlossenen Prüfkörper siehe im Anhang C-1). Im Anschluss wird, ähnlich wie bei den vorhergehenden Serien, eine Betrachtung des Eindrehmomentes, der Ausziehfestigkeit und der Steifigkeit durchgeführt. Dabei sollen die durch die veränderte Prüfkonfiguration auftretenden Unterschiede zu den Versuchen ohne Messung der Spaltkräfte ersichtlich werden. Dazu werden in erster Linie qualitative aber auch quantitative Vergleiche mit Referenzprüfungen aus den vorhergehenden Serien durchgeführt.

Das übergeordnete Ziel dieser Prüfserie 4 ist allerdings die Untersuchung der auftretenden Spaltkräfte. Diese werden für die Buche und BauBuche für Achs-Faserwinkel von  $0^\circ$  und  $90^\circ$  sowohl für die Applikation der Schraube als auch während der Ausziehprüfung ermittelt. Zusätzlich kommt es im Rahmen von Langzeitversuchen über mindestens 24 h Messdauer zu einer Ermittlung der Abklingcharakteristik der Spaltkräfte. Durch die Kombination der Spaltkräfte aus den Eindrehprüfungen, Ausziehprüfungen und Langzeitversuchen kann der Gesamtverlauf der Spaltkräfte über die Zeit ermittelt werden. Dadurch soll jener Zustand bzw. jene Beanspruchung ermittelt werden, bei welchem die maximalen Spaltkräfte auftreten und somit für die Bestimmung der Mindestabstände maßgebend sind.

## 4-5.1 MATERIALKENNWERTE

In den nachfolgend dargestellten Tabellen und Boxplots werden die statistischen Kennwerte der Rohdichte und der Holzfeuchtigkeit dargelegt. Es sind dabei jedoch nur jene Prüfkörper, welche auch in der gesamten nachfolgenden Auswertung betrachtet werden, miteinbezogen. Zudem werden als Referenzergebnisse (für die Ermittlung des Einflusses der geänderten Prüfkonfiguration durch die Messung der Spaltkräfte auf die Kenngrößen  $M_{\max}$ ,  $f_{ax}$  und  $K_{ser}$ ) jene Prüfkörper herangezogen, welche bereits für die Untersuchungen der vorhergehenden Serien geprüft wurden.

### Holzfeuchtigkeit

In Tabelle 64 sind die Holzfeuchtedaten der Prüfserie 4 (Kurzzeit: KZ; Langzeit: LZ) sowie der Referenzprüfkörper (REF aus den Serien 1 bzw. 2) dargestellt. Außerdem wird hier bei einem Achs-Faserwinkel von 90° eine Unterscheidung zwischen radialer (90°R) und tangentialer (90°T) Einschraubrichtung durchgeführt (siehe Prüfplanung in Kapitel 3-1).

**Tabelle 64:** Serie 4: Holzfeuchtigkeit  $u$  in Abhängigkeit vom Holzprodukt, Achs-Faserwinkel, Schraubentyp und der Prüfkonfiguration

Holzart bzw. Gruppe und Art	$\alpha$	Referenzschraube (RF)					Prototyp 1 (P1)					
		$n$	mean	COV	min	max	$n$	mean	COV	min	max	
		[-]	[%]	[%]	[%]	[%]	[-]	[%]	[%]	[%]	[%]	
Buche	REF	0°	22	8,50	3,5	8,06	9,05	22	9,32	2,5	9,02	9,77
		90°	20	8,32	2,8	8,04	8,82	22	9,19	3,3	8,68	10,1
	KZ	0°	10	9,86	2,8	9,45	10,4	11	9,75	2,8	9,39	10,3
		90°R	9	10,0	2,5	9,78	10,4	10	10,1	2,4	9,85	10,5
		90°T	10	10,2	1,8	9,95	10,4	10	10,3	1,8	9,99	10,5
	LZ	0°	5	10,4	1,1	10,3	10,5	2	10,2	0,7	10,1	10,2
		90°R	5	10,2	2,5	9,98	10,5	4	10,0	1,0	9,94	10,1
90°T		5	10,2	1,1	10,1	10,4	5	10,2	2,0	9,95	10,4	
BauBuche	REF	0°	22	6,86	1,5	6,70	7,07	14	7,70	1,3	7,54	7,90
		90°	21	6,71	2,0	6,47	6,98	21	7,85	0,9	7,76	8,04
	KZ	0°	8	8,32	1,4	8,16	8,48	6	8,32	1,0	8,22	8,44
		90°R	10	8,51	3,2	7,99	8,86	10	8,40	2,7	8,07	8,76
		90°T	10	8,55	2,3	8,31	8,94	10	8,53	2,2	8,22	8,80
	LZ	0°	3	8,98	0,6	8,91	9,02	4	9,11	1,6	9,00	9,31
		90°R	5	8,43	2,8	8,23	8,77	5	8,40	2,8	8,20	8,79
90°T		5	8,40	2,0	8,20	8,63	5	8,63	2,7	8,43	9,02	

Wie bereits in den vorherigen Serien eingehend erläutert, liegt die Holzfeuchtigkeit für die Referenzversuche aufgrund nicht ausreichender Konditionierung unterhalb der erwarteten Ausgleichsfeuchte, welche sich bei  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$  und  $(65 \pm 5)\%$  relativer Luftfeuchte einstellen würde.

Für jene Buchen-Prüfkörper, die zur Bestimmung der Spaltkräfte herangezogen werden, stellt sich eine Holzfeuchtigkeit zwischen 9,39 % und 10,5 % ein. Der Mittelwert der Buche kommt somit bei 10,1 % mit einem durchschnittlichen Variationskoeffizienten von 1,9 % zu liegen. Für die zur Ermittlung der Spaltkräfte herangezogenen BauBuchen-Prüfkörper liegen die Extremwerte der Holzfeuchtigkeit bei 7,99 % bzw. 9,31 %. Die in Summe mittlere Holzfeuchtigkeit von 8,55 % weist dabei ebenfalls lediglich einen Variationskoeffizienten von 2,1 % auf.

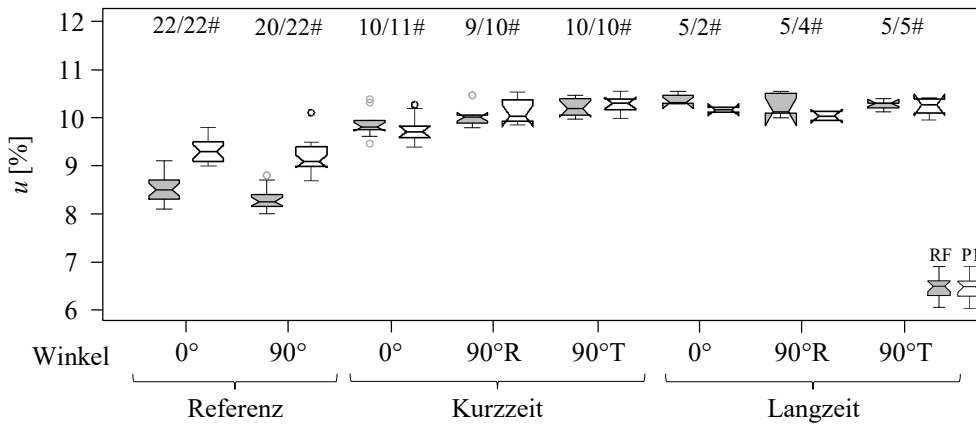


Abbildung 105: Serie 4: Boxplot Holzfeuchtigkeit  $u$  für die Buche in Abhängigkeit vom Achs-Faserwinkel, der Prüfkonfiguration und vom Schraubentyp

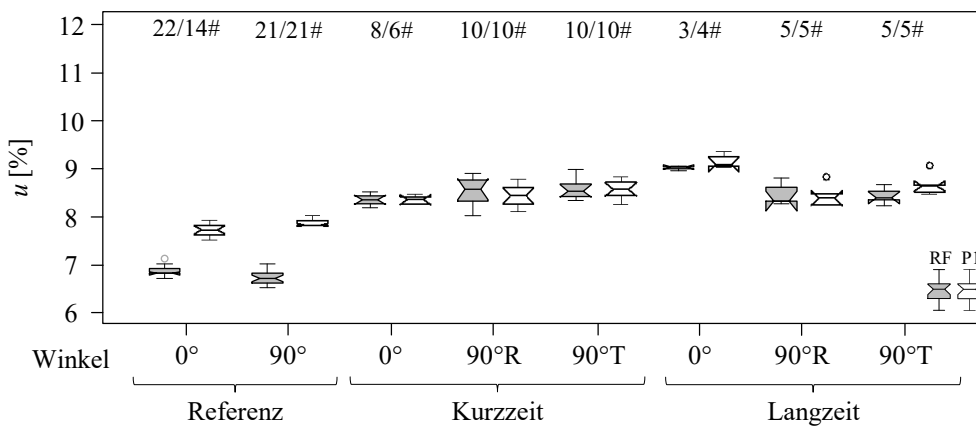


Abbildung 106: Serie 4: Boxplot Holzfeuchtigkeit  $u$  für die BauBuche in Abhängigkeit vom Achs-Faserwinkel, der Prüfkonfiguration und vom Schraubentyp

Wie den beiden Abbildungen 105 und 106 zu entnehmen ist, sind die Abweichungen der einzelnen Untergruppen der Serie 4 zueinander sehr gering. Es ist deshalb kein signifikanter Unterschied der nachfolgenden Kenngrößen (speziell der Spaltkräfte) aufgrund unterschiedlicher Holzfeuchtigkeit zu erwarten.



## Rohdichte

In Tabelle 65 sind die Rohdichten, welche auf eine Referenzholzfeuchte von 12 % korrigiert sind, der einzelnen Untergruppen der Prüfserie 4 und der dazugehörigen Referenzversuche dargestellt.

**Tabelle 65:** Serie 4: Rohdichte  $\rho_{12}$  in Abhängigkeit vom Holzprodukt, Achs-Faserwinkel, Schraubentyp und der Prüfkonfiguration

Holzart bzw. Gruppe und Art	$\alpha$	Referenzschraube (RF)					Prototyp 1 (P1)					
		$n$	mean	COV	min	max	$n$	mean	COV	min	max	
		[-]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[%]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[-]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[%]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	
Buche	REF	0°	22	740	7,7	660	861	22	742	7,6	660	851
		90°	20	728	6,8	654	839	22	734	7,4	657	851
	KZ	0°	10	747	6,4	677	829	11	748	5,9	667	828
		90°R	9	769	9,3	646	867	10	768	8,7	647	864
		90°T	10	764	8,3	651	856	10	764	7,8	664	860
	LZ	0°	5	739	7,7	694	837	2	734	2,1	723	745
		90°R	5	755	10,2	649	857	4	794	5,9	739	854
90°T		5	761	10,1	656	858	5	773	6,3	709	842	
BauBuche	REF	0°	22	840	1,5	810	862	14	832	1,2	814	849
		90°	21	832	1,7	810	860	21	840	1,7	808	860
	KZ	0°	8	825	1,8	804	846	6	832	2,1	808	852
		90°R	10	825	1,7	810	856	10	826	1,5	806	845
		90°T	10	827	1,0	813	840	10	828	1,1	810	845
	LZ	0°	3	839	1,6	825	851	4	800	4,3	749	823
		90°R	5	829	1,1	820	841	5	824	1,3	812	839
90°T		5	832	0,6	828	838	5	830	1,0	818	839	

Wie sich für die Buche in der Tabelle 65 und Abbildung 107 entnehmen lässt, liegen die Mittelwerte der einzelnen Untergruppen nicht so eng zusammen wie in den vorhergehenden Serien (vgl. Tabelle 48). Dies resultiert vorwiegend aus den unterschiedlichen Kanthölzern, welche als Ausgangsmaterial zur Herstellung der Prüfkörper verwendet wurden. So zeigen die Prüfkörper, welche für die Ermittlung der Spaltkräfte herangezogen werden (KZ und LZ) und einen Achs-Faserwinkel von 90° aufweisen ( $\rho_{12, \text{mean}, S4} = 769 \text{ kg/m}^3$ ) eine um durchschnittlich 30 kg/m<sup>3</sup> höhere Rohdichte im Vergleich zu den dazugehörigen Referenzprüfkörpern ( $\rho_{12, \text{mean}, \text{REF}} = 739 \text{ kg/m}^3$ ) der Buche. Unter Einbeziehung der Ergebnisse aus Kapitel 4-3.3, welche für die Ausziehfestigkeit der Buche einen Potenzparameter von etwa 1,7 für die Rohdichte angeben, sind somit etwa 7 % davon abweichende, höhere Ergebnisse für  $f_{ax}$  zu erwarten.

Die vergleichsweise größeren Variationskoeffizienten für die Buche, vor allem für 90°R und 90°T, resultieren aus den geringeren Prüfkörperanzahlen bei nahezu gleich bleibenden minimalen und maximalen Rohdichten.

Für die BauBuche kommt die durchschnittliche mittlere Rohdichte bei 829 kg/m<sup>3</sup> zu liegen. Wie der Abbildung 108 zu entnehmen ist, kommt es dabei zu keinen signifikanten Abweichungen zwischen den

Untergruppen. Die geringe Streuung der BauBuche ist durch die geringen Variationskoeffizienten der Untergruppen zwischen 0,6 % und 4,3 % ebenso wiederum gut erkennbar. Für die Ergebnisse der weiteren Kenngrößen ( $M_{\max}$ ,  $f_{ax}$  und  $K_{ser}$ ) ist somit von einer guten Vergleichbarkeit der Prüfergebnisse der BauBuche auszugehen. Lediglich der vorhin dargestellte Unterschied in der Holzfeuchtigkeit könnte einen geringen Einfluss haben.

Im Allgemeinen ist sowohl für die Buche als auch für die BauBuche von einer geringeren Aussagekraft der Boxplots aufgrund der sehr kleinen Probenumfänge auszugehen.

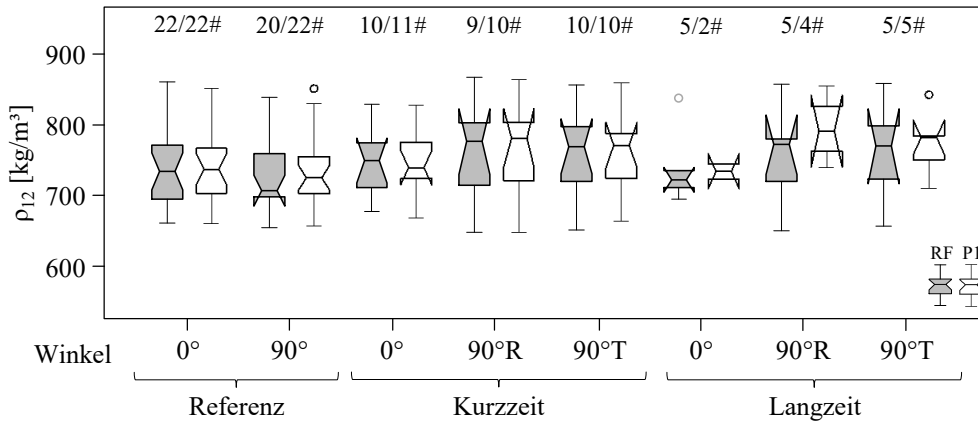


Abbildung 107: Serie 4: Boxplot Rohdichte  $\rho_{12}$  für die Buche in Abhängigkeit vom Achs-Faserwinkel, der Prüfkfiguration und vom Schraubentyp

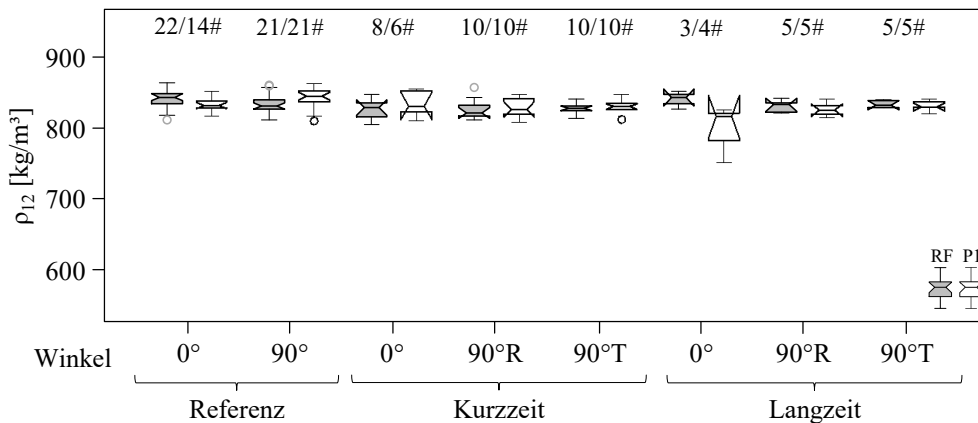


Abbildung 108: Serie 4: Boxplot Rohdichte  $\rho_{12}$  für die BauBuche in Abhängigkeit vom Achs-Faserwinkel, der Prüfkfiguration und vom Schraubentyp

## 4-5.2 AUSWERTUNG EINDREHPRÜFUNGEN

In der Tabelle 66 und den anschließenden Diagrammen sind die ermittelten maximalen Eindrehmomente angeführt. Es ist dabei allerdings zu beachten, dass ein Vergleich der Ergebnisse der Referenzprüfkörper mit den Prüfergebnissen der Serie 4 nur bedingt möglich ist, da die Prüfkörperhöhen und somit die Einschraubtiefen abweichen. Während für die Referenzversuche eine Prüfkörperhöhe von 50 mm gewählt wurde, sind die Prüfkörper, um eine entsprechende Anordnung der Messschrauben zu erreichen, 80 mm hoch.

Es sei an dieser Stelle auch noch angemerkt, dass für die Referenzversuche bei einem Achs-Faserwinkel von 90° die Schrauben in den BauBuche-Prüfkörpern ausschließlich in radialer Richtung appliziert wurden. Die Beschreibung und Analyse der Ergebnisse der Referenzdaten erfolgte bereits in Serien zuvor, weshalb die Ergebnisse nur der Vollständigkeit halber in die Tabelle 66 aufgenommen werden.

**Tabelle 66:** Serie 4: maximales Eindrehmoment  $M_{max}$  in Abhängigkeit vom Holzprodukt, Achs-Faserwinkel, Schraubentyp und der Prüfkonfiguration

Holzart bzw. Gruppe und Art	$\alpha$	Referenzschraube (RF)					Prototyp 1 (P1)					Verhältnis mean[P1]/ mean[RF] [%]	
		<i>n</i>	mean [Nm]	COV [%]	min [Nm]	max [Nm]	<i>n</i>	mean [Nm]	COV [%]	min [Nm]	max [Nm]		
Buche	REF	0°	22	8,48	17,3	6,43	11,4	22	9,65	16,5	7,51	14,0	114
		90°	20	8,91	14,6	7,18	12,1	22	10,2	15,7	7,94	14,5	114
	KZ	0°	10	11,0	9,9	9,25	12,7	11	12,4	11,4	10,5	15,0	112
		90°R	9	11,9	19,8	8,40	15,3	10	14,3	17,5	10,5	18,3	120
		90°T	10	11,5	15,2	8,62	14,6	10	14,8	16,0	11,0	19,5	128
	LZ	0°	5	10,1	16,4	8,74	13,0	2	12,6	16,2	11,2	14,1	125
		90°R	5	10,8	25,4	7,61	14,8	4	14,8	10,1	12,8	16,3	137
		90°T	5	11,3	22,9	8,30	15,3	5	14,3	8,0	13,2	16,0	126
	BauBuche	REF	0°	22	12,4	6,5	10,5	13,7	14	13,6	5,7	12,1	15,1
90°			21	12,7	3,5	11,6	13,5	21	15,0	5,4	13,4	16,4	119
KZ		0°	8	15,5	6,9	14,2	17,3	6	17,6	6,6	16,0	19,0	114
		90°R	10	15,1	5,9	13,2	16,2	10	18,5	3,3	17,5	19,3	123
		90°T	10	15,6	5,7	13,9	16,6	10	18,5	5,4	17,4	20,5	118
LZ		0°	3	15,3	1,4	15,1	15,5	4	16,6	4,5	15,8	17,5	108
		90°R	5	14,4	7,0	12,9	15,1	5	17,1	4,5	16,4	18,2	119
		90°T	5	14,9	5,8	14,1	15,9	5	17,0	6,3	15,5	18,4	115

Wie Tabelle 66 und den Abbildungen 109 und 110 zu entnehmen ist, weisen die maximalen Eindrehmomente für die Buche und BauBuche keine signifikanten Unterschiede zwischen den Achs-Faserwinkeln von 0°, 90°R und 90°T auf. So kommen die Mittelwerte für die Referenzschraube in der Buche zwischen 10,1 Nm und 11,9 Nm und für den Prototypen 1 zwischen 12,4 Nm und 14,8 Nm zu liegen. Auch für die BauBuche sind die ermittelten Unterschiede innerhalb der Untergruppen der RF (14,4–15,6 Nm) und des P1 (16,6–18,5 Nm) sehr gering.

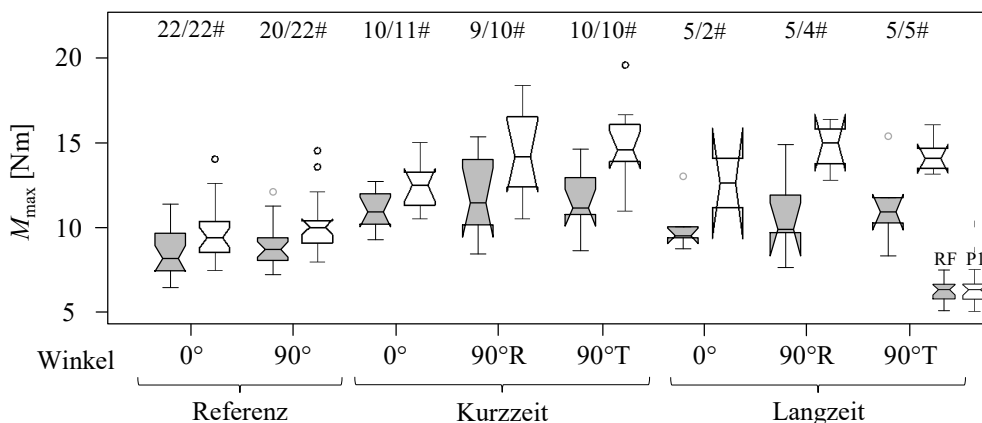
Die Variationskoeffizienten liegen für die Buche deutlich höher als für die BauBuche. Trotz eines eventuell möglichen Einflusses der Auftrennung der Prüfkörperhälften verhalten sich die Streuungen und folglich auch die Variationskoeffizienten sehr ähnlich zu den Referenzprüfungen. Die Variationskoeffizienten der Prüfkörper der Serie 4 liegen für die Buche bei 15,7 % und somit sehr ähnlich zu jenen der Referenzversuche (COV von 16,0 %). Für die BauBuche sind die Variationskoeffizienten der Referenzversuche sogar exakt gleich mit jenen der Serie 4 (jeweils 5,3 %).

Die Zunahme der maximalen Eindrehmomente für die BauBuche, welche aufgrund der höheren Rohdichte zu erwarten sind, stellt sich für die Prüfkörper mit den Messschrauben etwas weniger stark ein als bei den Referenzversuchen. Während für die Referenzversuche bei einem Achs-Faserwinkel von  $0^\circ$  und  $90^\circ$  in der BauBuche um durchschnittlich 44 % größere maximale Einschraubmomente auftreten als in der Buche, zeigt sich für die Serie 4 eine Zunahme von im Mittel 32 %. Die Ursache für diesen Unterschied ist allerdings zu einem Großteil auf die unterschiedlichen Rohdichten der Buchen-Prüfkörper für die Referenz- und Serie 4-Versuche zu begründen (siehe Kapitel 4-5.1). So lässt sich mit dem Potenzfaktor der Rohdichte von 1,9 für die Buche bei einem Einschraubwinkel von  $0^\circ$  und  $90^\circ$  ein Unterschied des Eindrehmomentes von ca. 8 % erwarten ( $\rho_{12,\text{mean},S4} = 769 \text{ kg/m}^3$ ;  $\rho_{12,\text{mean},\text{REF}} = 739 \text{ kg/m}^3$ ).

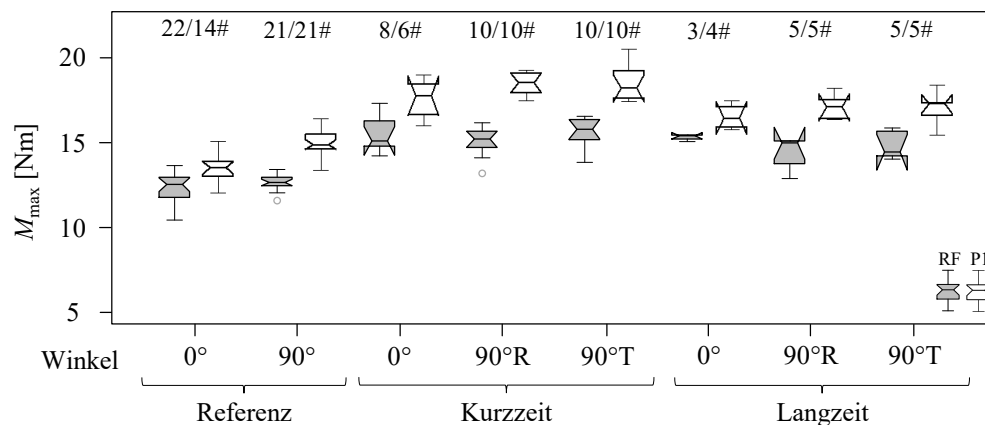
Sowohl für die Buche als auch für die BauBuche beträgt die Zunahme des maximalen Einschraubmomentes für den Prototyp 1 im Vergleich zur RF für die Referenzprüfungen 14 %. Für die Prüfungen inklusive der Messschrauben, welche aus der Vorspannung bereits einen Querdruck auf das Holz aufbringen, wird eine Zunahme für den P1 bezogen auf die RF von 20 % festgestellt.

Im Rahmen des “hardwood screws“-Projektes wurden bereits Eindrehprüfungen an nicht aufgetrennten Probekörpern mit einer Höhe bzw. effektiven Verankerungslänge von 96 mm durchgeführt. Dabei kam BauBuche mit einer mittleren Rohdichte von  $833 \text{ kg/m}^3$  zum Einsatz. Die Mittelwerte der maximalen Eindrehmomente für einen Achs-Faserwinkel von  $0^\circ$  ergaben sich dabei für den Prototypen 1 zu 18,7 Nm (Brandner und Ringhofer, 2017). Dieser Wert ist mit jenem aus den KZ-Prüfungen der Serie 4 bei einem Achs-Faserwinkel von  $0^\circ$  (17,6 Nm für den P1 bei 80 mm Einschraubtiefe) gut vergleichbar. Ein Einfluss der Vorspannung bzw. der Auftrennung in zwei Prüfkörperhälften auf die Eindrehkenngrößen kann deshalb nahezu vollständig ausgeschlossen werden.

In den nachfolgenden beiden Abbildungen 109 und 110 sind die in den Prüfungen ermittelten Daten der Serie 4 und der Referenzprüfungen durch Boxplots dargestellt.



**Abbildung 109: Serie 4: Boxplot maximales Eindrehmoment  $M_{\text{max}}$  für die Buche in Abhängigkeit vom Achs-Faserwinkel, der Prüfkonfiguration und vom Schraubentyp**



**Abbildung 110: Serie 4: Boxplot maximales Eindrehmoment  $M_{max}$  für die BauBuche in Abhängigkeit vom Achs-Faserwinkel, der Prüfkfiguration und vom Schraubentyp**

Anmerkung: Allgemein sei an dieser Stelle für die BauBuche noch festgehalten, dass die Position der Schraube bei einem Achs-Faserwinkel von 90° und tangentialer Einschraubrichtung (90°T) immer in einem höher verdichteten Bereich, als diesen der durchschnittliche Prüfkörper aufweist, zu liegen kommt. Dies ist sowohl der Produktion, bei welcher jeweils Platten mit einer Stärke von 40 mm flächig verklebt und daher im Bereich der Klebefuge größere Deformationen durch Aufbringung eines hohen Druckes aufweisen, als auch der erforderlichen Prüfkörpergeometrie (80 mm Breite) geschuldet. Für die tangentiale Verschraubung (lediglich für die Serie 4 durchgeführt) ist die zusätzliche Auftrennung in die beiden Prüfkörperhälften dahingehend hilfreich, dass aus dem hoch verdichteten Bereich die Stärke des Kreissägeblattes (ca. 3–4 mm) herausgeschnitten wird. Durch die Applikation der Schraube in radialer Richtung kommt es lediglich zu einer einmaligen Durchschraubung der dichteren Schicht. Dadurch wird ein vergleichsweise geringer Einfluss auf das Eindrehmoment erwartet.

### 4-5.3 AUSWERTUNG AUSZIEHPRÜFUNGEN

Neben den in dieser Serie hauptsächlich betrachteten Spaltkräften (siehe Kapitel 4-5.4) sind aus den Ausziehprüfungen wiederum die ermittelten Werte der Ausziehfestigkeit  $f_{ax}$  und der Steifigkeit  $K_{ser}$  von Bedeutung. Im Rahmen der Prüfungen kam es bei einzelnen Untergruppen (bei Achs-Faserwinkeln von 90°) der Buche und BauBuche zu einem Schraubenstahlbruch vor dem Erreichen der maximalen Ausziehkraft bzw. Ausziehfestigkeit. Bei den Referenzprüfungen der Serien 1 & 2 wurde aufgrund einer geringeren Prüfkörperhöhe und somit Einschraubtiefe kein Versagensfall dahingehend beobachtet. Die Anzahl der Schraubenbrüche der jeweiligen Untergruppen der Serie 4 ist der Tabelle 67 (Anzahl der Schraubenstahlbrüche in Klammer dargestellt), der Abbildung 111 und dem Anhang C-2 zu entnehmen. Da teilweise für eine große Anzahl bzw. sogar sämtliche Prüfungen einer Untergruppe ein Schraubenstahlbruch auftrat, wurde generell für die Ausziehfestigkeit auf eine rechts-zensierte Datenanalyse (MLerc) verzichtet.

#### Ausziehfestigkeit

Da im Rahmen der Ausziehprüfungen der Serie 4 mehrmals ein Versagen des Schraubenstahls eintrat, sind die in Tabelle 67 dargestellten Werte der Ausziehfestigkeit für die jeweiligen Untergruppen nur als Mindestwerte anzusehen. Somit bestehen einige Untergruppen vollständig aus rechts-zensierten Daten, was vor allem für die Interpretation und den Vergleich untereinander zu berücksichtigen ist.

**Tabelle 67: Serie 4: Ausziehfestigkeit  $f_{ax}$  in Abhängigkeit vom Holzprodukt, Achs-Faserwinkel, Schraubentyp und der Prüfkongfiguration**

Holzart bzw. Gruppe und Art	$\alpha$	Referenzschraube (RF)					Prototyp 1 (P1)					Verhältnis mean[P1]/ mean[RF] [%]	
		$n$	mean	COV	min	max	$n$	mean	COV	min	max		
		[-]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]		
Buche	REF	0°	22	12,6	17,4	9,57	17,7	22	11,2	17,0	8,38	15,3	89
		90°	20	15,8	13,4	13,1	20,9	22	15,7	13,1	12,8	19,6	99
	KZ	0°	10	10,7	14,1	8,29	12,2	11	11,0	11,8	9,04	13,2	103
		90°R	9 (5)	13,5	7,4	11,2	14,1	10 (2)	15,4	12,3	11,7	17,8	114
		90°T	10 (4)	13,2	8,3	10,9	14,0	10 (1)	14,4	13,0	11,1	17,1	109
BauBuche	REF	0°	22	15,6	5,4	14,0	17,2	14	13,9	6,7	12,4	15,6	89
		90°	21	18,5	3,7	17,6	19,9	21	17,2	4,2	15,6	18,5	93
	KZ	0°	8*	11,4	7,6	10,4	12,3	6	13,8	5,9	12,7	14,6	121
		90°R	10 (10)	14,0	0,4	13,9	14,1	10 (0)	16,9	3,6	16,1	17,6	121
		90°T	10 (10)	14,0	0,8	13,7	14,1	10 (8)	17,5	2,2	16,7	17,8	125

\* von diesen acht Prüfungen wurden vier bei einer Belastung von 25 kN abgebrochen (Pöll, 2017)

Für alle Werte der Buche und BauBuche, wo keine Schraubenbrüche auftraten (nur bei Achs-Faserwinkel von 0°), liegen die Werte der Ausziehfestigkeiten der Serie 4 für die Referenzschrauben deutlich unter jenen der Referenzprüfungen (ca. 20 %). Für die BauBuche ist dabei allerdings zu beachten, dass bei vier Prüfungen die Ausziehprüfung bei einer Belastung von 25 kN abgebrochen wurde und es sich somit ebenfalls um rechts-zensierte Daten handelt. Für den Prototypen 1 hingegen zeigen die Referenzprüfungen und die Prüfungen der Serie 4 keine signifikanten Unterschiede der Ausziehfestigkeit.

Aufgrund der unterschiedlichen Rohdichten der Buchen-Prüfkörper der Referenz- und Serie 4-Prüfungen würden für die Ergebnisse der Serie 4 Ausziehfestigkeiten von etwa 7 % mehr im Vergleich zu den Referenzversuchen erwartet werden. Die längere Verankerungslänge im Prüfkörper würde bei gleichbleibender Ausziehfestigkeit eine Erhöhung der maximalen axialen Last von 60 % bedeuten, welche aufgrund der zu geringen Stahlzugtragfähigkeit der Schrauben allerdings nicht erreicht werden kann.

Für die Ausziehfestigkeiten der Serie 4 (siehe Abkürzung KZ in Tabelle 67) der Referenzschraube in Buche und BauBuche werden, aufgrund der begrenzten Zugtragfähigkeiten und der damit verbundenen Brüche der Schrauben, nur wesentlich geringere Werte erreicht (etwa 20 % geringer). Mit dem steigenden Anteil der auf Stahlbruch der Schraube versagenden Prüfungen nimmt auch der Variationskoeffizient entsprechend ab. So liegt dieser für die Untergruppen, wo sämtliche Schrauben auf Stahlbruch versagen, unter 1 % (entspricht somit in etwa dem Variationskoeffizienten der Schraube bei reinen Stahlzugbruchsprüfungen).

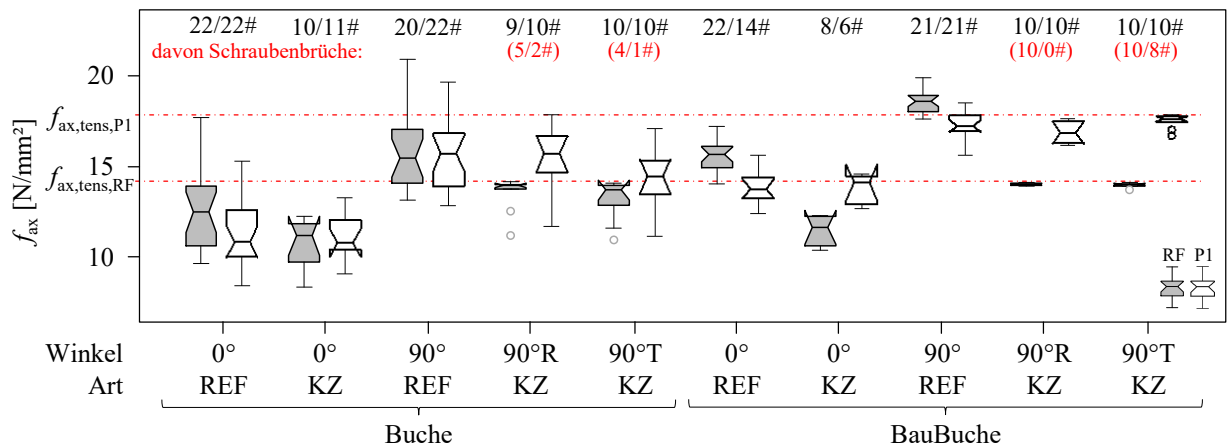
Für den P1 hingegen erreichen die Mittelwerte der Ausziehfestigkeiten bei einem Achs-Faserwinkel von 90° trotz des Auftretens von Schraubenbrüchen – allerdings in der Regel wenige einzelne – die mittleren Werte der Referenzversuche. So wird für die BauBuche (90°T), trotz des Auftretens von acht Schraubenstahlbrüchen, bereits eine höhere Ausziehfestigkeit als jene der Referenzschraube erreicht. Demzufolge wäre sogar eine weitere Steigerung der Belastung und somit Ausziehfestigkeit im Vergleich zu den Referenzprüfungen denkbar, welche allerdings mit dieser Prüfkongfiguration nicht ermittelt werden konnte (Schraubenstahlbruch). Diese sehr hohe Ausziehtragfähigkeit könnte dabei wiederum durch den Einfluss der hoch verdichteten Lagen im Bereich der Schraube in der BauBuche bei einem Achs-Faserwinkel von 90°T resultieren (siehe Anmerkung in Kapitel 4-5.2).



Wie der Abbildung 111 zu entnehmen ist, zeigen sich ausgeprägte Grenzen der Ausziehfestigkeit in Abhängigkeit der jeweiligen Schraube ( $f_{ax,tens,P1} = 17,7 \text{ N/mm}^2$  und  $f_{ax,tens,RF} = 14,0 \text{ N/mm}^2$ ). Diese ergeben sich nach Gleichung (4.8) und sind in Abbildung 111 eingetragen.

$$f_{ax,mean,RF/P1} = \frac{f_{tens,mean,RF/P1}}{d \cdot \pi \cdot l_{ef}} \quad (4.8)$$

- $f_{ax,mean,RF/P1}$  mittlere Grenzausziehfestigkeit für die Schraubentypen RF und P1 [ $\text{N/mm}^2$ ]
- $f_{tens,mean,RF/P1}$  mittlere Stahl-Zugtragfähigkeit für die Schraubentypen RF und P1 [N]
- $d$  Nenn- bzw. Außendurchmesser der Schraube [mm]
- $l_{ef}$  effektive Verankerungslänge des Gewindes [mm]



**Abbildung 111: Serie 4: Boxplot Ausziehfestigkeit  $f_{ax}$  in Abhängigkeit vom Achs-Faserwinkel, der Prüfkfiguration und vom Schraubentyp**

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass lediglich für die Referenzschraube bei einem Achs-Faserwinkel von  $0^\circ$  ein signifikanter Abfall in der BauBuche zu erkennen ist. Dieser ist allerdings zum Teil auf die bei einer Prüfbelastung von 25 kN abgebrochenen Prüfungen zurückzuführen. Der Abfall für die Buche fällt prozentuell ähnlich groß aus, ist aber aufgrund der größeren Streuungen nicht signifikant.

Für die Referenzschraube ist bei einem Einschraubwinkel von  $90^\circ$  zur Faser der Abfall der Ausziehfestigkeit für die Serie 4 im Vergleich zu den Referenzprüfungen größtenteils auf die aufgetretenen Schraubenstahlbrüche zurückzuführen. Deshalb ist eine Aussage über die tatsächlichen maximalen Ausziehfestigkeiten nicht möglich. Für den Prototyp 1 ist hingegen weder für die Buche noch für die BauBuche und unabhängig vom Einschraubwinkel ein signifikanter Abfall erkennbar. Somit kann davon ausgegangen werden, dass durch die veränderte Prüfkfiguration für die Serie 4 grundsätzlich sehr ähnliche Ergebnisse wie bei den Referenzversuchen erzielt werden, sofern nicht ein frühzeitiges Versagen der Schraube eintritt.

## Steifigkeit

In Tabelle 68 sind statistische Kenndaten der Verbundsteifigkeit der im Holz eingebetteten Schrauben der Untergruppen der Prüfserie 4 und der Referenzprüfungen angegeben. Dabei fehlen wie auch in den vorherigen Serien wiederum die Steifigkeiten für die Referenzprüfungen der Referenzschraube, bei welchen keine Messung der Verformungen durchgeführt wurde. Deshalb ist in weiterer Folge lediglich für den Prototypen 1 ein Vergleich zwischen den Referenzprüfungen und der Serie 4 möglich.

**Tabelle 68: Serie 4: Steifigkeit  $K_{ser}$  in Abhängigkeit vom Holzprodukt, Achs-Faserwinkel, Schraubentyp und der Prüfkongfiguration**

Holzart bzw. Gruppe und Art	$\alpha$	Referenzschraube (RF)					Prototyp 1 (P1)					
		$n$	mean	COV	min	max	$n$	mean	COV	min	max	
		[-]	[N/mm]	[%]	[N/mm]	[N/mm]	[-]	[N/mm]	[%]	[N/mm]	[N/mm]	
Buche	REF	0°	–	–	–	–	–	22	45.416	11,0	37.363	52.967
		90°	–	–	–	–	–	21	53.270	11,0	42.716	67.178
	KZ	0°	10	40.115	15,7	28.631	48.177	11	53.626	10,3	47.129	63.732
		90°R	9	44.882	9,8	40.708	54.646	10	55.682	16,1	37.937	68.112
		90°T	10	39.236	10,8	33.937	45.910	10	50.125	12,4	40.273	60.079
BauBuche	REF	0°	–	–	–	–	–	13	45.365	12,8	37.034	57.185
		90°	–	–	–	–	–	21	42.806	7,7	35.423	47.501
	KZ	0°	8	35.515	22,0	22.995	48.015	6	58.635	3,1	55.919	60.576
		90°R	10	39.295	4,2	35.723	41.297	10	46.026	6,8	42.188	52.008
		90°T	10	37.330	8,9	32.672	43.339	10	45.913	9,3	39.648	53.848

Für die Prüfungen der Serie 4 mit Achs-Faserwinkeln von 0°, 90°R und 90°T ergeben sich für die Buche und BauBuche beim Prototyp 1 im Mittel um 25 % höhere Steifigkeiten als für die Referenzschraube. Lediglich für die BauBuche zeigt sich bei einem Einschraubwinkel von 0° beim P1 sogar eine um 65 % höhere Steifigkeiten als für die RF. Im Vergleich dazu zeigen die Prüfungen aus Serie 2 (siehe Abschnitt 4-3.3), mit Einschraubwinkeln von 15°, 30° und 45°, für den Prototyp 1 um 21 % für die Buche und um 11 % für die BauBuche höhere Steifigkeiten als für die Referenzschraube. Die Zunahme der Steifigkeit zwischen den beiden Schraubentypen fällt im Vergleich dazu für die Serie 4 etwas größer aus.

Die Abnahme der Steifigkeit beim Vergleich der Ergebnisse der Buche mit der BauBuche ist identisch mit den diesbezüglichen Ergebnissen aus Serie 2. Die Steifigkeiten der BauBuche für die Serie 4 fallen dabei für beide Schraubentypen im Durchschnitt um 7,5 % geringer als die Steifigkeiten der Buche aus.

Zusätzlich bestätigen sich auch für die Prüfkongfiguration mit den Messschrauben die Ergebnisse der Serie 2, wo keine durchgängige Abnahme der Steifigkeit mit zunehmendem Einschraubwinkel hervor- geht. Besonders auffallend ist dabei, dass sich für eine in 90° zur Faser radial eingebrachte Schraube immer größere Steifigkeiten im Vergleich zu einer tangential angeordneten zeigen. Dies geht dabei mit den Steifigkeiten des Holzes einher, welches in radialer Richtung einen höheren E-Modul aufweist als in tangentialer Richtung (allerdings sehr geringe und nicht signifikante Unterschiede). Die Steifigkeiten für einen Achs-Faserwinkel von 90°T liegen dabei sowohl oberhalb der Steifigkeit von 0° als auch darunter und sind im Allgemeinen nur sehr gering abweichend.

Auffällig ist für die Verbundsteifigkeiten der BauBuche, dass es nur zu sehr geringen Abweichungen zwischen radialer und tangentialer Einschraubrichtung kommt. Für die Ausziehfestigkeiten hingegen werden bei tangential eingebrachten Schrauben, durch die hoch verdichteten Lagen im Bereich des

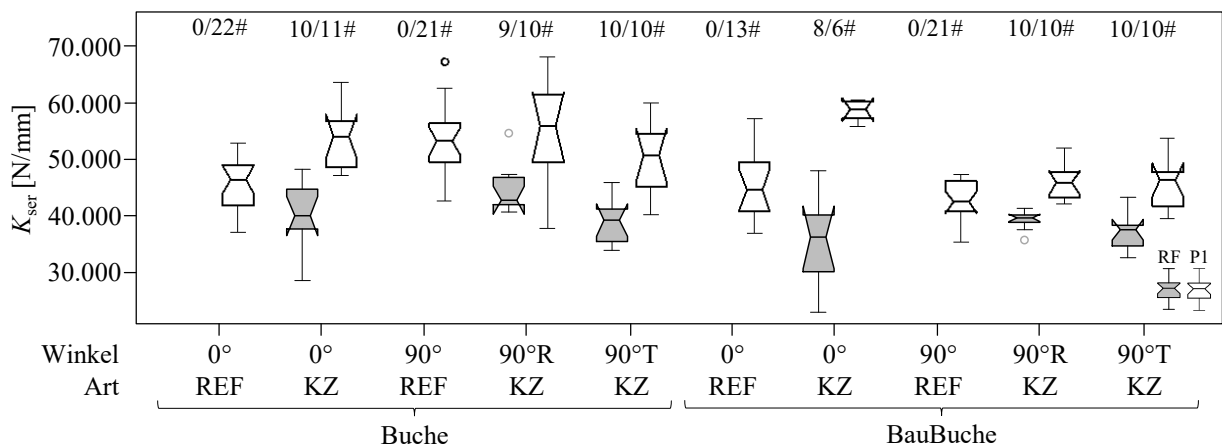
Schraubenkanals, höhere Werte als in radialer Richtung erzielt. Diese Charakteristik zeigt sich für die Steifigkeiten hingegen weder für den Prototypen 1, noch für die Referenzschraube.

