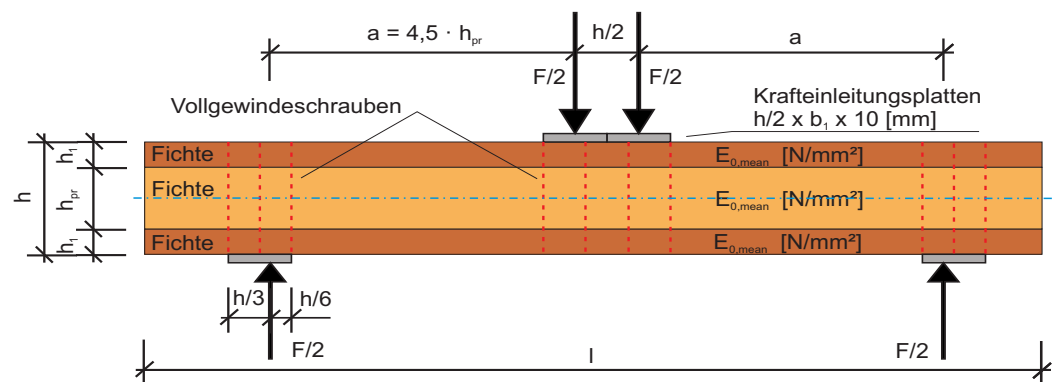


## Festlegung einer Prüfkonfiguration für die Ermittlung der Schubfestigkeit von Vollholz sowie Analyse des Größeneinflusses



D-4-1/2011

**Hannes LACKNER**

Institut für Holzbau und Holztechnologie  
Technische Universität Graz

# Festlegung einer Prüfkonfiguration für die Ermittlung der Schubfestigkeit von Vollholz sowie Analyse des Größeneinflusses

Diplomarbeit von:

**Hannes Lackner**

Eingereicht am

Institut für Holzbau und Holztechnologie  
Technische Universität Graz

Begutachtung:

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

Betreuer:

Dipl.-Ing. (FH) Reinhard Brandner

Graz, im Jänner 2011

---

# DANKSAGUNG

Ich danke Herrn Univ.-Prof. DI Dr. techn. Gerhard Schickhofer sowie meinem Betreuer DI(FH) Reinhard Brandner für die unermüdliche Unterstützung und Betreuung bei der Erstellung meiner Diplomarbeit.

Weiters bedanke ich mich bei den Mitarbeitern des Instituts für Holzbau und Holztechnologie sowie bei den Mitarbeitern der holz.bau forschungs gmbh, wo ich in den letzten Jahren nicht nur einen Arbeitsplatz sondern auch liebe Freunde gefunden habe.

Mein Dank gilt aber vor allem meiner Familie, welche mir diese Ausbildung erst ermöglicht hat.

Ein weiterer Dank gilt meinen Freunden, Studienkollegen und meiner Freundin, die während meines Studiums immer eine große moralische und fachliche Unterstützung waren.

---

# EIDESSTATTLICHE 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 den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche erkenntlich gemacht habe.

Graz, Jänner 2011

.....  
Hannes Lackner

---

## Kurzfassung

Die vorliegende Diplomarbeit befasst sich mit der Ermittlung der Schubfestigkeit von Voll- und Brettschichtholzträgern. Hierzu wurde eine umfassende Literatursammlung zur Findung einer geeigneten Prüfkongfiguration unter Beachtung von Einflüssen auf die zu bestimmende Schubfestigkeit durchgeführt. Die Analysen wurden durch theoretische Betrachtungen sowie durch Vorversuche ergänzt. Ein weiterer Schwerpunkt dieser Arbeit ist die Analyse des Größeneffekts im Bezug auf die Schubfestigkeit beider Holzgruppen. Die Bedeutung dieses Themas beruht darauf, dass bei Hauptanwendungen von Holzträgern es sich meist um einen Biegeträger handelt und hier immer eine Kombination aus Schub- und Biegebeanspruchung gegeben ist. Um einen Querschnitt wirtschaftlich auszunutzen, gilt es erforderlichen Schubfestigkeiten als Materialkennwert eingehend zu erfassen bzw. ein Verfahren zu definieren bei dem weitgehend unbeeinflusst Schubfestigkeiten bestimmt werden können. In dieser Arbeit wird der Ablauf zur Findung einer Prüfkongfiguration, welche eine ausreichende Beurteilung der Schubfestigkeit von Vollholz erlaubt, gezeigt.

Um eine hohe Schubversagensquote zu erreichen, wurde ein Träger mit einem I-Querschnitt gewählt. Als Prüfkongfiguration dient ein sogenannter „pseudo“-3-Punkt-Biegeversuch. Um erfolgreich Schubbrüche zu produzieren werden zudem spezielle Anforderungen an die Gurtlamellen gestellt. Im zweiten Teil der Diplomarbeit wurde anhand einer umfassenden nationalen und internationalen Literaturrecherche der Größeneinfluss auf die Schubfestigkeit recherchiert. Als Ergebnis wurde die Schubfestigkeit mit der Höhe, der Breite, dem beanspruchten Volumen und einer, als in dieser Arbeit definierten, korrigierten Schubfläche in Beziehung gebracht.

Als Schlussfolgerung der Arbeit wurde ein „pseudo“-3-Punkt-Biegeversuch als geeignete Prüfkongfiguration zur Ermittlung der Schubfestigkeit bei Vollholz definiert. Der Prüfkörper besteht aus einer Steglamelle, welche der eigentliche zu prüfende Teil ist, und aus zwei Gurtlamellen, die eine hohe Zugfestigkeit bei abgestimmten E-Modulen aufweisen. Als Fazit des Größeneinflusses konnte eine deutliche Abhängigkeit der Schubfestigkeit von der Bauteilgröße ermittelt werden. Weiters zeigte sich, dass die mittlere Schubfestigkeit vom Vollholz höher, als die vom Brettschichtholz ist.

---

## Abstract

This diploma thesis deals with the investigation of shear strength of solid timber and glued laminated timber beams as well as with an extensive collection of literature regarding the definition of an accurate test configuration by studying influencing properties on the shear strength. A further focal point is the analysis of size effects referring to the shear strength of both timber products. The significance of the issue of this work is given by the main application of timber as flexural beams consequently exposed to a combination of shear and bending stresses. For an economic design of flexural beams the essential shear strength has to be treated as a material constant. Therefore a method has to be found which determines unaffected shear strength. This work shows the procedure of finding a test configuration which allows an adequate evaluation of shear strength of solid timber.

For maximizing the share of shear failures beams with an I-cross section in combination with a so called pseudo three-point bending test configuration are chosen. In that respect the flange material has to be aligned with the web material offering in addition a high tensile strength capacity. In the second part of this diploma thesis the size effects on shear strength is discussed by means of the investigated literature. As one main result the shear strength reflects a distinctive dependency on width, depth, volume or the herein defined adjusted shear area.

As a conclusion of this work the pseudo three-point bending test configuration is defined as being accurate for the determination of the shear strength of solid timber. The test specimen is composed of a web as the real test piece and of two flange elements with high tensile strength and in respect to the web adjusted modulus of elasticity. The studies concerning the size effect point out a distinctive shear strength dependency on the component size. Moreover it concludes that the mean shear strength of solid timber is higher than that of glued laminated timber.

---



---

# Inhaltsverzeichnis

- Inhaltsverzeichnis .....1
- 1 Einleitung ..... 1
  - 1.1 Allgemeine Einführung zum Thema: Schub im Holzträger .....2
  - 1.2 Normalspannung vs. Scherspannung.....3
  - 1.3 Spannung vs. Festigkeit .....5
  - 1.4 Unterschied zwischen nachgiebigem und starrem Verbund .....5
  - 1.5 Isotropes, anisotropes und orthotropes Materialverhalten.....7
  - 1.6 Holzspezifische Eigenschaften .....7
  - 1.7 Aufbau von Holzprodukten ..... 11
  - 1.8 Unterschied zwischen „clear wood“ (merkmalfreie Kleinproben) und „timber“ (Bauholz) .....12
  - 1.9 Größeneinfluss.....13
  - 1.10 Definitionen betreffend Prüfkonfigurationsparameter .....13
  - 1.11 Untersuchung von Randbedingungen zur Festlegung der Prüfkonfigurationsgeometrien ..... 17
- 2 Literaturrecherche .....20
  - 2.1 Nationale und internationale Berichte zur Schubfestigkeit von Holzwerkstoffen .....20
    - 2.1.1 Allgemeine Betrachtung der Eigenschaften von Holzwerkstoffen ..... 20
      - 2.1.1.1 Holzfeuchte..... 21
      - 2.1.1.2 Rohdichte ..... 26
      - 2.1.1.3 Scherfestigkeit ..... 27
      - 2.1.1.4 Temperatur ..... 28
    - 2.1.2 Größeneinfluss und dessen Auswirkung auf die Festigkeiten, im Speziellen der Schubfestigkeit.....29

2.1.3	Einfluss des Volumens und der Spannungsverteilung auf die Festigkeit eines Trägers mit rechteckigem Querschnitt .....	31
2.1.4	Verwendete Prüfkfigurationen für die Bestimmung der Schubfestigkeit von Holzträgern.....	32
2.1.5	Normalspannungen und Schubspannungen im Träger und deren Auswirkung auf die Schubfestigkeit bzw. Prüfkfiguration.....	46
2.1.5.1	Normalspannung vs. Schubfestigkeit .....	46
2.1.5.2	Querdruckspannung im Krafteinleitungsbereich .....	48
2.2	Normen .....	52
2.2.1	ASTM D143-94: Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber [3].....	52
2.2.2	ÖNORM prEN 338: Bauholz für tragende Zwecke [70].....	53
2.2.3	Bestimmung der Scherfestigkeit in Faserrichtung nach ÖNORM EN 408 [67].....	54
2.2.4	ÖNORM EN 1194: Holzbauwerke, Brettschichtholz, Festigkeitsklassen und Bestimmung charakteristischer Werte [68] .....	55
2.2.5	ASTM D 3737-05: Standard Practise for Establishing Allowable Properties for Structural Glued Laminated Timber (Glulam) [6] .....	55
2.2.6	Bemessungsrichtlinien und vorgegebene Grenzwerte (Zusammenfassung) .....	57
2.3	Zusammenfassung der Literaturrecherche und daraus resultierende Erkenntnisse .....	59
2.3.1	Eigenschaften der Holzware.....	59
2.3.1.1	Holzfeuchte.....	59
2.3.1.2	Rohdichte .....	59
2.3.1.3	Temperatur .....	60
2.3.2	Prüfkfiguration .....	60
2.3.2.1	Recherchierte Prüfkfigurationen .....	60
2.3.2.2	Schubfläche .....	61
2.3.2.3	Querdruckfreie Zone .....	62
2.3.2.4	Krafteinleitung bzw. Auflagerverstärkung.....	63
2.3.3	Kritische Bereiche bei der Findung der richtigen Prüfkfiguration.....	64
2.3.3.1	Herausforderungen.....	64
2.3.3.2	Biegezugspannung .....	64
2.3.3.3	Klebefläche.....	64
2.3.3.4	Schubspannungsverläufe über den Querschnitt .....	66
2.3.3.5	Lösungsvorschläge.....	66
3	Vorversuche .....	68
3.1	Prüfvariante I: Rechteckquerschnitt mit aufgeklebten Verstärkungslamellen.....	68
3.1.1	Versuchsdaten .....	68
3.1.1.1	Materialeigenschaften .....	69
3.1.1.2	Berechnungsablauf .....	71
3.1.1.3	Prüfkfiguration .....	74
3.1.2	Ergebnisse bzw. Erkenntnisse .....	76
3.2	Prüfvariante II: I-Träger mit Gurtlamellen aus Kerto-S.....	78
3.2.1	Versuchsdaten.....	78
3.2.1.1	Materialeigenschaften.....	78



3.2.1.2	Prüfkonfiguration .....	80
3.2.2	Ergebnisse bzw. Erkenntnisse .....	81
3.3	Prüfvariante III: optimierter I-Träger (homogener Aufbau).....	83
3.3.1	Versuchsplanung – erwartbare Ergebnisse .....	84
3.3.1.1	Materialeigenschaften .....	84
3.3.1.2	Prüfkonfiguration .....	85
3.3.2	Theoretische Erkenntnisse .....	85
4	Hauptversuche .....	88
4.1	Anforderungen und Prüfaufwand .....	88
4.1.1	Ausgangsmaterial und Herstellung der I-Träger .....	88
4.1.1.1	Maschinelle Holz-Sortierung .....	89
4.1.1.2	Ermittlung der charakteristischen Eigenschaften der Prüfkörper .....	90
4.1.1.3	Verleimung der Träger .....	91
4.1.2	Prüfgeräte .....	92
4.1.2.1	Digitale Schiebelehre und Rollmeter .....	92
4.1.2.2	Waage .....	93
4.1.2.3	Feuchtemessgerät .....	93
4.1.2.4	Versuchsaufbau – erweiterte Schwingungsmessung .....	94
4.1.2.5	Presse .....	95
4.1.2.6	Zugprüfmaschine .....	96
4.1.2.7	Universalprüfmaschine .....	96
4.1.2.8	Darrschrank .....	97
4.1.3	Prüfablauf .....	98
4.1.3.1	Versuchsumfang .....	99
5	Vertiefende Betrachtung zum Einfluss des Größeneffekts auf die Schubfestigkeit von Voll- u. Brettschichtholz auf Basis einer umfangreichen Literaturrecherche .....	100
6	Schlussbetrachtung .....	111
6.1	Beurteilung der erarbeiteten Prüfkonfiguration .....	111
6.2	Fazit der Literaturrecherche im Bezug auf den Größeneffekt auf die Schubfestigkeit .....	112
6.3	Ausblick .....	112
7	Literaturverzeichnis .....	113
8	Anhang .....	121
8.1	Versuchsplanung für die Hauptversuche .....	121
8.1.1	Serie I: 40/75, C24 .....	121
8.1.2	Serie II: 40/150, C24 .....	125
8.1.3	Serie III: 80/150, C16 .....	128
8.1.4	Serie IV: 80/150, C24 .....	131
8.1.5	Serie V: 80/150, C40 .....	134
8.1.6	Serie VI: 80/300, C24 .....	137

8.2	Nachweis der Auflagerverstärkung .....	140
8.2.1	Holzeigenschaften .....	140
8.2.2	Schraubeneigenschaften .....	140
8.2.3	Mindestabstände .....	142
8.2.4	Zusammenfassung der gewählten Verstärkungsmaßnahmen.....	142

## Einleitung

Die Schubfestigkeit von Voll- und Brettschichtholz hat eine wesentliche Bedeutung für die Bemessung von Holzkonstruktionen. Diese Bedeutung beruht insbesondere darauf, dass die Hauptanwendung von Holzträgern als Biegeträger und somit immer in Verbindung mit einer Schubbeanspruchung gegeben ist. Die in den Normen angegebenen charakteristischen Materialkennwerte (bei Festigkeiten im Allgemeinen 5%-Quantilwerte) sind eingehend zu erfassen, da sie einen bedeutenden Einfluss auf die wirtschaftliche Ausnutzung der Holzquerschnitte haben.

In dieser Arbeit gilt es ein Verfahren zu finden, bei dem weitgehend unbeeinflusste Schubfestigkeiten als Materialkennwerte von Vollholz- und BSH-Trägern bestimmt werden können. Um auf ein entsprechendes Ergebnis zu kommen, werden im Vorhinein die wesentlichen Einflussparameter studiert. Unter anderem wird anhand des Interagierens, zum Beispiel von Querkzug oder Querkdruck und Schub, gezeigt, welcher Einfluss dadurch auf die Schubfestigkeit gegeben sein kann. Auch bisherige Prüfkongfigurationen, welche im Rahmen einer umfangreichen Literaturrecherche erarbeitet wurden, werden hervorgehoben und deren Einfluss auf die Schubfestigkeit im Rahmen der Arbeit bestmöglich quantifiziert.

Die wesentlichen Schwerpunkte dieser Arbeit sind die Festlegung einer Prüfkongfiguration zur zuverlässigen Ermittlung der Schubfestigkeit von Vollholz, sowie die Ermittlung des Größeneinflusses für Voll- und Brettschichtholz auf die Festigkeit. Die Beziehung zwischen Volumen und Festigkeit wird anhand von Daten aus der Literatur und anhand eigener durchgeführter Versuche gezeigt. Die dafür verantwortlichen Parameter werden im Zuge dieser Arbeit näher betrachtet und diskutiert.

Die wesentliche Strukturierung beinhaltet eine Literaturrecherche, eine Entwicklung und eine Erprobung einer Schubversuchskongfiguration für die Ermittlung der Schubfestigkeiten für Vollholz. Für Brettschichtholz und Vollholz wird eine Datensammlung von bisherigen internationalen recherchierten Arbeiten angeführt.

## 1.1 Allgemeine Einführung zum Thema: Schub im Holzträger

Nach der linearen Elastizitätstheorie entstehen u.a. durch Einwirkungen quer zur Balkenachse Schubspannungen im Querschnitt. Diese sind aufgrund der Dualität der Schubspannungen immer gleich groß zu jenen, welche parallel zur Balkenachse wirken (Schickhofer [84]).

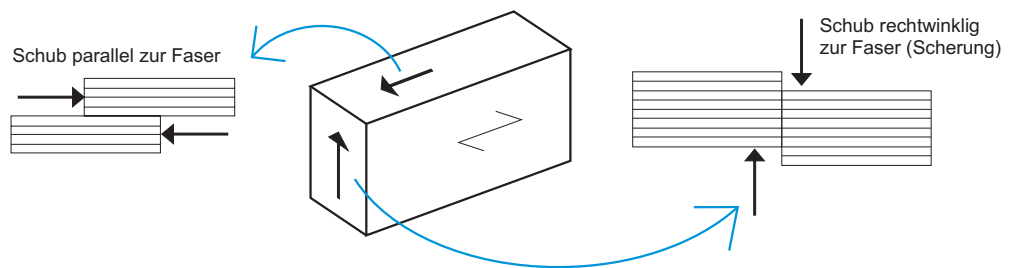


Abb. 1.1 Schubspannungen am Balken infolge einer Querkraftbeanspruchung

Die Schubfestigkeit parallel zur Faserrichtung ist aufgrund des natürlichen Wachstums bzw. des Stammaufbaus (biomechanisches Holzmodell, Mattheck [51]) gegenüber der Schubfestigkeit rechtwinklig zu den Fasern (i. Allg. als Scherfestigkeit bezeichnet) erheblich geringer. Somit wird im Allgemeinen bei Schub aus Querkraft die Schubfestigkeit parallel zur Faserrichtung im Bemessungsfall maßgebend.

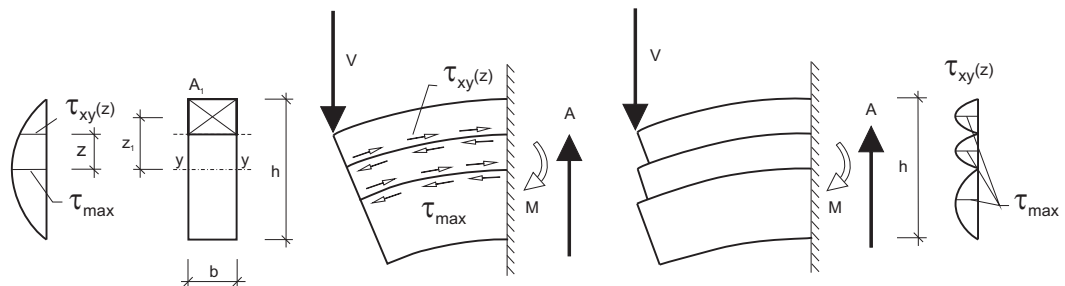


Abb. 1.2 Schubbeanspruchung eines Kragträgers mit Rechteckquerschnitt: starrer (links) vs. nachgiebiger Verbund (rechts)

Ein mehrteiliger Träger aus lose übereinander geschichteten Teilquerschnitten, erfährt unter einer Querkraft ( $V$ ) eine Verschiebung der einzelnen Teilträger (Abb. 1.2, rechte Skizze). Ein solches Verhalten nennt man auch „ideal“ nachgiebiger bzw. kein Verbund (Anmerkung: im Teilträger herrscht starrer Verbund). Der ideale Fall wäre hierfür, wenn zwischen den Teilstücken keine Reibung  $\mu = 0$  vorherrschen würde. Ein Vollholzträger bzw. ein verklebter Träger (z.B. BSH-Träger) lässt eine solche Verformung aufgrund der starren Verbundwirkung nicht zu und erzwingt dadurch Schubspannungen parallel und quer zur Faser. Diese Schubspannung im Rechteckquerschnitt kann nach der Festigkeitslehre an der Stelle  $z$  nach Glg. 1.1 wie folgt bestimmt werden:

$$\tau_{xy}(z) = \frac{V \cdot S_y(z)}{J_y(z) \cdot b}, \text{ mit dem statischen Moment } S_y(z) = \int_A z \cdot dA, \quad 1.1$$

V	Querkraft [N]
$\tau_{xy}(z)$	Schubspannung $\tau_{xy}(z)$ an der Stelle z [N/mm <sup>2</sup> ]
$S_y(z)$	statisches Moment an der Stelle z [mm <sup>3</sup> ]
$J_y(z)$	Trägheitsmoment an der Stelle z [mm <sup>4</sup> ]
b	Breite des Querschnitts [mm]
$A_1$	Fläche des abgetrennt gedachten Querschnittsteils [mm <sup>2</sup> ]
$z_1$	Schwerpunktsabstand des abgetrennt gedachten Querschnittsteils vom Gesamtschwerpunkt [mm]

Der Schubspannungsverlauf verläuft bei einem Rechteckquerschnitt parabelförmig über die Querschnittshöhe und hat in der neutralen Achse sein Maximum. Für Rechteckquerschnitte kann die maximale Schubspannung auch nach der Glg. 1.2 berechnet werden:

$$\tau_{\max} = \frac{3}{2} \cdot \tau_{\text{mean}} \quad \text{mit} \quad \tau_{\text{mean}} = \frac{V}{A} \quad 1.2$$

V	Querkraft [N]
A	Querschnittsfläche [mm <sup>2</sup> ]
$\tau_{\text{mean}}$	mittlere Schubspannung [N/mm <sup>2</sup> ]
$\tau_{\max}$	maximale Schubspannung [N/mm <sup>2</sup> ]

## 1.2 Normalspannung vs. Scherspannung

In diesem Unterkapitel werden zum besseren Verständnis die Begriffe Normal- und Scherspannung näher erklärt.

### Normalspannung

Die Normalspannung wirkt immer senkrecht (normal) zur betrachteten Ebene eines Elementes. Sie wird durch eine äußere Krafteinwirkung (F) oder Moment (M) hervorgerufen. In der nachfolgenden Abb. 1.3 werden zwei Normalspannungsmöglichkeiten gezeigt. In der Zeichnung a) wird eine Zugnormalspannung und in der Zeichnung b) wird eine Drucknormalspannung abgebildet.

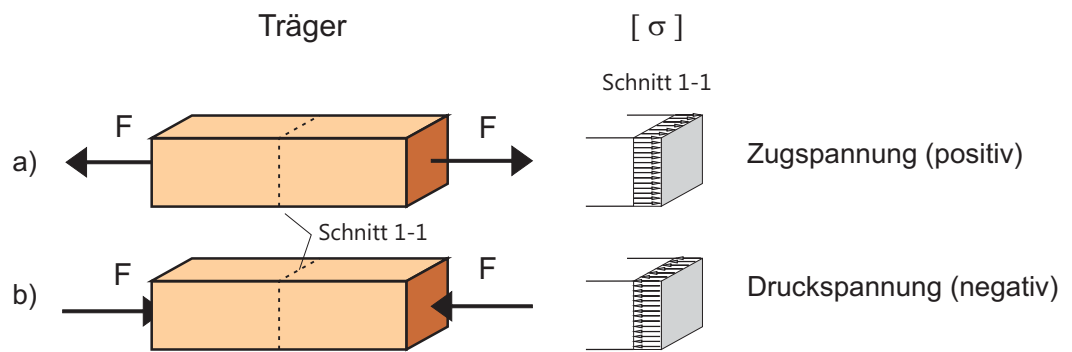


Abb. 1.3 Normalspannung: Zugnormalspannung a), Drucknormalspannung b)

Für die Berechnung der Normalspannung benötigt man die Größe der äußeren einwirkenden Kraft ( $F$ ) und die beanspruchte Querschnittsfläche ( $A$ ), siehe Glg. 1.3.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad 1.3$$

$\sigma$	Spannung [N/mm <sup>2</sup> ]
$F$	Kraft [N]
$A$	Querschnittsfläche [mm <sup>2</sup> ]

### Scherspannung

Die Scherspannung wirkt immer in der Schnittebene eines Elements. Die wirkenden abscherenden Kräfte versuchen die Teile eines Prüfkörpers gegeneinander zu verschieben, dadurch entstehen Scherspannungen im Prüfkörper (siehe Abb. 1.4, idealisierte Darstellung ohne Einfluss von Quertzug- bzw. Querdruckspannungen).

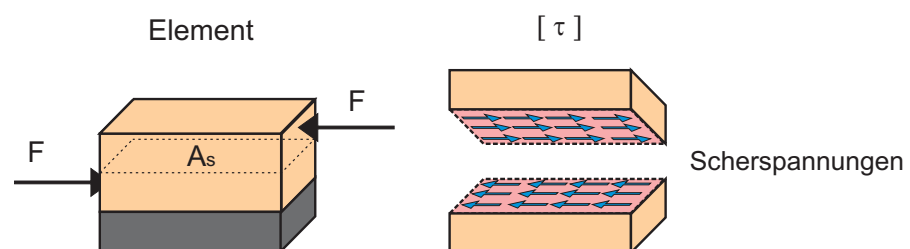


Abb. 1.4 Skizzenhafte Darstellung der Prüfkongfiguration zur Bestimmung von Scherspannungen inkl. Darstellung der Scherfläche (unterer Teil des Prüfkörpers).

Die Berechnung funktioniert mit der Glg. 1.4 ähnlich wie im Punkt „Normalspannungen“. Hier ist darauf zu achten, dass die richtige Querschnittsfläche berücksichtigt wird (Abb. 1.4).

$$\tau = \frac{F}{A}$$

1.4

$\tau$	Schubspannung [N/mm <sup>2</sup> ]
$F$	Kraft [N]
$A$	Scherfläche [mm <sup>2</sup> ]

### 1.3 Spannung vs. Festigkeit

Die Spannung (mechanische Spannung) ist definiert als Kraft pro beanspruchter Fläche [30]. Die Spannung kann noch weiter unterteilt werden in:

- Normalspannung (Biege-, Zug-, Druckspannung)
- Schubspannung

Den mechanischen Grenzwiderstand, den ein Werkstoff einer Verformung zum Zeitpunkt des Eintretens einer definierten Versagensbedingung entgegensetzt, nennt man die Festigkeit. Sie ist nichts anderes als eine Werkstoffeigenschaft [26]. Die Festigkeit unterscheidet sich nach der Art der angreifenden Einwirkungen:

- statische und dynamische Festigkeit (z.B. Dauerfestigkeit)
- nach der Lastrichtung (z.B. Zug- und Druckfestigkeit)

Die Festigkeit ist eine spezielle Form der Spannung. Der Unterschied ist, dass die Festigkeit genau die Grenzspannung ist an der ein Prüfkörper unter einer äußeren Einwirkung versagt bzw. an der eine Grenzspannung erreicht wurde, welche per Definition einem Versagen entspricht (z.B. Querdruckfestigkeit).

### 1.4 Unterschied zwischen nachgiebigem und starrem Verbund

Die Berechnung der nachgiebigen und starren Verbundwirkung besitzt Relevanz bei Betrachtung von Bauteilen, welche aus unterschiedlich oder gleich verbundenen Werkstoffen aufgebaut werden (z.B. Verbundbau). Ein nachgiebiger Verbund beschreibt somit das Verhalten eines kombinierten Trägers, an welchem die Einzelquerschnitte nicht oder zu einem bestimmten Grad nachgiebig miteinander verbunden sind, sodass es unter Last zu einer Verformung, einer Relativverschiebung, in der Verbundfuge kommt. Ein solches Beispiel wird in der Abb. 1.5 gezeigt. Im Bild b) kann man am linken Rand die Verschiebung beider Teilträger in Folge der Biegebeanspruchung zueinander gut erkennen.

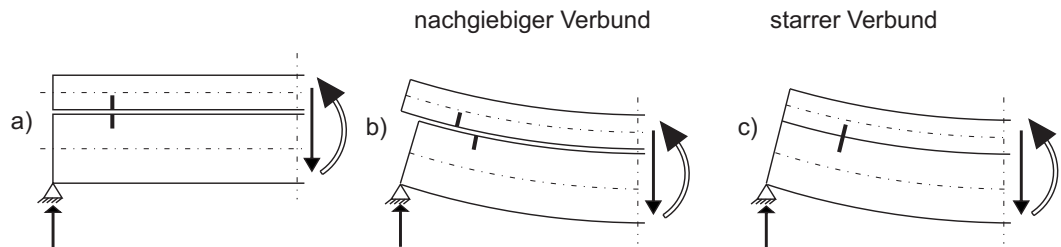


Abb. 1.5 Schematische Darstellung eines kombinierten Trägers unter Biegebeanspruchung bei nachgiebigem Verbund b) bzw. starrem Verbund c)

Von einem nachgiebigen Verbund spricht man auch wenn die Teilträger z.B. mit Schrauben oder Nägeln verbunden werden. Auch hier führt eine Beanspruchung gegebenenfalls zu gegenseitigen Verschiebungen der Teilträger zueinander in Abhängigkeit der Verbindungsmittelsteifigkeit, der Anzahl und Anordnung dieser sowie des Anfangsspiels der Verbindungsmittel (Schlupf). Dem nachgiebigen Verbund steht der starre bzw. „quasi“ starre Verbund gegenüber (Abb. 1.5, Bild c)). Ein „quasi“ starrer Verbund kann über Verklebung erzielt werden. Dadurch werden die einzelnen Teilträger vollflächig und weitgehend kraftschlüssig miteinander verbunden, sodass baupraktisch ein „monolithischer“ Stab entsteht. Bekannte Produkte im Holzbau sind z.B. BSH-Träger, BSP-Platten, OSB-Platten. Wie bereits zuvor erläutert ist darauf zu achten, dass durch die Verklebung (Sperrern der Verschiebung) Schubspannungen im Träger entstehen.

In der Arbeit vom Neuhaus [57] wird die Art des Verbundes über die Verschiebung des zweiteilig aufgebauten Biegeträgers und über das Flächenmoment 2. Grades beschrieben. Er unterteilt den Verbund in die drei Arten „kein Verbund“, „nachgiebiger Verbund“ und „starrer Verbund“.

Bei einem zweiteilig kombinierten Träger, wo beide Teilträger nicht miteinander verbunden sind, entsteht durch eine Belastung des Trägers eine Relativverschiebung in der Verbundfuge. Das Flächenmoment 2. Grades setzt sich aus den Flächenmomenten 2. Grades der einzelnen Träger zusammen. Setzt man jedoch in der Verbundfuge ein mechanisches Verbindungsmittel, so sind nun die Teilträger nachgiebig (elastisch) miteinander verbunden. Die Verschiebung der Teilträger ist nun von der Steifigkeit des Verbindungsmittels abhängig. Das Flächenmoment 2. Grades setzt sich jetzt aus den Flächenmomenten 2. Grades des Einzelquerschnitts und den beiden Steiner-Anteilen zusammen. Für einen nachgiebigen Verbund besitzt der Steiner-Anteil noch einen Abminderungsbeiwert, der die Nachgiebigkeit der Verbindungsmittel berücksichtigt. Liegt der Abminderungsbeiwert bei Null so spricht man von einem starren Verbund. Hier ist keine Verschiebung zwischen den Teilträgern gegeben, dies ist jedoch mit nachgiebigen mechanischen Verbindungsmitteln nicht zu erreichen. Da eine Verklebung sehr nahe an den starren Verbund herankommt, spricht man hier von einem „quasi“ starren Verbund.



## 1.5 Isotropes, anisotropes und orthotropes Materialverhalten

Im Allgemeinen handelt es sich bei diesen Begriffen um Ausdrücke der Mechanik. Sie beschreiben die Eigenschaften eines Materials hinsichtlich einer möglichen Richtungsabhängigkeit der Materialkenngrößen (Schanz [81]).

### Anisotropie

Anisotropes Materialverhalten ist durch die Richtungsabhängigkeit der Werkstoffeigenschaften (E-Modul, Festigkeit, ect.) charakterisiert [25]. Um ein solches Material mittels seiner Kenngrößen mathematisch zu erfassen ist die Kenntnis von 21 unabhängige Materialkonstanten notwendig.

### Orthotropie

Ist ein Sonderfall der Anisotropie. Der Begriff setzt sich aus den Wörtern orthogonal und anisotrop zusammen. Das orthotrope Materialverhalten wird immer auf ein Koordinatensystem bezogen [29]. Durch das Symmetrieverhalten können die 21 unabhängigen Materialkonstanten auf neun reduziert werden. Ein Beispiel für ein solches näherungsweise modellierbares Material ist Holz. Die neun Konstanten setzen sich aus den E-Moduln, den G-Moduln und den Querkontraktionszahlen für alle drei Hauptebenen zusammen [81].

### Isotropie

Isotropes Materialverhalten ist durch die Richtungsunabhängigkeit der Werkstoffeigenschaften (E-Modul, Festigkeit ect.) charakterisiert und stellt somit einen Spezialfall der allg. anisotropen Materialbeschreibung durch die konstanten Eigenschaftswerte in allen Materialrichtungen dar (z.B. Gas).

## 1.6 Holzspezifische Eigenschaften

### Exkurs: Allgemeiner Holzaufbau

Die prinzipielle Kenntnis des Holzaufbaus, der Materialstruktur wird für das Verständnis nachfolgender Erklärungen, im Zusammenhang mit der Dichte und der Auswirkung von Feuchte und Temperatur, als notwendig erachtet. Grundsätzlich kann man das Material Holz nach Schickhofer [83] in fünf Strukturebenen unterteilen:

- die molekulare Ebene,
- die Nanoebene,
- die Mikroebene,
- die Makroebene und
- die Stammebene.

