

Vergleich der Lochleibungsfestigkeit in Folge von Zug- und Druckbelastung

M-4-9/2014



Johanna Hohenwarter
Institut für Holzbau und Holztechnologie
Technische Universität Graz



Johanna Hohenwarter, BSc

**Vergleich der Lochleibungsfestigkeit
in Folge von
Zug- und Druckbelastung**

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieurin

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften - Konstruktiver Ingenieurbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Univ.-Prof. DI Dr.techn. Gerhard Schickhofer

Institut für Holzbau und Holztechnologie
Fakultät Bauingenieurwissenschaften

DI Georg Flatscher

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

Ich möchte mich bei allen bedanken, die mich während meiner Studienzeit begleitet haben.

Ich bedanke mich bei Univ.-Prof. DI Dr. techn. Gerhard Schickhofer für die Möglichkeit diese Arbeit zu verfassen und für die Unterstützung während der Bearbeitung. Zudem möchte ich mich für die lehrreichen Vorlesungen bedanken, die mich für den Holzbau begeistert haben.

Ich bedanke mich bei DI Georg Flatscher für die Betreuung und Unterstützung bei der Erstellung dieser Arbeit. Die vielen Gespräche und Diskussionen haben mich immer wieder neu motiviert und auf den richtigen Weg geführt.

Ich bedanke mich bei Ass.-Prof. DI (FH) Dr. techn. Reinhard Brandner für die Einführung in die Statistik.

Ich bedanke mich bei TM Ing. Bernd Heissenberger für die tatkräftige Unterstützung bei der Vorbereitung und Durchführung der Prüfungen und die lustige Zeit.

Ich bedanke mich bei den Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen des Institutes für Holzbau und Holztechnologie und der holz.bau forschungs gmbh für die angenehme Zeit.

Der allergrößte Dank gilt meiner Familie.

Ich möchte mich bei meinen Eltern Margot und Josef für die Unterstützung, Geduld und das Vertrauen bedanken. Ihr habt mir die Voraussetzungen für ein selbstbestimmtes, gesundes und aktives Leben von klein an gegeben. Dafür danke ich euch von Herzen.

Bei meiner Schwester Katharina bedanke ich mich für die lustigen Gespräche und den Spaß den wir gemeinsam haben. Durch deine Anwesenheit bringst du so viel Freude in mein Leben. Vielen Dank.

Meinen Großeltern Gertrude und Adolf möchte ich für die Unterstützung danken. Ihr seid immer für mich da, wenn ich euch brauche und gebt mir ein Gefühl von Geborgenheit. Vielen Dank dafür.

Ich möchte mich auch bei meiner Oma Rosa für die vielen lustigen Stunden und die Herzlichkeit bedanken.

Bei Thomas möchte ich mich für die vielen aufbauenden Worte und den Rückhalt bedanken. Du hast immer an mich geglaubt und mit dir hat mir das Studium, aber vor allem die Freizeit, sehr viel Spaß gemacht. Vielen Dank für deinen Enthusiasmus und deine Klarheit.

Kurzfassung

Im Ingenieurholzbau stellen auf Abscheren beanspruchte, meist mehrschnittige Stabdübelverbindungen eine wesentliche Art der Verbindung dar. Die aktuell verankerte Berechnungsmethode nach Johansen wurde 1949 veröffentlicht und unterschätzt laut einer Studie von *Hübner (2013)* die Tragfähigkeit realer Verbindungen um bis zu 40 %. Um entsprechende Anpassungen im Berechnungskonzept vornehmen zu können, ist ein umfangreiches Verständnis von Stabdübelverbindungen erforderlich. Am Beginn der Arbeit werden die Einflussfaktoren auf das Trag- und Verformungsverhalten von mehrschnittigen Stabdübelverbindungen zusammengefasst, wodurch eine gezielte Untersuchung einzelner Faktoren erleichtert wird. Der Einfluss der Belastungsart – Zug- oder Druckbelastung – auf die Lochleibungsfestigkeit parallel zur Faser wurde anhand von insgesamt 115 Lochleibungsprüfungen nach *ON EN 383 (2007)* untersucht. Die Prüfungen fanden mit handelsüblichen, galvanisch verzinkten Stabdübeln Durchmesser 12 mm statt und wurden an Birke, Esche und Fichte durchgeführt. Der Vergleich der Prüfergebnisse zeigt bei Esche und Fichte keinen signifikanten Unterschied der Lochleibungsfestigkeit durch Zug- oder Druckbelastung. Bei Birke kann ein signifikanter Unterschied der Lochleibungsfestigkeit zugunsten der Druckbelastung festgestellt werden. Die Ergebnisse dieser Arbeit bilden eine fundierte Grundlage für weiterführende Untersuchungen zur Lochleibungsfestigkeit.

Abstract

Connections with dowel-type fasteners subjected to shear are commonly used in structural timber engineering. Current design regulations to determine the load-carrying capacity were published by Johansen in 1949 and underestimate, according to studies by *Hübner (2013)*, connections of multiple fasteners by up to 40 %. To adapt the calculation method comprehensive knowledge concerning joints of dowel-type fasteners is required. As a first part of this master thesis influencing factors on the load-carrying capacity and deformation capacity of multi-shear dowel-connections are summarized. As a result, specific investigations on isolated influencing factors are eased. The influence of tension and compression parallel to the grain on the embedment strength was investigated according to *ON EN 383 (2007)*. In total 115 embedment tests were performed on birch, ash and spruce with galvanized dowels of diameter 12 mm. Comparison of the results of ash and spruce show no significant difference in the embedding strength in case of tensile and compressive load. In birch, a significant difference in the embedding strength in favour of compression can be determined. The results of this thesis provide a sound basis for further investigations on the embedment strength.

Inhalt

1	Motivation	1
2	Stand des Wissens – Einflussfaktoren auf Stabdübelverbindungen	2
2.1	Tragfähigkeit und Art der Verbindung	3
2.2	Lochleibungsfestigkeit	7
2.3	Fließmoment $M_{y,Rk}$	22
2.4	Gruppenwirkung	23
2.5	Reibung	25
2.6	Resümee	27
3	Lochleibungsfestigkeit bei Druck- und Zugbelastung nach ON EN 383:2007	28
3.1	Literaturrecherche	28
3.2	Methodik der Lochleibungsprüfung und -auswertung	33
3.3	Prüfvorbereitung	37
3.4	Durchführung der Prüfungen	42
3.5	Auswertung der Prüfungen	49
3.6	Gegenüberstellung der Prüfergebnisse	68
3.7	Resümee	78
4	Lochleibungsfestigkeit bei Druckbelastung nach Ehlbeck und Werner	79
4.1	Prüfvorbereitung	79
4.2	Durchführung der Prüfungen	80
4.3	Auswertung der Prüfungen	83
5	Gegenüberstellung der Prüfergebnisse	88
5.1	Rohdichte	88
5.2	Aufspalten der Probekörper	89
5.3	Lochleibungsfestigkeiten	91
5.4	Verschiebe- und Bettungsmoduln	93
5.5	Resümee	94
6	Schlussbetrachtung und Ausblick	95
7	Literaturverzeichnis	97
	Anhang	101

1 Motivation

Im Ingenieurholzbau stellen Entwurf und Dimensionierung von effizienten Verbindungen und Anschlüssen eine der wichtigsten Aufgaben dar. Die konstruktive Ausbildung von Verbindungen hat eine wesentliche Bedeutung für die Leistungsfähigkeit und dadurch auch für die Wirtschaftlichkeit von Tragwerken. Als eine wesentliche Art von Verbindungen im Holzbau können auf Abscheren beanspruchte, meist mehrschnittige Stabdübelverbindungen angeführt werden.

Das international zur Bemessung von stabförmigen Verbindungsmitteln verwendete Modell basiert auf Forschungsarbeiten von K.W. Johansen. Die Forschungsarbeit wurde bereits 1949 veröffentlicht und in *ON EN 1995-1-1:2009* für die Berechnung der Tragfähigkeit von Stabdübeln, Nägeln, Bolzen, Klammern und Holzschrauben auf Abscheren erweitert. Mit Hilfe dieses Modells lässt sich die Tragfähigkeit pro Verbindungsmittel und Scherfuge unter der Voraussetzung eines ideal-plastischen Materialverhaltens und verschiedener Versagensmodi ermitteln. Um den Einfluss von mehreren Verbindungsmitteln zu berücksichtigen, hängt die Tragfähigkeit der Verbindung von der effektiven Verbindungsmittelanzahl n_{ef} ab.

Von *Hübner (2013)* veröffentlichte Prüfergebnisse zeigen einen Unterschied von bis zu 40 % zwischen der Tragfähigkeit berechnet nach Johansen und den Prüfungen. Um die Leistungsfähigkeit des Berechnungsmodells zu verbessern und die Wirtschaftlichkeit zu erhöhen, ist eine entsprechende Anpassung des Berechnungsmodells für die Tragfähigkeit erforderlich. Zahlreiche Arbeiten, wie *Hübner (2013)*, *Sandhaas (2013)* und *Sjödin et al. (2008)*, um einige in letzter Zeit verfasste Arbeiten zu nennen, befassen sich bereits mit einzelnen Einflussfaktoren von Stabdübelverbindungen und tragen zu einem umfassenderen Verständnis des Verhaltens dieser Verbindungen bei. Trotzdem wurden wichtige Parameter noch nicht ausreichend untersucht.

In dieser Arbeit sind die Einflussfaktoren auf das Trag- und Verformungsverhalten von Stabdübelverbindungen zusammengefasst. Einen dieser Faktoren stellt der Einfluss der Belastungsart – Zug- oder Druckbelastung – bei der Ermittlung der Lochleibungsfestigkeiten da. In dieser Arbeit wurde der Einfluss der Belastungsart für Stabdübel Durchmesser 12 mm bei Birke, Esche und Fichte anhand von 102 Lochleibungsprüfungen nach *ON EN 383 (2007)* untersucht, wobei der belastete Randabstand bei den Zugversuchen mit $10d$ gewählt wurde. Vergleichend dazu wurden 13 Lochleibungsprüfungen auf Druck an Esche mit dem einzigen Unterschied eines verminderten, unbelasteten Randabstandes – von $7d$ auf $3d$ – durchgeführt.

2 Stand des Wissens – Einflussfaktoren auf Stabdübelverbindungen

Das Tragverhalten von stiftförmigen Verbindungen ist sehr komplex und von mehreren Einflussfaktoren abhängig. Neben der Lochleibungsfestigkeit stellt das Fließmoment den zweiten materialbezogenen Einflussfaktor bei der Ermittlung der Tragfähigkeit von Stabdübelverbindungen nach Johansen dar. Als systemabhängige Einflussfaktoren können die Gruppenwirkung und die Reibung angeführt werden. Der konstruktive Ingenieur kann einzelne materialbezogene und systemabhängige Einflussfaktoren durch die Auswahl entsprechender Materialien, Durchmesser, Verbindungsarten, etc. steuern. Die Geometrie der Verbindung ergibt sich im Optimalfall aus der Anordnung der Verbindungsmittel unter Zugrundelegung der Mindest- und Randabstände.

Stiftförmige Verbindungen im Holzbau werden derzeit gemäß der europaweit gültigen Norm *ON EN 1995-1-1:2009* nach *Johansen (1949)* berechnet. Ist die Lochleibungsfestigkeit in mindestens einem der verbundenen Hölzer erreicht oder tritt ein Fließgelenk im Verbindungsmittel auf, gilt die Tragfähigkeit einer stiftförmigen Verbindung als erreicht. Welcher Versagensmechanismus auftritt, ist von der Geometrie der Verbindung, der Lochleibungsfestigkeit der verbundenen Holzteile und dem Fließmoment des Verbindungsmittels abhängig. Zudem können Gruppenwirkung und Reibung einen Einfluss auf das Versagen haben.

In den folgenden Abschnitten werden die material- und systemabhängigen Einflussfaktoren, welche auch den Versagensmechanismus beeinflussen, näher beschrieben.

2.1 Tragfähigkeit und Art der Verbindung

Die von *Johansen (1949)* entwickelten Gleichungen sind in *ON EN 1995-1-1:2009* für verschiedene Verbindungsarten erweitert worden und unterteilen sich in Gleichungen für ein- und zweischnittige Holz-Holz-Verbindungen und ein- und zweischnittige Holz-Stahlblech-Verbindungen. Durch Kombinieren der Gleichungen können auch mehrschnittige Verbindungen berechnet werden. In den folgenden Abbildungen sind die Gleichungen für die Tragfähigkeit eines Verbindungsmittels pro Scherfuge dargestellt. Um das Versagen von Verbindungen frühzeitig erkennen zu können, ist ein duktiles Versagen nötig. Bei Stabdübelverbindungen bilden sich dabei Fließgelenke im Stabdübel aus.

Aus dem Minimalwert der Gleichungen (a) bis (f) aus Abb. 2.1 wird die Tragfähigkeit von einschnittigen Holz-Holz-Verbindungen berechnet. Die Ausbildung von zwei Fließgelenken, siehe Abb. 2.1 (f), sollte dabei die Bemessung bestimmen und den Minimalwert darstellen.

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d \quad (a) \\ f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d \quad (b) \\ \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{1 + \beta} \left[\sqrt{\beta + 2 \cdot \beta^2 \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (c) \\ 1,05 \cdot \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (d) \\ 1,05 \cdot \frac{f_{h,1,k} \cdot t_2 \cdot d}{1 + 2 \cdot \beta} \left[\sqrt{2 \cdot \beta^2 \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (1 + 2 \cdot \beta) \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_2^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (e) \\ 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \sqrt{2 \cdot M_{y,Rk} \cdot f_{h,1,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (f) \end{array} \right.$$

Abb. 2.1: Gleichungen für einschnittige Holz-Holz-Verbindungen nach *ON EN 1995-1-1:2009*

Die folgend dargestellte Abb. 2.2 zeigt die Versagensmechanismen für Holz- und Holzwerkstoff-Verbindungen, wobei die Buchstaben den Gleichungen Abb. 2.1 zugeordnet sind.

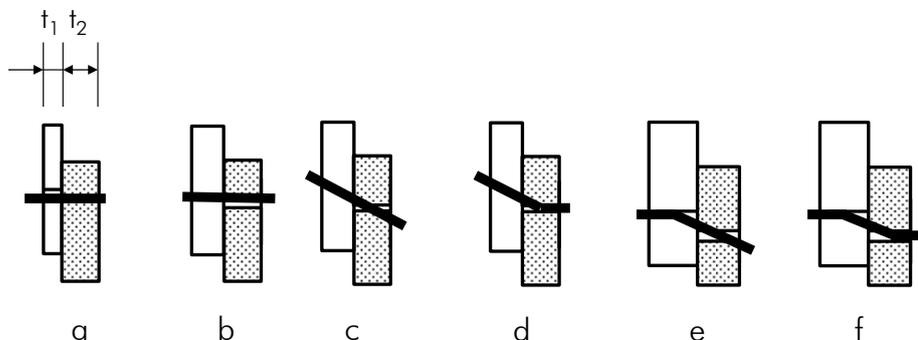


Abb. 2.2: Versagensmechanismen nach *ON EN 1995-1-1:2009* für Holz- und Holzwerkstoff-Verbindungen

Die Tragfähigkeit eines Verbindungsmittels pro Scherfuge bei zweischnittigen Holz-Holz-Verbindungen wird durch den Minimalwert der Gleichungen (g) bis (k) in Abb. 2.3 ermittelt.

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d & (g) \\ 0,5 \cdot f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d & (h) \\ 1,05 \cdot \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (j) \\ 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \sqrt{2 \cdot M_{y,Rk} \cdot f_{h,1,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (k) \end{cases}$$

Abb. 2.3: Gleichungen für zweischnittige Holz-Holz-Verbindungen nach ON EN 1995-1-1:2009

Die folgend dargestellte Abb. 2.4 zeigt die Versagensmechanismen für Holz- und Holzwerkstoff-Verbindungen, wobei die Buchstaben den Gleichungen aus Abb. 2.3 zugeordnet sind.

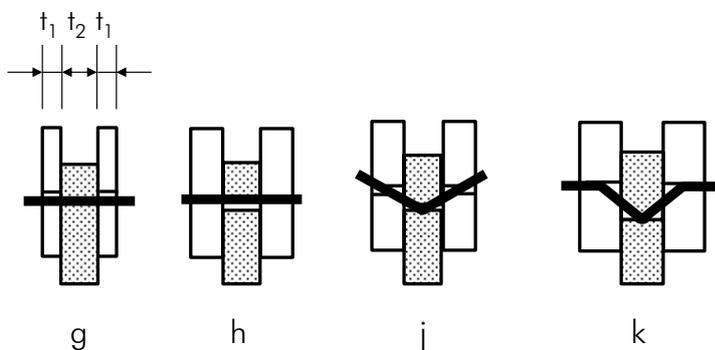


Abb. 2.4: Versagensmechanismen nach ON EN 1995-1-1:2009 für Holz- und Holzwerkstoff-Verbindungen

Bei Holz-Stahlblech-Verbindungen erfolgt eine zusätzliche Unterteilung in ein- und mehrschnittige Verbindungen mit außen- oder innenliegendem Stahlblech, zudem wird bei außenliegendem Stahlblech nach der Dicke der Stahlbleche unterschieden. Als dünne Stahlbleche gelten Bleche mit $t \leq 0,5d$, wobei t die Stahlblechdicke und d den Verbindungsmitteldurchmesser angibt. Als dicke Stahlbleche werden Bleche mit $t \geq d$ bezeichnet. Für Bleche mit der Dicke $0,5d < t < d$ darf laut Schickhofer (2009) geradlinig interpoliert werden. In der Tragfähigkeit unterscheiden sich dünne und dicke Bleche durch die Einspannwirkung, welche nur bei dicken Blechen vorhanden ist. Durch diese Einspannwirkung kann das Verbindungsmittel ein zusätzliches Fließgelenk ausbilden.

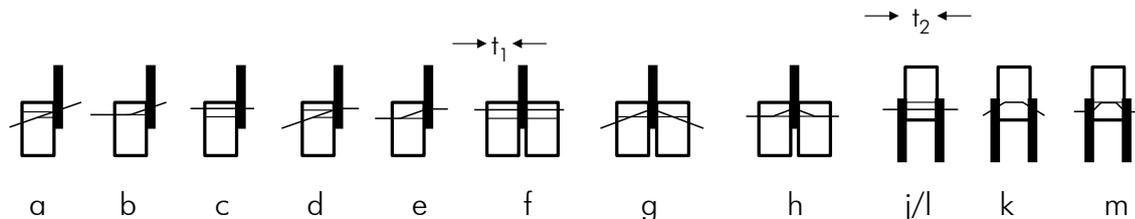


Abb. 2.5: Versagensmechanismen für Stahl-Holz-Verbindungen nach ON EN 1995-1-1:2009

Die folgenden Gleichungen in Abb. 2.6 zeigen die Gleichungen für einschnittige Holz-Stahlblech-Verbindungen für dünnes und dickes Stahlblech.

Für ein dünnes Stahlblech, einschnittig:

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} 0,4 \cdot f_{h,k} \cdot t_1 \cdot d & (a) \\ 1,15 \sqrt{2 \cdot M_{y,Rk} \cdot f_{h,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (b) \end{cases}$$

Für ein dickes Stahlblech, einschnittig:

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} f_{h,k} \cdot t_1 \cdot d & (c) \\ f_{h,k} \cdot t_1 \cdot d \left[\sqrt{2 + \frac{4 \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (d) \\ 2,3 \cdot \sqrt{M_{y,Rk} \cdot f_{h,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (e) \end{cases}$$

Abb. 2.6: Gleichungen für einschnittige Holz-Stahl-Verbindungen nach *ON EN 1995-1-1:2009*

Die folgenden Gleichungen in Abb. 2.7 zeigen die Gleichungen für zweischnittige Holz-Stahlblech-Verbindungen mit innenliegendem Stahlblech.

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d & (f) \\ f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d \left[\sqrt{2 + \frac{4 \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (g) \\ 2,3 \cdot \sqrt{M_{y,Rk} \cdot f_{h,1,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (h) \end{cases}$$

Abb. 2.7: Gleichungen für zweischnittige Holz-Stahlblech Verbindungen mit innenliegendem Blech nach *ON EN 1995-1-1:2009*

Die Tragfähigkeit eines Verbindungsmittels pro Scherfuge bei zweischnittigen Holz-Stahlblech-Verbindungen mit außenliegendem Stahlblech wird für dünne Bleche durch den Kleinstwert der Gleichungen (j) und (k) in Abb. 2.8 ermittelt, für dicke Bleche durch die Gleichungen (l) und (m).

Für dünne Stahlbleche als Seitenteile einer zweischnittigen Verbindung:

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} 0,5 \cdot f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d & (j) \\ 1,15 \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,Rk} \cdot f_{h,2,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (k) \end{cases}$$

Für dicke Stahlbleche als Seitenteile einer zweischnittigen Verbindung:

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} 0,5 \cdot f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d & (l) \\ 2,3 \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,Rk} \cdot f_{h,2,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (m) \end{cases}$$

Abb. 2.8: Gleichungen für zweischnittige Holz-Stahl-Verbindungen nach *ON EN 1995-1-1:2009*

Die in den Abbildungen Abb. 2.1 bis Abb. 2.8 angeführten Variablen werden nachfolgend beschrieben.

d	Verbindungsmitteldurchmesser in mm
t_1	der kleinere Wert der Seitenholzdicke oder der Eindringtiefe in mm
t_2	Dicke des Mittelholzes in mm
$f_{h,k}$	charakteristischer Wert der Lochleibungsfestigkeit im Holzteil in N/mm ²
$M_{y,Rk}$	Fließmoment des Verbindungsmittels in Nmm
$F_{ax,Rk}$	charakteristischer Wert des Ausziehwiderstandes des Verbindungsmittels in N
$F_{v,Rk}$	charakteristischer Wert der Tragfähigkeit pro Scherfuge und Verbindungsmittel in N

Durch die angeführten Gleichungen wird ersichtlich, dass die Holzdicke und der Verbindungsmitteldurchmesser in direktem Zusammenhang mit der Tragfähigkeit eines Verbindungsmittels stehen. Um auf die Tragfähigkeit einer Verbindung mit mehreren Verbindungsmitteln zu kommen, wird die ermittelte Tragfähigkeit pro Verbindungsmittel mit der Schnittigkeit, Anzahl der Verbindungsmittel normal zur Faserrichtung und der Abminderung für die Gruppenwirkung n_{ef} , siehe Abschnitt 2.4, multipliziert.

Die Lochleibungsfestigkeit und das Fließmoment gehen direkt in die zuvor erwähnten Gleichungen ein und werden in den folgenden Abschnitten näher beschrieben. Zudem werden die Einflussfaktoren angeführt. Die Gruppenwirkung und die Reibung werden ebenfalls mit den jeweiligen Einflussfaktoren beschrieben.

Nicht nur zu den einzelnen Einflussfaktoren, sondern auch zur Berechnung der Tragfähigkeit liegen Studien vor. Nachfolgend ist eine Arbeit von Gehri über die Lage des Fließmomentes zusammengefasst.

Gehri (2013) führte Versuche zur Überprüfung des EYM (European Yield Model) - Tragmodells für Holz-Stahl-Verbindungen mit innenliegendem Stahlblech durch. Das für die Prüfungen verwendete Ausgangsmaterial war Funiersperrholz – Buche (FSpH-Buche) mit einer Dicke von 8mm (5-schichtig). Durch additive Anordnung zusätzlicher Schichten wurde die Holzbreite stufenweise erhöht, wodurch die Materialeigenschaften gleichblieben. Der verwendete Dübeldurchmesser betrug 8 mm und der belastete Randabstand $10d$. In Abb. 2.9 ist das Versuchskonzept ersichtlich. Es wurden zudem Berechnungen mit der Lage des Gelenkes am Übergang zwischen Stahl und Holz durchgeführt. Die Ergebnisse daraus, verglichen mit den Versuchen, zeigen größere Abweichungen. Eine Verschiebung der Lage des Fließgelenkes bei den Berechnungen von rund $\frac{1}{3} d$ erzielt eine gute Übereinstimmung. Es wird erwähnt, dass sich diese Anpassung physikalisch begründen lässt.

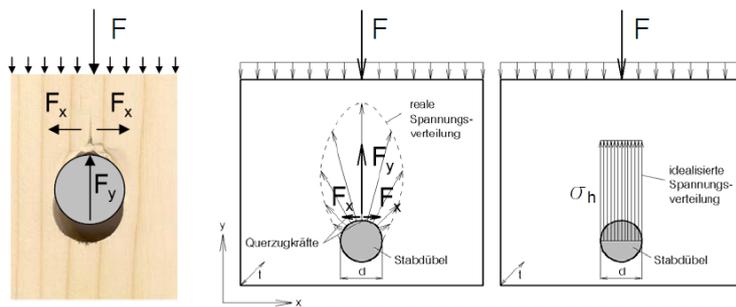


Abb. 2.10: Definition der idealisierten Lochleibungsspannung σ_h nach Spörk (2007b)

Die folgende Gleichung wird der Berechnung der idealisierten Spannung zugrunde gelegt.

$$\sigma_h = \frac{F}{d \cdot t} \quad \text{Gl. (1)}$$

- σ_h idealisierte Lochleibungsspannung in N/mm²
- F einwirkende Kraft in N
- d Durchmesser des Verbindungsmittels in mm
- t Holzdicke in mm

Die Berechnung der Lochleibungsfestigkeit ist in *ON EN 1995-1-1* (2009, S.78 bis S.81): *Bemessung und Konstruktion von Holzbauten* geregelt. Demnach gilt Gl. (2) zur Berechnung der charakteristischen Lochleibungsfestigkeit $f_{h,0,k}$ von Stabdübeln und Passbolzen bei einem Kraft-Faser-Winkel von $\alpha = 0^\circ$. Bei Verbindungen mit Stabdübeln sollen die Stabdübel kleiner 30 mm und größer als 6 mm sein. Die Mindest- und Randabstände für Stabdübelverbindungen sind auf S.81 abhängig von Durchmesser und Kraft-Faser-Winkel geregelt. Auf S.115 sind die Toleranzen für die Durchmesser mit -0/+0,1 mm festgelegt, zudem ist erwähnt, dass die Löcher nicht größer als der Stabdübeldurchmesser vorgebohrt werden sollen.

$$f_{h,0,k} = 0,082(1 - 0,01d)\rho_k \quad \text{Gl. (2)}$$

- ρ_k charakteristische Rohdichte in kg/m³
- d Durchmesser des Verbindungsmittels in mm
- $f_{h,0,k}$ char. Wert der Lochleibungsfestigkeit in Faserrichtung des Holzes ($\alpha = 0^\circ$) in N/mm²

Auf die Lochleibungsfestigkeit haben nach derzeitigem Wissen, die in den folgenden Punkten näher angeführten Faktoren einen Einfluss.

2.2.1 Einfluss des Durchmessers des Verbindungsmittels

Die Berechnung der charakteristischen Lochleibungsfestigkeit ist in *ON EN 1995-1-1* (2009, S.78) mit Gl. (2) geregelt. Für Verbindungen mit Stabdübeln sollen die verwendeten Stabdübelndurchmesser zwischen 6 mm und 30 mm liegen. In Gl. (2) geht der Stabdübelndurchmesser linear in die Berechnung der charakteristischen Lochleibungsfestigkeit ein. Je größer der Durchmesser, umso kleiner ist die berechnete Lochleibungsfestigkeit.

Auch *Hübner (2013)* stellte eine Abnahme der Lochleibungsfestigkeit bei größer werdendem Stabdübeldurchmesser fest. Abb. 2.11 zeigt die hinsichtlich Holzfeuchte und Rohdichte korrigierten Mittelwerte der Lochleibungsfestigkeit.

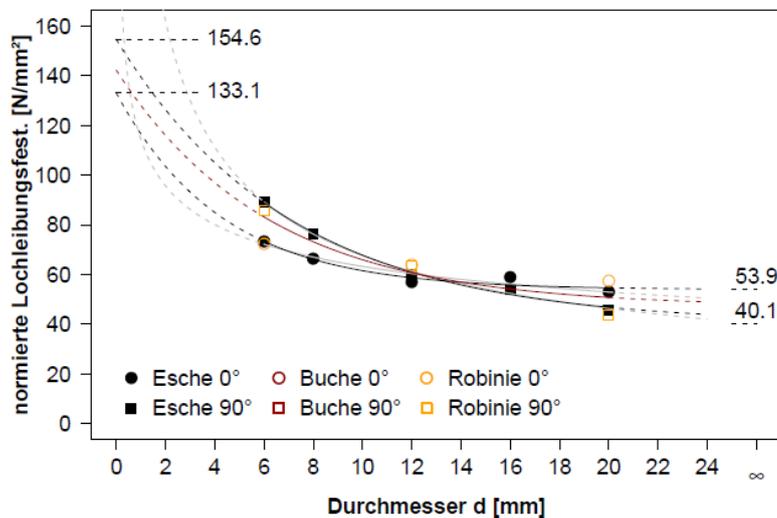


Abb. 2.11: Lochleibungsfestigkeit in Abhängigkeit des Durchmessers nach *Hübner (2013)*

Für die angepasste Kurve der korrigierten Mittelwerte der Festigkeit aus den Lochleibungsprüfungen von Eschenholz gibt *Hübner (2013)* eine Potenzfunktion an.

$$f_{h,0,mean} = 114d^{-0,257} \quad \text{für } \alpha = 0^\circ \text{ und Eschenholz} \quad \text{Gl. (3)}$$

d Stabdübeldurchmesser in mm

$f_{h,0,mean}$ Lochleibungsfestigkeit parallel zur Faserrichtung ($\alpha = 0^\circ$) in N/mm²

Gl. (4) und Gl. (5) geben die Ausgleichskurven aller Mittelwerte und 5%-Quantilwerte für alle von *Hübner (2013)* geprüften Serien an. In Abb. 2.11 ist Gl. (4) in Rot dargestellt.

$$f_{h,mean} = 54,0 + 65,1e^{-0,174d} \quad \text{für Buche, Esche und Robinie mit } r^2_{adj} = 0,801 \quad \text{Gl. (4)}$$

$$f_{h,05} = 45,9 + 98,8e^{-0,244d} \quad \text{für Buche, Esche und Robinie mit } r^2_{adj} = 0,914 \quad \text{Gl. (5)}$$

d Stabdübeldurchmesser in mm

$f_{h,mean}$ Lochleibungsfestigkeit in N/mm²

$f_{h,05}$ 5%-Quantil der Lochleibungsfestigkeit parallel zur Faserrichtung in N/mm²

r^2_{adj} angepasstes Bestimmtheitsmaß

Von *Traetta und Schickhofer (2007)* wird Gl. (6) für die bezogene Lochleibungsfestigkeit $f_{h,0}/\rho_{12}$ parallel zu Faserrichtung für Fichte und Stabdübel mit Durchmesser 8, 12 und 20 mm angegeben. Dabei zeigt sich kein linearer Zusammenhang wie in *ON EN 1995-1-1:2009* angegeben, sondern eine Potenzfunktion.

$$\frac{f_{h,0}}{\rho_{12}} = 0,1 \cdot d^{-0,15} \quad \text{bzw} \quad f_{h,0} = 0,1 \cdot d^{-0,15} \cdot \rho_{12} \quad \text{Gl. (6)}$$

d Stabdübeldurchmesser in mm
 $f_{h,0}$ Lochleibungsfestigkeit parallel zur Faserrichtung in N/mm²
 ρ_{12} auf 12 % Holzfeuchte umgerechnete Rohdichte in kg/m³

2.2.2 Einfluss der Rohdichte bzw. Holzart

Auch die Rohdichte geht in Gl. (2) aus *ON EN 1995-1-1:2009* linear in die Berechnung der charakteristischen Lochleibungsfestigkeit ein.

Auch nach *Ehlbeck und Werner (1992)* kann ein linearer Zusammenhang, unabhängig von der Holzart, zwischen Lochleibungsfestigkeit und Rohdichte angenommen werden.

Laut der von *Hübner (2013)* ermittelten Gl. (20) für die Lochleibungsfestigkeit von Laubholz geht die Rohdichte mit einer Potenz von 1,57 ein.

2.2.3 Einfluss des Winkels zwischen Kraft- und Faserrichtung (Beanspruchungswinkel)

Der Winkel zwischen Kraft- und Faserrichtung beeinflusst das Last-Verformungsverhalten und die Lochleibungsfestigkeit wesentlich.

Die Berechnung der charakteristischen Lochleibungsfestigkeit unter einem Winkel α zur Faser ist in *ON EN 1995-1-1:2009* anhand Gl. (7) geregelt. Daraus ist die Verringerung der Lochleibungsfestigkeit bei steigendem Kraft-Faser-Winkel abzulesen.

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \quad \text{Gl. (7)}$$

dabei ist

$$k_{90} = \begin{cases} 1,35 + 0,015d & \text{für Nadelhölzer} \\ 1,30 + 0,015d & \text{für Funierschichtholz LVL} \\ 0,90 + 0,015d & \text{für Laubhölzer} \end{cases}$$

ρ_k charakteristische Rohdichte in kg/m³
 d Durchmesser des Verbindungsmittels in mm
 α Winkel zwischen Kraft- und Faserrichtung in Grad
 $f_{h,0,k}$ char. Wert der Lochleibungsf. bei Kraft-Faser-Winkel $\alpha = 0^\circ$ in N/mm² aus Gl. (2)
 $f_{h,\alpha,k}$ char. Wert der Lochleibungsf. bei Kraft-Faser-Winkel α in N/mm²
 k_{90} Beiwert für das Verhältnis von $f_{h,0}$, zu $f_{h,90}$

Die Hankinson-Funktion beschreibt die Abhängigkeit der Lochleibungsfestigkeit vom Kraft-Faser-Winkel und in Abb. 2.12 ist der qualitative Verlauf dargestellt.

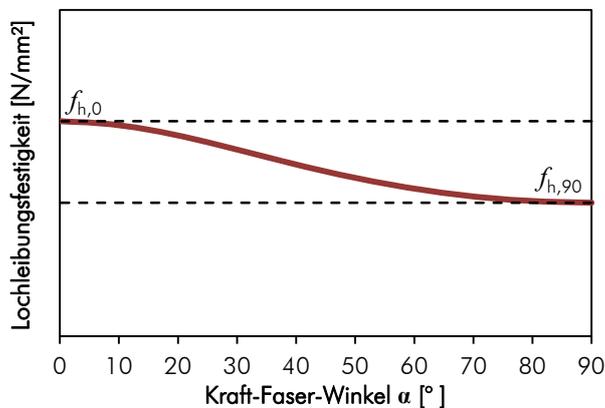
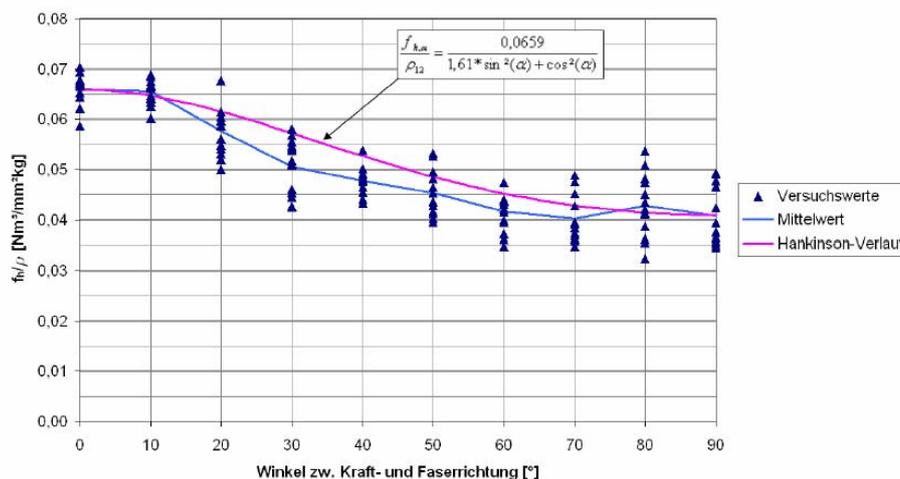


Abb. 2.12: Abhängigkeit der Lochleibungsfestigkeit vom Kraft-Faser-Winkel α , qualitativ

Spörk (2007) führte Lochleibungsprüfungen an 140 Probekörpern aus Fichte durch und variierte dabei den Kraft-Faser-Winkel zwischen 0° und 90° in 10°-Schritten. In Abb. 2.13 ist die bezogene Lochleibungsfestigkeit über den Kraft-Faser-Winkel dargestellt. Die Versuchsergebnisse werden mit der in Pink dargestellten Hankinson-Funktion verglichen, wobei eine Abweichung von bis zu 11,6 % festgestellt wird. Die anhand der Prüfergebnisse empirisch ermittelte Ausgleichsfunktion für die bezogene Lochleibungsfestigkeit ist in Gl. (8) angeführt.

$$\frac{f_{h,\alpha}}{\rho_{12}} = \frac{0,0659}{(1 - 1,61) \cdot [\cos \alpha]^{3,64} + 1,61} \quad \text{Gl. (8)}$$

- ρ_{12} charakteristische Rohdichte in kg/m³
- α Winkel zwischen Kraft- und Faserrichtung in Grad
- $f_{h,\alpha}$ char. Wert der Lochleibungsfestigkeit bei Kraft-Faser-Winkel α in N/mm²



	0 °	10 °	20 °	30 °	40 °	50 °	60 °	70 °	80 °	90 °
Abweichung des Mittelwertes zum Hankinsonverlauf in %	0,20	1,30	-6,23	-11,61	-9,37	-6,66	-7,96	-6,05	3,26	-0,29

Abb. 2.13: Abhängigkeit der mittleren bezogenen Lochleibungsfestigkeit vom Kraft-Faser-Winkel nach Spörk (2007)

Traetta und Schickhofer (2007) führten 306 Lochleibungsprüfungen an Fichte mit galvanisch verzinkten Stabdübeln mit einem Durchmesser von 12 mm durch. Dabei wurde der Kraft-Faser-Winkel variiert und der Zusammenhang mit der Lochleibungsfestigkeit untersucht. Als Ergebnis der Arbeit werden folgende empirisch ermittelte Gleichungen für die Lochleibungsfestigkeit unter Berücksichtigung des Kraft-Faser-Winkels vorgeschlagen.

$$\frac{f_{h,\alpha}}{\rho_{12}} = \frac{0,1 \cdot d^{-0,15}}{(1 - k_{90}) \cdot \cos(\alpha)^4 + k_{90}} \quad \text{Gl. (9)}$$

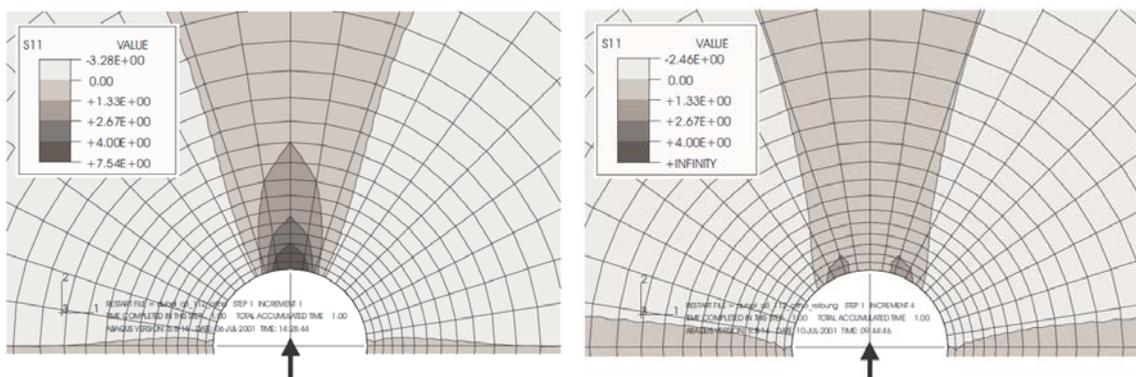
dabei ist

$$k_{90} = d^{0,17}$$

- d Stabdübeldurchmesser in mm
- ρ_{12} charakteristische Rohdichte in kg/m^3
- α Winkel zwischen Kraft- und Faserrichtung in Grad
- $f_{h,\alpha}$ char. Wert der Lochleibungsfestigkeit bei Kraft-Faser-Winkel α in N/mm^2
- k_{90} Beiwert für das Verhältnis von $f_{h,0}$ zu $f_{h,90}$

2.2.4 Einfluss der Stabdübeloberfläche

Schmid (2002) untersuchte anhand von Finite-Element-Simulationen den Einfluss des Reibungsbeiwertes zwischen Stabdübel und Holz. Dabei wurde der Reibungskoeffizient variiert. In Abb. 2.14 sind die Ergebnisse der Arbeit dargestellt. Es kann beobachtet werden, dass die Spannungsspitze, die in (a) ersichtlich ist, durch einen Reibkoeffizient größer 0 deutlich vermindert wird, siehe (b). Ein gleichmäßigeres Einleiten der Kraft kann beobachtet werden.



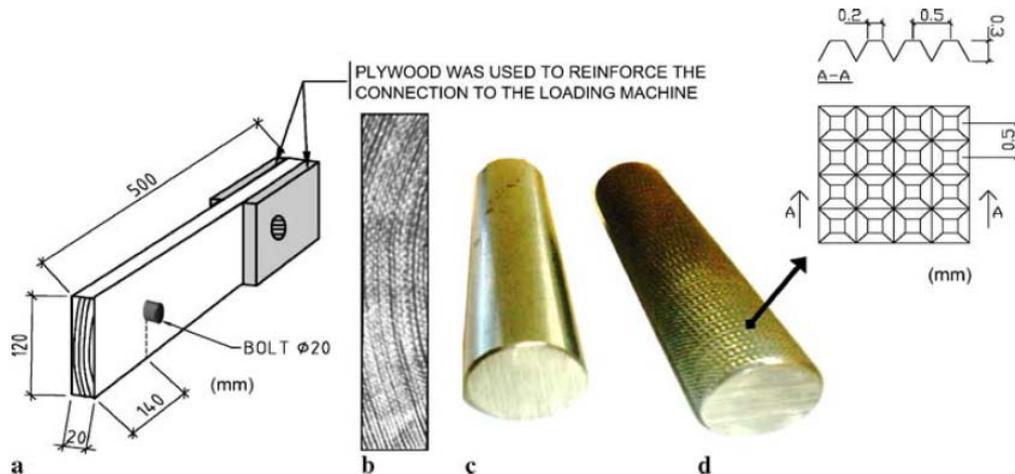
(a) Reibungskoeffizient $\mu = 0,0$

(b) Reibungskoeffizient $\mu = 0,339$

Abb. 2.14: Querzugspannungen im Nahbereich eines Stabdübels nach Schmid (2002)

Die Oberfläche des Stabdübels hat einen starken Einfluss auf den Reibungskoeffizient zwischen Verbindungsmittel und Holz und somit auch auf die Lochleibungsfestigkeit. Für den Reibungskoeffizient können nur Größenordnungen angegeben werden, da er von dem angrenzenden Holz, der Oberfläche des Verbindungsmittels und des Bohrloches und dem Spiel zwischen Verbindungsmittel und Bohrloch abhängig ist.

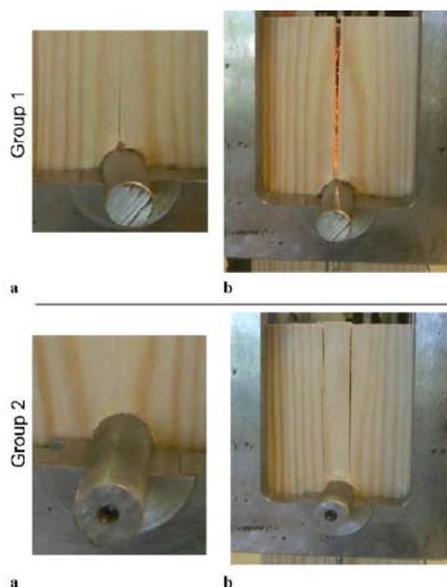
Sjödin *et al.* (2008) untersuchten den Einfluss der Reibung zwischen Stabdübel und umgebenden Holz anhand zweier unterschiedlicher Dübeloberflächen. In der ersten Gruppe wurden Dübel mit glatter Oberfläche, in der zweiten Gruppe wurden Dübel mit rauer Oberfläche geprüft, siehe Abb. 2.15. Die Versuche mit einem Stabdübeldurchmesser von 20 mm zeigten, dass die zunehmende Oberflächenrauigkeit des Stabdübels auch die Lochleibungsfestigkeit zunehmen lässt, siehe Abb. 2.17.



(a) Geometrie der Verbindung (b) Ansicht des Hirnholzes (c) Stabdübel mit glatter Oberfläche (d) Stabdübel mit rauer Oberfläche und deren Struktur

Abb. 2.15: Versuchskonfiguration nach Sjödin *et al.* (2008)

Die in Abb. 2.16 dargestellten Bruchbilder zeigen ein unterschiedliches Versagen der Probekörper. Während bei den glatten Stabdübeln ein Aufspalten stattfindet, kann bei den rauen Stabdübeln ein Blockscheren beobachtet werden.



(a) Aufnahme vor dem Bruch (b) Bruchbild

Abb. 2.16: Typische Versuchsbeobachtung nach Sjödin *et al.* (2008)

Group	Joint	Load-bearing capacity (kN)	Mean capacity (kN)	COV (%)
1	1	12,7	13,3	7,6
	2	13,4		
	3	12,3		
	4	14,6		
2	1	19,0	19,1	0,4
	2	19,1		
	3	19,0		
	4	19,2		

Note: COV = Coefficient of variation

Abb. 2.17: Ergebnisse der Tragfähigkeitsversuche nach Sjödin *et al.* (2008)

Traetta und Schickhofer (2007) führten Versuche an Stabdübeln mit verschiedenen Oberflächen mit Durchmesser 20 mm durch. Die Versuche wurden an Kiefer unter einem Kraft-Faser-Winkel von $\alpha = 0^\circ$ ausgeführt. In Abb. 2.18 sind die normierten Lochleibungsfestigkeiten der marktüblichen, galvanisch verzinkten Stabdübel und der nicht verzinkten Stabdübel dargestellt. Die Lochleibungsfestigkeiten sind bei Stabdübeln mit rauher Oberfläche um rund 25 % höher als bei der Referenzserie.

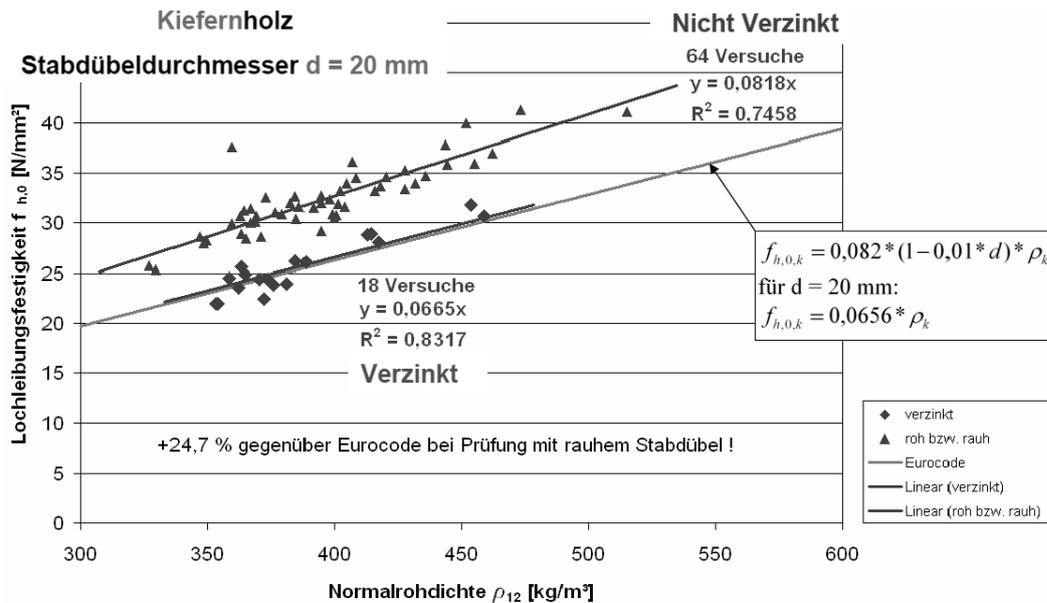


Abb. 2.18: Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit der Stabdübel auf die Lochleibungsfestigkeit nach Traetta und Schickhofer (2007)

2.2.5 Einfluss der Bohrlochoberfläche

Spörk (2007) führte in seiner Diplomarbeit 113 Lochleibungsversuche an Probekörpern aus Kiefer durch. Der dafür verwendete Stabdübeldurchmesser betrug 12 mm. Die erste Versuchsserie mit 78 Probekörpern wurde mit fehlerhaften, ausgerissenen Bohrungen hergestellt, bei der zweiten Versuchsserie wurden die Bohrungen exakt ausgeführt. Der Unterschied im Mittelwert der mittleren bezogenen Lochleibungsfestigkeit der zwei Serien betrug 7,2 %, siehe Abb. 2.19.