Für Einschraubwinkel von 0° zeigen die Referenzprüfungen für die Buche um 18 % und für die BauBuche um 29 % geringere Verbundsteifigkeiten für den Prototypen 1 als jene Werte der Serie 4 (KZ). Für die höhere Steifigkeit wird dabei vor allem der Einfluss der größeren effektiven Verankerungslänge auf die Verbundsteifigkeit in Betracht gezogen. Diese erwartete Zunahme ergibt sich für die erhöhte Verankerungslänge von 80 mm nach Ringhofer (2017) durch Gleichung (4.9) zu 15 %. Dies stellt dabei nur eine Abschätzung dar, welche nur auf Prüfdaten der Fichte beruht.

$$\left( \frac{l_{\text{ef,KZ}}}{l_{\text{ef,REF}}} \right)^{k_{\text{lef}}} \text{ mit } k_{\text{lef}} = \begin{cases} 0,30 & 0^\circ \\ 0,32 & 90^\circ \end{cases} \quad (4.9)$$

$l_{\text{ef,KZ/REF}}$  effektive Verankerungslänge bei den KZ- bzw. REF-Prüfungen [mm]  
 $k_{\text{lef}}$  Potenzfaktor zur Bestimmung der Abhängigkeit von der eff. Verankerungslänge [-]

Für den Prototyp 1, für welchen ein Vergleich mit den Referenzprüfungen möglich ist, zeigt sich für Einschraubwinkel von 90°R und 90°T nur eine sehr geringe Abweichung von den Steifigkeiten der Referenzprüfungen (max. ± 7 %). Damit kann bzw. muss die vor allem im Rahmen der Serie 2 (hier Referenz) bereits kritisch betrachtete hohe Steifigkeit der Buche bei einem Einschraubwinkel von 90° für den P1 bestätigt werden. Die Zunahme, welche entsprechend Ringhofer (2017) aufgrund der längeren Einbindelänge zu erwarten ist, wird für einen Achs-Faserwinkel von 90° nicht durchgehend beobachtet.



**Abbildung 112: Serie 4: Boxplot Steifigkeit  $K_{ser}$  in Abhängigkeit vom Achs-Faserwinkel, der Prüfkonfiguration und vom Schraubentyp**

Zusammenfassend kann somit für die Steifigkeiten der Serie 4 festgehalten werden, dass sich nahezu die gleichen Ergebnisse und Charakteristiken wie für die Serie 2 zeigen. Es ist somit keine signifikante Beeinflussung der Steifigkeiten durch das Auftrennen der Prüfkörper und dem anschließenden Vorspannen durch die Messschrauben zu erwarten. Außerdem sind für die Steifigkeit noch zahlreiche weitere Einflüsse, wie jene der effektiven Verankerungslänge, welche durch die vorhandenen Ergebnisse nicht eruiert werden können, maßgeblich.

## 4-5.4 SPALTKRÄFTE

Nachfolgend werden die Spaltkräfte für die jeweils durchgeführten Prüfungen dargestellt und diskutiert. Dabei wird zuerst der Spaltkraftverlauf bei der Applikation der Schraube in Abhängigkeit von der Einschraubtiefe und im Anschluss die Spaltkraft infolge der Ausziehprüfung in Abhängigkeit von der axialen Belastung auf Herausziehen dargestellt. Außerdem werden in Kapitel 4-5.4.3 die Ergebnisse der Untersuchungen zum Abklingen der Spaltkräfte nach dem Appliziervorgang über eine Zeitspanne von 24 Stunden beschrieben. Aus diesen drei Beobachtungsserien lässt sich in weiterer Folge ein Gesamtverlauf der Spaltkräfte (siehe Kapitel 4-5.4.4) darstellen. Zum Abschluss folgt noch eine Diskussion zur gewählten Prüfkfiguration bzw. den damit verbundenen Einflüssen auf die Ergebnisse (siehe Kapitel 4-5.5).

Anmerkungen: Grundsätzlich sei an dieser Stelle festgehalten, dass die Spaltkräfte, welche nachfolgend angegeben und diskutiert werden, nicht die tatsächlichen Kräfte darstellen, welche in einem intakten Holzbauteil auftreten würden; sie werden allerdings als gute Schätzer dieser angesehen. Zudem sind die in der Auswertung angeführten Spaltkräfte ausschließlich ohne die aufgebrachten Vorspannkräfte angegeben.

Eine Übersicht zur Anordnung der Messschrauben bzw. zur Lage der Messschraubenreihen ist in Kapitel 3-3.1.2 gezeigt. Die Bezeichnungen der zu verschiedenen Zeitpunkten bzw. Zeitspannen auftretenden unterschiedlichen Spaltkräfte sind nachfolgend kurz dargestellt und erläutert.

### Eindrehen

$F_{MS,i, \text{ein}}$	Kraft einer einzelnen Messschraube $i$ während des Eindrehvorganges [N]
$F_{MS, \text{ges}, \text{ein}}$	maximale Kraft aller Messschrauben während des Eindrehvorganges [N]
$F_{m, \text{tot}}$	gemittelte Gesamtspaltkraft nach Gleichung (4.10) für den Eindrehvorgang [N]

### Herausziehen

$F_{MS,i, \text{aus}, \text{zus}}$	zusätzliche Kraft einer einzelnen Messschraube $i$ durch die Ausziehprüfung [N]
$F_{MS, \text{ges}, \text{aus}, \text{zus}}$	maximale zusätzliche Kraft aller Messschrauben durch die Ausziehprüfung [N]
$F_{MS, \text{ges}, \text{aus}}$	maximale (kumulierte) Kraft aller Messschrauben während der Ausziehprüfung [N]

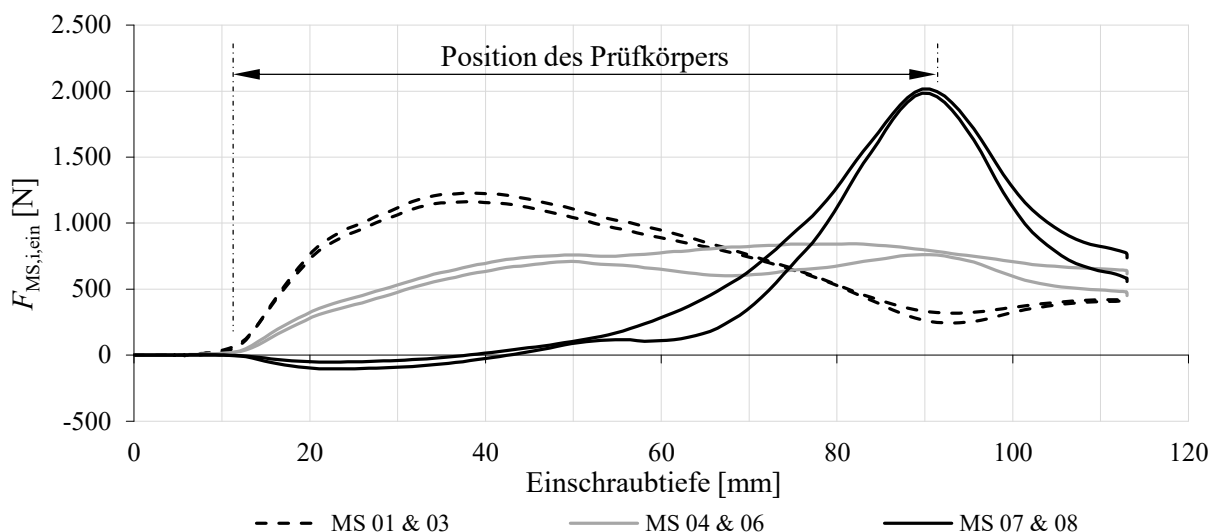
### Gesamtverlauf

$F_{MS,i,t}$	Kraft einer einzelnen Messschraube $i$ zum Zeitpunkt $t$ [N]
$F_{MS, \text{ges}, t}$	Kraft aller Messschrauben zum Zeitpunkt $t$ [N]

### 4-5.4.1 Spaltkräfte beim Eindrehen

Der in der Regel auftretende Verlauf der Spaltkräfte bzw. der Verlauf der Kräfte in den einzelnen Messschrauben durch den Appliziervorgang der Schraube wurde bereits von Pöll (2017) ausführlich beschrieben und ist exemplarisch in Abbildung 113 dargestellt. Es sind die Kraftänderungen in den Messschrauben mit zunehmender Einschraubtiefe sehr gut erkennbar. Eine Darstellung des entsprechenden Verlaufs über die Zeit wird in Kapitel 4-5.4.4 als Teil des Gesamtverlaufs dargestellt.

Wie Abbildung 113 zu entnehmen ist, kommt es in der Mehrzahl der Prüfungen beim Austreten der Schraubenspitze aus dem Prüfkörper bei einer Einschraubtiefe von ca. 90 mm, da während der ersten 10 mm die Schraube erst an den Prüfkörper herangeführt werden muss (ist durch den Prüfablauf bedingt), zur maximal auftretenden Spaltkraft; dies gilt sowohl für die einzelne Messschraube als auch bei Betrachtung der Summe aller Messschraubenkräfte. Die Messschrauben 07 & 08 erfahren im Zuge der Applikation der Schraube die höchsten Kräfte. Nach dem Austreten der Schraubenspitze fallen diese Kräfte sofort ab und es stellen sich für alle Messschrauben nahezu idente Kräfte ein. Auffallend ist dabei, dass bereits etwa 10–15 mm vor dem Austreten der Schraubenspitze in den MS 07 & 08 die nahezu identischen Kräfte auftreten wie nach Beendigung des Eindrehvorganges. Die maximale Spaltkraft aller Messschrauben resultiert dementsprechend zu dem Zeitpunkt, an dem es zum Austreten der Schraubenspitze (Durchschrauben) kommt.



**Abbildung 113:** Serie 4: Messschraubenkräfte infolge der Applikation der Schraube in Abhängigkeit der Einschraubtiefe bzw. des Einschraubweges

Um die Spaltkräfte aus den Eindrehprüfungen mit bekannten Ergebnissen von Blaß und Uibel (2007) bzw. Uibel (2012) vergleichbar zu machen, ist es notwendig, die gemittelte Gesamtpaltkraft  $F_{m,tot}$  zu berechnen. Dabei wird die in Gleichung (2.31) angegebene Formel entsprechend adaptiert, da die Einschraubtiefe größer als die Prüfkörperhöhe ist. Somit ergibt sich die in Gleichung (4.10) angeführte Formel zur Berechnung der mittleren Gesamtkraft.

$$F_{m,tot} = \frac{1}{l} \cdot \int_0^l (F_{MS,01,ein}(x) + F_{MS,03,ein}(x) + \dots + F_{MS,i,ein}(x) + \dots + F_{MS,08,ein}(x)) dx \quad (4.10)$$

- $F_{m,tot}$  mittlere Gesamtkraft zur Beurteilung des Spaltverhaltens [N]
- $l$  Einschraubtiefe; tatsächlicher Weg des beweglichen Schlittens im Rahmen des Eindrehvorganges [mm]
- $F_{MS,i,ein}(x)$  Wert der gemessenen Kraft an der  $i$ -ten Messschraube, hier mit  $i = 1, \dots, 8$  [N]

Die Tabelle 69 zeigt die Auswertung der mittleren Gesamtkräfte  $F_{m,tot}$  nach Gleichung (4.10) für die Prüfungen der Serie 4.

**Tabelle 69:** Serie 4: mittlere Gesamtpaltkraft  $F_{m,tot}$  in Abhängigkeit vom Holzprodukt, Achs-Faserwinkel, Schraubentyp und der Prüfkonfiguration

Holzart bzw. Gruppe und Art	$\alpha$	Referenzschraube (RF)					Prototyp 1 (P1)					Verhältnis mean[P1]/ mean[RF] [%]	
		$n$	mean	COV	min	max	$n$	mean	COV	min	max		
		[-]	[N]	[%]	[N]	[N]	[-]	[N]	[%]	[N]	[N]		
Buche	0°	10	2.842	33,2	1.872	4.677	11	3.171	28,1	1.976	4.622	112	
	KZ	90°R	9	3.483	35,1	1.698	6.016	10	4.823	27,4	2.793	7.159	138
		90°T	10	3.986	28,6	2.774	6.214	10	5.118	26,5	3.069	7.882	128
	LZ	0°	5	1.291	29,5	841	1.888	2	2.249	20,2	1.928	2.570	174
		90°R	5	3.239	31,1	2.371	4.968	4	4.069	14,3	3.276	4.665	126
			90°T	5	3.371	45,8	2.026	6.019	5	4.378	15,3	3.392	5.036

<b>BauBuche</b>	<b>0°</b>	8	3.941	20,8	3.051	5.176	6	5.411	7,4	4.992	5.984	137
	<b>KZ 90°R</b>	10	5.015	8,8	4.649	6.109	10	6.564	5,8	5.981	7.142	131
	<b>90°T</b>	10	6.509	11,0	5.364	7.530	10	7.699	8,8	6.295	8.867	118
	<b>0°</b>	3	3.438	20,3	2.799	4.181	4	3.545	7,3	3.245	3.879	103
	<b>LZ 90°R</b>	5	4.193	5,2	3.959	4.416	5	4.788	1,3	4.710	4.846	114
	<b>90°T</b>	5	5.346	11,4	4.321	5.758	5	6.140	5,3	5.668	6.481	115

Wie der Tabelle 69 zu entnehmen ist, kommt es für die Mittelwerte der Gesamtpaltkräfte  $F_{m,tot}$  zu signifikanten Unterschieden in Abhängigkeit der eingesetzten Schraubentypen, Holzprodukte und Achs-Faserwinkel.

Für die BauBuche ergeben sich Mittelwerte für  $F_{m,tot}$  zwischen 3.438 N und 7.699 N. Bis auf einzelne höhere Variationskoeffizienten bei einem Achs-Faserwinkel von 0° fallen diese mit Werten zwischen 1,3 % und 11,4 % aus. Für die Einschraubwinkel von 0° zeigt sich allerdings bereits erneut die erhöhte Schwierigkeit, die Schrauben exakt in der Mitte der beiden Prüfkörperhälften einzubringen, was trotz entsprechender Ausreißerelimination zu einem höheren Variationskoeffizienten führt.

Sämtliche Werte der mittleren Gesamtkräfte der Buche liegen zwischen 1.291 N und 5.118 N; dies für beide Schraubentypen und alle Achs-Faserwinkel. Zusätzlich fallen die damit verbundenen Variationskoeffizienten mit Werten zwischen 14,3 % und 45,8 % vergleichsweise hoch aus. Diese resultieren dabei vor allem aus dem großen Rohdichtebereich, welcher für die BauBuche so nicht gegeben ist.

Aus einer Abschätzung, ähnlich wie sie in Kapitel 2-5.1 mit Gleichung (2.32) durchgeführt wurde, erfolgt an dieser Stelle eine Abschätzung der auftretenden mittleren Gesamtpaltkräfte über die Potenzfaktoren der Rohdichte. Dabei werden die von Uibel (2012) ermittelten Ergebnisse als Basis herangezogen und auf die vorhandene Rohdichte hochgerechnet; Serie 1.1 für einen Achs-Faserwinkel von 90° und 4.1 für 0°. Mit dem gemittelten Potenzfaktor für die Rohdichte in Fichtenvollholz von 2,34 ergeben sich die in Tabelle 70 dargestellten Kräfte für die Referenzschraube (die Schraubengeometrie des Prototypen 1 ist mit den von Uibel (2012) eingesetzten Schraubentypen nicht vergleichbar; siehe Abmessungen der Schraube in Tabelle 19. Die in Tabelle 70 eingetragene mittlere Querzugfestigkeit entstammt für Buchen-Vollholz Wagenführ (2007) und für die Fichte ÖNORM B 3012 (2003).

**Tabelle 70: Abschätzung und Ergebnisse der mittleren Gesamtpaltkraft  $F_{m,tot}$  für die Referenzschraube**

<b>Holzart bzw. Gruppe und Art</b>	<b><math>\alpha</math></b>	<b><math>\rho_{mean}</math> [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b><math>F_{m,tot,Abschä.}</math> [N]</b>	<b><math>F_{m,tot,Prüfung}</math> [N]</b>	<b><math>f_{t,90,mean}</math> [N/mm<sup>2</sup>]</b>
<b>Fichte *<sup>1)</sup></b>	<b>0°</b>	460	950	–	3,0
	<b>90°</b>	460	1.330	–	
<b>Buche</b>	<b>0°</b>	740	2.890	2.842	7,0
	<b>90°</b>	740	4.046	3.735	
<b>BauBuche</b>	<b>0°</b>	830	3.780	3.941	n. v. * <sup>2)</sup>
	<b>90°</b>	830	5.292	5.762	

\*<sup>1)</sup> Ausgangs- bzw. Prüfdaten der Prüfreihe 1.1 (90°) und 4.1 (0°) von Uibel (2012);

\*<sup>2)</sup> lediglich charakteristischer Wert in ETA-14/0354 (2015) angegeben

Zusätzlich sei hier die folgende Überlegung angestellt: Es muss die durch das Applizieren auftretende Spaltkraft durch das Holz aufgenommen werden, ohne dabei aufzuspalten. Die bisher bekannten Mindestabstände für Verbindungsmittel in Nadelholz sind dabei in der Lage, die in Tabelle 70 dargestellte



Spaltkraft (für Fichte) aufzunehmen. Die Spaltkräfte aus der Abschätzung, welche auch durch die Prüfergebnisse bestätigt werden, liegen für die Buche um den Faktor 3,0 und für die BauBuche um den Faktor 4,0 höher. Wie der Tabelle 70 zu entnehmen ist, liegen die mittleren Querzugfestigkeiten für die Buche lediglich um den Faktor 2,3 über jenen der Fichte. Für die BauBuche, für welche in ETA-14/0354 (2015) lediglich der charakteristische Wert angegeben ist, ist der Mittelwert der Querzugfestigkeit nicht bekannt. Jedoch ist davon auszugehen, dass dieser Wert aufgrund der Schädigung des Materials beim Schälvorgang (Entstehung von Mikrorissen) maximal in der Größenordnung der Buche zu liegen kommt. Es zeigt sich somit, dass die Spaltkräfte beim Eindrehen stärker zunehmen als die Querzugfestigkeiten des Holzes. Deshalb wäre für den Fall, dass der Applikationsvorgang einer Schraube maßgebend für die Wahl der Mindestabstände ist, im Laubholz mit größeren Mindestabständen als im Nadelholz zu rechnen, sofern keine Maßnahmen zur Reduktion der Spaltkräfte, wie z. B. Vorbohren, ausgeführt werden.

Wie der Tabelle 70 zu entnehmen ist, kommen die aus der Abschätzung ermittelten Werte sehr nahe an jene Werte der Tabelle 69 für die Referenzschrauben zu liegen. So liefert die Abschätzung für die Buche mittlere Gesamtpaltkräfte von 2.890 N bzw. 4.046 N für Achs-Faserwinkel von 0° und 90° und die dazugehörigen Mittelwerte aus den Prüfungen weisen Werte von 2.842 N bzw. 3.735 N (Mittelwert aus 90°R und 90°T) auf. Auch für die BauBuche passen die Kräfte aus der Abschätzung (3.780 N bei 0° und 5.292 N bei 90°) sehr gut mit den Werten aus der Prüfung überein (3.941 N bei 0° und 5.762 N für den Mittelwert aus 90°R und 90°T).

Auffallend sind in Tabelle 69 vor allem die für die Langzeitversuche durchgehend geringeren Spaltkräfte als bei den Kurzzeitversuchen. So liegen die mittleren Gesamtpaltkräfte für die Langzeitversuche bei der Buche mit einem Einschraubwinkel von 0° bei lediglich 45 % der Spaltkräfte aus den Kurzzeitversuchen. Die Ursache liegt dabei an den weniger strengen Kriterien für Achs-Faserwinkel von 0°, damit die Prüfkörper noch für die Auswertung herangezogen werden konnten. Damit sollte der ohnehin bereits geringe Prüfkörperumfang nicht noch weiter dezimiert werden, sofern die Schraubenapplikation noch als vertretbar galt. Aber auch für die einwandfreien Prüfkörper mit exakt zentrisch eingebrachter Schraube zeigen sich im Mittel um 10–20 % geringere Spaltkräfte bei den LZ-Prüfungen bezogen auf die Kurzzeitversuche. Die Ursache für diese geringer ausfallenden Spaltkräfte kann allerdings nicht ausgemacht werden.

Aus diesem Grund werden die nachfolgenden Unterschiede der Spaltkräfte zwischen den Referenzschrauben und den Prototypen 1, den unterschiedlichen Achs-Faserwinkeln sowie der Buche und der BauBuche ausschließlich anhand der Daten für die Kurzzeitversuche (KZ) diskutiert.

Der Vergleich der Spaltkräfte in Tabelle 69 zeigt für den Prototypen 1 in Buche im Mittel um 26 % und in BauBuche im Mittel um 29 % höhere Werte als für die Referenzschraube. Diese Zunahme weist dabei für unterschiedliche Achs-Faserwinkel unterschiedlich starke Ausprägungen auf, welche zudem in Abhängigkeit des Schraubentyps verschieden hoch ausfallen.

Die Unterschiede zwischen den Spaltkräften in der Buche und BauBuche zeigen sich durch einen im Mittel 50 % höheren Wert für die BauBuche sehr deutlich. Dies lässt bereits auf einen entsprechend großen Einfluss der Rohdichte auf die Spaltkräfte schließen, welcher im Anschluss betrachtet wird.

Die zufolge der Literaturrecherche festgestellten, bedeutend geringeren Spaltkräfte für einen Achs-Faserwinkel von 0° im Vergleich zu rechtwinkelig zur Faser eingedrehten Schrauben können durch die hier durchgeführten Prüfungen bestätigt werden. Die betreffenden Verhältnisse der Spaltkräfte für 0° und 90° zur Faserrichtung situierten Schrauben betragen im Rahmen der Kurzzeitversuche lediglich 73 % (RF) bzw. 70 % (P1). Die lediglich geringfügigen Unterschiede in Abhängigkeit des Schraubentyps resultieren dabei laut Uibel (2012) aus den identisch ausgeprägten Schraubenmerkmalen im Bereich der Einschraubtiefe. Dies hat zur Folge, dass keine der beiden Schrauben in der Lage ist, bereits bei einem Einschraubwinkel von 90° die Spaltkraft stärker zu reduzieren. Wie Blaß und Uibel (2007) anführen, sind bei faserparalleler Anordnung von Verbindungsmitteln geringere Mindestabstände möglich, woraus auch indirekt die geringere Spaltkraft abgeleitet werden kann.

Die von Uibel (2012) beobachteten geringeren Spaltkräfte bei einem Achs-Faserwinkel von 90° und tangentialer Einschraubrichtung im Vergleich zu einer radialen Applikation können nicht bestätigt

werden. Tatsächlich stellen sich für die Schrauben mit einem Achs-Faserwinkel von  $90^\circ\text{T}$  durchgehend größere Spaltkräfte ein; sowohl für die Buche als auch für die BauBuche. Die von Uibel (2012) angeführte Begründung für seine Beobachtung, dass die Schraube bei tangentialer Einschraubrichtung mehr im Frühholz verlaufen kann und deshalb geringere Spaltkräfte erzeugt, ist für die Fichte nachvollziehbar. Für die im Rahmen dieser Arbeit untersuchte Buche bzw. BauBuche ist es aufgrund der holzanatomischen Struktur (Zerstreutporer) und des Schraubendurchmessers von 8 mm nur bedingt möglich, dass die Schraube überwiegend im Frühholz verlaufen kann und wenn, dann in einem Abschnitt mit nur geringfügig geringerer Rohdichte platziert ist. Stattdessen kommt es durch die mögliche Lage der Schraube, tangierend an zwei Spätholzschichten, zu erhöhten Spaltkräften bei einem Achs-Faserwinkel von  $90^\circ\text{T}$  im Vergleich zu  $90^\circ\text{R}$ . Zusätzlich trägt bei tangentialer Einschraubrichtung wohl auch die produktionsbedingte, höhere Rohdichte der BauBuche im Bereich des Schraubenkanals zu einem Anstieg der Spaltkraft bei (siehe Anmerkung in Kapitel 4-5.2).

In den nachfolgenden Abbildungen 114 und 115 sind die mittleren Gesamtspaltkräfte, welche aus den Eindrehprüfungen bestimmt wurden, angegeben. Es zeigen sich dabei die eindeutig niedrigeren Werte für die Langzeitversuche.

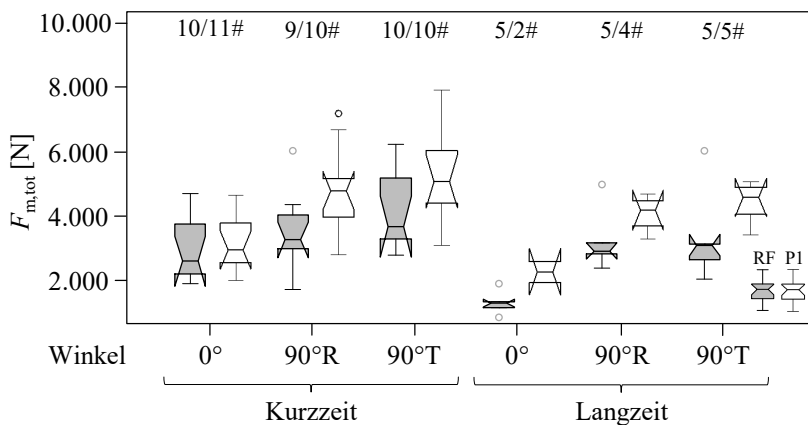


Abbildung 114: Serie 4: Boxplot mittlere Gesamtspaltkraft  $F_{m,tot}$  für die Buche in Abhängigkeit vom Achs-Faserwinkel, der Prüfkfiguration und vom Schraubentyp

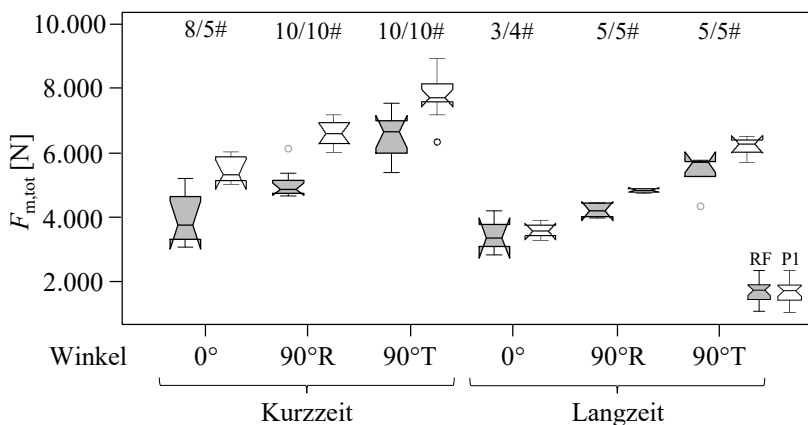


Abbildung 115: Serie 4: Boxplot mittlere Gesamtspaltkraft  $F_{m,tot}$  für die BauBuche in Abhängigkeit vom Achs-Faserwinkel, der Prüfkfiguration und vom Schraubentyp

Wie in der Abbildung 114 gut zu erkennen ist, zeigen sich für die Buche keine signifikant unterschiedlichen Spaltkräfte für die Einschraubrichtungen  $90^\circ\text{R}$  und  $90^\circ\text{T}$ . Für die in Abbildung 115 dargestellten Boxplots für die BauBuche sind allerdings durchaus signifikante Abweichungen der Spaltkräfte zwischen den radial und tangential eingebrachten Schrauben zu erkennen; diese sind auch auf die geringeren Streuungen der BauBuche zurückzuführen. Die höheren Spaltkräfte sind dabei, wie bereits in Kapitel 4-5.3 dargelegt, auf den lokal höher verdichteten Bereich, welcher durch den Herstellungsprozess der BauBuche genau im Bereich des Schraubenkanals resultiert, zurückzuführen.

Die nachfolgende Tabelle 71 zeigt das Maximum der Summe der Kräfte in den einzelnen Messschrauben, welche aus der Applikation der Schrauben resultiert. Diese Werte weisen eine sehr hohe Korrelation mit den Werten in Tabelle 69 auf; beide Kenngrößen basieren auf den gleichen Daten, werden aber auf deutlich unterschiedliche Weise bestimmt. Die Werte sind an dieser Stelle ergänzend angeführt, da sie in weiterer Folge in Kapitel 4-5.4.4 zur Erstellung des Gesamtverlaufes der Spaltkräfte herangezogen werden und auch für den Vergleich mit den Spaltkräften aus dem Ausziehvorgang notwendig sind.

**Tabelle 71: Serie 4: maximale Gesamtpaltkraft  $F_{MS,ges,ein}$  in Abhängigkeit vom Holzprodukt, Achs-Faserwinkel, Schraubentyp und der Prüfkongfiguration**

Holzart bzw. Gruppe und Art	$\alpha$	Referenzschraube (RF)					Prototyp 1 (P1)					Verhältnis mean[P1]/ mean[RF] [%]
		$n$	mean	COV	min	max	$n$	mean	COV	min	max	
		[-]	[N]	[%]	[N]	[N]	[-]	[N]	[%]	[N]	[N]	
Buche	0°	10	4.344	34,8	2.650	7.201	11	4.992	29,2	3.136	7.504	115
	KZ 90°R	9	5.720	34,4	2.474	9.431	10	8.275	28,1	4.593	11.975	145
	90°T	10	6.296	30,4	4.148	10.021	10	8.527	28,8	5.046	13.628	135
	0°	5	2.078	32,6	1.330	3.185	2	4.148	21,6	3.514	4.782	200
	LZ 90°R	5	5.599	27,6	4.160	8.165	4	8.170	16,6	6.443	9.646	146
	90°T	5	5.537	45,5	3.460	9.870	5	8.198	16,7	6.099	9.518	148
BauBuche	0°	8	6.078	21,9	4.550	7.791	6	8.509	14,4	7.100	9.826	140
	KZ 90°R	10	7.829	9,1	7.110	9.518	10	10.764	7,8	9.729	11.877	137
	90°T	10	10.610	8,9	9.061	11.804	10	12.836	9,1	10.380	14.581	121
	0°	3	6.110	18,5	5.154	7.359	4	6.838	5,4	6.325	7.200	112
	LZ 90°R	5	7.133	8,0	6.412	7.718	5	9.015	4,6	8.620	9.701	126
	90°T	5	9.403	10,3	7.878	10.223	5	12.091	0,1	11.096	12.850	129

### Abhängigkeit der Spaltkraft beim Eindrehen von der Rohdichte

In den Abbildungen 116 bis 118 sind die mittleren Gesamtspaltkräfte für unterschiedliche Achs-Faserwinkel für die Buche und BauBuche sowie die Referenzschraube und den Prototypen 1 dargestellt. Die für beide Schraubentypen eingetragenen Potenzfunktionen für die Buche resultieren dabei aus einer Regressionsanalyse der jeweiligen Kurzzeitdaten. Damit kann für jede Untergruppe der Potenzfaktor für die Rohdichte zur Bestimmung der mittleren Gesamtspaltkraft angegeben werden. Auf eine Angabe der Potenzfaktoren für die BauBuche wird dabei verzichtet, da die fehlende Variabilität der Rohdichte zu keinen aussagekräftigen Ergebnissen führt.

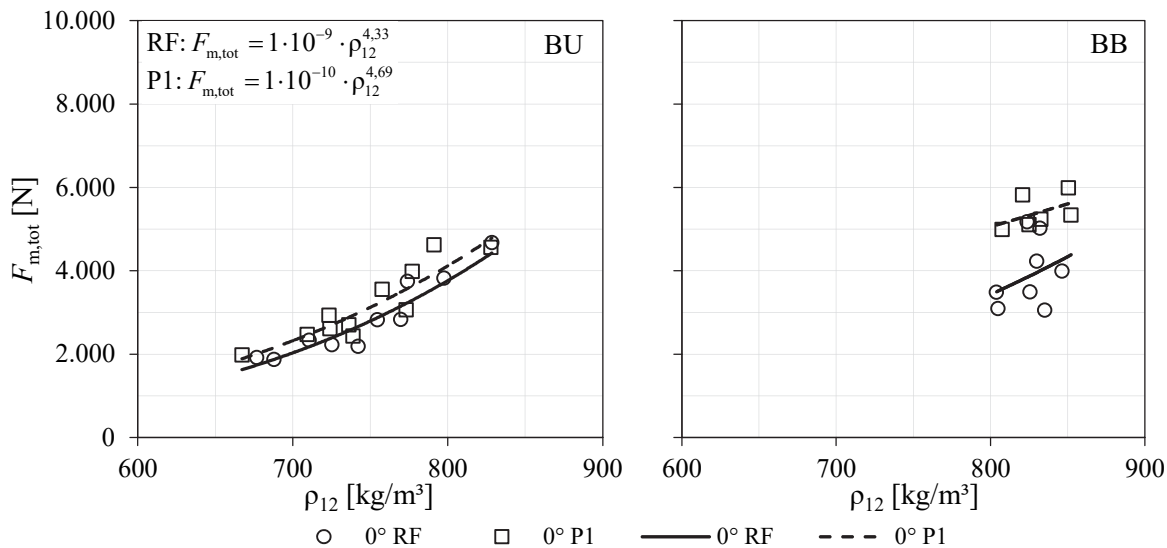


Abbildung 116: Serie 4:  $F_{m,tot}$  vs.  $\rho_{12}$  für  $\alpha = 0^\circ$  für die Buche (links) und die BauBuche (rechts)

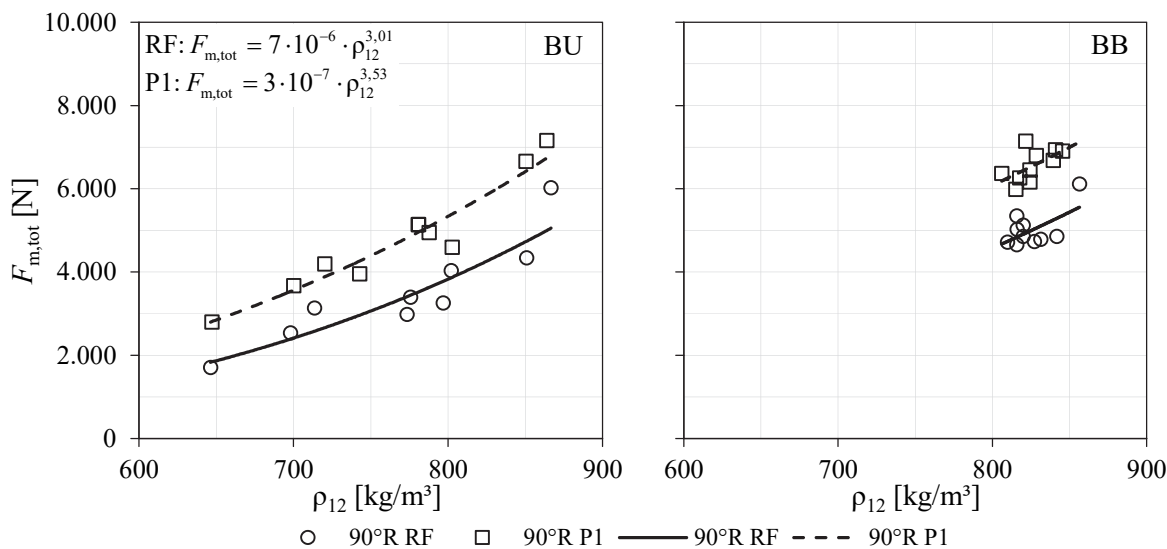


Abbildung 117: Serie 4:  $F_{m,tot}$  vs.  $\rho_{12}$  für  $\alpha = 90^\circ R$  für die Buche (links) und die BauBuche (rechts)

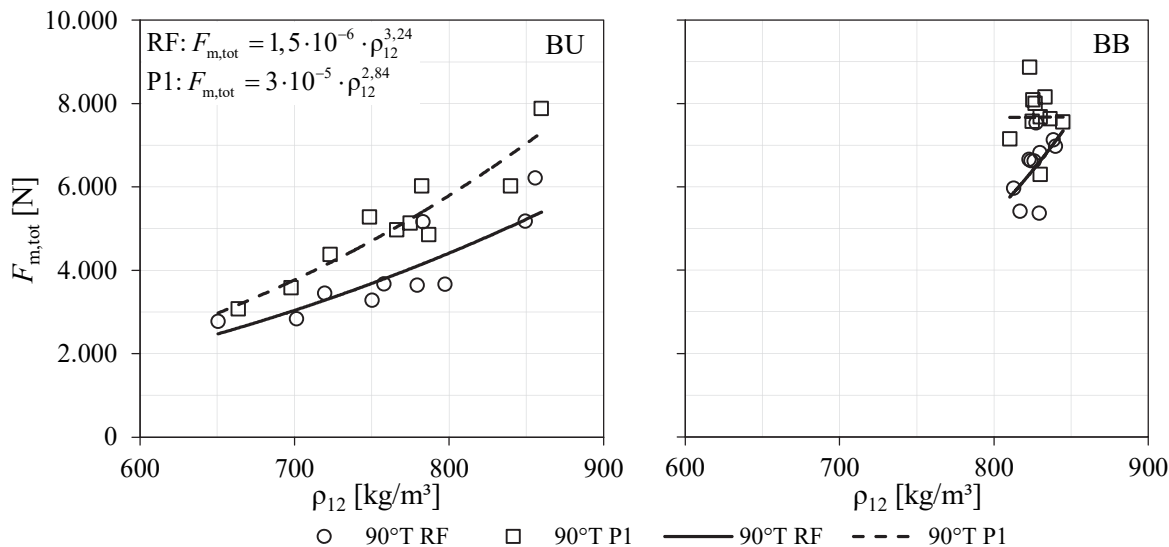


Abbildung 118: Serie 4:  $F_{m,tot}$  vs.  $\rho_{12}$  für  $\alpha = 90^\circ T$  für die Buche (links) und die BauBuche (rechts)

Wie in den Abbildungen 116 bis 118 zu erkennen ist, liegen die einzelnen mittleren Gesamtspaltkräfte des Prototypen 1 fast ausschließlich über jenen der Referenzschraube. Die Unterschiede fallen dabei für die Buche bei einem Achs-Faserwinkel von  $0^\circ$  geringer aus als für  $90^\circ R$  und  $90^\circ T$ . Für die BauBuche hingegen sind die Unterschiede für alle Einschraubwinkel nahezu von gleicher Größenordnung.

In den Untersuchungen von Uibel (2012) ergaben sich für unterschiedliche Schraubentypen (alle mit Abmessungen von 8 x 200 mm) in Fichtenvollholz und einem Achs-Faserwinkel von  $90^\circ$  Werte zwischen 2,26 und 2,44. Bei Versuchen in Fichten-BSH zeigten sich dabei bereits höhere Potenzfaktoren für die gleichen Schraubentypen und Einschraubwinkel zwischen 2,68 und 3,67. Diese ermittelten Potenzfaktoren sind bereits sehr ähnlich zu jenen, welche aus den Prüfungen von Buchen-Vollholz für Achs-Faserwinkel von  $90^\circ R$  und  $90^\circ T$  ermittelt wurden (siehe Tabelle 72; zwischen 2,84 und 3,53). Für Achs-Faserwinkel von  $0^\circ$ , zu welchen noch keine bekannten Untersuchungen vorliegen, zeigen sich in den Ergebnissen der Tabelle 72 nochmals höhere Potenzfaktoren der Rohdichte für die mittlere Gesamtspaltkraft von 4,33 (RF) bzw. 4,69 (P1). Ein eindeutiger Unterschied in den Potenzfaktoren der RF und des P1 für die mittlere Gesamtspaltkraft zeichnet sich hingegen nicht ab.

Aus Gründen der Vollständigkeit sind in Tabelle 72, zusätzlich zu den in Abbildungen 116 bis 118 dargestellten Ergebnissen, auch die Potenzfaktoren der Rohdichte für die maximale Kraft aller Messschrauben während des Eindrehvorganges  $F_{MS,ges,ein}$  eingetragen.

Tabelle 72: Serie 4: Potenzfaktoren der Rohdichte für die Spaltkräfte beim Eindrehen für die Buche in Abhängigkeit vom Achs-Faserwinkel und der betrachteten Spaltkraft

Holzart	$\alpha$	$F_{m,tot}$ vs. $\rho_{12}$		$F_{MS,ges,ein}$ vs. $\rho_{12}$	
		RF	P1	RF	P1
Buche	$0^\circ$	4,33	4,69	4,98	4,25
	$90^\circ R$	3,01	3,53	3,69	3,22
	$90^\circ T$	3,24	2,84	3,53	3,44

Es zeigt sich für beide Varianten ( $F_{m,tot}$  vs.  $\rho_{12}$  und  $F_{MS,ges,ein}$  vs.  $\rho_{12}$ ) eine sehr gute Übereinstimmung der Potenzfaktoren. Damit lässt sich ein annähernd gleicher Einfluss der Rohdichte auf die mittlere Gesamtspaltkraft  $F_{m,tot}$  sowie auf  $F_{MS,ges,ein}$  feststellen. In weiterer Folge wird ausschließlich die Summe der Messschraubenkräfte betrachtet, da dadurch auch ein Vergleich mit den Spaltkräften, welche aus der Ausziehprüfung resultieren, möglich ist.

### 4-5.4.2 Spaltkräfte beim Herausziehen

Für die Betrachtung der Spaltkräfte beim Herausziehen stehen nur Daten aus den Kurzzeitprüfungen zur Verfügung, da für die Ausziehprüfungen keine Langzeitversuche durchgeführt wurden. Die in weiterer Folge angegebenen Spaltkräfte stellen dabei die durch den Ausziehvorgang zusätzlich hervorgerufenen Spaltkräfte dar (Messung der Spaltkräfte beginnt für die Ausziehprüfung wieder bei null).

Der charakteristische Verlauf der Spaltkräfte im Rahmen der Ausziehprüfung für die gewählte Prüfkfiguration wurde von Pöll (2017) bereits beschrieben. Beispielhaft sind hier die Verläufe der Spaltkräfte in Abhängigkeit von der Ausziehkraft in Abbildung 119 dargestellt. Wie darin zu erkennen ist, stellt sich die für den "push-pull"-Versuch typische Spannungsverteilung (Vergleich mit wandartigem Träger) ein. Die beiden der Gegenplatte zugewandten Messschraubenreihen (MSR) nehmen die Zugkräfte auf, während an der untersten MSR eine Druckkraft auftritt. Diese Druckkraft wird dabei zum Teil von den Messschrauben aufgenommen und zeigt sich in einer Abnahme der Vorspannung. Der größte Teil der Druckkomponente wird allerdings direkt über die Kontaktflächen der beiden Prüfkörperhälften übertragen.

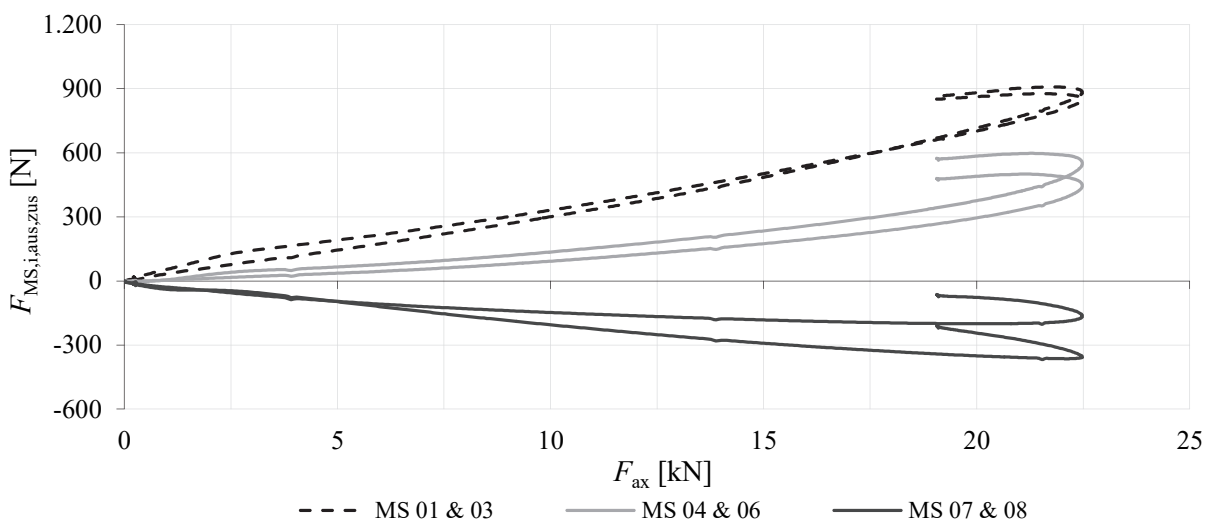


Abbildung 119: Spaltkraftverlauf der einzelnen Messschrauben in Abhängigkeit der Ausziehkraft

Auch die stärkere Zunahme der Spaltkräfte, zu der es ab etwa der Hälfte der maximalen Belastung kommt, sowie ein verstärkter überproportionaler Anstieg der Kräfte in den Messschraubenreihen 1 und 2 kurz vor dem Eintreten des Versagens sind in der Abbildung 119 erkennbar.