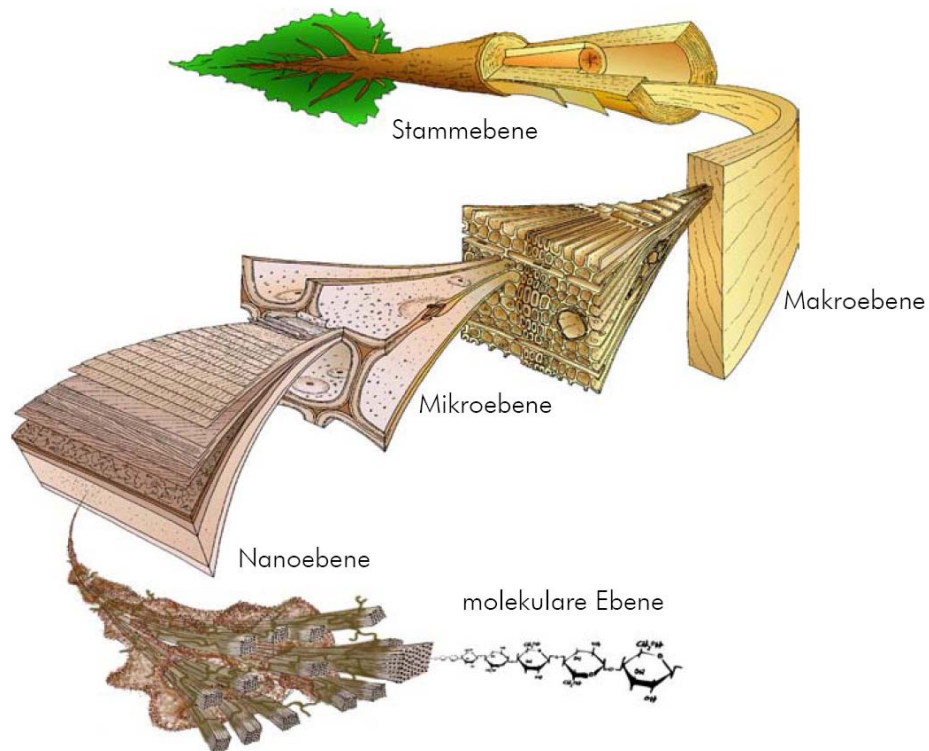


Abb. 1.6 Schematische Darstellung der fünf Hauptebenen von Holz, übernommen von Wimmer [95].

### Molekularebene

Holz ist ein Verbundmaterial aus den makromolekularen Zellwandkomponenten Cellulose, Hemicellulose und Lignin. Hierbei dient die Cellulose als ein langkettiges, unverzweigtes Makromolekül welches für die Aufnahme der mechanischen Kräfte wie z.B. Zugkräfte optimiert ist. Im Gegensatz dazu ist das Lignin (dreidimensional verzweigtes Makromolekül) für die Aufnahme der Druckkräfte zuständig.

### Nanoebene

Diese Ebene beschreibt den Aufbau der Zellwände, welche als Faserverbundwerkstoff aus mehreren Schichten aufgebaut sind und durch die Hemicellulose miteinander „verklebt“ und vernetzt werden.

### Mikroebene

Sie besteht aus unterschiedlichen Zelltypen, sogenannten Geweben. Sie unterscheiden sich in drei Gewebearten: Festigungs-, Leit- und Speichergewebe. Die Haupttrichtung der meisten Zellen verläuft parallel zur Stammachse.

### Makroebene

Sie beinhaltet jene Ebene, welche mit freiem Auge erkannt werden kann. Dabei gliedert sich die Struktur in z.B. die Zuwachszonen bzw. Jahrringe, Holzstrahlen und eventuell vorhandene Epithelzellen.

### Stammebene

In der Stammebene bzw. im Stammquerschnitt sind folgende Abschnitte im Aufbau zu erkennen (von außen nach innen):

- Rinde,
- Splintholz,
- Kernholz,
- Markröhre.

### Feuchte

Im Allgemeinen ist Holz ein kapillarporöser, hygrokopischer (Holz kann die Feuchtigkeit aus der Umgebung aufnehmen) Stoff. Der durchschnittliche Porenanteil beträgt ca. 50%, ist aber von der jeweiligen Holzart bzw. Dichte abhängig. Dadurch hat Holz die Möglichkeit Wasser an den Oberflächen, zwischen den Fasern und zwischen den Zellwänden zu binden. Hier werden drei Bereiche unterschieden. Wenn kein Wasser im Holz vorhanden ist, spricht man von darr trockenem Holz. Als weiterer Bereich gilt die Füllung der Zellwandzwischenräume und Zellwände mit Wasser (gebundenes Wasser). Dies verursacht eine Ausdehnung der Zellwände und führt zu einer Formänderung (Quellen). Als wassergesättigt versteht man den Zustand, wenn das Mikro- und das Makrosystem (somit auch die Zellhohlräume) maximal mit Wasser ausgefüllt sind. Hier spricht man auch vom „freiem Wasser“ in den Zellhohlräumen. Der Bereich zwischen gebundenem und freiem Wasser wird durch den Wassersättigungsbereich, bei einer Holzfeuchte von rund 28% definiert (Abb. 1.7, Schickhofer [83]). Der relevante Bereich im Bauwesen liegt unter dem Fasersättigungsbereich, etwa zwischen 6% und 20% Feuchtegehalt. Die Holzfeuchte selbst ist hier als Anteil Wasser zu der trockenen Holzmasse definiert mit:

$$u = \frac{m_f - m_o}{m_o} \cdot 100 \quad 1.5$$

$u$	Holzfeuchte [%]
$m_f$	feuchte Holzmasse [g]
$m_o$	trockene Holzmasse [g]

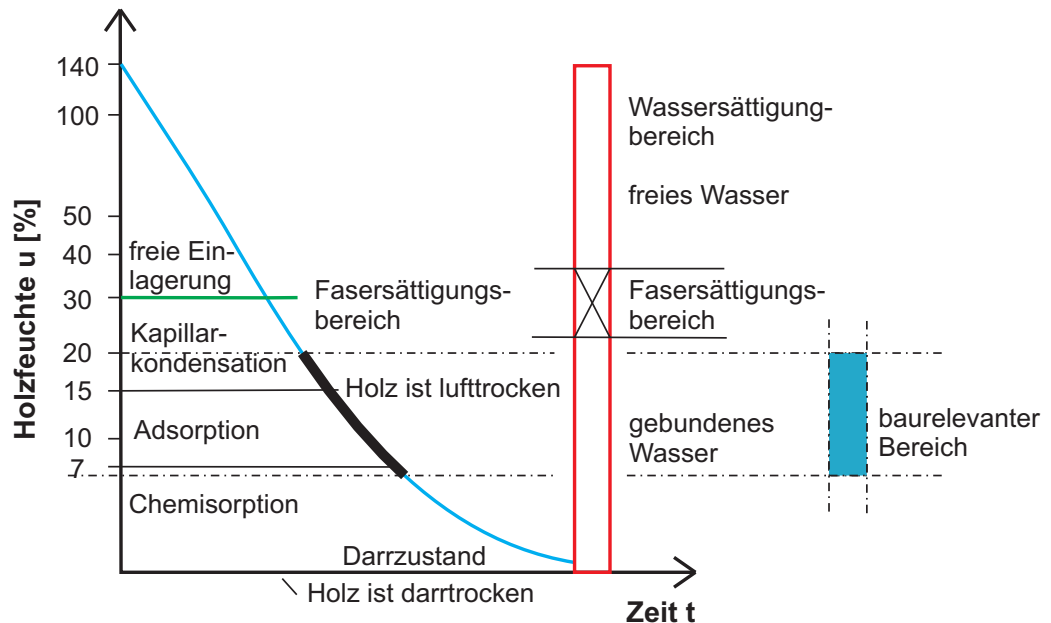


Abb. 1.7 Schematische Darstellung der Bindungsformen des Wassers im Holz inkl. Bereichsdefinitionen und Ergänzungen nach Schickhofer [83]

## Rohdichte

Die Rohdichte ist der Quotient aus der Masse und dem äußeren Volumen des Holzstücks, inklusive des Porenraums und des darin enthaltenen Wassers (Glg. 1.6). Das heißt, dass die Rohdichte immer mit der jeweiligen dazu gehörenden Holzfeuchte angegeben wird.

$$\rho_u = \frac{m_u}{V_u} \quad 1.6$$

$\rho_u$	Rohdichte bei der Holzfeuchte u [kg/m <sup>3</sup> ]
$m_u$	Masse der Probe mit der Holzfeuchte u [kg]
$V_u$	Volumen der Probe mit der Holzfeuchte u [m <sup>3</sup> ]

Einen Einfluss auf die Rohdichte haben u. a.:

- die Holzart
- die Wuchs- und Standortbedingungen sowie soziologische Stellung des Baumes im Bestand
- die Jahringbreite bzw. der Früh- und Spätholzanteil
- die Rohdichteverteilung im Stamm (und somit die radiale sowie axiale Lage der Probe im Stamm)

## Temperatur

Holz ist ein brennbarer Stoff und daher gegen hohe Hitzeinwirkung zu schützen. Eine thermische Zersetzung beginnt bei Temperaturen über 105 °C, kann aber bei sehr langer Temperaturexpositionen bereits bei niedrigeren Temperaturen stattfinden. Zuerst treten Flüssigkeiten und leicht lösliche Stoffe aus bzw. verdampfen. Dadurch wird die innere Struktur beschädigt, was wiederum zu einer Abminderung der Festigkeit führt. Ab einer Temperatur von 200 °C erfolgt eine lebhafte Holzzerersetzung welche mit einer Verfärbung einhergeht [83].

## 1.7 Aufbau von Holzprodukten

Das Ausgangsmaterial von jedem Produkt ist der Baumstamm. Mittels einer mechanischen Bearbeitung (sägen) wird der Baumstamm in unterschiedliche Profile zerlegt, sodass der Baumquerschnitt so gut wie möglich ausgenutzt werden kann. Wie eine solches Einschnittbild aussehen kann, wird in der Abb. 1.8 exemplarisch gezeigt.

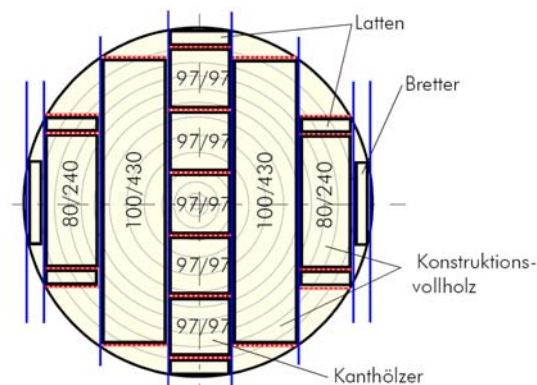


Abb. 1.8 Beispiel eines Einschnitts für eine optimale Querschnittsnutzung nach Schickhofer [83]

Im Wesentlichen werden die gewonnenen Querschnitte in Haupterzeugnisse (Hauptware), Nebenerzeugnisse (Seitenware) und in das Restprodukt unterschieden. Die Hauptware wird nach einer weiteren mechanischen Bearbeitung in folgende Produkte unterteilt:

- Kanthölzer,
- Bohlen,
- Bretter,
- Latten.

Nach dieser Unterteilung werden die Holzwerkstoffe in Gruppen gleicher mechanischer Eigenschaften (Festigkeit) zusammengefasst. Hierfür muss eine Sortierung durchgeführt werden, welche u. a. in der ON DIN 4074-xx [60] oder ON EN 14081-xx [61] geregelt ist.

Wie im Abschnitt 1.6 schon beschrieben, besteht Holz aus unterschiedlichen Bestand-

teilen die wiederum sehr unterschiedliche mechanische Eigenschaften haben. Nicht nur die Bestandteile des Holzes, sondern auch die Strukturebenen weisen unterschiedliche mechanische Eigenschaften auf.

Um nun dieser Potentialminderung entgegenzuwirken, versucht man den Werkstoff zu homogenisieren. Dies geschieht indem man z.B. einen Träger in einzelne Lamellen auftrennt und diese Lamellen anschließend (nach eventuell vorangegangener Sortierung) wieder zufällig miteinander verklebt [83]. Nach diesem Prinzip entstanden zahlreiche Produkte wie z.B.:

- Balkenschnittholz
- Duo-, Trio-Balken
- Brettschichtholz (BSH)
- Brettsperrholzplatten (BSP)
- Spansperrholz (OSB)
- Funierschichtholz (FSH)
- Funiersperrholz (FSP)
- Holzfaserplatten (MDF)

## 1.8 Unterschied zwischen „clear wood“ (merkmalfreie Kleinproben) und „timber“ (Bauholz)

Die ersten ermittelten Kennwerte für Holzwerkstoffe wurden im Bereich Maschinenbau und Flugzeugbau ermittelt. Die dafür verwendeten Prüfkörper waren merkmalfreie („fehlerfreie“) Kleinproben (engl.: „clear wood“), lt. Schickhofer [83]. Die Abmessungen der Prüfkörper sind für Biegeversuche (DIN 52186 [15])  $b = 20 \pm 1$  mm,  $h = 20 \pm 1$  mm, für Zugversuche in Faserlängsrichtung (DIN 52188 [17])  $b = 20$  mm,  $h = 6$  mm und für Druckversuche  $a = 20$  mm Seitenlänge eines würfelförmigen Prüfkörpers (DIN 52185 [14]).

Für die Abmessungen der Prüfkörper in Bauteilgröße gibt es in den Prüfnormen nur bedingt Referenzabmessungen, sondern primär Verhältnismaße für die Prüfkfigurationen. Die Festigkeitswerte (für Biege-, Zug- und Druckfestigkeit) sind auf eine Referenzhöhe  $h = 150$  mm ( $h = 600$  mm für BSH-Träger) bzw. Referenzbreite  $b = 150$  mm (Vollholz und BSH-Träger) zu beziehen (Schickhofer [83]).

## 1.9 Größeneinfluss

Im Allgemeinen beschreibt der Größeneinfluss den Zusammenhang zur Übertragbarkeit von Werkstoffkennwerten, die unter genormten Bedingungen ermittelt wurden, auf von den Versuchsbedingungen abweichende Größenverhältnisse [27]. In der Literatur werden vier Bereiche des Größeneinflusses beschrieben:

- oberflächentechnischer Größeneinfluss
- technologischer Größeneinfluss
- spannungsmechanischer / geometrischer Größeneinfluss
- statistischer Größeneinfluss

Der oberflächentechnische Größeneinfluss wird in Verbindung mit Druckeigen-  
spannungen und Eindringtiefen gesetzt. Der technologische Größeneinfluss berück-  
sichtigt die Unterschiede im Gefüge und wird dort herangezogen, wo sich das Gefüge  
der Prüfkörper bei der Herstellung verändern kann (Stahlbau, Betonbau). Der  
spannungsmechanische bzw. geometrische Größeneinfluss beruht auf den unterschied-  
lichen Spannungsgradienten im Werkstoff bei Verwendung von unterschiedlichen  
Größen. Als letzten Bereich wird der statistische Größeneinfluss angeführt. Er beschreibt  
die Tatsache, dass bei größerem Holzvolumen die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von  
versagensinduzierenden Holzmerkmalen steigt und dadurch die mechanischen  
Holzeigenschaften beeinflusst werden.

Bei der Betrachtung des Größeneffekts ist darauf zu achten, dass dieser von mehreren  
Faktoren abhängig ist. In Folge gilt es bei Untersuchungen zum Größeneffekt so viele  
Einflussfaktoren wie möglich konstant zu halten (wie z.B. die Holzart, Holzfeuchte,  
gleiche Grundgesamtheit) Um gezielte Aussagen über den reinen (unbeeinflussten)  
Größeneffekt treffen zu können, müssen im Vorhinein noch weitere Festlegungen in  
Bezug auf die Lage des Prüfkörpers im Stamm, Lage des Prüfkörpers im Prüfgerät  
(liegende bzw. stehende Jahrringe) sowie die Art der Prüfkfiguration getroffen werden.

## 1.10 Definitionen betreffend Prüf- konfigurationsparameter

Der folgende Abschnitt beinhaltet Definitionen für Begriffe und Parameter, welche für die  
weiteren Überlegungen zur Findung einer geeigneten Prüfkfiguration zur Bestimmung  
der Schubfestigkeit Verwendung finden.

### Variable $a$

Die Variable  $a$  beschreibt den Abstand zwischen dem Auflager und der Krafteinleitung  
z.B. bei einem 3-Punkt-Biegeversuch, siehe Abb. 1.9. Sie wird als Verhältniswert zur  
Trägerhöhe  $h$  über den Parameter  $x$  mit  $a = x \cdot h$  ermittelt. Durch Variation von  $a$  kann  
bei gleicher Krafteinwirkung das Ausmaß der Biegezugspannung und der Schubspan-  
nung beeinflusst werden.

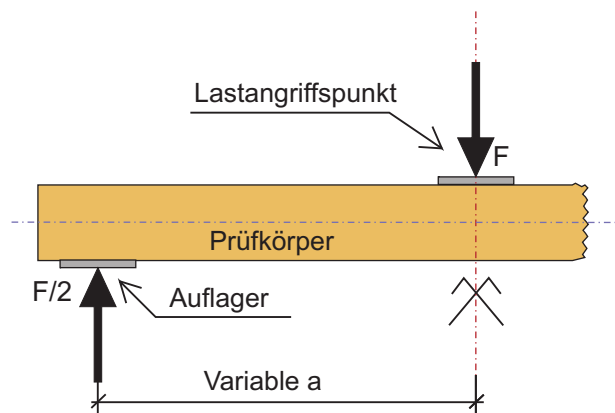


Abb. 1.9 Grafische Erklärung der Begriffe: Krafteinleitung, Auflager und Variable a

## Schubfläche

Die Schubfläche wird in der Literatur als die Fläche zwischen der Auflagerplatte und der Krafteinleitungsplatte in der Trägerachse beschrieben.

Durch die eingeleiteten Kräfte (im Auflager- und im Krafteinleitungsbereich) wird die Schubfestigkeit des Vollholzträgers durch die vorherrschende Normalspannung normal zur Trägerachse durch Überdrückung erhöht. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit zwischen einer theoretischen und einer korrigierten Schubfläche unterschieden (Abb. 1.10).

Die theoretische Schubfläche errechnet sich, indem man die Trägerbreite  $b$  mit der Variablen  $a$  abzüglich der halben Auflager- und der halben Krafteinleitungsplatte multipliziert (Glg. 1.7), sofern die Kräfte (Auflager; Einleitung) zentrisch auf die Platten wirken. Sonst gilt es, die Plattenanteile entsprechend zu berücksichtigen.

$$A_{s, \text{theor}} = b \cdot \left( a - \frac{l_{\text{AP}}}{2} - \frac{l_{\text{KP}}}{2} \right) \quad 1.7$$

$A_{s, \text{theor}}$	theoretische Schubfläche [mm <sup>2</sup> ]
$l_{\text{AP}}$	Länge der Auflagerplatte [mm]
$l_{\text{KP}}$	Länge der Krafteinleitungsplatte [mm]

Für die Korrektur der Schubfläche wird ein Lastausbreitungswinkel von 30° Grad angenommen. Der Hintergrund für diese Neigungsannahme liegt in der Beobachtung der Druckfalten an Vorversuche von H. Lackner [44]. Ein weiterer Hinweis für die Bestätigung dieser Annahme findet sich in der Arbeit von Chr. Salzmann [79] welche den Lastausbreitungswinkel für Brettsperrholz untersuchte und für die Referenz eines Brettchichtholzes den Winkel von rund  $\alpha = 30^\circ$  bestätigte. Weiters wurde dieser Winkel auch mit E. Gehri, welcher sich dem Thema Schubfestigkeit bereits jahrelang widmet, diskutiert und als akzeptabel befunden. Die korrigierte Schubfläche wird gleich wie die theoretische Schubfläche abzüglich der durch den Ausbreitungswinkel berücksichtigten



auf Querdruck beeinflussten Flächen in der Neutralebene der theoretischen Biegespannungen ermittelt (Glg. 1.8).

$$A_{S, \text{korr}} = b \cdot \left( a - \frac{l_{AP}}{2} - \frac{l_{KP}}{2} - \tan 30^\circ \cdot h \right) \quad 1.8$$

Um erfolgreich Schubbrüche zu produzieren, ist es wichtig, die Schubfläche so groß wie möglich zu gestalten (hohe Schubbruchwahrscheinlichkeit gemäß Größeneffekt, keine Gefahr von einer Überdrückung der Schubfläche). Diese Absicht ist aber begrenzt durch die Biegetragfähigkeit der Prüfkörper. Ein ausgewogenes Verhältnis zwischen einer hohen Versagenswahrscheinlichkeit auf Schub bei zugleich vernachlässigbarer bzw. geringer Versagenswahrscheinlichkeit auf Biegung ist nur bei einem relativ geringen Abstand  $a$  und somit bei einer relativ geringen Schubfläche möglich. Dies wird im nachfolgenden Abschnitt 1.11 eingehender erläutert.

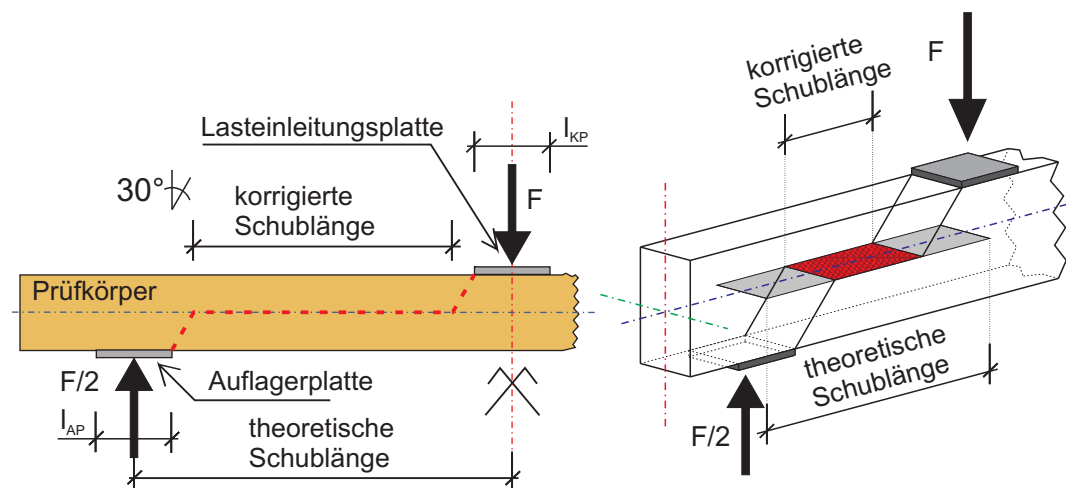


Abb. 1.10 Allgemeine grafische Darstellung der theoretischen sowie der korrigierten Schubfläche (3-Punkt-Biegeversuch)

Um der Anforderung „Schubversagen durch Querkraft“ gerecht zu werden, werden vier unterschiedliche Prüfkongfigurationen nach Lackner [44] beschrieben:

- 3-Punkt-Biegeversuch
- 4-Punkt-Biegeversuch
- asymmetrischer 4-Punkt-Biegeversuch
- 5-Punkt-Biegeversuch

Der Unterschied zwischen den einzelnen Verfahren liegt, abgesehen vom unterschiedlichen Prüfaufbau, in der Gesamtlänge der Träger und in der relativ zur Trägerlänge gegebenen theoretisch vereinfachten Größe der Schubfläche. Der Schubspannungsverlauf über die Trägerachse folgt qualitativ dem des Querkraftverlaufs.

Als Beispiel wird in der nachfolgenden Abb. 1.11 ein 5-Punkt-Biegeversuch gezeigt.

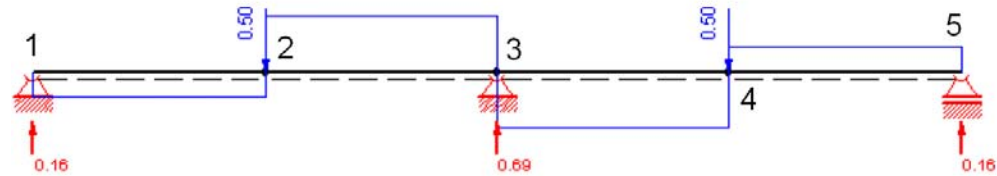


Abb. 1.11 Querkraftverlauf und zugleich qualitativer theoretischer Schubspannungsverlauf eines 5-Punkt-Biegeversuchs

### l / h-Verhältnis

Für die Ermittlung adäquater Abstände (Variable  $a$ ) zur Erzielung von Schubversagen zwischen Kraffteinleitungs- und Auflagerpunkt gilt es, ein geeignetes Verhältnis zwischen der Länge  $l$  und der Höhe  $h$  zu finden. Die Länge  $l$  beschreibt den Abstand zwischen den Auflagerpunkten und beinhaltet im wesentlichen zweimal die Variable  $a$  und eine Länge  $l_{KE}$  zwischen den Kraffteinleitungspunkten, siehe Abb. 1.12 (unter der Annahme, dass die Länge der Lasteinleitungsplatten =  $h/2$  entspricht). Schickhofer [82] schreibt, dass ein  $l/h$ -Bereich zwischen 5 : 1 und 7 : 1 für eine Prüfkfiguration notwendig ist, um Schubbrüche bzw. hohe Schubspannungen bei geringen Biegespannungen zu erzielen. Die entsprechenden Versuche wurden hierbei mit I-Querschnitten aus Brettschichtholz (BSH) erfolgreich bewältigt.

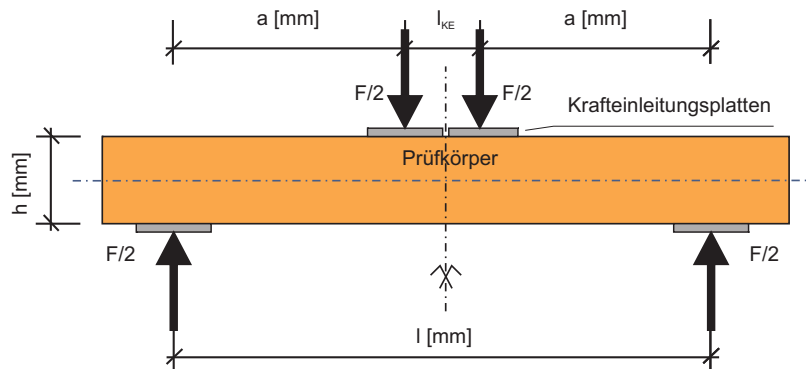


Abb. 1.12 Grafische Zuordnung der Begriffe Länge, Höhe, Variable  $a$  und der Abstand  $l_{KE}$  (mm).

## 1.11 Untersuchung von Randbedingungen zur Festlegung der Prüfkonfigurationsgeometrien

Die Bestimmung der Festigkeitseigenschaften von Holzwerkstoffen werden in Normenwerken (national / international) wie z.B. in der ÖNORM EN 408 oder in der ASTM D 143 geregelt. Eine europäische Regelung zur Ermittlung der Schubfestigkeit von Voll- und Brettschichtholz an bauteilgroßen Proben fehlt. Als erster wesentlicher Schritt zur Definition einer solchen Prüfkongfiguration gilt es die Art der Prüfung zu definieren.

In den bisherigen internationalen Arbeiten kommen hierfür fünf Methoden zur Anwendung (Riyanto [78]). Nach Riyanto [78] ist der Torsionsversuch am besten für die Bestimmung der Schubfestigkeit geeignet. Er ist auch das einzige bisherige Prüfverfahren, welches zu 100% Schubbrüche produziert. Weiters wurden der 3-Punkt-, der 4-Punkt- und der 5-Punkt-Biegeversuch vorgeschlagen. Als fünfte Variante wurde der in der ASTM verankerte Scherversuch an Kleinproben angeführt. Da die Methode nach ASTM D143 [3] nicht für bauteilgroße Träger herangezogen werden kann, mussten Korrekturfaktoren (Korin [31]) eingesetzt werden.

Obwohl der Torsionsversuch als die am geeignetste Variante angesehen wird, dies im gängigen baupraktischen Fall eines Biegeträgers nicht der Beanspruchungsweise entspricht bzw. die Kräfte und die Prüfeinrichtungen nicht als im Allg. vorhanden angenommen werden können, geht diese Diplomarbeit in Richtung der Biegeversuche, da diese die baupraktischen Gegebenheiten am Besten berücksichtigen.

Bei den Biegeversuchen ist darauf zu achten, dass die Schubfestigkeit immer in einer Beziehung zu der Biegefestigkeit steht bzw. im Versuch immer beide Spannungen in Kombination auftreten. Die Kunst liegt in der richtigen Wahl des Abstands zwischen Auflager- und Krafteinleitungsbereich (Variable  $a$ ). Um eine geeignete Prüfkongfiguration für einen Schubbruch mittels eines Biegeversuchs zu finden, müssen im Vorhinein Überlegungen bzw. Berechnungen bezüglich der auftretenden maximalen Biege- und Schubspannungen angestellt werden.

Um auf adäquate Abstände zur Erzielung von Schubversagen zwischen Krafteinleitungspunkt und Auflagerpunkt zu kommen, gilt es, die Beziehung zwischen der Biegespannung und der Schubspannung im Grenzbereich zu untersuchen.

Die Voraussetzung für einen Schubbruch im Biegeträger ist es, dass die Schubspannungen die Schubfestigkeit des Trägers erreichen und gleichzeitig die Biegespannungen die Biegefestigkeit nicht erreichen. Um statistisch die Wahrscheinlichkeit eines Schubbruchs weiter zu erhöhen, werden für die Untersuchungen die Biegefestigkeit auf dem 5%-Niveau und die Schubfestigkeit auf dem 95%-Niveau herangezogen. In den folgenden Gleichungen (Glg. 1.9, Glg. 1.10) wird die theoretischen Geometriefindung mathematisch gezeigt.

Mit der Glg. 1.9 werden die Schubspannungen für einen Rechteckquerschnitt berechnet.

Für die Biegespannungen wird die Glg. 1.10 angewendet.

$$\tau = 1,5 \cdot \frac{V}{A} \quad 1.9$$

$$\sigma_m = \frac{M}{W} \quad 1.10$$

Nachfolgend werden die einzelnen Bestandteile der davor genannten Gleichungen genauer dargestellt.

$$V = \frac{F}{2} \quad ; \quad A = b \cdot h$$

$$M = \frac{F}{2} \cdot a \quad ; \quad W = \frac{b \cdot h^2}{6} \quad ; \quad a = x \cdot h$$

$$\frac{\sigma_m}{\tau} \Rightarrow \frac{M/W}{1,5 \cdot V/A} \Rightarrow \frac{12 \cdot F \cdot b \cdot h \cdot a}{3 \cdot F \cdot b \cdot h^2} \Rightarrow \frac{4 \cdot a}{h} \Rightarrow 4 \cdot x$$

$$\frac{\sigma_m}{\tau} \Rightarrow \frac{f_{m,05}}{f_{v,95}} \Rightarrow 4 \cdot x \Rightarrow x = \frac{f_{m,05}}{4 \cdot f_{v,95}} \quad 1.11$$

Auf Basis der Beziehung in Glg. 1.11 kann nun eine Konfiguration bestimmt werden, wo eine 90% Wahrscheinlichkeit besteht, erfolgreich Schubbrüche am Biegeträger zu erzeugen.

Bei der Wahl der Variablen  $a$  ist darauf zu achten, dass mit zunehmenden Abstand die Biegespannungen gegenüber den Schubspannungen ansteigen und dadurch ein Biegeversagen ausgelöst werden kann. Bei zu geringem Abstand  $a$  gelten die ermittelten Schubfestigkeitswerte aufgrund der Überdrückung als überschätzt.

Weiters ist zu berücksichtigen, dass die Wahl der Prüfkonfiguration für alle Holzqualitäten geeignet sein soll. Geringere Holzklassen haben auch eine geringere Biegefestigkeit und werden bei gleicher Prüfkonfigurationsgeometrien erwartungsgemäß früher durch einen Biegebruch versagen noch bevor die Schubfestigkeit des Trägers erreicht wird. Dies liegt daran, dass sich bei geringeren Holzklassen u. a. die Anzahl von Holzmerkmalen, die als Schubverstärkung wirken können (Dübeleffekt), erhöhen ([82]). Nach Müller et al. [56] kann dies aber nur geschehen, wenn die Äste gut im Holz verwachsen sind.

Eine weitere Herausforderung liegt im Bereich der Krafteinleitung, da hier hohe Kräfte in den Träger übertragen werden. Um ein lokales Druckversagen quer zur Faser ausschließen zu können, müssen Vorkehrungen in Form von eingeklebten Gewindestangen oder Vollgewindeschrauben zur Auflagerverstärkung getroffen werden. Zusammenfassend liegt die Herausforderung darin, eine Prüfkonfiguration zu finden, mit welchem für handelsübliche Querschnitte und Holzqualitäten die Schubfestigkeit bestimmt werden kann.

## 2 Ziel der Arbeit

Das Ziel ist die Entwicklung und Erprobung einer für Vollholz geeigneten Prüfkongfiguration zur Ermittlung der Schubfestigkeit. Hierbei werden insbesondere die wesentlichen Einflussparameter auf die Schubfestigkeit und Einflüsse rückführbar auf die Versuchskonfiguration studiert und quantifiziert. Des Weiteren wird der Größeneinfluss anhand von Versuchen an unterschiedlichen Volumina von Voll- und Brettschichtholz – unter Berücksichtigung von Daten aus der Literatur sowie eigenen Versuchsreihen – ermittelt. Dies wird unter Einbindung von Modellen der Literatur, einer kritischer Analyse und gegebenenfalls einer Weiterentwicklung der gewählten Prüfkongfiguration durchgeführt.

## Literaturrecherche

### 2.1 Nationale und internationale Berichte zur Schubfestigkeit von Holzwerkstoffen

In diesem Kapitel werden national und international recherchierte Publikationen zusammengefasst, um den derzeitigen Stand der Technik zu erfassen. Der Inhalt umfasst die Betrachtung einzelner holzspezifischer Eigenschaften und deren Auswirkungen auf die Schubfestigkeit bis hin zu den bisherig verwendeten Prüfkonfigurationen.

#### 2.1.1 Allgemeine Betrachtung der Eigenschaften von Holzwerkstoffen

Im Bericht von Soltis und Gerhardt [86] wird die Bestimmung der Schubfestigkeit von Douglasie anhand von analytischen und experimentellen Methoden zusammengefasst. Die Schwierigkeit der Bestimmung der Schubfestigkeit von bauteilgroßen Holzträgern liegt laut Soltis und Gerhardt darin, dass diese von der Testmethode, der Prüfkörpergröße, der Prüfkonfiguration, den Holzmerkmalen, der Faserrichtung, dem Feuchtegehalt und der Temperatur abhängig ist. Hier ist zu ergänzen, dass jede Kenngröße im wesentlichen von diesen Einflussparametern abhängig ist und die Schwierigkeit in der versuchstechnischen Ermittlung unter Berücksichtigung all dieser Parameter liegt. Was für die Bestimmung der Druck-, Zug- und Biegefestigkeit relativ einfach ist, ist für die Ermittlung der Schubfestigkeit eher schwierig anzusehen, da bei den gegebenen Prüfkonfigurationen zusätzlich Querkzug- bzw. Querdrukspannung auftreten, welche die Schubfestigkeit beeinflussen. Eine Quantifizierung der Beeinflussung durch genannte Parameter ist in diesem Paper nicht zu finden.

