



Ing. Michael Gstettner, BSc, BSc

Experimentelle Untersuchung des Tragverhaltens lateral
beanspruchter, selbstbohrender Holzbauschrauben

MASTERARBEIT

Zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften – konstruktiver Ingenieurbau

Eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Dipl.-Ing. Dr.techn. Andreas Ringhofer, BSc

Dipl.-Ing. Raimund Sieder, BSc

Institut für Holzbau und Holztechnologie

Graz, März 19

EIDESSTÄTTLICHE 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

Standard Text
Standard Text Standard Text Standard Text Standard Text Standard Text Standard Text Standard Text
Standard Text Standard Text Standard

Kurzfassung

Standard Text
Standard Text Standard Text Standard Text Standard Text Standard Text Standard Text Standard Text
Standard Text Standard Text Standard

Soll der vermutete Forschungsbedarf bestätigt werden

Abstract

Standard Text
Standard Text Standard Text Standard Text Standard Text Standard Text Standard Text Standard Text
Standard Text Standard Text Standard

Inhaltsverzeichnis

Kapitel 1: Einleitung	1
1-1 Motivation und Ziel dieser Arbeit	1
1-2 Aufbau der Arbeit	2
Kapitel 2: Stand des Wissens	3
2-1 Einführung in die Verbindungstechnik	3
2-1.1 Grundsätze der Verbindungstechnik	4
2-1.2 Einsatzmöglichkeiten von Holzbauschrauben	5
2-2 Grundlagen der lateralen Tragfähigkeit	6
2-2.1 Einschnittige Holz-Holz Verbindungen	7
2-2.2 Einschnittige Stahlblech-Holz Verbindungen	8
2-2.3 Eingangparameter des Bemessungsmodells	9
2-2.4 Grundsätze des Lochleibungsversagens	10
2-2.5 Exkurs Aufbau von Nadelholz	12
2-3 Berechnungsmodelle	13
2-3.1 Modelle zur Beschreibung der Lochleibungsfestigkeit	13
2-3.2 Modelle zur Bestimmung der Steifigkeit	18
2-4 Modellvergleich	21
2-5 Formulierung des Forschungsbedarfs	24
Kapitel 3: Material und Methoden	25
3-1 Prüfserien und Ziele	25
3-1.1 Prüfkörperbeschriftung	27
3-1.2 Ermittlung des Rotationswinkels ($\varphi_{req,i}$)	27
3-1.3 Festlegung der Prüfkörperdimensionen	31
3-2 Material	34
3-2.1 Holz	34
3-2.2 Schraube	49
3-3 Methoden	52
3-3.1 Prüfkonfiguration (Pre- processing)	52
3-3.2 Prüfdurchführung (Data- Collection)	60
3-3.3 Physikalische Kenngrößen (Data post- processing)	69
3-3.4 Mechanische Kenngrößen (Data post- processing)	71
Kapitel 4: Ergebnisse und Diskussion	74
Kapitel 5: Modellbildung und Verifikation	75
Kapitel 6: Zusammenfassung und Ausblick	76
Kapitel 7: Anhang	77

KAPITEL 1: EINLEITUNG

1-1 MOTIVATION UND ZIEL DIESER ARBEIT

Standard Text
Standard Text Standard Text Standard Text Standard Text Standard Text Standard Text Standard Text
Standard Text Standard Text Standard

1-2 AUFBAU DER ARBEIT

Hier die einzelnen Kapitel beschreiben = Aufbau der Arbeit

Zentrale Frage: um was geht's in jedem Kapitel ?

KAPITEL 2: STAND DES WISSENS

In diesem Kapitel wird der Stand des Wissens bezüglich lateral beanspruchter, selbstbohrender Holzbauschrauben kurz dargestellt. Neben einer Einführung in die Thematik der Verbindungstechnik gliedert sich der weitere Aufbau wie folgt:

- Darstellung und Diskussion des gegenwärtig angewandten Modells zur Bestimmung der lateralen Tragfähigkeit
- Berechnungsmodelle zur Bestimmung maßgebender, lateraler Kenngrößen
- Modellvergleich und Formulierung des Forschungsbedarfs

Auf Basis des im aktuellen Normenregelwerk verankerten Bemessungsansatzes zur Bestimmung der lateralen Tragfähigkeit sollen in weiterer Folge für ausgewählte, mechanische Kenngrößen (Lochleibungsfestigkeit, Steifigkeit) die aktuellen, unterschiedlichen Ansätze zu deren Ermittlung gegenübergestellt werden. Auf Basis dieses Modellvergleichs soll schlussendlich der Forschungsbedarf formuliert werden, welcher in weiterer Folge eine wesentliche Rolle für die weitere Entwicklung dieser Arbeit einnimmt.

2-1 EINFÜHRUNG IN DIE VERBINDUNGSTECHNIK

Zu den zahlreichen Möglichkeiten der modernen, ingenieurmäßigen Verbindungstechnik zur Herstellung eines Verbunds zwischen statisch wirksamen Bauteilen, stellen vor allem die Gruppe der stiftförmigen Verbindungsmittel eine wirtschaftliche Methode um eine Interaktion zwischen diesen herzustellen dar. In weiterer Folge soll eine weitere Eingrenzung der stiftförmigen Verbindungsmittel auf die Gruppe der selbstbohrenden Holzbauschrauben vorgenommen werden, da diese einen wesentlichen Teil dieser Forschungsarbeit einnehmen. Auf Grund der unzähligen Ausführungsvarianten von Schrauben sollen diese nachfolgend am Beispiel einer Vollgewindeschraube (vgl. Abbildung 2-1) grundsätzlich beschrieben werden:

Unter einer selbstbohrenden Holzbauschraube versteht man einen Stift aus beschichtetem Kohlenstoffstahl oder Edelstahl, welcher mit einem speziellen Gewinde, als auch mit einer Spitze zur Applikation und einem Kopf der den Antrieb beinhaltet, versehen ist.

Auf Basis der Einleitung und der zuvor getroffenen Definition von Holzbauschrauben, sollen deren Einsatzmöglichkeiten und Wirkungsweise nach den folgenden Punkten weiterführend beschrieben werden:

- Grundsätze der Verbindungstechnik
- Einsatzmöglichkeiten von selbstbohrenden Holzbauschrauben
- Beanspruchung stiftförmiger Verbindungsmittel



Abbildung 2-1 Aus Kohlenstoffstahl hergestellte Vollgewindeschraube mit Halbspitze RAPID® 12,0 x 220

2-1.1 Grundsätze der Verbindungstechnik

Um ein statisch wirksames Tragwerk herzustellen, bedarf es einer Interaktion aller einzelnen Bauteile. Dies wird über einen notwendigen Verbund, welcher durch zusätzliche Elemente (Verbindungstechnik) gewährleistet wird, bewerkstelligt. Dabei sind ausgewählte, grundsätzliche Anforderungen (vgl. Schickhofer et al. [1]) an die Verbindungstechnik zu stellen:

- Hohe Duktilität,
- hohe Tragfähigkeit, und
- hohe Steifigkeit

Auf diese Anforderungen (vgl. Abbildung 2-2) und deren Zusammenspiel im Tragwerk wird nachfolgend eingegangen:

Zur Duktilität: Die Grundlage bei der Planung und Errichtung konstruktiver Ingenieurbauten bildet das Bestreben, ein duktileres Verhalten im Versagensfall zu gewährleisten. Ein duktileres Verhalten ermöglicht nicht nur eine Umlagerung der Beanspruchungen bei statisch unbestimmten Tragwerken zufolge Fließgelenkbildung, sondern auch eine Vorankündigung des Versagens einzelner Bauteile. Da das Versagensverhalten von Holz als weitestgehend spröde anzusehen ist, muss das duktile Verhalten durch die Verbindungstechnik erreicht werden.

Zur Tragfähigkeit: Die Beanspruchbarkeit eines Knotens wird nicht nur durch die Eigenschaften der zu verbindenden Holzbauteile, sondern vielmehr durch die Leistungsfähigkeit der Verbindung und deren einzelnen Bestandteile bestimmt. Dabei bewirkt ein Fügen der einzelnen Bauteile durch die dafür vorgesehene Verbindungstechnik eine Störung und Umlenkung des Kraftflusses, unter welcher die zuvor beschriebene Beanspruchbarkeit eines Knotens leidet und diese daher in der Regel durch eine Zugabe in den Dimensionen der Fügeteile kompensiert werden muss. Die Leistungsfähigkeit eines Knotens, beschrieben durch den Wirkungsgrad η , welcher durch das Verhältnis der Beanspruchbarkeit des Bauteils mit Verbindung zu jener ohne Verbindung definiert ist, leidet besonders unter großen Störstellen, welche unter anderem durch Schlitzungen oder Bohrungen bei Stabdübelanschlüssen verursacht werden.

Zur Steifigkeit: Die Steifigkeiten der Verbindungsmittel innerhalb des Knotens und in weiterer Folge die daraus resultierenden Knotensteifigkeiten beeinflussen nicht nur die Verformung einer Tragstruktur, sondern können auch Änderungen der Schnittkräfte, vor allem bei statisch unbestimmten Tragwerken hervorrufen. Somit kann der Verlauf von Schnittgrößen je nach gewählter Knotensteifigkeit entsprechend beeinflusst werden.

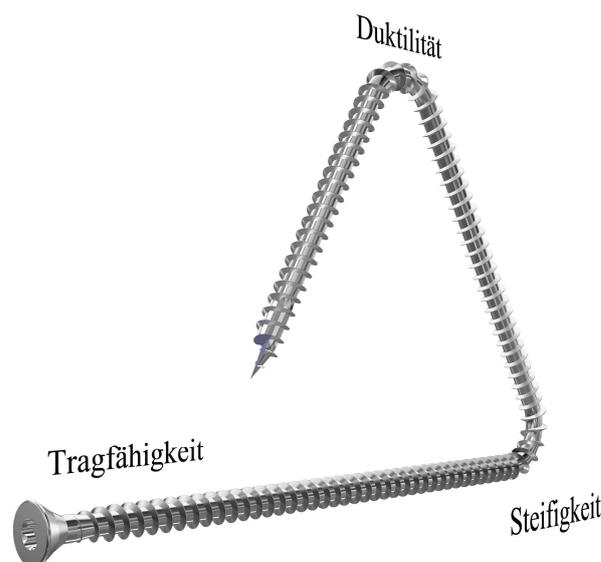


Abbildung 2-2 Tragfähigkeit, Steifigkeit und Duktilität als Grundsätze der Verbindungstechnik

2-1.2 Einsatzmöglichkeiten von Holzbauschrauben

Auf Grundlage der industriellen Weiterentwicklung der Sechskantschraube gemäß DIN 571 wurde sowohl die Anwendung, als auch die Applikation von modernen Holzbauschrauben wesentlich vereinfacht und ein umfassender Anwendungsbereich durch die Entwicklung von Teil- und Vollgewindeschrauben geschaffen. Dabei können selbstbohrende Holzbauschrauben grundsätzlich aktiv oder passiv, wie folgt eingesetzt (vgl. Ringhofer [2]) werden:

- Aktiv, zur Verbindung von Bauteilen einer Tragstruktur
- Passive zur Verstärkung und Erhöhung der Beanspruchbarkeit von Bauteilen

Im Nachfolgendem sollen die Vorzüge, wie der hohe wirtschaftliche Nutzen und eine rasche, unkomplizierte Applikation, als auch die etwaigen Schwachpunkte von Holzbauschrauben genannt werden:

Besonders bei sehr schlanken Schraubenquerschnitten und die daraus abgeleitete, geringe Biegesteifigkeit kann vor allem bei langen Stiften eine Abweichung auf Grund von lokalen Rohdichteunterschieden (Holzanomalien) aus der gewünschten Einschraubachse (vgl. Krenn [3]) während der Applikation eintreten. Kommt es dabei bei einem gekreuzt- angeordneten Vollgewindeschraubenpaar zu einer Kollision beider Verbindungsmittel, so kann auf Grund des geschädigten Gewindes nicht mehr die gewünschte Tragfähigkeit erreicht werden.

Auf Grundlage der beschriebenen, generellen Systematik und Wirkungsweise von Verbindungen innerhalb einer Tragstruktur (vgl. nachfolgender Abschnitt 2-1.1), soll in den nachfolgenden Zeilen die Beanspruchbarkeit von Holzbauschrauben in folgende Anteile mit den jeweiligen, enthaltenen Versagensmechanismen separiert werden:

- Axiale Beanspruchbarkeit
- Laterale Beanspruchbarkeit
- Kombination der axialen und lateralen Tragfähigkeit

Es kann bei der axialen Beanspruchbarkeit sowohl eine größere Leistungsfähigkeit in Hinblick auf Tragfähigkeit (R) und Steifigkeit (K_{ser}), doch eine geringere Duktilität (D) wie bei der lateralen Beanspruchbarkeit festgestellt werden (vgl. Bratulic [4]):

$$\text{Tragfähigkeit } \frac{R_{ax}}{R_{lat}} \approx \frac{2}{1}, \quad \text{Steifigkeit } \frac{K_{ser,ax}}{K_{ser,lat}} \approx \frac{35}{1}; \quad \text{Duktilität } \frac{D_{ax}}{D_{lat}} \approx \frac{3}{4}$$

In den weiterführenden Betrachtungen sollen der Fokus auf die Beschreibung und experimentelle Ermittlung lateraler Kenngrößen gelegt werden.

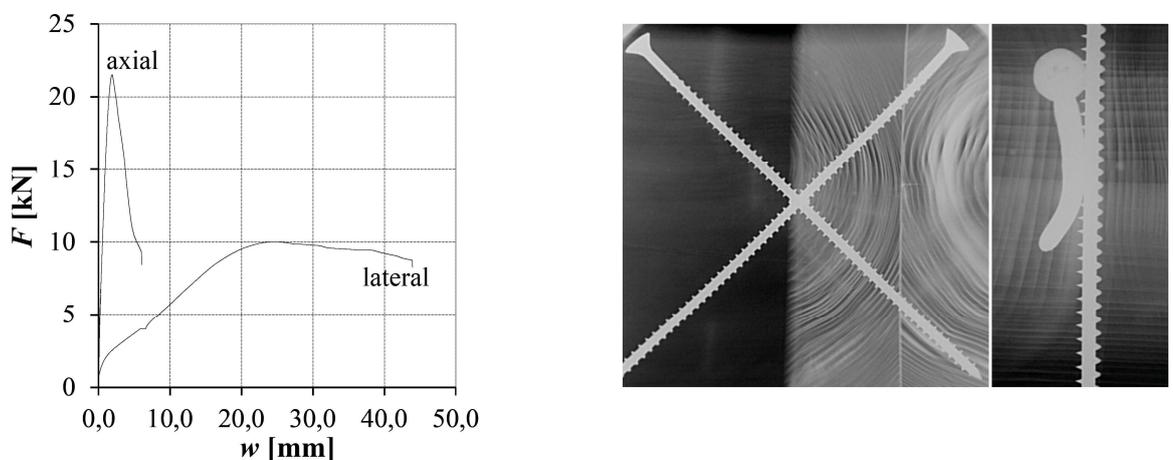


Abbildung 2-3 Einsatzmöglichkeiten von selbstbohrenden Holzbauschrauben
(links: Gegenüberstellung von axial und lateraler Beanspruchung;
rechts: Gekreuzt- angeordnete, kollidierte Vollgewindeschrauben (vgl. Pock [5])

2-2 GRUNDLAGEN DER LATERALEN TRAGFÄHIGKEIT

Die Beanspruchung von Holzbauschrauben kann somit einerseits axial auf Zug oder Druck, als auch lateral auf Abscheren erfolgen. Das gegenwärtige Modell zur Bestimmung der lateralen Tragfähigkeit beruht auf der Fließgelenktheorie von Johansen (vgl. Schickhofer et al. [1]) und ist gegenwärtig im aktuellen Normenregelwerk zur Bemessung von Holzbauten (vgl. ÖNORM B 1995-1-1 [6]) verankert. Die Bestimmung der Tragfähigkeit je Verbindungsmittel und Scherfuge erfolgt unter Berücksichtigung der Unterteilung in ein- und zweischnittige Verbindungen, sowie in:

- Holz- Holz oder Holzwerkstoff- Holz Verbindungen
- Stahl- Holz Verbindungen

Unabhängig von der Art der Verbindung (ein- oder zweischnittig) und vom jeweiligen Versagensmodus nach Johansen ist der Bemessungswert der lateralen Tragfähigkeit grundsätzlich wie folgt zu ermitteln:

$$F_{v,Rd} = F_{v,Rk} \frac{k_{mod}}{\gamma_m} \quad (2.1)$$

Dabei sind:

- $F_{v,Rd}$Bemessungswert der Tragfähigkeit einer Verbindung mit metallischen, stiftförmigen Verbindungsmitteln [N]
- $F_{v,Rk}$Charakteristischer Wert der Tragfähigkeit einer Verbindung [N]
- k_{mod}Modifikationsbeiwert für Lasteinwirkungsdauer und Feuchtegehalt [-]
- γ_mTeilsicherheitsbeiwert für Verbindungen [-]

Die Tragfähigkeit $F_{v,Rk}$ setzt sich einerseits aus der Abscherkomponente nach Johansen und andererseits aus der Tragfähigkeit des Verbindungsmittels zufolge Seilwirkung (Anteil der axialen Tragfähigkeit $F_{ax,Rk}$) zusammen. Die Seilwirkung berücksichtigt eine Erhöhung der Tragfähigkeit der Verbindung zufolge einer Einleitung von Zugkräften bei einer Zunahme des Biegewinkels des Stiftes und ist je nach Verbindungsmitteltyp ein gewisser, maximaler Prozentsatz der Abscherkomponente (vgl. ÖNORM B 1995-1-1 [6]). Bei der Bestimmung der lateralen Tragfähigkeit von Holzbauschrauben kommt es somit zu einer Steigerung durch die Mitwirkung der axialen Tragfähigkeit des Gewindes. Ist der Anteil des Seileffekts und somit die beschriebene, axiale Tragfähigkeit des jeweilig eingesetzten, stiftförmigen Verbindungsmittels nicht explizit bestimmbar, so soll dieser in einer konservativen Betrachtungsweise vernachlässigt werden.

Die Theorie nach Johansen zur Bestimmung der Abscherkomponente basiert auf unterschiedlichen Versagensmodi, deren Auftretenswahrscheinlichkeit von den nachfolgenden Einflussgrößen abhängt:

- Schnittigkeit der Verbindung
- Holz-/ Holzwerkstoff-/ Stahlblechdicke bzw. Einbindetiefe t_i des stiftförmigen Verbindungsmittels
- Fließmoment $M_{y,Rk}$ des eingesetzten Verbindungsmittels
- Lochleibungsfestigkeit $f_{h,i,k}$ des jeweiligen Holzbauteils

Zur Vereinfachung wird im Zuge der Bestimmung der Tragfähigkeit der einzelnen Versagensmodi ein ideal- plastisches Materialverhalten (konstanter Verlauf der Spannungen) für die Lochleibungsfestigkeit der zu fügenden Hölzer vorausgesetzt. In der vorliegenden Arbeit werden die Modelle zur Bestimmung der lateralen Tragfähigkeit gemäß dem vorliegenden Normenregelwerk nach deren Relevanz für Holzbauschrauben, wie folgt eingegrenzt:

- Einschnittige Holz-Holz Verbindungen
- Einschnittige, mit dünnem oder dickem außenliegenden Stahlblech-Holz Verbindungen

2-2.1 Einschnittige Holz-Holz Verbindungen

Wie zuvor beschrieben bildet neben der Seilwirkung, die Fließtheorie nach Johansen die Grundlage des Bemessungskonzept bei lateraler Beanspruchung. Die Theorie nach Johansen basiert auf unterschiedlichen Versagensmodi, deren Auftretenswahrscheinlichkeit von den nachfolgenden Einflussgrößen abhängt:

- Schnittigkeit der Verbindung
- Holz- Holzwerkstoffdicke oder Einbindetiefe t_i des stiftförmigen Verbindungsmittels
- Fließmoment $M_{y,Rk}$ des eingesetzten Verbindungsmittels
- Lochleibungsfestigkeit $f_{h,i,k}$ im jeweiligen Holzbauteil

Zur Vereinfachung wird im Zuge der Herleitung der Tragfähigkeit der einzelnen Versagensmodi ein ideal- plastisches Materialverhalten (linearer Verlauf der Spannungen) für die Lochleibungsfestigkeit der zu fügenden Hölzer vorausgesetzt. Das Prinzip der nachfolgenden Bestimmungsgleichung basiert auf der Ermittlung des maßgebenden Versagensmodus (vgl. Abbildung 2-4) der in Abhängigkeit der oben angeführten Einflussgrößen eintritt. Daher wird schlussendlich die Tragfähigkeit als Kleinstwert der nachfolgenden Gleichungen (vgl. ÖNORM B 1995-1-1 [6]) angenommen:

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{ll} f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d & (a) \\ f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d & (b) \\ \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{1 + \beta} \cdot \left[\sqrt{\beta + 2\beta^2 \cdot \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_1}{t_2} \right)^2 \right] + \beta^3 \left(\frac{t_1}{t_2} \right)^2} - \beta \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (c) \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \cdot \left[\sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot t_1^2 \cdot d}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (d) \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} \cdot t_2 \cdot d}{1 + 2\beta} \cdot \left[\sqrt{2\beta^2(1 + \beta) + \frac{4\beta(1 + 2\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot t_2^2 \cdot d}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (e) \\ 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2M_{y,Rk} \cdot f_{h,1,k} \cdot d} & (f) \end{array} \right. \quad (2.2)$$

Dabei sind:

- $F_{v,Rk}$ Charakteristischer Wert der Tragfähigkeit pro Scherfuge und Verbindungsmittel in N
 t_i Holz- oder Holzwerkstoffdicke, mit i entweder 1 oder 2 in mm
 $f_{h,i,k}$ Charakteristischer Wert der Lochleibungsfestigkeit im jeweiligen Holzteil i in N/mm²
 d Durchmesser des Verbindungsmittels in mm
 $M_{y,Rk}$ Charakteristisches Fließmoment des Verbindungsmittels in N/mm
 β Verhältnis der Lochleibungsfestigkeiten der Bauteile zueinander mit $\beta = \frac{f_{h,2,k}}{f_{h,1,k}}$
 $F_{ax,Rk}$ Charakteristischer Auszieh Widerstand des Verbindungsmittels in N

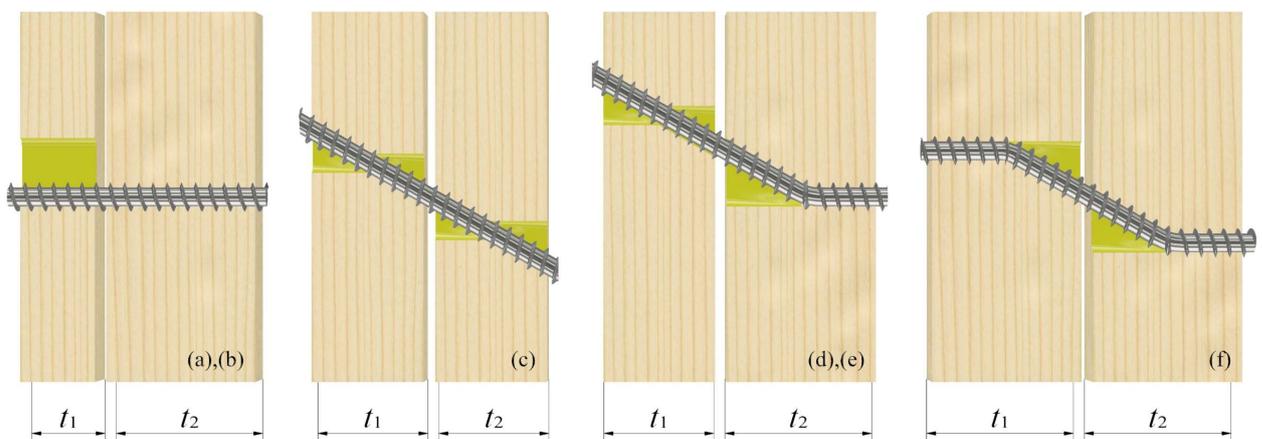


Abbildung 2-4 Versagensmechanismen für einschnittige Holz- Holz Verbindungen
 (Die Buchstaben kennzeichnen den jeweiligen Versagensmodus gemäß den Gleichungen)

2-2.2 Einschnittige Stahlblech-Holz Verbindungen

Bei der Bestimmung der charakteristischen Tragfähigkeit von einschnittigen Stahlblech-Holzverbindungen kommt es zusätzlich zu einer Fallunterscheidung zwischen dünnen und dicken Stahlblechen, wie nachfolgend dargestellt:

- Dünnes Stahlblech mit $t \leq 0,5 \cdot d$
- Dickes Stahlblech mit $t > d$

Kommt das eingesetzte Stahlblech zwischen diesen definierten Grenzen zu liegen, so ist zwischen den charakteristischen Werten der Tragfähigkeit von dünnen und dicken Blechen eine lineare Interpolation ($0,5 \cdot d \leq t \leq d$) durchzuführen. Das Prinzip einer Unterscheidung zwischen dünnen und dicken Stahlblechen beruht auf der möglichen Ausbildung eines weiteren Fließgelenks (vgl. Abbildung 2-5) durch eine Einspannung im dicken Stahlblech.

Für dünne Bleche gelten die nachfolgenden Gleichungen zur Bestimmung der charakteristischen Tragfähigkeit je Verbindungsmittel und Scherfuge:

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,4 \cdot f_{h,k} \cdot t_1 \cdot d \quad (a) \\ 1,15 \sqrt{2M_{y,Rk} \cdot f_{h,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (b) \end{array} \right. \quad (2.3)$$

Dabei sind:

- $F_{v,Rk}$ Charakteristischer Wert der Tragfähigkeit pro Scherfuge und Verbindungsmittel in N
 t_1 der kleinere Wert der Seitenholzdicke oder der Applikationstiefe des Verbindungsmittels in mm
 $f_{h,k}$ Charakteristischer Wert der Lochleibungsfestigkeit im jeweiligen Holzteil in N/mm²
 d Durchmesser des Verbindungsmittels in mm
 $M_{y,Rk}$ Charakteristisches Fließmoment des Verbindungsmittels in N/mm
 $F_{ax,Rk}$ Charakteristischer Auszieh Widerstand des Verbindungsmittels

Für dicke Stahlbleche können die Bestimmungsgleichungen, wie folgt angewandt werden:

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,k} \cdot t_1 \cdot d \quad (c) \\ f_{h,k} \cdot t_1 \cdot d \left[\sqrt{2 + \frac{4M_{y,Rk}}{f_{h,k} \cdot t_1^2 \cdot d}} \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (d) \\ 2,3 \sqrt{M_{y,Rk} \cdot f_{h,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (e) \end{array} \right. \quad (2.4)$$

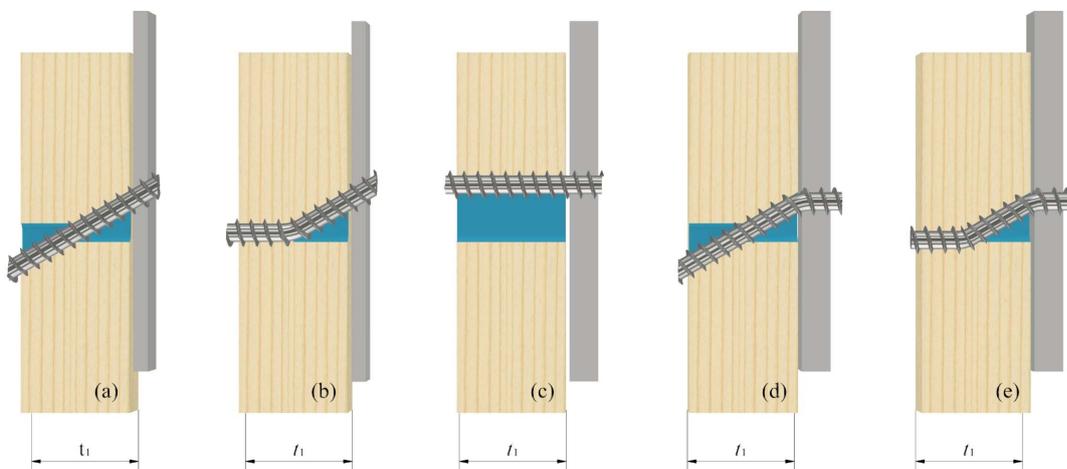


Abbildung 2-5 Versagensmechanismen für einschnittige Stahlblech-Holz Verbindungen
 (Die Buchstaben kennzeichnen den jeweiligen Versagensmodus gemäß den Gleichungen)

2-2.3 Eingangsparameter des Bemessungsmodells

Auf Basis der vorangegangenen Beschreibung des im aktuellen Normenregelwerk verankerten Bemessungsansatzes zur Bestimmung der lateralen Tragfähigkeit stiftförmiger Verbindungsmittel, kann eine Analyse des Bemessungsmodells durchgeführt werden.

Wie bereits dokumentiert, bildet die Grundlage des Bemessungskonzepts die Summierung des Anteils zufolge der Fließtheorie nach Johansen als auch ein möglicher Seileffekt. Dabei beruht das Johansen'sche Modell auf der Bildung eines Gleichgewichtszustands zwischen den einwirkenden Kraftgrößen unter Berücksichtigung des Moments zufolge der Ausbildung eines Fließgelenks des stiftförmigen Verbindungsmittels. An den nachfolgenden, einschnittigen Versagensmodi (vgl. Abbildung 2-6) sollen die mechanischen Eingangsparameter, welche zur Bestimmung der lateralen Tragfähigkeit in den Bemessungsgleichungen verankert sind, aufgeschlüsselt werden. Als Beispiel wurden dabei die Versagensmodi (e) für einschnittige Holz-Holz bzw. Holz-Stahlblech Verbindungen gewählt, da in deren Bestimmungsgleichungen jeweils alle möglichen Einflussparameter enthalten sind.

$$F_{v,Rk} = \begin{cases} \text{für Holz - Holz} & 1,05 \frac{f_{h,1,k} \cdot t_2 \cdot d}{1 + 2\beta} \cdot \left[\sqrt{2\beta^2 (1 + \beta) + \frac{4\beta(1 + 2\beta) M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot t_2^2 \cdot d}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (e) \\ \text{für Stahl - Holz} & f_{h,k} \cdot t_1 \cdot d \left[\sqrt{2 + \frac{4M_{y,Rk}}{f_{h,k} \cdot t_1^2 \cdot d}} \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (d) \end{cases} \quad (2.5)$$

Dabei sind:

- t_i Holz- oder Holzwerkstoffdicke, mit i entweder 1 oder 2 in mm
- $f_{h,i,k}$ Charakteristischer Wert der Lochleibungsfestigkeit im jeweiligen Holzteil i in N/mm²
- d Durchmesser des Verbindungsmittels in mm
- $M_{y,Rk}$ Charakteristisches Fließmoment des Verbindungsmittels in N/mm
- $F_{ax,Rk}$ Charakteristischer Auszieh Widerstand des Verbindungsmittels in N

Wie in Gleichung (2.5) ersichtlich, wird die Abscherkomponente der lateralen Tragfähigkeit einerseits von geometrischen (t_1 , t_2 , d) und andererseits von mechanischen Faktoren ($f_{h,ik}$, $M_{y,Rk}$) beeinflusst. Letztere berücksichtigen das Verhalten der Holzbauteile zufolge einer Scherbeanspruchung (Lochleibungsfestigkeit $f_{h,i,k}$) sowie jenes des biegebeanspruchten Stabes (Fließmomente $M_{y,Rk}$). Im Rahmen der weiteren Arbeit wird das Hauptaugenmerk auf die Lochleibungsfestigkeit f_h und jene Parameter gerichtet, welche diese mechanische Kenngröße beeinflussen. ([hier den Versagensmodus auf d ändern](#))

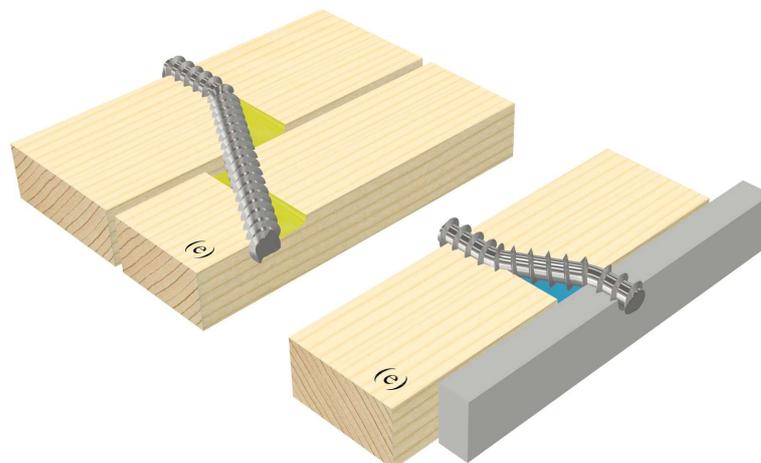


Abbildung 2-6 Links: Versagensmodus (e) einer Holz-Holzverbindung; rechts: Stahlblech-Holzverbindung)

2-2.4 Grundsätze des Lochleibungsversagens

Auf Basis eines, im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Prüfkörpers (vgl. Abbildung 2-7, links) soll das Lochleibungsversagens eines Holzbauteils näher erörtert werden. Unter Lochleibungsbeanspruchung wird generell das durch eine Druckkraft injizierte Einpressen eines Verbindungsmittels in das umgebende, vereinfacht als orthotrop angenommene Material Holz verstanden.

Durch Separieren des resultierenden Spannungszustands in Anteile parallel, bzw. orthogonal zur Faserrichtung (vgl. Abbildung 2-7, rechts) kann auf das Verhalten der Zellstruktur um das Verbindungsmittel geschlossen werden:

- Parallel zur Faserrichtung kann dem Verbindungsmittel ein hoher Lochleibungswiderstand entgegengesetzt werden
- Orthogonal zur Faserrichtung ist die aufnehmbare Spannung durch die Querkzugfestigkeit begrenzt

Durch die orthogonal zur Faserrichtung gerichteten Spannungen, kommt es bei einem Überschreiten der Querkzugfestigkeit zur Rissbildung und dessen Ausbreitung entlang der Faserrichtung (vgl. Abbildung 2-7, links). Der zurzeit erforschte Ansatz zur Berücksichtigung dieser auftretenden Spannungen (vgl. Schickhofer et al. [1]) wird wie folgt in der aktuellen Normung berücksichtigt:

- Nachweisführung der Komponente parallel zur eingeleiteten Kraft
- Berücksichtigung der orthogonal dazu stehenden Beanspruchung durch konstruktive Regelung in Form von Mindestabständen von den Verbindungsmittel zueinander

Das Verhalten im Bruchzustand und somit die Größe der Lochleibungsfestigkeit sind somit von der Orientierung der Faser abhängig, Daher werden im nachfolgendem die Bruchcharakteristika und der lokale Versagensmechanismus der Holzstruktur unterschiedlicher Faserorientierungen (vgl. Abbildung 2-8), welche im Zuge dieser Arbeit ermittelt wurden, dargestellt.