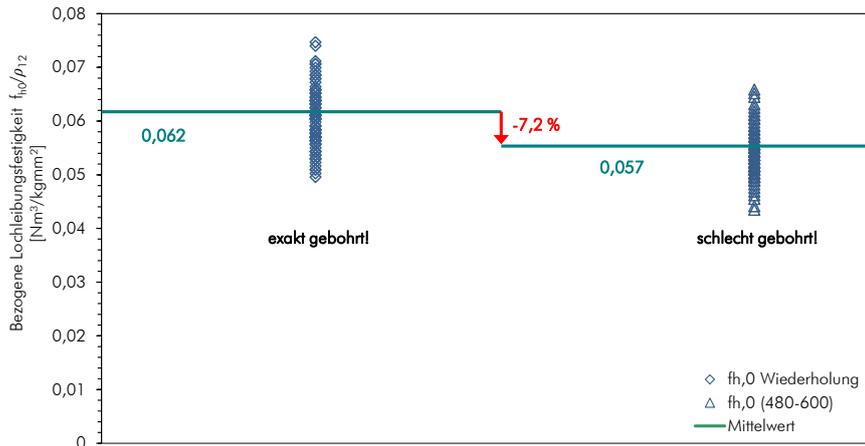


Abb. 2.19: Vergleich der bezogenen Lochleibungsfestigkeit bei fehlerhaft und exakt gebohrten Stabdübellöchern vergleiche *Spörk (2007)*

Die Eindrückung des Stabdübels in das angrenzende Holz war ebenfalls bei den exakt gefertigten Bohrlöchern größer. Bei einer Rohdichte von 480 kg/m³ bis 500 kg/m³ betrug die mittlere Verschiebung bei F_{max} bei den exakt gebohrten Löchern 3,87 mm und bei den fehlerhaften 1,05 mm, siehe Abb. 2.20.

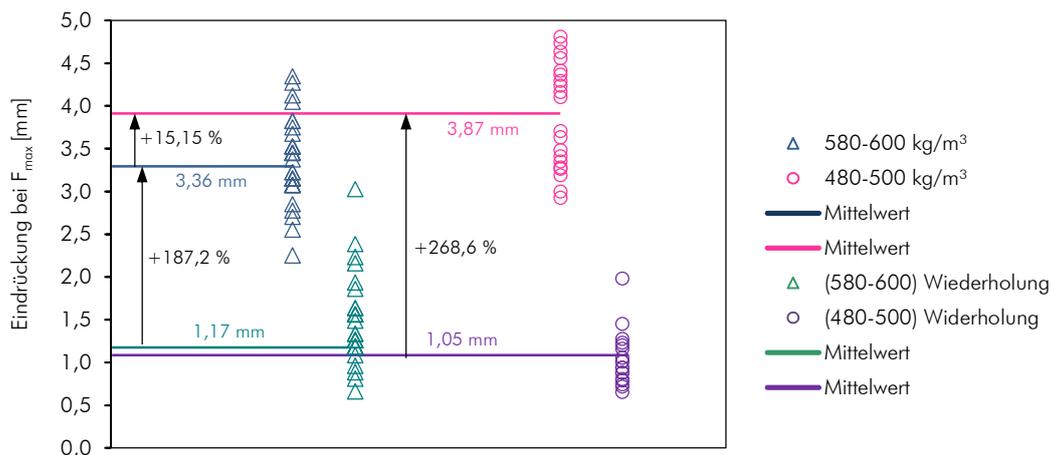


Abb. 2.20: Vergleich der Eindrückung mit fehlerhaften und exakt gebohrten Bohrlöchern bei Erreichen von F_{max} nach *Spörk (2007)*

2.2.6 Einfluss des Spiels zwischen Bohrloch und Stabdübel

Laut *Gehri (1982)* wird die Bedeutung des Lochspiels für die Tragfähigkeit überschätzt. Lediglich für die Tragfähigkeit des Systems kann die Verformung der Verbindung einen entscheidenden Einfluss haben. Eine ausreichende Klemmwirkung der Stabdübel im Bohrloch wird benötigt um bei statischer Beanspruchung auf weitere Sicherungsmaßnahmen verzichten zu können. Dieser Passsitz wird durch exakte Fertigung der Bohrlöcher und Einschlagen der Stabdübel erreicht. Ein Spiel zwischen Bohrloch und Stabdübel hat keine bedeutende Auswirkung auf die Lochleibungsfestigkeit. Bei großem Spiel ist eine erhebliche Verformung der Lochleibung nötig, damit der Bolzen Kräfte auf der halben Oberfläche übertragen kann. Dadurch entstehen lokale Spannungsspitzen und ein Aufspalten des Holzes wird begünstigt.

2.2.7 Einfluss der Holzfeuchte

Abb. 2.21 zeigt das hygroskopische Gleichgewicht in Abhängigkeit der Temperatur nach Keylwerth (1949) in Niemz (1993, S.49). Aus dieser Darstellung kann die Holzfeuchte von Sitka Fichte in Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen abgelesen werden. Es ist ersichtlich, dass die Holzfeuchte, relative Luftfeuchte und Temperatur miteinander verknüpft sind.

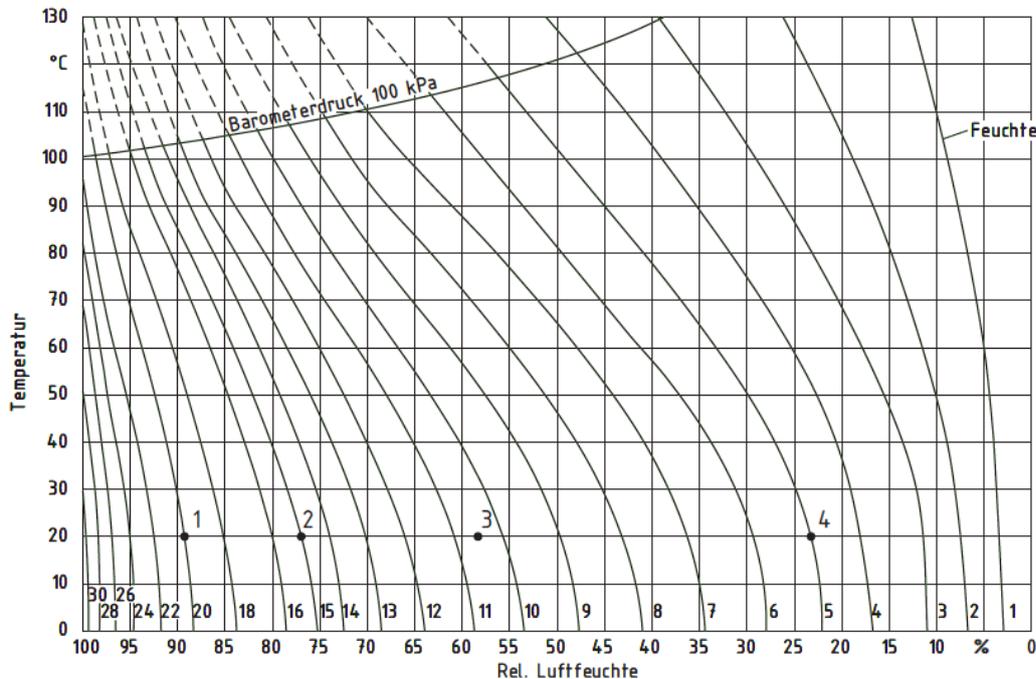
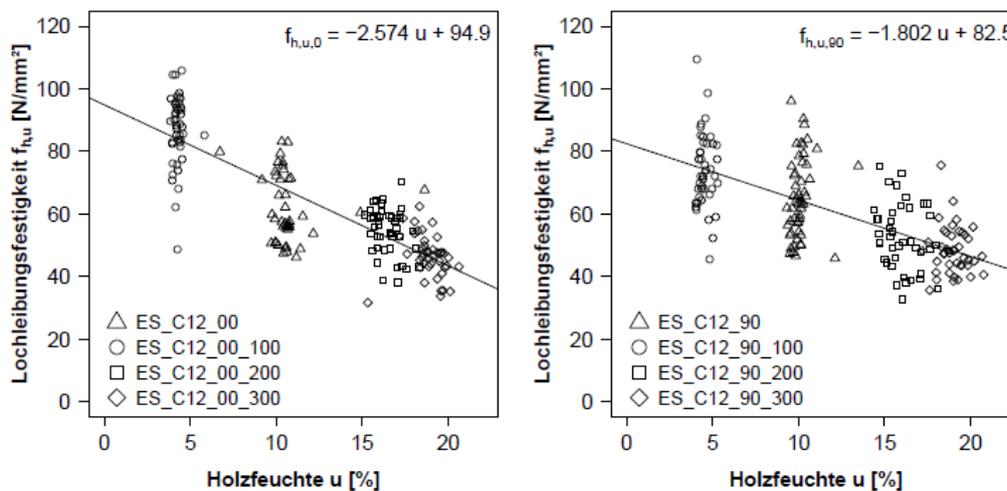


Abb. 2.21: Hygroskopisches Gleichgewicht von Sika-Fichte in Abhängigkeit der Temperatur nach Keylwerth (1949) in Niemz (1993, S. 49)

In Abb. 2.22 sind die von Hübner (2013) veröffentlichten Ergebnisse der Lochleibungsfestigkeit in Abhängigkeit der Holzfeuchte für Esche dargestellt.



(a) Kraft-Faser-Winkel $\alpha = 0^\circ$

(b) Kraft-Faser-Winkel $\alpha = 90^\circ$

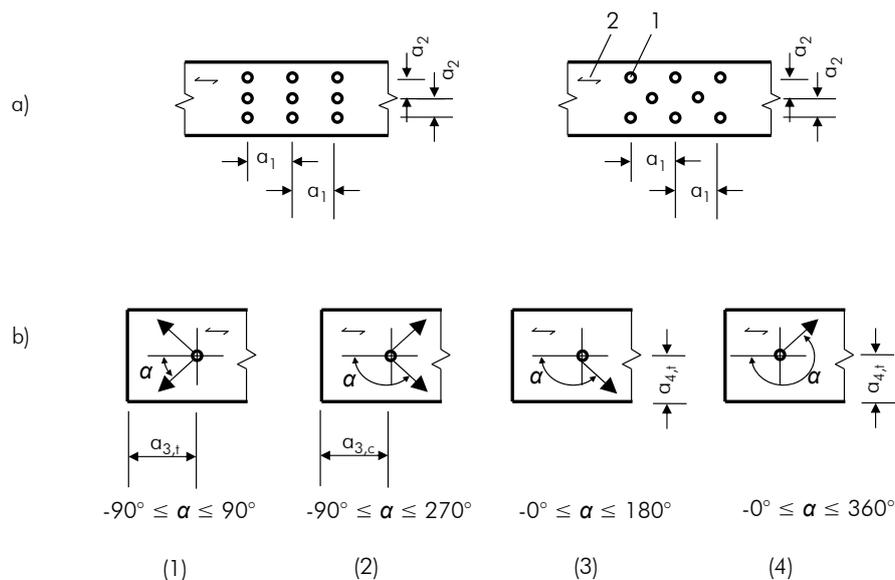
Abb. 2.22: Abhängigkeit der Lochleibungsfestigkeit von der Holzfeuchte bei Eschenholz bei Stabdübeldurchmesser 12 mm nach Hübner (2013)

Sowohl bei einer Belastung in als auch normal zur Faserrichtung wurde festgestellt, dass mit zunehmender Holzfeuchte die Lochleibungsfestigkeit abnimmt. Ein Zusammenhang zwischen Holzfeuchte und Spaltneigung der Probekörper aus Esche wurde dokumentiert. Bei Probekörpern mit einer Holzfeuchte von 10,7 % spalteten 70 % der Probekörper vor einer Verschiebung von 5 mm auf. Betrug die Holzfeuchte 16,5 % spaltete kein einziger Probekörper frühzeitig. Lag die Holzfeuchte mit 4,3 % sehr niedrig, versagten 43 von 44 Probekörpern durch Aufspalten vor der in *ON EN 383:2007* angeführten Grenze von 5 mm.

2.2.8 Einfluss der Rand- und Mindestabstände

Genügend große Rand- und Mindestabstände dienen unter anderem dazu, die Querzugbeanspruchung des Holzes bei stiftförmigen Verbindungen zu minimieren. Zudem soll das Blockscheren sehr kompakter Verbindungen mit großen Durchmessern verhindert werden.

In *ON EN 1995-1-1:2009* sind die Rand- und Mindestabstände in Abhängigkeit des Kraft-Faser Winkels und des Verbindungsmitteldurchmessers geregelt, siehe Abb. 2.23 und Abb. 2.24.



Legende

- (1) beanspruchtes Hirnholzende
- (2) unbeanspruchtes Hirnholzende
- (3) beanspruchter Rand
- (4) unbeanspruchter Rand

- 1 Verbindungsmittel
- 2 Faserrichtung des Holzes

- (a) Abstände in Faserrichtung innerhalb einer Reihe und rechtwinklig zur Faserrichtung zwischen den Reihen
- (b) Abstände vom Hirnholzende und vom Hand

Abb. 2.23: Verbindungsmittelabstände nach *ON EN 1995-1-1:2009*

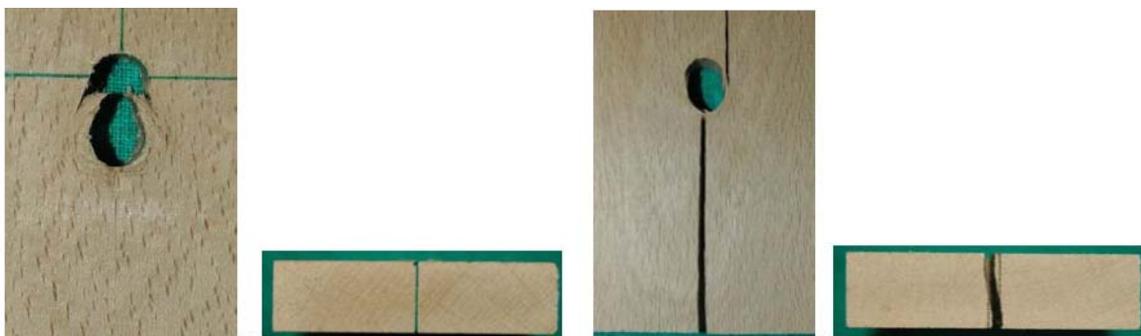
Abstände	Winkel	Mindestabstände
a_1 (in Faserrichtung)	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$(3 + 2 \cos\alpha)d$
a_2 (rechtwinklig zur Faserrichtung)	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$3d$
$a_{3,t}$ (beanspruchtes Hirnholzende)	$-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	$\max(7d; 80 \text{ mm})$
$a_{3,c}$ (unbeanspruchtes Hirnholzende)	$90^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$	$\max(a_{3,t} \sin\alpha ; 3d)$
	$150^\circ \leq \alpha \leq 210^\circ$	$3d$
	$210^\circ \leq \alpha \leq 270^\circ$	$\max(a_{3,t} \sin\alpha ; 3d)$
$a_{4,t}$ (beanspruchter Rand)	$0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$	$\max[(2 + 2\sin\alpha)d; 3d]$
$a_{4,c}$ (unbeanspruchter Rand)	$180^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$3d$

Abb. 2.24: Rand- und Mindestabstände von Stabdübeln nach ON EN 1995-1-1:2009

In *Gehri (2012)* wurde der Einfluss des Randabstandes auf die Lochleibungsfestigkeit bei Zugbelastung untersucht. Dabei werden die Versuchsdurchführung und die Ergebnisse der Prüfungen mit einem Stabdübeldurchmesser von 12 mm in Esche dargestellt. Die Holzdicke der Versuchskörper betrug 40 mm und die Belastung erfolgte auf Zug. Der beanspruchte Randabstand wurde im Bereich von $3,75d$ bis $10d$ variiert. Die variierten Randabstände betragen 45, 60, 75, 90, 105 und 120 mm. Die Rohdichte der Probekörper lag zwischen 570 kg/m^3 und 740 kg/m^3 . Die Abmessungen der 16 Proben aus möglichst störungsfreiem Eschenholz betragen 40/72/700 mm. Bei der Auswertung konnte trotz unterschiedlichen belasteten Randabstands kaum ein Einfluss auf die Lochleibungsfestigkeit festgestellt werden.

2.2.9 Einfluss der Neigung der Jahrringtangente

Sandhaas et al. (2010) stellten bei Lochleibungsprüfungen von Buche mit hss Stabdübeln 12 mm eine hohe Duktilität fest. Die Probekörper erfuhren Verschiebungen von 15 mm ohne zu spalten. Es wurden zwei Probekörper miteinander verglichen, siehe Abb. 2.25 (a) und (b). Bei Probekörper (a) sind die Jahrringe 45° geneigt und er spaltet nicht auf. Die Jahrringe des zweiten Probekörpers sind 0° geneigt und die Probe zeigt einen durchgehenden Spalt. Der Unterschied hinsichtlich der Spaltneigung wird auf die Holzstrahlen von Buche zurückgeführt. Es wird davon ausgegangen, dass das Aufspalten in radialer Richtung zwischen den Holzstrahlen deutlich leichter einsetzt als in tangentialer Richtung, da die Holzstrahlen wie natürliche Verstärkungen wirken.



(a) Buche mit 45° Jahrringlage

(b) Buche mit 0° Jahrringlage

Abb. 2.25: Probekörper mit Stabdübel 12 mm nach *Sandhaas et al. (2010)*

Hübner (2013) ermittelte in den durchgeführten Versuchen, dass mit zunehmender Rohdichte und auch Lochleibungsfestigkeit die Jahrringbreite bei Eschenholz zunimmt, Abb. 2.26 (a). Bei parallel zur Faserrichtung beanspruchtem Eschenholz verringert sich die Verschiebung bei F_{max} mit zunehmendem Jahrringwinkel, siehe (d). Der gleiche Trend ist für die Verschiebung bei F_u in (e) dargestellt. In (f) ist zu erkennen, dass die Lochleibungsfestigkeit bei steigendem Jahrringwinkel nicht signifikant sinkt.

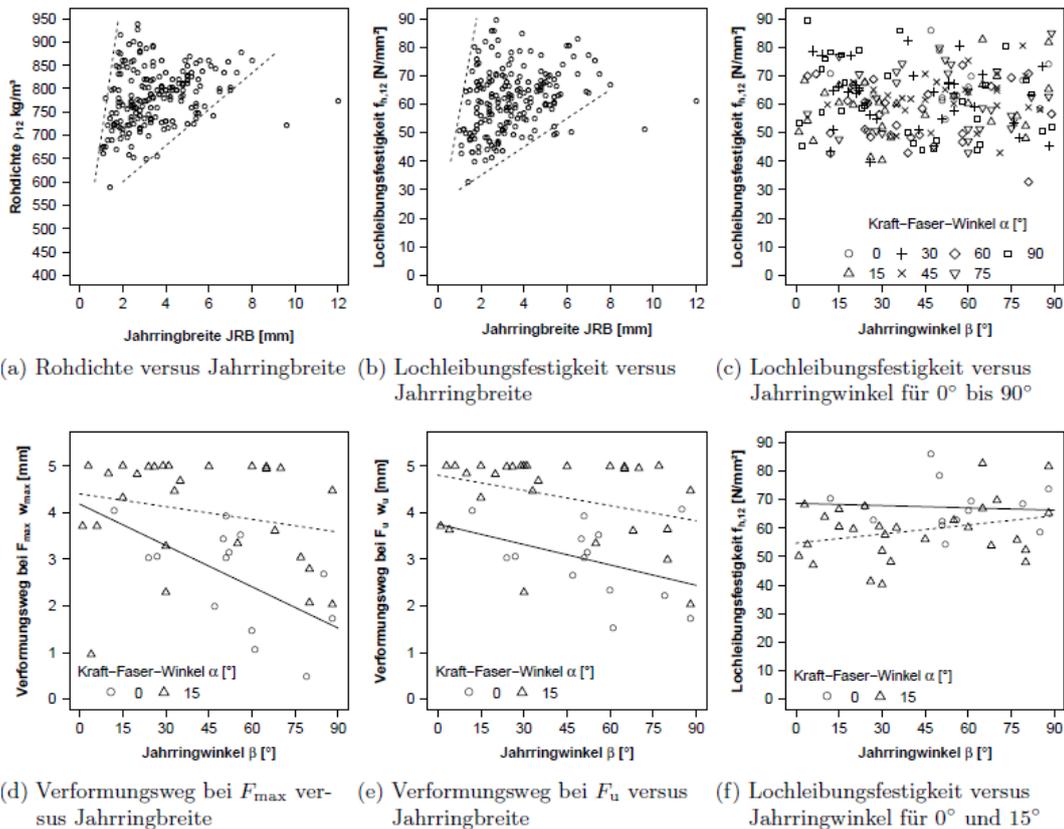


Abb. 2.26: Streudiagramme zum Einfluss der Jahrringe auf die Lochleibungsfestigkeit und die Verformungswege von Eschenholz bei Stabdübeln mit 12 mm nach Hübner (2013)

2.2.10 Einfluss der Bolzenschlankheit

Bei der Berechnung der Lochleibungsfestigkeit wird von einer gleichmäßigen Lastverteilung entlang des Stabdübeln ausgegangen. Ist der Bolzendurchmesser im Verhältnis zur Holzdicke zu gering biegt er sich und die Lastverteilung ist nicht mehr gleichmäßig. Die Bolzenschlankheit λ gibt das Verhältnis von Mittelholzdicke zum Bolzendurchmesser d in Holz-Holz-Verbindungen an.

In Mischler (1998), Original von Gehri (1981) und Gehri und Fontana (1983), wurden Verbindungen mit sechs Passbolzen $d = 16$ mm, Fließgrenze $f_y = 262$ N/mm² und Zugfestigkeit $f_u = 404$ N/mm² untersucht. Es wurde Brettschichtholz-Fichte mit einer mittleren Rohdichte bei 12 % Feuchtigkeit von $\rho_{12} = 484$ kg/m³ eingesetzt. In Abb. 2.27 und Abb. 2.28 sind die Abmessungen und die Versagenlasten der Proben dargestellt.

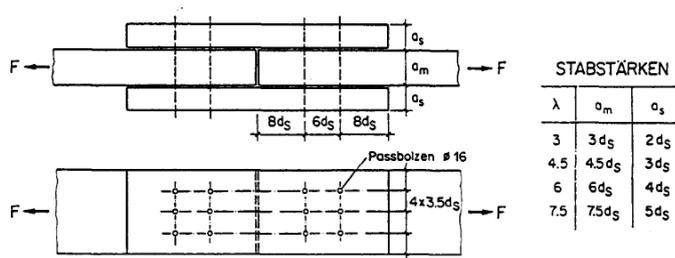


Abb. 2.27: Abmessungen der Proben nach Gehri (1981) in Mischler (1998)

Bei der Studie wurden drei Versagensarten definiert. Holzversagen tritt in Verbindungen mit gedungenen Bolzen durch Lochleibungsversagen ein. Am Bolzen treten keine Verformungen auf. Die zweite Versagensart stellt das gemischte Versagen dar. Dabei beginnt sich der Bolzen unter Belastung elastisch und auch plastisch zu verformen. Die dritte Versagensart stellt das Bolzenversagen dar. Dabei ist die Bolzenschlankheit am Größten und der Bolzen wird stark verbogen sodass sich Fließzonen ausbilden. Eine Tragfähigkeitserhöhung kann nicht mehr erzielt werden.

Bolzenschlankheit	Versagenslast (Mittelwert aus 3 Versuchen)
3	122,5 kN
4,5	136,1 kN
6	154,2 kN
7,5	166,8 kN

Abb. 2.28: Versagenslasten vergleiche Mischler (1998), Original von Gehri (1981) und Gehri und Fontana (1983)

2.2.11 Einfluss der Stahlgüte

Sandhaas et al. (2010) prüften die Lochleibungsfestigkeit von Fichte, Buche, Purpleheart, Tonkabaum aus Peru und Brasilien und Azobé an 139 Proben. Dazu wurden Stabdübel 12 mm und 24 mm mit Stahlgüte hss und vhss verwendet. Es konnte, bei ähnlicher Rohdichte und Holzfeuchte, ein Verhältnis der Lochleibungsfestigkeiten von bis zu 1,35 beim Vergleich der vhss zur hss Serie festgestellt werden, siehe Abb. 2.29. Ein Einfluss der Rauigkeit konnte ausgeschlossen werden, da für die Stabdübel beider Stahlgüten $R_a = 0,88 \mu\text{m}$ ermittelt wurde. Zudem wird erwähnt, dass kein signifikanter Einfluss des Verbindungsmitteldurchmesser und des Elastizitätsmoduls festgestellt wurde. Es wird festgehalten, dass ein Unterschied der Lochleibungsfestigkeit bei den beiden Serien mit unterschiedlicher Stahlgüte beobachtet wurde. Die Prüfkfiguration ist Abb. 3.4 zu entnehmen.

Wood species	Dowel diameter (mm)	Steel grade	Moisture content (%)		Density at test (kg/m ³)		f _{h,test} (MPa)		v _{ult} (mm)		f _{h,vhss} / f _{h,hss}	Ductility D	
			Mean	COV	Mean	COV	Mean	COV	Mean	COV		Mean	COV
Spruce	12	hss	13.3	10.5	482	6.6	24.6	14.6	4.8	28.5	1.28	8.7	56.6
		vhss	12.2	12.3	420	15.2	31.5	14.0	10.2	40.2		16.2	52.6
	24	hss	12.3	3.3	469	5.9	28.2	8.2	6.0	22.2	1.35	7.4	25.9
		vhss	12.4	2.4	463	3.0	38.0	8.4	9.8	39.6		10.4	36.8
Beech	12	hss	11.8	0.8	664	1.5	45.8	14.2	8.0	53.0	1.14	17.7	68.1
		vhss	11.8	0.8	636	3.0	52.3	6.7	9.6	37.9		18.0	30.6
	24	hss	12.1	5.8	725	4.2	49.9	2.6	10.6	39.3	1.17	31.5	45.6
		vhss	12.0	7.5	730	2.4	58.6	2.2	9.9	38.3		34.9	45.6
Purpleheart	12	hss	14.0	3.6	995	2.3	70.0	16.9	3.6	53.9	1.24	6.1	48.2
		vhss	14.6	4.1	949	2.8	87.0	4.0	4.0	51.2		5.3	51.5
	24	hss	15.5	2.6	792	19.3	52.4	27.5	6.1	24.7	1.24	11.2	28.0
		vhss	15.4	2.6	801	21.2	65.1	24.7	9.4	47.2		17.1	60.4
Cumaru Peru	12	hss	14.2	4.2	919	6.5	66.8	16.2	4.7	29.1	1.11	11.5	15.4
		vhss	14.3	5.6	893	4.6	74.3	8.6	6.3	18.8		11.9	26.0
	24	hss	15.0	2.7	938	3.3	63.6	9.1	8.3	44.6	1.17	20.4	46.6
		vhss	15.1	4.0	933	2.1	74.5	4.0	9.0	31.0		17.1	37.2
Cumaru Brazil	12	hss	12.4	1.6	1192	0.6	91.1	8.7	2.7	77.0	1.18	3.1	5.7
	vhss	13.3	5.3	1156	2.1	107.6	3.7	2.7	18.5		4.7	14.4	
Azobé	12	hss	19.7	9.1	1094	3.6	73.2	7.0	5.5	37.8	1.19	9.7	57.3
		vhss	19.3	8.8	1071	4.1	86.8	8.3	8.7	25.5		11.6	33.3
	24	hss	23.3	1.7	1045	5.1	65.7	9.7	10.8	22.4	1.13	21.1	24.6
		vhss	21.6	11.1	1042	5.7	74.1	5.1	11.5	12.7		20.1	34.0
Azobé wet	12	vhss	43.6	7.1	1229	2.8	64.1	9.4	5.0	29.5	-	7.8	32.2
	24		43.0	8.1	1222	3.1	62.9	7.6	7.3	31.9		15.3	25.1

Abb. 2.29: Ergebnisse der Lochleibungsprüfungen nach Sandhaas et al. (2010)

2.2.12 Einfluss der Art der Belastung Zug | Druck

Eine Darstellung des Spannungszustandes bei Druck- und Zugbelastung ist in Abb. 2.30 zu sehen.

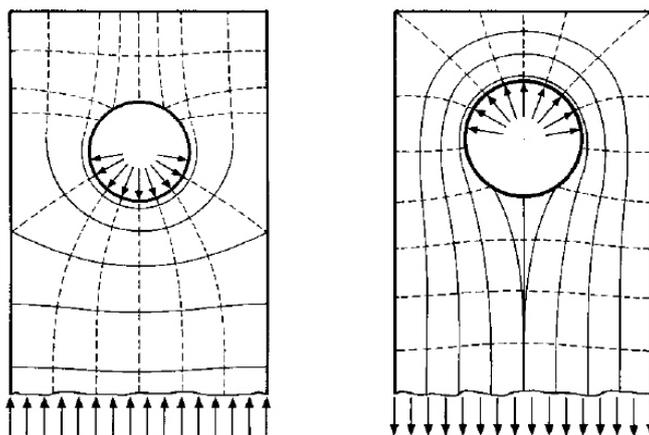


Abb. 2.30: Spannungszustand im Prüfkörper bei Druck- bzw. Zugbeanspruchung nach Gehri (1980)

Es kann festgestellt werden, dass bei Druckkrafteinleitung ein Bereich kaum größer als der Bolzendurchmesser für die Kraftübertragung benötigt wird. Bei Einleitung einer Zugkraft muss die Kraft in Belastungsrichtung durch Schubfluss in der Vorholzlänge abgebaut werden, wo-

bei sich aus Gleichgewichtsgründen Zugkräfte seitlich neben der Bohrung einstellen. Eine Umlenkung der eingebrachten Kraft ist somit nötig, wodurch ein Unterschied in der Lochleibungsfestigkeit vermutet wird.

Zum Einfluss der Belastungsart wurden im Rahmen dieser Masterarbeit Prüfungen durchgeführt. Eine eingehende Literaturrecherche zu diesem Einfluss und die Darstellung der Versuche samt Ergebnissen sind in den Abschnitten 3, 4 und 5 zu finden.

2.3 Fließmoment $M_{y,Rk}$

Laut *ON EN 409:2009* wird als Fließmoment das „(...) Biegemoment bei Verformung des Probekörpers durch einen vorgegebenen Biegewinkel (...)“ bezeichnet. Die Bestimmung des Fließmoments eines Stabdübels ist in *ON EN 409:2009* anhand eines 4-Punkt-Biegeversuches geregelt, siehe Abb. 2.31. Der wichtigste Parameter zur Bestimmung des Fließmoments ist der Biegewinkel α , von dem der Plastifizierungsgrad des Stabdübels abhängt.

Die Gl. (10) ist in *ON EN 1995-1-1:2009* zur Berechnung des charakteristischen Wertes des Fließmoments angegeben.

$$M_{y,Rk} = 0,3 f_{u,k} d^{2,6} \quad \text{Gl. (10)}$$

$M_{y,Rk}$ charakteristischer Wert des Fließmomentes in Nmm
 $f_{u,k}$ charakteristischer Wert der Zugfestigkeit in N/mm²
 d Durchmesser des Verbindungsmittels in mm

Die von *Blass et al. (2000)* durchgeführte Studie zeigt ebenfalls einen deutlichen Einfluss des Biegewinkels auf das Fließmoment. Es wird erwähnt, dass das Fließmoment beim Versagen von untersuchten Verbindungen nicht vollständig ausgebildet war und die Verbindungsmittel nur teilweise plastifizierten. Deshalb wurde Gl. (11) zur wirklichkeitsnäheren Abbildung des Fließmoments entwickelt.

$$M_{y,k} = 0,27 f_{u,k} d^{2,6} \quad \text{Gl. (11)}$$

$M_{y,k}$ charakteristischer Wert des Fließmomentes in Nmm
 d Durchmesser des Verbindungsmittels in mm
 $f_{u,k}$ charakteristischer Wert der Zugfestigkeit in N/mm²

2.3.1 Einfluss des Durchmessers des Verbindungsmittels

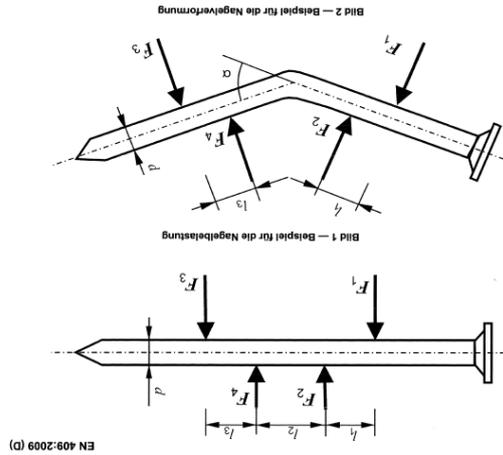
Wie in Gl. (10) dargestellt, geht der Durchmesser des Verbindungsmittels mit einer Potenz von 2,6 in das Fließmoment lt. *ON EN 1995-1-1:2009* ein. Anhand Abb. 2.31 (b) aus *ON EN 409:2009* kann eine Verringerung des Biegewinkels bei steigendem Durchmesser festgestellt werden. Auch *Blass et al. (2000)* gibt eine Potenz von 2,6 an, siehe Gl. (11).

2.3.2 Einfluss der Zugfestigkeit

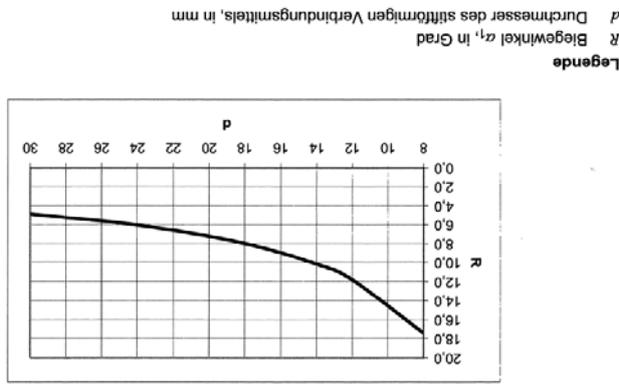
Aus Gl. (10) ist ersichtlich, dass in *ON EN 1995-1-1:2009* die Zugfestigkeit des Verbindungsmittels linear in die Berechnung des FlieBmoments eingehet. Auch in die von *Blass et al. (2000)* entwickelte Gl. (11) geht die Zugfestigkeit linear ein.

2.3.3 Einfluss des Biege winkels des Stabdübels

Der Plastifizierungsgrad des Verbindungsmittels hängt vom Biege winkel ab. Der Biege winkel von Stabdübeln wird in *ON EN 409:2009* mit $110/d$ definiert. In Abb. 2.31 ist der 4-Punkt-Biegeversuch zur Ermittlung des FlieBmoments dargestellt. Das in Abb. 2.31 (b) dargestellte Diagramm aus *ON EN 409:2009* zeigt den Biege winkel in Abhängigkeit des Verbindungsmitteldurchmessers und dient zur grafischen Ermittlung des Biege winkels.



(a) 4-Punkt-Biegeversuch
Abb. 2.31 : Biege winkel nach *ON EN 409:2009*



2.4 Gruppenwirkung

Die Berechnungen der Tragfähigkeit von Stabdübelverbindungen lt. *ON EN 1995-1-1:2009* basieren auf *Johansen* und beziehen sich auf ein Verbindungsmittel je Scherfuge. Um die Tragfähigkeit einer Verbindung mit mehreren Verbindungsmitteln zu bestimmen, werden die Tragfähigkeiten, unter Berücksichtigung von Abminderungen durch das gleichzeitige Wirken, summiert. Die Verringerung der Tragfähigkeit beim gleichzeitigen Wirken mehrerer Verbindungs mittel ergibt sich durch Ungenauigkeiten in der Fertigung, geometrischen Toleranzen und ungleichmäßiger Beanspruchung der einzelnen Verbindungsmittel. Durch die effektiv wirksamen, hintereinander in Faserichtung liegenden Verbindungsmittel n_{ef} werden diese Einflüsse berücksichtigt. Gl. (12) wird zur Berechnung der effektiven Verbindungsmittelanzahl n_{ef} angegeben:

$$n_{ef} = \min \left\{ n, n^{0,9} \sqrt[4]{\frac{a_1}{13d}} \right\} \quad \text{Gl. (12)}$$

- a_1 Abstand in Faserrichtung in mm, siehe Abschnitt 2.2.8
 d Durchmesser des Verbindungsmittels in mm
 n Anzahl der Bolzen in der Reihe hintereinander in Faserrichtung

In *enBR (2007)* ist Gl. (13) zur Bestimmung der effektiven Verbindungsmittelanzahl für auf Abscheren beanspruchte, stiftförmige Verbindungsmittel n_{ef} angeführt.

$$n_{ef} = \left[n^{0,9} \sqrt[4]{\frac{a_1}{10d}} \right] \frac{90 - \alpha}{90} + n \frac{\alpha}{90} \quad \text{Gl. (13)}$$

- a_1 Abstand der Verbindungsmittel hintereinander in Faserrichtung in mm, siehe Abschnitt 2.2.8
 d Durchmesser des Verbindungsmittels in mm
 n Anzahl der Verbindungsmittel hintereinander in Faserrichtung
 α Winkel zwischen Kraft- und Faserrichtung

Gl. (12) und Gl. (13) berücksichtigen, dass nicht alle Verbindungsmittel gleichzeitig wirken und finden nur bei $n > 1$ Anwendung. Während in Gl. (12) der Kraft-Faser-Winkel nicht eingetragt, berücksichtigt Gl. (13) auch diesen Einfluss.

2.4.1 Einfluss des Durchmessers des Verbindungsmittels

Unter Voraussetzung der von d abhängigen Mindestabstände aus Abschnitt 2.2.8, hat der Durchmesser keinen Einfluss auf die effektive Verbindungsmittelanzahl n_{ef} . Wird für den Abstand a_1 der Verbindungsmittel in Faserrichtung ein Wert größer dem des Mindestabstandes gewählt, geht der Verbindungsmitteldurchmesser in die Berechnung ein.

2.4.2 Einfluss des Beanspruchungswinkels

Bei Gl. (13) aus *enBR (2007)* wird der Kraft-Faser-Winkel bei der Berechnung der effektiven Verbindungsmittelanzahl n_{ef} berücksichtigt. Ein steigender Beanspruchungswinkel α vergrößert die effektive Verbindungsmittelanzahl n_{ef} . Bei einer Belastung rechtwinkelig zur Faserrichtung entspricht in diesem Berechnungsmodell die effektive Verbindungsmittelanzahl der Anzahl der vorhandenen Verbindungsmittel.

2.4.3 Einfluss der Anzahl der Verbindungsmittel

Es muss bereits bei einer Verbindungsmittelanzahl in Faserrichtung von $n > 1$ eine Abminderung durch Gruppenwirkung vorgenommen werden. In Abb. 2.32 ist die effektive Verbindungsmittelanzahl über der tatsächlichen Verbindungsmittelanzahl aufgetragen. Dabei wurde a_1 laut Abb. 2.24 und d mit 12 mm angenommen. In Rot ist Gl. (12) aus

ON EN 1995-1-1:2009 dargestellt. Mit einem Kraft-Faser-Winkel von 0° , 30° , 60° und 90° ist Gl. (13) aus *enBR (2007)* in Blau dargestellt.

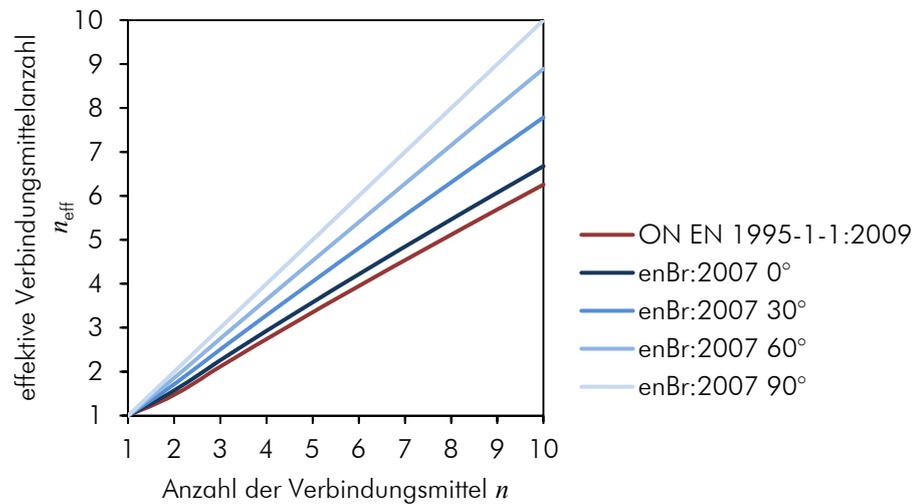


Abb. 2.32: Gegenüberstellung der Gl. (12) und Gl. (13) für die Berechnung der effektiven Verbindungsmittelanzahl bei einem Kraft-Faser-Winkel von 0° , 30° , 60° und 90°

Aus Abb. 2.32 ist der Unterschied zwischen Gl. (12) und Gl. (13) klar erkennbar. Die effektive Verbindungsmittelanzahl nach Gl. (12) ist nicht vom Kraft-Faser-Winkel abhängig. Bei der Berechnung der effektiven Verbindungsmittelanzahl mit Gl. (13) geht der Kraft-Faser-Winkel mit ein. Bei einem Kraft-Faser-Winkel von 90° besteht kein Unterschied zwischen effektiver und tatsächlicher Verbindungsmittelanzahl. Somit steigt lt. *enBR (2007)* die effektive Verbindungsmittelanzahl mit dem Kraft-Faser-Winkel an.

2.4.4 Einfluss der Rand- und Mindestabstände

Aus Gl. (12) und Gl. (13) wird ersichtlich, dass durch eine Vergrößerung des Abstandes a_1 in Faserrichtung die effektive Verbindungsmittelanzahl steigt.

2.5 Reibung

Der Seileffekt beschreibt die zusätzliche Zugkraft im Verbindungsmittel bei größeren Verformungen bzw. den Auszieh Widerstand und wird für Stabdübelverbindungen in *ON EN 1995-1-1:2009* nicht berücksichtigt.

Hübner (2013) prüfte Stabdübelverbindungen mit Eschenholz und ermittelte dabei die maximal aktivierbare Reibungskraft parallel zur Faserrichtung $F_{R||}$, siehe Gl. (14), Gl. (15) und Gl. (16). Wie in Abb. 2.33 dargestellt ist, wirkt die Reibungskraft F_R parallel zur Verbindungsmittelachse. Die Kraftkomponente $F_{R||}$ und der Reibungsbeiwert μ hängen vom Biege- winkel der Stabdübel ab. Der Biege- winkel ϑ der Stabdübel wurde aus den relativen vertikalen Verformungen und der Laschendicke von 28 mm berechnet, siehe Tab. 2.1.

$$F_{R||} = \sin(\vartheta_{cal}) \mu F_N \quad \text{Gl. (14)}$$

mit

$$\mu = \tan(\vartheta_{cal}) \quad \text{Gl. (15)}$$

und

$$F_N = \cos(\vartheta_{cal}) F_{max} \quad \text{Gl. (16)}$$

- F_N Normalkraft senkrecht zur Stabdübelachse in N
- μ Reibungskoeffizient
- $F_{R||}$ Reibungskraft parallel zur Faserrichtung in N
- ϑ_{cal} berechneter Biegewinkel der Stabdübel in Grad, siehe Abb. 2.33
- F_{max} mittlere Bruchlast in N, siehe Tab. 2.2

Tab. 2.1: mittlere Verformungen und Biegewinkel nach *Hübner (2013)*

Serie	mittlere Verformung	Standardabweichung	Variationskoeffizient	Biegewinkel bei Maximalkraft	
	w_{mean} [mm]	[mm]	CoV [%]	berechnet ϑ_{cal} [°]	gemessen ϑ_m [°]
ES_T8_00_05	14,6	1,7	11,9	27,5	29,8
ES_T8_00_10	8,1	3,8	47,7	15,8	14,5
ES_T8_00_15	5,7	1,8	31,8	13,9	11,4

Tab. 2.2: Gemittelte Maximallasten und Verhältnisse zu berechneten Werten nach *Hübner (2013)*

Serie	mittlere Bruchlast F_{max} [kN]	Variationskoeff. CoV [%]	Verhältnis Prüfung/Berechnung		geschätztes 5%-Quantil $F_{est,05}$ [kN]	char. Traglast R_k [kN]	Verhältnis 5%-Quantil der Maximallast / (charakteristische) Traglast	
			$\frac{F_{max}}{F_{cal}}$ [%]	$\frac{F_{max}}{F_{cal}^*}$ [%]			$\frac{F_{est,05}}{R_k}$ [%]	$\frac{F_{est,05} \gamma_M}{R_k k_{mod}}$ [%]
ES_T8_00_05	112,0	13,5	138	107	82	60,1	136	189
ES_T8_00_10	201,2	17,0	157	140	147	94,4	156	217
ES_T8_00_15	262,8	4,6	145	136	192	135,9	141	197

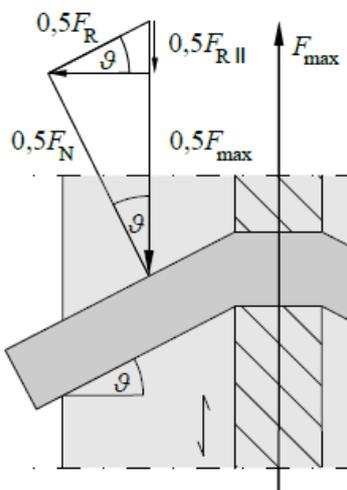


Abb. 2.33: Reibungskraft bei Stabdübelverbindungen nach *Hübner (2013)*

In Tab. 2.2 wird das Verhältnis der Traglasten aus Prüfung und Berechnung dargestellt. Dabei beschreibt F_{cal} die herkömmliche Berechnung und F_{cal}^* die Berechnung unter Berücksichtigung des Seileffekts. Durch die Berücksichtigung der Reibkraft konnte die berechnete Tragfähigkeit der Stabdübelverbindungen den durch Prüfungen ermittelten Traglasten angenähert werden.

2.5.1 Einfluss der Stabdübeloberfläche

Die in Abb. 2.33 ersichtliche Reibkraft F_R wirkt parallel zur Verbindungsmittelachse. Die zuvor beschriebene Gl. (14) ermittelt die Reibkraft parallel zur Richtung der einwirkenden Kraft, wobei der Reibbeiwert μ linear eingeht. Wie in 2.2.4 beschrieben, hängt der Reibbeiwert unter anderem von der Stabdübeloberfläche ab. Wird der Reibbeiwert vergrößert, ergibt sich auch eine größere Reibkraft parallel zur Verbindungsmittelachse, siehe Gl. (14).

2.6 Resümee

Es wurde eine Vielzahl von Einflussfaktoren auf die Tragfähigkeit von Stabdübelverbindungen festgestellt. Die zuvor beschriebenen Einflussfaktoren und ihre Abhängigkeiten sind in Abb. 2.34 zusammengefasst.

	Durchmesser des Verbindungsmittels	Rohdichte	Kraft-Faser-Winkel	Stabdübel		Holzfeuchte	Art der Verbindung	Art der Beanspruchung Zug Druck	Anzahl der Verbindungsmittel	Rand- und Mindestabstände	Neigung der Jahrringtangente	Bohrlochoberfläche bzw -qualität	Spiel zw. Bohrloch und Stabdübel	Bolzenschlankheit
				Zugfestigkeit bzw. Stahlgüte	Biegewinkel des Stabdübels	Stabdübeloberfläche								
Fließmoment $M_{y,Rk}$	x			x	x									
Lochleibungsfestigkeit f_h	x	x	x	x		x	x	x		x	x	x	x	x
Gruppenwirkung	x		x						x	x				
Reibung						x	x							

Abb. 2.34: Einflussfaktoren auf Stabdübelverbindungen

Um den Einfluss eines Parameters auf die Tragfähigkeit der Verbindung untersuchen zu können, sollen alle anderen Einflussgrößen so gut wie möglich konstant gehalten werden. Andernfalls kann keine eindeutige Aussage getroffen werden.