Niemz [58] beschreibt in seiner Arbeit die gleichen Faktoren und weitert diese noch aus. Um reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten, muss, wenn ein Prüfkörper geprüft wird, auf folgende eigenschaftsverändernde Einflüsse des Holzes eingegangen werden. Der strukturelle Aufbau des Holzes (wie Rohdichte, Faser-Last-Winkel usw.), die Vorgeschichte des Holzes (Korrosion, Pilzbefall usw.), die Prüfmethode und die Umweltbedingungen, wie relative Luftfeuchte oder auch die Temperatur, spielen bei der Bestimmung der Holzkenngößen eine Rolle. In der Abb. 2.1 wird eine Einteilung der Einflussparameter

auf die Kenngrößen von Holz tabellarisch dargestellt.

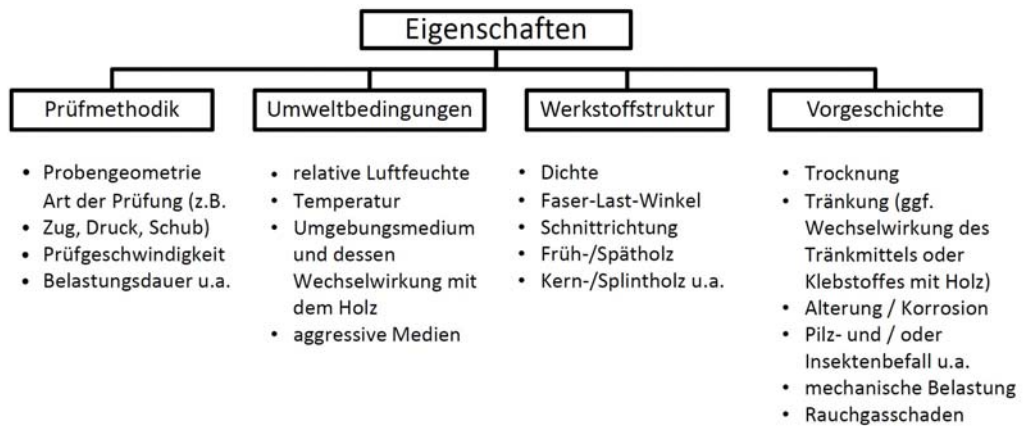


Abb. 2.1 Einflussfaktoren auf die zu bestimmenden Kennwerte von Holzwerkstoffen nach Niemz [58].

In der Folge wird auf wesentliche Einflussparameter einzeln eingegangen.

### 2.1.1.1 Holzfeuchte

Nach Kollmann [40] ist die Holzfeuchte der wesentlichste Einflussparameter auf die Holzeigenschaften, die Festigkeitseigenschaften aber auch auf die Formbeständigkeit von Holzwerkstoffen. Der größte Abfall der Biege- und Druckfestigkeit wurde von Kollmann zwischen 0% (theoretisch) und etwa 25% Feuchtegehalt festgestellt (Abb. 2.2). Das heißt, dass der größte Einfluss unterhalb des Fasersättigungsbereichs liegt. Die Scher- und die Zugfestigkeit nehmen im Feuchtebereich 0% (theoretisch) – 10% zu und nehmen bis zum Fasersättigungsbereich wieder ab (Abb. 2.3, Kollmann [40]).

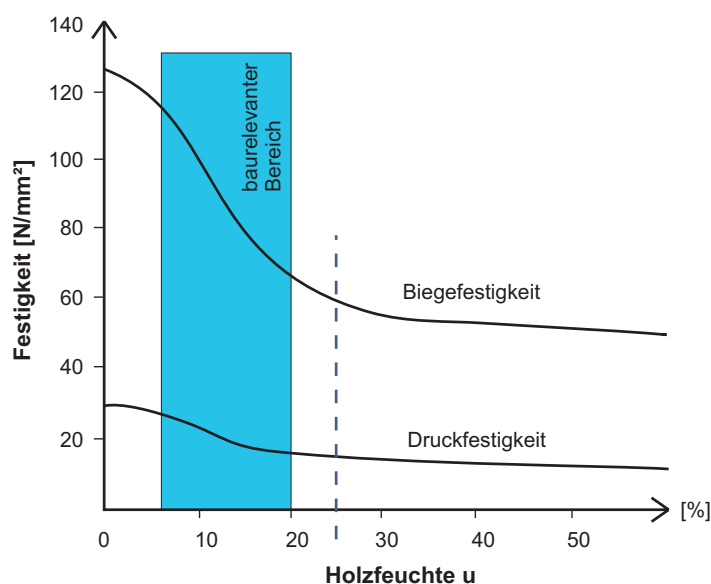


Abb. 2.2 Einfluss der Holzfeuchte  $u$  auf die Biege- und Druckfestigkeit ( $f_m, f_{c,0}$ ), nach Kollmann [40]

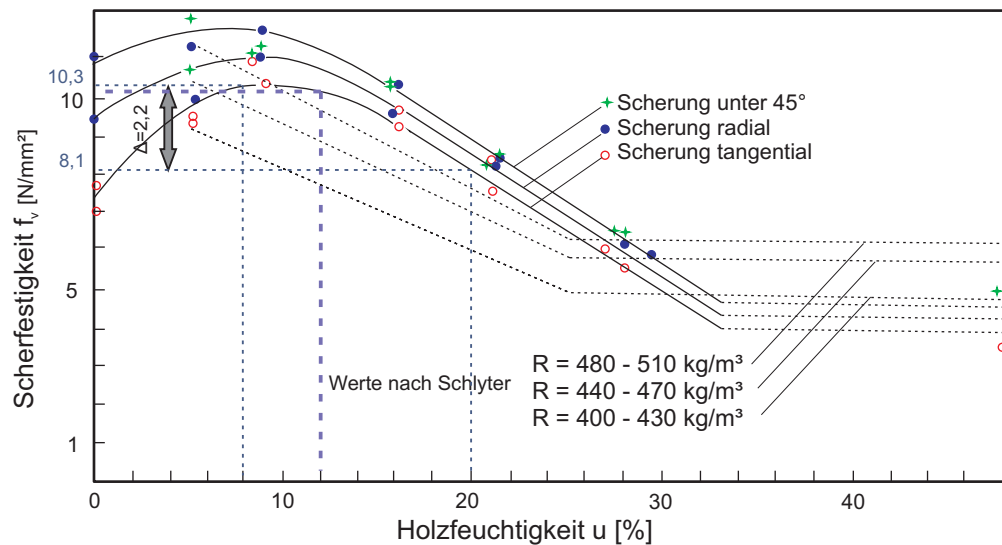


Abb. 2.3 Zusammenhang zwischen Scherfestigkeit  $f_v$  und Holzfeuchtigkeit  $u$  bei Kiefer nach Kollmann [40]

Weiters gibt Kollmann an, dass die höchste Scherfestigkeit (bei Kleinproben) bei einer Holzfeuchte von 8% liegt. Bei weiterer Zunahme der Holzfeuchte sinkt die Scherfestigkeit bis zum Fasersättigungsbereich. Die Scherfestigkeit ( $f_v$ ) von Holz sinkt bzw. steigt um ca.  $\pm 3\%$  (aus der Skizze ergibt sich  $\sim 2,4\%$ ) je 1% Feuchtigkeitszunahme bzw. -abnahme oberhalb / unterhalb der 8%-Grenze. Im Vergleich sinkt bzw. steigt die Zugfestigkeit ( $f_t$ ) um 3%, die Druckfestigkeit ( $f_c$ ) zwischen  $[4 \div 6]\%$  und die Biegefestigkeit ( $f_m$ ) um 4% pro 1% Feuchtigkeitsänderung. Kretschmann und Green [43] untersuchten ebenfalls den Einfluss der Holzfeuchte auf die Scherfestigkeit. In Anlehnung an die ASTM D143 [3] wurden Probekörper aus Southern Pine herangezogen und bei unterschiedlichen Holzfeuchten die Scherfestigkeit bestimmt. Das Ergebnis zeigt einen nichtlinearen Verlauf der Funktionskurve. Es bestätigt sich wieder, dass bei Zunahme der Holzfeuchte die Scherfestigkeit sinkt. Im baurelevanten Bereich (von 12% bis 19%) konnte ein Abfall von 2,7% pro 1% Feuchtezunahme festgestellt werden.

Rammer und McLean [77] veröffentlichten 1996 einen Bericht in dem sie den Einfluss der Holzfeuchtigkeit (mittels 5-Punkt-Biegeversuch) und der Risse (mittels 3-Punkt-Biegeversuch) auf die Schubfestigkeit erarbeiteten. Zur Bestimmung des Feuchteinflusses wurden zwei Versuchsserien gebildet. Die Prüferserie bestand aus Douglas Fir und Southern Pine. Das  $l/h$ -Verhältnis wurde mit 5:1 gewählt. In der ersten Serie wurden rissefreie Versuchskörper mit einer Holzfeuchtigkeit von  $u > 20\%$  verwendet. In der zweiten Versuchreihe besaßen die Prüfkörper eine Holzfeuchte von etwa 12%. In Tab. 2.1 ist der Zusammenhang zwischen Holzfeuchte und der Schubfestigkeit sowie zwischen der Bauteilgröße und der Schubfestigkeit ersichtlich.



Querschnitt	Schubfestigkeit in N/mm <sup>2</sup> , COV in %						Verhältnis $f_{v,12\%}/f_{v,20\%}$
	20% Holzfeuchte			12% Holzfeuchte			
b / h	Engelmann Spruce		Southern Pine		Southern Pine		Southern Pine
[mm]	$f_{v,mean}$	COV	$f_{v,mean}$	COV	$f_{v,mean}$	COV	[--]
51/102	8,5	20,9	10,1	8,2	12,8	13,1	1,3
51/203	8,1	29,1	7,8	22,0	10,7	15,6	1,4
102/203	7,2	19,7	7,1	9,1	11,3	20,9	1,6
102/305	4,3	17,0	5,9	11,6	8,3	20,0	1,4
102/356	3,9	13,4	5,1	18,7	7,4	8,5	1,4

Tab. 2.1 Zusammenfassung der Schubfestigkeiten in Abhängigkeit der Holzfeuchtigkeit nach Rammer und McLean [77]. Die Ergebnisse der Douglasie wurden im Bericht nicht angegeben.

Der Vergleich zwischen trockenen und feuchten Prüfkörpern zeigt, dass die von Kollmann getroffene Annahme einer 3%igen Änderung der Schubfestigkeit pro 1% Feuchteänderung in einem durchaus realistischen Bereich liegt. In der Tab. 2.1 sind Werte für die Schubfestigkeit bei 12% Holzfeuchte und bei 20% Holzfeuchte wiedergegeben. Diese 8% Differenz ergeben nach Kollmann einen Schubfestigkeitsabfall von 24%. Bei den Versuchen nach Rammer und McLean waren die Unterschiede noch größer, im Mittel sanken die Werte um 42% (= 5,3% pro 1% Feuchteänderung). Des Weiteren ist in Tab. 2.1 ein ausgeprägter Abfall der mittleren Schubfestigkeiten mit ansteigenden Prüfabmessungen zu entnehmen. Der hier zu beobachtende Größeneinfluss wird später, u. a. im Abschnitt 2.1.2, eingehender diskutiert.

Gerhards [24] erarbeitete die Beziehung zwischen der Holzfeuchte und der Schubfestigkeit anhand einer Literaturrecherche von merkmalfreien Kleinproben (clear wood). Hierfür konnte keine eindeutige Prüfkfiguration festgelegt werden. Betreffend dem Einfluss der Holzfeuchte konnte eine Steigerung der Schubfestigkeit um +18% bei einer Änderung der Holzfeuchte von 12% auf 6% bzw. ein Abfall der Schubfestigkeit um -18% bei einer Änderung der Holzfeuchte von 12% auf 20% gezeigt werden.

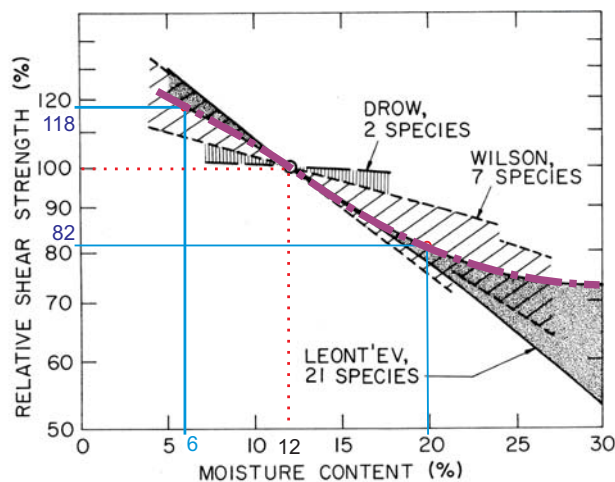


Abb. 2.4 Grafische Darstellung der Schubfestigkeit in Abhängigkeit der Holzfeuchte nach Gerhards [24].

Sundström et al. [89] zeigen an 104 BSH-Trägern (GL32c, Breite 115 mm, Höhe 540 mm, 12 Lamellen) die Auswirkungen von unterschiedlichen Feuchtegegebenheiten und unterschiedlichen Beschichtungen auf die Schubfestigkeit.

Es wurden fünf Serien gebildet, die wiederum aus 24 Prüfkörpern – ausgenommen Serie 1 hatte 6 Träger – bestanden. In den Serien 2-4 waren sechs Träger die zweilagig mit Aquatop 2600, sechs Träger die einlagig mit Aquatop 2600, sechs Träger die mit Öl (Linseed Oil) beschichtet und sechs Träger die nicht beschichtet wurden. Die Serie 1 bestand aus sechs unbehandelten Trägern. Für die Versuche wurde ein 3-Punkt-Biegeversuch angewendet, siehe Abb. 2.5.

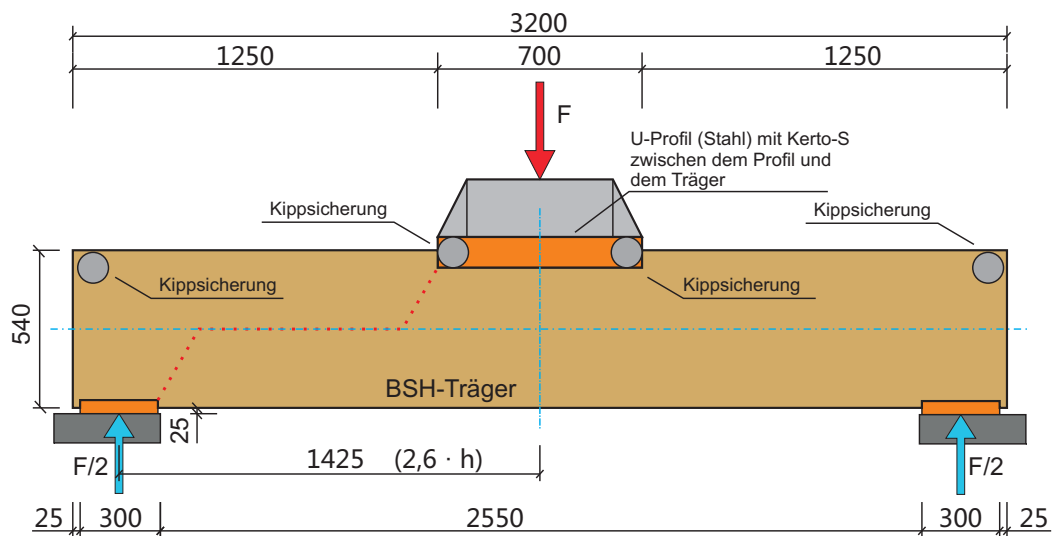


Abb. 2.5 Versuchskonfiguration nach Sundström et al. [89].

Die Unterscheidung der Serien zueinander lag in den unterschiedlichen Feuchtebedingungen. Die erste Serie lagerte ein Monat lang bei 65% relativer Luftfeuchtigkeit und wurde anschließend geprüft. Die zweite Serie konditionierte einen Monat lang bei 90% relativer Luftfeuchtigkeit. Für die dritte Serie wurde eine drei monatige Lagerung bei 90% relativer Luftfeuchtigkeit vorgesehen. Die vierte Serie lagerte drei Monate bei 90% und ein Monat bei 30% relativer Luftfeuchtigkeit. Die letzte Serie konditionierte drei Monate lang bei 90% und drei Monate bei 30% relativer Luftfeuchtigkeit.

Testserie	Beschichtung	Trägeranzahl	mittlere Schubfestigkeit	Standardabweichung	charakt. Schubfestigkeit
[-]	[-]	[-]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
S1	unbeschichtet	6	4,38	0,18	3,96
	<b>Alle</b>	<b>6</b>	<b>4,38</b>	<b>0,18</b>	<b>3,96</b>
S2	A2	6	4,13	0,68	2,66
	A1	6	3,98	0,38	3,13
	L	6	4,49	0,24	3,93
	unbeschichtet	6	4,46	0,43	3,52
	<b>Alle</b>	<b>24</b>	<b>4,27</b>	<b>0,48</b>	<b>3,37</b>
S3	A2	6	4,06	0,21	3,55
	A1	6	4,03	0,45	3,08
	L	6	4,18	0,4	3,28
	unbeschichtet	6	4,33	0,37	3,45
	<b>Alle</b>	<b>24</b>	<b>4,15</b>	<b>0,36</b>	<b>3,49</b>
S4	A2	6	4,2	0,23	3,66
	A1	6	4,44	0,28	3,78
	L	6	4,52	0,33	3,78
	unbeschichtet	6	4,67	0,24	4,11
	<b>Alle</b>	<b>24</b>	<b>4,46</b>	<b>0,31</b>	<b>3,89</b>
S5	A2	6	4,44	0,31	3,73
	A1	6	4,39	0,28	3,74
	L	6	4,31	0,48	3,29
	unbeschichtet	6	4,78	0,31	4,04
	<b>Alle</b>	<b>24</b>	<b>4,48</b>	<b>0,38</b>	<b>3,79</b>

Tab. 2.2 Ergebnisse der Biegeversuche zur Ermittlung der Schubfestigkeit von BSH-Träger nach Sundström et al. [89].

A1 ... 1 Beschichtungslagen von AQUATOP 2600 [32]

A2 ... 2 Beschichtungslagen von AQUATOP 2600 [32]

L ... 1 Beschichtungslagen von Linogard Underhållsolja [33]

Bei den Versuchen kam es zu 29 Biegeversagen und 73 Schubversagen. Die unterschiedlichen Feuchtegegebenheiten zeigten nur eine geringe Auswirkung auf die Schubfestigkeit von BSH-Träger der Holzklasse GL32c.

### 2.1.1.2 Rohdichte

Niemz [58] bezeichnet die Rohdichte als „Weiserwert“ für die Festigkeit bei fehlerfreien Kleinproben, da diese eine der dominierenden Kenngrößen für fast alle Eigenschaften des Holzes ist. Er behauptet, dass bei steigender Rohdichte auch die Festigkeit (Ann. Druck-, Zug-, Biege-, und Schubfestigkeit) ansteigt. Bei der Schubfestigkeit ist zu beachten, dass nicht die Dichte des gesamten Trägers herangezogen wird, sondern der Bereich im Querschnitt bzw. der Bereich der Bruchfläche. Die Versagensfläche bei einem Schubbruch ist stets in der weicheren Frühholzzone (optisch erkennbar durch die Jahrringe) gegeben bzw. kann je nach Stammlage auch die Spätholzschicht durchbrechen (senkrecht) um sich dann in der Frühholzebene weiter fortzusetzen (Abb. 2.6). Deshalb ist die Beziehung Schubfestigkeit vs. Rohdichte des gesamten Holzträgers bei der gleichen Holzart eher als kritisch anzusehen.

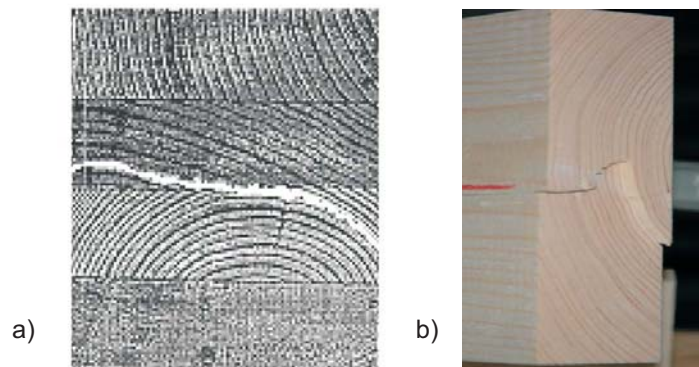


Abb. 2.6 Versagensfläche bei Schubbeanspruchung parallel zur Faser: a) BSH-Träger (Rammer [74]), b) Vollholzträger (Bruch ausgehend von der Kernseite)

Den Einfluss der Rohdichte auf die Scherfestigkeit beschreibt Kollmann [40] als eine „eindeutige Abhängigkeit“. Als Beispiel ermittelte Kollmann von 50 Eschenholz Prüfkörpern die radiale Scherfestigkeit und die Rohdichte (Abb. 2.7).

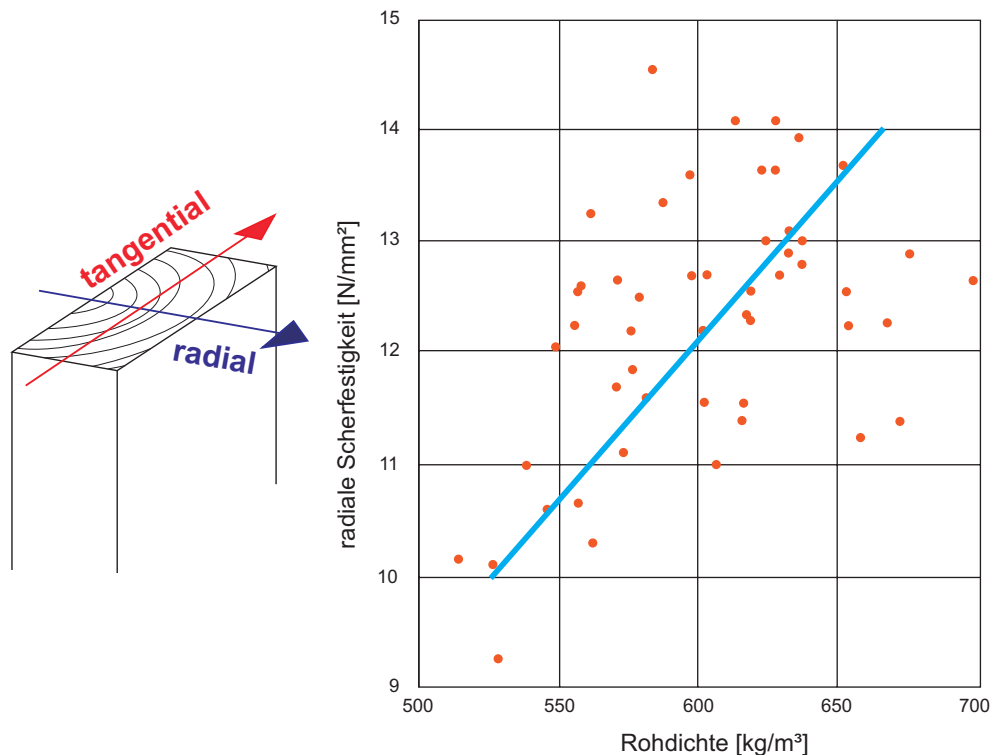


Abb. 2.7 Zusammenhang zwischen radialer Scherfestigkeit und Rohdichte bei Eschenholz [40]

### 2.1.1.3 Scherfestigkeit

Nach Niemz [58] ist die Scherfestigkeit der Widerstand, den ein Körper der Verschiebung zweier aneinanderliegender Flächen entgegensetzt. Für die prüftechnische Ermittlung der Scherfestigkeit wird auf die DIN 52187 [16] verwiesen. Als Einflussfaktoren werden die Jahrringlage (Schnittichtung zur Faserrichtung), die Rohdichte und der Feuchtegehalt angegeben. Müller et al. [56] hingegen stellte fest, dass die Jahrringlage (tangential bzw. radial) keine wesentliche Auswirkung auf die Schubfestigkeit hat. Hierfür wurden die Schubbruchverläufe in der Mikroebene von Lärche und Fichte untersucht. Der Einfluss der Rohdichte und der Holzfeuchte wurden bereits im Abschnitt 1.6 behandelt.

Kollmann [40] unterscheidet zwischen Schubfestigkeit und Scherfestigkeit. Die Schubfestigkeit, hervorgerufen durch eine zum Bruch führende Schubbeanspruchung, kann nach ihm am besten mittels Torsion eines stabförmigen Prüfkörpers erzielt werden. Der Scherversuch (Scherfläche der Kleinproben:  $b = 2,25-5 \text{ cm}$ ,  $l = 3,5-4 \text{ cm}$ ) wird eher als kritisch angesehen, da Scherspannungen nie isoliert auftreten, sondern in Kombination mit Nebenspannungen, verursacht durch Biegung, Druck und Schwellenpressung (hervorgerufen durch die Aufrechterhaltung des Kräftegleichgewichts). Laut Kollmann [40] sind diese Spannungsinteraktionen auch der Grund dafür, dass die Scherfestigkeit auf Basis oben angeführter Prüfkonfigurationen stets beträchtlich kleiner als die Schubfestigkeit, ermittelt anhand von Torsionsversuchen, ist. Kollmann weist weiters darauf

hin, dass Schwindrisse die Scherfestigkeit minimieren. Die Ursache dafür liegt in der Reduktion der Scherfläche.

#### 2.1.1.4 Temperatur

Gerhards [24] beschreibt den Zusammenhang zwischen Temperatur und den mechanischen Eigenschaften von Holz. Hierzu wurden die Arbeiten von Ohsawa und Yoneda [59] und von Sano [80] herangezogen. Ohsawa und Yoneda verwendeten fasergesättigtes und Sano luftgetrocknetes Holz. Die Versuche wurden im Bereich zwischen 20°C und 50°C durchgeführt (siehe Abb. 2.8.). Für die Temperaturzonen unter 20°C und über 50°C wurde der Funktionsverlauf extrapoliert.

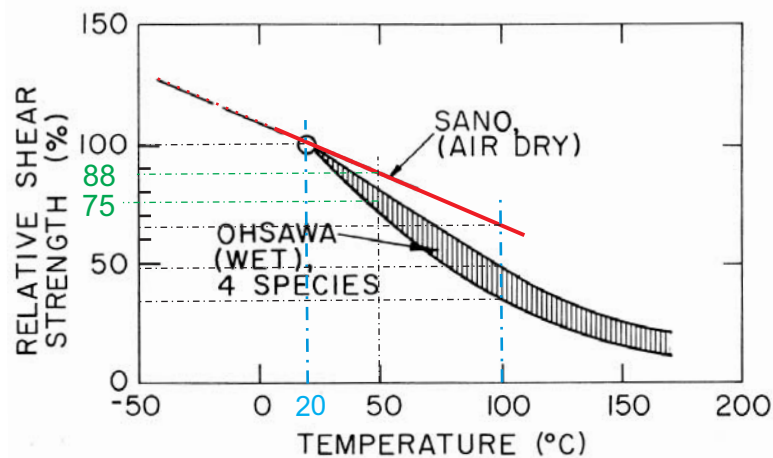


Abb. 2.8 Grafische Darstellung der relativen Schubfestigkeit (parallel zur Faser) in Abhängigkeit der Temperaturänderung [24]

Bei einem Anstieg auf +50°C ergab sich eine Abminderung der Schubfestigkeit für das Holz mit gesättigten Fasern um 25%. Für das luftgetrocknete Holz zeigte sich bei +50°C ein Abfall von etwa 11%. Aus der Abb. 2.8 ist zu erkennen, dass die Schubfestigkeit bei 100°C mit rund 40% des Wertes bei 20°C abgeschätzt werden kann. Dafür ist das in den Zellen gebundene Wasser, welches sich bei erhöhter Temperatur in Wasserdampf umwandelt, verantwortlich. Durch die Volumszunahme (Prozess Wasser zu Wasserdampf) hat der Dampf das Bestreben aus dem Holz auszutreten. In Folge dessen werden die Zellen auseinandergedrängt und dadurch die Festigkeit verringert.

## 2.1.2 Grösseneinflüsse und dessen Auswirkung auf die Festigkeiten, im Speziellen der Schubfestigkeit

Die Berücksichtigung des Grösseneinflusses ermöglicht im Allgemeinen die Übertragbarkeit von Kennwerten, welche unter genormten Referenzbedingungen ermittelt wurden, auf Kenngrößen für Bauteile mit von den Referenzdimensionen abweichenden Abmessungen. Durch Änderungen in der Dimension im beanspruchten Volumen ist im Allgemeinen eine Erhöhung (bei kleiner werdendem Volumen) bzw. Reduktion (bei größer werdendem Volumen) von Festigkeitswerten im Wesentlichen zu erwarten.

Die Ursache für diese Festigkeitsänderung liegt in der Zu- bzw. Abnahme der Wahrscheinlichkeit des Auftretens von versagensinduzierenden Strukturstörungen im Materialgefüge. In den derzeit gültigen Normen wird dieser Einfluss u. a. für Holz und Holzbauteile zum Teil mittels Größenfaktoren berücksichtigt. Hier ist zu erwähnen, dass in den europäischen Normen bislang nur die Biegefestigkeit und die Zugfestigkeit eine Korrektur erfahren. Für die Schubfestigkeit wird kein skalierender Größenfaktor angegeben. Eine diesbezügliche tabellarische Zusammenfassung wird im Abschnitt 2.2.6, Tab. 2.14 gezeigt.

Eine mögliche Handhabe die Schubfestigkeit von Holz und Holzwerkstoffen mit dem Grösseneinfluss in Zusammenhang zu bringen wird u. a. durch Anwendung der Sprödbruchtheorie von Weibull (1939) („weakest link theory“) gezeigt. Diese Theorie ermöglicht unter Einhaltung der Randbedingungen (sprödes Materialverhalten, identisch und unabhängig verteilte Festigkeiten in den Subelementen im Werkstoff und somit gleichmäßige Verteilung von Strukturstörungen) die Berechnung von Versagenswahrscheinlichkeiten von Bauteilen in Abhängigkeit der Spannungsverteilung und ihrer Dimension relativ zum Referenzspannungszustand und zur -dimension. Da Holz unter Zug- und Schubbeanspruchung ein solches Materialverhalten besitzt, kann nach [62] diese Theorie angewendet werden.

Ein spröde versagender Werkstoff zeichnet sich dadurch aus, dass er keine Spannungsspitzen abbauen kann. Aufgrund dieser Tatsache geht jeder Bruch von der ausgeprägtesten und hinsichtlich ihrer Belastbarkeit ausgenutzten Strukturstörung aus. Dies kann mit einer Kette verglichen werden, welche unter Zugbeanspruchung nur so stark ist wie ihr schwächstes Glied.

Mistler [53] stellte fest, dass die Randbedingungen von Weibull nicht voll erfüllt sind, daher entwickelte er ein erweitertes Model unter Betrachtung einer zweiachsigen Beanspruchung durch Querkraft und Schub für Holzquerschnitte.

Nach den Überlegungen von Weibull (1939) müsste ein Prüfkörper mit  $m$  seriell angeordneten einzelnen Teilstücken unter Belastung bei dem schwächsten Teilstück (Kettenglied) versagen. Mistler erweiterte diese Überlegung um eine weitere Dimension, sodass nicht nur seriell angeordnete Teilstücke sondern auch nebeneinanderliegende (parallel) Glieder betrachtet werden. Hierbei wird in Faserrichtung sowie zwischen den Elementen eines BSH-Trägers ein mittels der Weibull-Theorie beschreibbares Verhalten angenommen. In der Ebene der Brettbreite wird gemäß dem faserstrukturellen Aufbau

von Holz eine Lastverteilung nach einem Teilversagen im Querschnitt und somit ein seriell-paralleles Systemverhalten zugelassen welches, mit einem Seil, bestehend aus mehreren Litzen, vergleichbar ist. Durch Kombination beider Modelle zum sogenannten Seil-Ketten-Model nach Mistler [53] gelang es den Festigkeitsabfalls bei zunehmendem beanspruchten Volumen bei Holzwerkstoffen wie zum Beispiel bei BSH wirklichkeitsnäher darzustellen.

Longworth erkannte schon vor ca. 30 Jahren den Zusammenhang zwischen der Schubfestigkeit und dem schubbeanspruchten Volumen. Auf Basis des in seiner Arbeit erarbeiteten Ansatzes mit Schubfläche in [in<sup>2</sup>] und Schubfestigkeit in [psi] Glg. 2.1, welche von Gehri [23] für metrische Einheiten umgeformt wurde, wurde ein Vergleich mit eigenen Versuchen in [23] durchgeführt.

Die Berechnung der Schubfestigkeit in Abhängigkeit der einseitigen Scherfläche (Abb. 2.9) kann nach der Glg. 2.2 berechnet werden. Hier ist anzumerken, dass die Gleichungen nicht auf einen Referenzquerschnitt bezogen sind.

$$f_v = 2351 - 744 \cdot \log A_s \quad 2.1$$

$$f_v = 100 \cdot A_{\text{shear}}^{-0,28} \quad 2.2$$

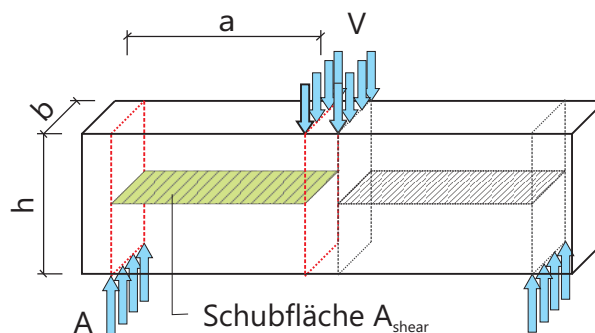


Abb. 2.9 Definition der Schubfläche für die Berechnung nach Gehri [23]

Folglich lässt sich der Größeneinfluss abhängig von der Schubfläche mit dem Exponenten von -0,28 umschreiben (Werte hier in [mm] und [N/mm<sup>2</sup>]). Die Begründung für die Betrachtung nur einer Scherfläche liegt im seriellen Systemverhalten wonach im Allg. nur eine der beiden Flächen als versagensinduzierend gilt. Es ist zu beachten, dass die somit ermittelten Schubfestigkeiten für ein serielles System von N = 2 gelten und eine Unterschätzung der Materialschubfestigkeit (N = 1) darstellen.