In der Tabelle 73 sind die durch den Ausziehvorgang resultierenden maximalen Spaltkräfte, welche aus der Summe der Kräfte der einzelnen Messschrauben gebildet werden, dargestellt. Da es bei den Ausziehprüfungen bei einem Achs-Faserwinkel von  $90^\circ$  zu Schraubenstahlbrüchen kam, ist die Anzahl der Prüfkörper, für die dies auftrat, zusätzlich in der Tabelle in Klammer dargestellt. Es handelt sich für die maximale Spaltkraft aus den Ausziehprüfungen  $F_{MS,ges,aus,zus}$  deshalb in gewisser Weise um rechtszensierte Daten.

Tabelle 73: Serie 4: maximale Spaltkraft bei den Ausziehprüfungen  $F_{MS,ges,aus,zus}$  in Abhängigkeit vom Holzprodukt, Achs-Faserwinkel und Schraubentyp

Holzart bzw. Gruppe	$\alpha$	Referenzschraube (RF)					Prototyp 1 (P1)					Verhältnis mean[P1]/ mean[RF] [%]
		$n$	mean	COV	min	max	$n$	mean	COV	min	max	
		[-]	[N]	[%]	[N]	[N]	[-]	[N]	[%]	[N]	[N]	
	$0^\circ$	10	1.604	27,7	635	2.074	11	1.278	24,6	913	1.776	80
Buche	$90^\circ R$	9 (5)	2.512	40,5	799	4.600	10 (2)	2.472	16,0	2.074	3.196	98
	$90^\circ T$	10 (4)	2.998	16,3	2.168	3.794	10 (1)	3.254	21,0	2.442	4.723	109



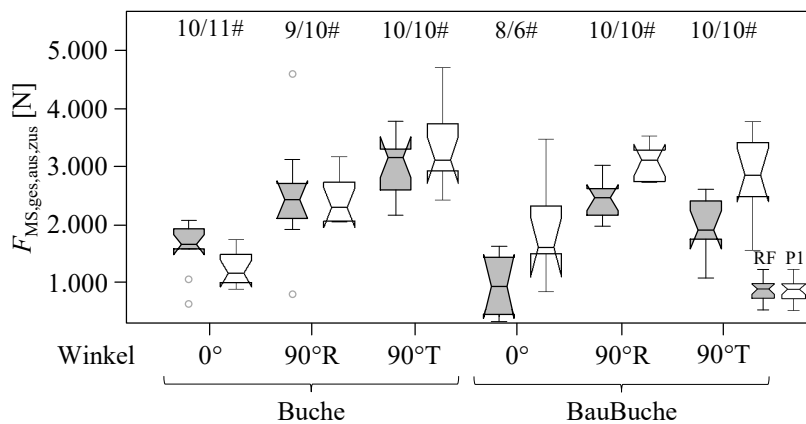
	<b>0°</b>	8*	950	56,3	334	1.623	6	1.922	46,9	883	3.500	202
<b>BauBuche</b>	<b>90°R</b>	10 (10)	2.448	14,8	1.969	3.023	10 (0)	3.091	9,4	2.746	3.557	126
	<b>90°T</b>	10 (10)	1.981	22,6	1.077	2.616	10 (8)	2.886	23,9	1.588	3.800	146

\* von diesen acht Prüfungen wurden vier bei einer Belastung von 25 kN abgebrochen (Pöll, 2017)

Die in Tabelle 73 angeführten Kräfte weisen extrem große Streuungen und folglich Variationskoeffizienten auf. Vor allem für die Achs-Faserwinkel von 90°R und 90°T, wo es gehäuft zu einem Schraubenschraubbruch kam, sind die ermittelten Daten nur bedingt aussagekräftig. Durch die erwartete Zunahme der Kräfte in den Messschrauben vor dem Erreichen der maximalen Belastung (siehe Abbildung 119), welche erst kurz vor dem Überschreiten der Ausziehfestigkeit auftritt, wäre eine starke Zunahme von  $F_{MS,ges,aus,zus}$  zu erwarten.

Ein Vergleich der zusätzlichen maximalen Spaltkraft, verursacht durch die Ausziehprüfungen, zwischen der Referenzschraube und dem Prototyp 1 zeigt vor allem für die BauBuche größere Spaltkräfte für den P1. Für die Buche hingegen kommt es für Achs-Faserwinkel von 0° und 90°R für die Referenzschraube sogar zu größeren Spaltkräften. Es zeigt sich also für die Vergleiche zwischen RF und P1, genauso wie für die Buche und BauBuche, keine grundsätzlich gültige Tendenz. Für die Referenzschraube kommt es in der Buche im Mittel zu größeren Spaltkräften, während für den Prototyp 1 die Spaltkräfte in der BauBuche durchschnittlich höher ausfallen.

Einzig die erhöhten Variationskoeffizienten und die im Vergleich geringeren Spaltkräfte für Achs-Faserwinkel von 0° sind für die Buche und BauBuche identisch. Dies ist dabei vor allem dem Umstand, dass die Spaltkräfte in Analogie zu den Ausziehfestigkeiten für die faserparallele Verschraubung (siehe Kapitel 4-5.3) geringer resultieren können, geschuldet. In der Abbildung 120 sind die zusätzlich auftretenden Spaltkräfte in Abhängigkeit der Prüfkörperuntergruppen dargestellt.



**Abbildung 120:** Serie 4: Boxplot maximale zusätzliche Spaltkraft  $F_{MS,ges,aus,zus}$  in Abhängigkeit vom Achs-Faserwinkel, Holzprodukt und Schraubentyp

### Abhängigkeit der Spaltkraft beim Herausziehen von der Rohdichte

Die maximalen Spaltkräfte, welche im Zuge der Ausziehprüfungen entstanden, sind in Abbildungen 121 bis 123 in Abhängigkeit von der Rohdichte dargestellt. Dabei wird für die Buche und BauBuche zwischen den unterschiedlichen Achs-Faserwinkeln sowie für die Referenzschraube und den Prototypen 1 unterschieden. Zusätzlich sind für die Buche Potenzfunktionen, die aus einer Regressionsanalyse resultieren, angeführt, wodurch für jede diesbezügliche Untergruppe der Potenzfaktor der Rohdichte für die maximale Spaltkraft der Ausziehprüfung angegeben werden kann. Da die BauBuche nur eine sehr eingeschränkte Variabilität der Rohdichte aufweist, wird auf eine betreffende Regressionsanalyse verzichtet.

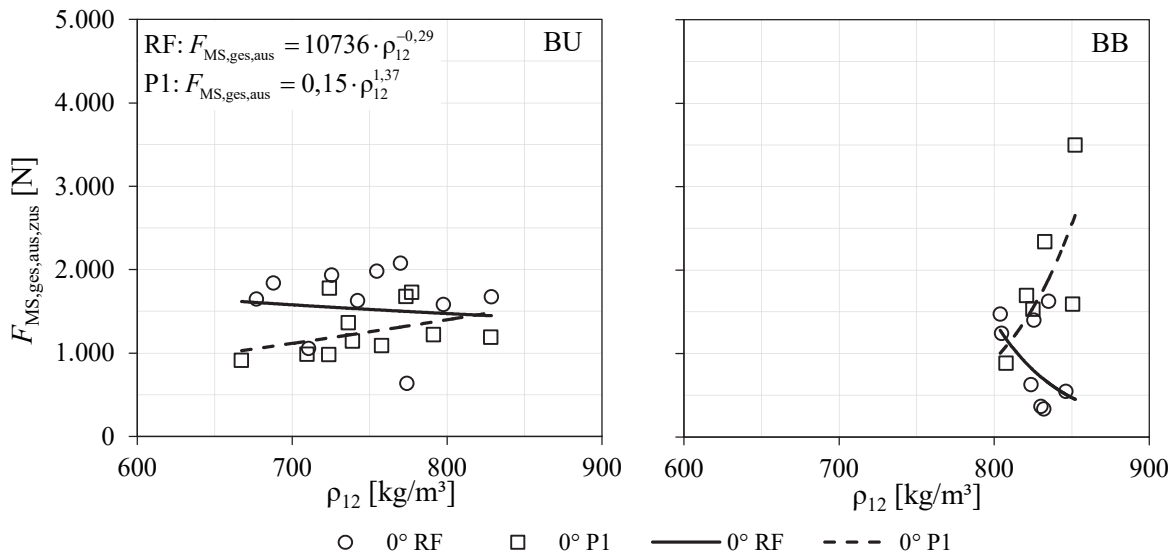


Abbildung 121: Serie 4:  $F_{MS,ges,aus,zus}$  vs.  $\rho_{12}$  für  $\alpha = 0^\circ$  für die Buche (links) und die BauBuche (rechts)

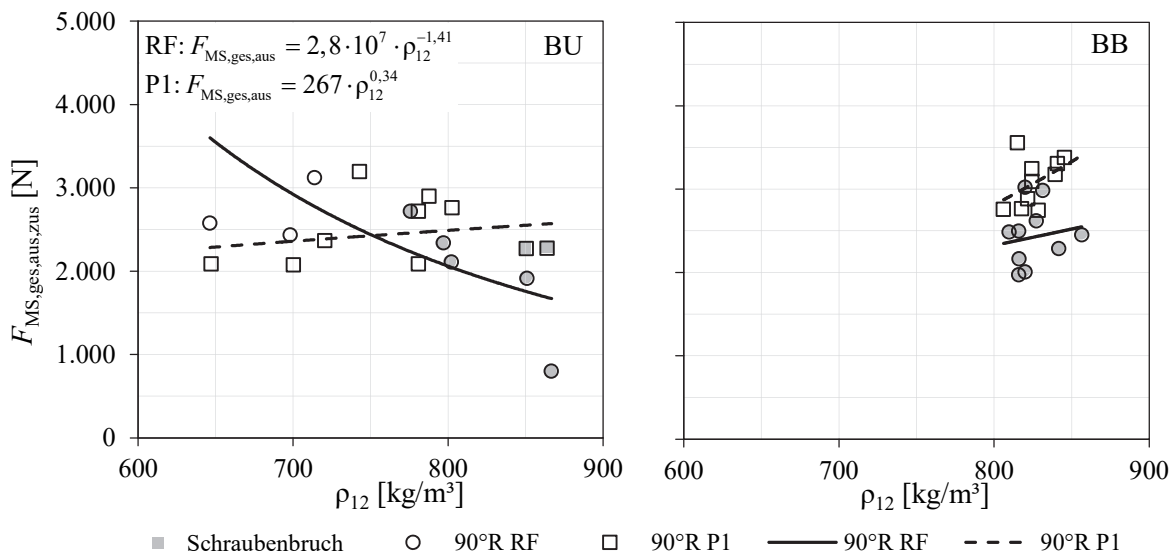


Abbildung 122: Serie 4:  $F_{MS,ges,aus,zus}$  vs.  $\rho_{12}$  für  $\alpha = 90^\circ R$  für die Buche (links) und die BauBuche (rechts)

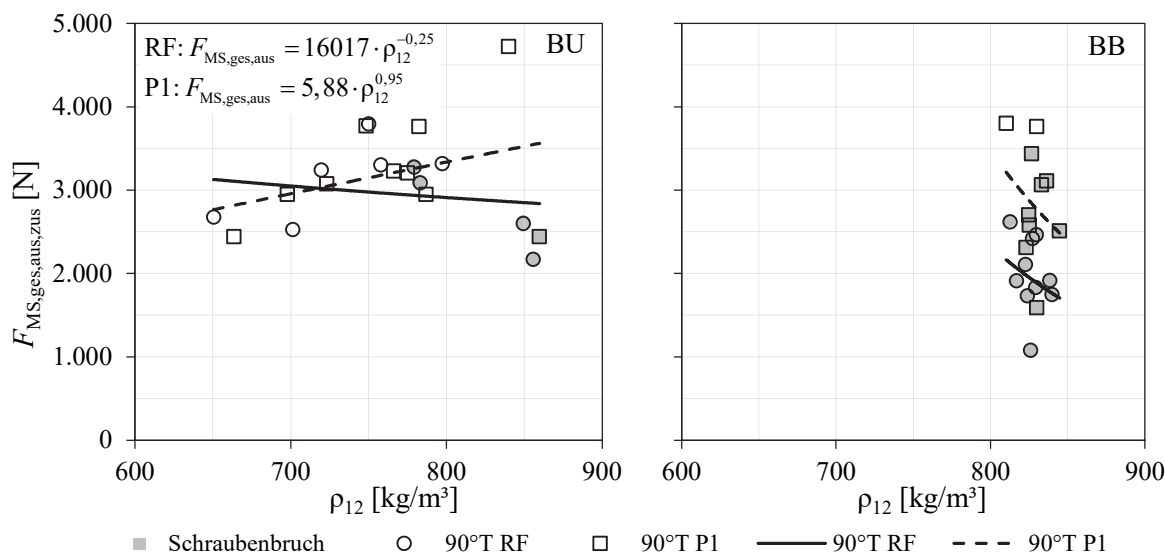


Abbildung 123: Serie 4:  $F_{MS,ges,aus,zus}$  vs.  $\rho_{12}$  für  $\alpha = 90^\circ T$  für die Buche (links) und die BauBuche (rechts)

Tabelle 74: Serie 4: Potenzfaktoren der Rohdichte für die bei der Ausziehprüfung zusätzlich auftretenden Spaltkräfte  $F_{MS,ges,aus,zus}$  der Buche in Abhängigkeit vom Achs-Faserwinkel und Schraubentyp

Holzart	$\alpha$	$F_{MS,ges,aus,zus}$ vs. $\rho_{12}$	
		RF	P1
Buche	0°	-0,29	1,37
	90°R	-1,41	0,34
	90°T	-0,25	0,95

Wie der Zusammenfassung der Potenzfaktoren für die Rohdichte in Tabelle 74 zu entnehmen ist, zeigen diese eine sehr unterschiedliche Ausprägung. Während für die Referenzschraube durchgehend negative Potenzfaktoren ermittelt werden, ergeben sich für den Prototypen 1 ausschließlich positive Werte. Allerdings sind die Bestimmtheitsmaße für die dargestellten Regressionsfunktionen so gering, dass keine weitere Aussage davon abgeleitet werden kann. Auf Basis der hier vorliegenden Ergebnisse kann daher kein einheitlicher Einfluss der Rohdichte auf die durch die Ausziehprüfung zusätzlich induzierten Spaltkräfte festgestellt werden. Dies ist auch den zahlreichen Stahlbrüchen geschuldet, welche eine Bestimmung des Einflusses auf die maximale Spaltkraft infolge Herausziehen für die betroffenen Proben verhindern.

### Abhängigkeit der Spaltkraft beim Herausziehen von der axialen Belastung

In der Abbildung 124 sind die maximalen Spaltkräfte, welche im Zuge der Ausziehprüfungen auftraten, in Abhängigkeit der axialen Belastung dargestellt. Dabei wird für die Buche und BauBuche lediglich zwischen den Achs-Faserwinkeln 0° und 90° unterschieden. Für die Referenzschraube und den Prototypen 1, welche beide die gleichen Flankenwinkel aufweisen, erfolgt hier keine Unterscheidung. Sowohl für die Buche als auch für die BauBuche sind lineare Funktionen (mit Voraussetzung des Nulldurchganges) zur Beschreibung der Abhängigkeit von der axialen Belastung eingetragen. Dabei ergibt sich für die BauBuche eine maximale Spaltkraft von 7,8 % der axialen Belastung und für die Buche von 8,9 %. Die Werte stellen allerdings aufgrund der rechts-zensierten Daten (zufolge der Schraubenstahlbrüche) eher Untergrenzen dar, da noch kein Einfluss des überproportionalen Anstiegs der Spaltkraft vor dem Erreichen der Ausziehfestigkeit mitberücksichtigt wird.

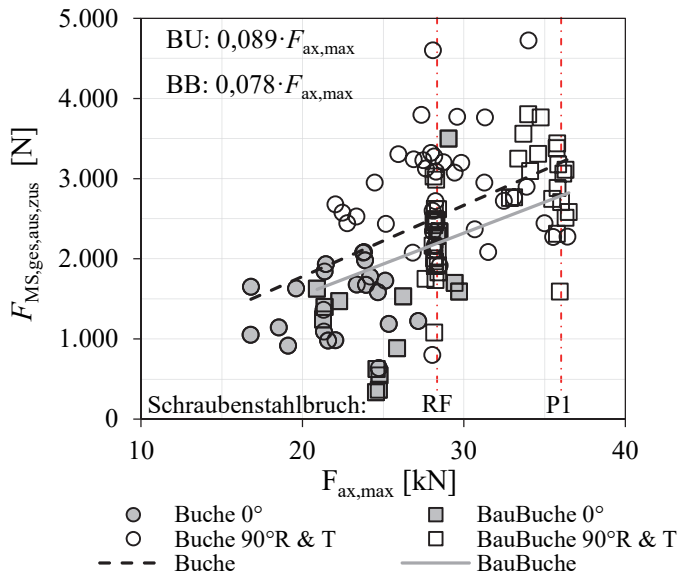


Abbildung 124: Serie 4:  $F_{MS,ges,aus,zus}$  vs.  $F_{ax,max}$  für die Buche und BauBuche

Für die in der Abbildung 124 eingetragenen linearen Regressionsfunktionen treten sehr geringe Bestimmtheitsmaße ( $R^2 = 0,29$  für Buche bzw.  $R^2 = 0,40$  für BauBuche) auf, weshalb die Funktionen lediglich als grobe Anhaltspunkte anzusehen sind. Aus einer detaillierteren, gesplitteten Analyse der für die Grafik verwendeten Daten der Untergruppen zeigen sich für die Buche bei einem Achs-Faserwinkel von  $0^\circ$  Spaltkräfte in der Größenordnung von 6,5 % bzw. für  $90^\circ R$  &  $90^\circ T$  von 9,9 %. Für die BauBuche liegen diese Werte bei 5,4 % für  $0^\circ$  und 8,2 % für  $90^\circ R$  &  $90^\circ T$ .

Der Vergleich mit dem Modell von Enders-Comberg (2015) nach Gleichung (2.37) zeigt sehr geringe Abweichungen von den ermittelten Spaltkräften. So ergibt sich für den Flankenwinkel von  $20^\circ$  (für RF und P1 ident) und den angenommenen Reibbeiwert von 0,2 für die Paarung Holz-Schraube eine dreidimensionale Spaltkraft in der Größenordnung von 15,6 % der axialen Belastung. Für die Kräfte in den Messschrauben (2D) resultiert dementsprechend eine Gesamtsplankraft von 7,8 % der axialen Last. Damit liegen die aus den Prüfungen resultierenden Werte nur geringfügig über jenen, welche durch das Modell ermittelt werden.

### 4-5.4.3 Abklingen der Spaltkräfte

Das Abklingen der Spaltkräfte in Abhängigkeit der Zeitdauer nach der Schraubenapplikation wurde im Rahmen der Langzeitprüfungen (LZ) der Serie 4 untersucht. Dabei wurden nach Beendigung der eigentlichen Eindrehprüfungen, welche identisch zu allen vorherigen Prüfungen mit Messschrauben (Kurzzeitprüfungen) durchgeführt wurden, die Spaltkräfte in weiterer Folge über einen Zeitraum von 24 h aufgezeichnet. Die Berechnung der betrachteten und als relative Spaltkraft bezeichneten Größe erfolgt dabei entsprechend Gleichung (4.11). Zusätzlich wird am Ende dieses Abschnittes ein Modell vorgestellt, welches den Verlauf der abklingenden Spaltkräfte beschreibt.

$$\text{relative Spaltkraft} = \frac{F_{MS,ges,t}}{F_{MS,ges,ein}} \quad (4.11)$$

$F_{MS,ges,t}$  Kraft aller Messschrauben zum Zeitpunkt  $t$  [N]  
 $F_{MS,ges,ein}$  maximale Kraft aller Messschrauben während des Eindrehvorganges [N]

In der Tabelle 75 sind die relativen Spaltkräfte, wie sie zum Beispiel in Abbildung 125 im Mittel zu ausgewählten Zeitpunkten auftreten, in Form einer Tabelle dargestellt. Die Verläufe der relativen Spaltkräfte aus den Prüfungen sind im Anhang C-5 für alle Untergruppen dargestellt.

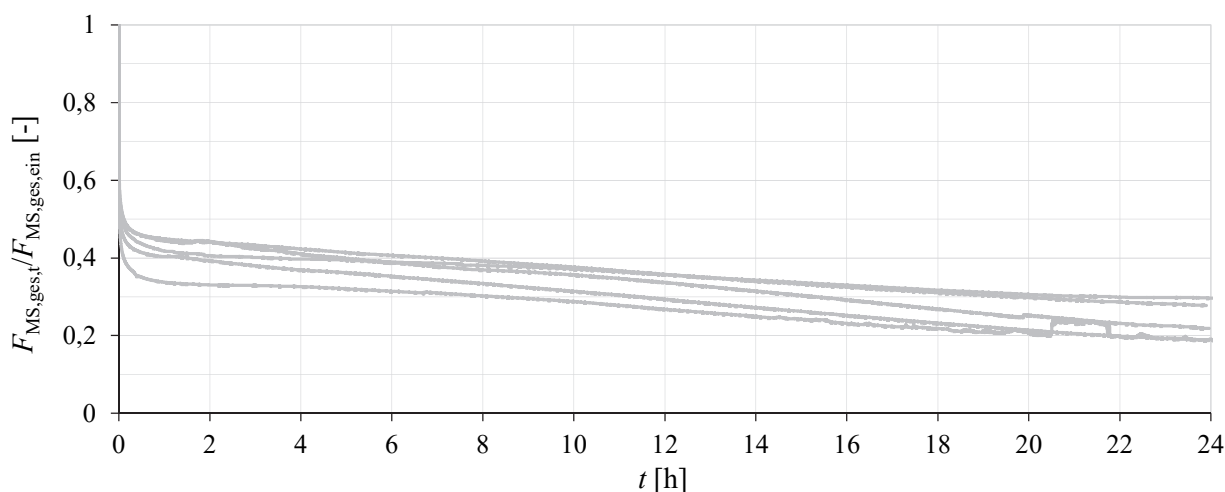
**Tabelle 75:** Serie 4: relative Spaltkräfte für ausgewählte Zeitpunkte nach dem Erreichen der maximalen Spaltkraft beim Eindrehen in Abhängigkeit vom Holzprodukt, Achs-Faserwinkel und Schraubentyp

Holzart bzw. Werkstoff	$\alpha$	5 Sekunden		1 Minute		1 Stunde		24 bzw. 12 Stunden	
		RF	P1	RF	P1	RF	P1	RF	P1
Buche	0°	0,66	0,78	0,47	0,67	0,23	0,49	-0,29*	0,00*
	90°R	0,67	0,76	0,53	0,65	0,41	0,51	0,23	0,35
	90°T	0,63	0,73	0,49	0,62	0,36	0,48	0,20	0,39
Bau-Buche	0°	0,75	0,83	0,58	0,71	0,35	0,49	0,12*	0,24*
	90°R	0,72	0,79	0,58	0,68	0,47	0,56	0,38	0,48
	90°T	0,74	0,87	0,61	0,71	0,51	0,60	0,44	0,53

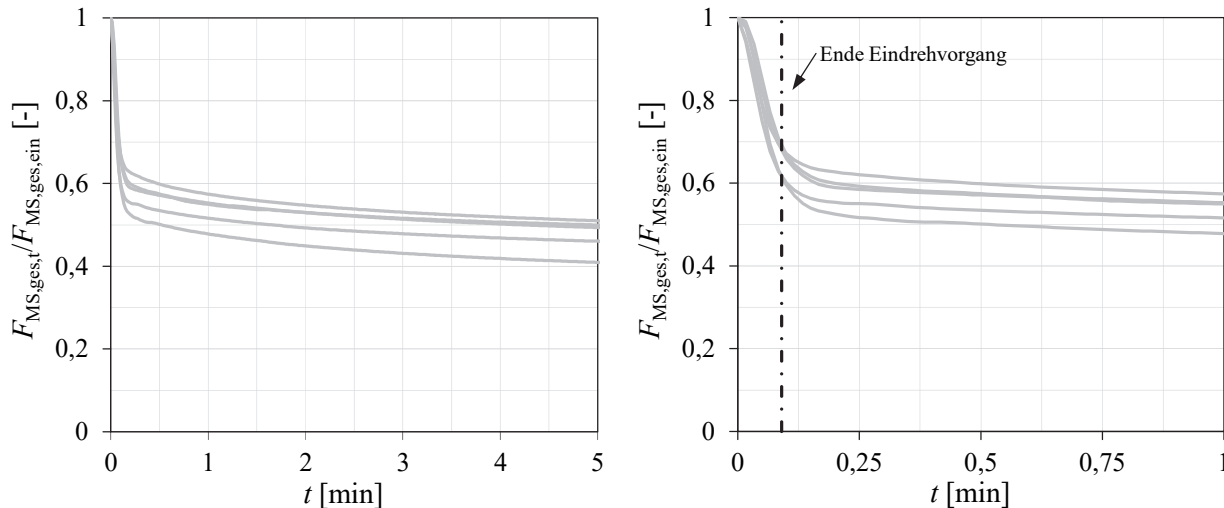
\* 12 Stunden für Achs-Faserwinkel von 0°

Wie den in Tabelle 75 gezeigten Ergebnissen zu entnehmen ist, fällt der Abfall für die Buche zu jedem Zeitpunkt und für alle Untergruppen stärker aus als für die BauBuche. Dies resultiert vor allem aus dem stärkeren Abfall bereits am Ende der Eindrehprüfung (bei einer Zeitdauer von rund 5 s). Außerdem zeigen sich für den Prototypen 1 durchgehend höhere Verhältnisse zur maximalen Spaltkraft als für die Referenzschraube; u. a. resultierend aus dem größeren Kerndurchmesser des P1. Da das auch für den Zeitpunkt 12 bzw. 24 h nach Applikation zutrifft, bedeutet dies, dass für den Prototypen 1 eine höhere Spaltkraft im Holz verbleibt als für die Referenzschraube. Die höhere Spaltkraft resultiert dabei einerseits aus den größeren Absolutwerten der Spaltkräfte aus der Applikation für den P1 im Vergleich zur RF (siehe Kapitel 4-5.4.1), als auch aus dem unterschiedlich stark ausgeprägten Abklingverhalten (tendenziell stärkeres Abklingen bei der Referenzschraube).

In den Abbildungen 125 und 126 ist der Verlauf der Spaltkraft im Verhältnis zum maximal auftretenden Wert dargestellt. Die grau eingetragenen Verläufe stellen dabei die Messwerte aus den Prüfungen dar.



**Abbildung 125:** Beispielhafter Verlauf der relativen Spaltkräfte nach der Applikation der Schraube (24 h) für die Buche mit einem Achs-Faserwinkel von 90°R und Verwendung der Referenzschraube (5#)



**Abbildung 126:** Beispielhafter Verlauf der relativen Spaltkräfte nach der Applikation der Schraube (links: 5 Minuten) bzw. (rechts: 1°Minute) für die Buche mit  $\alpha = 90^\circ R$  und Verwendung der Referenzschraube (5#)

In der Abbildung 126 sind die Verläufe für die ersten 5 Minuten (links) sowie die erste Minute (rechts) dargestellt. Zusätzlich ist in der Abbildung 126 (rechts) das Ende des Eindrehvorganges (bei ca. 5 Sekunden) dargestellt. Ab diesem Zeitpunkt wird die Abnahme der Spaltkräfte in weiterer Folge lediglich noch durch den Kriech- bzw. die Relaxationsvorgang beeinflusst. Auffallend ist vor allem der bereits zuvor gut erkennbare Abfall innerhalb der ersten Minuten bzw. Sekunden. So betragen die Spaltkräfte 5 Sekunden nach dem Erreichen der maximalen Spaltkraft für die Eindrehprüfung (entspricht ca. 1 bis 2 Sekunden nach dem Erreichen der endgültigen Einschraubtiefe bzw. Beendigung des Applikationsvorganges) nur mehr Werte zwischen 63 % und 83 % davon. Außerdem liegt eine Minute nach dem Erreichen der maximalen Spaltkraft beim Eindrehen, entsprechend Tabelle 75, nur mehr eine relative Spaltkraft zwischen 47 % und 71 % vor. Die Abnahme zwischen diesen beiden Betrachtungen beträgt somit zirka 10 % bis 15 % der maximal auftretenden Spaltkraft innerhalb von 55 s. Im Vergleich dazu weisen die Spaltkräfte bei Achs-Faserwinkeln von  $90^\circ$  nach 24 Stunden noch Anteile zwischen 20 % (Minimalwert bei Buche, RF) und 53 % (Maximalwert bei BauBuche, P1) der maximalen Spaltkräfte auf.

In weiterer Folge wird das Abklingverhalten sämtlicher Untergruppen benötigt, um den Gesamtverlauf der Spaltkräfte während der Eindreh- und Ausziehprüfung inklusive dem dazwischenliegenden Abklingen durchgehend beschreiben zu können (siehe Kapitel 4-5.4.4). Der Zeitabschnitt, welcher dabei benötigt wird, ist dabei je nach Prüfkörper unterschiedlich (abhängig von der Dauer der Aufzeichnung der Prüfkraft bei bzw. nach der Applikation) und wird aus den Mittelwerten aller Abklingkurven ermittelt. Generell ist dabei vor allem der Verlauf der relativen Spaltkräfte in den ersten Minuten nach dem Erreichen der maximalen Spaltkraft von besonderem Interesse.

Für die nachfolgende Diskussion der Spaltkräfte in Kapitel 4-5.5 ist der sprunghafte Abfall, bzw. bei umgekehrter Betrachtung der Anstieg, der Spaltkraft, welcher durch das Austreten der Schraubenspitze aus dem Prüfkörper verursacht wird, von Interesse. Dabei wird der sprunghafte Anstieg bzw. Abfall von etwa 20–30 % (siehe Abbildung 126 rechts) vor bzw. nach dem Erreichen der maximalen Spaltkraft vor allem diesem Mechanismus zugeschrieben. Diese Vermutung beruht auch auf der Auswertung der Spaltkraft in Abhängigkeit von der Einschraubtiefe für die Kurzzeituntersuchungen (siehe Abbildung 113). Dabei zeigt sich, dass die maximale Spaltkraft vor allem aus der extrem hohen Kraft in der letzten Messschraubenreihe (auf jener Seite wo die Schraubenspitze austritt) resultiert. Deshalb wird angenommen, dass für den Fall eines längeren Prüfkörpers, bei dem es zu keinem Austreten der Schraubenspitze kommt, dieser Maximalwert nicht in der Form auftreten kann. Ein möglicher Einfluss der Prüfkörpergeometrie auf die Ausbildung bzw. das Auftreten der maximalen Kräfte in den Messschrauben kann nicht ausgeschlossen werden.



## Modell zur Beschreibung der abklingenden Spaltkräfte

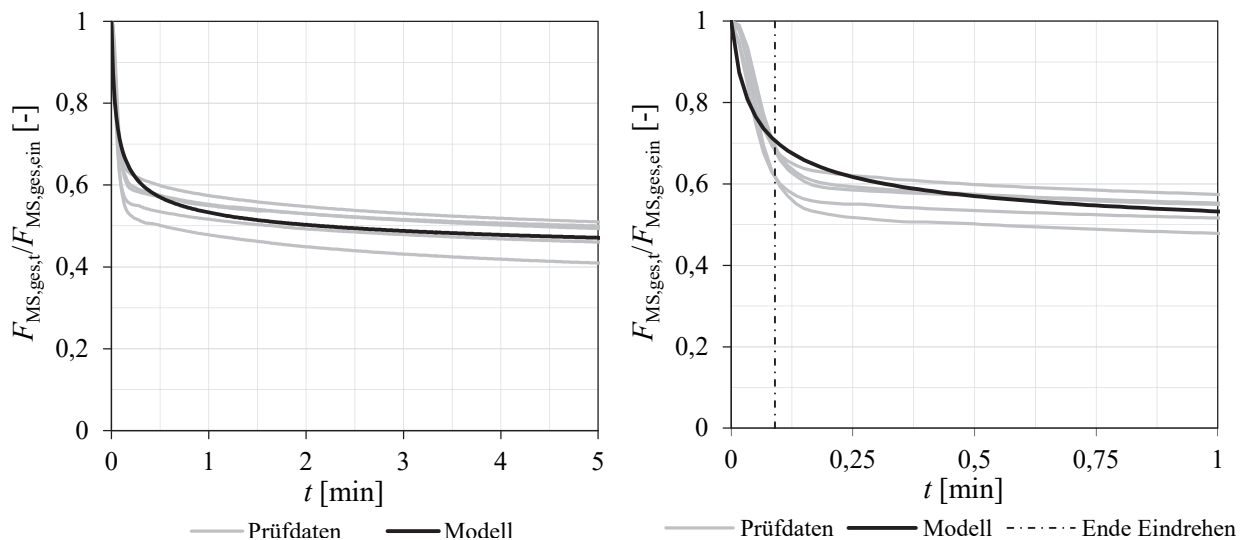
Für die Mittelwerte der jeweiligen Messwerte wurde für jede Untergruppe zusätzlich ein Modell erstellt, welches durch die in schwarz dargestellte Linie in den Abbildungen 128 und 127 dargestellt ist und nachfolgend erläutert wird.

Es handelt sich dabei um ein zweistufiges Modell, welches bis zu einem Übergangspunkt bei 2 h (für  $\alpha = 90^\circ R$  &  $90^\circ T$ ) bzw. 0,5 h (für  $\alpha = 0^\circ$ ) aus einer heuristischen Funktion, welche an Brandner und Stadlober (2014) angelehnt ist, abgebildet wird; im Anschluss daran folgt eine lineare Komponente. Der Übergang bei  $t = 2$  h bzw. 0,5 h ist dabei derart ausgebildet, dass beide Funktionen die gleiche Steigung aufweisen müssen. Diese Charakteristik, dass es nach der anfänglich stark ausgeprägten Spaltkraftabnahme in weiterer Folge zu einem linearen Abklingen kommt, wird auch in Kapitel 2-5.1 so beschrieben.

Die für den Anfangsbereich verwendete und geringfügig adaptierte heuristische Funktion nach Brandner und Stadlober (2014) weist dabei die in Gleichung (4.12) dargestellte Form auf. Die Kalibrierung der Funktionsparameter beider Funktionen an die Messwerte basiert dabei auf der Methode der kleinsten Fehlerquadrate (LSM). Dazu wird im ersten Schritt der Mittelwert der relativen Spaltkräfte für jeden Zeitschritt (1 s) der jeweiligen Untergruppe ermittelt und im Anschluss das Modell durch Anpassung der beiden Faktoren  $\beta$  und  $\gamma$  (siehe Gleichung (4.12)) so verändert, dass es möglichst geringe Abweichungen aufweist.

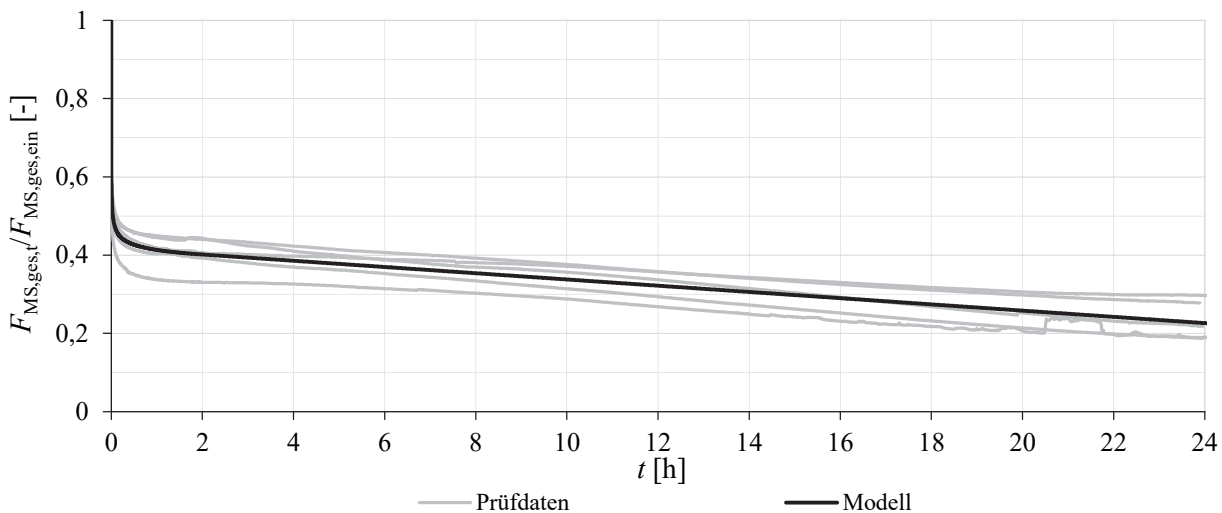
$$\frac{F_{MS,ges,t}}{F_{MS,ges,ein}} = \frac{1}{\left[ \ln(10^3 \cdot t) \cdot \beta + 1 \right]^\gamma} \quad | \quad 0 \leq t \leq \begin{cases} 0,5 & \alpha = 0^\circ \\ 2 & \alpha = 90^\circ \end{cases} \quad (4.12)$$

$F_{MS,ges,t}$	Kraft aller Messschrauben zum Zeitpunkt $t$ [N]
$F_{MS,ges,ein}$	maximale Kraft aller Messschrauben während des Eindrehvorganges [N]
$t$	Zeit nach Beendigung des Eindrehvorganges [h]
$\alpha$	Achs-Faserwinkel [°]
$\beta, \gamma$	Anpassungsfaktoren für das Modell [1/ln(h) bzw. -]



**Abbildung 127:** *Abklingen der Spaltkräfte nach der Applikation der Schraube (links: 5 Minuten) bzw. (rechts: 1°Minute) für die Buche mit  $\alpha = 90^\circ R$  und Verwendung der Referenzschraube inkl. Modell*

Mit dem sich aus Gleichung (4.12) ergebenden Verlauf können die stark abnehmenden Spaltkräfte, welche sofort nach dem Erreichen der maximalen Spaltkraft auftreten, und die anschließende Reduktion der Spaltkräfte aufgrund von Kriech- und Relaxationserscheinungen bestmöglich abgebildet werden (siehe Abbildung 127).



**Abbildung 128:** Abklingen der Spaltkräfte nach der Applikation der Schraube (24 h) für die Buche mit einem Achs-Faserwinkel von 90°R und Verwendung der Referenzschraube inklusive Modell

Nach dem Abklingen der nichtlinearen Spaltkraftreduktion kann der weitere Verlauf für die relativen Spaltkräfte durch eine lineare Funktion ausreichend gut beschrieben werden. Die lineare Funktion beschreibt dabei in weiterer Folge die relativ vorherrschenden Spaltkräfte bis zum Ende der Prüfaufzeichnungen nach 24 h (für 90°) bzw. bis zu einer Dauer der Prüfaufzeichnung von 12 h für Achs-Faserwinkel von 0°.

Die auf 12 h verkürzten Modelle bei einem Einschraubwinkel von 0° sind durch die geringeren Spaltkräfte und dem zusätzlich schnelleren Abfall der Spaltkraft bedingt. So zeigt sich für eine Untergruppe (BU, RF, 0°) bereits vor dem Ende des Modelles bei 12 h ein vollständiger Abbau der Spaltkräfte. Bei weiterer Abnahme der Spaltkräfte unterhalb des Niveaus der Vorspannung kommt es dabei zu einer erneuten nichtlinearen Abnahme der Spaltkraft (Vorspannung wird dadurch weiter abgebaut). Durch den raschen Abfall bei faserparalleler Verschraubung gleich zu Beginn wird außerdem der starke nichtlineare Abfall früher abgeschlossen, da die Spaltkräfte schnell ein geringeres Niveau erreichen. Deshalb wird bereits nach 0,5 h die weitere Abnahme der Spaltkraft bis 12 h mit einer linearen Funktion beschrieben.

In der nachfolgenden Tabelle 76 sind die Kenndaten zu den Anpassungsfaktoren  $\beta$  und  $\gamma$  sowie die sich im linearen Bereich durchschnittlich einstellende Steigungen  $k$  für die jeweiligen Untergruppen angegeben.

**Tabelle 76:** Anpassungsfaktoren  $\beta$  und  $\gamma$  sowie Abklingkoeffizient pro Stunde für die Modelle des Mittelwertes in Abhängigkeit vom Holzprodukt, Achs-Faserwinkel und Schraubentyp

Holzart bzw. Gruppe	$\alpha$	Referenzschraube (RF)			Prototyp 1 (P1)		
		$\beta$ [1/ln(h)]	$\gamma$ [-]	$k$ [%/h]	$\beta$ [1/ln(h)]	$\gamma$ [-]	$k$ [%/h]
Buche	0°	0,781	0,857	-5,00	0,217	3,68	-3,36
	90°R	0,320	2,14	-0,80	0,191	4,83	-0,61
	90°T	0,322	3,08	-0,73	0,141	22,5	-0,45
BauBuche	0°	0,161	52,9	-2,03	0,151	16,6	-2,38
	90°R	0,145	20,8	-0,45	0,110	24,3	-0,41
	90°T	0,088	285	-0,29	0,082	76,9	-0,32

Der Tabelle 76 sind neben den deutlich unterschiedlichen Anpassungsfaktoren  $\beta$  und  $\gamma$  für die jeweiligen Untergruppen auch die damit verbundenen Steigungen in den linearen Bereich des Modelles zu entnehmen. Dabei zeigt sich für Achs-Faserwinkel von  $0^\circ$  (Abnahme von im Mittel 4,2 %/h für die Buche bzw. 2,21 %/h für die BauBuche) nochmals die deutlich raschere Abnahme der relativen Spaltkräfte im Vergleich zu Einschraubwinkeln von  $90^\circ$  zur Faser (Abnahme von im Mittel 0,65 %/h für die Buche bzw. 0,37 %/h für die BauBuche). Zudem zeigt sich für das, bereits in Tabelle 75 beobachtete, raschere Abklingen der relativen Spaltkraft in der Buche eine nahezu doppelt so große Steigung (entspricht der Abklinggeschwindigkeit) im Vergleich zur BauBuche. Die theoretische Zeitspanne, welche bis zum gänzlichen Abklingen der Spaltkräfte (bei angenommener, gleichbleibender Steigung  $k$ ) für Achs-Faserwinkel von  $90^\circ$  notwendig wäre, ergibt sich für die Buche zu insgesamt ca. 3 Tagen und für die BauBuche zu etwa 6 Tagen.

Die Verläufe der relativen Spaltkräfte aus den Prüfungen inklusive dem jeweils dazugehörigen Modell sind im Anhang C-5 für alle Untergruppen in Form von Diagrammen dargestellt.

Anmerkung 1: Die Messung der Verformungen der Holzprüfkörper bzw. die daraus abgeleiteten Spaltkräfte werden für die Prüfkonfigurationen mit Achs-Faserwinkeln von  $0^\circ$  und  $90^\circ$  in radialer Richtung gemessen. Für die Achs-Faserwinkel von  $90^\circ$  erfolgt die Messung zur Bestimmung der Spaltkräfte in tangentialer Richtung. Der überwiegende Anteil der bei verschiedenen Achs-Faserwinkeln auftretenden, ausgeprägten Unterschiede kann deshalb dem Verhalten der Schraube im Prüfkörper zugeschrieben werden.

Anmerkung 2: Die signifikant geringeren maximalen Spaltkräfte infolge des Eindrehvorganges bei einem Achs-Faserwinkel von  $0^\circ$  bei den LZ-Prüfungen im Vergleich zu den Kurzzeitprüfungen weisen trotzdem eine vergleichbare Abklingcharakteristik der Spaltkräfte (relativer Spaltkraftverlauf) auf.