Da Holz sehr viele verschiedene Ausprägungen besitzt, gibt es nicht für jeden Parameter ausreichende Prüfergebnisse. Deshalb wird ein Bedarf an Versuchen und Forschungen bei den meisten Einflussparametern festgestellt. Der folgende Abschnitt beschäftigt sich mit dem Einfluss des Parameters *Art der Beanspruchung – Zug versus Druck* auf die Lochleibungsfestigkeit.

3 Lochleibungsfestigkeit bei Druck- und Zugbelastung nach ON EN 383:2007

3.1 Literaturrecherche

3.1.1 Gehri (1980)

Gehri (1980) wies auf ein unterschiedliches Bruchverhalten des Holzes bei Zug- oder Druckbelastung und auf die ungünstigere Beanspruchung des Prüfkörpers bei Einleitung von Zugkraft hin, siehe Abb. 2.30. Es wird erwähnt, dass Versuche mit Druckverbindungen in der Regel eine wesentlich höhere Tragfähigkeit aufweisen und die Ergebnisse werden auf die ungünstige Beanspruchung von Zugproben zurückgeführt.

3.1.2 Whale, Smith und Hilson (1986 und 1987)

Whale et al. (1986 und 1987) führten an sieben verschiedenen Hölzern insgesamt 1760 Lochleibungsprüfungen durch. Es wurde dabei zwischen Druck und Zug parallel zur Faserrichtung und Druck senkrecht zur Faserrichtung unterschieden. Es wurden Bolzen mit 8, 12, 16 und 20 mm geprüft und jede Serie umfasste 20 Prüfungen. Die Probekörper wurden bei $20 \pm 3 \text{ °C}$ und $65 \pm 5 \%$ Luftfeuchte konditioniert, und somit fast bei den in *ON EN 383:2007* definierten Normklimawerten von $20 \pm 2 \text{ °C}$ und $65 \pm 5 \%$ geprüft. Es bestand ein Spiel zwischen Bolzen und Bohrloch, da der Lochdurchmesser 1,5 mm größer als der Bolzendurchmesser angefertigt wurde.

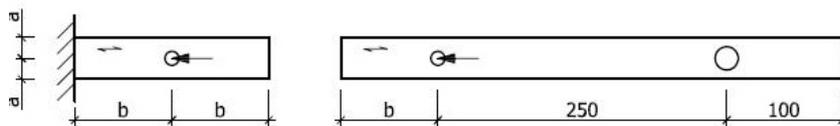


Abb. 3.1: Probekörpermaße nach *Whale et al. (1986)*

Maße	Bolzen
a	$1,5d$
b	$7d$
Dicke	$2d$

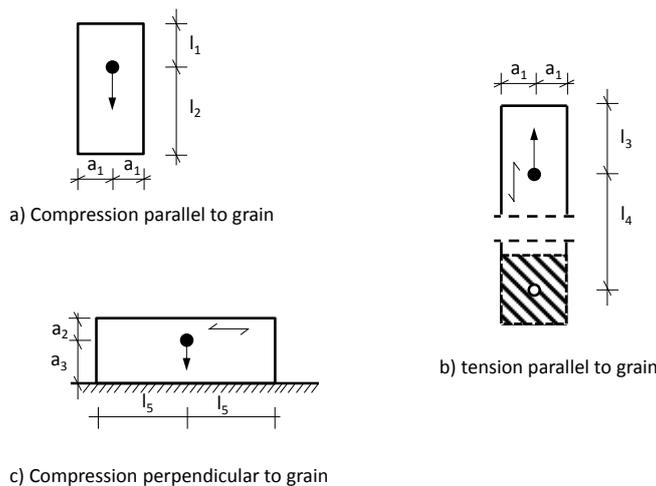
Tab. 3.1: Maße

Es wurden neun Vorlastzyklen mit der Dauer von jeweils einer Minute zwischen 5 % und 40 % der geschätzten Maximallast absolviert, danach erfolgte die Prüfung verformungssteuert mit 1,25 mm/min. Die Höchstlast wurde bei einer Verschiebung von 2,1 mm definiert falls sie nicht schon zuvor aufgetreten war.

Die noch heute in der *ON EN 1995-1-1:2009* vorhandene Gl. (2) zur Berechnung der Lochleibungsfestigkeit wurde bereits 1987 von *Whale et al.* für Bolzen mit Belastungsrichtung parallel zur Faser entwickelt.

3.1.3 Ehlbeck und Werner (1992)

Ehlbeck und Werner (1992) untersuchten die Lochleibungsfestigkeit von Buche, Eiche, Teak, Merbau und Afzelia nach dem Entwurf für prEN 383. Es wurden insgesamt 125 Zug- und Drucklochleibungsprüfungen parallel zur Faser mit Durchmessern von 8 mm bis 30 mm durchgeführt. In jeder Serie wurden fünf Prüfungen mit blanken, kaltgeformten Stabdübeln aus St 37 K ausgeführt. Der Stabdübeldurchmesser entsprach dabei dem Bohrlochdurchmesser und die Dicke der Probekörper $2d$. Die Probekörper wurden bei 20 ± 3 °C und 65 ± 5 % Luftfeuchte konditioniert. Als Höchstlast wurde die maximale Last innerhalb 5 mm Verschiebung definiert.



a) Compression parallel to grain

b) tension parallel to grain

c) Compression perpendicular to grain

Maße	Bolzen
a_1	$3d$
l_1	$3d$
l_2	$7d$
l_3	$7d$
l_4	$30d$

Abb. 3.2: Probekörpermaße nach Ehlbeck und Werner (1992)

Tab. 3.2: Maße

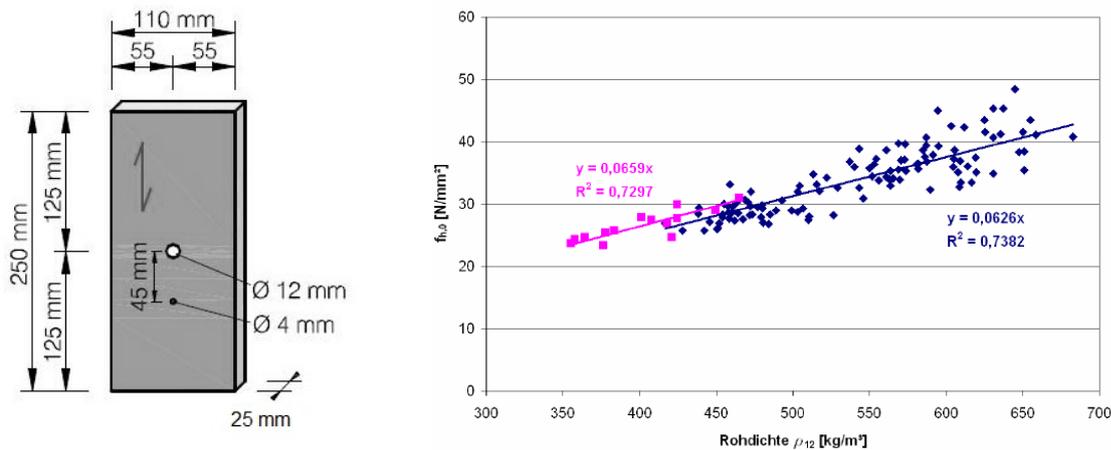
Unter der Belastungsart Druck wurden, wie in Tab. 3.2 ersichtlich, für den gleichen Durchmesser und ähnlicher Rohdichte durchwegs niedrigere mittlere Lochleibungsfestigkeiten $f_{h,0}$ beobachtet als unter Zugbelastung. Es wird ein frühes Aufspalten der Probekörper unter Druck und ein möglicher Zusammenhang mit dem geringeren, unbelasteten Randabstand von $l_1 = 3d$ statt der in prEN 383 vorgeschlagenen $7d$ erwähnt.

Tab. 3.3: Prüfergebnisse für Buche und Eiche nach Ehlbeck und Werner (1992)

	Belastungsart	Durchmesser d [mm]	Mittlere Rohdichte ρ_{mean} [kg/m ³]	CoV ρ_{mean} [%]	Mittlere Lochleibungsfestigkeit $f_{h,0}$ [N/mm ²]	CoV von $f_{h,0}$ [%]	$\frac{f_{h,0}}{\rho_{mean}}$ [Nm ³ /mm ² kg]
Buche	Druck	8	703	7,60	57,6	5,88	0,082
	Druck	16	724	1,89	62,6	8,23	0,086
	Zug	8	714	6,79	68,3	9,67	0,096
	Zug	12	697	5,22	59,6	8,08	0,086
	Zug	16	741	0,31	67,0	8,07	0,090
Eiche	Druck	8	722	0,20	63,4	3,28	0,088
	Druck	16	732	4,50	55,8	5,12	0,076
	Zug	8	743	2,30	60,8	4,67	0,082

3.1.4 Spörk (2007)

Spörk (2007) untersuchte in seiner Diplomarbeit die Lochleibungsfestigkeit von 140 Probekörpern aus Fichte und 113 Probekörper aus Kiefer nach ON EN 383:2007. Bei den Probekörpern aus Fichte wurde der Kraft-Faser-Winkel zwischen 0° und 90° in 10° -Schritten variiert. Bei den Probekörpern aus Kiefer wurde die Kraft parallel und senkrecht zur Faserrichtung eingeleitet. Alle Prüfungen erfolgten auf Druck und mit handelsüblichen galvanisch verzinkten Stabdübeln 12 mm. Die Brettstärke betrug 24 mm für die Proben aus Fichte bzw. 25 mm für die Probekörper aus Kiefer.



(a) Probekörperabmessungen (b) Vergleich der Lochleibungsfestigkeit von Fichte und Kiefer

Abb. 3.3: Lochleibungsprüfungen nach Spörk (2007)

In Abb. 3.3 ist der Vergleich der ermittelten Lochleibungsfestigkeiten in Pink für Fichte und in blau für Kiefer dargestellt.

3.1.5 Zitto, Köhler und Piter (2012)

Von Zitto *et al.* (2012) wurden 49 Versuche, davon 23 auf Zug und 26 auf Druck, an *Eucalyptus grandis* mit Stabdübeln Durchmesser 12,7 mm nach ON EN 383:2007 durchgeführt. Die Dicke der Probekörper lag zwischen 19,5 mm und 22,1 mm. Die Probekörper wurden im Normklima bei $20 \pm 2^\circ\text{C}$ und $65 \pm 5\%$ Luftfeuchte gelagert. Für die mittlere Lochleibungsfestigkeit parallel zur Faser unter Zug wurde $f_{h,0} = 30,2 \text{ N/mm}^2$ und unter Druck $f_{h,0} = 28,2 \text{ N/mm}^2$ ermittelt.

3.1.6 Sandhaas, Ravenshorst, Blass und van de Kuilen (2010 und 2013)

Sandhaas *et al.* (2010 und 2013) führten mit fünf Holzarten und Stabdübeln unterschiedlicher Stahlgüte mit 12 mm und 24 mm Durchmesser 139 Prüfungen nach ON EN 383:2007 aus. Die untersuchten Holzarten waren europäische Fichte, europäische Buche, Purpleheart, Tonkabaum aus Peru und Brasilien und Azobé. Die Probekörper aus Fichte und Buche wurden im Normklima bei $20 \pm 2^\circ\text{C}$ und $65 \pm 5\%$ Luftfeuchte gelagert. In Sand-

haas et al. (2013) wurden 13 Probekörper aus Fichte mit Stabdübeln Durchmesser 12 mm geprüft, davon sieben mit hss und 6 mit vhss Stabdübeln.

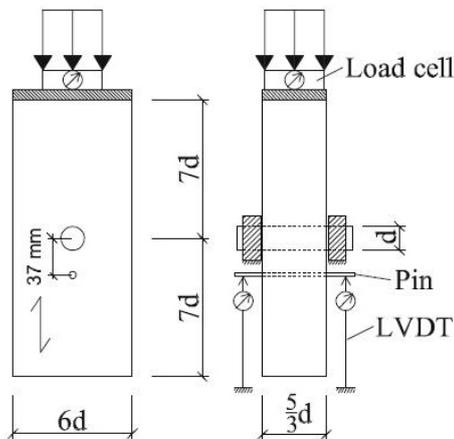


Abb. 3.4: Probekörpermaße und Prüfkongfiguration nach Sandhaas et al. (2013)

Die ermittelte Lochleibungsfestigkeit für Fichte ($\rho_{\text{mean}} = 482 \text{ kg/m}^3$, $u_{\text{mean}} = 13,3 \%$) mit hss Stabdübeln 12 mm ergab sich zu $f_{h,0} = 24,6 \text{ N/mm}^2$ ($CoV = 14,6 \%$). Es wird ein starker Einfluss der Stahlgüte der Stabdübel festgestellt, obwohl die Stabdübel elastisch blieben. Es wird erwähnt, dass die Oberflächenrauigkeit nicht der maßgebende Faktor dafür sein kann, da keine unterschiedlichen Rauigkeiten ($R_a = 0,88 \mu\text{m}$) gemessen wurden.

Die auf Basis der auf 12 % Holzfeuchte bezogenen Rohdichte erstellten Gl. (17) wird in Sandhaas et al. (2010) zur Ermittlung der Lochleibungsfestigkeit angeführt.

$$f_{h,0} = 0,095 \cdot (1 - 0,0089 \cdot d) \cdot \rho \quad \text{Gl. (17)}$$

- ρ Rohdichte in kg/m^3
- d Durchmesser des Verbindungsmittels in mm
- $f_{h,0}$ Lochleibungsfestigkeit bei Kraft-Faser-Winkel $\alpha = 0^\circ$ in N/mm^2

3.1.7 Hübner (2008 und 2013)

Hübner (2008 und 2013) prüfte die Lochleibungsfestigkeit von 773 Probekörpern aus Esche, 315 Probekörpern aus Buche und 269 Probekörpern aus Robinie nach ON EN 383:2007 auf Druck. Es wurden dabei ein etwaiger Einfluss des Durchmessers der verwendeten Stabdübel, mit Durchmessern von 6, 8, 12, 16 und 20 mm, und der Holzfeuchte auf die Lochleibungsfestigkeit untersucht. Zusätzlich wurde auch der Winkel zwischen Kraft- und Faserrichtung variiert. Das Ergebnis stellt ein neues Bemessungsmodell für die charakteristische Lochleibungsfestigkeit für Esche bzw. Laubholz dar.

Die folgende Gl. (18) wurde in Hübner (2008) veröffentlicht und dient zur Berechnung der Lochleibungsfestigkeit von Esche.

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{2,29 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_k^{1,61} \cdot d^{-0,240}}{(0,647 + 0,0273 \cdot d) \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \quad \text{Gl. (18)}$$

- ρ_k charakteristische Rohdichte in kg/m^3
 d Durchmesser des Verbindungsmittels in mm
 α Kraft-Faser-Winkel
 $f_{h,\alpha,k}$ char. Wert der Lochleibungsfestigkeit bei Kraft-Faser-Winkel α in N/mm^2

Gl. (19) wurde ebenfalls in *Hübner (2008)* veröffentlicht und dient zur Berechnung der Lochleibungsfestigkeit von Laubholz.

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{0,015 \cdot \rho_k^{1,3} \cdot d^{-0,2}}{(0,62 + 0,035 \cdot d) \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \quad \text{Gl. (19)}$$

- ρ_k charakteristische Rohdichte in kg/m^3
 d Durchmesser des Verbindungsmittels in mm
 α Kraft-Faser-Winkel
 $f_{h,\alpha,k}$ char. Wert der Lochleibungsfestigkeit bei Kraft-Faser-Winkel α in N/mm^2

In *Hübner (2013)* wurde Gl. (20) veröffentlicht und dient ebenfalls zur Berechnung der Lochleibungsfestigkeit von Laubholz.

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{2,60 \cdot 10^{-3} \cdot d^{-0,20} \cdot \rho_k^{1,57}}{(1 - k_{h,90}) \cdot \cos^3 \alpha + k_{h,90}} \quad \text{Gl. (20)}$$

mit

$$k_{h,90} = 0,48 \cdot d^{0,33}$$

- ρ_k charakteristische Rohdichte in kg/m^3
 d Durchmesser des Verbindungsmittels in mm
 α Kraft-Faser-Winkel
 $k_{h,90}$ Beiwert der Lochleibungsfestigkeit
 $f_{h,\alpha,k}$ char. Wert der Lochleibungsfestigkeit bei Kraft-Faser-Winkel α in N/mm^2

3.1.8 Resümee der Literaturrecherche

Wie zuvor erwähnt, wies *Gehri (1980)* auf eine höhere Tragfähigkeit von Probekörpern unter Druckbelastung hin. *Zitto et al. (2012)* führten Prüfungen nach *ON EN 383:2007* an *Eucalyptus grandis* unter Zug und Druck durch und veröffentlichten größere Mittelwerte bei den Probekörpern mit Zugkrafteinleitung. Auch *Ehlbeck und Werner (1992)* führten Prüfungen an fünf verschiedenen Hölzern nach prEN 383 und stellten nur bei Eiche eine höhere Lochleibungsfestigkeit unter Drucklast fest.

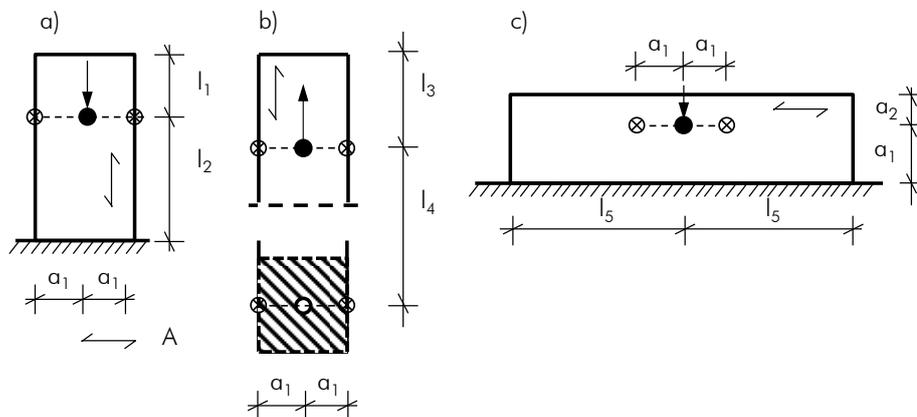
Da die Aussagen dieser Prüfberichte kontrovers sind und die Tatsache, dass die meisten stiftförmigen Verbindungen auf Zug belastet werden und die Lochleibungsprüfungen hauptsächlich

lich auf Druck durchgeführt wurden, wirft einen Bedarf an Prüfungen nach aktuellen Normen und an heimischen Hölzern unter Zug- und Druckbelastung auf.

Um den möglichen Unterschied zwischen Zug- und Druckbelastung feststellen zu können, wurden die Lochleibungsprüfungen in dieser Arbeit bei Birke, Esche und Fichte nach *ON EN 383:2007* ermittelt. Zudem wurde die Lochleibungsfestigkeit von Esche in einer zusätzlichen Serie mit verringertem unbelasteten Randabstand untersucht, vergleiche *Ehlbeck und Werner (1992)*.

3.2 Methodik der Lochleibungsprüfung und -auswertung

Die Ausführung der Lochleibungsprüfungen ist in *ON EN 383:2007: Bestimmung der Lochleibungsfestigkeit und Bettungswerte für stiftförmige Verbindungsmittel* geregelt. Die Abmessungen der Probekörper sind, wie in Abb. 3.5 und Abb. 2.24 gezeigt, geregelt.



a) Druck zur Faserrichtung

b) Zug zur Faserrichtung

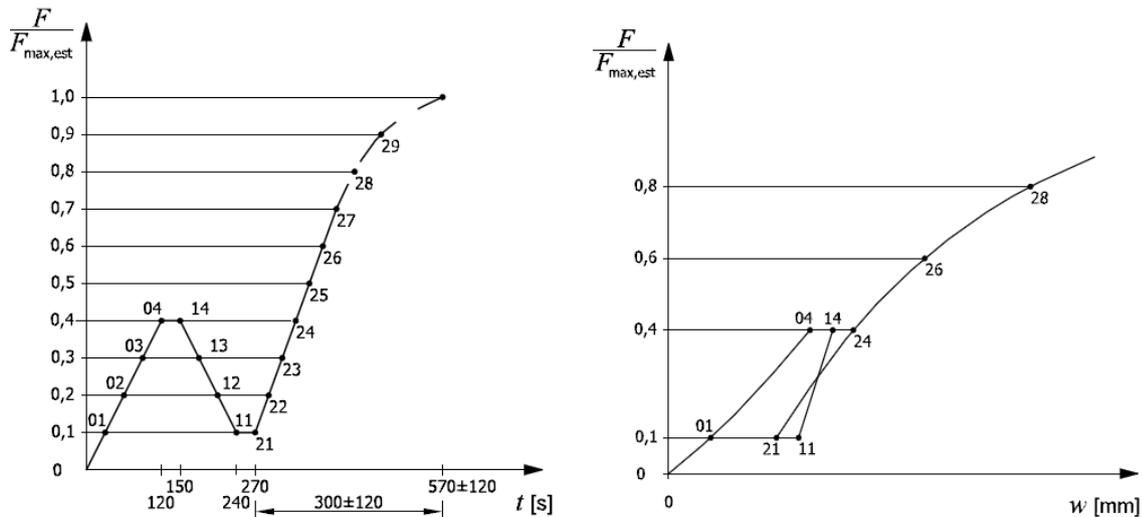
c) Druck rechtwinklig zur Faserrichtung

A Faserrichtung oder eine der Hauptrichtungen von Holzwerkstoffplatten

X Messpunkt

Abb. 3.5: Probekörpermaße mit Messpunkten für die Wegaufnahme nach *ON EN 383:2007*

Die Lastaufbringung erfolgt nach Abb. 3.6. Laut *ON EN 383:2007* gilt: „(...) die Prüfung ist abzubrechen, wenn die Höchstlast erreicht ist oder wenn die Verformung $w_0 + 5 \text{ mm}$ beträgt. Die Last ist mit einer konstanten Vorschubgeschwindigkeit zu steigern oder zu verringern. Die Last ist so anzupassen, dass die Höchstlast innerhalb von $(300 \pm 120) \text{ s}$ erreicht wird.(...)“



(a) Belastungsverfahren nach ON EN 383:2007

(b) Idealisierte Last-Verformungs-Kurve und Messwerte nach ON EN 383:2007

Abb. 3.6: Bilder nach ON EN 383:2007 aus Hübner (2013)

Die Berechnung der Lochleibungsfestigkeit erfolgt durch die ermittelte Höchstlast und der Probekörperdicke, siehe Gl. (21).

$$f_h = \frac{F_{\max}}{d \cdot t} \quad \text{Gl. (21)}$$

f_h Lochleibungsfestigkeit in N/mm²
 F_{\max} Höchstlast in N
 t Dicke in mm
 d Durchmesser in mm

3.2.1 Ermittlung der Holzfeuchte

Für die Ermittlung der Holzfeuchte werden die Masse der Probe nach der Prüfung bzw. vor dem Trocknen und die Masse im darrtrockenen Zustand benötigt. Die Trocknung wurde nach ON EN 13 183-1:2004 durchgeführt. Auch die Berechnung der Holzfeuchte fand nach ON EN 13 183-1:2004, siehe Gl. (22), statt.

$$u = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \cdot 100 \quad \text{Gl. (22)}$$

u Feuchtegehalt der Probe in %
 m_1 Masse der Probe vor dem Trocknen in g
 m_0 Masse der Probe im darrtrockenen Zustand in g

3.2.2 Ermittlung der Rohdichte und Bezug auf 12 % Holzfeuchte

Bei der Ermittlung der Rohdichte wird zwischen Normalrohddichte ρ_u , Darrrohddichte ρ_{darr} und Rohddichte bei 12 % Holzfeuchtigkeit ρ_{12} unterschieden. Dabei gibt die Normalrohddichte die Rohddichte bei den Prüfungen an und wird nach *ON ISO 3131:1996* ermittelt, siehe Gl. (23).

$$\rho_u = \frac{m_u}{a_u \cdot b_u \cdot l_u} = \frac{m_u}{V_u} \quad \text{Gl. (23)}$$

ρ_u	Dichte der Probe bei einem Feuchtegehalt u in kg/m^3
m_u	Masse der Probe bei einem Feuchtegehalt u in kg
a_u, b_u	Seitenabmessungen der Probe bei einem Feuchtegehalt u in m
l_u	Höhe der Probe bei einem Feuchtegehalt u in m
V_u	Volumen der Probe bei einem Feuchtegehalt u in m^3

Durch den Bezug der Normalrohddichte und auch der Lochleibungsfestigkeit auf 12 % Holzfeuchte können die bei unterschiedlicher Holzfeuchte bestimmten Rohddichten und Lochleibungsfestigkeiten miteinander verglichen werden. Dieser Bezug ist nicht in *ON EN 383:2007* vorgesehen, wurde aber bei der Auswertung der Prüfungen durchgeführt, da hierdurch die Ergebnisse besser vergleichbar sind. Laut *ON EN 384:2010* ist „(...) wenn die Holzfeuchte mehr als 12 % beträgt, die Rohddichte je Prozentpunkt Holzfeuchte um 0,5 % zu verringern; wenn die Holzfeuchte weniger als 12 % beträgt, ist die Rohddichte je Prozentpunkt Holzfeuchte um 0,5 % zu erhöhen.“ Die Umrechnung der Rohddichte erfolgte mittels Gl. (24).

$$\rho_{12} = \rho_u \cdot [1 + 0,5 \cdot (0,12 - u)] \quad \text{Gl. (24)}$$

ρ_u	Dichte der Probe bei einem Feuchtegehalt u in kg/m^3
ρ_{12}	Dichte der Probe bezogen auf 12 % Holzfeuchte in kg/m^3
u	Feuchtegehalt der Probe in [-]

Um die ermittelten Lochleibungsfestigkeiten mit Werten aus der Literatur vergleichen zu können, bietet sich eine Korrektur der Rohddichte an. Dabei werden alle zu vergleichenden Werte auf dieselbe Rohddichte umgerechnet. Dies erfolgt durch Gl. (25) aus *ON EN 28 970:1991*.

$$F_{cor} = F_0 \left[\frac{\rho_k}{\rho} \right]^c \quad \text{Gl. (25)}$$

ρ	Rohddichte des Holzes, in dem der Bruch auftrat in kg/m^3
ρ_k	geforderte charakteristische Rohddichte der Hölzer, auf die die Prüfergebnisse bezogen werden sollen in kg/m^3
c	Exponent, abhängig vom Einfluss der Holzeigenschaften auf die Eigenschaften der Verbindung. Er soll durch Versuche oder aufgrund von theoretischen Überlegungen ermittelt werden
F_0	zu korrigierende Lochleibungsfestigkeit in N/mm^2
F_{cor}	korrigierte Lochleibungsfestigkeit in N/mm^2

3.2.3 Bezug der Lochleibungsfestigkeit auf 12 % Holzfeuchte

Auch die Lochleibungsfestigkeit wurde nach *ON EN 384:2010* auf 12 % Holzfeuchte bezogen. Für die Lochleibungsfestigkeit wurde der Absatz: „(...) für die Druckfestigkeit parallel zu Faserrichtung: Änderung um 3 % je Prozentpunkt Holzfeuchteunterschied; (...)“ angewandt, da die Prüfungen parallel zur Faser erfolgten und der Stabdübel lokal in das Holz gedrückt wurde. Die ermittelten Lochleibungsfestigkeiten werden bei einer höheren Holzfeuchte als 12 % erhöht und bei einer geringeren Holzfeuchte verringert. Die Umrechnung der Lochleibungsfestigkeit erfolgte mittels Gl. (26).

$$f_{h,0,12} = f_{h,0} \cdot [1 - 3 \cdot (0,12 - u)] \quad \text{Gl. (26)}$$

- $f_{h,12}$ Lochleibungsfestigkeit der Probe bezogen auf 12 % Holzfeuchte in N/mm²
 $f_{h,0}$ Lochleibungsfestigkeit der Probe bei einem Feuchtegehalt u in N/mm²
 u Feuchtegehalt der Probe in %

3.2.4 Ermittlung des Bettungs- bzw. Verschiebemoduls

Der Bettungsmodul wird nach *ON EN 383:2007* bestimmt. Das darin vorgeschriebene Belastungsverfahren entspricht dem in *ON EN 26 891:1991* angeführten Belastungsverfahren. Die angegebenen Messwerte der Verschiebungen beruhen auf der erwarteten Höchstlast F_{est} . Auch die Auswertung des Bettungsmoduls $K_{s,Fest}$ erfolgt unter Zugrundlegung der erwarteten Höchstlast, siehe Gl. (27).

$$K_s = \frac{0,4 f_{h,est}}{w_{i,mod}} \quad \text{Gl. (27)}$$

dabei ist

$$w_{i,mod} = \frac{4}{3} (w_{04} - w_{01}) \quad \text{Gl. (28)}$$

$$f_{h,est} = \frac{F_{max,est}}{d \cdot t} \quad \text{Gl. (29)}$$

- $F_{max,est}$ geschätzte Höchstlast in N
 t Dicke in mm
 d Durchmesser in mm
 $w_{i,mod}$ modifizierte Anfangsverformung in mm
 w_{01} Verformung des Prüfkörpers bei $0,1F_{est}$
 w_{04} Verformung des Prüfkörpers bei $0,4F_{est}$
 K_s Bettungsmodul in N/mm³

Der Bettungsmodul $K_{s,Fmax}$ wurde ausschließlich durch die tatsächlich aufgetretene Höchstlast bestimmt. Der Verschiebemodul K_{ser} wird durch Gl. (30) nach *ON EN 26 891:1991* bestimmt und ist unabhängig von der Dicke des Probekörpers und dem Verbindungsmitteldurchmesser.

$$K_{ser,Fest} = \frac{0,4F_{est}}{v_{i,mod}} \quad \text{bzw.} \quad K_{ser,Fmax} = \frac{0,4F_{max}}{v_{i,mod}} \quad \text{Gl. (30)}$$

- F_{est} geschätzte Höchstlast in N
- F_{max} tatsächlich aufgetretene Höchstlast in N
- $v_{i,mod}$ modifizierte Anfangsverformung in mm
- $K_{ser,Fest}$ Verschiebemodul bei geschätzter Höchstlast in N/mm
- $K_{ser,Fmax}$ Verschiebemodul bei tatsächlich aufgetretener Höchstlast in N/mm

3.3 Prüfvorbereitung

Um die Zugbelastung der Druckbelastung gegenüberstellen und dadurch den Einfluss der Belastungsart auf die Lochleibungsfestigkeit ermitteln zu können, wurden alle anderen die Lochleibungsfestigkeit beeinflussenden Faktoren möglichst konstant gehalten.

Die geprüften Holzarten waren Birke (*Betula pendula*), Esche (*Fraxinus excelsior*) und Fichte (*Picea abies*). Die Wahl des zu prüfenden Durchmessers fiel auf 12mm, da von Spörk (2007) bereits Lochleibungsprüfungen von Fichte und Kiefer und von Hübner (2013) Esche, Buche und Robinie mit 12 mm durchgeführt wurden. Der Belastungswinkel wurde mit $\alpha = 0^\circ$ gewählt, somit wurden die Prüfungen parallel zur Faser durchgeführt.

3.3.1 Anzahl der Probekörper für die Lochleibungsprüfung

Um statistisch relevante Aussagen treffen zu können, wurden jeweils 25 Zug- und Druckprüfungen von Birke und 13 Zug- und Druckprüfungen von Fichte und Esche durchgeführt.

Tab. 3.4: Anzahl der Probekörper je Holzart

Belastungsart	Probekörper je Holzart		
	Birke	Esche	Fichte
Zug	25	13	13
Druck	25	13	13
Summe	50	26	26

3.3.2 Prüfkongfiguration

Für die Prüfungen wurde die Universalprüfmaschine lignum_uni_275 verwendet. Wie in Abb. 3.7 und Abb. 3.8 ersichtlich, wurden auf der Werkbank zwei Stahllaschen montiert, welche den Stabdübel fixieren. Um die Verformung zu messen, wurden zwei induktive Wegaufnehmer mit Tauchanker und einem kalibrierten Messbereich von 10 mm verwendet. Das zugehörige Massstück wurde mit Hilfe von Drahhaken auf eine Gewindestange mit 5 mm gehängt, welche unterhalb des Stabdübels angebracht war. Das Spiel zwischen Probekörper und Stahllaschen betrug beidseitig 2 mm.

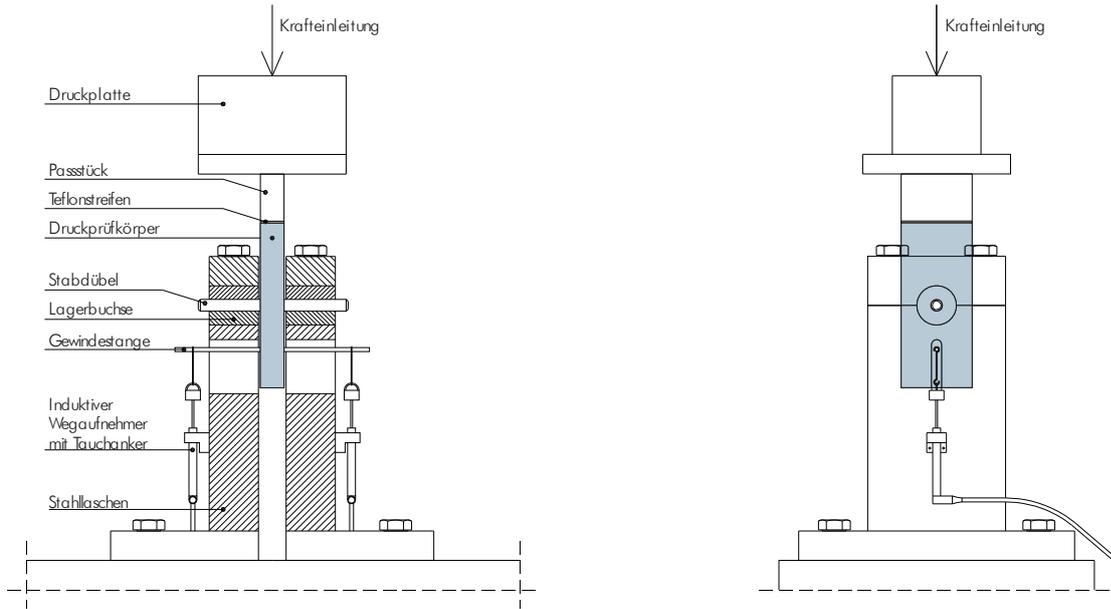


Abb. 3.7: Prüfkfiguration – Lochleibungsprüfung mit Belastung auf Druck

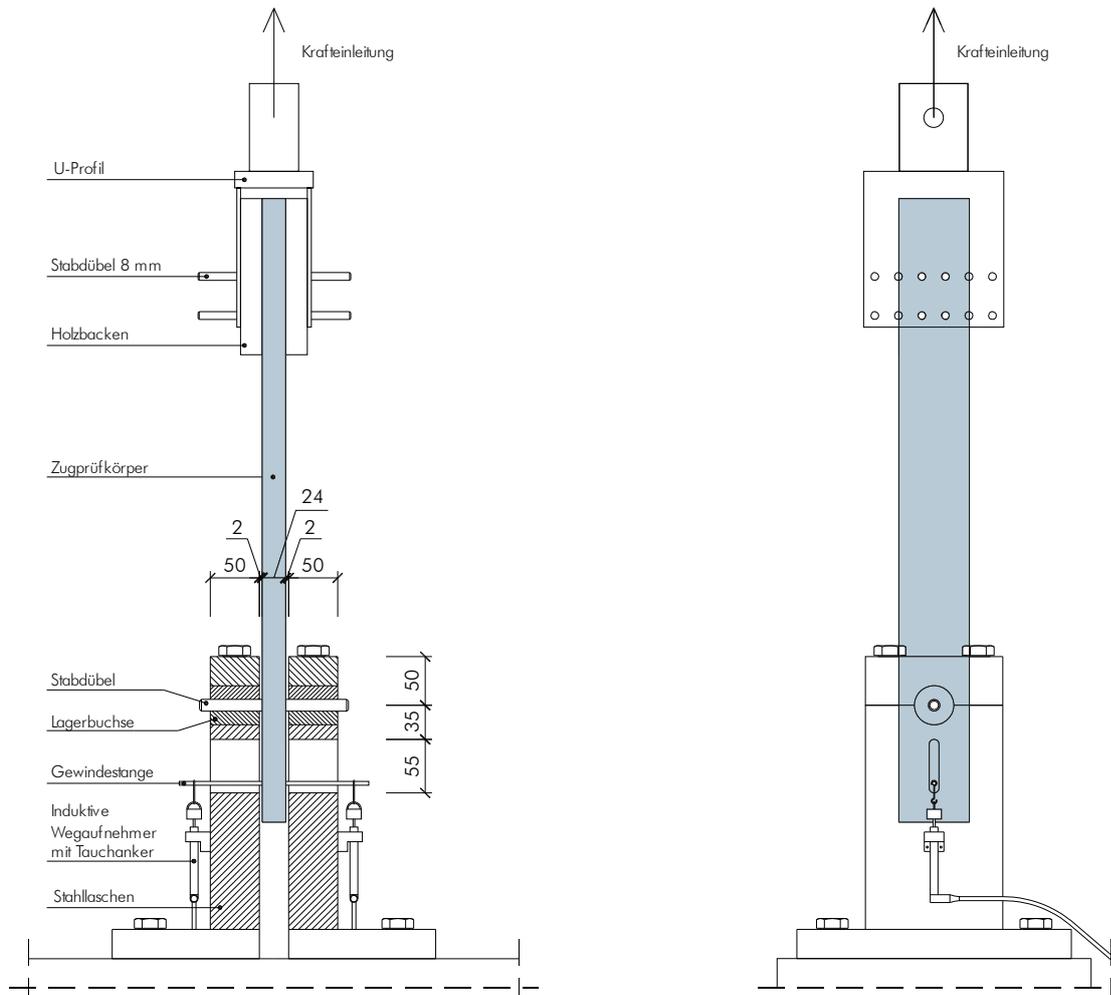


Abb. 3.8: Prüfkfiguration – Lochleibungsprüfung mit Belastung auf Zug

Bei den Druckprüfungen wurden zwischen dem Probekörper und der Druckplatte der fixierten Kugelkalotte ein 1 mm dicker Teflonstreifen und ein Passstück aus Funierschichtholz eingelegt. Der Teflonstreifen soll die Behinderung der Querdehnung, welche durch die Lasteinleitung mittels Druckplatte bzw. Passstück entsteht, und des Aufspaltens minimieren. Das Passstück wurde eingelegt, um die Prüfung nicht wegen zu geringem, freien Verformungsweg zwischen Druckplatte und Prüfvorrichtung vor dem Bruch abbrechen zu müssen.

Bei den Zugprüfungen wurde die Druckplatte durch ein U-Profil mit vorgebohrten Löchern ersetzt und die Lasteinleitung mittels einer Stabdübelverbindung mit 8 mm realisiert.

3.3.3 Probekörper für die Lochleibungsprüfung

Aus zuvor erfolgten Prüfungen waren nach der Rohdichte sortierte Brettstapel vorhanden, aus denen die zu prüfenden Bretter ausgewählt wurden. Aus jedem gewählten Brett wurde ein 1 m langes Stück und aus diesem ein Zug- und ein Druckprobekörper geschnitten. Dadurch wurde versucht, eine gute Übereinstimmung der Rohdichten der Zug- und Druckprobekörper zu erhalten und somit den Einfluss der Rohdichte auf die Prüfergebnisse so gering wie möglich zu halten. Da davon ausgegangen wurde, dass Äste im Probekörper die Vergleichbarkeit der Versuchsergebnisse und auch die Spaltneigung negativ beeinflussen, wurden die Probekörper möglichst ohne Holzmerkmale zugeschnitten.

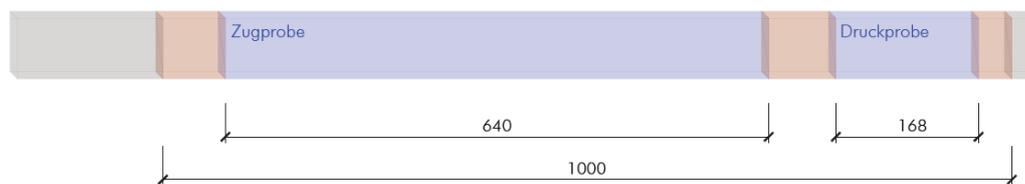


Abb. 3.9: Zug- und Druckprobekörper in 1 m Brett

Die Abmessungen der Probekörper ergaben sich aus den Mindestabständen die in *ON EN 383:2007* festgelegt sind und dem gewählten, zu prüfenden Stabdübeldurchmesser von 12 mm, siehe Abb. 3.10 und Tab. 3.5.

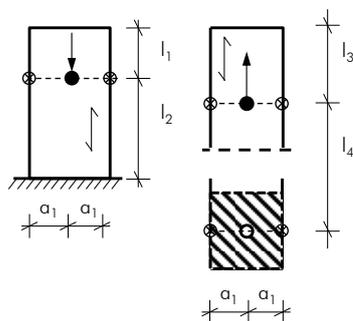


Abb. 3.10: Probekörperabmessungen nach *ON EN 383:2007*

Bezeichnung	Maß	Abmessungen
a_1	$3d$	36 mm
l_1	$7d$	84 mm
l_2	$7d$	84 mm
l_3	$10d$	120 mm
l_4	$30d$	360 mm
Dicke	$2d$	24 mm

Tab. 3.5: Probekörperabmessungen nach *ON EN 383:2007* für Stabdübel

Um die Spaltneigung zu verringern, wurde für die Zugprobekörper der Abstand zum belasteten Hirnholz ($l_3 = 7d$ lt. *ON EN 383:2007*) mit $10d$ gewählt. Um die Last in die Zugproben einzuleiten, wurden diese um 160 mm verlängert, zwei Holzbacken aufgeleimt und eine

zweischrittige Holz-Stahlblech-Verbindung mit vier Stabdübeln mit Durchmesser 8 mm gewählt, siehe Abschnitt 3.3.4. Die Dicke der Probekörper wurde für beide Belastungsarten mit $2d$ gewählt.

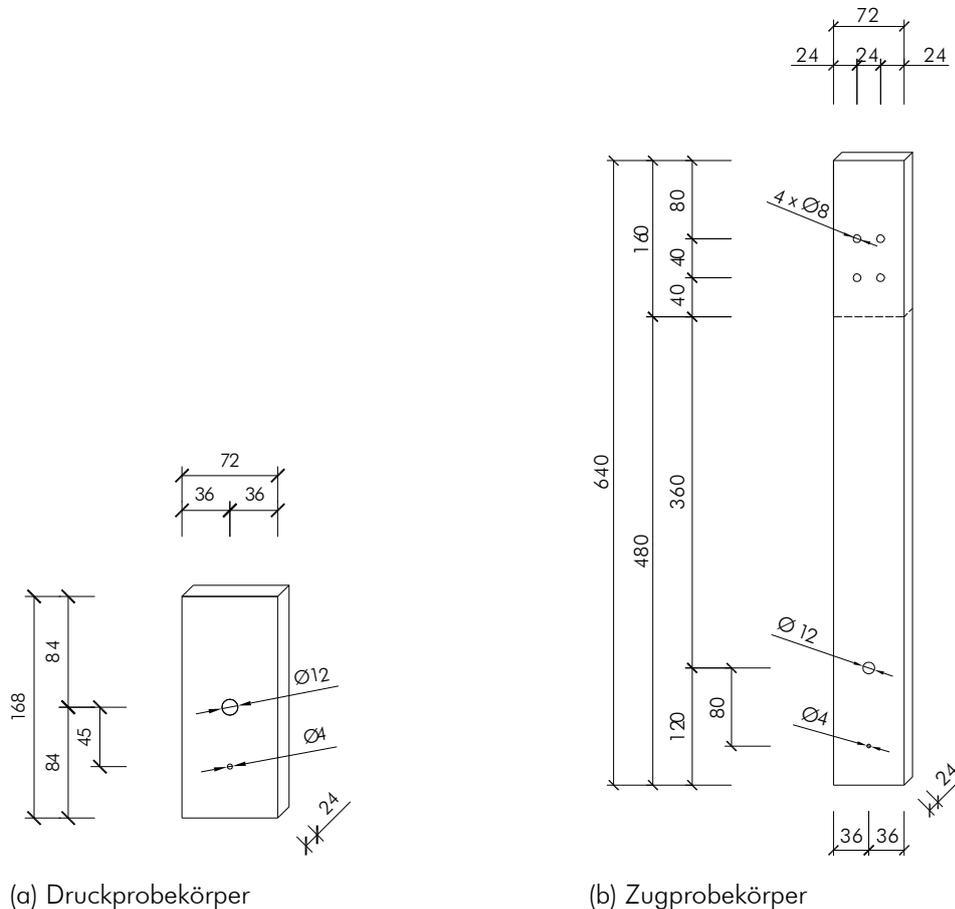


Abb. 3.11: Abmessungen der Probekörper

Um bei den Versuchen die gewünschte Holzfeuchte von 12 ± 2 % zu erreichen, wurden die Probekörper in einer Klimakammer bei 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchte gelagert, bis sich die Ausgleichsfeuchte eingestellt hatte.

Die Bohrungen für die Stabdübel 12 mm und die Gewindestange 5 mm wurden mit einer Ständerbohrmaschine und einem Holzbohrer 12 mm und 4 mm durchgeführt. Die Bohrungen wurden möglichst glatt und ohne Ausreißen von Holzfasern gefertigt, um den Einfluss der Bohrlochoberfläche auf die Versuchsergebnisse so gering wie möglich halten zu können.

3.3.4 Befestigung der Zugprobekörper

Um die Last in die Zugproben einzuleiten, wurde eine zweischrittige Holz-Stahlblech-Verbindung gewählt. Die Stahlbleche stellten ein U-Profil da, welches an die Prüfmaschine mit einem Bolzen montiert werden kann. Es wurde auf eine starre, überbemessene Verbindung Wert gelegt, da die Prüfergebnisse nicht durch die Art der Lasteinleitung beeinflusst werden sollten.

Da das U-Profil eine Öffnung von 66 mm zwischen den Stahlblechen aufwies, wurden zwei Holzbacken mit einer Stärke von jeweils 20 mm aufgeleimt. Um die in *ON EN 383:2007* vorgeschriebenen Randabstände einzuhalten, wurde der Probekörper um 160 mm verlängert. Unter der Berücksichtigung der zu erwartenden Höchstlast und Rohdichte des zu prüfenden Holzes, wurde die Verbindung bemessen und vier Stabdübel 8 mm gewählt, siehe Abb. 3.12.

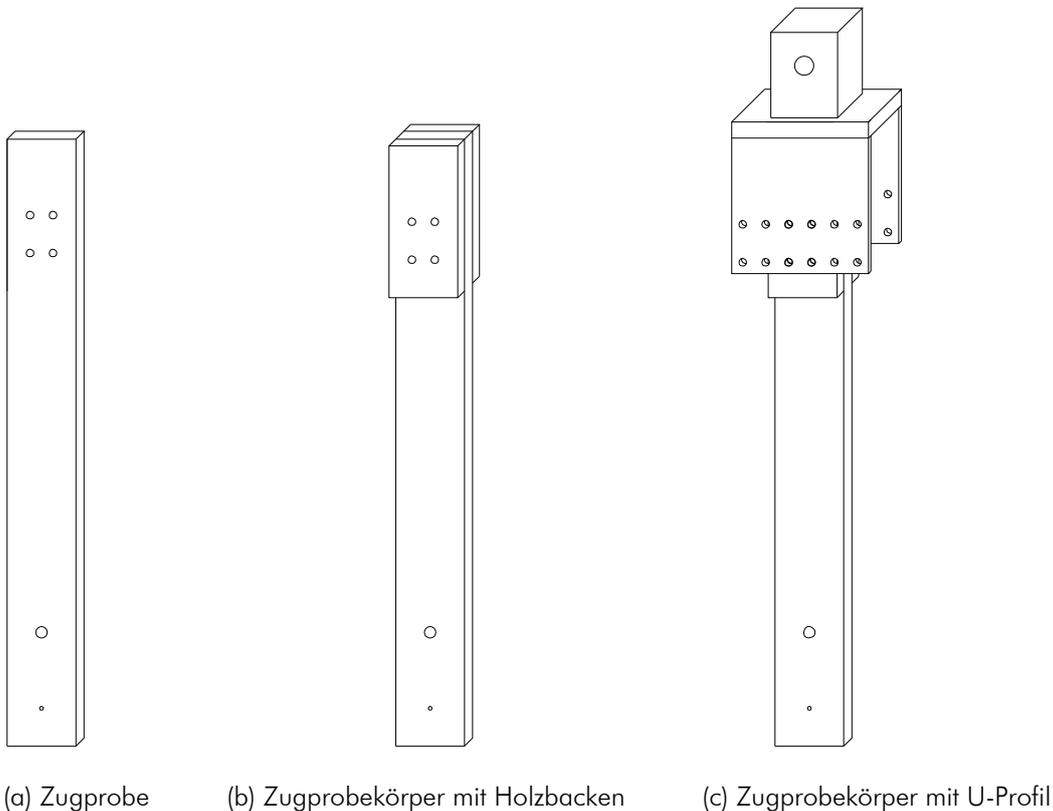


Abb. 3.12: Herstellung der Zugprobekörper und Lage des U-Profiles

3.3.5 Stabdübel

Die für die Lochleibungsprüfungen eingesetzten Stabdübel hatten einen Durchmesser von 12 mm und eine Länge von 200 mm. Für den zuvor beschriebenen Zuganschluss wurden Stabdübel mit einem Durchmesser von 8 mm eingesetzt. Die verwendeten Stabdübel waren handelsübliche, galvanisch verzinkte Stabdübel mit einer Stahlgüte von S235JR und einer glatten Oberfläche.