### 2.1.3 Einfluss des Volumens und der Spannungsverteilung auf die Festigkeit eines Trägers mit rechteckigem Querschnitt

Wie im Abschnitt 2.1.2 schon erwähnt, ist die Schubfestigkeit von der Größe des beanspruchten Volumens abhängig. Colling [11] beschreibt als weiteren Einflussfaktor die Schubspannungsverteilung über die Trägerlänge. Für die mathematische Umsetzung verwendete er sogenannte Völligkeitsbeiwerte, die den Einfluss der Spannungsverteilung auf die Versagenswahrscheinlichkeit erfassen.

Völligkeitsbeiwerte sind Beiwerte, welche die Versagenswahrscheinlichkeit eines individuell beanspruchten Querschnittes bzw. Trägers im Verhältnis zum Referenzspannungszustand bei konstanten Dimensionen, beschreibt.

Die Abhängigkeit der Festigkeit von der Spannungsverteilung und der Größe des beanspruchten Volumens wird in der nachfolgenden Formel unter Anwendung der Weibull-Theorie nach [11] gezeigt.

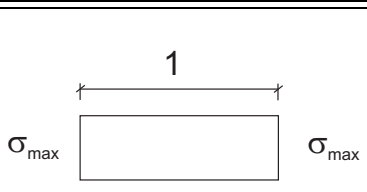
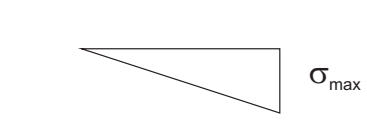
$$\frac{f_{\text{mean},2}}{f_{\text{mean},1}} = \frac{\bar{\sigma}_{\text{max},2}}{\bar{\sigma}_{\text{max},1}} = \frac{\lambda_{L,1}}{\lambda_{L,2}} \cdot \frac{\lambda_{H,1}}{\lambda_{H,2}} \cdot \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{1/m} \quad 2.3$$

$m$  Exponent der Weibull-Verteilung (Träger mit Rechtecksquerschnitt,  $h$  und  $b$  konst.) [-]


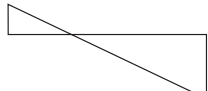
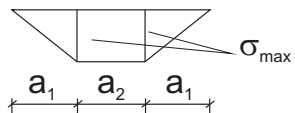
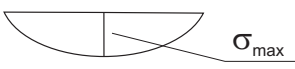
$f_{\text{mean}}$  mittlere Festigkeit [N/mm<sup>2</sup>]

$\bar{\sigma}_{\text{max}}$  mittlere max. Spannung [N/mm<sup>2</sup>]

$\lambda_L, \lambda_H$  Völligkeitsbeiwerte [-] (  $L$  ... bezogene max. Spannung über die Länge,  $H$  ... bezogene max. Spannung über die Höhe)

Spannungsverteilung	$\lambda = \left[ \int_{\eta=0}^1 f^m \cdot (\eta) d\eta \right]^{1/m}$
	1,0
	$\left(\frac{1}{m+1}\right)^{1/m}$

Tab. 2.3 Völligkeitsbeiwert  $\lambda$  in Abhängigkeit vom Exponenten  $m$  der 2-parametrischen Weibull-Verteilung für verschiedene Spannungsverteilungen nach Colling [11]

Spannungsverteilung	$\lambda = \left[ \int_{\eta=0}^1 f^m \cdot (\eta) d\eta \right]^{1/m}$
$k \sigma_{\max}$  $\sigma_{\max}$	$\left( \frac{1}{m+1} \cdot \frac{1-k^{m+1}}{1-k} \right)^{1/m}$
$k \sigma_{\max}$  $\sigma_{\max}$	$\left( \frac{1}{m+1} \cdot \frac{1+ k ^{m+1}}{1+ k } \right)^{1/m}$
 $\sigma_{\max}$	$\left[ \frac{1}{m+1} \cdot (1 + a_2 \cdot m) \right]^{1/m}$
 $\sigma_{\max}$	$\left[ \frac{1}{m+1} \cdot (1 + 0,345 \cdot m - 0,027 \cdot m^2 + 0,0013 \cdot m^3) \right]^{1/m}$

Tab. 2.3 Völligkeitsbeiwert  $\lambda$  in Abhängigkeit vom Exponenten  $m$  der 2-parametrischen Weibull-Verteilung für verschiedene Spannungsverteilungen nach Colling [11]

Mit der Glg. 2.3 und den Völligkeitsbeiwerten aus Tab. 2.3 können gleiche Träger mit unterschiedlichen Spannungsverteilungen verglichen und der Einfluss auf die erwartbare Schubfestigkeit bestimmt werden. Colling [11] gibt den Exponenten  $m$  näherungsweise zu  $m = 5$  für Quersug- und Schubbeanspruchung und  $m = 8$  für Biegebeanspruchungen an. Der Exponent  $m$  selbst hängt vom Variationskoeffizienten ab, welcher wiederum für Schubfestigkeiten mit 25% und für Biegefestigkeiten mit 15% angenommen wurde.

### 2.1.4 Verwendete Prüfkfigurationen für die Bestimmung der Schubfestigkeit von Holzträgern

Aicher und Ohnesorge [1] untersuchten die Schubfestigkeit von Brettschichtholz aus Buche. Der Schwerpunkt lag in der Untersuchung der Auswirkung von Verfärbungen in Folge von fakultativer Kernholzbildung auf die Festigkeit. Die Untersuchungen wurden mittels einem 4-Punkt-Biegeversuch an einem I-Träger durchgeführt. Die Höhe betrug 600 mm und das  $l/h$ -Verhältnis 5 : 1 (Holzfeuchte  $u = 11,3 \pm 1,0\%$ ). Insgesamt prüfte man zwei Serien zu je sieben Probekörpern.

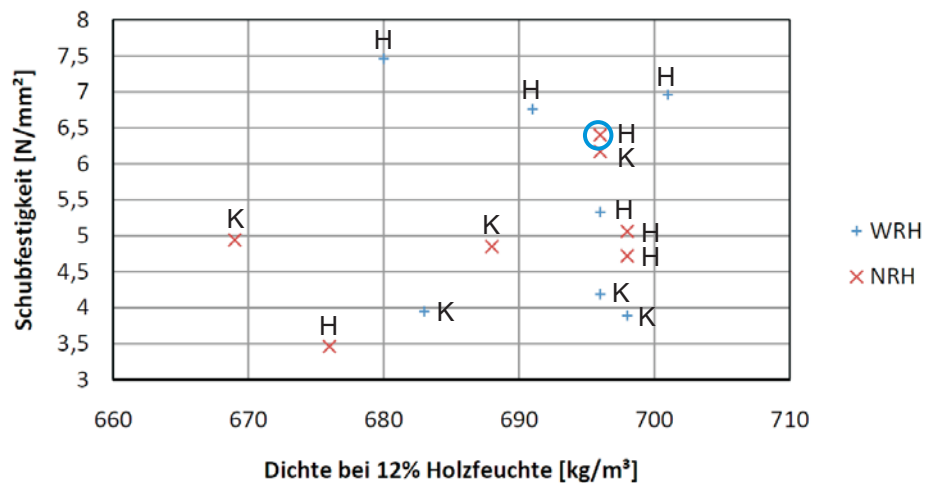


Abb. 2.10 Schubfestigkeit vs. Rohdichte nach Aicher und Ohnesorge [1] (H = Holzbruch, K = Versagen in der Klebefuge).

Abb. 2.10 beinhaltet den Zusammenhang zwischen der Rohdichte (bei 12% Holzfeuchte) und der Schubfestigkeit, dargestellt unter Berücksichtigung der Ergebnisse beider Serien. Proben ohne Verfärbung werden mit NRH (no red heartwood) und jene mit einer Verfärbung mit WRH (with red heartwood) gekennzeichnet. 13 von insgesamt 14 Versuche versagten auf Schub, ein Prüfkörper versagte durch einen Biegebruch (gekennzeichnet durch Kreis).

Das Wesentliche dieser Arbeit ist (im Bezug auf die Diplomarbeit), dass der 5%-Quantilwert der Schubfestigkeit auf Basis einer Biegeprüfung bei  $3,5 \text{ N/mm}^2$  ( $f_{\text{mean}} = 5,3 \text{ N/mm}^2$ ,  $\text{COV} = 23,8\%$ , alle 14 Träger berücksichtigt) liegt und dass das angewandte Prüfverfahren (4-Punkt-Biegeversuch) unter den gegebenen Geometrieverhältnissen verwertbare Ergebnisse im Bezug auf die Schubfestigkeit liefert. Weiters bekam man die Erkenntnis, dass die Verfärbung bei der untersuchten Rotbuche keinen Einfluss auf die Schubfestigkeit hat.

Im Bericht von Keenan et al. [37] wurde die Schubfestigkeit und deren Abhängigkeit von der Größe der Prüfkörper von unterschiedlichen Holzarten (white spruce, black spruce und eastern spruce in Kombination mit jack pine) untersucht. Es wurden drei Serien erstellt mit jeweils unterschiedlichen Abmessungen, siehe Abb. 2.11. Die Serien unterschieden sich nicht nur in der Dimension bzw. dem beanspruchten Volumen, sondern auch in der Zusammensetzung der einzelnen Probekörper hinsichtlich Holzart und Festigkeitsklasse. In der Serie A verwendete man kleine, merkmalfreie Prüfkörper aus Fichte (white spruce). In dieser Serie unterschied man zwischen drei verschiedenen Höhen, drei unterschiedlichen Breiten und in zwei unterschiedlichen Jahringlagen (Faktorisierung  $3 \times 3 \times 2$ ). Der Abstand zwischen Kraftereinleitung und Auflager wurde mit  $a = 2 \cdot h$  festgelegt. Die Holzfeuchte betrug  $u = 8\%$ . Für jede Zusammensetzung der einzelnen Faktoren (Höhe, Breite, Orientierung der Lamellen) wurden sechs Replikationen gefertigt und somit 108 Prüfkörper produziert. Für die Serie B verwendete man

Prüfkörper aus „black spruce“. Gleich wie in der Serie A wurden die Höhe und die Breite variiert. Zusätzlich wählte man noch drei unterschiedliche Längen zwischen Auflager und Kraffteinleitung (Faktorisierung 3 x 3 x 3), d.h., dass das a/h-Verhältnis nicht konstant blieb. Die Träger verstärkte man im Randbereich mit Lamellen aus Douglasie. In dieser Serie wurden zwei Replikationen je Kombinationsmöglichkeit (h zu b zu l) geprüft und somit 54 Versuche bearbeitet. Das Prüfmaterial hatte eine Holzfeuchte zwischen 8–10%. In der Serie C sind drei handelsübliche BSH-Querschnitte verwendet worden. In den Randlamellen wurden Lamellen mit einer höheren Steifigkeit verwendet als in den mittleren Lamellen. Das Material setzte sich aus rund 75% Fichte (eastern spruce) und 25% Kiefer (Pinus banksiana Lamb) zusammen. Bei gleichbleibendem Verhältnis zwischen der Prüfkörperhöhe und dem Abstand zwischen der Kraffteinleitung und dem Auflager wurden jeweils 10 Prüfkörper getestet.

Das Resultat der einzelnen Prüfserien zeigt, dass es signifikante Zusammenhänge zwischen der Prüfkörper-Geometrie und der Schubfestigkeit gibt (Abb. 2.12). Man erlangte die Erkenntnis, dass die Schubfestigkeit mit zunehmender Trägerhöhe abnimmt (Links: Abb. 2.13, Abb. 2.14), andererseits bei Vergrößerung der Breite die Schubfestigkeit steigt (Rechts: Abb. 2.13, Abb. 2.14). Weiters stellte man fest, dass die Schubfestigkeit bei Probekörpern mit eingebaut liegenden Jahrringen geringer ist als bei jenen mit stehenden Jahrringen. Diese Feststellungen waren für die Serie A und B zutreffend. Für die Serie C konnten fast keine statistischen Zusammenhänge zwischen der Veränderung der Höhe oder der Breite und der Schubfestigkeit erkannt werden. Bei Zunahme der Höhe und der Breite liegt eine leichte Erhöhung der Schubfestigkeit vor. Auch konnte man tendenziell einen Zusammenhang zwischen der Streuung der Schubfestigkeit und dem auf Schub beanspruchten Volumen erkennen. Bei steigendem Volumen zeigt sich eine Reduktion der Streuung der Schubfestigkeit. Dies gilt als Indiz für die Homogenisierung des Schubversagens. Die Ergebnisse aus den Serien B und C legen nahe, dass als untere Grenze der Schubfestigkeit für Fichtenholz ein konstanter Wert von  $f_{v,min} = 4,00 \text{ N/mm}^2$  und für Douglasie  $f_{v,min} = 2,25 \text{ N/mm}^2$ , ungeachtet des beanspruchten Volumens, angesetzt werden kann. Als Fazit für die Bestimmung der charakteristischen Schubfestigkeit wird ein BSH-Träger mit verstärkten Randlamellen als idealer Prüfkörperaufbau, unabhängig von der Holzart, angesehen.

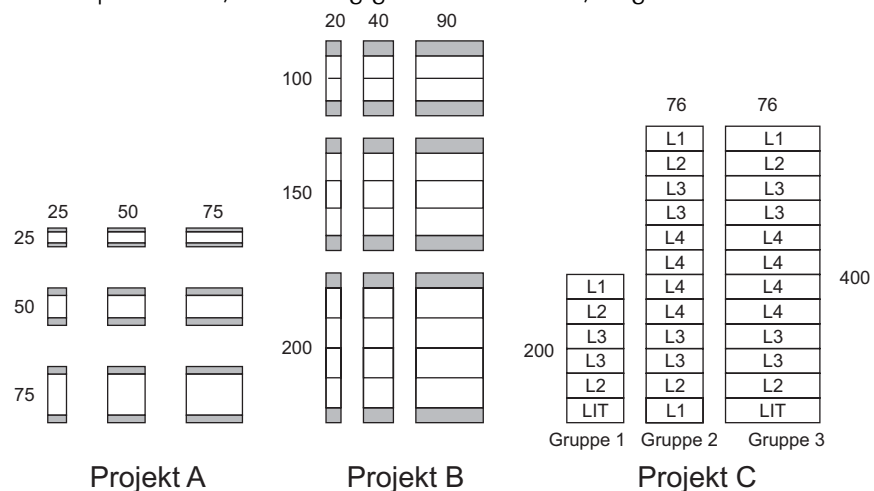


Abb. 2.11 Querschnittsabmessungen der Prüferien von Keenan [37], Werte in [mm].

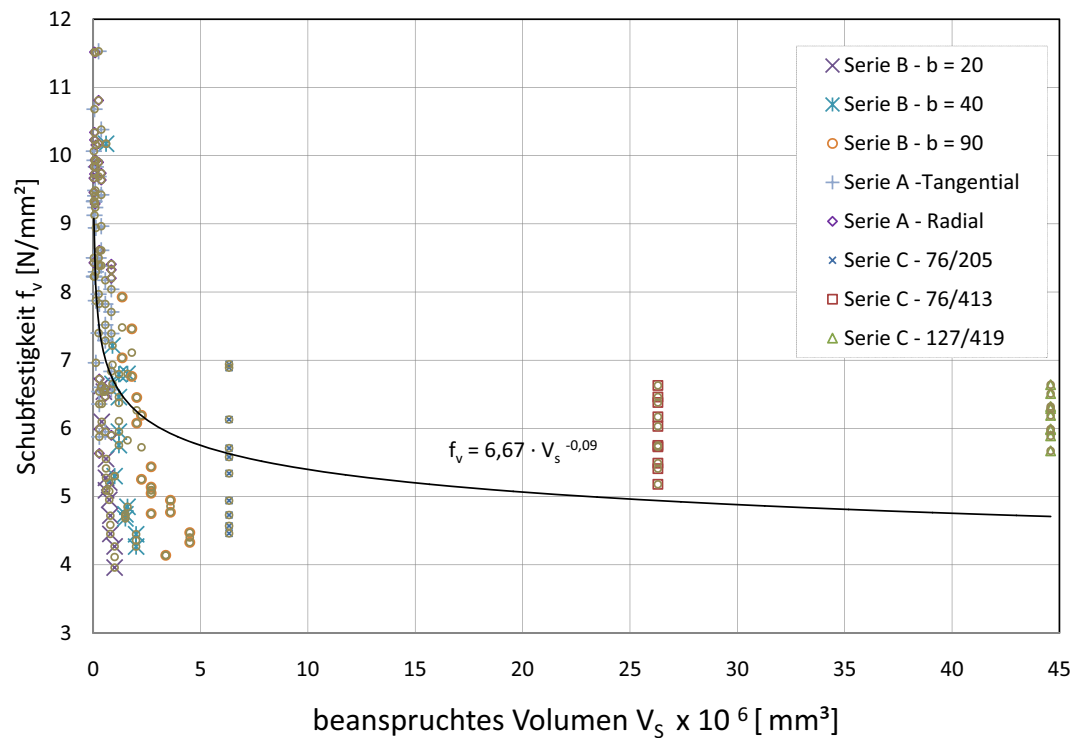


Abb. 2.12 Beziehung zwischen der Schubspannung und dem Schubvolumen von drei Versuchsreihen, inkl. Trendlinie (Potenzfunktion) [37]

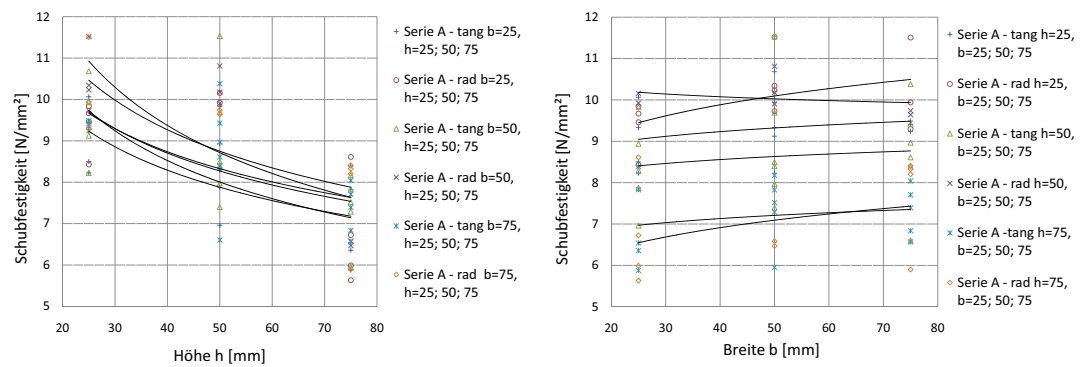


Abb. 2.13 Serie A: Beziehung zwischen der Schubspannung und der Höhe (links); der Breite (rechts)

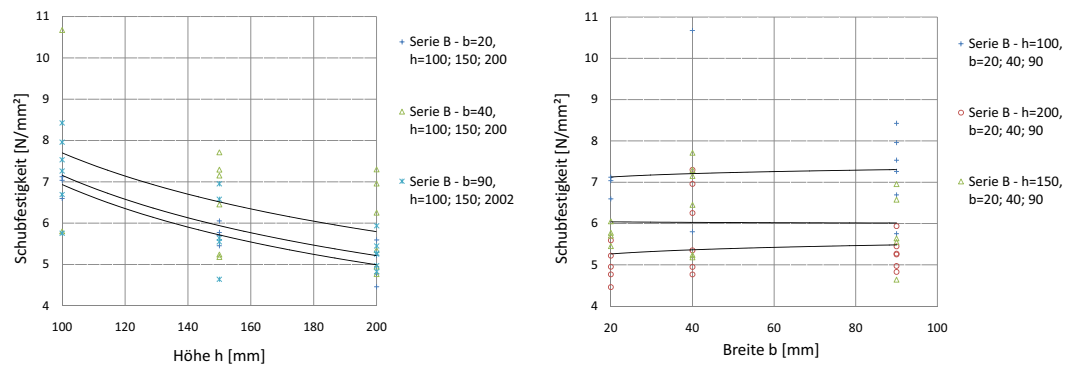


Abb. 2.14 Serie B: Beziehung zwischen der Schubspannung und der Höhe (links); der Breite (rechts)

Dem Thema „Ermittlung der Schubfestigkeit von Vollholzträgern“ widmete sich auch Korin [42]. Er schlug ein Prüfverfahren auf Basis eines Rechteckquerschnitts mit integrierter Sollbruchstelle für die Bestimmung der Schubfestigkeit vor. Die Form wurde durch das Einschlitzn im Mittelbereich von Rechteckquerschnitten erreicht (siehe Abb. 2.15, rechts). Die weiteren Untersuchungen wurden mittels einem 3-Punkt-Biegeversuch (Abb. 2.15, links) und einem zweifeldrigen 5-Punkt-Biegeversuch (Abb. 2.16) durchgeführt. Die Trägerlänge wurde mit dem Fünffachen der Gesamthöhe des Prüfkörpers für den 3-Punkt-Biegeversuch und mit dem 5,5-fachen der Höhe für den 5-Punkt-Biegeversuch gewählt. Durch den 3-Punkt-Biegeversuch konnte bei 18 von 25 Prüfungen (72%) ein Schubversagen erzielt werden, der Rest versagte frühzeitig aufgrund von Holzmerkmalen in der Biegezugzone. Bei dem 5-Punkt-Biegeversuch waren es 17 von 25 Prüfkörper (68%).

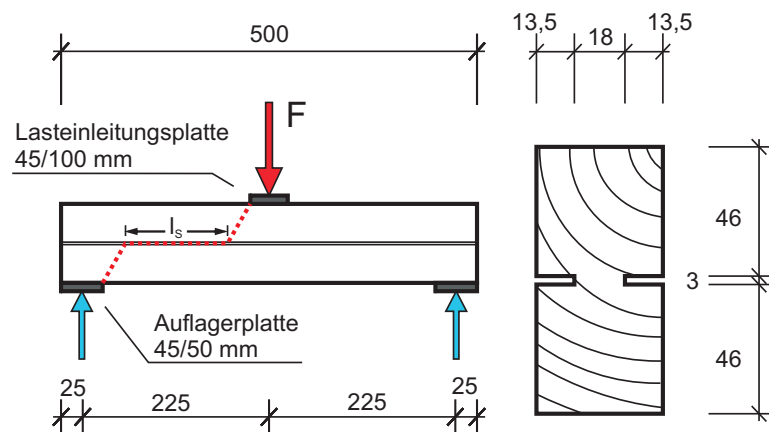


Abb. 2.15 Versuchskonfiguration (3-Punkt-Biegeversuch) zur Ermittlung der Schubfestigkeit von Vollholz mittels einem Rechteckquerschnitts mit integrierter Sollbruchstelle nach Korin [42], Werte in [mm]

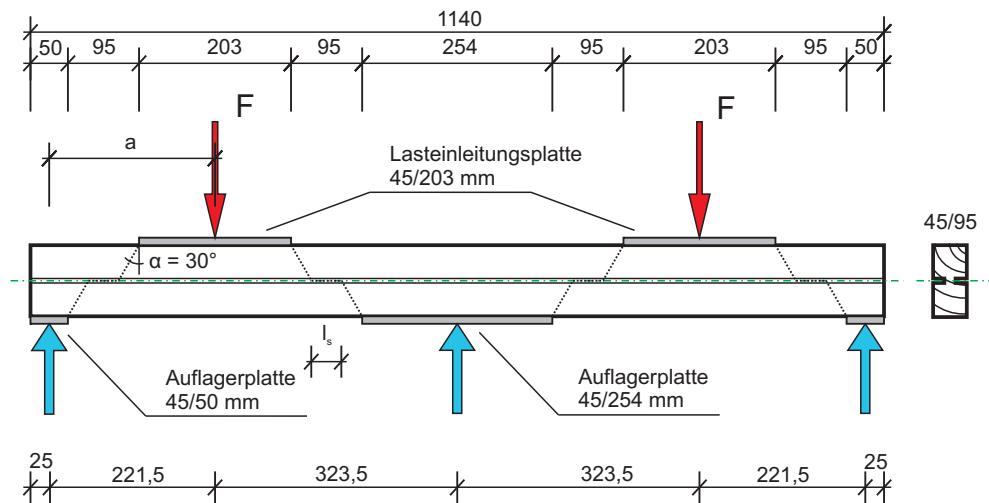


Abb. 2.16 Versuchskonfiguration (5-Punkt-Biegeversuch) zur Ermittlung der Schubfestigkeit von Vollholz mittels einem Rechteckquerschnitt mit integrierter Sollbruchstelle nach Korin [42], Werte in [mm]

Die Wahl des Querschnitts hat den Vorteil, dass der Randquerschnitt eine größere QS-Fläche als der Mittelquerschnitt aufweist und dadurch ein höherer Widerstand gegen Biegeversagen gegeben ist. Aufgrund der Reduktion der Schubfläche (Stegbreite multipliziert mit der Länge  $a$ ) wird hier eine Sollbruchstelle für ein Schubversagen gebildet. Bei dem 3-Punkt-Biegeversuch hatte Korin eine Schubversagensquote von 72% und beim Zweifeldträger (5-Punkt-Biegeversuch) immerhin noch 68%. Dieser geringe Anteil liegt vermutlich daran, dass der größte Bereich der Schubfläche überdrückt ist, d.h., dass hier die Schubspannung in Interaktion mit der Querdruckspannung wirkten. Dadurch steigt das Schubtragvermögen des Trägers und somit auch die Wahrscheinlichkeit, dass die Biegefestigkeit des Trägers vorzeitig überschritten wird. In Folge können keine exakten Aussagen über die Schubfestigkeitsverteilung getroffen werden. In der Abb. 2.15 und Abb. 2.16 wurde der querdruckspannungsfreie Bereich unter Annahme eines Druckausbreitungswinkels von  $30^\circ$  strichliert eingezeichnet.

Lam, Yee und Barrett [45] beschäftigten sich mit dem Zusammenhang zwischen der Schubfestigkeit von Kleinproben und der von bauteilgroßen Trägern. Für die Versuche wurden zwei Holzarten (Douglas-fir, Hem-fir) und eine Holzhandelsgruppe (Spruce-Pine-Fir) ausgewählt. Als Prüfkongfiguration wurde ein 5-Punkt-Biegeversuch (Abb. 2.17) mit einem  $l/h$ -Verhältnis von  $5:1$  (Serie 1) bzw.  $6:1$  (Serie 2) gewählt. Die dabei ermittelten Schubfestigkeitswerte wurden anschließend mit den Ergebnissen der ASTM-Versuche [3] inkl. Modifikationsfaktoren [4] (berücksichtigen Einflüsse wie Lastdauer, Volumen, Lastkonzentration und Risse) verglichen. Mit Hilfe der Reduktionsfaktoren werden die Ergebnisse der Scherprüfungen nach der ASTM [3] (Blockscherversuch) auf Designwerte für bauteilgroße Träger umgerechnet. Für den Einfluss der Lasteinwirkungsdauer wird ein Reduktionsfaktor von 1,82 und für die Lastkonzentration ein Reduktionsfaktor von 2,25 genannt. Weiters wird noch eine Gleichung für die Berücksichtigung der Bruchmechanik, sprich Risse, angegeben.

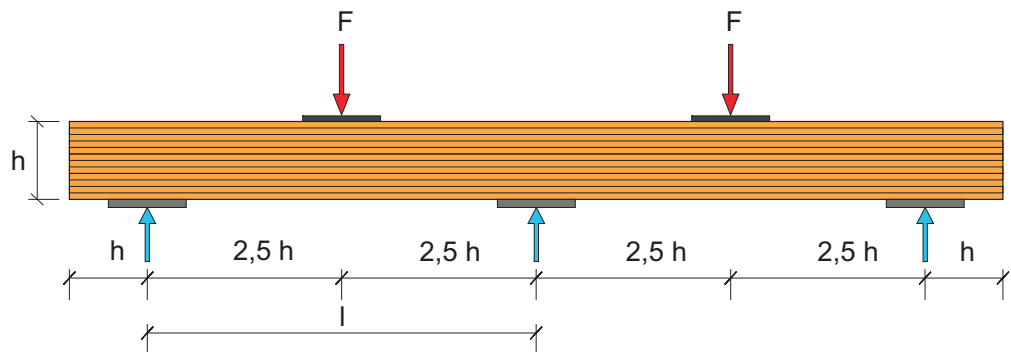


Abb. 2.17 Versuchskonfiguration eines 5-Punkt-Biegeversuchs mit einem  $l / h$ -Verhältnis von  $5 : 1$  [45]

Für die Versuchsdurchführung wurden von jeder Holzart bzw. Holzartgruppe 50 Stück mit einem  $l / h$ -Verhältnis von  $5 : 1$  und je 50 Stück mit einem Verhältnis von  $6 : 1$  geprüft. In der nachfolgenden Tab. 2.4 werden die Ergebnisse, getrennt nach den  $l / h$ -Verhältnissen und den Holzarten, dargestellt.

Schubfestigkeit $f_{v,median}$ [N/mm <sup>2</sup> ]		
Holzart	$l / h$ -Verhältnis	
	$5 : 1$	$6 : 1$
Douglas-fir	9,47	8,61
Hem-fir	7,82	6,20
Spruce-Pine-Fir	7,65	6,70

Tab. 2.4 Ergebnisse der Untersuchung der Schubfestigkeit von unterschiedlichen Holzgruppen in Abhängigkeit vom beanspruchten Volumen (bei gleichbleibendem Querschnitt).

Nur 40% der Versuche versagten auf Schub, weitere Versagensarten und ob bei der Auswertung der medianen Schubfestigkeit alle Prüfkörper (Schub-, Biegebruch) berücksichtigt wurden, wurde im Bericht nicht näher angeführt.

In Folge ist der 5-Punkt-Biegeversuch mit den Abmessungen, die hier verwendet wurden, zur zuverlässigen Ermittlung von Schubfestigkeiten nicht geeignet. Trotzdem zeigt und bestätigt diese Arbeit deutlich, dass die Schubfestigkeit bei zunehmendem beanspruchten Volumen, abnimmt.

Madsen [50] untersuchte die Schubfestigkeit von neuen und gebrauchten Holzschwellen aus Douglas-Fir. Die Notwendigkeit ergab sich aus der Erhöhung der Achslasten (Eisenbahn) von 290 kN auf 445 kN. Hierbei wurde zudem der Einfluss eines seitlichen Überstandes auf die Schubfestigkeit untersucht.

Die Prüfabmessungen mussten dem tatsächlichen System nahe kommen und wurden deshalb direkt aus dem Eisenbahnwesen übernommen. Somit bekommt man ein  $l / h$ -Verhältnis von  $9,3 : 1$  und eine Variable  $a$  mit  $a = 1,8 \cdot h$ , siehe Abb. 2.18 (Vertiefung  $t = 38$  [mm]).



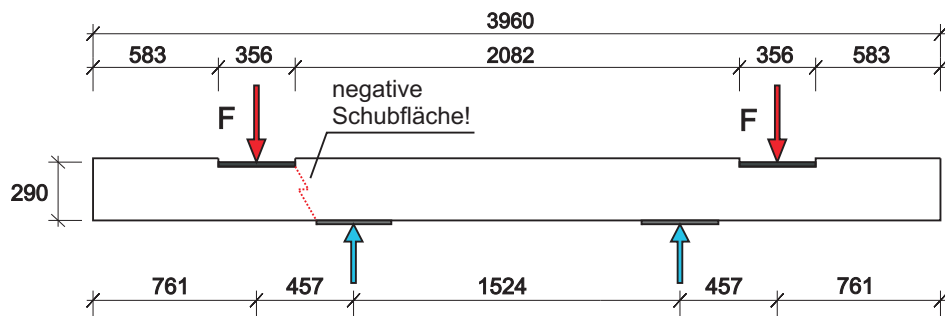


Abb. 2.18 Prüfkörperabmessungen der Holzschwellen nach Madsen [50], Werte (Abmessungen) in [mm]

Aufgrund dieser Prüfgeometrie ist es sehr schwierig Rückschlüsse auf die Schubfestigkeit zu bekommen, da die Beeinflussung durch die Auflager aufgrund der gegebenen Querdruck-Schubspannungsinteraktion zu groß ist. Insgesamt wurden 20 Stück unbehandelte neue Schwellen (VS 1), 200 Stück behandelte neue Schwellen ohne Auflagerausnehmung (VS 2), 60 Stück behandelte neue Schwellen mit Auflagerausnehmung (VS 3) und 200 Stück gebrauchte Schwellen mit Auflagerausnehmung (VS 4) geprüft. Durch die Verwendung von alten Schwellen und von neuen Schwellen konnte der Einfluss der Lastdauer zusätzlich untersucht werden. Im Weiteren wurden zwei Bruchursachen, der Bieg- und der Schubbruch unterschieden. In der nachfolgenden Tab. 2.5 wird eine Auflistung der Versagensarten dargestellt.

Versagensart	relativer Anteil der versagten Versuchskörper			
	Überstand (583; 433)		kein Überstand	
	Biegung	Schub	Biegung	Schub
VS 1	35%	5%	4%	12%
VS 2	17%	1%	7%	10%
VS 3	57%	--	52%	10%
VS 4	79%	2%	66%	5%

Tab. 2.5 Auflistung der Versagensarten nach Madsen [50]. Der restliche Anteil (auf 100%) waren Versuchskörper die unter der maximalen Belastung von 445 kN nicht versagten.

Das Wesentliche der Tab. 2.5 ist die Erkenntnis, dass bedeutend mehr Biegebrüche als Schubbrüche auftraten. Bemerkenswert ist auch das Ergebnis, dass beim Fehlen der Überstände vermehrt Schubversagen erzielt wurde.

Die Ergebnisse der Prüfung bzw. der Auswertung werden als 5%-Quantilwerte angegeben. Die Annahmen und Verfahren zur Ermittlung der Statistiken werden jedoch nicht genannt (Tab. 2.6).

Festigkeit	Biegung $f_{m,05}$ [N/mm <sup>2</sup> ]		Schub $f_{v,05}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	
	ja	nein	ja	nein
Überstand				
VS 1	27,3	32,4*	5,3*	4,4
VS 2	25,3	29,0	4,7*	4,5
VS 3	19,2	15,4	4,7*	4,5
VS 4	15,7	15,1	4,7*	4,5

Tab. 2.6 Zusammenstellung der Festigkeiten (5%-Quantilwerte)

\*) Die jeweilige Festigkeit (Bruchspannung) wurde nicht erreicht, da der Versuch bei 445 [kN] abgebrochen wurde (Unterschätzung der Schubfestigkeit).