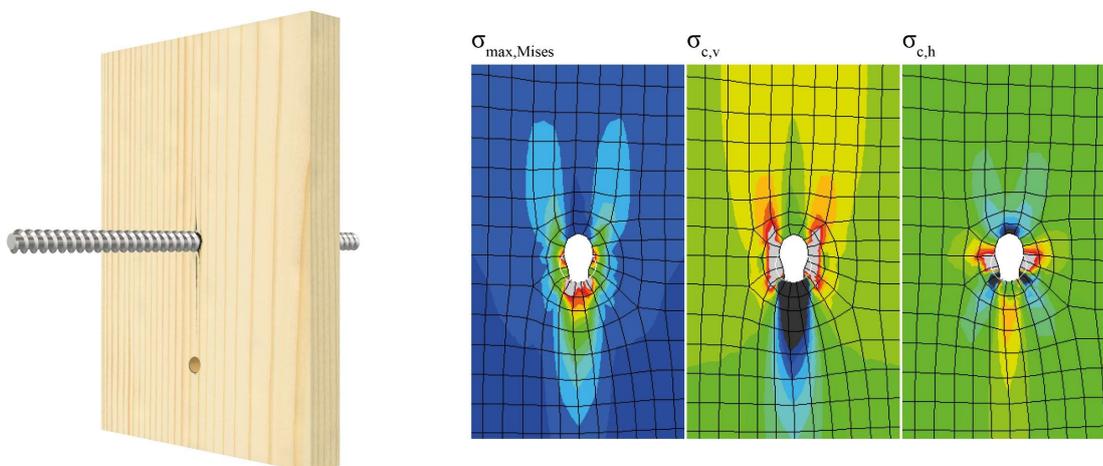


Abbildung 2-7 Verhalten von orthotropen Material beim Auftreten von Lochleibungsspannungen (links: Prüfkörper, auf welchen sich die Ausführungen zur Lochleibung beziehen; rechts: Qualitativer Spannungszustand einer FEM- Analyse (Quelle: Schickhofer et al. [1])

Beim Lochleibungsversagen₇ handelt es sich unabhängig von der Orientierung des Verbindungsmittels, bzw. der Ausrichtung der aufgebracht Last, grundsätzlich um ein lokales Versagen der Zellstruktur. Durch die spezielle Ausrichtung des Verbindungsmittels und Kraftgröße wird der lokale Versagensmechanismus und somit das Verhalten im Bruchzustand, sowie die mechanischen Kenngrößen der lateralen Steifigkeit beeinflusst.

In den nachfolgenden Absatz wird aus holztechnologischer Sicht auf das lokale Versagen der Nadelholzzellbündel eingegangen. Dabei soll eine Gliederung der „Einpressrichtung“ in die in dieser Arbeit definierten Hauptwinkelvariationen (vgl. Abschnitt 3-1) getroffen und somit eine eindeutige Definition sichergestellt werden:

- {90-00}, Beanspruchung durch das Verbindungsmittel in radialer Richtung der Zellstruktur
- {00-90}, Beanspruchung in Richtung der Faserbündel
- {90-90}, orthogonale Beanspruchung der Faserbündel

Zu {90-00}: Durch eine radiale Beanspruchung der Zellstruktur kommt es zu einem lokalen Stabilitätsversagen der Zellwände (vgl. Abbildung 2-9, rechts) und so zu einer Plastifizierung und Verdichtung (vgl. Abbildung 2-8, links). Das Zellmaterial wird vor dem Verbindungsmittel konzentriert und es bildet sich eine sogenannte „Druckfalte“.

Zu {00-90}: Durch das Entlanggleiten des Verbindungsmittels in Richtung der Zellbündel erfolgt eine Umlenkung der Zellstruktur und ein Gleiten entlang der Schraubenflanken (vgl. Abbildung 2-8, Mitte). Bei einem hohen Spätholzanteil und folglich einer größeren lokalen Steifigkeit kann die dem Verbindungsmittel vorausseilende Rissbildung (vgl. Abbildung 2-7, links) nicht mehr durch ein Plastifizieren der Frühholzzonen kompensiert werden. Und es kommt zu einem lokalen Querkzugversagen.

Zu {90-90}: Bei einer orthogonalen Beanspruchung der Zellbündel kommt es zu einer Interaktion des Verbindungsmittels und der Spätholzzonen, die wie ein Netz über das Verbindungsmittel gespannt einen Seileffekt hervorrufen. Durch diesen Effekt (vgl. Abbildung 2-8, rechts), kommt es wie auch zuvor beschrieben zu einem Querkzugversagen entlang der Zellbündel.

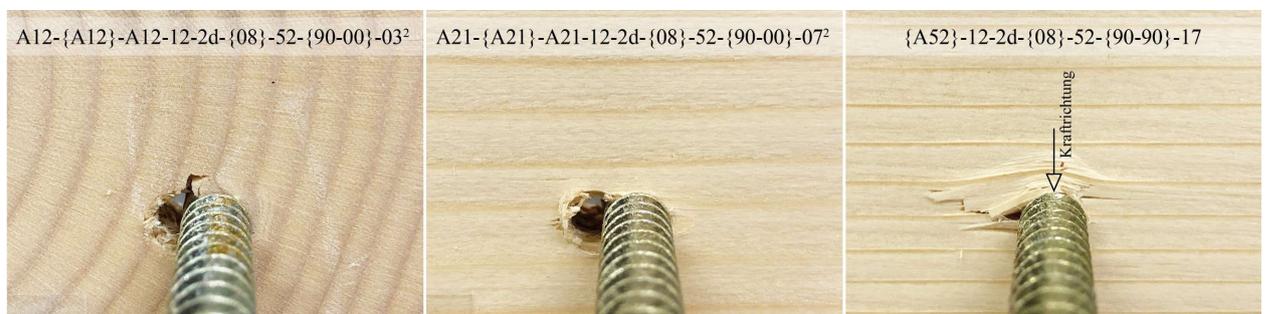


Abbildung 2-8 Bruchcharakteristika bei unterschiedlichen Faserorientierungen, (Belastungsrichtung von rechts nach links, sofern keine abweichende Angabe vorhanden)
(von li nach re: Beurteilung der Hauptwinkelvariationen {90-00}, {00-90}, {90-90})

2-2.5 Exkurs Aufbau von Nadelholz

Dieses Kapitel beinhaltet auf Grundlage von Wagenführ, Scholz [7] eine Zusammenfassung der wichtigsten Strukturmerkmale, des mikroskopischen Aufbaus von Nadelholz. Auf eine Darstellung der makroskopischen Holzstruktur wird verzichtet, bzw. die Kenntnis darüber vorausgesetzt.

Betrachtet man einen Holzquerschnitt, so wird dieser aus Zonen mit unterschiedlichem Zellaufbau und mit daraus abgeleiteten Eigenschaften durchzogen. Makroskopisch ist der Zusammenschluss von Früh- als auch von Spätholzzonen, welche eine Zuwachszone (Jahring) bilden, erkennbar. Grundlage dieser Zonen bilden Zellbündel, welche je nach ihrer Ausbildung der Struktur entweder Tragfähigkeit und Steifigkeit (Spätholz) verleihen oder dem Wasser- und Nährstofftransport (Frühholz) dienen. Zellbündel bestehen aus einzelnen, so genannten Tracheiden, welche hauptsächlich in Richtung der Stammachse orientiert sind und ca. 95 % des Nadelholzkörpers ausbilden. Betrachtet man den Querschnitt einer Längstracheide, so kann dieser vier- bis sechseckig geformt sein. Tracheiden können entweder in ihrer Orientierung oder an Hand ihrer Ausbildung und Funktion wie folgt gegliedert werden:

- Frühholztracheide
- Spätholztracheide

Frühholztracheiden sind dünnwandig und weitleumig und dienen in erster Linie dem vertikalen Transport, bzw. der Vorhaltung von Stoffen, die für das Zellwachstum während der Wachstumsperiode benötigt werden. Spätholztracheiden sind dickwandig bzw. englumig und verleihen der Zellstruktur dessen Tragfähigkeit und Steifigkeit. In der Regel sind Frühholz- und Spätholztracheiden eindeutig voneinander abgegrenzt (vgl. Abbildung 2-9, links). Die Zellwanddicke nimmt vom Frühholz zum Spätholz hin zu und bildet eine Zuwachszone (Jahring) innerhalb einer Vegetationsperiode.

Da Tracheiden lediglich eine Längsausdehnung von ca. 3 ÷ 5 mm besitzen und ein longitudinaler Transport von dem Zellwachstum dienlichen Stoffen erforderlich ist, sind diese radial durch Hoftüpfel. Die Tüpfel bilden die Grundlage der Gefäßkommunikation zwischen den Nadelholztracheiden und ermöglichen so den ungehinderten Nährstofftransport.

Auf Basis der ständigen Interaktion zwischen dem Zellwachstum und den vorherrschenden Wuchsbedingungen kann es unter außergewöhnlichen Einwirkungen zu einer Anpassung in der Zellstruktur kommen. Zu den wichtigsten Änderungen in der Zellstruktur zählt Reaktionsholz (Druckholz bei Nadelholz), bei welchem eine dickwandigere Tracheide durch zusätzliche Einlagerung von Lignin und Hemizellulose gebildet wird. Neben der Erhöhung der Härte, Rohdichte und einem stärkeren, axialen Schwindmaß wird in Folge dieser Verdickung das eigentliche Ziel, die Vermeidung eines lokalen Stabilitätsversagens der Tracheide, erreicht.

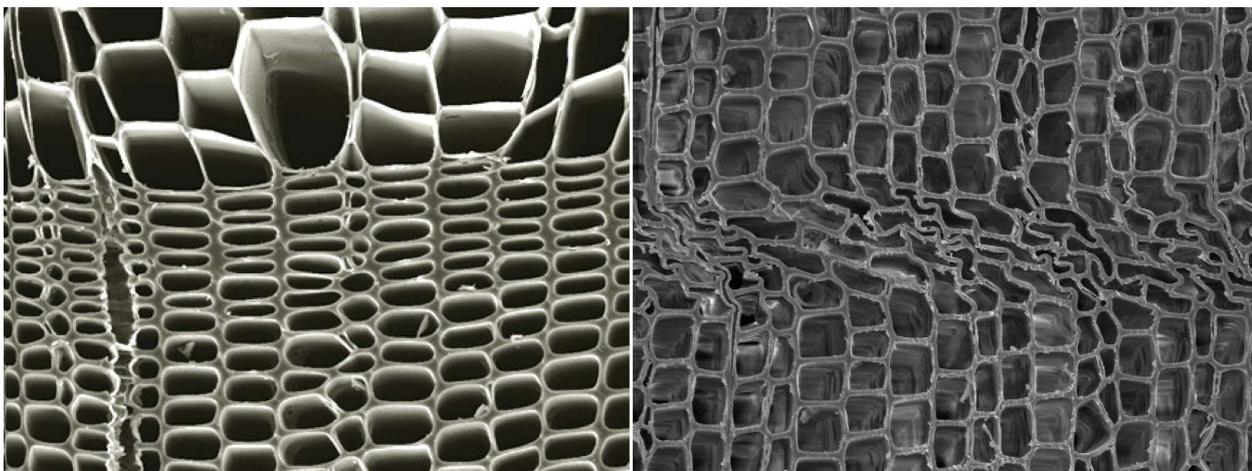


Abbildung 2-9 Zellstruktur von Nadelholz, charakterisiert durch Früh- und Spätholztracheiden (links: Fichte - *Picea abies*, Pinaceae; rechts lokales Stabilitätsversagen der Zellwände (Quelle: Müller et al. [8])

2-3 BERECHNUNGSMODELLE

Auf Grundlage der vorangegangenen Beschreibung des normativ verankerten Bemessungskonzepts soll in diesen Abschnitt speziell auf ausgewählte Modelle zur Bestimmung der Lochleibungsfestigkeit, als auch der Steifigkeit eingegangen werden. Es sollen vor allem auch über die aktuelle Normung hinausgehend alternative Modelle zur Ermittlung dieser lateralen Kenngrößen betrachtet werden.

Die in den nachfolgenden, unterschiedlichen Modellen verwendeten Formelzeichen, vor allem in der Bezeichnung des Last-Faser, als auch des Verbindungsmittel-Faserwinkels soll in allen Gleichungen vereinheitlicht mit den Bezeichnungen, wie in dieser Arbeit definiert, substituiert werden:

- Achs-Faserwinkel α ([Verweis auf Erklärung der Winkel noch einfügen](#))
- Verbindungsmittel-Faserwinkel = Achs-Faserwinkel ε

2-3.1 Modelle zur Beschreibung der Lochleibungsfestigkeit

Die ausgewählten Modelle zur Beschreibung der Lochleibungsfestigkeit eines Holzbauteils zufolge einer lateralen Beanspruchung durch eine Holzbauschraube, lauten:

- Berechnungsmodell gemäß der aktuellen Normung (vgl. ÖNORM B 1995-1-1 [6])
- Berechnungsmodell gemäß Europäisch technischer Bewertungen, stellvertretend auf Basis der ETA-11/0190 [9]
- Berechnungsmodell aus dem Forschungsbericht „Tragfähigkeit von Verbindungen mit selbstbohrenden Holzschrauben mit Vollgewinde“ (vgl. Blaß et al. [10])

2-3.1.1 Aktuelles Normenregelwerk ÖNORM B 1995-1-1

Die aktuell gültige Ausgabe des Eurocode 5 umfasst die allgemeinen Regeln zur Bemessung und Konstruktion von Holzbauten. Dabei beschreibt unter anderem das Kapitel 8 die Verbindungen mit metallischen Verbindungsmitteln (vgl. ÖNORM B 1995-1-1 [6]), welches die Basis für diese Forschungsarbeit darstellt. Neben eines einführenden Teils mit den allgemeinen Anforderungen bildet der Absatz 8.2 „Tragfähigkeit metallischer, stiftförmiger Verbindungsmittel auf Abscheren“ und des Weiteren die nachfolgende Gliederung in die einzelnen Verbindungsmitteltypen die Grundlage für die weitere Beschreibung des Modells zur Ermittlung der Lochleibungsfestigkeit von Holzbauschrauben.

Das aktuell gültige Normenregelwerk basiert dabei auf Untersuchungen von Whale, Smith [11], welche bereits im Jahr 1986 durchgeführt wurden. Die Ergebnisse dieser Untersuchung spiegeln sich in der Gleichung (2.8) wieder.

Die Normung unterscheidet dabei in Schrauben mit teilweisem glattem Schaft (vgl. ÖNORM B 1995-1-1 [6]), bei welchen der Außendurchmesser des Gewindeanteils dem Schaftdurchmesser gleicht und der effektive Durchmesser d_{ef} zur Bestimmung des Berechnungsmodells als Durchmesser des glatten Schafts angenommen wird, welches für Sechskant-Holzschrauben gemäß DIN 571 [12] gilt.

Ist diese Bedingung nicht erfüllt, so ist eine Unterteilung der Schrauben auf Grund eines effektiven, wirksamen Durchmessers zu treffen, an welchem das Berechnungsmodell zur Bestimmung der Lochleibungsfestigkeit ausgewählt wird.

$$d_{ef} = 1,1 \cdot d_i \quad (2.6)$$

Dabei sind:

d_{ef} Wirksamer Durchmesser in mm

d_i Kerndurchmesser des Verbindungsmittels in mm

Auf Basis des ermittelten, effektiven Durchmessers wird das geeignete Modell zur Bestimmung der Lochleibungsfestigkeit bestimmt:

- $d_{ef} > 6$ mm es gelten die Festlegung für Bolzen
- $d_{ef} \leq 6$ mm es gelten die Festlegungen für Nägel

Es soll an dieser Stelle noch festgehalten werden, dass der effektive Durchmesser d_{ef} gemäß ÖNORM B 1995-1-1 [6] sowohl zur Bestimmung der Lochleibungsfestigkeit, als auch des Fließmoments unabhängig des angewandten Modells eingesetzt werden soll.

Berechnungsansatz für Bolzen

Gemäß den festgelegten Bestimmungen für Bolzen (vgl. ÖNORM B 1995-1-1 [6]) gilt die nachfolgende Gleichung bis zu einem Bolzendurchmesser von 30 mm. Die Lochleibungsfestigkeiten können unter einem Kraft- Faserwinkel α wie folgt ermittelt werden:

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \cdot \sin^2(\alpha) + \cos^2(\alpha)} \quad (2.7)$$

$$f_{h,0,k} = 0,082(1 - 0,01 \cdot d) \rho_k \quad (2.8)$$

Dabei sind:

- k_{90} Für Nadelhölzer gilt: $k_{90} = 1,35 + 0,015 \cdot d$
- $f_{h,\alpha,k}$ Charakteristischer Wert der Lochleibungsfestigkeit in N/mm²
- $f_{h,0,k}$ Charakteristischer Wert der Lochleibungsfestigkeit in Faserrichtung des Holzes in N/mm²
- α Winkel zwischen Kraft und Faserrichtung in °
- d Bolzendurchmesser in mm
- ρ_k Charakteristischer Wert der Rohdichte des Holzes in kg/m³

Wie im Berechnungsmodell ersichtlich wird die Lochleibungsfestigkeit unter einem Winkel α zwischen Kraft- Faser durch die Lochleibungsfestigkeit in Faserrichtung im Zähler und durch den Hankison- Term im Nenner bestimmt. Der Faktor k_{90} beschreibt dabei das Verhältnis der Lochleibungsfestigkeit in Faserrichtung zur Lochleibungsfestigkeit orthogonal zur Faserrichtung:

$$k_{90} = \frac{f_{h,0,k}}{f_{h,90,k}} \quad (2.9)$$

Dabei sind:

- $f_{h,0,k}$ Charakteristischer Wert der Lochleibungsfestigkeit in Faserrichtung des Holzes in N/mm²
- $f_{h,90,k}$ Lochleibungsfestigkeit orthogonal zur Faserrichtung des Holzes in N/mm²

Aus der Gleichung zur Bestimmung der Lochleibungsfestigkeit in Faserrichtung lässt sich sowohl auf einen linearen Einfluss des Verbindungsmitteldurchmesser, als auch auf einen linearen Einfluss der Rohdichte schließen.

Berechnungsansatz für Nägel

Die Grundlage für die Ermittlung der Lochleibungsfestigkeit von Schrauben mit $d_{ef} = 1,1 \cdot d_i \leq 6$ mm bildet das Berechnungsmodell für nicht- vorgebohrte Nägel (vgl. ÖNORM B 1995-1-1 [6]), wie nachfolgend dargestellt:

$$f_{h,k} = 0,082 \cdot \rho_k \cdot d^{-0,3} \quad (2.10)$$

Dabei sind:

- $f_{h,k}$ Charakteristischer Wert der Lochleibungsfestigkeit in Holz in N/mm²
- ρ_k Charakteristischer Wert der Rohdichte des Holzes in kg/m³
- d Nageldurchmesser in mm

An Hand der Gleichung (2.10) des Modells für vorgebohrte Nägel lässt sich ein linearer Einfluss der Rohdichte, als auch ein hochgradig, exponentieller Einfluss auf die Lochleibungsfestigkeit des Verbindungsmitteldurchmessers feststellen.

Als wesentlichen Unterscheidung zum Modell für Bolzen ist hervorzuheben, dass bei der Bestimmung der Lochleibungsfestigkeit für nicht- vorgebohrte Nägel kein Einfluss des Last- Faserwinkels in Rechnung gestellt wird.

2-3.1.2 Berechnungsmodell gemäß ETA

Sind die wesentlichen Merkmale von Bauprodukten nicht- oder nicht vollständig in einer harmonisierten, europäischen Norm (hEN) erfasst, so kann deren Leistungsfähigkeit in einer Europäisch technischen Bewertung erfasst werden ([Zitat europ. Bauproduktenverordnung einbauen](#)).

Da dies unter gewissen Umständen (fehlende Regelung der axialen Steifigkeit $K_{ser,ax}$, Mindestabstände, etc. in der EN 14592 als hEN für Holzbauschrauben, vgl Ringhofer [2]) auf selbstbohrende Holzbauschrauben zutrifft, ist es gegenwärtig üblich, deren Leistung auf Basis Europäisch technischer Bewertungen zu deklarieren. Stellvertretend für diese große Anzahl an Europäisch technischen Bewertungen von selbstbohrenden Holzbauschrauben wird nachfolgend an Hand der technischen Bewertung ETA-11/0190 [9] der aktuelle Stand der Technik repräsentativ dargestellt und diskutiert. In dieser wird bei der Bestimmung der Lochleibungsfestigkeit unterschieden in:

- vorgebohrte Nadelholzbauteile
- nicht- vorgebohrte Nadelholzbauteile

In Gleichung (2.11) ist die Lochleibungsfestigkeit für nicht-vorgebohrte Nadelholzbauteile (vgl. ETA-11/0190 [9]) in Abhängigkeit des Verbindungsmittel-Faserwinkels dargestellt.

$$f_{h,\varepsilon,k} = \frac{0,082 \cdot \rho_k \cdot d^{-0,3}}{2,5 \cdot \cos^2(\varepsilon) + \sin^2(\varepsilon)} \quad (2.11)$$

Dabei sind:

- $f_{h,\varepsilon,k}$ Charakteristischer Wert der Lochleibungsfestigkeit in Abhängigkeit von ε in Holz in N/mm²
- ρ_k Charakteristischer Wert der Rohdichte des Holzes in kg/m³
- d Gewindeaußendurchmesser der Schraube in mm
- ε Winkel zwischen Schraubenachse und Faserrichtung, $0^\circ \leq \varepsilon \leq 90^\circ$

Als wesentliche Unterscheidung zum in der Normung vorgeschlagenen Berechnungsansatzes, wird anstelle des effektiven Durchmessers d_{ef} (vgl. Abschnitt 2-3.1.1) in der Gleichung (2.11) der nominelle Durchmesser d zur Berechnung der Lochleibungsfestigkeit angewandt.

Der im Zähler verwendete Ansatz zur Bestimmung der Lochleibungsfestigkeit $f_{h,0,k}$ entspricht exakt dem in der Normung verankerten Ansatz für nicht- vorgebohrte Nägel (vgl. ÖNORM B 1995-1-1 [6]). Der im Nenner stehende Term ähnelt dem Hankinson- Ansatz mit einem festgelegtem k_{90} von 2,5, welcher jedoch den Einfluss des Achs-Faser-Winkels und nicht jenen des Last-Faser-Winkels abbildet (vgl. Abschnitt 2-3.1.1). Weiters kann festgestellt werden, dass es sich bei ([Blass](#))...

Im Zuge der Bestimmung der Lochleibungsfestigkeit von vorgebohrten Holzbauschrauben kommt es zur Anwendung des identen Nennerterms. Im Zähler findet sich der Ansatz zur Bestimmung der Lochleibungsfestigkeit in Faserrichtung von Bolzen gemäß Normung (vgl. ÖNORM B 1995-1-1 [6]) wieder:

$$f_{h,\varepsilon,k} = \frac{0,082 \cdot \rho_k \cdot (1 - 0,01 \cdot d)}{2,5 \cdot \cos^2(\varepsilon) + \sin^2(\varepsilon)} \quad (2.12)$$

2-3.1.3 Berechnungsmodell aus Blaß et al. [10]

In diesem Kapitel soll der Forschungsbericht „Tragfähigkeit von Verbindungen mit selbstbohrenden Holzbauschrauben mit Vollgewinde“ des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) zusammengefasst und die Forschungsergebnisse dargestellt werden. Da der hier angeführte Forschungsbericht sowohl die Lochleibungsfestigkeit in Abhängigkeit des Kraft-Faserwinkels, als auch des Last-Faserwinkels untersucht, sollen die Prüfplanung, die experimentellen Untersuchungen und schlussendlich die abgeleiteten Prüfergebnisse dargestellt und zusammengefasst werden.

Auf Basis der von Blaß et al. [10] durchgeführten Vorversuche wurde festgestellt, dass die Lochleibungsfestigkeit bei der Beanspruchung von Holz durch das Gewinde eines stiftförmigen Verbindungsmittels (Schraube) von dem in der aktuellen Normung verankerten Bemessungsansatz für nicht- vorgebohrte Nägel (vgl. Gleichung 2.10) abweicht:

Auf Grund des festgestellten Forschungsbedarfs wurden in Anlehnung an das Prüfverfahren zur „Bestimmung der Lochleibungsfestigkeit und Bettungswerte für stiftförmige Verbindungsmittel“ (vgl. ÖNORM EN 383 [13]), experimentelle Untersuchungen unter Variation des Kraft- Faserwinkels α , als auch des Last- Faserwinkes ε (Definition siehe Abbildung 2-10) festgelegt. Das durchgeführte Prüfprogramm ist in Tabelle 2-1 ersichtlich.

Tabelle 2-1 Übersicht über das Prüfprogramm gemäß Forschungsbericht

		$\rho_{\text{mean}} = 420 \text{ kg/m}^3$				
		$\varepsilon = 0^\circ$	30°	45°	60°	90°
$\alpha = 0^\circ$						20
30°						20
45°						20
60°						20
90°	$n \geq 20$	20	20	20	20	20

Im Umfang von mindestens 20 Probekörper je Prüferie wurde bei einer mittleren Rohdichte (*Picea abies*) von 420 kg/m^3 und unter Variation des Verbindungsmitteldurchmessers ($d = 6, 8, 10$ und 12 mm) die Lochleibungsfestigkeit in Vollholz aus Fichte ermittelt. Unter dem Gesichtspunkt, dass keine Deformation des Verbindungsmittels während der Prüfdurchführung auftreten soll, wurden die erforderlichen Schlankheiten λ zur Bestimmung der jeweiligen Prüfkörperdicken t , wie folgt gewählt:

- Für $d = 6 \text{ mm}$ $\lambda = 3,3$
- Für $d > 6 \text{ mm}$ $\lambda = 3,0$

Auf Basis der zuvor definierten Schlankheiten wurden die Prüfkörperdimensionen ermittelt:

$$\lambda = \frac{t}{d_{\text{nom}}} \rightarrow t = \lambda_{\text{gew}} \cdot d_{\text{nom}} \quad (2.13)$$

Dabei sind:

- λ_{gew} Schlankheit
- t Dicke des Prüfkörpers in mm
- d Nomineller Durchmesser des angewendeten Verbindungsmittels in mm

Unter dem Gesichtspunkt der fehlerfreien Herstellung der Probekörper um den Prüfbereich wurden 410 Versuche mit $\varepsilon = 90^\circ$ zu Faserrichtung unter Variation des Last- Faserwinkels durchgeführt. Als Ergebnis der experimentellen Untersuchung wurde mittels einer multiplen Regressionsanalyse die Lochleibungsfestigkeit auf Basis des Mittelwerts der Rohdichte, ...

$$f_{h,\varepsilon} = \frac{0,022 \cdot \rho^{1,24} \cdot d^{-0,3}}{2,5 \cdot \cos^2(\varepsilon) + \sin^2(\varepsilon)} \quad (2.14)$$

bzw. auf charakteristischem Niveau:

$$f_{h,\varepsilon,k} = \frac{0,019 \cdot \rho_k^{1,24} \cdot d^{-0,3}}{2,5 \cdot \cos^2(\varepsilon) + \sin^2(\varepsilon)} \quad (2.15)$$

- $f_{h,\varepsilon}$ Lochleibungsfestigkeit in Abhängigkeit von ε in Holz in N/mm²
- $f_{h,\varepsilon,k}$ Charakteristischer Wert der Lochleibungsfestigkeit in Abhängigkeit von ε in Holz in N/mm²
- ρ Rohdichte des Holzes in kg/m³
- ρ_k Charakteristischer Wert der Rohdichte des Holzes in kg/m³
- d Gewindeaußendurchmesser der Schraube in mm
- ε Winkel zwischen Schraubenachse und Faserrichtung

Wie in den oben angeführten Gleichungen ersichtlich, ist bei der Bestimmung der charakteristischen, bzw. bei der Lochleibungsfestigkeit auf Basis des Mittelwerts der Rohdichte sowohl ein progressiver, exponentieller Einfluss der Rohdichte, als auch ein regressiver, exponentieller Einfluss des Durchmessers vorhanden. Daher lässt sich wie folgt interpretieren, dass mit einer zunehmenden Rohdichte und Durchmesser des Verbindungsmittels die Lochleibungsfestigkeit steigt, bzw. auf Grund des Durchmessers sinkt. Der Nennerterm entspricht der Hankinson- Funktion (vgl. Abschnitt 2-3.1.1) mit einem k_{90} von 2,5.

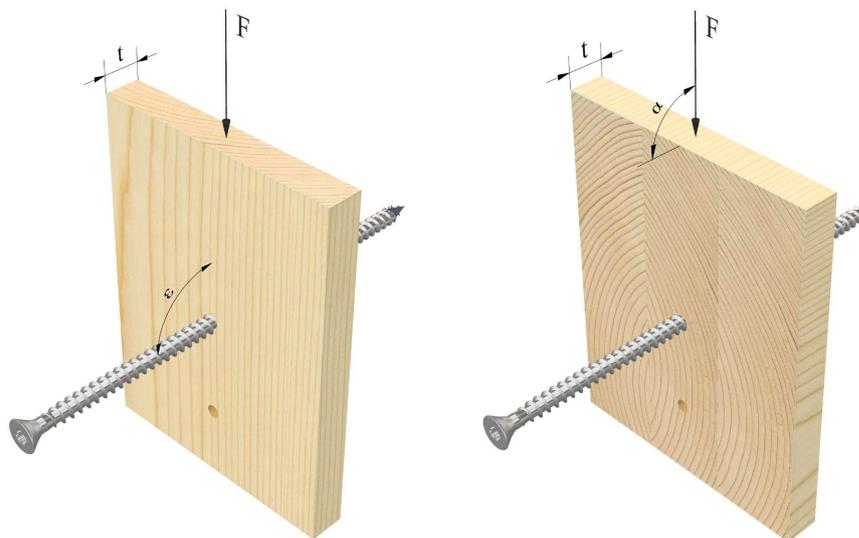


Abbildung 2-10 Definition des Achs- bzw. des Lastfaserwinkels
(links: Prüfkörper mit $\alpha = 0^\circ$, $\varepsilon = 90^\circ$; rechts: $\alpha = 90^\circ$, $\varepsilon = 0^\circ$)

2-3.2 Modelle zur Bestimmung der Steifigkeit

Auf Basis der vorangegangenen Diskussion der Modelle zur Ermittlung der Lochleibungsfestigkeit sollen nachfolgend die Modelle zur Bestimmung der Steifigkeit angeführt werden. Wie auch bei der Beschreibung der Lochleibungsfestigkeit werden in den nachfolgenden Seiten Bestimmungsgleichung der Steifigkeit, basierend auf dem aktuellen Normenregelwerk, als auch gemäß dem aktuellen Stand der Technik und an Hand experimenteller Untersuchungen angeführt:

- Modell zur Bestimmung der Steifigkeit aus aktueller Normung (vgl. ÖNORM B 1995-1-1 [6])
- Europäische technische Bewertung ETA-11/0190 (vgl.)
- Forschungsbericht „Verstärkung von Bauteilen aus Holz mit Vollgewindeschrauben“

Auf Grundlage der Darstellung und Diskussion der unterschiedlichen Ansätze zur Ermittlung der lateralen Steifigkeit soll im Anschluss ein Modellvergleich (vgl. Abschnitt 2-4) geführt werden.

2-3.2.1 Aktuelles Normenregelwerk ÖNORM B 1995-1-1

Der in der Normung verankerte Ansatz zur Bestimmung der Steifigkeit und somit des Verschiebungsmoduls K_{ser} je Scherfuge ist durch die nachfolgende Bestimmungsgleichung für stiftförmige Verbindungsmittel (Schrauben) in Holz- Holz Verbindungen (vgl. ÖNORM B 1995-1-1 [6]) gegeben:

$$K_{ser,H-H} = \rho_m^{1,5} \cdot \frac{d}{23} \quad (2.16)$$

Dabei sind:

- $K_{ser,H-H}$ Verschiebungsmodul je Scherfuge für Holz- Holz Verbindungen in N/mm
 ρ_m Mittelwert der Rohdichte in kg/m^3
 d Nomineller Durchmesser des angewendeten Verbindungsmittels in mm

Wird die Rohdichte den aktuellen Normen für Holzbauprodukte als charakteristische Wert entnommen, so kann diese durch die nachfolgende Gleichung in die benötigte, mittlere Rohdichte übergeführt werden. Liegen bei den zu fügenden Bauteilen voneinander abweichende Rohdichten vor, so kann der maßgebende Mittelwert der Rohdichte, wie folgt bestimmt werden:

$$\rho_m = 1,15 \cdot \rho_k \quad (2.17)$$

$$\rho_m = \sqrt{\rho_{m,1} \cdot \rho_{m,2}} \quad (2.18)$$

Dabei sind:

- ρ_m Mittelwert der Rohdichte in kg/m^3
 ρ_k Charakteristischer Wert der Rohdichte in kg/m^3
 $\rho_{m,i}$ Mittlerer Wert der Rohdichte der zu fügenden Bauteile in kg/m^3

Wie in der oben angeführten Gleichung zur Ermittlung des Verschiebungsmoduls ersichtlich, kann neben einen linearen Einfluss der Rohdichte auf einen exponentieller Einfluss der Rohdichte geschlossen werden. Soll die Steifigkeit auf Grundlage einer Stahlblech- Holzverbindung ermittelt werden, so ist der Ansatz zur Bestimmung des Verschiebungsmoduls für Holz- Holzverbindung mit dem Faktor 2,0 zu erweitern:

$$K_{ser,S-H} = 2 \cdot \rho_m^{1,5} \cdot \frac{d}{23} \quad (2.19)$$

Dabei sind:

- $K_{ser,S-H}$ Verschiebungsmodul je Scherfuge für Stahlblech- Holz Verbindungen in N/mm

2-3.2.2 Stand der Technik ETA-11/0190

Wie auch bei der Beschreibung des Modells zur Bestimmung der Lochleibungsfestigkeit, soll an Hand der Europäisch, technischen Bewertung ETA-11/0190, welche den aktuellen Stand der Technik repräsentiert, die Steifigkeit K_{ser} (Verschiebungsmodul) in weiterer Folge diskutiert werden:

Im Zuge einer Druckbeanspruchung von in Holz gebettet stiftförmigen Verbindungsmittel kann es neben dem Durchdrücken der Schraube aus dem Holzbauteil auch zu einem etwaigen Stabilitätsversagen kommen. Da die Schraube von der Zellstruktur umschlossen ist, erfolgt die Stabilitätsbetrachtung unter Berücksichtigung einer elastischen Bettung c_h , welche die Nachgiebigkeit der Holzstruktur repräsentiert. Da in der technischen Bewertung der Verschiebungsmodul nicht explizit ausgewiesen ist, wurde dieser aus der elastischen Bettung c_h abgeleitet.