3.3.6 Bezeichnung der Probekörper

Die Bezeichnung der Probekörper setzt sich aus vier Teilen zusammen. Der erste Buchstabe steht für den Anfangsbuchstaben der geprüften Holzart, wobei B für Birke, E für Esche und F für Fichte steht. Der geprüfte Stabdübeldurchmesser ist an der 12 ersichtlich. Um die Belastungsart zu dokumentieren, wurde der dritte Teil der Probekörperbezeichnung mit D für

Druck und Z für Zug vorgesehen. Der folgende Teil der Bezeichnung stellt die Lauf- bzw. Brett Nummer dar.

Ein Beispiel: E12_D05

Aus der Probekörperbezeichnung ist ersichtlich, dass der Probekörper aus dem Eschenbrett 05 stammt und mit Durchmesser 12 mm auf Druck geprüft wurde.

Tab. 3.6: Bezeichnung der Probekörper

Holzart	Stabdübel- durchmesser	Belastungsart Druck Zug	Lauf- bzw. Brett- nummer
B	12_	D	01_
E			02_
F		Z	03_
			...

3.4 Durchführung der Prüfungen

Bei der Durchführung der Prüfungen erfolgte zuerst die Prüfung der Druckproben. In Abb. 3.13 ist die Prüfkonfiguration für die Druckprüfungen dargestellt. Es können die Druckplatte, die Stahllaschen, der eingespannte Stabdübel, die Wegaufnehmer, das Passstück, der Teflonstreifen und der Probekörper erkannt werden.

Der Einbau des Druckprobekörpers in die Versuchsvorrichtung begann mit dem Einbringen des Probekörpers zwischen die Stahllaschen und dem Einbringen des Stabdübels. Danach erfolgten das Einschrauben der Gewindestange und das Aufhängen der Drahtaken an der Gewindestange. Zuletzt wurden der Teflonstreifen und das Passstück auf den Probekörper gelegt und der Probekörper ausgerichtet.



Abb. 3.13: Prüfkongfiguration – Durchführung der Druckprüfungen

Bei den Zugproben musste der belastende Teil der Prüfeinrichtung umgebaut werden. Anstelle der Druckplatte wurde ein U-Profil eingebaut, an dem die Zugprobekörper befestigt wurden. In Abb. 3.14 ist die Prüfkongfiguration für die Zugprüfungen dargestellt. Es können der Anschluss an den lastaufbringenden Teil der Prüfmaschine mittels Stabdübeln, die Stahllaschen, der eingespannte Stabdübel, die Wegaufnehmer, das Passtück, der Teflonstreifen und der Probekörper erkannt werden.

Der Einbau des Zugprobekörpers in die Versuchsvorrichtung beginnt mit dem Einbringen des Probekörpers in das U-Profil und Montage der Stabdübel. Danach erfolgte das Einbringen des Stabdübels in die zu prüfende Bohrung. Abschließend erfolgten das Einschrauben der Gewindestange und das Aufhängen der Drahthaken an der Gewindestange.



Abb. 3.14: Prüfkongfiguration – Durchführung der Zugprüfungen

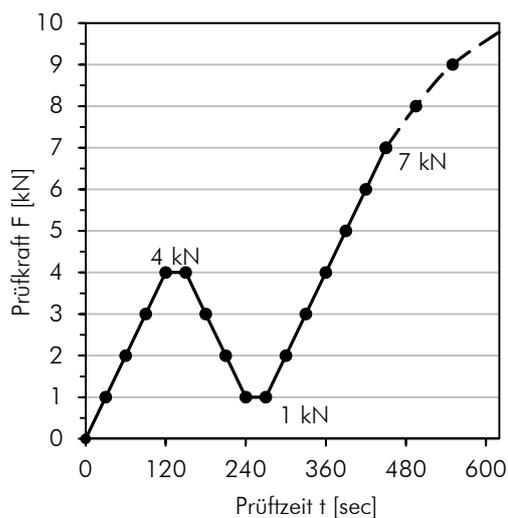
3.4.1 Belastungsverfahren

Um das Belastungsverfahren nach *ON EN 383:2007* durchführen zu können, benötigt man eine geschätzte Lochleibungsfestigkeit $f_{h,\alpha,est}$ bzw. geschätzte Maximallast $F_{max,est}$. Für die Zug- und Druckprüfungen von Birke, Fichte und Esche wurde das Belastungsverfahren gleich ge-

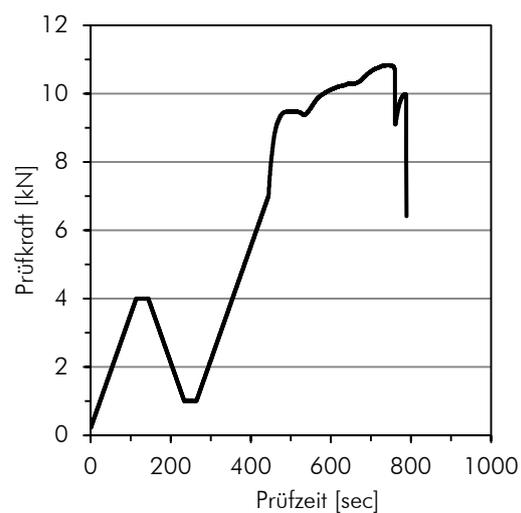
wählt. Die aufgebrachte Vorbelastung von 200 N dient dazu, den Schlupf vor der Messwertaufzeichnung zu überwinden und erfolgte mit einer Geschwindigkeit von 50 N/s. Die in der folgenden Beschreibung erwähnten Punkte sind in Abb. 3.6 ersichtlich.

3.4.1.1 Belastungsverfahren bei Birke

Da, wie zuvor erwähnt, Bretter aus demselben Stapel bereits für andere Studien verwendet wurden, war die charakteristische Rohdichte von ca. 550 kg/m^3 bereits bekannt. Die geschätzte Lochleibungsfestigkeit unter Druckbelastung für Birke wurde durch Gl. (19) für Laubholz nach *Hübner (2008)* ermittelt und betrug gerundet $F_{\text{max,est}} = 10,0 \text{ kN}$. Durch die geschätzte Maximallast von $10,0 \text{ kN}$ ergeben sich die Wendepunkte der Hysterese mit $0,4 F_{\text{max,est}}$ und $0,1 F_{\text{max,est}}$ zu $4,0 \text{ kN}$ und $1,0 \text{ kN}$. Die Belastung erfolgte bis zum Punkt 27 bzw. $0,7 F_{\text{max,est}}$ in Abb. 3.15 lastgesteuert mit einer Belastungsgeschwindigkeit von $2,0 \text{ kN/min}$. Ab $0,7 F_{\text{max,est}}$ erfolgte die Belastung weggesteuert mit 1 mm/min bis zu einem Lastabfall von 40% . Bei den Druckprüfungen war durch die Prüfvorrichtung die Verformung auf 25 mm beschränkt. Für die Zugprüfungen wurden das Belastungsverfahren und die geschätzte Maximallast beibehalten.



(a) Verlauf laut *ON EN 383:2007*

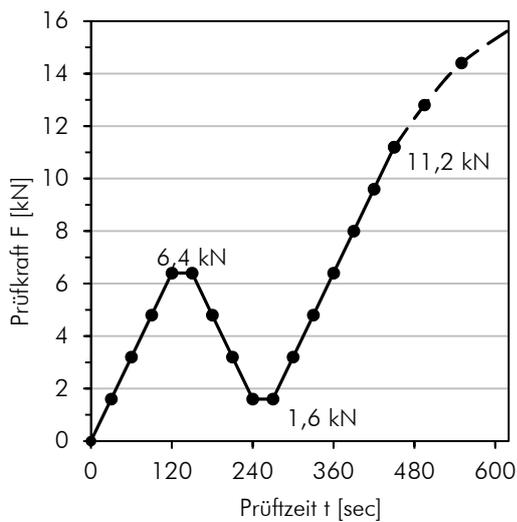


(b) Verlauf an Zugprobe B12_Z04

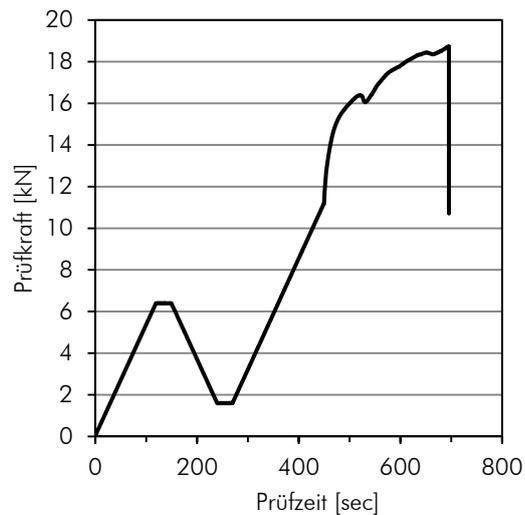
Abb. 3.15: Theoretisches Belastungsverfahren laut *ON EN 383:2007* und durchgeführtes Belastungsverfahren anhand Zugprobe B12_Z04

3.4.1.2 Belastungsverfahren bei Esche

Von *Hübner (2013)* lagen Versuchsergebnisse für Esche vor und $F_{\text{max,est}}$ wurde basierend auf diesen Ergebnissen mit $16,0 \text{ kN}$ angenommen. Durch die geschätzte Maximallast ergaben sich wie die Wendepunkte und die Belastungsgeschwindigkeiten für das Belastungsverfahren, siehe Tab. 3.7.



(a) Verlauf laut ON EN 383:2007

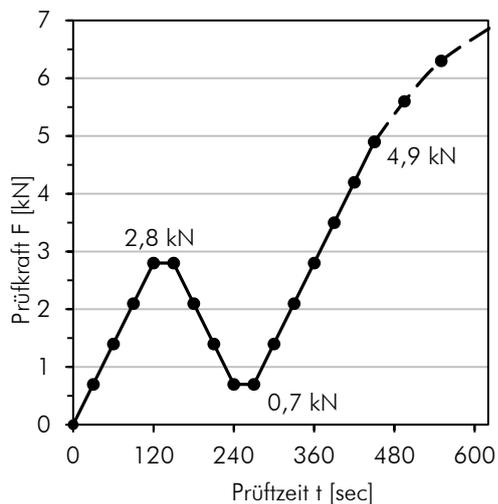


(b) Verlauf an Druckprobe E12_D10

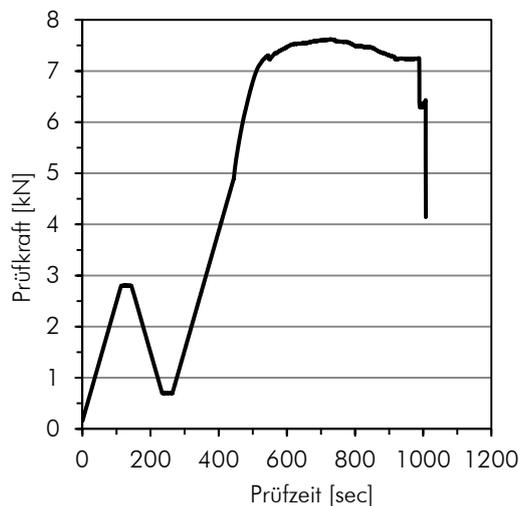
Abb. 3.16: Theoretisches Belastungsverfahren laut ON EN 383:2007 und durchgeführtes Belastungsverfahren anhand Druckprobe E12_D10

3.4.1.3 Belastungsverfahren bei Fichte:

Die erwartete durchschnittliche Maximallast für Fichte wurde durch die Versuchsergebnisse von Spörk (2007) für Durchmesser 12 mm ermittelt und betrug $F_{max,est} = 7,0$ kN. Die Wendepunkte und Belastungsgeschwindigkeiten sind Tab. 3.7 zu entnehmen.



(a) Verlauf laut ON EN 383:2007



(b) Verlauf an Zugprobe F12_Z06

Abb. 3.17: Theoretisches Belastungsverfahren laut ON EN 383:2007 und durchgeführtes Belastungsverfahren anhand Zugprobe F12_Z06

In Tab. 3.7 sind die Werte des Belastungsverfahrens für Druck und Zugbelastung von Birke, Esche und Fichte zusammengefasst.

	$F_{\max,est}$	Punkt 04 $0,4 F_{\max,est}$	Punkt 11 $0,1 F_{\max,est}$	Belastungsge- schwindigkeit bis Punkt 27 [kN/min]	Punkt 27 $0,7 F_{\max,est}$	Belastungsge- schwindigkeit ab Punkt 27 [mm/min]
Birke	10,0	4,0	1,0	2,0	7,0	1,0
Esche	16,0	6,4	1,6	3,2	11,2	1,2
Fichte	7,0	2,8	0,7	1,4	4,9	0,5

Tab. 3.7: Werte des Belastungsverfahrens für Druck und Zug von Birke, Esche und Fichte

3.4.2 Bruchbilder der Probekörper

Direkt nach der Prüfung erfolgte die Dokumentation mittels Fotografieren der geprüften Probekörper. In den folgenden Bruchbildern der Lochleibungsprobekörper können deutliche Aufweitungen der Bohrlöcher und Stauchungen mit seitlicher Verdrängung des Holzmaterials beobachtet werden. Zudem ist ersichtlich, dass die Verschiebung und das Verhalten des Holzes innerhalb einer Holzart stark variieren können. Für jede untersuchte Holzart werden drei repräsentative Probekörper in Abb. 3.18, Abb. 3.19 sowie Abb. 3.20 dargestellt. Charakteristisch ist der Bruch in Lochmitte auf der belasteten Seite und ein weniger stark ausgeprägter Riss auf der, der Lasteinwirkung abgewandten, Seite.

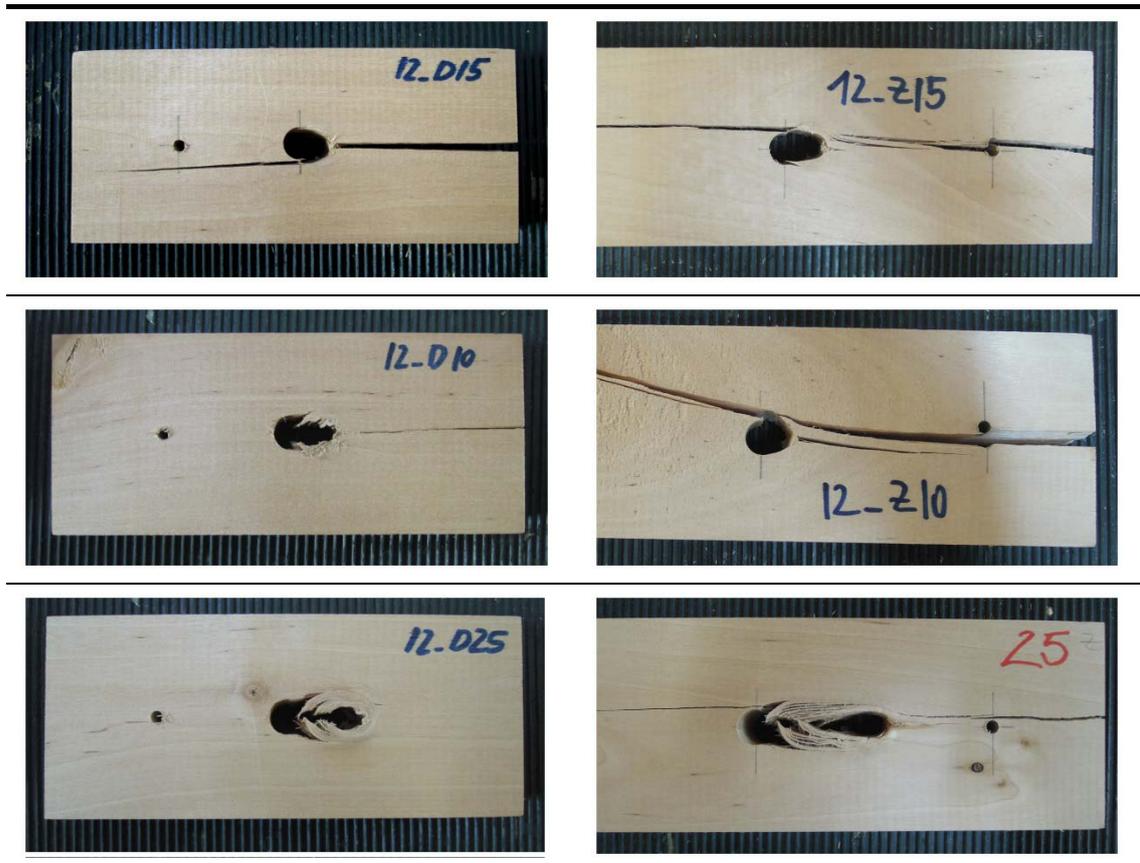


Abb. 3.18: geprüfte Druck- und Zugprobekörper aus Birke

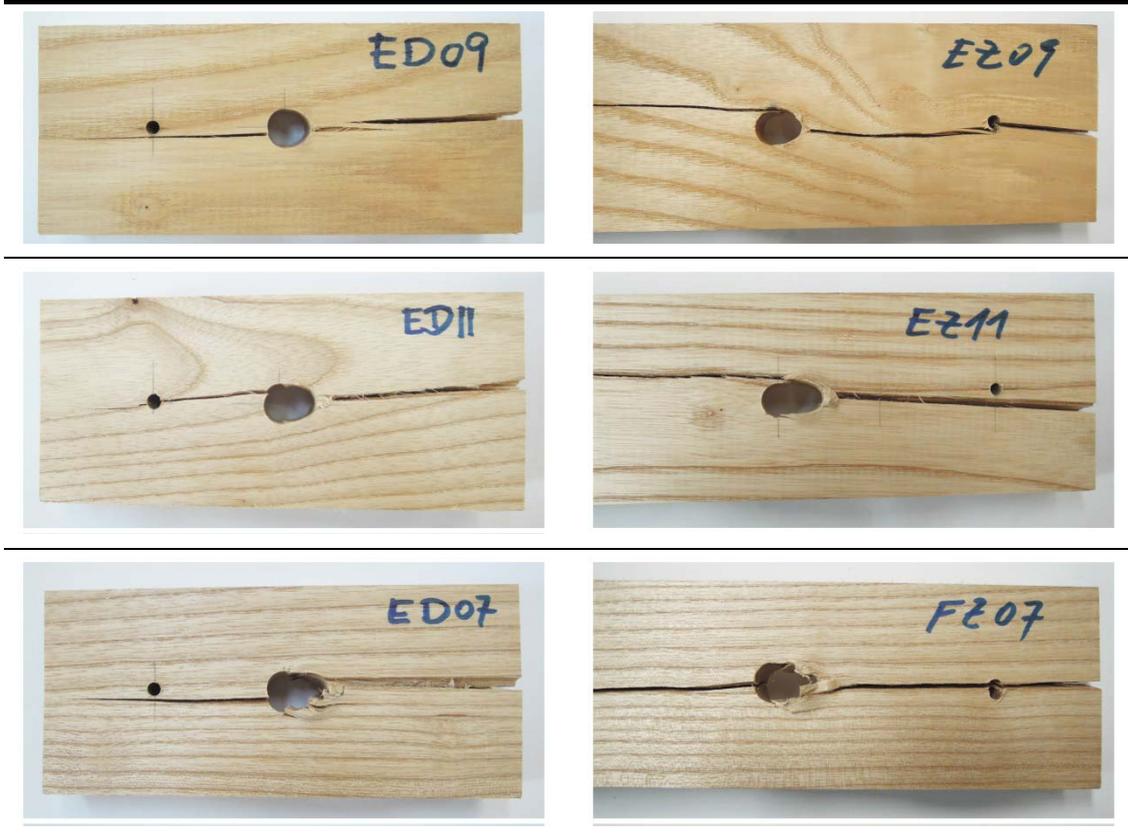


Abb. 3.19: geprüfte Druck- und Zugprobekörper aus Esche

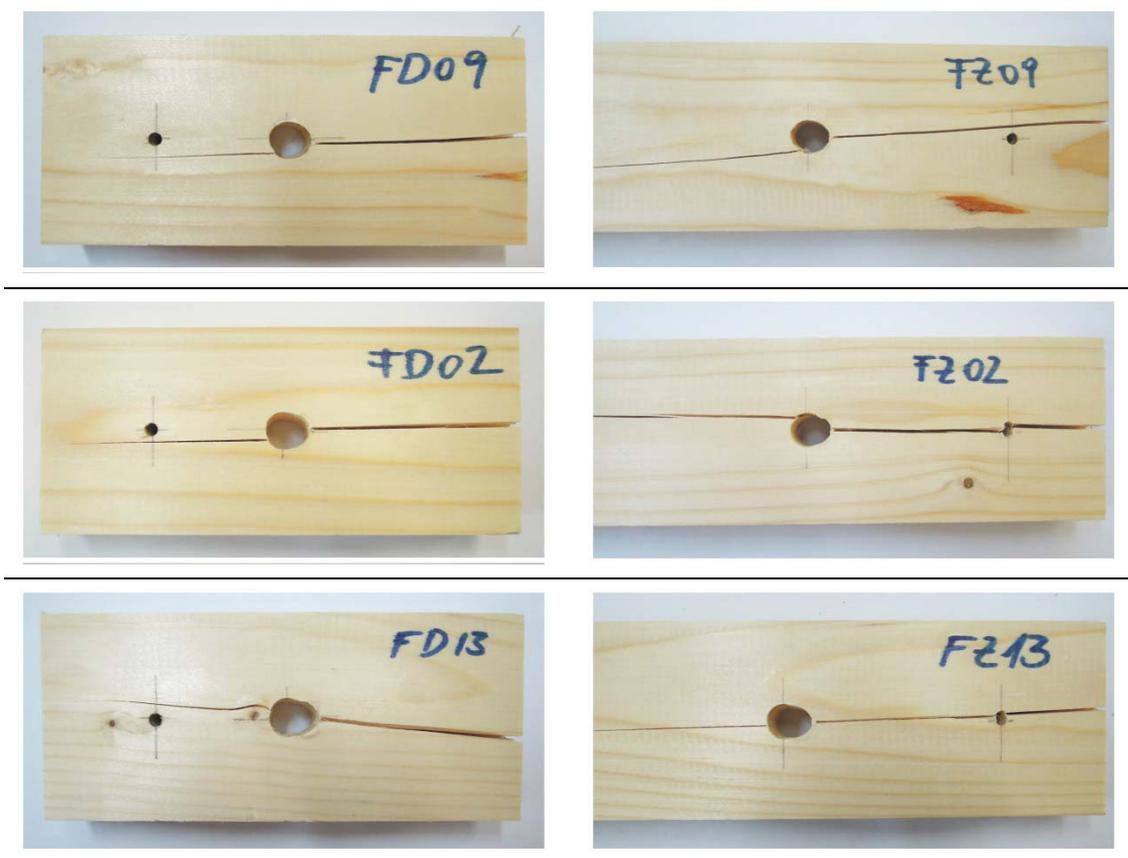


Abb. 3.20: geprüfte Druck- und Zugprobekörper aus Fichte

3.4.3 Probekörper für die Rohdichte- und Holzfeuchtebestimmung

Um die Rohdichte des geprüften Holzes möglichst gut abbilden zu können, wurden die Proben zur Ermittlung der Rohdichte und der Holzfeuchte auf der, der Lasteinleitung abgewandten Seite, in Faserrichtung entnommen. Die Abmessungen der Proben betragen in etwa 30/20/24 mm mit einer Masse, je nach Holzart, von ca. 6 bis 15 g. In Abb. 3.21 sind die Entnahmestellen der Rohdichteprobekörper exemplarisch für zwei Probekörper dargestellt.



(a) Druckprobekörper E12_D05

(b) Zugprobekörper F12_Z08

Abb. 3.21: Entnahmestellen der Rohdichteprobekörper bei Druck- und Zugproben

3.5 Auswertung der Prüfungen

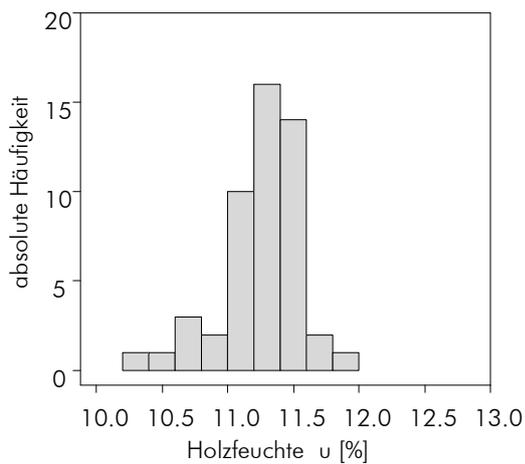
Bei der Auswertung der Prüfungen wurde eine log-Normalverteilung der Rohdichte und der Lochleibungsfestigkeit der Serien vorausgesetzt.

3.5.1 Fließmoment der Stabdübel

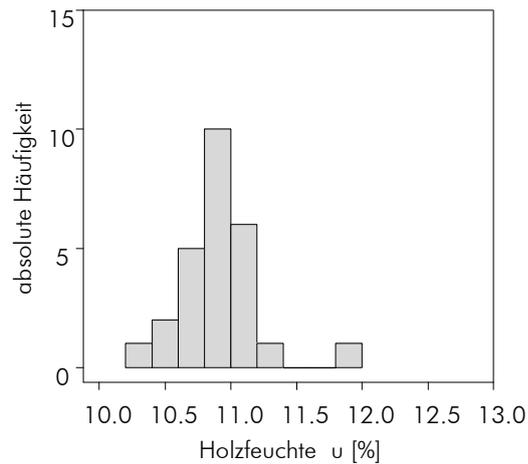
Da keine plastischen Verformungen und Fließgelenke auftraten, wurde für die gesamten Prüfungen der gleiche Stabdübel verwendet. Weil sich der Stabdübel nicht plastisch verformte, kann eine annähernd gleichmäßige Spannungsverteilung angenommen und auf eine Ermittlung des Fließmomentes verzichtet werden.

3.5.2 Holzfeuchte der Probekörper

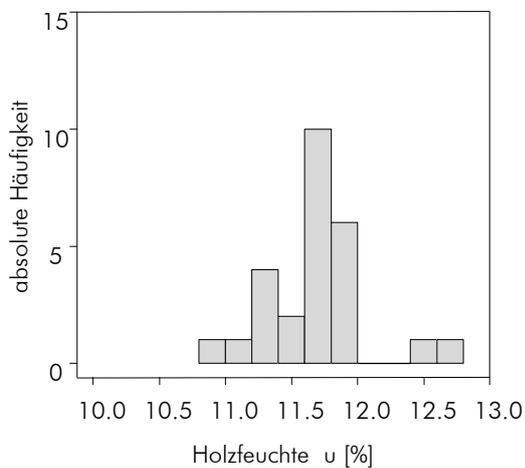
Die Probekörper wurden bis zur Massenkonstanz bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 65 ± 5 % und einer Temperatur von 20 ± 2 °C gelagert. Dabei ergab sich für die Probekörper eine mittlere Holzfeuchte von 11,3 % bei Birke, 10,9 % bei Esche und 11,7 % bei Fichte.



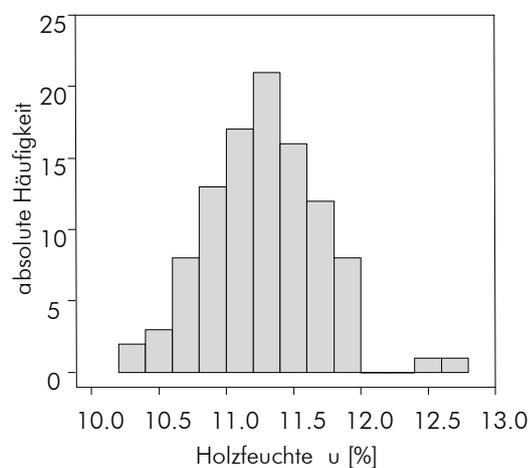
(a) Probekörper aus Birke



(b) Probekörper aus Esche



(c) Probekörper aus Fichte



(d) Probekörper aus Birke, Esche und Fichte

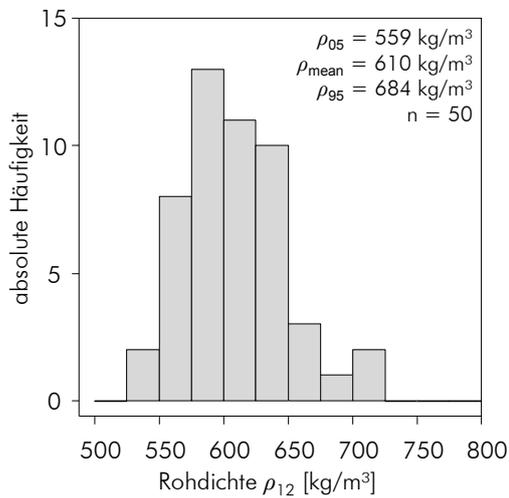
Abb. 3.22: Histogramme der Holzfeuchte der Probekörper

Tab. 3.8: Ausgleichsholzfeuchte der Darrproben bei relativer Luftfeuchtigkeit von 65 ± 5 % und 20 ± 2 °C

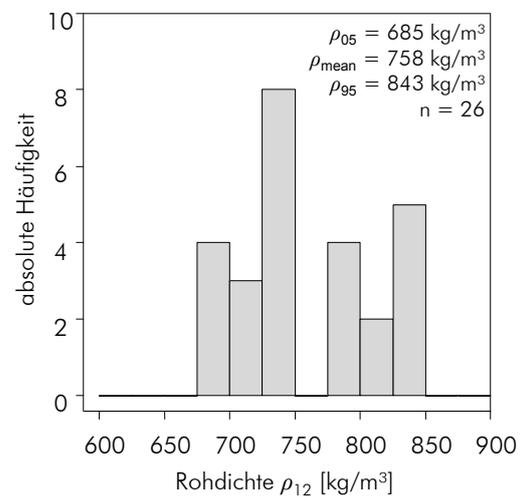
Holzart	Anzahl [Stück]	Kleinwert [%]	Mittelwert [%]	Größtwert [%]	CoV [%]
Birke gesamt	50	10,3	11,3	11,9	2,7
Druck	25	10,7	11,4	11,9	2,2
Zug	25	10,3	11,2	11,6	2,8
Esche gesamt	26	10,3	10,9	11,9	2,8
Druck	13	10,6	11,0	11,9	3,0
Zug	13	10,3	10,8	11,2	2,3
Fichte gesamt	26	11,0	11,7	12,6	3,1
Druck	13	11,3	11,8	12,6	3,0
Zug	13	11,0	11,5	11,9	2,5

3.5.3 Rohdichte der Probekörper

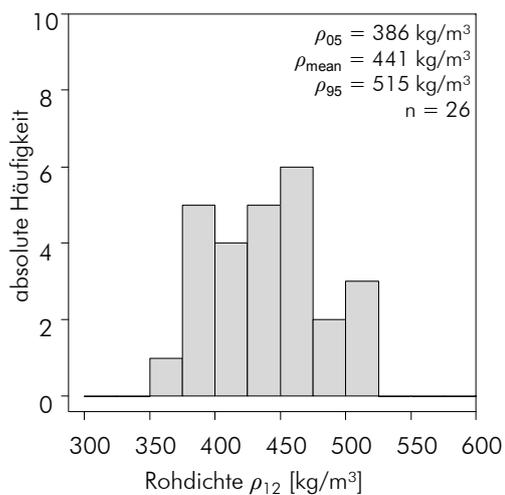
Aus Birkenholz wurden 50 Probekörper erstellt und geprüft, wobei sich die mittlere Rohdichte bei 12 % Holzfeuchte zu $\rho_{12} = 610 \text{ kg/m}^3$ ergibt. Der Mittelwert der Rohdichte für die 26 Probekörper aus Esche beträgt $\rho_{12} = 758 \text{ kg/m}^3$. Bei den 26 Probekörpern aus Fichte ergibt sich der Mittelwert der Rohdichte zu $\rho_{12} = 441 \text{ kg/m}^3$, wie in Tab. 3.10 ersichtlich.



(a) Probekörper aus Birke

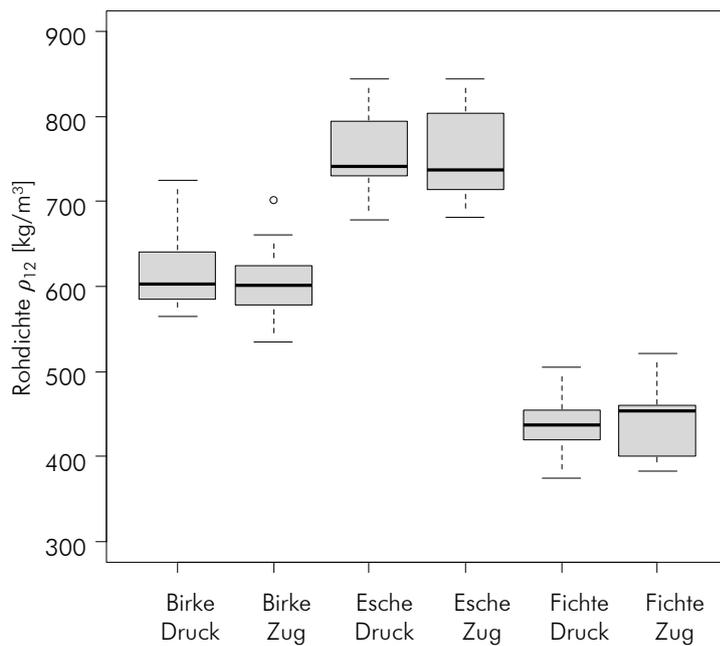


(b) Probekörper aus Esche



(c) Probekörper aus Fichte

Abb. 3.23: Histogramme der Rohdichten der Probekörper



Holzart	Median [kg/m ³]
Birke	602
Druck	603
Zug	602
Esche	744
Druck	741
Zug	737
Fichte	438
Druck	437
Zug	453

Abb. 3.24: Boxplots und Mediane für die Rohdichten aus Birke, Fichte und Esche bei 12 % Holzfeuchte

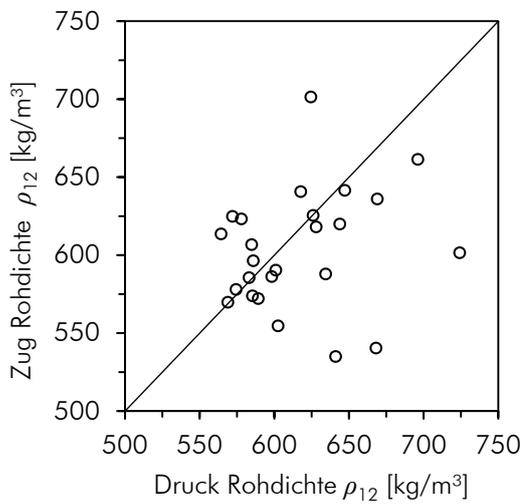
Die statistischen Kennwerte der ermittelten Rohdichten sind in Tab. 3.10 zusammengefasst. Daraus ist ersichtlich, dass die Rohdichten für die Zug- und Druckprüfungen bei gleicher Holzart, kaum schwanken. Sowohl beim t-Test als auch beim Wilcoxon-Mann-Whitney-Test wird für die Rohdichte von Birke, Esche und Fichte eine realisierte Signifikanz (p -Wert) größer 0,05 ausgegeben. Dies deutet darauf hin, dass die mittleren Rohdichten (t-Test) und der Median (Wilcoxon-Test) der verglichenen Serien sich nicht signifikant unterscheiden.

Tab. 3.10: Kleinst-, Mittel- und Größtwerte der Rohdichte bei 12 % Holzfeuchte

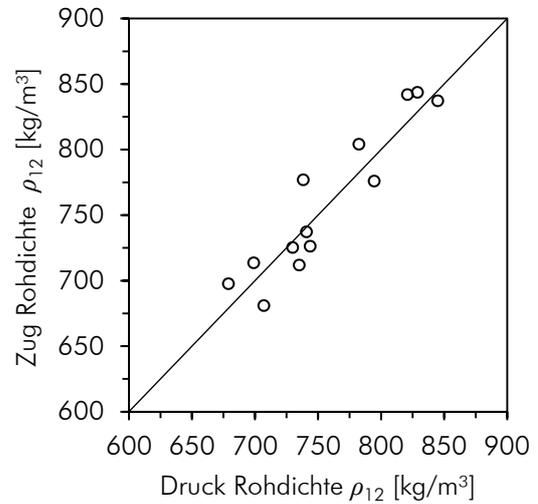
Holzart	Kleinstwert [kg/m ³]	Mittelwert [kg/m ³]	Größtwert [kg/m ³]	CoV [%]	t-Test p -Wert [-]	Wilcoxon-Test p -Wert [-]	ρ_{05} [kg/m ³]	ρ_{95} [kg/m ³]
Birke	535	610	724	6,57	0,260	0,407	559	684
Druck	564	616	724	6,79			569	691
Zug	535	603	701	6,29			543	658
Esche	679	758	845	7,11	0,926	0,880	685	843
Druck	679	757	845	6,93			691	835
Zug	681	759	844	7,57			691	843
Fichte	375	441	521	9,29	0,838	0,880	386	515
Druck	375	439	504	8,60			387	496
Zug	383	443	521	10,26			389	520

In Abb. 3.25 sind die Rohdichten der Druck- und Zugprobekörper des jeweiligen Brettes gegenübergestellt. Liegen die gemessenen Werte auf der Diagonale, wird kein Unterschied

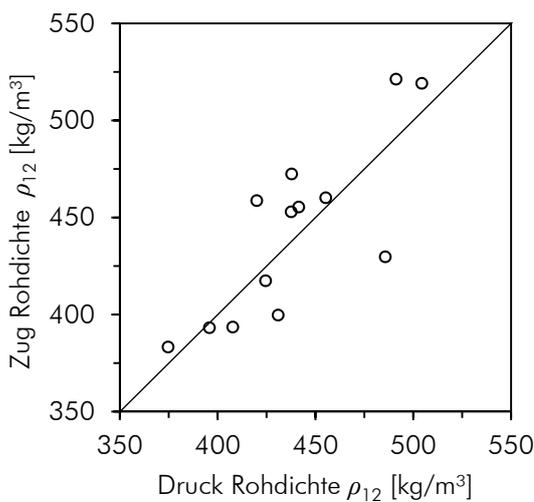
zwischen der Rohdichte der Druck- und Zugprobe des jeweiligen Brettes festgestellt. Liegt der vermerkte Wert eher im rechten, unteren Dreieck, so hat der Druckprobekörper eine höhere Rohdichte als der Zugprobekörper.



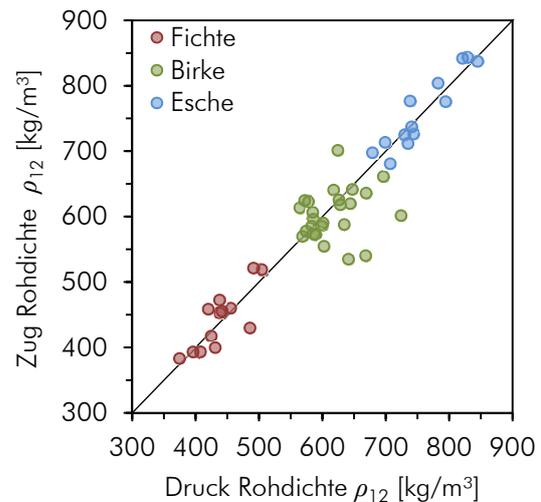
(a) Rohdichte der Birkenproben



(b) Rohdichte der Eschenproben



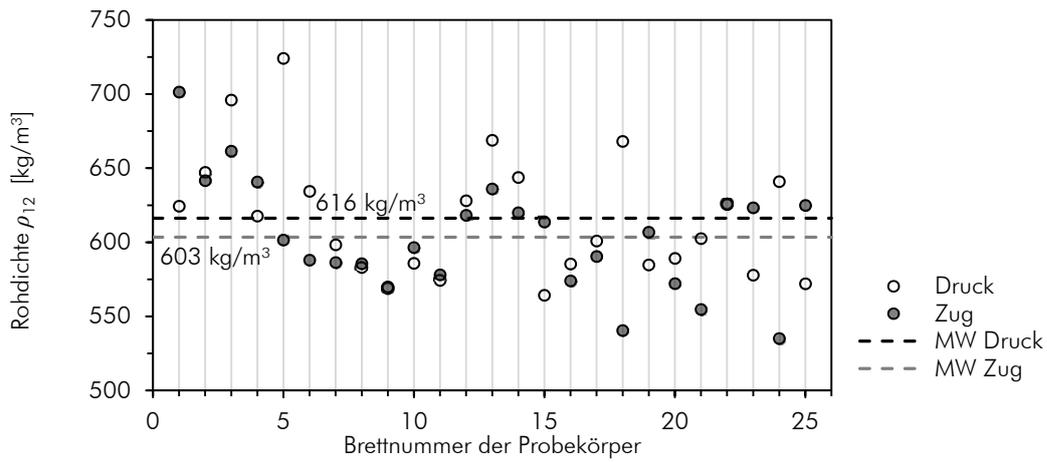
(c) Rohdichte der Fichtenproben



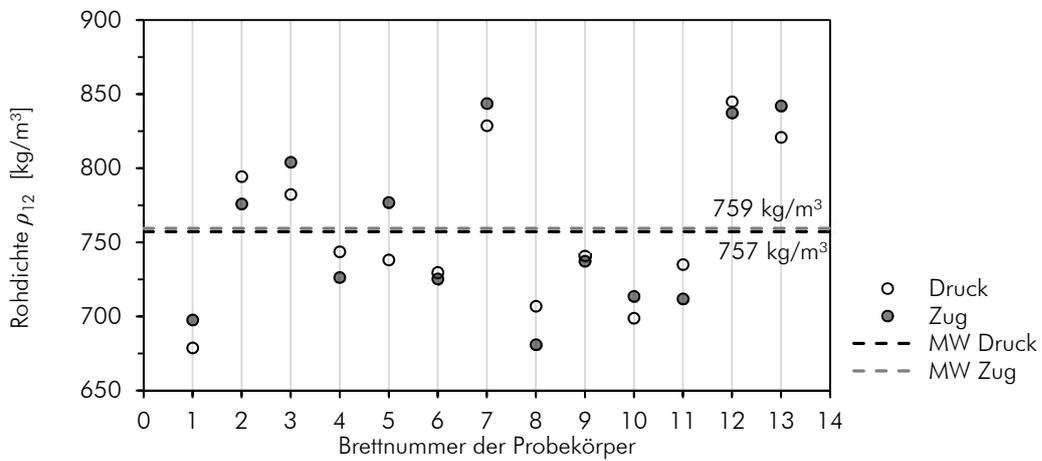
(d) Rohdichte der Proben aus Birke, Esche u. Fichte

Abb. 3.25: Rohdichten der Druck- versus Zugproben von Birke, Esche und Fichte

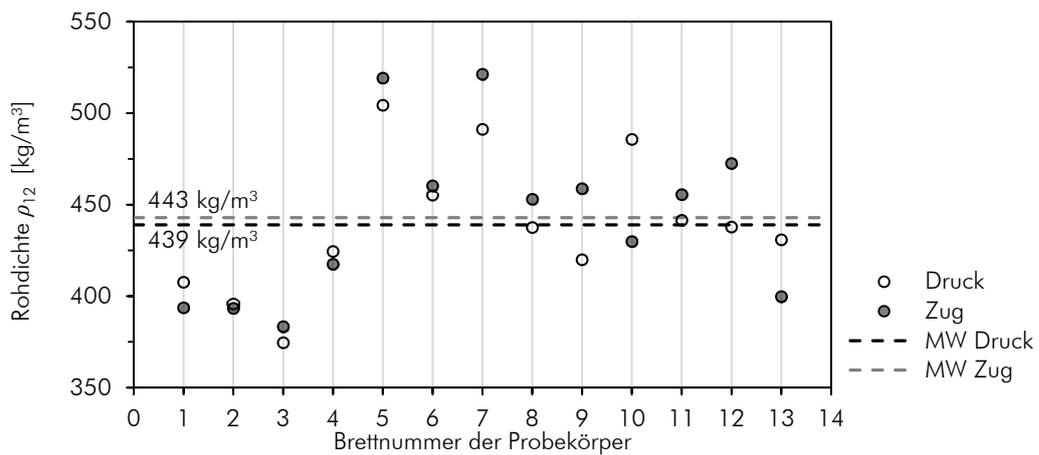
Bei Birke kann beobachtet werden, dass die ermittelten Rohdichtewerte stärker streuen als bei Esche und Fichte. Bei manchen Probekörpern kann ein Rohdichteunterschied von bis zu 100 kg/m^3 festgestellt werden, obwohl die verglichenen Druck- und Zugproben aus einem 1 m langen Streifen eines Brettes stammen. Ein sehr geringer Unterschied der Rohdichten ist bei Esche zu beobachten. Hier liegen die ermittelten Werte fast alle annähernd auf der Diagonale. Bei Fichte ist die Übereinstimmung der Rohdichten mit einer maximalen Differenz von ca. 50 kg/m^3 nicht ganz so hoch wie bei Birke. Abb. 3.26 zeigt die Rohdichten der Zug- und Druckprobekörper aus den jeweiligen Brettern.



(a) Birkenproben



(b) Eschenproben



(c) Fichtenproben

Abb. 3.26: Differenzen der Rohdichten von Birke, Esche und Fichte

3.5.4 Aufspalten der Probekörper

In *ON EN 383:2007* ist die Höchstlast für die Berechnung der Lochleibungsfestigkeit als „(...) Höchstlast, die gemessen wird, bevor der Probekörper den Grenzwert der Verformung erreicht hat (...)“ definiert, wobei der Grenzwert der Verformung mit 5 mm angegeben wird.

In Abb. 3.27 sind die Verschiebungen der einzelnen Serien dargestellt. Da die Wegaufnehmer nur für eine maximale Verschiebung von 10 mm kalibriert sind, wurden alle größeren gemessenen Verschiebungen in grau dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Verschiebung stark von der Holzart abhängig ist. Die mit Zug belasteten Probekörper spalteten bei allen drei Holzarten im Mittel (blaue Kreise) später als die mit Druck belasteten. Ein Zusammenhang mit dem vergrößerten belasteten Randabstand bei Zugbelastung von $10d$ könnte dafür eine mögliche Erklärung bieten.