#### 4-5.4.4 Gesamtverlauf der Spaltkräfte

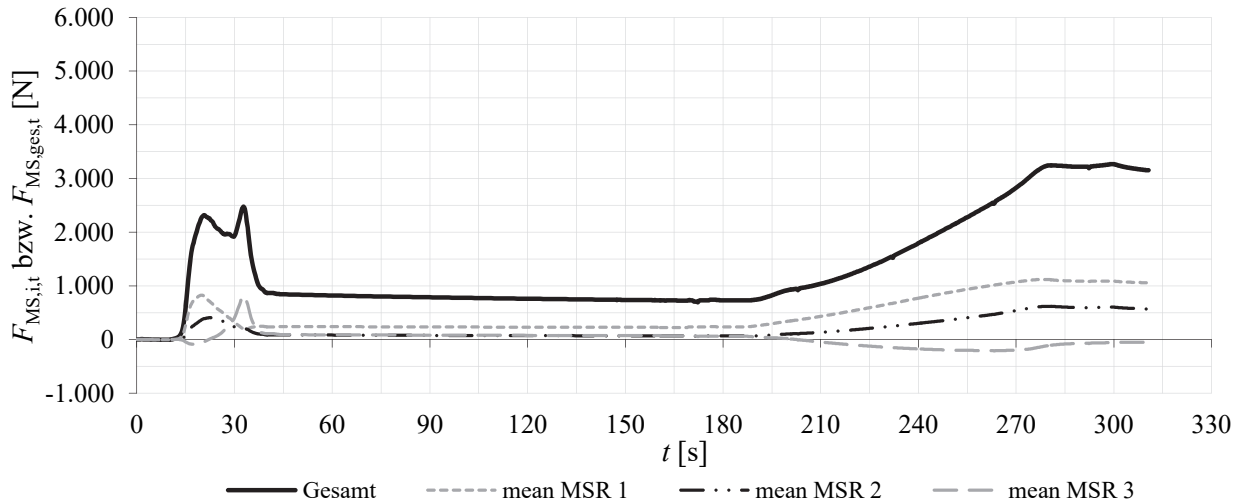
Die hier dargestellten Gesamtverläufe der Spaltkräfte über die Zeit setzen sich aus den Messungen der Spaltkräfte der Eindreh-, Auszieh- und Langzeitprüfungen, welche bereits in den Kapiteln 4-5.4.1 bis 4-5.4.3 erläutert wurden, zusammen. Neben den tatsächlich ermittelten Spaltkräften aus den Eindreh- und Ausziehprüfungen (Kurzzeit) wird aus den Mittelwerten der LZ-Prüfungen (nicht aus dem Modell, sondern direkt aus den Prüfdaten mit gleichen Parametern) der zum jeweiligen Prüfkörper gehörende Kraftabfall zwischen den beiden Prüfungen ermittelt. Um dabei den, wie in Abbildung 127 zu sehen ist, besonders hohen Anteil des relativen Kraftabfalles zu messen und nicht aus den Langzeitversuchen ermitteln zu müssen, wurde die Aufzeichnung der Spaltkräfte noch 10–20 s nach dem Ende der Eindrehprüfung fortgesetzt. Erst danach folgten die Beendigung der Prüfaufzeichnung und der Transport zur Ausziehprüfmaschine. Für Achs-Faserwinkel von  $0^\circ$  wurden, wie bereits erwähnt, die Ergebnisse von Pöll (2017) für die Auswertung der Kurzzeitversuche herangezogen. Dabei endet die Messung der Spaltkräfte allerdings bereits ca. 1–2 s nach dem Ende der Eindrehprüfung. Aufgrund der zu dieser Zeit noch sehr starken Änderungen der Spaltkräfte und der notwendigen Anpassung über die LZ-Prüfungen, ist somit die Möglichkeit einer Abweichung der davon abhängigen Spaltkräfte von den tatsächlichen erhöht.

Auch die Zeit für das Abschließen an der Eindrehprüfvorrichtung, den Transport und das Anschließen an der Ausziehprüfmaschine der gesamten Messeinrichtungen (Zeit, für welche der relative Spaltkraftverlust aus den LZ-Versuchen ermittelt wird) variiert zwischen den Prüfungen von Pöll (2017) und jenen, welche in dieser Arbeit zusätzlich durchgeführt wurden. So wird von Pöll (2017) hierfür lediglich eine Zeitspanne von 5 Minuten und ein COV-Wert von 36 % angegeben, während für alle weiteren Prüfungen ein Zeitfenster von  $(90 \pm 2)$  s eingehalten wurde.

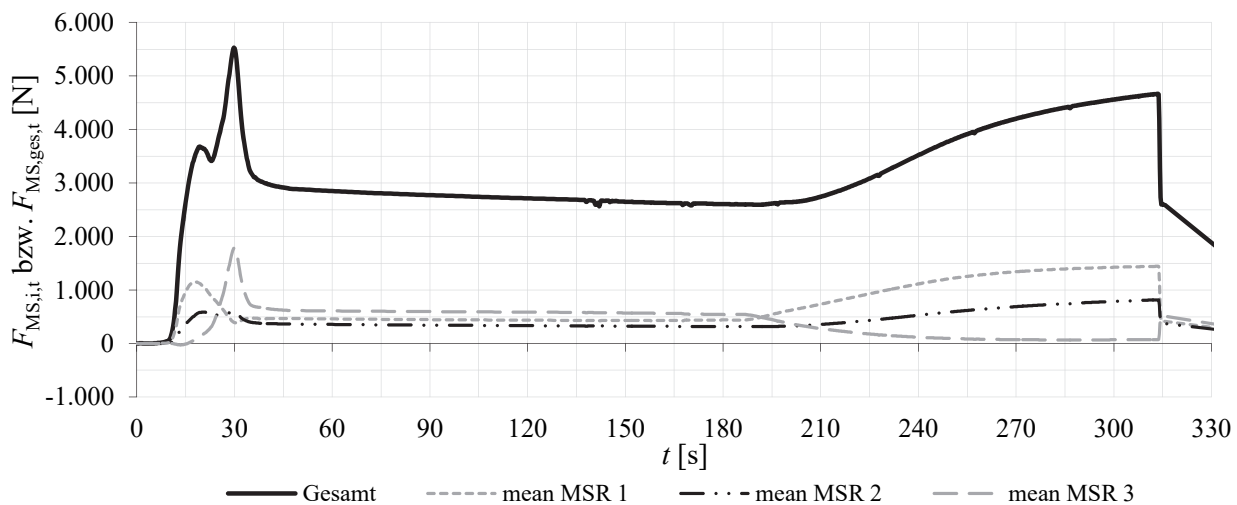
Damit kommt es auch in weiterer Folge zu einem unterschiedlichen Eintreten des Versagenszeitpunktes bzw. der maximalen axialen Belastung bei der Ausziehprüfung. Während für Achs-Faserwinkel von  $90^\circ$  das Versagen (bzw. die damit verbundene maximale Spaltkraft) ca. 4 Min. nach dem Ende des Eindrehvorganges erreicht wird, vergehen für Prüfkörper mit einem Achs-Faserwinkel von  $0^\circ$  ca. 7,5 Minuten. Wie der Abbildung 127 zu entnehmen ist, kommt es in den ersten Minuten zu einer so hohen Abnahme

der Spaltkraft, dass dabei durchaus ein Unterschied von mehreren Prozentpunkten relativer Spaltkraftänderung auftreten kann (ca. 5–7 %).

In den Abbildungen 129 und 130 werden beispielhaft zwei Gesamtverläufe der Spaltkräfte mit den gleichen Parameterausprägungen (BU, 90°R, RF) gezeigt. Es ist dabei bereits zu erkennen, dass in Abbildung 129 bei der Ausziehprüfung höhere Gesamtspaltkräfte auftreten, während in Abbildung 130 die Gesamtspaltkräfte bei der Eindrehprüfung höher ausfallen.



**Abbildung 129: V1: Gesamtspaltkraftverlauf der Spaltkräfte (Applikation und Herausziehen) für die Buche mit einem Achs-Faserwinkel von 90°R und Verwendung der Referenzschraube**



**Abbildung 130: V2: Gesamtspaltkraftverlauf der Spaltkräfte (Applikation und Herausziehen) für die Buche mit einem Achs-Faserwinkel von 90°R und Verwendung der Referenzschraube**

Wie in der Abbildung 130 zu erkennen ist, kommt es beim Eindrehvorgang in der Regel für die Messschraubenreihe 3 (Anordnung an der Rück- bzw. Unterseite der Prüfkörper) zu den höchsten auftretenden Spaltkräften. Beim Ausziehvorgang hingegen treten die maximalen Kräfte in den Messschrauben an der Vorder- bzw. Oberseite der Messschrauben (MSR 1) auf. Für die Messschraubenreihe 3 hingegen kommt es nahezu zu einem gänzlichen Abbau der Spaltkräfte und teilweise auch der Vorspannung (siehe Abbildung 129). Dieser Zustand stellt dabei eine Charakteristik der “push-pull“-Prüfungen dar und wäre bei anderen Prüfkfigurationen anders zu erwarten (siehe Diskussion in Kapitel 4-5.5).

In der nachfolgenden Tabelle 77 sind die Mittelwerte inkl. Variationskoeffizienten und die Extremwerte der kumulierten maximalen Gesamtspaltkräfte (wie vorhin beschrieben), welche bei der Ausziehprüfung auftreten, angegeben.

**Tabelle 77:** Serie 4: maximale kumulierte Spaltkraft  $F_{MS,ges,aus}$  bei den Ausziehprüfungen in Abhängigkeit vom Holzprodukt, Achs-Faserwinkel und Schraubentyp

Holzart bzw. Gruppe	$\alpha$	Referenzschraube (RF)					Prototyp 1 (P1)					Verhältnis mean[P1]/ mean[RF] [%]
		$n$	mean	COV	min	max	$n$	mean	COV	min	max	
		[-]	[N]	[%]	[N]	[N]	[-]	[N]	[%]	[N]	[N]	
Buche	0°	10	3.248	21,1	2.373	4.609	11	3.674	23,1	2.395	5.077	113
	90°R	9 (5)	4.806	16,0	3.217	5.488	10 (2)	7.249	19,1	4.524	9.190	151
	90°T	10 (4)	5.828	11,3	4.532	6.649	10 (1)	7.825	20,2	5.120	10.371	134
BauBuche	0°	8*	3.749	10,1	3.327	4.498	6	6.404	11,3	5.339	7.299	171
	90°R	10 (10)	6.157	6,2	5.736	7.033	10 (0)	9.678	6,42	8.688	10.536	157
	90°T	10 (10)	7.649	9,1	6.393	8.638	10 (8)	10.644	4,91	9.840	11.528	139

\* von diesen acht Prüfungen wurden vier bei einer Belastung von 25 kN abgebrochen (Pöll, 2017)

Wie aus den Mittelwerten der Verhältnisse in der Tabelle 77 hervorgeht, zeigen sich für den Prototyp 1 um 33 % (für die Buche) bzw. 56 % (für die BauBuche) höhere maximale Gesamtsplattkräfte bei der Ausziehprüfung als für die Referenzschraube. Entsprechend dem Kapitel 4-5.4.2, treten die durch die Ausziehprüfung zusätzlich induzierten Spaltkräfte relativ unabhängig vom Schraubentyp und der Holzart auf. Deshalb resultieren die Unterschiede in den Absolutwerten der Spaltkräfte bei der Ausziehprüfung zum Großteil aus den Eindrehprüfungen, wo für die BauBuche sowie für Prototyp 1 grundsätzlich höhere Werte als für die Buche und die Referenzschraube auftreten. Es ist dabei (siehe Tabelle 71) beim Eindrehen eine um durchschnittlich 32 % höhere Spaltkraft für den P1 im Vergleich zur RF, sowohl für die Buche als auch für die BauBuche, zu erkennen. Für die Buche sind somit die Unterschiede (zwischen maximaler Spaltkraft beim Applizieren und Herausziehen) der beiden Schraubentypen gleichbleibend, während für die BauBuche eine Zunahme für den P1 zu beobachten ist.

Die zusätzlichen Spaltkräfte infolge der Ausziehprüfung ( $F_{MS,ges,aus,zus}$ ) fallen für die BauBuche überwiegend geringer aus als für die Buche (vgl. Kapitel 4-5.4.2). Der dominante Einfluss der Spaltkräfte aus dem Eindrehvorgang ( $F_{MS,ges,ein}$ ; Spaltkräfte in der BauBuche um durchschnittlich 60 % höher als in der Buche) führt dazu, dass die tatsächliche Spaltkraft bei der Ausziehprüfung ( $F_{MS,ges,aus}$ ) ebenso für die BauBuche höher liegt als für die Buche. Der Unterschied zwischen den beiden Holzprodukten nimmt dabei, auf im Durchschnitt 36 % höhere Spaltkräfte für die BauBuche im Vergleich zur Buche (für RF & P1), ab.

Auffällig ist außerdem, dass sich, wie in der Tabelle 77 ersichtlich ist, im Vergleich zu den in Tabelle 71 (Spaltkräfte aus der Eindrehprüfung) und Tabelle 73 (zusätzliche Spaltkräfte aus der Ausziehprüfung) enthaltenen Ergebnissen geringere Variationskoeffizienten einstellen; auch hier liegt quasi ein Homogenisierungseffekt vor.

Identisch zur maximalen Gesamtsplattkraft beim Applikationsvorgang (siehe Tabelle 71) zeigen sich auch für Achs-Faserwinkel von 0° geringere Werte als für 90°. Diese Feststellung führt in weiterer Folge dazu, dass bei faserparallel angeordneten Holzbauschrauben geringere Mindestabstände möglich sind als bei in Querrichtung eingebrachten Schrauben. Dies deckt sich auch mit Erkenntnissen von Blaß und Uibel (2007), wo in umgekehrter Weise aufgrund von geringeren Mindestabständen schlussgefolgert wird, dass damit auch geringere Spaltkräfte abgeleitet werden können.

In den beiden nachfolgenden Abbildungen (Abbildung 131 für Buche und Abbildung 132 für BauBuche) sind die maximalen Gesamtsplattkräfte aus der Eindrehprüfung ( $F_{MS,ges,ein}$ ; Vergleich mit Tabelle 71) und der Ausziehprüfung ( $F_{MS,ges,aus}$ ; kumulierte Absolutwerte; Vergleich mit Tabelle 77) gegenübergestellt.

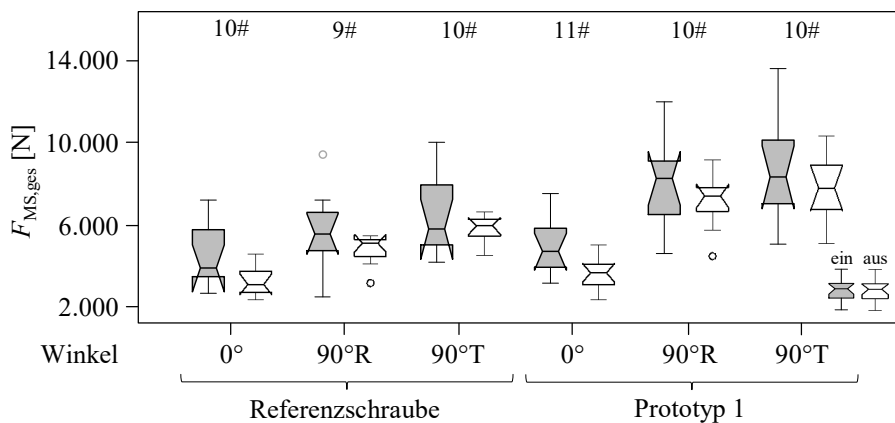


Abbildung 131: Serie 4: Spaltkräfte  $F_{MS,ges,ein}$  bzw.  $F_{MS,ges,aus}$  für die Buche in Abhängigkeit vom Achs-Faserwinkel, Schraubentyp und der Eindreh- oder Ausziehprüfung

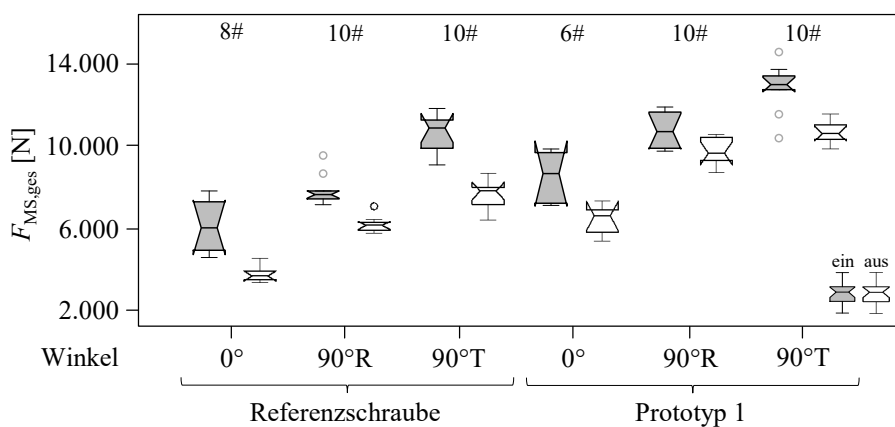


Abbildung 132: Serie 4: Spaltkräfte  $F_{MS,ges,ein}$  bzw.  $F_{MS,ges,aus}$  für die BauBuche in Abhängigkeit vom Achs-Faserwinkel, Schraubentyp und der Eindreh- oder Ausziehprüfung

Wie in der Abbildung 131 zu erkennen ist, zeigen sich für die Buche in der überwiegenden Anzahl der Eindrehprüfungen höhere maximale Gesamtsplattkräfte als für die Prüfungen auf Herausziehen. Die Konfidenzintervalle überschneiden sich allerdings für nahezu alle Untergruppen. Eine eindeutige Festlegung bzw. Aussage dahingehend, welcher Zustand die höheren Spaltkräfte verursacht, ist deshalb nicht möglich.

Für die BauBuche hingegen ist in Abbildung 132 klar zu erkennen, dass die maximalen Gesamtsplattkräfte aus den Eindrehprüfungen höher liegen als aus den Prüfungen auf Herausziehen. Allerdings sei darauf hingewiesen, dass diese Beobachtung unter Umständen nur bei der gewählten "push-pull" Prüfkonfiguration so auftritt. Für andere Prüfkonfigurationen und Holzwerkstoffe bzw. Holzarten (vgl. Abbildung 131) können andere Verhältnisse auftreten (weitere Überlegungen dazu siehe Abschnitt 4-5.5).

Die Feststellung von Pöll (2017), dass die Spaltkräfte beim Applizieren der Schrauben um das rund 2- bis 4-fache höher als bei axialer Belastung bis zum Erreichen der Ausziehfestigkeit oder eines Schraubenschraubbruches sind, können prinzipiell bestätigt werden. Allerdings ist auf jeden Fall anzumerken, dass dies lediglich für die durch das Herausziehen zusätzlichen Spaltkräfte  $F_{MS,ges,aus,zus}$  gilt. Im Rahmen einer Gesamtbetrachtung der Spaltkräfte (siehe Abbildungen 131 und 132) fällt dieser Unterschied viel weniger deutlich aus.

Anmerkung: Auch während der Prüfungen der Serien 1 bis 3 (ohne Messschrauben) wurden ausschließlich Aufspaltungen bei den Eindrehprüfungen beobachtet. Dies lässt bereits die Vermutung zu, dass die maximale Gesamtsplattkraft auch für diese Prüfkörper und die gewählten Prüfkonfigurationen beim Eindrehen größer sein muss als bei den Ausziehprüfungen.



## 4-5.5 DISKUSSION ZU DEN SPALTKRÄFTEN

An dieser Stelle wird erneut auf die im Kapitel 4-5.4.4 gezeigten Abbildungen 129 und 130 eingegangen. Wie in Abbildung 130 ersichtlich ist, treten dabei die maximalen Spaltkräfte im Zuge des Ausziehvorganges der Schraube auf. Wie in Tabelle 78 dargelegt, zeigen die Mittelwerte der Spaltkräfte in der MSR 1 durchgängig höhere Werte bei der Prüfung auf Herausziehen (kumulierte Werte identisch berechnet wie im Kapitel 4-5.4.4, allerdings unter Verwendung der Mittelwerte) als beim Eindrehen.

**Tabelle 78:** Serie 4: Verhältnis der Spaltkräfte in der MSR 1 beim Eindrehen und Ausziehen in Abhängigkeit vom Holzprodukt, Achs-Faserwinkel und Schraubentyp

Holzart bzw. Gruppe	$\alpha$	Referenzschraube (RF)			Prototyp 1 (P1)		
		mean [MSR 1 ein]	mean [MSR 1 aus]	ein/aus	mean [MSR 1 ein]	mean [MSR 1 aus]	ein/aus
		[-]	[-]	[%]	[-]	[-]	[%]
Buche	0°	902	1.152	128	1.073	1.465	137
	90°R	1.247	1.661	133	1.556	2.393	154
	90°T	1.397	1.879	135	1.737	2.507	144
Baubuche	0°	1.276	1.712	134	1.764	2.530	143
	90°R	1.667	2.369	142	2.177	3.271	150
	90°T	2.093	3.119	149	2.602	3.976	153

Die maximalen mittleren Spaltkräfte in der MSR 1 liegen beim Herausziehen zwischen 28 % und 54 % über jenen, welche beim Applizieren der Schraube auftreten (unabhängig des Holzproduktes und Schraubentyps). Demzufolge ist bei der Prüfung auf Herausziehen eine lokal höhere Spaltkraft festzustellen; Aufspaltung infolge Herausziehens somit primär in der Umgebung der MSR 1. Zusätzlich ist anzumerken, dass aufgrund der verwendeten Prüfkongfiguration die Reibung zwischen Prüfkörper und Gegenplatte einen Anteil an der Spaltkraft aufnimmt. Neben diesem Einfluss wird in den nachfolgenden Überlegungen auch jener der Schraubenspitze (siehe Kapitel 4-5.4.3) auf die Größe der auftretenden Spaltkräfte betrachtet und diskutiert.

Im Hinblick auf die Prüfkongfiguration sorgen vor allem zwei Gegebenheiten für einen maßgebenden Einfluss auf die Spaltkräfte. So kommt es durch die ausgewählte "push-pull"-Prüfanordnung zu einem Spannungsverlauf im Prüfkörper, welcher dem einer Scheibe unter Biegebeanspruchung ähnlich ist; Zug an Oberseite (in den MSR 1 & 2) und Druck an der Unterseite (in der MSR 3). Dadurch kommt es zu größeren Spaltkräften an der Oberseite und zu einer direkten Kontaktdruckspannung der beiden Prüfkörperhälften an der Unterseite. Um die Gleichgewichtsbedingungen (in horizontaler Richtung) zu erfüllen, müssen somit neben den Kräften in den Messschrauben auch noch weitere Kraftkomponenten berücksichtigt werden. Dies wären einerseits die durch die Reibung an der Gegenplatte wirkende Kraft (Zug) sowie die vorhin erwähnte Kontaktdruckkraft. Die durchgeführten Betrachtungen, welche lediglich die Summe aller Messschraubenkräfte berücksichtigen, werden davon beeinflusst.

Die Reibung zwischen dem Prüfkörper und der Gegenplatte, welche bereits im ersten Punkt erwähnt wird, führt außerdem zu einer Verringerung der Spalt(zug)kraft an der Oberseite. Diese Prüfkongfiguration kann dabei lediglich bei einer Verwendung der Schraube als Komponente einer Stahlblech-Holz-Verbindung mit anliegendem Stahlblech in dieser Art auftreten, wie z. B. bei einem Zuglaschenstoß mit außenliegenden Stahlblechen und Schrägverschraubung. Bei der Verwendung des Verbindungsmittels für eine Verbindung mit abhebendem Stahlblech wäre eine "pull-pull"-Konfiguration zur Bestimmung der Spaltkräfte notwendig. Dadurch könnten die Einflüsse der Reibung sowie jene, welche aus der Spannungsverteilung resultieren, eliminiert werden.

In den nachfolgend beschriebenen Modellen werden für mögliche Varianten von Prüfkonfigurationen und die damit verbundenen Spaltkräfte abgeschätzt. Dabei wird grundsätzlich ein modifizierter Gesamtverlauf der Spaltkräfte ermittelt, von welchem in weiterer Folge allerdings lediglich die maximal auftretenden Gesamtspaltkräfte für die Eindreh- ( $F_{MS,ges,ein}$ ) und Ausziehprüfungen ( $F_{MS,ges,aus}$ ) betrachtet werden. Für die maximalen Spaltkräfte der Eindrehprüfungen werden dabei die in den Prüfungen ermittelten Kennwerte herangezogen, während für jene der Ausziehprüfungen eine rechnerische Ermittlung auf Basis der getätigten Annahmen notwendig ist. Dazu werden an dieser Stelle einige Punkte bzw. Überlegungen erläutert, welche in den unterschiedlichen Modellen Anwendung finden.

Wie in Kapitel 4-5.4.3 festgestellt, kommt es vor dem Austreten der Schraubenspitze aus dem Prüfkörper zu einem sprunghaften Anstieg der Spaltkraft von etwa 20–30 % der maximalen Spaltkraft beim Eindrehen. Nach dem vollständigen Austreten der Schraubenspitze aus dem Prüfkörper fällt dieser Spaltkraftanteil größtenteils wieder ab. Wie bei der üblichen Anwendung der Schraube ohne Durchschrauben zu erwarten ist, kommt es weder zum so deutlich ausgeprägten Aufbau noch zum Abbau der Spaltkräfte infolge des Austretens der Schraubenspitze. Eine genaue Aussage zum Anteil der Spaltkräfte infolge der Durchdringung (bzw. Austreten der Schraubenspitze) stellt sich daher schwierig dar. Auch ein Einfluss der Prüfkörpergeometrie auf die Kräfte in den Messschrauben kann nicht ausgeschlossen werden. Für eine überschlägige Berechnung bzw. Abschätzung des Gesamtverlaufes der Spaltkräfte für diese Anordnung wird zu der aus den Prüfungen resultierenden Spaltkraft ein Anteil von 20 % hinzuaddiert, um diesen Abfall zu korrigieren.

Für die Gesamtverläufe kommt es so zu einem veränderten Niveau der Spaltkräfte nach dem Ende des Eindrehvorganges im Vergleich zu den tatsächlichen Prüfwerten. Trotz allem wird der aus den Langzeitversuchen ermittelte Abfall der Spaltkräfte über die Zeit verwendet. In der Realität kommt es allerdings durch das veränderte Spannungsniveau auch zu einer Änderung des Kriech- bzw. Relaxationsverhaltens.

Für die Abschätzung der resultierenden Spaltkraft, welche infolge einer “pull-pull“-Prüfkonfiguration auftritt, wurde der Ansatz von Enders-Comberg (2015) gewählt. Dabei ergibt sich mit einem oberen Flankenwinkel von  $\phi_0 = 20^\circ$  sowie einem angenommenen Reibbeiwert von  $\mu = 0,2$  (wird aus einer Vielzahl von in der Literatur angegebenen Werten ausgewählt) eine theoretische Spaltkraft in den Messschrauben von zirka 8 % (siehe Gleichung (2.37) für 3D und linear-elastischen Ansatz; Spaltkräfte ähnlich den Werten der durchgeführten “push-pull“-Prüfungen, siehe Kapitel 4-5.4.2). Wie aus den Untersuchungen von Enders-Comberg (2015) und Pöll (2017) sowie aus Abbildung 119 hervorgeht, zeigt sich, dass mit zunehmender Belastung nahe dem Ausziehversagen der Schraube ein nichtlineares Materialverhalten und ein damit verbundener überproportionaler Anstieg der Spaltkraft einhergeht. Dies wird in der nachfolgenden Modellbetrachtung allerdings nicht berücksichtigt. In Tabelle 79 sind die Mittelwerte der Spaltkräfte ( $F_{MS,aus,Pr.}$ ; lediglich die zusätzlichen Spaltkräfte für die Ausziehprüfungen), welche aus den “push-pull“-Prüfungen ermittelt wurden mit jenen, welche sich nach dem Modell von Enders-Comberg (2015) ergeben ( $F_{MS,aus,Mod.}$ ), gegenübergestellt.

**Tabelle 79: Serie 4: Verhältnis der zusätzlichen Spaltkräfte aus den Prüfungen und nach Gleichung (2.37) in Abhängigkeit vom Holzprodukt, Achs-Faserwinkel und Schraubentyp**

Holzart bzw. Gruppe	$\alpha$	Referenzschraube (RF)			Prototyp 1 (P1)		
		mean $[F_{MS,aus,Pr.}]$ [N]	mean $[F_{MS,aus,Mod.}]$ [N]	Prüfung/ Modell [%]	mean $[F_{MS,aus,Pr.}]$ [N]	mean $[F_{MS,aus,Mod.}]$ [N]	Prüfung/ Modell [%]
Buche	0°	1.604	1.737	92	1.278	1.812	70
	90°R	2.512	2.173	116	2.472	2.513	98
	90°T	2.998	2.130	141	3.254	2.353	138
Bau- Buche	0°	950	1.845	52	1.922	2.251	85
	90°R	2.448	2.259	108	3.091	2.757	112
	90°T	1.981	2.255	88	2.886	2.861	101

Für die in Tabelle 79 eingetragenen Spaltkräfte ist anzumerken, dass diese die Spaltkräfte beim Erreichen der maximalen Belastung darstellen. Für Achs-Faserwinkel von  $90^\circ$  wird dabei noch nicht die maximale Ausziehfestigkeit des Schrauben-Holz-Verbundes erreicht. Allerdings wird bereits die maximale Stahlzugtragfähigkeit der Schraube ausgenützt. Eine weitere Zunahme der Spaltkraft kann aufgrund der damit festgelegten Grenze des Schraubenproduktes nicht auftreten. Für Achs-Faserwinkel von  $0^\circ$  tritt eine eindeutig geringere Spaltkraft sowohl für die Buche als auch für die BauBuche auf. Ein möglicher Grund für die geringeren Spaltkräfte im Vergleich zu jenen nach der Abschätzung mit der Formel von Enders-Comberg (2015) könnte der möglicherweise höhere Reibbeiwert zwischen Stahl und Prüfkörper bei faserparalleler Verschraubung sein. Allerdings werden von Niemz und Sonderegger (2017) für die beiden Reibpartner Stahl und Rot- (*Fraxinus pennsylvanica Marshall*) bzw. Weiß-Esche (*Fraxinus americana L.*) keine signifikanten Unterschiede zwischen radialer, tangentialer und longitudinaler Richtung ausgewiesen.

Im Anschluss werden neben den durchgeführten Prüfungen auch noch die drei theoretisch betrachteten Konfigurationen, sowie deren Zusammensetzung der Spaltkräfte, erläutert.

### **Prüfungen (PR)**

Dabei handelt es sich um die Ergebnisse der durchgeführten Prüfungen und daraus ermittelten Werte für die in Kapitel 3-3.1.2 beschriebene “push-pull“-Prüfkonfiguration.

### **Modell 1 (M1)**

Das Modell 1 entspricht der für die Durchführung der Prüfungen gewählten Prüfkonfiguration. Allerdings wird davon ausgegangen, dass es zu keinem Austreten der Schraubenspitze an der Rückseite des Prüfkörpers kommt. Deshalb ist eine Verschiebung des Endwertes der Spaltkräfte der Eindrehprüfung um 20 % nach oben erforderlich. Für das Abklingen der Spaltkräfte werden die aus den Prüfungen ermittelten Daten verwendet. Dadurch kann der eher gering angenommene Einfluss des Austretens der Schraubenspitze durch das ebenfalls geringere Abklingen der Spaltkraft zum Teil ausgeglichen werden.

### **Modell 2 (M2)**

Für das Modell 2 werden die Daten aus den Eindrehprüfungen (mit Austreten der Schraubenspitze) sowie dem im Anschluss ermittelten Abklingen der Spaltkräfte übernommen. Allerdings wird in weiterer Folge nicht die durchgeführte “push-pull“-Prüfkonfiguration, sondern eine “pull-pull“-Konfiguration für die Ausziehprüfung herangezogen. Dazu werden die zu erwartenden Spaltkräfte durch das Modell von Enders-Comberg (2015) abgeschätzt. Es handelt sich dabei um eine eher theoretische Prüfanordnung, da sich die Umsetzung von “pull-pull“-Versuchen bei gleichzeitigem Austreten der Schraubenspitze etwas schwieriger umsetzen lässt.

### **Modell 3 (M3)**

Für das dritte Modell wird davon ausgegangen, dass es zu keinem Austreten der Schraubenspitze an der Rückseite des Prüfkörpers kommt (gleich wie im Modell 1). Neben der damit verbundenen Erhöhung der Spaltkräfte um 20 % der maximal auftretenden Spaltkraft bei der Applizierung wird für die Ausziehprüfung auch eine “pull-pull“-Anordnung der Prüfkörper vorgesehen. Dementsprechend werden wie im Modell 2 die aus der Ausziehprüfung resultierenden Spaltkräfte durch das Modell von Enders-Comberg (2015) abgeschätzt.

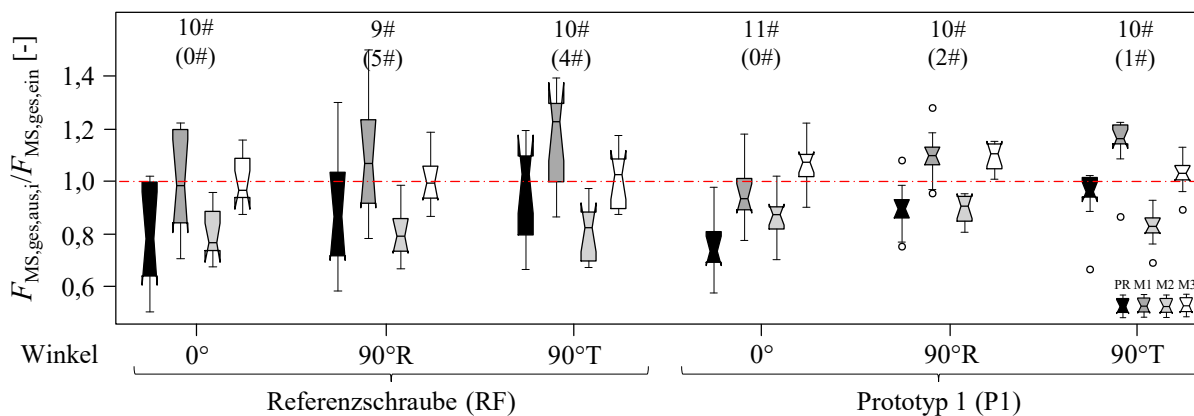
In der nachfolgenden Tabelle 80 sind die aus den Prüfungen sowie für die einzelnen Modelle aus der Abschätzung resultierenden Spaltkräfte zusammengefasst. Die in der Tabelle eingetragenen Werte geben das Verhältnis zwischen der maximal auftretenden Spaltkraft beim Eindrehen ( $F_{MS,ges,ein}$  aus den Prüfungen) und bei der Ausziehprüfung ( $F_{MS,ges,aus,i}$  aus der Prüfung bzw. der Abschätzungen der unterschiedlichen Modelle) an. Dabei werden aufgrund zahlreicher Unsicherheiten in den Annahmen für die Tabelle 80 lediglich die Verhältnisse der Mittelwerte betrachtet.

**Tabelle 80: Serie 4: Mittelwerte der Verhältnisse von  $F_{MS,ges,aus,i}/F_{MS,ges,ein}$  in Abhängigkeit vom Holzprodukt, Achs-Faserwinkel und Schraubentyp**

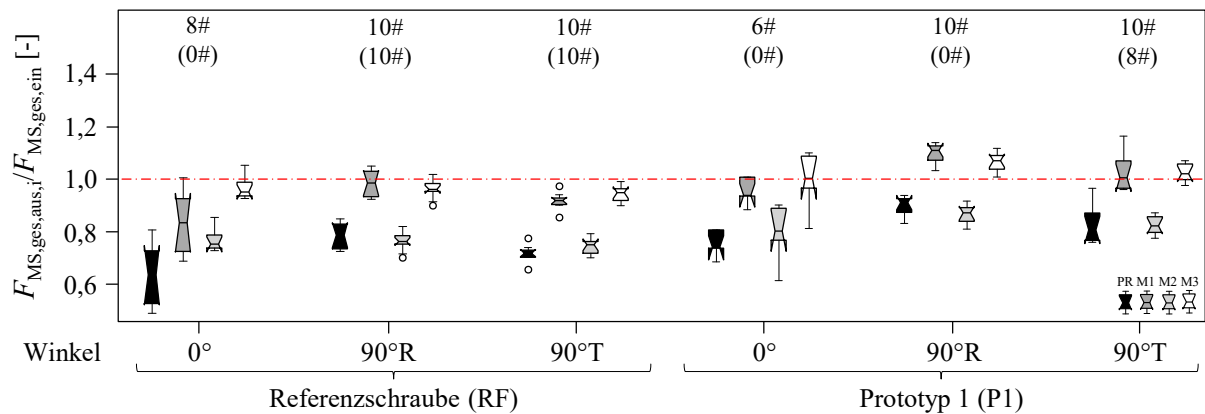
Holzart bzw. Gruppe	$\alpha$	Anzahl $n$		Prüfungen "push-pull"		Modell 1 "push-pull"		Modell 2 "pull-pull"		Modell 3 "pull-pull"	
		RF	P1	RF	P1	RF	P1	RF	P1	RF	P1
		[-]	[-]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Buche	0°	10	11	79	75	99	95	80	86	100	106
	90°R	9 (5)	10 (2)	91	90	111	110	80	89	100	109
	90°T	10 (4)	10 (1)	97	94	117	114	81	83	101	103
BauBuche	0°	8*	6	64	76	84	96	77	80	97	100
	90°R	10 (10)	10 (0)	79	90	99	110	76	87	96	107
	90°T	10 (10)	10 (8)	72	83	92	103	75	83	95	103

\* von diesen acht Prüfungen wurden vier bei einer Belastung von 25 kN abgebrochen (Pöll, 2017)

In den Abbildungen 133 (für die Buche) und 134 (für die BauBuche) sind die Boxplots, welche ebenfalls die Verhältnisse von  $F_{MS,ges,aus,i}/F_{MS,ges,ein}$  für die einzelnen Untergruppen beinhalten, dargestellt. Die Anzahl in den Klammern gibt dabei jene Versagensfälle an, bei welchem es zu einem Schraubenstahlbruch kam.



**Abbildung 133: Verhältnisse von  $F_{MS,ges,aus,i}$  zu  $F_{MS,ges,ein}$  für die Buche in Abhängigkeit vom Achs-Faserwinkel, Schraubentyp und der Modellbetrachtung**



**Abbildung 134: Verhältnisse von  $F_{MS,ges,aus,i}$  zu  $F_{MS,ges,ein}$  für die BauBuche in Abhängigkeit vom Achs-Faserwinkel, Schraubentyp und der Modellbetrachtung**

Wie aus den Ergebnissen der Tabelle 80 und den Abbildungen 133 und 134 hervorgeht, kommt es bei den beiden Modellen 1 und 3, bei welchen die Schraubenspitze im Prüfkörper verbleibt und nicht austritt, zu teilweise höheren maximalen Spaltkräften im Rahmen der Ausziehprüfungen im Vergleich zu den Eindrehprüfungen. Diese beiden Modelle stellen dabei sowohl eine “push-pull“ (Modell 1) als auch eine “pull-pull“-Prüfkonfiguration (Modell 3) dar.

Für Achs-Faserwinkel von 0° kommt es durchgehend zu vergleichsweise niedrigeren Spaltkräften, welche – mit einer Ausnahme für das Modell 3 (BB, P1) – allesamt geringere oder gleiche Werte wie beim Eindrehen aufweisen. Dies ist vor allem interessant, da für diese Prüfungen kein vorzeitiges Versagen (in Form von Schraubenstahlbrüchen) auftrat und somit die maximale Spaltkraft zum Zeitpunkt des Versagens auf Herausziehen für das Schraubenprodukt und den Schrauben-Holz-Verbund bestimmt werden konnte.

Für sämtliche Achs-Faserwinkel von 90° (ausgenommen 90°R P1) handelt es sich aufgrund der Schraubenstahlbrüche um rechts-zensierte Daten hinsichtlich der Ausziehfestigkeit. Die allerdings nur theoretische weitere Steigerung der axialen Kraft, bis ein Ausziehversagen eintritt, würde auch zu einer Erhöhung der Spaltkräfte (für den Ausziehvorgang) führen. Da allerdings dies in der Realität nicht eintreten wird, da die Grenze der Holzbauschraube bereits zuvor erreicht ist, kann auf den Prüfkörper auch keine höhere Spaltkraft wirken.

Für den Fall, dass die maximale axiale Belastung jedoch erst nach einem Tag nach der Applikation auftritt, so ist bis dahin eine zusätzliche Abnahme der relativen Spaltkraft von nochmals etwa 20 % zu erwarten (siehe Kapitel 4-5.4.3); im Vergleich zu den durchgeführten Prüfungen wo das Herausziehen wenige Minuten nach der Applikation durchgeführt wurde. Deshalb wäre in diesen Fällen wohl für alle betrachteten Modelle auf jeden Fall die Eindrehprüfung für die Bestimmung der Mindestabstände maßgebend.

Es lässt sich trotzdem erkennen, dass Einschraubprüfungen alleine nicht immer ausreichen, um Mindestabstände für Verbindungsmittel festzulegen. Wie Blaß et al. (2006) festhalten, können Holzbauteile natürlich bereits beim Einbringen von Holzbauschrauben durch Aufspalten versagen oder eine tragfähigkeitsmindernde Rissbildung aufweisen. Allerdings sind solcherart bestimmte Mindestabstände nach Durchführung von Belastungsversuchen, wie sie auch von Blaß und Uibel (2007) mittels Zug-Scherprüfungen durchgeführt wurden, unter Umständen noch weiter zu erhöhen.

# KAPITEL 5: ZUSAMMENFASSUNG, CONCLUSIO & AUSBLICK

## 5-1 ZUSAMMENFASSUNG

Nachfolgend werden für jede Serie eine abschließende Betrachtung sowie eine Zusammenfassung der jeweiligen Ergebnisse angeführt.

### **Serie 1: Variation der Holzarten, holzanatomischen Gruppen & Rohdichte**

Für die Untersuchungen der Serie 1, welche sich auf die Variation der Holzarten, holzanatomischen Gruppen und Rohdichte fokussiert, sind in Tabelle 81 die Potenzfaktoren der Rohdichte für unterschiedliche Eindreh- und Ausziehkenngößen angegeben. Es sind dabei jene Potenzfaktoren angegeben, welche aus der Regression der Mittelwerte stammen.

**Tabelle 81: Zusammenfassung der Potenzfaktoren für die untersuchten Zusammenhänge in Abhängigkeit von der holzanatomischen Gruppe, dem Achs-Faserwinkel und vom Schraubentyp**

holzanatomische Gruppe	$\alpha$	$M_{\max}$ vs. $\rho_{12}$		$f_{ax}$ vs. $\rho_{12}$			$K_{ser}$ vs. $\rho_{12}$		$f_{ax}$ vs. $M_{\max}$	
		RF	P1	RF	P1	RF <sup>*2)</sup>	RF	P1	RF	P1
Nadelholz (NH)	0°	1,48	1,43	0,85	0,86	-	1,07	0,94	0,66	0,72
	90°	1,74	1,71	1,17	1,24	-	1,26	1,60	0,66	0,74
ringporiges Laubholz (LHR)	0°	1,40	2,77 <sup>*1)</sup>	1,08	1,80	1,38	1,21	1,19	1,52	1,45
	45°	1,44	1,54	1,40	1,40	1,18	0,82	0,86	1,03	0,99
	90°	1,55	1,62	1,38	1,44	1,33	0,52	0,64	0,93	0,89
zerstreutporiges Laubholz (LHZ)	0°	1,65	1,61	1,71	1,58	-	1,77	1,11	1,04	0,93
	45°	2,05	2,20	1,72	1,82	-	1,26	1,29	0,84	0,83
	90°	1,76	1,75	1,85	1,69	-	1,63	2,24	1,05	0,97

\*<sup>1)</sup> stark erhöhter Faktor aufgrund rechts-zensierter Daten der Eichenprüfungen (nur 1 Prüfkörper ohne Aufspaltung)

\*<sup>2)</sup> erweiterte Prüfdaten aus (Hübner, 2013a)

Wie auch dem Kapitel 4-2.5 zu entnehmen ist, kommt es zu eindeutigen positiven Abhängigkeiten (Korrelationen) der betrachteten Kenngrößen. Es ergeben sich für die Laubhölzer deutliche Unterschiede in den Potenzfaktoren zu den Nadelhölzern. Auch die Potenzfaktoren für die jeweiligen holzanatomischen Gruppen der Laubhölzer weisen oftmals unterschiedliche Werte auf. Aufgrund der geringen Anzahl an Stützpunkten für die Bestimmung der jeweiligen Potenzfunktionen sind geringe Abweichungen durchaus tolerierbar und als nicht signifikant anzusehen. Die deutlichen Unterschiede zwischen den Nadelhölzern und den Laubhölzern bleiben allerdings trotzdem erkennbar. Vor allem der geringere Einfluss der Rohdichte auf die Ausziehfestigkeit ( $f_{ax}$  vs.  $\rho_{12}$ ) und zwischen Ausziehfestigkeit und Eindrehmoment ( $f_{ax}$  vs.  $M_{\max}$ ) für die Nadelhölzer sind klar erkennbar.