Vor der Darstellung des vorgeschlagenen Ansatzes zur Bestimmung der elastischen Bettungskennziffer gemäß Stand der Technik und der daraus abgeleitete Verschiebungsmodul K_{ser} , soll eine Übersicht über die Methodik zur Bestimmung dieser Kenngrößen gegeben werden:

Grundlage der Ermittlung sowohl einer Steifigkeit, als auch der elastischen Bettung bildet das experimentell ermittelte Kraft- Verschiebungsdiagramm (vgl. Abschnitt 3-3.4.2), aus welchem der Anfangsbettungsmodul C_i bestimmt (vgl. ÖNORM EN 383 [13]) werden kann. Dabei wird auf Ordinate nicht die Prüfkraft, sondern die Lochleibungsfestigkeit aufgetragen. Durch Erweiterung der Lochleibungsfestigkeit f_h mit dem Verbindungsmitteldurchmesser d kann so die elastische Bettung direkt bestimmt werden:

$$C_i = \frac{f_{h,i}}{u_i} \rightarrow c_h = \frac{f_{h,i} \cdot d}{u_i} \quad (2.20)$$

Dabei sind:

- C_i Bettungsmodul in N/mm^3
- c_i Elastische Bettungskennziffer in N/mm^2
- $f_{h,i}$ Aus experimentellen Untersuchungen ermittelte Lochleibungsfestigkeit in N/mm^2
- u_i Dazugehörige Verschiebung in mm
- i Fortlaufende Nummer eines Probekörpers je Prüfserie

Wir die elastische Bettungskennziffer c_h mit der Prüfkörperdicke $t_{(\lambda)}$ erweitert, so kann die Steifigkeit K_{ser} , wie nachfolgend gezeigt, bestimmt werden:

$$c_h = \frac{f_h \cdot d_i}{u_i} \rightarrow K_{ser} = c_h \cdot t_{(\lambda)} = f_h \frac{d_i}{u_i} \cdot t_{(\lambda)} = \frac{F_{max,i}}{t_{(\lambda)} \cdot d_i} \frac{d_i}{u_i} \cdot t_{(\lambda)} = \frac{F_{max,i}}{u_i} \quad (2.21)$$

Dabei sind:

- $F_{max,i}$ Maximale Prüfkraft je Probekörper in N
- $t_{(\lambda),i}$ Dicke des Prüfkörpers in Abhängigkeit der Schlankheit in mm
- d_i Durch Messung ermittelter Außendurchmesser des Verbindungsmittels in mm

Auf Basis der vorangegangenen Beschreibung der Steifigkeit wurde gezeigt, dass diese aus der elastischen Bettung (vgl. ETA-11/0190 [9]) abgeleitet werden kann. Nachfolgend soll der Verformungsmodul durch Erweiterung mit der Prüfkörperdicke $t_{(\lambda)}$ (vgl. auch Abschnitt 3-1.3) bestimmt werden:

$$c_h = (0,19 + 0,012 \cdot d) \rho_k \left(\frac{90 + \varepsilon}{180} \right) \quad (2.22)$$

Dabei sind:

- c_h Elastische Bettungskennziffer der Schraube in N/mm^2
- ρ_k charakteristischer Wert der Rohdichte in kg/m^3
- ε Winkel zwischen Schraubenachse und Faserrichtung, $30^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$

Wie in der oben angeführten Bestimmungsgleichung der elastischen Bettung ersichtlich, ist diese unter anderem durch den linearen Einfluss der Achs-Faserwinkels ε definiert. Im nachfolgenden soll der Verschiebungsmodul, welcher aus der elastischen Bettung bestimmt wurde mittels eines „Makrons“ gekennzeichnet werden. Der Verschiebungsmodul \bar{K}_{ser} kann wie nachfolgend dargestellt bestimmt werden:

$$\bar{K}_{ser} = (0,19 + 0,012 \cdot d) \rho_k \left(\frac{90 + \varepsilon}{180} \right) \cdot t_{(\lambda)} \quad (2.23)$$

Dabei sind:

- \bar{K}_{ser} Aus der elastischen Bettungskennzahl abgeleiteter Verschiebungsmodul in N/mm
- d Durchmesser des stiftförmigen Verbindungsmittels in mm
- ρ_k charakteristischer Wert der Rohdichte in kg/m³
- $t_{(\lambda)}$ Dicke des Prüfkörpers in Abhängigkeit der Schlankheit in mm
- ε Winkel zwischen Schraubenachse und Faserrichtung, $30^\circ \leq \varepsilon \leq 90^\circ$

Da die angeführte Gleichung auf Basis von Verstärkungsmaßnahmen von Holzbauteilen via Holzbauschrauben entwickelt wurde, besitzt diese ihre Gültigkeit bei $30^\circ \leq \varepsilon \leq 90^\circ$.

2-3.2.3 Forschungsbericht

Nachfolgend soll ein Überblick über den wissenschaftlichen Forschungsbericht „Verstärkung von Bauteilen aus Holz mit Vollgewindeschrauben“ gegeben werden. Basis der in diesem Bericht ermittelte, elastischen Bettungskennziffer bildet die Untersuchung des Stabilitätverhaltens (vgl. auch Abschnitt 2-3.2.2) von in Holz gebetteten Holzbauschrauben. Auf Grund des definierten Forschungsbedarfs soll im Anschluss das Prüfprogramm (vgl. Bejtka [14]), als auch die Ergebnisse dargestellt werden.

Der Prüfumfang umfasste 20 Probekörper, bei welchen der Kraft-Faserwinkel α , sowie der Verbindungsmitteldurchmesser (6, 8, 10 und 12 mm) variiert wurde:

Tabelle 2-2 Übersicht über das Prüfprogramm gemäß Forschungsbericht

	$\rho_{mean} = 420 \text{ kg/m}^3$				
	$\varepsilon = 0^\circ$	30°	45°	60°	90°
$\alpha = 0^\circ$					20
30°					20
45°					20
60°					20
90°					n = 20

Auf Basis der experimentellen Ermittlung konnte die elastische Bettungskennziffer, wie folgt ermittelt werden:

$$c_h = \frac{(0,19 + 0,012 \cdot d) \rho_k}{1,17 \cdot \sin^2(\alpha) + \cos^2(\alpha)} \quad (2.24)$$

Dabei sind:

- c_h Elastische Bettungskennziffer der Schraube in N/mm²
- d Durchmesser des stiftförmigen Verbindungsmittels in mm
- ρ_k charakteristischer Wert der Rohdichte in kg/m³
- α Winkel zwischen Kraft- und Faserrichtung

Wie zuvor beschrieben (vgl. 2-3.2.2), kann der Verschiebungsmodul K_{ser} durch erweitern der Prüfkörperdicke $t_{(\lambda)}$, wie folgt beschrieben werden:

$$\bar{K}_{ser} = \frac{(0,19 + 0,012 \cdot d) \rho_k}{1,17 \cdot \sin^2(\alpha) + \cos^2(\alpha)} \cdot t_{(\lambda)} \rightarrow \bar{K}_{ser} = \frac{\text{vgl. 2-3.2.2}}{\text{Hankison-Therm}} \cdot t_{(\lambda)} \quad (2.25)$$

Dabei sind:

- \bar{K}_{ser} Aus der elastischen Bettungskennzahl abgeleiteter Verschiebungsmodul in N/mm
- d Durchmesser des stiftförmigen Verbindungsmittels in mm
- ρ_k charakteristischer Wert der Rohdichte in kg/m³
- α Winkel zwischen Kraft- und Faserrichtung
- $t_{(\lambda)}$ Dicke des Prüfkörpers in Abhängigkeit der Schlankheit in mm

Auf Basis des bereits beschriebenen Verschiebungsmoduls, welcher den aktuellen Stand der Technik widerspiegelt (vgl. 2-3.2.2), ist bei einer separaten Betrachtung des Zähler- sowie des Nennertherms, ein identer Ausdruck des Zählers feststellbar:

Im Zuge der Analyse des Nenners kann die Implementierung des Hankison- Ansatzes festgestellt (vgl. 2-3.1.1) werden, welcher ein k_{90} von 1,17 enthält.

2-4 MODELLVERGLEICH

Auf Grundlage der vorangegangenen Darstellung der unterschiedlichen Bestimmungsgleichungen lateraler Kenngrößen der Tragfähigkeit und Steifigkeit soll im Anschluss eine Quantifizierung mit ausgewählten Größen (Verbindungsmitteldurchmesser, Rohdichte) für die Modelle der Tragfähigkeit erfolgen. Dazu soll vorangestellt eine Zusammenfassung und Gegenüberstellung der beschriebenen Gleichungen, separiert in Tragfähigkeit (Lochleibungsfestigkeit) und Steifigkeit (Verschiebungskennziffer) dargestellt werden:

	ÖNORM B 1995-1-1 [6]	ETA-11/0190 [9]	$f_{h,k}$: Blaß et al. [10] K_{ser} : Bejtka [14]
$f_{h,k} =$	$\left\{ \begin{array}{l} \text{für } d_{ef} > 6 \text{ mm} \\ \text{für } d_{ef} \leq 6 \text{ mm} \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} \frac{0,082(1-0,01 \cdot d) \rho_k}{k_{90} \cdot \sin^2(\alpha) + \cos^2(\alpha)} \\ 0,082 \cdot \rho_k \cdot d^{-0,3} \end{array} \right\}$	$\frac{0,082 \cdot \rho_k \cdot d^{-0,3}}{2,5 \cdot \cos^2(\varepsilon) + \sin^2(\varepsilon)}$	$\frac{0,019 \cdot \rho_k^{1,24} \cdot d^{-0,3}}{2,5 \cdot \cos^2(\varepsilon) + \sin^2(\varepsilon)}$
$K_{ser} =$	$2 \cdot \rho_m^{1,5} \cdot \frac{d}{23}$	$(0,19 + 0,012 \cdot d) \rho_k \left(\frac{90 + \varepsilon}{180} \right) \cdot t_{(\lambda)}$	$\frac{(0,19 + 0,012 \cdot d) \rho_m}{1,17 \cdot \sin^2(\alpha) + \cos^2(\alpha)} \cdot t_{(\lambda)}$

Auf Basis der Übersicht soll durch Auswahl quantifizierte Einflussgrößen, der im Anschluss formulierte Forschungsbedarf bestätigt werden. Dabei wird die Berechnung lateraler Kenngrößen auf die Lochleibungsfestigkeit eingegrenzt und die Variation der Einflussgrößen zur Gegenüberstellung der unterschiedlichen Modelle wie folgt festgelegt:

- Verbindungsmitteldurchmesser d Variation mit 6,0- bzw. 12,0 mm
- Charakteristische Rohdichte ρ_k Variation für C16, bzw. C30 mit 310- bzw. 380 kg/m³
- Winkelvariationen $\{\alpha-\varepsilon\}$ $\{00-90\}$, $\{90-00\}$, $\{90-90\}$

Bei den festgelegten Winkelkombinationen handelt es sich dabei um die Haupt-Kombinationen (vgl. Abschnitt 3-1) des Last- Faserwinkels α und des Verbindungsmittel -Faserwinkels ε , welche unter anderem im Zuge dieser Arbeit umfassend erforscht werden sollen.

In den nachfolgenden Zeilen soll beispielhaft die Bestimmung der Lochleibungsfestigkeit für ein stiftförmiges Verbindungsmittel des Durchmesser 6,0 mm bei einer charakteristischen Rohdichte von $\rho_k = 310 \text{ kg/m}^3$ der Winkelkombination {00-90}, als auch der Kombination {90-00} (vgl. Abbildung 2-10) für die zuvor beschriebenen Modelle gezeigt werden:

- ÖNORM B 1995-1-1 [6] (vgl. Abschnitt 2-3.1.1)

$$\{00-90\} \quad f_{h,k} = 0,082 \cdot \rho_k \cdot d^{-0,3} = 0,082 \cdot 310 \cdot 6,0^{-0,3} = 14,85 \text{ N/mm}^2 \quad (2.26)$$

$$\{90-00\} \quad f_{h,k} = 0,082 \cdot \rho_k \cdot d^{-0,3} = 0,082 \cdot 310 \cdot 6,0^{-0,3} = 14,85 \text{ N/mm}^2 \quad (2.27)$$

Dabei sind:

$f_{h,k}$ Charakteristischer Wert der Lochleibungsfestigkeit in N/mm^2
 ρ_k Charakteristischer Wert der Rohdichte des Holzes in kg/m^3
 d Bolzendurchmesser in mm

- Für ETA-11/0190 [9] (vgl. Abschnitt 2-3.1.1 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**)

$$\{00-90\} \quad f_{h,\varepsilon,k} = \frac{0,082 \cdot \rho_k \cdot d^{-0,3}}{2,5 \cdot \cos^2(\varepsilon) + \sin^2(\varepsilon)} = \frac{0,082 \cdot 310 \cdot 6,0^{-0,3}}{2,5 \cdot \cos^2(90^\circ) + \sin^2(90^\circ)} = 14,85 \text{ N/mm}^2 \quad (2.28)$$

$$\{90-00\} \quad f_{h,\varepsilon,k} = \frac{0,082 \cdot \rho_k \cdot d^{-0,3}}{2,5 \cdot \cos^2(\varepsilon) + \sin^2(\varepsilon)} = \frac{0,082 \cdot 310 \cdot 6,0^{-0,3}}{2,5 \cdot \cos^2(0^\circ) + \sin^2(0^\circ)} = 5,94 \text{ N/mm}^2 \quad (2.29)$$

Dabei sind:

$f_{h,\varepsilon,k}$ Charakteristischer Wert der Lochleibungsfestigkeit in Abhängigkeit von ε in Holz in N/mm^2
 ε Winkel zwischen Schraubenachse und Faserrichtung, $0^\circ \leq \varepsilon \leq 90^\circ$

- Für Blaß et al. [10] (vgl. Abschnitt 2-3.1.3)

$$\{00-90\} \quad f_{h,\varepsilon,k} = \frac{0,019 \cdot \rho_k^{1,24} \cdot d^{-0,3}}{2,5 \cdot \cos^2(\varepsilon) + \sin^2(\varepsilon)} = \frac{0,019 \cdot 310^{1,24} \cdot 6,0^{-0,3}}{2,5 \cdot \cos^2(90^\circ) + \sin^2(90^\circ)} = 13,63 \text{ N/mm}^2 \quad (2.30)$$

$$\{90-00\} \quad f_{h,\varepsilon,k} = \frac{0,019 \cdot \rho_k^{1,24} \cdot d^{-0,3}}{2,5 \cdot \cos^2(\varepsilon) + \sin^2(\varepsilon)} = \frac{0,019 \cdot 310^{1,24} \cdot 6,0^{-0,3}}{2,5 \cdot \cos^2(0^\circ) + \sin^2(0^\circ)} = 5,45 \text{ N/mm}^2 \quad (2.31)$$

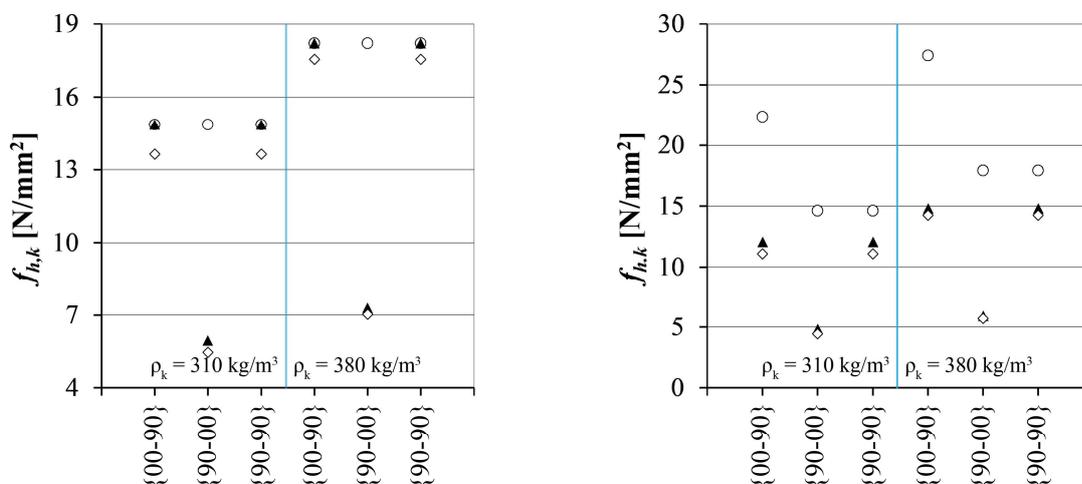


Abbildung 2-11 Modellvergleich: ○ ÖNORM B 1995-1-1; ▲ ETA-11/0190; ◇ Forschungsmodell Blaß
(links: charakteristischer Wert der Lochleibungsfestigkeit mit $d = 6 \text{ mm}$;
rechts: Charakteristische Lochleibungsfestigkeit mit $d = 12 \text{ mm}$)

Auf Grund der zuvor gezeigten, kalkulatorischen Ermittlung der charakteristischen Lochleibungsfestigkeit werden die Ergebnisse (vgl. Tabelle 2-3), wie nachfolgend angeführt, dargestellt:

Tabelle 2-3 Darstellung der Ergebnisse der Lochleibungsfestigkeit aus den Modellen, wie beschrieben

		für Verbindungsmittel d = 6,0 mm			für Verbindungsmittel d = 12,0 mm		
		ÖNORM	ETA	Blaß	ÖNORM	ETA	Blaß
$\rho_k = 310$	{00-90}	14,85	14,85	13,63	22,37	12,06	11,07
	{90-00}	14,85	5,94	5,45	14,62	4,82	4,43
	{90-90}	14,85	14,85	13,63	14,62	12,06	11,07
$\rho_k = 380$	{00-90}	18,2	18,2	17,55	27,42	14,79	14,25
	{90-00}	18,2	7,28	7,02	17,92	5,91	5,7
	{90-90}	18,2	18,2	17,55	17,92	14,79	14,25

Auf Basis der rechnerischen Bestimmung der Lochleibungsfestigkeiten und der grafischen Darstellung (vgl. Abbildung 2-11) soll im nächsten Schritt die Grundlage für die Formulierung des Forschungsbedarfs im Zuge einer Interpretation der Ergebnisse, wie folgt separiert, erfolgen:

- Allgemeine Feststellungen
- Interpretationen für den Verbindungsmitteldurchmesser $d = 6,0$ mm
- Interpretationen für $d = 12,0$ mm

Allgemein: Bei der Variation der Rohdichte konnte nach genauer Betrachtung der Bestimmungsgleichungen festgestellt werden, dass diese einerseits einen linearen, oder einen geringfügigen, exponentiellen Einfluss aufweisen und so lediglich annähernd eine „Skalierung“ der Ergebniswerte erfolgt. Auf Basis dieser Beobachtung kann keine markanter Abweichung, Bezug nehmend auf die unterschiedlichen Bestimmungsgleichungen der charakteristischen Lochleibungsfestigkeit, bei einer Variation der Rohdichte beobachtet (vgl. Abbildung 2-11) werden.

Für $d = 6,0$ mm: Bei der Ermittlung der charakteristischen Lochleibungsfestigkeit für den Verbindungsmitteldurchmesser $d = 6,0$ mm lässt sich vor allem bei der Winkelkombination {90-00} (vgl. Abbildung 2-12, rechts) eine erhebliche Abweichung des von dem in der aktuellen Normung verankerten Ansatzes feststellen. Die ist darauf zurückzuführen, dass bei der Bestimmungsgleichung für Verbindungsmittel mit einem effektiven Durchmesser $d_{ef} \leq 6$ mm weder der Last- noch der Kraftfaser Winkel berücksichtigt wird.

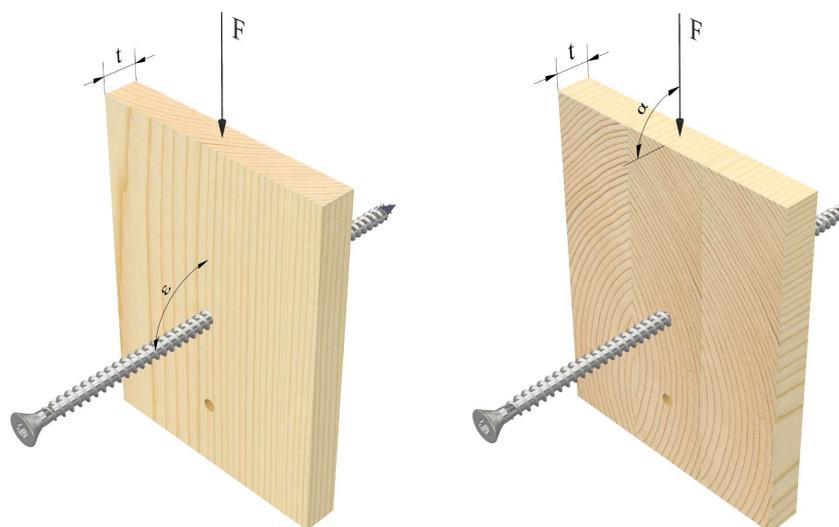


Abbildung 2-12 Für die Interpretation des Modellvergleichs, maßgebende Winkelkombinationen (links: Prüfkörper mit $\alpha = 0^\circ$, $\epsilon = 90^\circ$; rechts: $\alpha = 90^\circ$, $\epsilon = 0^\circ$)

Für $d = 12,0$ mm: Da der in der aktuellen Normung vorgeschlagene Bemessungsansatz zur Ermittlung der charakteristischen Lochleibungsfestigkeit die Bestimmungsgleichung in Abhängigkeit des effektiven Verbindungsmitteldurchmessers (vgl. Abschnitt 2-3.1.1) vorsieht, kann auf Grund der Anwendung der Gleichung für $d_{ef} > 6$ mm auch bei der Winkelvariation $\{00-90\}$ (vgl. Abbildung 2-12, links) eine erhebliche Abweichung zu den alternativen Modellen beobachtet werden.

Auf Grundlage des erfolgten rechnerischen Vergleichs, der grafischen Darstellung und der daraus resultierenden Interpretation soll im Anschluss der Forschungsbedarf formuliert werden:

2-5 FORMULIERUNG DES FORSCHUNGSBEDARFS

Auf Basis des festgehaltenen Stand des Wissens und der angeschlossenen Interpretationen soll an dieser Stelle sowohl der Forschungsbedarf formuliert, als auch ein Resümee mit der weiteren Vorgehensweise festgehalten werden:

Die Berechnungsmodelle, wie zuvor beschrieben berücksichtigen unterschiedliche Einflussgrößen, welche einerseits geringen, als auch andererseits großen Einfluss auf die Ergebnisse der Bestimmungsgleichungen bei lateraler Beanspruchung nehmen. Da auf Grundlage der bereits diskutierten Unterschiede in den einzelnen Modellen detailliert eingegangen wurde und dabei ein klarer Forschungsbedarf deklariert werden kann (vgl. Abschnitt 2-4), sollen nachfolgend ein Überblick über die grundsätzlich vorhandenen, als auch die nicht- vorhandenen Einflussgrößen gegeben werden:

- α Winkel zwischen Kraft- und Faserrichtung
- ε Winkel zwischen Achs- und Faserrichtung
- d Verbindungsmitteldurchmesser
- ρ_k Charakteristischer Wert der Rohdichte des Holzes

Dabei ist besonders hervorzuheben, dass in den jeweiligen Modellen sowohl α als auch ε einerseits nicht, andererseits getrennt voneinander berücksichtigt werden. Eine Kombination des Kraft- als auch des Verbindungsmittel- Faserwinkels ist in keiner Gleichung vorhanden und sollen daher in den nachfolgenden, nicht berücksichtigten Parametern erneut angeführt werden:

- u Einfluss der Holzfeuchte
- d_i Einfluss des Kerndurchmessers
- α Winkel zwischen Kraft- und Faserrichtung
- ε Winkel zwischen Achs- und Faserrichtung

Auf Grundlage der umfangreichen Diskussion der Einflussgrößen auf die Lochleibungsfestigkeit kann nachfolgend der Forschungsumfang ermittelt (vgl. Abschnitt 3-1) und beschrieben werden. Vorweggenommen sollen in dieser wissenschaftlichen Untersuchung die folgenden Parameter variiert werden:

- ρ Rohdichte
- u Holzfeuchtigkeit
- d Außendurchmesser mit dem dazugehörigen Innendurchmesser gemäß Hersteller
- d_i Kerndurchmesser bei identen Außendurchmesser
- α Winkel zwischen Kraft- und Faserrichtung
- ε Winkel zwischen Achs- und Faserrichtung

Dabei bilden besondere Schwerpunkte in der experimentellen Erforschung der lateralen Kenngrößen die Verbindungsmitteldurchmesser d und d_i , als auch der Winkel zwischen Kraft- Faserrichtung und der Winkel zwischen dem Achs- Faserrichtung.

KAPITEL 3: MATERIAL UND METHODEN

Auf Grundlage der Ausführungen zu den Bestimmungsgleichungen lateraler Kenngrößen (vgl. Abschnitt 2-2) und des formulierten Forschungsbedarfs (vgl. Abschnitt 2-5) soll in weiterer Folge eine Prüfplanung entwickelt werden, welche als übergeordnetes Ziel die Ermittlung dieser Größen verfolgt. Durch die im Resümee festgelegte Parametervariation kann nun eine Übersicht über das Prüfprogramm erstellt werden. In weiterer Folge sollen im Anschluss an die Prüfplanung sowohl die verwendeten Materialien, als auch die Herstellung der Prüfkörper, welche einen wesentlichen Teil dieser wissenschaftlichen Untersuchung einnehmen, beschrieben werden. Schlussendlich erfolgt unter Berücksichtigung der angewandten Methoden, als auch auf Basis der durchgeführten Prüfungen die Ermittlung der gewünschten Kenngrößen der Tragfähigkeit (Lochleibungsfestigkeit) und Steifigkeit.

- Übersicht über das Prüfprogramm und Formulierung des übergeordneten Ziels
- Verwendete Materialien
- Herstellung der Prüfkörper
- Angewandte Methoden
- Prüfdurchführung
- Ermittlung der lateralen Kenngrößen

3-1 PRÜFSERIEN UND ZIELE

Auf Basis der beschriebenen Einflussfaktoren (vgl. Abschnitt 2-4) auf die lateralen Kenngrößen der Tragfähigkeit und Steifigkeit kann in weiterer Folge ein Überblick über das Prüfprogramm gegeben werden. In einem ersten Schritt wird das Prüfprogramm auf Basis der in der Praxis bevorzugt, angewandten Festigkeitsklassen für Nadelholz (C16, C24, C30) und den zugeordneten, mittleren Rohdichten, in drei Rohdichteklassen separiert.

- Rohdichteklasse A $\rho_{\text{mean}} = 370 \text{ kg/m}^3$
- Rohdichteklasse B $\rho_{\text{mean}} = 420 \text{ kg/m}^3$
- Rohdichteklasse C $\rho_{\text{mean}} = 460 \text{ kg/m}^3$

Die weitere Zuordnung von variierenden Parametern (geometrische Kenngrößen des Gewindes) erfolgt im Anschluss zu jeder Rohdichteklasse, wobei das umfangreichste Prüfprogramm in der Klasse B erfolgte. Neben der Variation des nominellen Außendurchmessers ($d_{\text{nom}} = 6, 8, 12 \text{ mm}$) in Abhängigkeit des vom Hersteller deklarierten Innendurchmessers d_i , ist zusätzlich zum Außendurchmessers eine Variation des Innendurchmessers d_i in den „Hauptrichtungen“ bei den Schrauben $d_{\text{nom}} = 8,0 \text{ mm}$ geplant:

- „Referenzschraube“¹ $d_{\text{nom}} = 8,0 \text{ mm}, d_i = 5,2 \text{ mm}$
- Variation des Innendurchmessers $d_{\text{nom}} = 8,0 \text{ mm}, d_i = 6,1 \text{ mm}$

Da diese speziellen Richtungen (als „Hauptrichtung“ bezeichnet) im Zuge der nachstehenden Ausführungen mehrmals verwendet werden, sind diese als Kombination des Kraft- Faserwinkels α und des Last- Faserwinkels ε mit $\{\alpha - \varepsilon\}$ (vgl. Abbildung 3-1), wie folgt definiert:

- Hauptrichtung 1 $\{00-90\}$
- Hauptrichtung 2 $\{90-90\}$
- Hauptrichtung 3 $\{90-00\}$

¹ Da sich in weiterer Folge mehrere Ausführungen in dieser Dokumentation auf die Gewindegeometrie von $d_{\text{nom}} - d_i$ beziehen, wird diese als „Referenzgeometrie“, bzw. „Referenzschraube“ bezeichnet

3-1.1 Prüfkörperbeschriftung

Um im Zuge der Probekörpermanipulation während des gesamten Fertigungs- und Prüfprozesses eine eindeutige Bestimmung wesentlicher Prüfparameter zu gewährleisten, wurden diese in eine geschwungene Klammer gefasst. Da auf Grund der jeweiligen Variation des Kraft- bzw. des Last- Faserwinkels bis zu fünf Lamellen erforderlich sind, unterscheidet sich die Prüfkörperbezeichnung in der Anzahl der ersten Stellen. Dabei wurde die maßgebende Mittellamelle, in welcher das Verbindungsmittel nachfolgend appliziert und die Prüfung durchgeführt wird mit einer geschwungenen Klammer, wie zuvor beschrieben, gekennzeichnet.

Nachfolgend soll eine Prüfkörperbezeichnung an Hand seiner „umfangreichsten“ Darstellung gezeigt werden:

$$A28-A27-\{A28\}-A27-A28-12-2d-\{12\}-68-\{90-00\}-09^2$$

Dabei sind:

A28-A27- $\{A28\}$ -A27-A28	Lamellenaufbau eines 5- schichtigen Prüfkörpers
A	Rohdichteklasse $A \dots \rho_{\text{mean}} = 370 \text{ [kg/m}^3\text{]}$
28, 27	jeweilige, fortlaufende Lamellennummerierung innerhalb einer Rohdichteklasse
$\{A28\}$	maßgebende Mittellamelle, in welcher die Applikation des Verbindungsmittels erfolgt
12.....	Holzfeuchtigkeit $u = 12 \%$
2d.....	Schlankheit λ $\lambda = 2 \cdot d$
$\{12\}$	Nomineller Außendurchmesser $d = 12 \text{ mm}$
68.....	Innendurchmesser $d_i = 68 \cdot \frac{1}{10} = 6,8 \text{ mm}$
$\{90- \}$..	Kraft- Faserwinkel $\alpha = 90^\circ$
$\{ -00\}$..	Achs (Verbindungsmittel)- Faserwinkel $\varepsilon = 90^\circ$
09.....	Fortlaufende Prüfkörpernummer innerhalb einer Prüfserie
²	Deklaration der Anzahl von baugleichen Prüfkörpern

3-1.2 Ermittlung des Rotationswinkels ($\varphi_{\text{req},i}$)

Das Prinzip der nachfolgenden Prüfkörperdimensionierung und der Prüfdurchführung beruht darauf, dass sämtliche Winkelvariation vom Prüfkörper abgedeckt und die Prüfkfiguration im Zuge des gesamten Projektumfangs nicht adaptiert werden soll. Wird die Holzfaser um die y- Achse (orthogonal zur Verbindungsmittelachse, vgl. Abbildung 3-2) rotiert, so ergibt sich eine geometrische Abhängigkeit des Last- Faserwinkels (α) und Achs- Faserwinkels (ε). Bei einer Zunahme des Last- Faserwinkels von α nimmt der Achs- Faserwinkel gemäß der Gesetzmäßigkeit $\varepsilon = 90^\circ - \alpha$ ab.

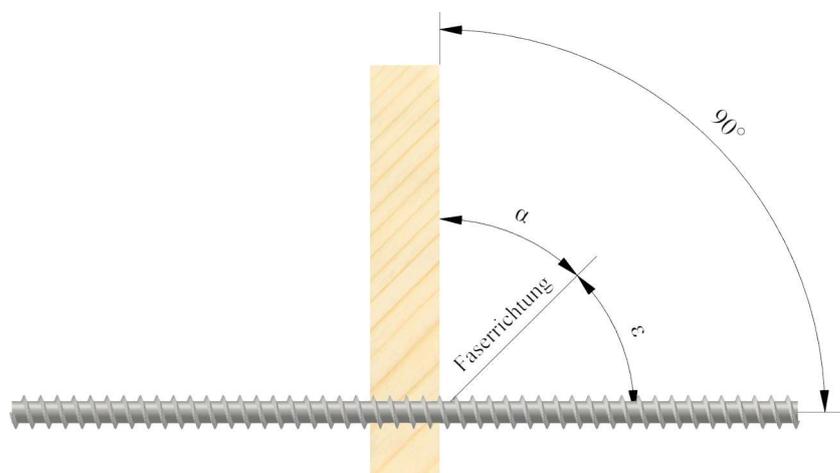


Abbildung 3-1 Definition des Kraft- Faserwinkels (α) und des Last- Faserwinkels (ε), Schnitt durch die Prüfachse der Winkelvariation $\{45 - 45\}$

Dieser Abhängigkeit ist der entwickelten Prüfkombination geschuldet, bei welcher sich die Achse der Lasteinleitung immer orthogonal zur Verbindungsmittelachse befindet. Summiert man den Last-Faserwinkel und den Achs- Faserwinkel, so muss sich ein rechter Winkel ausbilden: $\alpha + \varepsilon = 90^\circ$

Auf Grund dieser geometrischen Zusammenhänge zwischen des Last- Faserwinkels und Achs- Faserwinkels sind bei speziellen Kombinationen, bei welchen die Abhängigkeit „entkoppelt“ werden soll, besondere Betrachtungen und die Ermittlung eines zusätzlichen Drehwinkels ($\varphi_{req,i}$) in der folgenden Kombinationen gemäß Prüfplanung erforderlich:

- Winkelkombination I {45-60}
- Winkelkombination II {60-45}
- Winkelkombination III {60-60}

In den nachfolgenden Zeilen soll die Ermittlung des Drehwinkels ($\varphi_{req,i}$) für die zuvor dokumentierten Winkelkombinationen, gezeigt werden:

Durch eine Drehung der Faserrichtung um die jeweilige, dreidimensionale Koordinatenachse ergeben sich folgende Zusammenhänge:

Tabelle 3-2 Übersicht über die Rotationsmöglichkeiten im dreidimensionalen Raum

Rotation	Variation	unabhängig
x- Achse	α	-
y- Achse	α und ε	X
z- Achse	ε	-
y- und x- Achse	α und ε	✓

Die gewünschte Entkopplung des Last- Faser und des Achs Faserwinkels ($\alpha + \varepsilon \neq 90^\circ$) wird durch die Drehung um einen zur Prüfkörperseitenfläche stehenden Normalvektor, welcher der Verbindungsmittelachse (vgl. Abbildung 3-2) entspricht und daher durch die Drehung um die y- und x- Koordinatenachse, erreicht.