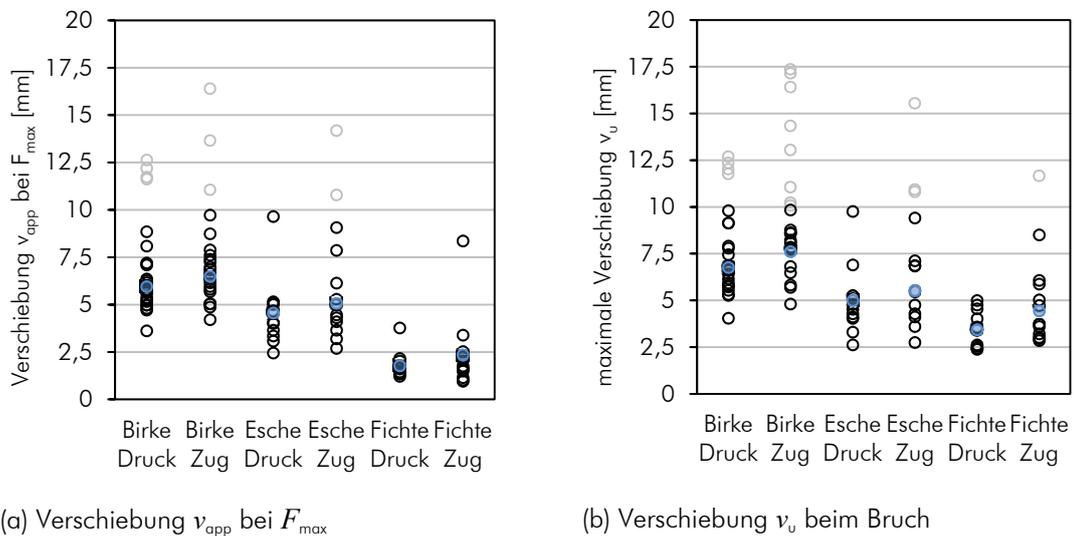


Abb. 3.27: Verschiebung des Stabdübels bei F_{max} und beim Bruch

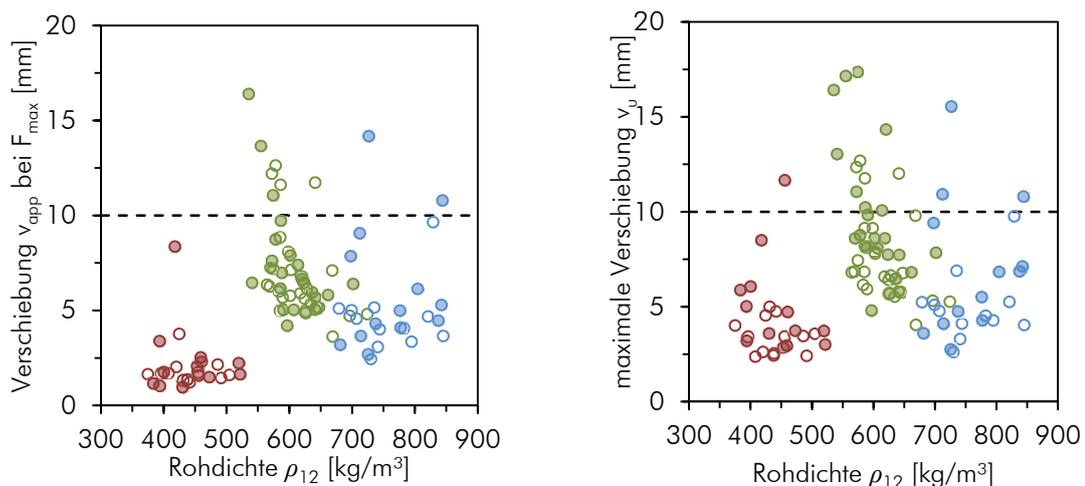


Abb. 3.28: Streudiagramm der Verschiebung über die Rohdichte für Birke, Esche und Fichte

Wie in Abb. 3.28 ersichtlich, kann kein Zusammenhang zwischen Rohdichte und Verschiebung erkannt werden. Dabei sind die Eschenprobekörper Blau, die Birkenproben in Grün und die Fichtenproben in Rot dargestellt. Die ausgefüllten Kreise stellen die Zugproben dar.

In Tab. 3.11 ist die Anzahl der Probekörper angegeben, die vor der Verformungsgrenze von 5 mm gespalten sind. Von den Probekörpern aus Birke spalteten nur 4 % gefolgt von den Eschenproben mit 46 % und den Fichtenprobekörpern mit 77 %. Bei Esche und Fichte neigen die auf Druck belasteten Probekörper mit 92 % deutlich häufiger zum Spalten als bei Zugbelastung.

Tab. 3.11: maximale Verschiebung der Probekörper aus Birke, Esche und Fichte bei Bruch

	Anzahl gesamt	$v_{u,min}$ [mm]	$v_{u,Mittelwert}$ [mm]	$v_{u,max}$ [mm]	Anzahl $v_u < 5$ mm [Stück]	[%]
Birke	50	4,0	7,2	> 10	2	4
Druck	25	4,0	6,8	> 10	1	4
Zug	25	4,8	7,6	> 10	1	4
Esche	26	2,6	5,3	> 10	12	46
Druck	13	2,6	5,0	9,8	7	54
Zug	13	2,8	5,5	> 10	5	39
Fichte	26	2,4	3,9	5,0	20	77
Druck	13	2,4	3,4	5,0	12	92
Zug	13	2,9	4,4	> 10	8	62

In Abb. 3.29 ist die gemittelte Prüfkraft über den gemittelten Verschiebungsweg bis zum Aufspalten des ersten Probekörpers dargestellt. Birke, Esche und Fichte zeigen einen linear-elastischen Anstieg der gemittelten Last-Verformungskurven bis zu einer beginnenden Plastifizierung des Holzes. Bei Fichte bleibt die Last annähernd konstant. Es wird ein sehr duktilen Verhalten von Birke festgestellt.

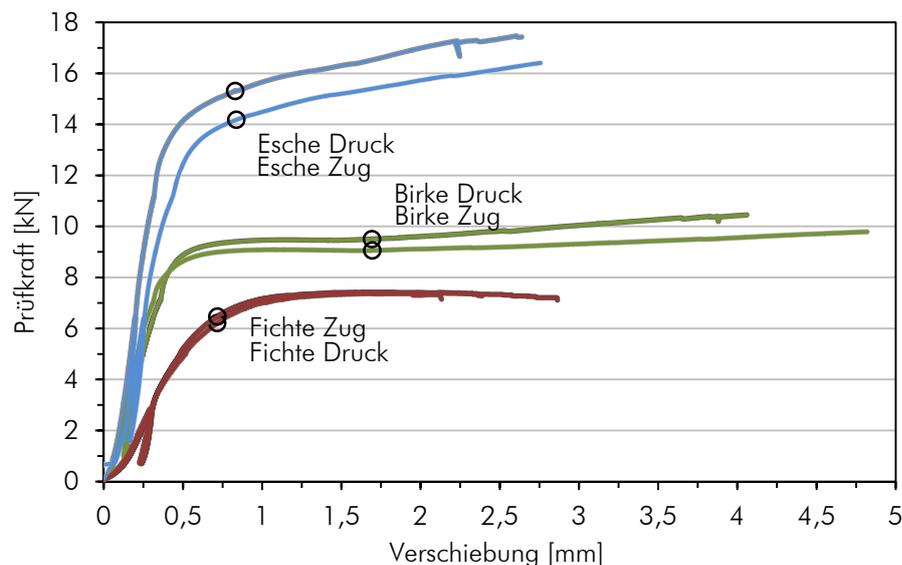


Abb. 3.29: Gemittelte Last-Verformungskurven für Stabdübel 12 mm bei Birke, Esche und Fichte

3.5.5 Verformung der Probekörper

In Abb. 3.30 sind die Last-Verformungskurven für Birke, Esche und Fichte bis zu einer Verschiebung von 1 mm dargestellt. Es kann erkannt werden, dass bei allen Serien die Hysteresis im elastischen Bereich liegt.

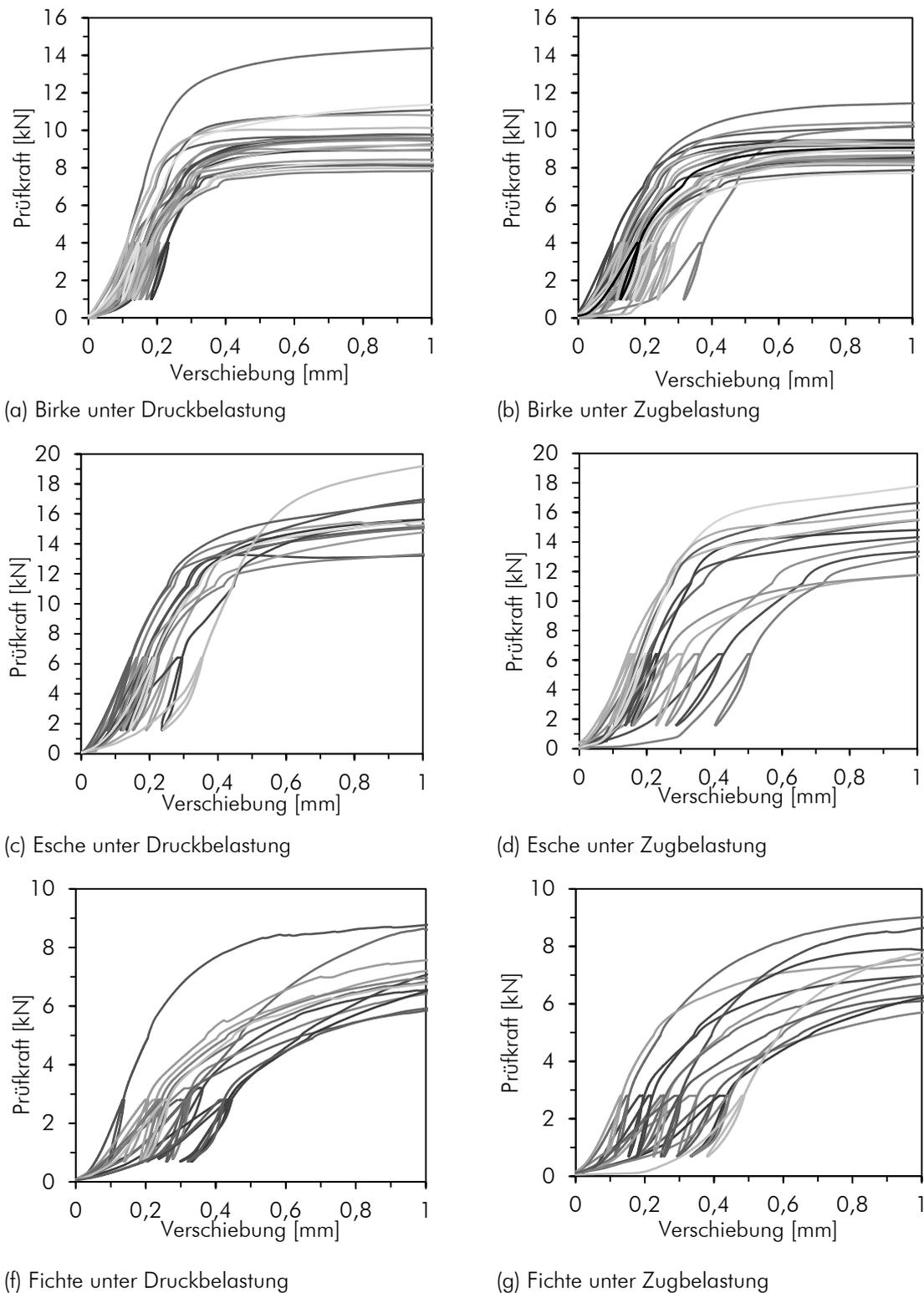
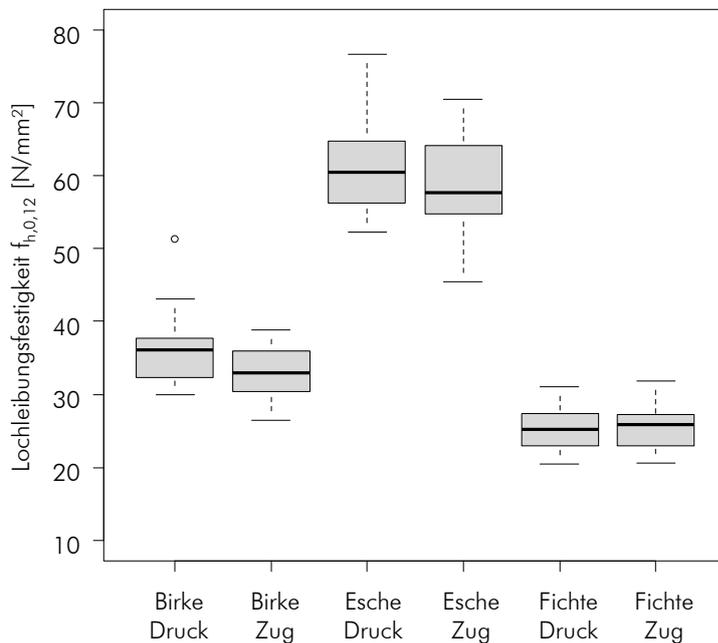


Abb. 3.30: Last-Verformungskurven bei Birke, Esche und Fichte bis 1 mm Verschiebung

3.5.6 Überblick der ermittelten Lochleibungsfestigkeiten

Durch die bei den Lochleibungsversuchen ermittelte Höchstlast, nach Abschnitt 3.2, den Stabdübeldurchmesser und die gemessene Brettstärke ergibt sich durch Gl. (21) die ermittelte Lochleibungsfestigkeit $f_{h,0}$ parallel zur Faser. Die Lochleibungsfestigkeit $f_{h,0,12}$ steht für die ermittelte Lochleibungsfestigkeit bei 12 % Holzfeuchte, welche wie in 3.2 beschrieben ermittelt wurde. In Abb. 3.31 sind die ermittelten Lochleibungsfestigkeiten $f_{h,0,12}$ der verschiedenen Holzarten und Belastungsarten dargestellt. Vergleicht man die Zug- und Druckboxplots von Birke, Esche und Fichte, gleichen sich die Verläufe qualitativ. Für Fichte ergeben sich die geringsten Lochleibungsfestigkeiten, gefolgt von Birke und Esche. Dieser Unterschied lässt sich auf die unterschiedlichen Rohdichten der Hölzer zurückführen.



Holzart	Median [N/mm²]
Birke	33,96
Druck	36,17
Zug	32,88
Esche	60,56
Druck	60,56
Zug	57,66
Fichte	25,49
Druck	25,16
Zug	25,81

Abb. 3.31: Boxplots der Lochleibungsfestigkeiten

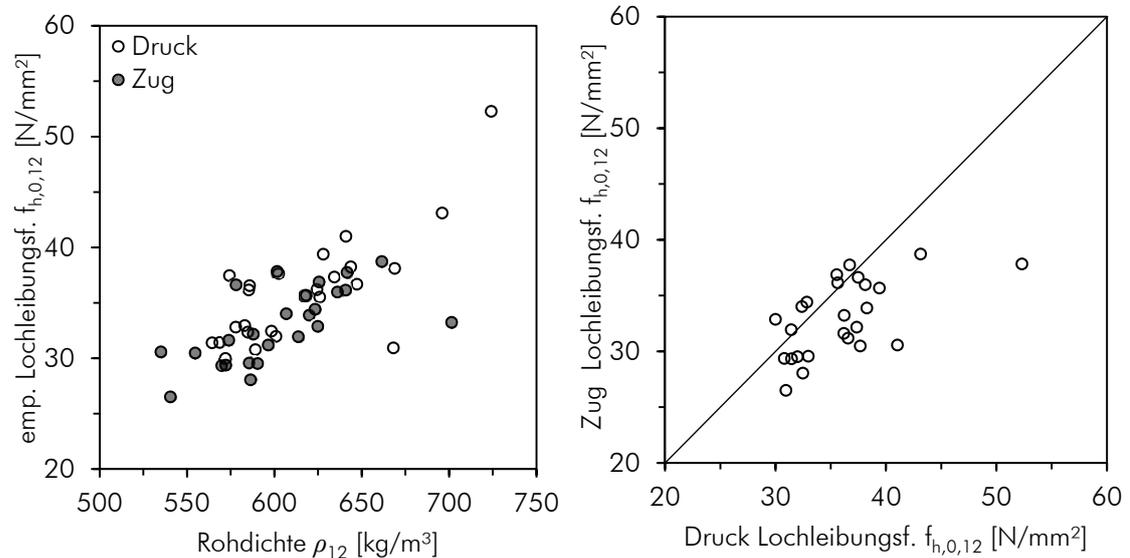
Tab. 3.12: Mediane

Tab. 3.13: Kleinst-, Mittel- und Größtwerte der Lochleibungsfestigkeit bei 12 % Holzfeuchte

Holzart	Kleinstwert [N/mm²]	Mittelwert [N/mm²]	Größtwert [N/mm²]	CoV [%]	t - Test p-Wert [-]	Wilcoxon - Test p-Wert [-]	$f_{h,0,5}$ [N/mm²]	$f_{h,0,95}$ [N/mm²]
Birke	26,52	34,44	51,36	12,53	0,014	0,024	29,36	40,28
Druck	29,99	35,90	51,36	13,12			30,82	42,70
Zug	26,52	32,98	38,73	10,23			28,32	37,83
Esche	45,48	59,90	76,72	12,60	0,181	0,362	46,99	71,49
Druck	52,34	61,84	76,72	11,44			53,42	73,80
Zug	45,48	57,96	70,42	13,41			46,13	67,99
Fichte	20,45	25,47	31,89	13,03	0,998	0,960	20,68	30,88
Druck	20,45	25,46	31,05	12,95			20,88	30,64
Zug	20,63	25,48	31,89	13,65			20,75	30,98

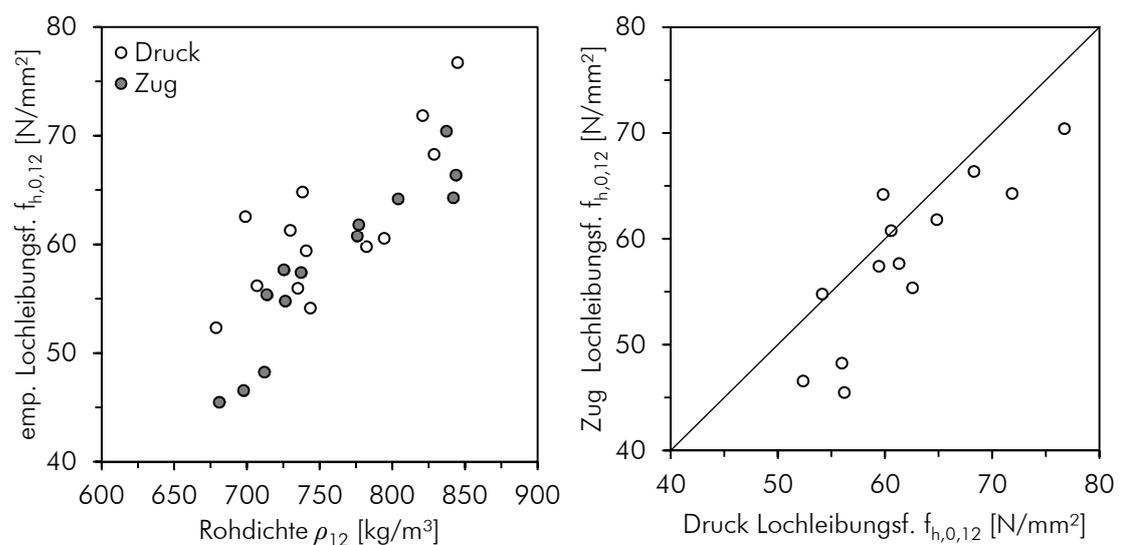
Wie in Tab. 3.13 ersichtlich, wird beim Vergleich der Lochleibungsfestigkeit $f_{h,0,12}$ der Serien aus Birke beim t-Test $p = 0,014$ und beim Wilcoxon-Mann-Whitney-Test $p = 0,024$ ermittelt. Beide p -Werte liegen unter dem Prüfniveau von $1 - \alpha = 0,95$ mit $\alpha = 0,05$, wodurch auf einen signifikanten Unterschied im Mittelwert (t-Test) und Median (Wilcoxon-Test) geschlossen werden kann. Bei den Serien aus Esche und Fichte kann bei gleichem Signifikanzniveau kein Unterschied in den Lageparametern festgestellt werden.

Abb. 3.32 zeigt die ermittelten Lochleibungsfestigkeiten $f_{h,0,12}$ bei Druck- bzw. Zugbelastung der Probekörper aus den jeweiligen Brettern. Daraus wird ersichtlich, dass für die Druckproben meist eine höhere Lochleibungsfestigkeit ermittelt wird. Bei Birke beträgt der Unterschied zwischen Druck- und Zugbelastung bei der mittleren Lochleibungsfestigkeit 8,13 %, bei Esche 6,70 % und bei Fichte -0,07 %.



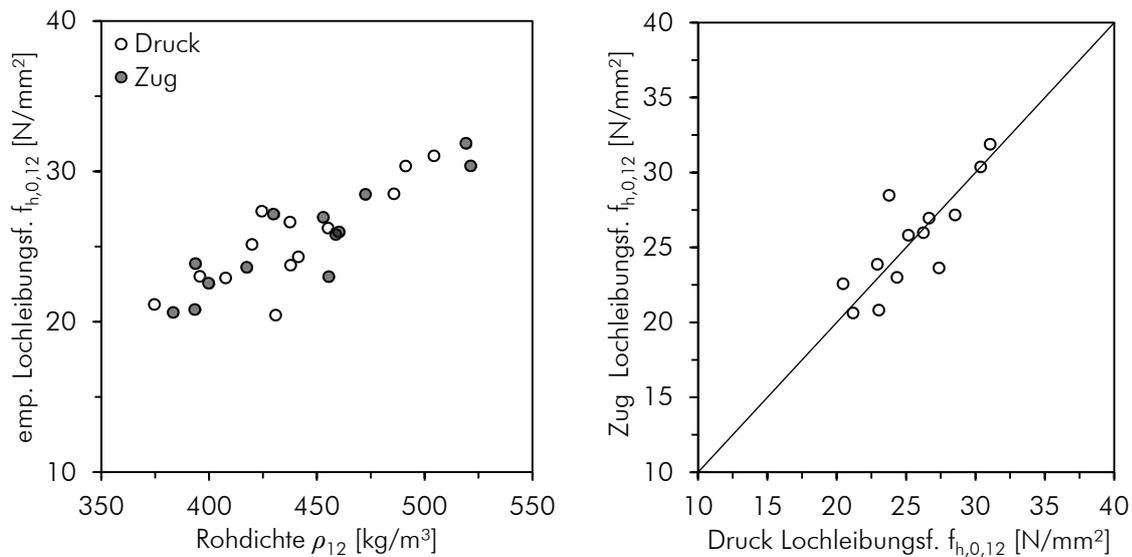
(a) Lochleibungsfestigkeit vers. Rohdichte Birke

(b) Lochleibungsfestigkeit Zug- versus Druck Birke



(c) Lochleibungsfestigkeit vers. Rohdichte Esche

(d) Lochleibungsfestigkeit Zug- versus Druck Esche



(e) Lochleibungsfestigkeit vers. Rohdichte Fichte (f) Lochleibungsfestigkeit Zug- versus Druck Fichte

Abb. 3.32: Lochleibungsfestigkeit der Probekörper aus Birke, Esche und Fichte

In Abb. 3.33 sind die Rohdichten aller geprüften Probekörper über deren Lochleibungsfestigkeit aufgetragen. Zu erkennen ist eine klare Abgrenzung der Rohdichtebereiche. Bei der Überlappung von Birke und Esche im Bereich von 700 kg/m³ ist zu erkennen, dass trotz gleicher Rohdichte die Lochleibungsfestigkeiten zwischen den beiden Holzarten deutlich unterschiedlich ausfallen können. Ein Zusammenhang von Rohdichte und Lochleibungsfestigkeit kann aus Abb. 3.33 entnommen werden.

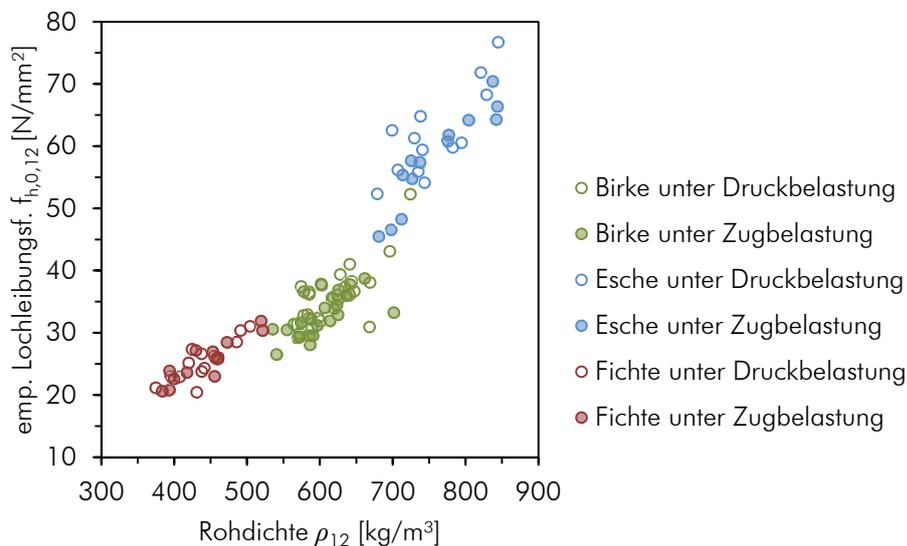
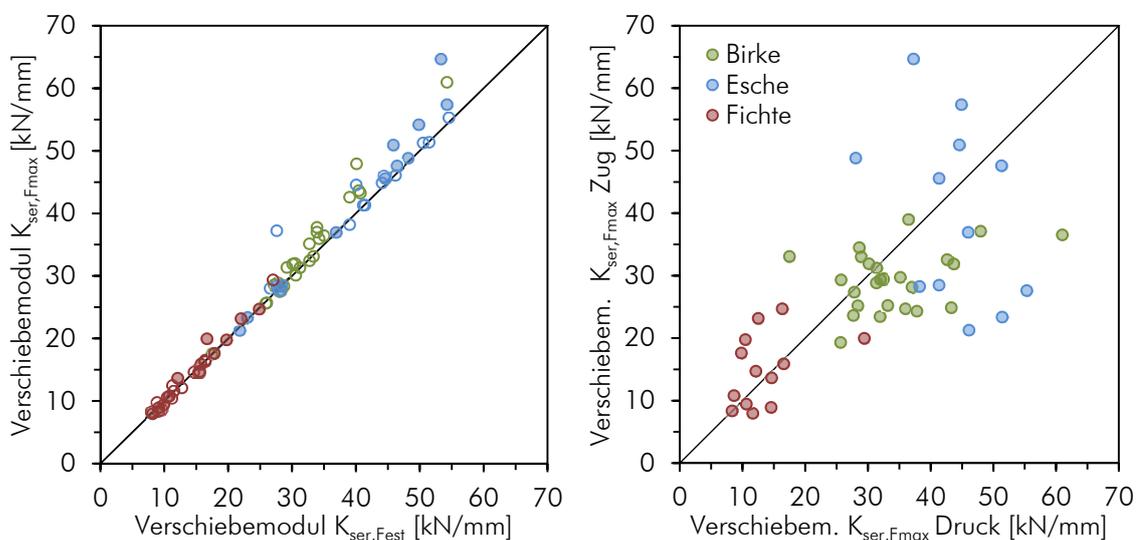


Abb. 3.33: Lochleibungsfestigkeit der gesamten Probekörper aus Birke, Esche und Fichte

3.5.7 Verschiebe- und Bettungsmoduln

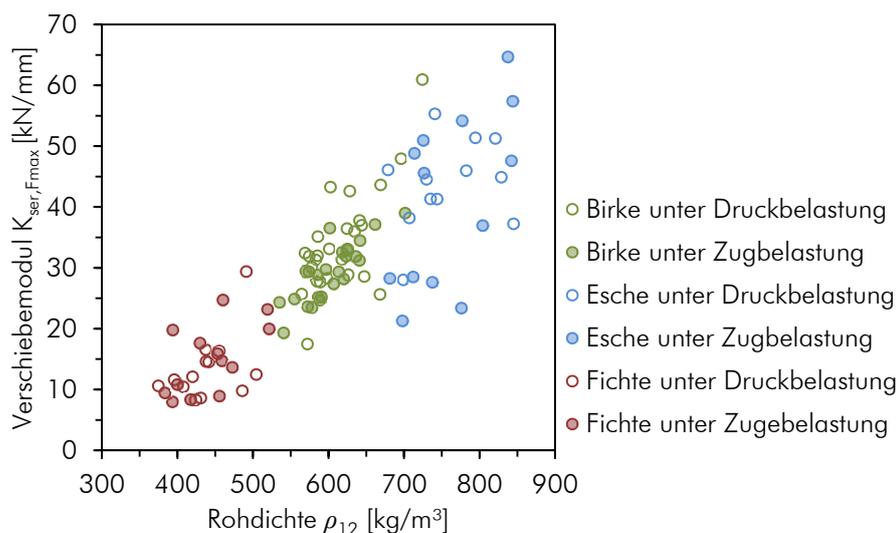
Neben den Lochleibungsfestigkeiten der Probekörper wurden auch die Verschiebemoduln $K_{ser,Fest}$ und $K_{ser,Fmax}$ ermittelt. Dabei gibt $K_{ser,Fest}$ den Verschiebemodul bei erwarteter und $K_{ser,Fmax}$ bei tatsächlich aufgetretener Höchstlast an, siehe Abschnitt 3.2.4.

In Abb. 3.34 sind in (a) der Verschiebemodul $K_{ser,Fmax}$ über $K_{ser,Fest}$ aufgetragen. Daraus wird eine hohe Übereinstimmung der beiden Moduln ersichtlich, mit einer leichten Tendenz zu einem höheren Verschiebemodul aus tatsächlich aufgetretener Höchstlast $K_{ser,Fmax}$. Der Verschiebemodul $K_{ser,Fmax}$ bei Zugbelastung wird in (b) dem Verschiebemodul $K_{ser,Fmax}$ bei Druckbelastung gegenübergestellt. Dabei kann eine enorme Streuung der Moduln beobachtet werden. Ein Zusammenhang zwischen Rohdichte und Verschiebemodul $K_{ser,Fmax}$ kann in (c) beobachtet werden.



(a) Verschiebemodul $K_{ser,Fmax}$ über $K_{ser,Fest}$

(b) Verschiebemodul $K_{ser,Fmax}$ Zug über Druck



(c) Verschiebemodul $K_{ser,Fmax}$ über Rohdichte

Abb. 3.34: Streudiagramme des Verschiebemoduls der Probekörper aus Birke, Esche und Fichte

Bei einer der tatsächlich aufgetretenen Höchstlast sehr nahe liegenden geschätzten Höchstlast entsteht kaum ein Unterschied im Verschiebemodul, wie in Tab. 3.14 ersichtlich ist.

Tab. 3.14: Kleinst-, Mittel- und Größtwerte der Verschiebemoduln und Rohdichte bei 12 % Holzfeuchte

	Rohdichte ρ_{12} [kg/m ³]	Mittelwert $K_{ser,Fest}$ [kN/mm]	Kleinstwert $K_{ser,Fmax}$ [kN/mm]	Mittelwert $K_{ser,Fmax}$ [kN/mm]	Größtwert $K_{ser,Fmax}$ [kN/mm]	Mittelwert $\frac{K_{ser,Fmax}}{K_{ser,Fest}}$
Birke	610	31,00	17,48	31,75	60,97	1,02
Druck	616	32,44	17,48	34,14	60,97	1,05
Zug	603	29,57	19,33	29,36	39,01	0,99
Esche	758	40,60	21,29	42,44	64,68	1,05
Druck	757	42,23	28,03	43,81	55,32	1,04
Zug	759	39,09	21,29	41,18	64,68	1,05
Fichte	441	14,03	7,99	14,26	29,39	1,02
Druck	439	13,35	8,30	13,50	29,39	1,01
Zug	443	14,71	7,99	15,01	24,72	1,02

Die ermittelten Bettungsmoduln sind in Tab. 3.15 und Abb. 3.35 dargestellt. Eine starke Streuung der Bettungsmoduln von Esche ist erkennbar. Ein Zusammenhang zwischen Rohdichte und Bettungsmodul $K_{s,Fmax}$ kann beobachtet werden.

Tab. 3.15: Mittelwerte der Bettungsmoduln und der Rohdichte bei 12 % Holzfeuchte

Holzart	Rohdichte ρ_{12} [kg/m ³]	Bettungsmoduln $K_{s,Fmax}$ [N/mm ³]
Birke	610	108,8
Druck	616	116,9
Zug	603	100,7
Esche	758	146,5
Druck	757	151,1
Zug	759	142,2
Fichte	441	49,1
Druck	439	46,5
Zug	443	51,7

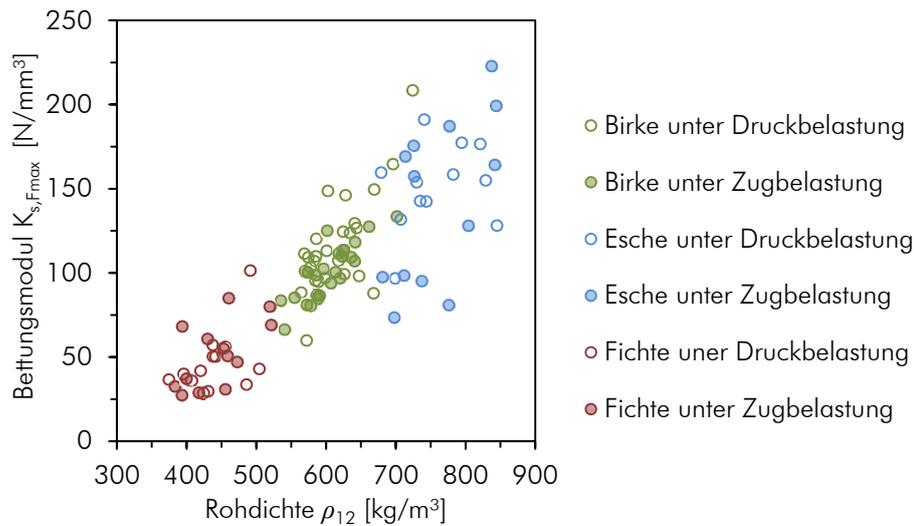


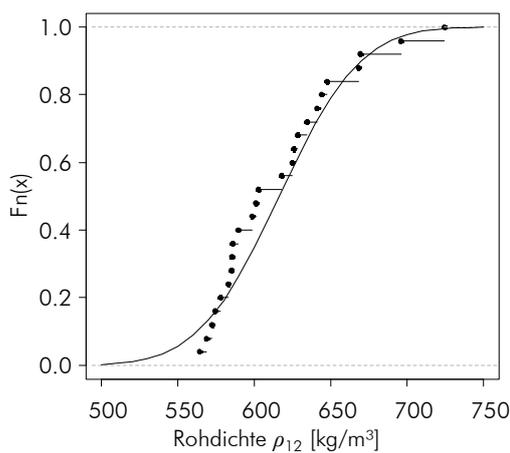
Abb. 3.35: Streudiagramm der Bettungsmoduln der Probekörper aus Birke, Esche und Fichte

3.5.8 Ausschluss von Probekörpern anhand der Rohdichte

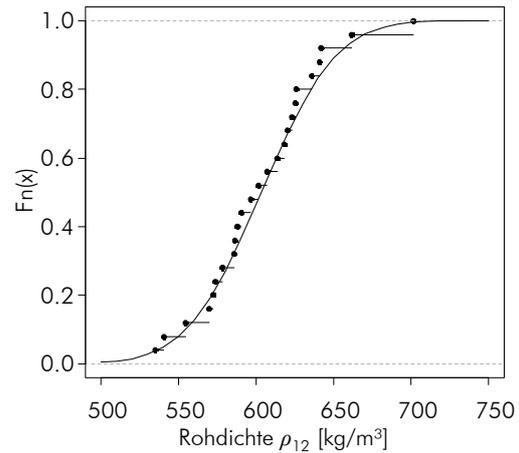
Da der Ausschluss von Probekörpern Versuchsergebnisse beeinflussen kann, werden zwei verschiedenen Ausschlussmöglichkeiten untersucht.

3.5.8.1 Ausschluss von Probekörpern nach empirischer Verteilungsfunktion

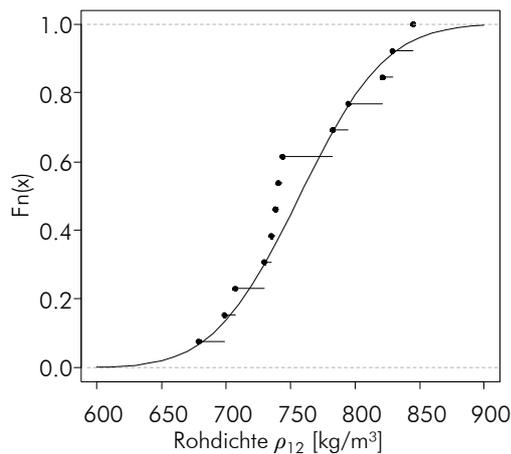
Als die erste Ausschlussmöglichkeit wird die empirische Verteilungsfunktion gewählt. Wie in Abb. 3.36 ersichtlich, bilden die ermittelten Rohdichten die Normalverteilungskurve gut ab und es können keine offensichtlichen Ausreißer festgestellt werden. Nach dieser Methode würde dementsprechend keine Probe ausgeschlossen werden.



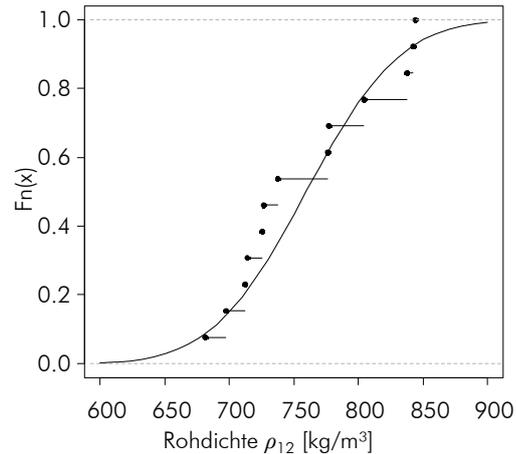
(a) Birkenproben mit Druckbelastung



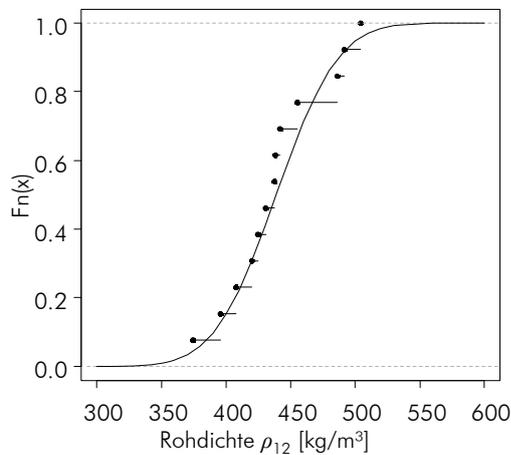
(b) Birkenproben mit Zugbelastung



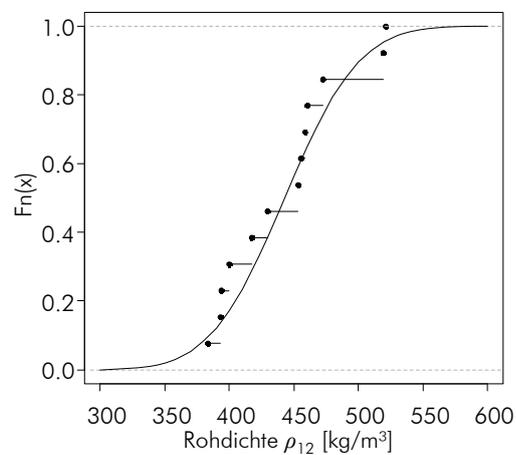
(c) Eschenproben mit Druckbelastung



(d) Eschenproben mit Zugbelastung



(e) Fichtenproben mit Druckbelastung



(f) Fichtenproben mit Zugbelastung

Abb. 3.36: empirische Verteilungsfunktion der Rohdichten aus Birke, Esche und Fichte

3.5.8.2 Ausschluss von Probekörpern nach ON EN ISO 8970:2010

Die zweite Ausschlussmöglichkeit stellt die *ON EN ISO 8970:2010* dar. Diese Norm gibt durch Gl. (31) und Gl. (32) Grenzen zum Ausschluss der Probekörper anhand der Rohdichte an. In Abb. 3.37 sind die ermittelten Rohdichten der Zugprobekörper durch ausgefüllte Kreise und die der Druckprobekörper durch unausgefüllte Kreise dargestellt. Die strichliert dargestellten Grenzen werden nach Gl. (31) und Gl. (32) ermittelt und würden die rot ausgefüllten und in Tab. 3.17 angeführten Probekörper ausschließen. Dadurch würden 10 % der Birkenproben, 4 % der Eschenproben und 15 % der Fichtenproben ausgeschlossen werden.

$$(1 - k)\rho_m \leq \rho \leq (1 + k)\rho_m \quad \text{Gl. (31)}$$

dabei ist

$$k = \frac{1,6 \cdot \sigma}{\rho_m} \quad \text{Gl. (32)}$$

- ρ_m Mittelwert der Rohdichte in kg/m^3
- k siehe Gl. (32)
- σ Standardabweichung in kg/m^3

Die Standardabweichungen der Rohdichte der einzelnen Serien können Tab. 3.16 entnommen werden.

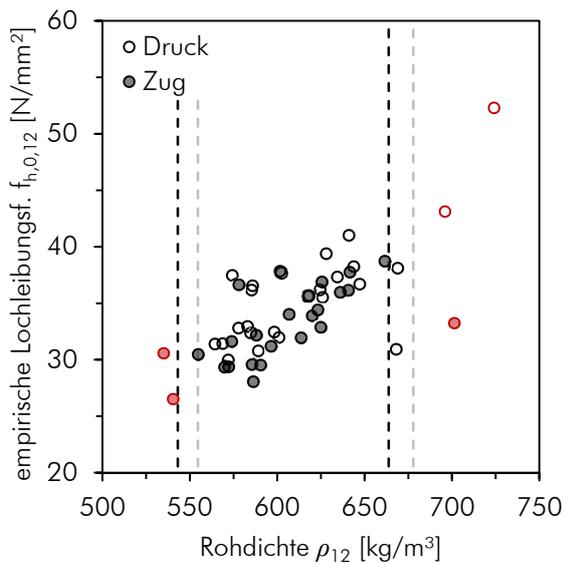
Tab. 3.16: Standardabweichung der Rohdichten

	Standardabweichung σ [kg/m^3]
Birke Druck	41,84
Birke Zug	37,94
Esche Druck	52,45
Esche Zug	57,48
Fichte Druck	37,73
Fichte Zug	45,42

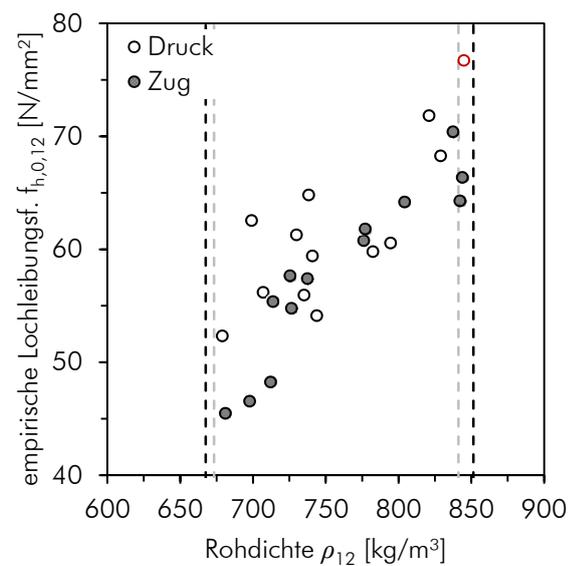
In der folgenden Tabelle sind die nach *ON EN ISO 8970:2010* ausgeschlossenen Probekörper angeführt.

Tab. 3.17: nach *ON EN ISO 8970:2010* ausgeschlossene Probekörper

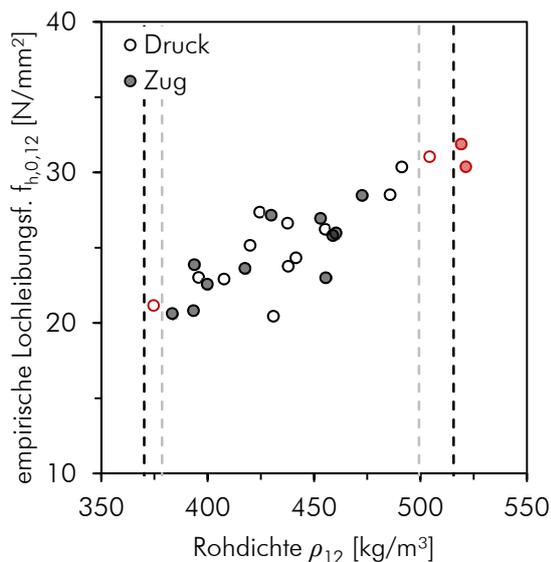
	Birke		Esche		Fichte	
	Anzahl	Probekörpernummer	Anzahl	Probekörpernummer	Anzahl	Probekörpernummer
Druck	2	B12_D03	1	E12_D12	2	F12_D03
		B12_D05				F12_D05
Zug	3	B12_Z01	0	-	2	F12_Z05
		B12_Z18				F12_Z07
		B12_Z24				



(a) Lochleibungsfestigkeit vers. Rohdichte - Birke



(b) Lochleibungsfestigkeit vers. Rohdichte - Esche



(c) Lochleibungsfestigkeit vers. Rohdichte - Fichte

Abb. 3.37: Einfluss von ON EN ISO 8970:2010 auf die Auswahl der Probekörper

Wiederholt man die statistischen Test (t-Test und Wilcoxon-Mann-Whitney-Test) für den verringerten Probenumfang ergeben sich ebenfalls p -Werte größer 0,05, siehe Tab. 3.18. Dies deutet darauf hin, dass sich die mittleren Rohdichten (t-Test) und der Median (Wilcoxon-Test) der verglichenen Serien, trotz der ausgeschlossenen Probekörper, nicht signifikant unterscheiden.

Tab. 3.18: Einfluss von *ON EN ISO 8970:2010* auf Rohdichte

	Anzahl gesamt aus- geschlossen	ausge- schlossene Proben	Mittelwert	<i>CoV</i>	t- Test <i>p</i> -Wert	Wilcoxon – Test <i>p</i> -Wert
	[Stück]	[%]	[kg/m ³]	[%]	[-]	[-]
Birke	50 45	10	607	4,90	0,741	0,866
Druck	25 23	8	608	5,26		
Zug	25 22	12	605	4,60		
Esche	26 25	4	755	6,89	0,671	0,894
Druck	13 12	8	750	6,32		
Zug	13 13	0	760	7,57		
Fichte	26 22	15	434	7,09	0,446	0,562
Druck	13 11	15	439	6,71		
Zug	13 11	15	429	7,60		

Bei der Ermittlung der *p*-Werte bei verringerten Probenumfang wurden Werte größer 0,05 ausgegeben. Dadurch ist ersichtlich, dass sich durch den Ausschluss der Probekörper die Lochleibungsfestigkeiten aller Serien nicht signifikant unterscheiden.

 Tab. 3.19: Einfluss von *ON EN ISO 8970:2010* auf Lochleibungsfestigkeit $f_{h,0,12}$

	Anzahl gesamt aus- geschlossen	ausge- schlossene Proben	Mittelwert	<i>CoV</i>	t- Test <i>p</i> -Wert	Wilcoxon – Test <i>p</i> -Wert
	[Stück]	[%]	[N/mm ²]	[%]	[-]	[-]
Birke	50 45	10	34,16	9,55	0,110	0,126
Druck	25 23	8	34,92	9,05		
Zug	25 22	12	33,37	9,74		
Esche	26 25	4	59,23	11,58	0,311	0,538
Druck	13 12	8	60,60	9,45		
Zug	13 13	0	57,96	13,41		
Fichte	26 22	15	24,90	10,86	0,460	0,478
Druck	13 11	15	25,35	11,20		
Zug	13 11	15	24,45	10,70		

3.5.8.3 Gewähltes Ausschlussverfahren

Anhand der folgenden Tab. 3.20 und Tab. 3.21 wurden die Ergebnisse der Ausschlussverfahren einander gegenüber gestellt. Dabei kann nur eine geringe Änderung der Statistik der Rohdichte und Lochleibungsfestigkeit beim Ausschluss nach *ON EN ISO 8970:2010* festgestellt werden. Aufgrund des geringen Einflusses auf die Lageparameter wurden zum Erhalt der Probenumfänge keine Probekörper ausgeschlossen.