Die angegebenen Daten sind sehr kritisch zu betrachten, da der Prüfkörper durch die geometrischen Abmessungen komplett überdrückt wurde. Dadurch sind die gewonnen Ergebnisse immer eine Folge einer Interaktion aus Querdruckspannungen und Schubspannungen. In Folge dessen wird das Schubtragvermögen erhöht und kann nicht mehr als ein reiner Schubfestigkeitswert gesehen werden.

Obermayr [62] befasste sich in seiner Diplomarbeit mit der Entwicklung einer optimierten Versuchskonfiguration zur Ermittlung der Schubfestigkeit von Brettschichtholz aus Fichte. Er untersuchte wesentliche Einflussfaktoren wie:

- beanspruchtes Volumen (beinhaltet den Querschnitt und die Geometrie des Prüfkörpers),
- Spannungsverteilung,
- Risse.

Im Vergleich zu den bisher referenzierten Arbeiten bestätigt sich wieder, dass die Berücksichtigung der Einflussfaktoren sehr wichtig in Bezug auf die Vergleichbarkeit der Werte ist, da bei unterschiedlichen Prüfkonfigurationen, sprich Spannungsverteilungen und bei unterschiedlich beanspruchten Volumina, unterschiedliche Ergebnisse erzielt werden. Obermayr wählte, basierend auf den Erkenntnissen von Schickhofer [82], einen Prüfkörper der die Form eines I-Trägers hat und ein  $l/h$ -Verhältnis von 5 : 1 aufwies. Für die Prüfkonfiguration diente ein 3-Punkt-Biegeversuch. In einer Versuchsreihe konnten 11 Schubbrüche von 12 Versuchen (92%, ein Biegebruch) erzielt werden und somit der 3-Punkt-Biegeversuch als zuverlässige Versuchskonfiguration zur Ermittlung von Schubfestigkeiten an BSH bestätigt werden.

Als weitere Verbesserungsmaßnahme der Prüfkonfiguration wurden die Querdruckspannungen im Auflagerbereich minimiert. Dies erfolgte durch eine Variation der Abmessungen der Auflagerplatten und einer exzentrischen Positionierung der Auflagerrollen (siehe Abb. 2.19). Hierfür wurde eine Parameterstudie durchgeführt (Tab. 2.7).

Variante	Auflager- abmessung	Überstand- länge	Abstand der Rollenlagerung (von Platteninnenkante weg gemessen)
	$l / b / t$	$l_{\text{Ü}}$	$l_{\text{R}}$
	[mm]	[mm]	[mm]
A) Ausgangskonfiguration	250 / 220 / 50	0	100
B) Verlängerung der Auflagerplatte	<b>350</b> / 220 / 50	0	100
C) Überstand	350 / 220 / 50	<b>50</b>	100
D) Auflagerplattenbreite = Stegbreite	350 / <b>100</b> / 50	0	100
E) Veränderung der Plattendicke	350 / 220 / <b>20</b>	0	100
F) Verschieben des Rollenlagers	350 / 220 / 50	0	<b>200</b>

Tab. 2.7 Varianten der Auflagerausbildung nach Obermayr [62]; die geänderten Abmessungen sind fett hervorgehoben.

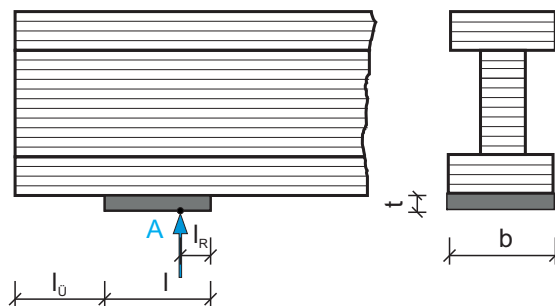


Abb. 2.19 Ergänzende Skizze für die Begriffserklärung zur Tab. 2.7.

Es zeigte sich eine deutliche Entlastung der Randbereiche des Trägers bei einer Verlängerung der Auflagerplatte (größere Fläche für Querdruck-Eintrag). Nach Obermayr kommt die Positionierung der Rollenlager (dort wo die Auflagerkraft  $A$  angreift, Abb. 2.19) eine wesentliche Bedeutung zu. Je näher die Rollenlager bei der Platteninnenkante liegen, desto geringer werden die Quernormalspannungen. Diese Abstandsminimierung wird aber durch Entstehen von Spannungsspitzen begrenzt. Obermayr beschreibt die Variante C wo neben der aussermittigen Kräfteinleitung auch noch ein Überstand vorgesehen wurde als ideale Auflagerausbildung um die Quernormalspannungen so gering wie möglich zu halten (resultierend aus der größeren Kraftausbreitungsfläche).

Eine grafische Darstellung der Querdruckspannungsverläufe der einzelnen Auflagervarianten wird in der Abb. 2.20 gezeigt. Hier werden die Querdruckspannungen an der Unterseite der ersten Lamelle des Steges am Trägerende abgebildet.

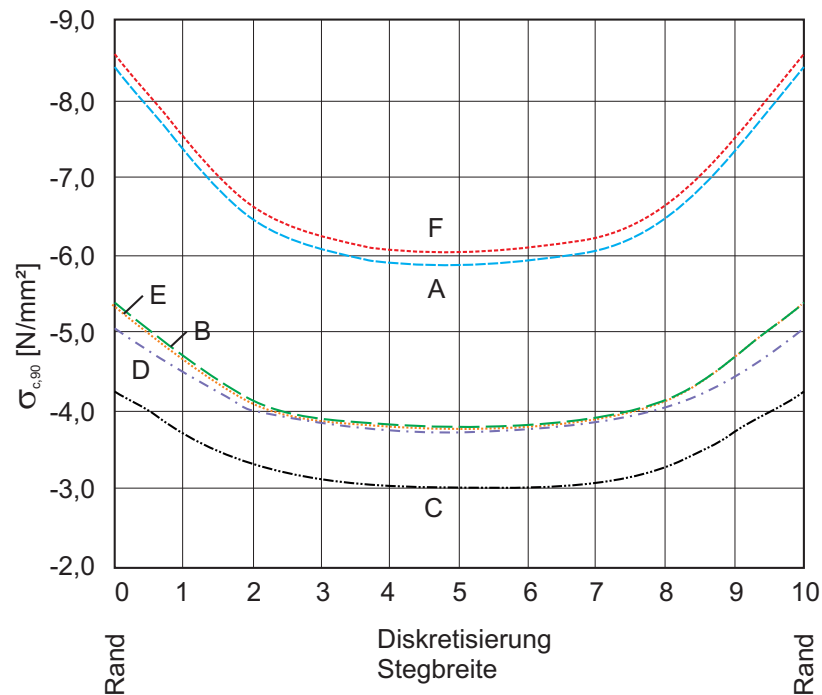


Abb. 2.20 Darstellung der Quernormalspannungen der einzelnen Auflagervarianten an der Unterseite der ersten Lamelle des Steges am Trägerende.  
 A ... Ausgangskonfiguration  
 B ... Verlängerung der Auflagerplatte  
 C ... Überstand (inklusive der Optimierung von B)  
 D ... Auflagerplattenbreite = Stegbreite (inklusive der Optimierung von B)  
 E ... Veränderung der Plattendicke (inklusive der Optimierung von B)  
 F ... verschieben des Rollenlagers (inklusive der Optimierung von B)

Als Folge wurde auf Basis des von Schickhofer [82] entwickelten I-Querschnitts und den Untersuchungen betreffend der Auflagerausbildung eine Prüfkongfiguration definiert (Abb. 2.21) und erfolgreich verifiziert.

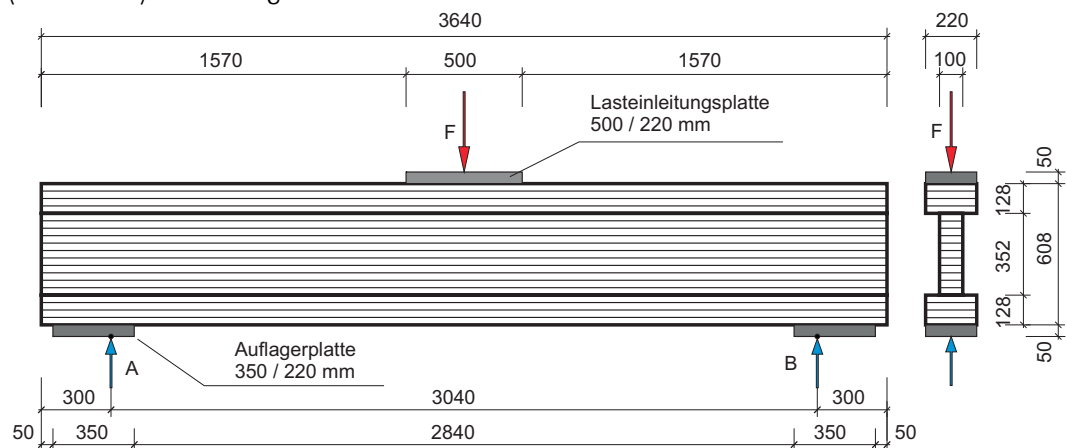


Abb. 2.21 Optimierte Versuchskonfiguration für BSH aus Nadelholz (I-Träger) nach Obermayr [62] und Schickhofer [82].

Trotz dieser optimierten Prüfkongfiguration konnten Problemzonen im Bereich der Übergangsbereiche zwischen Steg und Ober- bzw. Untergurt nicht vollständig beseitigt werden. Da diese Spannungskonzentrationen querschnittsbedingt sind, wurde zudem versucht den Rechteckquerschnitt zu optimieren (siehe Abb. 2.22).

Das Problem eines rechteckigen Biegeträgers ist seine niedrige Biegesteifigkeit im Vergleich zur Schubfestigkeit. Die Idee vom I-Träger wurde hier über die Steifigkeit gelöst indem man die äußeren Lamellen durch ein steiferes Holz (höherer E-Modul) ersetzte. Obermayr verwendete Kerto-S bzw. Robinienholz, beide besitzen eine hohe Biegezugfestigkeit ( $f_{m,k} = 50 \text{ N/mm}^2$ ) und einen gegenüber Fichte höheren E-Modul ( $E_{0,l,mean,KERTO-S} = 13000 \text{ N/mm}^2$  bzw.  $E_{0,l,mean,ROBINIE} = 18000 \text{ N/mm}^2$ ).

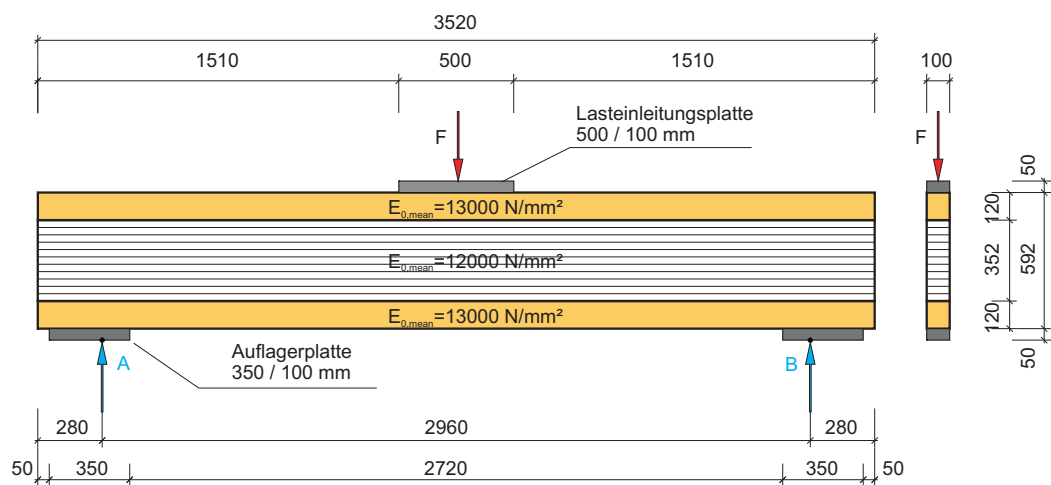


Abb. 2.22 Optimierte Versuchskonfiguration für BSH aus Nadelholz (Rechteckquerschnitt) nach Obermayr [62], Werte in [mm].

Um eine Aussagekraft über die optimierten Versuchskonfigurationen zu bekommen, prüfte man drei Serien. In der Serie 1 verwendete Obermayr [62] die Prüfkörper mit dem Rechteckquerschnitt inklusive der aufgeklebten Kerto-S Platten (drei Träger). Serie 2 wurde gleich wie Serie 1 aufgebaut, aber statt der Kerto-S Platten wurde Robinienholz verwendet (drei Träger). Für die Serie 3 wurde der I-Träger herangezogen (Abb. 2.21). Die Materialkennwerte sind der nachfolgenden Tab. 2.8 zu entnehmen.

	BS 14		Kerto-S	Robinie
$E_{0,g,mean}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	12600	$E_{0,l,mean}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	13000	18000
$G_{g,mean}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	780	$G_{mean}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	600	1100
$f_{m,g,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	28,0	$f_{t,0,l,k} / f_{t,0,l,50}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	38,0 / --	36,8 / 83,1
$f_{c,90,g,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	3,0	$f_{c,90,l,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	5,0 - 7,0	

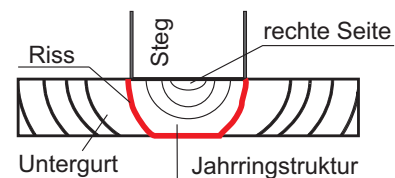
Tab. 2.8 Materialkennwerte der optimierten Versuchsserien [34], [71], [96]

Der Rechteckquerschnitt konnte als geeignet angesehen werden, da weder ein Biegeversagen noch ein vom Querdruck über dem Auflager beeinflusster Schubbruch festgestellt werden konnte. Problematisch ist aber weiterhin noch die Kraffteinleitung (Auflagerbereich). Aufgrund der starken Durchbiegung, welche durch die geringe Steifigkeit des Trägers herbeigerufen wird, bilden sich hohe Querdruckkonzentrationen an den Enden der Lasteinleitungsplatten. Hier ist eventuell die Lasteinleitungsfläche zu erhöhen oder grundsätzlich der Einsatz vom Kerto-S zu überdenken. Die Robinie hatte die ausreichende Querdruckfestigkeit, der darunterliegende Brettschichtholzkern konnte aber die hohen Normalspannungen (normal zur Faser) nicht aufnehmen ( $\sigma_{c,90} = 4,9 \text{ N/mm}^2$ ). Als Lösung bleibt hier nur die Verlängerung der Lasteinleitungsplatte. Die Ergebnisse der Prüfungen an Rechteckquerschnitten werden in der Tab. 2.9 gezeigt. Die Versagensursache war bei allen Trägern reines Schubversagen.

	Gurtlamellen aus Kerto-S			Gurtlamellen aus Robinie		
	Träger 1	Träger 2	Träger 3	Träger 1	Träger 2	Träger 3
Schubfestigkeit $f_v$ [N/mm <sup>2</sup> ]	4,2	3,6	3,9	5,0	4,6	4,9
Biegespannung $\sigma_{m,max}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	43,5	36,7	40,2	58,9	54,6	58,0

Tab. 2.9 Schubfestigkeiten und die dazugehörigen Biegezugspannungen zum Versagenszeitpunkt auf Schub vom Rechteckquerschnitt, Obermayr [62]

Beim I-Querschnitt versagten vier der sechs Prüfkörper auf Schub, die restlichen zwei Träger (Träger 1, 3 - Randlamellen aus Robinie) versagten im Bereich der oberen Untergurtlamelle, wo sehr hohe Querdruckspannungen wirkten. Die Zone zwischen Untergurt und Steg stellt einen kritischen Bereich hinsichtlich der Spannungen normal zu Faser dar. Als Lösungsvorschlag könnten hier



Vollgewindeschrauben als Auflagerverstärkung eingesetzt werden. Weiters sind die Schubspannungen im Bereich zwischen Gurt- und Steglamellen bedenklich (im rechten Bild sieht man einen typischen Rissverlauf eines Schubbruches entlang der Jahrringoberfläche). Um hier einem Versagen (Scherspannungen zwischen der Jahrringstruktur) entgegen zu wirken, muss auf die richtige Jahrringlage der Untergurtlamellen geachtet werden. Obermayr äußerte den Vorschlag, dass die Lamelle mit der rechten Seite nach unten angeordnet werden soll. Weiters müsste die Frage, welchen Einfluss unterschiedliche Materialien (Gurt- und Steglamellen) auf die Schubfestigkeit haben, noch abgeklärt werden.

Als optimale Versuchskonfiguration zur Bestimmung der Schubfestigkeit von Brettschichtholzträgern, schlug er den I-Träger (Abb. 2.21) vor. In der Tab. 2.10 werden die Ergebnisse der Prüfungen der optimierten Konfiguration am I-Querschnitt zusammengefasst.

	I-Träger					
	Träger 1	Träger 2	Träger 3	Träger 4	Träger 5	Träger 6
Schubfestigkeit $f_v$ [N/mm <sup>2</sup> ]	4,57	4,04	4,55	4,10	4,80	3,90
Biegespannung $\sigma_{m,max}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	25,40	22,45	25,33	22,83	26,71	21,70

Tab. 2.10 Schubfestigkeit und die dazugehörigen max. Biegezugspannungen im Zugrand der optimierten Versuche am I-Träger [62].

Diese Versuchsserie (I-Träger) wurde statistisch ausgewertet, wobei die Versuche, die in der obersten Untergurtlamelle auf Schub versagten, zu den Schubbrüchen gezählt wurden (Tab. 2.11).

I-Träger		
Anzahl	[#]	6
$f_{v,mean}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	4,3
COV	[%]	15
$f_{v,05}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	3,3

Tab. 2.11 Statistische Auswertung der optimierten Versuchsserie (I-Träger) [62]. Es wurden keine Angaben zur Annahme der Verteilungsfunktion gemacht.

## 2.1.5 Normalspannungen und Schubspannungen im Träger und deren Auswirkung auf die Schubfestigkeit bzw. Prüfkfiguration

### 2.1.5.1 Normalspannung vs. Schubfestigkeit

Im Kräfteinleitungsbereich bzw. im Auflagerbereich entstehen positive oder negative Normalspannungen (Querdruck- oder Querdzugspannungen). Die Berücksichtigung dieses Einflusses der Normalspannungen auf die Schubfestigkeit ist in der SIA 265 [85] verankert und wird in der Abb. 2.23 gezeigt.

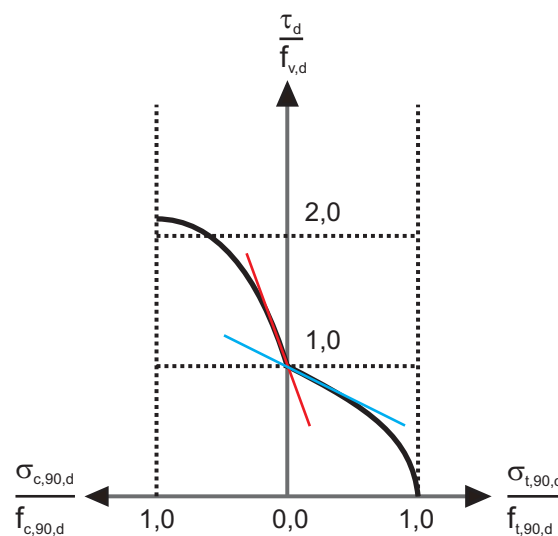


Abb. 2.23 Verhältnis Schubspannung / Schubfestigkeit vs. Zug- (Druck-) Spannung / Zug- (Druck-) Festigkeit quer zur Faser nach der SIA 265 [85] (durchgezogene Linie), ergänzt mit eigenen Überlegungen.

Demnach ist bei steigender Querdruckspannung mit einer Zunahme des Schubtragvermögens zu rechnen (durchgezogener Verlauf, Abb. 2.23). Im Gegensatz dazu verringert sich bei steigender Querdzugspannung die Schubtragfähigkeit theoretisch gegen null, lt. SIA 265 [85] (durchgezogener Verlauf, Abb. 2.23). Der Verlauf der Interaktion zwischen Querdruck-, Querdzug- und der Schubspannung weist im Übergang eine Unstetigkeit auf, die in dieser Form diskutierbar ist. Da das Verhalten von Werkstoffen in der Natur im Allg. einen fließenden Übergang zwischen dem Druckbereich und dem Zugbereich aufweist (strichlierter Verlauf, Abb. 2.23), sind Tangenten mit gleichen Steigungen im Wendepunkt zu erwarten. Vergleichend kann auf Versuche von Spengler [88] verwiesen werden, welche an Fichtenholz ( $l = 220 \text{ mm}$ ;  $b = 80\text{-}140 \text{ mm}$ ;  $h = 22\text{-}32 \text{ mm}$ ; Holzfeuchte  $u = 12\%$ ) durchgeführt wurden. Die Versuchskonfiguration wird in der Abb. 2.24 und das Ergebnis in der Abb. 2.25 gezeigt. Die Ergebnisse von Spengler bestätigen die hier getroffenen Überlegungen.



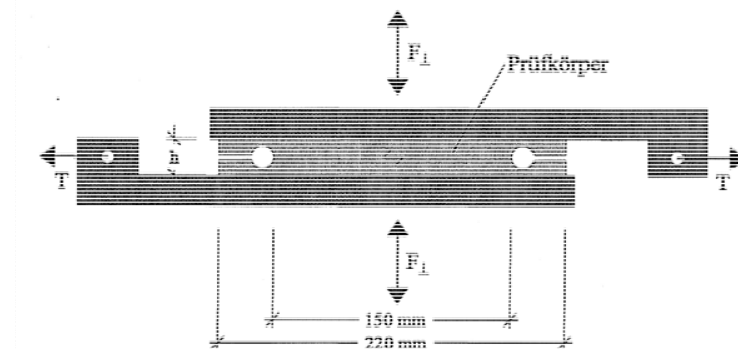


Abb. 2.24 Versuchskonfiguration zur Ermittlung der Schubfestigkeit in Kombination mit Normalspannungen, nach Spengler [88]

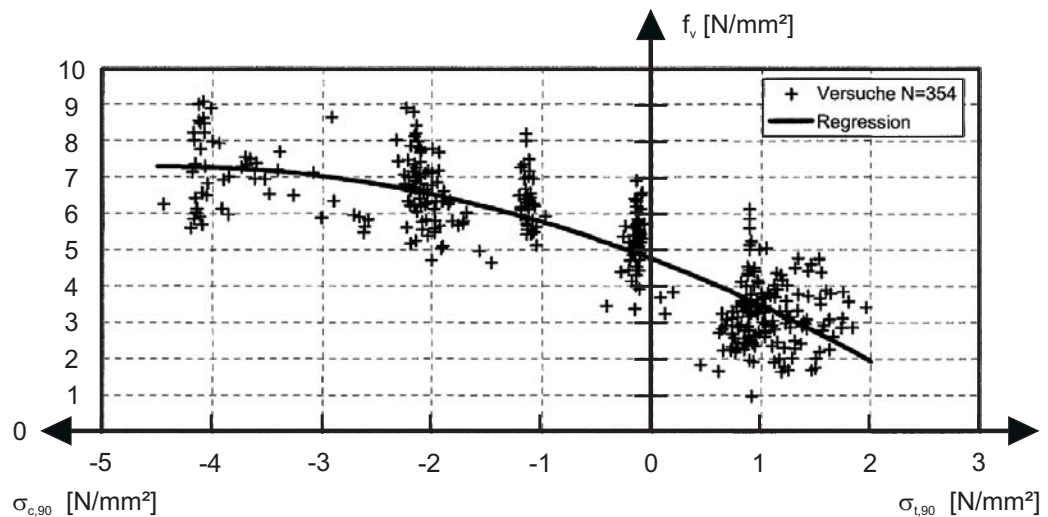


Abb. 2.25 Auswirkungen der Normalspannungen quer zur Faser auf die Schubfestigkeit bei Einwirkung von Schub und Querdruckspannung bzw. Querzugspannung, Spengler [88]

Spengler ermittelte anhand einer multiplen Regressionsanalyse Glg. 2.4 mit einem Korrelationskoeffizienten von  $R = 0,87$  zur Beschreibung des Interaktionsverhaltens bei kombinierter Beanspruchung aus Schub und Normalspannung quer zur Faser. Ohne Normalspannung quer zur Faser beträgt die mittlere Schubfestigkeit demnach  $4,75 \text{ N/mm}^2$ .

$$f_{v, \text{mean}} = 4,75 - 1,15 \cdot \sigma_{c|t, 90} - 0,13 \cdot \sigma_{c|t, 90}^2 \quad 2.4$$

### 2.1.5.2 Querdruckspannung im Krafterleitungsbereich

Die Erzielung von Schubbrüche an bauteilgroßen Trägern mittels Biegeversuchen bedingt das Einleiten relativ hoher Kräfte. Wegen der geringen Druckfestigkeit der Holzträger rechtwinkelig zur Faserrichtung müssen bei Überschreitung der zulässigen Querdruckspannungen diese Bereiche verstärkt werden. Ein positiver Effekt dieser Auflagerverstärkung ist, dass die Auflagerlängen minimiert werden können und sich zudem die Lastausbreitung günstig darstellt.

Gehri [23] zeigte in seiner Arbeit über eingeklebte Anker – Anforderungen und Umsetzungen – unter anderem wie durch Gewindestangen die Schubfläche bei gleichbleibender Trägerlänge maximiert werden kann. Eine seiner wesentlichen Erkenntnisse bezüglich der Krafterleitung mittels der Gewindestangen war es, dass die Schubfläche bei gleichem Abstand der Krafterleitung  $a$  eine größere ist als die, wenn keine Gewindestangen verwendet werden. Eine skizzenhafte Erklärung ist in der nachfolgenden Abb. 2.26 zu sehen.

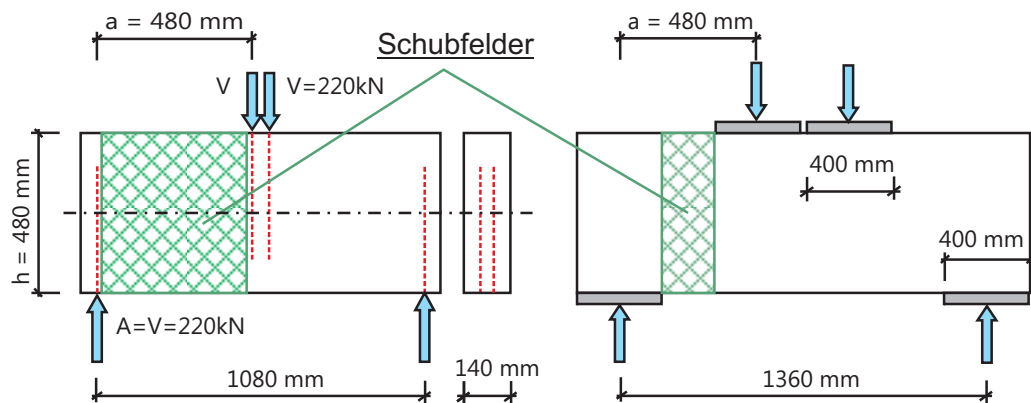


Abb. 2.26 Unterschiedliche Größen der Schubfelder bei gleichem Abstand  $a$  zwischen Auflager und Krafterleitung; mit Gewindestange (links), ohne Gewindestange (rechts), nach Gehri [23].

Der Grund für die geringere Schubfläche (Abb. 2.26, rechte Skizze) ist, dass z.B. bei einer mittleren angenommenen Druckfestigkeit von  $f_{c,90,\text{mean}} = 4,0 \text{ N/mm}^2$  eine rechnerisch erforderliche Länge der Krafterleitungsplatte von rund  $400 \text{ mm}$  notwendig ist und somit der freie Abstand zwischen Auflagerbereich und Krafterleitungsbereich minimal wird.

Im Vorfeld dieser Diplomarbeit wurde in einer ersten Testreihe die Schubfestigkeit von Vollholzträgern näher untersucht. Lackner [44] verwendete für seine Untersuchungen Fichtenholz mit einer nominellen Festigkeitsklasse von C24 (lt. ÖNORM EN 338 [63]). Das Ziel war es, möglichst viele Schubbrüche mittels einem „Pseudo-4-Punkt-Biegeversuch“ (siehe Abb. 2.27) zu erzeugen.

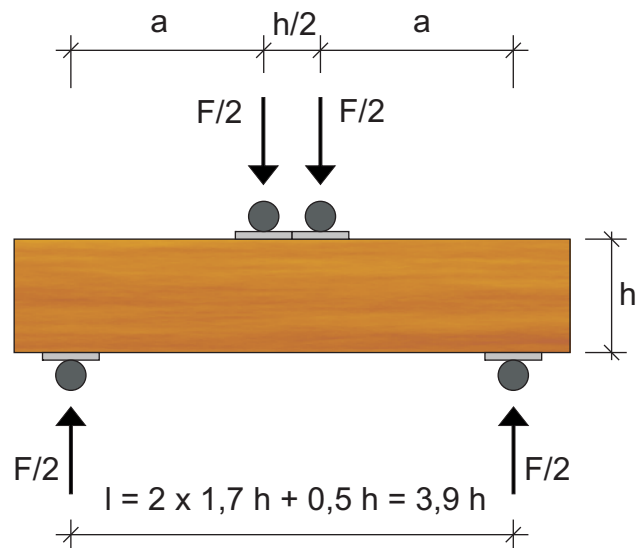


Abb. 2.27 Pseudo-4-Punkt-Biegeversuch als Prüfkonfiguration für die Ermittlung der Schubfestigkeit von Vollholzträgern (siehe Lackner [44]).

Es wurden vier Serien getestet (siehe Tab. 2.12). In der ersten Serie (a) wurde eine Holzlamelle liegend geprüft (40 / 150 mm). Hierbei konnten jedoch keine Schubbrüche erzeugt werden. Der Abstand zwischen dem Auflager und der Kräfteinleitung wurde im ersten Versuch mit  $a = 2,5 \cdot h$  gewählt. Da nur Biegebrüche erzeugt wurden, wurde der Abstand  $a$  auf  $1,7 \cdot h$  verkürzt. Dadurch konnten in den weiteren Serien Schubbrüche erzielt werden.

prozentuelle Fehlerdarstellung der Prüfserien (Fichte)				
Versagensarten	Serie a 40/150	Serie b 145/40	Serie c 170/80	Serie d 240/80
Schubversagen	0%	80%	100%	100%
Biegeversagen	80%	20%	0%	0%
Kräfteinleitungsproblem*	20%	0%	0%	0%

Tab. 2.12 Prozentuelle Versagenshäufigkeiten der einzelnen Serien  
\* aufgrund instabiler Auflagerausbildung

Prüfkörper [#]	Höhe	QS-Fläche	Bruchkraft		Schubfestigkeit   -spannung	Biegefestigkeit   -spannung	theoretische Scherfläche	Bruchart		
	h	A <sub>QS</sub>	F <sub>max</sub>	F <sub>(Schubversagen)</sub>	f <sub>v</sub>   τ	f <sub>m</sub>   σ <sub>m</sub>	A <sub>s,theoretisch</sub>	SB	BB	KB
	[mm]	[mm <sup>2</sup> ]	[N]	[N]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[mm <sup>2</sup> ]	[-]	[-]	[-]
1a	40	5.800	42.518		5,50	54,98	14.500		o	
2a		5.828	29.657				14.570			o
3a		5.824	45.128				14.560			o
4a		5.833	37.121				14.582			o
5a		5.819	39.318			5,07	50,68	14.546		o
6a		5.830	38.047			4,89	48,94	14.575		o
f <sub>mean,h</sub>					5,15	51,54				
COV					6,0%	6,0%				
f <sub>05,2pLND,h</sub>					4,66	46,62				
f <sub>05,2pLND,uG,h</sub>					4,37	43,73				
f <sub>05,2pLND,uG,href</sub>					3,35	33,57				
1a-1	40	5.981	12.990				10.167			o
3a-1		5.961	47.531			5,98	40,66	10.134		o
4a-1		5.999	58.455			7,31	49,69	10.199		o
5a-1		5.996	55.098			6,89	46,87	10.192		o
6a-1		5.994	57.929			7,25	49,29	10.189		o
f <sub>mean,h</sub>					6,86	46,63				
COV					8,9%	8,9%				
f <sub>05,2pLND,h</sub>					5,90	40,13				
f <sub>05,2pLND,uG,h</sub>					5,48	37,25				
f <sub>05,2pLND,uG,href</sub>					4,21	28,60				
1b	145	5.849	61.109	61.109	7,84	53,28	9.943	o		
2b		5.844	55.997	43.061	5,53	48,87	9.935	o		
3b		5.854	52.767	52.767	6,76	45,97	9.952	o	o	
4b		5.833	53.986	51.687	6,65	47,20	9.916	o		
5b		5.835	70.084	68.656	8,82	61,26	9.919	o		
f <sub>mean,h</sub>					7,12	51,32				
COV					17,6%	12,1%				
f <sub>05,2pLND,h</sub>					5,26	41,78				
f <sub>05,2pLND,uG,h</sub>					4,65	38,37				
f <sub>05,2pLND,uG,href</sub>					4,62	38,11				
2c	170	13.623	92.369	81.340	4,48	34,58	23.159	o		
3c		13.576	123.235	123.235	6,81	46,29	23.080	o		
4c		13.650	107.842	107.842	5,93	40,29	23.204	o		
5c		13.651	88.602	88.602	4,87	33,10	23.206	o		
6c		13.631	100.221	100.221	5,51	37,50	23.172	o		
f <sub>mean,h</sub>					5,52	38,35				
COV					16,5%	13,6%				
f <sub>05,2pLND,h</sub>					4,16	30,41				
f <sub>05,2pLND,uG,h</sub>					3,70	27,64				
f <sub>05,2pLND,uG,href</sub>					3,80	28,34				
1d	240	19.266	135.678	135.678	5,28	35,92	32.751	o		
2d		19.164	201.285	201.285	7,88	53,57	32.579	o		
3d		19.263	134.199	134.199	5,22	35,53	32.747	o		
4d		19.227	184.482	181.278	7,07	48,94	32.685	o		
5d		19.281	185.091	185.091	7,20	48,96	32.778	o		
f <sub>mean,h</sub>					6,53	44,58				
COV					18,5%	18,6%				
f <sub>05,2pLND,h</sub>					4,75	32,36				
f <sub>05,2pLND,uG,h</sub>					4,17	28,41				
f <sub>05,2pLND,uG,href</sub>					4,58	31,21				
f <sub>mean,h</sub>	...	mittlere Schubfestigkeit in Abhängigkeit der Prüfkörperhöhe			Schubfestigkeit, -spannung zum	Biegefestigkeit, -spannung zum	SB ...	Schubbruch		
COV	...	Variationskoeffizient			Zeitpunkt des	Zeitpunkt des	BB ...	Biegebruch		
f <sub>05,2pLND,h</sub>	...	Schubfestigkeit auf dem 5%-Niveau (log. Normalverteilung)			Biegeversagens (grau hinterlegt);	Schubversagens (grau hinterlegt);	KB ...	kein Bruch		
f <sub>05,2pLND,uG,h</sub>	...	untere Grenze (Konvidenzintervall)								
f <sub>05,2pLND,uG,href</sub>	...	Schubfestigkeit auf Referenzhöhe zurückgerechnet, h <sub>ref</sub> = 150 mm								

Abb. 2.28 Ergebnisse aus den Vorversuchen von Lackner [44]

Lackner erlangte die Erkenntnis, dass der Biegeversuch als Standardverfahren für die Ermittlung der Schubfestigkeit als kritisch zu betrachten sei, da für den Rechteckquerschnitt immer eine hohe Wahrscheinlichkeit eines Biegebruchs besteht. Dem kann man mit einer besseren Holzqualität bzw. unter Positionierung eines merkmalfreien Bereichs in der Biegezugzone entgegenwirken. Dieses Vorgehen widerspricht wiederum dem Zufallsprinzip der Entnahme von Stichproben aus einer Grundgesamtheit. Auch der Einfluss der Querkraft in Form der Auflagerkräfte kann das Ergebnis beeinflussen. Deshalb sollte man dieses im Vorhinein mittels einer Vorstudie bzw. FE-Studie abklären. Als Lösung wird für zukünftige Versuche von Vollholzträgern ein I-Querschnitt empfohlen (Steg aus Vollholz), bei Brettschichtholz sollten die äußeren Lamellen aus einem hochwertigerem Produkt erzeugt werden, um die Biegespannungen aufnehmen zu können. Im nächsten Kapitel betreffend Vorversuche im Rahmen dieser Diplomarbeit werden die Vorschläge von Lackner [44] über die Prüfkörpergeometrie bzw. Prüfkonfiguration noch weiter optimiert und verifiziert.