Die Potenzfaktoren der Laubhölzer für  $M_{\max}$  vs.  $\rho_{12}$ ,  $f_{ax}$  vs.  $\rho_{12}$  und  $K_{ser}$  vs.  $\rho_{12}$  zeigen durchaus Unterschiede. So wird der Rohdichteinfluss sowohl für das Eindrehmoment, die Ausziehfestigkeit und die

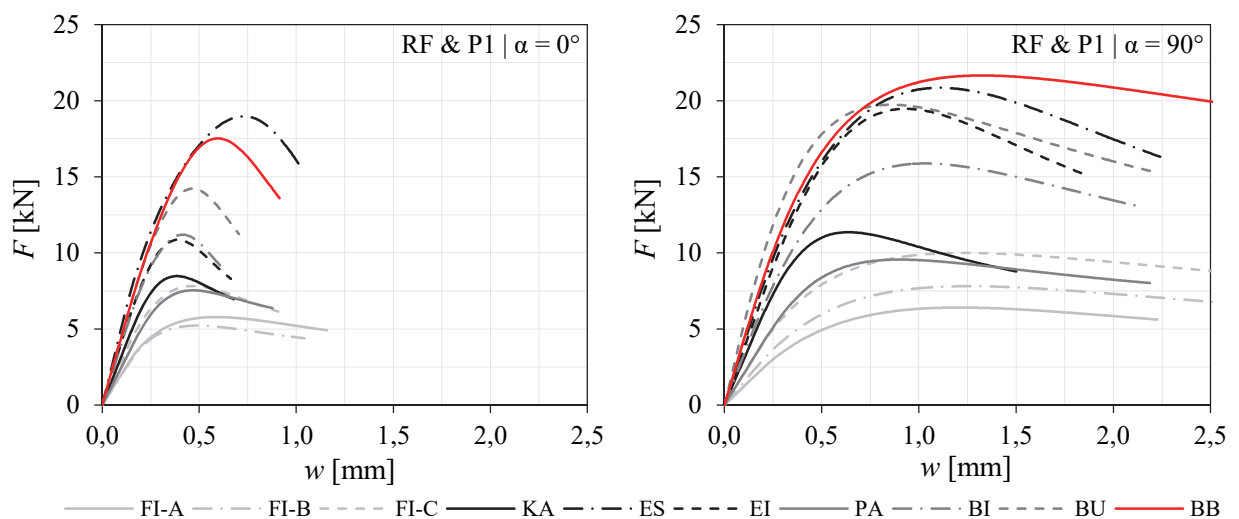


Steifigkeit bei den zerstreuporigen Laubhölzern in Form von größeren Potenzfaktoren ermittelt als bei den ringporigen Laubhölzern. Für das Eindrehmoment und die Ausziehfestigkeit liegen die Unterschiede in der Größe der Potenzfaktoren bei etwa 0,2 bis 0,3. Für die Steifigkeit hingegen sind die Unterschiede in Abhängigkeit von den Einschraubwinkeln zwischen 0,25 und 1,4. Lediglich für die Abhängigkeit von  $f_{ax}$  vs.  $M_{max}$  weisen die ringporigen und zerstreuporigen Laubhölzer die nahezu gleichen Werte auf (Ausnahme  $0^\circ$  bei LHR).

Auch liegen die Prüfdaten (in den Kapiteln 4-2.2 bis 4-2.4) unabhängig von der holzanatomischen Gruppe bei ähnlichen Rohdichten auch auf ähnlichem Niveau (Ausnahme Eiche, welche durchgehend etwas tiefer liegt, und Esche, welche über den erwarteten bzw. bekannten Ergebnissen zu liegen kommt).

Außerdem fällt eine entsprechende Änderung von einigen Potenzfaktoren bei veränderlichen Achs-Faserwinkeln auf. Eine allgemeingültige Aussage über den Verlauf der Potenzfaktoren in Abhängigkeit vom Achs-Faserwinkel ist allerdings meist nicht möglich. Zusätzlich wurde eine deutliche Abnahme der Ausziehfestigkeiten bzw. Zunahme der Steifigkeiten bei Einschraubwinkeln von  $0^\circ$  im Vergleich zu  $90^\circ$  festgestellt (ausgenommen die Buche, bei welcher die Steifigkeit bei einem Einschraubwinkel von  $0^\circ$  tiefer als bei  $90^\circ$  liegt).

Aus den Mittelwerten der Modellparameter ergeben sich die in Abbildung 135 dargestellten Kraft-Weg-Kennlinien. Dabei wurde keine Unterscheidung zwischen der Referenzschraube und dem Prototypen 1 durchgeführt, da sich dabei nahezu identische Kennlinien zeigen (siehe Kapitel 4-2.5).



**Abbildung 135: Kraft-Weg-Kennlinien für  $\alpha = 0^\circ$  (links) und  $\alpha = 90^\circ$  (rechts) gemittelt für RF und P1**

Wie in der Abbildung 135 zu erkennen ist, kommt es in Abhängigkeit der beiden Achs-Faserwinkel von  $0^\circ$  und  $90^\circ$  zu deutlichen Unterschieden im Kraft-Verschiebungsverhalten der axial beanspruchten Holzbauschrauben. Neben den höheren Prüflasten bei einem Achs-Faserwinkel von  $90^\circ$  zeigen sich auch größere dazugehörige Verformungen. Auch ist für einen Einschraubwinkel von  $90^\circ$  ein langsamerer Kraftabfall nach dem Erreichen der Maximallast zu erkennen. Dieser resultiert aus dem für Achs-Faserwinkel von  $90^\circ$  komplexeren Versagensmechanismus (siehe Kapitel 2-4.2) im Vergleich zu einem Achs-Faserwinkel von  $0^\circ$ .

Auffallend ist außerdem das bereits in Kapitel 4-1.1 erläuterte Verhalten, dass bei gleichen Achs-Faserwinkeln die Nadelhölzer und die Laubhölzer mit den höchsten Ausziehtragfähigkeiten gleiche Verformungen beim Erreichen der maximalen Belastung aufweisen.

## Serie 2: Variation des Einschraubwinkels

Für die Serie 2 werden die Eindreh- und Ausziehkenngößen bei unterschiedlichen Achs-Faserwinkeln ausgewertet. In Abbildung 136 sind die Verhältniszahlen der Ausziehfestigkeiten  $f_{ax,\alpha,mean}$  zur Referenzausziehfestigkeit  $f_{ax,90,mean}$  für die Buche und BauBuche eingetragen. Auch das Modell, welches auf Basis dieser Daten lt. Gleichung (4.2) vorgeschlagen wird, sowie jenes für die Abhängigkeit der Ausziehfestigkeit vom Achs-Faserwinkel von Hübner (2013a) (siehe Gleichung (4.1)), sind in diesem Diagramm eingetragen.

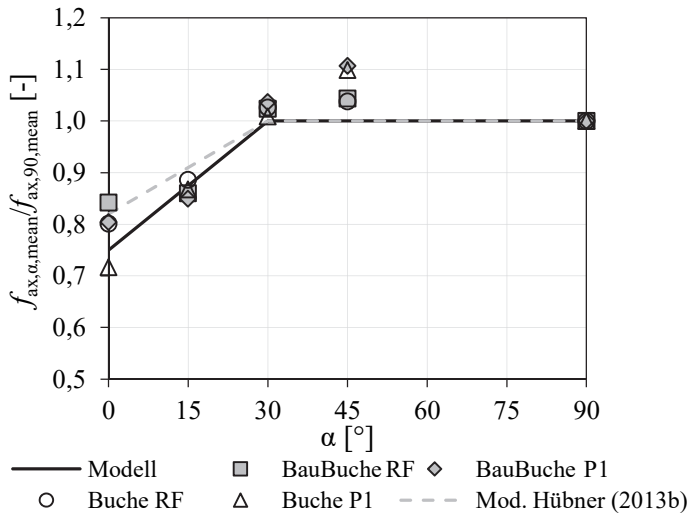


Abbildung 136: Verhältnis  $f_{ax,\alpha,mean}/f_{ax,90,mean}$  vs. Achs-Faserwinkel und Modelle für  $k_{ax}$  für die Buche und BauBuche für beide Schraubentypen

Wie in der Abbildung 136 zu erkennen ist, kommt es beim Modell von Hübner (2013a) vor allem zu einer Überschätzung der Ausziehfestigkeiten bei einem Einschraubwinkel von 15°. Für faserparallele Verschraubungen passt die Berücksichtigung der Winkelabhängigkeit sehr gut. Lediglich für den Prototyp 1 in Buche kommt es zu einer größeren Abweichung. Während für alle Einschraubwinkel von 15° bis 90° bei der Buche die Ausziehfestigkeiten des P1 gleich jenen der RF sind, fällt die Ausziehfestigkeit bei einem Einschraubwinkel von 0° für den P1 deutlich ab. Dieser Effekt ist auch in allen betrachteten Holzarten der Serie 1 so zu beobachten. Lediglich für die BauBuche zeigt sich für alle Einschraubwinkel ein nahezu gleichmäßiger Abfall der Ausziehfestigkeit für den Prototyp 1.

Im Hinblick auf die Potenzfaktoren sind vor allem jene für die BauBuche eher kritisch zu betrachten. Da alle Prüfkörper nahezu die gleichen Eigenschaften aufweisen (sehr geringe Variabilität der Rohdichte), stellt sich die Ermittlung von eindeutigen Abhängigkeiten bzw. Potenzfaktoren als sehr schwierig dar. Deshalb sind in der nachfolgenden Tabelle 82 lediglich die Potenzfaktoren der Buche für die unterschiedlichen Einschraubwinkel zusammengefasst.

Tabelle 82: Potenzfaktoren für die untersuchten Zusammenhänge der Buche in Abhängigkeit vom Achs-Faserwinkel und Schraubentyp

Holzart	$\alpha$	$M_{max}$ vs. $\rho_{12}$		$f_{ax}$ vs. $\rho_{12}$			$K_{ser}$ vs. $\rho_{12}$		$f_{ax}$ vs. $M_{max}$	
		RF	P1	RF	P1	RF & P1	RF	P1	RF	P1
Buche	0°	1,95	1,90	1,90	1,87	1,88	-	-0,32	0,89	0,85
	15°	1,51	1,98	1,61	1,07	1,30	0,58	1,11	0,64	0,41
	30°	1,58	2,00	1,35	1,69	1,52	1,06	0,95	0,70	0,67
	45°	0,95	1,73	1,14	1,47	1,36	1,20	1,05	0,48	0,73
	90°	1,97	2,01	1,82	1,60	1,69	-	1,22	0,86	0,75

Wie bereits dem Kapitel 4-2.5 der Serie 1 zu entnehmen ist, kommt es zu eindeutigen Abhängigkeiten der betrachteten Kenngrößen. Wie in der Tabelle 82 zusammengefasst, sind für die Eindrehmomente Potenzfaktoren der Rohdichte zwischen 1,51 und 2,01 (Ausreißer für die RF bei einem Achs-Faserwinkel von 45° mit 0,95) feststellbar. Dies zeigt eine überproportionale Abhängigkeit des Eindrehmomentes von der Rohdichte. Ein genereller Trend der Potenzfaktoren in Abhängigkeit vom Einschraubwinkel kann allerdings nicht festgestellt werden. Die gemittelten Potenzfaktoren für die Zerstreuporer liegen bei etwa 1,80, wo sich die Potenzfaktoren der Buche ebenso einordnen.

Auch für die Abhängigkeit von  $f_{ax}$  vs.  $\rho_{12}$  und  $K_{ser}$  vs.  $\rho_{12}$  sind die ermittelten Potenzfaktoren für alle Einschraubwinkel sehr ähnlich. In ihrer Größe kommen diese für  $f_{ax}$  vs.  $\rho_{12}$  (Mittelwert ca. 1,6) etwas unter jenen der zerstreuporigen Laubhölzer der Serie 1 (Mittelwert von 1,7) zu liegen. Damit kann allerdings der überproportionale Einfluss der Rohdichte auf die Ausziehfestigkeit bestätigt werden. Für die Potenzfaktoren des Verhältnisses  $K_{ser}$  vs.  $\rho_{12}$  liegen die Potenzfaktoren ebenfalls um etwa 0,2 unter jenen der Gruppe der zerstreuporigen Holzarten. Auffallend ist allerdings, dass für die Zerstreuporer bei einem Einschraubwinkel von 90° der Potenzfaktor mit 1,8 ermittelt wurde, während dieser für die Buche lediglich auf einen Wert von 1,22 kommt.

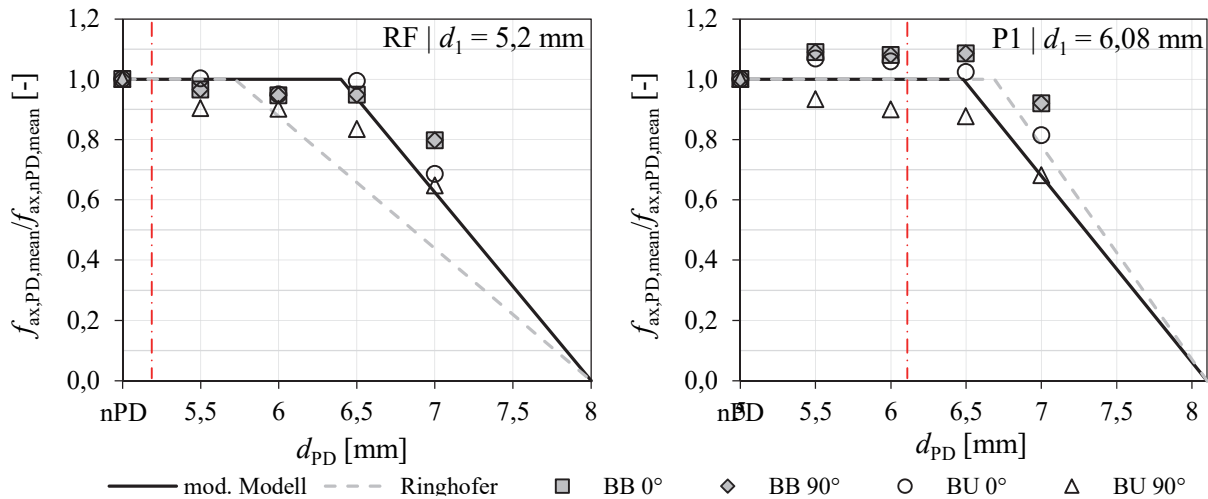
Die Potenzfaktoren, welche den Einfluss der Rohdichte auf die Steifigkeit beschreiben, liegen für die Buche zwischen 0,58 und 1,29 (Ausnahme von -0,32 bei 0° für den P1). Auch hier ist für die Faktoren mit Achs-Faserwinkeln zwischen 15° und 90° kein eindeutiger Trend bezüglich der unterschiedlichen Einschraubwinkel festzustellen. Jedoch fallen auch diese für die Buche im Mittel etwas kleiner als für die gesamte holzanatomische Gruppe der Zerstreuporer (ca. 0,9) aus.

### **Serie 3: Variation des Vorbohrdurchmessers**

Wie aus den Eindrehprüfungen bei verschiedenen Vorbohrdurchmessern hervorgeht, kommt es zu einer deutlichen Abnahme der Eindrehmomente bei Vergrößerung des Vorbohrdurchmessers. Diese Abnahme zeigt sich im Vergleich zum nicht vorgebohrten Fall für die Referenzschraube prozentuell allerdings deutlich stärker als für den Prototypen 1. So beträgt das mittlere maximale Eindrehmoment bei einem Vorbohrdurchmesser von 5,5 mm etwa 49 % vom mittleren maximalen Eindrehmoment ohne Vorbohrung für die Referenzschraube. Für den Prototypen 1 fällt der Wert des maximalen Einschraubmomentes bei einer Vorbohrung von 5,5 mm mit 71 % im Vergleich zum Eindrehmoment ohne Vorbohrung deutlich höher aus.

Die maximalen Eindrehmomente bei einem VBDM von 6,5 mm liegen für die RF bei 26,6 % und für den P1 bei 39,9 % der jeweiligen maximalen Eindrehmomente ohne Vorbohrung. Bei einem Relativvergleich der Vorbohrdurchmesser in Bezug auf die Kerndurchmesser der Schrauben zeigt sich hingegen für beide Schraubentypen sehr ähnliches Verhalten. So kommt es bei einem Vorbohrdurchmesser, welcher erstmals größer als der Schraubenkerndurchmesser ist, zu maximalen Eindrehmomenten im Vergleich zu nPD von 49 % für die RF (für  $d_{PD} = 5,5$  mm bei  $d_1 = 5,20$  mm) und 40 % für den Prototyp 1.

In Abbildung 137 sind die Verhältniszahlen ( $\eta_{PD}$ ) der Ausziehfestigkeiten  $f_{ax,PD,mean}$  zur Referenzausziehfestigkeit  $f_{ax,nPD,mean}$  für die Buche und BauBuche eingetragen. Auch das modifizierte Modell, welches auf Basis der Prüfdaten entsprechend Gleichung (4.5) vorgeschlagen wird, sowie die Abhängigkeit der Ausziehfestigkeit vom Vorbohrdurchmesser lt. Ringhofer (2017) (siehe Gleichung (4.4)), sind in die Diagramme eingetragen.



**Abbildung 137:** Verhältnis  $f_{ax,PD,mean}/f_{ax,nPD,mean}$  vs. Achs-Faserwinkel und Modelle für  $\eta_{PD}$  für die Buche und BauBuche für beide Schraubentypen

Wie in der Abbildung 137 zu erkennen ist, kommt es beim Modell von Ringhofer (2017) vor allem zu einer Überschätzung des Einflusses des Vorbohrdurchmessers für die Referenzschraube. Für den Prototyp 1 liefert das gleiche Modell durchaus eine sehr gute Näherung an die Prüfwerte. Dabei sei an dieser Stelle noch erwähnt, dass dieses Modell zur Beschreibung des Einflusses des Vorbohrdurchmessers auf die Ausziehfestigkeit in Nadelholz bestimmt wurde.

Für das an die Prüfdaten angepasste modifizierte Modell kommt es sowohl für die Buche als auch für die BauBuche nur zu geringen Abweichungen. Für den Prototyp 1 und die Referenzschraube wird durch das modifizierte Modell eine geringfügige Unterschätzung der Ausziehfestigkeiten bei größer werdenden Vorbohrdurchmessern in Kauf genommen.

Die Modelle, welche beide durch einen bilinearen Verlauf gekennzeichnet sind, weisen lediglich andere Bedingungen für den Übergang vom konstanten in den abfallenden Ast auf. So ist im Modell von Ringhofer (2017) bis zu einem Vorbohrdurchmesser von  $1,1 \cdot d_1$  eine konstante Ausziehfestigkeit gegeben, während im modifizierten Modell dies bis zu  $0,8 \cdot d$  der Fall ist. Diese beiden Vorbohrdurchmesser  $d_{PD,grenz}$ , welche entsprechend den Modellen ohne Abminderung der Ausziehfestigkeit ausgeführt werden dürfen, ergeben sich entsprechend Gleichung (4.5) für die beiden Schraubentypen wie folgt:

**Tabelle 83:** Grenzdurchmesser  $d_{PD,grenz}$  für RF und P1

	$d_{PD,grenz}$ [mm]	
	RF	P1
Ringhofer (2017)	5,72	6,69
modifiziertes Modell	6,40	6,48

Auf Grundlage der in Tabelle 83 angeführten maximalen Vorbohrdurchmesser und der in Kapitel 4-4.3 angegebenen minimalen Verankerungstiefen der Gewindeflanken zur Erreichung der maximalen Ausziehfestigkeit könnten die Kerndurchmesser der Schrauben auf bis zu 6,5 mm erhöht werden. Die in EAD 130118-00-0603 (2016) bzw. ÖNORM EN 14592 (2012) definierten Grenzen für  $d_1$  von  $0,5 \cdot d$  bzw.  $0,6 \cdot d$  bis  $0,9 \cdot d$  könnte dabei mit einem Wert von  $0,8 \cdot d$  eingehalten werden.

Wie auch die Analyse der Steifigkeiten für die unterschiedlichen Prüfparameter gezeigt hat, kann neben dem Einfluss des Vorbohrdurchmessers auf die Ausziehfestigkeit auch der Verlauf der zugehörigen Steifigkeit in guter Näherung mit den angeführten Modellen abgebildet werden. Dabei zeigt sich identisch – wie bei den Ausziehfestigkeiten im Modell von Ringhofer (2017) – abermals ein frühzeitiger Abfall des Faktors  $\eta_{PD}$  für die Referenzschraube. Mit dem modifizierten Modell wiederum kann der Verlauf der Steifigkeiten für beide Schraubentypen in einer guten Näherung beschrieben werden.

## **Serie 4: Bestimmung der Spaltkräfte**

Die Serie 4 hatte das Ziel, die Spaltkräfte für verschiedene Beanspruchungssituationen zu bestimmen. Dabei zeigt der Vergleich der Ergebnisse der Eindrehmomente, Ausziehfestigkeiten und Steifigkeiten der Serie 4, dass diese sehr gut mit jenen der Referenzprüfungen vergleichbar sind. Die ermittelten Abweichungen zu den vorhergehenden Untersuchungen sind dabei oftmals logisch nachvollziehbar (z. B. höhere Rohdichte im Bereich des Schraubenkanals für die BauBuche) beziehungsweise offensichtlich (z. B. Schraubenstahlbrüche bei einem Achs-Faserwinkel von 90°).

So kommt es bei den maximalen Eindrehmomenten beim Applizieren der Schrauben zu höheren Werten als bei den Referenzversuchen, was allerdings auf die größere Prüfkörperhöhe und somit Einschraubtiefe zurückzuführen ist. Für Achs-Faserwinkel von 90°R und 90°T zeigen sich keine signifikanten Unterschiede für die Eindrehprüfungen.

Bei den Ausziehprüfungen kommt es aufgrund der höheren effektiven Verankerungslänge des Gewindes zu Schraubenstahlbrüchen. Durch die damit verbundenen rechts-zensierten Daten erreichen die Ausziehfestigkeiten nicht mehr die Werte der Referenzprüfungen. Für jene Untergruppen der Serie 4, bei denen es zu keinen Schraubenstahlbrüchen bzw. vorzeitigem Abbruch der Prüfungen kam, konnte kein signifikanter Einfluss auf die Ausziehfestigkeit durch die zur Bestimmung der Spaltkräfte gewählte Prüfkonfiguration festgestellt werden.

Für die Verbundsteifigkeit der im Holz eingebetteten Schraube zeigen sich sehr ähnliche Ergebnisse und Charakteristiken wie für die Serie 2. So ist auch hier keine signifikante Beeinflussung der Steifigkeiten durch die Auftrennung der Prüfkörper erkennbar. Lediglich für Achs-Faserwinkel von 0° zeigen sich im Vergleich zu den Referenzprüfungen höhere Steifigkeiten, bei welchen ein Einfluss der veränderten effektiven Verankerungslänge möglich ist.

### **Spaltkräfte**

Für die Spaltkräfte ergeben sich im Zuge der Applizierung der Schraube in den Buchen-Prüfkörpern keine signifikanten Unterschiede zwischen den Einschraubwinkeln von 90°R und 90°T. Für die BauBuche treten hingegen durchaus signifikante Unterschiede der Spaltkräfte zwischen den radial und tangential eingebrachten Schrauben auf. Die höheren Spaltkräfte bei tangentialer Einschraubrichtung resultieren dabei, wie in Kapitel 4-5.3 erläutert, aus dem lokal höheren Rohdichtebereich (bedingt durch den Herstellungsprozess). Die Mittelwerte der mittleren Gesamtspaltkräfte  $F_{m,tot}$  des Prototypen 1 liegen ausschließlich über jenen der Referenzschraube.

Außerdem zeigt sich vor allem für die mittleren Gesamtspaltkräfte der Buche, dass diese eine starke Abhängigkeit von der Rohdichte aufweisen (Potenzfaktoren siehe Tabelle 84). Für die BauBuche ist aufgrund fehlender Variabilität der Rohdichte keine Aussage diesbezüglich möglich.

**Tabelle 84: Potenzfaktoren der Rohdichte für die mittlere Gesamtspaltkraft der Buche in Abhängigkeit vom Achs-Faserwinkel**

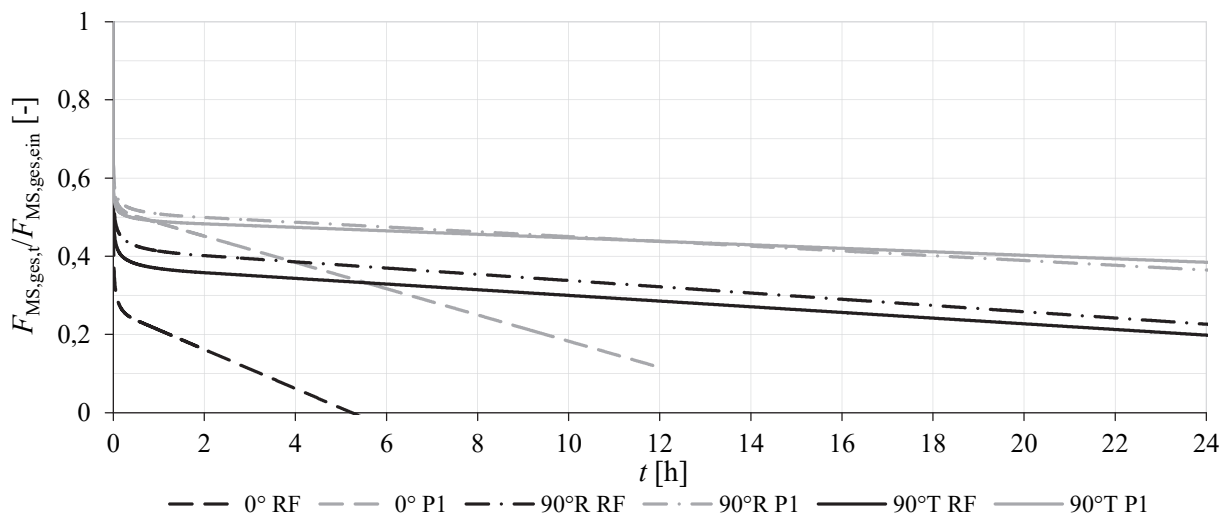
Holzart	$\alpha$	$F_{m,tot}$ vs. $\rho_{12}$	
		RF	P1
	0°	4,33	4,69
Buche	90°R	3,01	3,53
	90°T	3,24	2,84

In vergleichbaren Untersuchungen von Uibel (2012) werden für Fichten-BSH bei Achs-Faserwinkeln von 90° Potenzfaktoren zwischen 2,68 und 3,67 angegeben. Für die durchgeführten Prüfungen in Buchen-VH zeigen sich für 90°R und 90°T ähnliche Potenzfaktoren; zwischen 2,84 und 3,53. Für Achs-Faserwinkel von 0° kommt es zu vergleichsweise noch höheren Potenzfaktoren von 4,33 (RF) bzw. 4,69 (P1). Es zeigt sich also in allen Ergebnissen, dass der Einfluss der Rohdichte auf die mittlere Gesamtspaltkraft auf jeden Fall überproportional stark ausfällt.

Für die Spaltkräfte, welche im Rahmen der Ausziehprüfungen zusätzlich resultieren, zeigen sich keine einheitlichen Tendenzen. Weder in Bezug auf die Schraubentypen noch auf die Holzarten oder Achs-Faserwinkel sind eindeutige Zusammenhänge erkennbar. Auch ein möglicher signifikanter Einfluss der Rohdichte auf die Spaltkräfte konnte in den Untersuchungen nicht bestätigt werden (verschiedene Ausprägungen der Potenzfaktoren bei RF und P1, welche sich allerdings aufgrund der rechts-zensierten Prüfdaten nur bedingt aussagekräftig darstellen).

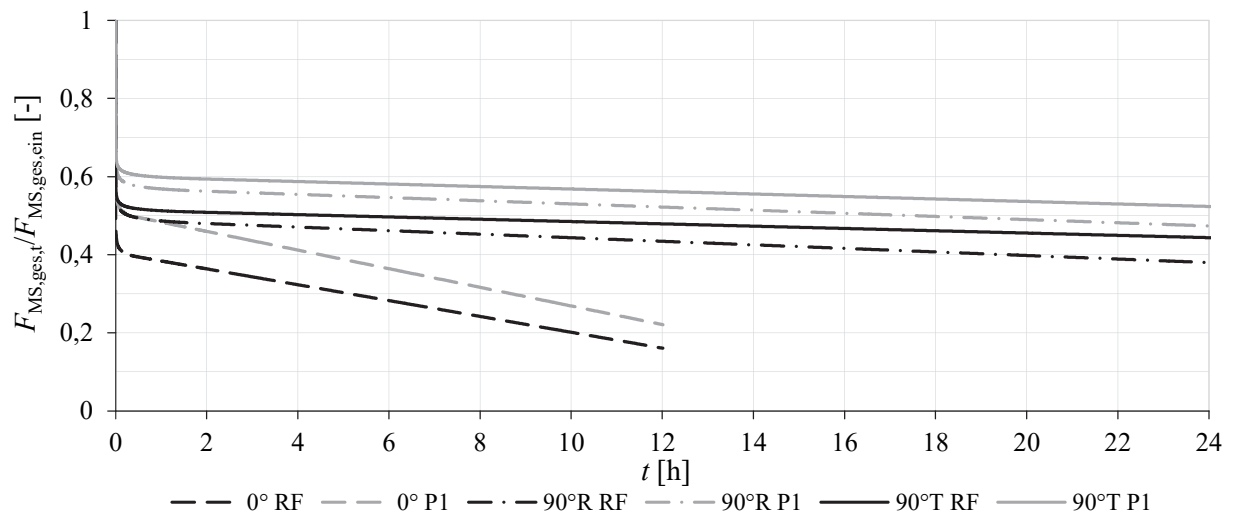
Allerdings zeigt sich aus der Regressionsanalyse für die BauBuche eine maximale Spaltkraft von 7,8 % der maximalen axialen Belastung und für die Buche von 8,9 %. Für das Modell von Enders-Comberg (2015) zur Bestimmung der Spaltkräfte bei axialer Belastung zeigt sich für die eingesetzten Schraubentypen bei der Annahme eines Reibbeiwertes von 0,2 eine Spaltkraft von 8 % der axialen Belastung. Obwohl dieser Wert aus dem Modell sehr gut mit jenen aus den Prüfungen übereinstimmt, ist dabei noch zu beachten, dass es bei den Prüfungen die nicht unwesentlichen Einflüsse der Prüfkonfiguration („push-pull“ vs. „pull-pull“) sowie der weiteren überproportionalen Laststeigerung vor dem Versagen auf Herausziehen zu berücksichtigen sind; trat hier oft nicht auf, da es zu Schraubenstahlbrüchen kam.

Das Abklingen der Spaltkräfte, welches im Rahmen von Langzeitprüfungen für mindestens 24 h untersucht wurde, zeigt für Achs-Faserwinkel von  $0^\circ$  einen deutlich stärkeren Abfall als bei Einschraubwinkel von  $90^\circ$ . In den Abbildungen 138 (für die Buche) und 139 (für die BauBuche) sind die Modelle, welche entsprechend Kapitel 4-5.4.3 an die Mittelwerte der Prüfergebnisse angepasst wurden, dargestellt.



**Abbildung 138: Relativer Spaltkraftverlauf für in Buche applizierte Holzbauschrauben in Abhängigkeit vom Achs-Faserwinkel und Schraubentyp**





**Abbildung 139: Relativer Spaltkraftverlauf für in BauBuche applizierte Holzbauschrauben in Abhängigkeit vom Achs-Faserwinkel und Schraubentyp**

Der aus den Eindreh- und Ausziehprüfungen sowie dem Abklingen der Spaltkraft zusammengesetzte Gesamtverlauf ist in den Abbildungen 129 und 130 anhand zweier Beispiel-Prüfkörper dargestellt. Generell zeigen sich für die Buche in der überwiegenden Anzahl der Eindrehprüfungen höhere maximale Gesamtsplattkräfte als für die Prüfungen auf Herausziehen (für 90°R und 90°T im Mittel ca. 93 %; jedoch nicht signifikant auch bedingt durch die Variabilität der Rohdichte). Für die BauBuche hingegen sind die maximalen Gesamtsplattkräfte aus den Eindrehprüfungen signifikant höher als für die Prüfungen auf Herausziehen (Splattkräfte beim Herausziehen für 90°R und 90°T im Mittel ca. 81 %). Die kumulierten Splattkräfte beim Herausziehen für einen Achs-Faserwinkel von 0° liegen für die Buche und BauBuche hingegen nochmals um ca. 10–15 % tiefer und fallen somit eindeutiger aus.

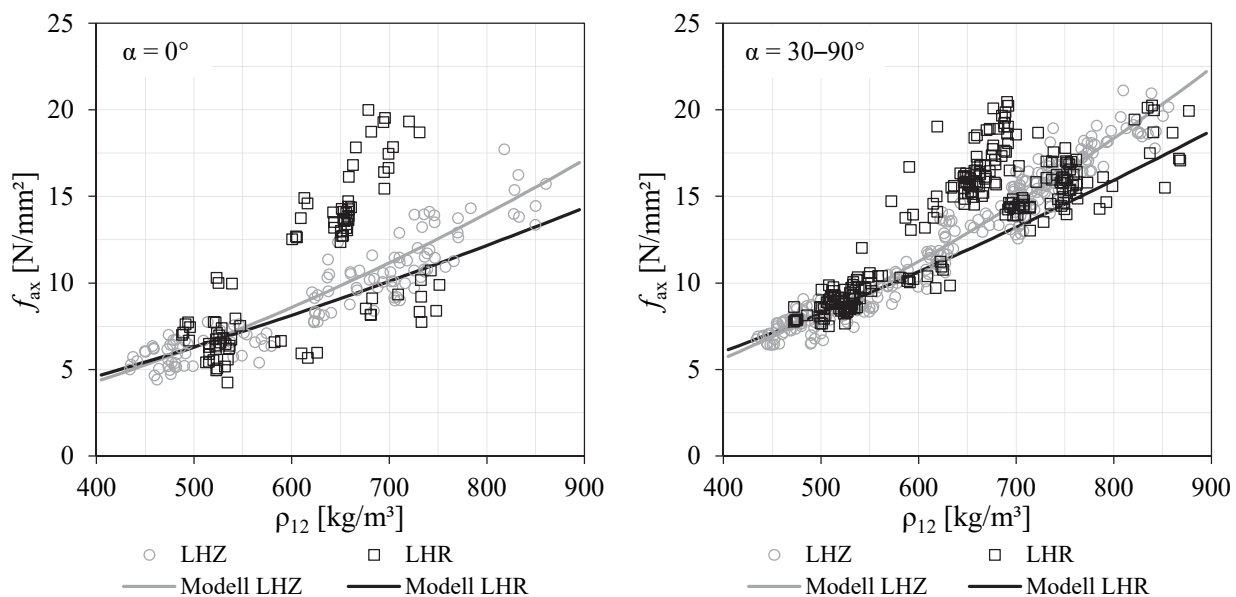
Für andere Prüfkonfigurationen – als die gewählte “push-pull“-Anordnung mit Austreten der Schraubenspitze – kann diese Beobachtung möglicherweise nicht allgemein bestätigt werden. Aus diesem Grund kam es zu einer weiteren Abschätzung durch die Analyse der getätigten Beobachtungen und Zugrundelegung der Splattkräfte gemäß Enders-Comberg (2015) für “pull-pull“-Varianten.

Dabei geht hervor, dass vor allem das Austreten der Schraubenspitze bereits zu einem Abfall der maximalen Splattkraft von ca. 20–30 % führt. Durch die Abschätzung der Splattkräfte auf Basis von drei möglichen Modellannahmen (siehe Kapitel 4-5.5) geht hervor, dass vor allem bei jenen Konfigurationen, wo es zu keinem Austreten der Schraubenspitze kommt, die Splattkräfte im Rahmen der Ausziehprüfung jene des Eindrehvorganges erreichen oder sogar übersteigen können. Maßgebend für diesen Fall ist allerdings auch eine axiale Belastung, welche unmittelbar – zumindest innerhalb weniger Stunden – nach der Applikation der Schraube auftreten muss.

Diese höheren Splattkräfte im Rahmen von Belastungsversuchen können durch ein Aufspalten bei Mindestabständen, welche zuvor durch Eindrehprüfungen festgelegt wurden, auch von Blaß und Uibel (2007) beobachtet werden. In den Untersuchungen von Koppauer (2017) wurde hingegen trotz einer vorherigen Bestimmung der Mindestabstände durch Eindreh- und Ausziehprüfungen an Kleingruppen ein Aufspalten bei größeren Schraubengruppen festgestellt.

## 5-2 CONCLUSIO

Ähnlich wie für die Nadelhölzer, zu denen bereits zahlreiche Publikationen vorliegen, wird die Abhängigkeit der Ausziehfestigkeit von der Rohdichte für die Laubhölzer bestimmt. Dabei zeigt sich eine eindeutige Unterscheidung der Potenzfaktoren zwischen den holzanatomischen Gruppen. Für die Nadelhölzer zeigt sich ein Potenzfaktor, welcher, ähnlich wie von Ringhofer (2017) beschrieben, mit abnehmendem Achs-Faserwinkel kleiner wird (1,20 bei  $90^\circ$  und 0,85 bei  $0^\circ$ ). Für die untersuchten zerstreutporigen und ringporigen Laubhölzer ist hingegen keine ausgeprägte Abhängigkeit vom Achs-Faserwinkel feststellbar. Deshalb wird zur Beschreibung der Ausziehfestigkeit in Abhängigkeit der Rohdichte für die ringporigen Laubhölzer ein Potenzfaktor von 1,40 und für die zerstreutporigen Laubhölzer ein Potenzfaktor von 1,70 empfohlen. In der Abbildung 140 sind die Modelle mit den angeführten Potenzfaktoren für die ringporigen und zerstreutporigen Laubhölzer sowie die Prüfergebnisse eingetragen;  $f_{ax}$  wird dabei bei einer Rohdichte von  $500 \text{ kg/m}^3$  als identisch für beide holzanatomischen Gruppen angenommen.



**Abbildung 140:**  $f_{ax}$  vs.  $\rho_{12}$  für Achs-Faserwinkel von  $0^\circ$  (links) bzw.  $30\text{--}90^\circ$  (rechts) für die Laubhölzer in Abhängigkeit von der holzanatomischen Gruppe

Für ein potenzielles Bemessungsmodell für die Ausziehfestigkeit von Laubholz wird in weiterer Folge ein einheitlicher Potenzfaktor von 1,4 für alle holzanatomischen Gruppen empfohlen. Im Vergleich zu Hübner (2013a), welcher einen Potenzfaktor von 1,6 vorschlägt, zeigt sich also ein kleinerer Einfluss der Rohdichte. Die Unterschiede resultieren dabei vor allem daraus, dass in der Arbeit von Hübner (2013a) überwiegend Esche geprüft wurde und deshalb von dieser Holzart ein dominanter Einfluss ausgeht. Zur Beschreibung des Rohdichteinflusses für sämtliche hier geprüften Holzarten wird die Gleichung (5.1) vorgeschlagen.

$$\left( \frac{\rho_{12}}{\rho_{\text{ref}}} \right)^{k_p} \rightarrow \left( \frac{\rho_{12}}{\rho_{\text{ref}}} \right)^{1,40} \quad (5.1)$$

$\rho_{12}$	Rohdichte bei einer Holzfeuchte von 12 % [ $\text{kg/m}^3$ ]
$\rho_{\text{ref}}$	Referenzrohichte zur Bestimmung der Ausziehfestigkeit [ $\text{kg/m}^3$ ]
$k_p$	Potenzfaktor der Rohdichte zur Bestimmung der Ausziehfestigkeit bei $\rho_{12}$ [–]

Für die Abhängigkeiten der Eindrehmomente von der Rohdichte wird für alle holzanatomischen Gruppen ein überproportionaler Zusammenhang festgestellt, welcher zum überwiegenden Teil zwischen 1,50 und 1,80 zu liegen kommt. Tendenziell geht dabei eine geringfügige Zunahme des Potenzfaktors mit steigendem Achs-Faserwinkel einher.

Der Einfluss der Rohdichte auf die Verbundsteifigkeit der im Holz eingebetteten Schraube wird durch wesentlich stärker variierende Potenzfaktoren zwischen 0,50 und 2,20 beschrieben. Zusätzlich weisen auch die einzelnen holzanatomischen Gruppen deutliche und voneinander abweichende Einflüsse der Achs-Faserwinkel auf, weshalb es schwierig ist, hier einheitliche Zusammenhänge zu erarbeiten.

Für den Zusammenhang der Ausziehfestigkeit mit dem Eindrehmoment wird für die unterschiedlichen Laubholzarten ein nahezu linearer Einfluss festgehalten. Für die Nadelhölzer hingegen steigt die Ausziehfestigkeit nicht im gleichen Maße wie das Eindrehmoment (Potenzfaktor für  $M_{\max}$  von 0,70).

Für den Prototypen 1 wird für die Buche für alle geprüften Achs-Faserwinkel zwischen  $15^\circ$  und  $90^\circ$  die gleiche Ausziehfestigkeit wie für die Referenzschraube erzielt. Lediglich bei faserparalleler Verschraubung liegt die Ausziehfestigkeit des Prototypen 1 um 10 % niedriger. Für die BauBuche hingegen zeigt sich für alle Achs-Faserwinkel eine um ca. 10 % niedrigere Ausziehfestigkeit für den Prototypen 1 als für die Referenzschraube. Dementsprechend zeigt sich für beide Schraubentypen ein sehr ähnliches Verhalten der Ausziehfestigkeit bei veränderlichen Achs-Faserwinkeln.

Für die Buche und die BauBuche, für welche die Prüfungen in einer  $15^\circ$ -Abstufung des Einschraubwinkels zwischen  $0^\circ$  und  $45^\circ$  durchgeführt wurden, zeigen sich von  $90^\circ$  bis zu einem Achs-Faserwinkel von  $30^\circ$  konstante Ausziehfestigkeiten. Für die BauBuche liegen die Ausziehfestigkeiten bei  $15^\circ$  bereits annähernd auf dem Niveau von  $0^\circ$ . Zusätzlich ist für sehr flache Einschraubwinkel für manche Holzprodukte (z. B. BSP) eine tragfähigkeitsmindernde Anordnung in den Fugen möglich, was vermieden werden sollte.

Aus diesem Grund wird für die Beschreibung der Abhängigkeit vom Achs-Faserwinkel für die Buche und BauBuche das in Gleichung (5.2) dargestellte bilineare Modell empfohlen, dem ein Faktor  $k_{90}$  von 1,43 zum Grunde liegt. Die im Vergleich zu Gleichung (4.2) weitere Erhöhung von  $k_{90}$  ermöglicht die Berücksichtigung der weiteren geprüften Laubhölzer (Ring- und Zerstreutporer), welche eine Abminderung bei einem Achs-Faserwinkel von  $0^\circ$  auf lediglich 70 % der Ausziehfestigkeit bei  $90^\circ$  erforderlich machen.

$$k_{\text{ax}} = \begin{cases} 0,70 & 0^\circ \\ 1,00 & 30^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ \end{cases} \quad (5.2)$$

$k_{\text{ax}}$  Faktor zur Beschreibung der Ausziehfestigkeit in Abhängigkeit vom Achs-Faserwinkel [–]  
 $\alpha$  Achs-Faserwinkel [°]

Für den Einfluss des Vorbohrdurchmessers auf die Ausziehfestigkeit wurde in den Untersuchungen der Buche und BauBuche ein starker Abfall der Eindrehmomente beim Vorbohren festgestellt. Der prozentuelle Abfall für die beiden Schraubentypen RF und P1 ist dabei ähnlich, sofern der Vorbohrdurchmesser größer ist als der jeweilige Kerndurchmesser der Schraube ausfällt.

Zusätzlich zeigt sich für die beiden verwendeten Schraubentypen mit geringfügig unterschiedlichen Außen- und Kerndurchmessern ( $d_{\text{RF}} = 8,0$  mm,  $d_{\text{i,RF}} = 5,20$  mm;  $d_{\text{P1}} = 8,1$  mm,  $d_{\text{i,P1}} = 6,08$  mm) bis zu einem Vorbohrdurchmesser von 6,5 mm kein signifikanter Abfall der Ausziehfestigkeit für Achs-Faserwinkel von  $0^\circ$  und  $90^\circ$ . Dies lässt, wie bereits in Kapitel 4-4.3 erläutert, die Annahme einer Mindestverankerungstiefe plausibel erscheinen. Diese liegt für die beiden Schraubentypen bei 0,75 mm (RF) bzw. 0,80 mm (P1) für den geprüften Vorbohrdurchmesser von 6,5 mm. Diese Verankerungstiefe würde entsprechend den Untersuchungen ausreichen, um die vollständige Ausziehfestigkeit der Schrauben trotz Vorbohren zu aktivieren.

In weiterer Folge wäre durch die Erhöhung des Schraubenkerndurchmessers auch eine Steigerung der Schraubenstahlzugtragfähigkeit gegeben. Dadurch könnten die mit dem Prototyp 1 erreichten Tragfähigkeiten, bei welchem in der Serie 4 bereits Stahlbrüche bei Verankerungslängen von  $10 \cdot d$  auftraten, erhöht werden. Eine Steigerung des Schraubenkerndurchmessers für den Prototypen 1 von 6,08 mm auf

6,50 mm wäre somit denkbar, wodurch die Fläche des Gewindekerndurchmessers nochmals um 14 % gesteigert werden kann. Auch die Einhaltung des in EAD 130118-00-0603 (2016) bzw. ÖNORM EN 14592 (2012) angegebenen Verhältnisses für  $d_1/d$  wäre mit einem Wert von 0,80 noch gegeben. Allerdings zeigen die Ausziehkenngößen des P1 ohne Vorbohrung bereits beim jetzigen  $d_1/d$ -Verhältnis teilweise eine Reduktion gegenüber der Referenzschraube. Neben den Kenngrößen bei Kurzzeitbeanspruchungen ist auch das Langzeitverhalten (DoL) zu beachten.

