

# Einflussparameter auf die Querzugfestigkeit von BSH-Lamellen

D-4-4/2011



**Alfons Stuefer**  
Institut für Holzbau und Holztechnologie  
Technische Universität Graz



# Einflussparameter auf die Querkzugfestigkeit von BSH-Lamellen

Diplomarbeit von  
**Alfons Stuefer**

Eingereicht am  
Institut für Holzbau und Holztechnologie  
Technische Universität Graz

Begutachtung:  
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerhard Schickhofer

Betreuer:  
Dipl.-Ing. Gernot Pirnbacher

Graz, Juni 2011

---



*... meinen Eltern und meinen Geschwistern*

*in Dankbarkeit gewidmet*



## Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benutzt, und die in den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Alfons Stuefer

Graz, Juni 2011

---





## Danksagung

In erster Linie möchte ich mich bei meinen Eltern für die jahrelange Unterstützung und das Ermöglichen eines Studiums bedanken. Ein besonderer Dank gilt auch meinen Geschwistern, Karlheinz, Alexia und Toni die mich immer mit Rat und Tat unterstützt haben.

Besonderer Dank gilt meinem Betreuer Gernot Pirnbacher, der stets ein offenes Ohr für meine Fragen hatte. Großen Dank auch an Reinhard Brandner der mir bei der statistischen Auswertung eine große Hilfe war. Elisabeth Kastner danke ich für die Unterstützung bei der Aufnahme der Lamellen und für die ständige Bereitschaft mir bei jederlei Problem zu helfen. Ein Dankeschön auch an Alexandra Thiel die bei der Software-Entwicklung behilflich war. Für die tatkräftige Unterstützung bei der Durchführung der Versuche möchte ich mich bei Thomas Kröpfl, Robert Jöbstl und Bernd Heissenberger bedanken. Weiterer Dank gilt Andreas Ringhofer, Georg Flatscher, Gregor Silly und Ulrich Hübner, die stets ein offenes Ohr für meine Belange hatten.

Bei Herrn Professor Gerhard Schickhofer möchte ich mich im Besonderen bedanken, denn er war es, der mir die Möglichkeit gab, eine so umfangreiche Diplomarbeit durchzuführen.

---



## Kurzfassung

In den letzten Jahrzehnten ist es immer zu Schäden an Brettschichtholzträgern infolge planmäßiger Querkzugbeanspruchung gekommen. Um den Stand der Technik und des Wissens darzustellen, wurde im Rahmen dieser Diplomarbeit die aktuelle Literatur zusammengefasst. Aufbauend auf diesen Informationen wurden Versuche entwickelt um die wesentlichen Parameter die die Querkzugfestigkeit von Brettschichtholz beeinflussen zu identifizieren. Die Versuche fanden nicht an fehlerfreiem Holz statt, sondern wurden mit Lamellen durchgeführt, die zur Herstellung von Brettschichtholzträgern der Festigkeitsklasse GL 24h verwendet werden. Dabei wurden zwei Querkzugflächen und vier Volumen untersucht.

Für die Beschreibung der Querkzugfestigkeit ( $f_{t,90}$ ) wurden die Parameter Markabstand, Querkzug-E-Modul und Jahrringbreite als relevant identifiziert. Bei der Volumenabhängigkeit der Querkzugfestigkeit konnte ein serieller und paralleler Systemeffekt herausgearbeitet werden. Die Abhängigkeit vom Volumen wurde bestätigt, der 5% Fraktilwert der Querkzugfestigkeit bei einem Volumen von  $0,9 \text{ dm}^3$  beträgt  $2,17 \text{ N/mm}^2$ , bei dem sechsfachen Volumen von  $5,4 \text{ dm}^3$  fällt der 5% Fraktilwert der Querkzugfestigkeit auf  $0,89 \text{ N/mm}^2$  ab. Das ist ein Abfall der Festigkeit um 60% bezogen auf das Volumen von  $0,9 \text{ dm}^3$ . Im Bereich der Volumenabhängigkeit gibt es noch weiteren Forschungsbedarf für Volumen von  $10 \text{ dm}^3$  und größer.

## Abstract

Over the last decades many glulam beams damage due to regular tension perpendicular to the grain. A literature study was carried out to give an overview of the current state-of-the-art. Based on this information tests were developed to identify the important parameters that influence tension perpendicular to the grain. Instead of clear wood, lamellas for the production of glulam timber of the strength class GL 24h were used as test material. Four volumes and two areas subjected to tension stress perpendicular to grain were tested.

The parameters: distance to pith, tension modulus of elasticity perpendicular to grain and annual ring width were identified as parameters influencing tension strength perpendicular to grain ( $f_{t,90}$ ). In case of volume dependency a serial and parallel system effect could be identified. The volume effect for tension strength perpendicular to grain was confirmed. The 5% quantile of tension strength perpendicular to grain of a volume of  $0,9 \text{ dm}^3$  is  $2,17 \text{ N/mm}^2$ , while it is only  $0,89 \text{ N/mm}^2$  for a six times larger volume of  $5,4 \text{ dm}^3$ . This is a loss 60% compared to a volume of  $0,9 \text{ dm}^3$ . Therefore further research is needed concerning the volume effect for volumes up to  $10 \text{ dm}^3$  and larger.

---



# Einflussparameter auf die Querkzugfestigkeit von BSH-Lamellen

## Einleitung

|   |                                   |   |
|---|-----------------------------------|---|
| 1 | Darstellung der Problematik ..... | 1 |
|---|-----------------------------------|---|

## Stand der Technik und des Wissens

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | Verhalten von Brettschichtholz bei Querkzugbeanspruchung .....  | 3  |
| 1.1   | Zugbeanspruchung rechtwinklig zur Faserrichtung .....   | 3  |
| 1.2   | Elastisches Verhalten bei Querkzugbeanspruchung.....  | 5  |
| 1.2.1 | Zylindrische Anisotropie .....  | 5  |
| 1.2.2 | Spannungsverteilung im Querschnitt eines Einzelbrettes unter Querkzugbelastung ....                             | 11 |
| 1.2.3 | Spannungsverteilung über den BSH-Querschnitt bei Querkzugbelastung .....  | 16 |
| 1.2.4 | Spannungsverteilung über den Querschnitt eines gekrümmten Brettschichtholzträgers unter Momentenbelastung ..... | 20 |
| 1.3   | Bestimmung des Einflusses des Querschnittsaufbaus auf die Festigkeit anhand von Versuchen .....                 | 24 |
| 1.3.1 | Versuche zur Ermittlung der Dehnungsverteilung einer Einzellamelle .....  | 24 |
| 1.3.2 | Versuche zur Ermittlung der globalen Steifigkeit von BSH in Abhängigkeit vom Querschnittsaufbau .....           | 26 |
| 1.3.3 | Bruchformen und Schädigungsverlauf bei BSH-Proben .....   | 28 |
| 1.3.4 | Globales Last-Verformungsverhalten .....  | 30 |
| 1.3.5 | Schädigungsmodell für BSH bei Querkzugbeanspruchung .....   | 31 |
| 1.3.6 | Einfluss des Querschnittsaufbaus auf die Querkzugfestigkeit .....   | 32 |
| 1.3.7 | Zusammenfassung .....   | 33 |

## Experimentelle Untersuchungen

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | Versuchsplanung .....                          | 35 |
| 1.1   | Prüfmaschine.....                              | 35 |
| 1.2   | Versuchsaufbau .....                           | 36 |
| 1.2.1 | Allgemeines .....                              | 36 |
| 1.2.2 | Krafteinleitung .....                          | 36 |
| 1.3   | Auswahl der Materialien .....                  | 41 |
| 1.3.1 | Verwendetes Holz für die Prüfkörper .....      | 41 |
| 1.3.2 | Verwendetes Holz für die Krafteinleitung ..... | 45 |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 1.3.3    | Verwendete Schrauben für die Krafteinleitung .....  | 46        |
| <b>2</b> | <b>Versuchsdurchführung .....</b>   | <b>49</b> |
| 2.1      | Herstellung der Prüfkörper .....  | 49        |
| 2.1.1    | Prüfkörperbezeichnung .....   | 49        |
| 2.1.2    | Prüfkörperherstellung .....   | 53        |
| 2.2      | Versuche .....  | 55        |
| 2.2.1    | Allgemeines .....   | 55        |
| 2.2.2    | Verschraubung .....   | 55        |
| 2.2.3    | Messtechnik zur Bestimmung von $E_{t,90}$ .....   | 55        |
| 2.2.4    | Versuchsablauf .....  | 56        |
| 2.2.5    | Feuchtegehalt der Prüfkörper .....  | 57        |
| <b>3</b> | <b>Versuchsauswertung .....</b>   | <b>58</b> |
| 3.1      | Parameterbestimmung .....   | 58        |
| 3.1.1    | Querzug E-Module $E_{t,90}$ .....   | 58        |
| 3.1.2    | Querzugfestigkeit $f_{t,90}$ .....  | 58        |
| 3.2      | Datenerfassung .....  | 59        |
| 3.3      | Auswertung .....  | 61        |
| 3.3.1    | Quantile-Quantile-Plot (Q-Q-Plot) .....   | 61        |
| 3.3.2    | Parameteruntersuchung .....   | 65        |
| 3.3.3    | Versagensarten (Bruchformen) .....  | 74        |
| 3.3.4    | Versagensverlauf .....  | 80        |
| 3.3.5    | Statistische Kennwerte für die reduzierten Gruppen: .....                                   | 81        |
| 3.3.6    | Quantil-Quantil-Plot Datensatz bereinigt .....  | 82        |
| 3.3.7    | Normierung der Querzugfestigkeit gegen die Rohdichte .....                                  | 86        |
| 3.3.8    | Ergebnisse der Einzellamellen .....   | 88        |
| 3.3.9    | Ergebnisse der Hauptgruppen .....   | 93        |
| 3.4      | Parameter der Querzugfestigkeit .....   | 94        |
| 3.4.1    | ANOVA (analysis of variance, Varianzanalyse) .....  | 94        |
| 3.4.2    | ANOVA .....   | 94        |
| 3.4.3    | Scatterplots .....  | 99        |
| 3.4.4    | Untersuchung der Korrelation der Querzugfestigkeit zwischen Abschnitten einer Lamelle ..... | 105       |
| 3.5      | Volumeneffekt $k_{vol}$ .....   | 106       |
| 3.5.1    | Serieller und paralleler Volumeneffekt .....  | 106       |
| 3.5.2    | Sperreffekt .....   | 112       |
| 3.6      | Zusammenfassung .....   | 115       |
| 3.6.1    | Allgemeines .....   | 115       |

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 3.6.2 | Parameter der Querkzugfestigkeit ..... | 115 |
| 3.6.3 | Volumeneffekt .....                    | 115 |

## Ausblick

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| <b>1</b> | <b>Zukünftige Forschungsschwerpunkte .....</b> | <b>117</b> |
| 1.1      | Eigenspannung.....                             | 117        |
| 1.1.1    | Eigenspannungen der Lamelle .....              | 117        |
| 1.1.2    | Spannungsverteilung mit Sperreffekt .....      | 117        |
| 1.1.3    | FE-Berechnung und E-Modul-Erfassung .....      | 117        |
| 1.2      | Ausweitung der Versuche.....                   | 118        |
| 1.2.1    | Volumen .....                                  | 118        |
| 1.2.2    | Parametervariationen .....                     | 118        |
| 1.3      | Langzeitverhalten .....                        | 119        |
| 1.4      | Feuchteverhalten .....                         | 119        |

## Literaturverzeichnis

## Abbildungsverzeichnis





# Einleitung

## 1 Darstellung der Problematik

Die in den letzten Jahrzehnten aufgetretenen Risschäden an Brettschichtholzträgern mit Querkzugbeanspruchung geben Anlass in verstärktem Maße nach den Ursachen zu forschen. Planmäßige Querkzugbeanspruchungen treten im Holzbau bei gekrümmten, satteldachförmigen Brettschichtholzträgern und bei Queranschlüssen auf. Auch bei Ausklinkungen und Durchbrüchen kann das Versagen des Holzes quer zur Faser für die Tragfähigkeit maßgebend sein. [1]

Wesentliche Probleme die im Zusammenhang mit der Bemessung solcher Bauteile auftreten, sind die ungenügende Beachtung der Anisotropie und der generellen Inhomogenität des Holzes bei der Berechnung der Querkzugspannungen, sowie das Außerachtlassen der starken Abhängigkeit der Querkzugfestigkeit vom querkzugbeanspruchten Volumen. Da es für diese Thematik nur wenig direkt einsetzbare Lösungen und Normen gibt, ist es für den Ingenieur im Alltag schwer, eine saubere klar nachvollziehbare Bemessung durchzuführen. [2]

Zudem ist die Volumenabhängigkeit der Querkzugspannungen zwar in den Normen eingebettet, beispielsweise durch den Beiwert  $k_{vol}$ , jedoch bedarf es einer Verifizierung der bisherigen Annahmen, die im Zusammenhang mit dieser Arbeit erfolgen soll. Ziel dieser und folgender Arbeiten ist es sein eindeutige Aussage über die Wirkung des querkzugbeanspruchten Volumens im Bezug auf die Querkzugfestigkeit zu tätigen. Um dies zu ermöglichen, wurden Versuche durchgeführt.

Weiters können Vorschädigungen des Grundmaterials der Brettschichtholzträger zu einem markanten Abfall der Querkzugfestigkeit führen, die zu einen lokalen Verlust der Tragfähigkeit innerhalb des Brettschichtholzträgers zur Folge haben (siehe Abb. 1.1). Vorschädigungen wie Ringschäle oder Harzgallen können nicht aussortiert werden. Solche Vorschädigungen sind es, die der Kommentar zur National Design Specification for Wood Construction (1993) als Begründung dafür angibt, dass in der National Design Specification (1997) der USA keine Werte der Querkzugfestigkeit für Vollholz zugewiesen werden, sondern mechanische Verstärkungen quer zur Faser gefordert werden. [17]



Abb. 1.1 Typischer Querschnitt eines gekrümmten BSH-Bauteiles [24]

Neben diesen planmäßigen Beanspruchungen aus äußeren Lasten führen wechselnde Holzfeuchten zu Eigenspannungen quer zur Faser. Da Holz ein hygroskopischer Baustoff ist unterliegt er ständigem Quellen und Schwinden. Untersuchungen haben gezeigt, dass es sinnvoll wäre, einen eigenen Lastfall „Feuchte“ einzuführen, um dieses Problem dingbar zu machen.

Wie Dill-Langer 2004 [2] festgestellt hat, spielt das Verhalten bei Langzeitbelastung in Kombination mit wechselnden Klimaverhältnissen eine wesentliche Rolle.

In dieser Arbeit wird auf das Problem der wechselnden Holzfeuchten und auf das Verhalten bei Langzeitbelastung **nicht** weiter eingegangen.

# Stand der Technik und des Wissens

## 1 Verhalten von Brettschichtholz bei Querzugbeanspruchung

### 1.1 Zugbeanspruchung rechtwinklig zur Faserrichtung

Rechtwinklig zur Faserrichtung setzt das Material Holz den einwirkenden Kräften den kleinsten Widerstand, sowohl bezüglich der Steifigkeit als auch der Festigkeit, entgegen. Insbesondere weist die Zugfestigkeit rechtwinklig zur Faserrichtung geringere Werte im Vergleich zur Biegefestigkeit auf. Das Versagen bei Querzugbelastung ist spröde. Die Materialkennwerte der Querzugfestigkeit weisen, wie für sehr spröde Materialien zu erwarten, noch größere Streuungen auf als andere Materialkennwerte des Holzes. Die Querzugfestigkeit ist zudem deutlich vom beanspruchten Volumen abhängig, was sich durch den Volumeneffekt erklären lässt. [2]

Bei der Konstruktion von Holztragwerken bemüht man sich aufgrund der geringen und stark streuenden Festigkeitswerte, nur geringe Zugspannungen rechtwinklig zur Faserebene von Holz bzw. Brettschichtholz zuzulassen. Die in üblichen Bauteilen auftretenden Spannungen rechtwinklig zur Faserrichtung sind entweder auf kleine, eng begrenzte räumliche Bereiche beschränkt (lokale Querzugspannungen) oder wirken planmäßig innerhalb eines größeren Volumens (räumlich verteilte Querzugspannungen).

Neben den Querzugspannungen aufgrund äußerer mechanischer Einwirkungen sind auch Eigenspannungen rechtwinklig zur Faserrichtung von Bedeutung, die insbesondere von Feuchtebewegungen des Materials hervorgerufen werden.

Lokale Querzugspannungen aufgrund mechanischer Lasten entstehen z.B. an Durchbrüchen oder Ausklinkungen von BSH-Trägern oder im Bereich von Anschlüssen. Außerdem können sich durch lokale Faserabweichungen z.B. im Bereich natürlicher Fehlstellen wie Ästen oder Harzgallen auch bei aufgeprägter Längszug- oder Biegebeanspruchung Querzugspannungen ergeben. [2]

Auf größere Volumen verteilte planmäßige Querzugspannungen aus mechanischen Ein-

wirkungen ergeben sich vor allem in gebogenen Trägern oder in Satteldachträgern bei Einwirkung eines öffnenden (positiven) – d. h. die kürzere Bogenseite verlängernden bzw. die längere Bogenseite verkürzenden - Biegemomentes. Die entsprechenden Kräfte und Schnittgrößen sind in Abb. 1.1 schematisch für den einfachen Fall eines Bogenabschnittes konstanter Höhe dargestellt, welcher z.B. den Firstbereich eines Biegeträgers abbilden könnte. Das Entstehen von Spannungen rechtwinklig zur Achse eines gekrümmten parallelrandigen Bogens der Höhe  $h$  und Breite  $b$  mit dem mittleren Radius  $r_m$  lässt sich für den Fall isotropen Materialverhaltens durch die Betrachtung eines Kreisbogensegmentes aus der Kräfteumlenkung herleiten.

Dabei wird das Biegemoment  $M$  statisch äquivalent in die Druck- und Zugkräfte  $P_D$  und  $P_Z$  aufgelöst, die im Schwerpunkt der jeweiligen Biegespannungsverteilung angreifen und deren Größe sich jeweils mit Hilfe der Biegerandspannungen  $\sigma_m$  die bei geringen Krümmungsradien am gedrückten bzw. gezogenen Rand übereinstimmen, berechnen lassen. Betrachtet man jeweils die Ränder einzeln, so wird wegen des eingeschlossenen Winkels  $d\varphi$  für das Kräftegleichgewicht jeweils eine rechtwinklig zur Trägerachse nach außen weisende Kraftkomponente  $P_U$  für das Gleichgewicht notwendig. Das gegeneinander gerichtete Paar der aus der Umlenkung resultierenden Querkzugkräfte tritt in der Kontinuumsbetrachtung als Feld von näherungsweise parabelförmig verteilten Querkzugspannungen auf. Der Maximalwert der Querkzugspannung (auf halber Trägerhöhe) ergibt sich als Quotient von  $P_U$  und der Segmentfläche  $dA$ . [2]

$$\sigma_{t,90,max} = \frac{P_U}{dA} = \frac{P_D}{r_m \cdot b} \quad 1.1$$

mit:

$$P_D = \frac{b \cdot h}{4} \cdot \sigma_m \quad 1.2$$

und

$$\sigma_m = \frac{M}{W_m} = \frac{6 \cdot M}{b \cdot h^2} \quad 1.3$$

ergibt:

$$\sigma_{t,90,max} = \frac{3}{2} \cdot \frac{M}{r_m \cdot b \cdot h} \quad 1.4$$

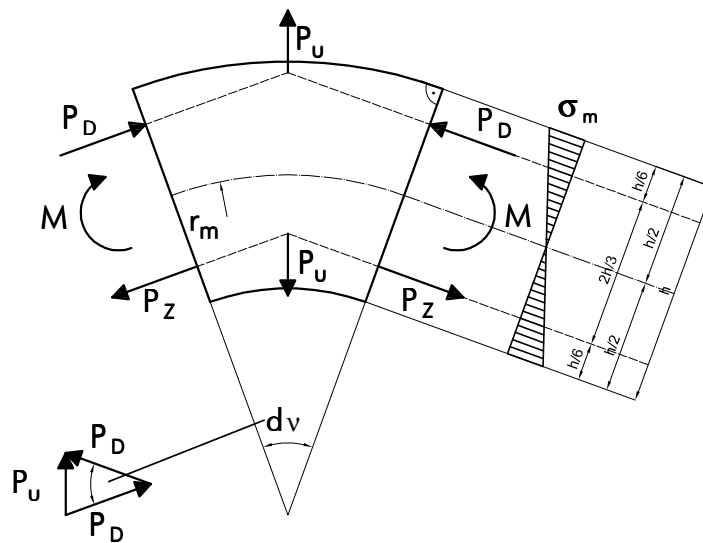


Abb. 1.1 Bogenträger unter Belastung eines positiven Biegemomentes und Entstehen von Querzugspannungen in einem Bogensegment [2]

Im Abschnitt 1. 2. 4 wird auf die Spannungsverteilung eines gekrümmten BSH-Trägers unter Momentenbelastung mit Hilfe von FE-Berechnungen genauer eingegangen.

## 1. 2 Elastisches Verhalten bei Querzugbeanspruchung

### 1. 2. 1 Zylindrische Anisotropie

Aus der Längsrichtung der in den Zellwänden überwiegend parallel ausgerichteten Celluloseketten ergibt sich die ausgeprägte Anisotropie des Werkstoffes Holz sowohl bezüglich der Steifigkeit als auch der Festigkeit. [1]

Die Kennwerte längs bzw. rechtwinklig zur Faser unterscheiden sich typischerweise um einen Faktor 10 bis 20. Aus dem natürlichen Wuchsprozess des Stammes ergibt sich außerdem die jahreszeitlich periodische Inhomogenität der Faserwanddicke und damit eine periodisch variierende lokale Dichte der Jahrringe.

Die Richtung rechtwinklig zu den Jahrringgrenzen wird als radial (R), die mit den Jahrringgrenzen verlaufende Richtung als tangential (T) bezeichnet. Aus der geometrischen Form und Anordnung der Hohlquerschnitte (und aus dem Vorhandensein einiger zusätzlicher in radialer Richtung verlaufender Fasern) ergibt sich eine radial-tangentiale Anisotropie innerhalb der Querschnittsebene, die jedoch weniger ausgeprägt ist als die longitudinal-transversale Anisotropie, die jedoch weitreichende Folgen für das mechanische Verhalten und die Festigkeit hat. [2]

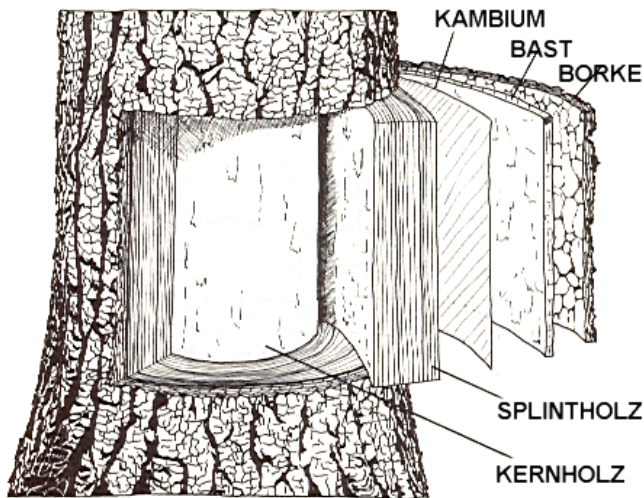


Abb. 1.2 Aufbau eines Baumes [29]

Der relative Flächenanteil von Zellwand zu Hohlraum beträgt etwa 1:100 für das am Anfang der jährlichen Wachstumsperiode gebildete Frühholz, das im lebenden Baum primär dem Wasser- und Nährstofftransport dient. Für das vornehmlich zu Festigkeitszwecken am Ende der jährlichen Wachstumsperiode gebildete Spätholz beträgt dieser Flächenanteil dagegen nur ca. 1:2. Nadelholz ist also ein gerichteter, poröser Werkstoff.

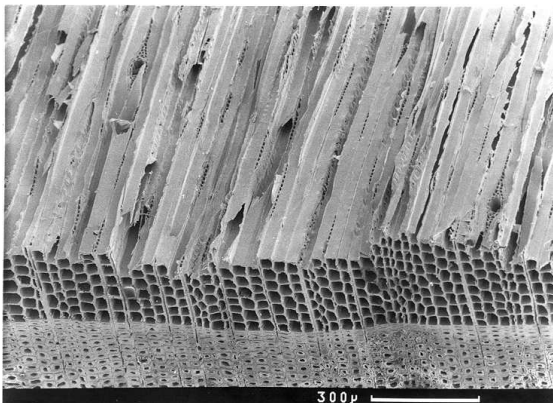


Abb. 1.3 Makroskopischer Aufbau von Fichtenholz [2]

Die elastischen Eigenschaften von Holz lassen sich auf der Makroebene des Werkstoffes, d.h. bei typischen Längeneinheiten von Zentimetern bis Metern, in einem kontinuumsmechanischen Modell näherungsweise durch eine zylindersymmetrische Anisotropie beschreiben. Die Symmetrieachse des zylindrischen Systems fällt mit der Lage der Markröhre des Baumes zusammen, die Symmetrierichtung folgt damit in einer Idealisierung der longitudinalen (L) Faserrichtung des Holzes. Die radiale (R) Richtung weist

rechtwinklig zu den Jahrringen nach außen, die tangentiale (T) Hauptrichtung folgt den Jahrringen. Diese Beschreibung stellt insoweit nur eine (allerdings in den meisten Fällen ausreichend exakte) Näherung dar, da der Stamm eines Baumes eigentlich als Kegelstumpf zu beschreiben ist und sich außerdem durch Wuchsstörungen Abweichungen zwischen der Faserrichtung und der Richtung der Stammachse ergeben können.

Die üblichen einfachen Holzquerschnitte (Bretter, Bohlen, Kanthölzer etc.) sind Quader, die parallel zur Stammachse (Faserrichtung, Markröhrenrichtung, z-Richtung des zylindrischen Materialkoordinatensystems) eingeschnitten werden. Bei Beanspruchung rechtwinklig zur Faserrichtung sind deshalb zwei Koordinatensysteme zu unterscheiden: einerseits das Materialkoordinatensystem mit Zylindersymmetrie, in dem die Materialgesetze einfache Formen annehmen, und andererseits das äußere kartesische Koordinatensystem, mit Hilfe dessen sich sowohl die Geometrie der Bauteile als auch die äußeren Einwirkungen und Randbedingungen einfach beschreiben lassen. Die Abb. 1.4 stellt die beiden Koordinatensysteme schematisch anhand eines für Brett-schichtholz typischen Brettquerschnittes dar.

Zur rechnerischen Behandlung der Anisotropie des Holzes ist es zweckmäßig, sich das Zylinder-Koordinatensystem an jedem Materialpunkt aus kartesischen Koordinatensystemen zusammengesetzt zu denken, wobei die lokalen Hauptrichtungen tangential an dem gekrümmten globalen System ausgerichtet sind. Die Transformation zwischen dem globalen kartesischen und dem globalen Zylinderkoordinatensystem wird durch eine ortsabhängige Drehtransformation der Elastizitätstmatrix beschrieben. [2]

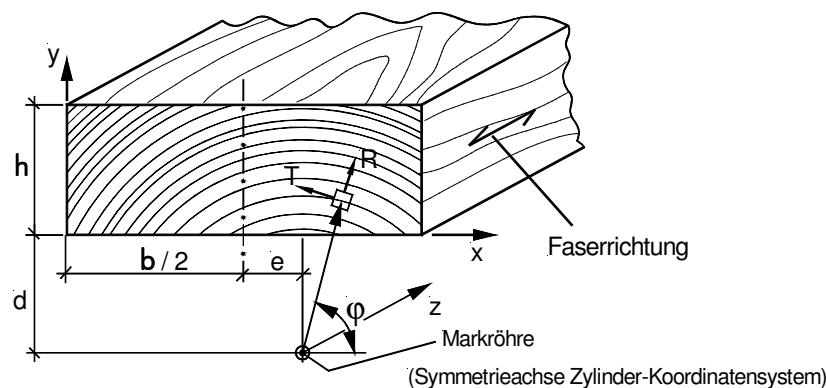


Abb. 1.4 Sägeeinschnitt eines Brettquerschnittes mit globalem Zylinderkoordinatensystem und lokalem Material-Koordinatensystem [2]

Für das Hooke'sche Gesetz im Materialkoordinatensystem (im Folgenden gemäß der Nomenklatur der Laminattheorie „on-axis“-System [2] genannt) mit den Materialhauptachsen R = radial, T=tangential und L =longitudinal (faserparallel) gilt

$$\epsilon = S \cdot \sigma \quad 1.5$$

wobei

$\varepsilon$  die Dehnungsmatrix,

$\sigma$  die Spannungsmatrix und

$S$  die Nachgiebigkeitsmatrix ist

In Matrixschreibweise ergibt sich folgende Form:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_R \\ \varepsilon_T \\ \varepsilon_L \\ \gamma_{RL} \\ \gamma_{TL} \\ \gamma_{RT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44}/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55}/2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_R \\ \sigma_T \\ \sigma_L \\ \tau_{RL} \\ \tau_{TL} \\ \tau_{RT} \end{bmatrix} \quad 1.6$$

Der erste Index gibt die Richtung der Flächennormalen an, der zweite die Richtung der Spannungs- oder Verzerrungsvektoren. Hierbei bezeichnen

$\varepsilon_i$  die Dehnungen,

$\gamma_{ij}$  die Schubverzerrungen,

$\sigma_i$  die Normalspannungen

$\tau_{ij}$  die Schubspannungen

Der Zusammenhang zwischen den Ingenieurkonstanten und den Koeffizienten der Nachgiebigkeitsmatrix lautet:

$$\begin{aligned}
 S_{11} &= \frac{1}{E_R} & S_{22} &= \frac{1}{E_T} & S_{33} &= \frac{1}{E_L} \\
 S_{44} &= \frac{1}{G_{RL}} & S_{55} &= \frac{1}{G_{TL}} & S_{66} &= \frac{1}{G_{RT}} \\
 S_{12} &= -\frac{\nu_{RT}}{E_T} & S_{13} &= -\frac{\nu_{RL}}{E_L} & S_{23} &= -\frac{\nu_{TL}}{E_L} \\
 S_{21} &= -\frac{\nu_{RT}}{E_R} & S_{31} &= -\frac{\nu_{LR}}{E_R} & S_{32} &= -\frac{\nu_{LT}}{E_T}
 \end{aligned} \quad 1.7$$

Wobei  $E_i$  die E-Module,  $G_{ij}$  die Schubmodule und  $\nu_{ij}$  die Querkontraktionszahlen bezeichnen.

1.8



Die Drehtransformation um die z-Achse in ein zweidimensionales x-y-Ebene-System (im Folgenden „off-axis“-System genannt) benötigt eine Drehmatrix.

$$D = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & -2cs \\ s^2 & c^2 & 2cs \\ -cs & cs & s^2 - c^2 \end{bmatrix} \quad 1.9$$

Wobei  $c = \cos(\varphi)$  und  $s = \sin(\varphi)$  und  $\varphi$  = Drehwinkel in mathematisch positiver Richtung, gegen den Uhrzeigersinn darstellt. Dadurch erhält man das Hook'sche Gesetz in transformierter Form

$$\varepsilon' = S' \cdot \sigma' \quad 1.10$$

mit

$$\varepsilon' = D \cdot \varepsilon \quad 1.11$$

$$\sigma' = D \cdot \sigma \quad 1.12$$

$$S' = D^{-1} \cdot S \cdot D \quad 1.13$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S'_{11} & S'_{21} & S'_{16}/2 \\ S'_{12} & S'_{22} & S'_{26}/2 \\ S'_{61}/2 & S'_{62}/2 & S'_{66}/2 \end{bmatrix} \quad 1.14$$

Die Komponenten  $S'_{ij}$  der off-axis-Elastizitätsmatrix sind von den Winkelfunktionstermen des Drehwinkels  $\varphi$  abhängig. Die wichtigste Auswirkung der Koordinatentransformation ist die Schubkopplung. Darunter versteht man einerseits das Auftreten von off-axis-Schubverzerrungen  $\varepsilon_{ij}$  trotz einer in on-axis-System nur einachsiger Belastung. Andererseits sind bei einaxialer (off-axis-) Belastung die off-axis-Hauptdehnungen vom on-axis-Schub-Modul abhängig. Dies ist anhand der expliziten Ausdrücke für  $S'_{11}$  und  $S'_{22}$  angegeben, deren Kehrwerte als effektive oder off-axis-E-Module bezüglich der jeweiligen Orientierung aufgefasst werden können:

$$S'_{11} = \frac{1}{E_y} = (\cos \varphi)^4 \cdot \frac{1}{E_R} + (\sin \varphi)^4 \cdot \frac{1}{E_T} + (\sin \varphi)^2 \cdot (\cos \varphi)^2 \cdot \left( \frac{1}{G_{RT}} - 2 \cdot \frac{\nu_{RT}}{E_T} \right) \quad 1.15$$

$$S'_{22} = \frac{1}{E_x} = (\sin \varphi)^4 \cdot \frac{1}{E_R} + (\cos \varphi)^4 \cdot \frac{1}{E_T} + (\sin \varphi)^2 \cdot (\cos \varphi)^2 \cdot \left( \frac{1}{G_{RT}} - 2 \cdot \frac{\nu_{RT}}{E_R} \right) \quad 1.16$$

Untersucht man das elastische Verhalten eines Brettes entlang einer Schnittlinie parallel zu einer Brettkante, z.B. in Brettbreitenrichtung x von 0 bis b auf halber Brettstärke mit  $y = \text{const.} = h/2$ , so lässt sich mit Hilfe der Gleichungen für  $S'_{11}$ ,  $S'_{22}$  und der geometrischen Abhängigkeit  $\varphi(x)$  der Verlauf der effektiven  $E_x(x)$  und  $E_y(x)$  bei einaxialer Belastung rechtwinklig zur Breitseite bzw. zur Schmalseite eines Brettes beschreiben.

Die Funktion  $\varphi(x)$  hängt davon ab wie das Brett aus dem ursprünglichen Stamm einge-

schnitten wurde. Der Sägeeinschnitt des Holzquerschnittes wird, wie in Abb. 1.4 dargestellt, durch die beiden Parameter  $e$  (Exzentrizität der Markröhrenlage gegenüber der Symmetrielinie des Brettes) und  $d$  (Abstand der Markröhre vom rechten Brettrand, also dem Brettrand, der der Markröhre beim Einschnitt zugewandt ist) definiert. [2]

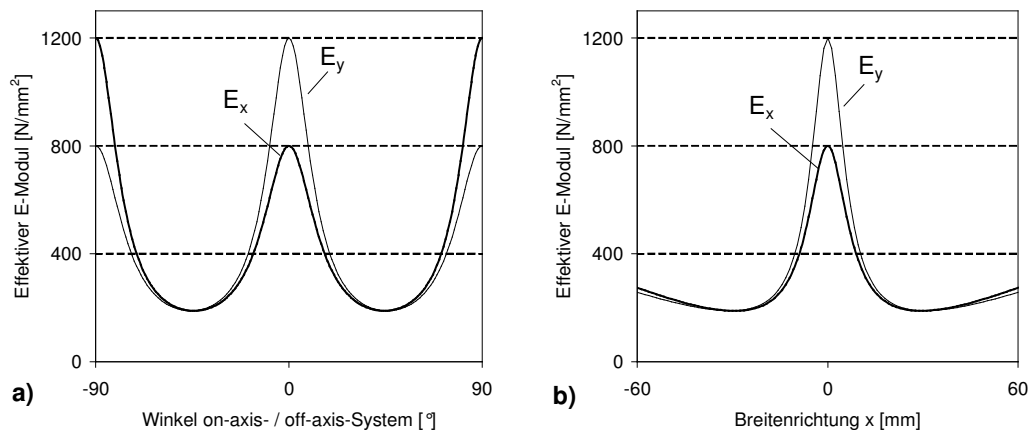


Abb. 1.5 Effektive off-axis E-Module  $E_x$  und  $E_y$  als Ergebnis der Koordinatentransformation [2]  
 a) Verlauf in Abhängigkeit vom Drehwinkel  $\varphi$   
 b) Verlauf in Abhängigkeit von der Breitenkoordinate  $x$

In Abb. 1.5 sind die Verläufe der effektiven E-Module gegenüber dem Drehwinkel  $\varphi$  bzw. der der  $x$ -Koordinate eines exemplarisch gewählten Brettquerschnittes mit Breite  $b = 120 \text{ mm}$ , Dicke  $h = 33 \text{ mm}$  und den Sägeeinschnittparametern  $e = 0 \text{ mm}$  und  $d = 30 \text{ mm}$  aufgetragen. Als Materialparameter der Elastizität wurden  $E_R = 1200 \text{ N/mm}^2$ ,  $E_T = 800 \text{ N/mm}^2$ ,  $G_{RT} = 50 \text{ N/mm}^2$  und  $\nu_{RT} = 0,35$  gewählt. [2]

Die Verläufe (siehe Abb. 1.5a und b) der beiden E-Module  $E_x$  und  $E_y$  zeigen ein durch den Schubkopplungseffekt dominiertes Verhalten. Nur in der Brettmitte ( $x = b/2$ ) stimmen off-axis und on-axis-E-Module überein. Zu den Bretträndern hin jedoch fallen die Werte der off-axis-E-Module stark ab und liegen dort deutlich (ca. um den Faktor 4) unter den jeweiligen on-axis-E-Modulen. Der Grund für die starke Überhöhung der Nachgiebigkeit liegt in dem gegebenen extremen Verhältnis der E-Module zu den Schubmodulen in der R-T Querschnittsebene von ca. 20:1, dass sich durch die R-T Schubweichheit von Nadelholz in den Frühholzschichten erklären lässt. Eine aufgeprägte Schubbelastung bewirkt dabei auf der ausgeprägt dünnwandigen Frühholz-Zelle lokale Biegespannungen der Faserwandung und somit eine gegenüber Zug- und Druckbelastungen niedrigere Steifigkeit. Der vergleichsweise niedrige Schubmodul wird durch die Drehtransformation in die off-axis-Hauptrichtungen eingekoppelt, durch den Term  $\sin^2\varphi \cdot \cos^2\varphi \cdot (1/G_{RT})$  und dominiert somit das elastische Verhalten bei  $\varphi \sim 45^\circ$ . Bei  $x$ -Koordinatenwerten, an denen der Transformationswinkel  $\varphi$  zwischen dem lokalen Koordinatensystem und den off-axis-System einen Wert von  $45^\circ$  erreicht, liegen dementsprechend die Minima der Kurven in Abb. 1.5. [2]

### 1. 2. 2 Spannungverteilung im Querschnitt eines Einzelbrettes unter Querzugbelastung

Die Berechnung der Spannungsverteilung rechtwinklig zur Faserrichtung in einem Brettquerschnitt ist bei Berücksichtigung der zylindrischen Anisotropie und der jeweiligen Randbedingungen im allgemeinen nicht mehr analytisch, sondern nur mit numerischen Verfahren möglich. Zur Simulation der elastischen Eigenschaften wird der Brettquerschnitt (Radial-Tangentialebene koplanar zur x-y-Ebene, Faserrichtung parallel zur z-Richtung) als zweidimensionales Modell, mit Hilfe der Finiten Elemente, abgebildet. Der Ansatz zur Reduzierung von 3 auf 2 Dimensionen geschieht durch die Annahme eines gleichmäßigen Dehnungszustandes (plain strain), der ein in der z-Richtung unendlich langes homogenes Brett darstellt. Der Querschnitt wird durch ein Netz aus vierknotigen Scheibenelementen diskretisiert. In Abhängigkeit von der Lage gegenüber einer innerhalb oder außerhalb des Brettes liegenden Markröhre (dem Ursprung des in der Ebene polaren Materialkoordinatensystems) wird jedem Element jeweils ein gedrehtes lokales Koordinatensystem zugeordnet, das an den jeweiligen Hauptrichtungen (radial, tangential) des Materialkoordinatensystems orientiert. [2]

Der Einfluss der Belastungskonfiguration und der Randbedingungen auf das Spannungs- und Dehnungsfeld eines Brettes bei Beanspruchung rechtwinklig zur Faserrichtung soll anhand von 4 Beispielen A bis D illustriert werden, die in Abb. 1.6 , Abb. 1.7 , Abb. 1.8 und Abb. 1.9 abgebildet sind.

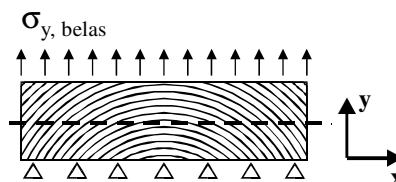


Abb. 1.6 Konfiguration A [2]

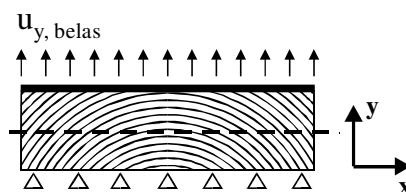


Abb. 1.7 Konfiguration B [2]

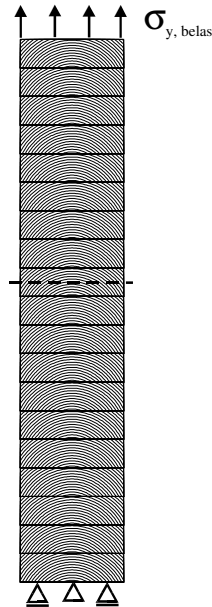


Abb. 1.8 Konfiguration C [2]

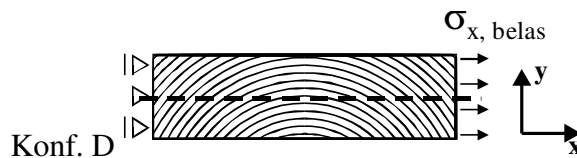


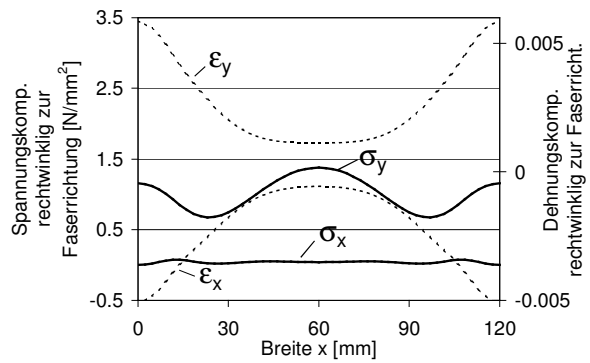
Abb. 1.9 Konfiguration D [2]

Bei den Konfigurationen A und C wird auf der Breitseite des Brettquerschnittes eine gleichförmige Streckenlast der Größe  $\sigma_{y, \text{belas}} = 1 \text{ N/mm}^2$  aufgebracht, wobei die gegenüberliegende Brettseite verschieblich gelagert ist. Im Fall B wird eine Verformung  $u_{y, \text{belas}}$  aufgebracht. Die Größe der aufgeprägten Verformung entspricht dabei dem Mittelwert der Verformungen, die aus dem Ergebnis der Rechnung zu Fall A ermittelt wurde. Im Fall C wird das Mittelbrett eines periodisch geschichteten Brettschichtholzquerschnittes untersucht, deren Randbedingungen weit vom untersuchten Querschnitt entfernt sind. Fall D zeigt einen Brettquerschnitt, der an der Schmalseite zugbelastet wird. Eine Seite ist verschieblich gelagert, auf die andere Seite wird eine Einheits-Linienlast ( $\sigma_{x, \text{belas}} = 1 \text{ N/mm}^2$ ) aufgebracht.

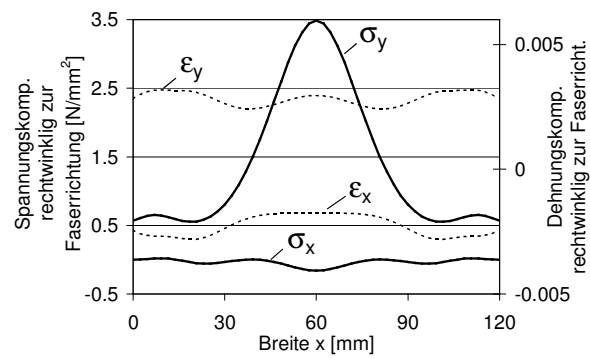
Für die Konfigurationen werden die gleichen Abmessungen, Materialparameter und Sägeeinschnitt-Parameter angenommen, wie für die analytische Bestimmung der effektiven off-axis E-Module im Abschnitt 1. 2. 1.

Um die Ergebnisse untereinander und mit den analytischen Lösungen vergleichen zu können, sind in Abb. 1.10 jeweils die Spannungs- und Dehnungskomponenten in x- und

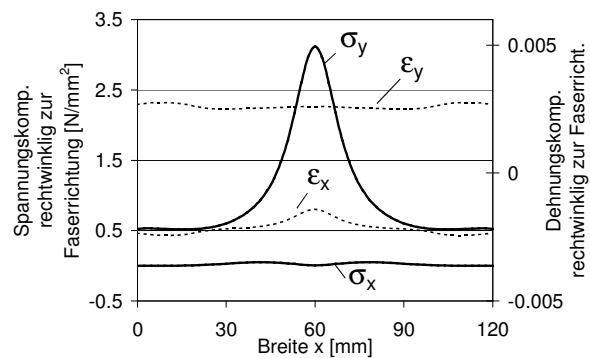
y-Richtung für einen Schnitt in x-Richtung der Brettbreite auf halber Bretthöhe  $y = \text{konst.} = h/2$  aufgetragen.