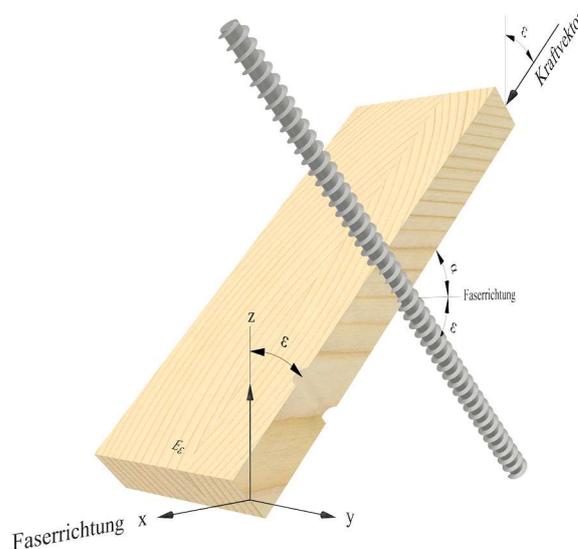


Abbildung 3-2 Definition des Kraft- Faserwinkels (α) und des Last- Faserwinkels (ε), Schnitt durch die Prüfachse der Winkelvariation {45 - 45}

Die Ermittlung der gewünschten Winkelvariationen, wie auf der Seite zuvor beschrieben, ist somit nur durch die Einführung des Rotationwinkels $\varphi_{\text{req},i}$ um die Verbindungsmittelachse möglich. Diese gliedert sich in folgende Teilschritte²:

- Festlegung eines dreidimensionalen Koordinatensystems (vgl. Abbildung 3-2)
- Rotation um die y- Achse
- Ermittlung eines Drehvektors (orthogonal zur „Grundebene“)
- Rotation des Kraftvektors um den „Grundvektor“ als Ausgangsbasis für $\varphi_{\text{req},i}$
- Darstellung der Ergebnisse der speziellen Winkelvariationen

Als Basis für die Bestimmung der Ursprungsebene, sowie für die weiterführenden Berechnungen werden Einheitsvektoren verwendet:

$$E_0 = P_0 + s \cdot \underline{a} + t \cdot \underline{b} \quad (3.1)$$

Dabei sind:

E_0	Ursprungsebene, durch den Koordinatenursprung mit	$P_0 = [0, 0, 0]$
\underline{a}	Richtungsvektor	$\underline{a} = [0, 1, 0]$
\underline{b}	Richtungsvektor	$\underline{b} = [0, 0, 1]$

Die nachfolgende Rotation der Ursprungsebene E_0 um die y- Koordinatenachse wird durch Multiplikation einer geeigneten Drehmatrix mit dem Richtungsvektor \underline{b} erreicht.

$$E_\varepsilon = P_0 + s \cdot \underline{a} + t \cdot \underline{b}_\varepsilon \quad (3.2)$$

Dabei sind:

E_ε	Grundebene, durch den Koordinatenursprung mit	$P_0 = [0, 0, 0]$
$\underline{b}_\varepsilon$	mit einer geeigneten Drehmatrix multiplizierter Richtungsvektor	$\underline{b}_\varepsilon = [-\sin(\varepsilon), 0, \cos(\varepsilon)]$
ε	Achs- Faserwinkel	

Auf Basis der Grundebene E_ε kann nun der um y- geneigte Kraftvektor $\underline{k}_\varepsilon$ ermittelt werden, welcher in weiterer Folge durch eine dreidimensionalen Drehmatrix um einen auf die Grundebene normal- stehenden Einheitsvektor $\underline{n}_\varepsilon$ (Verbindungsmittelachse) rotiert wird:

$$\underline{k}_\varepsilon = \underline{k}_0 \cdot \underline{R}_{\underline{y}(\varepsilon)} = [\sin(\varepsilon), 0, -\cos(\varepsilon)] \quad (3.3)$$

Dabei sind:

$\underline{k}_\varepsilon$	Mit dem Achs- Faserwinkel ε um die y- Achse rotierter Kraftvektor	
\underline{k}_0	Kraftvektor in der Ursprungsebene E_0	$\underline{k}_0 = [0, 0, -1]$
$\underline{R}_{\underline{y}(\varepsilon)}$	In der Mathematik übliche, dreidimensionale Drehmatrix (Drehung um die y- Achse)	

Der für die Rotation des Kraftvektors $\underline{k}_{\varepsilon,\varphi}$ benötigte Einheitsvektor $\underline{n}_\varepsilon$ (Verbindungsmittelachse) kann durch die bereits ermittelte Richtungsvektoren der rotierten Grundebene E_ε durch die Anwendung eines Kreuzprodukts berechnet werden:

$$\underline{n}_\varepsilon = \underline{a} \times \underline{b}_\varepsilon = [0, 1, 0] \times [-\sin(\varepsilon), 0, \cos(\varepsilon)] = [\cos(\varepsilon), 0, \sin(\varepsilon)] \quad (3.4)$$

Dabei sind:

$\underline{n}_\varepsilon$	Der zur Ermittlung des Kraft- Faserwinkels benötigte Einheitsvektor
-----------------------------------	---

² In den nachfolgenden Zeilen wird die Vorgehensweise zur Ermittlung von $\varphi_{\text{req},i}$ beschrieben – die detaillierte Berechnung ist im Anhang beigefügt

Durch einsetzen des berechneten Normalvektors $\underline{n}_\varepsilon$ zur Grundebene in eine dreidimensionale Drehmatrix kann im Anschluss die Grundgleichung (Bestimmung des Winkels zwischen zwei Vektoren) formuliert werden, aus welcher der benötigte Rotationswinkel $\varphi_{\text{req},i}$ (vgl. Abbildung 3-3) ermittelt werden kann:

$$\underline{R}_{(\varphi)} = \begin{bmatrix} \cos(\varepsilon)^2 \cdot (1 - \cos(\varphi)) + \cos(\varphi) & -\sin(\varepsilon) \cdot \sin(\varphi) & \cos(\varepsilon) \cdot (1 - \cos(\varphi)) \cdot \sin(\varepsilon) \\ \sin(\varepsilon) \cdot \sin(\varphi) & \cos(\varphi) & -\cos(\varepsilon) \cdot \sin(\varphi) \\ \cos(\varepsilon) \cdot (1 - \cos(\varphi)) \cdot \sin(\varepsilon) & \cos(\varepsilon) \cdot \sin(\varphi) & \cos(\varphi) + (1 - \cos(\varphi)) \cdot \sin(\varepsilon)^2 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$\underline{k}_{\varepsilon,\varphi} = \underline{k}_\varepsilon \cdot \underline{R}_{(\varphi)} \quad (3.6)$$

Dabei sind:

$\underline{k}_\varepsilon$ Mit dem Achs- Faserwinkel ε um die y- Achse rotierter Kraftvektor

$\underline{k}_{\varepsilon,\varphi}$ Durch die Drehmatrix $\underline{R}_{(\varphi)}$ um den Vektor $\underline{n}_\varepsilon$ rotierter Kraftvektor

$\underline{R}_{(\varphi)}$ Drehung um eine Ursprungsgerade, welche durch einen beliebigen Vektor definiert ist

Durch die mathematische Gesetzmäßigkeit zur Bestimmung des Winkels zwischen zwei Vektoren, kann schlussendlich durch die Berechnung des Winkels zwischen dem um ε gedrehten Kraftvektor $\underline{k}_\varepsilon$ und des Faservektors \underline{f}_0 ³ auf den gesuchten Rotationswinkel $\varphi_{\text{req},i}$ geschlossen werden:

$$\cos(\alpha) = \frac{\underline{k}_\varepsilon \cdot \underline{f}_0}{|\underline{k}_\varepsilon| \cdot |\underline{f}_0|} \rightarrow \cos(\alpha) = \underline{k}_\varepsilon \cdot \underline{f}_0 \rightarrow \underline{\underline{\varphi = \cos^{-1}\left(\frac{\cos(\alpha)}{\sin(\varepsilon)}\right)}} \quad \begin{cases} \text{für } \{45 - 60\} & \rightarrow \varphi_{\text{req},45-60} = 35,26^\circ \\ \text{für } \{60 - 45\} & \rightarrow \varphi_{\text{req},60-45} = 45,0^\circ \\ \text{für } \{60 - 60\} & \rightarrow \varphi_{\text{req},45-45} = 45,74^\circ \end{cases} \quad (3.7)$$

Dabei sind:

$\underline{k}_\varepsilon$ Um den Achs- Faserwinkel ε um die Y- Achse rotierter Kraftvektor

\underline{f}_0 Faservektor in der Ursprungsebene E_0

$$\underline{f}_0 = [1, 0, 0]$$

α Kraft- Faserwinkel

φ Rotationswinkel

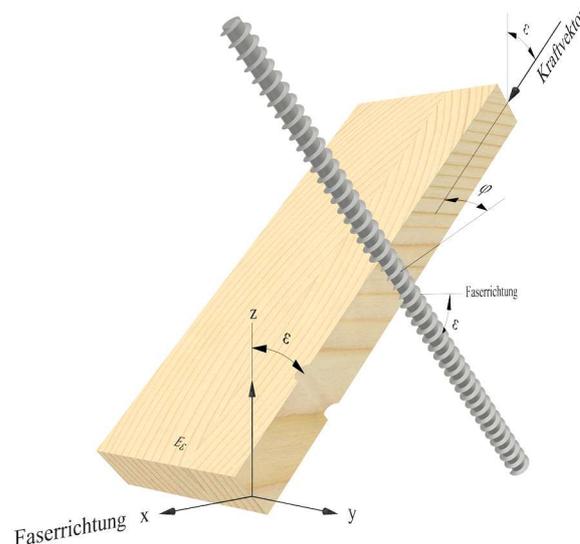


Abbildung 3-3 Definition des Rotationswinkels (φ),
Schnitt durch die Prüfachse der Winkelvariation {45 - 45}

³ Da es sich bei allen Vektoren um Einheitsvektoren handelt ist der Betrag des Vektors $\underline{k}_\varepsilon$, als auch \underline{f}_0 „1“

Auf Basis des erstellten Prüfprogramms und der detaillierten Machbarkeitsstudie von außergewöhnlichen Winkelkombinationen, sollen im nachfolgenden Absatz die Dimensionen der Probekörper festgelegt werden. Grundlage der Dimensionsermittlung, als auch der Entwicklung einer Prüfkonfiguration bildet die ÖNORM EN 383 [13], welche die Methodik zur Bestimmung von lateralen Kenngrößen von Nägel und Bolzen umfasst.

3-1.3 Festlegung der Prüfkörperdimensionen

Der Bestimmung von Prüfkörperdimensionen wird besonders bei der Verwendung von Holzbauschrauben, welche praxisnah ohne Vorbohren in einen Probekörper eingebracht werden, eine besondere Bedeutung zugesprochen. Diese werden üblicherweise je nach Hersteller mit unterschiedlichen Spitzen versehen, wobei besondere Ausbildungen zu einer Verminderung des Vorspaltens beim Eindrehvorgang der Schraube beitragen. Erfahrungsgemäß kommt es durch das Applizieren einer Schraube ohne einer besonderen Vorbohrwirkung lediglich zu einer Verdrängung der Holzfasern in die benachbarten Schichten. Die Faserbündel können den auftretenden Zugspannungen untereinander nicht mehr Stand halten und es kommt zum Quersugversagen und zu einer Rissbildung (vgl. Abbildung 3-4) entlang der Faserbündel. Um eine unzulässige Rissfortpflanzung während des Eindrehvorgangs, als auch im Zuge der Prüfdurchführung zu unterbinden, werden die gemäß der Normung (vgl. ÖNORM EN 383 [13]) vorgeschlagenen Prüfkörperdimensionen für „Bolzen oder Stabdübel“ zusätzlich überhöht. Unter Berücksichtigung dieser Erfahrungswerte können nachfolgend in Anlehnung an die Normung die Prüfkörperdimensionen bestimmt werden:

- Dicke $t_{(\lambda)} = \lambda_{\text{gew}} \cdot d_{\text{nom}}$
- Breite $b = 2 \cdot a_1$
- Länge $l_{(\alpha)} = 2 \cdot l_1$ (15)

Auf Basis bereits diskutierter Einflussgrößen wird in einem ersten Schritt die Dicke des Probekörpers $t_{(\lambda)}$ in Abhängigkeit der Schlankheit λ definiert. Die Schlankheit beschreibt dabei das Verhältnis von der Prüfkörperdicke zum Nenndurchmesser des angewendeten Verbindungsmittels und soll gemäß Normung zwischen $1,5 \div 4$ betragen. Durch die Zuweisung einer geeigneten Größe ($\lambda = 2$) kann so aus der nachfolgenden Bestimmungsgleichung die Prüfkörperdicke ermittelt werden:

$$\lambda = \frac{t}{d_{\text{nom}}} \rightarrow t_{(\lambda)} = \lambda_{\text{gew}} \cdot d_{\text{nom}} \quad (3.8)$$

Dabei sind:

- λ_{gew} Gewählte Schlankheit ($\lambda = 2$) basierend auf den bereits diskutierten Einfluss
- $t_{(\lambda)}$ Dicke des Prüfkörpers [mm]
- d_{nom} Nomineller Durchmesser des angewendeten Verbindungsmittels



Abbildung 3-4 Auftretende Rissbildung während der Schraubenapplikation
 (links: Prüfkörper der Variation {00-90}; rechts: Vergrößerung des Bereichs um die Schraube)

Die Breite b setzt sich aus den Mindestabständen a_i zusammen und ist unabhängig einer Variation des Kraft- Faserwinkels (α), orthogonal zur Faserrichtung festgelegt. In der normativen Regelung werden zur Bestimmung geeigneter Randabstände zwei Grenzzustände betrachtet (vgl. ÖNORM EN 383 [13]) und die entsprechenden Abstände, wie folgt vorgeschlagen:

- Winkelvariation {00 - 90} mit $a_1 = 3d$, sowie $l_1 = l_2 = 7d$
- Winkelvariation {90 - 90} mit $a_1 = a_2 = 5d$, sowie $l_5 = 20d$

Im Falle einer Variation des Kraft- Faserwinkels sind normativ keine detaillierten Grenzwerte vorgeschrieben. Es wird daher ein linearer Zusammenhang für b_{EN383} und l_{EN383} zwischen den zuvor angeführten Grenzzuständen angenommen. Unter Verwendung der nachfolgenden, normativen Bestimmungsgleichung zur Ermittlung der Probekörperbreite kann mit einen gewählten Randabstand $a_{1,gew}$ von $7d$ die Prüfkörperbreite in Abhängigkeit des gewählten Last- Faserwinkels ermittelt werden:

$$b_{EN383} = \begin{cases} \text{für } \{00-90\} & = 2 \cdot a_1 \\ \text{für } \{90-00\} & = a_1 + a_2 \end{cases} \quad (3.9)$$

$$b_{gew} = 2 \cdot \text{Tafelwert} \cdot d$$

Dabei sind:

- b_{EN383} Normativ vorgeschlagene Breite des Prüfkörpers in Abhängigkeit des Kraft- Faserwinkels (α)
- b_{gew} Gewählte Breite in Abhängigkeit des nominellen Verbindungsmitteldurchmessers [mm]
- $a_{1,gew}$ Abstand zum unbelasteten Rand [mm]
- a_2 Abstand zum belasteten Rand [mm]

Die Ermittlung der Prüfkörperdimensionen an Hand des Diagramms (vgl. Abbildung 3-6) ist wie folgt zu interpretieren:

Durch die Wahl des gewünschten Last- Faserwinkels (α) auf der Abszisse, kann die entsprechende Kurve zur Bestimmung der Prüfkörperbreite b_{gew} oder der Prüfkörperlänge l_{gew} selektiert, und der entsprechende „Tafelwert“ auf der Ordinate abgelesen werden. Durch die Multiplikation des „Tafelwertes“ mit dem zweifachen, nominellen Durchmesser des Verbindungsmittels können die gewünschten Prüfkörperdimensionen bestimmt werden.

Festgelegte Winkelvariationen zur Bestimmung der Prüfkörperdimensionen

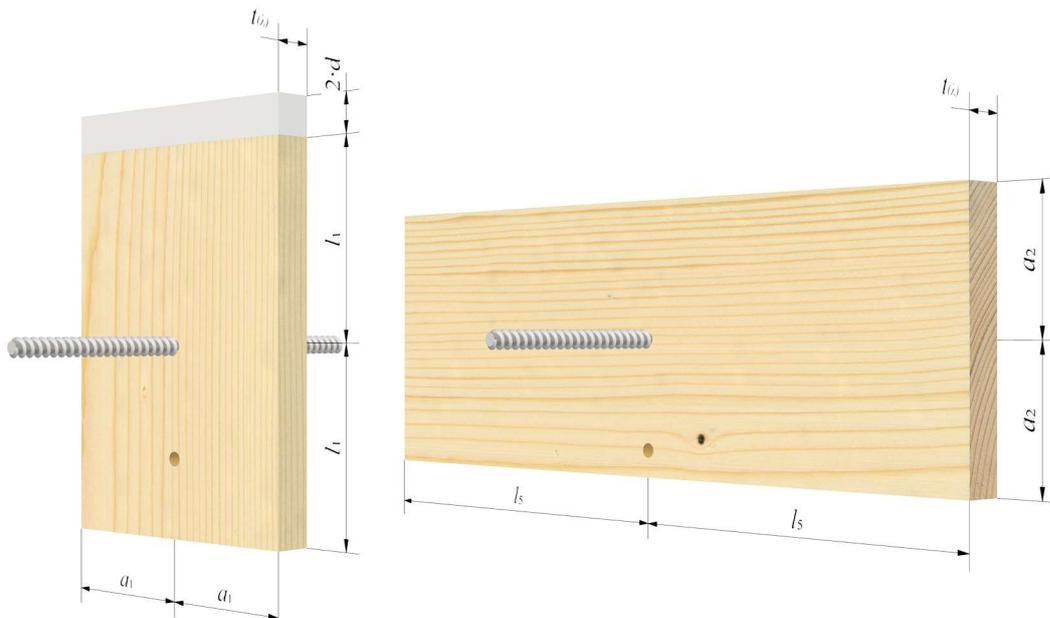


Abbildung 3-5 Normativ festgelegte Winkelvariationen zur Bestimmung der Prüfkörperdimensionen (links: Probekörper der Winkelvariation {00-90}; rechts: Variation {90-90})

Die Bestimmung der Prüfkörperlänge erfolgt analog zur Vorgehensweise der Probekörperbreite. Auf Basis des zuvor beschriebenen Spaltverhaltens durch die Schraubenapplikation, bzw. durch eine etwaige Rissfortpflanzung während der Prüfdurchführung bei der Winkelvariation {00 - 90} wurden zusätzliche Maßnahmen ergriffen. Eine Eindämmung der Rissbildung im Zuge der Prüfdurchführung wurde durch die Zugabe von $2d$ (vgl. Abbildung 3-5) sichergestellt:

$$l_{EN383} = \begin{cases} \text{für } \{00-90\} & = l_1 + l_2 \\ \text{für } \{90-00\} & = 2 \cdot l_5 \end{cases} \quad (3.10)$$

$$l_{gew} = 2 \cdot \text{Tafelwert} \cdot d$$

Dabei sind:

- l_{EN383} Normativ vorgeschlagene Länge des Prüfkörpers in Abhängigkeit des Kraft- Faserwinkels (α)
- l_{gew} Gewählte Länge in Abhängigkeit des nominellen Verbindungsmitteldurchmessers [mm]
- l_1, l_2 Abstand zum unbelasteten Rand [mm]
- l_5 Abstand zum belasteten Rand [mm]

Mit den aktuellen Bestimmungsfunktionen (vgl. Abbildung 3-6) können die Prüfkörperdimensionen in Abhängigkeit der Last- Faserwinkels (α) ermittelt werden. Daher gilt es nun die Dimensionierung für diejenigen Probekörper durchzuführen, bei welchen der Achs- Faserwinkel (ϵ) oder eine Kombination von (α) und (ϵ) auftritt. Da beim Applizieren von Schrauben in Prüfkörper mit einer Achs- Faserwinkelvariation eine geringe Neigung zur Rissbildung festgestellt werden konnte, wurden die Abmessungen äquivalent zu der Prüfkörperdimensionierung bei einem Kraft- Faserwinkel von $\alpha = 0^\circ$ gewählt.

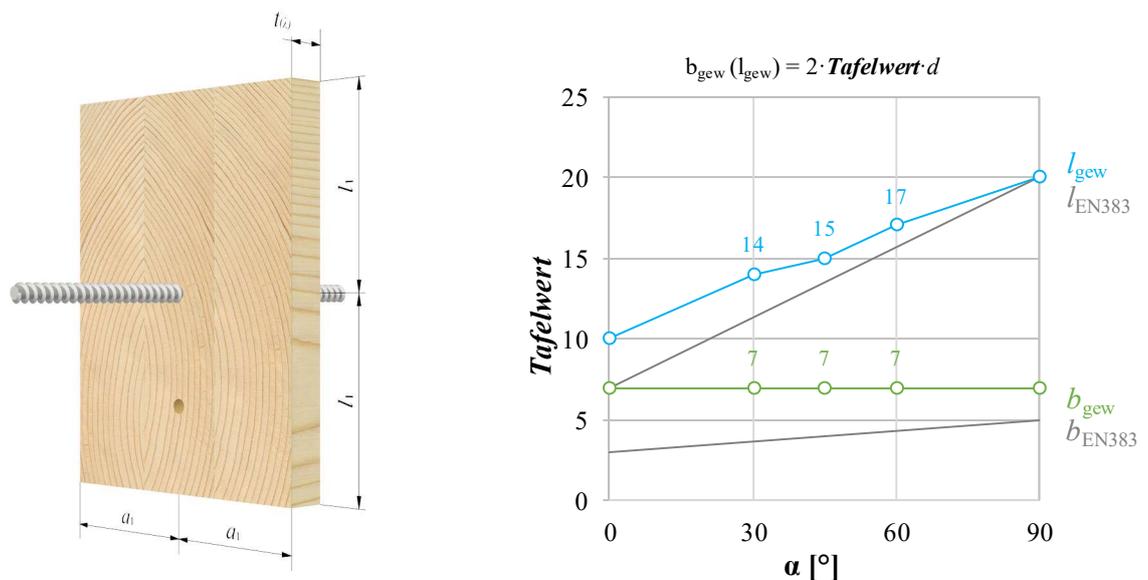


Abbildung 3-6 Bestimmungsfunktionen zur Ermittlung der Prüfkörperdimensionen
 (links: Probekörper der Winkelvariation {90-00}); rechts: Bestimmungsfunktionen

3-2 MATERIAL

In diesem Kapitel werden die Materialien beschrieben, die im Zuge dieser wissenschaftlichen Untersuchung verwendet wurden. Für die experimentelle Ermittlung lateraler Kenngrößen ist die Fertigung von speziellen Probekörper gemäß des definierten Prüfprogramms (vgl. Abschnitt 3-1) notwendig, welche aus einem geeigneten Rohmaterial hergestellt werden sollen. Um schlussendlich einen Probekörper zu erhalten, welcher in die Prüfkongfiguration appliziert und geprüft werden kann, sind folgende Materialien erforderlich:

- Gemäß Prüfprogramm definiertes Nadelholz (Fichte)
- Stiftförmiges Verbindungsmittel (Holzbauschraube)

Im nachfolgendem soll der umfangreiche Vorgang der Herstellung der Prüfkörper bis hin zur Prüfvorbereitung beschrieben werden, welcher neben der Entwicklung einer geeigneten Prüfkongfiguration wesentlich zum Gelingen zur Bestimmung gewünschter Kenngrößen beiträgt. Dieser gliedert sich, wie folgt in:

- Auswahl eines geeigneten, vorsortierten Rohmaterials und Ausbeuterechnung
- Ausbeuterechnung
- Nachsortierung
- Detailsortierung
- Prüfkörperherstellung
- Lagerung unter normierten Bedingungen
- Applikation des Verbindungsmittels und Vorbereitung für den Einbau in die Prüfkongfiguration

Die Planung und Entwicklung, sowie die Fertigung der Prüfkongfiguration inkl. Applikation des Probekörpers vor der Prüfdurchführung soll im nachfolgenden, angeschlossenen Kapitel (vgl. Abschnitt 3-3) gezeigt werden.

3-2.1 Holz

Grundsätzlich besteht diese experimentelle Untersuchung im Wesentlichen aus zwei Komponenten (Holz, stiftförmiges Verbindungsmittel), welche in der Zusammenstellung und die daraus resultierende Interaktion auf ein entsprechendes Prüfergebnis schließen lassen. Basis dieser Forschungsarbeit bildet das in der europäischen Holzwirtschaft „fest verwurzelte“ Nadelholz. Die dabei mengenmäßig am meisten gehandelten Holzarten sind Fichte (*Picea abies*, Pinaceae), als auch Tanne (*Abies alba*, Pinaceae), welche auf Grund der ähnlichen, holztechnologischen Eigenschaften (vgl. Abschnitt 2-2.5) als ein Sortiment gehandelt werden.

Im Zuge der in der Definition des Prüfumfangs festgelegten Parametervariation kann nachfolgend das Pflichtenheft mit den nötigen Anforderungen, welches an das zur Prüfkörperherstellung benötigte Rohmaterial gestellt wird, definiert werden:

- Holzspezies (Sortiment: Fi/Ta)
- Variabel Rohdichte
- Homogene Verteilung der Holzfeuchtigkeit über den Querschnitt des Ausgangsmaterials
- „Spannungsarme“ Querschnitte infolge eines schonenden Trocknungsprozesses
- Möglichst frei von Holzanomalien
- Effiziente, Ressourcen-schonende Herstellung

Nach einer entsprechenden Bewertung aller Kriterien stellen sich sowohl Konstruktionsvollholz (KVH), als auch die Brettschichtholzlamelle (BSH) als ein geeignetes Ausgangsprodukt zur Fertigung der Prüfkörper heraus.

Im nachfolgendem soll mittels einer Übersicht über den Produktionsprozess von Konstruktionsvollholz, die schlussendliche Auswahl des Rohstoffs zur Probekörperherstellung untermauert werden:

Das Prinzip in der Herstellung von Konstruktionsvollholz besteht darin, die festigkeitsmindernden Holzanomalien gemäß Sortiernorm aus einer technisch getrockneten „Rohstange“ mit großem Querschnitt durch einen Kappschnitt zu entfernen und mittels einer Keilzinkenverbindung und Verklebung zu einer Endlosstange wieder zu verbinden.

Durch die Verwendung von kleineren Querschnitten, wie diejenigen einer Brettschichtholzlamelle, lässt sich im Gegensatz zu KVH eine durch die technische Trocknung, homogenere Feuchteverteilung über den Querschnitt erzielen und sich so schlussendlich ein „formstabilerer“ Prüfkörper herstellen. Ein weiterer Vorteil bei der Herstellung von Probekörpern aus kleineren Ausgangsquerschnitten ist der zunehmende Homogenisierungsgrad und daher die dadurch sinkende Anzahl an ausgeprägten Holzanomalien, wie Äste oder durch die Trocknung initiierte Rissbildung.

Durch diese, im Vorhinein angestellten Überlegungen, wurde schlussendlich die Brettschichtholzlamelle als geeignetes Ausgangsmaterial definiert. Im nachfolgenden Abschnitt sollen unter Berücksichtigung des Charakteristikums in der Herstellung dieser Lamellen zunächst eine Ausbeuterechnung erstellt werden:

3-2.1.1 Brettschichtholzlamelle

Bei diesen, für die Produktion von BSH verwendeten „Rohlamellen“ handelt es sich um Lamellen höchster Güte, welche bereits nach ihrer Festigkeit (vgl. ÖNORM DIN 4074-1 [15]) vom Hersteller vorsortiert wurden. Dabei ist die präzise Kenntnis der Einschnitttechnologie und deren „Eigenheiten“ (etwaiger Versatz der Sägeblätter) für die folgende Ausbeuterechnung von entscheidender Bedeutung:

Auf Grund hoher Eigenspannungen im Rundholz (Reaktionsholz) kann es, während des in der Sägelinie integrierten Nachschnitts mittels der Doppelwellenkreissäge zu Instabilitäten und dem seitlichen „verdrücken“ der Sägeblätter kommen. Dieser so genannte Versatz und ein etwaiger Verzug während des Trocknungsprozesses (vgl. Abbildung 3-7) vermindern den effektiv, nutzbaren Querschnitt um mehrere Millimeter:

$$\frac{b_{ef}}{b} \approx 0,97; \quad \frac{t_{ef}}{t} \approx 0,93 \quad (3.11)$$

Dabei sind:

- b Nominelle angegebene Breite der Brettschichtholzlamelle $b = 145 \text{ mm}$
- t Nominelle Dicke $t = 43 \text{ mm}$
- b_{ef} Effektive Breite $b_{ef} \approx 243 \text{ mm}$
- t_{ef} Effektive Dicke $t_{ef} \approx 40 \text{ mm}$

Wird der Querschnitt im Zuge der Ausbeuterechnung zu übermäßig ausgenutzt, so kann schlussendlich ohne Berücksichtigung eines Versatzes, vor allem wie zuvor dargestellt in der Dicke, kein maßhaltiger Prüfkörper mehr hergestellt werden.

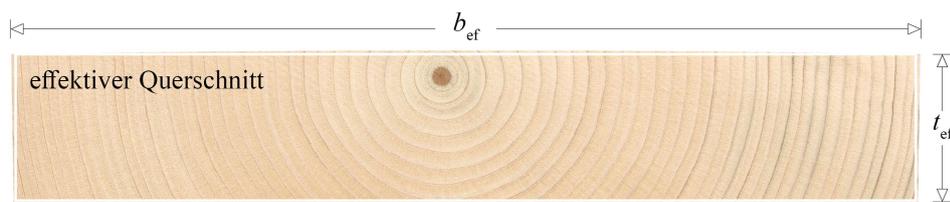


Abbildung 3-7 Brettschichtholzlamellen mit einer durch den Einschnitt und Trocknungsprozess initiierten Verminderung des nutzbaren Querschnitts

Nach einer umfassenden Beschreibung des Ausgangsmaterial und der Berücksichtigung der bei der Herstellung etwaigen Maßungenauigkeiten, wie beschrieben kann in weiterer Folge die Ausbeuterechnung erfolgen. Grundlage bildet dabei die generelle Definition des Prüfumfanges (vgl. Abschnitt 3-1), als auch die festgelegten Prüfkörperdimensionen (vgl. Abschnitt 3-1.3).

3-2.1.2 Ausbeuterechnung

Ziel der Ausbeuterechnung ist die Ermittlung der benötigten Lamellenanzahl je Rohdichteserie, sodass das Prüfprogramm und folglich alle Probekörper aus diesen vollständig hergestellt werden können. Im Zuge der Ausbeutermittlung ist bereits der Herstellprozess der Prüfkörper zu berücksichtigen, welcher wie nachfolgend angeführt, gemäß der definierten Winkelvariation aus der Prüfplanung zu trennen ist:

- Herstellung von Probekörper mit Variation von α
- Fertigung von Probekörper mit Variation von ε

Zur besseren Übersicht sollen nachfolgend, stellvertretend jeweils ein Prüfkörper der Variation des Kraft- Faserwinkels α , als auch des Verbindungsmittel- Faserwinkels ε angeführt (vgl. Abbildung 3-8) werden. Der wesentliche Unterschied in der Produktion der Prüfkörper der jeweiligen Winkelvariationen besteht aus dem ...

- Spaltprozess aus Einzel- Lamellenquerschnitten (Variation von α)
- Trennprozess der Prüfkörper aus so genannte Mehrfachquerschnitte (Variation von ε)

... an welchem die nachfolgende Ausbeuterechnung aufgebaut werden soll:

Zu Variation von ε : Grundlage bei der Herstellung von Probekörper, welche einer Variation des Verbindungsmittel- Faserwinkels unterliegen, bilden so genannte Mehrfachquerschnitte, welche in Ihrem Aufbau dessen eines Brettschichtholzbinders (vgl. Abbildung 3-8, rechts) ähneln. Auf Grund der Herstellung von diesen großen Mehrfachquerschnitten, aus welchen die Prüfkörper getrennt werden, spielt die Maßhaltigkeit der Rohlamellen eine eher untergeordnete Rolle. Nach der Produktion der „Rohblöcke“ erfolgt schlussendlich der finale Zuschnitt der gewünschten Prüfkörper.

Zu Variation von α : Die Basis bei der Prüfkörperherstellung, welche der Variation von α unterliegen, bilden Einzelquerschnitte, bei welchen die Maßhaltigkeit des Ausgangsmaterials eine wesentliche Rolle bei der Fertigung und Mengenermittlung einnehmen. Nachfolgend soll im Zuge der Ausbeuterechnung die Entnahme der Prüfkörperquerschnitte aus den Querschnitten des Ausgangsmaterials gezeigt werden:



Abbildung 3-8 Maßgebende Art von Prüfkörpern als Grundlage für die Ausbeuterechnung
(links: Prüfkörper der Winkelvariation {00-90}; rechts: Prüfkörper der Variation {90-00})

Wohingegen Probekörper der der Variation ε „lediglich“ aus den zuvor beschriebenen Rohblöcken getrennt werden, nimmt die Fertigung von Prüfkörpern der Variation α (vgl. Abbildung 3-8, links) eine wesentlich aufwändigere Planung in Anspruch. Im Zuge der Ausbeuterechnung sind dabei die Verluste durch den Fertigungsprozess von entscheidender Bedeutung, da so die Anzahl an fertigmachen Probekörper aus den Lamellenquerschnitt festgelegt wird und die Gesamtanzahl an benötigten Lamellen reduziert. Nachfolgend sollen die Verluste zufolge der maschinellen Bearbeitung aufgeschlüsselt werden:

- Spalten des Ausgangsquerschnitt 4,4 mm
- Querschnittsverlust zufolge Abrichten und Fügen, jeweils 1 ÷ 2 mm
- Querschnittsreduktion infolge des Dickenhobelns, jeweils 2 ÷ 3 mm

Das wesentlichste Maß stellt dabei die Summe aus dem Querschnittsverlust zufolge Abrichten und Dickenhobeln dar, welches auf der sicheren Seite gewählt in etwa 5 mm betragen sollte, um einen „sauber ausgehobelten“ Prüfkörper zu erhalten und so eine über die Prüferie homogen Dicke zu gewährleisten, um das Prüfergebnis nicht nachteilig zu beeinflussen.

Die dargestellten Verluste zufolge den einzelnen Bearbeitungsschritten sind am Beispiel der Prüfkörper, welche für das Verbindungsmittel mit dem nominellen Durchmesser von $d = 8,0$ mm (vgl. Abbildung 3-9, oben), als auch $d = 12$ mm (vgl. Abbildung 3-9, mitte) vorgesehen sind, wie nachfolgend angeführt, dargestellt:

- Querschnittsverlust infolge des Spaltprozesses
- Querschnittsverlust infolge Abrichten, Fügen und Dickenhobeln
- Fertig gestellter Probekörper

Besonders bei der Fertigung von Probekörper, bei welchen lediglich ein Einzelquerschnitt aus einer Lamelle entnommen wird ist auf die erfahrungsgemäß, besonders mangelnde Formstabilität zu achten. Auf Grund des, durch eine zu rasche Trocknung initiierten Eigenspannungszustands kommt es zu Verzug (vgl. Abbildung 3-9, mitte), welcher durch den zuvor beschriebenen Prozess des Abrichtens und Dickenhobelns kompensiert werden soll.

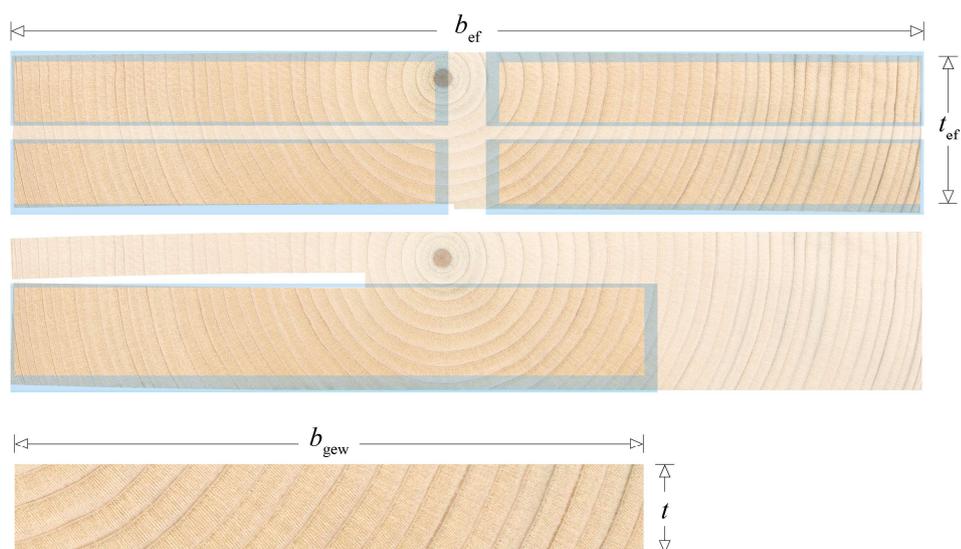


Abbildung 3-9 Maßgebende Art von Prüfkörpern als Grundlage für die Ausbeuterechnung
(links: Prüfkörper der Winkelvariation {00-90}; rechts: Prüfkörper der Variation {90-00})

Maßgebend für die Bestimmung der maximal erreichbaren Prüfkörper je Querschnitt sind die Probekörper mit den Abmessungen basierend auf den nominellen Verbindungsmitteldurchmesser $d = 8 \text{ mm}$. Auf Grundlage der zuvor getroffenen Annahmen können aus einem Lamellenquerschnitt vier Probekörper entnommen werden.