Die Ausziehfestigkeiten bei einem Achs-Faserwinkel von  $90^\circ$  (VBDM von 5,5–6,5 mm) im Vergleich zu den nicht vorgebohrten Prüfungen weisen geringfügige Abnahmen auf. Für einen Achs-Faserwinkel von  $0^\circ$  hingegen liegen die Ausziehfestigkeiten sogar etwas höher als die nPD-Prüfergebnisse, sofern der Vorbohrdurchmesser unter 6,5 mm bleibt. Daraus resultiert ein geringerer Wert für  $k_{90}$  und somit eine weniger ausgeprägte Reduktion der Ausziehfestigkeit bei einem Achs-Faserwinkel von  $0^\circ$  für die Prüfkörper mit Vorbohrung.

Die Messung der Spaltkräfte sowie die anschließenden Abschätzungen ähnlicher Prüfkonfigurationen (bzw. in der Realität anzutreffende Anordnungen mit abhebenden und angepressten Stahlblechen) lassen darauf schließen, dass die Festlegung der Mindestabstände durch Eindrehprüfungen lediglich abgeschätzt werden kann um den Prüfumfang zur Ermittlung der Mindestabstände durch Ausziehprüfungen einzuschränken.

So kann bei frühzeitiger Belastung der Schraube eine höhere Spaltkraft als beim Eindrehvorgang auftreten. Aus diesem Grund wird für die Festlegung der erforderlichen Mindestabstände folgende Vorgehensweise empfohlen: Bestimmung der erforderlichen Mindestabstände durch Eindrehprüfungen und Verwendung dieser als Startwerte für anschließende Belastungsversuche. Vor allem im Hinblick auf die Zwischenabstände sollten dabei auch größerer Gruppen geprüft werden, um die eventuell negative gegenseitige Beeinflussung der Verbindungsmittel zu berücksichtigen.

## 5-3 AUSBLICK

---

Für zukünftige Untersuchungen scheint die Erarbeitung eines Modells zur Beschreibung bzw. Bestimmung des maximalen Einschraubdrehmomentes für verschiedene Einschraubtiefen interessant, da sich das maximale Eindrehmoment laut Pöll (2017) bereits bei Einschraubtiefen von 200 mm nur unwesentlich von jenem bei 80 mm unterscheidet. Damit könnten in weiterer Folge nur wenige Eindrehprüfungen ausreichend sein, um die Anforderungen für die Zulassung als erfüllt ansehen zu können.

Außerdem sind weitere Prüfungen für die vollständige Beschreibung des Winkeleinflusses auf die Ausziehfestigkeit bei Laubhölzern notwendig. Da im Rahmen dieser Arbeit lediglich Achs-Faserwinkel von 0°, 45° und 90° für die ringporigen und zerstreutporigen Laubhölzer untersucht wurden, wären vor allem weitere Ergebnisse zwischen 0° und 45° interessant, da zwischen 45° und 90° von keinem signifikanten Einfluss des Achs-Faserwinkels auf die Ausziehfestigkeit ausgegangen werden kann.

In weiterer Folge wäre ein Bemessungsmodell, welches für sämtliche üblichen Laubholzarten gültig ist, sinnvoll. Das Modell von Hübner (2013a) basiert zum größten Teil auf der Holzart Esche und deckt somit nicht die gesamte Bandbreite der Laubhölzer ab.

Auch weitere Untersuchungen speziell zur Verbundsteifigkeit zwischen Holz und Schraube sind noch durchzuführen. Die Ergebnisse der bisherigen Publikationen bzw. Zulassungen (überwiegend für Nadelholz) unterscheiden sich dabei teilweise so gravierend, dass hier dringend Handlungsbedarf besteht.

Im Hinblick auf eine mögliche Mindestverankerungstiefe der Gewindeflanken wären weitergehende Untersuchungen mit abweichenden Schraubengeometrien (Variation der Gewindegeometrie und Nenn-durchmesser) sehr interessant. Neben der Bestimmung möglicher Einflüsse sollte außerdem eine feinere Abstufung für die Vorbohrdurchmesser im untersuchten Bereich gewählt werden.

Des Weiteren wäre es denkbar, durch die Optimierung der Schraubenspitzengeometrie eine Reduktion der Spaltwirkung beim Applizieren zu erreichen und somit die Mindestabstände möglicherweise in den Bereich der Nadelhölzer zu bringen. Andernfalls wäre es auch ein Lösungsansatz, auf eine Schraubengeometrie hin zu optimieren, welche lediglich mit Vorbohrung verwendet werden kann. Bei weiterer Automatisierung und der verstärkten Anwendung von Systemverbindern stellt die Herstellung der Vorbohrungen nur noch einen geringeren Aufwand dar (Verwendung von Bohraggregaten). Durch die dabei zu erwartende signifikante Reduktion der Spaltkräfte aus dem Appliziervorgang sowie den generell geringer ausfallenden Spaltkräften beim Ausziehvorgang sollten auch geringere Rand- und Zwischenabstände möglich sein.

Die Bestimmung der Spaltkräfte wäre auch für unterschiedliche Schraubengruppen interessant. Es geht dabei um die mögliche Festlegung einer Applizierreihenfolge, bei welcher die Spaltkräfte so gering wie möglich bleiben. Auch die Beeinflussung des Abklingverhaltens der Spaltkraft durch die Anordnung von Schraubengruppen könnte im Rahmen dieser Untersuchungen ermittelt werden.

Generell bedarf die Methode zur Bestimmung der Spaltkräfte einer weiteren Verfeinerung bzw. Überarbeitung. Da eigentlich nur indirekt die Abnahme der Spaltkräfte über die Dehnungsänderung des Holzes bestimmt wird, sind diese Ergebnisse immer mit einer Unsicherheit behaftet. Zusätzlich sollten aber zu den hier durchgeführten Prüfungen auch noch "pull-pull"-Versuche durchgeführt werden, um die getroffenen Annahmen bzw. Abschätzungen zu überprüfen.





# ANHANG A VERZEICHNISSE

## A-1 Literaturverzeichnis

- [Alexiou et al., 1991] Alexiou P. N., Shouyue Z., Marchant J. F.: Elastic Properties of Eucalyptus pilularis Sm. Perpendicular to the Grain. I. In Tension. *Holzforschung*. 1991; 45(1): 1–6. DOI: 10.1515/hfsg.1991.45.1.1.
- [Ammann et al., 2016] Ammann S., Schlegel S., Beyer M., Aehlig K., Lehmann M., Jung H., Niemz P.: Quality assessment of glued ash wood for construction engineering. *Eur. J. Wood Prod.* 2016; 74(1): 67–74. DOI: 10.1007/s00107-015-0981-2.
- [Bariska, 2002] Bariska M.: *Holzchemie: Skriptum zur Vorlesung*. ETH Zürich, Professur Holzwissenschaften. Teil 2, Zürich 2002.
- [Bejtka, 2005] Bejtka I.: *Verstärkung von Bauteilen aus Holz mit Vollgewindeschrauben [Dissertation]*. Universität Fridericiana zu Karlsruhe, Karlsruhe 2005.
- [BFW, 2011] BFW: *Österreichische Waldinventur 2007/09*. BFW-Praxisinformation Nr. 24. Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW), Wien 2011.
- [Blaß und Schmid, 2001] Blaß H. J., Schmid M.: Querszugfestigkeit von Vollholz und Brettschichtholz. *Eur. J. Wood Prod.* 2001; 58(6): 456–466. DOI: 10.1007/s001070050460.
- [Blaß et al., 2006] Blaß H. J., Bejtka I., Uibel T.: *Tragfähigkeit von Verbindungen mit selbstbohrenden Holzschrauben mit Vollgewinde*, Karlsruhe, Hannover 2006.
- [Blaß, 2007] Blaß H. J.: *Selbstbohrende Schrauben als hochwirksames Verbindungsmittel*. In: *holz.bau forschungs gmbh, TU Graz Institut für Holzbau und Holztechnologie (Hrsg.). 6. Grazer Holzbau-Fachtagung*; 28. September 2007. Verlag der Technischen Universität; Graz 2007. D-1–D-20.
- [Blaß und Uibel, 2007] Blaß H. J., Uibel T.: *Tragfähigkeit von stiftförmigen Verbindungsmitteln in Brettsperrholz*, Karlsruhe 2007.
- [Blaß und Uibel, 2009] Blaß H. J., Uibel T.: *Spaltversagen von Holz in Verbindungen: Ein Rechenmodell für die Rissbildung beim Eindrehen von Holzschrauben*, Karlsruhe, Hannover 2009.
- [Blaß und Sandhaas, 2016] Blaß H. J., Sandhaas C.: *Ingenieurholzbau: Grundlagen der Bemessung*, Karlsruhe 2016.
- [Brandner, 2013] Brandner R.: *Stochastic system actions and effects in engineered timber products and structures [Dissertation]*. Technische Universität Graz, Graz 2013.
- [Brandner und Stadlober, 2014] Brandner R., Stadlober E.: Samples of iid Lognormals: Approximations for Characteristics of Minima. *Communications in Statistics - Simulation and Computation*. 2014; 45(2): 504–518. DOI: 10.1080/03610918.2013.863924.
- [Brandner und Spitzer, 2015] Brandner R., Spitzer H.: *Holz- und Waldwirtschaft: Skript zur Vorlesung*. TU Graz, Institut für Holzbau und Holztechnologie, Graz 2015.
- [Brandner et al., 2015] Brandner R., Bratulic K., Ringhofer A.: Serial correlation of withdrawal properties from axially-loaded self-tapping screws. In: *The University of British Columbia (Hrsg.). ICASP12 Proceedings of the 12 th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering: Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering.* ; Vancouver, Canada 2015. DOI: 10.14288/1.0076077.
- [Brandner und Ringhofer, 2017] Brandner R., Ringhofer A.: *FFG BRIDGE Projekt hardwood\_SCREWS - Aktueller Stand & Ausblick: Präsentation beim Konsortialpartnermeeting am 17.01.2017*. Institut für Holzbau und Holztechnologie, Graz 2017.

- [Brandner et al., 2017 (in print)] Brandner R., Ringhofer A., Grabner M.: Probabilistic Models for the Withdrawal Behavior of Single Self-Tapping Screws in the Narrow Face of Cross Laminated Timber (CLT). *Wood Science and Technology*. 2017 (in print). DOI: 10.1007/s00107-017-1226-3.
- [Brandner, 2017] Brandner R.: Risiko im Konstruktiven Ingenieurbau: Skript zur Vorlesung. TU Graz, Institut für Holzbau und Holztechnologie, Graz 2017.
- [Burgert et al., 2000] Burgert I., Eckstein D., Bernasconi A.: The Strength and Volume Fraction of Rays in Trees Subjected to Radial Tensile Stresses. In: Spatz H.-C., Speck T. (Hrsg.). *Plant Biomechanics 2000: Proceedings of the 3rd Plant Biomechanics Conference, Freiburg - Badenweiler, 27.8.–2.9.2000*. Georg Thieme Verlag; Stuttgart 2000. S. 413–419.
- [Burgert et al., 2001] Burgert I., Bernasconi A., Niklas K. J., Eckstein D.: The Influence of Rays on the Transverse Elastic Anisotropy in Green Wood of Deciduous Trees. *Holzforschung*. 2001; 55(5): 449–454. DOI: 10.1515/HF.2001.074.
- [Cockrell, 1933] Cockrell R. A.: A study of the screw-holding properties of wood. New York State College of Forestry. Technical Publication No. 44. 1933.
- [DIN 1052, 2008] DIN 1052: Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken – Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau. 12.2008; ICS: 91.080.20. DIN Deutsches Institut für Normung e.V, Berlin 2008.
- [Divos et al., 1998] Divos F., Tanaka T., Nagao H., Kato H.: Determination of shear modulus on construction size timber. *Wood Science and Technology*. 1998; 32(6): 393–402. DOI: 10.1007/BF00702796.
- [EAD 130118-00-0603, 2016] EAD 130118-00-0603: Screws for use in timber constructions. 04.2016. European Organisation for Technical Assessment, 2016.
- [Eberhardsteiner et al., 2016] Eberhardsteiner J., Winter W., Fadaei A., editors: WCTE 2016: Full papers submitted to the World Conference on Timber Engineering (WCTE 2016), August 22-25, 2016, Wien 2016.
- [Eckelman, 1975] Eckelman C. A.: Screwholding performance in hardwoods and particleboard. *Forest Products Journal*. 1975; 25(6): 30–35.
- [Ehrhart, 2014] Ehrhart T.: Materialbezogene Einflussparameter auf die Rollschubeigenschaften in Hinblick auf Brettspertholz [Masterarbeit]. Technische Universität Graz, Graz 2014.
- [Enders-Comberg, 2015] Enders-Comberg M.: Leistungsfähige Verbindungen des Ingenieurholzbaus - Einsatzmöglichkeiten für Nadel- und Laubholz [Dissertation]. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, Hannover 2015.
- [ETA-12/0373, 2012] ETA-12/0373: Selbstbohrende Schrauben zur Verwendung im Holzbau. 05.11.2012. Österreichisches Institut für Bautechnik, Wien 2012.
- [ETA-13/0642, 2013] ETA-13/0642: VIGAM BSH aus Eiche. offen, offen 2013.
- [ETA-13/0646, 2013] ETA-13/0646: Sierolam - Glued laminated timber of chestnut. offen, offen 2013.
- [ETA-14/0354, 2015] ETA-14/0354: Brettschichtholz aus Laubholz - Buchenfurnierschichtholz für tragende Zwecke. 20.02.2015. Österreichisches Institut für Bautechnik, Wien 2015.
- [Fairchild, 1926] Fairchild I. J.: Holding power of wood screws. 20, Washington 1926.
- [Frese et al., 2010] Frese M., Fellmoser P., Blaß H. J.: Modelle für die Berechnung der Ausziehtragfähigkeit von selbstbohrenden Holzschrauben. *Eur. J. Wood Prod.* 2010; 68(4): 373–384. DOI: 10.1007/s00107-009-0378-1.
- [Gehri, 1993] Gehri E.: Grundlagen der Verbindungstechnik, Schweiz 1993.
- [Gehri, 2010] Gehri E.: Schraubenverbindungen für Laubholzkonstruktionen. In: Internationales Holzbau-Forum Garmisch (Hrsg.). *Forum Holzbau Garmisch 10: 16. Internationales Holzbauforum (IHF) Congress Centrum Garmisch-Partenkirchen: 1. - 3. Dezember 2010; aus der Praxis - für die Praxis*. Fraunhofer-IRB-Verlag; Stuttgart 2010.

- [Glos, 1978] Glos P.: Zur Bestimmung des Festigkeitsverhaltens von Brettschichtholz bei Druckbeanspruchung aus Werkstoff- und Einwirkungskenngrößen: Sonderforschungsbereich 96. Laboratorium für den Konstruktiven Ingenieurbau (LKI); Technische Universität München, München 1978.
- [Götz, 2000] Götz K.: Die innere Optimierung der Bäume als Vorbild für technische Faserverbunde - eine lokale Approximation [Dissertation]. Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe 2000.
- [Grosser, 1977] Grosser D.: Die Hölzer Mitteleuropas: Ein mikrophotographischer Lehratlas, Berlin, Heidelberg 1977.
- [Hankinson, 1921] Hankinson R. L.: Investigation of Crushing Strength of Spruce at Various Angles to the Grain: Materials Section Paper No. 130. Air Service Information, Engineering Division. 1921; 259(3).
- [Hasslacher Timber, 2016] Hasslacher Timber: Produktionformation Brettschichtholz Birke. Sachsenburg 2016. <https://www.hasslacher.com/%E2%80%8Bbrettschichtholz-birke>. Abgerufen am 4. Aug 2017.
- [Holzforschung Austria, 2014] Holzforschung Austria: Laubholz ist in aller Munde: Georg Erlacher im Gespräch über die Stellung des Laubholzes bei den österreichischen Bundesforsten, Wien 2014.
- [Hübner, 2013a] Hübner U.: Mechanische Kenngrößen von Buchen-, Eschen- und Robinienholz für lasttragende Bauteile [Dissertation]. Technische Universität Graz, Graz 2013.
- [Hübner, 2013b] Hübner U.: Withdrawal strength of self-tapping screws in hardwoods. In: KIT Holzbau und Baukonstruktion (Hrsg.). Working Commission W18 - Timber Structures: CIB - W18: Proceedings. ; Vancouver, Canada 2013. S. 127–140.
- [Hübner, 2009] Hübner U.: Auszieh widerstand von Holzschrauben in Eschen-Brettschichtholz. In: Internationales Holzbau-Forum Garmisch (Hrsg.). Forum Holzbau Garmisch 09: 15. Internationales Holzbauforum (IHF) Congress Centrum Garmisch-Partenkirchen: 2. - 4. Dezember 2009; aus der Praxis - für die Praxis. Fraunhofer-IRB-Verlag; Stuttgart 2009.
- [Informationsverein Holz e.V., 2016] Informationsverein Holz e.V.: Baustoffe für den konstruktiven Holzbau. Informationsverein Holz e.V., Düsseldorf 2016.
- [Jablonkay, 1999] Jablonkay P.: Schrauben auf Ausziehen [Diplomarbeit]. ETH Zürich, Zürich 1999.
- [Knorz et al., 2014] Knorz M., Schmidt M., Torno S., van de Kuilen J.-W.: Structural bonding of ash (*Fraxinus excelsior* L.): Resistance to delamination and performance in shearing tests. *Eur. J. Wood Prod.* 2014; 72(3): 297–309. DOI: 10.1007/s00107-014-0778-8.
- [Koch und Dünisch, 2008] Koch G., Dünisch O.: Juvenile wood in Robinie - Qualität von Robinienholz (*Robinia pseudoacacia* L.) und Folgerungen für Holzbearbeitung und Produktqualität: Abschlussbericht [für das DGfH / AiF Forschungsvorhaben], Stuttgart 2008.
- [Kollmann, 1941] Kollmann F.: Die Esche und ihr Holz, Berlin, Heidelberg 1941.
- [Kollmann, 1951] Kollmann F. G.: Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe, Berlin 1951.
- [Koppauer, 2017] Koppauer L.: Optimierung von axial beanspruchten Hinholz-Schraubverbindungen in Hartlaubholz [Masterarbeit]. Technische Universität Graz, Graz 2017.
- [Kretschmann, 1998] Kretschmann D. E.: Properties of Juvenile Wood. *Techline* VI-7/09. 1998.
- [Mägdefrau, 1951] Mägdefrau K.: Botanik: Eine Einführung in das Studium der Pflanzenkunde, Heidelberg 1951.
- [Mattheck, 1994] Mattheck C.: Holz: die innere Optimierung der Bäume: Kernforschungszentrum Karlsruhe. *KfK-Nachrichten*. 1994(4): 232–239.
- [Meyer, 2016] Meyer N.: Zugbeanspruchte Verbindungen in Buchenurnierschichtholz. In: Görlacher R. (Hrsg.). *Karlsruher Tage 2016 - Holzbau: Forschung für die Praxis* : Karlsruhe, 06.–07.10.2016. KIT Scientific Publishing; Karlsruhe 2016.
- [Mombächer, 1988] Mombächer R.: Holz-Lexikon: Nachschlagewerk für die Holz- und Forstwirtschaft, Stuttgart 1988.

- [Müller et al., 2003] Müller U., Gindl W., Teischinger A.: Effects of cell anatomy on the plastic and elastic behaviour of different wood species loaded perpendicular to grain. IAWA Journal. 2003; 24(2): 117–128. DOI: 10.1163/22941932-90000325.
- [Müller et al., 2004] Müller U., Wimmer R., Sretenovic A., Grabner M., Gindl W., Teischinger A.: Effects of macro- and micro- structural variability on the shear behaviour of softwood. IAWA Journal. 2004; 25(2): 231–243. DOI: 10.1163/22941932-90000363.
- [Nakatani und Komatsu, 2005] Nakatani M., Komatsu K.: Mechanism of pull-out performance in lagscrew-bolted timber joints I. Effects of lead hole diameter, embedment depth, embedment direction and edge distance on pull-out performance. Mokuzai Gakkashi 51. 2005(2): 125–130.
- [NDS, 2005] NDS: National Design Specification for wood structures. 2005. American Forest and Paper Association, Washington 2005.
- [neue Holzbau AG, 2017] neue Holzbau AG: BSH-Laubholz: Laubholz im Wendepunkt. Lungern 2017. <http://www.neueholzbau.ch/de/produkte/laubholz/>. Abgerufen am 9. Jun 2017.
- [Newlin und Gahagan, 1938] Newlin J. A., Gahagan J. M.: Lag-screw joints: Their behavior and design: United States Department of Agriculture. Technical bulletin No. 597; Januar 1938. 1938.
- [Niemz, 2006] Niemz P.: Holzphysik: Skript zur Vorlesung. ETH Zürich, Zürich 2006.
- [Niemz, 2011] Niemz P.: Holz und Holzwerkstoffe: Skript zur Vorlesung Werkstoffe I. ETH Zürich, Zürich 2011.
- [Niemz und Sonderegger, 2017] Niemz P., Sonderegger W. U.: Holzphysik: Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe, München 2017.
- [Olsson, 2005] Olsson U.: Confidence Intervals for the Mean of a Log-Normal Distribution. Uppsala (Schweden) 2005. <http://ww2.amstat.org/publications/jse/v13n1/olsson.html>. Abgerufen am 21. Jun 2017.
- [ÖNORM B 3012, 2003] ÖNORM B 3012: Holzarten - Kennwerte zu den Benennungen und Kurzzeichen der ÖNORM EN 13556. 01.12.2003; ICS: 79.040. Austrian Standards Institute, Wien 2003.
- [ÖNORM EN 13183-1, 2004] ÖNORM EN 13183-1: Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz - Teil 1 Bestimmung durch Darrverfahren (EN 13183-12002 + AC2003). 01.02.2004; ICS: 79.040. Österreichisches Normungsinstitut, Wien 2004.
- [ÖNORM EN 1382, 1999] ÖNORM EN 1382: Holzbauwerke - Prüfverfahren - Ausziehtragfähigkeit von Holzverbindungsmiteln. 01.11.1999; ICS: 91.080.20. Österreichisches Normungsinstitut, Wien 1999.
- [ÖNORM EN 1382, 2016] ÖNORM EN 1382: Holzbauwerke - Prüfverfahren - Ausziehtragfähigkeit von Holzverbindungsmiteln. 15.05.2016; ICS: 91.080.20. Austrian Standards Institute, Wien 2016.
- [ÖNORM EN 13986, 2015] ÖNORM EN 13986: Holzwerkstoffe zur Verwendung im Bauwesen - Eigenschaften, Bewertung der Konformität und Kennzeichnung. 01.06.2015; ICS: 79.060.01. Austrian Standards Institute, Wien 2015.
- [ÖNORM EN 14080, 2013] ÖNORM EN 14080: Holzbauwerke - Brettschichtholz und Balkenschichtholz - Anforderungen. 01.08.2013; ICS: 79.060.99; 91.080.20. Austrian Standards Institute, Wien 2013.
- [ÖNORM EN 14358, 2010] ÖNORM EN 14358: Holzbauwerke - Berechnung und Kontrolle charakteristischer Werte. 01.10.2010; ICS: 79.040; 91.080.20. Austrian Standards Institute, Wien 2010.
- [ÖNORM EN 14592, 2012] ÖNORM EN 14592: Holzbauwerke - Stifförmige Verbindungsmittel - Anforderungen. 15.07.2012; ICS: 21.060.01; 91.080.20. Austrian Standards Institute, Wien 2012.
- [ÖNORM EN 15737, 2009] ÖNORM EN 15737: Holzbauwerke - Prüfverfahren - Einschraubdrehmoment von Schrauben. 15.09.2009; ICS: 91.080.20. Austrian Standards Institute, Wien 2009.
- [ÖNORM EN 1912, 2013] ÖNORM EN 1912: Bauholz für tragende Zwecke - Festigkeitsklassen - Zuordnung von visuellen Sortierklassen und Holzarten; ICS: 79.040. Austrian Standards Institute, Wien 2013.

- [ÖNORM EN 1995-1-1, 2015] ÖNORM EN 1995-1-1: Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau. 15.06.2015; ICS: 91.010.30; 1.0980.20. Austrian Standards Institute, Wien 2015.
- [ÖNORM EN 26891, 1991] ÖNORM EN 26891: Holzbauwerke - Verbindungen mit mechanischen Verbindungsmitteln - Allgemeine Grundsätze für die Ermittlung der Tragfähigkeit und des Verformungsverhaltens (ISO 68911983). 01.08.1991; ICS: 91.080.20. Österreichisches Normungsinstitut, Wien 1991.
- [ÖNORM EN 338, 2016] ÖNORM EN 338: Bauholz für tragende Zwecke — Festigkeitsklassen. 01.06.2016; ICS: 79.040. Austrian Standards Institute, Wien 2016.
- [ÖNORM EN 350, 2016] ÖNORM EN 350: Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten - Prüfung und Klassifikation der Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten gegen biologischen Angriff; ICS: 79.040. Austrian Standards Institute, Wien 2016.
- [ÖNORM EN 384, 2016] ÖNORM EN 384: Bauholz für tragende Zwecke - Bestimmung charakteristischer Werte für mechanische Eigenschaften und Rohdichte. 01.11.2016; ICS: 79.040. Austrian Standards Institute, Wien 2016.
- [ÖNORM EN ISO 10666, 1999] ÖNORM EN ISO 10666: Bohrschrauben mit Blechschraubengewinde - Mechanische und funktionelle Eigenschaften. 01.02.2000; ICS: 21.060.00. Österreichisches Normungsinstitut, Wien 1999.
- [ÖNORM ISO 3131, 1996] ÖNORM ISO 3131: Holz - Bestimmung der Dichte für physikalische und mechanische Prüfungen. 01.06.1996; ICS: 79.040. Österreichisches Normungsinstitut, Wien 1996.
- [Pirnbacher und Schickhofer, 2007] Pirnbacher G., Schickhofer G.: Schrauben im Vergleich - eine empirische Betrachtung. In: holz.bau forschungs gmbh, TU Graz Institut für Holzbau und Holztechnologie (Hrsg.). 6. Grazer Holzbau-Fachtagung; 28. September 2007. Verlag der Technischen Universität; Graz 2007. F-1–F-22.
- [Pirnbacher et al., 2009] Pirnbacher G., Brandner R., Schickhofer G.: Base parameters of self-tapping screws. In: Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen (Hrsg.). Working Commission W18 - Timber Structures: CIB - W18. ; Dübendorf, Schweiz 2009. 42-7-1.
- [Pirnbacher, 2009] Pirnbacher G.: Beanspruchungs- und Optimierungspotentiale selbstbohrender Holzschrauben. In: Internationales Holzbau-Forum Garmisch (Hrsg.). Forum Holzbau Garmisch 09: 15. Internationales Holzbauforum (IHF) Congress Centrum Garmisch-Partenkirchen: 2. - 4. Dezember 2009; aus der Praxis - für die Praxis. Fraunhofer-IRB-Verlag; Stuttgart 2009.
- [Pöll, 2017] Pöll M.: Entwicklung einer Hartlaubholzschraube: Optimierung der Gewindegeometrie für die Beanspruchung auf Herausziehen [Masterarbeit]. Technische Universität Graz, Graz 2017.
- [pro:holz, 2017] pro:holz: Holzarten. Wien 2017. <http://www.proholz.at/holzarten/holzarten/>. Abgerufen am 25. May 2017.
- [Ringhofer et al., 2014a] Ringhofer A., Brandner R., Grabner M., Schickhofer G.: Die Ausziehfestigkeit selbstbohrender Holzschrauben in geschichteten Holzprodukten. Forschungskolloquium Holzbau "Forschung und Praxis". 2014: 49–60.
- [Ringhofer et al., 2014b] Ringhofer A., Grabner M., Silva C., Branco J. M., Schickhofer G.: The influence of moisture content variation on the withdrawal capacity of self-tapping screws. holztechnologie. 2014; 55(3): 33–40.
- [Ringhofer et al., 2015a] Ringhofer A., Brandner R., Schickhofer G.: A Universal Approach for Withdrawal Properties of Self-Tapping Screws in Solid Timber and Laminated Timber Products: INTER - Sibenik. International Network on Timber Engineering Research. 2015: 79–98.
- [Ringhofer et al., 2015b] Ringhofer A., Brandner R., Flatscher G., Schickhofer G.: Axial beanspruchte Holzschrauben in Vollholz, Brettschichtholz und Brettsperrholz. Bautechnik. 2015; 92(11): 770–782. DOI: 10.1002/bate.201500075.
- [Ringhofer et al., 2015c] Ringhofer A., Brandner R., Schickhofer G.: Withdrawal resistance of self-tapping screws in unidirectional and orthogonal layered timber products. Mater Struct. 2015; 48(5): 1435–1447. DOI: 10.1617/s11527-013-0244-9.



- [Ringhofer und Schickhofer, 2014a] Ringhofer A., Schickhofer G.: Influencing parameters on the experimental determination of the withdrawal capacity of self-tapping screws. WCTE 2014 - Proceedings of the 13th World Conference on Timber Engineering. Quebec City (Canada). 2014.
- [Ringhofer und Schickhofer, 2014b] Ringhofer A., Schickhofer G.: Investigations Concerning the Force Distribution along Axially Loaded Self-tapping Screws. In: Aicher S., Reinhardt H.-W., Garrecht H. (Hrsg.). Materials and Joints in Timber Structures. Springer Netherlands; Dordrecht 2014. S. 201–210. DOI: 10.1007/978-94-007-7811-5\_19.
- [Ringhofer, 2017] Ringhofer A.: Axially Loaded Self-Tapping Screws in Solid Timber and Laminated Timber Products [Dissertation]. Technische Universität Graz, Graz 2017.
- [Schickhofer et al., 2007] Schickhofer G., Augustin M., Jeitler G.: Einführung in die Verbindungstechnik mit Stabdübeln, Schrauben und eingeklebten Stahlstangen. In: holz.bau forschungs gmbh, TU Graz Institut für Holzbau und Holztechnologie (Hrsg.). 6. Grazer Holzbau-Fachtagung; 28. September 2007. Verlag der Technischen Universität; Graz 2007. A-1–A-66.
- [Schickhofer, 2007] Schickhofer G.: Holzbau: Der Roh- und Werkstoff Holz: Skript zur Vorlesung. TU Graz, Institut für Holzbau und Holztechnologie. S-4-01A/2006, Graz 2007.
- [Schmid, 2002] Schmid M.: Anwendung der Bruchmechanik auf Verbindungen mit Holz [Dissertation]. Universität Fridericiana zu Karlsruhe, Karlsruhe 2002.
- [Schneider, 1999] Schneider P.: Auszugsfestigkeit von EJOT-Rahmenschrauben. ETH Zürich, Zürich 1999.
- [Sell, 1989] Sell J.: Eigenschaften und Kenngrößen von Holzarten, Dietikon 1989.
- [SIA 265, 2012] SIA 265: Holzbau. 01.01.2012; Referenznummer: SN 505265:2012 de. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich 2012.
- [Stadlober und Schauer, 2007] Stadlober E., Schauer J.: Statistik: Skript zur VO im Bakkalaureat Technische Mathematik. TU Graz, Institut für Statistik, Graz 2007.
- [Strutz, 2016] Strutz T.: Data fitting and uncertainty: A practical introduction to weighted least squares and beyond, Wiesbaden 2016.
- [Stuefer, 2011] Stuefer A.: Einflussparameter auf die Querkzugfestigkeit von BSH-Lamellen [Masterarbeit]. Technische Universität Graz, Graz 2011.
- [Taj et al., 2009] Taj M. A., Kazemi Najafi S., Ebrahimi G.: Withdrawal and lateral resistance of wood screw in beech, hornbeam and poplar. Eur. J. Wood Prod. 2009; 67(2): 135–140. DOI: 10.1007/s00107-008-0294-9.
- [Uibel, 2012] Uibel T.: Spaltverhalten von Holz beim Eindrehen von selbstbohrenden Holzschrauben [Dissertation]. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe 2012.
- [Wagenführ, 2000] Wagenführ R.: Holzatlas, Leipzig 2000.
- [Wagenführ, 2007] Wagenführ R.: Holzatlas, München 2007.
- [Wimmer, 2002] Wimmer R.: Forstnahe Holzforschung: Forschung an der Schnittstelle von Wald und Holz: Präsentation auf dem Knet-Fachseminar „Holzeigenschaften und Strukturhierarchy“ 2002.
- [Z-9.1-679, 2013] Z-9.1-679: BS-Holz aus Buche und BS-Holz Buche-Hybridträger. 16.04.2013. Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin 2013.
- [Z-9.1-838, 2016] Z-9.1-838: Furnierschichtholz aus Buche zur Ausbildung stabförmiger und flächiger Tragwerke "Platte BauBuche S" und "Platte BauBuche Q". 23.06.2016. Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin 2016.
- [Zimmermann und Sell, 1997] Zimmermann T., Sell J.: Das Feingefüge der Zellwand auf Querbruchflächen von längszugbeanspruchten Laubhölzern: Forschungs- und Arbeitsbericht 115/35. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA) Abteilung Holz, Dübendorf 1997.



## A-2 Abkürzungsverzeichnis

BB	BauBuche
BI	Birke (Weißbirke bzw. Hängebirke, <i>Betula pendula Roth.</i> )
BSH (GLT)	Brettschichtholz (Glued Laminated Timber)
BSP (CLT)	Brettsperrholz (Cross Laminated Timber)
BU	Buche (Rotbuche, <i>Fagus sylvatica L.</i> )
CI	Konfidenzintervall (Confidence Inveral)
DMS	Dehnungsmessstreifen
DoL	Duration of Load (Langzeitbelastung)
EI	Eiche (Stieleiche: <i>Quercus robur L.</i> bzw. Traubeneiche: <i>Quercus petraea (Matt.) Liebl.</i> )
ES	Esche ( <i>Fraxinus excelsior L.</i> )
ETA	European Technical Assessment (Europäisch Technische Bewertung)
FI-A, -B, -C	Fichte ( <i>Picea abies Karst.</i> ; mit jeweils unterschiedlichem Rohdichtebereich)
FSH (LVL)	Furnierschichtholz (Laminated Veneer Lumber)
Gl	Gleichung
KA	Edelkastanie ( <i>Castanea sativa Mill.</i> )
KVH	Konstruktionsvollholz
KZ	Kurzzeit
LH	Laubholz
LHR	ringporiges Laubholz
LHZ	zerstreutporiges Laubholz
LND	Lognormal Distribution (Lognormalverteilung)
LSM	Least Square Matching/Method (Methode der kleinsten Fehlerquadrate)
LZ	Langzeit
M	Mittellamelle
M1, M2, M3	Modell 1–3
MLErc	rechts-zensierte Datenanalyse mittels Maximum Likelihood Estimation
MS	Messschraube
MSR	Messschraubenreihe
ND	Normal Distribution (Normalverteilung)
NH	Nadelholz
NKL	Nutzungsklasse
nPD	nicht vorgebohrt (not pre-drilled)
OSB	Oriented Strand Board (Grobspanplatten)
P	Primärwand
P1	Prototypschraube 1
PA	Pappel (Schwarzpappel, <i>Populus nigra L.</i> )
PD	vorgebohrt (pre-drilled)
PR	Prüfung
REF	Referenzprüfungen
RF	Referenzschraube
S1–S3	Sekundärwandschichten 1–3
T	Tertiärwand
TG	Teilgewinde
VBDM	Vorbohrdurchmesser
VG	Vollgewinde
VH (ST)	Vollholz (Solid Timber)

## ANHANG B HOLZARTENBESCHREIBUNG

### B-1 Vorkommen, Merkmale und Verwendung

Tabelle 85: *Fichte und Edelkastanie nach Wagenführ (2007)*

Holzart	Fichte ( <i>Picea abies</i> Karst.)	Edelkastanie ( <i>Castanea sativa</i> Mill.)
<b>Vorkommen</b>	Mittel-, Südost-, Nordosteuropa; weite künstliche Verbreitung; Hauptvorkommen: Alpen, Alpenvorland, [...], Sudeten, Karpaten, Skandinavien; im Flachland wie im Gebirge; [...]; bevorzugt sandige, humöse Lehm- und Schieferböden, kalkarme Böden ungünstig; stellt geringe Ansprüche an Wärme, höhere Ansprüche an Feuchtigkeit; [...], häufig vergesellschaftet mit Rotbuche und Tanne, auch mit Kiefer und Laubhölzern; im Freiland auf Bergwiesen, in Gärten und Parkanlagen	West- und Südeuropa, Klein-asien, Nordafrika; bevorzugt auf frischen, tiefgründigen, lockeren, kieselsäurereichen, kalkarmen Böden; auch auf trockneren Standorten und in Gebirgen bis zu 1200 m über NN anzutreffen. Das Verbreitungsgebiet des wärmeliebenden Baumes fällt etwa mit der Weinbaugrenze zusammen.
<b>Baumhöhe</b>	30 ... 55 m (vereinzelt bis 60 m)	15 ... 25 m
<b>Stammlänge</b>	bis zu 20 m	10 ... 20 m
<b>Stamm-MD</b>	bis zu 1,2 m	0,6 ... 1,0 m (1,2 m)
<b>Stammform und Rinde</b>	gerade, schlank, vollholzig, im Freiland abholzig; in der Jugend glatt und hellbraun, im Alter in dünnen Schuppen abblättern, rotbraun bis grau; gerbstoffhaltig	zylindrisch; in der Jugend glatt mit hellen Lentizellen, tiefgrau; im Alter längsrissig, bräunlich grau bis dunkelbraun, dick
<b>Farbe</b>	gelblich weiß bis rötlich weiß	Splintholz grauweiß, schmal; Kernholz gelblich bis dunkel-braun, nachdunkelnd, eicheähnlich
<b>makroskopische Strukturmerkmale</b>	Q: Jahrringgrenze deutlich; Spätholz rötlich gelb, Frühholz weißlich; Übergang Frühholz zu Spätholz innerhalb des Jahrringes überwiegend allmählich R, T: nicht sehr auffallend, siehe Q	Q: Jahrringgrenze und Frühholzgefäße infolge Ringporigkeit mit bloßem Auge deutlich, Spätholzgefäße und Holzstrahlen erst unter der Lupe erkennbar R, T: grob-nadelrissig
<b>Verwendung</b>	Furnierholz, überwiegend als Schälholz für Einlagen; Ausstattungsholz für Verkleidungen; Konstruktionsholz für Innen- und Außenbau mit Holzschutz; für Dachstühle, Leimbinder, Fußböden, Treppen; im Wasser-, Brücken-, Erd-, Berg-, Gartenbau; Spezialholz für Masten, Pfähle, Stangen, Stempel, Musikinstrumente (Resonanzholz, z. B. für Zupf- und Streichinstrumente), Holzwole, Kisten, Papier-, Zellstoff-, Span- und Faserplattenindustrie, Spaltwaren, Paletten	Furnierholz, überwiegend als Messerholz für Deckfurniere; Ausstattungsholz für rustikale Möbel, Verkleidungen, Wandvertäfelungen, Treppen und Parkett (Mosaikparkett, Fertigparkett); Spezialholz für Rahmen, Türen, Fenster, Maste, Schwellen, Musikinstrumente, Schiff und Wasserbau, Fassdauben, zum Schnitzen und Drechseln, zur Gerbstoffgewinnung; im Mittelmeergebiet auch als Bauholz sowie als Zellstoff- und Papierholz Konstruktionsholz für mittlere Beanspruchung im Innen- und Außenbau

**Tabelle 86: Esche, Eiche und Pappel nach Wagenführ (2007)**

Holzart	Esche ( <i>Fraxinus excelsior</i> L.)	Stiel- bzw. Traubeneiche ( <i>Quercus robur</i> L. / <i>Q. petraea</i> Liebl.)	Pappel ( <i>Populus nigra</i> L.)
<b>Vorkommen</b>	Europa bis Mittelrussland, Vorderasien; bevorzugt frische bis feuchte Böden, aber auch auf felsigem Gelände und trockenen Kalkböden noch gut wachsend; trockene Sande werden gemieden, ebenso stagnierende Nässe; spätfrostempfindlich; in der Ebene und im Bergland wachsend; Mischbaumart; einzel oder horstweise; [...], auch im Freistand an Straßen, in Gärten und Parkanlagen	Europa bis Kleinasien; [...]; <i>Quercus robur</i> L.: schwere Böden mit hohem Grundwasserspiegel, [...]; <i>Q. petraea</i> Liebl.: leichtere, tiefgründige, nährstoffärmere, trockenere und wärmere Böden; [...]; beide Arten überwiegend in Laubholzmischwäldern, auch im Freistand, [...]; häufigstes europäisches Vorkommen in Frankreich; zweitwichtigste europäische Laubholzart	Hauptverbreitung Mittel- und Südeuropa; in sommergrünen Wäldern; häufig in den Auwäldern der Flusstäler, auch im Freistand an Straßen, [...], sonst zerstreut im Mischwald; künst. Anpflanzungen sehr verbreitet. Die angepflanzten Wirtschaftspappeln sind meist keine reinen Arten; bevorzugt lockere, tiefgründige, mineralreiche, lehmige und feuchte Böden, [...]; auch auf Schutthalden
<b>Baumhöhe</b>	17 ... 35 m	20 ... 30 m (40 m)	30 ... 35 m
<b>Stammlänge</b>	8 ... 12 m	12 ... 15 m (20 m)	bis zu 15 m
<b>Stamm-MD</b>	0,4 ... 1,0 m	0,4 ... 1,0 m (1,8 m)	bis zu 1,0 m (2,0 m)
<b>Stammform und Rinde</b>	gerade, zylindrisch, gelegentlich mit Maserknollen; in der Jugend glatt und grünlich grau, im Alter korkig, rhombisch gefurcht, dunkelgrau – schwarzgraubraun	zylindrisch, öfter unschnürrig, krumm; grob-längsrissig, braungrau bis schwarzbraun, dünn bis sehr dick; gerbstoffreich;	zylindrisch, mitunter spannrückig; in der Jugend glatt, aschgrau; im Alter tief und breitlängsrissige Borke, braunschwarz;
<b>Farbe</b>	Splintholz weißlich, breit; Kernholz gelblich bis rötlich weiß, später hellbraun, [...]; auch mit fakultativer Farbkernbildung; Splint- und Kernholzgrenze nicht immer deutlich	Splintholz gelblich weiß, 2–5 cm breit; Kernholz hellbraun bis gelblich braun, nachdunkelnd, im frischen Zustand auch leicht rötlich, vom Standort abhängig	Splintholz weißlich bis gelblich weiß; Kernholz hellbraun bis hellgrünlich braun, in Marknähe schwach rötlich
<b>Makroskopische Strukturmerkmale</b>	Q: Jahringgrenze, Frühholzgefäße und Längsparenchym mit bloßem Auge wahrnehmbar, Spätholzgefäße und Holzstrahlen erst unter der Lupe deutlich R, T: Holzstrahlen auch ohne Lupe erkennbar (R); nadelrissig im Frühholz	Q: Jahringgrenze, Frühholzporen und Holzstrahlen mit bloßem Auge deutlich sichtbar, Längsparenchym erst unter der Lupe R: Holzstrahlen als große Spiegel auffällig; grob-nadelrissig	Q: Jahringgrenze infolge Spätholzverdichtung noch deutlich; Gefäße und Holzstrahlen erst unter der Lupe wahrnehmbar
<b>Verwendung</b>	Furnierholz, insb. Messer- und Schälholz; Ausstattungsholz für Möbel, Vertäfelungen, Parkett; Konstruktionsholz für mittlere Beanspruchungen, vornehmlich im Innenbau; Treppen Spezialholz für Sportgeräte, Turngeräte, Stiele, Griffe, Sprossen, Fässer; im Bootsbau, Apparatebau, Maschinenbau, Fahrzeugbau, Waggonbau und Flugzeugbau; zum Drechseln und Schnitzen; für Biegeformteile	Furnierholz, überwiegend als Messerholz für Deckfurniere; Ausstattungsholz für Möbel, Vertäfelungen und Parkett; im Innenausbau; Konstruktionsholz für mittlere bis hohe Beanspruchung im Hoch-, Tief-, Wasserbau, im Schiff-, Maschinen- und Fahrzeugbau; Spezialholz für Schwellen und Fässer, [...], Türen, Tore, Fenster, Treppen, in der Garten-, Park- und Landschaftsgestaltung	Furnierholz, überwiegend als Schälholz für die Sperrholzproduktion; Konstruktionsholz für geringe bis mittlere Beanspruchung im Innenbau; Blindholz; Spezialholz für Span- und Faserplatten, Papier- und Zellstoffindustrie, [...], Flugzeugbau, Holzwole, Prothesen, Fässer, Kisten, [...], Bleistifte, zum Schnitzen, [...], Mulden, Formen, Formpresserzeugnisse

Tabelle 87: Birke und Buche nach Wagenführ (2007)