## 2.2 Normen

In diesem Teil der Diplomarbeit wird auf die internationale und nationale Normung zu dem Thema der Schubfestigkeit von Holz und Holzwerkstoffen näher eingegangen. Weiters werden Verfahren zur Bestimmung der Schubfestigkeit und der Umgang mit dem Größenfaktor gezeigt.

### 2.2.1 ASTM D143-94: Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber [3]

In der ASTM D143-94 [3] werden Verfahren geregelt, welche die physikalischen sowie die mechanischen Eigenschaften von kleinen merkmalfreien Holzprüfkörpern bestimmen. Die Abmessungen sind mit 2 mal 2 in. bzw. 50 mal 50 mm festgelegt (die 50 mm wurden aus der ASTM D143-94 [3] übernommen, der genauere Wert für 2 in. wäre 50,8 mm). Eine grafische Darstellung wird in der nachfolgenden Abb. 2.29 (links) gezeigt.

Für die Prüfdurchführung wird die Kraft parallel zu den Fasern aufgebracht. In der Abb. 2.29 (rechts) ist eine solche Prüfkonfiguration skizziert.

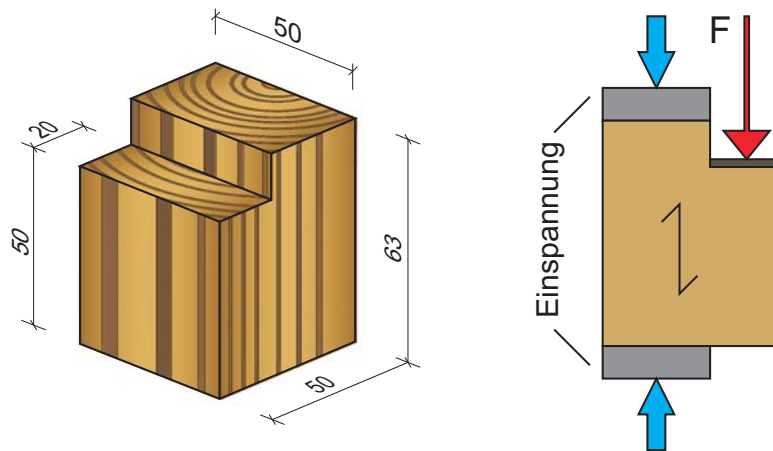


Abb. 2.29 Links: Prüfkörper (Kleinproben) für Scherversuche nach der ASTM D 143-94 [3], Rechts: Skizze der Prüfkonfiguration

## 2.2.2 ÖNORM prEN 338: Bauholz für tragende Zwecke [70]

In der ÖNORM prEN 338 [70] werden die Festigkeitsklassen bzw. die charakteristischen Werte für Pappel und Nadelholz sowie Laubholz (für tragende Zwecke) angegeben. Weiters sind Gleichungen zur Bildung der Beziehungen zwischen einigen charakteristischen Werten wie die Schubfestigkeit, die Druckfestigkeit und die Zugfestigkeit vs. der Biegefestigkeit enthalten.

Der Zusammenhang zwischen der charakteristischen Schubfestigkeit und der Biegefestigkeit wird in der Glg. 2.5 angegeben. Hier ist zu erkennen, dass die ÖNORM EN 338 [70] den Wert nach oben mit 3,8 [N/mm<sup>2</sup>] begrenzt. Für charakteristische Schubfestigkeiten kleiner 3,8 [N/mm<sup>2</sup>] wird der Ansatz einer Potenzfunktion für die Ermittlung gewählt.

Die charakteristische Biegefestigkeit bezieht sich hierbei auf einen Querschnitt mit einer Referenzhöhe von  $h_{\text{ref}} = 150$  [mm] und einer Referenzprüfkonfiguration gem. ÖNORM EN 408 [67] als 4-Punkt-Biegeversuch mit einer Spannweite  $l = 18 \cdot h$  und die Krafteinleitung in den Drittelpunkten.

$$f_{v,k} = \min \left\{ \begin{array}{l} 3,8 \\ 0,2 \cdot f_{m,k}^{0,8} \end{array} \right\} \quad 2.5$$

Abb. 2.30 Beziehung zwischen der charakteristischen Schubfestigkeit und der charakteristischen Biegefestigkeit für Vollholz nach ÖNORM EN 338 [70].

### 2.2.3 Bestimmung der Scherfestigkeit in Faserrichtung nach ÖNORM EN 408 [67]

Nach der ÖNORM EN 408 [67] müssen für die Ermittlung der Scherfestigkeit an den Prüfkörpern zwei Stahlplatten angeklebt werden. Diese Bearbeitung soll nach abgeschlossener Klimatisierung erfolgen. Die Prüfkonfiguration sowie die -geometrie sind in der Abb. 2.31 zusammengefasst.

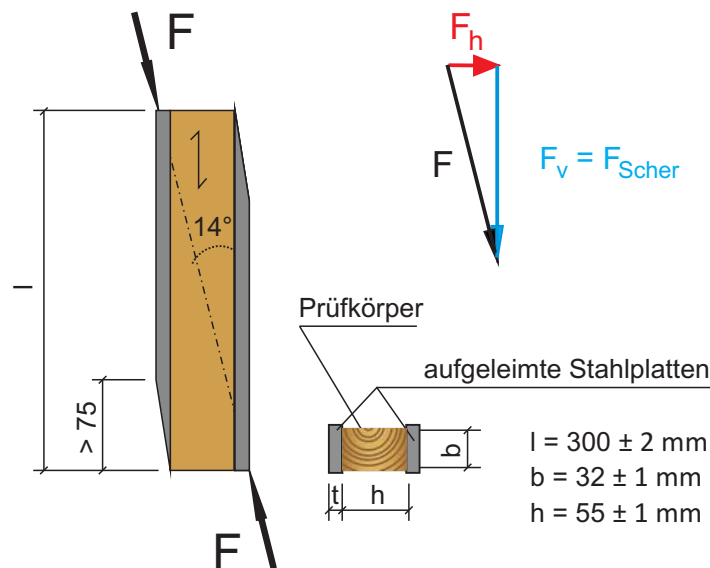


Abb. 2.31 Prüfkörper mit aufgeklebten Stahlplatten nach ÖNORM EN 408 [67].

Das Versagen des Prüfkörpers sollte dabei innerhalb von  $300 \pm 120$  Sekunden auftreten. Die Bruchlast selbst ist in die Achsenebene umzurechnen um in Folge die Scherfestigkeit nach der Glg. 2.6 ermitteln zu können.

$$f_v = \frac{F_{\max} \cdot \cos 14^\circ}{l \cdot b} \quad 2.6$$

Für die Bestimmung der Scherfestigkeit mittels dieser Prüfkonfiguration ist zu erwähnen, dass das Ergebnis (Scherfestigkeit) eine Kombination aus zwei Spannungskomponenten ist. Zum Einen wirkt die Scherspannung, hervorgerufen durch die vertikale Komponente der vorherrschenden Kraft, und zum Anderen wirkt die Normalspannung senkrecht zur Faser, hervorgerufen durch die horizontale Komponente der vorherrschenden Kraft. In Folge der Querdruck-Schubinteraktion ist mit einem erhöhten Schubtragvermögen zu rechnen.



### 2.2.4 ÖNORM EN 1194: Holzbauwerke, Brettschichtholz, Festigkeitsklassen und Bestimmung charakteristischer Werte [68]

Diese Norm beschränkt sich zurzeit auf Brettschichtholz, welches aus mindestens vier über ihre Flächen verklebten Lamellen aus Nadelhölzern gefertigt wird. Die angeführten Festigkeitswerte (Tab. 2.14) beziehen sich auf geometrische Referenzabmessungen, die im Falle einer Abweichung mit einem sogenannten Korrekturfaktor bzw. Größenfaktor  $k_{size}$  (Glg. 2.7) multipliziert werden müssen. Die Werte der Schubfestigkeit wurden von bestehenden Ansätzen für Vollholz in Abhängigkeit der Biegefestigkeit abgeleitet und für verschiedene Holzklassen angegeben. In der Glg. 2.8 wird noch die Beziehung zwischen der Zugfestigkeit einer Brettlamelle und der Schubfestigkeit der BSH-Träger gezeigt. Für die Biegefestigkeit gelten die Werte der Referenzabmessungen, welche  $h = 600$  mm,  $b = 150$  mm sind.

$$k_{size} = \left(\frac{b}{150}\right)^{0,05} \cdot \left(\frac{h}{600}\right)^{0,1} \quad 2.7$$

$$f_{v,g,k} = 0,32 \cdot f_{t,0,l,k}^{0,8} \quad 2.8$$

### 2.2.5 ASTM D 3737–05: Standard Practice for Establishing Allowable Properties for Structural Glued Laminated Timber (Glulam) [6]

Diese Norm regelt die Ermittlung von Festigkeitseigenschaften für BSH-Träger. Neben den Biege-, Druck-, Zugfestigkeiten und den zugehörigen E-Modulen behandelt diese auch die Scherfestigkeit in Faserrichtung. Zudem werden die einflussnehmenden Faktoren in der Tab. 2.13 gezeigt.

mech. Eigenschaften	Multiplikationsfaktor für den Mittelwert oder den 5%-Quantilwert	
	Weichholz	Hartholz
Biegung	0,476	0,435
Druck parallel zur Faser	0,526	0,476
Elastizitätsmodul	1,095	1,095
Schub parallel zur Faser	0,244	0,222

Tab. 2.13 Anpassungsfaktor der Festigkeitswerte von Kleinproben [5] auf bauteilgroße Prüfkörper nach [6]

Vor der Prüfung müssen die Prüfkörper bei einem Normklima von  $20 \pm 2$  °C und  $65 \pm 5\%$  relative Luftfeuchte konditioniert werden. Hierbei stellt sich bei Fichtenholz und

auch noch weiteren Holzarten eine erwartbare Holzfeuchte von rund 12% ein. In der ASTM D 3737 unterscheidet man zwischen trockener und feuchter Holzware. Der Grenzbereich liegt bei einer Holzfeuchte von 16%. Die Prüfkörper die über 16% Holzfeuchte liegen werden als feucht bzw. die darunter liegenden als trocken bezeichnet. Da die Festigkeitseigenschaften im Allg. mit zunehmender Holzfeuchte abnehmen, wird bei der Scherfestigkeit ein Multiplikationsfaktor von 0,875 angegeben wenn man die 16%-Grenze (16% Holzfeuchte) übersteigt, Glg. 2.9. Die Biegefestigkeit wird bei einer Überschreitung der Grenze zum Vergleich um 20% gemindert (Glg. 2.10). Demgemäß wird die Scherfestigkeit geringer abgemindert als die Biegefestigkeit.

$$f_{v,k,u \geq 16\%} = 0,875 \cdot f_{v,k} \quad 2.9$$

$$f_{m,k,u \geq 16\%} = 0,8 \cdot f_{m,k} \quad 2.10$$

Im Zusammenhang mit der Biegebeanspruchung wird ein Größenfaktor  $C_v$  (Glg. 2.11) angegeben, welcher für alle Träger auszuwerten ist die größer sind als die Standardabmessungen (Höhe  $h = 12$  in. (ca. 0,3 m), Breite  $b = 5,125$  in. (ca. 0,13 m), Trägerlänge  $l = 21$  ft (ca. 6,4 m)),

$$C_v = \left[ \frac{5,125}{w} \right]^x \cdot \left[ \frac{12}{d} \right]^x \cdot \left[ \frac{21}{L} \right]^x \leq 1,0 \quad 2.11$$

wobei hier  $d$  für die Höhe (depth),  $w$  für die Breite (width),  $L$  für die Länge (length) zwischen den Auflagern (Spannweite) und  $x$  als Potenzfaktor in Abhängigkeit der Holzart bzw. Holzartgruppen steht. Somit beschreibt die ASTM D3737 [6] mit  $C_v$  einen holzart-abhängigen Größenfaktor. Der Faktor  $x$  ist gemäß dieser Norm auf Basis eines eigens geregelten Prüfprozederes zu bestimmen bzw. nachzuweisen.

Für die Bestimmung der Schubfestigkeit in Faserrichtung verwendet die ASTM D3737 [6] einen 4-Punkt-Biegeversuch als Prüfkonfiguration. Der Abstand zwischen dem Auflager bzw. der Innenkante der Auflagerplatte und dem Bereich der Krafteinleitung sollte gleich bzw. größer als zweimal die Trägerhöhe sein. Die Länge der Auflagerplatte ist mit der Trägerhöhe begrenzt. Die Trägerlänge ist mit den Auflagerplatten beschränkt, d.h., es ist kein Trägerüberstand vorgesehen. Weitere Details können der Abb. 2.32 entnommen werden.

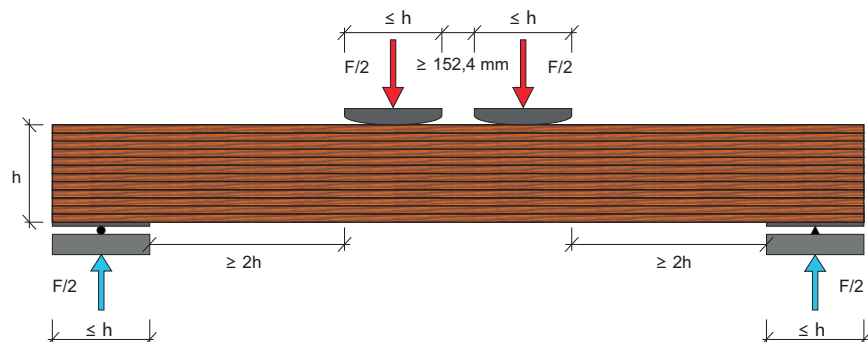


Abb. 2.32 Prüfkonfiguration für die Bestimmung der Schubfestigkeit nach ASTM D 3737 [6].

Im Bereich der max. Schubspannungen (Schwerachse), darf die Holzklasse der einzelnen Lamellen nicht variieren. Jedoch ist es zulässig in den stark beanspruchten Zugzonen Holz höherer Festigkeitsklassen zu verwenden. Durch diese Maßnahme kann die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Schubbruches erhöht werden.

Die Schubfestigkeit wird unter Verwendung der Bruchkraft (Kraft bei Schubversagen) und des Trägerquerschnittes mittels Glg. 2.12 berechnet.

$$f_v = \frac{3 \cdot F}{4 \cdot b \cdot h} \quad 2.12$$

$f_v$	Schubfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
$F$	Last die vom Prüfgerät aufgebracht wurde [N]
$b$	Querschnittsbreite [mm]
$h$	Querschnittshöhe [mm]

### 2.2.6 Bemessungsrichtlinien und vorgegebene Grenzwerte (Zusammenfassung)

Um eine Übersicht zu schaffen, werden in diesem Teil der Diplomarbeit unterschiedliche Normen herangezogen, um die dort verankerten Kennwerte (mechanische Eigenschaften) miteinander zu vergleichen bzw. zu zeigen.

Richtlinien	Vollholz C24	Brettschichtholz GL24h
	$f_{v,k}$	$f_{v,k}$
	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
SIA 265 [85]	2,4	2,7
ÖNORM EN 338 [63]	2,5	-
ÖNORM prEN 338 [70]	4,0	-
ÖNORM EN 1194 [68]	-	2,7
ÖNORM prEN 14080 [72]	-	3,5
DIN 1052 [13]	2,0	2,5
en BR [21]	2,7	3,0

Tab. 2.14 Bemessungswerte aus nationalen und internationalen Normen

Die gezeigten Werte der Schubfestigkeit liegen im Bereich von 2,0 bis 4,0 [N/mm<sup>2</sup>], ein Schubfestigkeitswert von 4,0 [N/mm<sup>2</sup>] wird in der ÖNORM prEN 338 [70] vorgeschlagen.

Während sich die Biegefestigkeiten in Tab. 2.14 auf Kenngrößen gemäß Referenzquerschnitten beziehen und im Fall von Abweichungen davon mittels Korrekturformeln (Größenfaktoren) umzurechnen sind, sind für die hier dargelegten Schubfestigkeiten keine Größenfaktoren bzw. auch keine Referenzquerschnitte normativ verankert.

SIA 265 [85]	$k_h = \left(\frac{600}{h}\right)^{0,1} \leq 1, 1$	Für BSH-Trägerhöhen kleiner als $h=600$ mm, kann die Biegefestigkeit um den Faktor $k_h$ vergrößert werden.
ÖNORM EN 1194 [68]	$k_{size} = \left(\frac{b}{150}\right)^{0,05} \cdot \left(\frac{h}{600}\right)^{0,1}$	Bei BSH-Trägerquerschnitten kleiner als die Referenzabmessungen müssen die charakt. Biegefestigkeiten und/oder Zugfestigkeiten mit dem Faktor $k_{size}$ multipliziert werden.
DIN 1052 [13]	$k_h = \min\left\{\left(\frac{600}{h}\right)^{0,14}; 1, 1\right\}$	Bei Flachkant-Biegebeanspruchung der Lamellen von BSH-Trägern mit $h \leq 600$ mm darf der charakt. Festigkeitswert mit dem Beiwert $k_h$ multipliziert werden
DIN EN 1995 [18]	$k_{h, \text{Vollholz}} = \min\left[\left(\frac{150}{h}\right)^{0,2}; 1, 3\right]$ $k_{h, \text{BSH}} = \min\left[\left(\frac{600}{h}\right)^{0,1}; 1, 1\right]$	Bei Vollholz-Rechteckquerschnitten mit einer charakt. Rohdichte von $\rho_k \leq 700 \text{ kg/m}^3$ dürfen die charakt. Biegefestigkeit und/oder die charakt. Zugfestigkeit mit dem Faktor $k_h$ erhöht werden, wenn die Bezugshöhe $h=150$ [mm] unterschritten wird. Bei Brettschichtholz darf die charakt. Biegefestigkeit und/oder die charakt. Zugfestigkeit mit dem Faktor $k_h$ erhöht werden, wenn die Bezugshöhe $h=600$ [mm] unterschritten wird.

Tab. 2.15 Zusammenfassung von geometrieabhängigen Formeln für die Berücksichtigung des Größeneffekts bei charakteristischen Biegefestigkeiten.

## 2.3 Zusammenfassung der Literaturrecherche und daraus resultierende Erkenntnisse

In diesem Teil der Diplomarbeit werden die bisherigen Erkenntnisse aus den Normen und der Literaturrecherche zusammengefasst. Sie dienen als Basis für das weitere Vorgehen bezüglich der Definition einer geeigneten Prüfkongfiguration zur Bestimmung der Schubfestigkeit von Vollholz- und Brettschichtholzträgern.

### 2.3.1 Eigenschaften der Holzware

#### 2.3.1.1 Holzfeuchte

Der Einfluss der Holzfeuchte auf die Holzeigenschaften ist laut den recherchierten Arbeiten bzw. Normen ausgeprägt. Nach Kollmann [40] gilt, dass sich die Scherfestigkeit von Vollholz (Kleinproben) um ca. 3% je 1% Feuchtigkeitszunahme verringert. Bei den Versuchen von Rammer und McLean [77] wurde eine Reduktion der Schubfestigkeit (bauteilgroße Träger) im Mittel um 5,25% pro 1% Feuchteänderung (Zunahme) festgestellt. Gerhards [24] konnte eine Steigerung der Schubfestigkeit um 3% pro 1% Holzfeuchteverringern und einen Abfall der Schubfestigkeit um 2,25% bei 1%er Steigerung der Holzfeuchte feststellen. Sundström et al. [89] stufte den Einfluss der Holzfeuchte auf die Schubfestigkeit als eher gering ein.

Diese Fakten verdeutlichen, dass es von größter Wichtigkeit ist in der Prüfkörpervorbereitung die Holzfeuchtigkeit zu überprüfen bzw. gegebenenfalls die Prüfkörper auf ein Referenzklima, im Allg. das Normklima 20°/65% (entsprechend [67]) zu konditionieren.

#### 2.3.1.2 Rohdichte

Die Rohdichte ist im Allg. eine der bedeutendsten Einflussgrößen für die mechanischen Holzeigenschaften. Untersuchungen von Müller [56] zeigten aber, dass dieser Einfluss ausgeprägt ist. Er untersuchte hierfür zwei Holzarten (Fichte, Lärche und Lärche Druckholz). Als Prüfkongfiguration wurde ein der ÖNORM EN 408 [67] angenähertes Verfahren (an Kleinproben) verwendet. Die Ergebnisse werden in der Abb. 2.33 dargestellt. Hierbei zeigt sich primär ein Einfluss der Holzart und der zugehörigen Rohdichte auf die erwartbaren Schubfestigkeiten. Innerhalb einer Holzart gilt die Schubfestigkeit - trotz Variation der Rohdichte - als nahezu konstant (Ausnahme: Lärche-Druckholz).

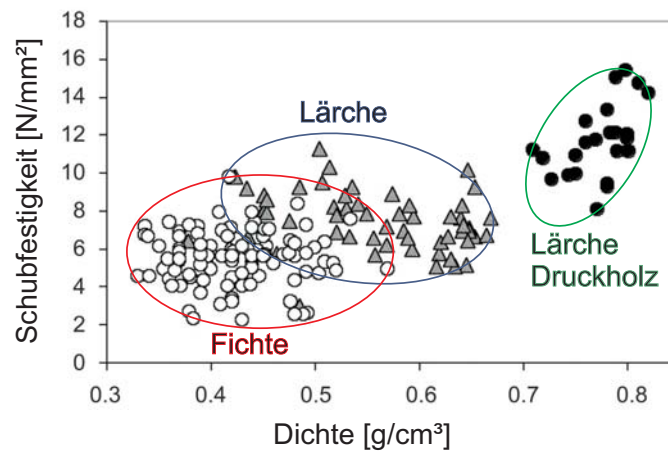


Abb. 2.33 Beziehung zwischen der Schubfestigkeit und der Rohdichte bei 12% Holzfeuchte.

Der Grund für diese eher geringe Beeinflussung der Schubfestigkeit durch die Rohdichte liegt ev. im Bruchverlauf. Bei näherer Betrachtung von Bruchstellen (Stirnholz) ist zu erkennen, dass sich der Bruch meistens im Frühholzbereich fortpflanzt und somit keine höhere Schubfestigkeit mit einer höheren Rohdichte erwarten lässt.

Um den Einfluss der Rohdichte auf die Schubfestigkeit ermitteln zu können, ist es notwendig die lokale Rohdichte im Versagensbereich mit der lokalen Festigkeit in Beziehung zu setzen.

### 2.3.1.3 Temperatur

Bei thermischer Einwirkung reagiert der Werkstoff Holz sehr sensibel. Da aber die Versuche bei Raumtemperatur durchgeführt werden (ca. 20°C) ist für die Bestimmung der Schubfestigkeit keine Beeinflussung gegeben. Im allg. üblichen baupraktischen Bereich liegen die Temperaturen zwischen ca. -25°C und +50°C an der Holzoberfläche. Um einen Einfluss auf die Festigkeitswerte zu bekommen, müsste der Prüfkörper (dimensionsabhängig) über den ganzen Querschnitt diese Temperaturen erreichen. Da Holz aber ein guter Dämmstoff ist, sind diese Gegebenheiten (z.B. Durchfrieren, Brand) eher als unrealistisch anzusehen.

## 2.3.2 Prüfkonfiguration

In diesem Unterkapitel werden die wesentlichen Schwerpunkte für die Findung einer geeigneten Prüfkonfiguration nochmals zusammengefasst.

### 2.3.2.1 Recherchierte Prüfkonfigurationen

Im Zuge der Recherchen wurden vier unterschiedliche Prüfkonfigurationen zur Ermittlung der Schubfestigkeit an Vollholz bzw. daraus aufgebauten Tragsystemen analysiert. Im

Wesentlichen kann man zwischen Prüfungen an merkmalfreien Kleinproben und Prüfungen an bauteilgroßen Trägern unterscheiden. Als bisherige Standardkonfiguration galt das Prüfen der Scherfestigkeit an merkmalfreien Kleinproben (für Vollholzträger), gemäß ÖNORM EN 408 [67]. Für bauteilgroße Träger wurde in der Literatur eine Biegeprüfkonfiguration mit verkürzten Spannweiten angewendet. Die Konfigurationen unterscheiden sich dabei nach der Anzahl der Kraftereinleitungsbereiche und jener der Auflager. Verwendung fanden der 3-Punkt-, der 4-Punkt- und der 5-Punkt-Biegeversuch. Der wesentliche Unterschied zwischen den Prüfkonfigurationen, abgesehen zwischen den Versuchen an Kleinproben und den Biegeversuchen, liegt im Querkraftverlauf, in der erforderlichen Belastung und im beanspruchten Volumen bzw. Scherfläche.

### 2.3.2.2 Schubfläche

Wie im vorhergehenden Abschnitt 2.3.2.1 angemerkt ändert sich durch die Wahl der Prüfkonfiguration der relative Anteil der Schubfläche. In erster Näherung kann die Schubfläche als Produkt vom Parameter  $a$  (Abstand zwischen Auflager und der Kraftereinleitung) mit der dazugehörigen Breite bestimmt werden. Hier ist darauf zu achten, dass nur eine Seite herangezogen wird, da der Bruch in jenem Schubfeld mit der geringeren Schubtragfähigkeit bzw. der max. Schubbeanspruchung initiiert wird (weakest link).

Das Bestreben in der Festlegung einer Prüfkonfiguration liegt darin, mit hoher Wahrscheinlichkeit Schubbrüche zu erzielen. Um Beeinflussungen aus Spannungsinteraktionen und Kraftereinleitungen zu minimieren, liegt das weitere Bestreben die Schubfläche zu maximieren. Gehri [23] beschreibt in seiner Arbeit einen Vorschlag wie man ein solches Vorhaben realisieren kann. Er verwendete eine Auflagerverstärkung in Form von eingeklebten Gewindestangen, welche die Minimierung der Kraftereinleitungsbereiche (Flächen) zu quasi Linienlagern ermöglichen. Weiters sind solche Maßnahmen auch für die Übertragung und Einleitung der hohen Kräfte von Vorteil.

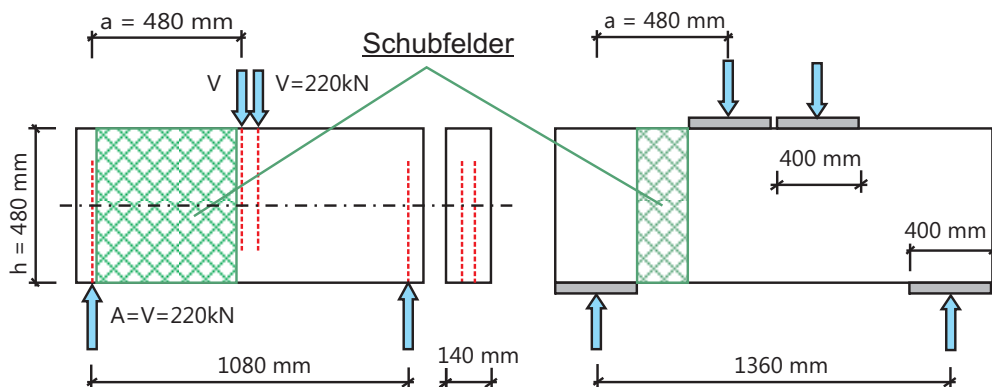


Abb. 2.34 Kraftereinleitungsbildung nach Gehri [23], Minimierung der erforderlichen Kraftereinleitungsbereiche (beispielhaft)

### 2.3.2.3 Querdruckfreie Zone

Es ist darauf zu achten, dass die ermittelten Ergebnisse weitestgehend frei von nicht quantifizierbaren Einflüssen sind. Deshalb ist es notwendig einen theoretisch querdruckfreien Bereich zu schaffen um den Einfluss einer Überdrückung des Querschnitts verbunden mit erhöhten Schubfestigkeiten zu reduzieren bzw. zu verhindern. Um eine solche Zone im vorhinein zu definieren, muss bezüglich der Querkraftausbreitung im Träger eine Annahme des Winkels getroffen werden. Im Bericht von Lackner [44] beobachtete man einen solchen Ausbreitungswinkel ( $\alpha$  = Winkel zwischen Kraftwirkungslinie und Druckfalte) zwischen  $0^\circ$  und  $35^\circ$  (Mittelwert =  $18^\circ$ , siehe rechte Tabelle in Abb. 2.35). Eine FE-Analyse von Obermayr [62] weist einen mittleren Winkel über dem Auflager von  $35,5^\circ$  (Abb. 2.35) aus. Der Winkel ergibt sich hierbei aus dem Schnittpunkt der Trägermittelachse (max. Schubspannung) mit dem spannungsfreien Bereich (Normalspannung normal zur Faser) und der Kante der Auflagerplatte, siehe Abb. 2.35. Ein weiterer Anhaltspunkt für die Winkelausbreitung ist in der Masterarbeit von Salzmann [79] enthalten. Er bestätigt einen Winkel von rund  $30^\circ$  als Referenz fürs Brett-schichtholz. Für weitere Berechnungen wird etwas konservativ ein Winkel von  $\alpha = 30^\circ$  angenommen. Durch die Verwendung von Vollgewindeschrauben wird sich dieser Ausbreitungswinkel noch steiler ausbilden. Zumindest wird bei der Berechnung der Auflagerverstärkung nach enBR [21] die Lastabtragungsfläche an der Schraubenspitze verwendet, d. h., dass der Lastausbreitungswinkel unterhalb dieser Fläche gleich  $0^\circ$  betragen muss. Somit ist man mit der 30-Grad-Annahme bezüglich des spannungsfreien Bereichs bei Auflagerverstärkungen welche die Lasten bis in den oberen Abschnitt des Trägers einleiten zu konservativ, eine Lastausbreitung nach Gehri [23] mit  $\alpha = 0^\circ$  erscheint demnach angebracht.

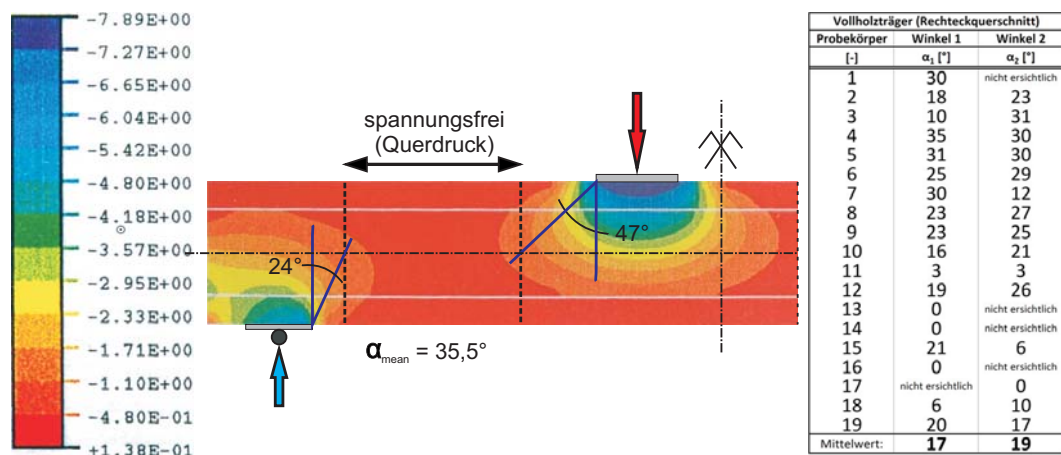


Abb. 2.35 Ausbreitungswinkel der Druckspannung über dem Auflager, ermittelt aus einer FE-Analyse eines 3-Punkt-Biegeversuchs nach Obermayr [62] (nur halber Träger skizziert!)  
Rechts: Neigungen der Druckfalten von den Vorversuchen nach Lackner [44]



### 2.3.2.4 Krafteinleitung bzw. Auflagerverstärkung

Um ein Schubversagen hervorzurufen ist es notwendig, die Schubfestigkeit des Trägers zu erreichen, ohne die Biegetragfähigkeit zu überschreiten. Diese Bedingung hat die Konsequenz, dass hohe Kräfte in den Trägern eingeleitet werden müssen. Da Holz rechtwinkelig zur Faser nur eine geringe Druckfestigkeit hat, müssen hier Vorkehrungen getroffen werden, um diese nicht zu übersteigen. Diese können in Form von Verstärkungsmaßnahmen wie z.B. Vollgewindeschrauben, eingeklebte Gewindestangen oder durch dementsprechende Wahl großer Einleitungsflächen ausgeführt werden. Die Vergrößerung der Auflagerflächen führt, wie in Abschnitt 2.3.2.2 erläutert, wiederum zur Reduktion der tatsächlich prüfbar und vom Querdruck unbeeinflussten Schubfläche. Das Einbringen von Verstärkungsmaßnahmen – mit dem Bestreben einer z.B. gegebenen Reduktion der Auflager- und Einleitungsflächen – ist hier zu bevorzugen.