In Tab. 3.20 ist unter ρ_{12} die gesamte, mittlere Rohdichte der Probekörper angeführt. Unter ρ_{8970} ist die Rohdichte nach Ausschluss von Probekörpern nach *ON EN ISO 8970:2010* angegeben. In Tab. 3.21 sind die Lochleibungsfestigkeiten der gesamten Prüfungen jenen nach Ausschluss durch *ON EN ISO 8970:2010* angeführt.

Tab. 3.20: Vergleich der Ausschlussverfahren anhand der Rohdichte

Holzart	ρ_{12} [kg/m ³]	ρ_{8970} [kg/m ³]	Differenz [kg/m ³]	<u>Differenz</u> ρ_{12}
Birke	610	607	3	0,5 %
Druck	616	608	8	1,3 %
Zug	603	605	2	0,3 %
Esche	758	755	3	0,4 %
Druck	757	750	7	0,9 %
Zug	759	760	1	0,1 %
Fichte	441	434	7	1,6 %
Druck	439	439	0	0,0 %
Zug	443	429	14	3,2 %

In Tab. 3.21 sind die Lochleibungsfestigkeiten der gesamten Prüfungen $f_{h,0,12}$ jenen nach Ausschluss durch *ON EN ISO 8970:2010* gegenübergestellt.

Tab. 3.21: Vergleich der Ausschlussverfahren anhand der Lochleibungsfestigkeit

Holzart	$f_{h,0,12}$ [N/mm ²]	f_{8970} [N/mm ²]	Differenz [N/mm ²]	<u>Differenz</u> $f_{h,0,12}$
Birke	34,44	34,16	0,28	0,8 %
Druck	35,90	34,92	0,98	2,7 %
Zug	32,98	33,37	0,39	1,2 %
Esche	59,90	59,23	0,67	1,1 %
Druck	61,84	60,60	1,24	2,0 %
Zug	57,96	57,96	0,00	0,0 %
Fichte	25,47	24,90	0,57	2,2 %
Druck	25,46	25,35	0,11	0,4 %
Zug	25,48	24,45	1,03	4,0 %

3.6 Gegenüberstellung der Prüfergebnisse

Die ermittelten Lochleibungsfestigkeiten und die Verschiebemoduln für Birke, Esche und Fichte auf Druck und Zug werden in diesem Kapitel mit Werten aus der Literatur sowie mit den Modellen aus den aktuell gültigen Normen verglichen.

3.6.1 Vergleich der Lochleibungsfestigkeit für Fichte

Der Vergleich der Ergebnisse aus den Fichtenversuchen erfolgt anhand *ON EN 1995-1-1:2009*, den Prüfwerten von *Spörk (2007)* und *Sandhaas et al. (2010)*.

Vergleich mit ON EN 1995-1-1:2009

Der Vergleich mit *ON EN 1995-1-1:2009* erfolgt auf Basis der 5%-Quantilwerte der Rohdichte und der ermittelten Lochleibungsfestigkeit bei 12 % Holzfeuchte. In Tab. 3.22 sind die 5%-Quantilwerte der Rohdichte und der ermittelten Lochleibungsfestigkeit, die mit ρ_{05} berechnete Lochleibungsfestigkeit nach *ON EN 1995-1-1:2009*, die Differenz sowie das Verhältnis von empirisch ermittelter zu berechneter Lochleibungsfestigkeit angeführt.

Tab. 3.22: Vergleich der 5%-Quantilwerte der Prüfergeb. für Fichte mit *ON EN 1995-1-1:2009*

	ρ_{05}	$f_{h,05}$	$f_{h,05,Norm}$	Differenz	$\frac{Differenz}{f_{h,05,Norm}}$	$\frac{f_{h,05}}{f_{h,05,Norm}}$
Fichte	[kg/m ³]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]		
Druck	387	20,88	27,95	-7,07	-25,2 %	0,75
Zug	389	20,75	28,09	-7,34	-26,1 %	0,74
Gesamt	386	20,68	27,85	-7,17	-25,7 %	0,74

Abb. 3.38 zeigt in schwarz die durch die Prüfungen ermittelten Werte der Lochleibungsfestigkeit $f_{h,0,12}$ bei 12% Holzfeuchte. Da sich die mittleren Rohdichten der Serien nicht signifikant unterscheiden und dies auch für die ermittelte Lochleibungsfestigkeit bei Druck- bzw. Zugbelastung gilt, wird nicht zwischen den Serien unterschieden. Die durchgezogene blaue Linie stellt die charakteristische Lochleibungsfestigkeit $f_{h,05,norm}$ nach *ON EN 1995-1-1:2009* unter Zugrundelegung des 5%-Quantilwertes der Rohdichte der Prüferien dar. Die blaue, strichlierte Linie bildet den 5%-Quantilwert der ermittelten Lochleibungsfestigkeit bei 12 % Holzfeuchte $f_{h,05}$ ab.

Wie aus Tab. 3.22 und Abb. 3.38 ersichtlich ist, wird ein Unterschied von 25,7 % zwischen $f_{h,05,norm}$ und $f_{h,05}$ bezogen auf $f_{h,05,norm}$ festgestellt. Es ist ersichtlich, dass die Trendlinie der ermittelten Lochleibungsfestigkeiten um ca. 7 N/mm² parallel versetzt zur Gl. (2) verläuft.

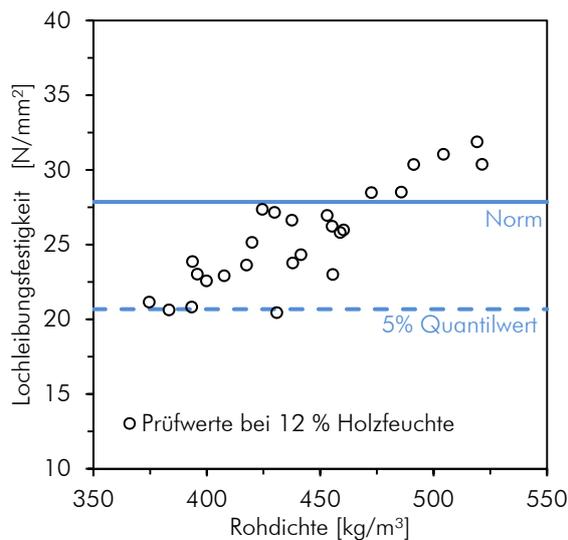


Abb. 3.38: Streudiagramm der Lochleibungsfestigkeiten von Fichte mit 5%-Quantilwert und Lochleibungsfestigkeit aus ON EN 1995-1-1:2009 nach Gl. (2)

Da die in ON EN 1995-1-1:2009 nur für die theoretische Lochleibungsfestigkeit von Nadelholz gilt, wird an dieser Stelle auf einen Vergleich mit den anderen Prüfwerten verzichtet.

Vergleich mit Werten aus der Literatur

Wie im Abschnitt 3.1 beschrieben führten Spörk (2007) und Sandhaas et al. (2013) Lochleibungsversuche an Fichte mit einem Stabdübeldurchmesser von 12 mm durch. Aus Spörk (2007) werden nur die Prüfergebnisse von Fichte parallel zur Faser verwendet. Bei Sandhaas et al. (2013) werden die verwendeten Werte der Serie Fichte mit Stahlgüte hss entnommen. Um die Versuchsergebnisse vergleichbar zu machen, werden die Lochleibungsfestigkeiten mittels Gl. (25) auf einen Rohdichte von 440 kg/m³ bezogen, siehe Lochleibungsfestigkeit $f_{h,ref}$. Unter Annahme eines linearen Einflusses der Rohdichte wird $c = 1$ gesetzt, vergleiche Abschnitt 2.2.2. Da die Lochleibungsfestigkeiten aus der Literatur aus Druckprüfungen stammen, werden für den Vergleich ebenfalls nur die ermittelten Lochleibungsfestigkeiten aus den Druckprüfungen verwendet. In Tab. 3.23 sind zudem die auf 12 % Holzfeuchte bezogenen Rohdichten und Lochleibungsfestigkeiten angeführt. Sie zeigen eine gute Übereinstimmung der Prüfergebnisse mit Ergebnissen aus der Literatur.

Tab. 3.23: Vergleich der gemittelten Prüfergebnisse für Fichte mit Werten aus Literatur

	ρ_{12} [kg/m ³]	$f_{h,0,12}$ [N/mm ²]	$f_{h,ref}$ [N/mm ²]	Differenz $f_{h,ref}$ [%]
ermittelte Werte aus Druckprüfungen	439	25,46	25,48	-
Spörk (2007)	402	25,52	27,94	9,7 %
Sandhaas et al.(2013)	479	25,60	23,50	-7,77 %

3.6.2 Vergleich der Lochleibungsfestigkeit für Esche

3.6.2.1 Vergleich der Lochleibungsfestigkeiten aus Druckprüfungen

Da die Lochleibungsfestigkeiten von *Hübner und Schickhofer (2007)* aus Druckprüfungen stammen, werden für den Vergleich ebenfalls nur die ermittelten Lochleibungsfestigkeiten aus den Druckprüfungen verwendet. In Tab. 3.24 sind die Mittelwerte der Rohdichte und der Lochleibungsfestigkeit bezogen auf 12 % Holzfeuchte dargestellt. Um die Lochleibungsfestigkeiten miteinander vergleichen zu können, werden sie auf eine Referenzrohichte von 760 kg/m^3 nach Gl. (25) bezogen. Unter Annahme eines linearen Einflusses der Rohdichte wird, wie zuvor erwähnt, $c = 1$ gesetzt, vergleiche Abschnitt 2.2.2. Die nachfolgende Tab. 3.24 zeigt eine leichte Abweichung der verglichenen Lochleibungsfestigkeiten von ca. 6 %.

Tab. 3.24: Vergleich der gemittelten Prüfergebnisse für Esche unter Druckbelastung mit Werten von *Hübner und Schickhofer (2007)*

Esche	ρ_{12} [kg/m ³]	$f_{h,0,12}$ [N/mm ²]	$f_{h,ref}$ [N/mm ²]	Differenz $f_{h,ref}$ [%]
ermittelte Werte aus Druckprüfungen	757	61,84	61,97	-
<i>Hübner und Schickhofer (2007)</i>	760	58,00	58,00	6,4 %

Abb. 3.4 zeigt in schwarz die Lochleibungsfestigkeit $f_{h,0,12}$ für Druck bei 12% Holzfeuchte. Die blaue, strichlierte Linie stellt den 5%-Quantilwert der Lochleibungsfestigkeit bei Druckbelastung dar. Die durchgezogene, blaue Linie ergibt sich aus Gl. (18) nach *Hübner (2008)*. Aus Abb. 3.4 und Tab. 3.25 ist eine Unterschätzung von ca. 14 % des 5%-Quantilwertes der Druckproben durch Gl. (18) nach *Hübner (2008)* erkennbar.

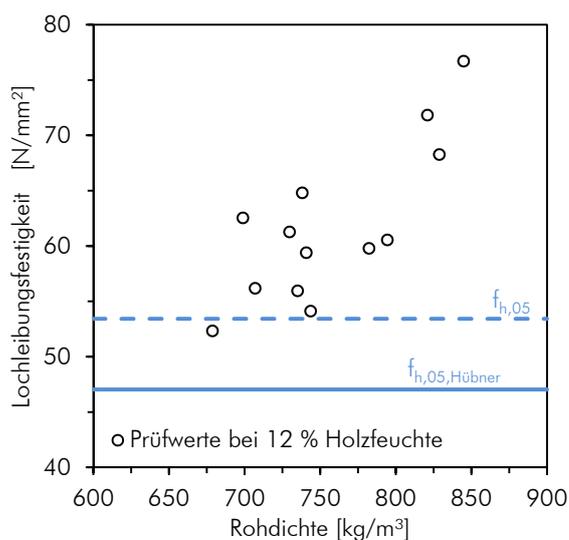


Abb. 3.39: Streudiagramm der Lochleibungsfestigkeiten von Esche unter Druckbelastung mit 5%-Quantilwert und Lochleibungsfestigkeit nach *Hübner (2008)*

Die durch Gl. (18) nach *Hübner (2008)* ermittelten Lochleibungsfestigkeiten sind in Tab. 3.25 unter $f_{h,05,Hübner}$ angeführt. Ein Vergleich mit dem 5%-Quantilwert der Messwerte ergibt eine gute Übereinstimmung.

Tab. 3.25: Vergleich der 5%-Quantilwerte der Prüfergebnisse für Esche unter Druckbelastung mit Gl. (18) nach *Hübner (2008)*

	ρ_{05}	$f_{h,05}$	$f_{h,05,Hübner}$	Differenz	$\frac{\text{Differenz}}{f_{h,05}}$	$\frac{f_{h,05}}{f_{h,05,Hübner}}$
Esche	[kg/m ³]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]		
Druck	691	53,42	47,03	6,39	12,0 %	1,14

3.6.2.2 Vergleich der Lochleibungsfestigkeiten aus Zug- und Druckprüfungen

Da sich, wie in Abschnitt 3.5.6 ausgeführt, die Lochleibungsfestigkeiten unter Zug- und Druckbelastung bei Esche nicht signifikant unterscheiden, scheint ein Vergleich der gesamten Prüfwerte mit *Hübner und Schickhofer (2007)* und Gl. (18) nach *Hübner (2008)* sinnvoll.

Tab. 3.26: Vergleich der gemittelten Prüfergebnisse für Esche mit Werten von *Hübner und Schickhofer (2007)*

	ρ_{12}	$f_{h,0,12}$	$f_{h,ref}$	Differenz $f_{h,ref}$
Esche	[kg/m ³]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]
ermittelte Werte	758	59,90	57,58	-
<i>Hübner und Schickhofer (2007)</i>	760	58,00	58,00	0,7 %

An den in Tab. 3.26 angeführten Werten kann eine sehr gute Übereinstimmung der Prüfergebnisse festgestellt werden.

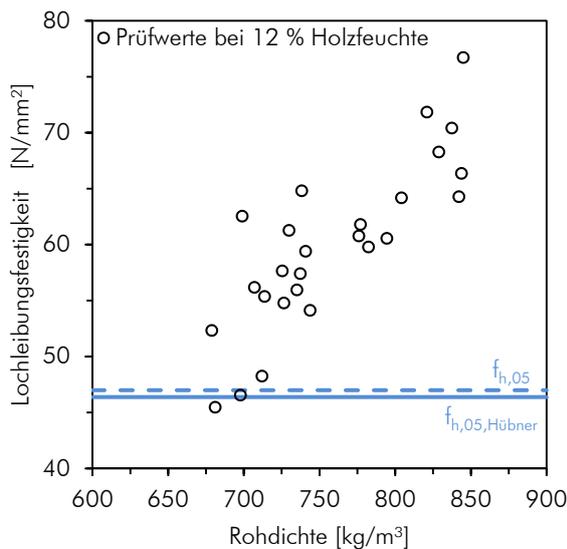


Abb. 3.40: Streudiagramm der Lochleibungsfestigkeiten von Esche mit 5%-Quantilwert und Lochleibungsfestigkeit nach *Hübner (2008)*

Auch in Tab. 3.27 und Abb. 3.40 können kaum Abweichungen der Gl. (18) nach *Hübner (2008)* und dem 5%-Quantilwert der ermittelten Lochleibungsfestigkeiten beobachtet werden.

Tab. 3.27: Vergleich der 5%-Quantilwerte der Prüfergebnisse für Esche mit Gl. (18) nach *Hübner (2008)*

	ρ_{05} [kg/m ³]	$f_{h,05}$ [N/mm ²]	$f_{h,05,Hübner}$ [N/mm ²]	Differenz [N/mm ²]	$\frac{\text{Differenz}}{f_{h,05}}$	$\frac{f_{h,05}}{f_{h,05,Hübner}}$
Esche	685	46,99	46,38	0,61	1,3 %	1,01

3.6.3 Vergleich der Lochleibungsfestigkeit für Birke

Wie im Abschnitt 3.1 beschrieben führte *Hübner (2008 und 2013)* Lochleibungsversuche an Esche, Buche und Robinie mit einem Stabdübeldurchmesser 12 mm durch.

Die durch Gl. (19) nach *Hübner (2008)* ermittelten Lochleibungsfestigkeiten sind in Tab. 3.28 unter $f_{h,05,Hübner}$ angeführt. Ein Vergleich mit den 5%-Quantilwerten der Messwerte ergibt eine gute Übereinstimmung.

Tab. 3.28: Vergleich der 5%-Quantilwerte der Prüfergebnisse für Birke mit Gl. (19) nach *Hübner (2008)*

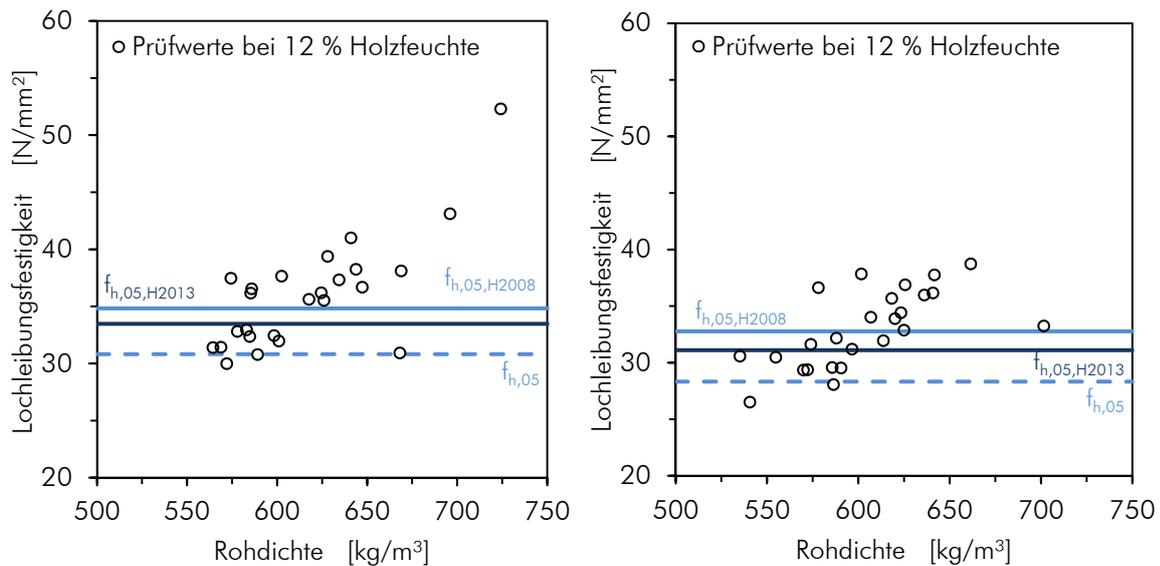
	ρ_{05} [kg/m ³]	$f_{h,05}$ [N/mm ²]	$f_{h,05,Hübner}$ [N/mm ²]	Differenz [N/mm ²]	$\frac{\text{Differenz}}{f_{h,05,Hübner}}$	$\frac{f_{h,05}}{f_{h,05,Hübner}}$
Birke						
Druck	569	30,82	34,83	-4,01	-11,5 %	0,88
Zug	543	28,32	32,77	-4,45	-13,6 %	0,86

In *Hübner (2013)* wird Gl. (20) zur Ermittlung der Lochleibungsfestigkeit von Laubholz angegeben. Die Lochleibungsfestigkeiten $f_{h,05,Hübner}$ in Tab. 3.29 wurden durch Gl. (20) ermittelt.

Tab. 3.29: Vergleich der 5%-Quantilwerte der Prüfergebnisse für Birke mit Gl. (20) nach *Hübner (2013)*

	ρ_{05} [kg/m ³]	$f_{h,05}$ [N/mm ²]	$f_{h,05,Hübner}$ [N/mm ²]	Differenz [N/mm ²]	$\frac{\text{Differenz}}{f_{h,05,Hübner}}$	$\frac{f_{h,05}}{f_{h,05,Hübner}}$
Birke						
Druck	569	30,82	33,47	-2,65	-7,9 %	0,92
Zug	543	28,32	31,10	-2,78	-8,9 %	0,91

Abb. 3.41 zeigt die ermittelten Lochleibungsfestigkeiten von Birke bei Druck- und Zugbelastung. Dabei stellen die schwarzen Kreise die ermittelten Lochleibungsfestigkeiten bei 12 % Holzfeuchte dar. Die blauen, strichlierten Linien geben die 5%-Quantilwerte der ermittelten Lochleibungsfestigkeiten an. Die durchgezogene, hellblaue Linie stellt Gl. (19) für Laubholz nach *Hübner (2008)* dar. Die von *Hübner (2013)* veröffentlichte Gl. (20) für Laubholz ist als dunkelblaue, durchgezogene Linie abgebildet.



(a) Birke unter Druckbelastung

(b) Birke unter Zugbelastung

Abb. 3.41: Streudiagramm der Lochleibungsfestigkeiten von Birke mit 5%-Quantilwerten und Lochleibungsfestigkeit nach *Hübner (2008)* und (2013)

Eine bessere Übereinstimmung der Versuchswerte wird mit Gl. (20) aus *Hübner (2013)* erzielt, obwohl die ermittelten Lochleibungsfestigkeiten $f_{h,05}$ um ca. 10 % unter den berechneten liegen.

3.6.4 Vergleich des Verschiebemoduls von Fichte

ON EN 1995-1-1:2009 gibt folgende Gleichung zur Berechnung des Verschiebemoduls K_{ser} für Stabdübel an. Es wird angemerkt, dass bei Stahlblech-Holz-Verbindungen K_{ser} mit dem Faktor 2,0 multipliziert werden soll.

$$K_{ser} = \frac{\rho_m^{1,5} \cdot d}{23} \quad \text{Gl. (33)}$$

ρ_m Mittelwert der Rohdichte in kg/m³
 d Durchmesser des Verbindungsmittels in mm

In Tab. 3.30 sind die ermittelten Verschiebemoduln denen aus der Norm gegenübergestellt. Dabei wurden zwei Verschiebemoduln ermittelt. Mit $K_{ser, Norm}$ ist der Verschiebemoduln nach Gl. (33) bezeichnet. Da die Prüfkfiguration auch als Stahlblech-Holz-Verbindung interpretiert werden kann, wurde der Verschiebemodul mit dem Faktor 2 multipliziert und unter $K_{ser, Norm, 2}$ angeführt.

Tab. 3.30: Vergleich der ermittelten Verschiebmoduln von Fichte mit Gl. (33) nach ON EN 1995-1-1:2009

	$\rho_{12} = \rho_m$	$K_{ser,12}$	$K_{ser,Norm,2}$	$K_{ser,Norm}$	Differenz $K_{ser,12} - K_{ser,Norm}$	$\frac{K_{ser,12}}{K_{ser,Norm}}$
Fichte	[kg/m ³]	[kN/mm]	[kN/mm]	[kN/mm]	[kN/mm]	
Druck	439	13,50	9,60	4,80	8,7	2,81
Zug	443	15,01	9,73	4,87	10,1	3,08
Gesamt	441	14,26	9,66	4,83	9,43	2,95

Die Berechnungsrichtlinie *enBR (2007)* gibt folgende Gleichung zur Berechnung des Verschiebmoduls K_{ser} für Stabdübel an.

$$K_{ser} = 0,05 \cdot \rho_k^{1,5} \cdot d \quad \text{Gl. (34)}$$

ρ_k charakteristischer Wert der Rohdichte in kg/m³
 d Durchmesser des Verbindungsmittels in mm

Wie in Gl. (34) ersichtlich ist, wird der Verschiebemodul in *enBR (2007)* mit dem 5%-Quantilwert der Rohdichte ermittelt. Tab. 3.31 vergleicht den durch *enBR (2007)* ermittelten Verschiebemodul mit den Mittelwerten des ermittelten Verschiebmoduls.

Tab. 3.31: Vergleich der ermittelten Verschiebmoduln von Fichte mit Gleichung Gl. (34) nach ON EN 1995-1-1:2009

	ρ_{05}	$K_{ser,12}$	$K_{ser,enBR}$	Differenz $K_{ser,12} - K_{ser,enBR}$	$\frac{K_{ser,12}}{K_{ser,enBR}}$
Fichte		[kN/mm]	[kN/mm]	[kN/mm]	
Druck	387	13,50	4,57	8,9	2,95
Zug	389	15,01	4,61	10,4	3,26
Gesamt	386	14,26	4,59	9,7	3,11

Abb. 3.42 zeigt die Messwerte von $K_{ser,12}$ als schwarze Kreise, die schwarze, strichlierte Linie gibt den Mittelwert an. Als blaue, durchgezogene Linie ist $K_{ser,Norm}$ nach Gl. (33) aus ON EN 1995-1-1:2009 dargestellt. Der Wert für $K_{ser,Norm,2}$ ist als blaue, strichlierte Linie abgebildet.

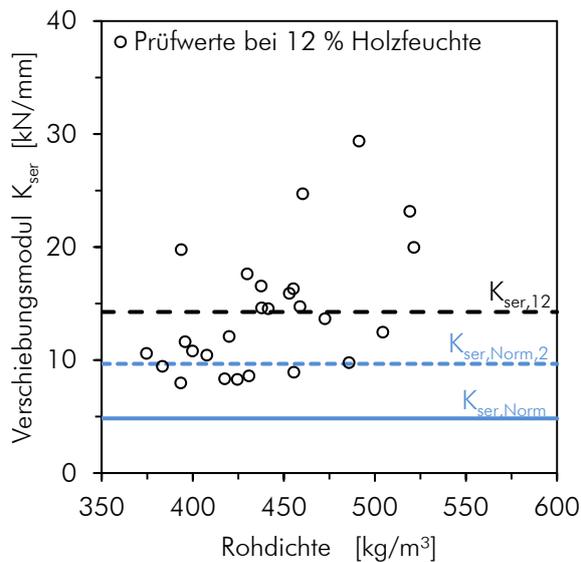


Abb. 3.42: Streudiagramme der Verschiebmoduln von Fichte mit 5%-Quantilwerten nach ON EN 1995-1-1:2009

Aus den zuvor dargestellten Tabellen und Abbildungen geht hervor, dass sowohl ON EN 1995-1-1:2009 als auch enBR (2007) die Verschiebmoduln von Fichte mit bis zu 200 % unterschätzen.

3.6.5 Vergleich des Bettungsmoduls von Birke und Esche

Die ermittelten Bettungsmoduln von Birke und Esche werden nachfolgend mit der von Hübner (2013) ermittelte Gl. (35) zur Bestimmung des Bettungsmoduls von Laubholz verglichen.

$$K_s = \frac{5,5 \cdot 10^{-6} d^{-0,82} \rho_{12}^{2,9}}{(1 - 10d^{-0,52}) \cos \alpha + 10d^{-0,52}} \quad \text{Gl. (35)}$$

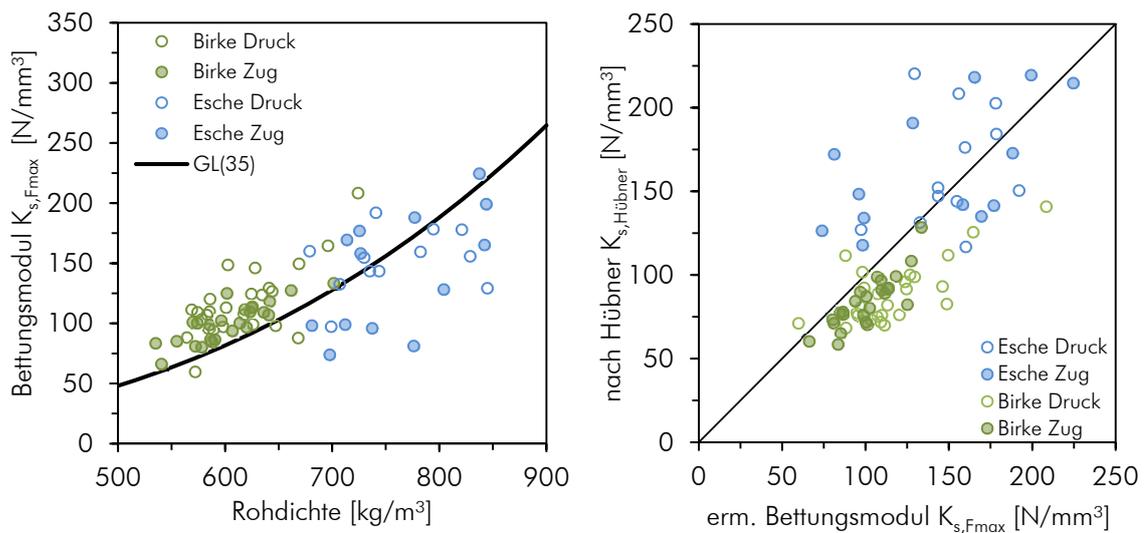
- ρ_{12} auf 12 % Holzfeuchte umgerechnete Rohdichte in kg/m^3
- d Stabdübeldurchmesser in mm
- α Winkel zwischen Kraft- und Faserrichtung in Grad
- K_s Bettungsmodul in N/mm^3

In Tab. 3.32 sind die Rohdichte bezogen auf 12 % Holzfeuchte, der ermittelte Verschiebmodul $K_{\text{ser},F_{\text{max}}}$, der ermittelte Bettungsmodul $K_{s,F_{\text{max}}}$ und der Bettungsmodul $K_{s,\text{Hübner}}$ laut Gl. (35) angeführt.

Tab. 3.32: Verschiebemoduln, Bettungsmoduln und Rohdichte bei 12 % Holzfeuchte von Birke und Esche

	ρ_{12} [kg/m ³]	$K_{ser,Fmax}$ [kN/mm]	$K_{s,Fmax}$ [N/mm ³]	$K_{s,Hübner}$ [N/mm ³]	$\frac{K_{s,Fmax}}{K_{s,Hübner}}$
Birke	610	31,8	108,8	85,7	1,27
Druck	616	34,1	116,9	88,1	1,33
Zug	603	29,4	100,7	82,9	1,21
Esche	758	42,4	146,5	160,9	0,91
Druck	757	43,8	151,1	160,3	0,94
Zug	759	41,2	142,2	162,1	0,88

Aus Abb. 3.43 ist eine starke Streuung des Verschiebemoduls von Esche im Vergleich zu Birke erkennbar. In Schwarz ist Gl. (35) dargestellt. Es kann eine Überschätzung der Bettungsmoduln der Eschenproben und eine leichte Unterschätzung der Birkenproben erkannt werden.



(a) Bettungsmodul versus Rohdichte

(b) Bettungsmodul nach Hübner versus Prüfwerte

Abb. 3.43: Streudiagramm der Bettungsmoduln von Birke und Esche im Vergleich mit Gl. (35) nach Hübner (2013)

3.7 Resümee

Eine signifikant höhere Lochleibungsfestigkeit bei Zugbelastung konnte durch die durchgeführten Versuche an Birke, Esche und Fichte nach *ON EN 383:2007* nicht festgestellt werden. Die Lochleibungsfestigkeiten bei Druckbelastung lagen bei allen drei Holzarten meist höher als bei Zugbelastung, obwohl die Zugproben durch einen erhöhten Randabstand von $10d$ statt $7d$ begünstigt wurden. Bei Birke konnte zudem ein signifikanter Unterschied im Median, zugunsten der Druckbelastung, beobachtet werden.

Der von *Zitto et al. (2012)* bei *Eucalyptus grandis* ermittelte Unterschied der Lochleibungsfestigkeiten von 10 % zugunsten der Zugbelastung, konnte bei Birke, Esche und Fichte nicht bestätigt werden.

Ehlbeck und Werner (1992) ermittelten höhere Lochleibungsfestigkeiten bei Zugbelastung. Die verwendeten Abmessungen der Probekörper entsprachen dabei denen aus *ON EN 383:2007*, mit dem Unterschied, dass für l_1 $3d$ statt der vorgeschriebenen $7d$ verwendet wurden. Somit wurde der unbelastete Randabstand verringert und als möglicher Grund für die niedrigeren Lochleibungsfestigkeiten auf Druck angegeben.

Da die exakten Abmessungen der Probekörper aus *Zitto et al. (2012)* nicht klar ersichtlich sind und *Ehlbeck und Werner (1992)* als Referenz angeführt werden, wurde ein Bedarf an Prüfungen auf Druck mit einem Randabstand $l_1 = 3d$ festgestellt. Wie im folgenden Abschnitt 4 beschrieben, wurden weitere Druckprüfungen an Esche durchgeführt, wobei darauf geachtet wurde, so wenig wie möglich von den zuvor durchgeführten Prüfungen abzuweichen.

Beim Vergleich der Lochleibungsfestigkeit von Fichte mit der in *ON EN 1995-1-1:2009* angeführten Gl. (2) zur Berechnung der Lochleibungsfestigkeit von Nadelholz kann eine deutliche Überschätzung der Lochleibungsfestigkeit von bis zu 25 % durch die Norm festgestellt werden.

Zudem wird eine Unterschätzung von bis zu 200 % der ermittelten Verschiebemoduln von Fichte durch *ON EN 1995-1-1:2009* und *enBR (2007)* festgehalten.

4 Lochleibungsfestigkeit bei Druckbelastung nach Ehlbeck und Werner

Dieser Abschnitt befasst sich mit der Lochleibungsprüfung von Eschenproben unter Druck. Die Abmessungen der Probekörper entsprechen denen von *Ehlbeck und Werner (1992)*.

4.1 Prüfvorbereitung

Wie in Abschnitt 3.3 beschrieben, wurden Prüfungen mit einem Kraft-Faser-Winkel von 0° und einem Stabdübel mit 12 mm Durchmesser durchgeführt.

4.1.1 Prüfkongfiguration

Da, wie in Abb. 4.1 ersichtlich, die Wegmessung nicht durch eine eingeschraubte Gewindestange erfolgen konnte, wurde eine Kompaktplatte zwischen Druckplatte und Teflonstreifen eingelegt. Die Wegmessung erfolgt mit Wegmessern an der Kompaktplatte. Die Wegmesser wurden durch Magnetständer gehalten.

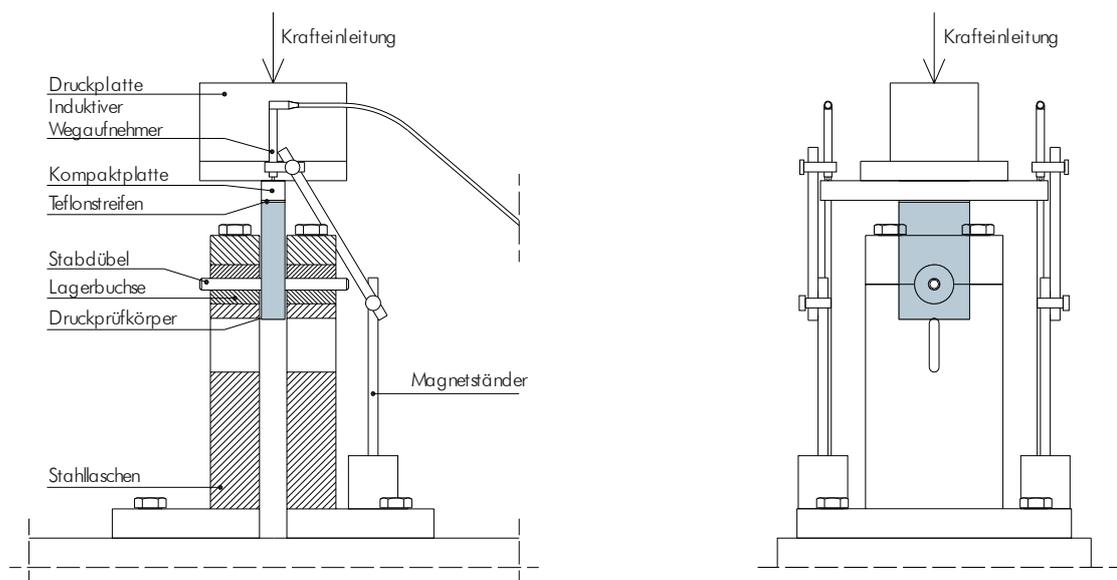
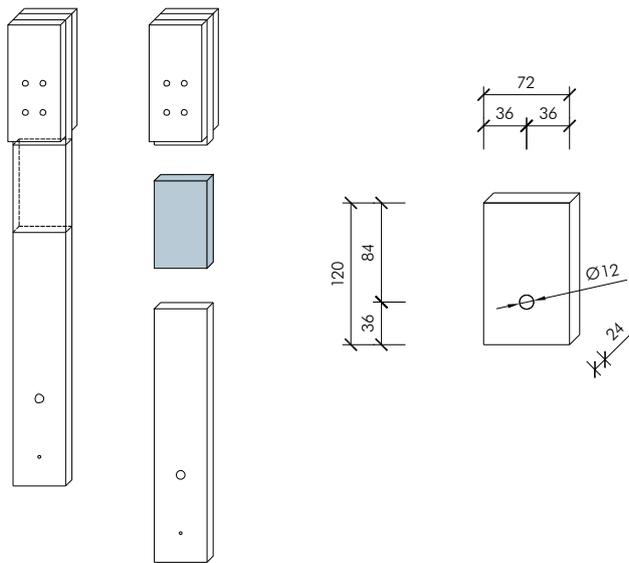


Abb. 4.1: Prüfkongfiguration – Lochleibungsprüfung mit Belastung auf Druck bei verringertem Randabstand

4.1.2 Probekörper

Die Probekörper wurden aus den bereits geprüften Zugproben aus Esche geschnitten, siehe Abb. 4.2. Die Abmessungen der Probekörper entsprechen den Maßen aus *ON EN 383:2007*, nur der unbelastete Randabstand wurde von $7d$ auf $3d$ reduziert.



Bez.	Maß	Abm.
a_1	$3d$	36 mm
l_1	$3d$	36 mm
l_2	$7d$	84 mm
Dicke	$2d$	24 mm

(a) Probekörper aus Zugprobekörper

(b) Probekörperabmessungen

Abb. 4.2: Probekörper für die Prüfungen mit verringertem Randabstand

4.2 Durchführung der Prüfungen

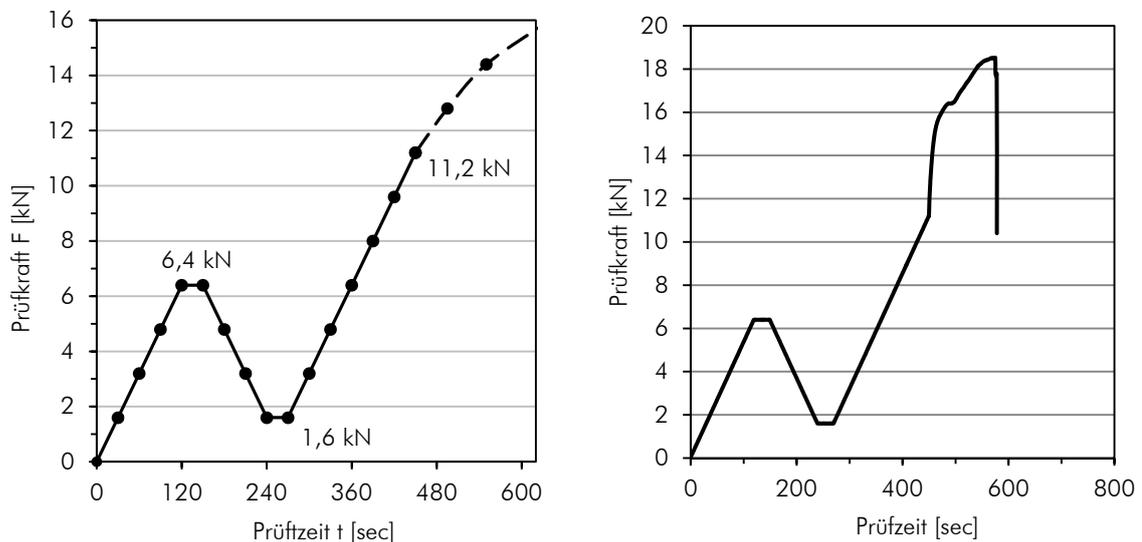
In Abb. 4.3 ist die reale Prüfkongfiguration dargestellt. Es sind die Magnetständer, Wegmesser und die Kompaktplatte ersichtlich.



Abb. 4.3: Prüfkongfiguration – Durchführung der Druckprüfungen an Probekörpern mit verringertem Randabstand

4.2.1 Belastungsverfahren

Das Belastungsverfahren erfolgte wie in Abschnitt 3.4.1.2 für Eschenproben beschrieben und in Abb. 4.4 dargestellt. Die Werte der Wendepunkte der Hysterese und die Belastungsgeschwindigkeit kann Tab. 4.1 entnommen werden.



(a) Verlauf laut *ON EN 383:2007*

(b) Verlauf an Probe E12_D10

Abb. 4.4: Belastungsverfahren laut *ON EN 383:2007* mit Werten aus geschätzter Maximallast und durchgeführtes Belastungsverfahren anhand Druckprobe E12_D10

Tab. 4.1: Werte des Belastungsverfahrens für Druck bei Esche

	$F_{\max,est}$	Punkt 04 $0,4 F_{\max,est}$	Punkt 11 $0,1 F_{\max,est}$	Belastungsgeschwindigkeit bis Punkt 27	Punkt 27 $0,7 F_{\max,est}$	Belastungsgeschwindigkeit ab Punkt 27
	[kN]	[kN]	[kN]	[kN/min]	[kN]	[mm/min]
Esche	16,0	6,4	1,6	3,2	11,2	1,2

4.2.2 Bruchbilder der Probekörper

Die Bruchbilder der auf Druck geprüften Eschenproben sind in Abb. 4.5 zu sehen. Es sind drei repräsentative Probekörper dargestellt. An den Probekörpern 02 und 04 ist zu erkennen, dass die unbelastete Seite durchgerissen ist, wobei die belastete Seite nicht ganz gerissen ist. Probekörper 09 ist beidseitig komplett gerissen. Klar erkennbar ist, dass die Risse aller Probekörper radial eingetreten sind.

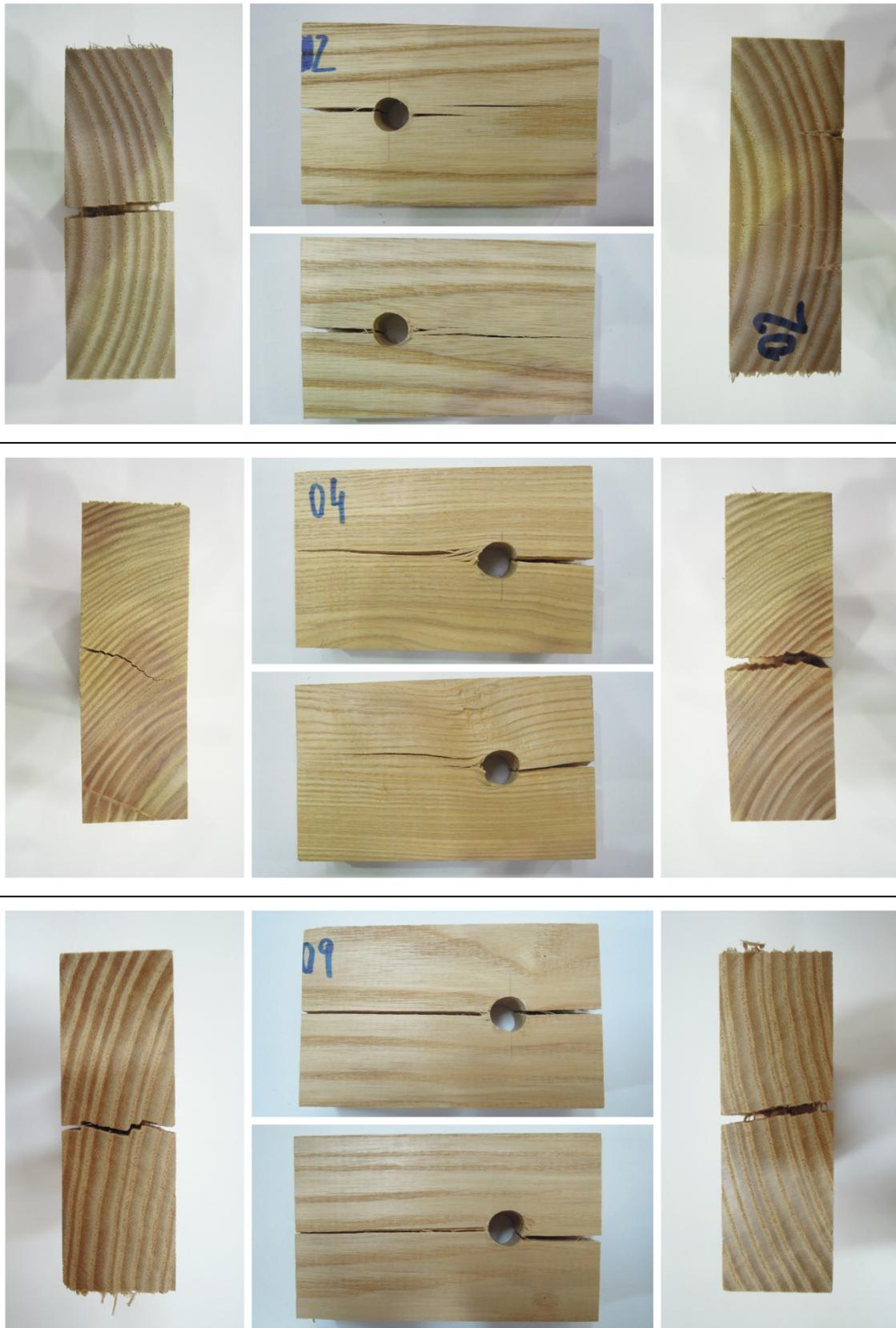


Abb. 4.5: geprüfte Druckprobekörper aus Esche mit verringertem Randabstand l_1

4.2.3 Probekörper für die Rohdichte- und Holzfeuchtebestimmung

Die Probekörper für die Holzfeuchte- und Rohdichtebestimmung wurden am unbelasteten Rand direkt unter dem Bohrloch entnommen. In Abb. 4.6 sind die Entnahmestellen der Rohdichteprobekörper exemplarisch für zwei Probekörper dargestellt.

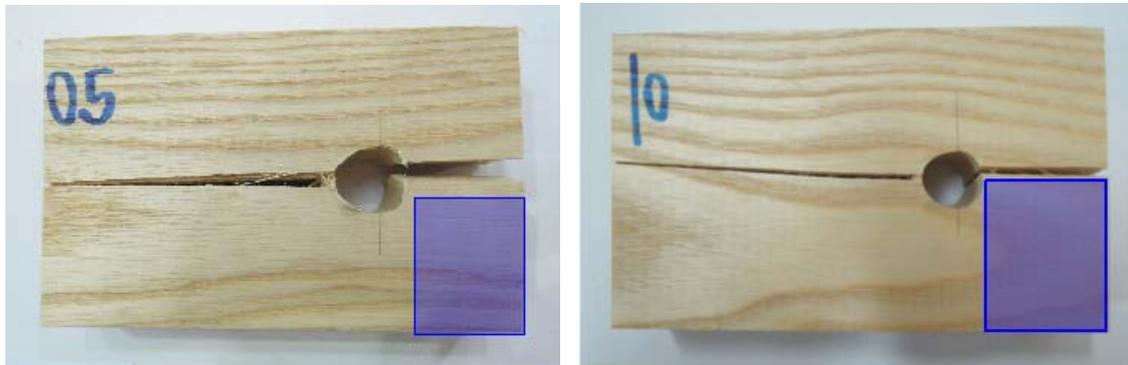


Abb. 4.6: Entnahmestelle der Rohdichteprobekörper bei Druckprobekörpern mit verringertem Randabstand l_1

4.3 Auswertung der Prüfungen

Die Auswertung der Prüfungen erfolgt analog zur Auswertung der zuvor durchgeführten Prüfungen.

4.3.1 Holzfeuchte der Probekörper

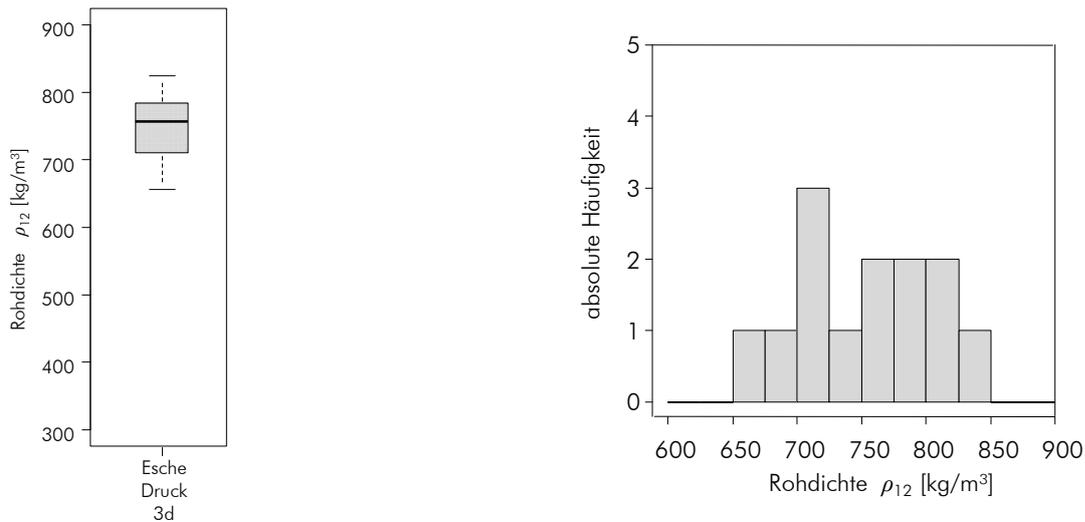
Für die Probekörper aus Esche wurde eine mittlere Holzfeuchte von 11,0 % ermittelt.