Konfiguration A



Konfiguration B



Konfiguration C

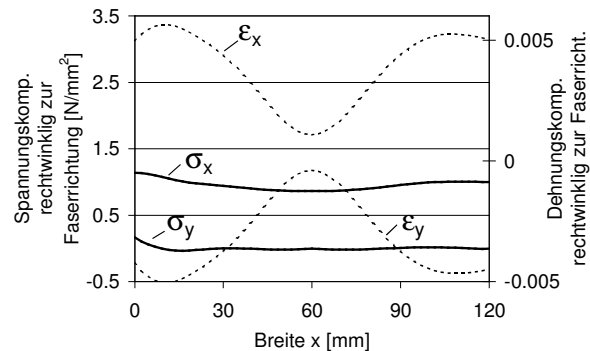

**Konfiguration D**

Abb. 1.10 Spannungs- und Dehnungsverteilung im Brettquerschnitt zufolge elastischer FE-Berechnung bei Querzugbeanspruchung mit unterschiedlichen Randbedingungs-Konfigurationen [2]

Bei der Konfiguration A ergeben sich trotz der im off-axis-System einachsigen Belastung Spannungs- und Dehnungsverläufe, die nicht durch eine einfache analytische Betrachtung vorhergesagt werden können. Sowohl Spannungen als auch Dehnungen variieren deutlich über die Breiten-(x)-Richtung aufgrund der asymmetrischen Lagerungsbedingungen. So wird durch die Lagerung trotz der Verschieblichkeit in x-Richtung die Querdehnung im on-axis-System auf der Unterkante des Brettes ( $y = 0$ ) abhängig vom Winkel zwischen on- und off-axis-System behindert, während der obere Rand des Brettes ( $y = h$ ) frei ist.

Für die Konfiguration B sind die Lagerungsbedingungen symmetrisch bezüglich der Höhe, so dass eine insgesamt gleichmäßige Dehnungsverteilung erzwungen wird. Dementsprechend ausgeprägt ist die Inhomogenität der Zugspannungskomponente in y-Richtung. Ähnlich verhält sich es sich für die Konfiguration C. Hier ist die Lagerung weit entfernt von der untersuchten Brettfläche, wodurch sich beim angenommenen (typischen) Schlankheitsgrad des gesamten BSH-Querschnittes für ein Brett nahe halber Trägerhöhe eine nahezu gleichmäßige relative Verformung der beiden Brettseiten zueinander und damit ein relativer gleichmäßiger Dehnungszustand ergibt. Konfiguration B und C bilden die Spannungen und Dehnungen innerhalb eines BSH-Brettes qualitativ gut wieder. [2]

Als Modellvorstellung kann dafür eine Reihe von parallelgeschalteten Federn dienen, die unterschiedliche Federkonstanten  $1/S_{11}$  (E-Module) in Abhängigkeit von  $\varphi$  haben und bei gleicher Verformung (Dehnung) unterschiedliche Reaktionskräfte (Spannungen) aufweisen, wie in Abb. 1.11 skizziert.

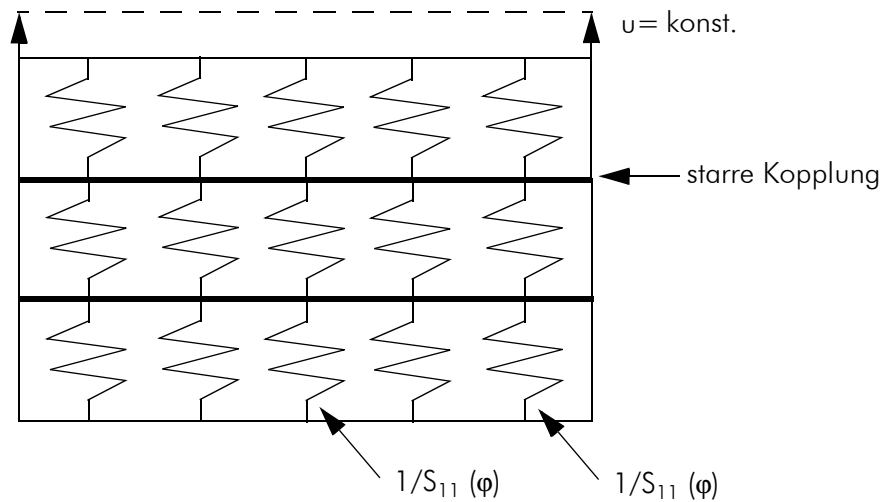


Abb. 1.11 Reihe von parallelgeschalteten Federn mit unterschiedlichen Federkonstanten

Für die Konfiguration D, kann als Modellvorstellung eine Kette von Federn dienen, die in Reihe geschaltet sind. Die Variation der Federkonstanten entspricht der Nachgiebigkeit  $S_{22}$  nach Gleichung 1.16, so dass die Zugkraft in allen Federgliedern in Belastungsrichtung gleich ist und sich die Anisotropie des Materials in einer inhomogenen Verformungsverteilung ausdrückt. Das Ergebnis der FE-Berechnung ergibt eine Dehnungsverteilung, die mit der analytischen Verteilung der Nachgiebigkeiten näherungsweise übereinstimmt. Die Spannungsverteilung kann als nahezu homogen angesehen werden.

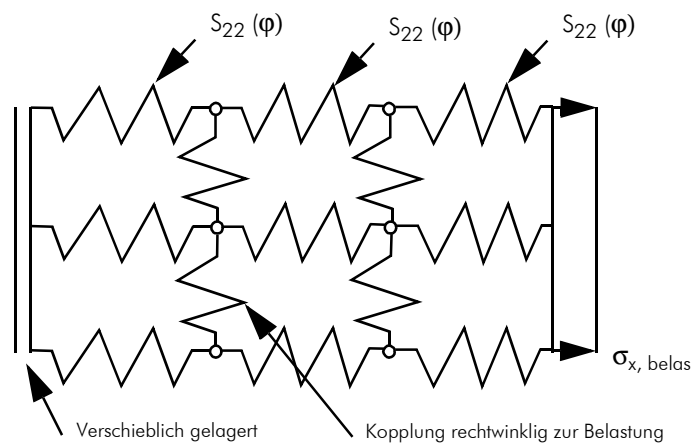


Abb. 1.12 Modellvorstellung der Konfiguration D: Eine Kette von Federn die in Reihe geschaltet ist; die Variation der Federkonstanten entspricht der Variation der Nachgiebigkeiten  $S_{22}$

Da Spannungen nicht messbar sind, ist der empirische Nachweis der FE-Berechnung di-

rekt am belasteten BSH-Querschnitt wie in Fall B und C kaum möglich, da eine homogene Dehnungsverteilung  $\epsilon_y(x)$  vorliegt. Eine reine Streckenlast wie in Fall A ohne Zwängung ist technisch nicht realisierbar. Dagegen spiegelt sich bei Belastung der Schmalseite wie in Fall D, die polare Anisotropie der Querschnittsebene eines Brettes hauptsächlich in einer starken Inhomogenität der Dehnungen in  $\epsilon_x(y)$  mit nur begrenzten Einfluss der Randbedingungen wieder. Eine direkte empirische Verifizierung des Effektes der zylindrischen, d.h. in der Querschnittsebene polaren Anisotropie mit Hilfe von Dehnungsmessungen und damit die Auswirkungen der Schubkopplungseffekte ist am besten an Brettern, die an der Schmalseite nominell parallel zur tangentialen Richtung belastet werden, wie in Abschnitt 1. 3 gezeigt wird möglich. [2]

Auf Grund der polaren Anisotropie ergibt sich für ein Brett innerhalb eines schlanken ( $h \gg b$ ) querzugbeanspruchten BSH-Querschnitt eine ausgeprägt inhomogene Spannungsverteilung. Dabei folgt die Verteilung über die Brettmitte näherungsweise dem Kehrwert der analytisch berechneten Nachgiebigkeit, dem off-axis-E-Modul.

Berechnet man neben der Spannungskomponente  $\sigma_y$  in Last-y-Richtung die Hauptspannungen, so weichen die Werte der ersten Hauptspannung  $\sigma_1(x)$  im gesamten Verlauf weniger als 0,1% von den Werten der Spannungskomponente in Lastrichtung  $\sigma_y(x)$  ab. Für die einachsige Belastung eines Brettschichtholzquerschnittes wird deshalb die Spannungskomponente in Last-Richtung generell mit dem Ausdruck „Querzugspannung“ bezeichnet. [2]

### 1. 2. 3 Spannungverteilung über den BSH-Querschnitt bei Querzugbelastung

Die Dehnungs- und Spannungsverteilung eines Brettschichtholz-Abschnittes, der quer zur Faser belastet wird, hängt mit dem Sägeeinschnitt und dem Aufbau der einzelnen Lamellen zueinander, kurz mit dem Querschnittsaufbau, zusammen. Folgende Parameter sind hierbei von Bedeutung:

- d der Markröhrenabstand,
- e die Exzentrizität d.h. der Abstand der Markröhrenlage gegenüber der Symmetrieachse des BSH-Querschnittes und die

#### Jahrringkrümmung

Um die Abhängigkeit der Spannungsverteilung vom Querschnittsaufbau zu zeigen, hat Dill-Langer [2] idealisierte Aufbauten mittels FE-Rechnungen untersucht. Dabei wird ein BSH-Querschnitt wie in Abb. 1.8 durch eine Einheits-Linienlast entlang der Breitseite der obersten Lamelle belastet und an der Unterkante des untersten Brettes in Zugrichtung verschieblich gelagert. Die Rechnung erfolgte an einem 2D-FE-Modell mit vierknotigen Scheibenelementen, wobei der „plain-strain“-Ansatz gewählt wurde. Es wurden folgende Abmessungen und Materialparameter gewählt:

$n = 18$  Lamellen, Einzeldicke = 33 mm, Gesamthöhe = 594 mm,



$$E_R = 1200 \text{ N/mm}^2, E_T = 800 \text{ N/mm}^2, \nu_{RT} = 0,35, G_{RT} = 50 \text{ N/mm}^2$$

Die Klebefuge zwischen den Lamellen wird nicht modelliert, sondern die Lamellen werden an den Brettseiten starr miteinander verbunden. Aus Vergleichsrechnungen mit und ohne Klebefuge geht hervor, dass es keinen relevanten Einfluss auf das Spannungs- und Dehnungsfeld gibt. Es wurden vier Parametersätze durchgerechnet, die den Einfluss von  $d$ ,  $e$  und Sägeeinschnitt systematisch verdeutlichen, diese sind in Abb. 1.13 skizziert.

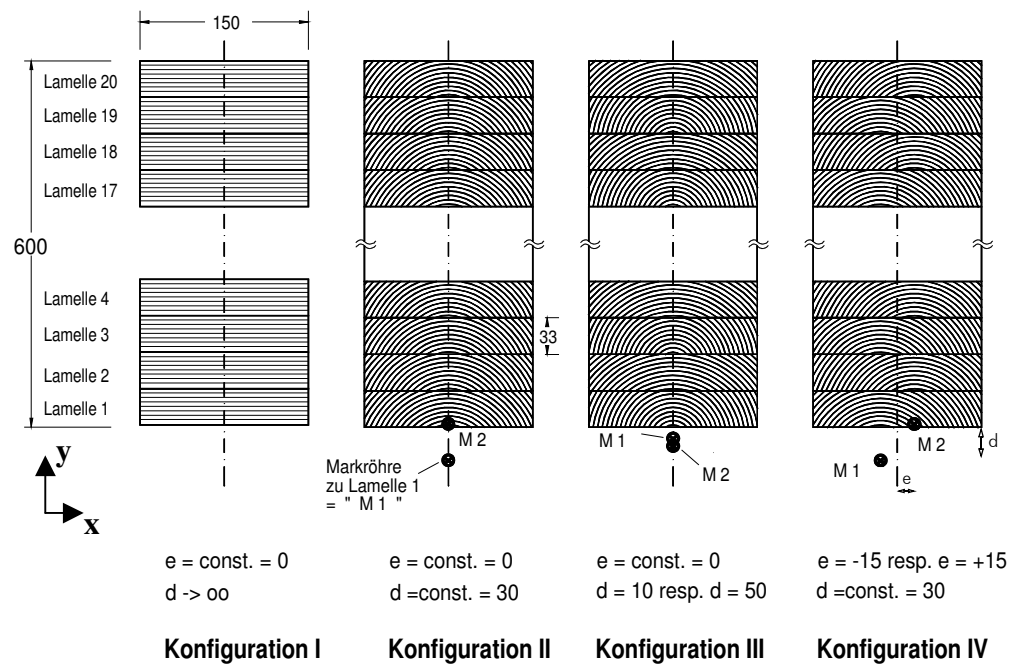


Abb. 1.13 Skizze vier verschiedener idealisierter BSH-Querschnitte, die sich hinsichtlich des Sägeeinschnittes der jeweiligen Lamellen und deren Abfolge unterscheiden [2]

- Konfiguration I:  $e = 0$ ,  $d = \infty$ ; Hier liegt der Grenzfall von liegenden, parallel zur Brettseite der Bretter angeordneten Jahrringen vor. Es handelt sich dabei um den Spezialfall der rhombischen Anisotropie kurz Orthotropie. Hier existiert kein Schubkopplungseffekt.
- Konfiguration II:  $e = 0$ ,  $d = 30 \text{ mm}$ ; Dieser Aufbau besteht aus gleichgerichteten, identischen Brettern, die symmetrisch eingesägt wurden.
- Konfiguration III:  $e = 0$ ,  $d = 10/50 \text{ mm}$ ; Die relative Lage des Zylinderkoordinatensystems von jeweils zwei aufeinanderfolgenden Brettern unterscheiden sich bezüglich der  $y$ -Richtung um  $40 \text{ mm}$ . Dies stellt den Fall des symmetrischen Einschnittes mit unterschiedlichen Markröhrenabstand dar.
- Konfiguration IV:  $e = \pm 15 \text{ mm}$ ,  $d = 30 \text{ mm}$ ; Die Lage des Zylinderkoordinatensystems von jeweils zwei aufeinanderfolgenden Brettern ist um  $30 \text{ mm}$  in  $x$ -Richtung gegeneinander verschoben, dies stellt den ideal antimetrischen Fall bezüglich der Exzentrizität  $e$  dar.

In Abb. 1.15 und Abb. 1.16 ist als Ergebnis der Berechnungen zu den vier Parameter-sätzen die Spannungskomponente in Zugrichtung  $\sigma_y$  im off-axis-System dargestellt. Da-bei wird in Abb. 1.15 jeweils der Spannungswert über der x-Richtung für einen konstanten y-Wert bei halber Trägerhöhe entlang des Übergangs zweier Lamellen auf-getragen (siehe Abb. 1.14). In Abb. 1.16 wird die Spannungsverteilung über der Hö-hen-y-Koordinate entlang der Mittellinie der 8 mittleren Bretter des BSH-Querschnittes dargestellt.

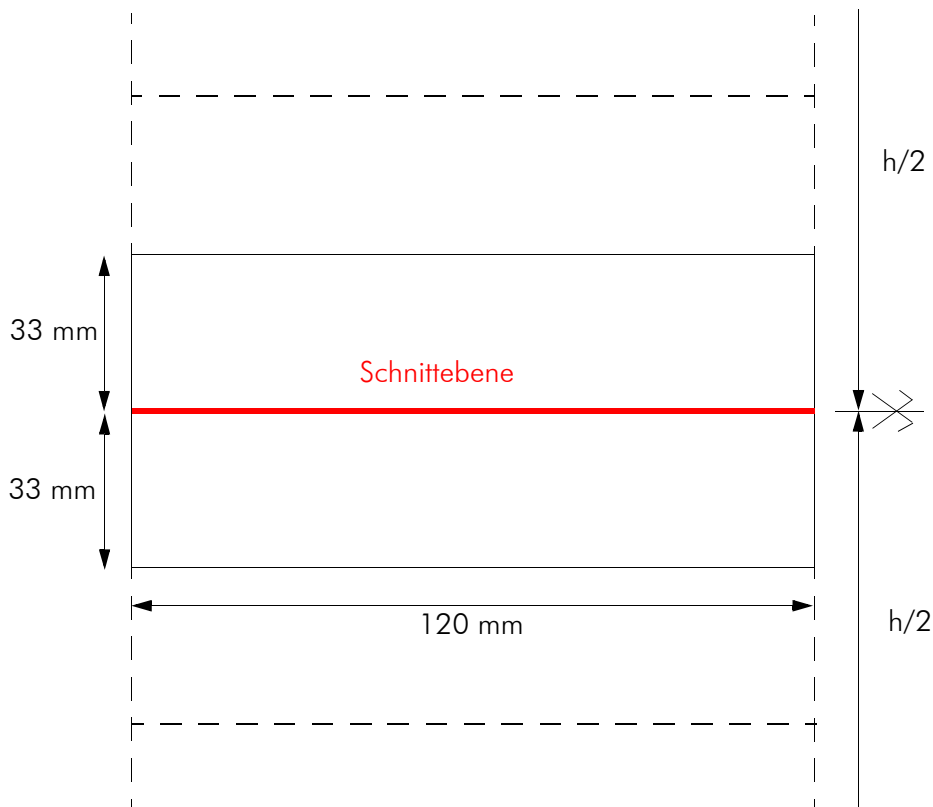


Abb. 1.14 Skizze der Schnittebene

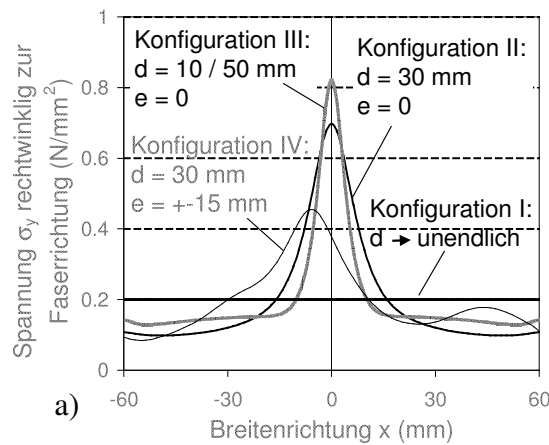


Abb. 1.15 Verteilung der Querzugspannung  $\sigma_y$  nach FE-Berechnung für die vier Querschnittskonfigurationen bezüglich der Querschnittsbreiten-Richtung x [2]

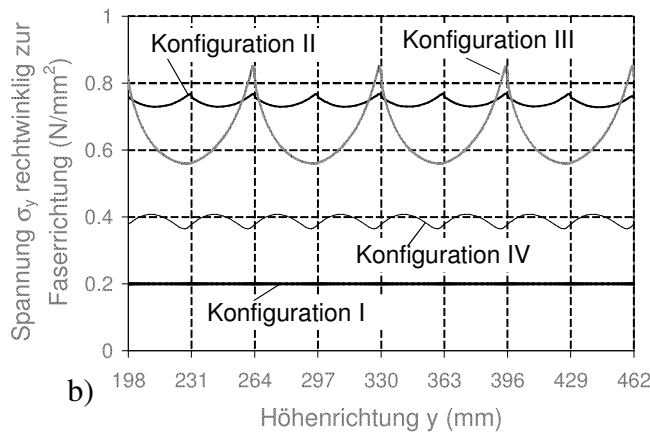


Abb. 1.16 Verteilung der Querzugspannung  $\sigma_y$  nach FE-Berechnung für die vier Querschnittskonfigurationen bezüglich der Querschnittshöhen-Richtung y [2]

Für die Konfiguration I, den Grenzfall von liegenden Jahrringen, ergibt sich die triviale Lösung der sowohl horizontal als auch vertikal konstanten Zugspannungsverteilungen  $\sigma_y = \sigma_{\text{belas}} = 1$ . Dies erklärt sich aus dem Verschwinden der Kopplungsterme der Koordinatentransformation, da bei liegenden Jahrringen  $\varphi = 90^\circ$  und bei stehenden Jahrringen  $\varphi = 0^\circ$  ist.

Für die Konfiguration II dagegen erhält man für einen Aufbau aus Lamellen mit identisch gekrümmten Jahrringen eine Spannungserhöhung in der Brettmitte um einen Faktor 4 gegenüber dem rhombisch orthotropen Fall. Bei der Betrachtung der Verteilung in y-Richtung ergeben sich Spannungserhöhungen am Übergang zwischen jeweils zwei Brettern. Da an den Lamellenübergängen die rechte (dem Mark zugewandte) und die linke (dem Mark abgewandte) Seite eines Brettes aufeinander treffen, ergeben sich durch die unterschiedlichen relativen Lagen der zugehörigen Materialkoordinatensysteme unter-

schiedliche effektive Nachgiebigkeiten und demzufolge Spannungsinhomogenitäten. Bei der Konfiguration III mit periodisch variierendem Markröhrenabstand ist die Spannungsinhomogenität in  $y$ -Richtung ausgeprägt. Die Maxima mit einem Überhöhungsfaktor von 6 liegen an der Kontaktstelle der rechten Seite eines Brettes mit geringem Markröhrenabstand ( $d = 10$  mm) und der linken Seite eines Brettes mit größerem Markröhrenabstand ( $d = 50$  mm). An den Übergangsflächen zweier Bretter mit der jeweils entgegengesetzten Konfiguration finden sich die Minima. Je nachdem, an welchem Schnitt die Spannungsverteilung bezüglich der Breitenrichtung ausgewertet wird, ergeben sich an jedem zweiten Brettübergang höhere bzw. niedrigere Spannungs-Maxima verglichen mit dem symmetrischen Fall II identischer Bretter.

Bei der antisymmetrischen Konfiguration IV fällt die Spannungserhöhung in der Breitenrichtung geringer aus als im symmetrischen Fall II. Statt einer maximalen Überhöhung von 4 ergibt sich ein relatives Maximum von 2,5, außerdem sind die Maxima gegenüber der Mittellinie der Lamellen verschoben. Die 2-D Verteilung der Spannungen ist komplexer als bei der symmetrischen Konfiguration, so dass die Höhenverteilung entlang der Querschnittsmitte für diese Konfiguration nicht die absoluten Maxima der Querspannungen erfasst. [2]

Diskussion der Parametervariation:

Für die hier gezeigten Sägeschnittparameter  $e$  und  $d$  (gilt für Konfiguration II-IV), liegen die Maxima der Verteilungen in Breiten- $x$ -Richtung nahe der Querschnittsmitte. In Höhenrichtung finden wir die Maxima nahe der Leimfuge.

Es ist zu erkennen, dass der quantitative Wert der Spannungsüberhöhung aufgrund der polaren Isotropie von den jeweiligen Sägeeinschnittsparametern  $d$  und  $e$  abhängt.

Weiters ergibt sich zwischen verschiedenen Brettschichtholz-Abschnitten eine Variation der Maximalspannungen, die durch die unterschiedlichen Querschnittsaufbauten bezüglich des Sägeeinschnittes verursacht werden.

Als Folge dieser Ergebnisse kann angenommen werden, dass ein Schädigungsbeginn im Inneren des BSH-Querschnittes und nahe der Leimfuge erfolgt.

#### 1. 2. 4 Spannungsverteilung über den Querschnitt eines gekrümmten Brettschichtholzträgers unter Momentenbelastung

In der Literatur wird die Anisotropie des Werkstoffes Holz auch bei dreidimensionaler Modellierung üblicherweise in einer Vereinfachung als rhombische Orthotropie betrachtet. Der Ausdruck „zylindrische Anisotropie“ bezieht sich hierbei auf die effektive Symmetrie des Gesamtsystems eines kreisförmig gebogenen Trägers mit konstanter Höhe. Die Zylinderachse ist hierbei normal zur Bogenebene des Trägers und bezieht sich auf die Geometrie des Bauteils und nicht auf die Materialeigenschaften. [2] Bei Annahme einer zylindrischen Materialanisotropie dagegen erhält man im Fall eines gekrümmten kreisförmigen Brettschichtholzträgers mit konstanter Höhe schließlich eine Torus-Symmetrie des Gesamtsystems mit zwei Symmetrieachsen. Einerseits die gekrümmte Achse der ursprünglichen Zylinderkoordinatensysteme, die den Markröhrenlagen der Einzellamellen entsprechen und die Drehachse normal zur Bogenebene, um die sich die Torusse der Materialkoordinatensysteme winden. Die Zylinder-Anisotropie bezieht sich hier nicht auf

die Geometrie, sondern auf den ursprünglichen Aufbau des Materials Holz. Die Berechnung der Querzugspannungen, unter Berücksichtigung der zylindrischen Anisotropie des Holzes, im gekrümmten Träger erfolgte laut Dill-Langer [2] mit Hilfe eines 3-D FE-Modells. In Abb. 1.17 ist die Diskretisierung des betrachteten Bogenabschnittes eines gekrümmten Trägers konstanter Höhe unter Ausnutzung der Symmetrie dargestellt. Ziel dieser 3-D FE-Berechnung ist es den Effekt der zylindrischen Materialanisotropie und damit der torusförmigen Symmetrie jeder einzelner gebogenen Lamelle nicht herausgemittelt, sondern explizit zu untersuchen.

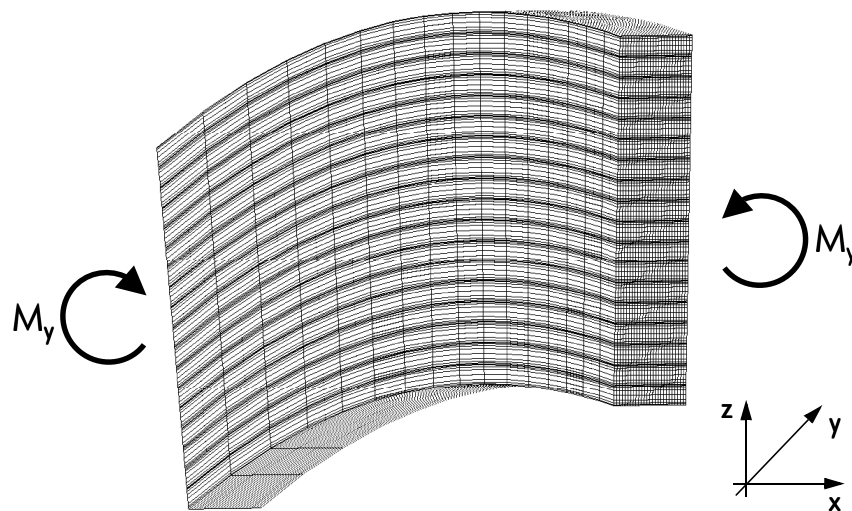


Abb. 1.17 3-D Diskretisierung eines BSH-Bogenträgers unter Momentenbelastung [2]

Um eine Näherung für die maximalen Querzugspannungen zu erhalten kann die von Blumer ermittelte Gleichung 1.17 [5] für den rhombisch orthotropen Fall herangezogen werden. Die Form der Querzugs-Spannungsverteilung über die Höhe stellt näherungsweise eine Parabel dar. Die Biegespannungen an der biegezugbeanspruchten Innenkante  $\sigma_{m,i}$  bzw. an der bиеgedruckbeanspruchten Außenkante  $\sigma_{m,a}$  des Trägers können in Näherung durch die Gleichungen 1.18 und 1.19 bestimmt werden.

$$\sigma_{t,90,max} = \frac{3 \cdot M}{2 \cdot b \cdot h \cdot r_{mitt}} \quad 1.17$$

$$\sigma_{m,i} = 6 \cdot \frac{M}{b \cdot h^2} \cdot \left( 1 + 0,35 \cdot \frac{h}{r_{mitt}} + 0,6 \cdot \left( \frac{h}{r_{mitt}} \right)^2 \right) \quad 1.18$$

$$\sigma_{m,a} = -6 \frac{M}{b \cdot h^2} \quad 1.19$$

Mit Hilfe des 3-D-Modells werden die aus den Umlenkkraften resultierenden Spannungs- und Dehnungsfelder für die gleichen Querschnittskonfigurationen I - IV und Ma-

terialparameter wie in Abschnitt 1. 2. 3 berechnet.

Hinzu kommt:

der Krümmungsradius  $r_{\text{mitt}} = 6000 \text{ mm}$

$E_L = 13000 \text{ N/mm}^2$ ,  $\nu_{LR} = 0,015$ ,  $\nu_{LT} = 0,015$ ,  $G_{LT} = 800 \text{ N/mm}^2$ ,  $G_{LR} = 800 \text{ N/mm}^2$

Die Werte für den E-Modul und die Schubmodule in Faserlängsrichtung liegen im Bereich der Werte für GL 36 (EN 1194 1995). Die Werte der Querkontraktionszahlen liegen innerhalb der Bandbreite der in der Literatur angegebenen Werte von Neuhaus.

Für die Konfiguration I, den rhombisch orthotropen Fall ohne Jahrringskrümmung und ohne Kopplungseffekt, gilt die Näherung aus Gleichung 1.17 . In Abb. 1.18 und Abb. 1.19 ist die Querkzugspannung innerhalb des Symmetriequerschnittes des gekrümmten Trägers für die Konfiguration I und II dargestellt. In Abb. 1.18 ist die Verteilung über die Höhe entlang der Mittellinie und an den Rändern der Bretter dargestellt. Die Abb. 1.19 zeigt den Spannungsverlauf in Breitenrichtung entlang der Linie am Übergang zwischen zwei Lamellen auf halber Trägerhöhe.

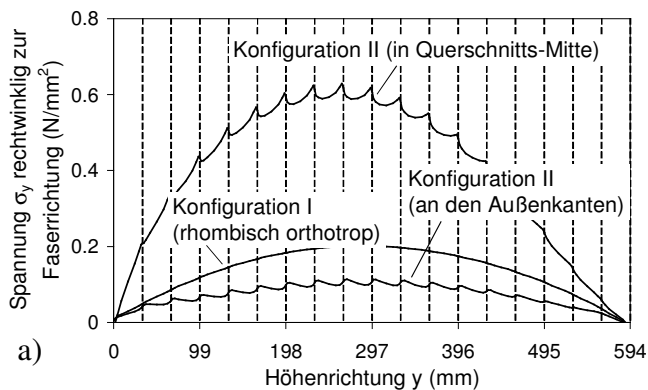


Abb. 1.18 Verteilung der Querkzugspannung  $\sigma_y$  im Symmetriequerschnitt: Schnitt in Höhenrichtung [2]

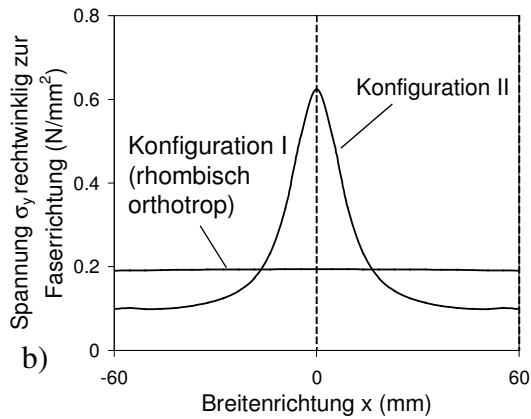


Abb. 1.19 Verteilung der Querzugspannung  $\sigma_y$  im Symmetriequerschnitt: Schnitt in halber Trägerhöhe über die Breite [2]

Für die Konfiguration I ist die Verteilung annähernd parabolisch in Höhenrichtung und konstant in Breitenrichtung.

Für die Konfiguration II, gleiche symmetrische Jahrringkrümmung für alle Lamellen, ergibt sich eine Verteilung die in Höhenrichtung nahezu parabolisch ist, jedoch sind Spannungsüberhöhungen in Form von Spitzen an den Leimfugen zu erkennen. In Breitenrichtung erhält man durch die Schubkopplung das extrem ausgeprägte Spannungsmaximum in der Querschnittsmitte.

Die Ergebnisse aller Konfigurationen sind in Abb. 1.20 dreidimensional dargestellt.

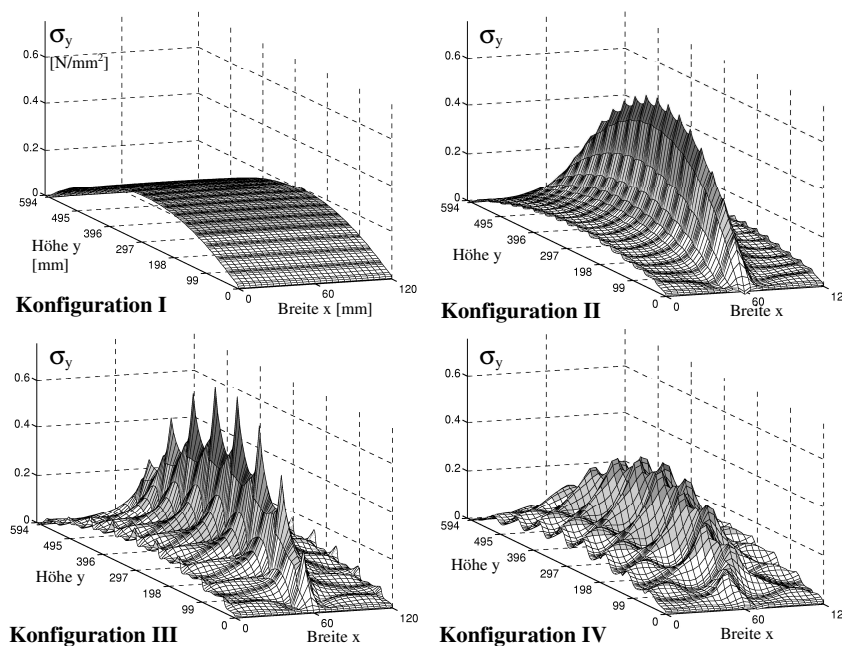


Abb. 1.20 Querzugspannungsverteilung  $\sigma_y$  im Symmetriequerschnitt für die Konfigurationen I - IV in 3-D [2]

Für Konfiguration III, unterschiedliche Koordinatenursprungsabstände zweier aufeinanderfolgender Lamellen, gilt wie bei einachsiger Belastung Inhomogenität in Höhenrichtung zweier aufeinanderfolgender Lamellen. Die Maxima der Querspannungen erreichen das Sechsfache gegenüber Konfiguration I.

Die Konfiguration IV, gegeneinander verschobene Exzentrizitäten zweier aufeinanderfolgender Lamellen, weist ein in Breitenrichtung verschobenes Maximum in Richtung Brettmitte auf, wie es schon aus der einachsigen Belastungskonfiguration erkennbar war. Die parabolische Form in Höhenrichtung ist nicht mehr so ausgeprägt, wie bei den anderen Konfigurationen.

Bei der Konfiguration II, ideal symmetrischer Aufbau, sind die Effekte der Schubkopplung in Breitenrichtung am ausgeprägtesten zu erkennen. Weiters ist eine parabolische Form in Höhenrichtung erkennbar. [2]

### 1. 3 Bestimmung des Einflusses des Querschnittsaufbaus auf die Festigkeit anhand von Versuchen

Die hier diskutierten Versuche und die daraus entnommenen Daten stammen aus mehreren Forschungsarbeiten des Otto-Graf-Institut (OGI) der Universität Stuttgart und aus dem europäischen AIR-Forschungsvorhaben.

#### 1. 3. 1 Versuche zur Ermittlung der Dehnungsverteilung einer Einzellamelle

Wie in Abschnitt 1. 2. 2 bereits erwähnt, ist zur experimentellen Verifizierung der FE-Berechnungen bezüglich der zylindrischen Anisotropie der Elastizität eine einachsig rechtwinklig zur Faserrichtung zugbeanspruchte Lamelle am besten geeignet. Die Randbedingungen wurden entsprechend der in Abschnitt 1. 2. 2 definierten Konfiguration D übernommen. Diese Randbedingungskonfiguration ist besonders gut geeignet, da die rechnerisch mittels FE-Berechnung vorhergesagte inhomogene Dehnungsverteilung mit experimentellen Methoden einfach nachzuweisen ist. Durch die Verifizierung der Dehnungsverteilung kann im Rahmen linear elastischen Verhaltens rechnerisch auf die Spannungsverteilungen bei beliebigen Randbedingungskonfigurationen geschlossen werden. [2]

In Abb. 1.21 a) ist der Prüfaufbau der Einzellamelle, die in der Schmalseite rechtwinklig zur Faserrichtung durch Zugkräfte einachsig belastet wird dargestellt. Dabei wird die Last von der Prüfmaschine über Gelenke und Stahlklammern auf Anleimer-Holz-Abschnitte übertragen, die mit dem Prüfkörper verklebt sind. Die Dehnungsverteilung innerhalb des Brettquerschnittes wird mit Hilfe von linearen Dehnungsmessstreifen gemessen, die auf beiden Hirnholzseiten und an den Längsholzseiten angeordnet sind.

Es werden die Ergebnisse zusammengefasst, die eine experimentelle Bestätigung der numerischen FE-Berechnungen und der zugrundeliegenden Annahmen der elastischen Zylinder-Anisotropie darstellen. In Abb. 1.21 b) werden die Ergebnisse der gemessenen Dehnungskomponente in Last-x-Richtung mit den berechneten Dehnungen des Querschnittes verglichen. Als Ergebnis der Versuche kann eine Übereinstimmung mit den Ergebnissen der FE-Berechnung unter der Voraussetzung einer zylindrischen Anisotropie gezeigt werden. Insbesondere werden bezüglich der off-axis-Dehnungskomponente  $\epsilon_x$



die großen Dehnungsunterschiede zwischen der Mittellinie des nahezu symmetrischen Brettes (Drehwinkel zwischen on- und off-axis-Systemen  $\varphi \sim 0^\circ$ ) und dem randnahen Bereich ( $\varphi \sim 45^\circ$ ) quantitativ richtig wiedergegeben und damit der Schubkopplungseffekt im zylindrisch anisotropen Fall nachgewiesen. [2]

Eine weitere Bestätigung der FE-Berechnungen ergibt sich aus der Betrachtung der gemessenen Querdehnungen  $\varepsilon_y$  die in Abb. 1.21 c) dargestellt sind.  $\varepsilon_y$  liegt in den Bereichen  $\varphi \sim 45^\circ$  von der gleichen Größenordnung wie die Längsdehnung  $\varepsilon_x$ . Bei  $\varphi \sim 45^\circ$  dominiert der on-axis-Schubterm der Gleichung 1.15 und 1.16 sowohl die off-axis-Längs- als auch die off-axis-Querdehnungen. Der Einfluss der on-axis-Hauptdehnungsanteile ist für  $\varphi \sim 45^\circ$  vernachlässigbar, bestimmt dagegen das Dehnverhalten für  $\varphi \sim 0^\circ$  wie numerisch ermittelt. [2]

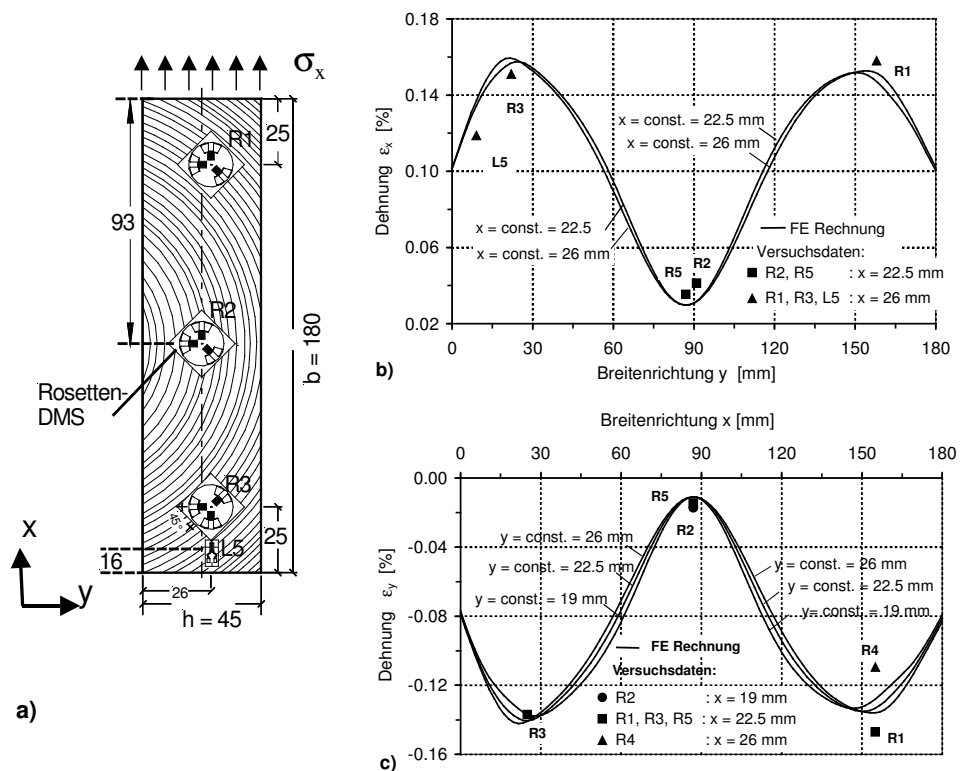


Abb. 1.21 a) Skizze des Prüfaufbaus der Dehnungsmessungen an einer rechtwinklig zu den Querschnitts-Schmalseiten einachsig belasteten Lamelle  
 b) Vergleich der empirischen und rechnerischen Verteilung der Dehnungskomponenten  $\varepsilon_x$  parallel zur Lastrichtung  
 c) Vergleich der empirischen und rechnerischen Verteilung der Dehnungskomponenten  $\varepsilon_y$  rechtwinklig zur Lastrichtung [2]

Weiters zeigt sich, dass die linear elastische FE-Berechnung die Dehnungsfelder und die dazu gehörigen Spannungsfelder innerhalb einer quer zur Faserrichtung belasteten Lamelle richtig wiedergeben.

### 1.3.2 Versuche zur Ermittlung der globalen Steifigkeit von BSH in Abhängigkeit vom Querschnittsaufbau

Die empirische Bestätigung der zylindersymmetrischen Anisotropie der Elastizität an schmaleitig belasteten Lamellen-Querschnitten wurde anhand von globalen Verformungsmessungen an einachsig beanspruchten Brettschichtholz-Querschnitten mit unterschiedlichen Querschnitts-Aufbau-Konfigurationen überprüft. Für die Versuche mit Brettschichtholz wurden Bretter mit zwei unterschiedlichen Sägeeinschnitten hergestellt: Kernnahe Bretter mit starker Jahrringkrümmung und Abständen zwischen Lamellenrand und Markröhre  $d$  von weniger als 15 mm. [2]

Kernferne Bretter mit schwacher Jahrringkrümmung und Abständen zwischen Lamellenrand und Markröhre  $d$  von mehr als 100 mm.

Aus diesen Lamellen wurden drei verschiedene Querschnittsaufbauten realisiert:

Ein symmetrischer Aufbau aus kernnahen Lamellen ( $d = 15$  mm) mit starker Jahrringkrümmung;  $e = 0$ ; Bezeichnung SYMM

Ein antimetrischer Aufbau aus in Breitenrichtung von gegeneinander versetzten kernnahen Lamellen ( $d = 15$  mm) mit starker Jahrringkrümmung;  $e = +/- 15$  mm; Bezeichnung ANTI

Ein Aufbau aus kernfernen Lamellen ( $d = 100$  mm) mit schwacher Jahrringkrümmung und symmetrischen Aufbau;  $e = 0$ ; Bezeichnung FERN

In Folge dieser Versuchsreihe wurden pro Prüfserie 15 einachsige Zugversuche mit Wegsteigerung unter konstanter Lasterhöhung in Anlehnung an die europäische Prüfnorm EN 1193:1998 durchgeführt. Die Zugkraft wurde mittels Zwischenhölzern auf den Prüfkörper mit 12 Lamellen und den Abmessungen  $b \times h \times l = 100$  mm  $\times$  369 mm  $\times$  250 mm aufgebracht. Während der Prüfung wurde die Verformung mittels vier Wegaufnehmern und die Reaktionskraft mittels einer Kraftmessdose aufgenommen und als Last-Verschiebungskurve aufgezeichnet. In Abb. 1.22 ist der Aufbau der BSH-Prüfkörper als Zeichnung und als Foto abgebildet.