Die Bedenken, dass die Auflagerverstärkung die erzielbare Schubfestigkeit beeinflussen könnte, wurde von Lackner [44] widerlegt. Die Vollgewindeschrauben gelten hierbei als einseitig am Auflager bzw. den Krafteinleitungsplatten aufliegend und wurden aufgrund der gegebenen geringen Schubverformungen als frei in der Holzmatrize eingebunden betrachtet. Erst nach einem Holzversagen tritt eine Verbundwirkung zwischen den abgesicherten Probekörperteilen aufgrund der Verschraubung ein, welche in Folge je nach Auslegung der Verstärkung auch zu einer Erhöhung des Schubtragvermögens führen kann. In der nachfolgenden Abb. 2.36 konnte ein typischer Verlauf (Kraft-Weg-Diagramm) bzw. der Einfluss einer Vollgewindeschraube auf die Schubfestigkeit gezeigt werden.

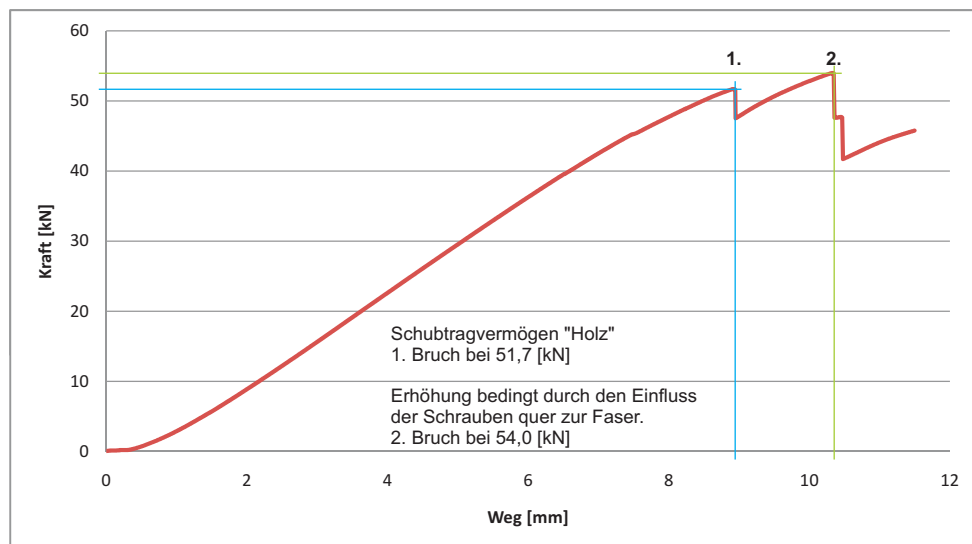


Abb. 2.36 Kraft-Weg-Diagramm eines mit Vollgewindeschrauben im Auflagerbereich verstärkten Prüfkörpers, nach Lackner [44]. (3-Punkt-Biegeversuch)

### 2.3.3 Kritische Bereiche bei der Findung der richtigen Prüfkonfiguration

Um eine geeignete Prüfkonfiguration für die Bestimmung der Schubfestigkeit von Vollholzträgern zu bekommen, müssen folgende kritische Bereiche genauer untersucht bzw. bearbeitet werden.

#### 2.3.3.1 Herausforderungen

Eine Herausforderung liegt mit Sicherheit darin, die hohen Prüfkräfte, welche durch die geringen Trägerlängen zu erwarten sind, in den Prüfkörpern einzuleiten. Die dadurch lokal entstehenden Querdruckspannungen dürfen die Schubfestigkeit nicht beeinflussen.

Ein weiterer kritischer Bereich ist das Prüfen von Probekörpern der unteren Festigkeitsklassen (Festigkeitsklassen nach ÖNORM EN 338 [63]), da hier einerseits eine sehr geringe Biegefestigkeit und andererseits durch die vermehrte Anzahl von Holzmerkmalen, sprich Ästen, ein natürlicher Verdübelungseffekt und somit eine erhöhte Schubfestigkeit zu erwarten ist.

#### 2.3.3.2 Biegezugspannung

Für die Bestimmung der Schubfestigkeit von Vollholzträgern sollten handelsübliche Trägerquerschnitte verwendet und unter realen Bedingungen in Form einer Biegeprüfung labortechnisch geprüft werden.

Durch diese Biegeprüfung ist jeder Träger gefährdet unter einem Biegebruch zu versagen. Die Herausforderung liegt nun darin das System (Geometrie, Trägeraufbau) so zu variieren, dass bei einer Biegeprüfung Schubversagen stattfindet. Speziell Vollholzträger mit geringer Biegefestigkeit sind hierfür gefährdet. Durch Verringern der Variablen  $a$  kann man die Biegespannungen minimieren, bekommt aber dadurch immer höhere Prüfkräfte die wiederum in das Holz (rechtwinkelig zur Faser) eingebracht werden müssen. Weiters führt ein zu geringer Abstand  $a$  zu einer Überdrückung der Schubfläche und somit zu einer Beeinflussung der Schubfestigkeit.

#### 2.3.3.3 Klebefläche

Bei Beanspruchung von kombiniert aufgebauten Trägern auf Biegung, hergestellt aus Teilquerschnitten unterschiedlicher Dimension (Breite) und / oder Steifigkeit, welche untereinander mittels Verklebungen quasi starr verbunden sind (starrer Verbund), ist eine ausreichende Tragfähigkeit der Klebefugen auf Schub zu gewährleisten. Solche kombinierten Träger können Rechteckquerschnitte sein, wo im Druck- und im Zugbereich Lamellen zur Verstärkung aufgeklebt werden oder wo die Querschnittsform aus einer Steglamelle verklebt mit zwei Gurtlamellen aufgebaut ist (I-Träger). Im Rechteckquerschnitt sind die Differenzspannungen (Schub- und Biegespannungsdifferenz im Übergangsbereich) nicht so ausgeprägt wie jene im I-Träger, da sich die Querschnitts-

breite nicht ändert. Im Fall eines I-Trägers bekommt man im Biegespannungsverlauf und im Schubspannungsverlauf einen Sprung, siehe Abb. 2.37 Bild c) (rote Markierung). Diese Differenz beider Verläufe muss die Klebefläche auf Schub aufnehmen können. In der Regel sollten laut ÖNORM EN 386 [65] 5 N/mm<sup>2</sup> Differenz an Schubspannung in der Klebefläche nicht überschritten werden.

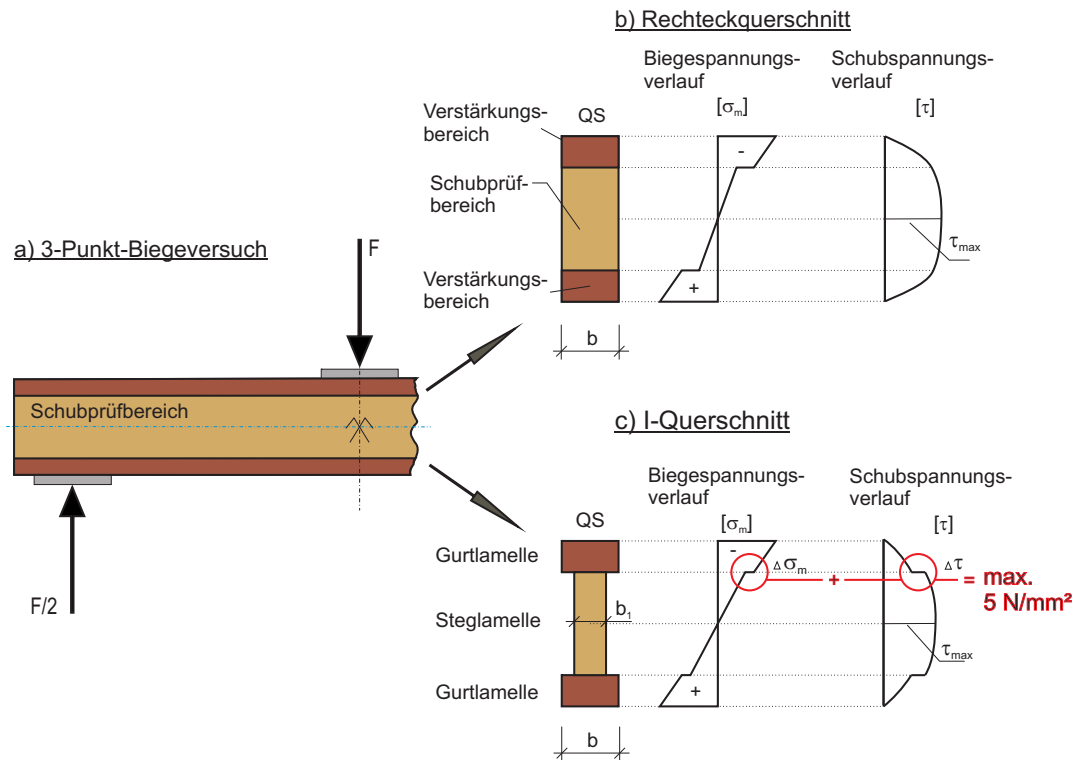


Abb. 2.37 Gegenüberstellung der Schub- und der Biegespannung eines biegebeanspruchten kombinierten Holzträgers bei starrem Verbund (a), b) Rechteckquerschnitt, c) I-förmiger Querschnitt. Für die Spannungsverläufe wurden die Gurt- bzw. die Verstärkungsbereiche jeweils mit einem höheren E-Modul als der Steg bzw. der Prüfbereich angenommen.

### 2.3.3.4 Schubspannungsverläufe über den Querschnitt

Der Verlauf der Schubspannungen über die Trägerhöhe, hervorgerufen durch die wirkenden Querkräfte, zeigt sich bei einem Rechteckquerschnitt (Abb. 2.38, a) parabelförmig. Wenn man die Randbereiche versteift, führt dies zu einem verstärkten Anstieg der Schubspannungen bis zum Prüfbereich. Je größer die Differenz in den E-Modulen der Verstärkungs- vs. dem Prüfbereich, desto steiler der Schubspannungsverlauf im Verstärkungsbereich (Abb. 2.38, b), desto flacher aber dessen Verlauf im Prüfbereich. Somit ist zu erwarten, dass bei der Verwendung von sehr steifen Verstärkungslamellen die Schubspannungen in der Randlamelle überschritten werden und sich somit dort ein Schubversagen ausbilden kann. Auch ist der Unterschied zwischen den Schubspannungen im Randbereich und der Mittelachse des Trägers sehr gering (Abb. 2.38, Bild b, punktierte Linie). Aufgrund dessen ist mit einer erhöhten Schubversagenswahrscheinlichkeit zu rechnen da ein hoher Anteil des Prüfquerschnittes nahezu unter gleich hoher Schubbeanspruchung steht. Um diesbezüglich ausgewogene Spannungsverhältnisse zu gewährleisten, gilt es den Prüfkörperaufbau sowie die Geometrie zu optimieren (Abb. 2.38 Bild c).

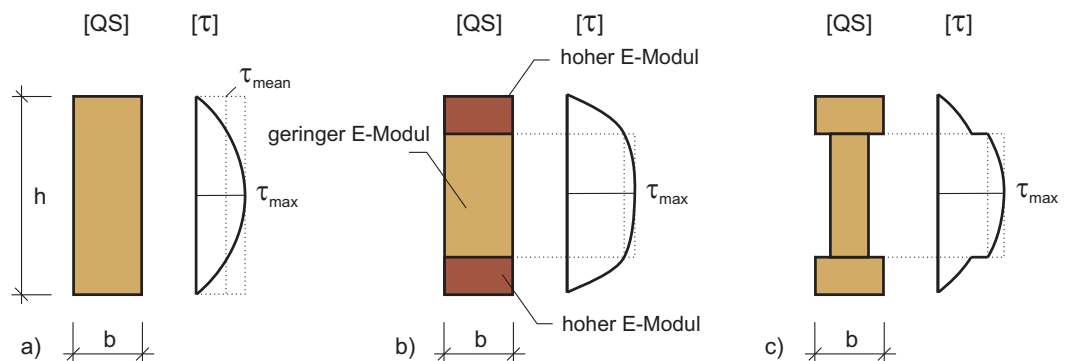


Abb. 2.38 Theoretische Schubspannungsverläufe bei unterschiedlichen Querschnittsformen bzw. unterschiedlichen Steifigkeitsbereichen im Rechteckquerschnitt, unter Annahme eines starren Verbundes

### 2.3.3.5 Lösungsvorschläge

Nach der Zusammenfassung der bisherigen Literaturrecherchen konnten einige Erkenntnisse gewonnen werden, die in weiterer Folge durch Vorversuche überprüft bzw. verifiziert werden, um weiters zu einer geeigneten Prüfkonfiguration für die Ermittlung der Schubfestigkeit von Vollholzträgern zu kommen. Folgend wird festgehalten:

- Es wird empfohlen, die Prüfkräfte durch Vollgewindeschrauben einzuleiten ( $\rightarrow$  Gewährleistung der Kräfteinleitung durch Anwendung von Verstärkungsmaßnahmen, z.B. in Form von Vollgewindeschrauben, mit dem zusätzlichen Vorteil einer möglichen Reduktion der Kräfteinleitungsflächen bzw. Optimierung der Spannungsverteilung mit dem Ergebnis einer vergrößerten querdrukfreien Schubfläche).

- Es wird empfohlen den Rechteckquerschnitt mittels aufgeklebten Lamellen zu verstärken (→ Festigkeitsverstärkung der Biegezugzone – gilt auch aus Symmetriegründen für die Biegedruckseite).
- Es wird empfohlen einen I-Träger als Prüfquerschnitt zu verwenden (→ Reduktion des Tragvermögens auf Schub bei gleichzeitiger Erhöhung des Biegetragvermögens).

Vorteil: größere Fläche im Gurtbereich (für die Übertragung der Biegezugspannung)

Nachteil: Sprung im Biegespannungsverlauf und im Schubspannungsverlauf (erhöhte Beanspruchung der Klebeflächen)

## Vorversuche

Im Rahmen des Masterprojekts von Lackner [44], welches als eine Vorarbeit dieser Diplomarbeit diente, wurden erste Versuche mit Vollholzträgern in Bauteilgröße durchgeführt. Wie im Abschnitt 2.1.5.2 beschrieben, verwendete Lackner Fichtenholz, welches sich aufgrund der Geometrien der Probekörper in vier Serien unterteilen ließ. Mittels einem Pseudo-4-Punkt-Biegeversuch gelang es in drei Serien erfolgreich Schubversagen zu produzieren. Dieser Erfolg konnte aber nur erreicht werden indem die Prüfkörper hinsichtlich ihrer Biegezugzone gezielt vorsortiert wurden, um eine ausreichende Biegetragfähigkeit bis zum Schubversagen zu gewährleisten. Dies wiederum widerspricht dem Bestreben der Ermittlung von Materialkennwerten einer Grundgesamtheit unter Entnahme einer repräsentativen Zufallsstichprobe. Deshalb wird auf diesen Erkenntnissen und den Erkenntnissen der vorangegangenen Untersuchungen weiters aufgebaut, um ein Standardverfahren für die Ermittlung der Schubfestigkeit zu entwickeln.

### 3.1 Prüfvariante I: Rechteckquerschnitt mit aufgeklebten Verstärkungslamellen

Das primäre Ziel war es eine Prüfkfiguration zu finden die überwiegend Schubbrüche erzeugt. Basierend auf dem Vorschlag von Lackner [44] diente der Einfeldträger mit mittlerer Belastung als statisches System. Um nicht auf den Zustand der Zugzone eines Prüfrägers Rücksicht nehmen zu müssen, wurde die Zugzone sowie die Druckzone (Biegeprüfung) mittels einer Lamelle aus Kerto-S symmetrisch verstärkt. Dies soll gewährleisten, dass der eigentliche Prüfbereich zufällig aus der zu prüfenden Grundgesamtheit entnommen und zuverlässig einer Schubprüfung unterzogen werden kann.

#### 3.1.1 Versuchsdaten

Da es sich um eine Vorversuchsreihe handelt, war die Anzahl der Versuchskörper auf sechs Stück begrenzt. Da nach Schickhofer [82] u. a. mit steigender Astigkeit eine höhere Schubtragfähigkeit zu erwarten ist aber die hier zu findende Prüfkfiguration möglichst allgemein anwendbar sein soll, wurde als Grenzfall für das Prüfmaterial als eine untere

Festigkeitsklasse C 14 nach ÖNORM EN 338 [63] mit geringer Biegetragfähigkeit aber erwartbarer hoher Astigkeit für die Untersuchungen herangezogen.

### 3.1.1.1 Materialeigenschaften

Bevor ein Träger gefertigt und geprüft wurde, mussten zuvor wesentliche Parameter festgelegt und rechnerisch beachtet werden. Solche Festlegungen betreffen z.B. die Festigkeitsklasse, die Querschnittsabmessungen des Prüfkörpers und die Wahl des Materials (Kennwerte) für die Verstärkungslamellen (Tab. 3.1).

	Prüfkörper	Verstärkungslamelle
Material	Fichte C14*	Kerto-S**
Höhen $h_{pr}$ und $h_1$ [mm]	73	53
Breite $b_{pr}$ und $b_1$ [mm]	38	38
Länge $l$ [mm]	931	931
E-Modul $E_{0,mean}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	7.000*	13.800**
Zugfestigkeit $f_{t,0,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	8*	38**
Biegefestigkeit $f_{m,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	14*	50**
Schubfestigkeit $f_{v,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	1,7*	2,3**
Variable $a$ [mm]	$3,6 \cdot h = 262,8$	

Tab. 3.1 Geometrische und mechanische Kenngrößen der verwendeten Materialien für die Vorversuchsreihe I.

\* Werte aus der ÖNORM EN 338 [63]

\*\* Werte aus der Zulassung Z-9.1-100 [96]

Die Länge der Träger ergibt sich aus einem Annäherungsprozess, wo im Vorhinein aus der abgeschätzten Schubfestigkeit bei 95%-Quantilniveau die dafür notwendige Prüfkraft errechnet wurde.

Unter Anwendung dieser Last konnte über den Querschnitt der Biege- bzw. der Schubspannungsverlauf ermittelt werden. Hierbei musste die Länge so gewählt werden, dass bei Erreichen der Schubfestigkeit parallel zur Faser immer noch genügend Potential im Biegetragvermögen gegeben ist.

Mangels der Kenntnisse über den Hintergrund der Beziehung zwischen der Schub- und der Biegefestigkeit von Vollholz nach der ÖNORM EN 338 [63] wird der formale Zusammenhang in der Glg. 3.1 als Regressionsgleichung von Brandner [8], auf Basis der Ergebnisse von Schickhofer [82] für die Abschätzung der Schubfestigkeit im Verhältnis zur Zugfestigkeit, respektive Festigkeitsklasse bei Brettschichtholz aus Fichte, angewendet.

$$f_{v,mean} = -0,02 \cdot f_{t,0,l,k} + 4,5 \quad 3.1$$

$$f_{v,mean} = -0,02 \cdot 8,0 + 4,5 = 4,3 \text{ N/mm}^2 \quad 3.2$$

Die Berücksichtigung des Größeneffekts erfolgte auf Basis einer ersten Abschätzung mittels einer Potenzfunktion und einer Potenz  $k_s = 0,2$ :

$$f_{v, \text{mean}, (38/73)} = \left( \frac{A_{s, \text{ref}}}{A_s} \right)^{k_s} \cdot f_{v, \text{mean}, \text{ref}} = \left( \frac{81897}{6585,4} \right)^{0,2} \cdot 4,3 = 7,1 \text{ N/mm}^2 \quad 3.3$$

Für die Vorversuche wurden Restbestände, (Fichtenholz mit geringer Festigkeitsklasse) welche am Institut für Holzbau und Holztechnologie lagernd waren, herangezogen. Die begrenzte Auswahl war auch der Grund dafür, dass die Querschnittsabmessungen etwas vom gewünschten Querschnitt 40 / 75 [mm] abwichen.

Als referenzierte Schubfläche wurde eine Prüfkongfiguration (BSH-I-Querschnitt) von Schickhofer [82] mit den Referenzabmessungen  $h = 608$  (352) [mm],  $b = 220$  (100) [mm] herangezogen, siehe Abb. 3.1.

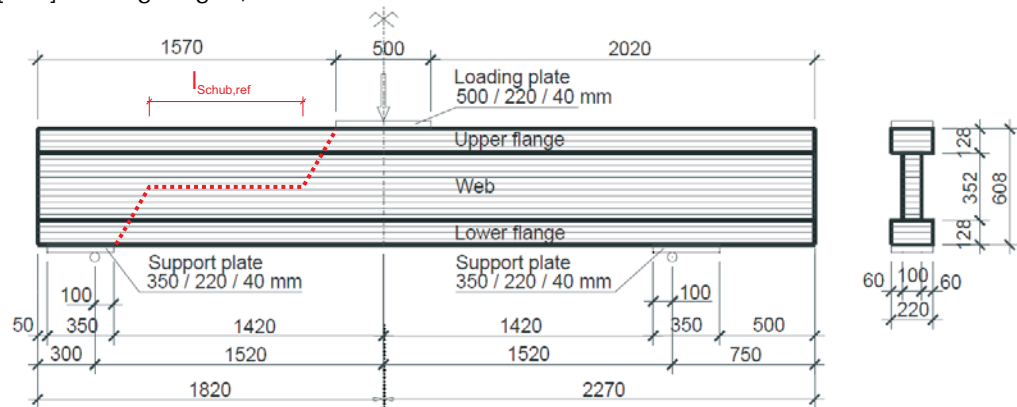


Abb. 3.1 Prüfkongfiguration nach Schickhofer [82], inkl. korrigierter Referenzschublänge (Lastausbreitungswinkel  $\alpha = 30^\circ$ ) da keine Verstärkungsmaßnahmen angeordnet wurden

$$A_{s, \text{ref}} = \left( 1420 - 250 - 2 \cdot \tan 30^\circ \cdot \frac{608}{2} \right) \cdot 100 = 81897 \text{ mm}^2$$

In den folgenden Berechnungen werden die Schublängen zwischen der Auflager- und der Kräfteinleitungsverstärkung herangezogen (Abb. 3.2). Der Grund dafür liegt in der geringen Lastausbreitung in der Mittelebene des Trägers unter Verwendung von Verstärkungsmaßnahmen, siehe Abschnitt 2.1.5.2.

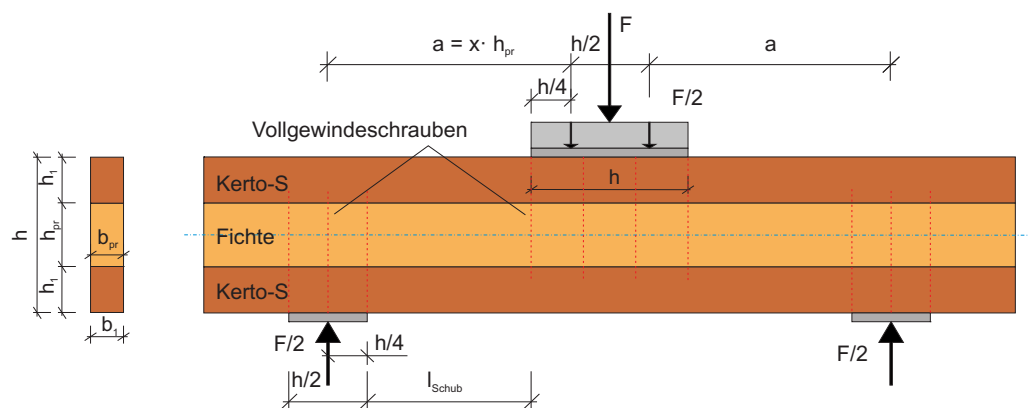


Abb. 3.2 Bereichsdefinitionen der Prüfkörpergeometrie



$$A_s = \left( x \cdot h_{pr} - \left( \frac{h}{4} + \frac{h}{4} \right) \right) \cdot b_{pr} \quad 3.4$$

$$A_s = (3,6 \cdot 73 - 89,5) \cdot 38 = 6585,4 \text{ mm}^2$$

Um vom Mittelwert auf den 95%-Quantilwert der Schubfestigkeit zu kommen, bedient man sich statistischer Methoden. In Übereinstimmung mit dem JCSS [35] wird zur statistischen Charakterisierung der Festigkeitswerte für Vollholzträger eine logarithmische Normalverteilung angewendet.

### 3.1.1.2 Berechnungsablauf

Geometrie:

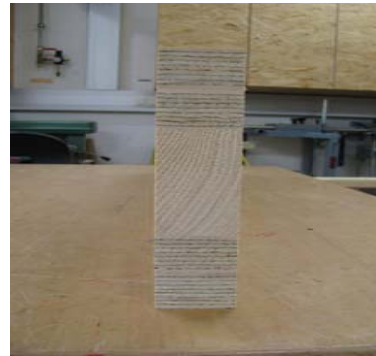
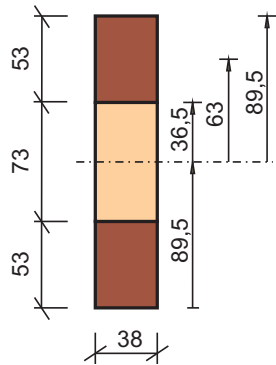


Abb. 3.3 Geometrie (links) bzw. Bild des Querschnitts (rechts) der Vorversuchsreihe I.

Varianz:

$$\sigma^2 = (\text{COV} \cdot \mu)^2 \text{ mit der Annahme von } \text{COV} = 20\% \quad 3.5$$

$$\sigma^2 = (0,2 \cdot 7,1)^2 = 2,0 \text{ (N/mm}^2\text{)}^2$$

Erwartungswert der auf die Normalverteilung hin transformierten logarithmisch-normalverteilte Zufallsvariablen:

$$\mu_y = \ln \left[ \frac{\mu^2}{\sqrt{\mu^2 + \sigma^2}} \right] = \ln \left[ \frac{7,1^2}{\sqrt{7,1^2 + 2,0}} \right] = 1,94 \quad 3.6$$

Standardabweichung der auf die Normalverteilung hin transformierten logarithmisch-normalverteilte Zufallsvariablen:

$$\sigma_y = \sqrt{\ln\left(\frac{\sigma^2}{\mu^2} + 1\right)} = \sqrt{\ln\left(\frac{2,0}{7,1^2} + 1\right)} = 0,197 \quad 3.7$$

Allgemein lässt sich das Quantil einer Verteilung auf Basis der inversen Verteilungsfunktion ermitteln:

$$F_x(x) = q = \int_{-\infty}^{x_q} f_x(x) dx \rightarrow x_q = F_x(x)^{-1} \quad 3.8$$

Des Weiteren können die 5%- und die 95%-Quantilwerte einer lognormal verteilten Variable ermittelt werden:

$$\chi_{q, \text{LND}} = \frac{\exp(\mu_y)}{\exp(-\Phi(q)^{-1} \cdot \sigma_y)} \rightarrow \chi_{95} = f_{v, 95, (38/73)} = 9,7 \text{ N/mm}^2 \quad 3.9$$

mit  $-\Phi(q)^{-1}$  = Quantilwert der Standardnormalverteilung

Um den Spannungsverlauf über den Querschnitt zu ermitteln, muss von der Schubfestigkeit  $f_{v, 95, (38/73)}$  auf die Belastung zurückgerechnet werden, um anschließend die Querkraft und das Biegemoment zu errechnen. Hierfür wird das sogenannte n-Verfahren (starr verbundene Bauteile) verwendet (Theiler und Frangi [91]).

Bei unterschiedlichen E-Moduln wird mit der Wertigkeit  $n_i$  gerechnet:

$$n_i = \frac{E_i}{E} = \frac{13800}{7000} = 1,97 \quad 3.10$$

(alle weiteren Berechnungen werden mit allen verfügbaren Nachkommastellen berechnet!)

Dabei stellt E einen beliebig wählbaren Elastizitätsmodul dar. Im Fall des Vorversuchs I ist  $E_i$  der E-Modul von der Gurtlamelle (Kerto-S) und E der Elastizitätsmodul vom Steg (Fichte, C14).

Der Schwerpunkt und gleichzeitig auch der Nullpunkt der Dehnungsebene ist bei reiner Biegung mit  $z_s$  definiert:

$$z_s = \frac{\sum n_i \cdot A_i \cdot z_i}{\sum n_i \cdot A_i} = \frac{1,97 \cdot 53 \cdot 38 \cdot 26,5 + 1 \cdot 73 \cdot 38 \cdot 89,5 + 1,97 \cdot 53 \cdot 38 \cdot 152,5}{1,97 \cdot 2 \cdot 38 \cdot 53 + 1 \cdot 73 \cdot 38} \quad 3.11$$

$z_s = 89,5 \text{ mm}$  = Aufgrund des sym. Aufbaues der geom. Mittelpunkt

Weiter können das effektive Trägheitsmoment  $J_{\text{ef}}$  die wirksame Querschnittsfläche  $A_{\text{ef}}$  und das effektive statische Moment  $S_{\text{ef}}$  bestimmt werden:

$$J_{ef} = \sum n_i \cdot J_i + \sum n_i \cdot A_i \cdot e_i^2 \quad 3.12$$

$$J_{ef} = 1,97 \cdot \frac{38 \cdot 53^3}{12} \cdot 2 + 1 \cdot \frac{38 \cdot 73^3}{12} + 1,97 \cdot 38 \cdot 53 \cdot 63^2 \cdot 2$$

$$J_{ef} = 34608212 \text{ mm}^4 = 3,46 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$$

$$S_{ef,i} = \sum n_i \cdot A_i \cdot e_i \quad 3.13$$

$$S_{ef,Mitte} = 1,97 \cdot 38 \cdot 53 \cdot 63 + 1 \cdot 38 \cdot 36,5 \cdot 18,25 = 275452 \text{ mm}^3 = 2,75 \cdot 10^5 \text{ mm}^3$$

Für die Berechnung von Normal- und Schubspannungen können die folgenden Gleichungen verwendet werden:

$$\sigma_{m,i} = \frac{M}{E \cdot J_{ef}} \cdot e_i \cdot E_i \quad 3.14$$

$$\tau_i = \frac{V \cdot S_{ef,i}}{J_{ef} \cdot b} \quad 3.15$$

Aus der Glg. 3.15 wird nun die Querkraft (V) ermittelt, indem man die Schubspannung mit der Schubfestigkeit gleichsetzt ( $\tau = f_{v,95,(38/73)}$ ), Glg. 3.16:

$$V = \frac{f_{v,95,(38/73)} \cdot I_{ef} \cdot b}{S_{ef,Mitte}} = \frac{10,1 \cdot 3,46 \cdot 10^7 \cdot 38}{2,75 \cdot 10^5} = 48078 \text{ N} \approx 48,1 \text{ kN} \quad 3.16$$

$$M = V \cdot a = 48078 \cdot 262,8 = 12634895 \text{ Nmm} \approx 12,6 \text{ kNm} \quad 3.17$$

Mit den bekannten Glg. 3.14 und Glg. 3.15 kann jetzt an jeder Stelle des Querschnitts die Schub- bzw. die Biegespannung bestimmt werden, siehe Abb. 3.4.

$E_{0,mean}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	z [mm]	$\tau$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]
13800	-89,5	0,0	-62,0
13800	-36,5	8,8	-25,3
7000	-36,5	8,8	-12,8
7000	0,0	9,7	0,0
7000	0,0	9,7	0,0
7000	36,5	8,8	12,8
13800	36,5	8,8	25,3
13800	89,5	0,0	62,0

Tab. 3.2 Theoretische Spannungsverteilung der Vorversuchsreihe I

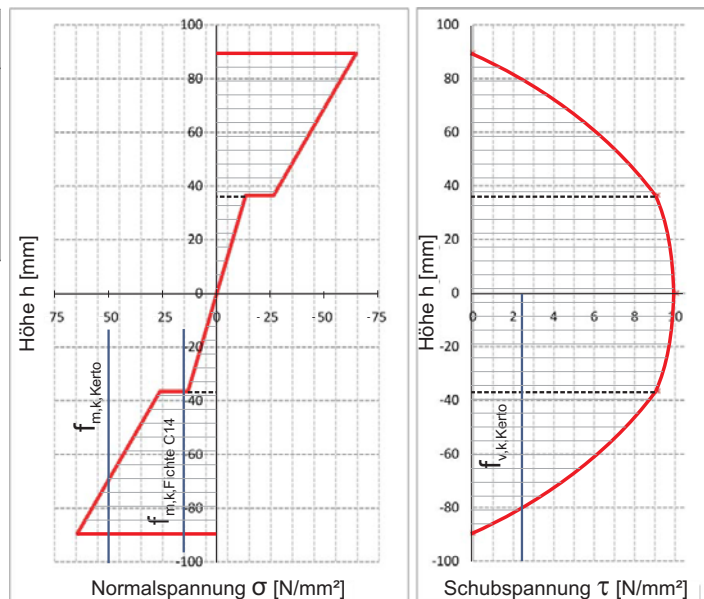


Abb. 3.4 Theoretische Auswertung der Vorversuchsreihe I.

Wie schon im Vorhinein beschrieben, wurden die Berechnungen auf dem 95% Schubspannungsniveau gemacht. In der Abb. 3.4 ist der Normalspannungs- und der Schubspannungsverlauf dargestellt. Hier ist gut zu erkennen, dass sowohl die Normalspannungen wie auch die Biegespannungen bei diesem Niveau die dementsprechend charakteristischen Festigkeiten übersteigen (ausgenommen die Biegefestigkeit für den Steg!). Um eine Aussagekraft über diese Berechnung zu bekommen und um zu sehen wie sich dieser kombinierte Aufbau unter einer Prüflast (95%-Niveau) verhält, wurden sechs Träger gefertigt und geprüft.

### 3.1.1.3 Prüfkfiguration

In Abb. 3.5 wird die für den Vorversuch vorgesehene Prüfkfiguration mit den dazugehörigen Abmessungen gezeigt. Zum Einen dient die Prüfung der Abschätzung, inwieweit die errechneten mit den im Versuch ermittelten Spannungen übereinstimmen und zum Anderen ob die Rechenergebnisse plausibel sind.