Tab. 4.2: Ausgleichsholzfeuchte der Darrproben aus Esche mit verringertem Randabstand bei relativer Luftfeuchtigkeit von 65 ± 5 % und 20 ± 2 °C

	Anzahl [Stück]	Kleinstwert [%]	Mittelwert [%]	Größtwert [%]	CoV [%]
Esche	26	10,8	11,0	11,4	1,84

4.3.2 Rohdichte der Probekörper

Der Mittelwert der Rohdichte für die 26 Probekörper aus Esche beträgt $\rho_{12} = 753 \text{ kg/m}^3$ und der Median ergab sich zu 759 kg/m^3 . Aus Abb. 4.7 (a) ist eine gute Übereinstimmung der Rohdichten aus Esche zu erkennen. In (b) sind die Rohdichten der Eschenproben mit verringertem Randabstand dargestellt.



(a) Boxplot der Rohdichte bei 12 % Holzfeuchte (b) Histogramm der Rohdichte Esche 3d

Abb. 4.7: Rohdichte von Esche bei verringertem Randabstand l_1

Die statistischen Kennwerte der ermittelten Rohdichten sind in Tab. 4.3 zusammengefasst.

Tab. 4.3: Kleinst-, Mittel- und Größtwerte der Rohdichte bei 12 % Holzfeuchte

	Kleinstwert [kg/m^3]	Mittelwert [kg/m^3]	Größtwert [kg/m^3]	CoV [%]	$\rho_{0,05}$ [kg/m^3]	$\rho_{0,95}$ [kg/m^3]
Esche	658	753	826	6,80	681	822

4.3.3 Aufspalten und Verformung der Probekörper

In Tab. 4.4 ist die Anzahl der Probekörper angegeben, die vor der Verformungsgrenze von 5 mm gespalten sind. Bei den Eschenproben mit verringertem Randabstand spalteten 69 % der Probekörper vor einer Verschiebung von 5 mm.

Tab. 4.4: maximale Verschiebung der Probekörper aus Esche bei Bruch

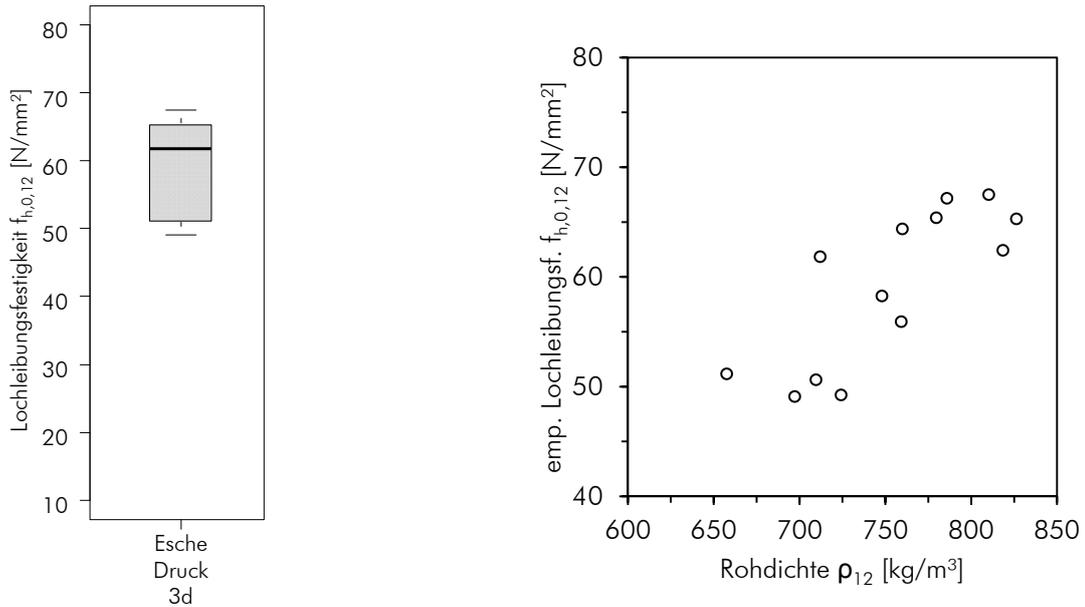
	Anzahl gesamt	$v_{u, \min}$ [mm]	Mittelwert v_u [mm]	$v_{u, \max}$ [mm]	Anzahl $v_u < 5$ mm [Stück]	$v_u < 5$ mm [%]
Esche	13	1,53	4,68	7,99	9	69

4.3.4 Überblick der ermittelten Lochleibungsfestigkeiten

In Abb. 4.8 und Tab. 4.5 sind die ermittelten Lochleibungsfestigkeiten $f_{h,0,12}$ der Eschenserie mit verringertem Randabstand dargestellt.

Tab. 4.5: Kleinst-, Mittel- und Größtwerte der Lochleibungsfestigkeit bei 12 % Holzfeuchte

	Kleinstwert [N/mm^2]	Mittelwert [N/mm^2]	Größtwert [N/mm^2]	CoV [%]	$f_{h,05}$ [N/mm^2]	$f_{h,95}$ [N/mm^2]
Esche	49,10	59,10	67,50	11,99	49,19	67,31

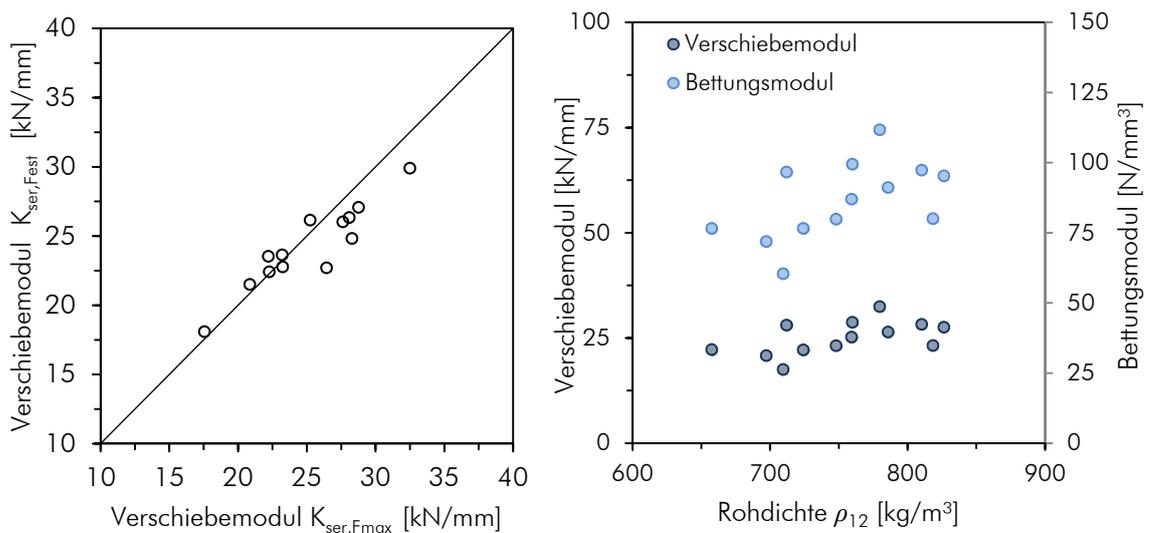


(a) Boxplots der Lochleibungsfestigkeiten (b) Rohdichte vs. Lochleibungsfestigkeit

Abb. 4.8: Lochleibungsfestigkeit normiert auf 12 % Holzfeuchte

4.3.5 Verschiebe- und Bettungsmoduln

In Abb. 4.9 sind in (a) der Verschiebemodul $K_{ser,Fmax}$ über $K_{ser,Fest}$ aufgetragen. Daraus wird eine hohe Übereinstimmung der beiden Moduln ersichtlich. Eine leichte Unterschätzung des Verschiebemoduls durch eine zu hohe erwartete Höchstlast kann bei einem Teil der Proben erkannt werden. In (b) sind die Verschiebe- und Bettungsmoduln der Rohdichte gegenübergestellt. Der mittlere Bettungsmodul der Eschenserie mit verringertem, unbelastetem Randabstand ergibt sich zu $86,4 \text{ N/mm}^3$.



(a) Verschiebemodul $K_{ser,Fmax}$ über $K_{ser,Fest}$ (b) Module über Rohdichte

Abb. 4.9: Streudiagramme des Verschiebemoduls und Bettungsmoduls der Probekörper aus Esche

In Tab. 4.6 sind die ermittelten Werte des Verschiebemoduls für Esche mit verringertem Randabstand angeführt.

Tab. 4.6: Kleinst-, Mittel- und Größtwerte des Verschiebemoduls

	Rohdichte ρ_{12} [kg/m ³]	Kleinstwert [kN/mm]	Mittelwert [kN/mm]	Größtwert [kN/mm]	CoV [%]
Esche	753	17,6	25,1	32,5	16,0

4.3.6 Ausschluss von Probekörpern anhand der Rohdichte

Für den Ausschluss von Probekörpern wurden die folgenden zwei Methoden untersucht.

4.3.6.1 Ausschluss von Probekörpern nach empirischer Verteilungsfunktion

Als die erste Ausschlussmöglichkeit wird die empirische Verteilungsfunktion gewählt. Wie in Abb. 4.10 ersichtlich, können keine offensichtlichen Ausreißer festgestellt werden. Nach dieser Methode würde keine Probe ausgeschlossen werden.

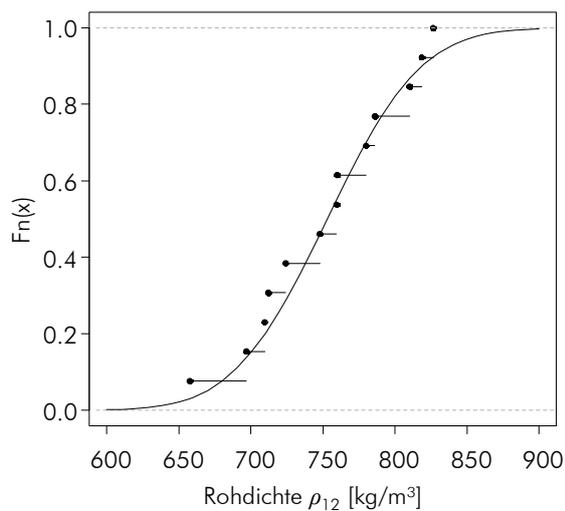


Abb. 4.10: empirische Verteilungsfunktion der Rohdichten aus der Serie Esche 3d

4.3.6.2 Ausschluss von Probekörpern nach ON EN ISO 8970:2010

Als zweite Methode wird die Vorgehensweise nach *ON EN ISO 8970:2010* gewählt. Die Grenzen dieser Methoden sind strichliert dargestellt und würden den rot ausgefüllten Probekörper E12_D08 ausschließen. Dadurch würden 8 % der Eschenproben ausgeschlossen werden.

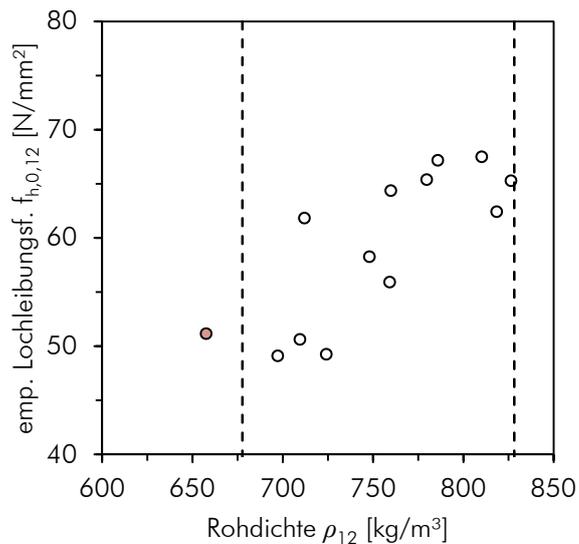


Abb. 4.11: Einfluss von *ON EN ISO 8970:2010* auf die Auswahl der Probekörper

4.3.6.3 Gewähltes Ausschlussverfahren

Anhand der folgenden Tab. 4.7 und Tab. 4.8 wurden die Ergebnisse der Ausschlussverfahren den Prüfwerten gegenüber gestellt. Aufgrund des geringen Einflusses auf die Lageparameter wurde zum Erhalt des Probenumfangs kein Probekörper ausgeschlossen.

Tab. 4.7: Vergleich der Ausschlussverfahren anhand der Rohdichte

	ρ_{12} gesamt [kg/m ³]	ρ_{8970} [kg/m ³]	Differenz [kg/m ³]	<u>Differenz</u> ρ_{12}
Esche	753	761	8	1,1 %

Tab. 4.8: Vergleich der Ausschlussverfahren anhand der Lochleibungsfestigkeit

	$f_{h,0,12}$ gesamt [N/mm ²]	f_{8970} [N/mm ²]	Differenz [N/mm ²]	<u>Differenz</u> $f_{h,0,12}$
Esche	59,10	59,8	0,7	1,2 %

5 Gegenüberstellung der Prüfergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Lochleibungsversuche der Eschenserien miteinander verglichen. Die drei untersuchten Serien stellten Prüfungen mit Probekörpern mit Abmessungen nach *ON EN 383:2007* auf Druck und Zug und Prüfungen mit Probekörper auf Druck mit verringertem unbelasteten Randabstand nach *Ehlbeck und Werner (1992)* dar. In den folgenden Abschnitten werden Rohdichte, Spaltverhalten, Lochleibungsfestigkeit, Verschiebe- und Bettungsmoduln der Serien einander gegenübergestellt.

Die unter Druck mit einem Randabstand nach *ON EN 383:2007* geprüften Eschenproben werden nun als *Druck 7d* bezeichnet, die Eschenproben mit verringertem Randabstand als *Druck 3d*.

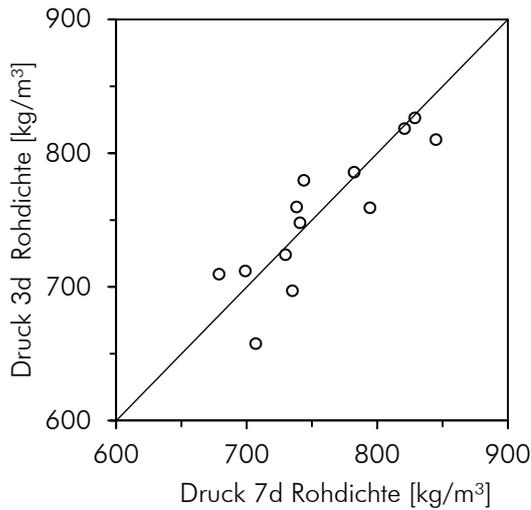
5.1 Rohdichte

In den folgenden Abbildungen sind die Rohdichten der geprüften Serien dargestellt. In Tab. 5.1 sind unter anderem die ermittelten Kleinst-, Mittel- und Größtwerte der Rohdichte bei 12 % Holzfeuchte der jeweiligen Serie angeführt. Der Boxplot in Abb. 5.1 (d) zeigt eine ausgeglichene Verteilung der Rohdichten.

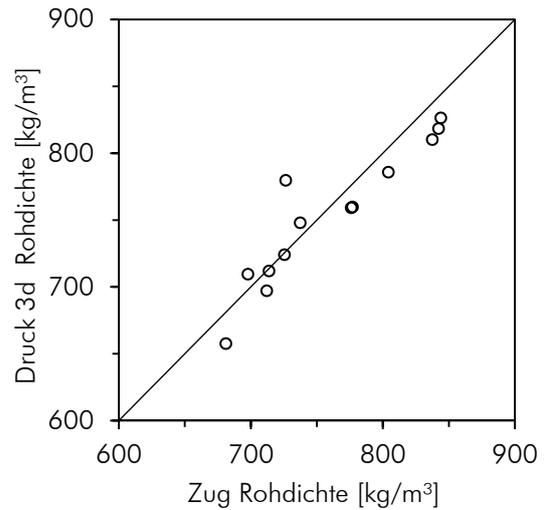
Tab. 5.1: Kleinst-, Mittel- und Größtwerte der Rohdichte bei 12 % Holzfeuchte

Esche	Kleinstwert [kg/m ³]	Mittelwert [kg/m ³]	Größtwert [kg/m ³]	CoV [%]	t-Test p-Wert [-]	Wilcoxon -Test p-Wert [-]	$\rho_{0,05}$ [kg/m ³]	$\rho_{0,95}$ [kg/m ³]
					0,837	0,920		
Druck 7d	679	757	845	6,93			691	835
Druck 3d	658	753	826	6,80			681	822
					0,772	0,801		
Zug	681	759	844	7,57			691	843
Druck 3d	658	753	826	6,80			681	822

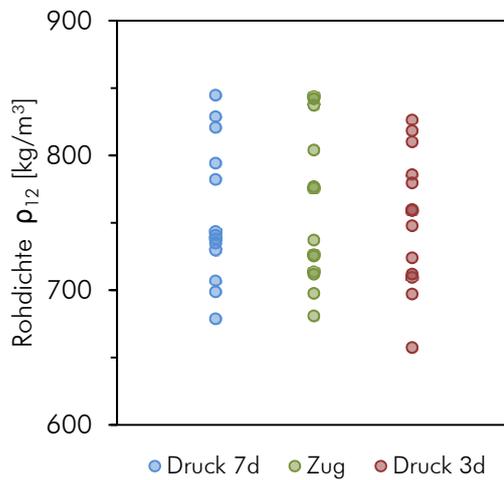
Die durchgeführten statistischen Tests sind der t-Test und der Wilcoxon-Mann-Whitney-Test, siehe Tab. 5.1. Sowohl beim t-Test als auch beim Wilcoxon-Mann-Whitney-Test wird für die Rohdichte von Druck 7d – Druck 3d und Zug – Druck 3d ein *p*-Wert nahe 1 ausgegeben. Dies deutet darauf hin, dass die Rohdichten der einzelnen Serien sich weder im Mittelwerte noch im Median signifikant voneinander unterscheiden. In Abb. 5.1 sind die Rohdichten der Eschenserien dargestellt. Die ermittelten Mediane der Rohdichten betragen 741 kg/m³ bei der Serie Druck 7d, 737 kg/m³ bei Zug und 759 kg/m³ bei Druck 3d.



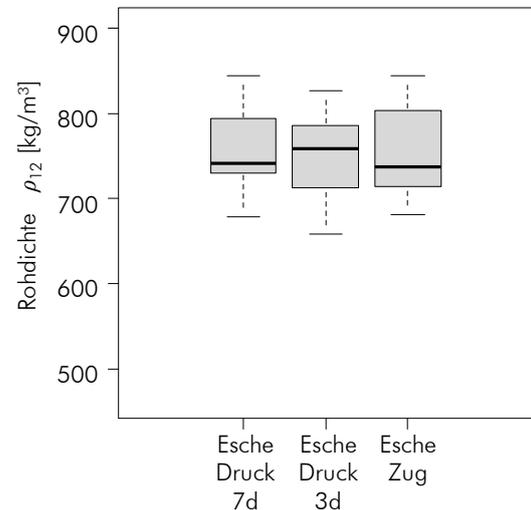
(a) Druck 3d versus Druck 7d



(b) Druck 3d versus Zug



(c) Rohdichten der Eschenserien



(d) Boxplots für die Rohdichten aus Esche

Abb. 5.1: Rohdichten bei Eschenproben

5.2 Aufspalten der Probekörper

In Abb. 5.2 ist die gemittelte Prüfkraft über den gemittelten Verschiebeweg der Eschenproben bis zum Aufspalten des ersten Probekörpers dargestellt. Alle drei Serien weisen einen linear-elastischen Anstieg gefolgt von einer Plastifizierung des Holzes auf. Während der Bruch bei den Serien Druck 7d und Zug bei ca. 3,6 mm eintritt, spaltet der erste Probekörper mit veringertem Randabstand – Esche 3d – früher, siehe Abb. 5.2.

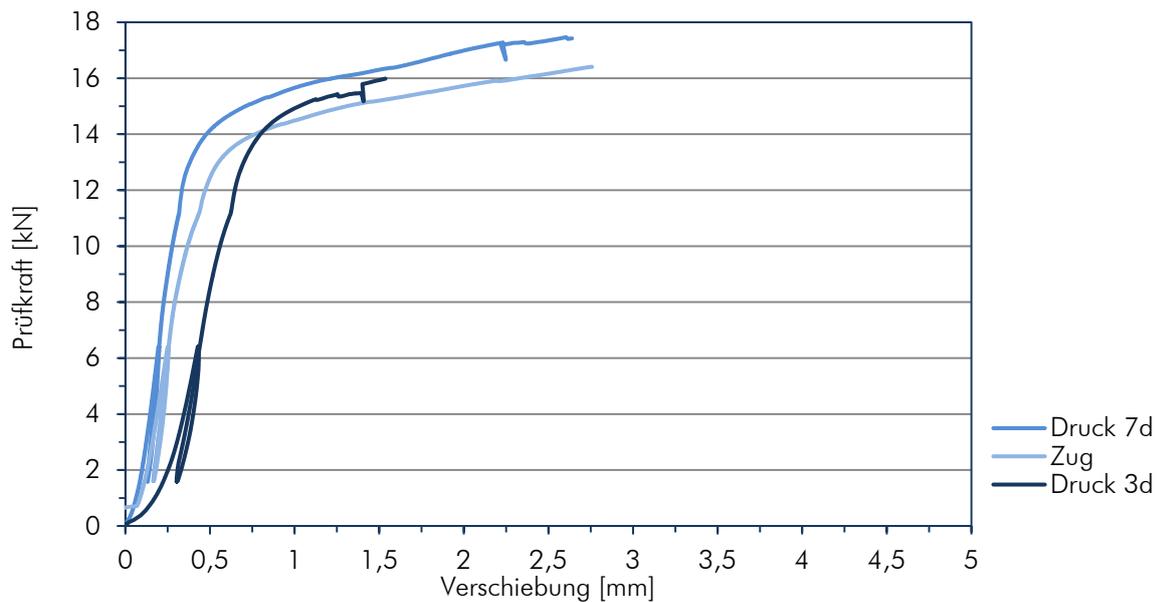


Abb. 5.2: Gemittelte Last-Verformungskurven für Stabdübel 12 mm bei Esche

In Tab. 5.2 sind die Verschiebungen der Probekörper der Serien Esche Druck mit einem unbelasteten Randabstand von $7d$, Esche Zug und Esche Druck mit einem unbelasteten Randabstand von $3d$ dargestellt. Das früheste Aufspalten einer Probe fand bei Esche Druck $3d$ statt, auch die geringste maximale Verschiebung kann bei dieser Serie festgestellt werden. Ein deutlicher Einfluss des Randabstandes kann zudem durch die Anzahl der vor 5 mm Verschiebung gespaltenen Proben erkannt werden. Bei der Serie Esche Druck $7d$ spalteten 54 % der Proben vor einer Verschiebung von 5 mm, 69 % der Probekörper spalteten bei Esche Druck $3d$.

Tab. 5.2: Verschiebung der Probekörper aus Esche bei Bruch

Esche	Anzahl gesamt	$v_{u, \min}$ [mm]	$v_{u, \max}$ [mm]	Anzahl $v_u < 5$ mm	
				[Stück]	[%]
Druck $7d$	13	2,63	9,76	7	54
Zug	13	2,75	> 10	5	39
Druck $3d$	13	1,53	7,99	9	69

In Abb. 5.3 sind die Verschiebungen der einzelnen Serien dargestellt. Da die Wegaufnehmer nur für eine maximale Verschiebung von 10 mm kalibriert sind, wurden alle größeren gemessenen Verschiebungen in grau dargestellt.

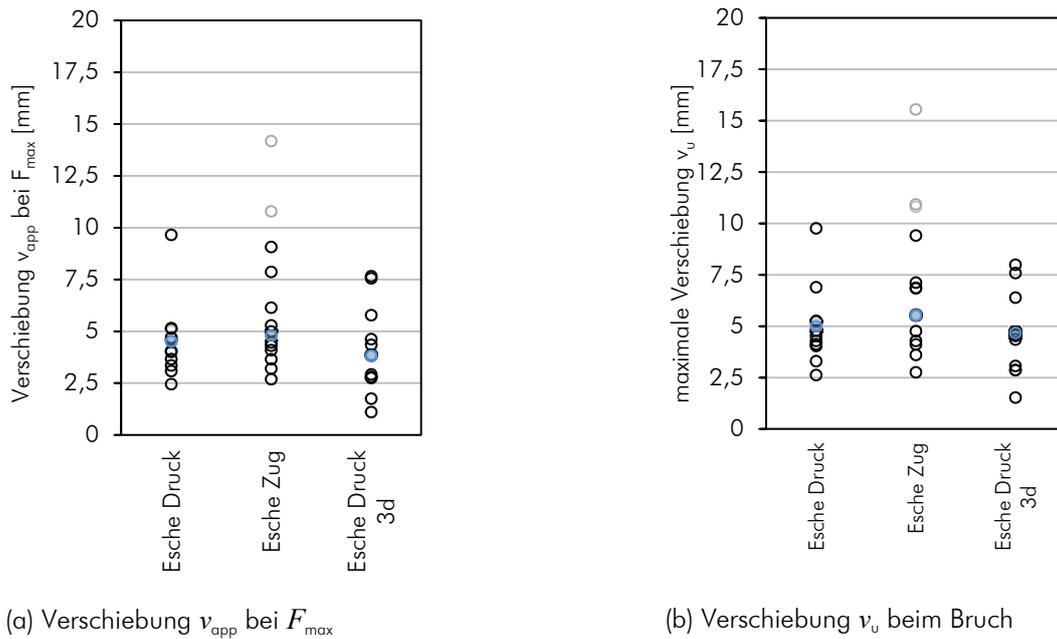


Abb. 5.3: Verschiebung des Stabdübels bei F_{max} und beim Bruch

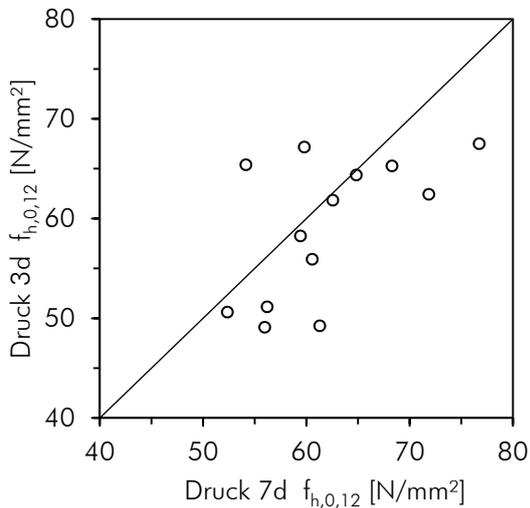
5.3 Lochleibungsfestigkeiten

In Tab. 5.3 werden die zuvor ermittelten Lochleibungsfestigkeiten gegenübergestellt. In Abb. 5.4 (d) sind die Boxplots der Lochleibungsfestigkeiten bei 12 % Holzfeuchte aufgetragen. Dabei kann festgestellt werden, dass der Median der Serie Esche Druck 3d etwas höher liegt als Esche Druck 7d und deutlich höher als Esche Zug. In Tab. 5.3 sind unter anderem die Kleinst-, Mittel- und Größtwerte der Lochleibungsfestigkeit bei 12 % Holzfeuchte angeführt. Dabei kann festgestellt werden, dass die gemittelte Lochleibungsfestigkeit von Esche Druck 3d zwischen der von Druck 7d und Zug liegt. Auch der CoV ist bei allen drei Serien sehr ähnlich.

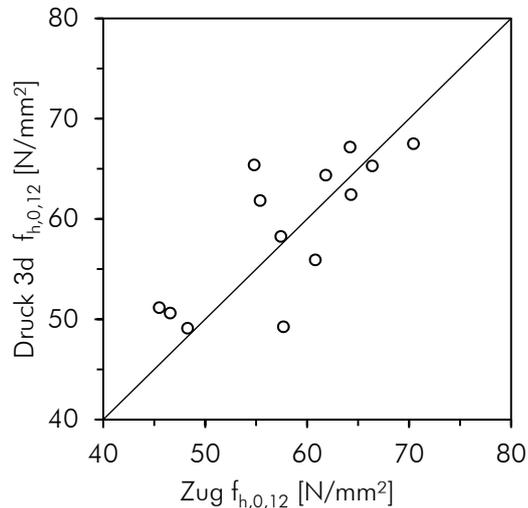
Tab. 5.3: Kleinst-, Mittel- und Größtwerte der Lochleibungsfestigkeit bei Esche unter Druck bei 12 % Holzfeuchte

Esche	Kleinstwert	Mittelwert	Größtwert	CoV	t - Test p -Wert	Wilcoxon -Test p -Wert	$f_{h,05}$	$f_{h,95}$
	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
					0,324	0,511		
Druck7d	52,34	61,84	76,72	11,44			53,42	73,80
Druck 3d	49,10	59,10	67,50	11,99			49,19	67,31
					0,681	0,479		
Zug	45,48	57,96	70,42	13,41			46,13	67,99
Druck 3d	49,10	59,10	67,50	11,99			49,19	67,31

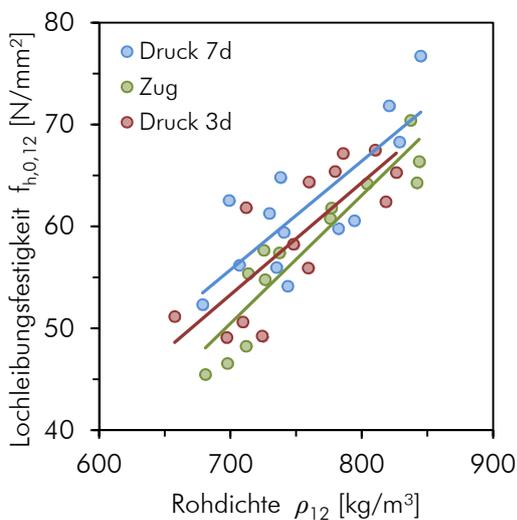
Bei den statistischen Tests der Lochleibungsfestigkeit der Serien Druck 7d – Druck 3d und Zug – Druck 3d können beim t-Test und beim Wilcoxon-Mann-Whitney-Test p -Werte größer 0,05 ermittelt werden. Dies weist darauf hin, dass die Lochleibungsfestigkeiten der verglichenen Serien sich im Mittelwert (t-Test) und Median (Wilcoxon-Test) nicht signifikant unterscheiden.



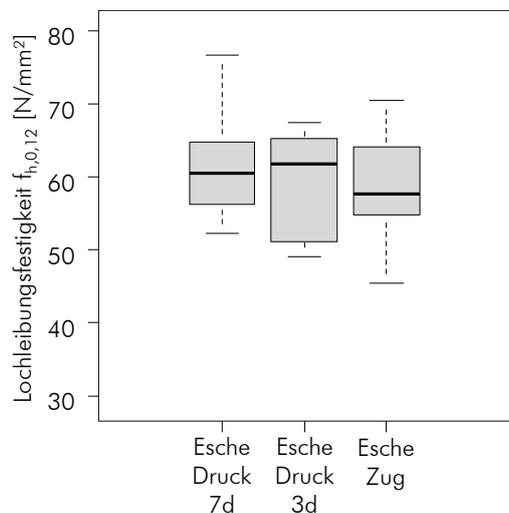
(a) Druck 3d versus Druck 7d



(b) Druck 3d versus Zug



(c) Lochleibungsfestigkeit versus Rohdichte



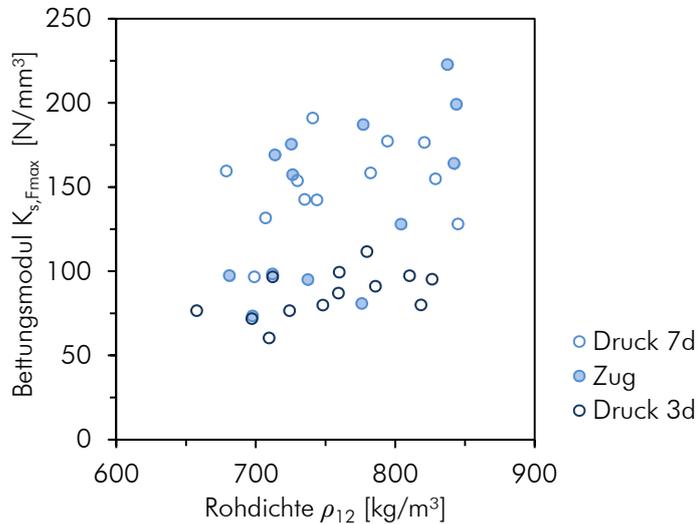
(d) Boxplot der Lochleibungsfestigkeit

Abb. 5.4: Lochleibungsfestigkeit der Probekörper aus Esche

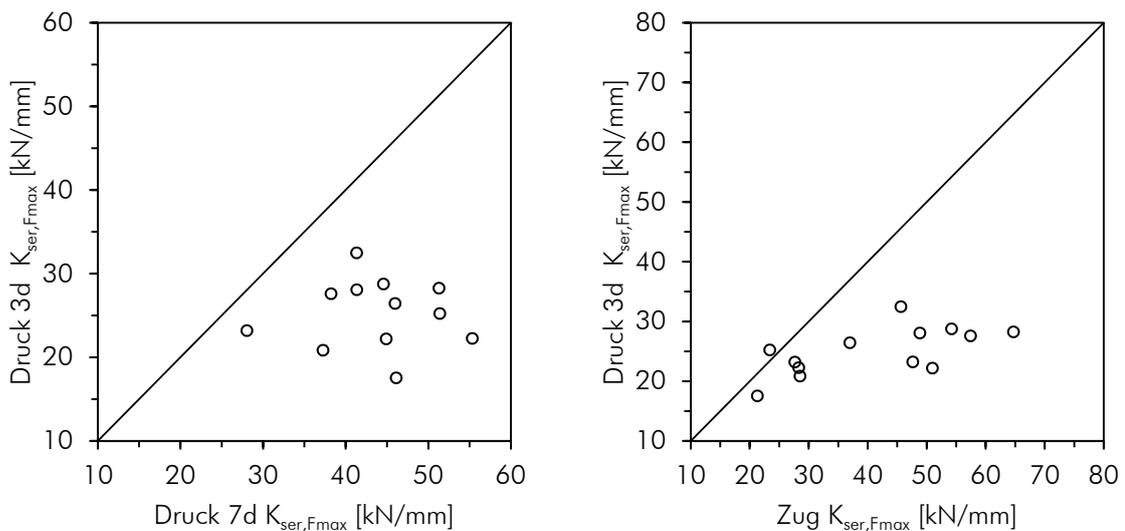
Aus Abb. 5.4 (a) und (b) ist ersichtlich, dass die Lochleibungsfestigkeit der jeweiligen Proben aus einem Brett deutlich Schwanken. In (c) sind die auf 12 % Holzfeuchte umgerechneten Lochleibungsfestigkeiten und Rohdichten dargestellt. Daraus kann erkannt werden, dass die Werte für Zug eher unter jenen der Druckserien liegen. Zudem wurden die Trendlinien eingezeichnet wodurch ersichtlich ist, dass die Trendlinien der Druckserien nahezu parallel verlaufen.

5.4 Verschiebe- und Bettungsmoduln

Aus Abb. 5.5 ist klar erkennbar, dass die Bettungs- und auch die Verschiebemoduln der Serie Esche Druck 3d deutlich geringer sind, als bei Esche Druck 7d und Esche Zug.



(a) Bettungsmodul $K_{s,Fmax}$ über die Rohdichte bei 12 % Holzfeuchte der gesamten Serien



(b) Verschiebemodul $K_{ser,Fmax}$ von Druck 7d über Druck 3d der Eschenproben

(c) Verschiebemodul $K_{ser,Fmax}$ von Zug über Druck 3d der Eschenproben

Abb. 5.5: Streudiagramme des Verschiebe- und Bettungsmoduls

In Tab. 5.4 sind unter anderem die Kleinst-, Mittel- und Größtwerte des Verschiebemoduls angeführt. Dabei kann festgestellt werden, dass der mittlere Verschiebemodul bei Druck 3d deutlich unter Druck 7d und Zug liegt. Ein Zusammenhang mit der Rohdichte ist nicht erkennbar, da die mittlere Rohdichte bei 12 % Holzfeuchte kaum schwankt. Auffällig ist, dass der CoV von Zug deutlich höher ist als bei den anderen Serien.

Tab. 5.4: Kleinst-, Mittel- und Größtwerte des Verschiebemoduls $K_{ser, Fmax}$ bei Esche

Esche	Rohdichte ρ_{12} [kg/m ³]	Kleinstwert [kN/mm]	Mittelwert [kN/mm]	Größtwert [kN/mm]	CoV [%]
Druck $7d$	757	28,0	43,8	55,3	16,8
Zug	759	21,3	41,2	64,7	34,6
Druck $3d$	753	17,6	25,1	32,5	16,0

Da die Bettungsmoduln sich nur durch das Einbeziehen der Fläche von den Verschiebemoduln unterscheiden, siehe Abschnitt 3.2.4, und die Fläche bei allen Prüfungen gleich war, wird auf einen zusätzlichen Vergleich der Bettungsmoduln verzichtet.

5.5 Resümee

Die von *Ehlbeck und Werner (1992)* ermittelte, geringere Lochleibungsfestigkeit unter Druckbelastung wurde auf den geringeren unbelasteten Randabstand zurückgeführt.

Wie die in dieser Studie ermittelten Lochleibungsfestigkeiten zeigen, gibt es keinen signifikanten Unterschied zwischen den Proben mit einem unbelasteten Randabstand von $3d$ bzw. $7d$ unter Druckbelastung. Die ermittelte Lochleibungsfestigkeit der Serie Esche Druck $3d$ liegt im Mittelwert sogar über der der Serie Esche Zug. Somit kann weder ein Einfluss des unbelasteten Randabstandes unter Druckbelastung noch ein Einfluss von Druck- und Zugbelastung auf die Lochleibungsfestigkeit erkannt werden.

Für den Verschiebungs- und Bettungsmodul stellt der unbelastete Randabstand hingegen einen großen Einfluss dar, siehe Abb. 5.5 (b).

6 Schlussbetrachtung und Ausblick

In dieser Arbeit wurden insgesamt 115 Lochleibungsversuche an Birke, Esche und Fichte mit einem Stabdübeldurchmesser von 12 mm durchgeführt. Es wurde versucht, den Einfluss der Belastung – Zug- oder Druckbelastung – auf die Lochleibungsfestigkeit festzustellen. Zudem wurde der unbelastete Randabstand bei Esche unter Druck zwischen $3d$ und $7d$ variiert.

Bei den durchgeführten Prüfungen kann nur bei Birke ein signifikanter Unterschied im Median zwischen Zug- und Druckbelastung für die Lochleibungsfestigkeit festgestellt werden. Die Lochleibungsfestigkeiten unter Druckbelastung liegen dabei höher als unter Zugbelastung. Bei Esche und Fichte besteht kein signifikanter Unterschied der Lochleibungsfestigkeit bei Druck- und Zugbelastung. Die Lochleibungsfestigkeiten bei Druckbelastung lagen bei allen drei Holzarten meist höher als bei Zugbelastung, wobei angemerkt werden muss, dass sogar eine mögliche Begünstigung der Zugproben durch einen belasteten Randabstand von $10d$, statt der in *ON EN 383:2007* geforderten $7d$, vorlag. Dementsprechend kann der Randabstand als Ursache für die geringeren Werte der Lochleibungsfestigkeit unter Zugbeanspruchung mit einer hohen Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden. Auch bei der Variation des unbelasteten Randabstandes der Eschenserien unter Druckbelastung kann kein signifikanter Unterschied in der Lochleibungsfestigkeit beobachtet werden.

Beim Vergleich der im Zuge dieser Masterarbeit ermittelten Lochleibungsfestigkeiten mit Prüfwerten aus der Literatur ist eine gute Übereinstimmung erkennbar.

Vergleicht man hingegen den charakteristischen Wert der Lochleibungsfestigkeit von Fichte aus den Prüfungen mit der durch Gl. (2) aus *ON EN 1995-1-1:2009* ermittelten charakteristischen Lochleibungsfestigkeit, dann kann eine deutliche Überschätzung der Prüfwerte von bis zu 25 % dokumentiert werden. Somit muss das in *ON EN 1995-1-1:2009* verankerte Modell zur Berechnung der Lochleibungsfestigkeit als progressiv bezeichnet werden.

Zusätzlich zur Lochleibungsfestigkeit wurden auch die Verschiebemoduln ermittelt. Im Gegensatz zur Lochleibungsfestigkeit werden die Verschiebemoduln durch die Gleichungen aus *ON EN 1995-1-1:2009* und *enBR (2007)* um bis zu 200 % unterschätzt.

Beim Vergleich der ermittelten Lochleibungsfestigkeiten und Moduln der Laubhölzer mit entsprechenden Gleichungen aus der Literatur, siehe 3.6.2 und 3.6.2.2, kann eine gute Übereinstimmung beobachtet werden.

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass Lochleibungsfestigkeiten durch das derzeitige Berechnungsmodell aus *ON EN 1995-1-1:2009* nicht optimal abgebildet werden. Auch für die Gleichung zur Berechnung des Verschiebemoduls sind Anpassungen aufgrund der deutlichen Unterschätzung der Prüfwerte nötig. Zudem wäre eine Einarbeitung der Abhängigkeit des Verschiebemoduls vom Kraft-Faser-Winkel, wie in *Hübner (2013)* für Bettungsmoduln ausgeführt, sinnvoll.