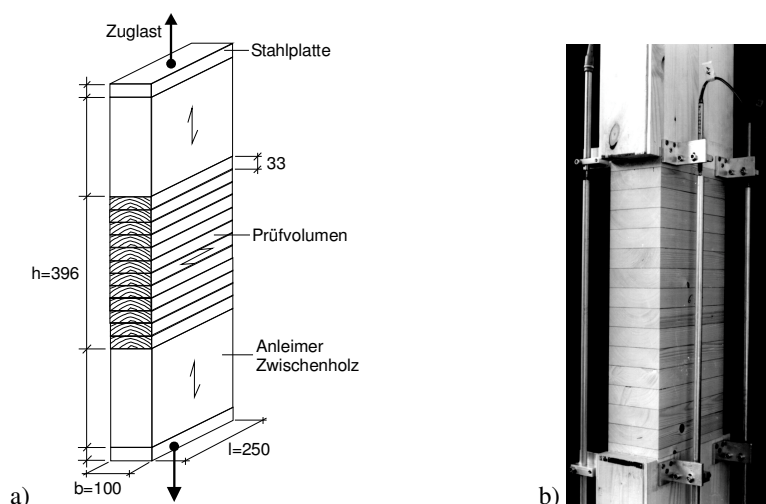


Abb. 1.22 a) Skizze des Versuchsaufbaus; b) Foto eines BSH-Prüfkörpers mit Wegaufnehmer [2]

Der globale oder „effektive“ E-Modul wurde in Übereinstimmung mit der EN 1193:1998 aus der Steigung der Spannungs-Dehnungslinie in einem Bereich zwischen 10 und 40% der Bruchspannung ermittelt. Als Spannung wurde dabei die Zuglast bezogen auf die belastete Fläche und als Dehnung die aus den vier Wegaufnehmern gemittelte Gesamtverformung des Messbereichs bezogen auf die Messlänge definiert. Die Mittelwerte und deren Variationskoeffizienten der empirischen Werte des globalen E-Moduls sind in Tab. 1.1 angegeben. [2]

Um einen direkten Vergleich zwischen Rechnung und Versuch zu erhalten, wurde mit den durch den Versuch vorgegebenen Geometrie- und Einschnittparameter FE-Berechnungen zur Steifigkeit des Brett-schichtholzquerschnittes unter linear elastischen und mit Hilfe zylindrisch anisotropen Materialverhaltens durchgeführt. Bei der FE-Rechnung wurden jeweils 2-D-Modelle des Brett-schichtholzquerschnittes mit den Abmessungen der Prüfkörper erstellt. Als Materialparameter wurden die schon aus Abschnitt 1. 2. 2 bekannten Werte angenommen. Die äußere Last wurde als Gleichstreckenlast aufgebracht und die Gesamtverformung wurde als Mittelwert der Differenz-Verschiebung in Last-richtung des oberen bzw. unteren Querschnittsrandes ausgegeben. Der globale E-Modul wurde als Quotient aus der Gleichstreckenlast und der mittleren Dehnung (Gesamtverformung bezogen auf die Querschnittshöhe) berechnet. Für die idealisierten Querschnitte sind die nominellen Einschnittparameter zugrundegelegt worden. Bei den drei Versuchsserien wurden außerdem pro Serie jeweils 4 (von insgesamt 15) Querschnittsaufbauten hinsichtlich des Sägeeinschnittes vermessen und die auf diese Weise pro Lamelle individuell ermittelten Parameter  $d$  und  $e$  zu einer weiteren Modellierung benutzt. Im Weiteren werden in Abgrenzung zu den idealisierten Querschnittsaufbauten die auf ausgemessenen Einschnittparametern beruhenden modellierten Querschnitte als „empirische“ Querschnitte bezeichnet. Die FE-Resultate der effektiven E-Module für die idealisierten Querschnitte und die Mittelwerte, Minimal- und Maximalwerte der FE-Ergebnisse für die empirischen Querschnitte sind in Tab. 1.1 und in Abb. 1.23 den E-Modul-Mittelwerten (mit Standardabweichungen) gegenübergestellt. [2]

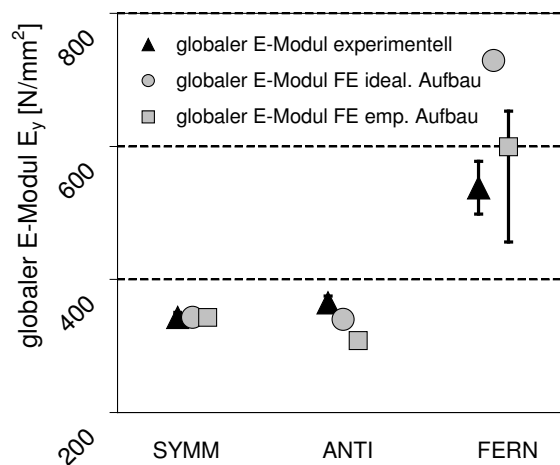


Abb. 1.23 Vergleich von rechnerischen und experimentellen globalen E-Modulen [2]

| Bezeichnung<br>Querschnitts-<br>aufbau | globaler E-Modul $E_y$<br><b>experimentell:</b><br>Mittelwert $\pm$ Standabw.<br><br>[N/mm <sup>2</sup> ] | globaler E-Modul $E_y$<br><b>FE-Modelle</b><br>idealisierte Querschnitte<br><br>[N/mm <sup>2</sup> ] | globaler E-Modul $E_y$<br><b>FE-Modelle</b><br>empirische Querschnitte<br>Min./Mittel/Max.<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|--|---|--|--|
| SYMM                                   | <b>343</b> $\pm$ 7,5  | <b>343</b>   | 339 / <b>343</b> / 348   |
| ANTI                                   | <b>365</b> $\pm$ 10,2   | <b>340</b>   | 302 / <b>308</b> / 313   |
| FERN                                   | <b>538</b> $\pm$ 39,8   | <b>729</b>   | 456 / <b>599</b> / 653   |
| <i>Gesamt-<br/>Mittelwert</i>          | <b>415</b>  | <b>471</b>   | <b>417</b>   |

Tab. 1.1 Experimentelle und rechnerische Werte für die globalen E-Module unterschiedlicher Querschnittsaufbau-Konfigurationen [2]

### Diskussion der Ergebnisse:

Der Gesamtmittelwert der globalen E-Module über alle Versuchsserien liegt bei 415 N/mm<sup>2</sup>, ist damit niedriger als die beiden angenommenen on-axis-E-Module. Die experimentellen globalen E-Module bestätigen den Einfluss der zylindrischen Anisotropie und den niedrigen Schubmodul der RT-Ebene mittels des Schubkopplungseffektes.

Die Serie FERN mit kernfern eingeschnittenen Lamellen weist trotz geringerer Rohdichte einen um 57% gegenüber der Serie SYMM und einen 47% gegenüber der Serie ANTI höheren globalen E-Modul rechtwinklig zur Faserrichtung auf. [2]

### 1. 3. 3 Bruchformen und Schädigungsverlauf bei BSH-Proben

Betrachtet man die Bruchflächen der insgesamt 135 Proben (90 Proben aus AIR und 45 Proben aus Otto Graf Institut) so lassen sich die Bruchflächen in zwei Klassen einteilen: „Interface-Brüche“ mit Bruchflächen nahe an den Klebefugen zwischen zwei Lamellen und „Lamellen-Brüche“ ohne Beteiligung oder Nähe zu den Interfacebereichen nahe der Klebefugen.

Nur insgesamt ca. 15% der Proben wiesen einen Lamellenbruch auf. In Abb. 1.24 ist ein Lamellenbruch mit Harzgalie dargestellt, diese wuchsbedingte Fehlstelle ist vermutlich der Initialdefekt der zum Versagen geführt hat.

Etwa 85% der Proben wiesen einen Interfacebruch auf. Bei den Interfacebrüchen versagt das Holz in der Nähe der Leimfuge, allerdings nicht in der Klebstoffschicht selbst. Auf allen Bruchflächen war eine dünne Holzschicht bzw. mindestens ein Holzfaserbelag zu erkennen. Die Bruchfläche ist meistens wenig zerklüftet und verläuft im Bereich der La-

mellen-Mitte relativ glatt. Der Riss läuft meist durch zwei Lamellen, vorwiegend im Bereich derjenigen Lamelle (1), deren rechte, dem Kern zugewandten, Seite zur Versagensfläche zeigt. [2]

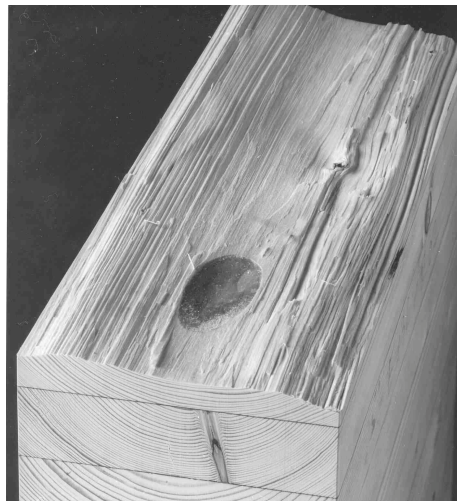


Abb. 1.24 Lamellenbruch mit Harzgalle [2]

Da es bei der Durchführung der Versuche nur sehr selten zum Beobachten von Rissbildungen und deren Dokumentation gekommen ist wurde ein eigener Versuchsaufbau entwickelt. An einigen exemplarischen Prüfkörpern konnte somit der Schädigungsverlauf im Kurzzeitversuch durch lokale Dehnungsmessungen sowie durch Erfassung und räumlicher Ortung von Schallemissionen (SE) ermittelt werden. [2] In Abb. 1.25 ist der Versuchs- sowie der Prüfkörperaufbau dargestellt.

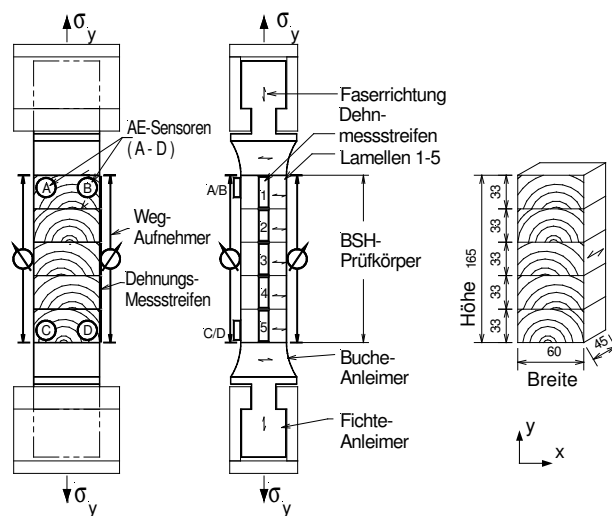


Abb. 1.25 Skizze des Prüfkörperaufbaus und des Versuchsaufbaus zur Erfassung der lokalen Dehnungen und zur Ortung von Schallemissionen [2]

Die Ergebnisse der Schallemissionsmessungen, sind exemplarisch in Abb. 1.26 für einen Brettschichtholzquerschnitt dargestellt. Es ist dabei zu erkennen, dass die Schädigung zwischen der dritten und vierten Lamelle und in Mitte der Breitenrichtung zu lokalisieren ist. Die Lage der Spannungmaxima nahe der Querschnittsmitte ist ein Hinweis auf die Mikroschädigung in der Zone der höchsten Spannungskonzentration, wie sie unter Annahme der zylindrischen Anisotropie der Elastizität berechnet wurde.

Die lokalen Dehnungsmessungen an den einzelnen Lamellen ergänzen das durch Schallemissionsverfahren gewonnene Bild des Schädigungsverlaufes. Dabei zeigt sich, dass eine sprunghafte Dehnungszunahme hauptsächlich in den zwei beteiligten Bruchlamellen stattfand. Die weiter entfernt liegenden Lamellen zeigen eine weit geringere Dehnungszunahme. [2]

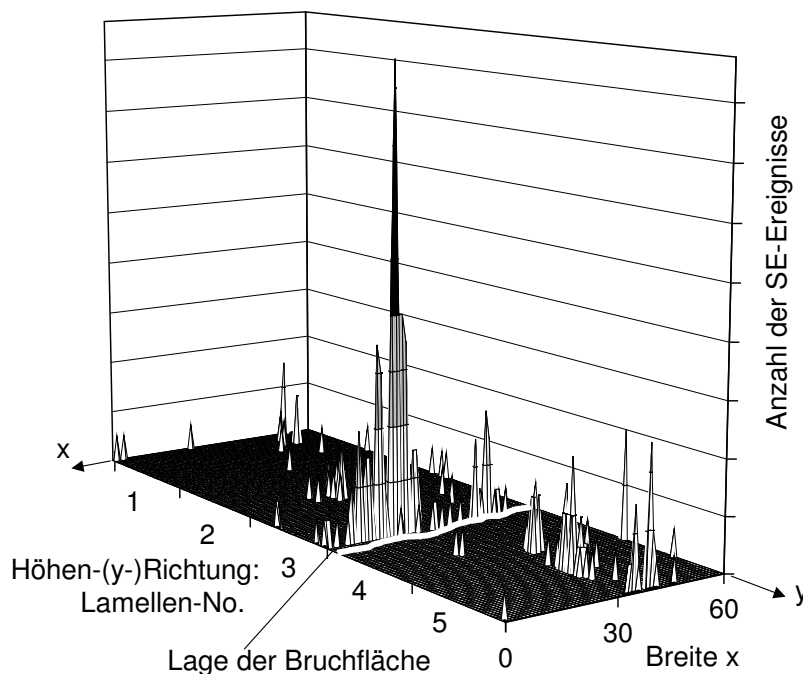


Abb. 1.26 Ergebniss der Schallemissionsmessung im Brettschichtholzquerschnitt [2]

### 1. 3. 4 Globales Last-Verformungsverhalten

Betrachtet man die Lastverschiebungskurven der drei Serien (SYMM,ANTI,FERN), so lassen sich diese in zwei Klassen einteilen, von denen jeweils eine typische Kurve in Abb. 1.27 aufgetragen ist. Bei ca. 40% der Proben ist vor dem Bruch kein Anzeichen einer beginnenden Schädigung in der Lastverschiebungskurve zu erkennen. Es ist ein lineares Verhalten bis kurz vor dem Versagen zu erkennen, das Versagen kann als spröde und instabil bezeichnet werden. Bei ca. 60% der Proben treten dagegen vor dem Versagen Lasteinbrüche und / oder Nichtlinearitäten in der Lastverschiebungskurve auf. Für

die meisten dieser Prüfkörper zeigen sich erste Abweichungen vom linearen Verlauf ab einem Belastungsniveau von 90% - 95% bezogen auf die Bruchlast. Die Beispielkurve in Abb. 1.27 zeigt nach dem linearen Bereich einen Lasteinbruch von ca. 20% der bis dahin erreichten Last, gefolgt von einem Wiederanstieg der Kurve mit verminderter Steigung und weiteren kleineren Lasteinbrüchen, bis ein niedriger Tangentenmodul erreicht wird. Anschließend versagt die Probe, wie alle geprüften Proben, schlagartig auf spröde Weise. Weiters zeigt sich, dass ein symmetrischer Lastaufbau mit kleinen Markröhrenabständen und starker Jahrringkrümmung, wie bei Aufbau SYMM realisiert, das Auftreten von Lasteinbrüchen und damit von abschnittsweise stabilen Schädigungsverhalten begünstigt, d.h. der Sprödbbruch tritt erst nach einem Lasteinbruch auf. Das Versetzen der Markröhre gegeneinander, Aufbau ANTI, oder die Verwendung von kernfernen Lamellen, Aufbau FERN, führt dagegen zu einem linearen Verhalten bis zum Sprödbbruch. [2]

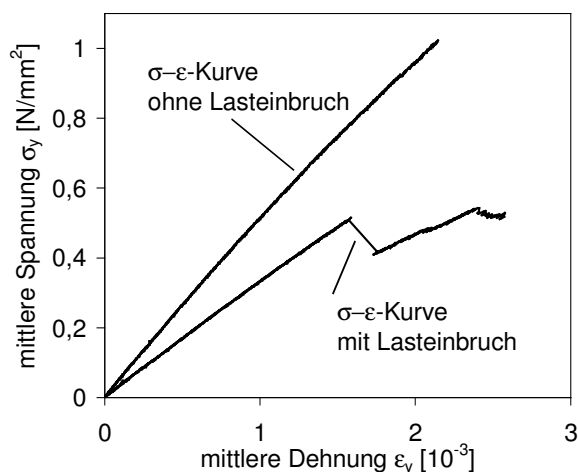


Abb. 1.27 Zwei exemplarische Lastverschiebungskurven mit und ohne Lasteinbruch [2]

### 1. 3. 5 Schädigungsmodell für BSH bei Querzugbeanspruchung

Durch die aus den Versuchen gewonnenen Ergebnisse, begleitet von Modellberechnungen, lässt sich ein idealisierter Schädigungsverlauf von Brett-schichtholz bei Querzugbelastung angeben. In Abb. 1.28 ist der Verlauf durch fünf Schädigungsstufen dargestellt, wobei jeweils der charakteristische Mechanismus schematisch skizziert und der entsprechenden Stufe im Lastverformungsdiagramm zugeordnet ist. Weiters sind die Prüfmetho-den angegeben, mit denen der jeweilige Mechanismus experimentell charakterisiert werden konnte. [2]

In der ersten Stufe (bis ca. 50% der Bruchlast) bleiben sowohl das lokale Materialverhalten als auch die globale Last-Verformungskurve linear. Aufgrund der Jahrringkrümmung und des Schubkopplungseffektes bildet sich trotz global einachsiger Belastung ein inhomogenes Feld von Zugspannungen aus.

In der zweiten Stufe (bis ca. 80-90% der Bruchlast) bleibt das globale Last-Verformungsverhalten annähernd linear, während sich lokal betrachtet in den Querschnittsbereichen mit hohen Zugspannungen Mikrorisse bilden, die mittels Schallemissionsverfahren loka-

lisierbar sind.

In der dritten Stufe treten bereits Makrorisse auf, die im Bereich hoher Zugspannungen in Brettmitte auftreten. Die Rissentstehung und die damit verbundene Lastumlagerung auf unbeschädigte Bereiche des Querschnittes kann abhängig vom Sägeeinschnitt zu Lasteinbrüchen in der Last-Verformungskurve oder zum sofortigen Versagen führen.

Der Schädigungsmechanismus der letzten beiden Stufen lässt sich als Rissausbreitung des in der dritten Stufe entstandenen Makrorisses in der RT-Ebene beschreiben. Die Stabilität des Risswachstums hängt neben den Einflussgrößen der Materialparameter von der Jahrringkrümmung der Lamellen im Brettschichtholzquerschnitt ab. Bei Erreichen einer kritischen Risslänge von maximal 2/3 der Brettschichtholz-Querschnittsbreite tritt ein plötzlicher Sprödbruch auf. [2]

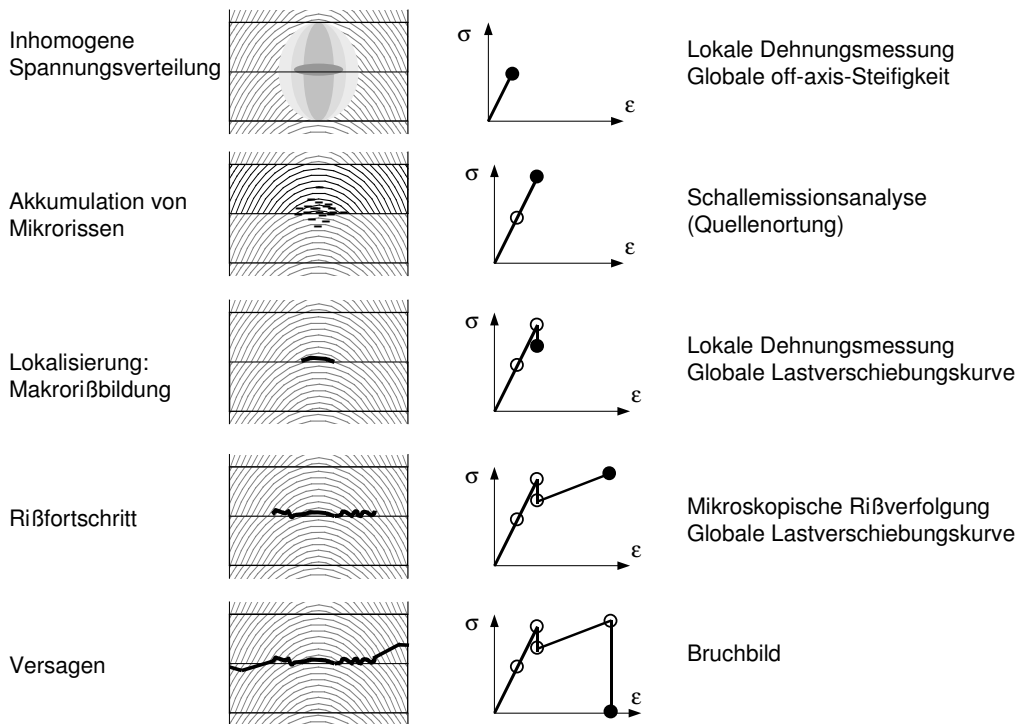


Abb. 1.28 Schema des empirischen Schädigungsmodells für BSH bei Querkzugbeanspruchung [2]

### 1.3.6 Einfluss des Querschnittsaufbaus auf die Querkzugfestigkeit

Zur Untersuchung des Einflusses des Querschnittsaufbaus wurden die Festigkeiten der Prüfserien SYMM, ANTI und FERN ausgewertet. Das Volumen der Prüfkörper der drei Serien war identisch.

In Tab. 1.2 sind die Sollwerte, die Variationskoeffizienten und die 5%-Fraktilwerte der versuchstechnisch ermittelten Festigkeitsverteilungen angegeben.



Neben dem planmäßigen Unterschied im Querschnittsaufbau unterscheiden sich die Serien auch bezüglich ihrer Material-Rohdichte. Die Rohdichteunterschiede verhielten sich reziprok zu den Festigkeiten, so dass die üblicherweise angenommene Proportionalität zwischen Festigkeit und Rohdichte hier nicht zutrifft.

Sowohl auf dem Mittelwert- wie auf dem Fraktilniveau zeigt die Serie SYMM mit symmetrischem Aufbau aus kernnahen Lamellen die niedrigste Festigkeit.

Mittlere Festigkeiten liefert die Serie ANTI mit antisymmetrischen Aufbau und kernnahen Lamellen.

Die höchsten Festigkeiten liefert die Serie FERN aus kernfernen Lamellen mit geringer Jahrringkrümmung. [2]

| Prüfkörper-Serie | Markröhren-Abstand<br>d | Exzentrizität<br>e | Rohdichte<br>$\rho_{12}$ | Festigkeit                     |                       |                              |
|------------------|-------------------------|--------------------|--------------------------|--------------------------------|-----------------------|------------------------------|
|                  |                         |                    |                          | Mittelwert<br>$f_{t, 90, mit}$ | Var.-Koeff.<br>C.O.V. | 5%-Frakt.<br>$f_{t, 90, 05}$ |
|                  | mm                      | mm                 | kg/m <sup>3</sup>        | N/mm <sup>2</sup>              | %                     | N/mm <sup>2</sup>            |
| SYMM             | <15                     | 0                  | 516                      | <b>0,62</b>                    | 14,7                  | <b>0,44</b>                  |
| ANTI             | <15                     | > ± 15             | 489                      | <b>0,77</b>                    | 17,7                  | <b>0,53</b>                  |
| FERN             | >100                    | 0                  | 498                      | <b>0,89</b>                    | 13,6                  | <b>0,65</b>                  |

Tab. 1.2 Parameter der drei Serien mit unterschiedlichen Querschnittsaufbauten [2]

### 1. 3. 7 Zusammenfassung

Wie Rechenmodelle und deren Verifizierung durch Versuche gezeigt haben, sind bei der Betrachtung des linear elastischen Verhaltens rechtwinklig zur Faserrichtung mehrere Punkte zu berücksichtigen:

Die übliche Modellvorstellung einer rhombischen Anisotropie reicht bei Querzugbeanspruchung von Brett-schichtholz nicht aus. Die zylindrische Anisotropie entspricht in besserer Näherung dem Werkstoff Holz. Die Ergebnisse der FE-Berechnungsmodelle auf Grundlage der zylindrischen Anisotropie wurden anhand der Versuche bestätigt. [2]

Der Einfluss der Sägeeinschnittsparameter (d Markröhrenabstand; e Exzentrizität gegenüber der Querschnittsmitte) und der Querschnittsaufbau (zB. SYMM, ANTI, FERN) auf die Querzugfestigkeit wurde nachgewiesen.

Weiters zeigte sich, dass der mittels elastischer Rechnung vorhergesagte Schädigungsbeginn nahe der Querschnittsmitte durch Schallemissionsmessungen bestätigt werden konnte. Das versuchstechnisch ermittelte „unstete“ Last-Verformungsverhalten konnte ebenfalls auf den Einfluss der zylindrischen Anisotropie der Brettquerschnitte zurückgeführt werden.



# Experimentelle Untersuchungen

## 1 Versuchsplanung

### 1.1 Prüfmaschine

Die Versuche wurden mit der am Institut für Holzbau und Holztechnologie verwendeten Universalprüfmaschine lignum\_uni\_275 der Allround-Linie der Zwick GmbH & Co. KG, mit einer maximalen Prüfkraft von 275 kN, durchgeführt (siehe Abb. 1.1).

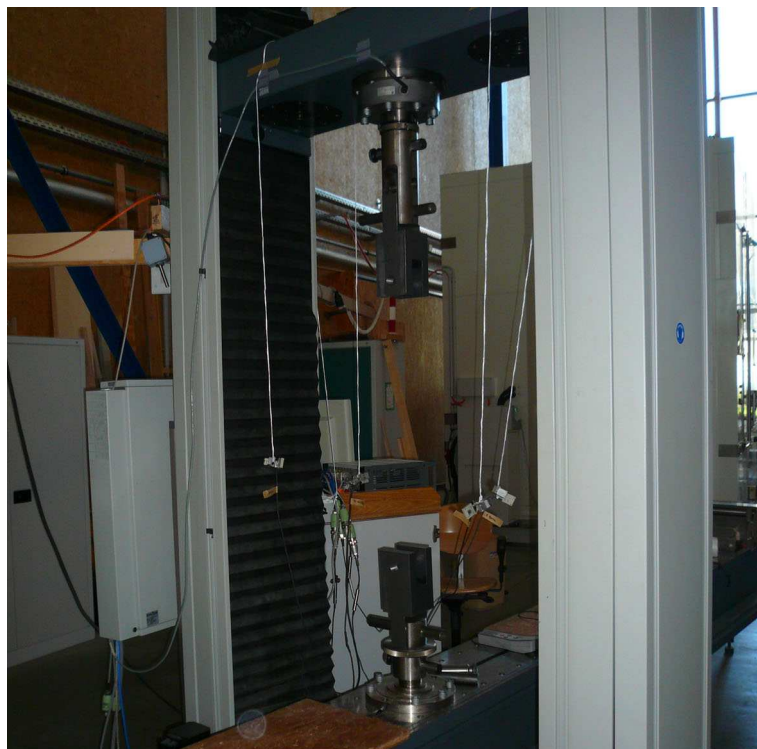


Abb. 1.1 Universalprüfmaschine lignum\_uni\_275

## 1.2 Versuchsaufbau

### 1.2.1 Allgemeines

Der Versuchsaufbau wurde in Anlehnung an die EN 408:2009 gestaltet. Die EN 408:2009 geht für die Untersuchung der Querkzugfestigkeit von einem festgelegten Volumen von 10 dm<sup>3</sup> aus.

Das Ziel dieser Diplomarbeit, die Volumenabhängigkeit der Querkzugfestigkeit zu untersuchen, erforderte eine Variation des Volumens. Zudem sollen die aus der Literatur bekannten Effekte infolge der seriellen und der parallelen Systemwirkungen untersucht werden.

Aufgrund dieser Erkenntnisse wurden zwei Querkzugflächen für die Versuche ausgewählt:

- 150 x 150 mm
- 150 x 300 mm

| Anzahl Einzelprüfkörper übereinander | Querschnittshöhe [mm] | serieller Effekt (Querkzugfläche 150 x 150 mm) Volumen [dm <sup>3</sup> ] | paralleler Effekt (Querkzugfläche 150 x 300 mm) Volumen [dm <sup>3</sup> ] |
|--------------------------------------|-----------------------|---|--|
| 1                                    | 40                    | 0,9   | 1,8  |
| 3                                    | 120                   | 2,7   | -  |
| 6                                    | 240                   | 5,4   | -  |

Tab. 1.1 Volumenvariation

### 1.2.2 Krafteinleitung

Die Krafteinleitung erfolgte nach Abb. 1.2, dabei bezeichnet ① die Gelenkkette welche Exzentrizitäten der Zugkraft aus der Vertikalachse verhindert. Weiters werden damit Zwängungen aus der Krafteinleitung vermieden. Damit ist sichergestellt, dass keine äußeren Kräfte, außer der planmäßigen mittigen Zugkraft auf den Prüfkörper wirken.

Die genaue Ausführung der Gelenke ist der Abb. 1.3 zu entnehmen.

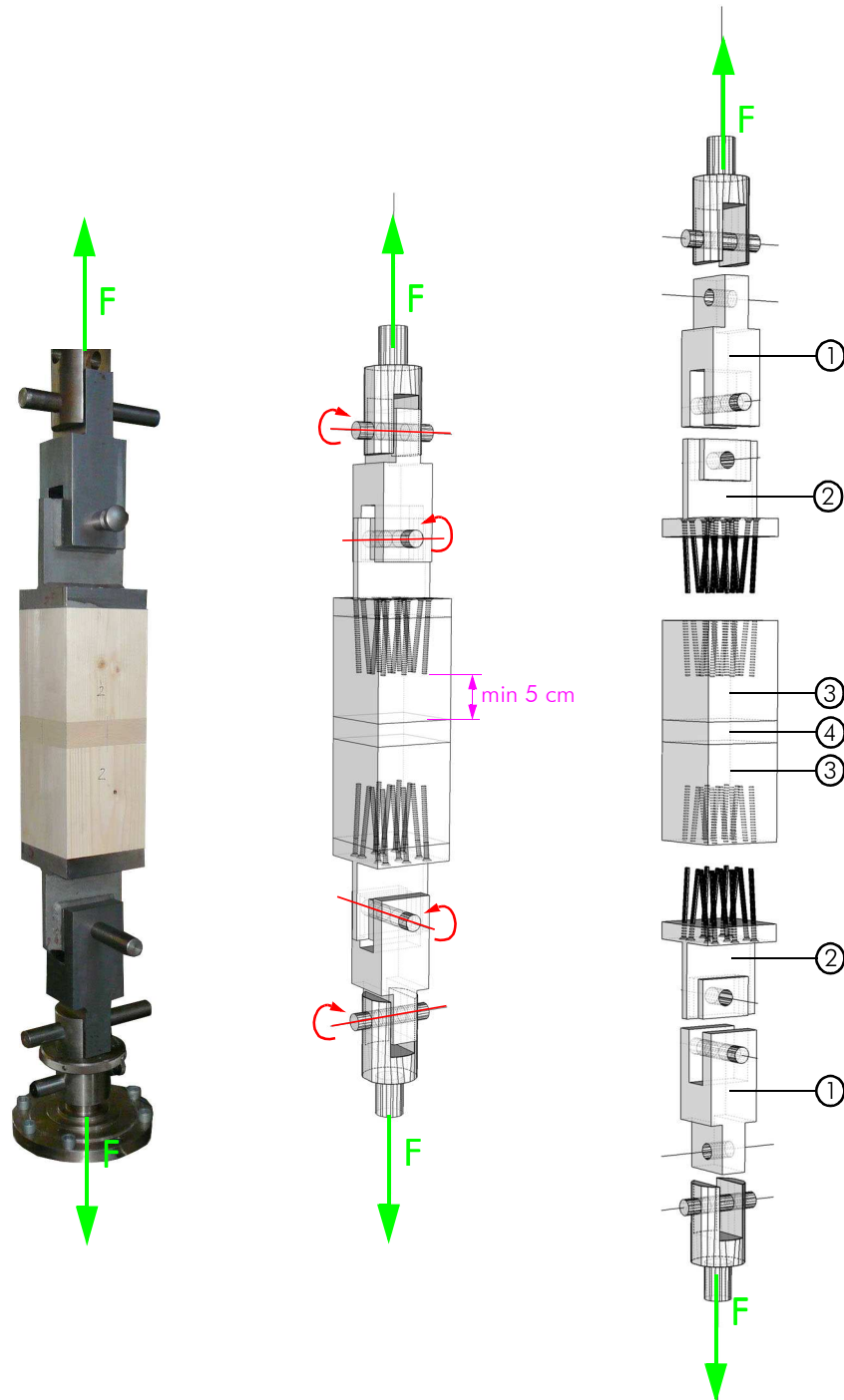


Abb. 1.2 Versuchsaufbau mit Kräfteinleitung (Foto, photorealistische Darstellung, Explosionszeichnung)

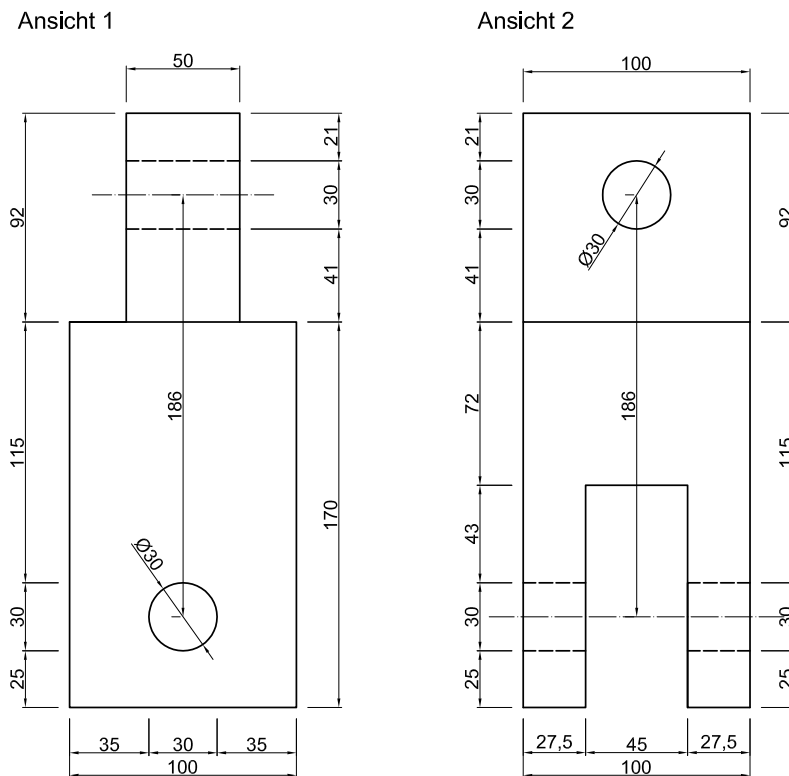


Abb. 1.3 Stahlteil der Gelenkkette

Die Bezeichnung ② steht für den Stahlwinkel der die Zugkraft in das Lasteinleitungsholz überträgt. Diese Übertragung erfolgt mittels Vollgewindeschrauben „Star Drive“ der Firma Schmidt mit einem Nenndurchmesser von 8 mm und einer Gesamtlänge von 160 mm. Bei der Querszugfläche 150 x 150 mm kommen 12 Schrauben zum Einsatz, bei der Querszugfläche 150 x 300 mm werden 24 Schrauben pro Stahlwinkel zur Kraftübertragung eingesetzt.

Zur Bemessung der Stahlwinkel wurde die Durchbiegung infolge der maximalen Prüfkraft von 275 kN am Punkt 1 des Stahlwinkels für die Querszugfläche 150 x 300 mm (siehe Abb. 1.5) auf 0,1 mm beschränkt.

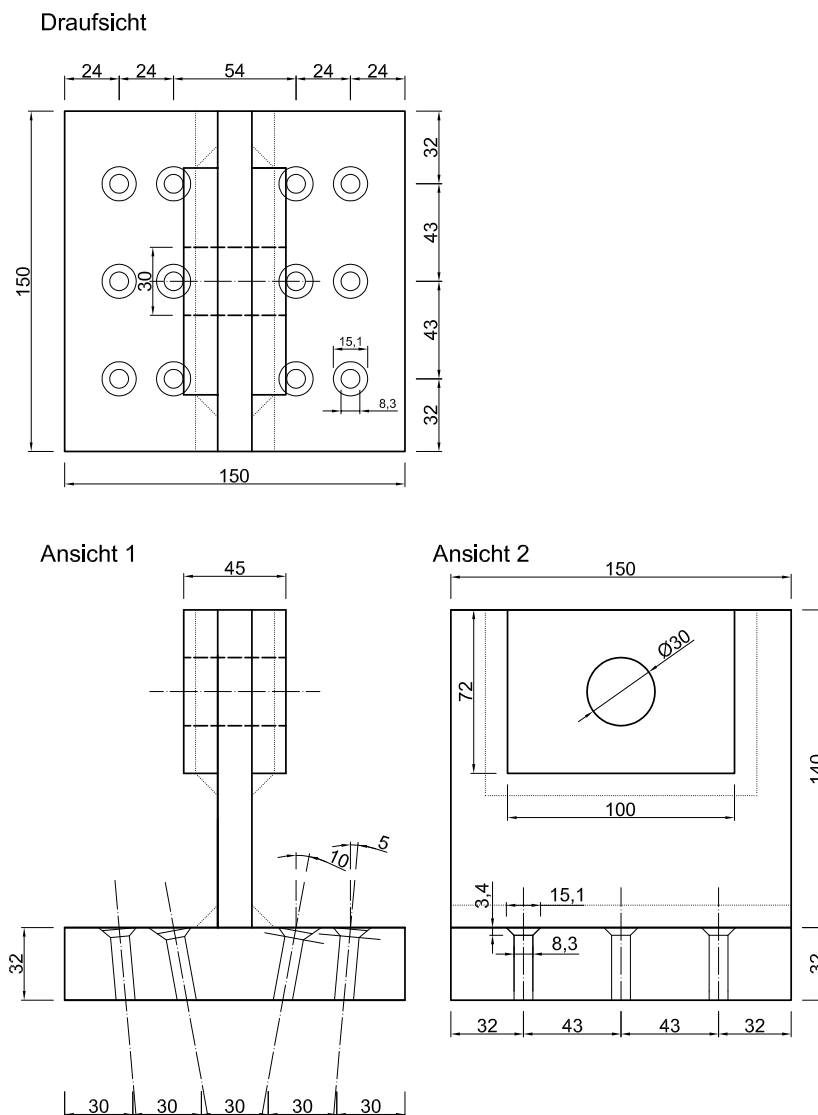


Abb. 1.4      Stahlwinkel für Kräfteinleitung für die Querszugfläche 150 x 150 mm

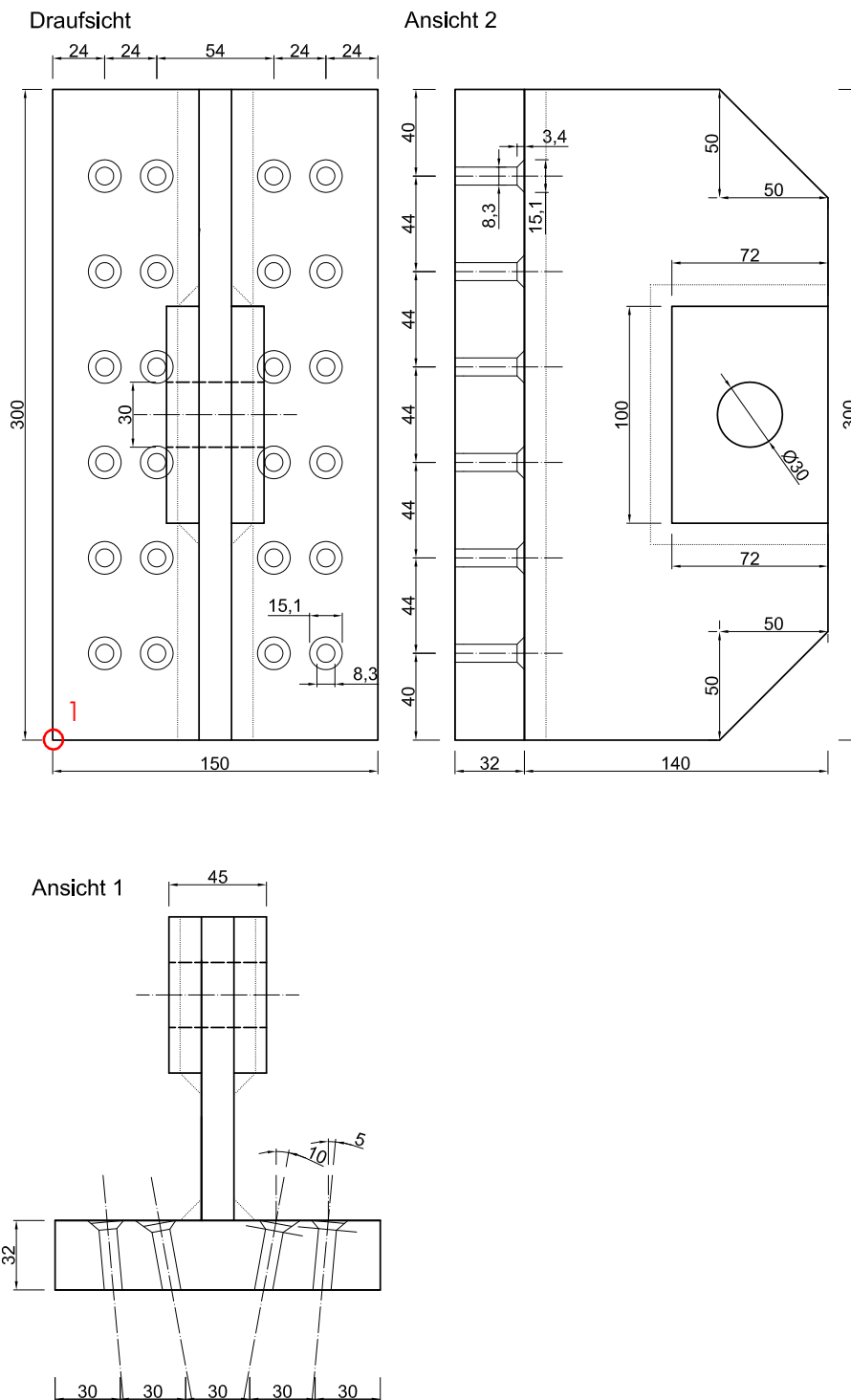


Abb. 1.5 Stahlwinkel für Kräfteinleitung für die Querszugfläche 150 x 300 mm

Das Lasteinleitungsholz ③ überträgt die Zugkraft über eine Verklebung auf den Querszug-Prüfkörper. Die Faserrichtung des Lasteinleitungsholzes verläuft parallel zur Richtung



der Zugkraft. Die Spitzen der eingesetzten Schrauben weisen einen Mindestabstand von 5 cm vom Prüfkörper auf.

Der Prüfkörper wird mit ④ bezeichnet. Die Zugkraft im Prüfkörper wirkt rechtwinklig zur Faserrichtung (siehe Abb. 1.6).

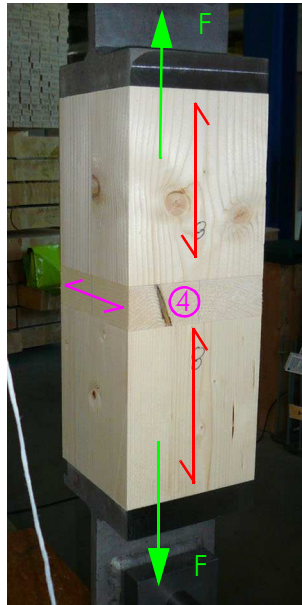


Abb. 1.6 Lasteinleitungsholz mit Prüfkörper

## 1. 3 Auswahl der Materialien

### 1. 3. 1 Verwendetes Holz für die Prüfkörper

Eines der Hauptziele der Diplomarbeit ist es die Querkzugfestigkeit von Brettschichtholz (BSH) zu untersuchen. Daher wurden als Versuchsmaterial Lamellen für die Herstellung von BSH GL 24h verwendet. Es wurden insgesamt 110 Lamellen von der Firma Hasslacher Drauland Holzindustrie, A-9751 Sachsenburg, mit folgenden Kennwerten verwendet:

- Sortierung laut Hersteller nach EN 13990
- Fichte: L25 nach EN 14081
- Verrechnungsmaß: 46 x 210 x 4000 mm
- Mindestrohichte ( $\rho_{12,mean}$ ) = 390 kg/m<sup>3</sup>
- Holzfeuchte (u) = 12%

- Hobelmaß bei Lieferung = 42,50 x 208,00 mm

Aus den 110 vorhandenen Lamellen wurden 24 Lamellen, siehe Abb. 1.7, für die Versuche ausgewählt. Es wurden jeweils 12 Lamellen mit einem Markabstand deutlich größer 80 mm (Seitenware) und jeweils 12 Lamellen mit einem Markabstand deutlich kleiner 80 mm (Mittelware) ausgewählt. Offensichtliche Kernware wurde aussortiert. Diese Vorsortierung erfolgte visuell und diente dem Zweck Versuchsgruppen für Seitenware und Mittelware zu bilden.

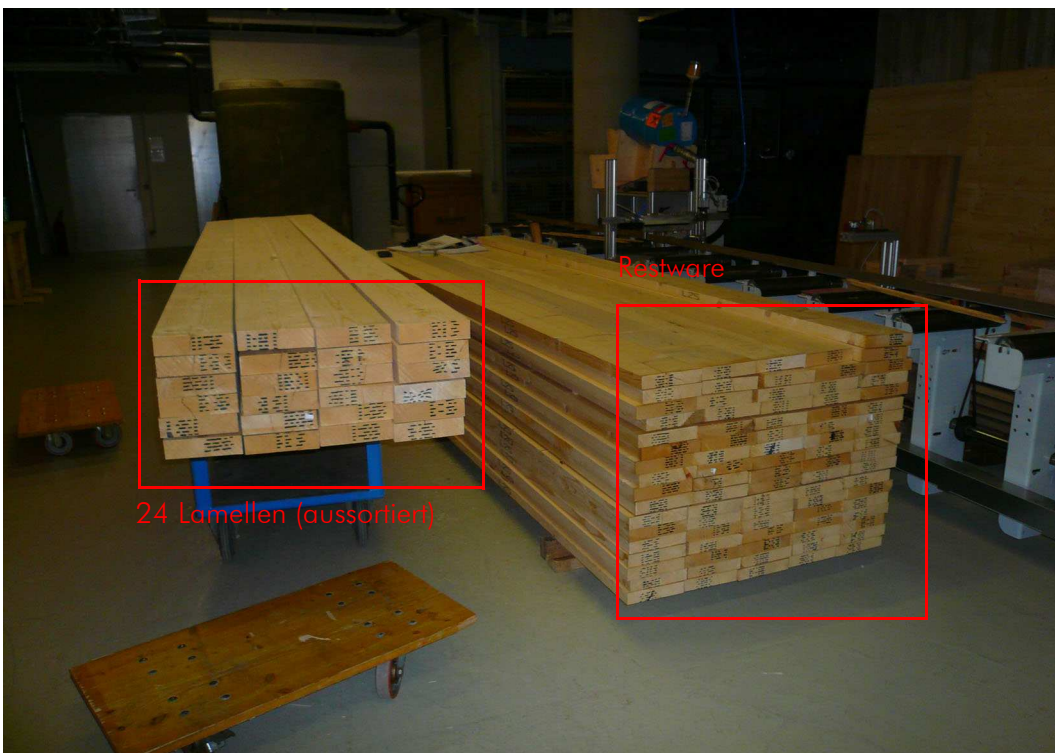


Abb. 1.7 Lamellenware

Die so aussortierten Lamellen wurden anschließend auf die erforderliche Breite zur Herstellung der Prüfkörper (ca. 160 mm) gesäumt. Wobei sich der „Kern“ ( $e \sim 0$  mm) nach dem Absäumen möglichst in der Brettmitte befinden sollte.