Schlussendlich kann auf Basis der getroffenen Annahmen die Mengenermittlung abgeschossen und die erforderliche Anzahl an Rohlamellen bestimmt werden, um auf Grundlage der Prüfplanung (vgl. Abschnitt 3-1) einen vollständigen Satz an Prüfkörpern aller Winkelvariationen je Rohdichte herstellen zu können. Die nachfolgende Darstellung der benötigten Lamellenanzahl beruht auf der Annahme, dass in etwa 60 % einer Brettschichtholzlamelle auf Grund der enthaltenen, unerwünschten Holzanomalien, verwertbar sind.

Auf Basis der geplanten Anzahl an Probekörper je Prüfserie ($n_{i,serie}$) kann so nachfolgend die Gesamtanzahl ($n_{i,ges}$) an benötigten Lamellen ermittelt werden. Dabei ist anzumerken, dass die geplante Anzahl von 15 Prüfkörper je Variation auf 19 erhöht wurde, um etwaige Einflüsse von Holzanomalien oder andere Abweichungen zufolge des Fertigungs- und Prüfprozesses abfedern zu können:

- Rohdichteklasse A $n_{A,serie} = 3$ $n_{A,ges} = 57$
- Rohdichteklasse B $n_{B,serie} = 4$ $n_{B,ges} = 76$
- Rohdichteklasse C $n_{C,serie} = 3$ $n_{C,ges} = 57$

Nach der Auswahl des geeigneten Rohmaterials (vgl. 3-2.1.1), sowie der nötigen Anzahl an Rohlamellen soll nachfolgend beginnend bei der Qualitätsermittlung des Rohmaterials der gesamte Fertigungsprozess umfassend beschrieben werden:

Um schlussendlich Probekörper zu erhalten, welche sich für die Prüfdurchführung eignen, ist ein mehrstufige Sortierprozess erforderlich, welcher sich wie folgt gliedert:

- Nachsortierung im Werk und Auswahl an geeigneten Rohlamellen für die Prüfkörperfertigung
- Visuelle Detailsortierung
- Begleitende Sortierung der Prüfkörper im Zuge des Fertigungsprozesses

Nachfolgend werden die jeweiligen Sortierprozesse beschrieben, da es sich bei der laufenden Sortierung während des Fertigungsprozesses um ein wesentliches Qualitätsmerkmal einer wissenschaftlichen Untersuchung handelt:

3-2.1.3 Visuelle Nachsortierung

Ziel der visuellen Nachsortierung als Teil des gesamten Sortierprozesses ist die Auswahl an geeigneten Rohlamellen für die anschließende Detailsortierung, als Basis für die Prüfkörperfertigung.,

Dabei ist das übergeordnete Ziel nicht die Beurteilung von festigkeitsmindernden Einflüssen mit einer angeschlossenen Zuordnung zu einer Festigkeitsklasse, welche in der Regel unter einer Sortierung verstanden wird, sondern die generelle Vermeidung von diesen Einflüssen und Homogenisierung des Rohmaterials.

Grundlage der visuellen Nachsortierung bilden die vom Hersteller zur Verfügung gestellten Lamellen der Festigkeitsklassen T_{14} und T_{22} (vgl. ÖNORM EN 338 [16]). Daher soll in einem ersten Schritt eine Zuordnung der jeweiligen T- Klassen auf Basis der mittleren Rohdichte zu den in dieser Untersuchung definierten Rohdichteklassen gemäß den C- Klassen (vgl. Abschnitt 3-1) erfolgen:

$$\begin{aligned}
 \rho_{C18,mean} &= 380 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \text{n.v.} \\
 \rho_{C24,mean} &= 420 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{T14,mean} = 420 \text{ kg/m}^3 \\
 \rho_{C30,mean} &= 460 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{T22,mean} = 470 \text{ kg/m}^3
 \end{aligned}
 \tag{3.12}$$

Dabei sind:

- $\rho_{Cii,mean}$ Mittelwert der Rohdichte auf Basis visueller Festigkeitssortierung in kg/m^3
- $\rho_{Tii,mean}$ Mittelwert der Rohdichte auf Basis maschineller Festigkeitssortierung in kg/m^3

Da im Zuge der Sortierung vom Hersteller keine äquivalente T-Klasse zu der in dieser Forschungsarbeit definierten Rohdichteklasse A mit einer mittleren Rohdichte von 380 kg/m^3 zur Verfügung gestellt werden konnte, wurde diese in Anlehnung der unteren Rohdichtegrenzwerte aus der Klasse T_{14} sortiert.

Um schlussendlich eine gute Qualität der Prüfkörper zu erhalten und um die Ausreißerbereinigung gering zu halten, wurde besonderer Hauptaugenmerk auf die Auswahl von qualitativ, hochwertigem Rohmaterial gelegt. Daher sollen im nachfolgendem die einzelnen Teilschritte der visuellen Nachsortierung beschrieben und wie folgt gegliedert werden:

- Abschätzen der Rohdichte ρ_{mean} gemäß ÖNORM ISO 3130 [17]
- Beurteilung festigkeitsmindernder Holzanomalien in Anlehnung an ÖNORM DIN 4074-1 [15]
- Kontrolle der Holzfeuchtigkeit u laut ÖNORM EN 13183-2 [18]

Auf Grundlage der optischen Beurteilung der Jahrringbreite der Lamellen je Paket (vgl. Abbildung 3-10, links) wurden in einem ersten Schritt geeignete Pakete erfasst und für die weitere Sortierung gekennzeichnet (vgl. Abbildung 3-10, rechts). Ein guter Indikator zur Bestimmung der Rohdichte ist dabei die Jahrringbreite. Mit einer geringen Jahrringbreite steigt der Anteil an Spätholzzonen im betrachteten Bereich (vgl. Abbildung 3-11) und es lässt sich so auf eine zunehmende Rohdichte schließen.

Zur Abschätzung der Rohdichte: Die Rohdichte beschreibt die Masse bei einer vorherrschenden Ausgleichsfeuchte bezogen auf das dazugehörige Volumina (vgl. ÖNORM ISO 3131 [19]) und wird üblicherweise in kg/m^3 angegeben:

$$\rho_u = \frac{m_u}{V_u} \quad (3.13)$$

Dabei sind:

- ρ_u Rohdichte bei einer Holzausgleichsfeuchte u in kg/m^3
- u Holzfeuchtigkeit zum Zeitpunkt der Wiegung in %
- m_u Masse des Prüfkörpers bei einem Feuchtegehalt u in kg
- V_u Das Volumen des Prüfkörpers bei einer Holzfeuchtigkeit u in m^3

Auf Basis dieser Grundgleichung zur Ermittlung der Rohdichte kann durch geringfügige Modifikation über eine präzise Wiegung der Lamellen schlussendlich auf die Rohdichte der Prüfkörper nach Fertigung geschlossen werden.



Abbildung 3-10 Prozess zur Bestimmung geeigneter Rohlamellen für die Probekörperfertigung
(links: Erste Eischätzung der Rohdichte über die Jahrringbreite
rechts: Auswahl von geeigneten Paketen im Zuge des Sortierprozesses)

Da das wesentliche Ziel der Prüfkörperfertigung der Ausschluss von Holzanomalien ist, soll dies im Zuge der Nachsortierung bereits in Form einer Rohdichtekorrektur von 5 % (vgl. ÖNORM EN 384 [20]) berücksichtigt werden. Die korrigierte Rohdichte kann wie nachfolgend dargestellt, ermittelt werden:

$$m_{\text{lam}} = \rho_{\text{kl,req}} \cdot V_{\text{lam}} \cdot 1,05 = \rho_{\text{kl,req}} \cdot b_{\text{lam}} \cdot t_{\text{lam}} \cdot l_{\text{lam}} \cdot 1,05 \quad (3.14)$$

$$\rho_{\text{kl,req}} \cdot 0,243 \cdot 0,043 \cdot 4,08 \cdot 1,05 = \rho_{\text{kl,req}} \cdot 0,044764 \text{ m}^3 \quad \pm 5\%$$

Dabei sind:

- m_{lam} Rohdichte bei einer Holzgleichsfeuchte u in kg/m^3
- $\rho_{\text{kl,req}}$ Geforderte Rohdichte der jeweiligen Rohdichteklasse in kg/m^3
- V_{lam} Volumen der Rohlamelle in m^3
- b_{lam} Breite der Brettschichtholzlamelle in m
- t_{lam} Dicke der Brettschichtholzlamelle in m
- l_{lam} Länge der Brettschichtholzlamelle in m

Im Zuge der Sortierung ist eine Definition einer zulässigen Streuung der Lamellenmassen erforderlich (mit $\pm 5\%$ festgelegt), in welchem eine akzeptable Abweichung vom berechneten Mittelwert der Masse auftritt.

Beurteilung von Holzanomalien: Um aussagekräftige, laterale Kenngrößen im Zuge einer experimentellen Ermittlung zu erhalten, sind Prüfkörper von besonderer Qualität und Güte erforderlich. Daher ist ein unbedingt einzuhaltendes Qualitätskriterium, die Vermeidung von Größen, welche auf das Messergebnis ungewollten Einfluss nehmen. Somit sollen im Zuge der Nachsortierung diese Größen einerseits deklariert, während der Sortierung bestimmt und in weiterer Folge bei der Fertigung der Prüfkörper vermieden werden:

- Astigkeit
- Markröhre
- Jahrringbreite
- Reaktionsholz (Druckholz)
- Holzfeuchte (mittels elektrischem Widerstandsverfahren, wie nachfolgend beschrieben)

Da es sich bei dem Ausgangsmaterial zur Herstellung von Prüfkörper bereits um vorsortiertes Material (vgl. ÖNORM DIN 4074-1 [15]) handelt, wurde eine bereits eine Beurteilung von festigkeitsmindernden Holzanomalien durchgeführt. Bei nachfolgend durchgeführten, visuellen Nachsortierung werden Holzanomalien generell als schädigend klassifiziert und sollen demnach zur Gänze vermieden werden.

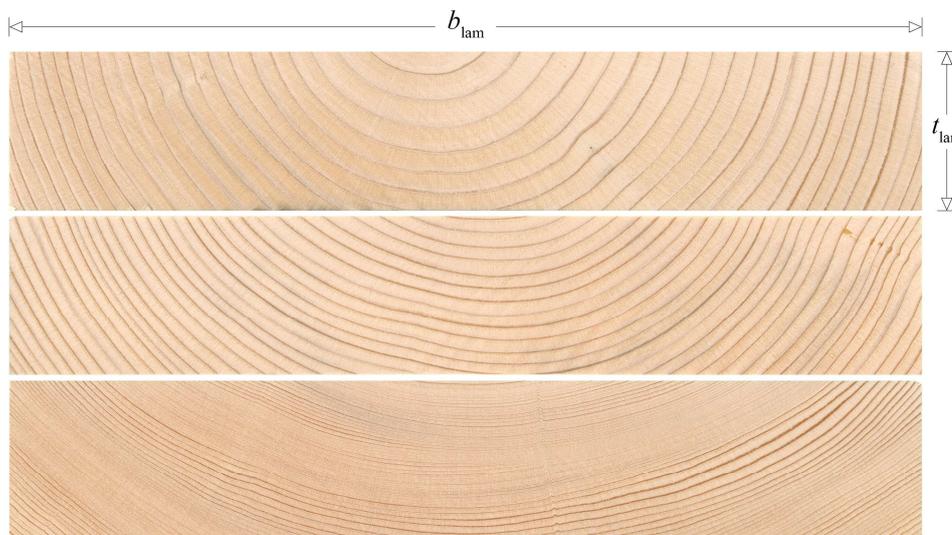


Abbildung 3-11 Erste Abschätzung der Rohdichte auf Basis der Jahrringbreite
(oben nach unten: Prüfkörper der Rohdichteklassen A ÷ C)

Im Zuge der visuellen Beurteilung erfolgt aus der Symbiose eines gedanklichen „Zuschnittnetzes“, basierend auf die Ausbeuterechnung und die Oberfläche der Rohlamelle die Bestimmung von Bereichen, welche frei von „Holzfehlern“ sind. Übersteigt der Grad an fehlerfreien Bereichen einen intuitiven, erfahrungsgemäßen Grenzwert, so wird die vorliegende, beurteilte Lamelle als „zur Prüfkörperherstellung geeignet“ deklariert und im Anschluss einem vorgesehenen „Sortierplätze“ (vgl. Abbildung 3-12, links) zugeordnet.

Besonders bei der Sortierung von Lamellen, welche der Rohdichteklasse A zugeordnet werden sollen, konnte eine Abnahme der Qualität durch überdurchschnittlich große Artigkeit und Reaktionsholz festgestellt werden. Querschnitte mit geringer Rohdichte und daher mit einer einhergehenden großen Jahrringbreite stammen vorwiegend aus Randgebieten von forstwirtschaftlichen Nutzflächen. In diesen Gebieten erhält der Baum für das Wachstum genügend Sonnenlicht und deckt den Bedarf an, für die Photosynthese erforderlichen Stoffen, unter anderem durch die Ausbildung von Ästen.

In Summe war ein Gesamtsortierolumina von 8 Paketen (~ 18,57 t) á 125 Lamellen je Paket (gesamt ca. 1000 Lamellen) erforderlich, um die gewünschte Anzahl an Rohmaterial zu erhalten.

Holzfeuchtigkeit: Da mit einer Zunahme der Feuchtegehalts bis zum Erlangen des Fasersättigungsbereichs nicht nur ein Quellen und Schwinden stattfindet, sondern auch eine einhergehende Reduktion der Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften (vgl. Niemz, Sonderegger [21]) ist neben der qualitativen Beurteilung die präzise Kenntnis der Holzfeuchtigkeit von großer Wichtigkeit. Gemäß Prüfprogramm ist eine Holzausgleichsfeuchte von $u = 12\%$ anzustreben (vgl. Abschnitt 3-1), welche im Zuge der visuellen Nachsortierung durch ein geeignetes Messverfahren stichprobenartig überprüft werden soll:

Zur Bestimmung der Holzausgleichsfeuchte wurde das Messverfahren nach dem elektrischen Widerstandsprinzip angewandt, welches der Gesetzmäßigkeit des sinkenden elektrischen Widerstands bei einer zunehmenden Holzfeuchte unterliegt. Bei diesem Messverfahren wird eine holzartenspezifische Kennlinie verwendet, welche eine genaue Kenntnis der Temperatur voraussetzt. Nach Applikation der Messelektroden an einer geeigneten Messstelle, welche frei von Holzanomalien sein soll, wurde demnach die Lufttemperatur zur Annäherung der vorliegenden Holztemperatur verwendet. Im Zuge der Messdurchführung wurden die Messelektroden mittels einer „Rammvorrichtung“ (vgl. Abbildung 3-12, rechts) in das Holz getrieben. Die notwendige Einbringtiefe der Elektroden soll dabei ca. 30 % des Schnittholzes erreichen (vgl. ÖNORM EN 13183-2 [18]). Verwendet wurde das Feuchtigkeitsmessgerät GANN Hydromette M 2050, bei welchem eine Applikation der Messelektroden orthogonal zur Faserrichtung vorgeschrieben ist.



Abbildung 3-12 *Qualitative Beurteilung der Brettschichtholzlamellen
(links: Jeweiligen Sortierplätze nach der Rohdichte; rechts: Rammelektrode)*

3-2.1.4 Visuelle Detailsortierung

Auf Basis der visuellen Nachsortierung ist das Ziel der Detailsortierung die Beurteilung sowohl der Oberseite, als auch der Unterseite der Rohlamelle und eine Bereichsdefinition, aus welchem schlussendlich ein Prüfkörper entstehen soll. Dabei kommen bereits während des Beurteilungsprozesses folgende Methoden zur Herstellung eines qualitativ hochwertigen Prüfkörper, welcher von sämtlichen unerwünschten Einflüssen (Holzanomalien) befreit wurde, zum Einsatz:

- Auskappen von Bereichen, welche unerwünschte Einflüsse enthalten
- Explizites Platzieren von Holzanomalien in Bereich, die im Zuge der weiteren Bearbeitung entfallen
- Planung der Lage von Holzanomalien in Bereichen des Probekörpers, welche im Zuge der Prüfdurchführung und Entnahme der Darrproben keinen Einfluss nehmen

Auf Grundlage der zuvor beschriebenen, im Zuge der visuellen Nachsortierung erfolgten Bestimmung der Lamellenmasse und der daraus abgeleiteten Rohdichte wurde zunächst eine aufsteigende Sortierung der Lamellen vorgenommen. Nachdem die Fertigung eines vollständigen Satz Prüfkörper nicht aus einer Lamelle möglich ist, bildet die Sortierung nach Masse eine wesentliche Grundlage, um keine wesentlichen Unterschiede in der Rohdichte, zwischen den einzelnen Prüfkörpern zu erhalten.

Schlussendlich kann die visuelle Detailsortierung und daher die Bestimmung der Teilbereiche (vgl. Abbildung 3-13) erfolgen, die in weiterer Folge als Grundlage der Probekörperherstellung dienen. Dabei ist anzumerken, dass vor allem bei der Herstellung von Prüfkörpern aus Mehrfachquerschnitten eine zusätzliche Längenzugabe zur sicheren Manipulation während des Zuschnitts mittels der Formatsäge erfordern. Zu diesem Zweck werden für die Probekörperherstellung nicht verwertbare Bereiche in die Mehrfachquerschnitte als gleichseitig , ausgerichtete Längenzugabe beigefügt.

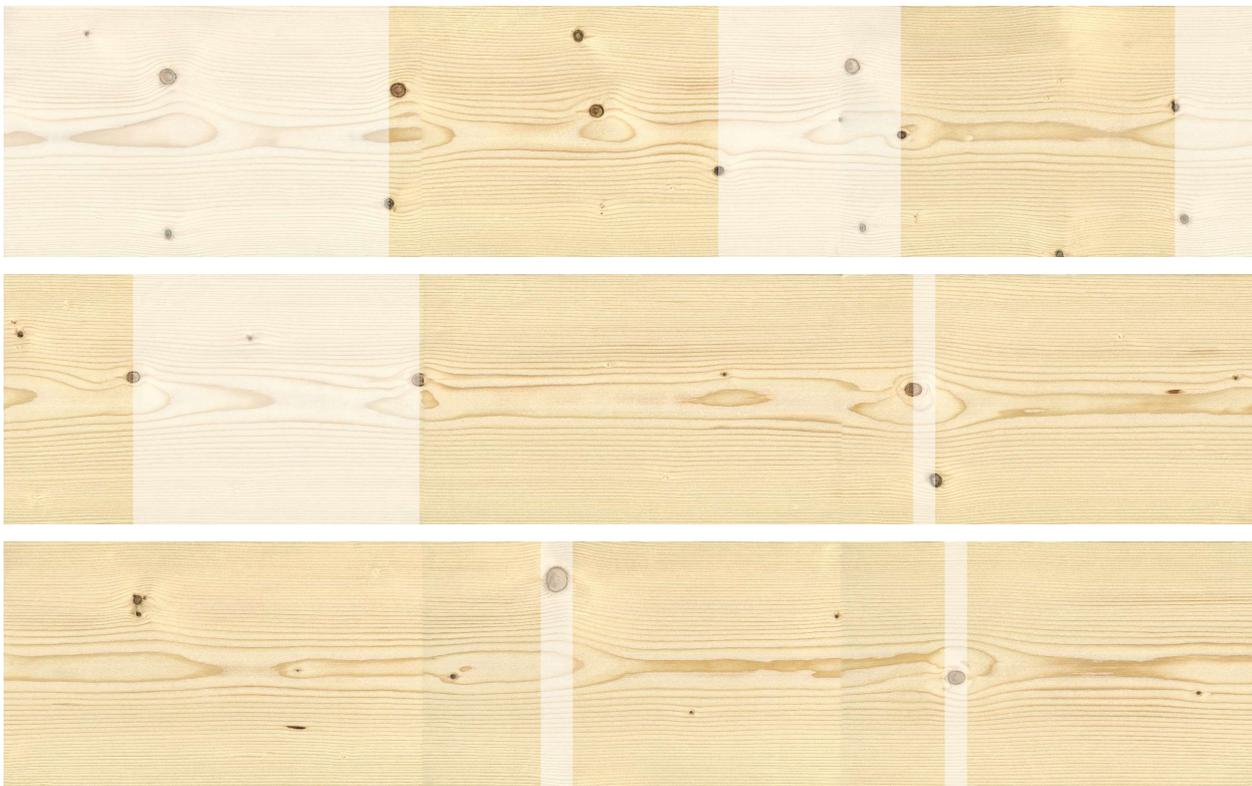


Abbildung 3-13 Brettchichtholzlamelle der Klasse B mit verwendbaren Teilbereichen

3-2.1.5 Prüfkörperherstellung

Mittels des umfangreichen Sortierprozesses wurde der Grundstein für die weitere, mechanische Bearbeitung gelegt. Nach dem Zuschnitt der in der visuellen Detailsortierung definierten Bereiche kann aus diesen Lamellenteilen schlussendlich die Herstellung der Prüfkörper erfolgen. Dabei soll in zwei „Fertigungslinien“ in der Probekörperfertigung unterscheiden werden:

- Prüfkörper, Variation des Kraft- Faserwinkels α (vgl. Abbildung 3-14, links)
- Prüfkörper, Variation des Verbindungsmittel- Faserwinkel ε (vgl. Abbildung 3-14, rechts)

Nachfolgend soll auf die jeweiligen Unterschiede in der Fertigung eingegangen, als auch die im Zuge der Fertigung aufgetretenen Probleme und Lösungsansätze beschrieben werden:

Fertigung der Probekörper Variation α

Probekörper, welche einer Variation des Kraft- Faserwinkels unterworfen sind, werden aus kürzeren Lamellenabschnitten gefertigt, welche in einem „Spaltprozess“ aus der Rohlamelle getrennt werden. Dabei können aus einem Lamellenquerschnitt, in Abhängigkeit der Probekörperdimension bis zu vier Prüfkörper entnommen (vgl. Abbildung 3-9, oben) werden.

Im Zuge des Spaltens, als welches das Trennen eines Holzquerschnitts in mehrere, kleinere Querschnitte verstanden wird, wurde in einem ersten Ansatz ein wechselbezahntes Sägeblatt (vgl. Abbildung 3-15, rechts), verwendet, welches üblicherweise für solche Schnitte Anwendung findet. Dabei kam es bereits unmittelbar nach dem Eintauchen des Sägeblatts durch die frei- werdenden Spannungen und die daraus resultierenden Reibung zwischen Holz und Säge zum Stillstand des Sägeblatts. Dies ist ein Indiz dafür, dass ein aus einer zu scharfen Trocknung resultierender Eigenspannungszustand vorliegt, welcher bei einer Veränderung des Querschnitts und des vorherrschenden Gleichgewichtszustands zu enormen Forminstabilitäten führt. Auch die Methode des „verdeckten Schnittes“, bei welcher anfänglich nur die Hälfte des Werkstücks durchtrennt wird führte zu keinem zielbringenden Ergebnis. Die durch die Reibung zwischen Sägeblatt und Werkstück initiierte Temperatur führt zum beulen des Sägeblatts, welches weder durch den eingewalzten Eigenspannungszustand, noch durch Dehnungsfugen in der Säge aufgenommen werden können.

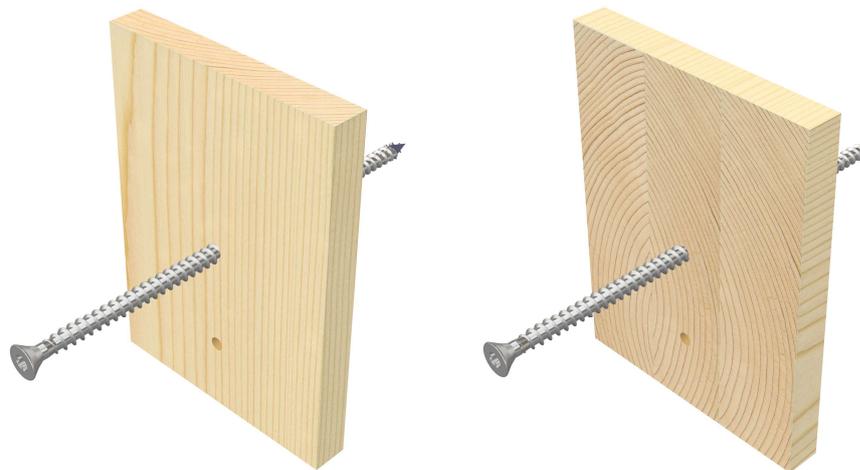


Abbildung 3-14 Grundsätzliche Unterscheidung bei der Fertigung der Prüfkörper
(links: Probekörper mit Variation des Kraft- Faserwinkels ;
rechts: Variation des Achs- Faserwinkels aus einem „Mehrfachquerschnitt“ hergestellt)

Die Verwendung einer Wechselzahnsäge mit geringer Zahnanzahl zur Durchführung des Längsschnittes erscheint somit als völlig ungeeignet und wird in weiterer Folge durch ein Sägeblatt mit sogenannten Räumschneiden substituiert. Diese spezielle Ausführung zeichnet sich durch eine geringe Zahnanzahl, große Spanräume und durch Räumschneiden (vgl. Abbildung 3-15, links), welche über den Grundkörper verteilt sind, aus. Kommt es bei diesem Blatt zu einer spannungsinjizierten Verformung, so schneidet sich der Sägeblattkörper durch die angeordneten Räumschneiden selbständig frei.

Durch die gewonnenen Erkenntnisse auf Basis der zuvor beschriebenen Bearbeitung ist von einem erhöhtem Konditionierungsbedarf, daher einem Angleichen der Holzfeuchtigkeit und somit einer Verringerung des Feuchtegefälles über den Querschnitt, auszugehen. Je länger der Konditionierungszeitrahmen, welcher dem Rohmaterial zur Verfügung gestellt werden kann, desto formstabiler sind die Prüfkörper schlussendlich herstellbar.

Im Anschluss erfolgt die Kompensierung der entstandenen Maßungenauigkeiten zufolge den zuvor beschriebenen Prozesse in Form von Umfangplanfräsen (konventionell als hobeln bezeichnet) und so die Herstellung eines passgenauen, prismatischen Prüfkörpers (vgl. Abbildung 3-9, unten) erfolgen. Schlussendlich kann der Probekörper nach der Beschriftung unter genormten, klimatischen Bedingungen bis zur Entnahme unmittelbar vor der Prüfdurchführung übergeben werden.

Fertigung der Probekörper Variation ϵ

Prüfkörper, bei welchen eine Variation des Verbindungsmittel- Faserwinkels erfolgt, unterlaufen einen Fertigungsprozess auf Basis von Mehrfachquerschnitten, welche in Ihrem Aufbau den eines Brettschichtholzbinders ähneln. In den nachfolgenden Zeilen soll sowohl der Lamellenaufbau der Mehrfachquerschnitte, als auch die Beschreibung des Zuschnitts gezeigt werden:

Basis dieser Prüfkörper bilden, wie zuvor erwähnt, sogenannte Mehrfachquerschnitte, welche aus drei oder fünf Rohlamellen auf Basis der erforderlichen Prüfkörperabmessungen (vgl. Abschnitt 3-1.3) durch einen starren Verbund mittels Verklebung zu einem Block verbunden werden. Dabei wird der Lamellenquerschnitt in seiner gegebenen Stärke t_{ef} einheitlich mittels Dickenhobeln auf 40 mm reduziert und so für nachfolgende Verklebung von Verunreinigungen befreit, der Versatz entfernt und für die optimale Klebstoffpenetration vorbereitet. Etwaiger Verzug der Einzellamellen wird während des Pressvorgangs durch den nötigen Pressdruck kompensiert.



Abbildung 3-15 *Unterschiedliche Ausführungstypen von Längsschnittsägen
 (links: Flachzahn- Sägeblatt mit großem Spanraum und Räumschneiden;
 rechts: Wechselzahn- Sägeblatt mit Spandickenbegrenzung)*

Da die Verklebung der einzelnen Lamellen im Zuge dieser wissenschaftlichen Untersuchung eine untergeordnete Rolle einnimmt, soll nachfolgend eine Übersicht über die, nach Verfügbarkeit angewandten Klebstoffe gegeben werden:

- Rohdichteklasse A Polyurethan (PU)
- Rohdichteklasse B, C Weißleim (PVAc)

Die Lamellenorientierung erfolgte nach dem Grundsatz des allgemein anerkannten Tischlerregelwerks, zur Verklebung von mehreren Lamellen unter dem Gesichtspunkt der Minimierung des Verzugs und Rissbildung (vgl. Abbildung 3-16, links). Dabei wird die mittlere Lamelle, Bezug nehmend auf deren Jahrringlage um schlussendlich eine gute Streuung zu erhalten, beliebig angeordnet.

Im Anschluss an den Pressvorgang wird mittels Abrichten eine erforderliche Orthogonalität zur Pressfläche hergestellt, welche im Zuge des folgenden Zuschnitts eine wesentliche Rolle einnimmt. Aus den so hergestellten Blöcken kann im Anschluss in zwei Arbeitsschritten der gewünschte Prüfkörper hergestellt werden:

- Zuschnitt einer „Rohscheibe“ mit der entsprechenden Winkeleinstellung
- Formatschnitt, um den geplanten Prüfkörper zu erhalten

Als „Rohscheibe“ wird dabei das Ausgangsprodukt verstanden, aus welchem schlussendlich der gewünschte Prüfkörper durch den Formatschnitt entsteht. Dabei soll nachfolgend speziell das know-how zur Fertigung der Rohscheiben dokumentiert werden:

Beim Zuschnitt der schlanken Rohscheiben kam es zu einer unvorhergesehenen Interaktion zwischen den bereits durch das Sägeblatt durchtrennten Teil des Probekörpers mit den Sägezähnen im Bereich des Spaltkeils. Mit zunehmenden Schnitt büßt die Rohscheibe an Stabilität ein (vgl. Abbildung 3-17, links) und diese kann sich einerseits durch frei werdende Spannungen und andererseits durch den vorherrschenden Sog der Späneabsaugung in Richtung des Sägeblattes bewegen. Es kommt zu einem so genannten „Kratzen“ des Sägeblattes bzw. der Sägezähne auf der Werkstückoberfläche (vgl. Abbildung 3-16) und somit zu einem ungewollten Spanabtrag. Der geschädigte Bereich ist in seiner Lage am Probekörper nicht eindeutig bestimmbar und soll daher vermieden werden. Zur Vermeidung wurden folgende Ansätze entwickelt:

- Nutzung der Sägeaggregatschrägstellung
- Entwicklung gesonderter Maßnahmen zur Vermeidung des „Kratzens“

In erster Linie soll die Schrägstellung des Sägeaggregats, falls anwendbar genutzt werden, da sich der Rohzuschnitt des Prüfkörpers auf Grund der Schrägstellung (vgl. Abbildung 3-17, rechts) selbstständig vom Sägeblatt entfernt. Je nach Winkelkombination ist dieses Prinzip nicht bei allen Kombinationen anwendbar. In diesen Fällen sind besondere Maßnahmen zur Vermeidung des Kratzens erforderlich:



Abbildung 3-16 „Kratzen“ des Sägeblatts während des Rohzuschnitt des Probekörpers

In einem ersten Ansatz konnte eine Verbesserung durch eine Reduktion der Sägewellendrehzahl und somit durch die Verminderung der Schnittgeschwindigkeit erzielt werden., doch es konnte die Beschädigung der Prüfkörperoberfläche nicht vollständig vermieden werden.

Als Alternative erscheint der eigens entwickelte Lösungsansatz zur Vermeidung einer Schädigung der Oberfläche zunächst als simpel:

Die Sicherstellung, das während des Zuschnitts, der Rohkörper nicht in Interaktion mit den Sägezähnen tritt. Doch da die Schädigung bereits unmittelbar mit dem „Durchschlagen“ der Sägezähne an der Werkstückoberkante eintritt, kann durch formschlüssige Maßnahmen die Beschädigung der Prüfkörperoberfläche nicht gewährleistet werden. Durch die Anwendung von kraftschlüssigen Alternativen ist es möglich, auf die Rohscheibe unabhängig von Fortschritt des Schnittes eine Kraftwirkung, welche vom Sägeblatt weg orientiert ist, auszuüben. Dies wurde durch präparieren des Schiebstocks mittels selbst-haftendem Band erreicht, bei welchem die haftende Seite nach außen orientiert war und so ein Kraftschluss mit der Rohscheibe sichergestellt werden konnte.

Schlussendlich kann der gewünschte Prüfkörper aus den Rohscheiben durch den finalen Zuschnitt gefertigt werden. In einem ersten Schritt wurde mittels des Parallelschnitts, die in Abhängigkeit der geplanten und durchgeführten Schnittführung entstandene Fransenbildung entfernt. Diese entsteht durch große Sägeblattdurchmesser, welche durch den annähernd vertikal gerichteten Schnittdruck ein lokales Quersugversagen in den Randbereichen verursachen und es zu einer erheblichen Fransenbildung kommt. Dieser Effekt wird durch eine ungünstigen Sägezahngeometrie (Flachzahn) und einer schlechten Schneidenschärfe begünstigt.

Im Anschluss wurde der Kappschnitt durchgeführt (vgl. Abbildung 3-19), welcher die Qualität als auch die endgültige Dimension des Prüfkörpers definiert. Dabei können etwaig, vorhandene Holzanomalien entfallen, oder in Bereiche des Prüfkörpers positioniert (vgl. Abschnitt 3-3.2.7) werden, in welchen diese geringen Einfluss auf das schlussendlich gewünschte Messergebnis aufweisen.