Holzart	Birke ( <i>Betula pendula</i> Roth.)	Buche ( <i>Fagus sylvatica</i> L.)
<b>Vorkommen</b>	Europa, Asien bis Japan; Nordgrenze 60°–65° N (Norwegen, Schweden, Finnland, Russland), Südgrenze: nördliches Portugal, Ostpyrenäen, Alpensüdrand, Altserbien, Rhodopengebirge, Steppengebiete Russlands; stellt geringe Ansprüche an Boden und Klima; auf trockenen Böden, in Heidegebieten, auf Dünen und trockenen Mooren, meidet stagnierende Nässe; [...] In den südeuropäischen Gebirgen nur eine Gebirgsholzart; in Finnland und Russland von hoher forstlicher Bedeutung, reine Bestände bildend; sonst eingesprengt oder gruppenweise, im Freiland an Straßen, Gräben, in Gärten und Parkanlagen	West-, Mittel- und Südeuropa; Nordspanien, Südostengland, Dänemark, Südschweden, Westpolen, in den Gebirgen Rumäniens, der Balkanhalbinsel, Italiens und Korsikas; [...]; im Norden Baum der Ebene, im Süden nur im Gebirge; in Europa 10 % der Gesamtwaldfläche einnehmend, entspricht etwa 17 Mio. ha Buchenwälder; in Deutschland, Frankreich, Schweiz 10–20 % anteilig, auf der Balkanhalbinsel 35–40 %; Schattenbaumart; bevorzugt lockere, mineralreiche und gut mit Wasser versorgte Böden; empfindlich gegenüber niedrigen Temperaturen und Spätfrösten; [...]
<b>Baumhöhe</b>	20 ... 25 m	bis 30 m
<b>Stammlänge</b>	bis zu 15 m	15 ... 20 m
<b>Stamm-MD</b>	0,3 ... 0,8 m	0,3 ... 0,9 ... 1,0 m (1,5 m)
<b>Stammform und Rinde</b>	zylindrisch, gelegentlich Verformungen am Stammfuß, auf ungünstigen Standorten auch krumm; in horizontalen Bändern sich ablösend, weiß, glänzend, am unteren Stammteil tiefrisig, grobborkig, schwärzlich;	zylindrisch, gerade; in der Jugend glatt, dünn, graugrün mit hellem Schimmer, im Alter silbergrau, besonders auf Kalkböden, gelegentlich im unteren Bereich leicht borkig;
<b>Farbe</b>	gelblich weiß, rötlich weiß bis hellbräunlich, im Alter fakultativer dunkelbrauner bis brauner Kern	gelbrötlich bis rötlich braun (wenn gedämpft), Falschkern rot bis rotbraun, wolkig oder zackig abgestuft = fakultativer Farbkern
<b>Makroskopische Strukturmerkmale</b>	Q: Jahringgrenze mehr oder weniger deutlich durch Faserzonen mit verdickten Zellwänden, Gefäße und Holzstrahlen selbst unter der Lupe kaum erkennbar  R, T: fein-nadelrissig	Q: Jahringgrenze durch porenarme Zonen deutlich, ebenso die Holzstrahlen, Gefäße erst unter der Lupe erkennbar  R, T: große Holzstrahlen mit bloßem Auge deutlich sichtbar
<b>Verwendung</b>	Furnierholz; überwiegend als Schälholz für Deck-, Innendeckfurniere und Sperrholz; Ausstattungsholz für Möbel, Vertäfelungen und Parkett; Spezialholz für Stilmöbel, Zellstoff und Papier, Span- und Faserplattenindustrie, Sportgeräte, Flugzeugbau, Kisten, Spulen, Spunde, Holznägel, Stiele, zum Drechseln und Schnitzen; weiterhin für Holzblasinstrumente, Gewehrschäfte, Haushaltgegenstände, Kinderspielzeug, Fassreifen, Schuhteile, Verpackungskisten, Griffe, imprägnierte Schwellen; als Pressvollholz und Presslagenholz	Furnierholz; überwiegend als Schälholz für Sperrplatten, Verbundplatten, Presslagenholz usw.; Ausstattungsholz für Möbel (Büromöbel, Schulmöbel, Stilmöbel, Kinderzimmermöbel u. a. Stühle, Tische, Gestelle), Vertäfelungen und Parkett; Konstruktionsholz für mittlere Beanspruchung im Fahrzeug- und Maschinenbau, im Tief-, Wasser- und Hochbau; Spezialholz für Span- und Faserplatten, Zellstoff und Papier, Pressholz, [...], Holzpflaster, Musikinstrumententeile; [...]; ausgezeichnetes Biegeholz; etwa 250 Verwendungsbereiche sind bekannt, auch mit Rotkernigkeit

## B-2 Mechanische Kenngrößen

**Tabelle 88: Mechanische Kenngrößen von merkmalsfreien Probekörpern – Fokus auf die Steifigkeiten**

Holzart	Quelle	Rohdichte W: $\rho_{12...15}$ S: $\rho_{15}$ ; Ö: $\rho_{12}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Faserlänge <i>l</i> [ $\mu$ m]	E-Modul			Schubmodul			
				$E_0$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E_{90,r}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E_{90,t}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$G_{lr}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$G_{lt}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$G_{rt}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	
Fichte ( <i>Picea abies</i> Karst.)	Sell (1989)	430–470	–	10.000–12.000	–	–	–	–	–	–
	Wagenführ (2007)	330–470–680	1.300–2.800– 4.800	7.300–11.000–21.400	–	–	–	–	–	–
	ÖNORM B 3012 (2003)	330–441–680	–	12.500	800	450	600	650	50	–
Pappel ( <i>Populus</i> <i>Nigra</i> L.)	Sell (1989)	430–490	–	8.100–9.600	–	–	–	–	–	–
	Wagenführ (2007)	410–450–560	300–1.300– 2.100	4.000–8.800–11.700	–	–	–	–	–	–
	ÖNORM B 3012 (2003)	410–441–560	–	8.800	–	–	–	–	–	–
Birke ( <i>Betula</i> <i>Pendula</i> <i>Roth.</i> )	Sell (1989)	650–730	–	13.300–16.200	–	–	–	–	–	–
	Wagenführ (2007)	510–650–830	340–1000– 1..700	14.500–16.500	620–800– 1.190*	620–800– 1.190*	–	–	–	–
	ÖNORM B 3012 (2003)	510–673–830	–	16.500	–	–	–	–	–	–
Buche ( <i>Fagus</i> <i>sylvatica</i> L.)	Sell (1989)	700–790	–	12.300–16.400	–	–	–	–	–	–
	Wagenführ (2007)	540–720–910	600– 1.300	10.000–16.000–18.000	–	–	–	–	–	–
	ÖNORM B 3012 (2003)	540–712–910	–	16.000	2.280	1.160	1.640	1.080	–	–
Edelkastanie ( <i>Castanea</i> <i>sativa</i> Mill.)	Sell (1989)	560–680	–	8.200–8.800	–	–	–	–	–	–
	Wagenführ (2007)	590–620–680	600–1.220– 1.570	6.400–9.000	–	–	–	–	–	–
	ÖNORM B 3012 (2003)	563	–	9.000	–	–	–	–	–	–
Esche ( <i>Fraxinus</i> <i>excelsior</i> L.)	Sell (1989)	680–760	–	11.900–13.900	–	–	–	–	–	–
	Wagenführ (2007)	450–720–860	150–1.600	4.400–13.400–18.100	–	–	–	–	–	–
	ÖNORM B 3012 (2003)	450–702–860	–	13.400	1.500	820	880	620	–	–
Eiche ( <i>Quercus</i> <i>robur</i> L.)	Sell (1989)	650–760	–	10.500–14.500	–	–	–	–	–	–
	Wagenführ (2007)	430–690–960	1.230–1.530– 1.740	10.000–11.700–13.200	–	–	–	–	–	–
	ÖNORM B 3012 (2003)	430–702–960	–	13.000	1.000	–	1.150	800	–	–

\* keine Angabe ob radial oder tangential;

**Tabelle 89: Mechanische Kenngrößen von merkmalsfreien Probekörpern – Fokus auf die Festigkeiten**

Holzart	Quelle	Zugfestigkeit $f_{t,0}$ $f_{t,90}$ [N/mm <sup>2</sup> ]		Druckfestigkeit $f_{c,0}$ $f_{c,90}$ [N/mm <sup>2</sup> ]		Biege- festigkeit $f_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Schub- festigkeit $f_v$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Rollschub- festigkeit* $f_r$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Schlag- zähigkeit $a$ [J/cm <sup>2</sup> ]	Brinellhärte $HB_0$ $HB_{90}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	
Fichte ( <i>Picea abies</i> Karst.)	Sell (1989)	80-90	-	40-50	-	65-77	5-7,5		4-5	31	12
	Wagenführ (2007)	21-90-245	1,5-2,7-4	33-50-79	-	49-78-136	4-6,7-12	1,4-1,9-2,3	1-4,6-11	32	12
	ÖNORM B 3012 (2003)	77	2,7	44	5,8	95	6,7		4,6-5	32	12
Pappel ( <i>Populus</i> <i>Nigra</i> L.)	Sell (1989)	69-76	-	29-7	-	54-76	5-7		3,8-4,9	25-33	10-15
	Wagenführ (2007)	43-77-110	1,7-2,8	26-35-56	-	43-60-94	4-5-8	2,5-2,9-3,2	3-5-7	24-37	10-15
	ÖNORM B 3012 (2003)	77	1,7-2,8	30-35	-	60	5		5	30	10
Birke ( <i>Betula</i> <i>Pendula</i> <i>Roth.</i> )	Sell (1989)	130-140	-	42-60	-	120-144	11,8-14,2		7,5-10	48	22-35
	Wagenführ (2007)	35-137-270	7	38-51-100	-	76-147-155	12-14,5	2,9-3,5-4,1	4,5-10-13	48	22-49
	ÖNORM B 3012 (2003)	137	7	51	-	147	12		8,5-10	49	23
Buche ( <i>Fagus</i> <i>sylvatica</i> L.)	Sell (1989)	100-135	-	52-64	-	90-125	7,7-10		8-12	71	28-41
	Wagenführ (2007)	57-135-180	7-10,7	41-62-99	-	74-123-210	6,5-8-19	4,6-5,4-6,1	3-10-19	72	34
	ÖNORM B 3012 (2003)	135	7	62	9,5	123	8		10	72	34
Edelkastanie ( <i>Castanea</i> <i>sativa</i> Mill.)	Sell (1989)	115-142	-	40-52	-	63-79	-		5,5-5,9	32-37	15-23
	Wagenführ (2007)	115-142	-	40-52-57	-	64-77-91	8-9,5	-	5,5-5,9	27-38-47	15-23
	ÖNORM B 3012 (2003)	135	-	49	-	80	8,7		5,5-5,9	35	18
Esche ( <i>Fraxinus</i> <i>excelsior</i> L.)	Sell (1989)	130-160	-	43-59	-	100-127	12-13,4		6,7-8,8	64	30-46
	Wagenführ (2007)	70-165-293	7-11,2	23-52-80	-	58-105-210	9-12-14,6	4,5-5,6-6,4	1-6,8-8	35-65-100	37-41
	ÖNORM B 3012 (2003)	165	7	52	11	120	13		6,8	65	38
Eiche ( <i>Quercus</i> <i>robur</i> L.)	Sell (1989)	88-110	-	52-64	-	86-108	9,3-11,5		5-7,4	50-65	25-42
	Wagenführ (2007)	50-90-180	2,6-4-9,6	54-61-67	-	74-88-105	6-11-13		1-6-16	50-66	25-34
	ÖNORM B 3012 (2003)	90	4	61	11	88	11		6-7,5	66	34

\* sämtliche Rollschubwerte stammen aus der Arbeit von Ehrhart (2014)



# ANHANG C PRÜFAUSWERTUNG

## C-1 Ausgeschlossene Prüfdaten

Die in den Tabellen 90 und 91 angeführten Daten der Serien 1–3 wurden im Rahmen der Detektion von Ausreißern als solche identifiziert (Vorgehensweise siehe Kapitel 3-3.2). Dabei erfolgte entweder eine Elimination von einzelnen Kenngrößen oder auch der Ausschluss des ganzen Prüfkörpers für die Auswertung.

**Tabelle 90: Serie 1 & 2: ausgeschlossene Prüfdaten**

Prüfkörperbezeichnung	ausgeschlossene Kenngröße(n)	Grund der Elimination
FI-A02-0-01-P1	$f_{ax}$	zu hoher Wert im Vergleich zu den restlichen Prüfkörpern
FI-A04-0-08-P1	gesamt	generell zu hohe Rohdichte für diese Gruppe
FI-C01-0-03-P1	Modellparameter	$\Delta w_{lin}$ war 0; Verfälschung der Statistik aufgrund LND
FI-C06-0-06-RF	$f_{ax}$	Rissbildung zum Rand hin während Ausziehvorgang
KA01-0-11-P1	Modellparameter	$\Delta w_{lin}$ war 0; Verfälschung der Statistik aufgrund LND
PA02-0-12-P1	gesamt	generell zu hohe Rohdichte für diese Gruppe
BB16-0-02-P1	$K_{ser}$	zu geringer Wert im Vergleich zu den restlichen Prüfkörpern
BU05-15-RF	gesamt	generell alle Werte zu gering für diese Gruppe
BU32-15-01-RF	gesamt	generell alle Werte zu gering für diese Gruppe
BU32-15-02-P1	gesamt	generell alle Werte zu gering für diese Gruppe
BB39-15-01-P1	$K_{ser}$	zu geringer Wert aufgrund von schiefer Schraube
BB39-15-02-RF	$K_{ser}$	zu geringer Wert aufgrund von schiefer Schraube
BU02-30-RF	$f_{ax}$ & $K_{ser}$	zu geringer Wert im Vergleich zu den restlichen Prüfkörpern
BU05-30-P1	gesamt	generell alle Werte zu gering für diese Gruppe
BU32-30-01-P1	gesamt	generell alle Werte zu gering für diese Gruppe
BU32-30-02-RF	gesamt	generell alle Werte zu gering für diese Gruppe
ES01-45-08-RF	$f_{ax}$	zu geringer Wert im Vergleich zu den restlichen Prüfkörpern
EI02-45-02-P1	$f_{ax}$	zu hoher Wert im Vergleich zu den restlichen Prüfkörpern
PA03-45-04-P1	Modellparameter	$\Delta w_{lin}$ war 0; Verfälschung der Statistik aufgrund LND
PA07-45-04-P1	Modellparameter	$\Delta w_{lin}$ war 0; Verfälschung der Statistik aufgrund LND
PA07-45-06-P1	Modellparameter	$\Delta w_{lin}$ war 0; Verfälschung der Statistik aufgrund LND
BU05-45-RF	gesamt	generell alle Werte zu gering für diese Gruppe
BU32-45-01-RF	gesamt	generell alle Werte zu gering für diese Gruppe
BU32-45-02-P1	gesamt	generell alle Werte zu gering für diese Gruppe
BB39-45-01-P1	$M_{max}$	zu hoher Wert im Vergleich zu den restlichen Prüfkörpern
FI-A03-90-01-RF	gesamt	generell zu hohe Rohdichte für diese Gruppe
FI-B03-90-02-P1	$f_{ax}$ & $K_{ser}$	zu hohe Werte im Vergleich zu den restlichen Prüfkörpern
FI-B03-90-01-RF	$f_{ax}$ & $K_{ser}$	zu hohe Werte im Vergleich zu den restlichen Prüfkörpern
FI-C06-90-11-P1	gesamt	Riss bereits vor Eindrehvorgang vorhanden
KA01-90-23-RF	gesamt	zu hohe Werte im Vergleich zu den restlichen Prüfkörpern

ES23-90-11-RF	gesamt	zu hohe Werte im Vergleich zu den restlichen Prüfkörpern ( $\rho$ )
ES23-90-12-P1	gesamt	zu hohe Werte im Vergleich zu den restlichen Prüfkörpern ( $\rho$ )
PA06-90-13-P1	$K_{ser}$	zu hoher Wert im Vergleich zu den restlichen Prüfkörpern
BI03-90-15-RF	gesamt	generell alle Werte zu gering für diese Gruppe
BI03-90-16-P1	gesamt	generell alle Werte zu gering für diese Gruppe
BU06-90-02-P1	$K_{ser}$	zu geringer Wert im Vergleich zu den restlichen Prüfkörpern
BB10-90-01-RF	gesamt	größere Einschraubtiefe & keine Ausziehdaten vorhanden

Tabelle 91: Serie 3: ausgeschlossene Prüfdaten

Prüfkörperbezeichnung	ausgeschlossene Kenngröße(n)	Grund
BU18-0-55-01-RF	$f_{ax}$	zu hoher Wert im Vergleich zu den restlichen Prüfkörpern ( $\rho$ )
BU20-0-55-01-RF	gesamt	generell zu hohe Rohdichte für diese Gruppe
BU20-0-55-02-P1	gesamt	generell zu hohe Rohdichte für diese Gruppe
BB07-0-55-01-P1	gesamt	zu hohe Werte im Vergleich zu den restlichen Prüfkörpern
BB11-0-55-01-P1	gesamt	zu hohe Werte im Vergleich zu den restlichen Prüfkörpern
BU18-0-60-01-P1	$f_{ax}$	zu hoher Wert im Vergleich zu den restlichen Prüfkörpern ( $\rho$ )
BU20-0-60-01-P1	gesamt	generell zu hohe Rohdichte für diese Gruppe
BU20-0-60-02-RF	gesamt	generell zu hohe Rohdichte für diese Gruppe
BB19-0-60-02-P1	gesamt	zu hohe Werte im Vergleich zu den restlichen Prüfkörpern ( $\rho$ )
BU05-0-65-02-RF	gesamt	generell zu geringe Rohdichte für diese Gruppe
BU12-0-65-02-P1	$K_{ser}$	zu hoher Wert im Vergleich zu den restlichen Prüfkörpern
BU20-0-65-01-RF	gesamt	generell zu hohe Rohdichte für diese Gruppe
BU20-0-65-02-P1	gesamt	generell zu hohe Rohdichte für diese Gruppe
BU18-0-70-02-RF	$f_{ax}$	zu geringer Wert im Vergleich zu den restlichen Prüfk. ( $\rho$ )
BU20-0-70-01-P1	gesamt	generell zu hohe Rohdichte für diese Gruppe
BU20-0-70-02-RF	gesamt	generell zu hohe Rohdichte für diese Gruppe
BB01-0-70-02-P1	gesamt	zu geringe Werte im Vergleich zu den restlichen Prüfk. ( $\rho$ )
BU20-90-55-01-P1	gesamt	generell zu hohe Rohdichte für diese Gruppe
BU18-90-60-02-P1	$f_{ax}$	zu hoher Wert im Vergleich zu den restlichen Prüfkörpern
BU20-90-60-01-RF	gesamt	generell zu hohe Rohdichte für diese Gruppe
BU20-90-65-01-P1	gesamt	generell zu hohe Rohdichte für diese Gruppe
BU20-90-65-02-RF	gesamt	generell zu hohe Rohdichte für diese Gruppe
BU20-90-70-01-RF	gesamt	generell zu hohe Rohdichte für diese Gruppe
BU20-90-70-02-P1	gesamt	generell zu hohe Rohdichte für diese Gruppe

Die in der Tabelle 92 angeführten Daten der Serie 4 wurden ebenfalls im Rahmen der Detektion von Ausreißern als solche identifiziert (Vorgehensweise siehe Kapitel 3-3.2). Im Vordergrund steht dabei eine mögliche Abweichung hinsichtlich der in der Mitte der beiden Prüfkörperhälften eingebrachten Holzbauschraube. Dabei erfolgte für alle Prüfkörper der komplette Ausschluss von der nachfolgenden Auswertung.

**Tabelle 92: Serie 4: ausgeschlossene Prüfdaten**

Prüfkörperbezeichnung	Art der Prüfung	Grund
BU20-0-01-RF	KZ	Ast im Bereich des Schraubenkanals
BU20-0-02-P1	KZ	Ast im Bereich des Schraubenkanals
BU22-0-01-RF	KZ	Schraube sehr einseitig eingedreht
BB11-0-02-P1	KZ	eine Prüfkörperhälfte radial aufgespaltet
BB12-0-02-P1	KZ	eine Prüfkörperhälfte radial aufgespaltet
BB13-0-01-RF	KZ	eine Prüfkörperhälfte radial aufgespaltet
BB14-0-02-P1	KZ	eine Prüfkörperhälfte radial aufgespaltet
BB15-0-01-RF	KZ	Schraube sehr einseitig eingedreht
BB16-0-02-P1	KZ	Schraube sehr einseitig eingedreht
BB20-0-01-RF	KZ	Schraube sehr einseitig eingedreht
BB20-0-02-P1	KZ	eine Prüfkörperhälfte radial aufgespaltet
BB21-0-01-RF	KZ	Schraube sehr einseitig eingedreht
BB22-0-02-P1	KZ	Schraube sehr einseitig eingedreht
BU08-90R-01-RF	KZ	Schraube sehr einseitig eingedreht
BU03-0-01-P1	LZ	Schraube sehr einseitig eingedreht
BU05-0-01-P1	LZ	Schraube sehr einseitig eingedreht
BU09-0-01-P1	LZ	Schraube sehr einseitig eingedreht
BB01-0-01-P1	LZ – V2*	Schraube sehr einseitig eingedreht
BB02-0-01-RF	LZ – V2*	Schraube sehr einseitig eingedreht
BB08-0-01-RF	LZ – V2*	Schraube sehr einseitig eingedreht
BU01-90R-01-P1	LZ	Schraube sehr einseitig eingedreht

\* V2 steht für die Bezeichnung der Serie, da für die Prüfungen der BauBuche mit einem Achs-Faserwinkel von 0° zwei Versuchsserien (V1 & V2) durchgeführt wurden; V1 findet in dieser Arbeit allerdings keine weitere Betrachtung;

## C-2 Unerwartete Versagensfälle

Für die Prüfserien 1, 2 und 3 wurde in jenen Fällen, in denen es zu einem unerwarteten Versagen kam eine rechts-zensierten Datenanalyse mittels MLE durchgeführt (siehe Tabelle 93). Dies trat allerdings lediglich einige Male bei den Aufspaltungen der Prüfkörper während des Applikationsvorganges auf. Die damit verbundene Anpassung der Streuung und des Mittelwertes wurde aus diesem Grund lediglich für die maximalen Eindrehmomente durchgeführt. Für die Prüfserie 3 kam es aufgrund der Vorbohrungen zu keinen Aufspaltungen im Rahmen der Eindrehprüfungen.

**Tabelle 93: Serie 1 & 2: Datensätze mit Aufspaltung bei der Applikation der Schraube**

Prüfserienbezeichnung	Anzahl
FI-Cxx-0-xx-P1	1
KAxX-0-xx-P1	1
EIxx-0-xx-RF	10
EIxx-0-xx-P1	20
BBxx-0-xx-P1	8
BUxx-15-xx-P1	1
BBxx-15-xx-RF	4
BBxx-15-xx-P1	10
BBxx-30-xx-P1	1
EIxx-45-xx-P1*	2
FI-Bxx-90-xx-P1	1
FI-Cxx-90-xx-P1	3
EIxx-90-xx-P1	4
EIxx-90-xx-RF	1
BBxx-90-xx-P1	1

\* zusätzlich zwei Proben aufgespalten beim Ausziehen, welche allerdings bereits zuvor extreme Risse zeigten; es erfolgte keine MLerc für das maximale Eindrehmoment allerdings eine Ausscheidung bei der Auswertung der Ausziehfestigkeit (auch bei RF 1x der Fall)

Für die in Tabelle 94 dargestellten Daten der Serie 4 kam es zu Schraubenstahlbrüchen im Rahmen der Ausziehprüfungen. Aus den in Kapitel 4-5.3 angeführten Gründen, wird dafür allerdings keine rechts-zensierte Datenanalyse durchgeführt. Die Schraubenstahlbrüche treten dabei ausschließlich in den Kurzzeit (KZ) geprüften Prüfkörpern auf, da nur für diese auch Ausziehprüfung durchgeführt wurden.

**Tabelle 94: Serie 4: Datensätze mit besonderen Versagensfällen**

Prüfserienbezeichnung	Anzahl	Grund
BBxx-0-xx-RF	4	Abbruch der Ausziehprüfung bei 25 kN
BUxx-90R-xx-RF	5	Schraubenstahlbruch
BUxx-90R-xx-P1	2	Schraubenstahlbruch
BUxx-90T-xx-RF	4	Schraubenstahlbruch
BUxx-90T-xx-P1	1	Schraubenstahlbruch
BBxx-90R-xx-RF	10	Schraubenstahlbruch
BBxx-90T-xx-RF	10	Schraubenstahlbruch
BBxx-90T-xx-P1	8	Schraubenstahlbruch

## C-3 Potenzfaktoren für die Holzarten

Die in der nachfolgenden Tabelle 95 angegebenen Potenzfaktoren resultieren aus Regressionen mit den ermittelten Prüfdaten. Dabei wird für jede Holzart bei unterschiedlichen Achs-Faserwinkeln der Potenzfaktor für die Rohdichte bzw. das maximale Eindrehmoment angegeben.

**Tabelle 95: Potenzfaktoren für die einzelnen Holzarten**

Holzart	$\alpha$	$M_{\max}$ vs. $\rho_{12}$			$f_{ax}$ vs. $\rho_{12}$			$K_{ser}$ vs. $\rho_{12}$			$f_{ax}$ vs. $M_{\max}$		
		RF	P1	RF & P1	RF	P1	RF & P1	RF	P1	RF & P1	RF	P1	RF & P1
Fichte A, B, C	0°	1,63	1,60	1,61	1,04	1,13	1,09	1,24	1,06	1,13	0,76	0,81	0,78
	90°	1,81	1,72	1,74	1,24	1,31	1,27	1,40	1,64	1,48	0,63	0,76	0,67
Edel- kastanie	0°	0,80	1,28	0,93	-0,71	-0,66	-0,58	0,63	0,35	0,14	0,90	0,17	0,37
	45°	1,63	1,35	1,39	0,95	1,44	1,23	0,66	1,13	0,79	0,47	0,81	0,57
	90°	0,73	1,13	0,95	0,75	0,92	0,83	0,60	0,67	0,67	0,65	0,55	0,47
Esche	0°	1,37	1,75	1,72	2,39	2,33	2,35	0,57	1,26	1,05	0,87	1,05	0,68
	45°	1,72	1,43	1,56	0,80	1,92	1,29	0,71	0,95	0,74	0,46	0,56	0,42
	90°	1,10	1,37	1,08	2,13	2,27	2,09	1,61	2,44	1,70	0,78	0,80	0,64
Eiche	0°	2,94	–	2,94	0,85	–	1,01	1,14	–	0,71	0,35	–	0,38
	45°	1,61	1,32	1,37	1,31	0,54	1,07	0,84	0,89	0,67	0,74	0,41	0,51
	90°	1,05	0,81	0,62	1,43	1,69	1,40	1,09	2,67	0,62	0,60	0,30	0,31
Pappel	0°	0,87	1,40	0,97	1,68	0,85	1,40	0,40	-0,95	-0,34	1,20	0,69	0,42
	45°	1,70	1,39	1,55	1,33	1,08	1,22	0,91	0,98	0,97	0,65	0,58	0,40
	90°	1,64	1,79	1,70	1,02	1,05	1,02	0,54	0,31	0,35	0,45	0,52	0,46
Birke	0°	2,05	1,77	1,90	1,97	2,24	2,19	1,75	1,93	1,95	0,82	0,98	0,97
	45°	1,96	1,70	1,82	1,90	1,87	1,89	1,80	1,37	1,56	0,94	1,10	0,99
	90°	1,78	1,42	1,59	1,75	1,54	1,65	1,23	0,81	1,00	0,92	1,10	0,90
Buche	0°	1,95	1,90	1,93	1,90	1,87	1,88	–	-0,32	-0,32	0,89	0,85	0,64
	45°	0,95	1,73	1,55	1,14	1,47	1,36	1,20	1,05	1,29	0,48	0,73	0,51
	90°	1,97	2,01	2,05	1,82	1,60	1,69	–	1,22	1,22	0,86	0,75	0,65

## C-4 Korrelationsmatrizen der Holzarten

Nachfolgend sind alle Korrelationsmatrizen, welche zur Auswertung der Serie 1 herangezogen werden, dargestellt. Zusätzlich sind jeweils der Mittelwert, der Variationskoeffizient und die Anzahl der verwendeten Modelle angeführt. Diese werden für die logarithmierten Daten berechnet und anschließend in den linearen Raum zurücktransformiert. Dabei wurden, wie in Kapitel 4-2.5 angeführt, jene Prüfkörper, bei denen eine plastische Verformung der Schraube auftritt, ausgeschlossen. Für die folgenden Untergruppen der Serie 1 stehen, aus den angeführten Gründen, keine Daten zur Erstellung der Korrelationsmatrizen zur Verfügung:

- Eiche mit  $\alpha = 0^\circ$  und P1 (nur 1 Datensatz übrig – keine Korrelation ermittelbar)
- Buche mit  $\alpha = 0^\circ$  und RF (keine Wege ermittelt)
- Buche mit  $\alpha = 45^\circ$  und RF (Einfluss plastischen Schraubenverformung für gesamte Gruppe)
- Esche mit  $\alpha = 45^\circ$  und RF (Einfluss plastischen Schraubenverformung für gesamte Gruppe)
- Eiche mit  $\alpha = 45^\circ$  und RF (Einfluss plastischen Schraubenverformung für gesamte Gruppe)
- Buche mit  $\alpha = 90^\circ$  und RF (keine Wege ermittelt)

Anmerkung: Für die gemittelten Korrelationsmatrizen in Kapitel 4-2.5 wurden nur jene der nachfolgenden Matrizen berücksichtigt, für welche mehr als fünf vollständigen Datensätze als Basis dienen.

**Tabelle 96: Einheiten für die statistischen Kenndaten der nachfolgenden Tabellen**

[–]	$\rho_{12}$	$F_{\max}$	$\Delta w_f$	$K_{\text{ser}}$	$\Delta w_{\text{lin}}$	$c$
mean[X]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[N]	[mm]	[N/mm]	[mm]	[–]
COV[X]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]

### Nadelhölzer

**Tabelle 97: Korrelationskoeffizienten und Statistik der Modellparameter für die Fichte-A, 0° und RF**

FI-Axx-0-xx-RF	$\ln(\rho_{12})$	$\ln(F_{\max})$	$\ln(\Delta w_f)$	$\ln(K_{\text{ser}})$	$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	$\ln(c)$
$\ln(\rho_{12})$	1,00	-0,26	-0,26	-0,13	-0,30	-0,14
$\ln(F_{\max})$	–	1,00	0,50	0,92	0,28	0,50
$\ln(\Delta w_f)$	–	–	1,00	0,28	0,30	0,61
$\ln(K_{\text{ser}})$	–	–	–	1,00	0,26	0,48
$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	–	–	–	–	1,00	0,68
$\ln(c)$	–	–	–	–	–	1,00
21#	$\rho_{12}$	$F_{\max}$	$\Delta w_f$	$K_{\text{ser}}$	$\Delta w_{\text{lin}}$	$c$
mean[X]	358	6.193	0,64	17.805	0,18	3,25
COV[X]	4,1	17,1	13,4	14,5	17,5	38,4

**Tabelle 98: Korrelationskoeffizienten und Statistik der Modellparameter für die Fichte-A, 0° und P1**

FI-Axx-0-xx-P1	$\ln(\rho_{12})$	$\ln(F_{\max})$	$\ln(\Delta w_f)$	$\ln(K_{\text{ser}})$	$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	$\ln(c)$
$\ln(\rho_{12})$	1,00	-0,43	0,01	-0,34	0,40	0,12
$\ln(F_{\max})$	–	1,00	0,08	0,87	-0,17	0,60
$\ln(\Delta w_f)$	–	–	1,00	-0,18	-0,08	0,49
$\ln(K_{\text{ser}})$	–	–	–	1,00	-0,09	0,46
$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	–	–	–	–	1,00	0,25
$\ln(c)$	–	–	–	–	–	1,00
20#	$\rho_{12}$	$F_{\max}$	$\Delta w_f$	$K_{\text{ser}}$	$\Delta w_{\text{lin}}$	$c$
mean[X]	360	5.455	0,54	22.573	0,11	2,33
COV[X]	3,2	18,9	12,6	20,1	62,8	36,1



Tabelle 99: Korrelationskoeffizienten und Statistik der Modellparameter für die Fichte-B, 0° und RF

FI-Bxx-0-xx-RF	$\ln(\rho_{12})$	$\ln(F_{\max})$	$\ln(\Delta w_f)$	$\ln(K_{\text{ser}})$	$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	$\ln(c)$
$\ln(\rho_{12})$	1,00	0,52	0,20	0,52	-0,15	0,14
$\ln(F_{\max})$	–	1,00	-0,06	0,81	-0,14	-0,04
$\ln(\Delta w_f)$	–	–	1,00	-0,26	-0,02	0,46
$\ln(K_{\text{ser}})$	–	–	–	1,00	-0,38	-0,06
$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	–	–	–	–	1,00	0,46
$\ln(c)$	–	–	–	–	–	1,00
22#	$\rho_{12}$	$F_{\max}$	$\Delta w_f$	$K_{\text{ser}}$	$\Delta w_{\text{lin}}$	$c$
mean[X]	443	5.593	0,51	18.298	0,16	2,96
COV[X]	2,5	18,9	10,6	16,8	25,8	39,4

Tabelle 100: Korrelationskoeffizienten und Statistik der Modellparameter für die Fichte-B, 0° und P1

FI-Bxx-0-xx-P1	$\ln(\rho_{12})$	$\ln(F_{\max})$	$\ln(\Delta w_f)$	$\ln(K_{\text{ser}})$	$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	$\ln(c)$
$\ln(\rho_{12})$	1,00	0,52	-0,13	0,50	-0,10	-0,06
$\ln(F_{\max})$	–	1,00	-0,34	0,85	0,10	-0,05
$\ln(\Delta w_f)$	–	–	1,00	-0,61	-0,41	0,38
$\ln(K_{\text{ser}})$	–	–	–	1,00	0,14	-0,16
$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	–	–	–	–	1,00	0,10
$\ln(c)$	–	–	–	–	–	1,00
22#	$\rho_{12}$	$F_{\max}$	$\Delta w_f$	$K_{\text{ser}}$	$\Delta w_{\text{lin}}$	$c$
mean[X]	445	4.973	0,47	21.335	0,12	1,95
COV[X]	2,6	11,8	23,5	17,8	53,4	31,7

Tabelle 101: Korrelationskoeffizienten und Statistik der Modellparameter für die Fichte-C, 0° und RF

FI-Cxx-0-xx-RF	$\ln(\rho_{12})$	$\ln(F_{\max})$	$\ln(\Delta w_f)$	$\ln(K_{\text{ser}})$	$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	$\ln(c)$
$\ln(\rho_{12})$	1,00	0,84	0,36	0,86	-0,56	0,61
$\ln(F_{\max})$	–	1,00	0,65	0,87	-0,49	0,76
$\ln(\Delta w_f)$	–	–	1,00	0,26	-0,42	0,58
$\ln(K_{\text{ser}})$	–	–	–	1,00	-0,52	0,61
$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	–	–	–	–	1,00	-0,33
$\ln(c)$	–	–	–	–	–	1,00
22#	$\rho_{12}$	$F_{\max}$	$\Delta w_f$	$K_{\text{ser}}$	$\Delta w_{\text{lin}}$	$c$
mean[X]	542	8.321	0,51	26.685	0,14	3,48
COV[X]	6,7	25,0	19,4	21,6	48,1	42,2

Tabelle 102: Korrelationskoeffizienten und Statistik der Modellparameter für die Fichte-C, 0° und P1

FI-Cxx-0-xx-P1	$\ln(\rho_{12})$	$\ln(F_{\max})$	$\ln(\Delta w_f)$	$\ln(K_{\text{ser}})$	$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	$\ln(c)$
$\ln(\rho_{12})$	1,00	0,84	0,34	0,75	-0,59	0,52
$\ln(F_{\max})$	–	1,00	0,48	0,82	-0,52	0,48
$\ln(\Delta w_f)$	–	–	1,00	0,03	-0,13	0,54
$\ln(K_{\text{ser}})$	–	–	–	1,00	-0,65	0,26
$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	–	–	–	–	1,00	-0,44
$\ln(c)$	–	–	–	–	–	1,00
20#	$\rho_{12}$	$F_{\max}$	$\Delta w_f$	$K_{\text{ser}}$	$\Delta w_{\text{lin}}$	$c$
mean[X]	536	7.200	0,42	30.973	0,11	2,40
COV[X]	6,7	25,0	19,5	23,0	46,0	43,4

**Tabelle 103: Korrelationskoeffizienten und Statistik der Modellparameter für die Fichte-A, 90° und RF**

FI-AXX-90-XX-RF	$\ln(\rho_{12})$	$\ln(F_{\max})$	$\ln(\Delta w_f)$	$\ln(K_{\text{ser}})$	$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	$\ln(c)$
$\ln(\rho_{12})$	1,00	0,58	0,01	0,32	-0,21	-0,34
$\ln(F_{\max})$	–	1,00	-0,03	0,67	-0,32	-0,51
$\ln(\Delta w_f)$	–	–	1,00	-0,59	0,15	0,16
$\ln(K_{\text{ser}})$	–	–	–	1,00	-0,24	-0,23
$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	–	–	–	–	1,00	0,72
$\ln(c)$	–	–	–	–	–	1,00
<b>21#</b>	<b><math>\rho_{12}</math></b>	<b><math>F_{\max}</math></b>	<b><math>\Delta w_f</math></b>	<b><math>K_{\text{ser}}</math></b>	<b><math>\Delta w_{\text{lin}}</math></b>	<b><math>c</math></b>
mean[X]	373	6.346	1,24	11.252	0,27	2,99
COV[X]	5,2	6,4	13,7	12,3	64,0	43,3

**Tabelle 104: Korrelationskoeffizienten und Statistik der Modellparameter für die Fichte-A, 90° und P1**

FI-AXX-90-XX-P1	$\ln(\rho_{12})$	$\ln(F_{\max})$	$\ln(\Delta w_f)$	$\ln(K_{\text{ser}})$	$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	$\ln(c)$
$\ln(\rho_{12})$	1,00	0,41	0,12	0,33	-0,14	-0,27
$\ln(F_{\max})$	–	1,00	-0,24	0,83	-0,48	-0,23
$\ln(\Delta w_f)$	–	–	1,00	-0,44	0,06	0,23
$\ln(K_{\text{ser}})$	–	–	–	1,00	-0,49	-0,28
$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	–	–	–	–	1,00	0,74
$\ln(c)$	–	–	–	–	–	1,00
<b>22#</b>	<b><math>\rho_{12}</math></b>	<b><math>F_{\max}</math></b>	<b><math>\Delta w_f</math></b>	<b><math>K_{\text{ser}}</math></b>	<b><math>\Delta w_{\text{lin}}</math></b>	<b><math>c</math></b>
mean[X]	369	6.413	1,18	13.135	0,13	2,05
COV[X]	5,7	8,2	9,8	14,1	92,6	29,0

**Tabelle 105: Korrelationskoeffizienten und Statistik der Modellparameter für die Fichte-B, 90° und RF**

FI-BXX-90-XX-RF	$\ln(\rho_{12})$	$\ln(F_{\max})$	$\ln(\Delta w_f)$	$\ln(K_{\text{ser}})$	$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	$\ln(c)$
$\ln(\rho_{12})$	1,00	0,75	0,28	0,56	0,22	-0,13
$\ln(F_{\max})$	–	1,00	0,28	0,75	0,54	0,26
$\ln(\Delta w_f)$	–	–	1,00	-0,04	0,12	0,61
$\ln(K_{\text{ser}})$	–	–	–	1,00	0,22	-0,07
$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	–	–	–	–	1,00	0,59
$\ln(c)$	–	–	–	–	–	1,00
<b>21#</b>	<b><math>\rho_{12}</math></b>	<b><math>F_{\max}</math></b>	<b><math>\Delta w_f</math></b>	<b><math>K_{\text{ser}}</math></b>	<b><math>\Delta w_{\text{lin}}</math></b>	<b><math>c</math></b>
mean[X]	452	7.769	1,29	14.202	0,20	2,39
COV[X]	4,2	7,9	17,3	9,0	57,8	48,0

**Tabelle 106: Korrelationskoeffizienten und Statistik der Modellparameter für die Fichte-B, 90° und P1**

FI-BXX-90-XX-P1	$\ln(\rho_{12})$	$\ln(F_{\max})$	$\ln(\Delta w_f)$	$\ln(K_{\text{ser}})$	$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	$\ln(c)$
$\ln(\rho_{12})$	1,00	0,65	-0,02	0,13	0,14	0,11
$\ln(F_{\max})$	–	1,00	-0,27	0,68	-0,12	-0,01
$\ln(\Delta w_f)$	–	–	1,00	-0,66	0,20	0,48
$\ln(K_{\text{ser}})$	–	–	–	1,00	-0,25	-0,24
$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	–	–	–	–	1,00	0,74
$\ln(c)$	–	–	–	–	–	1,00
<b>20#</b>	<b><math>\rho_{12}</math></b>	<b><math>F_{\max}</math></b>	<b><math>\Delta w_f</math></b>	<b><math>K_{\text{ser}}</math></b>	<b><math>\Delta w_{\text{lin}}</math></b>	<b><math>c</math></b>
mean[X]	450	7.971	1,23	15.984	0,12	2,02
COV[X]	3,4	10,0	16,8	11,9	51,1	36,6

**Tabelle 107: Korrelationskoeffizienten und Statistik der Modellparameter für die Fichte-C, 90° und RF**

FI-C <sub>xx</sub> -90-xx-RF	$\ln(\rho_{12})$	$\ln(F_{\max})$	$\ln(\Delta w_f)$	$\ln(K_{\text{ser}})$	$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	$\ln(c)$
$\ln(\rho_{12})$	1,00	0,90	-0,42	0,82	0,24	0,09
$\ln(F_{\max})$	–	1,00	-0,43	0,91	0,16	0,02
$\ln(\Delta w_f)$	–	–	1,00	-0,60	0,32	0,77
$\ln(K_{\text{ser}})$	–	–	–	1,00	-0,07	-0,16
$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	–	–	–	–	1,00	0,61
$\ln(c)$	–	–	–	–	–	1,00
22#	$\rho_{12}$	$F_{\max}$	$\Delta w_f$	$K_{\text{ser}}$	$\Delta w_{\text{lin}}$	$c$
mean[X]	546	9.851	1,35	18.132	0,21	2,37
COV[X]	7,0	14,7	20,2	22,3	67,0	55,3

**Tabelle 108: Korrelationskoeffizienten und Statistik der Modellparameter für die Fichte-C, 90° und P1**

FI-C <sub>xx</sub> -90-xx-P1	$\ln(\rho_{12})$	$\ln(F_{\max})$	$\ln(\Delta w_f)$	$\ln(K_{\text{ser}})$	$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	$\ln(c)$
$\ln(\rho_{12})$	1,00	0,88	-0,12	0,83	0,17	0,29
$\ln(F_{\max})$	–	1,00	0,04	0,84	-0,07	0,24
$\ln(\Delta w_f)$	–	–	1,00	-0,30	-0,19	0,31
$\ln(K_{\text{ser}})$	–	–	–	1,00	0,04	0,28
$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	–	–	–	–	1,00	0,53
$\ln(c)$	–	–	–	–	–	1,00
19#	$\rho_{12}$	$F_{\max}$	$\Delta w_f$	$K_{\text{ser}}$	$\Delta w_{\text{lin}}$	$c$
mean[X]	544	10.171	1,11	23.447	0,12	1,87
COV[X]	7,0	16,2	15,3	20,7	55,3	25,7

**Ringporige Laubhölzer**
**Tabelle 109: Korrelationskoeffizienten und Statistik der Modellparameter für die Edelkastanie, 0° und RF**

KAxx-0-xx-RF	$\ln(\rho_{12})$	$\ln(F_{\max})$	$\ln(\Delta w_f)$	$\ln(K_{\text{ser}})$	$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	$\ln(c)$
$\ln(\rho_{12})$	1,00	-0,20	-0,41	0,35	-0,33	-0,10
$\ln(F_{\max})$	–	1,00	0,87	0,33	0,22	0,34
$\ln(\Delta w_f)$	–	–	1,00	-0,05	0,31	0,21
$\ln(K_{\text{ser}})$	–	–	–	1,00	-0,55	0,31
$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	–	–	–	–	1,00	-0,34
$\ln(c)$	–	–	–	–	–	1,00
<b>21#</b>	<b><math>\rho_{12}</math></b>	<b><math>F_{\max}</math></b>	<b><math>\Delta w_f</math></b>	<b><math>K_{\text{ser}}</math></b>	<b><math>\Delta w_{\text{lin}}</math></b>	<b><math>c</math></b>
<b>mean[X]</b>	535	8.854	0,43	28.044	0,19	3,27
<b>COV[X]</b>	6,1	22,0	23,6	10,9	24,9	25,6

**Tabelle 110: Korrelationskoeffizienten und Statistik der Modellparameter für die Edelkastanie, 0° und P1**

KAxx-0-xx-P1	$\ln(\rho_{12})$	$\ln(F_{\max})$	$\ln(\Delta w_f)$	$\ln(K_{\text{ser}})$	$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	$\ln(c)$
$\ln(\rho_{12})$	1,00	-0,32	-0,51	0,14	-0,50	0,19
$\ln(F_{\max})$	–	1,00	0,59	0,39	0,43	-0,11
$\ln(\Delta w_f)$	–	–	1,00	-0,42	0,70	-0,49
$\ln(K_{\text{ser}})$	–	–	–	1,00	-0,50	0,21
$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	–	–	–	–	1,00	-0,33
$\ln(c)$	–	–	–	–	–	1,00
<b>19#</b>	<b><math>\rho_{12}</math></b>	<b><math>F_{\max}</math></b>	<b><math>\Delta w_f</math></b>	<b><math>K_{\text{ser}}</math></b>	<b><math>\Delta w_{\text{lin}}</math></b>	<b><math>c</math></b>
<b>mean[X]</b>	523	8.277	0,34	36.610	0,12	2,77
<b>COV[X]</b>	5,2	14,4	15,9	11,1	36,1	38,0