Anschließend wurde die Rohdichte, Holzfeuchte und der dynamische E-Modul der Lamellen ermittelt.

### Ermittlung der Rohdichte (global für die Einzellamelle)

Die Ermittlung der Rohdichte der Lamelle erfolgt über den Zusammenhang:

$$\rho = \frac{\text{Masse}}{\text{Volumen}}$$

Die Masse der Lamelle wurde mit einer elektronischen Waage mit einer Genauigkeit von 1 g gemessen, das Volumen ergibt sich über die Abmessungen der Lamelle.

Die Höhe und die Breite der Lamelle wurde mit einer Schiebelehre, mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,1$  mm an einer Stelle der Lamelle gemessen. Die Länge wurde mit einem Maßband auf  $\pm 1$  mm gemessen.

Zudem wurde die Rohdichte einer Feuchtekorrektur nach der ÖNORM EN 384:2004 unterzogen. Dabei wird die Rohdichte in Abhängigkeit von der Holzfeuchte, unter 12 % Holzfeuchte um 0,5 % je Holzfeuchteänderung erhöht, sonst um 0,5 % je Holzfeuchteabweichung verringert.

### Ermittlung der Holzfeuchte

Die Ermittlung der Holzfeuchte für die Lamellen erfolgte mit Hilfe des Holzfeuchtemessgerätes „Hydromette M 4050“ der Firma Gann (siehe Abb. 1.8).

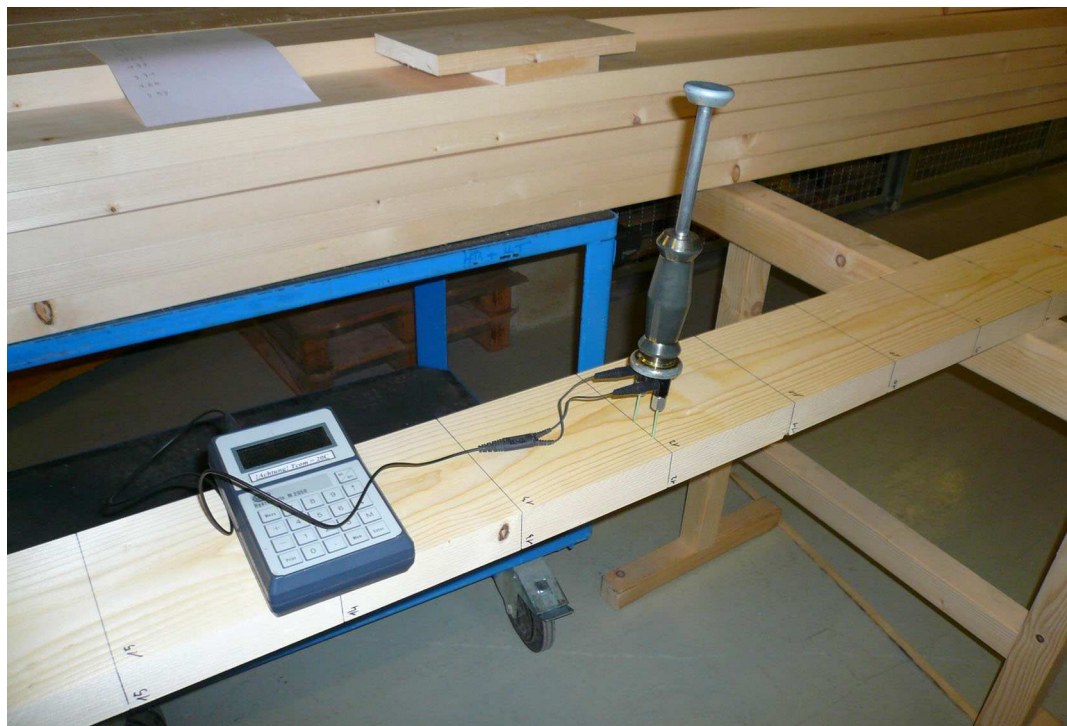


Abb. 1.8 Feuchtemessgerät Gann Hydromette M 4050

### Bestimmung des dyn. E-Moduls auf Basis einer Eigenschwingungsmessung

Die Erfassung der Eigenfrequenz erfolgte mit Hilfe eines an der holz.bau forschungs gmbh entwickelten Eigenschwingungsmesssystems (siehe Abb. 1.9). Dabei wird die Lamelle mit Hilfe eines Hammers in Längsschwingung versetzt. Die sich einstellende 1. Eigenfrequenz der Lamelle wird, mit Hilfe eines in die Lamelle geschraubten Beschleunigungsaufnehmers, erfasst.[25]

Aus der 1. Eigenfrequenz, der Länge und der Rohdichte der Lamelle wurde der dynamische E-Modul  $E_{\text{dyn,EF}}$  berechnet:

$$E_{\text{dyn,EF}} = v^2 \cdot \rho \cdot 10^{-6}$$

$$v = 2 \cdot L \cdot f \cdot 10^{-3}$$

wobei:

L .... Prüfkörperlänge [m]

$\rho$  .... Rohdichte [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

v .... Schallgeschwindigkeit bei Holzfeuchte u [m/s]

f .... erste Eigenfrequenz [Hz]

Die Umrechnung des dynamischen E-Moduls auf die Referenzfeuchte von 12% erfolgte nach einer am Institut für Holzbau und Holztechnologie entwickelten Formel:

$$E_{\text{dyn,EF,12}} = \frac{E_{\text{dyn,EF}}}{[1 - (0,00825 \cdot (u - 12))]}$$

mit:

u .... Holzfeuchte der Lamelle [%]



Abb. 1.9 Eigenschwingungsmessung

## Bestimmung der Astparameter, Faserabweichungen und Störungen

Zur Bestimmung der verschiedenen Astparameter, der Faserabweichungen und anderer Störungen wurden alle vier Längsseiten der Lamelle mit Hilfe des vom Joaneum Research entwickelten Brett-Scanners aufgenommen (siehe Abb. 1.10). Der Brett-Scanner befindet sich in Nutzung der holz.bau forschungs gmbh.



Abb. 1.10 Brett-Scanner

Ab diesem Zeitpunkt wurden die Lamellen bei Normalklima d.h. bei Raumtemperatur ( $20 \pm 2$ ) °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von ( $65 \pm 5$ )% in der Klimakammer gelagert. So wurde gewährleistet, dass sich eine für die Versuche optimale Holzfeuchtigkeit von 12% einstellt.

### 1. 3. 2 Verwendetes Holz für die Kraffteinleitung

Für das Kraffteinleitungsholz wurde ein am Institut für Holzbau und Holztechnologie lagerndes Balkenschichtholz mit folgenden Kennwerten verwendet:

- Rohdichte ( $\rho_{12,mean}$ ) = 450 kg/m<sup>3</sup>
- $u_{mean}$  = 11,7 %
- $E_{dyn,EF,12,mean}$  = 13000 N/mm<sup>2</sup>

- $E_{t,0,\text{mean}} = 12000 \text{ N/mm}^2$

Diese Kennwerte wurden aus dem Projekt „COMET 2.1.4 multigirder“ [25] entnommen.

### 1.3.3 Verwendete Schrauben für die Kraffteinleitung

Zur Kraffteinleitung wurden Schrauben mit folgender Bezeichnung verwendet:

- Holzbauschraube „Star Drive Vollgewinde“  
der Firma Schmid Schrauben Hainfeld GmbH  
Abmessungen: 8,0 x 160 mm  
Zulassungsnummer: Z-9. 1-656 vom 25.06.2007

Die Bemessung der Schrauben erfolgte dabei unter Annahme der maximal zu erwartenden Querkraft (Prüfkraft)  $F_{t,90,\text{max}}$ . Für die Berechnung von  $F_{t,90,\text{max}}$  wurde der Maximalwert der aus Versuchen von H.J. Blaß und M. Schmid ermittelten Querkzugfestigkeit als Grundlage herangezogen. Diese Versuche wurden mit Prüfkörpern mit einer Querkzugfläche von 45 x 70 mm und einem Volumen von 0,567 dm<sup>3</sup> durchgeführt. Der Maximalwert der Querkzugfestigkeit betrug innerhalb dieser Versuchsreihe  $f_{t,90,\text{max}} = 3,19 \text{ N/mm}^2$ .

Bezogen auf die Querkzugfläche von 150 x 150 mm ergibt sich eine  $F_{t,90,\text{max}}$  von 71,77 KN. Um ein Versagen der Schrauben auszuschließen wurde als ingenieurmäßiger Ansatz eine Sicherheit von 25% auf die  $F_{t,90,\text{max}}$  aufgeschlagen. Somit ergibt sich eine maximale Prüflast bei der Querkzugfläche von 150 x 150 mm von rund 90 KN. Die Bemessungslast pro Schraube ergibt sich aus:

$$F_{t,90,\text{max},1} = \frac{F_{t,90,\text{max}}}{n}$$

Anzahl der Schrauben  $n$ , bei der Querkzugfläche von 150 x 150 mm

$$n = 12$$

$$F_{t,90,\text{max},1} = 90 \text{ KN}/12 = 7,5 \text{ KN}$$

**Bemessung der Schrauben laut Zulassung:**- Nachweis der Zugtragfähigkeit

$$R_{t,u,k} = 23,0 \text{ KN}$$

$$\text{mit } \gamma_m = 1,0$$

$\gamma_m$  wurde 1,0 gesetzt, da es sich um Versuche handelt und die charakteristischen Werte herangezogen werden können.

$$R_{t,u,d} = \frac{R_{t,u,k}}{\gamma_m} = \frac{23}{1,0} = 18,4 \text{ KN}$$

$$F_{t,90,max} = 7,5 \text{ KN}$$

$$R_{t,u,d} > F_{t,90,max,1}$$

Nachweis erfüllt

- Nachweis des Ausziehwiderstandes

Gl 24h

$$\rho_k = 380 \text{ kg/m}^3$$

$$f_{1,90,k} = 80 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_k^2 = 11,55 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Annahme: } f_{1,0,k} = 0,65 \cdot f_{1,90,k} = 7,5 \text{ N/mm}^2$$

Diese Annahme stützt sich auf die CIB 42-7-1 [28] zur Tragfähigkeit von Schrauben in Faserrichtung. Die Schrauben wurden unter einem Winkel von 5° bzw. 10° gegenüber der Faserrichtung in das Lasteinleitungsholz eingeschraubt. Die Versuchsergebnisse der CIB 42-7-1 beziehen sich auf einen Einschraubwinkel von 0°. Da es keine Kennwerte für Einschraubwinkel von 0° bis 45° gibt wurde die Versuchsergebnisse der CIB 42-78-1 von 0° für die Berechnung herangezogen.

$$\text{mit } \gamma_m = 1,0$$

$$f_{1,0,d} = f_{1,0,k} = 7,5 \text{ N/mm}^2$$

$$R_{ax,d} = f_{1,0,d} \cdot l_{ef} \times d$$

$$\text{mit } l_{ef} = 128 \text{ mm}$$

$$\text{und } d = 8 \text{ mm}$$

$$R_{ax,d} = 7,68 \text{ KN}$$

$$F_{t,90,max} = 7,5 \text{ KN}$$

$$R_{ax,d} > F_{t,90,max,1}$$

$$\frac{R_{ax,d}}{F_{t,90,max,1}} = 1,024$$

Nachweis nicht erfüllt

Da es sich bei  $F_{t,90,max,1}$  um einen Maximalwert handelt ist eine Überschreitung von 2,4% vertretbar, da bereits eine Sicherheit von 25% für  $F_{t,90,max,1}$  berücksichtigt wurde. Es ist während der Versuche weder zu einem Schraubenversagen noch zu einem Ausziehversagen gekommen.



## 2 Versuchsdurchführung

### 2.1 Herstellung der Prüfkörper

#### 2.1.1 Prüfkörperbezeichnung

Es wurden je 12 Lamellen Seitenware und je 12 Lamellen Mittelware entnommen, diese wurden in je 6 Lamellen für die Querkzugfläche von 150 x 150 mm und je 6 Lamellen für die Querkzugfläche 150 x 300 mm aus den Gruppen für die Mittelware und die Seitenware eingeteilt.

Für die Querkzugfläche von 150 x 150 mm ergeben sich somit, nach dem Auftrennen der Lamelle in 150 mm Abschnitte, 24 Einzelteile und für die Grundfläche 150 x 300 je 12 Einzelteile von 300 mm Länge.

Die Lamellenbezeichnung erfolgt aufsteigend:

- 6 Lamellen Seitenware der Querkzugfläche 150 x 150 mm = 22500 mm<sup>2</sup>,  
V = 0,9 dm<sup>3</sup> + V = 2,7 dm<sup>3</sup> + V = 5,4 dm<sup>3</sup>  
Lamellenbezeichnung: 1001-1006
- 6 Lamellen Seitenware der Querkzugfläche 150 x 300 mm = 45000 mm<sup>2</sup>,  
V = 1,8 dm<sup>3</sup>  
Lamellenbezeichnung: 1007-1012
- 6 Lamellen Mittelware der Querkzugfläche 150 x 150 mm = 22500 mm<sup>2</sup>,  
V = 0,9 dm<sup>3</sup> + V = 2,7 dm<sup>3</sup> + V = 5,4 dm<sup>3</sup>  
Lamellenbezeichnung: 1013-1018
- 6 Lamellen Mittelware der Querkzugfläche 150 x 300 mm = 45000 mm<sup>2</sup>,  
V = 1,8 dm<sup>3</sup>  
Lamellenbezeichnung: 1019-1024

Innerhalb einer Lamelle:

Für die Querkzugfläche 150 x 150 mm wurde nur jeder zweite Abschnitt (gerade Bezeichnung) der Lamelle als Einzelprüfkörper verwendet, beginnend mit dem Abschnitt 2. Die restlichen 12 Abschnitte (ungerade Bezeichnung) wurden zu 2 BSH-Prüfkörpern mit je 3 Abschnitten und einem BSH-Prüfkörper mit je 6 Abschnitten verarbeitet (siehe Abb. 2.1).

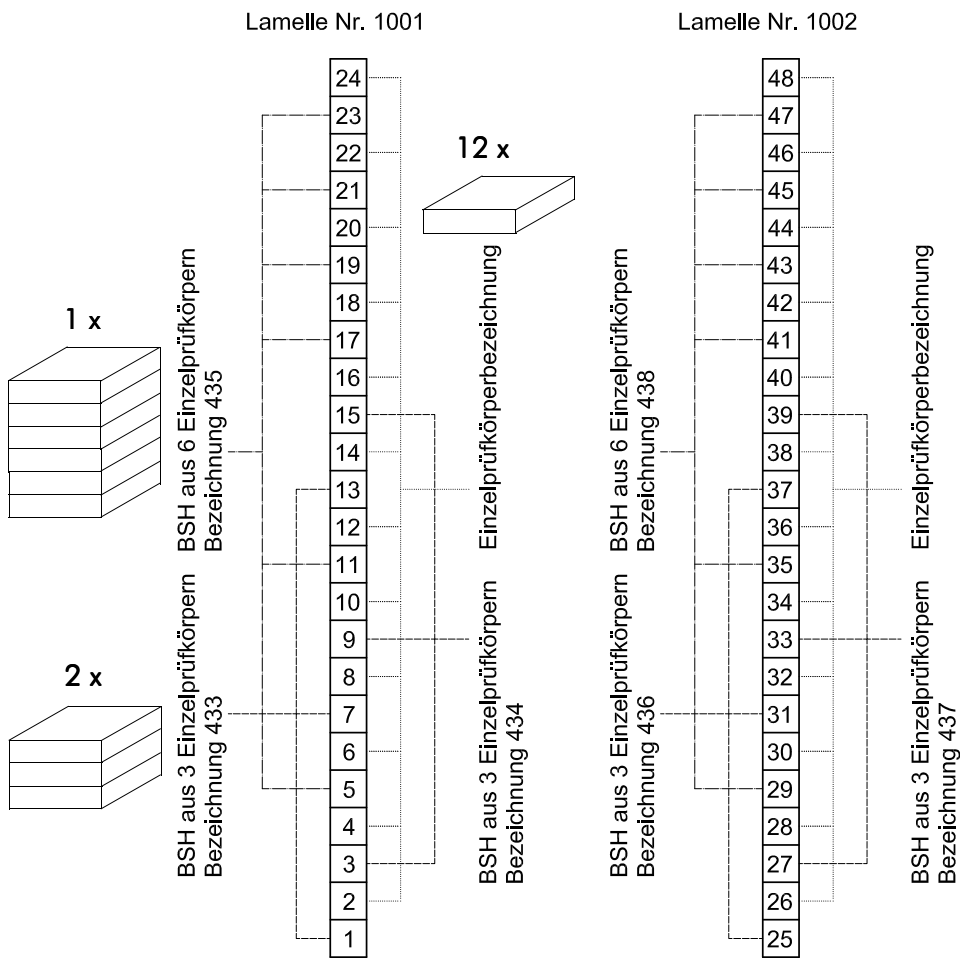


Abb. 2.1 Prüfkörperbezeichnung der Querszugsfläche 150 x 150 mm

Für die Querszugfläche 150 x 300 wurde die Einzellamelle in 12 Einzelprüfkörper unterteilt und mit aufsteigender Nummerierung bezeichnet (siehe Abb. 2.2).

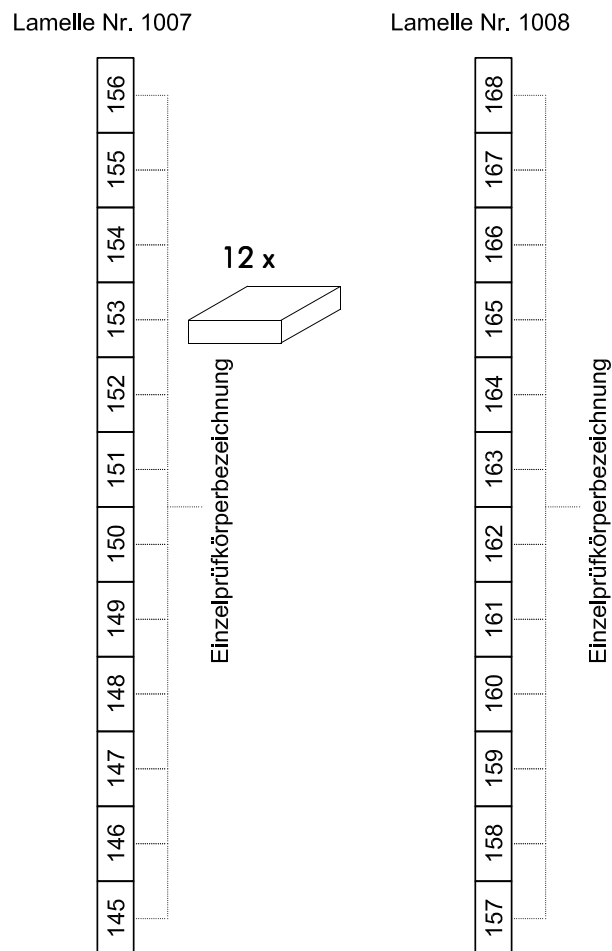


Abb. 2.2 Prüfkörperbezeichnung der Querszugfläche 150 x 300 mm

Somit ergeben sich insgesamt 432 Abschnitte (Einzelprüfkörper). Die BSH-Prüfkörper wurden nach ihrer Herstellung ab der Nummer 432 wiederum aufsteigend benannt. Daraus ergibt sich folgende Prüfkörperbezeichnung:

Seitenware mit der Querszugfläche 150 x 150 mm aus 1 Einzelprüfkörper:

- Prüfkörperbezeichnung: 2, 4, 6, ..., 144 (jeweils gerade)
- $A = 22500 \text{ mm}^2, V = 0,9 \text{ dm}^3$
- Anzahl Prüfkörper: 72

Setenware mit der Querszugfläche 150 x 300 mm aus 1 Einzelprüfkörper:

- Prüfkörperbezeichnung: 145, 146, 147,..., 216  
 $A = 45000 \text{ mm}^2$ ,  $V = 1,8 \text{ dm}^3$   
Anzahl Prüfkörper: 72

Mittelware mit der Querschnittsfläche  $150 \times 150 \text{ mm}$  aus 1 Einzelprüfkörper:

- Prüfkörperbezeichnung: 218, 220, 222,..., 360 (jeweils gerade)  
 $A = 22500 \text{ mm}^2$ ,  $V = 0,9 \text{ dm}^3$  (  
Anzahl Prüfkörper: 72

Mittelware mit der Querschnittsfläche  $150 \times 300 \text{ mm}$  aus 1 Einzelprüfkörper:

- Prüfkörperbezeichnung: 361, 362, 363,..., 432  
 $A = 45000 \text{ mm}^2$ ,  $V = 1,8 \text{ dm}^3$   
Anzahl Prüfkörper: 72

Seitenware mit der Querschnittsfläche  $150 \times 150 \text{ mm}$  aus 3 Einzelprüfkörper (BSH):

- Prüfkörperbezeichnung: 433; 434; 436; 437; 439; 440; 442; 443; 445;  
446; 448, 449  
 $A = 22500 \text{ mm}^2$ ,  $V = 2,7 \text{ dm}^3$   
Anzahl Prüfkörper: 12

Mittelware mit der Querschnittsfläche  $150 \times 150 \text{ mm}$  aus 3 Einzelprüfkörper (BSH):

- Prüfkörperbezeichnung: 451, 452; 454; 455; 457; 458; 460; 461; 463;  
464; 466; 467  
 $A = 22500 \text{ mm}^2$ ,  $V = 2,7 \text{ dm}^3$   
Anzahl Prüfkörper: 12

Seitenware mit der Querschnittsfläche  $150 \times 150 \text{ mm}$  aus 6 Einzelprüfkörper (BSH):

- Prüfkörperbezeichnung: 435; 438; 441; 444; 447; 450;  
 $A = 22500 \text{ mm}^2$ ,  $V = 5,4 \text{ dm}^3$   
Anzahl Prüfkörper: 6

Mittelware mit der Querschnittsfläche  $150 \times 150 \text{ mm}$  aus 6 Einzelprüfkörper (BSH):

- Prüfkörperbezeichnung: 453; 456; 459; 462; 465; 468  
 $A = 22500 \text{ mm}^2$ ,  $V = 5,4 \text{ dm}^3$   
Anzahl Prüfkörper: 6

Insgesamt ergeben sich somit: 324 Prüfkörper

## 2. 1. 2 Prüfkörperherstellung

Aus den 24 aussortierten und in der Breite gesäumten Lamellen mit einer durchschnittlichen Länge von 403 cm wurden jeweils 12 Abschnitte zu je 33 cm Länge hergestellt. Aus herstellungstechnischen Gründen war es nicht möglich die für die Querszugfläche von 150 x 150 mm benötigte Länge von ca. 16 cm im ersten Bearbeitungsschritt herzustellen.

### Ermittlung der Rohdichte, des Markabstandes und der mittleren Jahringbreite

Die so erhaltenen Abschnitte (insgesamt 288) wurden mit der Stirnseite auf einem Flachbett-Scanner eingescannt (siehe Abb. 2.3) und mit Hilfe einer am Institut für Holzbau und Holztechnologie entwickelten Software der Markabstand und die mittlere Jahringbreite jedes Abschnittes ermittelt.

Weiters wurden von den Abschnitten die Querschnitts-Abmessungen mit einer Schiebelehre (mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,1$  mm) an einer Stelle gemessen. Die Ermittlung der Masse erfolgte mit einer elektronischen Waage mit einer Genauigkeit von 0,01 g. Die Berechnung der Rohdichte (lokal für den Einzelprüfkörper) erfolgte nach dem bekannten Zusammenhang aus Kapitel 1. 3. 1.

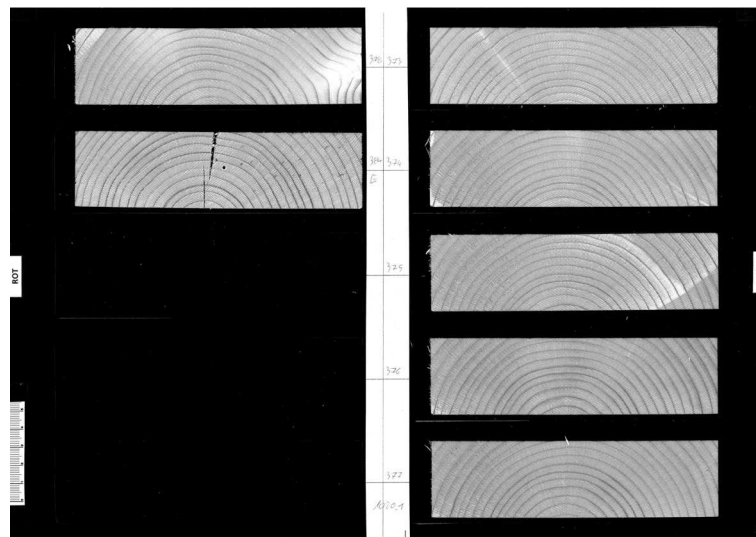


Abb. 2.3 Scan der Stirnseiten

### Vorbereitung der Prüfkörper

Nach Ermittlung dieser Parameter wurden die einzelnen Abschnitte auf die erforderliche Höhe von 4 cm zurechtgehobelt. Nach dem Hobeln konnten die Abschnitte für die Prüf-

körper mit der Querschnittsfläche 150 x 150 mm auf die für deren Herstellung erforderliche Länge von 160 mm aufgetrennt werden.

Die Lasteinleitungshölzer aus Balkenschichtholz wurden auf die erforderlichen Abmessungen, der Breite von 160 mm, der Höhe von 180 mm und der Länge von 330 mm, zurechtgeschnitten

## Verklebung

Die Verklebung erfolgte gemäß Herstellerangaben immer unmittelbar nach dem Hobeln. Es kamen dabei einkomponentige, feuchtigkeitsvernetzende Polyuretan-Schmelzklebstoffe der Hersteller Jowat [25] und Purbond [26] zum Einsatz (siehe Abb. 2.4).

Der Pressdruck während der Verklebung betrug  $0,6 \text{ N/mm}^2$ .

Die Presszeit betrug mindestens 3 Stunden. Beide Parameter für die Verklebung liegen über den von den Herstellern geforderten.

## Herstellung der Prüfkörper

Nach dem Aushärten des jeweiligen Klebers wurden die Prüfkörper mit Hilfe der Kreissäge und der Abrichthobelmaschine auf die gewünschten Abmessungen 150 x 150 mm und 150 x 300 mm abgerichtet.

Die Lagerung der Prüfkörper erfolgte ab diesem Zeitpunkt bis zur Prüfung in der Klimakammer bei Normalklima (Luftfeuchtigkeit 65%; Temperatur  $20^\circ\text{C}$ )



Abb. 2.4 Verklebung der Prüfkörper mit einer Querschnittsfläche von 150 x 150 mm, jeweils 2 Prüfkörper gemeinsam verklebt

## 2. 2 Versuche

### 2. 2. 1 Allgemeines

Die Versuche fanden auf der in Kapitel 1. 1 beschriebenen Universalprüfmaschine statt.

### 2. 2. 2 Verschraubung

Das Verschrauben der Prüfkörper mit den Stahlwinkel erfolgte mit Hilfe eines Schraubbohrers. Um eine parallelen Ausrichtung der Stahlwinkel zu gewährleisten, wurden diese mit einer Einbauhilfen gesichert (siehe Abb. 2.5). Jede Schraube wurde zusätzlich mit einem Momentenschlüssel mit einem Anziehmoment von 20 Nm angezogen, um eine gleichmäßige Belastung der Schrauben zu gewährleisten. Insgesamt wurden 11.232 Schrauben eingeschraubt.

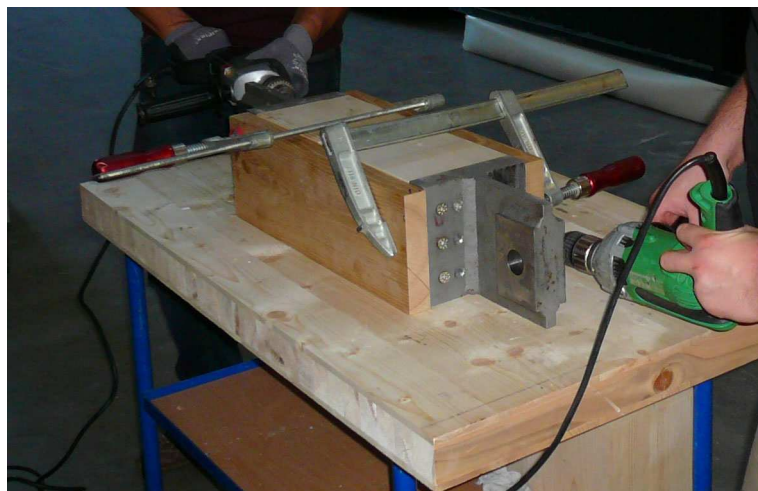


Abb. 2.5 Verschraubung der Stahlwinkel

### 2. 2. 3 Messtechnik zur Bestimmung von $E_{t,90}$

Zur Bestimmung des Querkzug-E-Modules wurden Dehnungsaufnehmer mit der Bezeichnung DD1 der Firma HBM, mit einer Messauflösung von 0,001 mm, verwendet. Die Messrate betrug 5 Hz.

Diese wurden bei den Einzelprüfkörpern mit der Querkzugfläche 150 x 150 mm in der Mitte der vier Seitenflächen direkt am Prüfkörper aufgesetzt (siehe Abb. 2.6).

Bei den BSH-Prüfkörpern bestehend aus 3 bzw. 6 Einzelprüfkörpern, wurden zusätzlich 4 Dehnungsaufnehmer über die gesamte Höhe mit einer Messbasis  $h_{0,2}$  von 115 mm bzw. 230 mm montiert (siehe Abb. 2.6).

Bei den Einzelprüfkörpern mit einer Querkzugfläche von 150 x 300 wurden insgesamt 6 Dehnungsaufnehmer montiert, pro Stirnseite einer und pro Seitenfläche zwei in einem Abstand von 75 mm vom Rand.

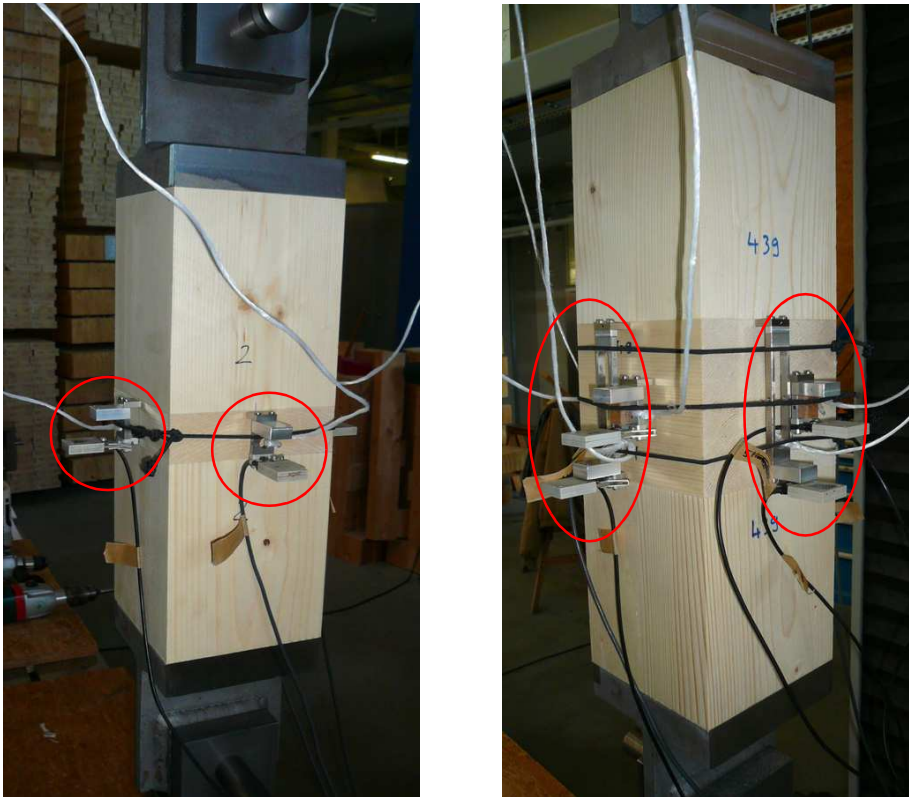


Abb. 2.6 DD1 Dehnungsaufnehmer am Einzelprüfkörper und am BSH-Prüfkörper

Die Querschnittshöhen und Messbasen sind in Tab. 2.1 dargestellt.

| Anzahl Einzelprüfkörper | Querschnittshöhe $h$ [mm] | 1. Messbasis $h_{0,1}$ [mm] | 2. Messbasis $h_{0,2}$ [mm] |
|-------------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 1                       | 40                        | 35                          | -                           |
| 3 (BSH)                 | 120                       | 35                          | 115                         |
| 6 (BSH)                 | 240                       | 35                          | 230                         |

Tab. 2.1 Querschnittshöhen und Messbasen

#### 2. 2. 4 Versuchsablauf

Der Prüfkörper wurde in die Prüfmaschine eingebaut und die Dehnungsaufnehmer wurden angebracht. Die Versuche wurde weggesteuert durchgeführt, die Versuchsgeschwindigkeit  $v_{\text{Test}}$  betrug dabei  $0,4\text{mm/min}$ , um die in der EN 408:2009 geforderte Prüfzeit von  $300 \pm 120$  Sekunden einhalten zu können.

Die Dehnungsaufnehmer wurden bei einer vorher definierten Prüfkraft von 20 kN abgenommen. Zu diesem Zweck wurde der Versuch für 10 s angehalten (siehe Abb. 2.7). Danach wurde der Versuch bis zum Versagen des Prüfkörpers fortgesetzt.



Als Ergebnis der Versuche konnte die Querkzugfestigkeit  $f_{t,90}$  und der Querkzug-E-Modul  $E_{t,90}$  der Prüfkörper berechnet werden.

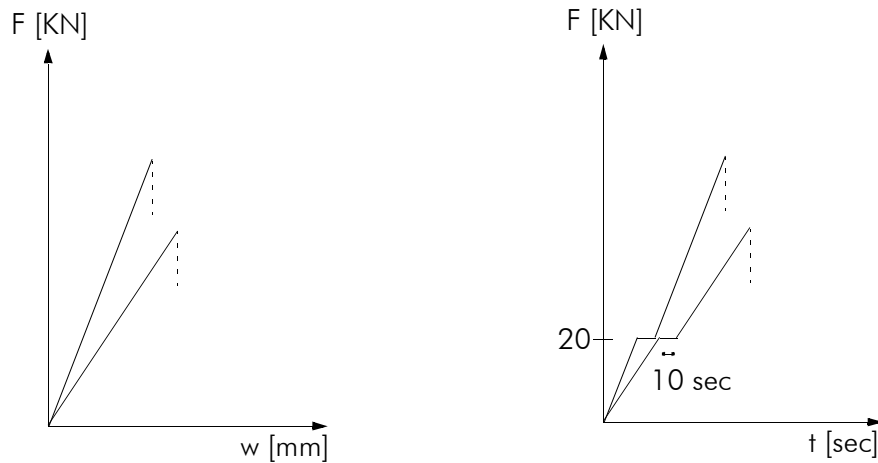


Abb. 2.7 Kraft-Wegdiagramm (links) und Kraft-Zeitdiagramm (rechts)

### 2. 2. 5 Feuchtegehalt der Prüfkörper

Der Feuchtegehalt  $u$  als Massenanteil Wasser in Prozent der Holzmasse wurde gemäß ÖNORM 13183-1 berechnet:

$$u = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \cdot 100$$

wobei  $u$ ..... der Feuchtegehalt [%]

$m_1$  ..... die Masse des Prüfkörpers vor dem Trocknen [g] und

$m_0$  ..... die Masse des Prüfkörpers im darrtrockenen Zustand [g] ist.

## 3 Versuchsauswertung

### 3.1 Parameterbestimmung

#### 3.1.1 Querzug E-Module $E_{t,90}$

Grundlage der Versuchsauswertung ist die EN 408:2009.

Der Querzug E-Module  $E_{t,90}$  der einzelnen Prüfkörper wurde mit:

$$\sigma = E_{t,90} \cdot \varepsilon$$

$$\frac{\Delta F}{b \cdot l} = E_{t,90} \cdot \frac{\Delta h}{h_0}$$

daraus folgt:

$$E_{t,90} = \frac{\Delta F \cdot h_0}{\Delta h \cdot b \cdot l} \quad 3.1$$

Die Ermittlung der E-Module erfolgte insofern abweichend der Norm, da es aufgrund des spröden Verhaltens der Prüfkörper nicht möglich war die Grenzen von 0,1 bis 0,4 der maximal zu erwartenden Prüfkraft einzuhalten. Stattdessen wurden ein linearer Bereich der Arbeitslinie gewählt, mit einem linearen Korrelationsmaß von  $R = 0,99$ .

Die so ermittelten E-Module weisen in Abweichung zur Literatur einen niedrigeren E-Modul in der Mitte des Prüfkörper  $E_R$  und einen höheren E-Modul an der Seite des Prüfkörpers  $E_T$  auf.

Konstante Dehnung über den gesamten Querschnitt wurde vorausgesetzt, für die exakte Spannungsverteilung innerhalb der Brettbreite muss ein FE-Modell generiert werden, wie Dill-Langer es in Abschnitt 1. 2. 3 in Abb. 1.15 mit folgende Kennwerten:  $E_r = 1200 \text{ N/mm}^2$  und für  $E_t = 800 \text{ N/mm}^2$  generierte. Daraus ergibt sich eine nicht konstante Spannungsverteilung über die Querschnittsbreite, daraus folgt, dass die E-Module angepasst werden müssen. Nimmt man diese FE-Berechnung zur Grundlage, so lassen sich die E-Module qualitativ an jene von Dill-Langer angleichen.

#### 3.1.2 Querzugfestigkeit $f_{t,90}$

Die mittlere Querzugfestigkeit über den Querschnitt der einzelnen Prüfkörper wurde mit

$$f_{t,90} = \frac{F_{t,90,max}}{A} \quad 3.2$$

ermittelt.

## 3.2 Datenerfassung

Alle gesammelten Daten wurden in eine Excel-Tabelle eingetragen, anschließend wurden sie in das Programm „R“ [27] zur statistischen Weiterverarbeitung übertragen.

Die Tabelle beinhaltet:

- Einzelprüfkörperbezeichnung
- Anzahl der Einzelprüfkörper
- Prüfkörperbezeichnung
- bruchauslösender Einzelprüfkörper (Einzelprüfkörper der bei den BSH-Prüfkörpern den Bruch auslöste)
- Höhe, Breite, Länge des Prüfkörpers
- Grundfläche des Prüfkörpers
- Volumen des Prüfkörpers
- Rohdichte des Prüfkörpers;  $\rho_{12}$
- dynamischer E-Modul;  $E_{dyn,EF,12}$
- Feuchtegehalt der Prüfkörper;  $u$
- die Querkzug-E-Module
- Querkzugfestigkeit;  $f_{t,90}$
- Nennvolumen des Prüfkörpers
- Nenngrundfläche des Prüfkörpers
- Lamellennummer
- lamelleninterne Nummerierung
- Lamellenware
- Bruch (ja/nein)
- Trocknungsrisse auf der Stirnseite (ja/nein)
- Harz (ja/nein)
- Ast (ja/nein)
- Mark (ja/nein)

- Harzlage
- Harzfläche in Prozent der Prüffläche
- Harzflächenverhältnis
- Grundfläche harzbereinigt
- mittlere Jahrringbreite; JRB
- Markabstand; MA

die folgenden Astparameter:

- KAR; knot area ratio
- TKAR; tensile knot area ratio
- DAB; DIN-Astansammlung bei Brettern, Pfosten und Latten
- DEK; DIN-Einzelastkriterium für das Kantholz und für vorwiegend hochkant beanspruchte Bretter
- DEB; DIN-Einzelastkriterium für Bretter, Pfosten und Latten
- Astdichte; die Astdichte ist definiert als Verhältnis aller Astflächen an der Oberfläche aller vier Seitenflächen des definierten Brettabschnittes bezogen auf die gesamte Brettabschnittsoberfläche
- WRatio; ist definiert als Verhältnis  $d_{y,max}$  der Breitseitenäste an der Stelle x zur Brettbreite b
- NRatio; ist definiert als Verhältnis  $d_{y,max}$  der Schmalseitenäste an der Stelle x zur Bretthöhe h
- NSK; Schmalseitenastkriterium
- SMF; ist definiert als die Summe der Trägheitsmomente der Äste in der Querschnittsfläche, bezogen auf das Trägheitsmoment des Brettquerschnittes
- maximaler Astdurchmesser
- Verhältnis Gesamtastfläche zu Gesamtmantelfläche (der 4 Seiten)
- Verhältnis Astfläche 1 (der Seite 1) zu Mantelfläche 1 (der Seite 1)
- Verhältnis Astfläche 2 zu Mantelfläche 2
- Verhältnis Astfläche 3 zu Mantelfläche 3
- Verhältnis Astfläche 4 zu Mantelfläche 4
- Verhältnis verwachsener Astfläche 1 zu Mantelfläche 1

- Verhältnis verwachsener Astfläche 2 zu Mantelfläche 2
- Verhältnis verwachsener Astfläche 3 zu Mantelfläche 3
- Verhältnis verwachsener Astfläche 4 zu Mantelfläche 4
- Verhältnis nicht verwachsener Astfläche 1 zu Mantelfläche 1
- Verhältnis nicht verwachsener Astfläche 2 zu Mantelfläche 2
- Verhältnis nicht verwachsener Astfläche 3 zu Mantelfläche 3
- Verhältnis nicht verwachsener Astfläche 4 zu Mantelfläche 4

### 3.3 Auswertung

Da in der Regel bisherige Versuche zum Thema Querkzugfestigkeit am fehlerfreien Holz durchgeführt wurden und somit der Einfluss von Ästen, Harz und Störungen wie Trocknungsrisse und Mark nicht im Detail untersucht wurden, werden sämtliche Parameter die in diesen Zusammenhang stehen hinsichtlich ihres Einflusses auf die Querkzugfestigkeit untersucht.

#### 3.3.1 Quantile-Quantile-Plot (Q-Q-Plot)

Um einen Überblick über die Verteilung der Querkzugfestigkeit zu erhalten wurden Q-Q-Plots für verschiedene Verteilungsfunktionen verglichen. Dabei wurden die Prüfkörper aufgrund des zu erwarteten Volumeneinflusses in 3 Gruppen eingeteilt:

- sämtliche Prüfkörper (alle Volumina):  $P_{ges}$   
Anzahl  $n = 324$
- Prüfkörper mit einem Volumen von  $0,9 \text{ dm}^3$ :  $P_{0,9}$   
 $n = 144$
- Prüfkörper mit einem Volumen von  $1,8 \text{ dm}^3$ :  $P_{1,8}$   
 $n = 144$

Auf die gesonderte Gruppeneinteilung der BSH-Prüfkörper wurde in einer ersten Betrachtung verzichtet, da ihre Anzahl ( $n = 36$ ) für statistische Aussagen hoher Qualität nicht ausreicht.