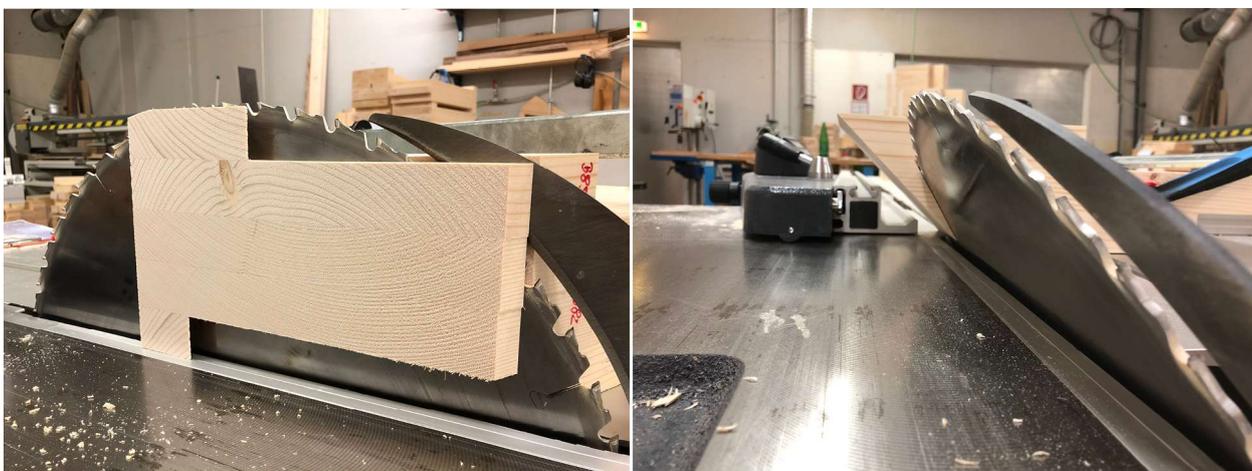


Abbildung 3-17 *Gegenüberstellung der Herstellungsverfahren von Prüfkörper der Variation ϵ (links; Schrägstellung des Präzision- Winkelanschlags; rechts: Schrägstellung des Sägeaggregates)*

Im Zuge der Prüfkörperformatierung konnten erhebliche Ausrisse an den Schnittkanten festgestellt werden, welche durch den abwärts gerichteten Schnittdruck der Sägezähne verursacht werden. Diese Ausrisse sind auf ein Scherversagen in Faserrichtung zurückzuführen. Durch „stürzen“ des Probekörpers kann so der schräg geneigte Faserverlauf entsprechend justiert werden, sodass es bei den gewünschten Kanten zu keine Ausrisse kommt.

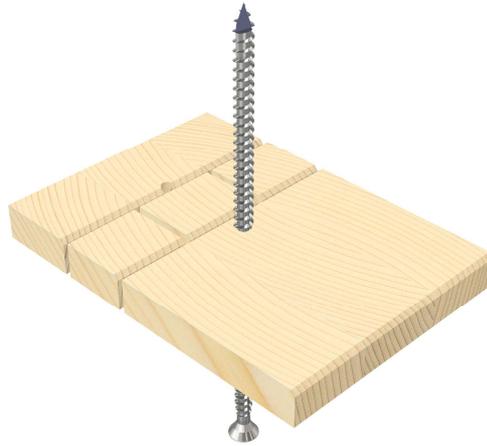


Abbildung 3-18 Einfluss der Ausrisse an den Schnittkanten auf die Darrprobe

Dieses Phänomen spielt bei der Prüfkörperformatierung eine untergeordnete Rolle, doch konnten wichtige Erkenntnisse für den Zuschnitt der Darrproben (vgl. Abschnitt 3-3.3.1) gewonnen werden.

3-2.1.6 Messbohrung und Beschriftung

Nach Fertigstellung des Zuschnitts erfolgte je Prüfkörper die für den Messdübel erforderliche Bohrung mittels eines Holzspiralbohrers $d = 6$ mm. Die Bohrung befindet sich exakt 45 mm in Krafrichtung unter dem jeweiligen, applizierten Verbindungsmittel (vgl. Abbildung 3-20, links) welches im Flächenschwerpunkt (excl. Bohrung) des Prüfkörpers positioniert ist.

Um die Herstellung der Prüfkörper endgültig abschließen zu können, bedarf es einer dauerhaften Beschriftung (vgl. Abbildung 3-19). Diese soll den klimatischen Verhältnissen des Normklimas, als auch den Bedingungen des Darrschanks bei ca. 103°C Stand halten. Auf Grund der hohen Anzahl an Probekörpern wurde ein Laser-bedruckbares Beschriftungssystem gewählt, welches dauerhaft auf Holzoberflächen haftet und wetterbeständig ist.

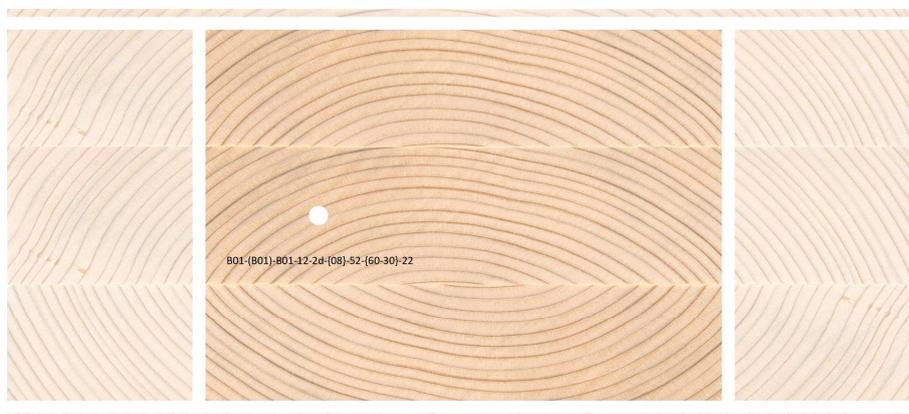


Abbildung 3-19 Parallelschnitt und Formatschnitt (Formatierung) eines Prüfkörpers

3-2.1.7 Lagerung unter normierten Bedingungen

Nach Abschluss der Prüfkörperherstellung ist die ordnungsgemäße Lagerung unter genormten Bedingungen erforderlich. Durch die hygroskopischen Eigenschaften der Zellstruktur ergibt sich eine Interaktion zwischen der in der Umgebungsluft enthaltenen Luftfeuchtigkeit und der Holzfeuchtigkeit. Findet keine Änderung der Holzfeuchte mehr statt, so spricht man vom Zustand der Holzgleichsfeuchte. Auf Grundlage der in der Prüfplanung definierten Holzfeuchte der Hauptserie von $u = 12\%$ sind die Prüfkörper in einer Klimakammer in welcher eine Temperatur von 20°C und eine relative Luftfeuchtigkeit von 65% (vgl. ÖNORM EN 383 [13]) vorherrscht zu konditionieren. Um eine optimale Kommunikation mit dem Umgebungsbedingungen zu erreichen, wurde auf eine Art der Probekörperlagerung zurückgegriffen, bei welcher diese optimal „luftumspült“ werden. Durch die Lagerung auf der Schmalseitenfläche mit entsprechenden Abstand zueinander soll die Holzgleichsfeuchte möglichst rasch erreicht werden.

3-2.1.8 Prüfvorbereitung

Grundlage jeder Prüfung ist die sorgfältige Herstellung von Probekörpern. Je nach Art der wissenschaftlichen Untersuchung beeinflussen nicht vermeidbare Toleranzen im Zuge der Herstellung und Prüfvorbereitung im ungünstigsten Fall das Messergebnis. Daher soll in diesem Kapitel die sorgfältige Vorbereitung der Prüfkörper, unmittelbar vor der Prüfdurchführung beschrieben werden. Dabei wurde folgende Vorgehensweise angewandt:

- Entnahme der Prüfkörper unmittelbar vor der Prüfdurchführung aus den klimatisierten Räumlichkeiten
- Fixierung der beiden Hälften der Einschraublehre mit dem Prüfkörper
- Applikation der Schraube
- Entfernen der Fixierungen und der Einschraublehre

Nach einem möglichst langen Zeitraum zur Konditionierung, dem Angleichen der Holzfeuchtigkeit an die umgebenden, klimatischen Bedingungen, erfolgt die Entnahme der Prüfkörper unmittelbar vor der Prüfdurchführung. Von besonderer Bedeutung ist orthogonale Ausrichtung der Schraubenachse zur Prüfkörperseitenfläche. Die Ausrichtung soll vor allem durch die Verwendung einer speziell entwickelten Einschraublehre sichergestellt werden. Ist diese Orthogonalität nicht gewährleistet, so kommt es zu unvorhersehbaren Verhalten während der Prüfdurchführung, welche sich vor allem im anfänglichen Bereich des Kraft- Wegdiagramms wieder spiegeln.



Abbildung 3-20 Vorbereiten des Prüfkörpers unmittelbar vor der Prüfdurchführung
 (links: Lage der Messbohrung im Prüfkörper; rechts: Einschraublehre aus Baubuche)

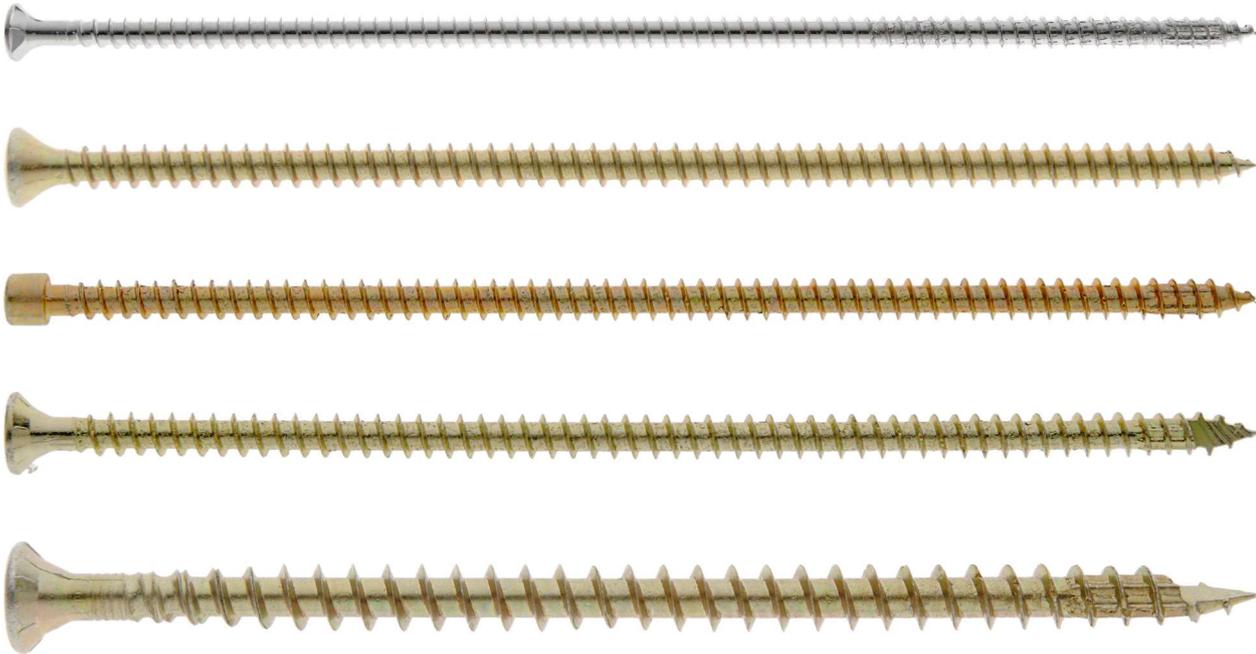
Während des Setzvorgangs der Schraube konnte festgestellt werden, dass wenn die Applikation in- oder orthogonal zur Faserrichtung verläuft, sich kaum Abweichungen aus der gewünschten Position ergeben. Erfahrungsgemäß kommt es bei flachen Winkeln zwischen der Einschraubachse und dem Faserverlauf zum „abdriften“ aus der vorgesehene Einschraublage. Beim Versuch der Schraubenspitze die jeweiligen Spätholzlagen zu durchdringen, erfolgt auf Grund der lokalen Rohdichteunterschiede in Summe eine Schiefstellung der Schraube. Um die gewünschte Ausrichtung der Schraube in Bezug auf den Prüfkörper zu erhalten, bedarf es gesonderter Maßnahmen, bzw. gilt es spezielle Einflüsse zu vermeiden:

- Vorbohren in Verbindung mit einer Einschraublehre (liefert die besten Ergebnisse)
- Planung von Prüfkörpern mit flachen oder steilen Verbindungsmittel- Faserwinkeln
- Einsatz von Schrauben mit optimierte Schraubenspitze (verbesserte Vorbohrwirkung)
- Vermeidung zusätzlicher Zellwandverdickungen (Reaktionsholz)

Für die in dieser Arbeit hergestellten Probekörper eignet sich das entwickelte Prinzip der Schraubenapplikation mittels einer zweiteiligen Setzlehre am besten, welches auf einer statischen Einspannung beruht und dadurch eine Abweichung aus der Achsrichtung während des Setzvorgangs vermieden werden soll. Beim Austritt der Schraubenspitze aus dem Einschraubkanal und dem anschließenden Eintritt in den Probekörper ist keine „Zwangsführung“ mehr gegeben und es konnten bei Probekörpern mit ausgeprägten Spätholzlagen auf Grund der geringen Biegesteifigkeit der Schraube, Abweichungen aus der geplanten Achslage festgestellt werden.

Weiters soll an dieser Stelle auf die „abrasive“ Wirkung eines Schraubengewindes hingewiesen werden, welche die Standzeit einer Einschraublehre innerhalb weniger hundert Einschraubvorgänge erheblich beeinflusst. Durch diese abrasive Wirkung kommt es zu einer Abnutzung der vorgesehenen, passgenauen Bohrung und so schlussendlich im Vorhinein zu einer Schiefstellung während der Schraubenapplikation. Daher werden für die Herstellung von Einschraublehren Materialien hoher Rohdichte, wie Baubuche empfohlen.

3-2.2 Schraube



- Hier die verwendeten Schrauben erklären
- Techn. Zeichnung und Photo inkl. Den Features der Schrauben eintragen
- Unbedingt Unterschiede zwischen den Gewindearten beschreiben -> wichtig für die Einschraublehre
- Vorspalten beschreiben -> Wahl einer anderen Schraube (durch geringere Umdrehungszahl lässt sich eine Verbesserung erkennen)
- Hier auch die Unterschiede zwischen Prüfplanung und Realität beschreiben !

- Unterschied zwischen der Prüfplanung und dem original, mit diesem Bild erklären

Die exakt gemessenen Werte der Schraube hier einfügen

Schrauben Geometriebestimmung

- Hier würde auch die Abb. Mit dem gespaltenene Prüfkörper gut passen – hm ?

Anmerkung, bzw. hier dokumentieren: tja, Gstetti hast wieder was wichtiges dazugelernt - du kannst Dir die Prüfplanung noch so gut überlegt haben, Versuche sind unbezahlbar ! hier noch das coole Fazit welches Du in exp. Methoden formuliert hast, einfügen

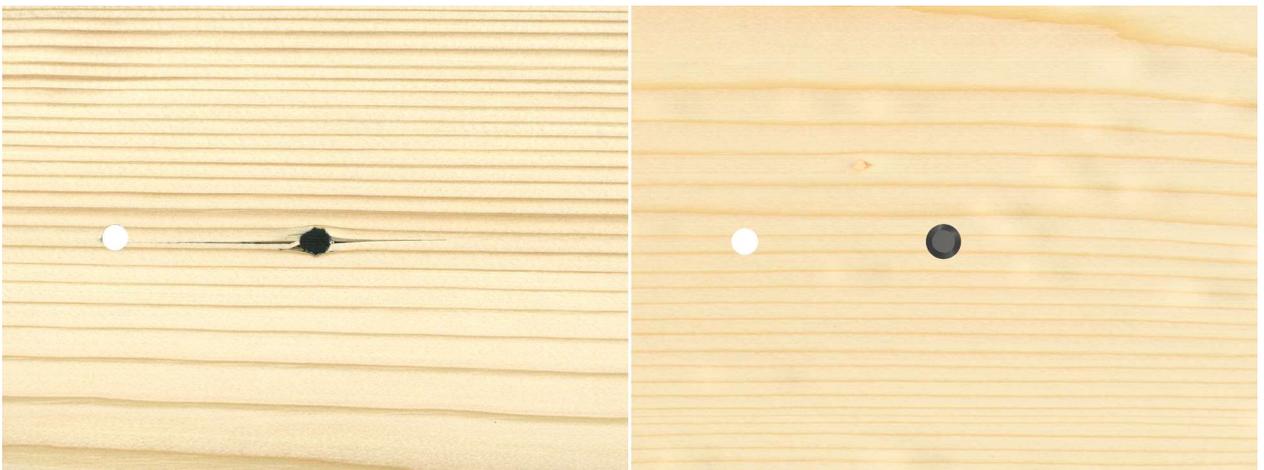


Abbildung 3-21 In Bezug auf die Prüfplanung auftretende, reale Bedingungen der Verschraubung (links: auftretendes Querkzugversagen, initiiert durch den Einschraubprozess; rechts: geplanter Prüfkörper B_{25-12-2d}-{08}-52-{00-90}-0)

3-3 METHODEN

Auf Basis der definierten Prüfziele und der daraus resultierenden Prüfplanung, soll in den nachfolgenden Seiten die Methodik beschrieben werden, welche wesentlichen Einfluss auf die Prüfdurchführung, als auch auf die Bestimmung der gewünschten Kenngrößen hat. Das weitere methodische Vorgehen gliedert sich in:

- Prüfkonfiguration (Pre- processing)
- Prüfdurchführung (Data Collection)
- Ermittlung physikalischer, sowie mechanischer Kenngrößen (Data post- processing)

Bezogen auf dieses Kapitel „Methoden“ umfasst das Pre- processing sämtliche Vorbereitungen vor der eigentlichen Prüfdurchführung, sodass in dem anschließenden Data post- processing die gesammelten Prüfdaten (Data Collection), welches während der Prüfdurchführung statt findet, zu einer Darstellung der Ergebnisse führt.

3-3.1 Prüfkonfiguration (Pre- processing)

3-3.1.1 Prüfaufsätze

Die Lasteinleitung vom Prüfgerüst in den Prüfkörper erfolgte durch den Prüfaufsatz. Dieser dient vor allem bei der Variation des Kraft- Faserwinkels zur Sicherstellung vom gewünschten Winkel α , als auch zur lastverteilenden Wirkung.

Jeder Prüfaufsatz wurde durch vier M16 Sechskantschrauben starr mit der Adapterplatte des Prüfgerüsts verbunden, um so einer Gelenkkette vorzubeugen. Durch die Betrachtung etwaiger „Problemzonen“, welche sich im Zuge der Prüfdurchführung im Prüfaufsatz ausbilden, können diese bereits durch die Wahl eines geeigneten Plattenwerkstoffs kompensiert werden:

Durch die Rotation des Prüfkörpers um die Verbindungsmittelachse, um so den entsprechenden Kraft- Faserwinkel zu erreichen, resultieren Zugspannungen, welche zur Rissbildung orthogonal zur Prüfachse in Prüfaufsatz führen. Durch die bewusste Ausnutzung und Anordnung spezieller Holzeigenschaften (Zugfestigkeit) können die auftretenden Spannungen optimal kompensiert werden. Durch eine schichtweise, orthogonale Ausrichtung einzelner Buchen- Schäl furniere (Sperrholz) können einerseits die orthogonal zur Prüfrichtung auftretenden Zugspannung aufgenommen und andererseits in Prüfrichtung eine hohe Steifigkeit des lasteinleitende Prüfaufsatzes erreicht werden.

Die Prüfaufsätze bestehen aus einer ungeraden Anzahl an Schäl furnierlagen, um eine geeignete Formstabilität zu gewährleisten und werden für jede Prüfserie passgenau angefertigt. Durch die Verwendung eines Klebstoffs (PVAc) wird ein starrer Verbund zwischen den einzelnen Lagen erreicht. Je nach Prüfkörperstärke (vgl Abschnitt 3-1) kann die benötigte Anzahl an Furnieren in Abhängigkeit der Furnierblattdicke d wie folgt ermittelt werden:

$$n = \frac{t_{(\lambda)}}{d} - 1 \quad (3.15)$$

Dabei sind:

- n Anzahl der benötigten Buchen- Schäl furnierlagen
- $t_{(\lambda)}$ Dicke des Prüfkörpers in mm
- d Dicke des Buchen- Schäl furniers in mm

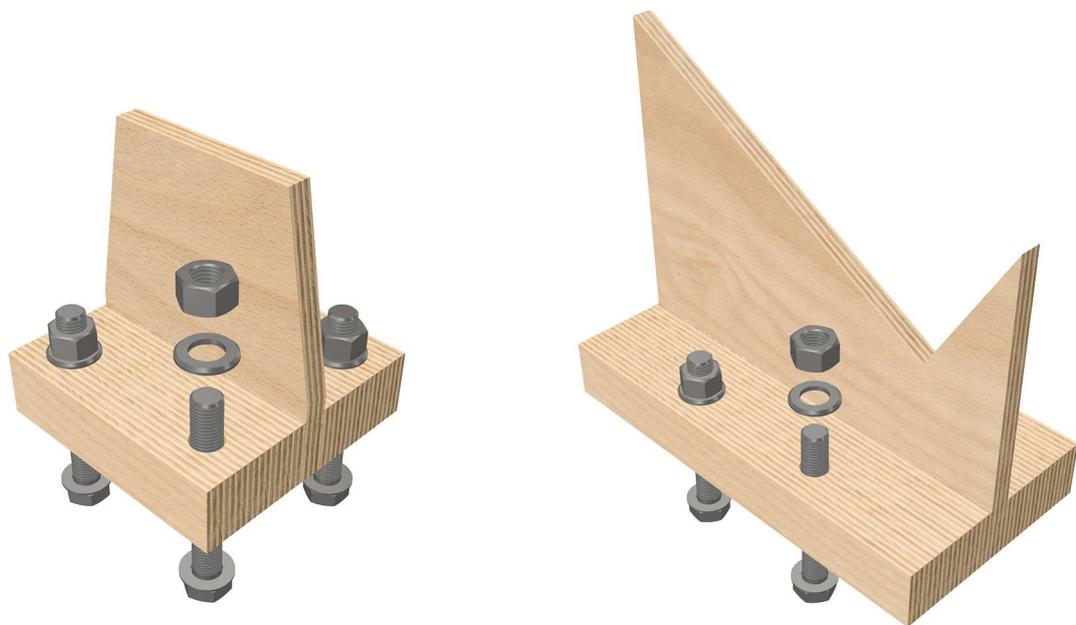


Abbildung 3-22 Prüfaufsätze in Explosionsdarstellung aus Buchen- Schäl furnieren
(links: Aufsatz für die Serie {00-90}; rechts: Aufsatz der Serie {30-90})

Auf Grund der gewählten Schichtanordnung kann mit der Methode der finiten Elemente (FEM) abgeschätzt werden, ob sich der gewählte Plattenaufbau zur Aufnahme der auftretenden Spannungen eignet. Dabei wurde folgende Vorgehensweise angewandt:

- Abschätzen der auftretenden Lasteinwirkung über die Lochleibungsfestigkeit
- FEM- Modellierung des Prüfaufsatzes
- Auswertung der Ergebnisse

Zur Abschätzung der auftretenden Spannungen wurde das Modell für Schrauben $d_{ef} = 1,1 \cdot d_{nom}$ für $d_{nom} > 6$ mm gemäß der aktuellen Normung (vgl. ÖNORM B 1995-1-1 [6]) auf charakteristischem Niveau herangezogen. Im Zuge einer konservativen Bestimmung der Lochleibungsfestigkeit, wurde der charakteristische Wert der Rohdichte ρ_k durch den Mittelwert der Rohdichte ρ_{mean} substituiert:

$$f_{0,h,k} = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_k = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot 8) \cdot 460 = 34,70 \text{ N/mm}^2 \quad (3.16)$$

Dabei sind:

- $f_{0,h,k}$ Charakteristischer Wert der Lochleibungsfestigkeit in Faserrichtung des Holzes in N/mm^2
 ρ_k Charakteristischer Wert der Rohdichte des Holzes in kg/m^3
 α Winkel zwischen Kraft- und Faserrichtung
 d Bolzendurchmesser (Verbindungsmitteldurchmesser) in mm

Unter der Berücksichtigung von k_{90} für Vollholz kann die Lochleibungsfestigkeit berechnet werden:

$$k_{90} = 1,35 + 0,015 \cdot d \quad (3.17)$$

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \cdot \sin^2(\alpha) + \cos^2(\alpha)} = \frac{34,70 \text{ N/mm}^2}{1,47 \cdot \sin^2(60^\circ) + \cos^2(60^\circ)} = 25,66 \text{ N/mm}^2 \quad (3.18)$$

Dabei sind:

- $f_{\alpha,h,k}$ Charakteristischer Wert der Lochleibungsfestigkeit unter dem Winkel α zur Faserrichtung N/mm^2

Da es sich bei dem ermittelten Wert der Lochleibungsfestigkeit um einen charakteristischen Wert (untere 5 % Quantile) des Materialwiderstands handelt, soll dieser im nächsten Schritt auf das charakteristische Niveau einer Einwirkung (95 % Quantile) übergeführt werden. Unter der Annahme einer Normalverteilung kann auf Grund eines festgelegten Variationskoeffizienten $COV = 0,2$ auf den Mittelwert einer normalverteilten Grundgesamtheit geschlossen werden:

$$f_{0,05} = \mu - \sigma \cdot 1,645 \rightarrow \mu = \frac{f_{0,05}}{1 - COV \cdot 1,645} = \frac{25,66}{1 - COV \cdot 1,645} = 38,24 \text{ N/mm}^2 \quad (3.19)$$

Dabei sind:

- $f_{0,05}$ 5 %- Quantile der Lochleibungsfestigkeit einer normalverteilten Grundgesamtheit in N/mm^2
 μ Mittelwert der normalverteilten Lochleibungsfestigkeit in N/mm^2
 σ Standardabweichung einer normalverteilten Grundgesamtheit in N/mm^2
 COV Variationskoeffizient

Durch die folgende Bestimmungsgleichung kann auf die 95 %- Quantile der gewünschten Lochleibungsfestigkeit geschlossen werden:

$$f_{0,95} = \mu - f_{0,05} + \mu = 38,24 - 25,66 + 38,24 = 50,82 \text{ N/mm}^2 \quad (3.20)$$

Dabei sind:

- $f_{0,05}$ 5 %- Quantile der Lochleibungsfestigkeit einer normalverteilten Grundgesamtheit in N/mm²
- $f_{0,95}$ 95 %- Quantile der Lochleibungsfestigkeit einer normalverteilten Grundgesamtheit in N/mm²
- μ Mittelwert einer Normalverteilung

Durch die Berechnung der maßgebenden Lochleibungskennziffer $f_{0,95}$ kann unter der Annahme einer projizierenden Fläche, auf eine Kraftresultierende geschlossen werden. Als „Begrenzung“ dieser Fläche wird einerseits die Prüfkörperdicke $t_{(\lambda)} = 2 \cdot d$, als auch in einer konservativen Betrachtungsweise der nominelle Durchmesser $d = 8,0$ mm der Referenzschraube definiert.

$$F_{0,95} = f_{0,95} \cdot t_{(\lambda)} \cdot d = f_{0,95} \cdot 2 \cdot d^2 = 50,82 \cdot 2 \cdot 8^2 = 6504,96 \text{ N} \quad (3.21)$$

Dabei sind:

- $F_{0,95}$ 95 %- Quantile der aus der Lochleibungsfestigkeit resultierenden Einwirkung in N
- $f_{0,95}$ 95 %- Quantile der Lochleibungsfestigkeit einer normalverteilten Grundgesamtheit in N/mm²
- $t_{(\lambda)}$ Prüfkörperdicke in Abhängigkeit der Schlankheit in mm
- d Nomineller Außendurchmesser der Referenzschraube in mm

Für die Modellierung mittels eines 2D- Finite Elemente Modells, wird die resultierende Einzelkraft der Einwirkung durch eine repräsentative Gleichlast substituiert, welche die Lasteinleitung in den Prüfaufsatz von der Adapterplatte des Prüfgerüsts simuliert:

$$\bar{q}_{0,95} = \frac{F_{0,95}}{b_{Ad}} = \frac{6504,96}{150} = 43,37 \text{ N/mm} \sim 43,5 \text{ kN/m} \quad (3.22)$$

Dabei sind:

- $\bar{q}_{0,95}$ Aus der Lochleibungsfestigkeit ermittelte Beanspruchung des Prüfaufsatzes in kN/m
- $F_{0,95}$ 95 %- Quantile der aus der Lochleibungsfestigkeit resultierenden Einwirkung in N
- b_{Ad} Breite der Adapterplatte des Prüfgerüsts

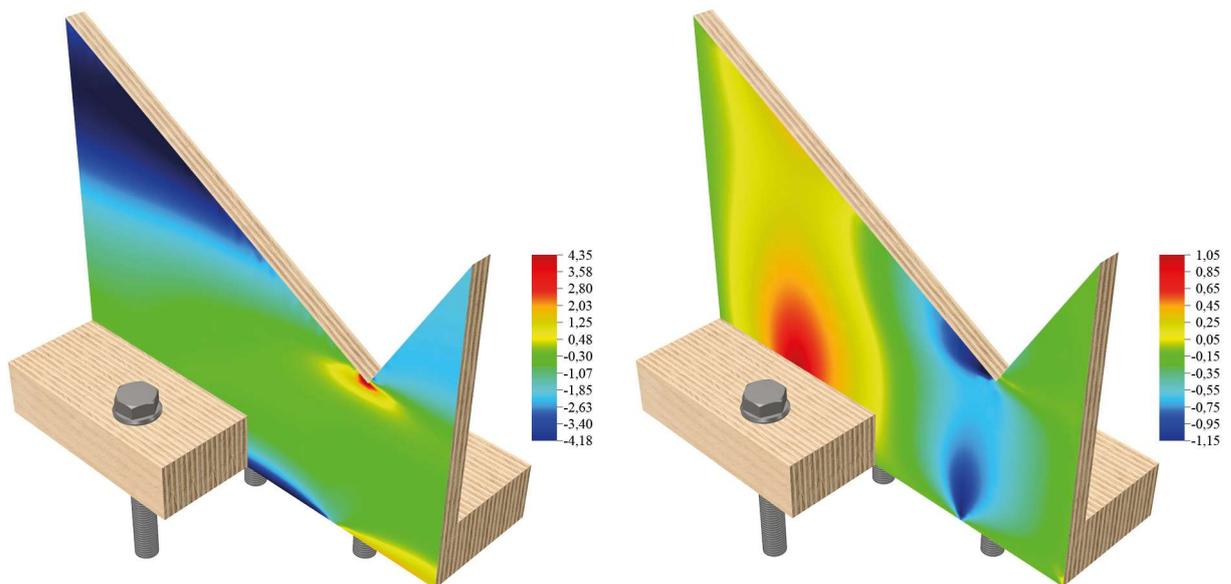


Abbildung 3-23 Ergebnisse der zweidimensionalen FEM- Berechnung
(links Überlagerung der Biege- Zugspannungen in Faserrichtung (Schicht 1);
rechts: maßgebende Schubspannungen in Faserrichtung (Schicht 1)

Als Grundlage für die Berechnung in der zweidimensionalen Finite Elemente Modellierung wurden die Materialparameter der Festigkeitsklasse D40 zugewiesen, welche annähernd die Festigkeits- und Steifigkeitsparameter von Buchen- Schäl furnieren repräsentieren. Schlussendlich können die Maxima der Spannungsüberlagerungen gemäß der aus der Farbskala (vgl. Abbildung 3-23) entnommenen und in einer konservativen Betrachtungsweise den charakteristischen Werten der Zugfestigkeit $f_{t,0,k,D40}$ und Schubfestigkeit $f_{v,k,D40}$ gegenübergestellt werden. Der Vergleich der charakteristischen Werte der Einwirkung und des Widerstands dient als eine Einschätzung der vorliegenden Verhältnisse:

$$\sigma_{t,0,k,1} = 4,35 \text{ N/mm}^2 \leq f_{t,0,k,D40} = 24 \text{ N/mm}^2 \quad (3.23)$$

$$\tau_{x,y} = |-1,15| \text{ N/mm}^2 \leq f_{v,k,D40} = 4,2 \text{ N/mm}^2 \quad (3.24)$$

Dabei sind:

- $\sigma_{t,0,k,1}$ Zugspannung, Schicht 1 zufolge der zweidimensionalen Finite Elemente Berechnung in N/mm^2
- $\tau_{x,y,1}$ Schubspannung, Schicht 1 zufolge der zweidimensionalen Finite Elemente Berechnung in N/mm^2
- $f_{t,0,k,D40}$ Aufnehmbare Zugspannung der Festigkeitsklasse D40 in N/mm^2
- $f_{v,k,D40}$ Aufnehmbare Schubspannung der Festigkeitsklasse D40 in N/mm^2

3-3.1.2 Negativformen

Die vom Prüfergüst über den Aufsatz in den Probekörper eingeleiteten Prüflast, muss dem Kraftfluss folgend von einer Lagerung hoher Steifigkeit aufgenommen werden. Diesbezüglich werden sogenannte „Negativformen“ (vgl. Abbildung 3-24) verwendet, um die komplexe Geometrie eines mit einem Gewinde versehenen Stahlstiftes zu betten. Findet die Lagerung nicht über Negativformen statt, so kann auf Grund der geringen Gewindesteifigkeit eine Verformung während des Prüfvorgangs stattfinden und das Messergebnis in einem nicht explizit definierbaren Ausmaß verfälschen.

Diese beschriebenen Negativformen werden je produzierter Schraubengeometrie und Charge speziell gefertigt und den durch den Herstellungsprozess bedingten, hohen Fertigungstoleranzen der Schrauben angepasst.

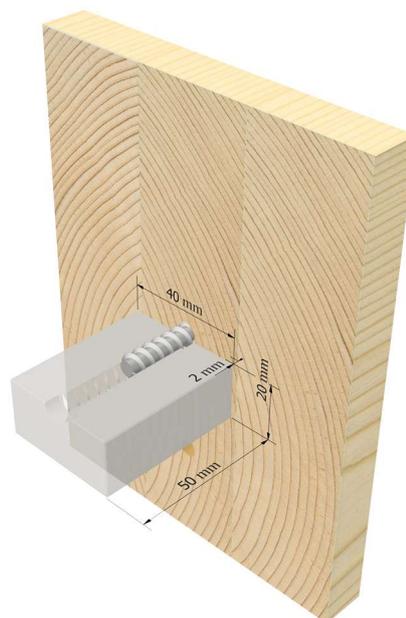


Abbildung 3-24 Bettung der Referenzschraube in der speziell gefertigten Negativform

Durch die geometrische Ausbildung der Negativformen lässt sich durch entsprechende Fixierung in den „Seitenführungen“ (vgl. nachfolgender Abschnitt 3-3.1.3) eine biegesteife Lagerung realisieren. Diese biegesteife Interaktion zwischen den Negativformen und den Seitenführungen gewährleistet eine Minimierung des Verformungsrisikos der Schraube im Zuge der Prüfdurchführung. Die Interaktion der Negativformen, des Wegmesssystems und der Lagerung soll im nachfolgenden Abschnitt beschrieben werden:

3-3.1.3 Seitenführungen

Die Seitenführungen dienen zur Kopplung des Prüfkörpers mit der lokalen Wegmessung, als auch zur Lagerung der Negativformen. Als zentrales Bindeglied der Prüfkongfiguration bestimmen diese unter anderem die Qualität und die Prüfdauer je Versuch und übernehmen folgende Aufgaben:

- Biegesteife Einbindung der Negativformen und in weiterer Folge Lagerung des Prüfkörpers
- Aufnahme des lokalen Wegmesssystems (vgl. folgender Abschnitt 3-3.1.4)
- Rückkopplung der applizierten Last zum Prüfgerüst durch M16 Sechskantschrauben

Nach der Bettung des Prüfkörpers über die applizierte Schraube (vgl. Abschnitt 3-2.1.8) in die jeweiligen Hälften der Negativformen wird dieses „Prüfpaket“ in die Ausnehmungen der seitlichen Führungen platziert und im Anschluss der Messdübel in der vorgesehene Bohrung im Prüfkörper symmetrisch zum Prüfkörper ausgerichtet. Nach der Justierung des geplanten seitlichen Abstands zwischen Prüfkörper und Seitenführungen von 2 mm (vgl. Abbildung 3-24) wird durch die oberen M8 Sechskantschrauben (vgl. Abbildung 3-25) die biegesteife Lagerung gewährleistet und eine Sicherstellung der Positionierung mittels Kraftschluss in der Prüfkongfiguration erreicht.