7 Literaturverzeichnis

[Blass et al., 2000] BLASS, Hans Joachim; BIENHAUS, Adriane; KRÄMER, Volker: *Effective bending capacity of dowel-type fasteners*. In: Proceedings of CIB-W18. Delft, August 2000. – Paper 33-7-5

[Ehlbeck und Werner, 1992] EHLBECK, Jürgen; WERNER, Hartmut: *Softwood and hardwood embedding strength for dowel-type fasteners*. In: Proceedings of CIB-W18. Åhus, Sweden, 1992. – Paper 25-7-2

[enBR, 2007] enBR: *eurocodenahe Bemessungsrichtlinie – Holzbauwerke – Entwurf, Berechnung und Bemessung*. Graz: holz.bau forschungs gmbh, April 2007

[Gehri, 1980] GEHRI, Ernst: *Betrachtungen zum Tragverhalten von Bolzenverbindungen im Holzbau*. Schweizer Ingenieur und Architekt 1980, S. 1336-1344

[Gehri, 1981] GEHRI, Ernst: *Stabförmig Verbindungsmittel*. In: Einführung in die Norm SIA 164 (1981) Holzbau“. Baustatik und Stahlbau, Publ. Nr. 81-1, ETH Zürich, 1981

[Gehri, 1982] GEHRI, Ernst: *Zur Tragfähigkeit von Stabdübelverbindungen*. Ingenieurholzbau in Forschung und Praxis, S. 107-115, Karlsruhe 1982

[Gehri und Fontana, 1983] GEHRI, Ernst; FONTANA, Mario: *Betrachtungen zum Tragverhalten von Passbolzen in Holz-Holz-Verbindungen*. Institut für Baustatik und Stahlbau ETH Zürich. Zürich, 1983 – Interner Bericht 83-1

[Gehri, 2012] GEHRI, Ernst: *Stabdübelverbindung in Eschenholz - Bestimmung der Lochleibungsfestigkeit*. Rüşchlikon, September 2012 - Versuchsbericht

[Gehri, 2013] GEHRI, Ernst: *Überprüfung der Johansen-Gleichungen für Holz-Stahl-Holz-Verbindung*. Rüşchlikon, 2013 - unveröffentlicht

[Hübner und Schickhofer, 2007] HÜBNER, Ulrich; SCHICKHOFER, Gerhard: *Forschung an der TU Graz – Die Festigkeitskenngröße „Lochleibung“ für die Laubholzart Esche*. In: SCHICKHOFER, Gerhard (Hrsg.); PIRNBACHER, Gernot (Hrsg.): 6. Grazer Holzbau-Fachtagung: Verbindungstechnik im Ingenieurholzbau. Graz: holz.bau forschungs gmbh, 28. September 2007. – ISBN 978-3-902465-90-0

[Hübner, 2008] HÜBNER, Ulrich; BOGENSPERGER, Thomas; SCHICKHOFER, Gerhard: *Embedding strength of European hardwoods*. In: Proceedings of CIB-W18. St. Andrews, Canada, 24. – 28. August 2008. – Paper 41-7-6

[Hübner, 2013] HÜBNER, Ulrich: *Mechanische Kenngrößen von Buchen-, Eschen- und Robiniensholz für lastabtragende Bauteile*. Graz, Institut für Holzbau und Holztechnologie der TU Graz, Dissertation, 01. Mai 2013

[Johansen, 1949] JOHANSEN, K.W.: *Theory of timber connections*. In: IABSE Journal 9 (1949), Nr. 9, S. 249-262

[Keylwerth, 1949] KEYLWERTH, Rudolf: *Einfache Kontrollmessung bei der Holzrocknung*. In: Holz-Zentralblatt (1949), Nr. 75, S. 307-309

[Niemz, 1993] NIEMZ, Peter: *Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Leinfelden-Echterdingen: DRW-Verlag, 1993. – ISBN 3-87181-324-9

[Mischler, 1998] MISCHLER, Adrian: *Bedeutung der Duktilität für das Tragverhalten von Stahl-Holz-Bolzenverbindungen*. ETH Zürich, Dissertation

[ON EN 383, 2007] ON EN 383: *Holzbauwerke – Prüfverfahren – Bestimmung der Lochleibungsfestigkeit und Bettungswerte für stiftförmige Verbindungsmittel*. 1. März 2007

[ON EN 384, 2010] ON EN 384: *Bauholz für tragende Zwecke – Bestimmung charakteristischer Werte für mechanische Eigenschaften und Rohdichte*. 15. Mai 2010

[ON EN 409, 2009] ON EN 409: *Holzbauwerke – Prüfverfahren – Bestimmung des Fließmoments von stiftförmigen Verbindungsmitteln*. 15. Juni 2009

[ON EN 1995-1-1, 2009] Eurocode 5: *Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau*. 01. Juli 2009

[ON EN 13 183-1, 2004] ON EN 13 183-1: *Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz – Teil 1: Bestimmung durch Darrverfahren*. 1. Februar 2004

[ON EN 26 891, 1991] ON EN 26 891: *Holzbauwerke – Verbindungen mit mechanischen Verbindungsmitteln – Allgemeine Grundsätze für die Ermittlung der Tragfähigkeit und des Verformungsverhaltens (ISO 6891:1983)*. 1. August 1991

[ON EN 28 970, 1991] ON EN 28 970: *Holzbauwerke – Prüfung von Verbindungen mit mechanischen Verbindungsmitteln – Anforderungen an die Rohdichte des Holzes (ISO 8970:1989)*. 1. August 1991

[ON ISO 3131, 1996] ON ISO 3131: *Holz Bestimmung der Dichte für physikalische und mechanische Prüfungen*. 1. Juni 1996

[ON EN ISO 8970, 2010] ON EN ISO 8970: *Holzbauwerke – Prüfung von mechanischen Verbindungen – Anforderungen an die Rohdichte des Holzes*. 1. September 2010

[Sandhaas et al., 2010] SANDHAAS, Carmen; VAN DE KUILEN, Jan-Willem; BLASS, Hans Joachim; RAVENSHORST, Geert: *Embedment tests parallel-to-grain and ductility in tropical hardwood species*. In: Proceedings of 11th World Conference on Timber Engineering (WCTE). Riva del Garda, Italy, 21. Juni 2010. – Paper 491

[Sandhaas et al., 2013] SANDHAAS, Carmen; VAN DE KUILEN, Jan-Willem; BLASS, Hans Joachim; RAVENSHORST, Geert: *Embedment test parallel-to-grain and ductility aspects using various wood species*. 2013 – DOI 10.1007/s00107-013-0718-z

- [Schickhofer, 2009] SCHICKHOFER Gerhard: Holzbau – Nachweisführungen für Konstruktionen aus Holz, Institut für Holzbau und Holztechnologie, Technische Universität Graz, 2009, Skriptum
- [Schmid, 2002] SCHMID, Martin: *Anwendung der Bruchmechanik auf Verbindungen mit Holz*. Karlsruhe, Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften, Promotionsarbeit, 2002
- [Sjödin, Serrano und Enquist, 2008] SJÖDIN, Johan; SERRANO, Erik; ENQUIST, Bertil: *An experimental and numerical study of the effect of friction in single dowel joints*. In: Holz als Roh- und Werkstoff. 66. 363-372, 2008
- [Spörk, 2007] SPÖRK, Anton: *Lochleibungsfestigkeit von Nadelhölzern – Einflußfaktoren und Modellvergleiche*. Graz, Institut für Holzbau und Holztechnologie der TU Graz, Diplomarbeit, Januar 2007
- [Spörk, 2007b] SPÖRK, Anton: Einflussfaktoren auf die Lochleibungsfestigkeit für die Nadelholzart Fichte. März 2007. – Internes Paper holz.bau forschungs gmbh
- [Traetta und Schickhofer, 2007] TRAETTA, Gianluigi; SCHICKHOFER, Gerhard: *Einflussfaktoren auf die Lochleibungsfestigkeit von Fichte und Kiefer für Stabdübelverbindungen*. In: SCHICKHOFER, Gerhard (Hrsg.); PIRNBACHER, Gernot (Hrsg.): 6. Grazer Holzbau-Fachtagung: Verbindungstechnik im Ingenieurholzbau. Graz: holz.bau forschungs gmbh, 28. September 2007. – ISBN 978-3-902465-90-0
- [Whale et al., 1986] WHALE, Luke R.J.; SMITH, Ian; HILSON, Barry O.: *Behaviour of nailed and bolted joints under short-term lateral load – conclusions from some recent research*. In: Proceedings of CIB-W18 Bd.1. Florence, Italy, September 1986. – Paper 19-7-1
- [Whale et al., 1987] WHALE, Luke R.J.; SMITH, Ian; HILSON, Barry O.: *Characteristic properties of nailed and bolted joints under short-term lateral load*. Part 4 – The influence of testing mode and fastener diameter upon embedment test data. In: Journal of the Institute of Wood Science 11 (1987), Nr. 5, S. 156-161
- [Zitto et al., 2012] ZITTO, Maria Alexandra Sosa; KÖHLER, Jochen; PITER, Juan Carlos: *Embedding strength in joints of fast-growing Argentinean Eucalyptus grandis with dowel-type fasteners. Analysis according to the criterion adopted by European standards*. In: European Journal of Wood and Wood Products 70 (2012), Nr. 4, S. 433-440

Anhang A: Messdaten der Lochleibungsprüfungen

LfNr.	Laufnummer
$F_{max,5}$	Höchstlast innerhalb 5 mm Verschiebung
F_{max}	Höchstlast
v_{app}	Verschiebung bei Höchstlast
v_u	Verschiebung bei Bruch
$f_{h,0}$	Lochleibungsfestigkeit parallel zur Faser bei Holzfeuchte u
$f_{h,0,12}$	Lochleibungsfestigkeit parallel zur Faser bezogen auf 12 % Holzfeuchte
ρ_u	Normalrohddichte bei Holzfeuchte u
u	Holzfeuchte
ρ_{12}	Rohddichte bezogen auf 12 % Holzfeuchte
$K_{ser,Fest}$	Verschiebemodul bei erwarteter Höchstlast
$K_{ser,Fmax}$	Verschiebemodul bei tatsächlicher Höchstlast
$K_{s,Fmax}$	Bettungsmodul bei tatsächlicher Höchstlast

Birke unter Zug- und Druckbelastung

Mittelwert	24,32	10,27	10,67			35,18	34,44	607,72	11,3%	609,85	31,00	31,75	108,80
min Wert	24,20	7,92	8,22	3,62	4,05	27,16	26,52	534,10	10,3%	535,05	17,45	17,48	59,80
max Wert	24,43	15,30	15,30	> 10	> 10	52,30	51,36	722,10	11,9%	724,10	54,25	60,97	208,40
Standardabw.	0,05	1,28	1,29			4,39	4,32	39,82	0,0030	40,05	6,05	7,38	25,28
COV	0,2%	12,5%	12,1%			12,5%	12,5%	6,6%	2,7%	6,6%	19,5%	23,3%	23,2%

Birke unter Druckbelastung

LfNr.	Probe	Dicke	$F_{max,5}$	F_{max}	v_{app}	v_u	$f_{h,0}$	$f_{h,0,12}$	ρ_u	u	ρ_{12}	$K_{ser,Fest}$	$K_{ser,Fmax}$	$K_{s,Fmax}$
		[mm]	[kN]	[kN]	[mm]	[mm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[kg/m ³]	[%]	[kg/m ³]	[kN/mm]	[kN/mm]	[N/mm ²]
01	12_D01	24,39	10,71	10,81	5,62	6,42	36,6	36,2	623,3	11,6%	624,4	35,0	36,4	124,52
02	12_D02	24,29	10,89	10,92	5,17	6,78	37,4	36,7	645,2	11,4%	647,2	27,2	28,6	98,11
03	12_D03	24,27	12,84	12,84	4,72	5,33	44,1	43,1	693,5	11,3%	696,0	40,1	47,9	164,61
04	12_D04	24,40	10,62	10,81	5,92	6,59	36,3	35,6	615,8	11,4%	617,7	29,2	31,4	107,14
05	12_D05	24,38	15,30	15,30	4,81	5,27	52,3	51,4	722,1	11,4%	724,1	54,3	61,0	208,40
06	12_D06	24,24	11,04	11,11	5,38	5,54	38,0	37,3	632,6	11,5%	634,4	34,2	36,0	123,69
07	12_D07	24,34	9,70	10,31	8,09	9,14	33,2	32,5	596,1	11,3%	598,3	28,7	28,4	97,12
08	12_D08	24,39	9,71	9,84	6,00	6,15	33,2	33,0	582,3	11,8%	583,0	31,2	31,3	106,99
09	12_D09	24,27	9,19	9,42	6,27	6,86	31,5	31,4	568,5	11,9%	568,8	32,7	32,4	111,40
10	12_D10	24,35	10,87	12,30	11,62	11,77	37,2	36,6	584,1	11,4%	585,8	32,7	35,1	120,27
11	12_D11	24,34	11,10	11,94	7,20	7,45	38,0	37,5	572,9	11,5%	574,3	30,1	31,9	109,25
12	12_D12	24,30	11,94	12,26	6,15	6,65	40,9	39,4	624,1	10,7%	628,0	39,0	42,6	146,12
13	12_D13	24,32	11,25	11,25	3,62	4,05	38,5	38,1	667,6	11,6%	668,9	40,4	43,7	149,57
14	12_D14	24,35	11,37	11,40	5,21	5,79	38,9	38,3	642,0	11,4%	643,8	33,9	37,0	126,67
15	12_D15	24,26	9,29	9,52	6,36	6,82	31,9	31,4	562,8	11,5%	564,3	26,0	25,7	88,31
16	12_D16	24,29	10,71	11,95	8,85	9,14	36,7	36,2	583,8	11,5%	585,3	30,4	32,0	109,79
17	12_D17	24,40	9,61	9,82	5,77	7,91	32,8	32,0	598,3	11,1%	600,9	33,3	33,1	113,16
18	12_D18	24,29	9,20	9,36	7,10	9,80	31,6	30,9	665,9	11,3%	668,1	25,9	25,6	87,95
19	12_D19	24,30	9,56	9,56	4,99	6,85	32,8	32,4	583,6	11,6%	584,8	28,4	27,8	95,37
20	12_D20	24,34	9,08	9,20	5,68	5,93	31,1	30,8	588,2	11,7%	589,1	28,1	27,7	94,69
21	12_D21	24,25	11,19	11,72	7,14	7,80	38,4	37,7	600,5	11,3%	602,5	40,7	43,3	148,72
22	12_D22	24,29	10,49	10,49	4,98	5,72	36,0	35,5	624,6	11,6%	625,9	27,7	28,9	99,17
23	12_D23	24,32	9,85	10,94	12,64	12,69	33,7	32,8	575,2	11,1%	577,9	30,6	30,1	103,25
24	12_D24	24,32	12,34	13,09	11,73	12,02	42,3	41,0	637,8	11,0%	641,0	33,9	37,8	129,46
25	12_D25	24,36	8,88	11,81	12,21	12,36	30,4	30,0	570,8	11,6%	572,0	17,5	17,5	59,80
Mittelwert		24,32	10,67	11,12			36,55	35,90	614,46	11,4%	616,25	32,44	34,13	116,94
min Wert		24,24	8,88	9,20	3,62	4,05	30,36	29,99	562,81	10,7%	564,30	17,45	17,48	59,80
max Wert		24,40	15,30	15,30	> 10	> 10	52,30	51,36	722,10	11,9%	724,10	54,25	60,97	208,40
Standardabw.		0,05	1,43	1,42			4,89	4,71	41,55	0,0025	41,84	6,94	8,72	29,87
COV		0,2%	13,4%	12,8%			13,4%	13,1%	6,8%	2,2%	6,8%	21,4%	25,6%	25,5%

Birke unter Zugbelastung

LfNr.	Probe	Dicke [mm]	$F_{max,5}$ [kN]	F_{max} [kN]	v_{app} [mm]	v_u [mm]	$f_{h,0}$ [N/mm ²]	$f_{h,0,12}$ [N/mm ²]	ρ_u [kg/m ³]	u [%]	ρ_{12} [kg/m ³]	$K_{ser,Fest}$ [kN/mm]	$K_{ser,Fmax}$ [kN/mm]	$K_{s,Fmax}$ [N/mm ²]
26	12_Z01	24,35	10,15	10,36	6,40	7,85	34,7	33,2	696,4	10,6%	701,4	39,0	39,0	133,49
27	12_Z02	24,30	11,28	11,41	5,69	7,73	38,7	37,8	639,0	11,2%	641,6	33,8	34,5	118,28
28	12_Z03	24,28	11,56	11,59	5,82	6,81	39,7	38,7	658,9	11,2%	661,5	34,9	37,1	127,42
29	12_Z04	24,33	10,83	10,83	5,05	5,83	37,1	36,2	638,1	11,2%	640,8	31,4	31,2	106,99
30	12_Z05	24,34	11,47	11,63	7,89	8,61	39,3	37,8	598,0	10,8%	601,6	36,1	36,5	125,12
31	12_Z06	24,34	9,70	10,26	6,98	8,12	33,2	32,2	584,9	11,0%	587,9	25,7	24,7	84,61
32	12_Z07	24,26	8,61	9,20	9,73	10,24	29,6	28,1	581,4	10,3%	586,3	24,4	25,2	86,53
33	12_Z08	24,36	8,88	9,25	6,15	8,22	30,4	29,6	583,1	11,1%	585,6	28,9	28,9	98,75
34	12_Z09	24,28	8,80	9,01	7,27	8,61	30,2	29,3	567,2	11,1%	569,8	29,2	29,5	101,09
35	12_Z10	24,20	9,42	9,42	4,21	4,81	32,4	31,2	592,7	10,7%	596,4	29,9	29,7	102,42
36	12_Z11	24,33	10,95	12,02	8,74	8,77	37,5	36,6	575,9	11,2%	578,1	21,5	23,5	80,39
37	12_Z12	24,35	10,62	10,95	6,85	8,61	36,4	35,7	616,3	11,4%	618,2	33,7	32,6	111,53
38	12_Z13	24,31	10,66	10,89	5,96	6,48	36,5	36,0	634,4	11,5%	636,0	33,3	31,9	109,33
39	12_Z14	24,25	10,08	10,29	6,64	14,34	34,6	33,9	617,8	11,3%	620,0	30,2	28,2	96,84
40	12_Z15	24,35	9,53	9,90	7,40	10,08	32,6	32,0	611,6	11,3%	613,7	29,5	29,3	100,43
41	12_Z16	24,43	9,46	9,97	11,06	17,37	32,3	31,6	572,0	11,3%	573,9	29,3	29,4	100,22
42	12_Z17	24,34	8,85	8,86	5,05	9,84	30,3	29,5	587,9	11,1%	590,4	26,0	25,3	86,50
43	12_Z18	24,31	7,92	8,22	6,46	13,05	27,2	26,5	538,4	11,2%	540,5	20,6	19,3	66,25
44	12_Z19	24,30	10,06	10,06	5,04	8,07	34,5	34,0	605,4	11,6%	606,8	28,8	27,4	93,89
45	12_Z20	24,32	8,77	9,37	7,61	11,06	30,0	29,4	570,1	11,3%	572,2	23,9	23,6	81,00
46	12_Z21	24,34	9,10	9,73	13,66	17,15	31,2	30,5	552,7	11,3%	554,7	24,8	24,9	85,23
47	12_Z22	24,24	10,88	10,88	4,87	5,70	37,4	36,9	624,1	11,5%	625,6	33,5	33,0	113,51
48	12_Z23	24,26	10,18	10,43	6,45	7,75	35,0	34,4	621,6	11,5%	623,2	33,2	31,9	109,68
49	12_Z24	24,28	9,00	9,61	16,40	16,41	30,9	30,6	534,1	11,6%	535,0	24,5	24,3	83,52
50	12_Z25	24,34	9,82	11,38	> 10	> 10	33,6	32,9	622,6	11,3%	624,9	33,0	33,1	113,32
Mittelwert		24,31	9,86	10,22			33,81	32,98	600,98	11,2%	603,45	29,57	29,36	100,65
min Wert		24,20	7,92	8,22	4,21	4,81	27,16	26,52	534,10	10,3%	535,05	20,62	19,33	66,25
max Wert		24,43	11,56	12,02	> 10	> 10	39,69	38,73	696,44	11,6%	701,42	39,01	39,01	133,49
Standardabw.		0,05	0,99	0,98			3,40	3,37	37,63	0,0031	37,94	4,72	4,83	16,56
COV		0,2%	10,0%	9,6%			10,1%	10,2%	6,3%	2,8%	6,3%	16,0%	16,5%	16,5%

Esche unter Zug- und Druckbelastung

Mittelwert		24,15	17,94	18,32			61,92	59,90	754,22	10,9%	758,33	40,60	42,44	146,49
min Wert		24,01	13,60	13,60	2,45	2,63	46,86	45,48	674,40	10,3%	678,79	21,78	21,29	73,50
max Wert		24,23	23,02	23,02	14,18	15,55	79,16	76,72	840,60	11,9%	844,87	54,54	64,68	222,84
Standardabw.		0,05	2,23	2,36			7,66	7,55	53,92	0,0031	53,92	10,32	11,32	39,12
COV		0,2%	12,4%	12,9%			12,4%	12,6%	7,1%	2,8%	7,1%	25,4%	26,7%	26,7%

Esche unter Druckbelastung

LfNr.	Probe	Dicke [mm]	$F_{max,5}$ [kN]	F_{max} [kN]	v_{app} [mm]	v_u [mm]	$f_{h,0}$ [N/mm ²]	$f_{h,0,12}$ [N/mm ²]	ρ_u [kg/m ³]	u [%]	ρ_{12} [kg/m ³]	$K_{ser,Fest}$ [kN/mm]	$K_{ser,Fmax}$ [kN/mm]	$K_{s,Fmax}$ [N/mm ²]
51	12_D01	24,08	15,74	15,77	5,10	5,24	54,5	52,3	674,4	10,7%	678,8	46,2	46,1	159,57
52	12_D02	24,15	18,21	18,21	3,35	4,29	62,8	60,6	789,7	10,8%	794,4	51,4	51,4	177,33
53	12_D03	24,18	17,95	17,95	4,07	4,53	61,9	59,8	778,0	10,9%	782,3	44,4	46,0	158,44
54	12_D04	24,18	16,22	16,22	4,01	4,12	55,9	54,1	739,8	10,9%	743,7	41,1	41,3	142,39
55	12_D05	24,22	19,67	19,67	-	-	67,7	64,8	733,0	10,6%	738,2	-	-	-
56	12_D06	24,14	18,38	18,38	2,45	2,63	63,4	61,3	725,6	10,9%	729,7	40,0	44,6	153,85
57	12_D07	24,14	20,22	21,82	9,65	9,76	69,8	68,3	825,8	11,3%	828,8	44,1	44,9	154,98
58	12_D08	24,17	16,77	16,77	4,57	4,78	57,8	56,2	703,6	11,1%	706,9	39,0	38,2	131,76
59	12_D09	24,13	17,66	17,66	3,08	3,30	61,0	59,4	737,6	11,1%	740,8	54,5	55,3	191,04
60	12_D10	24,15	18,74	18,74	5,01	5,10	64,7	62,6	695,1	10,9%	698,9	26,5	28,0	96,73
61	12_D11	24,14	16,62	16,62	5,15	6,90	57,4	56,0	732,0	11,2%	735,0	41,4	41,3	142,70
62	12_D12	24,23	23,02	23,02	3,66	4,04	79,2	76,7	840,6	11,0%	844,9	27,6	37,2	128,10
63	12_D13	24,20	20,93	20,93	4,69	5,26	72,1	71,8	820,4	11,9%	820,9	50,5	51,3	176,60
Mittelwert		24,16	18,47	18,60			63,70	61,84	753,51	11,0%	757,17	42,23	43,81	151,12
min Wert		24,08	15,74	15,77	2,45	2,63	54,47	52,34	674,40	10,6%	678,79	26,55	28,03	96,73
max Wert		24,23	23,02	23,02	9,65	9,76	79,16	76,72	840,60	11,9%	844,87	54,54	55,32	191,04
Standardabw.		0,04	2,06	2,22			7,04	7,07	52,80	0,0033	52,45	8,56	7,34	25,38
COV		0,2%	11,2%	11,9%			11,1%	11,44%	7,0%	3,0%	6,93%	20,3%	16,8%	16,8%

Esche unter Zugbelastung

LfNr.	Probe	Dicke [mm]	$F_{max,5}$ [kN]	F_{max} [kN]	v_{app} [mm]	v_u [mm]	$f_{h,0}$ [N/mm ²]	$f_{h,0,12}$ [N/mm ²]	ρ_u [kg/m ³]	u [%]	ρ_{12} [kg/m ³]	$K_{ser,Fest}$ [kN/mm]	$K_{ser,Fmax}$ [kN/mm]	$K_{s,Fmax}$ [N/mm ²]
64	12_Z01	24,14	14,14	15,05	7,86	9,41	48,8	46,6	692,3	10,5%	697,7	21,8	21,3	73,50
65	12_Z02	24,10	18,14	18,14	5,00	5,52	62,7	60,8	772,0	11,0%	776,0	23,0	23,4	80,88
66	12_Z03	24,06	19,32	19,55	6,14	6,84	66,9	64,2	798,7	10,6%	804,1	36,9	37,0	127,99
67	12_Z04	24,14	16,52	20,30	14,18	15,55	57,0	54,8	721,7	10,7%	726,4	44,6	45,6	157,40
68	12_Z05	24,13	18,54	18,54	4,10	4,29	64,0	61,8	772,5	10,8%	776,9	49,8	54,2	187,17
69	12_Z06	24,19	17,44	17,44	2,69	2,75	60,1	57,7	720,5	10,7%	725,4	45,8	51,0	175,55
70	12_Z07	24,01	19,60	22,14	10,79	10,81	68,0	66,4	840,4	11,2%	843,8	54,2	57,4	199,21
71	12_Z08	24,18	13,60	13,60	3,20	3,60	46,9	45,5	677,7	11,0%	681,0	27,6	28,3	97,48
72	12_Z09	24,22	17,13	17,13	4,31	4,76	58,9	57,4	734,1	11,1%	737,3	28,2	27,6	95,09
73	12_Z10	24,06	16,57	16,57	3,66	4,12	57,4	55,4	709,5	10,8%	713,7	48,2	48,8	169,13
74	12_Z11	24,14	14,54	15,26	9,07	10,93	50,2	48,3	707,4	10,7%	711,9	28,4	28,5	98,42
75	12_Z12	24,19	21,52	21,52	4,46	6,87	74,1	70,4	830,4	10,3%	837,3	53,3	64,7	222,84
76	12_Z13	24,17	19,33	19,45	5,29	7,13	66,6	64,3	837,1	10,8%	842,1	46,4	47,6	164,17
Mittelwert		24,13	17,41	18,05			60,14	57,96	754,94	10,8%	759,49	39,09	41,18	142,22
min Wert		24,01	13,60	13,60	2,69	2,75	46,86	45,48	677,66	10,3%	680,98	21,78	21,29	73,50
max Wert		24,22	21,52	22,14	> 10	> 10	74,13	70,42	840,38	11,2%	843,76	54,25	64,68	222,84
Standardabw.		0,06	2,34	2,56			8,11	7,77	57,16	0,0025	57,48	11,86	14,26	49,28
COV		0,3%	13,4%	14,2%			13,5%	13,4%	7,6%	2,3%	7,6%	30,3%	34,6%	34,7%

Fichte unter Zug- und Druckbelastung

Mittelwert	24,20	7,46	7,47			25,71	25,47	440,24	11,7%	440,93	14,03	14,26	49,10
min Wert	24,13	6,06	6,06	0,96	2,38	20,91	20,45	373,78	11,0%	374,59	8,09	7,99	27,45
max Wert	24,29	9,43	9,43	8,36	11,67	32,54	31,89	519,34	12,6%	521,30	27,00	29,39	101,34
Standardabw.	0,04	0,95	0,95			3,27	3,32	40,97	0,0036	40,96	5,12	5,56	19,17
COV	0,2%	12,7%	12,7%			12,7%	13,0%	9,3%	3,1%	9,3%	36,5%	39,0%	39,0%

Fichte unter Druckbelastung

LfNr.	Probe	Dicke [mm]	$F_{max,5}$ [kN]	F_{max} [kN]	v_{app} [mm]	v_u [mm]	$f_{h,0}$ [N/mm ²]	$f_{h,0,12}$ [N/mm ²]	ρ_u [kg/m ³]	u [%]	ρ_{12} [kg/m ³]	$K_{ser,Fest}$ [kN/mm]	$K_{ser,Fmax}$ [kN/mm]	$K_{s,Fmax}$ [N/mm ²]
77	12_D01	24,22	6,70	6,70	1,70	2,38	23,1	22,9	407,3	11,8%	407,6	11,2	10,5	35,97
78	12_D02	24,23	6,80	6,80	1,69	3,44	23,4	23,0	394,8	11,5%	395,8	11,5	11,6	39,99
79	12_D03	24,13	6,21	6,21	1,64	4,02	21,4	21,2	373,8	11,6%	374,6	10,4	10,6	36,62
80	12_D04	24,18	7,84	7,84	3,77	4,55	27,0	27,4	425,4	12,4%	424,4	8,1	8,3	28,61
81	12_D05	24,22	9,07	9,07	1,61	3,58	31,2	31,0	503,9	11,8%	504,3	11,3	12,5	42,95
82	12_D06	24,29	7,69	7,69	1,75	3,44	26,4	26,2	454,8	11,8%	455,2	16,4	16,3	56,01
83	12_D07	24,17	8,81	8,81	1,45	2,42	30,4	30,4	491,2	12,0%	491,2	27,0	29,4	101,34
84	12_D08	24,16	7,73	7,73	1,36	2,44	26,7	26,6	437,4	12,0%	437,5	16,4	16,6	57,11
85	12_D09	24,13	7,34	7,34	2,03	2,62	25,3	25,2	419,4	11,8%	419,9	12,7	12,1	41,79
86	12_D10	24,21	8,14	8,14	2,16	3,46	28,0	28,5	487,2	12,6%	485,7	8,8	9,8	33,70
87	12_D11	24,14	7,11	7,11	1,22	4,76	24,5	24,3	440,8	11,7%	441,4	15,5	14,6	50,23
88	12_D12	24,20	6,96	6,96	1,37	2,55	24,0	23,8	437,2	11,7%	437,8	14,6	14,6	50,40
89	12_D13	24,15	6,06	6,06	1,34	5,00	20,9	20,5	429,3	11,3%	430,8	9,6	8,6	29,73
Mittelwert		24,19	7,42	7,42			25,56	25,46	438,64	11,8%	438,95	13,35	13,50	46,50
min Wert		24,13	6,06	6,06	1,22	2,38	20,91	20,45	373,78	11,3%	374,59	8,09	8,30	28,61
max Wert		24,29	9,07	9,07	3,77	5,00	31,21	31,05	503,89	12,6%	504,31	27,00	29,39	101,34
Standardabw.		0,05	0,92	0,92			3,14	3,30	38,07	0,0036	37,73	4,96	5,49	18,91
COV		0,2%	12,3%	12,3%			12,3%	12,9%	8,7%	3,0%	8,6%	37,1%	40,6%	40,7%

Fichte unter Zugbelastung

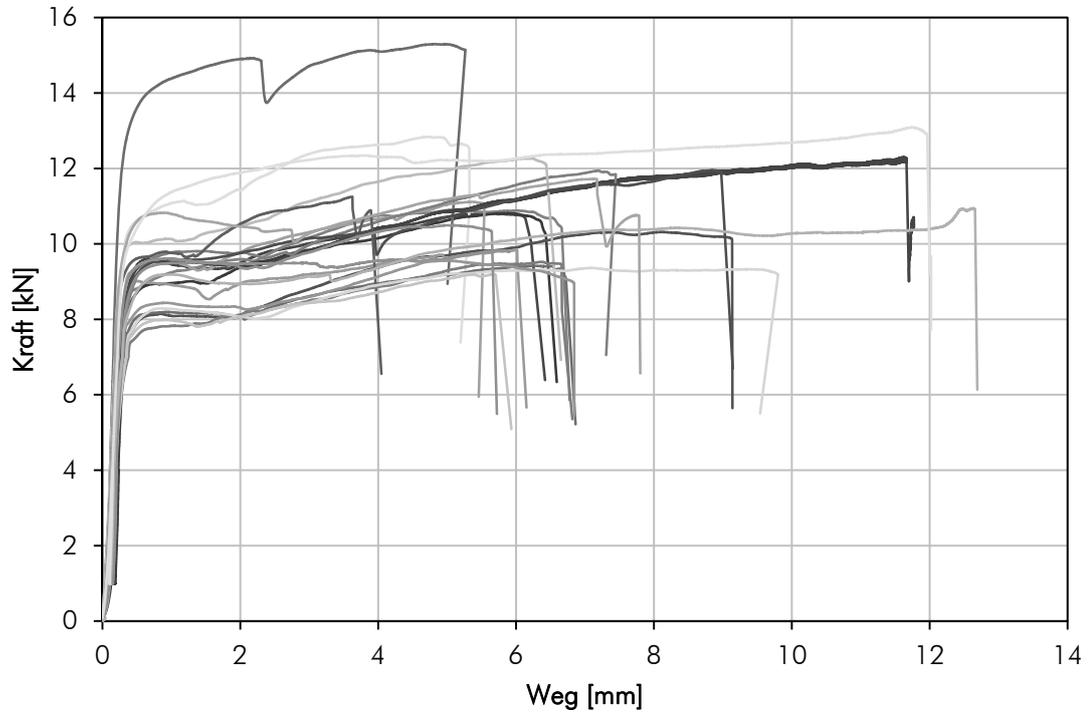
LfNr.	Probe	Dicke [mm]	$F_{max,5}$ [kN]	F_{max} [kN]	v_{app} [mm]	v_u [mm]	$f_{h,0}$ [N/mm ²]	$f_{h,0,12}$ [N/mm ²]	ρ_u [kg/m ³]	u [%]	ρ_{12} [kg/m ³]	$K_{ser,Fest}$ [kN/mm]	$K_{ser,Fmax}$ [kN/mm]	$K_{s,Fmax}$ [N/mm ²]
90	12_Z01	24,19	6,98	6,98	1,03	3,21	24,0	23,9	393,2	11,8%	393,7	19,7	19,8	68,17
91	12_Z02	24,24	6,13	6,13	3,39	5,03	21,1	20,8	392,6	11,6%	393,3	8,1	8,0	27,45
92	12_Z03	24,24	6,14	6,14	1,15	5,88	21,1	20,6	381,9	11,2%	383,3	9,9	9,5	32,52
93	12_Z04	24,19	6,93	7,04	8,36	8,51	23,9	23,6	416,8	11,7%	417,5	9,1	8,4	28,81
94	12_Z05	24,15	9,43	9,43	2,23	3,73	32,5	31,9	517,4	11,3%	519,2	22,0	23,2	79,98
95	12_Z06	24,25	7,62	7,62	2,31	4,73	26,2	26,0	459,7	11,8%	460,3	24,8	24,7	84,96
96	12_Z07	24,13	9,00	9,00	1,65	3,02	31,1	30,4	519,3	11,2%	521,3	16,6	20,0	69,00
97	12_Z08	24,16	7,89	7,89	2,07	2,86	27,2	27,0	452,2	11,7%	453,0	15,7	15,9	54,88
98	12_Z09	24,25	7,59	7,59	2,53	2,96	26,1	25,8	458,0	11,7%	458,8	15,5	14,7	50,65
99	12_Z10	24,19	7,91	7,91	0,96	3,60	27,2	27,2	429,6	11,9%	429,8	17,8	17,6	60,77
100	12_Z11	24,20	6,89	6,89	1,57	11,67	23,7	23,0	453,2	11,0%	455,5	9,1	8,9	30,78
101	12_Z12	24,20	8,35	8,35	1,50	3,74	28,8	28,5	471,8	11,7%	472,5	12,1	13,7	47,06
102	12_Z13	24,25	6,72	6,72	1,76	6,07	23,1	22,6	398,2	11,2%	399,8	10,7	10,8	37,18
Mittelwert		24,20	7,51	7,51			25,85	25,48	441,84	11,5%	442,91	14,71	15,01	51,71
min Wert		24,13	6,13	6,13	0,96	2,86	21,07	20,63	381,87	11,0%	383,33	8,15	7,99	27,45
max Wert		24,25	9,43	9,43	8,36	> 10	32,54	31,89	519,34	11,9%	521,30	24,84	24,72	84,96
Standardabw.		0,04	1,01	1,01			3,53	3,48	45,18	0,0028	45,42	5,39	5,75	19,83
COV		0,2%	13,5%	13,4%			13,6%	13,6%	10,2%	2,5%	10,3%	36,6%	38,3%	38,4%

Esche mit verringertem Randabstand unter Druckbelastung

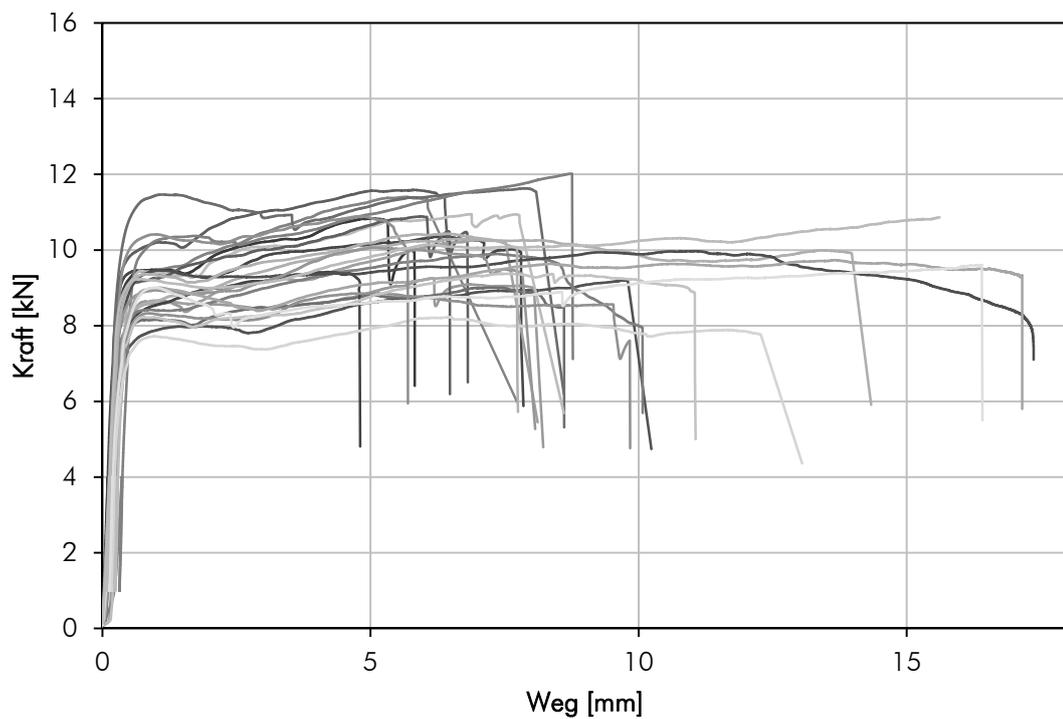
LfNr.	Probe	Dicke [mm]	$F_{max,5}$ [kN]	F_{max} [kN]	v_{app} [mm]	v_u [mm]	$f_{h,0}$ [N/mm ²]	$f_{h,0,12}$ [N/mm ²]	ρ_u [kg/m ³]	u [%]	ρ_{12} [kg/m ³]	$K_{ser,Fest}$ [kN/mm]	$K_{ser,Fmax}$ [kN/mm]	$K_{s,Fmax}$ [N/mm ²]
01	12_D01	24,20	15,22	15,45	7,66	7,99	52,4	50,6	705,5	10,9%	709,5	18,1	17,6	60,45
02	12_D02	24,17	16,76	16,76	2,77	2,86	57,8	55,9	755,2	10,9%	759,2	26,2	25,2	87,03
03	12_D03	24,17	20,23	20,23	5,78	6,40	69,8	67,2	781,0	10,8%	785,8	22,7	26,4	91,15
04	12_D04	24,23	19,57	19,57	1,75	4,62	67,3	65,4	776,0	11,1%	779,7	29,9	32,5	111,74
05	12_D05	24,10	19,17	19,17	5,56	5,61	66,3	64,4	756,2	11,0%	759,8	27,1	28,8	99,46
06	12_D06	24,16	14,81	14,81	1,11	1,53	51,1	49,3	719,8	10,8%	724,1	23,5	22,2	76,58
07	12_D07	24,14	19,25	19,25	2,80	4,35	66,5	65,3	823,9	11,4%	826,3	26,0	27,6	95,31
08	12_D08	24,23	15,19	15,19	3,85	4,66	52,2	51,2	655,3	11,3%	657,6	22,4	22,3	76,59
09	12_D09	24,20	17,33	17,33	2,75	2,87	59,7	58,3	745,1	11,2%	748,0	23,7	23,2	79,91
10	12_D10	24,20	18,53	18,53	2,93	3,07	63,8	61,8	708,4	11,0%	712,0	26,3	28,1	96,68
11	12_D11	24,17	14,71	14,90	7,56	7,58	50,7	49,1	693,5	10,9%	697,2	21,5	20,9	71,91
12	12_D12	24,20	20,32	20,32	4,62	4,73	70,0	67,5	805,5	10,8%	810,2	24,8	28,3	97,37
13	12_D13	24,18	18,56	18,56	4,35	4,53	64,0	62,4	815,2	11,2%	818,4	22,8	23,2	80,07
Mittelwert		24,18	17,66	17,70	4,11	4,68	60,88	59,10	749,27	11,0%	752,91	24,24	25,09	86,48
min Wert		24,10	14,71	14,81	1,11	1,53	50,73	49,10	655,30	10,8%	657,57	18,10	17,55	60,45
max Wert		24,23	20,32	20,32	7,66	7,99	69,96	67,51	823,93	11,4%	826,35	29,90	32,49	111,74
Standardabw.		0,04	2,11	2,07			7,29	7,09	51,07	0,0020	51,20	2,97	4,02	13,84
COV		0,1%	12,0%	11,7%			12,0%	12,0%	6,8%	1,8%	6,8%	12,2%	16,0%	16,0%

Anhang B: Kraft-Weg-Diagramme

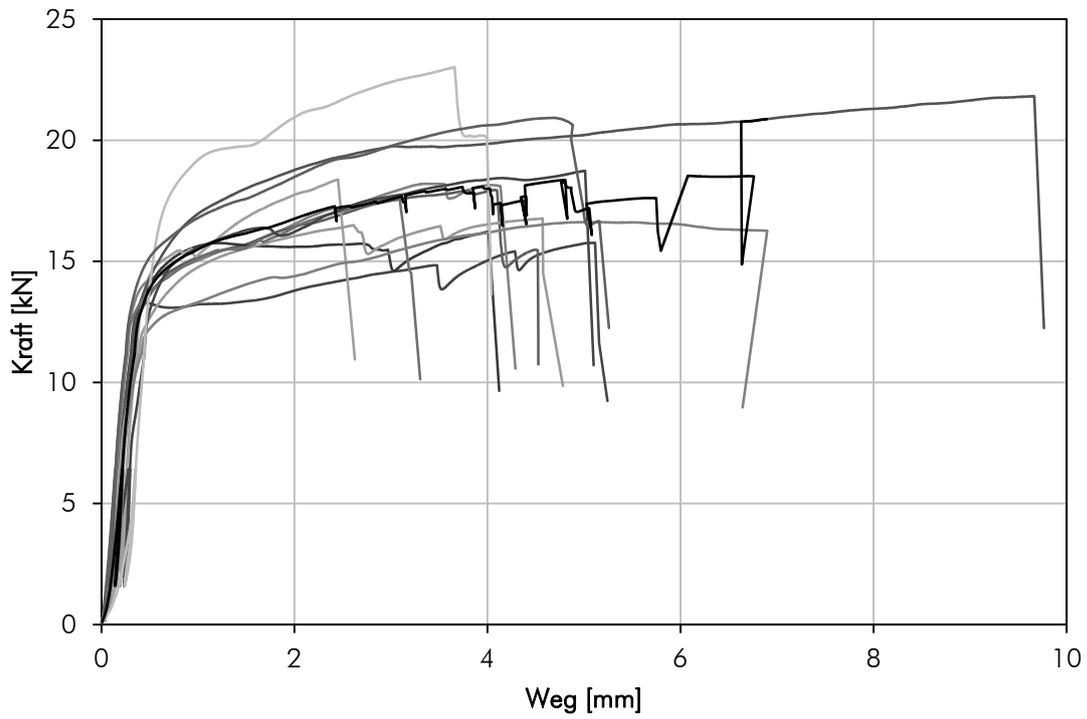
Birke unter Druckbelastung



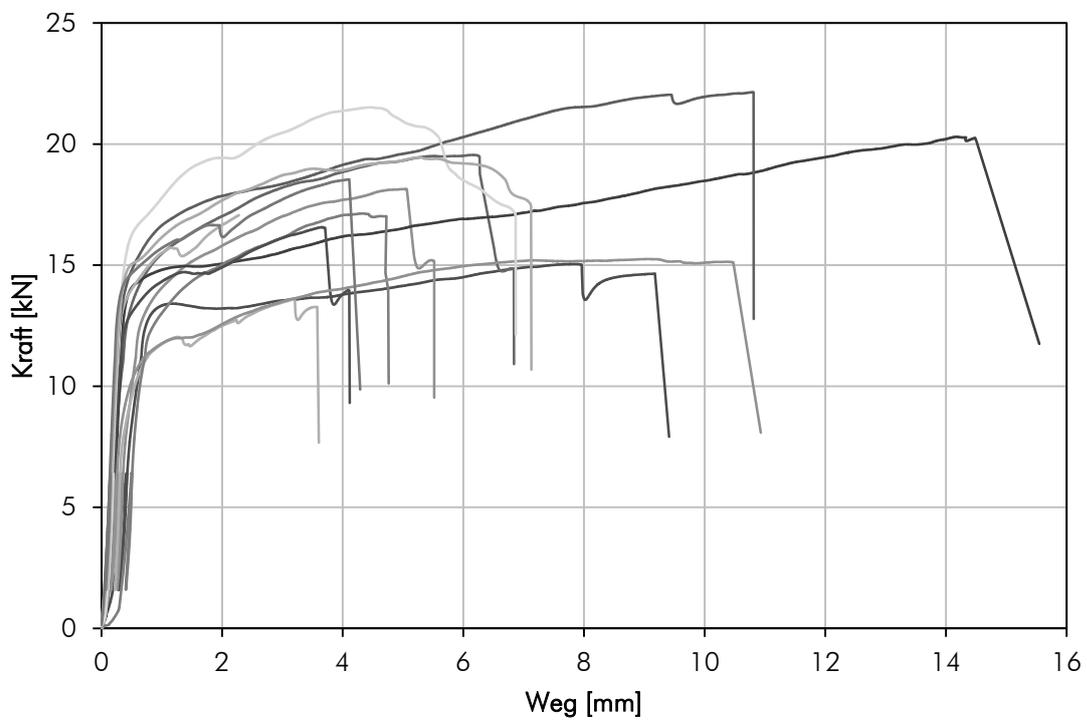
Birke unter Zugbelastung



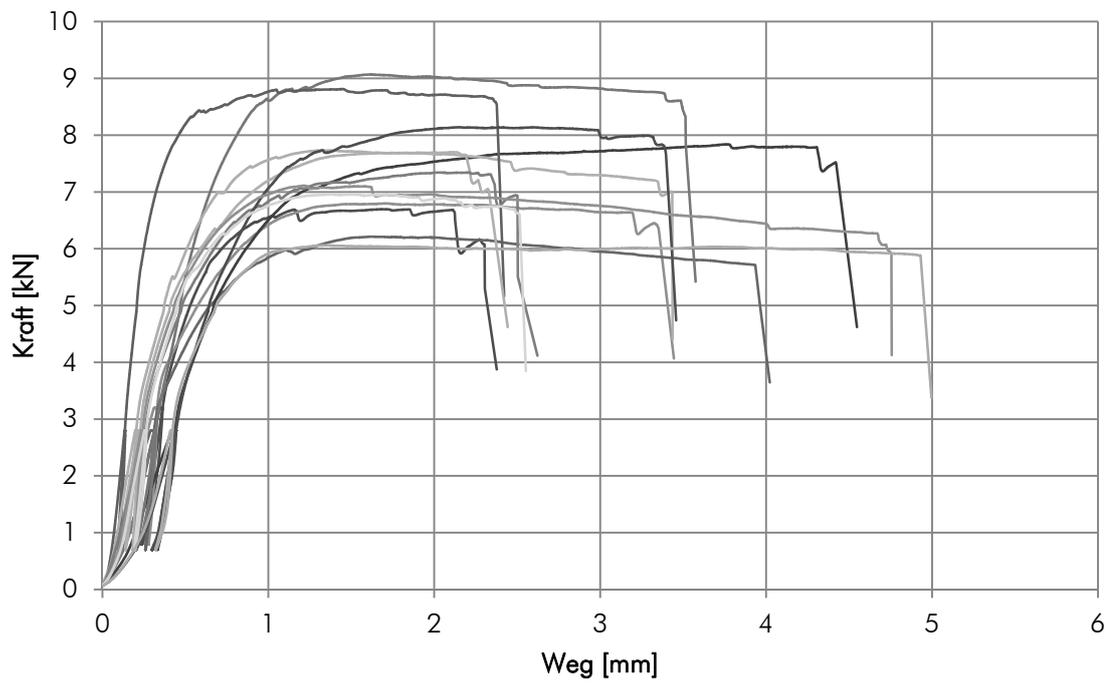
Esche unter Druckbelastung



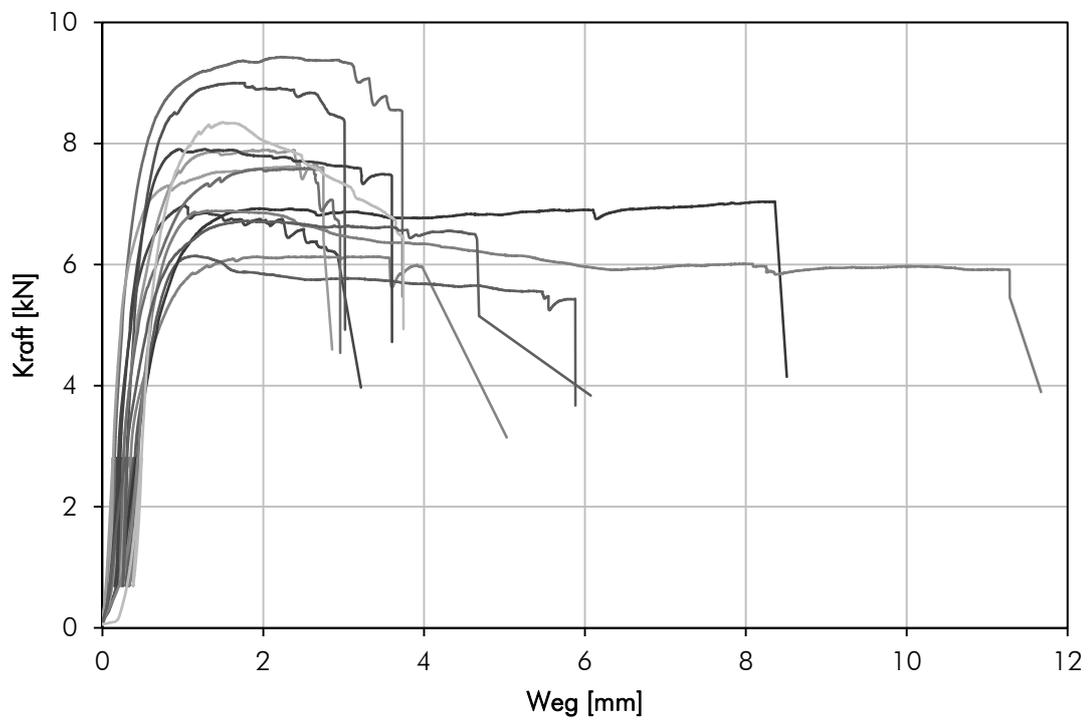
Esche unter Zugbelastung



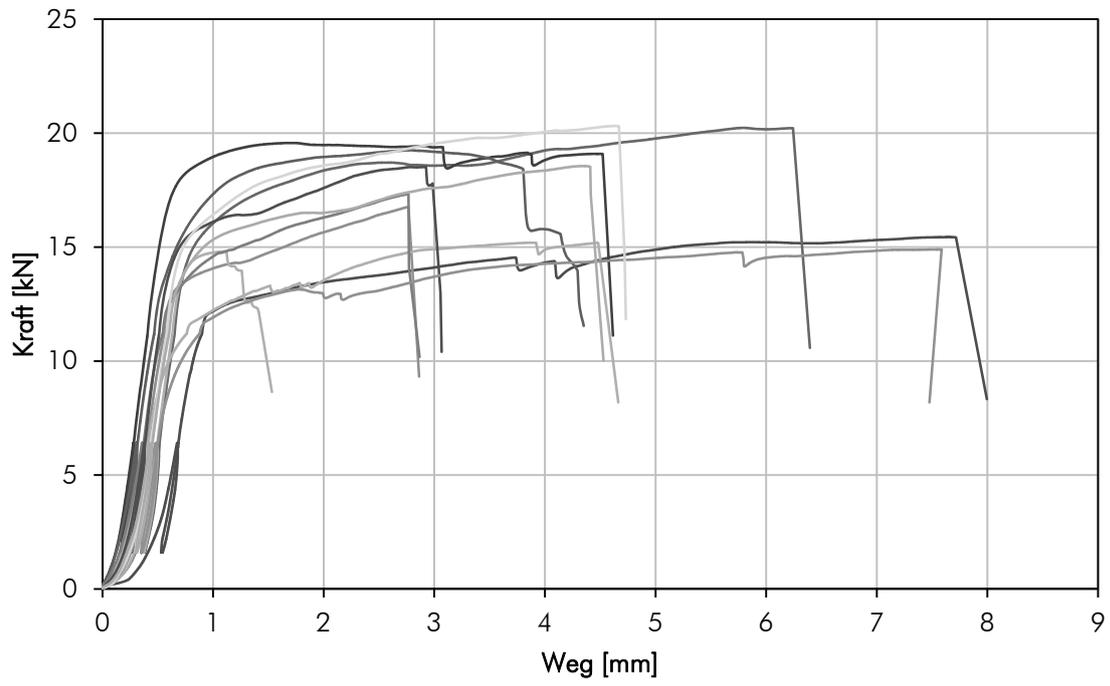
Fichte unter Druckbelastung



Fichte unter Zugbelastung



Esche mit verringertem Randabstand unter Druckbelastung



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

Institutskenzahl:

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