Es wurden Quantile-Quantile-Plots für 3 Verteilungen durchgeführt:

- Normalverteilung
- logarithmische Normalverteilung
- Weibull-Verteilung

Gruppe  $P_{ges}$  : alle Einzelprüfkörper:

Volumen  $0,9 \text{ dm}^3$  (Querszugfläche  $150 \times 150 \text{ mm}$ ) und  $1,8 \text{ dm}^3$  (Querszugfläche  $150 \times 300 \text{ mm}$ );  $n = 324$

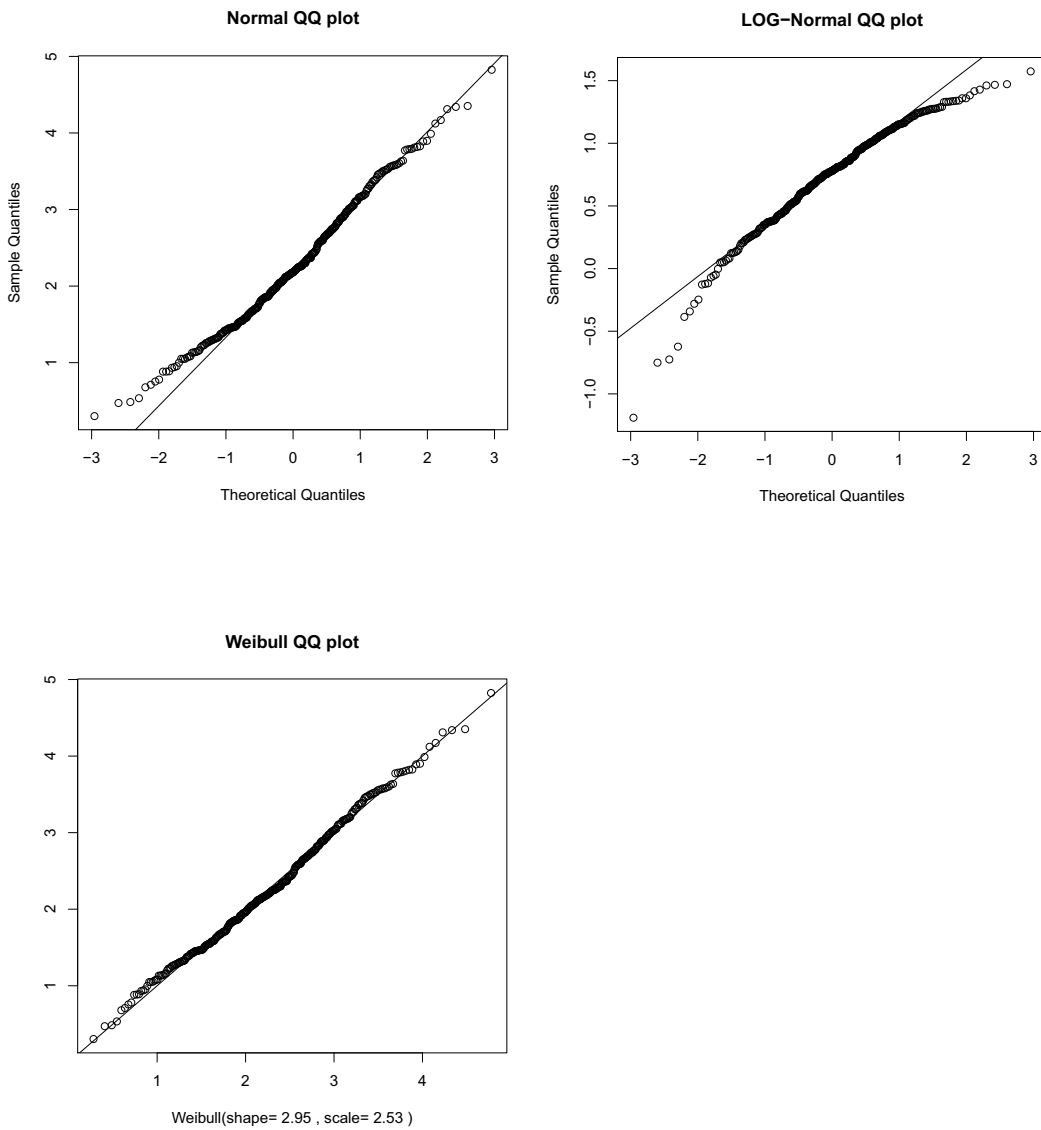


Abb. 3.1 Q-Q-Plots der Gruppe  $P_{ges}$

Gruppe  $P_{0,9}$  : Einzelprüfkörper:

Volumen  $0,9 \text{ dm}^3$  (Querschnittsfläche  $150 \times 150 \text{ mm}$ );  $n = 144$

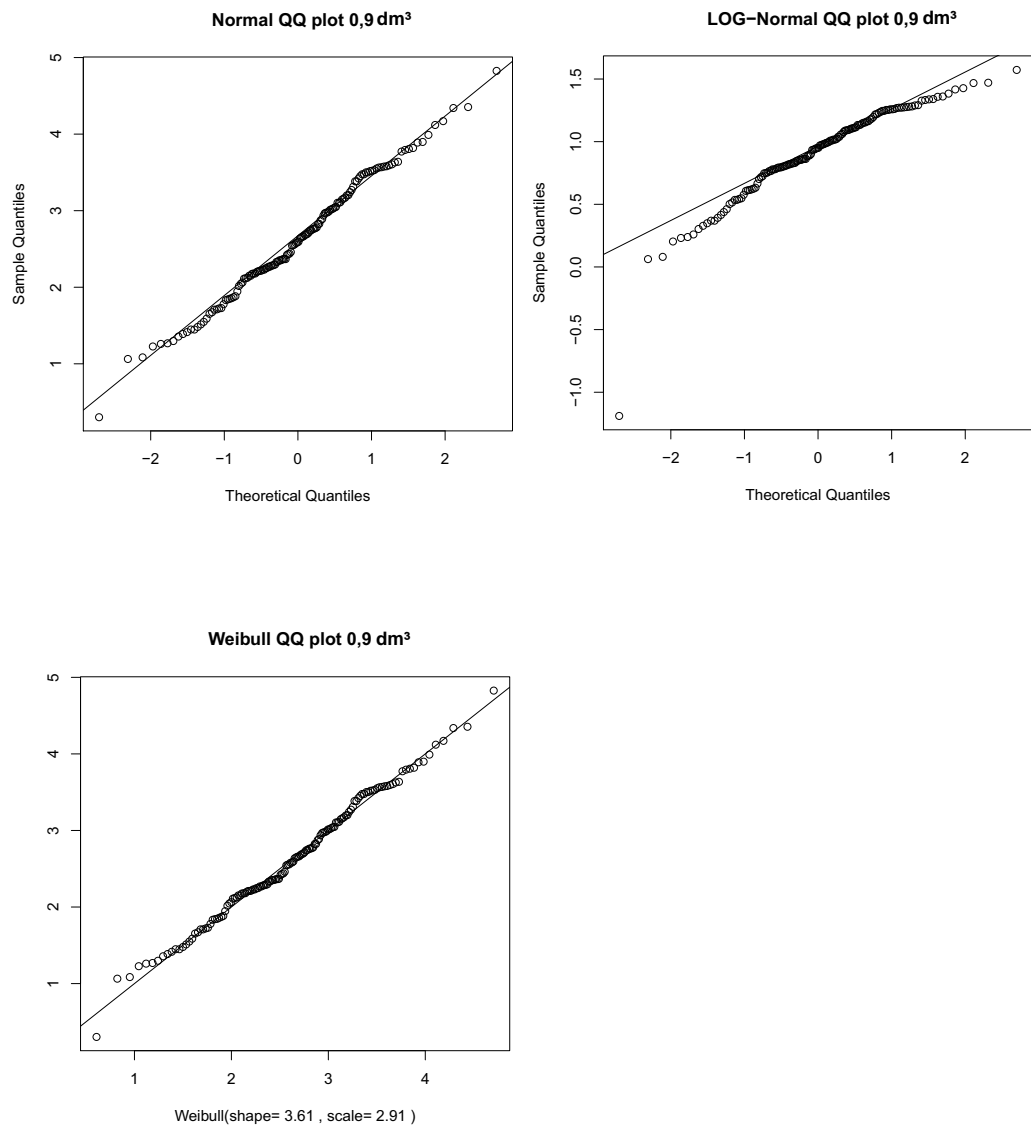


Abb. 3.2 Q-Q-Plots der Gruppe  $P_{0,9}$

Gruppe P<sub>1,8</sub> : Einzelprüfkörper:

Volumen 1,8 dm<sup>3</sup> (Querszugfläche 150 x 300 mm); n = 144

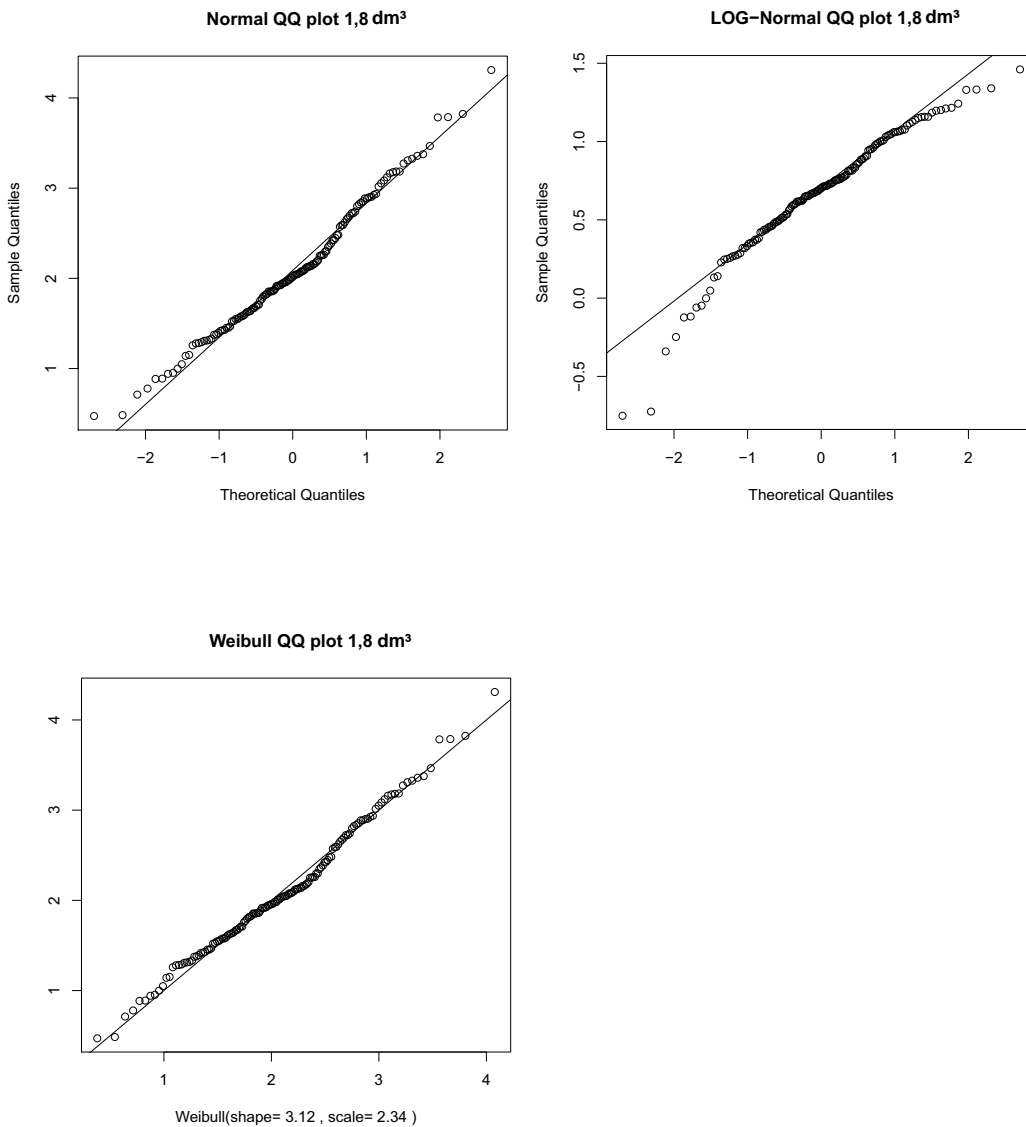


Abb. 3.3 Q-Q-Plots der Gruppe P<sub>1,8</sub>

Aus den Q-Q-Plots geht hervor, dass die Querszugfestigkeit durch die Weibullverteilung am Besten beschrieben wird. Dies bestätigt die Weibull-Theorie, die sprödes Verhalten voraussetzt. Auch die Normalverteilung bildet die Querszugfestigkeit gut ab. Die Q-Q-Plots können die Verteilungen nur qualitativ abbilden. Der JCSS 2006 empfiehlt eine Weibullverteilung bei Querszugfestigkeit. Diese Annahme wurde durch die gezeigten Q-Q-Plots bestätigt.



### 3. 3. 2 Parameteruntersuchung

#### Allgemeines

Parameter, die eine offensichtliche Verminderung der Querkzugfestigkeit hervorriefen:

- Harz
- Trocknungsrisse an den Stirnseiten
- Mark

Diese Parameter wurden anhand von Boxplots gesondert betrachtet um zu beurteilen ob diese betroffenen Prüfkörper aus dem Datensatz ausgeschieden werden müssen oder belassen werden können.

Der Parameter „Ast“ wurde ebenfalls in die Untersuchung miteingeschlossen, da dessen Einfluss auf die Querkzugfestigkeit noch völlig unbekannt ist. Die Untersuchungen erfolgten mit den selben Gruppen wie in Abschnitt 3. 3. 1

#### Parameter Trocknungsrisse

Trocknungsrisse (siehe Abb. 3.4) traten an den Stirnseiten der Lamellen auf. Prüfkörper die aus dem Inneren der Lamelle hergestellt wurden, wiesen keine Trocknungsrisse auf. In den Boxplots wird zudem der Unterschied in Prozent zwischen den Medianen der Querkzugfestigkeiten der Gruppe mit und der Gruppe ohne Trocknungsrisse dargestellt (siehe Abb. 3.5).

Aufgrund des Abfalls der Querkzugfestigkeit von ca. 50% wurden Prüfkörper mit Trocknungsrisse in der weiteren Auswertung nicht berücksichtigt.

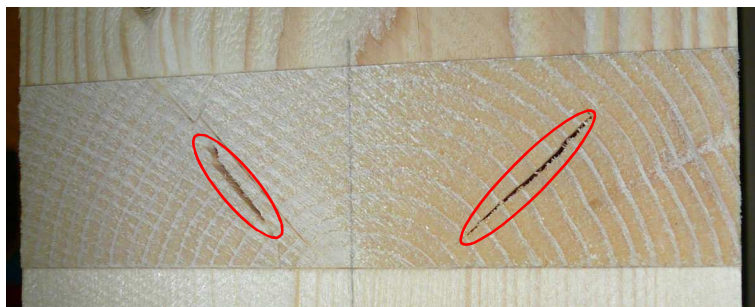


Abb. 3.4 Trocknungsrisse

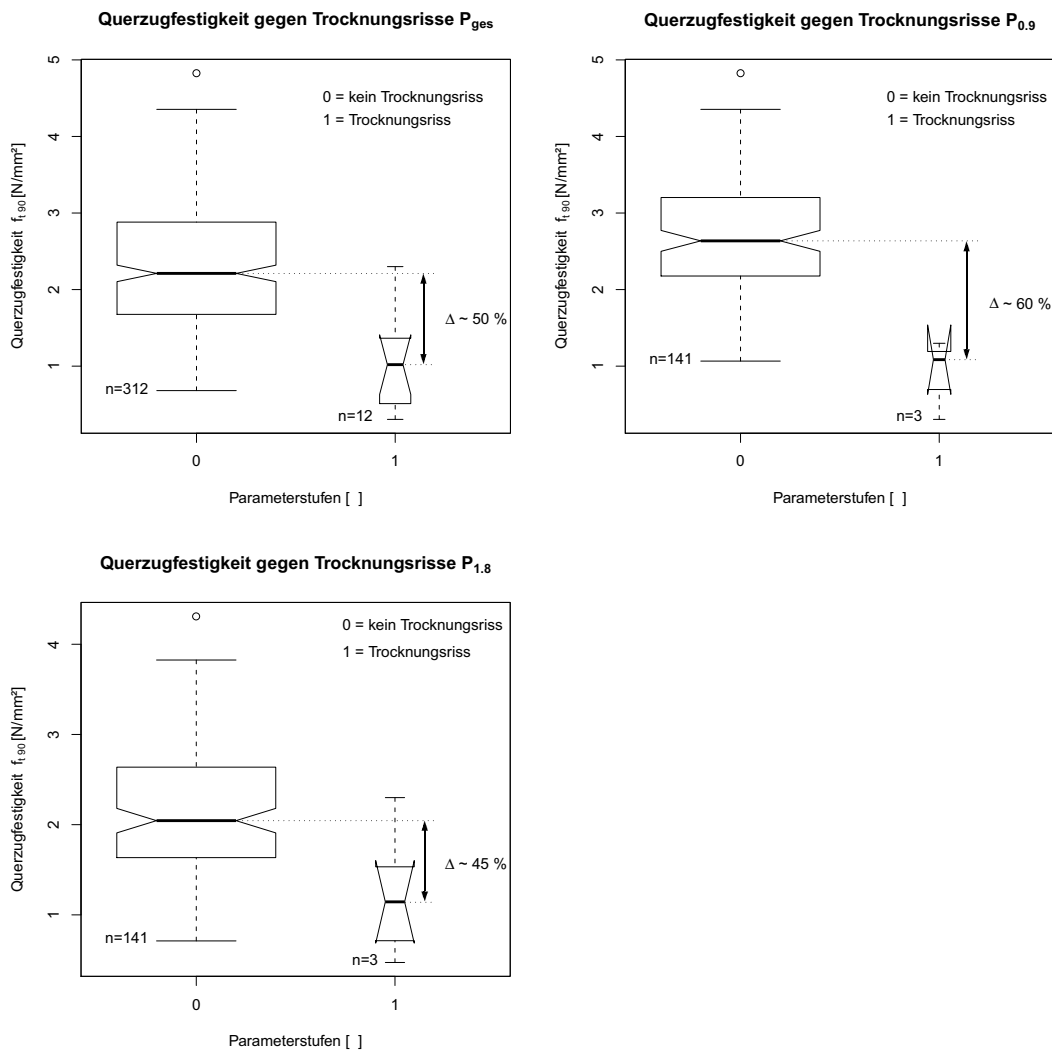


Abb. 3.5 Boxplots Querzugfestigkeit gegen Trocknungsrisse

## Parameter Ast

Der Parameter „Ast“ ließ in den Gruppen keine Signifikanz erkennen, d.h. ob sich Äste im Prüfkörper befanden oder nicht, hatte keinen nachweisbaren Einfluss auf die Querzugfestigkeit. Es wurde beobachtet, dass Äste die längs ihrer Faser belastet wurden (siehe Abb. 3.6) an der Klebefuge versagten, dh. das Versagen erfolgte nicht aufgrund der Querzugfestigkeit, sondern das Versagen trat in der Verklebung zwischen Ast und Lasteinleitungsholz auf.

Bei Flügelästen die quer zu ihrer Faserrichtung belastet wurden traten zwei Versagensarten auf. Der Bruch des Astes durch den Kern des Astes, diese Art des Versagens trat nur bei Prüfkörpern mit Mark auf (siehe Abb. 3.7). Und jene Versagensart bei der der Ast ungeschädigt blieb, die Bruchform der Prüfkörper aber vom Ast beeinflusst wurde (siehe Abb. 3.8). Daraus lässt sich ableiten, dass die Querzugfestigkeit des Astes, bei einer Be-

lastung in Faserrichtung des Astes, höher ist als die des umgebenden Holzes.  
Für die weitere Auswertung erfolgte die Betrachtung unabhängig davon ob sich Äste im Prüfkörper befanden oder nicht.



Abb. 3.6 Prüfkörper mit Ast (Belastung des Astes in Faserrichtung)



Abb. 3.7 Prüfkörper mit Flügelast (Astbruch)



Abb. 3.8 Prüfkörper mit Flügelast (Ast ungeschädigt)

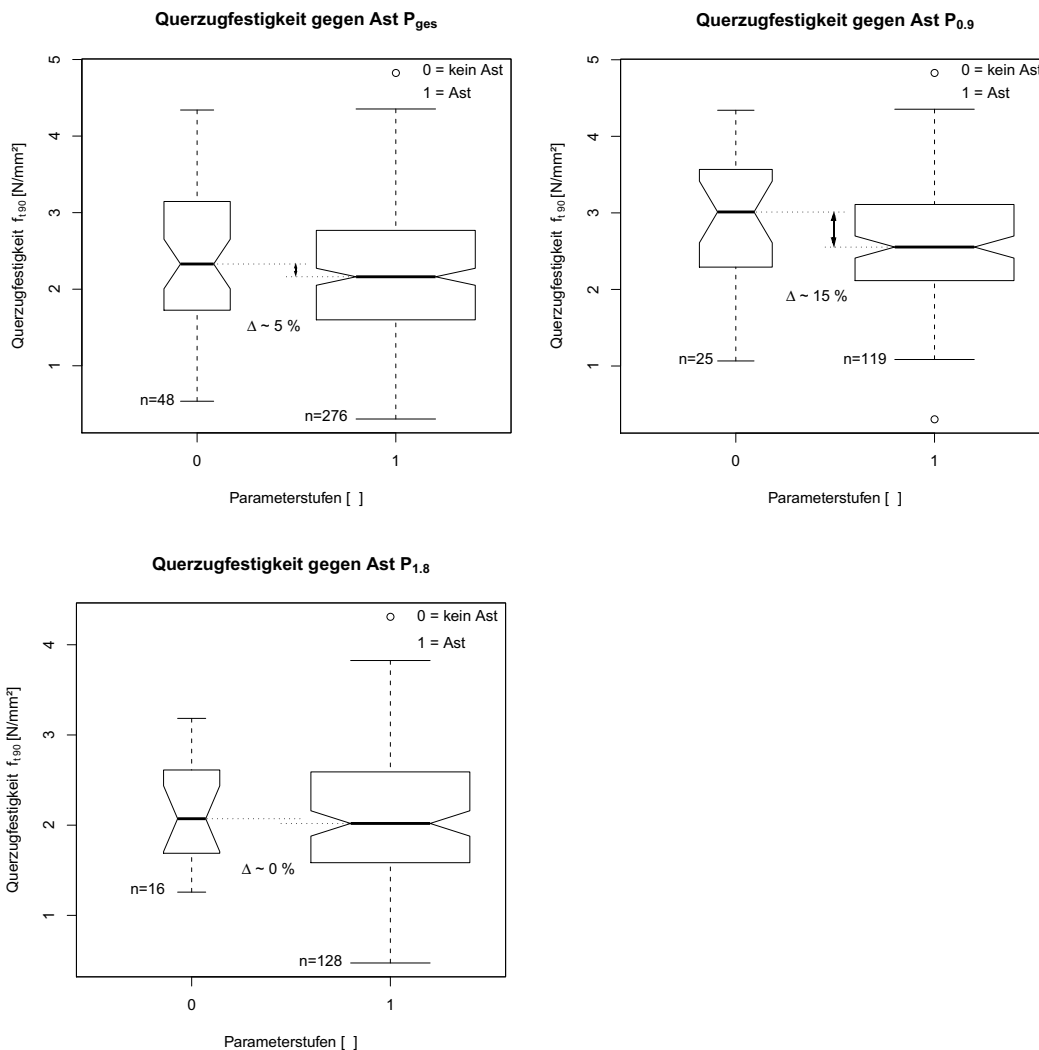


Abb. 3.9 Boxplots Querzugfestigkeit gegen Ast

Vergleicht man die Gruppen  $P_{0,9}$  und  $P_{1,8}$  hinsichtlich der Astdichte so ergibt sich für  $P_{0,9}$  ein Mittelwert der Astdichte ( $AD_{mean}$ ) von 1,2% und für  $P_{1,8}$  ein  $AD_{mean}$  von 1,7%. Der Unterschied der Mediane der Gruppe  $P_{0,9}$  ( $\Delta \sim 15\%$ ) bei geringerer Astdichte ist höher als der Unterschied der Mediane bei höherer Astdichte der Gruppe  $P_{1,8}$  ( $\Delta \sim 0\%$ ) d.h. selbst eine steigende Astdichte hat keinerlei Einfluss auf die Querzugfestigkeit. Weiters kann aus Boxplots abgeleitet werden, dass je größer die Querzug beanspruchte Fläche wird desto geringer ist der Einfluss seitens der Astdichte auf die Querzugfestigkeit.

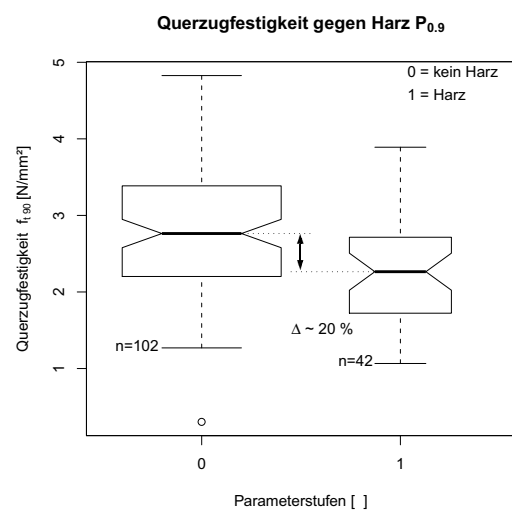
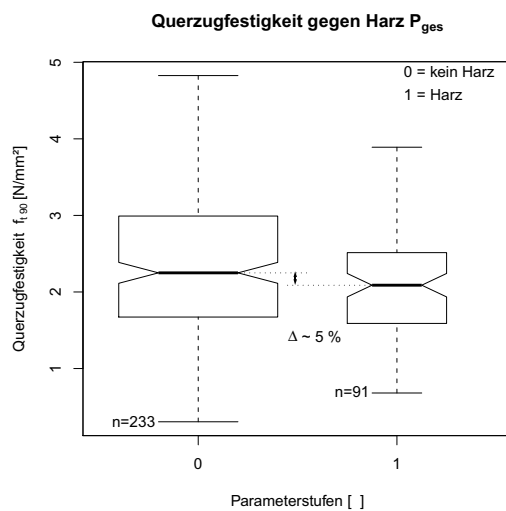
### Parameter Harz

Prüfkörper mit Harz (siehe Abb. 3.10) ließen in den Gruppen keine Signifikanz hinsichtlich Einfluss auf die Querkzugfestigkeit erkennen. Jedoch besitzt Harz eine geringere Querkzugfestigkeit gegenüber dem umgebenden Holz. Wie bereits in Abschnitt 1. 3. 3 erläutert beginnt die Rissbildung in der Prüfkörpermitte. Befindet sich eine Schwachstelle wie z.B. Harz in diesem oder angrenzenden Bereichen so kann angenommen werden, dass diese Schwachstelle rissauslösend ist.

Aufgrund dieser Betrachtung wurden Prüfkörper mit Harz für die weitere Auswertung nicht mehr im Datensatz weiterverwendet.



Abb. 3.10 Prüfkörper mit Harzgallen



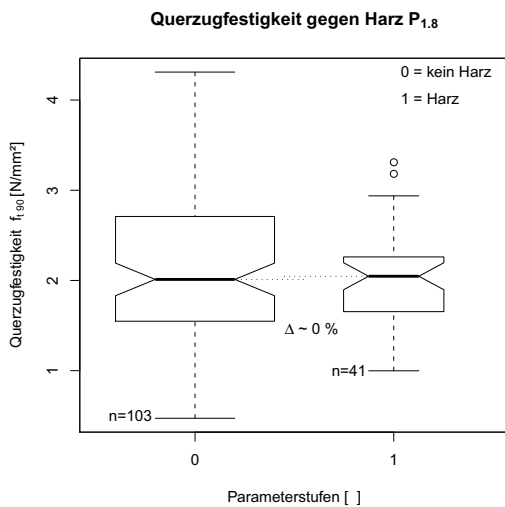


Abb. 3.11 Boxplots Querzugfestigkeit gegen Harz

Der Mittelwerte der Harzflächenverhältnisse (Verhältnis vorhandene Harzfläche zur Bruchfläche in Prozent) für die Gruppe P<sub>0,9</sub> beträgt 1,8%, für die Gruppe P<sub>1,8</sub> beträgt es 0,7%. Vergleicht man die Mediane der Gruppen P<sub>0,9</sub> ( $\Delta \sim 20\%$ ) und P<sub>1,8</sub> ( $\Delta \sim 0\%$ ) so kann daraus geschlossen werden, dass eine erhöhte Harzfläche zu einer Verminderung der Querzugfestigkeit führt.

## Parameter Mark

Trotz der erfolgten Aussortierung der Lamellen unter Ausschluss von Kernware, befand sich in der Lamelle Nr.: 1019 in Lamellenmitte ein Abschnitt mit Mark (siehe Abb. 3.12). Das Mark verringerte die Querzugfestigkeit um ca. 45% (siehe Abb. 3.13). Mark stellt ähnlich wie Harz eine Schwächung des Querschnittes dar. Da aufgrund des gewählten Versuchsaufbaus sich die Lage des Kerns in Brettmitte befand und von dort die Rissbildung ausgeht kann dadurch der Abfall der Querzugfestigkeit erklärt werden. Daher wurden die Prüfkörper mit Mark für die weitere Auswertung aussortiert.

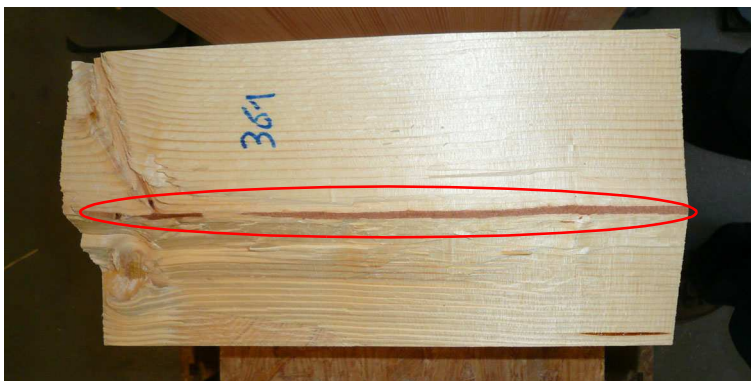


Abb. 3.12 Prüfkörper mit Mark

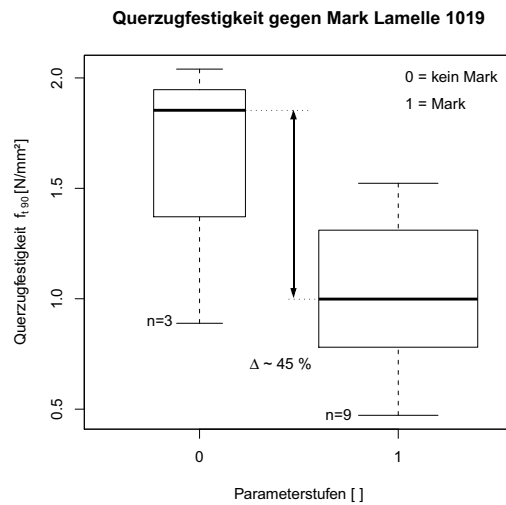


Abb. 3.13 Lamelle Nr. 1019: Querzugfestigkeit gegen Mark

### Parameter Harzlage

Wie bereits erläutert, ist der Ort der Schwächung (Harzlage) innerhalb des Querschnittes ein Kriterium für die Querzugfestigkeit (siehe Abb. 3.15).

Der Datensatz für die Darstellung der Boxplots der Harzlage wurde um die Parameter Mark und Trocknungsrisse reduziert, weiters wurden nur jene Prüfkörper dargestellt, welche Harz beinhalten.

Um dies zu untersuchen wurde der Querschnitt in drei Abschnitte unterteilt. Der Abschnitt bezeichnet jeweils die Lage des Harzes (siehe Abb. 3.14):

- mittleres Drittel; Abschnitt 1
- äußeres Drittel; Abschnitt 2
- gemischte Lage; Bezeichnung 3

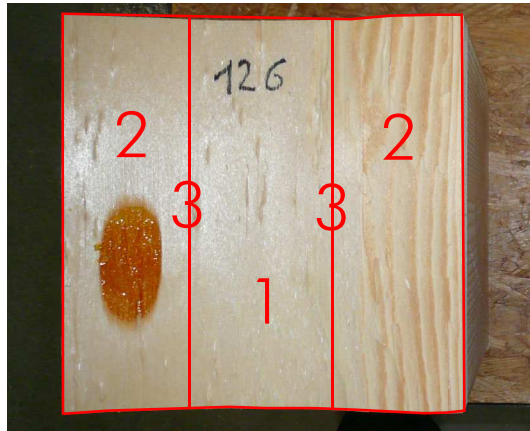


Abb. 3.14 Querschnittunterteilung

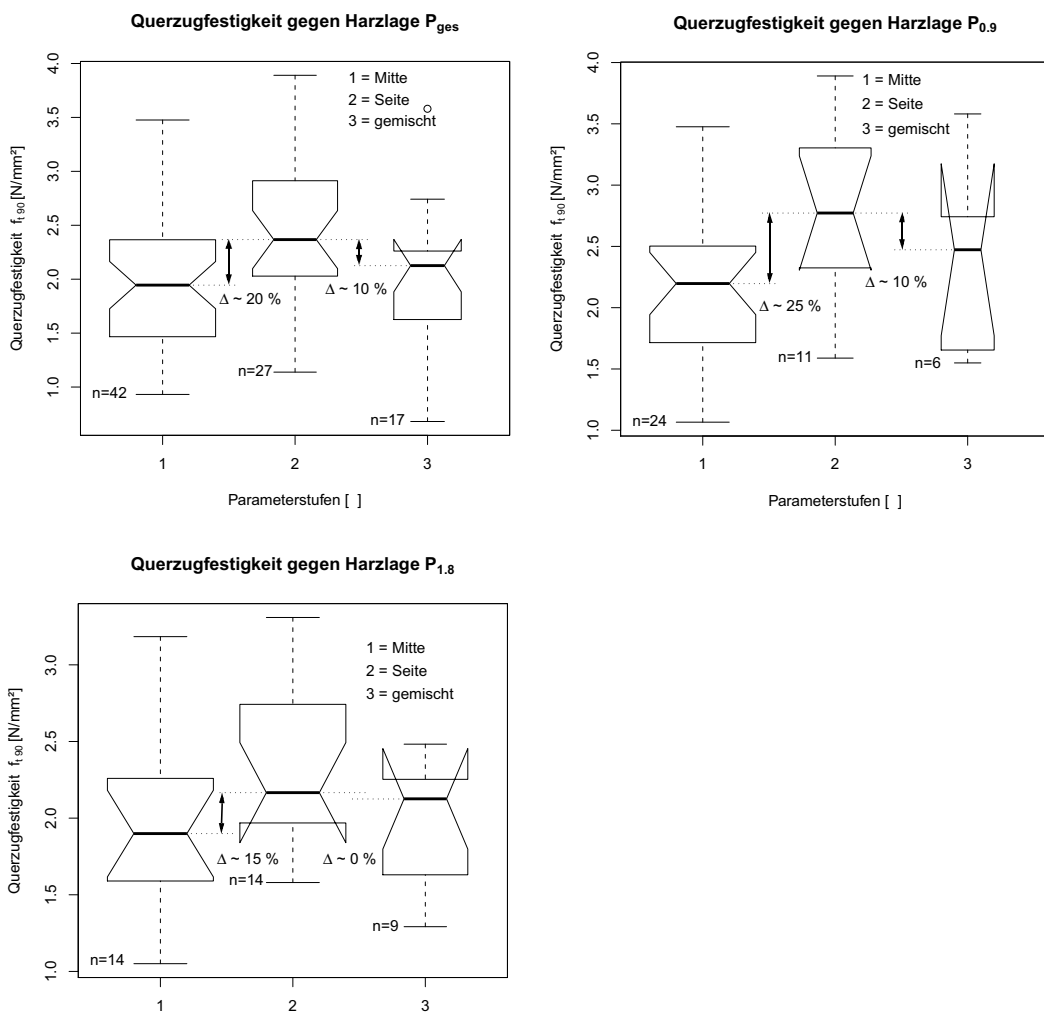


Abb. 3.15 Boxplots der Querzugfestigkeit gegen die Harzlagen, ohne Prüfkörper mit Trocknungsrissen und Mark



Aus den Boxplots ist klar zu erkennen, dass die Lage des Harzes die Querkzugfestigkeit beeinflusst. Befindet sich Harz im inneren Drittel des Prüfkörpers (Lage 1), in jenem Drittel in dem die Rissbildung beginnt, so ist mit geringeren Querkzugfestigkeiten infolge der Schwächung durch das Harz zu rechnen. Ist Harz in den äußeren zwei Dritteln (Lage 2) vorhanden so beeinflusst es die Querkzugfestigkeit am geringsten, da dieser Bereich im Allgemeinen nicht versagensinduzierend wirkt. Befindet sich Harz an den Übergängen der Lage 1 und der Lage 2 so liegt die Querkzugfestigkeit wie zu erwarten zwischen jener von Lage 1 und jener von Lage 2.

### Zusammenfassung

Aufgrund der Erkenntnisse aus Abschnitt 3. 3. 2 für die verschiedenen Parameter wird der Datensatz für die weitere Auswertung wie folgt reduziert:

keine Prüfkörper mit:

- Harz
- Mark
- Trocknungsrisse

Weiters wurden die BSH-Prüfkörper für die folgenden Betrachtungen aus dem Datensatz aussortiert.

Die Anzahl  $n$  innerhalb der Gruppen reduzierte sich aufgrund dieser Einschränkungen wie folgt:

- $P_{\text{ges}} = 324$  auf  $P_{\text{ges,red}} = 190$
- $P_{0,9} = 144$  auf  $P_{0,9,\text{red}} = 100$
- $P_{1,8} = 144$  auf  $P_{1,8,\text{red}} = 90$

### 3.3.3 Versagensarten (Bruchformen)

Die in den Versuchen festgestellten Bruchformen lassen sich im wesentlichen in folgende Gruppen einteilen:

- „W“-Bruch

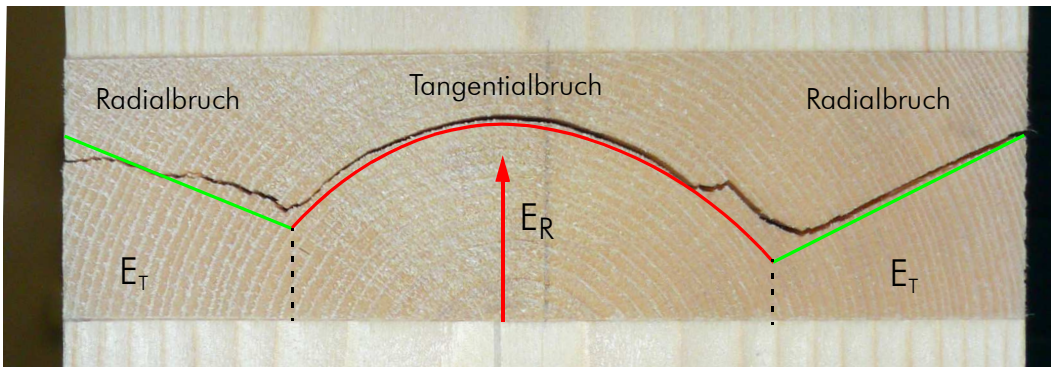


Abb. 3.16 „W“-Bruch

Typisch für den „W“-Bruch ist seine Form, in Brettmitte reißt der Prüfkörper entlang eines Jahrringes (Tangentialbruch) auf, bis der Riss die Richtung um ca.  $90^\circ$  ändert. Erklärt kann diese Bruchform durch die höhere Steifigkeit in Brettmitte werden, der radiale E-Modul ist ca. um den Faktor 1,5 höher als der tangentielle E-Modul ( $E_R > E_T$ ) [2]. Die Rissbildung beginnt in Brettmitte, wo die Belastung durch die Querkraft vorwiegend in radialer Richtung wirkt, es kommt zu einem Tangentialbruch dem Jahrringverlauf folgend (Bruchfläche in tangentialer Richtung). Durch die Veränderung der Steifigkeiten kommt es zum Wechsel der Bruchform, an den Seiten wirkt die Querkraft vorwiegend in tangentialer Richtung. Es kommt zum Radialbruch (Bruchfläche in radialer Richtung).

- Jahrringbruch

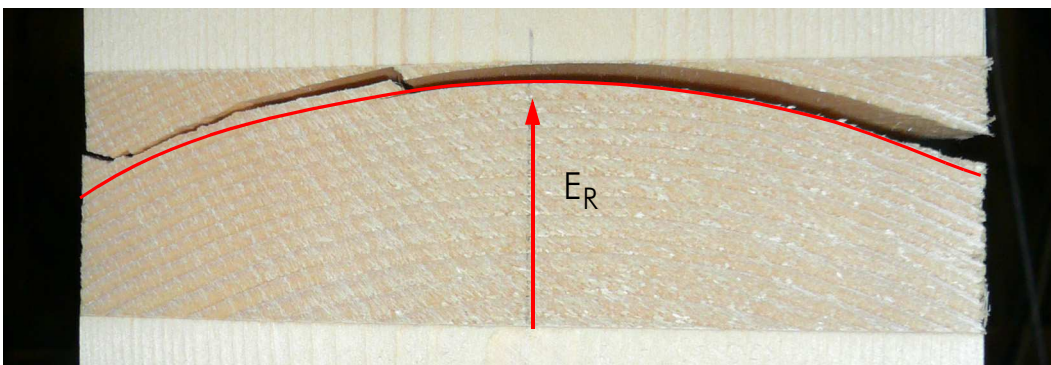


Abb. 3.17 Jahrringbruch

Beim Jahrringbruch (siehe Abb. 3.17) wirkt die Querkraft vorwiegend in radialer Richtung, es kommt zum Tangentialbruch (Jahrringbruch). Der Riss innerhalb des Jahrringes erfolgte in der Frühholzzone bzw. an der Jahrringgrenze (siehe Abb. 3.18), dies ist auf die geringere Festigkeit gegenüber der Spätholzzone zurückzuführen. Aufgrund der Rohdichteunterschiede die eine Unstetigkeit an den Jahrringgrenzen zur Folge hat.



Abb. 3.18 Versagen der Frühholzzone

- **Interfacebruch (rechte oder linke Seite)**



Abb. 3.19 Interfacebruch; rechte Seite

Beim Interfacebruch befindet sich der Riss im Bereich der Klebefuge. Hierbei kommt es nicht zum Versagen der Verklebung, auf den Prüfkörpern konnte ein Faserbelag nachgewiesen werden (siehe Abb. 3.20).

Interfacebrüche traten bei Einzelprüfkörpern immer an der rechten Seite auf, dies kann durch die inhomogenere Spannungsverteilung der rechten (kernzugewandten) Seite erklärt werden. Der Unterschied der E-Module ist an der rechten Seite größer als auf der linken Seite. Bei BSH-Prüfkörpern kam es auch zum Versagen der linken Seite.

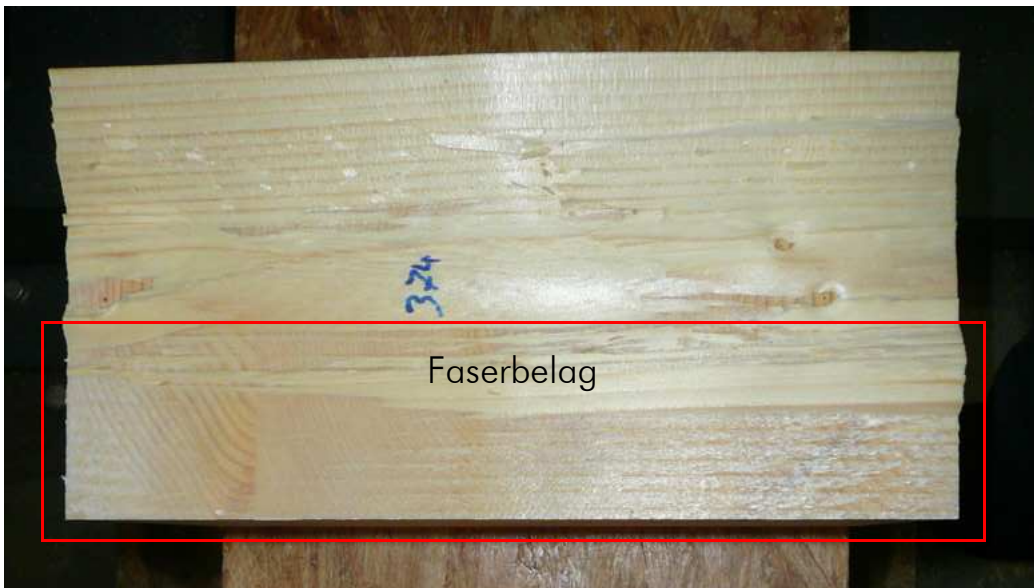


Abb. 3.20 Prüfkörper mit Faserbelag

- Kernbruch



Abb. 3.21 Kernbruch

Beim Kernbruch ist das Mark (ähnlich wie Harz) jene Schwachstelle die den Riss auslöst (siehe Abb. 3.22). Der Kern befand sich bei den Prüfkörpern generell in Brettmitte. Da sich der Riss von der Querschnittsmitte ausbreitet, kommt es aufgrund der geringeren Steifigkeit in tangentialer Richtung zu einem spröden Radialbruch.



Abb. 3.22 Prüfkörper mit rissauslösendem Mark

- **Gerader Bruch**



Der gerade Bruch ging meist horizontal auf halber Höhe durch den Prüfkörper. Die Bruchform ist eine Mischform aus Radial- und Tangentialbruch. Diese Bruchform war vor allem bei Prüfkörpern mit flacher Jahrringlage (Seitenware) zu beobachten.

- **Mischbruch**

Ähnlich wie beim geraden Bruch, so handelt es sich beim Mischbruch um eine Bruchform, die sowohl Tangential- als auch Radialbrüche aufweisen kann. Es kann sich dabei um verschiedene Kombinationen der hier genannten Bruchformen handeln. Diese Bruchform entstand meist bei Prüfkörpern mit Ästen, durch das Versagen des Astes an der Klebefuge wurde das mit dem Ast verwachsene Holz an die Bruchform des Astes angepasst.



Abb. 3.23 Mischbruch

### Boxplot der Bruchformen

Da es sich bei den Bruchformen an sich um keinen direkten Querkzugfestigkeit beeinflussenden Parameter handelt, wurden die gesamten Prüfkörper (Gruppe  $P_{ges}$ ) für die Erstellung des Boxplotes verwendet.