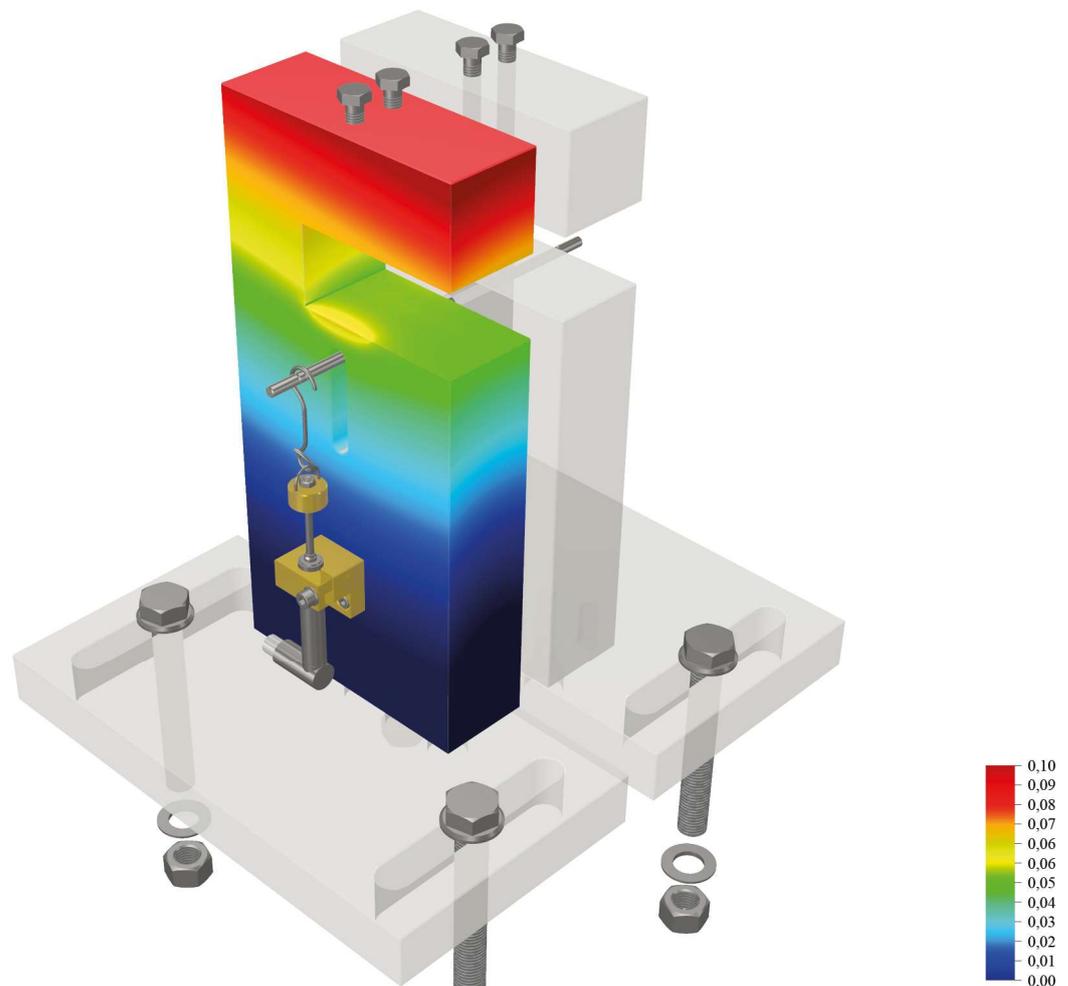


Abbildung 3-25 Seitenführung mit der dreidimensionalen FEM-Berechnung

Um eine entsprechend hohe Steifigkeit der Seitenführungen zu gewährleisten wurde mittels eines dreidimensionalen Finite Elemente- Modells die Verformung dieser Stahlteile untersucht. Dabei wurde auf Basis eines vereinfachten Modells und Ausnutzung der Symmetriebedingung der Prüfkongfiguration die Resultierende der Lochleibungsfestigkeit (vgl. Abschnitt 3-3.1.1) als Beanspruchung auf eine Seitenführung aufgebracht. Auf Grund der hohen Steifigkeit in Relation zur applizierten Beanspruchung, Bedarf es einer 13- fachen Laststeigerung, um eine Verformung an der Führungsoberkante von $u_y = 0,1$ mm (vgl. Abbildung 3-25) hervorzurufen. Die seitlichen Führungen wurden daher als ausreichend steif beurteilt und ein ungünstiger Einfluss der Nachgiebigkeit auf die gewünschten Messergebnisse konnte daher ausgeschlossen werden.

3-3.1.4 Wegaufnehmer

Das Prinzip der lokalen Wegmessung beruht auf einer Anordnung von zwei Wegaufnehmern, welche symmetrisch zur Prüfachse ausgerichtet sind. Durch nicht vermeidbare Toleranzen in der Prüfkörperfertigung, als auch durch Abweichung von der gewünschten Schraubenachse während des Setzvorgangs werden im Zuge der Prüfdurchführung von einander abweichende Weg- Messwerte dokumentiert. Diese werden durch die Bildung eines gemittelten Weges „bereinigt“ und für die weitere Auswertung herangezogen.

Um die vertikale Verformung im Zuge der Prüfdurchführung messtechnisch zu erfassen, wurde ein induktives Wegmesssystem von Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH (HBM) des Types WA- L mit losem Tauchanker (vgl. Abbildung 3-25) der Genauigkeitsklasse 1 verwendet. Dieser zeichnet sich durch einen nominellen Messbereich von 10 mm, sowie durch eine Kennwerttoleranz von ± 1 % aus.

Die Interaktion zwischen dem Prüfkörper und der lokalen Wegmessung (Tauchanker) erfolgt durch Applikation des Verbindungshakens (vgl. Abbildung 3-26, rechts) auf den „Messdübel“, welcher symmetrisch in seiner Längsachse im Prüfkörper ausgerichtet ist. Dieser Messdübel ist ein aus Edelstahl gefertigtes Instrument zur Verlagerung der vom Prüfkörper ausgeführten vertikalen Verformung an eine Stelle außerhalb der Prüfkongfiguration, an welcher die lokale Wegmessung statt finden kann. Um beim Setzen des Messdübels den Prüfkörper nicht vor der Prüfdurchführung zu beschädigen ist dieser bis auf den mittleren Bereich welcher sich im Prüfkörper befindet abgesetzt (vgl. Abbildung 3-26, links).



Abbildung 3-26 Darstellung der lokalen Wegmessung mit gesetztem Messdübel und Verbindungshaken (links Prüfkörper der Prüferie {90-00}; rechts: Prüfkörper der Serie {90-90})

3-3.1.5 Prüfgerüst

Die durchgeführten, experimentellen Untersuchungen beruhen auf dem Prinzip der Messung einer aufgetragenen Last und die der dazugehörigen Verformung. Daher Bedarf es an einem Prüfgerüst, welches sowohl die Applikation der Prüfkongfiguration ermöglicht, als auch die der erforderlichen Messeinrichtungen und schlussendlich durch einen mechanischen Antrieb die gewünschte Belastung aufbringt.

Beim Prüfgerüst handelt es sich um eine Universalprüfmaschine „lignum_uni_275“ des Herstellers ZwickRoell GmbH & Co. KG (Ulm / Deutschland). Die Hauptkomponenten des Prüfgerüsts sind:

- Lastrahmen zur starren (beweglichen) Lagerung der Traversen
- Vertikal bewegliche Traverse zum Aufbringen der gewünschten Belastung
- Unten angeordnete, feststehende Traverse zur Aufnahme der Prüfeinrichtungen

Die vertikale Verschiebung der Traverse wird durch einen spielfreien Kugelgewindetrieb gewährleistet, welcher neben der Einrichtung zur Messung der aus der Verschiebung der Traverse resultierenden Kraft, ebenfalls den starr angebrachten Prüfaufsatz beinhaltet. Die Seitenführungen werden mittels dem Grundplatten mit der unten angeordneten, fest stehenden Traverse durch M16 Sechskantschrauben (vgl. Abbildung 3-27) verbunden und so in Ihrer Ausrichtung zur vertikalen Prüfachse fixiert.



Abbildung 3-27 Darstellung der Prüfkongfiguration mit „eingebauten“ Prüfkörper der Serie {60-90}

3-3.2 Prüfdurchführung (Data- Collection)

Nach Abschluss des Pre-processings und der erfolgreichen Entwicklung einer geeigneten Prüfkongfiguration erfolgt im nächsten Schritt die Data Collection, welche die Prüfdurchführung und alle dafür notwendigen Annahmen beinhaltet. In Anlehnung an die aktuell genormten Prüfverfahren zur Bestimmung der Lochleibungsfestigkeit und Bettungswerte für stiftförmige Verbindungsmittel (vgl. ÖNORM EN 383 [13]) sollen die Prüfdurchführung und die dafür erforderlichen Randbedingungen dokumentiert werden:

- Unterscheidung zwischen Prüfungen mit und ohne Vorbelastungszyklus (Hystherese)
- Ermittlung benötigter Kennziffern ($F_{max,est}$)
- Bestimmung der Prüfgeschwindigkeit
- Vermessung der Verbindungsmittelgeometrie
- Auffälligkeiten während der Prüfdurchführung
- Beurteilung des Bruchzustandes
- Dokumentation etwaiger relevanter Einflussgrößen

An Hand der Winkelkombination {00 - 90} (vgl. Abbildung 3-28) soll im nachfolgenden Abschnitt die Vorgehensweise der Prüfdurchführung gezeigt werden:

3-3.2.1 Prüfdurchführung mit / ohne Vorbelastungszyklus

Die Anwendung des Verfahrens zur Bestimmung mechanischer, lateraler Kenngrößen gemäß der aktuellen Normenregelung mit oder ohne Vorbelastungszyklus setzt die genaue Kenntnis grundlegender Kennziffern ($F_{max,est}$) voraus. Die Bestimmung dieser Kennziffern werden im nachfolgenden Absatz (vgl. Abschnitt 3-3.2.2) beschrieben.

Durch die Prüfdurchführung unter Anwendung des Belastungsverfahrens inkl. Vorbelastungszyklus können mechanische Kenngrößen (K_{ser}) im nachfolgenden Post- processing, der Vorbelastung als auch der Wiederbelastung bestimmt werden. Wird das Verfahren inkl. eines Vorbelastungszyklus angewandt, so gliedert sich die zeitliche Abfolge der Prüfdurchführung (vgl. Abbildung 3-29) in folgende Teilabschnitte:

- | | |
|--|----------------------------------|
| • Steigerung der Prüflast vom Anfangszustand auf | $0,4 \cdot F_{max,est}$ |
| • Halten der Prüflast für | 30 s |
| • Verringern auf | $0,1 \cdot F_{max,est}$ |
| • Halten für | 30 s |
| • Steigerung der Last bis zum „Bruchzustand“ | 300 ± 120 s bei $w_0 + 5$ mm |

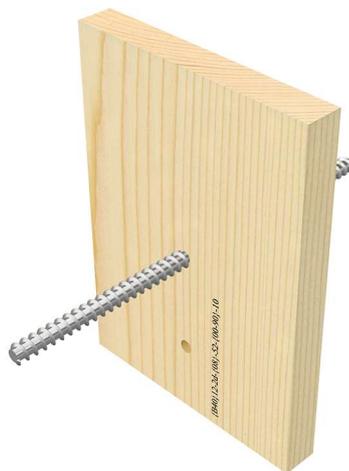


Abbildung 3-28 Prüfkörper der Winkelvariation {00-90}

In weiterer Folge wird der Bruchzustand als derjenige Zeitpunkt bezeichnet, bei welchem innerhalb von 300 ± 120 s ein Prüfungsabbruch bei einer Verformung von $w_0 + 5$ mm unabhängig eines Versagens des Prüfkörpers erfolgt.

Ist eine Bestimmung der Wiederbelastungskenngrößen nicht erforderlich, so kann unter Anpassung der Prüfzeiten, daher das Eintreten des Bruchzustandes bei 300 ± 120 s (vgl. ÖNORM EN 383 [13]) der Vorbelastungszyklus entfallen. Auf Basis der fortlaufenden Prüfkörpernummerierung je Prüfsérie gliedert sich die Messdatenerfassung (Prüfdurchführung) in mit oder ohne Vorbelastungszyklus, wie folgt:

- Ohne Vorbelastungszyklus: Prüfkörpernummer 1 ÷ 5
- Mit Vorbelastungszyklus: Prüfkörpernummer 6 ÷ 10
- Ohne Vorbelastungszyklus: Prüfkörpernummer 11 ÷ ii

Im nachfolgenden Abschnitt soll die Findung dieser Gliederung, welche in Abhängigkeit der benötigten Kennziffern erstellt wurde, gezeigt werden:

3-3.2.2 Erforderliche Kennziffern

Zur Beschreibung der Kraft- Wegdiagramms, bzw. des Kraft- Verformungsdiagramms und in weiterer Folge zur präzisen Bestimmung von punktuellen Kenngrößen ($F_{\max,est}$) sind diverse Kennziffern für eine eindeutige Zuordnung erforderlich:

- Ausgangsverformung w_0
- Verformung zugehörig zu $F_{0+5,i}$ w_{0+5}
- Verformung zugehörig zu $F_{\max,<5,i}$ $w_{<5}$
- Erwartete Maximalkraft $F_{\max,est}$ w_{0+5} oder $w_{<5}$
- Maßgebende Maximalkraft $F_{\max,i}$ w_{0+5} oder $w_{<5}$

Das Prinzip der Prüfdurchführung, wie im Abschnitt zuvor beschrieben, beruht auf der genauen Kenntnis von $F_{\max,est}$, welche auf Grundlage von Erfahrungswerten, Berechnung aus bereits bekannten Modellen oder auf Basis von Vorprüfungen (vgl. ÖNORM EN 383 [13]) bestimmt werden kann.

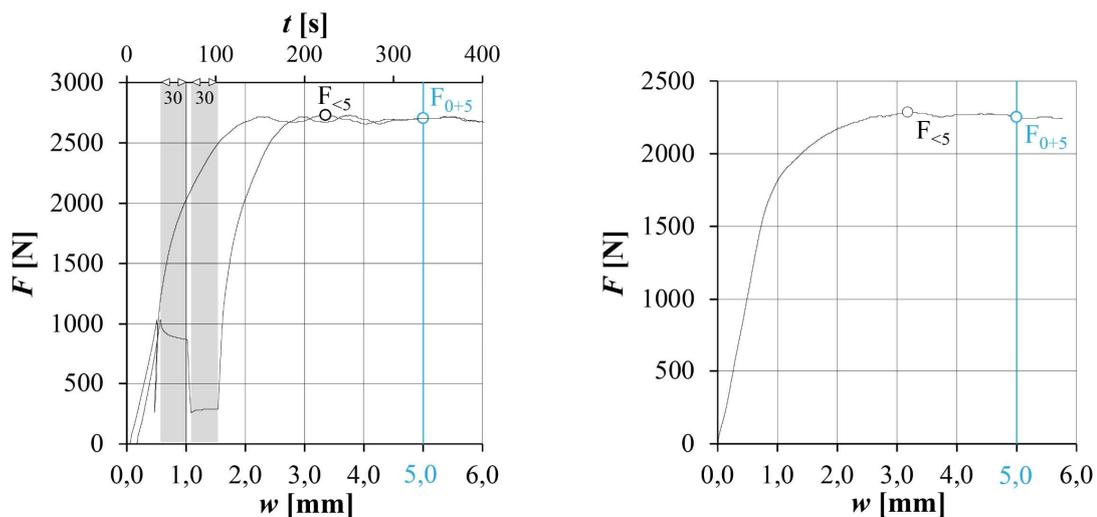


Abbildung 3-29 Last- Verformungsdiagramm mit Kennzeichnung der benötigten, punktuellen Größen (links Last- Verformung bzw. Last- Wegdiagramm mit Vorbelastungszyklus (Hystherese); rechts: Last- Verformungsdiagramm ohne Vorbealstungszyklus)

Die maßgebende Prüfkraft je Serie $F_{\max,i}$ wird aus den Extremalwerten von $F_{0+5,i}$ und $F_{\max,<5,i}$ gebildet und dient neben der Ermittlung der Lochleibungsfestigkeit und anderer mechanischer Parameter auch der Bestimmung von $F_{\max,est}$, welches die Grundlage der für die unter Vorbelastung durchgeführten Prüfungen bildet:

$$F_{\max,i} = \max \left\{ \begin{array}{l} F_{0+5,i} \\ F_{\max,<5,i} \end{array} \right\} \quad (3.25)$$

Dabei sind:

- $F_{\max,i}$ Maximale Prüfkraft je Serie in N
- $F_{0+5,i}$ Kraft an der Stelle w_{0+5} der jeweiligen Last- Verformungskurve je Serie in N
- $F_{\max,<5,i}$ Maximale Prüfkraft je Serie bis zur Verformung w_{0+5} in N
- i Fortlaufende Nummer einer einzelnen Prüfung je Prüfserie

Die maximale Kraft je durchgeführter Prüfung $F_{\max,i}$ wird in weiterer Folge zur Bestimmung von $F_{\max,est}$ und der erforderlichen Grenzwerte (vgl. 3-3.2.1) benötigt. Durch die Bildung des arithmetischen Mittels von $F_{\max,i}$ der Versuche 1 ÷ 5 soll eine in einer guten Annäherung auf den zu erwartenden, mittleren Maximalwert $F_{\max,est}$ der nachfolgenden Versuche 6 ÷ 10 geschlossen werden:

$$F_{\max,est} = \frac{\sum_{i=1}^{n=5} F_{\max,i}}{n} \quad (3.26)$$

Dabei sind:

- $F_{\max,est}$ Arithmetisches Mittel der ersten fünf Probekörper je Versuchsserie in N
- $F_{\max,i}$ Maxima der aufgetretenen Kraft im Zuge der Prüfdurchführung je Serie in N
- n_i Anzahl der zur Ermittlung von $F_{\max,est}$ herangezogene Prüfungen

Handelt es sich bei den Zusammenhang zwischen der aufgebrachten Prüflast und der dazugehörigen Verformung um eine stetig ansteigende Funktion, so repräsentiert sowohl $F_{0+5,i}$ und $F_{\max,<5,i}$ den Extremwert $F_{\max,i}$ der jeweiligen Prüfkurve.

3-3.2.3 Prüfgeschwindigkeit

Da die Prüfdurchführung in Anlehnung nach dem aktuell gültigen Normenregelwerk (vgl. ÖNORM EN 383 [13]) durchgeführt wurde, welche einen Prüfungsabbruch im Bereich von 300 ± 120 s beim Erreichen der Maximallast, bzw. bei einer Verformung von $w_0 + 5$ mm vorschreibt, wurde die Last mit konstantem Vorschub (Weg- gesteuert) der Prüftraverse (vgl. Abschnitt 3-3.1.5) aufgebracht. Die verwendete Prüfgeschwindigkeit von 1,2 mm/min wurde wie folgt ermittelt:

$$v_{trav} = \frac{w_{0+5}}{t_{gew}} \cdot 60 = \frac{5 \text{ mm}}{250 \text{ s}} \cdot 60 = 1,2 \text{ mm / min} \quad (3.27)$$

Dabei sind:

- v_{trav} Traversengeschwindigkeit = Prüfgeschwindigkeit in mm/min
- w_{0+5} Vertikale, durch die lokale Wegmessung bestimmte Verformung in mm
- t_{gew} Gewählte Dauer der Prüfung, bis zu welcher die Prüfabbruchverformung von w_{0+5} erreicht wurde

3-3.2.4 Verbindungsmittelgeometrie

Das Prinzip der experimentellen Ermittlung von lateralen Kenngrößen sieht das Aufbringen einer Prüflast auf einen Probekörper vor, welcher durch das zu prüfende Verbindungsmittel und dessen Lagerung gestützt ist. Dabei ist die geometrische Ausbildung des mit einem Gewinde versehenen Stahlstifts von besonderer Bedeutung.

Nach der Applikation des Verbindungsmittels im Prüfkörper und vor dem Einbau in die Prüfkongfiguration wurde jeweils an den Probekörperseitenflächen der Außendurchmesser d , als auch der Innendurchmesser d_i mittels eines Messschiebers bestimmt. Auf Grund der geringen Streuung der gemessenen Durchmesser wurde ein „globaler“ Mittelwert je Schraubentype ermittelt und keine feinere Gliederung durchgeführt:

Tabelle 3-3 Durch Messung bestimmte Gewindekenngrößen d_{mean} , $d_{i,\text{mean}}$ je Schraubentype

	d_{nom} [mm]	d_{mean} [mm]	d_i [mm]	$d_{i,\text{mean}}$ [mm]
StarDrive Vollgewinde	6,0	5,78	3,8	3,90
RAPID® Vollgewinde	8,0	7,90	5,2	5,16
RAPID® Hardwood	8,0	8,00	6,1	5,98
RAPID® Vollgewinde	12,0	11,83	6,8	6,90

Die Erfassung der Gewindegeometrie (vgl. Tabelle 3-3) wurde in unmittelbarer Nähe (nächstgelegener, messbarer Innen- und Außendurchmesser) des Prüfbereichs bestimmt.

3-3.2.5 Auffälligkeiten

Im Zuge der Prüfungsdurchführung kam es zu Abweichungen, aus welchen neue Erkenntnisse und weitere Erfahrungswerte geschöpft wurden. Neben kleineren Abweichungen, welche während der Prüfungen behoben wurden, sollen drei wesentliche Erkenntnisse nachfolgend beschrieben werden:

- Unstetigkeiten in den Messergebnissen (Prüfkurve)
- Abweichungen in den Abständen vom Prüfkörper zu den Negativformen
- Passgenauigkeit der Prüfaufsätze

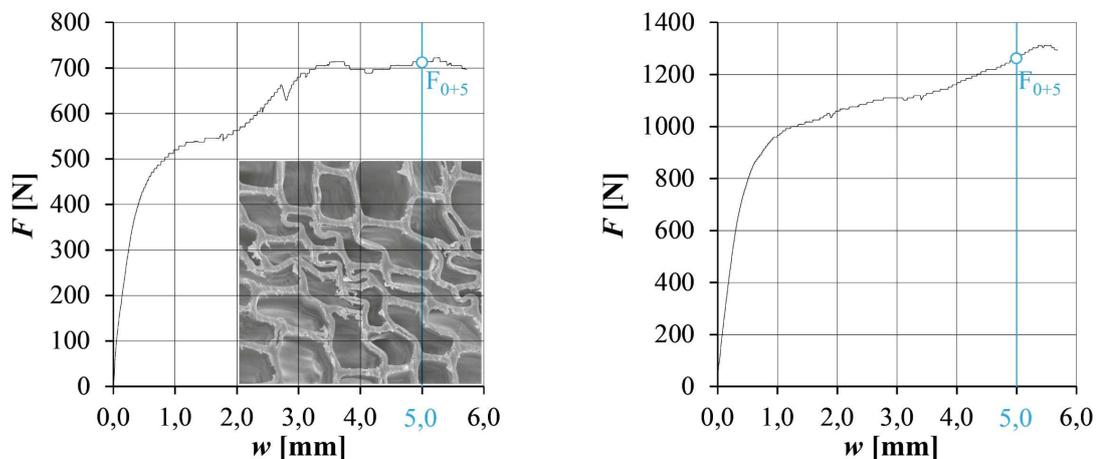


Abbildung 3-30 Lokales Stabilitätsversagen der Zellwandstruktur während der Prüfungsdurchführung (links: Prüfsreihe A-90-00) mit Stabilitätsversagen der Zellstruktur; rechts: 90-00) der Rohdichteklasse C mit vergleichsweise annähernd stetig ansteigendem Ast

Unstetigkeitsstellen

Im Zuge der Prüfungsdurchführung der Serie Rohdichteklasse A - {90-00} konnte ein unstetiges, sprunghaftes Verhalten nach dem Übergang von linear-elastischen zum plastischen Bereich des Kraft- Wegdiagramms festgestellt werden. In einem ersten Ansatz wird ein lokales Stabilitätsversagen der Zellwandstruktur (vgl. Müller et al. [8]) sowie eine einhergehende Rissbildung (vgl. Abbildung 3-30, links), vermutet. Durch die stetige Laststeigerung kommt es nach dem Versagen einiger Zellbündel zu einem erneuten Anstieg im Kraft- Weg Diagramm bis die kritische Beanspruchung erneut erreicht wird und es zu einem weiteren Versagen in der Zellstruktur kommt.

Durch eine Erhöhung der Rohdichte sinkt der Anteil an Frühholzzonen, welcher durch eine geringe Zellwanddicke und großem Lumen charakterisiert ist und es verringert sich der Effekt des lokalen Stabilitätsversagens, welcher im Kraft- Wegdiagramm der Rohdichteklasse C beobachtet werden kann (vgl. Abbildung 3-30, rechts).

Seitenabstand der Negativformen

Im Zuge der Applikation des Prüfkörpers in die Negativformen mit anschließendem Einbau in die Prüfkonfiguration konnte festgestellt werden, dass der geplante Abstand von der Prüfkörperseitenfläche zur Negativform $a_{li} = a_{re} = 2 \text{ mm}$ (vgl. Abbildung 3-31) nicht eingehalten werden konnte. Die Lage des ersten Gewindeganges bestimmt in Abhängigkeit zum Zeitpunkt des beginnenden Einschraubfortschritts die axiale Lage des Verbindungsmittels im Prüfkörper. Je nach dieser axialen Lage des Verbindungsmittels in der Prüfkörperdicke $t_{(\lambda)}$, bzw. der Fräsung des „Gewindeabdruckes“ in der Negativform ergibt sich der Abstand von der Prüfkörperseitenfläche zur Form. Nach Anlieferung der Negativformen konnte daher das Maß a_{li} bzw a_{re} im Idealfall unter einer symmetrischen Teilung zu 2,5 mm bestimmt werden:

$$5 \text{ mm} = a_{li} + a_{re} \quad (3.28)$$

Dabei sind:

a_{li} Abstand von der Prüfkörpervorderseite⁴ zur Negativform in mm

a_{re} Abstand von der Rückseite zur Negativform in mm

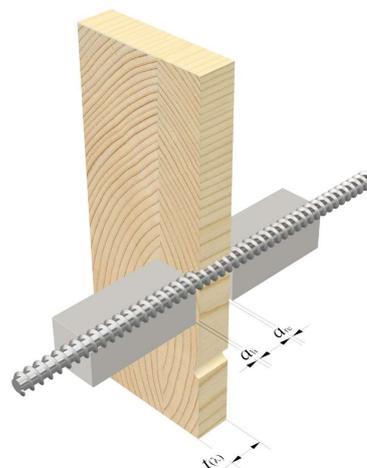
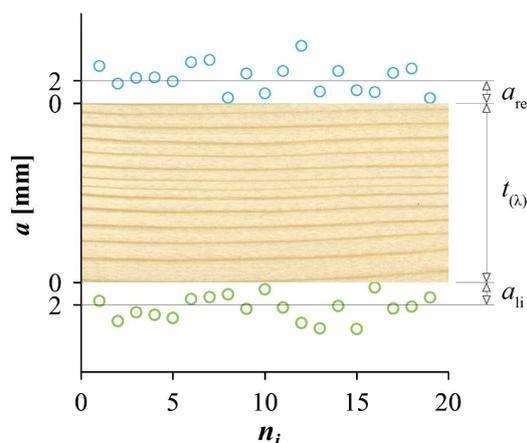


Abbildung 3-31 Abstand der Negativform zur Prüfkörperoberfläche je Prüfung der Referenzschraube (links: Verteilung der Abstände a_{li} bzw. a_{re} ; rechts: Prüfkörper der Serie B-{90-00})

⁴ Die Prüfkörpervorderseite ist durch das Anbringen der Probekörperbeschriftung definiert

Passgenauigkeit der Prüfaufsätze

Neben einer lastverteilenden Wirkung dienen die Prüfaufsätze zur Sicherstellung des gewünschten Kraft-Faserwinkels und fungieren als Bindeglied zwischen dem Prüfgerüst und dem Prüfkörper (vgl. Abschnitt 3-3.1.1). Von besonderer Bedeutung ist sowohl die Passgenauigkeit der Aufsätze, als auch die Vermeidung von Imperfektionen des Verbindungsmittels. Als Imperfektion wird dabei die Abweichung der Holzbauschraube vom Einschraubpunkt (Flächenschwerpunkt ohne Berücksichtigung der Bohrung des Messdübels), als auch die Abweichung von der orthogonal zur Prüfkörperseitenfläche ausgerichtete Verbindungsmittelachse verstanden.

Im Zuge der Applikation des Verbindungsmittels unter der Verwendung einer sich abnutzenden Einschraublehre (vgl. Abschnitt 3-2.1.8) führten die zuvor beschriebenen Imperfektionen zu einer Abweichung der Passgenauigkeit des Prüfaufsatzes. Die so entstandenen, geringfügigen Ungenauigkeiten im Ausmaß von wenigen Zehntel Millimetern zwischen dem Aufsatz und Probekörper (vgl. Abbildung 3-32, rechts) führten im linear elastischen Bereich des Kraft- Wegdiagramms durch die Überwindung der Haftreibung zum abrupten Abfall der Prüflast (vgl. Abbildung 3-32, links). Je nach Ausmaß der Imperfektion und der stetigen Überwindung der Haftreibung konnte schlussendlich der Prüfkörper seine Lage in der Passform finden.

Um einen stetigen Anstieg der Prüffunktion zu gewährleisten wurde den vorhandenen Imperfektionen mit dem Aufbringen einer geringen Vorlast von 50 bis 100 N entgegengewirkt und so die Formfindung des Probekörpers im Aufsatz vor Start der eigentlichen Prüfdurchführung unterstützt. Im Anschluss erfolgte biegesteife Fixierung in der Prüfkonfiguration und der Beginn der Prüfung.

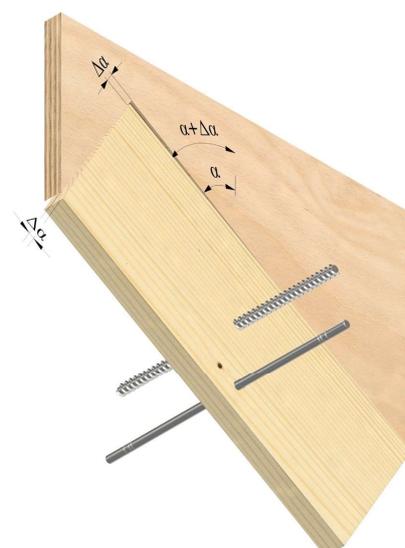
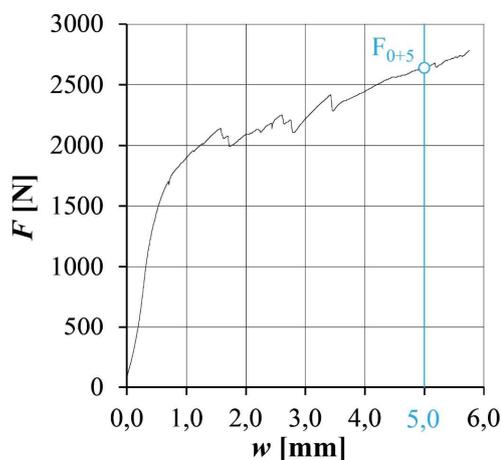


Abbildung 3-32 Einfluss von Imperfektionen und fehlender Passgenauigkeit auf die Kurvenstetigkeit (links: Unstetiges Kraft- Weg Diagramm; rechts: „überhöhte“ Darstellung der Auswirkung von Imperfektionen $\Delta\alpha$)

3-3.2.6 Beurteilung des Bruchzustands

Nach Abschluss der Prüfdurchführung und somit nach Erreichen des Bruchzustands wurde der Probekörper aus der Prüfkonfiguration entnommen und der Bruchzustand beurteilt, etwaige Auffälligkeiten im Prüfprotokoll vermerkt, bzw. die Vorder- und Rückseite photographisch dokumentiert. Im Zuge der Beurteilung sollen folgende Beobachtungen festgehalten werden:

- Unterscheidung des Bruchzustands nach Rohdichte
- Beobachtung des Versagens nach Vorder- bzw. Rückseite des Prüfkörpers
- Beurteilung des Bruchcharakteristikums nach Jahrringlage
- Beurteilung der Hauptrichtungen, bzw. unterschiedlicher Winkelkombination

Grundsätzlich soll in den nachfolgenden Zeilen die unterschiedlichen Bruchcharakteristika beschrieben und ein erster Grundstein für die nachfolgende Auswertung der gewünschten Kenngrößen und Interpretationen gelegt werden. Auf Basis der Winkelkombination {90-00} wird eine Beurteilung des Bruchcharakteristikums mit einer Gegenüberstellung der Rohdichteklassen, bzw. eine Unterscheidung der Vorder- bzw. Rückseite der Prüfkörper vorgenommen. Dabei ist die Kraftrichtung bei allen nachfolgenden Abbildungen, sofern nicht explizit ausgewiesen zufolge der Prüfdurchführung horizontal von rechts nach links gerichtet:

Bruchzustand nach Rohdichte (Vorder- Rückseite)

Besteht eine ähnliche Jahrringlage bei den Prüfkörpern je Rohdichteklasse, so konnte keine charakteristische Unterscheidung (vgl. Abbildung 3-34) im Bruchzustand festgestellt werden. Auf Grund der Druckbeanspruchung orthogonal zur Faserrichtung findet eine Stauchung der Zellbündel und die Ausbildung einer Druckfalte (lokales Stabilitätsversagen der Zellwandstruktur) statt. Bei einer entsprechenden Jahrringlage (vgl. Abbildung 3-34, unten- rechts) kann auf Grund einer Seilwirkung auf einen Einfluss der Messergebnisse geschlossen werden.