**Tabelle 111: Korrelationskoeffizienten und Statistik der Modellparameter für die Esche, 0° und RF**

ESxx-0-xx-RF	$\ln(\rho_{12})$	$\ln(F_{\max})$	$\ln(\Delta w_f)$	$\ln(K_{\text{ser}})$	$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	$\ln(c)$
$\ln(\rho_{12})$	1,00	0,73	0,69	0,41	0,02	0,57
$\ln(F_{\max})$	–	1,00	0,80	0,38	0,56	0,91
$\ln(\Delta w_f)$	–	–	1,00	0,04	0,17	0,59
$\ln(K_{\text{ser}})$	–	–	–	1,00	-0,12	0,43
$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	–	–	–	–	1,00	0,69
$\ln(c)$	–	–	–	–	–	1,00
<b>7#</b>	<b><math>\rho_{12}</math></b>	<b><math>F_{\max}</math></b>	<b><math>\Delta w_f</math></b>	<b><math>K_{\text{ser}}</math></b>	<b><math>\Delta w_{\text{lin}}</math></b>	<b><math>c</math></b>
<b>mean[X]</b>	640	17.063	0,69	41.359	0,16	8,32
<b>COV[X]</b>	3,1	4,8	4,5	5,4	15,9	54,7

**Tabelle 112: Korrelationskoeffizienten und Statistik der Modellparameter für die Esche, 0° und P1**

ESxx-0-xx-P1	$\ln(\rho_{12})$	$\ln(F_{\max})$	$\ln(\Delta w_f)$	$\ln(K_{\text{ser}})$	$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	$\ln(c)$
$\ln(\rho_{12})$	1,00	0,78	0,63	0,60	0,08	0,45
$\ln(F_{\max})$	–	1,00	0,92	0,58	0,13	0,72
$\ln(\Delta w_f)$	–	–	1,00	0,27	0,28	0,76
$\ln(K_{\text{ser}})$	–	–	–	1,00	-0,33	0,24
$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	–	–	–	–	1,00	0,46
$\ln(c)$	–	–	–	–	–	1,00
<b>20#</b>	<b><math>\rho_{12}</math></b>	<b><math>F_{\max}</math></b>	<b><math>\Delta w_f</math></b>	<b><math>K_{\text{ser}}</math></b>	<b><math>\Delta w_{\text{lin}}</math></b>	<b><math>c</math></b>
<b>mean[X]</b>	655	18.965	0,59	61.279	0,08	4,72
<b>COV[X]</b>	4,8	14,6	14,6	10,0	30,3	31,7

Tabelle 113: Korrelationskoeffizienten und Statistik der Modellparameter für die Eiche, 0° und RF

EIxx-0-xx-RF	$\ln(\rho_{12})$	$\ln(F_{\max})$	$\ln(\Delta w_f)$	$\ln(K_{\text{ser}})$	$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	$\ln(c)$
$\ln(\rho_{12})$	1,00	0,31	0,13	0,54	-0,26	0,20
$\ln(F_{\max})$	–	1,00	0,87	0,26	-0,05	0,29
$\ln(\Delta w_f)$	–	–	1,00	-0,16	0,26	-0,12
$\ln(K_{\text{ser}})$	–	–	–	1,00	-0,85	0,42
$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	–	–	–	–	1,00	-0,16
$\ln(c)$	–	–	–	–	–	1,00
11#	$\rho_{12}$	$F_{\max}$	$\Delta w_f$	$K_{\text{ser}}$	$\Delta w_{\text{lin}}$	$c$
mean[X]	715	11.493	0,40	39.771	0,14	4,42
COV[X]	3,9	10,1	13,4	8,5	32,7	35,6

Tabelle 114: Korrelationskoeffizienten und Statistik der Modellparameter für die Edelkastanie, 45° und RF

KAxx-45-xx-RF	$\ln(\rho_{12})$	$\ln(F_{\max})$	$\ln(\Delta w_f)$	$\ln(K_{\text{ser}})$	$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	$\ln(c)$
$\ln(\rho_{12})$	1,00	0,72	-0,02	0,42	0,33	0,04
$\ln(F_{\max})$	–	1,00	0,20	0,45	0,25	0,13
$\ln(\Delta w_f)$	–	–	1,00	-0,64	0,24	0,05
$\ln(K_{\text{ser}})$	–	–	–	1,00	-0,36	-0,12
$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	–	–	–	–	1,00	-0,02
$\ln(c)$	–	–	–	–	–	1,00
21#	$\rho_{12}$	$F_{\max}$	$\Delta w_f$	$K_{\text{ser}}$	$\Delta w_{\text{lin}}$	$c$
mean[X]	539	12.020	0,67	27.225	0,21	2,70
COV[X]	6,9	9,7	9,3	11,6	46,5	12,4

Tabelle 115: Korrelationskoeffizienten und Statistik der Modellparameter für die Edelkastanie, 45° und P1

KAxx-45-xx-P1	$\ln(\rho_{12})$	$\ln(F_{\max})$	$\ln(\Delta w_f)$	$\ln(K_{\text{ser}})$	$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	$\ln(c)$
$\ln(\rho_{12})$	1,00	0,77	0,19	0,61	0,01	0,13
$\ln(F_{\max})$	–	1,00	0,25	0,67	0,20	0,28
$\ln(\Delta w_f)$	–	–	1,00	-0,46	0,48	0,14
$\ln(K_{\text{ser}})$	–	–	–	1,00	-0,41	0,04
$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	–	–	–	–	1,00	0,10
$\ln(c)$	–	–	–	–	–	1,00
21#	$\rho_{12}$	$F_{\max}$	$\Delta w_f$	$K_{\text{ser}}$	$\Delta w_{\text{lin}}$	$c$
mean[X]	530	11.643	0,59	31.572	0,18	2,28
COV[X]	7,0	14,0	10,1	14,5	22,3	12,2

Tabelle 116: Korrelationskoeffizienten und Statistik der Modellparameter für die Esche, 45° und P1

ESxx-45-xx-P1	$\ln(\rho_{12})$	$\ln(F_{\max})$	$\ln(\Delta w_f)$	$\ln(K_{\text{ser}})$	$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	$\ln(c)$
$\ln(\rho_{12})$	1,00	0,70	0,33	0,45	-0,19	-0,21
$\ln(F_{\max})$	–	1,00	0,68	0,57	-0,15	0,07
$\ln(\Delta w_f)$	–	–	1,00	0,08	-0,05	-0,18
$\ln(K_{\text{ser}})$	–	–	–	1,00	-0,44	-0,08
$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	–	–	–	–	1,00	0,11
$\ln(c)$	–	–	–	–	–	1,00
20#	$\rho_{12}$	$F_{\max}$	$\Delta w_f$	$K_{\text{ser}}$	$\Delta w_{\text{lin}}$	$c$
mean[X]	648	21.254	0,90	44.621	0,12	2,47
COV[X]	4,0	9,9	12,0	10,6	41,2	18,1

**Tabelle 117: Korrelationskoeffizienten und Statistik der Modellparameter für die Eiche, 45° und P1**

Elxx-45-xx-P1	$\ln(\rho_{12})$	$\ln(F_{\max})$	$\ln(\Delta w_f)$	$\ln(K_{\text{ser}})$	$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	$\ln(c)$
$\ln(\rho_{12})$	1,00	0,54	-0,46	0,64	-0,13	0,45
$\ln(F_{\max})$	–	1,00	0,29	0,09	0,24	-0,02
$\ln(\Delta w_f)$	–	–	1,00	-0,67	0,09	-0,46
$\ln(K_{\text{ser}})$	–	–	–	1,00	-0,38	0,32
$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	–	–	–	–	1,00	-0,17
$\ln(c)$	–	–	–	–	–	1,00
<b>16#</b>	<b><math>\rho_{12}</math></b>	<b><math>F_{\max}</math></b>	<b><math>\Delta w_f</math></b>	<b><math>K_{\text{ser}}</math></b>	<b><math>\Delta w_{\text{lin}}</math></b>	<b><math>c</math></b>
mean[X]	737	19.714	0,80	42.520	0,17	2,52
COV[X]	7,1	7,3	13,5	9,3	43,0	11,5

**Tabelle 118: Korrelationskoeffizienten und Statistik der Modellparameter für die Edelkastanie, 90° und RF**

KAxX-90-xx-RF	$\ln(\rho_{12})$	$\ln(F_{\max})$	$\ln(\Delta w_f)$	$\ln(K_{\text{ser}})$	$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	$\ln(c)$
$\ln(\rho_{12})$	1,00	0,67	0,37	0,48	-0,04	-0,12
$\ln(F_{\max})$	–	1,00	0,52	0,81	-0,45	-0,20
$\ln(\Delta w_f)$	–	–	1,00	0,47	-0,40	-0,61
$\ln(K_{\text{ser}})$	–	–	–	1,00	-0,34	-0,36
$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	–	–	–	–	1,00	0,04
$\ln(c)$	–	–	–	–	–	1,00
<b>20#</b>	<b><math>\rho_{12}</math></b>	<b><math>F_{\max}</math></b>	<b><math>\Delta w_f</math></b>	<b><math>K_{\text{ser}}</math></b>	<b><math>\Delta w_{\text{lin}}</math></b>	<b><math>c</math></b>
mean[X]	528	11.375	0,67	27.004	0,19	2,51
COV[X]	6,1	7,0	5,7	8,0	46,7	16,8

**Tabelle 119: Korrelationskoeffizienten und Statistik der Modellparameter für die Edelkastanie, 90° und P1**

KAxX-90-xx-P1	$\ln(\rho_{12})$	$\ln(F_{\max})$	$\ln(\Delta w_f)$	$\ln(K_{\text{ser}})$	$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	$\ln(c)$
$\ln(\rho_{12})$	1,00	0,71	-0,02	0,38	0,10	0,48
$\ln(F_{\max})$	–	1,00	0,13	0,48	0,12	0,30
$\ln(\Delta w_f)$	–	–	1,00	-0,35	0,15	0,11
$\ln(K_{\text{ser}})$	–	–	–	1,00	-0,70	-0,10
$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	–	–	–	–	1,00	0,37
$\ln(c)$	–	–	–	–	–	1,00
<b>20#</b>	<b><math>\rho_{12}</math></b>	<b><math>F_{\max}</math></b>	<b><math>\Delta w_f</math></b>	<b><math>K_{\text{ser}}</math></b>	<b><math>\Delta w_{\text{lin}}</math></b>	<b><math>c</math></b>
mean[X]	529	11.573	0,61	32.980	0,15	2,07
COV[X]	6,7	8,3	6,2	10,7	26,9	16,5

**Tabelle 120: Korrelationskoeffizienten und Statistik der Modellparameter für die Esche, 90° und RF**

ESxx-90-xx-RF	$\ln(\rho_{12})$	$\ln(F_{\max})$	$\ln(\Delta w_f)$	$\ln(K_{\text{ser}})$	$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	$\ln(c)$
$\ln(\rho_{12})$	1,00	0,98	0,98	-1,00	0,92	-0,92
$\ln(F_{\max})$	–	1,00	1,00	-0,96	0,98	-0,82
$\ln(\Delta w_f)$	–	–	1,00	-0,96	0,98	-0,83
$\ln(K_{\text{ser}})$	–	–	–	1,00	-0,88	0,95
$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	–	–	–	–	1,00	-0,70
$\ln(c)$	–	–	–	–	–	1,00
<b>3#</b>	<b><math>\rho_{12}</math></b>	<b><math>F_{\max}</math></b>	<b><math>\Delta w_f</math></b>	<b><math>K_{\text{ser}}</math></b>	<b><math>\Delta w_{\text{lin}}</math></b>	<b><math>c</math></b>
mean[X]	606	17.177	0,96	31.973	0,25	4,42
COV[X]	2,4	3,9	6,8	9,3	25,9	10,5



**Tabelle 121: Korrelationskoeffizienten und Statistik der Modellparameter für die Esche, 90° und P1**

ESxx-90-xx-P1	$\ln(\rho_{12})$	$\ln(F_{\max})$	$\ln(\Delta w_f)$	$\ln(K_{\text{ser}})$	$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	$\ln(c)$
$\ln(\rho_{12})$	1,00	0,83	0,34	0,68	-0,48	-0,84
$\ln(F_{\max})$	–	1,00	0,41	0,93	-0,58	-0,59
$\ln(\Delta w_f)$	–	–	1,00	0,31	-0,07	-0,31
$\ln(K_{\text{ser}})$	–	–	–	1,00	-0,70	-0,41
$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	–	–	–	–	1,00	0,37
$\ln(c)$	–	–	–	–	–	1,00
18#	$\rho_{12}$	$F_{\max}$	$\Delta w_f$	$K_{\text{ser}}$	$\Delta w_{\text{lin}}$	$c$
mean[X]	653	21.487	1,05	44.125	0,14	2,67
COV[X]	4,6	11,3	11,0	13,8	64,4	29,9

**Tabelle 122: Korrelationskoeffizienten und Statistik der Modellparameter für die Eiche, 90° und RF**

EIxx-90-xx-RF	$\ln(\rho_{12})$	$\ln(F_{\max})$	$\ln(\Delta w_f)$	$\ln(K_{\text{ser}})$	$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	$\ln(c)$
$\ln(\rho_{12})$	1,00	0,10	-0,48	0,95	-0,23	-0,99
$\ln(F_{\max})$	–	1,00	0,82	-0,06	0,10	-0,21
$\ln(\Delta w_f)$	–	–	1,00	-0,60	0,26	0,37
$\ln(K_{\text{ser}})$	–	–	–	1,00	-0,52	-0,90
$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	–	–	–	–	1,00	0,16
$\ln(c)$	–	–	–	–	–	1,00
4#	$\rho_{12}$	$F_{\max}$	$\Delta w_f$	$K_{\text{ser}}$	$\Delta w_{\text{lin}}$	$c$
mean[X]	714	17.206	0,94	27.721	1,33	2,62
COV[X]	3,6	3,4	5,1	7,6	109,9	14,9

**Tabelle 123: Korrelationskoeffizienten und Statistik der Modellparameter für die Eiche, 90° und P1**

EIxx-90-xx-P1	$\ln(\rho_{12})$	$\ln(F_{\max})$	$\ln(\Delta w_f)$	$\ln(K_{\text{ser}})$	$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	$\ln(c)$
$\ln(\rho_{12})$	1,00	0,78	0,38	0,68	-0,38	-0,26
$\ln(F_{\max})$	–	1,00	0,63	0,65	-0,58	-0,30
$\ln(\Delta w_f)$	–	–	1,00	0,08	-0,38	-0,39
$\ln(K_{\text{ser}})$	–	–	–	1,00	-0,78	-0,18
$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	–	–	–	–	1,00	0,33
$\ln(c)$	–	–	–	–	–	1,00
16#	$\rho_{12}$	$F_{\max}$	$\Delta w_f$	$K_{\text{ser}}$	$\Delta w_{\text{lin}}$	$c$
mean[X]	734	19.596	0,85	40.384	0,19	2,55
COV[X]	2,8	6,2	7,4	11,1	40,4	21,7

**Zerstreutporige Laubhölzer**
**Tabelle 124: Korrelationskoeffizienten und Statistik der Modellparameter für die Pappel, 0° und RF**

PAxx-0-xx-RF	$\ln(\rho_{12})$	$\ln(F_{\max})$	$\ln(\Delta w_f)$	$\ln(K_{\text{ser}})$	$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	$\ln(c)$
$\ln(\rho_{12})$	1,00	0,64	0,31	0,15	0,08	0,63
$\ln(F_{\max})$	–	1,00	0,02	0,65	0,22	0,78
$\ln(\Delta w_f)$	–	–	1,00	-0,60	-0,43	0,11
$\ln(K_{\text{ser}})$	–	–	–	1,00	0,05	0,32
$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	–	–	–	–	1,00	0,41
$\ln(c)$	–	–	–	–	–	1,00
20#	$\rho_{12}$	$F_{\max}$	$\Delta w_f$	$K_{\text{ser}}$	$\Delta w_{\text{lin}}$	$c$
mean[X]	481	7.855	0,51	22.412	0,21	3,10
COV[X]	6,4	16,7	17,8	17,3	30,9	34,5

**Tabelle 125: Korrelationskoeffizienten und Statistik der Modellparameter für die Pappel, 0° und P1**

PAxx-0-xx-P1	$\ln(\rho_{12})$	$\ln(F_{\max})$	$\ln(\Delta w_f)$	$\ln(K_{\text{ser}})$	$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	$\ln(c)$
$\ln(\rho_{12})$	1,00	0,41	0,25	-0,26	0,25	0,48
$\ln(F_{\max})$	–	1,00	-0,31	0,63	-0,01	0,70
$\ln(\Delta w_f)$	–	–	1,00	-0,83	-0,35	-0,03
$\ln(K_{\text{ser}})$	–	–	–	1,00	-0,05	0,23
$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	–	–	–	–	1,00	-0,24
$\ln(c)$	–	–	–	–	–	1,00
20#	$\rho_{12}$	$F_{\max}$	$\Delta w_f$	$K_{\text{ser}}$	$\Delta w_{\text{lin}}$	$c$
mean[X]	477	7.425	0,43	27.595	0,14	2,21
COV[X]	5,4	10,9	18,2	22,3	44,3	23,1

**Tabelle 126: Korrelationskoeffizienten und Statistik der Modellparameter für die Birke, 0° und RF**

BIxx-0-xx-RF	$\ln(\rho_{12})$	$\ln(F_{\max})$	$\ln(\Delta w_f)$	$\ln(K_{\text{ser}})$	$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	$\ln(c)$
$\ln(\rho_{12})$	1,00	0,86	0,55	0,93	0,11	0,00
$\ln(F_{\max})$	–	1,00	0,85	0,88	0,04	0,17
$\ln(\Delta w_f)$	–	–	1,00	0,58	0,03	0,37
$\ln(K_{\text{ser}})$	–	–	–	1,00	-0,12	-0,09
$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	–	–	–	–	1,00	0,44
$\ln(c)$	–	–	–	–	–	1,00
21#	$\rho_{12}$	$F_{\max}$	$\Delta w_f$	$K_{\text{ser}}$	$\Delta w_{\text{lin}}$	$c$
mean[X]	634	12.012	0,46	36.646	0,14	5,57
COV[X]	10,1	24,4	16,2	19,6	39,5	51,4

**Tabelle 127: Korrelationskoeffizienten und Statistik der Modellparameter für die Birke, 0° und P1**

BIxx-0-xx-P1	$\ln(\rho_{12})$	$\ln(F_{\max})$	$\ln(\Delta w_f)$	$\ln(K_{\text{ser}})$	$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	$\ln(c)$
$\ln(\rho_{12})$	1,00	0,94	0,13	0,94	-0,52	0,31
$\ln(F_{\max})$	–	1,00	0,12	0,97	-0,55	0,33
$\ln(\Delta w_f)$	–	–	1,00	0,05	-0,33	0,28
$\ln(K_{\text{ser}})$	–	–	–	1,00	-0,53	0,23
$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	–	–	–	–	1,00	-0,08
$\ln(c)$	–	–	–	–	–	1,00
21#	$\rho_{12}$	$F_{\max}$	$\Delta w_f$	$K_{\text{ser}}$	$\Delta w_{\text{lin}}$	$c$
mean[X]	633	10.653	0,37	44.056	0,15	3,19
COV[X]	10,5	25,1	20,6	23,1	92,1	30,5

Tabelle 128: Korrelationskoeffizienten und Statistik der Modellparameter für die Buche, 0° und P1

BU <sub>xx-0-xx-P1</sub>	$\ln(\rho_{12})$	$\ln(F_{\max})$	$\ln(\Delta w_f)$	$\ln(K_{\text{ser}})$	$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	$\ln(c)$
$\ln(\rho_{12})$	1,00	0,85	0,83	-0,22	0,38	0,33
$\ln(F_{\max})$	–	1,00	0,92	-0,07	0,39	0,18
$\ln(\Delta w_f)$	–	–	1,00	-0,38	0,55	0,16
$\ln(K_{\text{ser}})$	–	–	–	1,00	-0,80	-0,20
$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	–	–	–	–	1,00	0,30
$\ln(c)$	–	–	–	–	–	1,00
22#	$\rho_{12}$	$F_{\max}$	$\Delta w_f$	$K_{\text{ser}}$	$\Delta w_{\text{lin}}$	$c$
mean[X]	732	14.486	0,47	45.434	0,14	4,04
COV[X]	7,5	16,6	18,4	11,3	53,9	45,2

Tabelle 129: Korrelationskoeffizienten und Statistik der Modellparameter für die Pappel, 45° und RF

ES <sub>xx-45-xx-P1</sub>	$\ln(\rho_{12})$	$\ln(F_{\max})$	$\ln(\Delta w_f)$	$\ln(K_{\text{ser}})$	$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	$\ln(c)$
$\ln(\rho_{12})$	1,00	0,79	0,54	0,47	0,20	-0,52
$\ln(F_{\max})$	–	1,00	0,34	0,78	0,03	-0,21
$\ln(\Delta w_f)$	–	–	1,00	-0,13	-0,17	-0,66
$\ln(K_{\text{ser}})$	–	–	–	1,00	-0,19	-0,06
$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	–	–	–	–	1,00	0,18
$\ln(c)$	–	–	–	–	–	1,00
21#	$\rho_{12}$	$F_{\max}$	$\Delta w_f$	$K_{\text{ser}}$	$\Delta w_{\text{lin}}$	$c$
mean[X]	481	10.073	0,78	21.039	0,22	2,68
COV[X]	6,4	10,9	7,4	11,8	75,8	21,6

Tabelle 130: Korrelationskoeffizienten und Statistik der Modellparameter für die Pappel, 45° und P1

PA <sub>xx-45-xx-P1</sub>	$\ln(\rho_{12})$	$\ln(F_{\max})$	$\ln(\Delta w_f)$	$\ln(K_{\text{ser}})$	$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	$\ln(c)$
$\ln(\rho_{12})$	1,00	0,66	0,18	0,44	0,03	-0,57
$\ln(F_{\max})$	–	1,00	0,15	0,62	-0,17	-0,38
$\ln(\Delta w_f)$	–	–	1,00	-0,51	0,48	-0,03
$\ln(K_{\text{ser}})$	–	–	–	1,00	-0,42	-0,18
$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	–	–	–	–	1,00	0,47
$\ln(c)$	–	–	–	–	–	1,00
18#	$\rho_{12}$	$F_{\max}$	$\Delta w_f$	$K_{\text{ser}}$	$\Delta w_{\text{lin}}$	$c$
mean[X]	482	10.168	0,79	24.777	0,15	2,37
COV[X]	6,2	8,8	7,5	13,1	71,6	22,2

Tabelle 131: Korrelationskoeffizienten und Statistik der Modellparameter für die Birke, 45° und RF

BI <sub>xx-45-xx-RF</sub>	$\ln(\rho_{12})$	$\ln(F_{\max})$	$\ln(\Delta w_f)$	$\ln(K_{\text{ser}})$	$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	$\ln(c)$
$\ln(\rho_{12})$	1,00	0,81	0,41	0,89	-0,65	-0,47
$\ln(F_{\max})$	–	1,00	0,77	0,87	-0,40	-0,51
$\ln(\Delta w_f)$	–	–	1,00	0,40	-0,20	-0,47
$\ln(K_{\text{ser}})$	–	–	–	1,00	-0,61	-0,44
$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	–	–	–	–	1,00	0,31
$\ln(c)$	–	–	–	–	–	1,00
15#	$\rho_{12}$	$F_{\max}$	$\Delta w_f$	$K_{\text{ser}}$	$\Delta w_{\text{lin}}$	$c$
mean[X]	597	13.436	0,87	24.874	0,21	2,73
COV[X]	6,8	15,5	10,0	13,3	27,6	15,6

**Tabelle 132: Korrelationskoeffizienten und Statistik der Modellparameter für die Birke, 45° und P1**

BI <sub>xx-45-xx-P1</sub>	$\ln(\rho_{12})$	$\ln(F_{\max})$	$\ln(\Delta w_f)$	$\ln(K_{\text{ser}})$	$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	$\ln(c)$
$\ln(\rho_{12})$	1,00	0,94	0,85	0,88	0,11	-0,10
$\ln(F_{\max})$	–	1,00	0,86	0,95	0,04	-0,19
$\ln(\Delta w_f)$	–	–	1,00	0,75	-0,17	-0,12
$\ln(K_{\text{ser}})$	–	–	–	1,00	0,10	-0,09
$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	–	–	–	–	1,00	-0,34
$\ln(c)$	–	–	–	–	–	1,00
19#	$\rho_{12}$	$F_{\max}$	$\Delta w_f$	$K_{\text{ser}}$	$\Delta w_{\text{lin}}$	$c$
mean[X]	623	14.976	0,89	32.029	0,13	2,14
COV[X]	10,1	20,5	10,2	15,1	47,6	8,8

**Tabelle 133: Korrelationskoeffizienten und Statistik der Modellparameter für die Buche, 45° und P1**

BU <sub>xx-45-xx-P1</sub>	$\ln(\rho_{12})$	$\ln(F_{\max})$	$\ln(\Delta w_f)$	$\ln(K_{\text{ser}})$	$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	$\ln(c)$
$\ln(\rho_{12})$	1,00	0,84	0,64	0,65	-0,07	0,38
$\ln(F_{\max})$	–	1,00	0,62	0,82	-0,21	0,41
$\ln(\Delta w_f)$	–	–	1,00	0,33	-0,31	0,24
$\ln(K_{\text{ser}})$	–	–	–	1,00	-0,40	0,25
$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	–	–	–	–	1,00	-0,08
$\ln(c)$	–	–	–	–	–	1,00
18#	$\rho_{12}$	$F_{\max}$	$\Delta w_f$	$K_{\text{ser}}$	$\Delta w_{\text{lin}}$	$c$
mean[X]	741	21.837	0,92	42.851	0,14	2,34
COV[X]	6,2	10,4	9,3	9,8	59,1	13,4

**Tabelle 134: Korrelationskoeffizienten und Statistik der Modellparameter für die Pappel, 90° und RF**

PA <sub>xx-90-xx-RF</sub>	$\ln(\rho_{12})$	$\ln(F_{\max})$	$\ln(\Delta w_f)$	$\ln(K_{\text{ser}})$	$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	$\ln(c)$
$\ln(\rho_{12})$	1,00	0,54	0,55	0,20	-0,02	-0,24
$\ln(F_{\max})$	–	1,00	-0,02	0,78	-0,35	-0,01
$\ln(\Delta w_f)$	–	–	1,00	-0,47	0,07	-0,15
$\ln(K_{\text{ser}})$	–	–	–	1,00	-0,35	0,14
$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	–	–	–	–	1,00	0,25
$\ln(c)$	–	–	–	–	–	1,00
21#	$\rho_{12}$	$F_{\max}$	$\Delta w_f$	$K_{\text{ser}}$	$\Delta w_{\text{lin}}$	$c$
mean[X]	484	9.443	0,92	19.134	0,22	1,91
COV[X]	5,8	10,6	13,8	14,4	23,7	20,8

**Tabelle 135: Korrelationskoeffizienten und Statistik der Modellparameter für die Pappel, 90° und P1**

PA <sub>xx-90-xx-P1</sub>	$\ln(\rho_{12})$	$\ln(F_{\max})$	$\ln(\Delta w_f)$	$\ln(K_{\text{ser}})$	$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	$\ln(c)$
$\ln(\rho_{12})$	1,00	0,70	0,60	0,00	-0,19	-0,06
$\ln(F_{\max})$	–	1,00	0,04	0,52	-0,19	-0,08
$\ln(\Delta w_f)$	–	–	1,00	-0,64	0,03	0,36
$\ln(K_{\text{ser}})$	–	–	–	1,00	-0,53	-0,45
$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	–	–	–	–	1,00	0,50
$\ln(c)$	–	–	–	–	–	1,00
19#	$\rho_{12}$	$F_{\max}$	$\Delta w_f$	$K_{\text{ser}}$	$\Delta w_{\text{lin}}$	$c$
mean[X]	479	9.785	0,89	21.897	0,18	1,79
COV[X]	6,1	8,9	13,9	13,2	35,8	17,7

**Tabelle 136: Korrelationskoeffizienten und Statistik der Modellparameter für die Birke, 90° und RF**

BI <sub>xx-90-xx-RF</sub>	$\ln(\rho_{12})$	$\ln(F_{\max})$	$\ln(\Delta w_f)$	$\ln(K_{\text{ser}})$	$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	$\ln(c)$
$\ln(\rho_{12})$	1,00	0,81	0,58	0,71	0,12	0,42
$\ln(F_{\max})$	–	1,00	0,84	0,79	0,12	0,74
$\ln(\Delta w_f)$	–	–	1,00	0,53	0,02	0,66
$\ln(K_{\text{ser}})$	–	–	–	1,00	-0,27	0,68
$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	–	–	–	–	1,00	0,06
$\ln(c)$	–	–	–	–	–	1,00
15#	$\rho_{12}$	$F_{\max}$	$\Delta w_f$	$K_{\text{ser}}$	$\Delta w_{\text{lin}}$	$c$
mean[X]	613	14.446	1,02	28.548	0,14	1,99
COV[X]	6,4	14,6	10,6	10,5	55,5	12,8

**Tabelle 137: Korrelationskoeffizienten und Statistik der Modellparameter für die Birke, 90° und P1**

BI <sub>xx-90-xx-P1</sub>	$\ln(\rho_{12})$	$\ln(F_{\max})$	$\ln(\Delta w_f)$	$\ln(K_{\text{ser}})$	$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	$\ln(c)$
$\ln(\rho_{12})$	1,00	0,92	0,59	0,83	0,38	0,18
$\ln(F_{\max})$	–	1,00	0,76	0,90	0,40	0,23
$\ln(\Delta w_f)$	–	–	1,00	0,55	0,40	0,26
$\ln(K_{\text{ser}})$	–	–	–	1,00	0,32	0,27
$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	–	–	–	–	1,00	0,47
$\ln(c)$	–	–	–	–	–	1,00
19#	$\rho_{12}$	$F_{\max}$	$\Delta w_f$	$K_{\text{ser}}$	$\Delta w_{\text{lin}}$	$c$
mean[X]	637	16.042	0,95	35.646	0,10	2,29
COV[X]	9,3	15,9	11,0	10,1	48,9	13,8

**Tabelle 138: Korrelationskoeffizienten und Statistik der Modellparameter für die Buche, 90° und P1**

PA <sub>xx-90-xx-P1</sub>	$\ln(\rho_{12})$	$\ln(F_{\max})$	$\ln(\Delta w_f)$	$\ln(K_{\text{ser}})$	$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	$\ln(c)$
$\ln(\rho_{12})$	1,00	0,93	0,70	0,83	-0,16	-0,25
$\ln(F_{\max})$	–	1,00	0,71	0,84	-0,27	0,05
$\ln(\Delta w_f)$	–	–	1,00	0,47	-0,30	-0,21
$\ln(K_{\text{ser}})$	–	–	–	1,00	-0,41	-0,12
$\ln(\Delta w_{\text{lin}})$	–	–	–	–	1,00	-0,39
$\ln(c)$	–	–	–	–	–	1,00
20#	$\rho_{12}$	$F_{\max}$	$\Delta w_f$	$K_{\text{ser}}$	$\Delta w_{\text{lin}}$	$c$
mean[X]	725	20.439	0,85	53.312	0,08	1,85
COV[X]	7,7	13,1	8,8	11,3	169,0	14,7

## C-5 Abklingen der Spaltkräfte

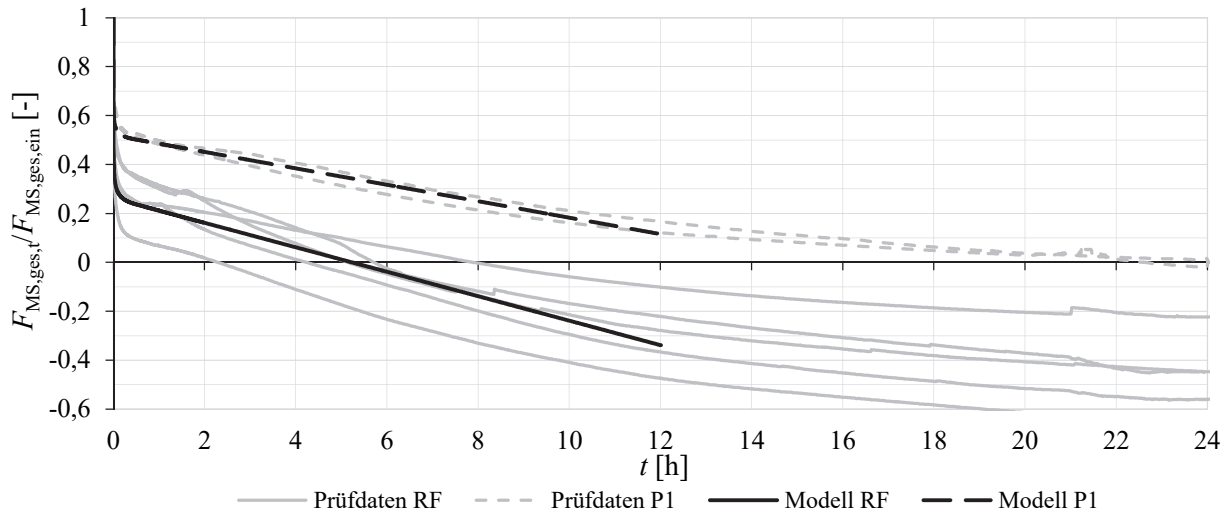


Abbildung 141: Relative Spaltkraftverlauf über 24 h für die Buche bei einem Achs-Faserwinkel von  $0^\circ$

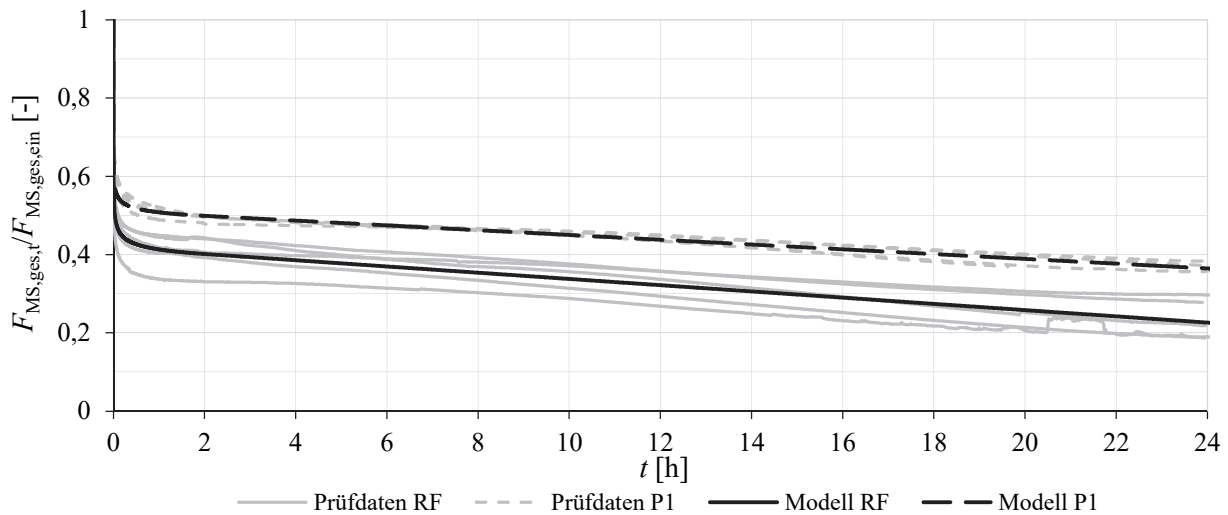


Abbildung 142: Relative Spaltkraftverlauf über 24 h für die Buche bei einem Achs-Faserwinkel von  $90^\circ R$

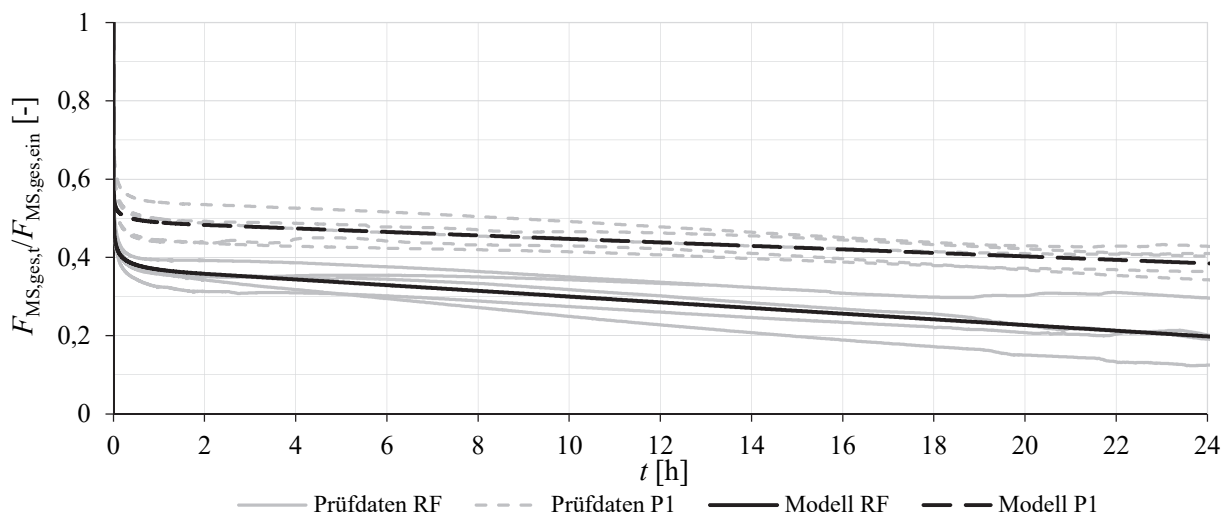


Abbildung 143: Relative Spaltkraftverlauf über 24 h für die Buche bei einem Achs-Faserwinkel von  $90^\circ T$



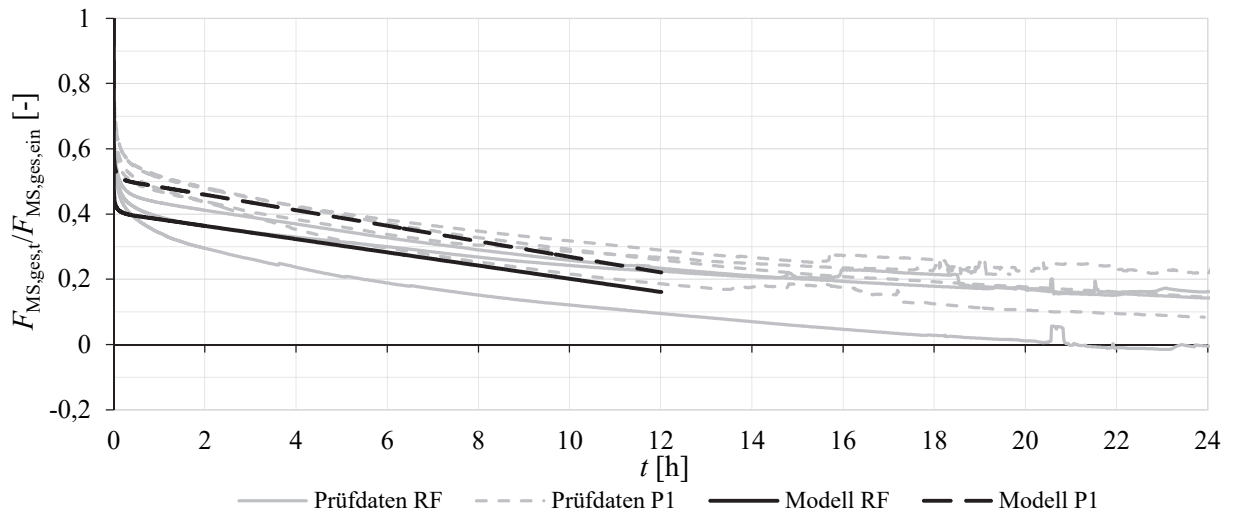


Abbildung 144: Relative Spaltkraftverlauf über 24 h für die BauBuche bei einem Achs-Faserwinkel von 0°

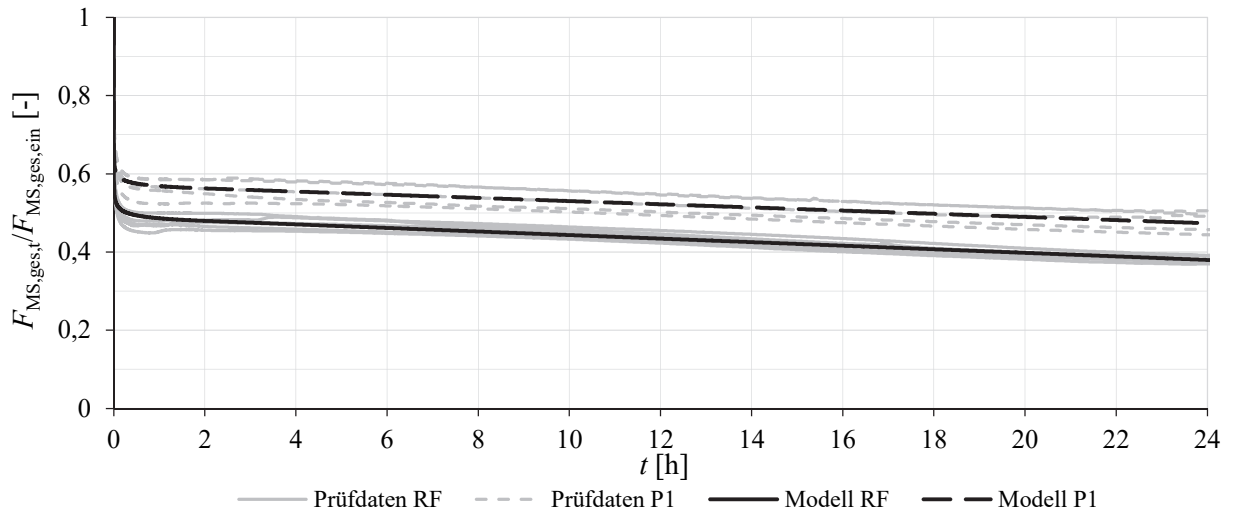


Abbildung 145: Relative Spaltkraftverlauf über 24 h für die BauBuche bei einem Achs-Faserwinkel von 90°R

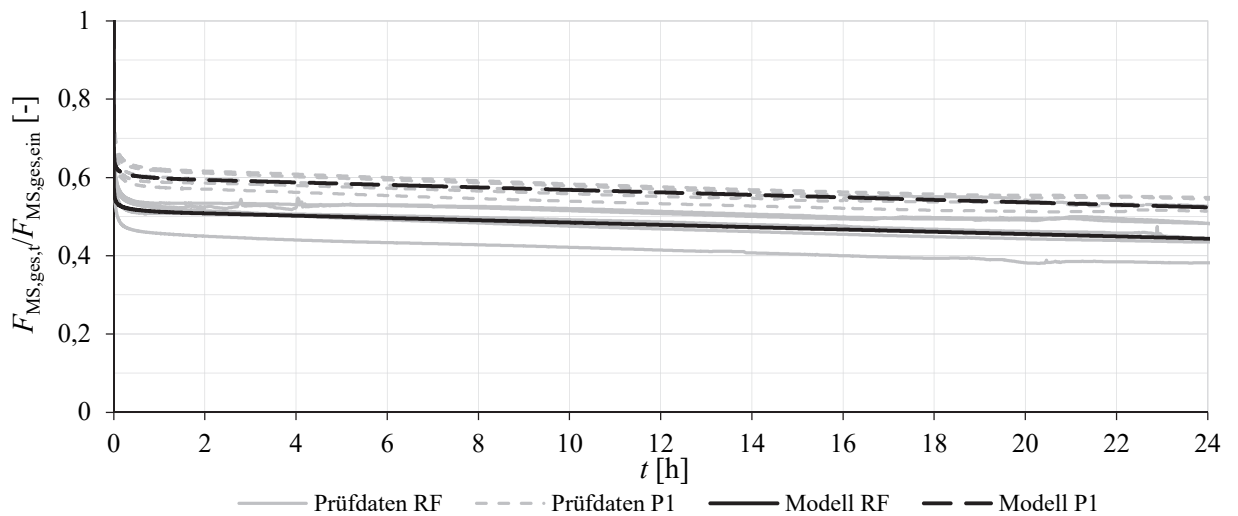


Abbildung 146: Relative Spaltkraftverlauf über 24 h für die BauBuche bei einem Achs-Faserwinkel von 90°T





Dies ist eine Veröffentlichung des

### **FACHBEREICHS INGENIEURBAUKUNST (IBK) AN DER TU GRAZ**

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

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

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

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

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

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

Nummerierungssystematik der Schriftenreihe

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

Institutskennzahl:

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

Fortlaufende Nummer pro Reihe und Institut / Jahreszahl