Dabei bedeuten:

- G                      gerader Bruch; n = 53
- J                      Jahrringbruch; n = 26
- K                      Kernbruch; n = 9
- L                      Interfacebruch der linken Seite; n = 1
- M                      Mischbruch; n = 98
- R                      Interfacebruch der rechten Seite; n = 71
- W                      W-Bruch; n = 66

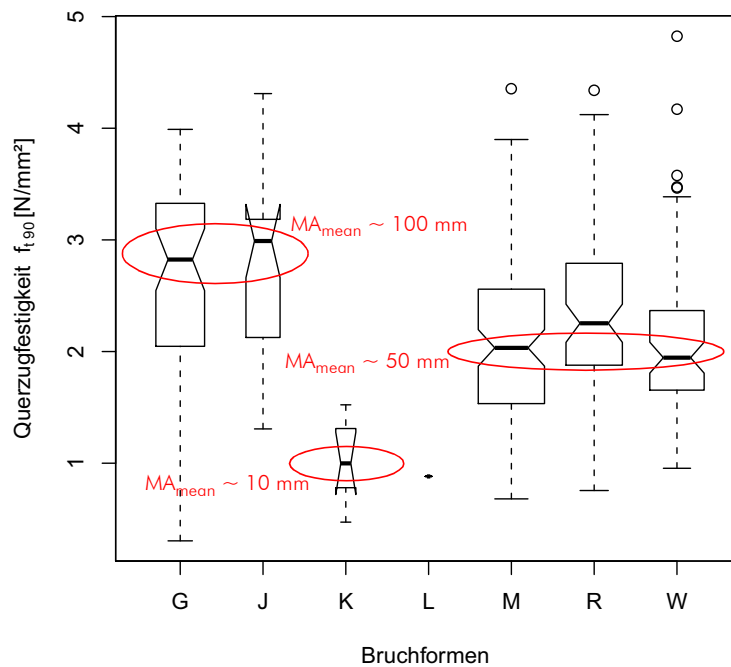


Abb. 3.24 Boxplot der Bruchformen

Ein Zusammenhang zwischen Markabstand und Bruchform kann aus dem Boxplot der Bruchformen abgeleitet werden. Dazu wurden die Mittelwerte der Markabstände der Bruchformen ermittelt:

| Bruchform               |   | Mittelwert Markabstand [mm] |
|-------------------------|---|-----------------------------|
| Gerader Bruch           | G | 105                         |
| Jahringbruch            | J | 110                         |
| Kernbruch               | K | 17                          |
| Bruch der linken Seite  | L | 124                         |
| Mischbruch              | M | 55                          |
| Bruch der rechten Seite | R | 114                         |
| „W“-Bruch               | W | 55                          |

Tab. 3.1 Mittelwerte des Markabstandes der Bruchformen

Der gerade Bruch und der Jahringbruch weisen die höchsten Querzugfestigkeiten auf. Der mittlere Markabstand dieser Bruchformen beträgt dabei im Mittel 107,5 mm, dies entspricht Seitenware.

Beim Kernbruch liegt das Mark bereits innerhalb des Prüfkörpers. Die Querzugfestigkei-

ten sind entsprechend niedrig.

Der Bruch der linken Seite lässt aufgrund des einmaligen Auftretens, keine schlüssige Aussage zu.

Sowohl der Mischbruch als auch der „W“-Bruch besitzen mit 55 mm den selben Markabstand, dies entspricht Mittelware bzw. kernnaher Ware. Die Werte für die Querkzugfestigkeiten liegen entsprechend unter denen der Seitenware.

Beim Bruch der rechten Seite beträgt der Mittelwert des Markabstandes 114 mm. Trotz des größten Markabstandes liegen die Werte der Querkzugfestigkeit zwischen jenen der G- bzw. J-Brüche und jenen der M- bzw. W-Brüche. Dies kann durch die Bruchform selbst erklärt werden. Hierbei handelt es sich nicht um einen Bruch im Holz, sondern um einen Interaktionsbruch zwischen Prüfkörper und Klebefuge. Die Spannungsverteilung in Brettweitenrichtung am Übergang zwischen Prüfkörper und Lasteinleitungsholz ist wesentlich inhomogener als jene in Prüfkörperinneren. Daher kommt es zum sofortigen Sprödbbruch über die gesamte Brettbreite.

Zusammenfassend kann erklärt werden, dass je größer der Markabstand wird desto höher ist die Querkzugfestigkeit.

### 3.3.4 Versagensverlauf

In den Versuchen konnte der Schadensverlauf an einigen Prüfkörpern in Bildern festgehalten werden. Der Riss breitete sich von der Prüfkörpermitte zu den Seiten hin aus (siehe Abb. 3.25). Hat der Riss ca. die halbe Brettbreite erreicht tritt ein Sprödbbruch auf.





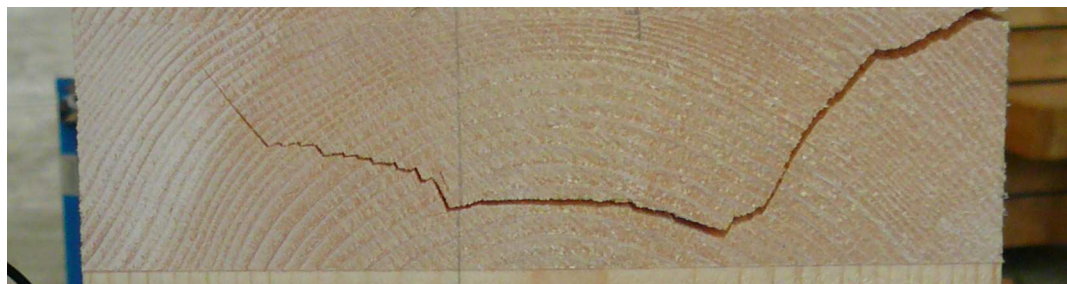


Abb. 3.25 Rissfortschritt am Beispiel: Prüfkörper 460

### 3. 3. 5 Statistische Kennwerte für die reduzierten Gruppen:

- **Gruppe  $P_{ges,red}$**  : Einzelprüfkörper mit dem Volumen  $0,9 \text{ dm}^3$  (Querzuggrundfläche  $150 \times 150 \text{ mm}$ ) und Einzelprüfkörper mit dem Volumen  $1,8 \text{ dm}^3$  (Querzuggrundfläche  $150 \times 300 \text{ mm}$ );  $n = 190$
- **Gruppe  $P_{0,9,red}$**  : Einzelprüfkörper mit dem Volumen  $0,9 \text{ dm}^3$  (Querzuggrundfläche  $150 \times 150 \text{ mm}$ ) ;  $n = 100$
- **Gruppe  $P_{1,8,red}$**  : Einzelprüfkörper mit dem Volumen  $1,8 \text{ dm}^3$  (Querzuggrundfläche  $150 \times 300 \text{ mm}$ );  $n = 90$

| Parameter  | Kennwert      | Einheit              | Gruppe $P_{ges,red}$ | Gruppe $P_{0,9,red}$ | Gruppe $P_{1,8,red}$ |
|------------|---------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| $f_{t,90}$ | Minimum       | [N/mm <sup>2</sup> ] | 0,89                 | 1,27                 | 0,89                 |
|            | Mittelwert    | [N/mm <sup>2</sup> ] | 2,55                 | 2,80                 | 2,27                 |
|            | Maximum       | [N/mm <sup>2</sup> ] | 4,38                 | 4,83                 | 4,31                 |
|            | Median        | [N/mm <sup>2</sup> ] | 2,43                 | 2,77                 | 2,07                 |
|            | COV           | [%]                  | 30,8                 | 27,3                 | 31,4                 |
|            | Quantile 0,05 | [N/mm <sup>2</sup> ] | 1,40                 | 1,48                 | 1,30                 |

Tab. 3.2 Kennwerte der reduzierten Gruppen

|                       |                       |                      |        |        |        |
|-----------------------|-----------------------|----------------------|--------|--------|--------|
|                       | Weibull-P shape       | [-]                  | 3,55   | 4,07   | 3,43   |
|                       | Weibull-P scale       | [-]                  | 2,83   | 3,08   | 2,52   |
|                       | Weibull Quantile 0,05 | [N/mm <sup>2</sup> ] | 1,23   | 1,49   | 1,06   |
|                       | Weibull KI 90 %       | [N/mm <sup>2</sup> ] | 1,64   | 1,35   | 1,00   |
| Rohdichte $\rho_{12}$ | Mittelwert            | [kg/m <sup>3</sup> ] | 444,23 | 450,84 | 436,88 |
|                       | COV                   | [%]                  | 6,4    | 6,0    | 6,5    |
|                       | Normal Quantile 0,05  | [kg/m <sup>3</sup> ] | 397,31 | 406,53 | 389,86 |
| Holzfeuchte $u$       | Mittelwert            | [%]                  | 12,57  | 12,55  | 12,60  |
|                       | COV                   | [%]                  | 4,2    | 4,6    | 3,6    |
| $E_{t,90}$            | Mittelwert            | [N/mm <sup>2</sup> ] | 874    | 890    | 857    |
|                       | COV                   | [%]                  | 15,0   | 15,3   | 14,5   |
| $E_{dyn,EF,12}$       | Mittelwert            | [N/mm <sup>2</sup> ] | 12733  | 12586  | 12897  |
|                       | COV                   | [%]                  | 16,1   | 14,4   | 17,8   |
| JRB                   | Mittelwert            | [mm]                 | 2,7    | 2,5    | 2,8    |
|                       | COV                   | [%]                  | 35,13  | 31,37  | 37,07  |
| MA                    | Mittelwert            | [mm]                 | 89,47  | 92,40  | 86,22  |
|                       | COV                   | [%]                  | 49,1   | 44,2   | 54,6   |

Tab. 3.2 Kennwerte der reduzierten Gruppen

### 3. 3. 6 Quantil-Quantil-Plot Datensatz bereinigt

Wesentliche Querszugfestigkeit beeinflussende Parameter wie Mark, Trocknungsrisse und Harz konnten ermittelt werden, die Prüfkörper die solche Parameter enthielten wurden aus dem Datensatz ausgeschieden, der Datensatz wurde bereinigt. Um einen Überblick über die Verteilungen des reduzierten Datensatzes zu erhalten werden die Querszugfestigkeiten erneut anhand der bekannten Verteilungen aus Abschnitt 3. 3. 1, in der reduzierten Gruppen ( $P_{ges,red}$ ,  $P_{0.9,red}$ ,  $P_{1.8,red}$ ), verglichen.

Gruppe  $P_{ges,red}$  : Einzelprüfkörper:

Volumen  $0,9 \text{ dm}^3$  (Querzugfläche  $150 \times 150 \text{ mm}$ ) und  $1,8 \text{ dm}^3$  (Querzugfläche  $150 \times 300 \text{ mm}$ );  $n = 190$

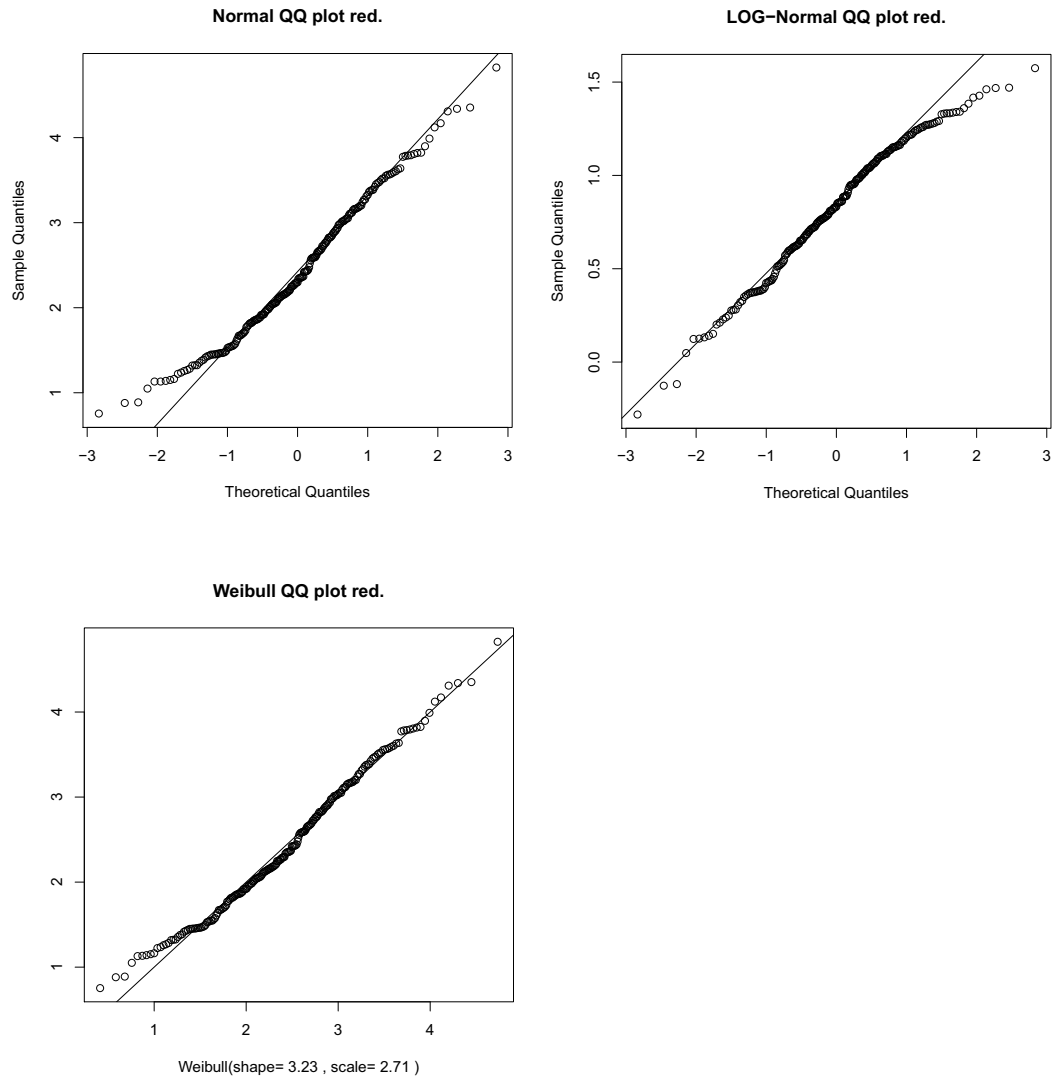


Abb. 3.26 Gruppe  $P_{ges,red}$  Q-Q-Plots

Gruppe  $P_{0,9,red}$ : Einzelprüfkörper:

Volumen  $0,9 \text{ dm}^3$  (Querszugfläche  $150 \times 300 \text{ mm}$ );  $n = 100$

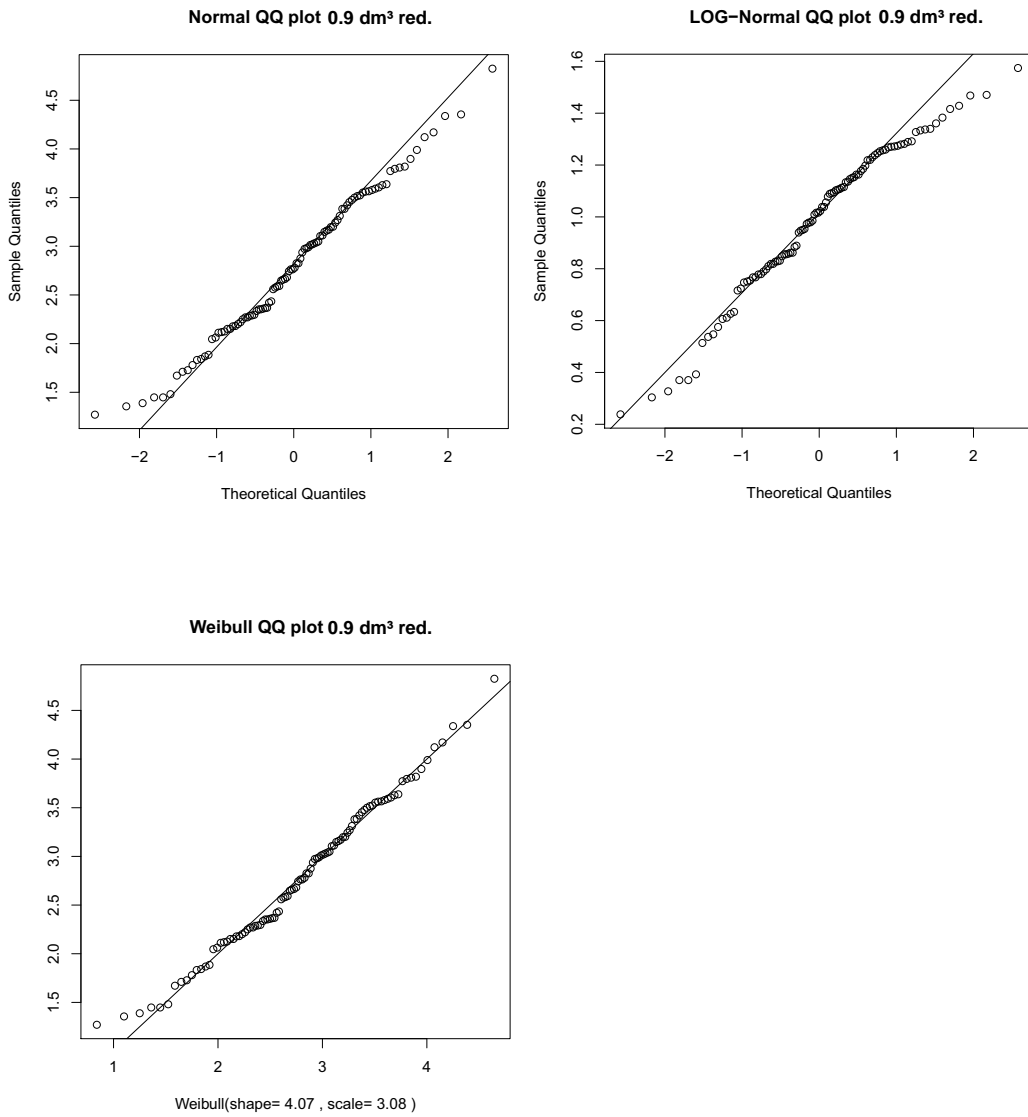
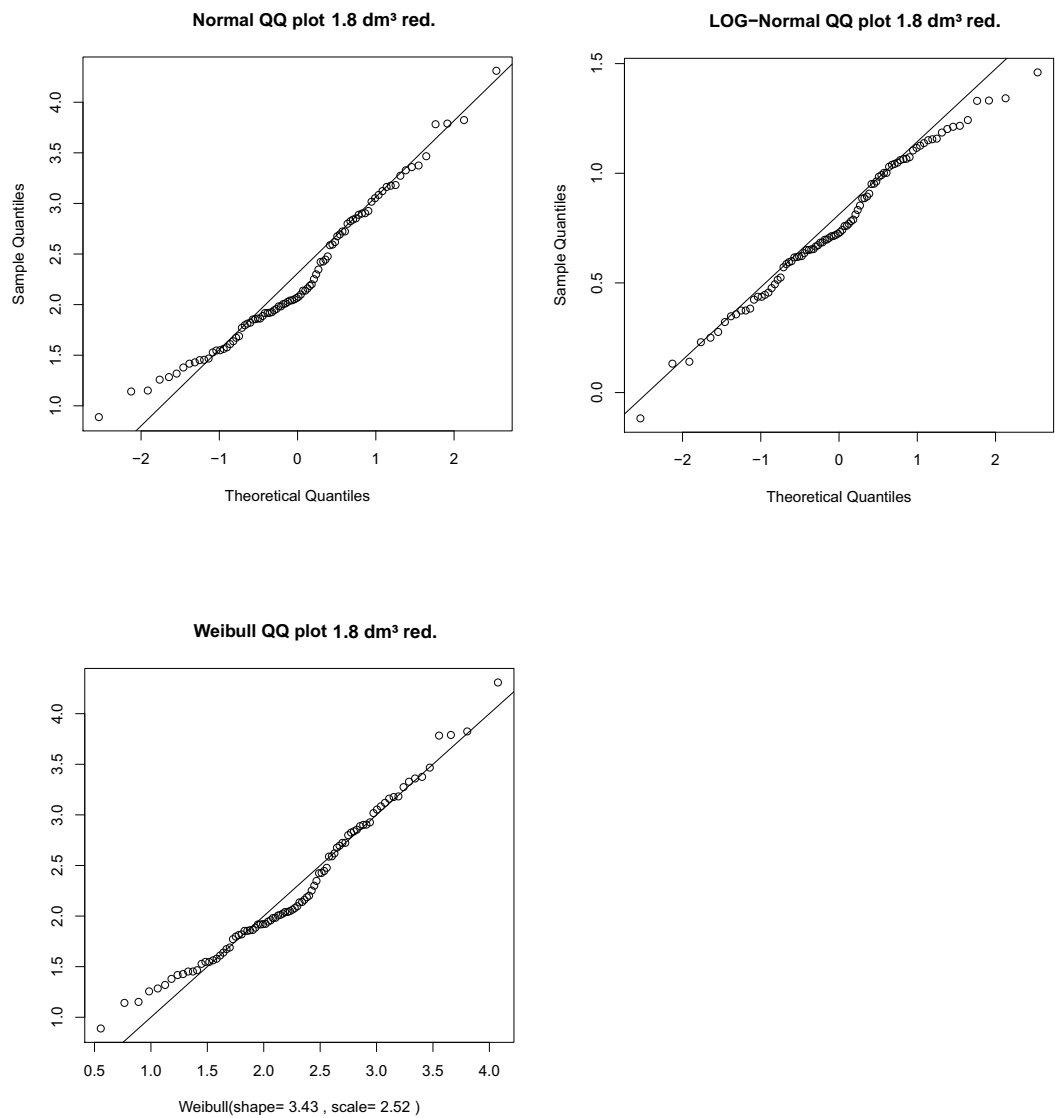


Abb. 3.27 Gruppe  $P_{0,9,red}$  Q-Q-Plots

Gruppe  $P_{1,8,red}$  : Einzelprüfkörper:Volumen  $1,8 \text{ dm}^3$  (Querschnittsfläche  $150 \times 300 \text{ mm}$ );  $n = 90$ Abb. 3.28 Gruppe  $P_{1,8,red}$  Q-Q-Plots

Als Ergebnis aus den Q-Q-Plots kann festgestellt werden, dass unter den angenommenen statistischen Verteilungsmodellen und den qualitativen Vergleich untereinander die Weibullverteilung die Querschnittsfläche am besten beschreibt.

Die Weibullverteilung ist das Ergebnis der statistischen Überlegungen von Weibull zur „Sprödbruchtheorie“ bei iid-Elementen (voneinander unabhängige Elemente) und serieller Versagenscharakteristik.

### 3. 3. 7 Normierung der Querkzugfestigkeit gegen die Rohdichte

Aus der Normierung kann die Bandbreite der Querkzugfestigkeit und der Rohdichte um den jeweiligen Mittelwert ermittelt werden.

Die Bandbreite der Rohdichte um den Mittelwert innerhalb einer Lamelle ist dabei auf  $\pm 2-3\%$  beschränkt. Der Rohdichteunterschied innerhalb der Lamelle kann daher als konstant angesehen werden. Die Bandbreite der Querkzugfestigkeit innerhalb einer Lamelle beträgt  $\pm 25-30\%$ .

Bei konstanter Rohdichte innerhalb der Lamelle gibt es starke Schwankungen der Querkzugfestigkeit. Daraus kann gefolgert werden, dass die Rohdichte eine unausgeprägte bis keine Korrelation gegenüber der Querkzugfestigkeit innerhalb der Lamelle aufweist.

Die y-Achse wurde wie folgt normiert:

$$y_i = \frac{f_{t,90,j,i}}{f_{t,90,j,mean}} \quad j \dots \text{Lamelle}; i \dots \text{Prüfkörper innerhalb der Lamelle}$$

Die x-Achse wurde wie folgt normiert:

$$x_i = \frac{\rho_{12,j,i}}{\rho_{12,j,mean}}$$

#### Gruppe $P_{0,9,red}$ : Einzelprüfkörper:

Volumen  $0,9 \text{ dm}^3$  (Querkzugfläche  $150 \times 150 \text{ mm}$ );  $n = 100$

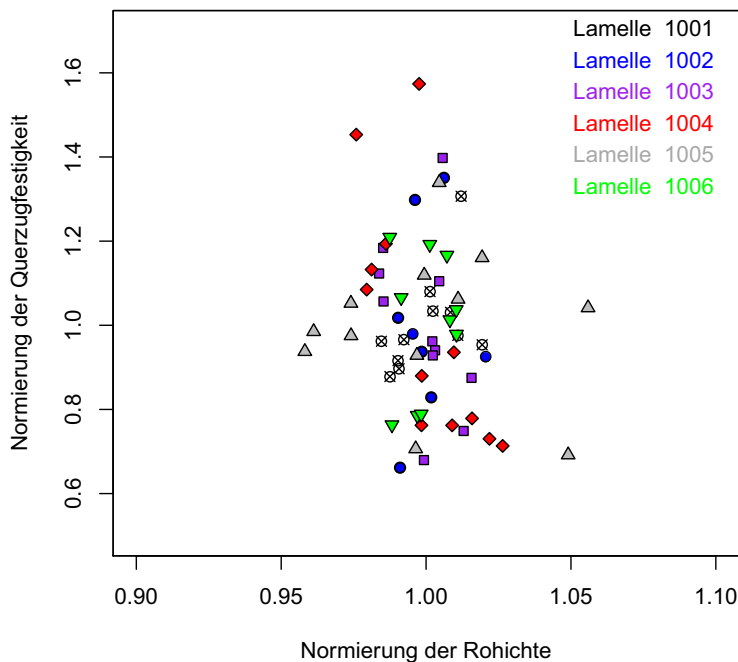


Abb. 3.29 Normierung der Querkzugfestigkeit gegen die normierte Rohdichte der Lamellen 1001 bis 1006; Seitenware

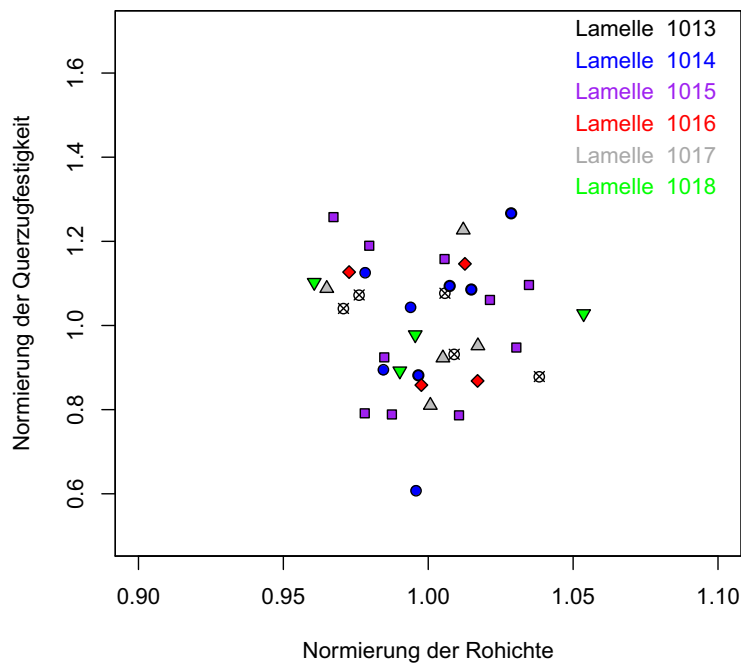


Abb. 3.30 Normierung der Querkzugfestigkeit gegen die normierte Rohdichte der Lamellen 1013 bis 1018; Mittelware

**Gruppe P<sub>1,8,red</sub> Gruppe P<sub>1,8,red</sub> : Einzelprüfkörper:**

Volumen 1,8 dm<sup>3</sup> (Querkzugfläche 150 x 300 mm); n = 90

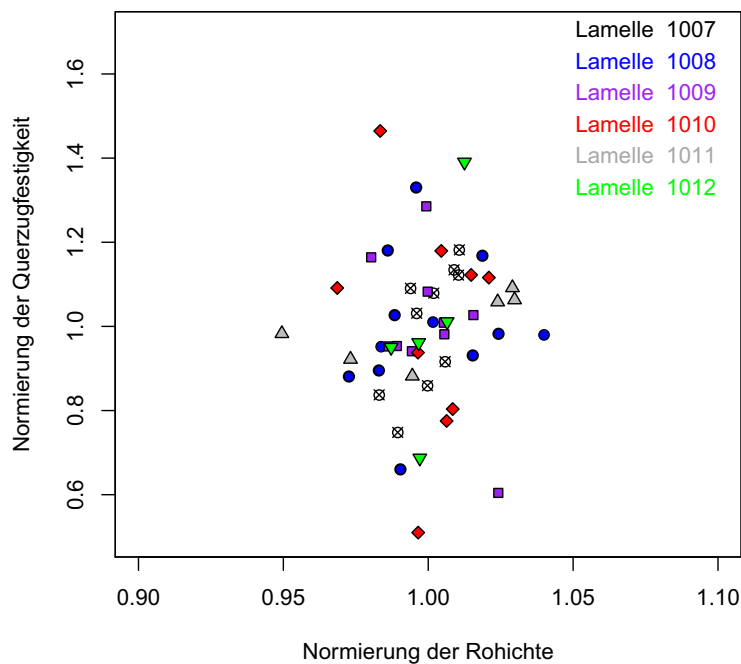


Abb. 3.31 Normierung der Querkzugfestigkeit gegen die normierte Rohdichte der Lamellen 1007 bis

1012; Seitenware

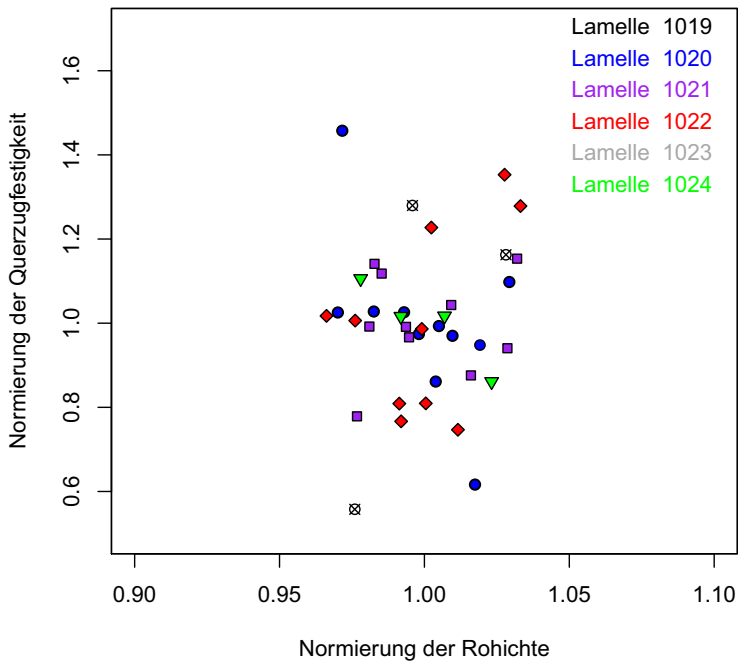


Abb. 3.32 Normierung der Querkzugfestigkeit gegen die normierte Rohdichte der Lamellen 1019 bis 1024; Mittelware

### 3. 3. 8 Ergebnisse der Einzellamellen

Für die Darstellung der Kennwerte der Einzellamellen wurden für die Auswertung nur Prüfkörper ohne Harz, Trocknungsrisse und Mark verwendet. Es werden nur die Kennwerte der Einzelprüfkörper dargestellt.

Die Mittelwerte der Querkzugfestigkeiten der Lamellen streuen stark, von  $1,47 \text{ N/mm}^2$  bis  $3,69 \text{ N/mm}^2$ . Diese Streuung spiegelt das spröde Verhalten von Holz bei Querkzugbelastung wieder. Dies wird auch durch den Variationskoeffizient (COV) der einzelnen Lamellen bestätigt, seine Werte reichen von rund 10% bis zu rund 40%.

Die Holzfeuchte liegt mit rund 12,5% und einen COV um die 3% im für Prüfungen zulässigen Bereich von  $12\% \pm 2\%$ .

Die Rohdichten liegen über der von der EN 1194:1999 geforderten Rohdichte für GL 24h von  $350 \text{ kg/m}^3$ . Ein Zusammenhang zwischen Rohdichte und Querkzugfestigkeit ist aus dem Vergleich der Kennwerte der Einzellamellen nicht erkennbar.



Lamellen 1001-1006; Seitenware; 0,9 dm<sup>3</sup>

| Parameter              | Kennwert                 | Einheit              | Lamelle<br>1001<br>n=11 | Lamelle<br>1002<br>n=8 | Lamelle<br>1003<br>n=11 | Lamelle<br>1004<br>n=12 | Lamelle<br>1005<br>n=12 | Lamelle<br>1006<br>n=10 |
|------------------------|--------------------------|----------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| f <sub>t,90</sub>      | Minimum                  | [N/mm <sup>2</sup> ] | 3,24                    | 2,13                   | 1,71                    | 1,36                    | 2,25                    | 2,29                    |
|                        | Mittelwert               | [N/mm <sup>2</sup> ] | 3,69                    | 3,21                   | 2,52                    | 1,90                    | 3,25                    | 3,00                    |
|                        | Maximum                  | [N/mm <sup>2</sup> ] | 4,83                    | 4,34                   | 3,52                    | 2,99                    | 4,35                    | 3,63                    |
|                        | Median                   | [N/mm <sup>2</sup> ] | 3,57                    | 3,08                   | 2,42                    | 1,73                    | 3,29                    | 3,08                    |
|                        | COV                      | [%]                  | 11,9                    | 22,9                   | 20,3                    | 29,1                    | 17,9                    | 17,0                    |
|                        | Quantile 0,05            | [N/mm <sup>2</sup> ] | 3,28                    | 2,31                   | 1,80                    | 1,37                    | 2,28                    | 2,32                    |
|                        | Weibull-P<br>shape       | [-]                  | 7,67                    | 5,06                   | 5,52                    | 3,75                    | 6,50                    | 7,50                    |
|                        | Weibull-P scale          | [-]                  | 3,89                    | 3,49                   | 2,72                    | 2,10                    | 3,48                    | 3,21                    |
|                        | Weibull<br>Quantile 0,05 | [N/mm <sup>2</sup> ] | 2,64                    | 1,94                   | 1,59                    | 0,95                    | 2,21                    | 2,16                    |
|                        | Weibull KI 90<br>%       | [N/mm <sup>2</sup> ] | 2,44                    | 1,68                   | 1,42                    | 0,81                    | 2,01                    | 1,98                    |
| ρ <sub>12</sub>        | Mittelwert               | [kg/m <sup>3</sup> ] | 414,64                  | 444,05                 | 444,30                  | 478,84                  | 424,57                  | 434,30                  |
|                        | COV                      | [%]                  | 1,1                     | 1,0                    | 1,1                     | 1,7                     | 3,1                     | 0,9                     |
|                        | Normal<br>Quantile 0,05  | [kg/m <sup>3</sup> ] | 406,71                  | 436,85                 | 436,35                  | 465,50                  | 402,82                  | 427,91                  |
| u                      | Mittelwert               | [%]                  | 12,29                   | 12,45                  | 12,84                   | 13,25                   | 12,84                   | 12,66                   |
|                        | COV                      | [%]                  | 2,5                     | 1,2                    | 2,4                     | 2,9                     | 4,4                     | 4,9                     |
| E <sub>t,90</sub>      | Mittelwert               | [N/mm <sup>2</sup> ] | 892                     | 854                    | 791                     | 844                     | 1002                    | 1011                    |
|                        | COV                      | [%]                  | 19,8                    | 5,8                    | 5,0                     | 6,3                     | 16,9                    | 4,9                     |
| E <sub>dyn,EF,12</sub> | Einzelwert               | [N/mm <sup>2</sup> ] | 12340                   | 14282                  | 13965                   | 15865                   | 10004                   | 13324                   |
| JRB                    | Mittelwert               | [mm]                 | 3,02                    | 3,28                   | 1,94                    | 1,54                    | 3,04                    | 1,58                    |
|                        | COV                      | [%]                  | 2,1                     | 3,9                    | 2,2                     | 2,5                     | 5,1                     | 4,9                     |
| MA                     | Mittelwert               | [mm]                 | 126,04                  | 116,05                 | 81,32                   | 124,04                  | 127,02                  | 140,05                  |
|                        | COV                      | [%]                  | 8,2                     | 12,4                   | 5,7                     | 10,1                    | 11,4                    | 11,4                    |

Tab. 3.3 Kennwerte der Lamellen 1001-1006; Seitenware; 0,9 dm<sup>3</sup>

Lamellen 1007-1012; Seitenware; 1,8 dm<sup>3</sup>

| Parameter              | Kennwert                 | Einheit              | Lamelle<br>1007<br>n=10 | Lamelle<br>1008<br>n=12 | Lamelle<br>1009<br>n=10 | Lamelle<br>1010<br>n=9 | Lamelle<br>1011<br>n=6 | Lamelle<br>1012<br>n=5 |
|------------------------|--------------------------|----------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| f <sub>t,90</sub>      | Minimum                  | [N/mm <sup>2</sup> ] | 1,80                    | 2,14                    | 1,26                    | 1,32                   | 2,80                   | 1,56                   |
|                        | Mittelwert               | [N/mm <sup>2</sup> ] | 2,40                    | 3,24                    | 2,08                    | 2,59                   | 3,18                   | 2,27                   |
|                        | Maximum                  | [N/mm <sup>2</sup> ] | 2,84                    | 4,31                    | 2,68                    | 3,79                   | 3,47                   | 3,16                   |
|                        | Median                   | [N/mm <sup>2</sup> ] | 2,54                    | 3,18                    | 2,07                    | 2,82                   | 3,24                   | 2,19                   |
|                        | COV                      | [%]                  | 14,8                    | 17,0                    | 17,7                    | 27,8                   | 8,5                    | 25,2                   |
|                        | Quantile 0,05            | [N/mm <sup>2</sup> ] | 1,89                    | 2,53                    | 1,57                    | 1,59                   | 2,83                   | 1,68                   |
|                        | Weibull-P<br>shape       | [-]                  | 8,95                    | 6,57                    | 7,10                    | 4,35                   | 16,12                  | 4,69                   |
|                        | Weibull-P scale          | [-]                  | 2,55                    | 3,46                    | 2,22                    | 2,84                   | 3,29                   | 2,48                   |
|                        | Weibull<br>Quantile 0,05 | [N/mm <sup>2</sup> ] | 1,83                    | 2,20                    | 1,46                    | 1,44                   | 2,73                   | 1,32                   |
|                        | Weibull KI 90<br>%       | [N/mm <sup>2</sup> ] | 1,70                    | 2,01                    | 1,33                    | 1,22                   | 2,59                   | 1,07                   |
| ρ <sub>12</sub>        | Mittelwert               | [kg/m <sup>3</sup> ] | 458,98                  | 417,41                  | 445,90                  | 459,87                 | 451,68                 | 504,84                 |
|                        | COV                      | [%]                  | 0,9                     | 2,0                     | 1,3                     | 1,6                    | 3,3                    | 1,0                    |
|                        | Normal<br>Quantile 0,05  | [kg/m <sup>3</sup> ] | 451,90                  | 403,51                  | 436,09                  | 447,69                 | 426,80                 | 496,72                 |
| u                      | Mittelwert               | [%]                  | 12,93                   | 12,86                   | 12,62                   | 13,00                  | 13,07                  | 12,76                  |
|                        | COV                      | [%]                  | 1,4                     | 1,7                     | 2,8                     | 1,2                    | 3,1                    | 1,2                    |
| E <sub>t,90</sub>      | Mittelwert               | [N/mm <sup>2</sup> ] | 974                     | 884                     | 980                     | 843                    | 942                    | 976                    |
|                        | COV                      | [%]                  | 5,1                     | 7,6                     | 2,9                     | 7,6                    | 3,4                    | 4,2                    |
| E <sub>dyn,EF,12</sub> | Einzelwert               | [N/mm <sup>2</sup> ] | 15955                   | 11600                   | 13780                   | 15627                  | 13510                  | 17383                  |
| JRB                    | Mittelwert               | [mm]                 | 1,66                    | 2,71                    | 1,52                    | 2,24                   | 2,84                   | 2,26                   |
|                        | COV                      | [%]                  | 2,2                     | 6,3                     | 3,3                     | 9,6                    | 7,2                    | 1,2                    |
| MA                     | Mittelwert               | [mm]                 | 140,20                  | 141,57                  | 127,47                  | 98,36                  | 123,10                 | 77,87                  |
|                        | COV                      | [%]                  | 11,4                    | 7,6                     | 10,6                    | 8,0                    | 15,7                   | 2,4                    |

 Tab. 3.4 Kennwerte der Lamellen 1007-1012; Seitenware; 1,8 dm<sup>3</sup>

Lamellen 1013-1018; Mittelware; 0,9 dm<sup>3</sup>

| Parameter              | Kennwert                 | Einheit              | Lamelle<br>1013<br>n=5 | Lamelle<br>1014<br>n=8 | Lamelle<br>1015<br>n=10 | Lamelle<br>1016<br>n=4 | Lamelle<br>1017<br>n=5 | Lamelle<br>1018<br>n=4 |
|------------------------|--------------------------|----------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| f <sub>t,90</sub>      | Minimum                  | [N/mm <sup>2</sup> ] | 1,73                   | 1,27                   | 2,58                    | 2,15                   | 2,35                   | 2,22                   |
|                        | Mittelwert               | [N/mm <sup>2</sup> ] | 1,97                   | 2,09                   | 3,28                    | 2,51                   | 2,90                   | 2,49                   |
|                        | Maximum                  | [N/mm <sup>2</sup> ] | 2,12                   | 2,65                   | 4,12                    | 2,87                   | 3,56                   | 2,74                   |
|                        | Median                   | [N/mm <sup>2</sup> ] | 2,05                   | 2,22                   | 3,29                    | 2,50                   | 2,76                   | 2,50                   |
|                        | COV                      | [%]                  | 9,0                    | 20,5                   | 17,7                    | 15,8                   | 16,1                   | 8,8                    |
|                        | Quantile 0,05            | [N/mm <sup>2</sup> ] | 1,75                   | 1,47                   | 2,58                    | 2,16                   | 2,42                   | 2,25                   |
|                        | Weibull-P<br>shape       | [-]                  | 16,47                  | 6,72                   | 6,86                    | 8,69                   | 7,48                   | 15,06                  |
|                        | Weibull-P scale          | [-]                  | 2,04                   | 2,25                   | 3,51                    | 2,66                   | 3,09                   | 2,58                   |
|                        | Weibull<br>Quantile 0,05 | [N/mm <sup>2</sup> ] | 1,70                   | 1,44                   | 2,28                    | 1,89                   | 2,08                   | 2,12                   |
|                        | Weibull KI 90<br>%       | [N/mm <sup>2</sup> ] | 1,60                   | 1,29                   | 2,07                    | 1,67                   | 1,82                   | 1,97                   |
| ρ <sub>12</sub>        | Mittelwert               | [kg/m <sup>3</sup> ] | 424,18                 | 470,66                 | 481,73                  | 487,59                 | 545,59                 | 493,28                 |
|                        | COV                      | [%]                  | 2,7                    | 1,6                    | 2,4                     | 2,0                    | 2,1                    | 3,9                    |
|                        | Normal<br>Quantile 0,05  | [kg/m <sup>3</sup> ] | 405,05                 | 458,01                 | 462,90                  | 471,54                 | 439,09                 | 461,72                 |
| u                      | Mittelwert               | [%]                  | 12,29                  | 12,49                  | 12,15                   | 12,11                  | 11,69                  | 12,30                  |
|                        | COV                      | [%]                  | 3,4                    | 4,0                    | 4,1                     | 6,1                    | 1,7                    | 4,2                    |
| E <sub>t,90</sub>      | Mittelwert               | [N/mm <sup>2</sup> ] | 699                    | 767                    | 1039                    | 910                    | 868                    | 858                    |
|                        | COV                      | [%]                  | 2,9                    | 7,9                    | 8,8                     | 7,6                    | 7,4                    | 8,3                    |
| E <sub>dyn,EF,12</sub> | Einzelwert               | [N/mm <sup>2</sup> ] | 11223                  | 12069                  | 10451                   | 11815                  | 12285                  | 11382                  |
| JRB                    | Mittelwert               | [mm]                 | 3,05                   | 1,71                   | 3,74                    | 1,94                   | 3,01                   | 2,47                   |
|                        | COV                      | [%]                  | 2,9                    | 8,0                    | 9,6                     | 12,6                   | 7,2                    | 9,5                    |
| MA                     | Mittelwert               | [mm]                 | 35,54                  | 31,67                  | 62,67                   | 54,38                  | 40,01                  | 35,44                  |
|                        | COV                      | [%]                  | 9,1                    | 4,4                    | 20,2                    | 8,8                    | 10,2                   | 17,5                   |

Tab. 3.5 Kennwerte der Lamellen 1013-1018; Mittelware; 0,9 dm<sup>3</sup>

Lamellen 1019-1024; Mittelware; 1,8 dm<sup>3</sup>

| Parameter              | Kennwert              | Einheit              | Lamelle 1019<br>n=3 | Lamelle 1020<br>n=11 | Lamelle 1021<br>n=10 | Lamelle 1022<br>n=10 | Lamelle 1023<br>n=0 | Lamelle 1024<br>n=4 |
|------------------------|-----------------------|----------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|---------------------|
| f <sub>t,90</sub>      | Minimum               | [N/mm <sup>2</sup> ] | 0,89                | 1,15                 | 1,14                 | 1,43                 | -                   | 1,58                |
|                        | Mittelwert            | [N/mm <sup>2</sup> ] | 1,59                | 1,87                 | 1,47                 | 1,91                 | -                   | 1,83                |
|                        | Maximum               | [N/mm <sup>2</sup> ] | 2,04                | 2,72                 | 1,69                 | 2,59                 | -                   | 2,03                |
|                        | Median                | [N/mm <sup>2</sup> ] | 1,85                | 1,86                 | 1,45                 | 1,91                 | -                   | 1,86                |
|                        | COV                   | [%]                  | 38,5                | 19,8                 | 11,9                 | 22,2                 | -                   | 10,2                |
|                        | Quantile 0,05         | [N/mm <sup>2</sup> ] | 0,99                | 1,38                 | 1,21                 | 1,45                 | -                   | 1,62                |
|                        | Weibull-P shape       | [-]                  | 3,96                | 5,29                 | 10,52                | 5,17                 | -                   | 14,38               |
|                        | Weibull-P scale       | [-]                  | 1,77                | 2,01                 | 1,54                 | 2,08                 | -                   | 1,90                |
|                        | Weibull Quantile 0,05 | [N/mm <sup>2</sup> ] | 0,84                | 1,15                 | 1,16                 | 1,17                 | -                   | 1,55                |
|                        | Weibull KI 90 %       | [N/mm <sup>2</sup> ] | 0,60                | 1,02                 | 1,09                 | 1,03                 | -                   | 1,43                |
| ρ <sub>12</sub>        | Mittelwert            | [kg/m <sup>3</sup> ] | 443,02              | 406,10               | 437,29               | 395,30               | -                   | 441,48              |
|                        | COV                   | [%]                  | 2,6                 | 1,9                  | 2,0                  | 2,1                  | -                   | 1,9                 |
|                        | Normal Quantile 0,05  | [kg/m <sup>3</sup> ] | 423,83              | 393,22               | 422,76               | 381,84               | -                   | 427,35              |
| u                      | Mittelwert            | [%]                  | 12,04               | 11,97                | 12,61                | 12,38                | -                   | 11,80               |
|                        | COV                   | [%]                  | 2,6                 | 2,1                  | 1,2                  | 2,1                  | -                   | 1,7                 |
| E <sub>t,90</sub>      | Mittelwert            | [N/mm <sup>2</sup> ] | 868                 | 774                  | 776                  | 666                  | -                   | 832                 |
|                        | COV                   | [%]                  | 35,3                | 6,9                  | 8,5                  | 7,7                  | -                   | 15,0                |
| E <sub>dyn,EF,12</sub> | Einzelwert            | [N/mm <sup>2</sup> ] | 10129               | 10548                | 12335                | 10747                | -                   | 9586                |
| JRB                    | Mittelwert            | [mm]                 | 4,02                | 4,65                 | 2,43                 | 3,98                 | -                   | 4,08                |
|                        | COV                   | [%]                  | 2,5                 | 2,4                  | 9,5                  | 3,3                  | -                   | 6,0                 |
| MA                     | Mittelwert            | [mm]                 | 30,00               | 40,30                | 35,70                | 33,27                | -                   | 37,02               |
|                        | COV                   | [%]                  | 15,3                | 6,5                  | 17,3                 | 9,7                  | -                   | 25,7                |

 Tab. 3.6 Kennwerte der Lamellen 1019-1024; Mittelware; 1,8 dm<sup>3</sup>

In der Lamelle 1023 befanden sich aufgrund von vorhandenen Mark und Harz keine Prüfkörper die zur Auswertung herangezogen werden konnten.