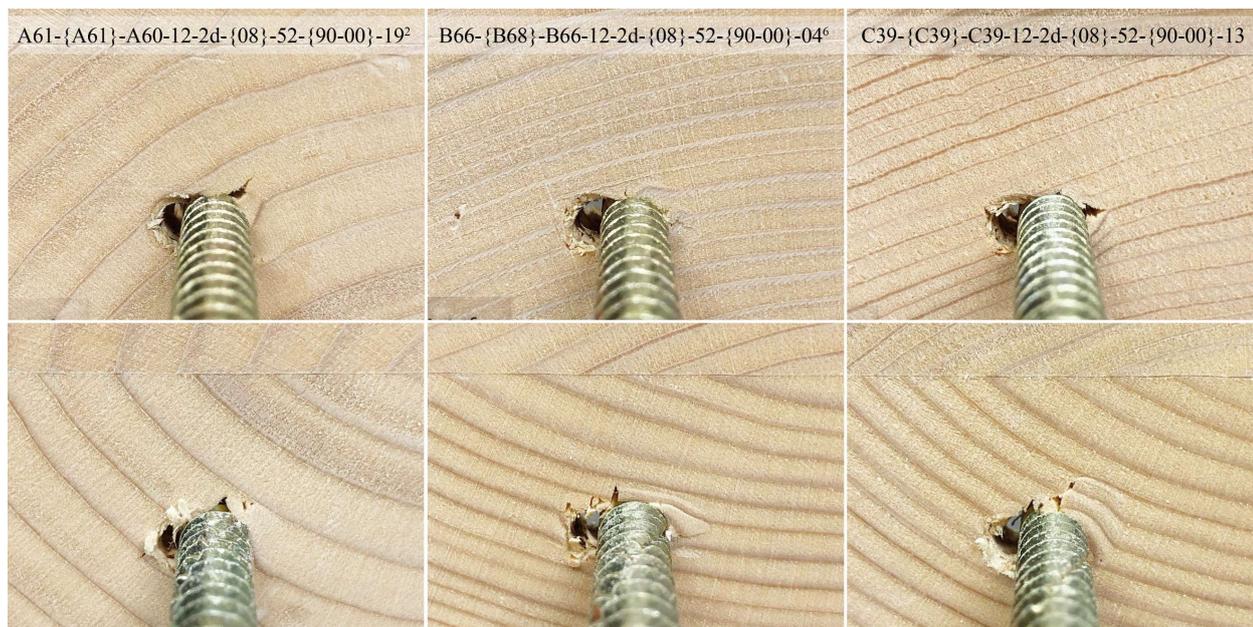


Abbildung 3-33 Beurteilung des Bruchzustands auf der Vor- Rückseite der Rohdichteklassen
(oben- li nach re: Vorderseite des Prüfkörpers mit aufsteigender Rohdichte;
unten- li nach re: Rückseite der Probekörper)

Bruchcharakteristikum nach Jahrringlage

Bei der Beurteilung des Bruchzustands in Abhängigkeit der Tagentenneigung lässt sich feststellen, dass vor allem bei großen Jahrringbreiten das Verbindungsmittel während der Prüfdurchführung in Bereiche mit geringer Steifigkeit wandert. Der Tagentenwinkel ξ ist durch die Neigung der gedachten Jahrringtangente zu der horizontalen Prüflast definiert. Vor allem eine etwaige Seilwirkung, bzw. auch die Steifigkeitsunterschiede vom Frühholz zum Spätholz könnten Einfluss auf das Messergebnis nehmen und soll an dieser Stelle festgehalten werden.

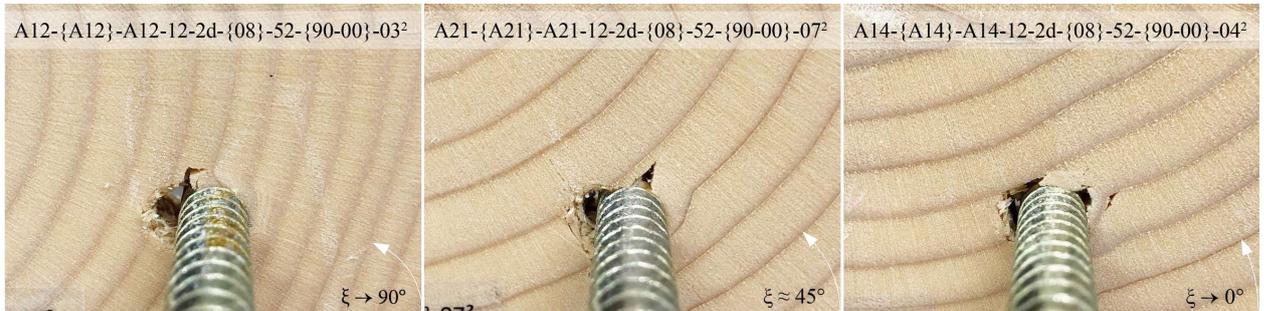


Abbildung 3-34 Bruchcharakteristikum nach Jahrringlage und dem resultierenden Tagentenwinkel
(li nach re: Abnehmender Tangentenwinkel, annähernd 90°- 45°- 0°)

Bruchzustand je Winkelkombination

Im ersten Schritt sollen das Bruchcharakteristikum der Hauptwinkelvariationen genauer betrachtet werden. Im Zuge dessen lässt sich bei der Winkelvariation $\{90-90\}$ ein ausgeprägter Seileffekt feststellen (vgl. Abbildung 3-35, oben- rechts), welcher sich ebenfalls bei der Variation des Kraft- Faserwinkel ausbildet. Bei der Betrachtung der Variation von α konnte kein außergewöhnliches Verhalten im Zuge der Prüfdurchführung und der Bruchbeurteilung festgestellt werden.

Bei der Variation des Achs- Faserwinkels konnte mit zunehmenden ϵ ebenfalls eine Zunahme der Rissbildung (vgl. Abbildung 3-35, unten- links nach rechts), entlang der im Prüfkörper schräg verlaufenden Faserrichtung beobachtet werden.



Abbildung 3-35 Bruchcharakteristika besonderer Winkelkombination
(oben- li nach re: Beurteilung der Hauptwinkelvariationen $\{90-00\}$, $\{00-90\}$, $\{90-90\}$
unten- li nach re: Zunahme der Rissbildung mit steigendem Achs- Faserwinkel ϵ)

3-3.2.7 Einflussgrößen

Grundlage dieser wissenschaftlichen Arbeit, welche auf einer experimentellen Untersuchung beruht, sind Probekörper in geeigneter Qualität. Diese sollen keine Einflussgrößen enthalten, welche in irgendeiner Art und Weise das Messergebnis verfälschen könnten. Bereits während der Vor- bzw. der Detailsortierung (vgl. Abschnitt 3-2) wird die Qualität der in weiterer Folge gefertigten Probekörper festgelegt. Besonders zu vermeiden sind Einflussgrößen, welche sich in Bereiche befinden, die direkten Einfluss auf die Primärmessung während der Prüfdurchführung, bzw. auf die Sekundärmessung wie die Ermittlung der Rohdichte, als auch die Holzfeuchtigkeit nehmen:

- Holzanomalien wie Einzel- oder Ansammlungen von Äste
- Harzgallen
- Übermäßige Rissbildung

Während der Prüfkörperfertigung wurde das Prinzip zur generellen Vermeidung von Holzanomalien angewandt. Einflussgrößen wurden im Zuge der Herstellung bewusst in Bereichen angeordnet (seitlichen Prüfkörperlamellen), welche keinen Einfluss (vgl. Abbildung 3-36, links) auf die gewünschten Messergebnisse nehmen. Besonders bei Prüfkörper die aus mehreren, untereinander verklebten Lamellen getrennt wurden, können nicht vorhersehbare Holzanomalien in Anzahl und in ihrer Lage im Probekörper auftreten. Dem wurde durch die Herstellung eines zweiten, identen Prüfkörpers, als „gesund schneiden“ bezeichnet, (vgl. Abbildung 3-36, mitte und rechts) entgegnet. Diese wurde, wie bereits beschrieben mit einer zusätzlichen Information (vgl. Abschnitt 3-1) am Ende der Probekörperbezeichnung in Form einer Hochzahl versehen, welche die Anzahl an identen, vorhandenen Prüfkörper beschreibt:

B32-~~{B30}~~-B30-A28-12-2d-~~{08}~~-52-~~{90-00}~~-12⁸

Nach der Prüfdurchführung ist in einem ersten Schritt die Darstellung wesentlicher Größen (F_{\max} , etc.) jeder Prüfung zur weiteren Verwendung in nachfolgenden, statistischen Betrachtungen erforderlich. Daher kommt es zuerst zu einer sogenannten Ausreißerbereinigung, welche wie nachfolgend dargestellt gegliedert werden kann:

- Ausscheiden von Prüfungen auf Grund Einflussgrößen behafteter Prüfkörper
- Bereinigung von Ergebnisgrößen im Zuge einer statistischen Betrachtung

Da während der Herstellung der Probekörper besonders auf deren Qualität geachtet wurde (vgl. Abbildung 3-36, rechts), kam es zu keiner Bereinigung der ermittelten Messgrößen auf Grund von Einflussgrößen behafteter Probekörper.

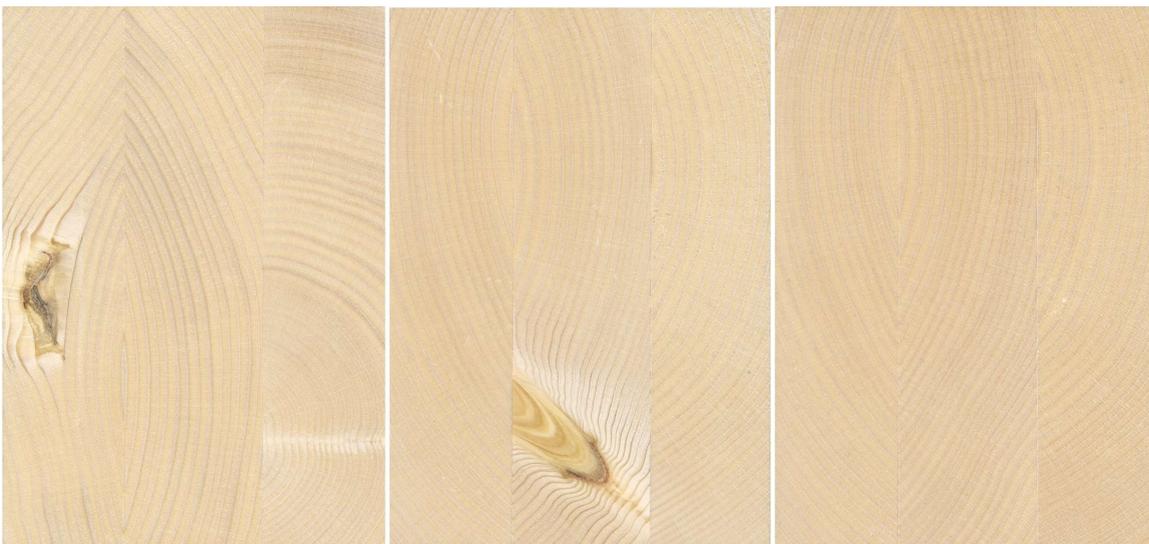


Abbildung 3-36 Prüfkörper, unmittelbar nach dem Zuschnitt
 (links: Prüfkörper der Serie B72-~~{B72}~~-B72-12-2d-~~{08}~~-52-~~{90-00}~~-03⁶;
 mitte und rechts: Prüfkörper der Serie B32-~~{B30}~~-B30-12-2d-~~{08}~~-52-~~{90-00}~~-12⁸;

3-3.3 Physikalische Kenngrößen (Data post- processing)

Unter der Ermittlung von physikalischen Größen wird die Bestimmung von holztechnologisch relevanten Kenngrößen verstanden, welche das mechanische Verhalten erheblich beeinflussen (vgl. Abschnitt 2-2). Als die zwei wissenschaftlich erwiesenen, bedeutendsten Vertreter, gelten:

- Rohdichte ρ in kg/m^3
- Holzfeuchtigkeit u in %

Grundlage zur Bestimmung der Rohdichte, als auch der Holzfeuchtigkeit bildet die sogenannte Darrprobe, bei welcher es sich um einen nicht geschädigten Teil des Prüfkörpers handelt. Die Entnahme der Darrprobe erfolgte unmittelbar nach der Prüfdurchführung aus einem Bereich, welcher sich möglichst nahe am Prüfbereich befindet und welcher durch die Prüfdurchführung nicht nachteilig beeinflusst wurde. Die Entnahme der Darrprobe erfolgte:

- Bei allen Probekörpern im Bereich zwischen der Bohrung des Messdübels, sowie dem Setzbereich des Verbindungsmittels
- Der Belastungsrichtung folgend (vgl. Abbildung 3-37, rechts)
- Ausnahmslos In der jeweiligen Lamelle je Prüfkörper (vgl. Abbildung 3-37, links)

Diese folgt der geometrischen Form eines Prismas mit rechteckiger Grundfläche, sodass die Dimensionen im Zuge des Vermessungsprozesses eindeutig festgelegt sind. Auf Grundlage der Darrprobe sollen im nächsten Schritt die Ermittlung der technologischen Kenngrößen beschrieben werden:

3-3.3.1 Rohdichte ρ

Als wesentlicher Einflussparameter, Bezug nehmend auf die Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften von Vollholz wurde die Rohdichte durch Ermittlung der Masse und geometrischen Abmessungen (vgl. ÖNORM ISO 3131 [19]) aus der Darrprobe bestimmt. Zur Bestimmung der Masse wurde eine Waage mit einer Präzision von 0,01 g, sowie zur Ermittlung Seitenlängen des Prismas ein digitaler Messschieber mit einer Genauigkeit von 0,01 mm verwendet.

Bei der Bestimmung der Seitenlängen wurden Messungen an zwei jeweils gegenüberliegenden Messstellen durchgeführt, um etwaige Ungenauigkeiten beim Zuschnittprozess der Darrproben zu kompensieren.



Abbildung 3-37 Entnahmestelle der Darrprobe bei unterschiedlichen Prüfserien
(links: Probekörper der Winkelvariation {45-45}
rechts: Probekörper der Variation {30-90})

Da die Entnahme der Darrprobe unmittelbar nach der Prüfdurchführung erfolgte, kann die Rohdichte zum Zeitpunkt der Prüfdurchführung, wie folgt berechnet (vgl. ÖNORM ISO 3131 [19]) werden:

$$\rho_u = \frac{m_u}{a_u \cdot b_u \cdot l_u} = \frac{m_u}{V_u} \quad (3.29)$$

Dabei sind:

- ρ_u Dichte jedes Prüfkörpers bei einem Feuchtegehalt w in kg/m^3
- u Feuchtegehalt der zum Zeitpunkt der Prüfung in %
- m_u Masse des Prüfkörpers mit dem Feuchtegehalt w in Kilogramm (Gramm)
- a_u, b_u, l_u ...Das jeweilige Maß des Prüfkörpers beim Feuchtegehalt w , in Meter (oder Zentimeter)
- V_u Das Volumen des Prüfkörpers beim Feuchtegehalt w , in Kubikmetern (oder Kubikzentimeter)

Um einen Einfluss der Holzfeuchtigkeit auf die gewünschten, mechanische Kenngrößen innerhalb einer Prüfserie zu unterbinden, wurde eine umfangreiche Konditionierung unter genormten, klimatischen Bedingungen durchgeführt (vgl. ÖNORM EN 383 [13]). Geringfügige Abweichungen der Holzfeuchtigkeit bei der Bestimmung der Rohdichte (vgl. ÖNORM EN 384 [20]) können durch die Anwendung der nachfolgenden Gesetzmäßigkeit adjustiert werden:

$$\rho_{12} = \rho_u \cdot (1 - 0,005 \cdot (u - u_{12})) \quad (3.30)$$

Dabei sind:

- ρ_{12} Dichte jedes Prüfkörpers bei einem Feuchtegehalt von 12 % in kg/m^3
- u Holzfeuchte je Probekörper in %
- u_{12} Gewählte Referenzfeuchtigkeit $u_{12} = 12$ %

Die zur Ermittlung der Rohdichte bei einem Referenzfeuchtegehalt von 12 % benötigte, tatsächlich vorherrschende Holzfeuchtigkeit in jedem Prüfkörper, wird wie im nachfolgenden Absatz dokumentiert, ermittelt.

3-3.3.2 Holzfeuchtigkeit u

Zur Bestimmung der Holzfeuchtigkeit u wird, wie zur Ermittlung der Rohdichte, die zuvor beschriebene Darrprobe herangezogen. Die Methode zur Feuchtermittlung nach dem Darrverfahren stellt das präziseste Verfahren zur Bestimmung der Holzfeuchtigkeit dar. Das Prinzip beruht auf einer Erstwiegung unmittelbar nach dem Zuschnitt der Darrprobe mit einer anschließenden Trocknung in einem Darrofen bei (103 ± 2) C bis zur Massekonstanz (vgl. ÖNORM EN 13183-1 [22]). Proben werden als darrtrocken bezeichnet, wenn der Masseunterschied zwischen zwei aufeinanderfolgenden Wiegungen im Abstand von 2 h weniger als 0,1 % beträgt.

Nach positiver, stichprobenartiger Überprüfung der Massenkonstanz ist die Masse im darrtrockenen Zustand eines jeden Prüfkörpers durch Wiegen zu bestimmen. Im Anschluss kann der Feuchtegehalt je Prüfkörper, wie folgt errechnet werden:

$$u = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \cdot 100 \quad (3.31)$$

Dabei sind:

- u Holzfeuchtigkeit in %
- m_1 Masse des Prüfkörpers unmittelbar nach der Entnahme der Darrprobe in g
- m_0 Masse des Prüfkörpers im darrtrockenen Zustand in g

3-3.4 Mechanische Kenngrößen (Data post- processing)

Ziel dieser Untersuchung ist die Bestimmung lateraler Kenngrößen der Festigkeit und Steifigkeit von in Holz gebetteten Holzbauschrauben (vgl. Abschnitt 3-1). Basierend auf die vorangegangene Beschreibung der experimentellen Ermittlung soll in den nachfolgenden Zeilen die Methodik zur Bestimmung der gesuchten Größen der Festigkeit und Steifigkeit beschrieben werden:

- Laterale Kenngröße der Festigkeit Lochleibungsfestigkeit f_h
- Laterale Kenngröße der Steifigkeit $K_{ser,lat}$

Es soll an dieser Stelle festgehalten werden, dass diese Kenngrößen aus der Prüfdurchführung und die daraus gewonnen Messdaten bestimmt wurden. Durch Auswertung des experimentell ermittelten Kraft- Verschiebungsdiagramms (auch als Arbeitslinie bezeichnet) können alle erforderlichen Größen zur Bestimmung der gesuchten, lateralen Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften bestimmt werden.

3-3.4.1 Lochleibungsfestigkeit

Auf Basis der Ermittlung von F_{max} (vgl. Abbildung 3-38, links) der experimentellen Untersuchung je Probekörper (vgl. Abschnitt 3-3.2.2) und der Festlegung einer geeigneten, projizierten Fläche, auf welche diese bezogen wird, kann die Lochleibungsfestigkeit bestimmt werden.

$$f_{h,i} = \frac{F_{max,i}}{A_i} = \frac{F_{max,i}}{t_{(\lambda),i} \cdot d_i} \quad (3.32)$$

Dabei sind:

- $f_{h,i}$ Aus experimentellen Untersuchungen ermittelte Lochleibungsfestigkeit in N/mm²
- $F_{max,i}$ Maximale Prüfkraft je Probekörper in N
- A_i Projizierte Fläche je Probekörper in mm²
- $t_{(\lambda),i}$ Dicke des Prüfkörpers in Abhängigkeit der Schlankheit in mm
- d_i Durch Messung ermittelter Außendurchmesser des Verbindungsmittels in mm
- i Fortlaufende Nummer eines Probekörpers je Prüfserie

Bei der Wahl einer geeigneten Fläche wird neben der Probekörperstärke $t_{(\lambda)}$, der Außendurchmesser des Verbindungsmittels vorgeschlagen. Um die Lochleibungsfestigkeit unter realistischen Bedingungen abzubilden, werden die Parameter zu Ermittlung der projizierten Fläche aus den tatsächlich gemessenen Werten bestimmt:

Die Dicke je Prüfkörper $t_{(\lambda),i}$ kann aus der Vermessung der Darrproben bezogen werden. Um eine realistische Abbildung des Außendurchmessers abzubilden, wurde dieser im Zuge des Einbaus des Probekörpers in die Prüfkfiguration vermessen (vgl. Abschnitt 3-3.2.4).

3-3.4.2 Steifigkeit

Wie auch zur Bestimmung der Lochleibungsfestigkeit wird zur Ermittlung der Steifigkeitskenngrößen, das Kraft- Verschiebungsdiagramm je Probekörper aus den experimentellen Untersuchungen herangezogen. Nachfolgend soll an Hand eines Probekörpers der Serie {90-00} das Vorgehen (vgl. Abbildung 3-39, links) zur Bestimmung unterschiedlicher Steifigkeiten gezeigt werden:

Grundsätzlich beschreibt die Steifigkeit den Grad des Anstiegs im linear, elastischen Bereich (Steigung der Arbeitslinie) zwischen zwei festgelegten Grenzen:

$$K_{\text{ser,lat}} = \frac{\Delta F}{\Delta u} = \frac{F_1 - F_0}{u_1 - u_0} \quad (3.33)$$

Dabei sind:

- $K_{\text{ser,lat}}$Aus experimentellen Untersuchungen ermittelte Steifigkeit in N/mm
- F_0, u_0 Kraft, bzw. dazugehörige Verschiebung des unteren, definierten Grenzbereichs in N, bzw. mm
- F_1, u_1 Kraft, bzw. dazugehörige Verschiebung des oberen, definierten Grenzbereichs in N, bzw. mm

Bei der Bestimmung der Steifigkeit, können sowohl die festgelegten Grenzen des Auswertebereichs justiert, als auch unterschiedliche Methoden zur Bestimmung der Steifigkeit innerhalb dieser Grenzen angewandt werden:

- Ermittlung der linearen Steifigkeit zwischen zwei Grenzpunkten mittels der „Differenzmethode“
- Bestimmung der Steifigkeit mittels eines linearen Regressionsmodells

Auf Grund der teilweisen Prüfdurchführung je Prüfserie mit Vorbelastungszyklus (vgl. Abschnitt 3-3.2.1) wurde der obere Grenzwert zur Steifigkeitsbestimmung in dessen Anlehnung mit $0,4 \cdot F_{\text{max}}$, bzw. der untere Grenzwert mit $0,1 \cdot F_{\text{max}}$ global zur Steifigkeitsbestimmung für alle Prüfungen vorgesehen. Zwischen diesen, definierten Grenzen kann die Steifigkeit nach unterschiedlichen Methoden, wie nachfolgend beschrieben, ermittelt werden:

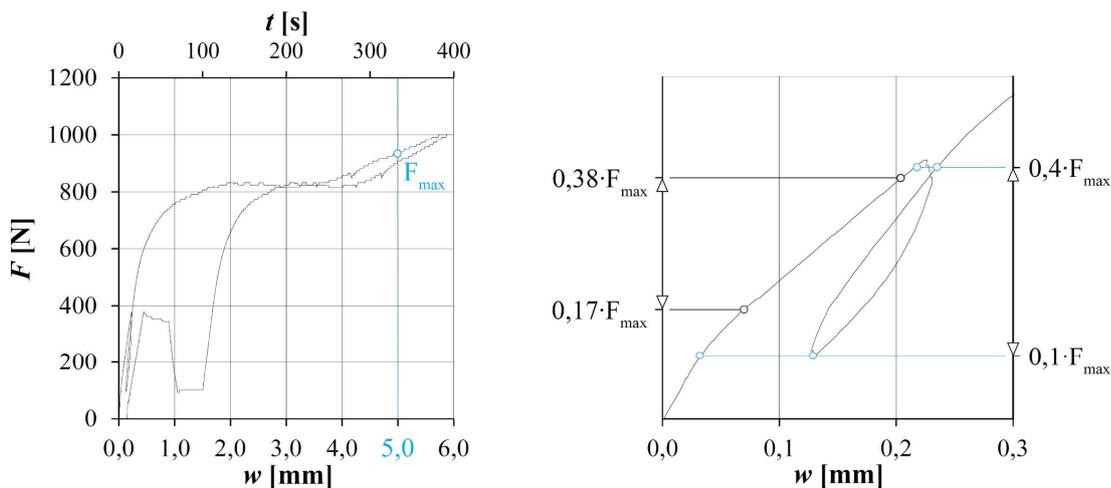


Abbildung 3-38 Arbeitslinie des Probekörpers {B42}-12-2d-{08}-52-{90-00}-10
(links Kraft- Verformung bzw. Kraft- Weg Diagramm);
rechts: Vergrößerung des Vorbelastungszyklus (Hysteresese)

Die festgelegten Grenzpunkte $0,1$ bzw. $0,4 \cdot F_{\max}$ dienen vor allem bei Arbeitslinien, welche keinen ausgeprägten, linear ansteigenden Ast des Vorbelastungszyklus aufweisen, als Anhaltspunkt zur Steifigkeitsbestimmung. Zur Bestimmung der Steifigkeit kann der Bereich exakt zwischen diesen Grenzpunkten, oder nur ein Teilabschnitt verwendet werden. Zwischen den Grenzpunkten wurden dabei folgende Methoden zur Bestimmung der Steifigkeit des Vorbelastungszyklus ...

- Lineares Modell zwischen den Grenzpunkten der Erstbelastung
- Anwendung eines linearen Regressionsmodells
- Steifigkeitsbestimmung auf Basis der Steigung der Arbeitslinie

bzw. als auch für die der Wiederbelastung angewandt:

- Anwendung eines linearen Regressionsmodells zwischen den Grenzpunkten der Wiederbelastung

Bei der Anwendung des Modells einer linearen Einfachregression erfolgt die Anpassung einer Regressionsgeraden an den Teilabschnitt der Arbeitslinie, welcher durch die exakt definierten Grenzpunkten gegeben ist und gleicht somit eine etwaige nicht-Linearität der Arbeitslinie im Vorbelastungszyklus aus.

Das Prinzip der Steifigkeitsbestimmung mittels der Steigung an der Arbeitslinie, beruht auf einer Bestimmung von gesonderten Grenzpunkten innerhalb des bereits definierten Bereichs, mit dem Ziel einen akkuraten, linearen Bereich der Arbeitslinie zu erhalten. Dabei wurde wie folgt vorgegangen:

- Bestimmung der Steigung in jedem Punkt der Arbeitslinie
- Anwendung eines linearen Regressionsmodells unter Variation der Grenzen mit dem Ziel der Bestimmung einer Geraden mit der kleinsten Steigung (durch die Variation der Grenzen kann der optimale, lineare Bereich der Arbeitslinie bestimmt werden)
- Ermittlung der Steifigkeit durch lineare Regression auf Basis der neu festgelegten Grenzpunkte

Im Zuge der Auswertung und der Bestimmung der Lochleibungsfestigkeit, als auch den jeweiligen Steifigkeiten wurde ein Zeilen-basiertes Auswertefile erstellt. Daher werden alle gesuchten Größen indirekt über einen Zeilen-Bezug ermittelt. Der Vorteil dieses Systems liegt in der einfachen Bestimmung zugehöriger Größen von Interesse. Daher wurde die Steigung der Arbeitslinie über die fortlaufende Zeilennummerierung des Kraft- Verschiebungsdiagramm aufgetragen (vgl. Abbildung 3-39, rechts).

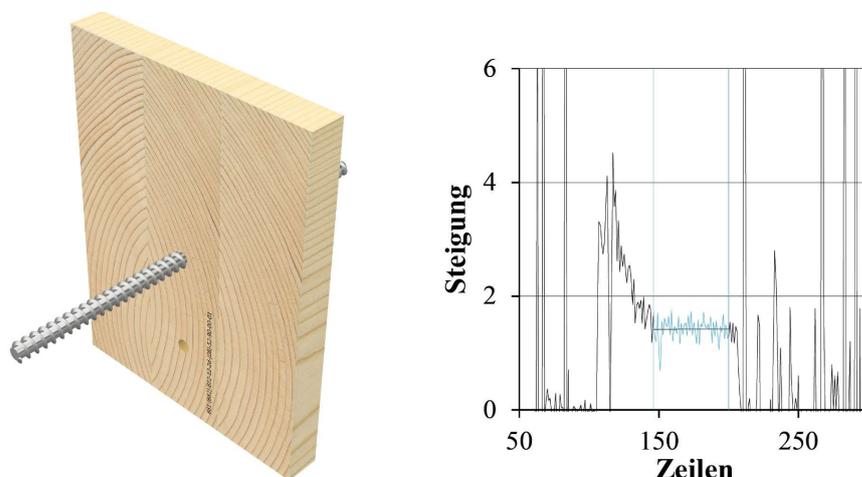


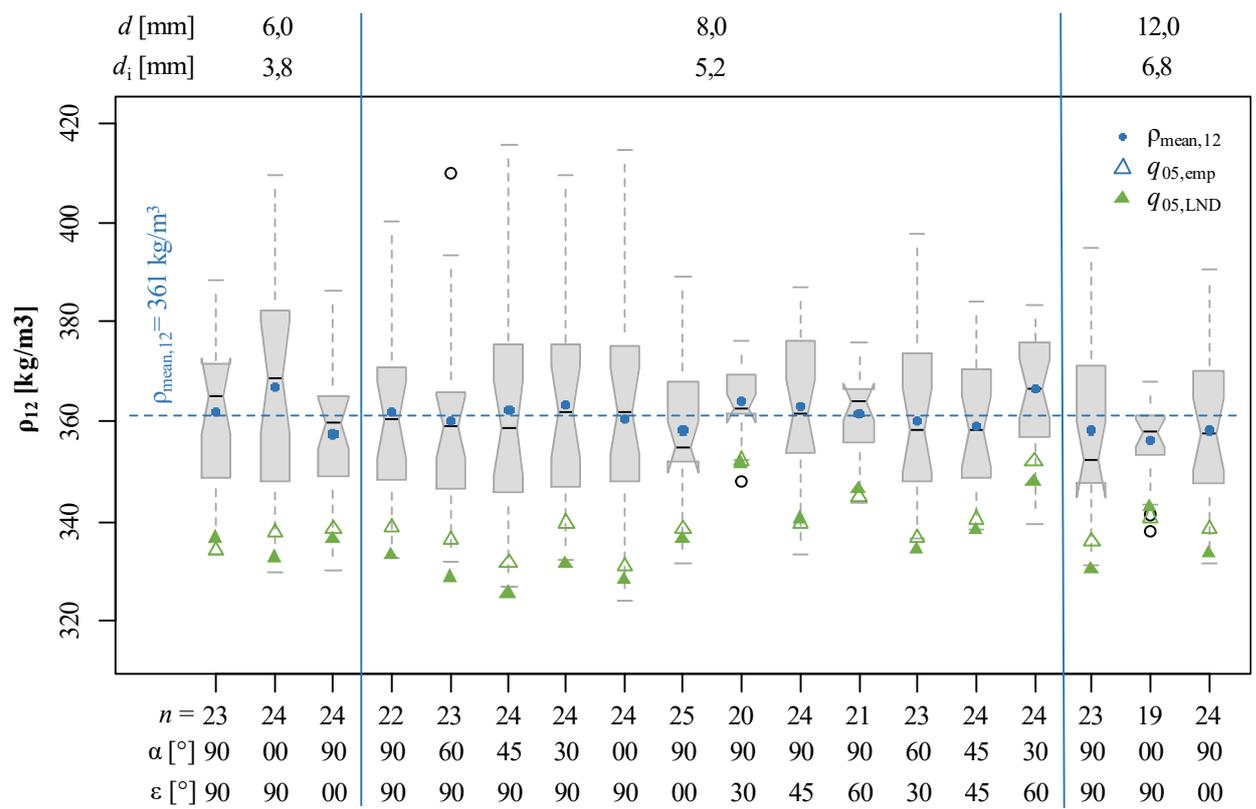
Abbildung 3-39 Bestimmung des optimalen, linearen Bereichs des Kraft- Verformungsdiagramms (links Prüfkörper {B42}-12-2d-{08}-52-{90-00}-10); rechts: Steigung der Arbeitslinie)

KAPITEL 4: ERGEBNISSE UND DISKUSSION

KAPITEL 5: MODELLBILDUNG UND VERIFIKATION

KAPITEL 6: ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

KAPITEL 7: ANHANG



CHECKLIST – nach der Fertigstellung der Arbeit zu erledigen

- Seitenbacken (als A4 den Plan in Druck, als A5 in .pdf)
- Alle Abbildungen auf die richtige Formatvorlage legen
- Alle Abbildungen aufhellen - siehe Bruchbeurteilung =)
- Abschnittswechsel bei den Hauptkapitel'n noch überall einfügen
- Checken, ob' alle Formelzeichen je Seite definiert sind – so wurde es festgelegt, so soll es geschehen =)

Literatur

- [1] Schickhofer et al. Nachweisführung für Konstruktionen aus Holz.
- [2] Ringhofer A. Axially loaded self-tapping screws in solid timber and laminated timber products; 2017. (Monographic series TU Graz. Timber engineering & technology).
- [3] krenn. HK.book.
- [4] katarina. 311_2_Monotones und zyklisches Verhalten von Schraubenverbindungen in BSP-Strukturen.
- [5] kpoock. Schraubverbindungen im praktischen Einsatz.
- [6] ÖNORM B 1995-1-1 Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau: Nationale Festlegungen zur Umsetzung der ÖNORM EN 1995-1-1, nationale Erläuterungen und nationale Ergänzungen. Ausg. 2015-06-15, Ersatz für: ÖNORM B 1995-1-1:2014-11.
- [7] Wagenführ A, Scholz F. Taschenbuch der Holztechnik. 2., aktualisierte Aufl. München: Fachbuchverl. Leipzig; 2012.
- [8] Institute of Wood Science and Technology, Vienna. Effects of cell anatomy on the plastic and elastic behaviour of different wood species loaded perpendicular to grain.
- [9] DIBt - Deutsche Institut für Bautechnik: Würth selbstbohrende Schrauben als Holzverbindungsmittel; 2018+07-23 2018+07-23.
- [10] Blaß HJ, Bejtka I, Uibel T. Tragfähigkeit von Verbindungen mit selbstbohrenden Holzschrauben mit Vollgewinde. Karlsruhe: Univ.-Verl. Karlsruhe; 2006. (Karlsruher Berichte zum IngenieurholzbauBd. 4).
- [11] LRJ Whale IS, Hrsg. The derivation of design clauses for nailed and bolted joints in eurocode 5.
- [12] DIN 571 Sechskant-Holzschrauben.
- [13] ÖNORM EN383 Holzbauwerke - Prüfverfahren: Bestimmung der Lochleibungsfestigkeit und Bettungswerte für stiftförmige Verbindungsmittel.
- [14] Bejtka I. Verstärkung von Bauteilen aus Holz mit Vollgewindeschrauben [Zugl.: Karlsruhe, Univ., Diss., 2005]. Karlsruhe: Univ.-Verl. Karlsruhe; 2005.
- [15] ÖNORM DIN 4074-1 Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit: Teil 1: Nadelschnittholz. Ersatz für DIN 4074-1: 2009-06: Österreichische Normungsinstitut (ON); 2012. (79.040) 01.09.2012.
- [16] ÖNORM EN 338 Bauholz für tragende Zwecke: Festigkeitsklassen. Ausg.: 2016-06-01, Normengruppe B; Ersatz für EN 338:2009; 2016. (ÖNORM : EN).
- [17] ÖNORM ISO 3130 (1994-10-01): Darrverfahren - Labormethode.
- [18] ÖNORM EN 13183-2 Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz: Teil 2: Schätzung durch elektrisches Widerstandsmessverfahren: Österreichische Normungsinstitut (ON); 2002. (79.040) 01.07.2002.
- [19] ÖNORM ISO 3131 Bestimmung der Dichte für physikalische und mechanische Prüfungen.
- [20] ÖNORM EN 384 Bauholz für tragende Zwecke: Bestimmung charakteristischer Werte für mechanische Eigenschaften und Rohdichte. Ausg. 2016-11-01, Ersatz für: ÖNORM EN 384: 2010-05.
- [21] Niemz P, Sonderegger WU. Holzphysik: Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG; 2018.
- [22] ÖNORM EN 13183-1 Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz: Teil 1: Bestimmung durch Darrverfahren. Ersatz für: 2002-07: Österreichische Normungsinstitut (ON); 2004. (79.040) 01.02.2004.