### 3. 3. 9 Ergebnisse der Hauptgruppen

Die Ergebnisse der Hauptgruppen ergeben sich aus den Mittelwerten der:

- Einzelprüfkörper der Lamellen 1001-1006 für die Hauptgruppe: Seitenware; 0,9 dm<sup>3</sup>
- Einzelprüfkörper der Lamellen 1007-1012 für die Hauptgruppe: Seitenware; 1,8 dm<sup>3</sup>
- Einzelprüfkörper der Lamellen 1013-1018 für die Hauptgruppe: Mittelware; 0,9 dm<sup>3</sup>
- Einzelprüfkörper der Lamellen 1001-1006 für die Hauptgruppe: Mittelware; 1,8 dm<sup>3</sup>

| Parameter          | Kennwert                 | Einheit              | Seitenware<br>0,9 dm <sup>3</sup><br>n=64 | Seitenware<br>1,8 dm <sup>3</sup><br>n=52 | Mittelware<br>0,9 dm <sup>3</sup><br>n=36 | Mittelware<br>1,8 dm <sup>3</sup><br>n=38 |
|--------------------|--------------------------|----------------------|---|---|---|---|
| f <sub>t,90</sub>  | Minimum                  | [N/mm <sup>2</sup> ] | 2,16                                      | 1,81                                      | 2,05                                      | 1,24                                      |
|                    | Mittelwert               | [N/mm <sup>2</sup> ] | 2,93                                      | 2,63                                      | 2,54                                      | 1,73                                      |
|                    | Maximum                  | [N/mm <sup>2</sup> ] | 3,94                                      | 3,38                                      | 3,01                                      | 2,21                                      |
|                    | Median                   | [N/mm <sup>2</sup> ] | 2,86                                      | 2,67                                      | 2,55                                      | 1,79                                      |
|                    | COV                      | [%]                  | 19,8                                      | 18,5                                      | 14,6                                      | 20,6                                      |
|                    | Quantile 0,05            | [N/mm <sup>2</sup> ] | 2,23                                      | 2,02                                      | 2,11                                      | 1,33                                      |
|                    | Weibull-P<br>shape       | [-]                  | 6,00                                      | 7,96                                      | 10,21                                     | 7,86                                      |
|                    | Weibull-P scale          | [-]                  | 3,15                                      | 2,81                                      | 2,69                                      | 1,86                                      |
|                    | Weibull<br>Quantile 0,05 | [N/mm <sup>2</sup> ] | 1,92                                      | 1,83                                      | 1,92                                      | 1,17                                      |
| Weibull KI 90<br>% | [N/mm <sup>2</sup> ]     | 1,72                 | 1,65                                      | 1,74                                      | 1,03                                      |   |
| ρ <sub>12</sub>    | Mittelwert               | [kg/m <sup>3</sup> ] | 440,12                                    | 456,45                                    | 468,65                                    | 424,64                                    |
|                    | COV                      | [%]                  | 1,5                                       | 1,7                                       | 2,5                                       | 2,1                                       |
|                    | Normal<br>Quantile 0,05  | [kg/m <sup>3</sup> ] | 429,36                                    | 443,78                                    | 449,72                                    | 409,80                                    |
| u                  | Mittelwert               | [%]                  | 12,72                                     | 12,87                                     | 12,17                                     | 12,16                                     |
|                    | COV                      | [%]                  | 3,1                                       | 1,9                                       | 3,9                                       | 1,9                                       |
| E <sub>t,90</sub>  | Mittelwert               | [N/mm <sup>2</sup> ] | 899                                       | 933                                       | 857                                       | 783                                       |

|                 |            |                      |        |        |       |       |
|-----------------|------------|----------------------|--------|--------|-------|-------|
|                 | COV        | [%]                  | 9,8    | 5,2    | 7,1   | 14,7  |
| $E_{dyn,EF,12}$ | Mittelwert | [N/mm <sup>2</sup> ] | 13297  | 14642  | 11538 | 10669 |
| JRB             | Mittelwert | [mm]                 | 2,40   | 2,21   | 2,65  | 3,83  |
|                 | COV        | [%]                  | 3,4    | 5,0    | 8,3   | 4,8   |
| MA              | Mittelwert | [mm]                 | 119,09 | 118,09 | 48,21 | 35,26 |
|                 | COV        | [%]                  | 9,9    | 9,3    | 11,8  | 14,9  |

Tab. 3.7 Kennwerte der Hauptgruppen

### 3. 4 Parameter der Querkzugfestigkeit

#### 3. 4. 1 ANOVA (analysis of variance, Varianzanalyse)

Zur Abklärung welche Parameter statistisch signifikanten Einfluss auf die Querkzugfestigkeit zeigen wurde eine ANOVA durchgeführt. Hierbei wurden die Daten der reduzierten Gruppen herangezogen.

#### 3. 4. 2 ANOVA

Bei der ANOVA werden Gruppen der Querkzugfestigkeiten untereinander auf signifikante Unterschiede, in den Mittelwerten untersucht. Die Gruppen selbst definieren sich hierbei aus der definierten Parametern und dessen Variation (Parameterstufen). Liegt kein Unterschied zwischen den Mittelwerten der Querkzugfestigkeit vor, besteht kein Einfluss des Parameters auf die Querkzugfestigkeit. Ist ein signifikanter Unterschied zwischen den Mittelwerten der Querkzugfestigkeit und Parameterstufen gegeben, so zeigt sich ein Einfluss des Parameters auf die Querkzugfestigkeit.

Signifikanz-Code des Berechnungsprogrammes „R“:

```

" *** "    .... >0
" ** "    .... 0,001
" * "    .... 0,05
" . "    .... 0,1
" "    .... 1

```

Die ANOVA wurde in Schritten durchgeführt. Nach jedem Schritt wurden jene Parameter eliminiert, die keine Signifikanz gegenüber der Querkzugfestigkeit aufwiesen. Zu Beginn wurden alle Parameter analysiert. Jene Parameter die keine Signifikanz aufwiesen wurden im weiteren Schritt nicht mehr berücksichtigt. Dieser Vorgang wurde so lange wiederholt bis sich das Ergebnis „stabil“ darstellte und die beschreibenden Parameter auf die Wesentlichen reduziert waren.

Ausgangsparameter der ANOVA:

- Astparameter (insgesamt 24, siehe Abschnitt 3. 2)
  - Rohdichte,  $\rho_{12}$
  - dynamischer E-Modul,  $E_{dyn,EF,12}$
  - Markabstand, MA
  - mittlere Jahringbreite, JRB
  - Holzfeuchte, HF
  - Querkzug-E-Modul,  $E_{t,90}$
  - Harzflächenverhältnis
  - Nennvolumen
  - Nenngrundfläche
- **Gruppe  $P_{ges,red}$**  : Einzelprüfkörper mit dem Volumen  $0,9 \text{ dm}^3$  (Querkzugfläche  $150 \times 150 \text{ mm}$ ) und Einzelprüfkörper mit dem Volumen  $1,8 \text{ dm}^3$  (Querkzugfläche  $150 \times 300 \text{ mm}$ );  $n = 190$

ANOVA 1. Schritt; folgende signifikante Parameter wurden gefunden:

|  |     |
|--|-----|
| $E_{t,90}$   | *** |
| Markabstand  | *** |
| KAR  | *** |
| SMF  | **  |
| NSK  | *   |
| TKAR   | *   |
| Verhältnis verwachsene<br>Astfläche der Seite 4 zu<br>Mantelfläche der Seite 4 | *   |
| $E_{dyn,EF,12}$  | .   |

ANOVA 2. Schritt Ergebnis:

|                 |     |
|-----------------|-----|
| $E_{t,90}$      | *** |
| Markabstand     | *** |
| NSK             | **  |
| KAR             | *   |
| TKAR            | *   |
| $E_{dyn,EF,12}$ | *   |
| SMF             | .   |

Ab dem 2. Schritt keine Veränderung, dh. für  $P_{ges,red}$  wurden die Parameter des 2. Schrittes als Querkzugfestigkeits beeinflussend ermittelt.

- **Gruppe  $P_{0,9,red}$**  : Einzelprüfkörper mit dem Volumen  $0,9 \text{ dm}^3$  (Querkzugfläche  $150 \times 150 \text{ mm}$ ) ;  $n = 100$

ANOVA 1. Schritt Ergebnis:

|                 |     |
|-----------------|-----|
| $\rho_{12}$     | *** |
| $E_{t,90}$      | *** |
| JRB             | *** |
| TKAR            | **  |
| HF              | **  |
| $E_{dyn,EF,12}$ | .   |
| KAR             | .   |

Verhältnis Astfläche  
der Seite 4 zu  
Mantelfläche der Seite 4 .

ANOVA 2. Schritt Ergebnis:

|             |     |
|-------------|-----|
| $\rho_{12}$ | *** |
|-------------|-----|



|                 |     |
|-----------------|-----|
| $E_{t,90}$      | *** |
| JRB             | *** |
| TKAR            | **  |
| HF              | **  |
| KAR             | *   |
| $E_{dyn,EF,12}$ | .   |

Ab dem 2. Schritt keine Veränderung.

- **Gruppe P<sub>1.8,red</sub>** : Einzelprüfkörper mit dem Volumen 1,8 dm<sup>3</sup> (Querszugfläche 150 x 150 mm) ; n = 90

ANOVA 1. Schritt Ergebnis:

|   |     |
|---|-----|
| HF  | *** |
| $E_{t,90}$  | *** |
| Markabstand   | *** |
| JRB   | **  |
| Verhältnis Asfläche 2 zu Mantelfläche 2             | **  |
| NSK   | *   |
| $\rho_{12}$   | .   |
| WRatio  | .   |
| Verhältnis verwachsene Asfläche 4 zu Mantelfläche 4 | .   |

ANOVA 2. Schritt Ergebnis:

|            |     |
|------------|-----|
| HF         | *** |
| $E_{t,90}$ | *** |

|             |     |
|-------------|-----|
| Markabstand | *** |
| JRB         | **  |
| NSK         | .   |
| $\rho_{12}$ | .   |

ANOVA 3. Schritt Ergebnis:

|             |     |
|-------------|-----|
| HF          | *** |
| $E_{t,90}$  | *** |
| Markabstand | *** |
| JRB         | **  |
| $\rho_{12}$ | .   |

Ab dem 3. Schritt keine Veränderung.

Als Ergebnis der ANOVA für die verschiedenen Gruppen können die folgenden Parameter die die Querkzugfestigkeit beeinflussen nach angegeben werden:

- Markabstand, MA
- Querkzug-E-Modul,  $E_{t,90}$
- mittlere Jahrringbreite, JRB
- dynamische E-Modul,  $E_{dyn,EF,12}$
- Rohdichte,  $\rho_{12}$

### Diskussion der Ergebnisse:

Der Markabstand wies in den Gruppen die höchste Signifikanz gegenüber der Querkzugfestigkeit auf, gefolgt vom Querkzug-E-Modul. Für die mittlere Jahrringbreite der Prüfkörper konnte in den Gruppen  $P_{0,9,red}$  und  $P_{1,8,red}$  eine hohe Signifikanz ermittelt werden. Der dynamische E-Modul lies in den Gruppen  $P_{ges,red}$  und  $P_{0,9,red}$  eine geringe Korrelation mit der Querkzugfestigkeit erkennen.

Die Rohdichte wies nur geringe Signifikanz in der Gruppe  $P_{1,8,red}$  auf. Da die Rohdichte eine Kenngröße für die Bestimmung einer Festigkeit ist, wird sie in den folgenden Überlegungen miteinbezogen.

### 3. 4. 3 Scatterplots

Um die in der ANOVA gefundenen Querkzugfestigkeit beeinflussenden Parameter auf ihre Signifikanz hin auch qualitativ zu bestätigen, wurde ein Scatterplot durchgeführt. Der Scatterplot ermöglicht es alle Parameter untereinander auf Korrelation zu untersuchen. Oberhalb der Diagonale wird dabei der Plot der einzelnen Parameter gegeneinander und eine Ausgleichsline die den Trend angibt angezeigt. Unterhalb der Diagonale wird der Korrelationskoeffizient nach Spearman der Parameter gegeneinander angezeigt. Der Korrelationskoeffizient nach Spearman ist ein Rangkorrelationskoeffizient und ist daher für die Beschreibung der in den Scatterplots gezeigten Trendlinien besser geeignet, als ein linearer Korrelationskoeffizient.

Die Scatterplots zeigen die reduzierten Gruppen, siehe Abb. 3.33 bis Abb. 3.35. Abb. 3.36 bis Abb. 3.38 zeigen die auf die identifizierten Hauptparameter reduzierten Scatterplots der Gruppen.

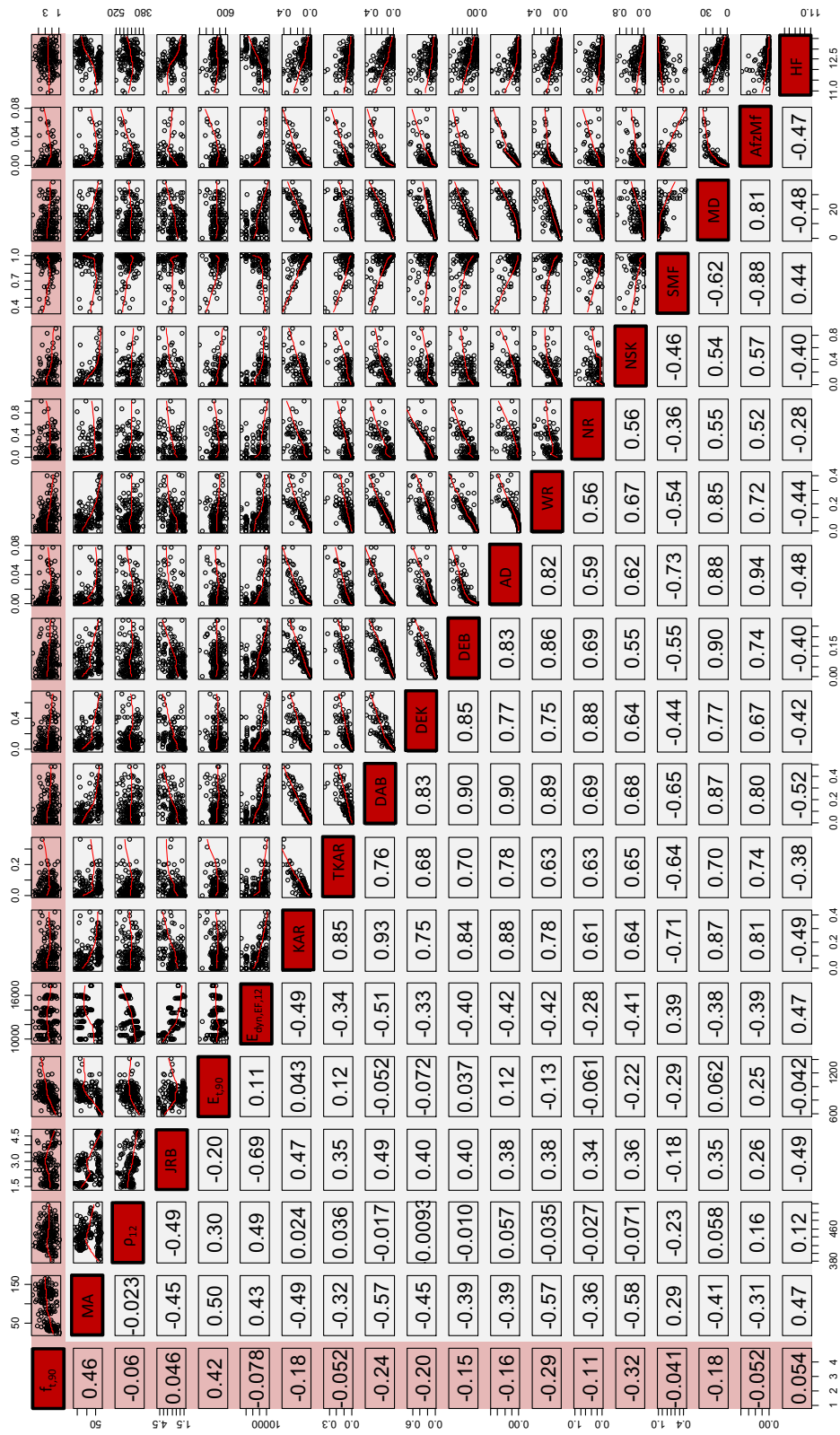


Abb. 3.33 Scatterplot  $P_{ges,red}$



Abb. 3.34 Scatterplot  $P_{0,9,red}$

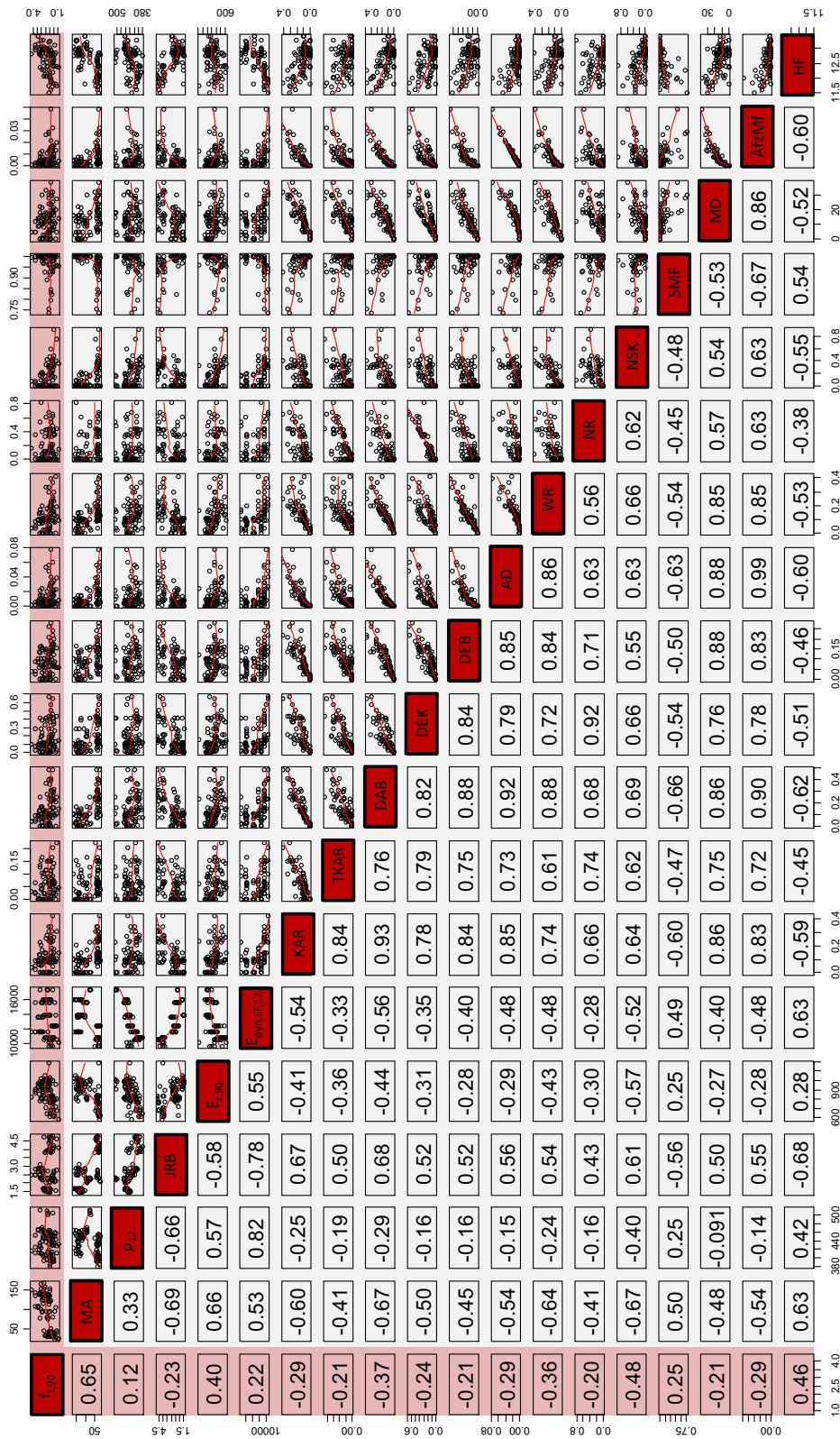


Abb. 3.35 Scatterplot P<sub>1,8,red</sub>

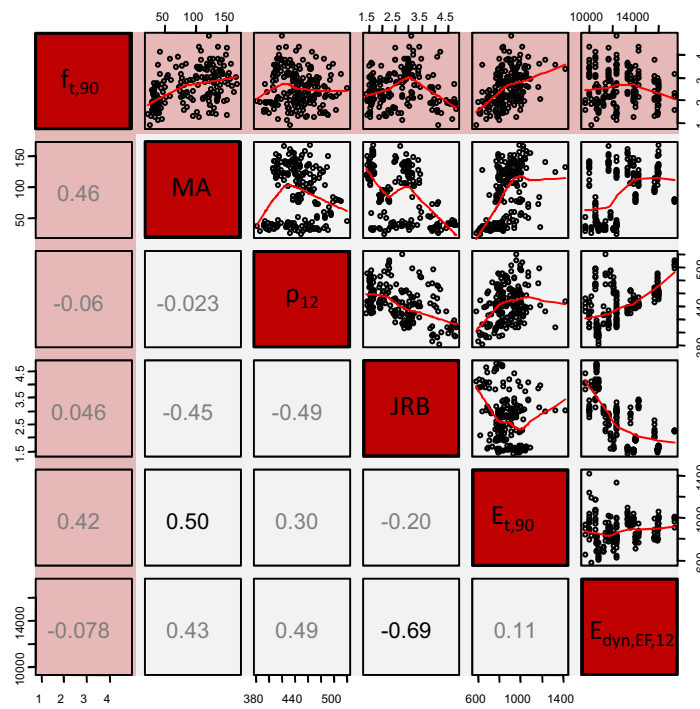


Abb. 3.36 Scatterplot  $P_{ges,red}$  der identifizierten Hauptparameter

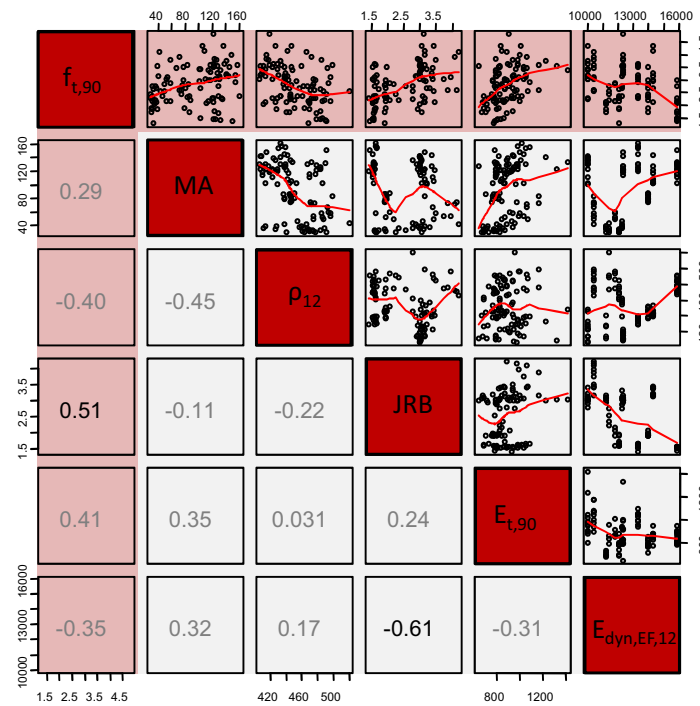
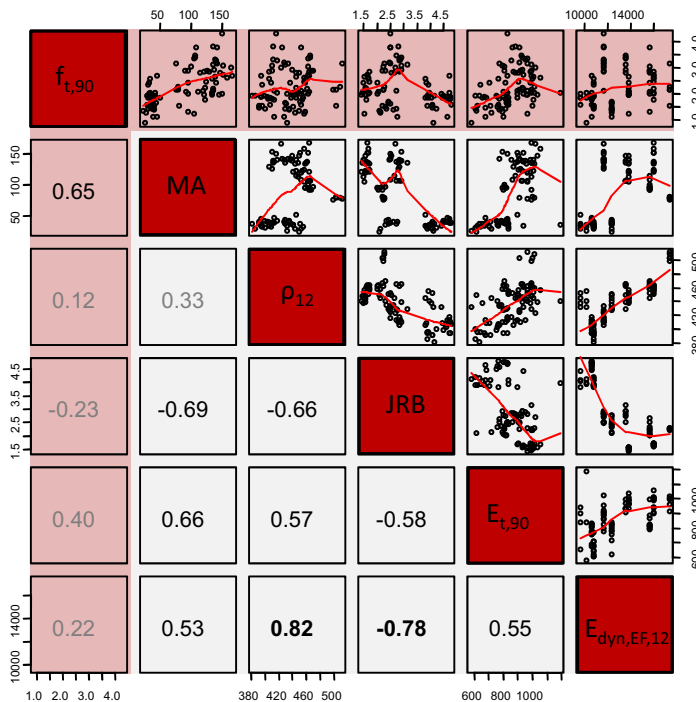


Abb. 3.37 Scatterplot  $P_{0,9,red}$  der identifizierten Hauptparameter


 Abb. 3.38 Scatterplot  $P_{1,8,red}$  der identifizierten Hauptparameter

### Diskussion der Scatterplots:

Die Korrelation des Markabstandes mit der Querkzugfestigkeit wird in sämtlichen Gruppen bestätigt, d.h. je größer der Markabstand, desto höher die Querkzugfestigkeit. Der Markabstand besitzt in der Gruppe  $P_{1,8,red}$  mit 0,65 die höchste Korrelation der gesamten Parameter. Weiters ist eine positive Korrelation des Markabstandes mit dem Querkzug-E-Modul gegeben.

Die aus der ANOVA ermittelte hohe Signifikanz der Querkzugfestigkeit gegen den Querkzug-E-Modul ist auch in den Scatterplots zu erkennen. Ein Korrelationsmaß von 0,4 ist bei sämtlichen Gruppen angezeigt.

Die bereits in der ANOVA festgestellte geringe Signifikanz des dynamischen E-Moduls gegen die Querkzugfestigkeit wurde durch die Scatterplots bestätigt. Eine Korrelation der beiden Parametern ist nicht gegeben.

Die mittlere Jahringbreite korreliert negativ zur Rohdichte. Dieser Zusammenhang ist nachvollziehbar, da mit abnehmender Jahringbreite die Rohdichte bei Nadelhölzern steigt.

Die Rohdichte weist im Scatterplot der Gruppe  $P_{0,9,red}$  eine negative, in Gruppe  $P_{ges,red}$  keine und in der Gruppe  $P_{1,8,red}$  eine leicht positive Korrelation gegenüber der Querkzugfestigkeit auf. Es ist kein definitiver Trend der Korrelation zu erkennen. Dies kann auf die große Bandbreite von  $\pm 30\%$  der Querkzugfestigkeit innerhalb der Einzelamelle und der folgenden Vermischung innerhalb der Gruppe zurückgeführt werden. Ein Zusammenhang zwischen Querkzugfestigkeit und Rohdichte kann somit nicht bestätigt werden.



### 3. 4. 4 Untersuchung der Korrelation der Querkzugfestigkeit zwischen Abschnitten einer Lamelle

Die Lamellen wurden in Abschnitte unterteilt, bei Lamellen der Querkzugfläche 150 x 150 mm in 24 Abschnitte (jeder zweite Abschnitt ein Einzelprüfkörper) zu je 150 mm Länge und bei der Querkzugfläche von 150 x 300 mm in 12 Abschnitte zu je 300 mm Länge. Pro Lamelle wurden jeweils 12 Einzelprüfkörper entnommen. Für die Ermittlung der Korrelation wurden die Querkzugfestigkeiten der Einzelprüfkörper herangezogen. Der geometrische Abstand zwischen den Einzelprüfkörpern betrug somit immer 330 mm, die zusätzlichen 30 mm ergeben sich aus den für die Prüfkörperherstellung nötigem Übermaß (siehe Abschnitt 2. 1. 2). Die Korrelation zwischen den Abschnitten wurde unter Variation der Abstände als ein Vielfaches des Grundabstandes von 330 mm ermittelt. Somit ergeben sich: Abstand 1 = 330 mm; Abstand 2 = 660 mm; ... ; Abstand 11 = 3.960 mm.

Es ergeben sich somit 11 verschiedene Abstände, da definitionsgemäß der Abstand 0 (Vergleich der Querkzugfestigkeit eines Einzelprüfkörpers mit sich selbst) ein Korrelationsmaß von 1 aufweisen muß.

Für den Abstand 1 ergeben sich für die Gruppe  $P_{ges}$  somit 264 Wertepaare (11 Abschnitte und 24 Lamellen). Als Annahme zur Ermittlung der Korrelation zwischen diesen Wertepaaren wurde eine lineare Beziehung angenommen. Dementsprechend wurde ein lineares Korrelationsmaß berechnet, welches den Wert für den Plot liefert (siehe Abb. 3.39). Für die Gruppen  $P_{0,9}$  und  $P_{1,8}$  halbierten sich die Anzahl der Werte, da jeweils 12 Lamellen untersucht werden.

#### Diskussion der Ergebnisse:

Beim Abstand 1 weist die Korrelation ein Maß von 0,5 bis 0,7, in Abhängigkeit der betrachteten Gruppe, auf. Ab dem Abstand 2 nimmt das Korrelationsmaß Werte um 0,5 an. Es besteht gleichförmige Korrelation, d.h. ab diesem Abstand besteht kein Zusammenhang mehr zwischen Querkzugfestigkeit und Abstand. Innerhalb der Lamelle besteht, unabhängig vom Abstand, eine Korrelation von rund 0,5 zwischen den Querkzugfestigkeiten der Elemente.

Die gleichförmige Korrelation lässt sich über die Abhängigkeit der Querkzugfestigkeit vom Grundmaterials erklären. Die Lamelle besitzt definierte globale Parameter die sich über die Lamelle nicht wesentlich verändern wie die Rohdichte, das Längs-E-Modul, die Jahrringbreite und der Markabstand. Diese Abhängigkeit zeigt sich in der gleichförmigen Korrelation hier mit rund 0,5.

Da die Lamelle lokale Störstellen wie Harz, Äste, Ringschäle, Risse, etc. ausweisen kann, besitzt die Korrelation zum einen eine gewisse Bandbreite. Zum Anderen führen diese lokalen Merkmale zur stochastischen Ausprägung der lokalen Querkzugfestigkeit.

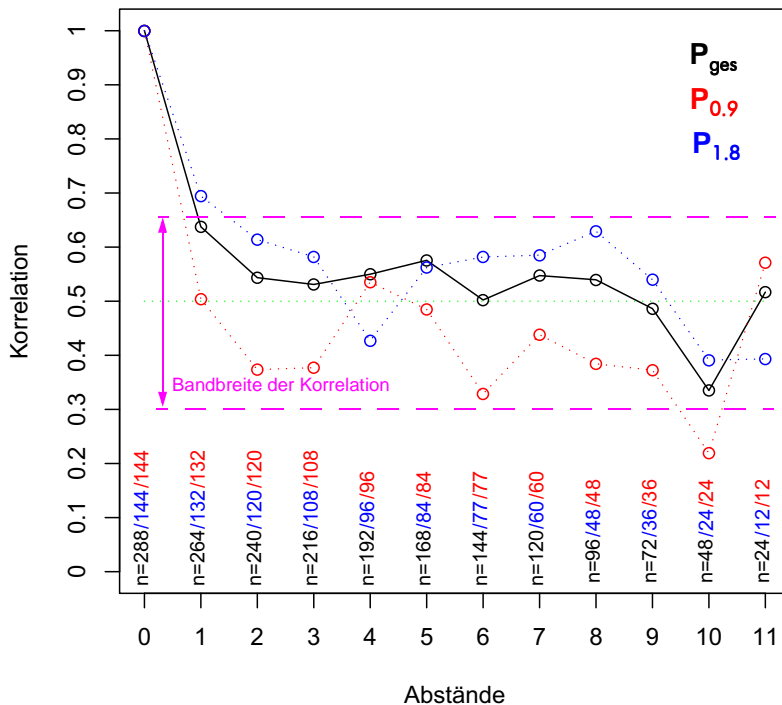


Abb. 3.39 Gleichförmige Korrelation der Querkzugfestigkeit

### 3.5 Volumeneffekt $k_{vol}$

#### 3.5.1 Serieller und paralleler Volumeneffekt

##### Serieller Volumeneffekt

Der serielle Volumeneffekt kann mit Hilfe des Kettenmodells (siehe Abb. 3.40) beschrieben werden. Hierbei gilt, daß jede Kette beim schwächsten Glied versagt. Bei theoretisch unendlich vielen Kettengliedern sinkt laut Weibull-Theorie [Weibull (1939)] die Festigkeit auf Null. Zudem besteht zwischen den einzelnen Kettengliedern keine Korrelation, alle Kettenglieder verhalten sich untereinander völlig unabhängig. In der Praxis tritt dieser Fall nie ein.

Die BSH-Prüfkörper wurden aus 3 bzw. 6 Einzelprüfkörpern zusammengesetzt, wobei eine Korrelation zu der Querkzugfestigkeit innerhalb der Lamelle von rund 0,5 nachgewiesen werden konnte. Jeder Einzelprüfkörper innerhalb des BSH-Prüfkörper verhält sich so wie das Glied einer Kette. Das Versagen eines Einzelprüfkörpers führt zum Versagen des gesamten Prüfkörpers. Daraus folgt, dass die Querkzugfestigkeit der BSH-Prüfkörper

eine Minimalfestigkeit des Festigkeitspotentials der Elemente darstellt. Die aus den Versuchen ermittelte Querkzugfestigkeit des Einzelprüfkörpers ist hingegen die maximale Zugkraft die übertragen werden kann. Da die BSH-Prüfkörper aus Abschnitten von Lamellen hergestellt wurden, aus denen auch die Einzelprüfkörper entnommen und geprüft wurden, können die Querkzugfestigkeiten nicht direkt auf ihre Volumenabhängigkeit hin untersucht werden. Hierfür wurde die minimale Querkzugfestigkeit der Einzelprüfkörper pro Lamelle ermittelt. Aus den so ermittelten Minimalquerkzugfestigkeiten der Einzelprüfkörper pro Lamelle wurde der Mittelwert der Querkzugfestigkeit berechnet, er betrug  $2,11 \text{ N/mm}^2$  (siehe Tab. 3.8). Der Mittelwert der Querkzugfestigkeit der BSH-Prüfkörper mit einem Nennvolumen von  $2,7 \text{ dm}^3$  (bestehend aus 3 Einzelprüfkörpern) betrug  $1,58 \text{ N/mm}^2$  mit einem COV von 29,1% und einem 5% Fraktilwert von  $1,0 \text{ N/mm}^2$ . Für die BSH-Prüfkörper mit einem Nennvolumen von  $5,4 \text{ dm}^3$  (bestehend aus 6 Einzelprüfkörpern) betrug der Mittelwert der Querkzugfestigkeit  $1,26 \text{ N/mm}^2$  mit einem COV von 18,7% und einem 5% Fraktilwert von  $0,89 \text{ N/mm}^2$ . Mit Hilfe des Mittelwertes der Minimalquerkzugfestigkeiten der Einzelprüfkörper und den Mittelwerten der Querkzugfestigkeiten der BSH-Prüfkörper konnte die Abhängigkeit der Querkzugfestigkeit von der Anzahl der seriell beanspruchten Elemente ermittelt werden (siehe Abb. 3.44).

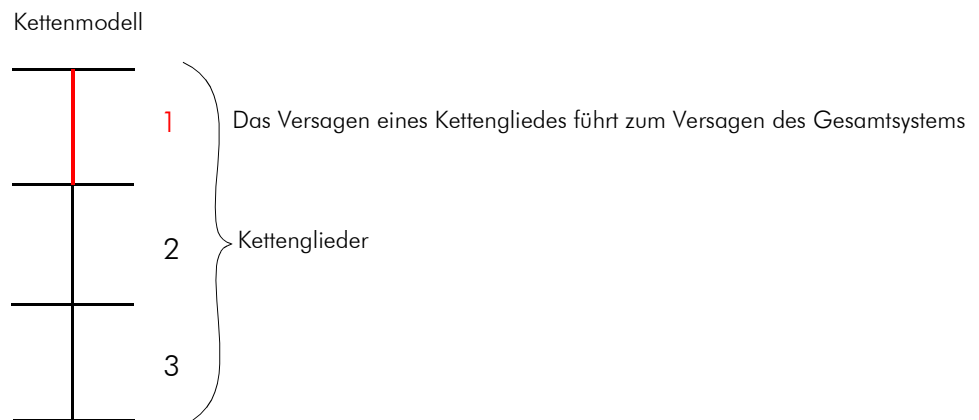


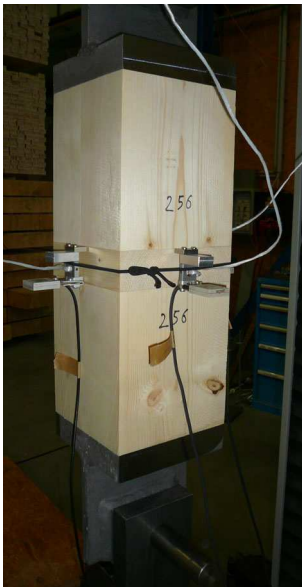
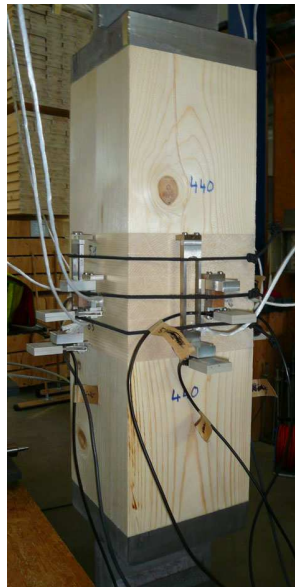
Abb. 3.40 Darstellung des Kettenmodells

| Parameter       | Kennwert   | Einheit           | $0,9 \text{ dm}^3$<br>$n=12$ |
|-----------------|------------|-------------------|------------------------------|
| $f_{t,90,\min}$ | Minimum    | $[\text{N/mm}^2]$ | 1,27                         |
|                 | Mittelwert | $[\text{N/mm}^2]$ | 2,11                         |
|                 | Maximum    | $[\text{N/mm}^2]$ | 3,24                         |
|                 | Median     | $[\text{N/mm}^2]$ | 2,19                         |

|  |                       |                      |      |
|--|-----------------------|----------------------|------|
|  | COV                   | [%]                  | 25,6 |
|  | Quantile 0,05         | [N/mm <sup>2</sup> ] | 1,32 |
|  | Weibull-P shape       | [-]                  | 4,38 |
|  | Weibull-P scale       | [-]                  | 2,31 |
|  | Weibull Quantile 0,05 | [N/mm <sup>2</sup> ] | 1,17 |
|  | Weibull KI 90 %       | [N/mm <sup>2</sup> ] | 1,02 |

Tab. 3.8 Statistik der Minimalquerzugfestigkeiten der Lamellen (1001-1006 und 1013-1018)

Für die Betrachtung des seriellen Volumeneffektes wurden die Prüfkörper mit einer Querzugfläche von 150 x 150 mm herangezogen (siehe Abb. 3.47).


 Einzelprüfkörper  
Volumen 0,9 dm<sup>3</sup>

 BSH-3 Einzelprüfkörper  
Volumen 2,7 dm<sup>3</sup>

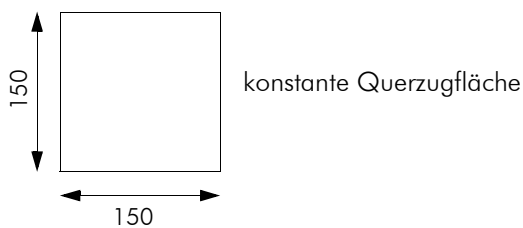
 BSH-6 Einzelprüfkörper  
Volumen 5,4 dm<sup>3</sup>


Abb. 3.41 Prüfkörper mit einer Querzugfläche von 150 x 150 mm

## Paralleler Volumeneffekt

Der parallele Systemeffekt ist Teil des Seilkettenmodells (siehe Abb. 3.42) welches Mistler [1] entwickelt hat. Mistler beschreibt dabei ein System bestehend aus parallel angeordneten Seilen, welche im System als Kettenglieder wirken. Kommt es zum Versagen eines Seiles, kommt es zur Lastumlagerung innerhalb des Kettengliedes, die verbleibenden Seile übernehmen die Belastung.

Als erste Annahme für das parallele Systemverhalten wird davon ausgegangen, dass eine volle Lastumlagerung innerhalb des Querschnittes möglich ist. In Folge wird eine Konzentration der Quersugfestigkeiten der Gruppen um die Mittelwerte aufgrund der Homogenisierung und einhergehender Reduzierung der Streuungen erwartet. Aufgrund dessen wurde der parallele Volumeneffekt mit Hilfe der Mittelwerte der Quersugfestigkeit der zwei Quersugflächen von 150 x 150 mm und 150 x 300 mm dargestellt (siehe Abb. 3.44).

Als Ergebnis der Versuche konnte nur das parallele Systemverhalten (Verhalten der Seile im Kettenglied) ermittelt werden, da die Versuche nur an Einzelprüfkörpern mit lediglich verschiedener Länge durchgeführt wurden. Die Länge des Prüfkörper ist dabei äquivalent zur Anzahl der Seile. Um das Seilkettenmodell auf die Versuche ausweiten zu können, müssten BSH-Prüfkörper (jeder Einzelprüfkörper ein Kettenglied) mit der Quersugfläche 150 x 300 mm geprüft werden.

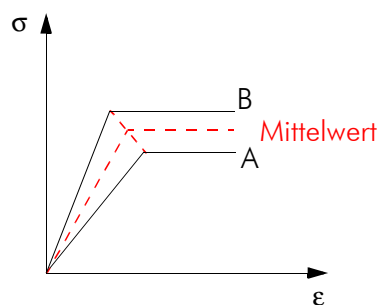
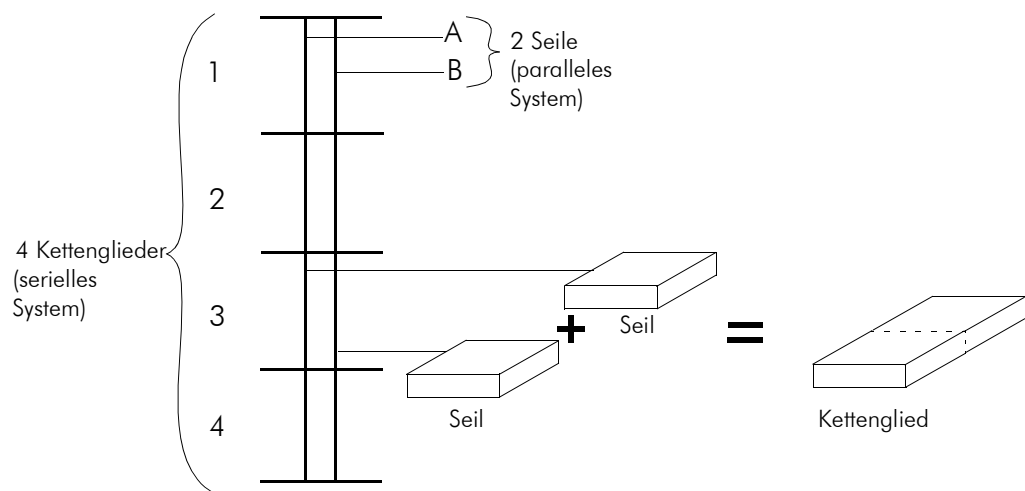
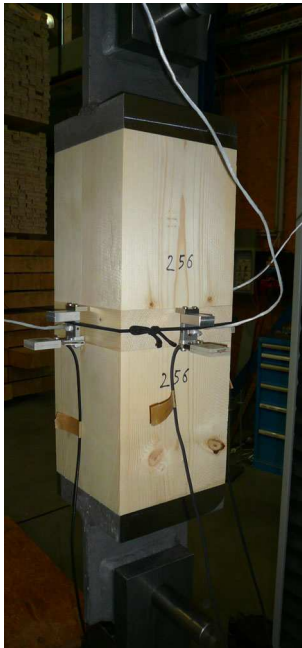
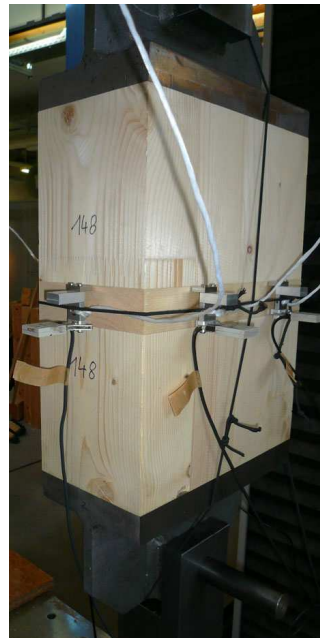
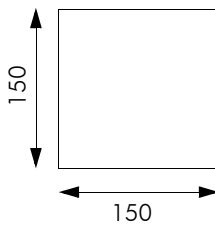


Abb. 3.42 Seilkettenmodell



Einzelprüfkörper  
Volumen 0,9 dm<sup>3</sup>



Einzelprüfkörper  
Volumen 1,8 dm<sup>3</sup>

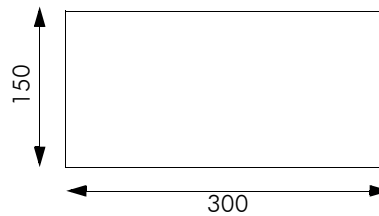


Abb. 3.43 Prüfkörper mit Querschnittsflächen von 150 x 150 mm und 150 x 300 mm

| Anzahl Einzelprüfkörper | Querschnittshöhe [mm] | serieller Effekt (Querschnittsfläche 150 x 150 mm) Volumen [dm <sup>3</sup> ] | paralleler Effekt (Querschnittsfläche 150 x 300 mm) Volumen [dm <sup>3</sup> ] |
|-------------------------|-----------------------|---|--|
| 1                       | 40                    | 0,9   | 1,8  |
| 3 (BSH)                 | 120                   | 2,7   | -  |
| 6 (BSH)                 | 240                   | 5,4   | -  |

Tab. 3.9 Tabelle der Volumen

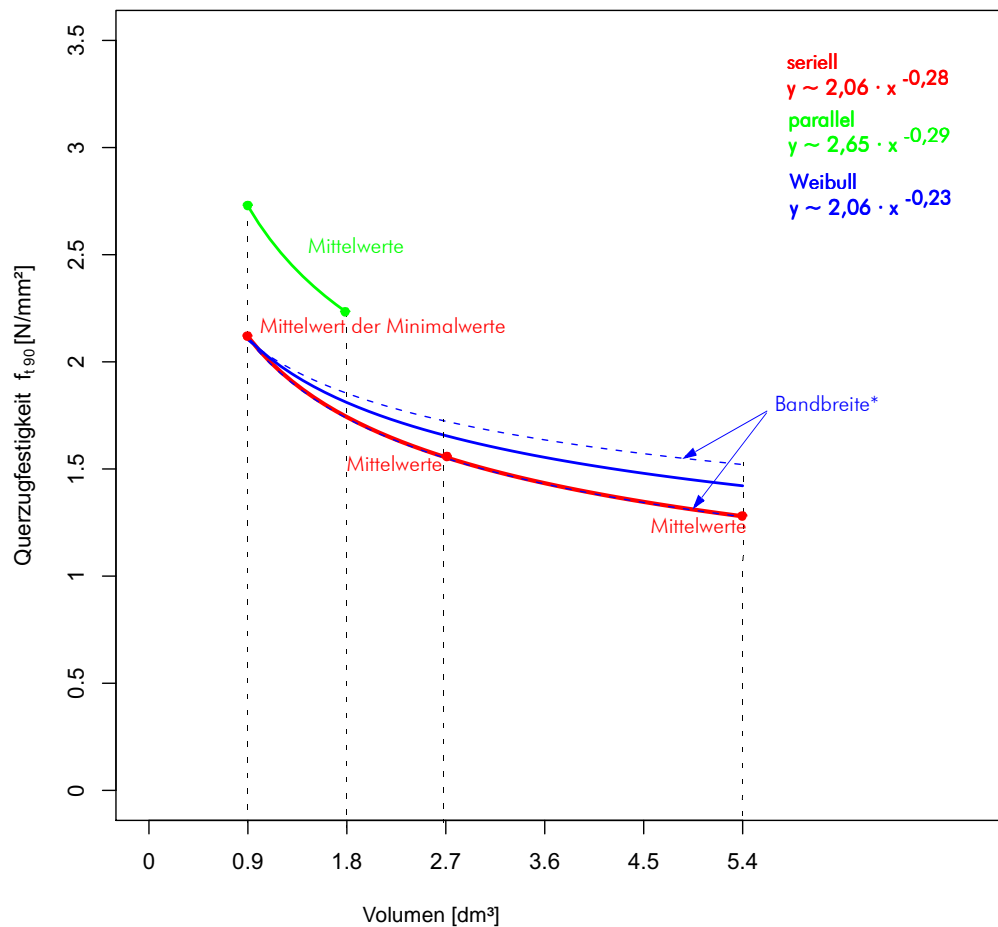


Abb. 3.44 Einfluss des Volumens auf die Querzugfestigkeit  
 \*Abgeschätzte Bandbreite der Funktionsverläufe auf Basis der „weakest link“-Theorie nach Weibull, aufgrund der statistischen Unschärfe in der Ermittlung des Variationskoeffizienten bzw. des  $\beta$ -Parameters der Weibullverteilung.

Sowohl der serielle als auch parallele Funktionsverlauf in Abb. 3.44 geben den Einfluss des „Volumens“ auf die Querzugfestigkeit wieder. Auch der Funktionsverlauf, der mit Hilfe der Weibull-Theorie ermittelt wurde, gibt die Volumenabhängigkeit wieder, jedoch wäre mit einem stärkeren Abfall der Funktion gegenüber der seriellen Funktion zu rechnen. An der abgeschätzten Bandbreite der Streuung, welche aufgrund der begrenzten Prüfkörperanzahl einer statistischen Unsicherheit unterliegt, ist zu erkennen, dass im unteren Bereich der Bandbreite sich die serielle Funktion und die Weibull-Funktion decken, die Weibull-Funktion nähert sich dem erwarteten Verlauf. Im Abschnitt 3. 5. 2 wird auf diese Effekte genauer eingegangen.

Die Querkzugfestigkeit der Lamellen, mit der Querkzugfläche von 150 x 150 mm, gegenüber dem Volumen ist in Abb. 3.45 dargestellt. In der Lamelle Nr. 1014 ist die Volumenabhängigkeit der Querkzugfestigkeit nicht zu erkennen. In der Lamelle Nr. 1006 tritt beim Volumen von 2,7 dm<sup>3</sup> die höchste Querkzugfestigkeit auf. Bei den restlichen Lamellen ist die Volumenabhängigkeit der Querkzugfestigkeit deutlich ersichtlich.

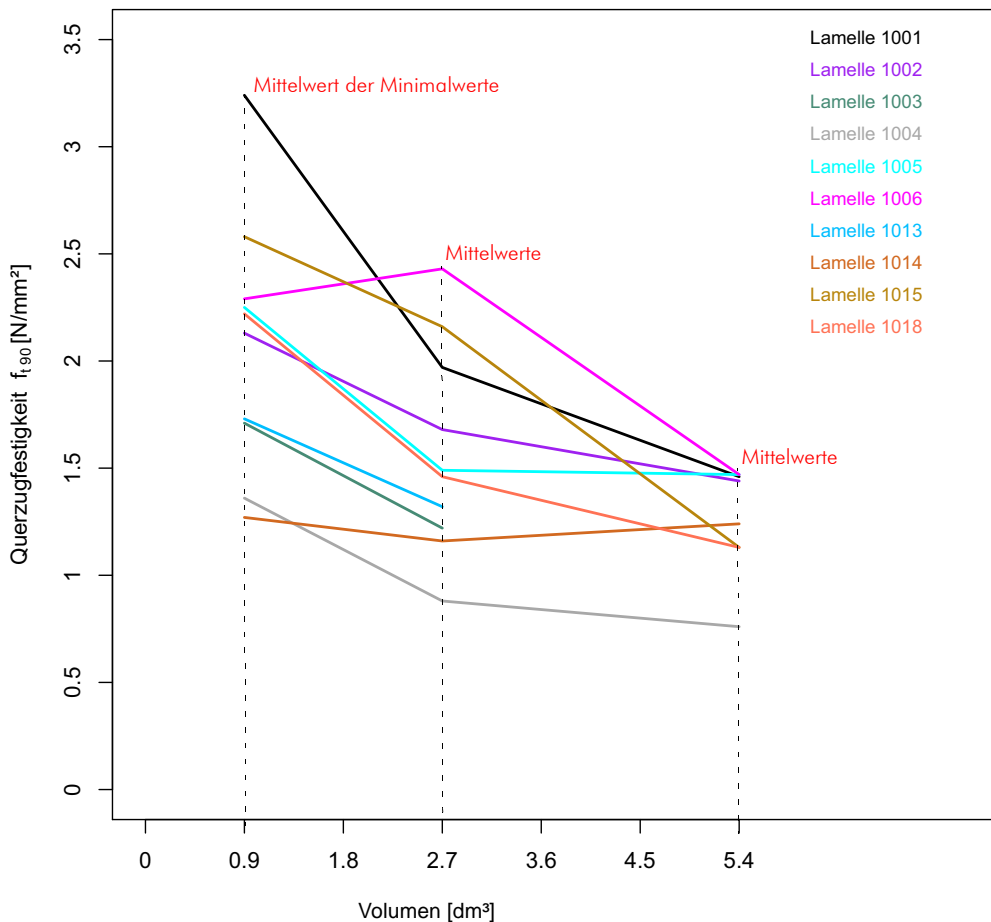


Abb. 3.45 Einfluss des Volumens auf die Querkzugfestigkeit der Einzellamellen

### 3. 5. 2 Sperreffekt

Der in Abschnitt 3. 5. 1 in Abb. 3.44 dargestellte Plot entspricht nicht der in der Praxis zu erwartenden Volumenabhängigkeit der Querkzugfestigkeit.

Laut Weibull-Theorie sinkt mit zunehmenden Volumen die Querkzugfestigkeit. Das aus den Versuchen ermittelte Verhalten für den seriellen Systemeffekt weist in Abb. 3.44 eine geringere Querkzugfestigkeit auf wie jene auf Basis des Weibull-Effektes. Ein gegenteiliges Verhalten wurde erwartet, da eine Abhängigkeit der Querkzugfestigkeit innerhalb der Lamelle von rund 0,5 festgestellt wurde.

Eine mögliche Erklärung wird in einem Sperreffekt gesehen. Der Prüfkörper wird an der



freien Verschiebung an der Kontaktstelle Prüfkörper-Lasteinleitungsholz gehindert. Dies führt zu Eigenspannungseffekten die die Ergebnisse verfälschen können.

Um diesen Sperreffekt zu berücksichtigen wurde in einer ersten ingenieurmäßigen Annahme jeweils  $1/4$  des Einzelprüfkörpers, welcher sich an der Kontaktfläche befindet, vom Volumen abgezogen (siehe Abb. 3.46).

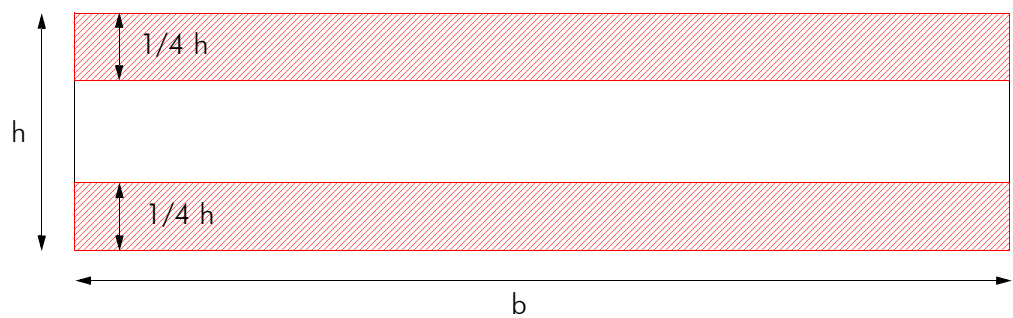


Abb. 3.46 Sperreffekt der Prüfkörper

Die Volumen der Prüfkörper verringern sich aufgrund des Sperreffektes entsprechend der Tab. 3.10:

| Anzahl Einzelprüfkörper | Querschnittshöhe [mm] | serieller Effekt (Querzugfläche 150 x 150 mm) Volumen [dm <sup>3</sup> ] | paralleler Effekt (Querzugfläche 150 x 300 mm) Volumen [dm <sup>3</sup> ] |
|-------------------------|-----------------------|--|---|
| 1                       | 20                    | 0,45   | 0,9   |
| 3                       | 100                   | 2,25   | -   |
| 6                       | 220                   | 4,95   | -   |

Tab. 3.10 Tabelle der reduzierten Volumen aufgrund des Sperreffektes

Aufgrund des abgeschätzten Sperreffektes ergibt sich nun folgende Darstellung (siehe Abb. 3.47):

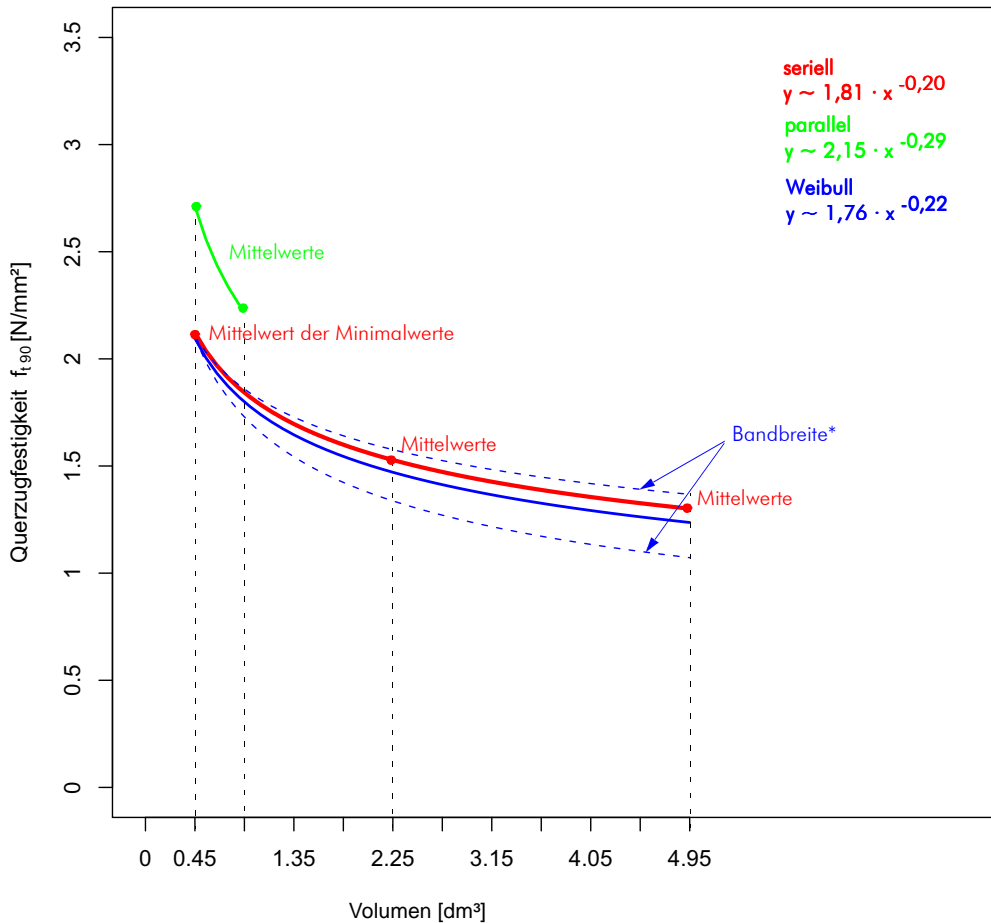


Abb. 3.47 Einfluss des Volumens auf die Querzugfestigkeit mit abgeschätzten Sperreffekt

Die Werte der Querzugfestigkeiten bleiben für die Darstellung in Abb. 3.47 die Selben, es werden ihnen lediglich die Sperreffekt bereinigten Volumina zugewiesen. Die Weibull-Funktion weist in Folge dessen den stärksten Abfall der Querzugfestigkeit auf. Da laut Weibull-Theorie, sich jedes Element unabhängig voneinander verhält, ist das zu erwarten.

## 3. 6 Zusammenfassung

### 3. 6. 1 Allgemeines

Ziel dieser Diplomarbeit war es den Volumeneffekt und wesentliche, die Querkzugfestigkeit beeinflussenden, Parameter zu ermitteln.

### 3. 6. 2 Parameter der Querkzugfestigkeit

Folgende Parameter wurden aufgrund der durchgeführten Versuche ermittelt:

|                     | Art des Parameters | Verhalten des Parameters | Einfluss auf die Querkzugfestigkeit |
|---------------------|--------------------|--------------------------|-------------------------------------|
| Trocknungsrisse     | Faktor (0/1)       | 1                        | negativ                             |
| Mark                | Faktor (0/1)       | 1                        | negativ                             |
| Harz                | Faktor (0/1)       | 1                        | negativ                             |
| Ast                 | Faktor (0/1)       | 1                        | kein Einfluss vorhanden             |
| Markabstand         | Kennwert           | steigend                 | positiv                             |
| Querkzug-E-Modul    | Kennwert           | steigend                 | positiv                             |
| Jahringbreite       | Kennwert           | steigend                 | negativ                             |
| dynamisches E-Modul | Kennwert           | steigend                 | kein Einfluss vorhanden             |
| Rohdichte           | Kennwert           | steigend                 | kein Einfluss vorhanden             |

Tab. 3.11 Parameter der Querkzugfestigkeit

### 3. 6. 3 Volumeneffekt

Die Abhängigkeit der Querkzugfestigkeit vom Volumen konnte anhand der Versuche bestätigt werden. Im Rahmen der getroffenen Abschätzungen konnten folgende Funktion für die Volumenabhängigkeit der Querkzugfestigkeit abgeschätzt werden:

- für den seriellen Systemeffekt mit Sperreffekt:

$$f_{t,90,s,mean} \sim 1,81 \cdot N^{-0,20}$$

N ... Anzahl der seriellen Elemente, mit einer Querkzugfläche von 150 x 150 mm



## **1 Zukünftige Forschungsschwerpunkte**

### **1. 1 Eigenspannung**

#### **1. 1. 1 Eigenspannungen der Lamelle**

Jede einzelne Lamelle eines BSH-Trägers besitzt vor dem Einbau eine Eigenspannung. Bereits bekannt ist der Unterschied der E-Module der linken und rechten Seite der Lamelle. Weiters gibt es Eigenspannungen infolge des Sägeeinschnittes (Stammlage) infolge der Trocknung und des Pressvorganges während der Herstellung zum BSH-Träger. Inwieweit diese Eigenspannung die Querkzugfestigkeit beeinflusst ist noch zu verifizieren.

#### **1. 1. 2 Spannungsverteilung mit Sperreffekt**

Wie in Abschnitt 3. 5. 2 gezeigt, gibt es einen Sperreffekt an der Kontaktstelle zwischen Krafteinleitungsholz und Prüfkörper, hervorgerufen durch den E-Modul-Unterschied (Querkzug-E-Modul des Prüfkörpers und Längs-E-Modul des Lasteinleitungsholzes).

Weiters gibt es bei BSH-Prüfkörpern einen Sperreffekt an der Kontaktstelle zwischen den Einzelprüfkörpern aufgrund der Verklebung. Dieser Effekt ist aufgrund der geringen E-Modul-Unterschiede nicht so stark ausgeprägt wie zwischen Lasteinleitungsholz und Prüfkörper, muss aber berücksichtigt werden.

#### **1. 1. 3 FE-Berechnung und E-Modul-Erfassung**

Um die in Abschnitt 1. 1. 1 und Abschnitt 1. 1. 2 beschriebenen Eigenspannungen numerisch darstellen zu können, gilt eine FE-Berechnung als zielführend.

Diese FE-Berechnung, wie in Abschnitt 1. 2. 2 beschrieben, muss auf Grundlage der zylindrischen Anisotropie erfolgen. Dabei muss jedem Punkt des Querschnittes ein E-Modul zugewiesen werden.

Dafür muss ein Prüfkörper so untersucht werden, dass die E-Module erfasst und für die FE-Berechnung ausgewertet werden können.

Mit Hilfe der FE-Berechnung wäre es dann möglich die Eigenspannungseffekte zu ermitteln und den Spannungsverlauf innerhalb des Querschnittes eindeutig darstellen zu können.

## 1. 2 Ausweitung der Versuche

### 1. 2. 1 Volumen

Die hier untersuchten Volumen liegen unter der in der EN 408:2009 geforderten  $10 \text{ dm}^3$  für die Ermittlung der Querkzugfestigkeit. Daher ist es erforderlich, weitere Prüfungen mit Volumen bis zu  $10 \text{ dm}^3$  und darüber hinaus durchzuführen. Ein Prüfvolumen bei welchem sich ein quasi konstantes Lastniveau (konstante Querkzugfestigkeit) einstellt, wäre erstrebenswert.

In Hinblick auf die weitere Untersuchung des parallelen Volumeneffektes müssen die Prüfkörperlängen vergrößert werden. Im Zuge der Vergrößerung der Prüfkörperlängen müssen auch BSH-Prüfkörper hergestellt werden um an denen die Seilketteneffekt zu verifizieren.

### 1. 2. 2 Parametervariationen

Die Exzentrizität des Kerns wurde in den Prüfungen nicht untersucht. Eine Variation der Kernlage bei Einzelprüfkörper und bei BSH-Trägern würde die Erfassung dieses Parameters ermöglichen. Bei BSH-Trägern könnten zudem der Kernabstand und die Exzentrizität variiert werden.

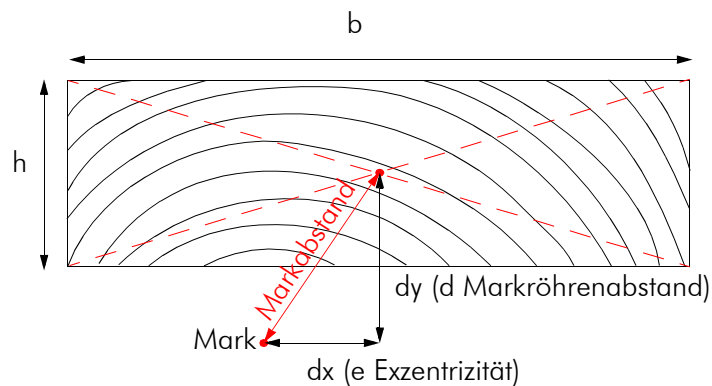


Abb. 1.1 Definition Markabstand

### 1.3 Langzeitverhalten

Die durchgeführten Versuche beschränkten sich auf das Verhalten der Querkzugfestigkeit bei Kurzzeitbeanspruchung. Das Langzeitverhalten bei verschiedenen Lastniveaus und deren Auswirkungen auf das serielle und parallele Systemverhalten sollte noch anhand von Versuchen verifiziert werden.

### 1.4 Feuchteverhalten

Wie Dill-Langer 2004 [2] bereits aufgezeigt hat, wirkt sich wechselnde Feuchtigkeit negativ auf die Querkzugfestigkeit aus. Das ständige Quellen und Schwinden verringert die Kurzzeitquerkzugfestigkeit um ca. 50%.

Aus diesem Grund sollte die Versuche auch auf verschiedene klimatische Randbedingungen ausgeweitet werden.





## Literaturverzeichnis

- [1] Hans-Ludwig Mistler: Über die Querkzugfestigkeit von Fichten-Brettschichtholz in Abhängigkeit von der Bauteilgröße und der Verteilung der Beanspruchung
- [2] Gerhard Dill-Langer: Schädigung von Brettschichtholz bei Zugbeanspruchung rechtwinklig zur Faserrichtung; Materialprüfanstalt Universität Stuttgart; 2004
- [3] H. J. Blaß, M. Schmid: Ermittlung der Querkzugfestigkeit von Vollholz und Brettschichtholz; Fraunhofer IRB Verlag; Karlsruhe; 1998
- [4] Hans-Ludwig Mistler: Die Tragfähigkeit des am Endauflager unten rechtwinklig ausgeklinkten Brettschichtträgers; Technische Hochschule Karlsruhe; 1979
- [5] Hermann Blumer: Spannungsberechnung an anisotropen Kreisbogenscheiben und Sattelträgern konstanter Dicke; Technische Hochschule Karlsruhe; 1972-1979
- [6] Karl Möhler, Hermann Blumer: Gekrümmte Brettschichtträger mit konstanter Querschnittshöhe oder mit geneigten Obergurt ; Technische Hochschule Karlsruhe; 1978
- [7] Jürgen Ehlbeck, Jürgen Kürth: Influence of perpendicular-to-grain stressed volume on the load-capacity of curved and tapered glulam beams; INTERNATIONAL COUNCIL FOR RESEARCH AND INNOVATION IN BUILDING AND CONSTRUCTION; Oxford; 1991
- [8] Jürgen Ehlbeck, Jürgen Kürth: Einfluß des querkzugbeanspruchten Volumens auf die Tragfähigkeit gekrümmter Träger und Satteldachträger aus Brettschichtholz; Springer-Verlag; Holz als Roh- und Werkstoff 50 (1992) 33-40
- [9] Simon Aichner, Lilian Höfflin, Hans-Wolf Reinhardt: Runde Durchbrüche in

- Biegeträgern aus Brettschichtholz; Ernst und Sohn Verlag; Bautechnik 84 Heft 12; 2007
- [10] Lukas Unterweger: Satteldachträger aus BSH; TU-Graz; Institut für Holzbau und Holztechnologie; 2010
- [11] Simon Aichner, Hans-Wolf Reinhardt: Einfluß der Bauteigröße in der linearen und nichtlinearen (Holz-)Bruchmechanik; Springer-Verlag; Holz als Roh- und Werkstoff 51 (1993) 215-220
- [12] Hans-Ludwig Mistler: Querkzug-Bemessung von BSH-Trägern nach EC 5 Ein Vergleich mit Forschungsergebnissen; Springer-Verlag; Holz als Roh- und Werkstoff 56 (1998) 51-59
- [13] W. Schelling: Berechnung gekrümmter Brettschichtträger mit Biegebeanspruchung; Zimmermeister-Kalender; Technische Hochschule Karlsruhe; 1967
- [14] M. Fleischmann, H. Krenn, J Eberhardsteiner, G. Schickhofer: Numerische Berechnung von Holzkonstruktionen unter Verwendung eines orthotropen elasto-plastischen Werkstoffmodells; Springer-Verlag; Holz als Roh- und Werkstoff 65 (2007) 301-313
- [15] Karl Möhler, Klaus Hemmer: Zusammenwirken von Längs- Quer- und Schubspannungen(Torsionsspannungen) bei Brettschicht- und Vollholzbau-teilen; Technische Hochschule Karlsruhe; 1978
- [16] A. Trummer, K. Bergmeister, K. Kernbichler: Verstärkung konstruktiver Details von Brettschichtholzträgern mit Glasfasergewebe; Ernst und Sohn Verlag; Bautechnik 81 Heft 3; 2004
- [17] Leonardo da Vinci Projekt: Handbuch 1: Tragwerke aus Holz; CZ/06/B/F/PP/168007; 2008
- [18] Karl Möhler, W Siebert: Untersuchungen zur Erhöhung der Querkzugfestigkeit in gefährdeten Bereichen; Forschungsarbeit durchgeführt im Auftrag des Ministers für Landes- und Stadtentwicklung des Landes Nordrhein-Westfalen
- [19] Kai Haase: Möglichkeiten und Regelungen der neuen Holzbaunorm(DIN 1052 (08/04)): Querkzugproblematik und mögliche Verstärkungen; FRILÖ-Magazin
- [20] Karl Möhler, Hermann Blumer, J. Ehlbeck: Versuche mit gekrümmten Brettschichtträgern; Ernst und Sohn, Berlin; 1974
- [21] TU Graz: Skriptum zur Lehrveranstaltung: HOLZBAU VO; TU-Graz; Institut

- für Holzbau und Holztechnologie; 2010
- [22] ÖNORM EN 1995-1-1 Ausgabe: 2009-07-01
- [23] DIN 1052:2008-12
- [24] SIA 265:2003
- [25] COMET 2.1.4 multigirderzertifikat für Jowapur 686.60
- [26] Purbond Zertifikat für Purbond 110, 2010
- [27] „R“ Rechenprogramm; <http://www.r-project.org/>
- [28] CIB 42-7-1: INTERNATIONAL COUNCIL FOR RESEARCH AND INNOVATION IN BUILDING AND CONSTRUCTION; BASE PARAMETERS OF SELF-TAPPING SCREWS; 2009
- [29] Schul-Umwelt-Zentrum Mitte: Gartenarbeitsschule Wedding und Tiergarten: Holz; <http://www.suz-mitte.de/>





## Abbildungsverzeichnis

### 1 Darstellung der Problematik

Abb. 1.1 Typischer Querschnitt eines gekrümmten BSH-Bauteiles [24] ..... 2

### 1 Verhalten von Brettschichtholz bei Quersugbeanspruchung

Abb. 1.1 Bogenträger unter Belastung eines positiven Biegemomentes und Entstehen von Quersugspannungen in einem Bogensegment [2] ..... 5

Abb. 1.2 Aufbau eines Baumes [29] ..... 6

Abb. 1.3 Makroskopischer Aufbau von Fichtenholz [2] ..... 6

Abb. 1.4 Sägeeinschnitt eines Brettquerschnittes mit globalem Zylinderkoordinatensystem und lokalem Material-Koordinatensystem [2] ..... 7

Abb. 1.5 Effektive off-axis E-Module  $E_x$  und  $E_y$  als Ergebnis der Koordinatentransformation [2]  
a) Verlauf in Abhängigkeit vom Drehwinkel  $\varphi$   
b) Verlauf in Abhängigkeit von der Breitenkoordinate  $x$  ..... 10

Abb. 1.6 Konfiguration A [2] ..... 11

Abb. 1.7 Konfiguration B [2] ..... 11

Abb. 1.8 Konfiguration C [2] ..... 12

Abb. 1.9 Konfiguration D [2] ..... 12

Abb. 1.10 Spannungs- und Dehnungsverteilung im Brettquerschnitt zufolge elastischer FE-Berechnung bei Quersugbeanspruchung mit unterschiedlichen Randbedingungen-Konfigurationen [2] ..... 14

Abb. 1.11 Reihe von parallelgeschalteten Federn mit unterschiedlichen Federkonstanten ..... 15

Abb. 1.12 Modellvorstellung der Konfiguration D: Eine Kette von Federn die in Reihe geschaltet ist; die Variation der Federkonstanten entspricht der Variation der Nachgiebigkeiten  $S_{22}$  ... 15

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Abb. 1.13 | Skizze vier verschiedener idealisierter BSH-Querschnitte, die sich hinsichtlich des Sägeeinschnittes der jeweiligen Lamellen und deren Abfolge unterscheiden [2] .....   | 17 |
| Abb. 1.14 | Skizze der Schnittebene .....  | 18 |
| Abb. 1.15 | Verteilung der Querkzugspannung $\sigma_y$ nach FE-Berechnung für die vier Querschnittskonfigurationen bezüglich der Querschnittsbreiten-Richtung x [2] .....  | 19 |
| Abb. 1.16 | Verteilung der Querkzugspannung $\sigma_y$ nach FE-Berechnung für die vier Querschnittskonfigurationen bezüglich der Querschnittshöhen-Richtung y [2] .....  | 19 |
| Abb. 1.17 | 3-D Diskretisierung eines BSH-Bogenträgers unter Momentenbelastung [2] .....   | 21 |
| Abb. 1.18 | Verteilung der Querkzugspannung $\sigma_y$ im Symmetriequerschnitt: Schnitt in Höhenrichtung [2] .....   | 22 |
| Abb. 1.19 | Verteilung der Querkzugspannung $\sigma_y$ im Symmetriequerschnitt: Schnitt in halber Trägerhöhe über die Breite [2] .....   | 23 |
| Abb. 1.20 | Querkzugspannungsverteilung $\sigma_y$ im Symmetriequerschnitt für die Konfigurationen I - IV in 3-D [2] .....   | 23 |
| Abb. 1.21 | a) Skizze des Prüfaufbaus der Dehnungsmessungen an einer rechtwinklig zu den Querschnitts-Schmalseiten einachsrig belasteten Lamelle<br>b) Vergleich der empirischen und rechnerischen Verteilung der Dehnungskomponenten $\epsilon_x$ parallel zur Lastrichtung<br>c) Vergleich der empirischen und rechnerischen Verteilung der Dehnungskomponenten $\epsilon_y$ rechtwinklig zur Lastrichtung [2] ..... | 25 |
| Abb. 1.22 | a) Skizze des Versuchsaufbaus; b) Foto eines BSH-Prüfkörpers mit Wegaufnehmer [2] ...  | 26 |
| Abb. 1.23 | Vergleich von rechnerischen und experimentellen globalen E-Modulen [2] .....   | 27 |
| Abb. 1.24 | Lamellenbruch mit Harzgalle [2] .....  | 29 |
| Abb. 1.25 | Skizze des Prüfkörperaufbaus und des Versuchsaufbaus zur Erfassung der lokalen Dehnungen und zur Ortung von Schallemissionen [2] .....   | 29 |
| Abb. 1.26 | Ergebniss der Schallemissionsmessung im Brettschichtholzquerschnitt [2] .....  | 30 |
| Abb. 1.27 | Zwei exemplarische Lastverschiebungskurven mit und ohne Lasteinbruch [2] .....   | 31 |
| Abb. 1.28 | Schema des empirischen Schädigungsmodells für BSH bei Querkzugbeanspruchung [2]  | 32 |

# 1 Versuchsplanung

|          |   |    |
|----------|---|----|
| Abb. 1.1 | Universalprüfmaschine lignum_uni_275 .....  | 35 |
| Abb. 1.2 | Versuchsaufbau mit Krafteinleitung (Foto, photorealistische Darstellung, Explosionszeichnung) ..... | 37 |
| Abb. 1.3 | Stahlteil der Gelenkkette .....   | 38 |
| Abb. 1.4 | Stahlwinkel für Krafteinleitung für die Querkzugfläche 150 x 150 mm .....                           | 39 |
| Abb. 1.5 | Stahlwinkel für Krafteinleitung für die Querkzugfläche 150 x 300 mm .....                           | 40 |
| Abb. 1.6 | Lasteinleitungsholz mit Prüfkörper .....  | 41 |

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Abb. 1.7  | Lamellenware .....                            | 42 |
| Abb. 1.8  | Feuchtemessgerät Gann Hydromette M 4050 ..... | 43 |
| Abb. 1.9  | Eigenschwingungsmessung .....                 | 44 |
| Abb. 1.10 | Brett-Scanner .....                           | 45 |

## 2 Versuchsdurchführung

|          |   |    |
|----------|---|----|
| Abb. 2.1 | Prüfkörperbezeichnung der Querkzugfläche 150 x 150 mm .....   | 50 |
| Abb. 2.2 | Prüfkörperbezeichnung der Querkzugfläche 150 x 300 mm .....   | 51 |
| Abb. 2.3 | Scan der Stirnseiten .....  | 53 |
| Abb. 2.4 | Verklebung der Prüfkörper mit einer Querkzugfläche von 150 x 150 mm,<br>jeweils 2 Prüfkörper gemeinsam verklebt ..... | 54 |
| Abb. 2.5 | Verschraubung der Stahlwinkel .....   | 55 |
| Abb. 2.6 | DD1 Dehnungsaufnehmer .....   | 56 |
| Abb. 2.7 | Kraft-Wegdiagramm (links) und Kraft-Zeitdiagramm (rechts) .....   | 57 |

## 3 Versuchsauswertung

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Abb. 3.1  | Q-Q-Plots der Gruppe $P_{ges}$ .....   | 62 |
| Abb. 3.2  | Q-Q-Plots der Gruppe $P_{0,9}$ .....   | 63 |
| Abb. 3.3  | Q-Q-Plots der Gruppe $P_{1,8}$ .....   | 64 |
| Abb. 3.4  | Trocknungsrisse .....  | 65 |
| Abb. 3.5  | Boxplots Querkzugfestigkeit gegen Trocknungsrisse .....  | 66 |
| Abb. 3.6  | Prüfkörper mit Ast (Belastung des Astes in Faserrichtung) .....  | 67 |
| Abb. 3.7  | Prüfkörper mit Flügelast (Astbruch) .....  | 67 |
| Abb. 3.8  | Prüfkörper mit Flügelast (Ast ungeschädigt) .....  | 67 |
| Abb. 3.9  | Boxplots Querkzugfestigkeit gegen Ast .....  | 68 |
| Abb. 3.10 | Prüfkörper mit Harzgallen .....  | 69 |
| Abb. 3.11 | Boxplots Querkzugfestigkeit gegen Harz .....   | 70 |
| Abb. 3.12 | Prüfkörper mit Mark .....  | 70 |
| Abb. 3.13 | Lamelle Nr. 1019: Querkzugfestigkeit gegen Mark .....  | 71 |
| Abb. 3.14 | Querschnittsunterteilung .....   | 72 |
| Abb. 3.15 | Boxplots der Querkzugfestigkeit gegen die Harzlagen,<br>ohne Prüfkörper mit Trocknungsrisse und Mark ..... | 72 |

|           |  |     |
|-----------|--|-----|
| Abb. 3.16 | „W“-Bruch .....  | 74  |
| Abb. 3.17 | Jahringbruch .....   | 74  |
| Abb. 3.18 | Versagen der Frühholzzone .....  | 75  |
| Abb. 3.19 | Interfacebruch; rechte Seite .....   | 75  |
| Abb. 3.20 | Prüfkörper mit Faserbelag .....  | 76  |
| Abb. 3.21 | Kernbruch .....  | 76  |
| Abb. 3.22 | Prüfkörper mit rissauslösendem Mark .....  | 77  |
| Abb. 3.23 | Mischbruch .....   | 78  |
| Abb. 3.24 | Boxplot der Bruchformen .....  | 79  |
| Abb. 3.25 | Rissfortschritt .....  | 81  |
| Abb. 3.26 | Gruppe $P_{ges,red}$ Q-Q-Plots .....   | 83  |
| Abb. 3.27 | Gruppe $P_{0,9,red}$ Q-Q-Plots .....   | 84  |
| Abb. 3.28 | Gruppe $P_{1,8,red}$ Q-Q-Plots .....   | 85  |
| Abb. 3.29 | Normierung der Querkzugfestigkeit gegen die normierte Rohdichte der Lamellen 1001 bis 1006; Seitenware .....   | 86  |
| Abb. 3.30 | Normierung der Querkzugfestigkeit gegen die normierte Rohdichte der Lamellen 1013 bis 1018; Mittelware .....   | 87  |
| Abb. 3.31 | Normierung der Querkzugfestigkeit gegen die normierte Rohdichte der Lamellen 1007 bis 1012; Seitenware .....   | 87  |
| Abb. 3.32 | Normierung der Querkzugfestigkeit gegen die normierte Rohdichte der Lamellen 1019 bis 1024; Mittelware .....   | 88  |
| Abb. 3.33 | Scatterplot $P_{ges,red}$ .....  | 100 |
| Abb. 3.34 | Scatterplot $P_{0,9,red}$ .....  | 101 |
| Abb. 3.35 | Scatterplot $P_{1,8,red}$ .....  | 102 |
| Abb. 3.36 | Scatterplot $P_{ges,red}$ der identifizierten Hauptparameter .....   | 103 |
| Abb. 3.37 | Scatterplot $P_{0,9,red}$ der identifizierten Hauptparameter .....   | 103 |
| Abb. 3.38 | Scatterplot $P_{1,8,red}$ der identifizierten Hauptparameter .....   | 104 |
| Abb. 3.39 | Gleichförmige Korrelation der Querkzugfestigkeit .....   | 106 |
| Abb. 3.40 | Darstellung des Kettenmodells .....  | 107 |
| Abb. 3.41 | Prüfkörper mit einer Querkzugfläche von 150 x 150 mm .....   | 108 |
| Abb. 3.42 | Seilkettenmodell .....   | 110 |
| Abb. 3.43 | Prüfkörper mit Querkzugflächen von 150 x 150 mm und 150 x 300 mm .....   | 110 |
| Abb. 3.44 | Einfluss des Volumens auf die Querkzugfestigkeit<br>*Abgeschätzte Bandbreite der Funktionsverläufe auf Basis der „weakest link“-Theorie nach Weibull, aufgrund der statistischen |     |



|           |   |     |
|-----------|---|-----|
|           | Unschärfe in der Ermittlung des Variationskoeffizienten<br>bzw. des $\beta$ -Parameters der Weibullverteilung ..... | 111 |
| Abb. 3.45 | Einfluss des Volumens auf die Querkzugfestigkeit der Einzellamellen .....   | 112 |
| Abb. 3.46 | Sperreffekt der Prüfkörper .....  | 113 |
| Abb. 3.47 | Einfluss des Volumens auf die Querkzugfestigkeit mit abgeschätzten Sperreffekt .....                                | 114 |

## 1 Zukünftige Forschungsschwerpunkte

|          |                              |     |
|----------|------------------------------|-----|
| Abb. 1.1 | Definition Markabstand ..... | 119 |
|----------|------------------------------|-----|





Dies ist eine Veröffentlichung des

### **FACHBEREICHS INGENIEURBAUKUNST (IBK) AN DER TU GRAZ**

Der Fachbereich Ingenieurbaukunst umfasst die dem konstruktiven Ingenieurbau nahe stehenden Institute für Baustatik, Betonbau, Stahlbau & Flächentragwerke, Holzbau & Holztechnologie, Materialprüfung & Baustofftechnologie, Baubetrieb & Bauwirtschaft, Hochbau & Industriebau, Bauinformatik und Allgemeine Mechanik der Fakultät für Bauingenieurwissenschaften an der Technischen Universität Graz.

Dem Fachbereich Ingenieurbaukunst ist das Bautechnikzentrum (BTZ) zugeordnet, welches als gemeinsame hochmoderne Laboreinrichtung zur Durchführung der experimentellen Forschung aller beteiligten Institute dient. Es umfasst die drei Laboreinheiten für konstruktiven Ingenieurbau, für Bauphysik und für Baustofftechnologie.

Der Fachbereich Ingenieurbaukunst kooperiert im gemeinsamen Forschungsschwerpunkt „Advanced Construction Technology“. Dieser Forschungsschwerpunkt umfasst sowohl Grundlagen- als auch praxisorientierte Forschungs- und Entwicklungsprogramme.

Weitere Forschungs- und Entwicklungskooperationen bestehen mit anderen Instituten der Fakultät, insbesondere mit der Gruppe Geotechnik, sowie nationalen und internationalen Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft.

Die Lehrinhalte des Fachbereichs Ingenieurbaukunst sind aufeinander abgestimmt. Aus gemeinsam betreuten Projektarbeiten und gemeinsamen Prüfungen innerhalb der Fachmodule können alle Beteiligten einen optimalen Nutzen ziehen.

Durch den gemeinsamen, einheitlichen Auftritt in der Öffentlichkeit präsentiert sich der Fachbereich Ingenieurbaukunst als moderne Lehr- und Forschungsgemeinschaft, welche die Ziele und Visionen der TU Graz umsetzt.

Nummerierungssystematik der Schriftenreihe

S – Skripten, Vorlesungsunterlagen | F – Forschungsberichte  
V – Vorträge, Tagungen | D – Diplomarbeiten

Institutskenzahl:

1 – Allgemeine Mechanik | 2 – Baustatik | 3 – Betonbau  
4 – Holzbau & Holztechnologie | 5 – Stahlbau & Flächentragwerke  
6 – Materialprüfung & Baustofftechnologie | 7 – Baubetrieb & Bauwirtschaft  
8 – Hochbau & Industriebau | 9 – Bauinformatik

Fortlaufende Nummer pro Reihe und Institut / Jahreszahl