Bedenken gab es im Bereich der Biegezugspannung, da diese die charakteristische Biegefestigkeit des Kerto-S übersteigt. Ein weiteres Problem war die Schubspannung im Kerto-S, die im Bereich der Klebefläche einen sehr hohen Wert erreicht. Auch der Sprung im Normalspannungsverlauf bedeutet eine hohe Beanspruchung der Klebefläche.

Verwendet wurde ein pseudo-4-Punkt-Biegeversuch in Anlehnung an die Arbeit von Lackner [44]. Im Kräfteinleitungsbereich wurden die bewährten Max Résistance-Platten (Max Compactplatten mit integrierter, chemikalienresistenter Oberfläche) (Abb. 3.6) verwendet und als Verstärkungsmaßnahme wurden Vollgewindeschrauben [97] eingesetzt.

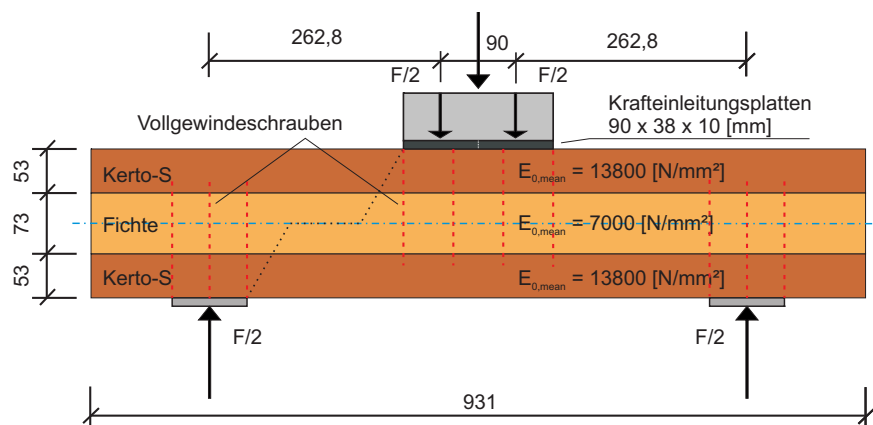


Abb. 3.5 Schematische Darstellung der optimierten Prüfkfiguration (Rechtecksquerschnitt mit Verstärkungslamellen) der Vorversuchsreihe I, in Anlehnung an die Arbeit von Lackner [44], Werte in [mm].

Die reale Durchführung wurde mit einem 3-Punkt-Biegeversuch getätigt. Die Abmessung blieben jedoch gleich wie in Abb. 3.5. (pseudo-4-Punkt-Biegeversuch).



Abb. 3.6 eingebauter Prüfkörper; Prüfgerät: Universalprüfmaschine Lignum\_uni\_275, Lignum Test Center, Institut für Holzbau und Holztechnologie, Technischen Universität Graz

### 3.1.2 Ergebnisse bzw. Erkenntnisse

In der folgenden Tab. 3.3 werden die Ergebnisse inklusive Anmerkungen des Bruchverlaufs wiedergegeben.

Nr.	Kraft zum Zeitpunkt des 1. Schubversagens	Schubfestigkeit (Kerto-S), Schubspannung (Fichte)	Biegespannung zum Zeitpunkt des 1. Schubversagens	Anmerkung zur Bruchabfolge (Schubversagen)
[--]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[--]
VS_1	51,32	4,88 5,37*	34,38	1. Kerto-S (oben) 2. Fichte 3. Kerto-S (unten)
VS_2	48,66	4,63 5,10*	32,60	1. Kerto-S (oben) 2. Kerto-S (unten)
VS_3	44,35	4,22 4,64*	29,71	Kerto-S
VS_4	47,87	4,55 5,01*	32,07	1. Kerto-S (oben) 2. Kerto-S (unten)
VS_5	50,68	4,82 5,31*	33,95	1. Kerto-S (oben) 2. Klebefläche (oben)
VS_6	43,31	4,12 4,54*	29,01	1. Kerto-S (oben) 2. Fichte 3. Kerto-S (unten)

Tab. 3.3 Ergebnisse und Anmerkungen der 1. Vorversuchsreihe.  
 \* rechnerische max. Schubspannung in der Fichte zum Zeitpunkt des Schubversagens im Kerto-S.

Die Prüfserie zeigte die Leistungsfähigkeit und Eignung der verwendeten Schrauben als Verstärkungsmaßnahme. Es konnten keine nennenswerten bleibenden Eindrückungen in den Kräfteinleitungsbereichen im Kerto-S festgestellt werden.

Die im Vorhinein geäußerten Bedenken im Bezug auf die Klebefläche konnten nicht bestätigt werden, da bei keinem Versuch die Klebefläche zuerst versagte. Es konnte auch kein Biegeversagen im Kerto-S festgestellt werden.

Der Schwachpunkt dieser Prüfkonfiguration war die zu geringe Schubfestigkeit des Kerto-S. Bei allen Probekörpern war der erste Bruch im Grenzbereich der Klebefläche, aber innerhalb der Verstärkungslamelle. In der folgenden Abb. 3.7 werden die Versagensbilder der einzelnen Versuchsträger gezeigt.

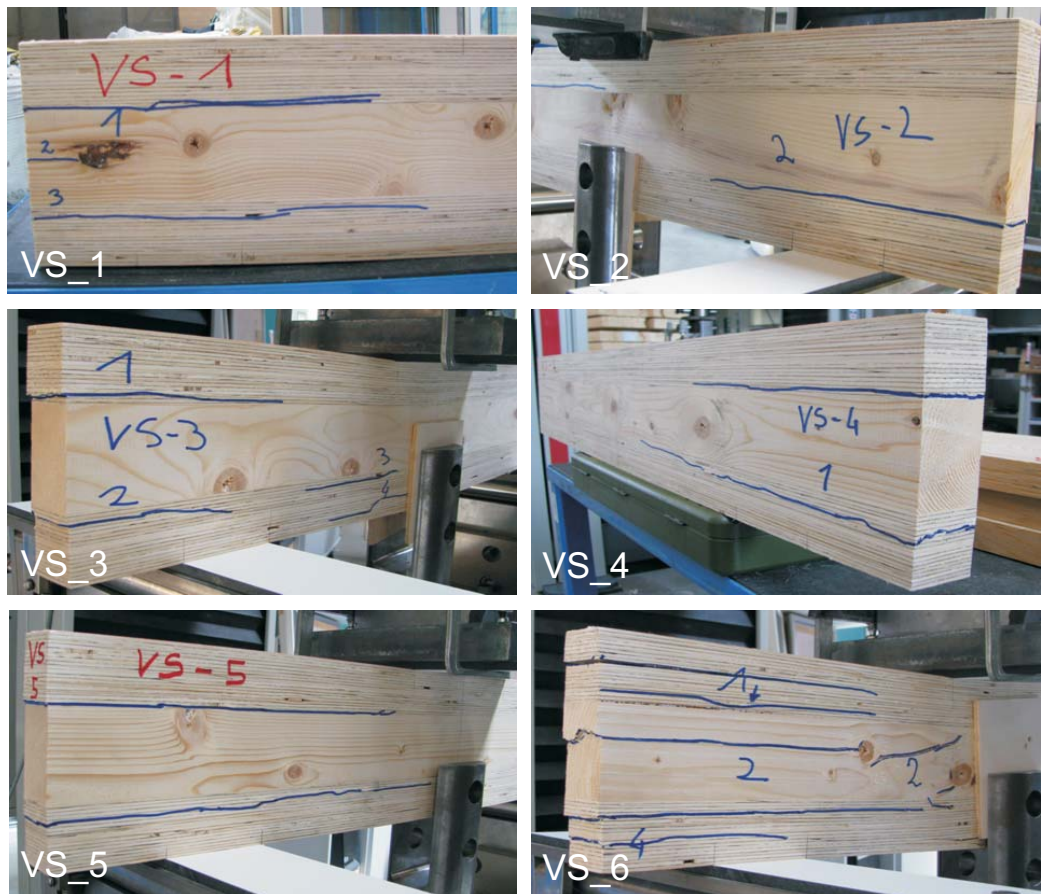


Abb. 3.7 Bildaufnahmen der Versagensform der einzelnen Prüfkörper der Vorversuchsreihe I.

Als weitere Optimierung wurde von einem Rechteckquerschnitt auf einen I-Querschnitt gewechselt. Das Problem liegt in der Gurtlamelle, da hier hohe Normalspannungen auftreten und auch eine gewisse Schubtragfähigkeit gegeben sein muss. Das Kerto-S konnte im Hinblick auf die Normalspannung überzeugen, aber die auftretenden Schubspannungen nicht aufnehmen. Somit wurde ein Material benötigt, welches die Normal- und auch die Schubspannungen aufnehmen kann. Dies ist aber nur mit einer vergrößerten Querschnittsfläche der Gurtlamellen möglich und somit wurde in weiterer Folge eine I-Träger gefertigt und geprüft, siehe nächster Abschnitt 3.2.

## 3.2 Prüfvariante II: I-Träger mit Gurtlamellen aus Kerto-S

Wie im Abschnitt 3.1 beschrieben, konnte der Einsatz vom Kerto-S als Verstärkungslamelle positiv angesehen werden. Um die Schubspannungen im Kerto-S zu verringern muss die Geometrie (Breite) der Verstärkungslamelle im Verhältnis zur Prüfbreite geändert werden. In Annäherung an die Arbeit von Schickhofer [82] und zur Vergleichbarkeit zwischen dem I-Träger aus Vollholz und dem I-Träger aus Brettschichtholz wurden die Geometrieverhältnisse von Schickhofer übernommen.

### 3.2.1 Versuchsdaten

Für die Vorversuchsreihe II wurden fünf Träger gefertigt und geprüft. Im Wesentlichen wurden die Versuchsdaten der Vorversuchsreihe I beibehalten bis auf die Querschnittsabmessungen der Verstärkungslamelle (geringfügig auch der Stegquerschnitt aufgrund der Abmessungen der lagernden Ware) und die Länge der Variablen  $a$ .

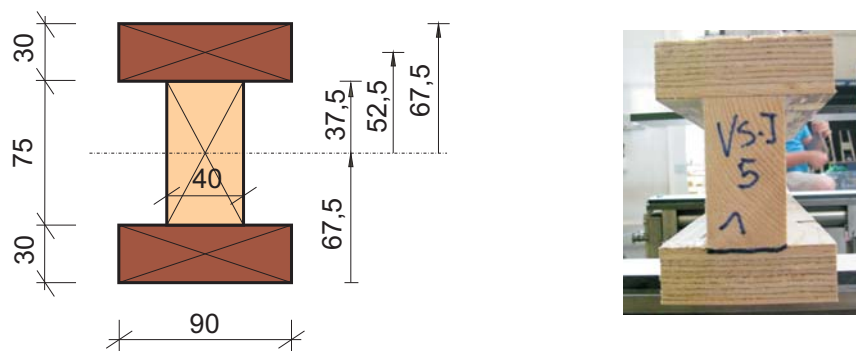


Abb. 3.8 Geometrie (links) und Bild (rechts) des Querschnitts der Vorversuchsreihe II.

#### 3.2.1.1 Materialeigenschaften

Der Querschnittsaufbau bestand aus dem eigentlichen Prüfkörper der Holzart Fichte im Stegbereich und aus den zwei Gurtlamellen aus Kerto-S. Die Materialkennwerte und Abmessungen werden in der nachfolgenden Tab. 3.4 gezeigt.



	Prüfkörper (Steg)	Verstärkungslamelle (Gurt)
Material	Fichte C14*	Kerto-S**
Höhen $h_{pr}$ und $h_1$ [mm]	75	30
Breite $b_{pr}$ und $b_1$ [mm]	40	90
Länge $l$ [mm]	989	989
E-Modul $E_{0,mean}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	7.000*	13.800**
Zugfestigkeit $f_{t,0,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	8*	38**
Biegefestigkeit $f_{m,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	14*	50**
Schubfestigkeit $f_{v,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	1,7*	2,3**
Variable $a$ [mm]	$4,5 \cdot h = 337,5$	

Tab. 3.4 Geometrische und mechanische Kenngrößen der verwendeten Materialien für die Vorversuchsreihe II.

\* Werte aus der ÖNORM EN 338 [63]

\*\* Werte aus der Zulassung Z-9.1-100 [96]

Der Biegespannungsverlauf sowie der Schubspannungsverlauf wurde nach dem gleichen Berechnungsablauf, wie in Abschnitt 3.1.1.1 vorgestellt, ermittelt.

$E_{0,mean}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$z$ [mm]	$\tau$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]
13800	-67,5	0,0	-51,6
13800	-37,5	3,6	-28,7
7000	-37,5	8,0	-14,6
7000	0	8,8	0,0
7000	0	8,8	0,0
7000	37,5	8,0	14,6
13800	37,5	3,6	28,7
13800	67,5	0,0	51,6

Tab. 3.5 Theoretische Spannungsverteilung der Vorversuchsreihe II

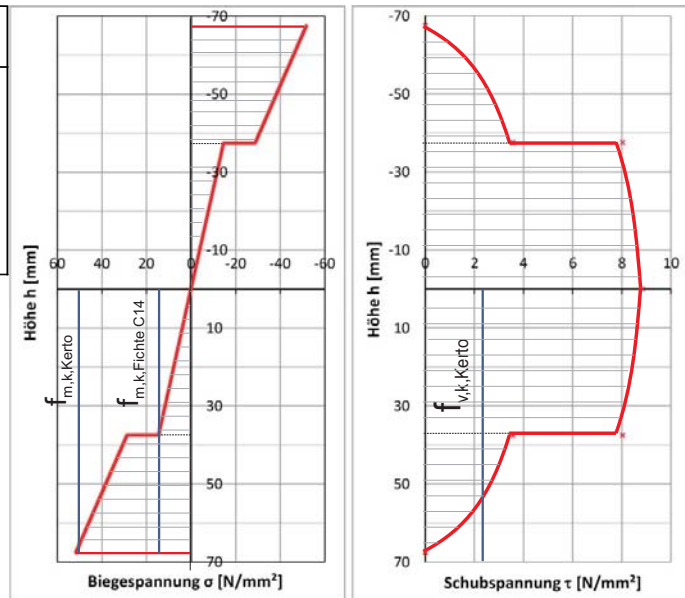


Abb. 3.9 Theoretische Auswertung der Vorversuchsreihe II.

### 3.2.1.2 Prüfkonfiguration

Für die Optimierung des Rechteckquerschnitts wurde der Prüfquerschnitt aus Fichte in seiner Geometrie wie beim Rechteckquerschnitt in Abschnitt 3.1 beibehalten. Es wurde lediglich der Querschnitt der Gurtlamellen verändert. Die theoretische Berechnung zeigt, dass die erwartbaren, hohen max. Schubspannungen im Kerto-S auf  $4,0 \text{ N/mm}^2$  gesenkt werden konnten (Abb. 3.9). Eine rechnerische max. Schubspannung von  $\tau_{\max} = 4,0 \text{ [N/mm}^2]$  scheint bei einer charakt. Schubfestigkeit des Kerto-S von  $f_{v,05} = 2,3 \text{ [N/mm}^2]$  durchaus vertretbar. Die errechneten max. zu erwartenden Biegespannungen von  $\sigma_{m,\max} = 57,4 \text{ [N/mm}^2]$  sollten ebenfalls bei  $f_{m,05} = 50 \text{ [N/mm}^2]$  kein Problem darstellen.

Bei dieser Prüfkonfiguration war der kritische Bereich die Klebefuge im Übergang zwischen Steg und Gurt, da hier aus dem Schubspannungsverlauf und aus dem Biegespannungsverlauf zu übertragende Spannungsdifferenzen bzw. Schubspannungen auftreten. Welche Auswirkungen diese Spannungssprünge im Hinblick auf die Tragfähigkeit der Klebefläche haben, wurde anhand von fünf Prüfkörpern getestet.

Die verwendete Prüfkonfiguration ist in der Abb. 3.10 skizziert bzw. in Abb. 3.11 bildlich dargestellt. Die Breite der Krafteinleitungsplatten wurde in Anlehnung an die ÖNORM EN 408 [67] mit halber Trägerhöhe angenommen.

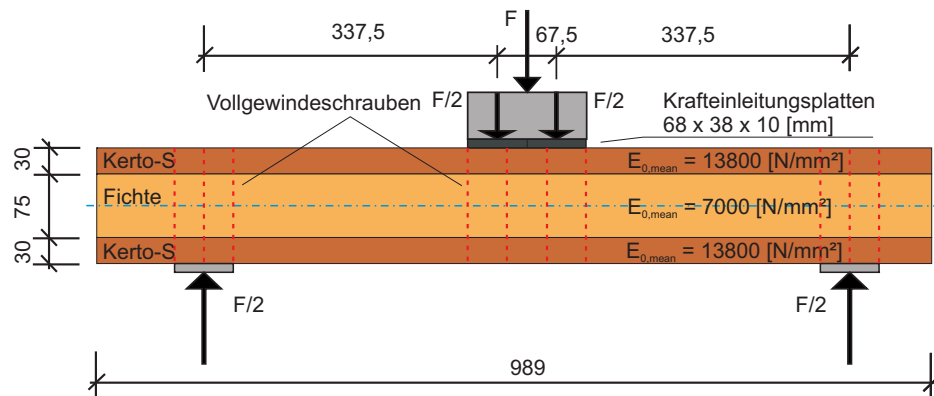


Abb. 3.10 Optimierte Prüfkonfiguration der Vorversuchsreihe II, Werte in [mm].



Abb. 3.11 I-Träger (Vorversuchsreihe II), eingebaut im Prüfgerät Universalprüfmaschine Lignum\_uni\_275, Lignum Test Center, Institut für Holzbau und Holztechnologie, Technischen Universität Graz

### 3.2.2 Ergebnisse bzw. Erkenntnisse

Auch bei dieser Prüfkongfiguration wurde bei allen fünf Prüfkörpern (100%) Schubversagen beobachtet. Der Schubbruch ereignete sich bei allen Trägern im Bereich der Klebefuge zwischen Steg und Gurt statt. Wie in den nachfolgenden Bilder zu erkennen ist, waren Schubbrüche nicht nur im Kerto-S sondern auch im Stegquerschnitt (Fichte) gegeben.

Nr.	Kraft	Schubfestigkeit	Anmerkung zur Bruchabfolge (Schubversagen)
[--]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[--]
VS_I-1	49,5	6,03	1. Sb im Steg und im Gurt zugleich, Übergangszone zwischen Steg und Gurt
VS_I-2	40,5	4,94	1. Sb im Kerto-S 2. Sb in der Fichte
VS_I-3	40,5	4,94	Sb im Kerto-S
VS_I-4	36,0	4,38	1. Sb im Übergangsbereich 2. Sb in Trägermitte
VS_I-5	52,2	6,36	Sb im Übergangsbereich

Tab. 3.6 Ergebnisse und Anmerkungen der Vorversuchsreihe II (Sb  $\hat{=}$  Schubbruch).

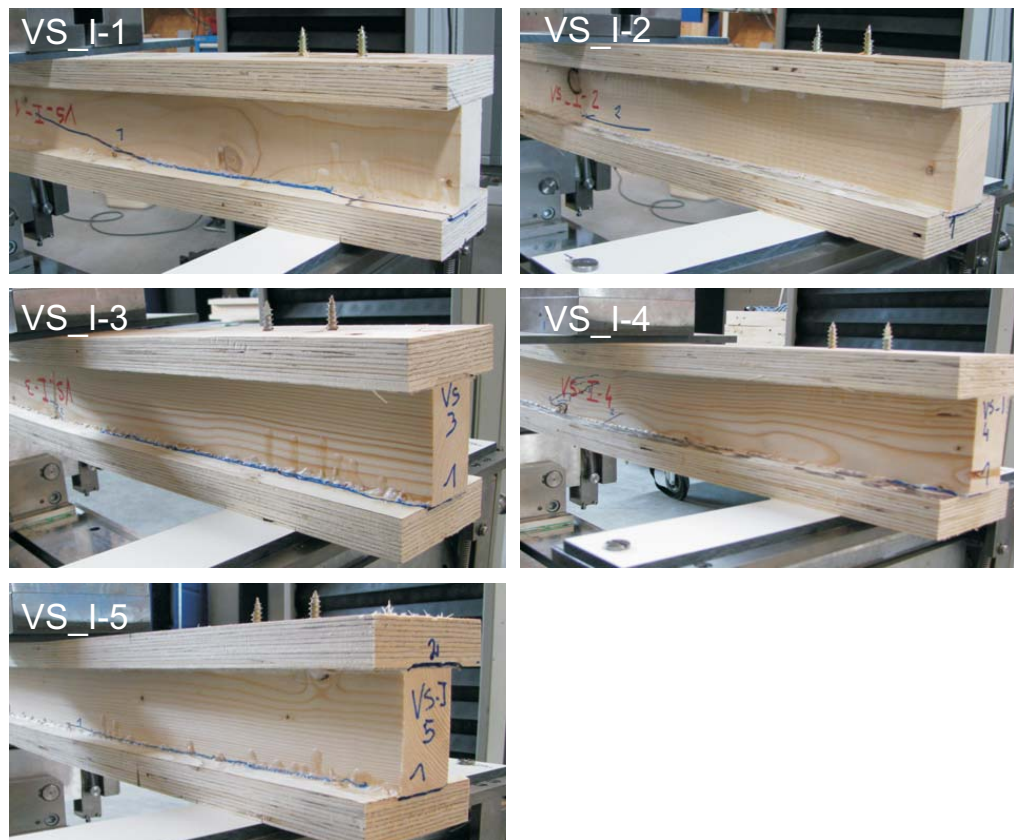


Abb. 3.12 Bildaufnahmen der Versagensformen der einzelnen Prüfkörper der Vorversuchsreihe II

Die Ursache für das Auftreten der Brüche im Bereich der Überganszone zwischen Steg und Gurt ist möglicherweise auf die hohen Differenzspannungen aus dem Biege- und Schubanteil rückführbar. Auch wurde der Einfluss der höheren Steifigkeit von Kerto-S gegenüber der hier geprüften Fichte analysiert. Aufgrund des höheren E-Moduls wirken die Gurtlamellen anziehend auf die Spannungen was wiederum eine höhere Beanspruchung der Klebefugen erwarten lässt.

Um die Normalspannungsdifferenz zwischen dem Gurt und dem Steg im Übergangsbe-  
reich zu minimieren, ist darauf zu achten, dass in der Gurt- und in der Steglamelle  
weitgehend gleich hohe E-Module gegeben sind. Zur Aufnahme der hohen Normal-  
spannungen gilt es zudem ein Material mit ausreichender Biegetragfähigkeit aber auch  
ausreichender Querschnittsdimension im Gurtbereich anzusetzen.

Der neue Vorschlag beinhaltet das Bestreben den gleichen E-Modul für den Gurt und  
den Steg zu verwenden. Da aber bei einer niedrigen Holzklasse die Biegefestigkeit auch  
gering ist, ist es notwendig ein Material (Fichte) zu wählen, dass neben dem geforderten  
E-Modul eine hohe Zugfestigkeit aufweist.

### 3.3 Prüfvariante III: optimierter I-Träger (homogener Aufbau)

Als Erkenntnis der Vorversuchsreihen I und II wird vom Vorversuch I die Wahl des I-Trägers und vom Vorversuch II die Entscheidung eines steifigkeitsähnlichen Aufbaus, sprich Gurtlamelle und Steglamelle bestehend mit vergleichbaren E-Modulen, weiterverwendet.

Eine besondere Aufmerksamkeit bekamen die Gurtlamellen, sie mussten im Vorhinein sortiert werden, um sie anschließend den einzelnen Serien bzw. Sortierklassen zuzuordnen. Nach einer anfänglichen Unterscheidung nach der Geometrie musste von jeder einzelnen Lamelle der dynamische E-Modul bestimmt werden. Dies geschah mittels einer Frequenzmessung welche im Abschnitt 4.1.1.1 näher erklärt wird. Im nächsten Schritt konnten die einzelnen Gurtlamellen den Steglamellen mit den ähnlichen E-Modulen zugeordnet werden. Da die Herausforderung an die Gurtlamellen eine hohe Zugfestigkeit ist, werden die Lamellen anschließend mittels „proof loading“ auf das gewünschte Niveau der Zugtragfähigkeit (proof level) geprüft. Diejenigen, welche die Prüfung unbeschadet überstanden haben, werden mit den Steglamellen zu I-Träger gefertigt. In der Abb. 3.5 wird der spezielle Bereich der Gurtlamellen (innere Ellipse) schematisch gezeigt, welcher für den Aufbau der Prüfkörper als geeignet gilt.

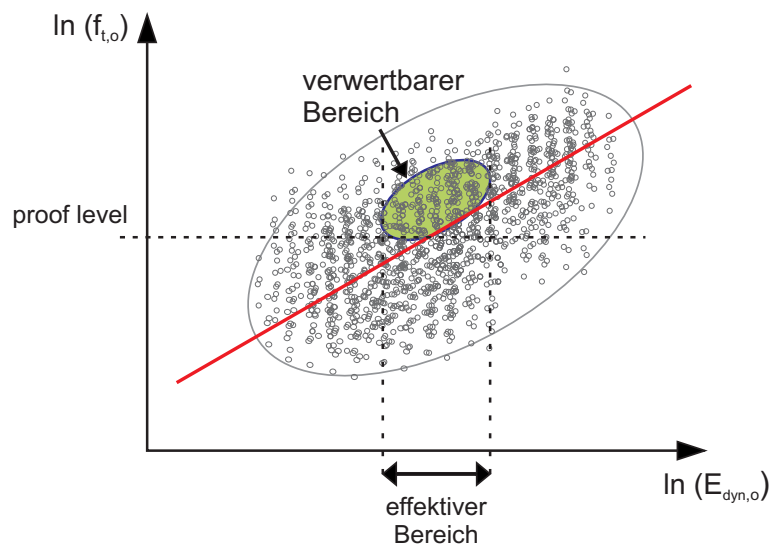
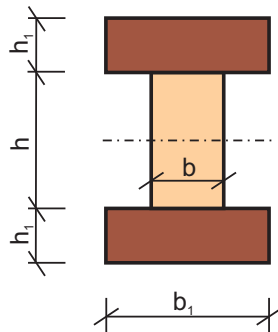


Abb. 3.13 Schematische Darstellung der Beziehung Zugfestigkeit vs. E-Modul von den Gurtlamellen und der verwertbare Bereich der Gurtlamellen für die Fertigung der I-Träger.

### 3.3.1 Versuchplanung – erwartbare Ergebnisse

Um den Einfluss der Trägerabmessungen und den Einfluss der unterschiedlichen Holzklassen auf die Schubfestigkeit zu untersuchen, werden sechs Serien, unter Anwendung einer eingehenden Versuchsplanung, gefertigt (Angaben siehe Tab. 3.7).

Für alle weiteren Versuche wurde die Variable  $a$  mit  $a = 4,5 \cdot h$  festgelegt. Die Höhe  $h$  bezieht sich auf die Höhe vom Steg.



Serien	I	II	III	IV	V	VI
Anzahl [#]	45	45	45	45	45	30
Festikeitsklassen [#]	C24	C24	C16	C24	C40	C24
Länge $l$ [mm]	985	1970	1970	1970	1970	3940
Höhe $h_{pr}$ [mm]	75	150	150	150	150	300
Breite $b_{pr}$ [mm]	40	40	80	80	80	80
Höhe $h_1$ [mm]	40	80	80	80	80	160
Breite $b_1$ [mm]	110	110	220	220	220	200
Variable $a$ [mm]	338	675	675	675	675	1350

Tab. 3.7 Geometrische Angaben zu den sechs Versuchsreihen (Hauptversuche)

#### 3.3.1.1 Materialeigenschaften

Gurt- und Steglamellen bestehen aus der Holzart Fichte. Die Materialkennwerte der einzelnen nominellen Festigkeitsklassen nach ÖNORM EN 338 [63] werden in der nachfolgenden Tab. 3.8 gezeigt.

	Materialeigenschaften		
	C16	C24	C40
Material (Fichte)	C16	C24	C40
E-Modul $E_{0,mean}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	8.000	11.000	14.000
Zugfestigkeit $f_{t,0,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	10	14	24
Biegefestigkeit $f_{m,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	16	24	40
Schubfestigkeit $f_{v,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	1,8	2,5	3,8

Tab. 3.8 Mechanische Angaben der verwendeten Materialien für die Vorversuchsreihe III. Erforderliche Angaben wurden aus der ÖNORM EN 338 [63] entnommen.

Gemäß der errechneten Anforderungen betreffend der Zugfestigkeit der Gurtlamellen sind für die Serie I 32 [N/mm<sup>2</sup>], Serie II 28 [N/mm<sup>2</sup>], Serien III 27 [N/mm<sup>2</sup>], Serie IV 24 [N/mm<sup>2</sup>], Serie V 23 [N/mm<sup>2</sup>] und für die Serie VI 24 [N/mm<sup>2</sup>] auf der Biegezugseite der I-Träger zu gewährleisten.

### 3.3.1.2 Prüfkonfiguration

Die aus den vorangegangenen Vorversuchen erhaltenen Erkenntnisse wurden in der folgenden Prüfkonfiguration eingearbeitet und in der Abb. 3.14 gezeigt. Die Daten zu den einzelnen Serien sind in der Tab. 3.7 angeführt.

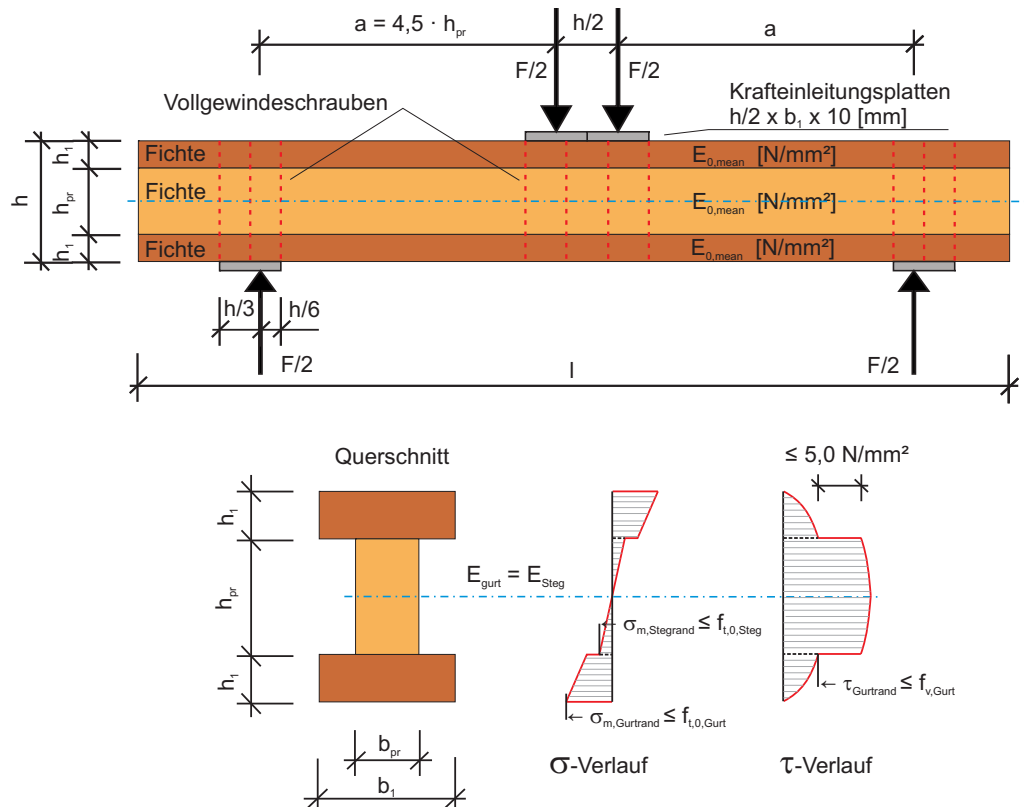


Abb. 3.14 Resultierende Prüfkonfiguration zur Bestimmung der Schubfestigkeit von Vollholzträgern.

### 3.3.2 Theoretische Erkenntnisse

Die Berechnung zeigt, dass durch die Wahl der gezeigten Abmessungen (Tab. 3.7) die Normalspannungen und die Schubspannungen in den Randbereichen der Träger keine Probleme darstellen bzw. unterhalb deren Festigkeiten liegen (Tab. 3.9, Tab. 3.10 und Tab. 3.11).

Der Übergangsbereich zwischen Gurt und Steg bekommt durch die Normalspannungen keine zusätzliche Beanspruchung. Einzig die Spannungsdifferenz aus der Schubspannung ist durch die Klebefläche aufzunehmen. Hier gilt es aber die 5 N/mm<sup>2</sup> Spannungsdifferenz nicht zu überschreiten.

Die Normalspannungen quer zur Faserrichtung werden durch Vollgewindeschrauben in den Trägern eingeleitet. Die Versuche zeigten hierbei keine nennenswerten Einpressungen und auch sonst keine Schwierigkeiten mit den hohen Kräften.

Die Herausforderung bei dieser Prüfkfiguration liegt in der sorgfältigen Sortierung der Gurtlamellen, insbesondere in der Gewährleistung einer hohen Zugfestigkeit bei entsprechend niedrigem Elastizitätsmodul wie etwa bei den Prüfkörpern der Serie III.

Serie I (C24, 75/40)					Serie II (C24, 150/40)				
Bereich	E	z <sub>i</sub>	τ	σ	Bereich	E	z <sub>i</sub>	τ	σ
[#]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[mm]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[#]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[mm]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
Gurt	11000	-77,5	0,0	-31,9	Gurt	11000	-155,0	0,0	-27,8
Gurt		-37,5	2,8	-15,5	Gurt		-75,0	2,4	-13,5
Steg		-37,5	7,7	-15,5	Steg		-75,0	6,7	-13,5
Steg		0	8,6	0,0	Steg		0,0	7,5	0,0
Steg		0	8,6	0,0	Steg		0,0	7,5	0,0
Steg		37,5	7,7	15,5	Steg		75,0	6,7	13,5
Gurt		37,5	2,8	15,5	Gurt		75,0	2,4	13,5
Gurt		77,5	0,0	31,9	Gurt		155,0	0,0	27,8

Tab. 3.9 Ergebnisse der Spannungsberechnung der Serie I (links) und der Serie II (rechts).

Serie III (C16, 150/80)					Serie IV (C24, 150/80)				
Bereich	E	z <sub>i</sub>	τ	σ	Bereich	E	z <sub>i</sub>	τ	σ
[#]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[mm]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[#]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[mm]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
Gurt	8000	-155,0	0,0	-24,6	Gurt	11000	-155,0	0,0	-24,2
Gurt		-75,0	2,2	-11,9	Gurt		-75,0	2,1	-11,7
Steg		-75,0	6,0	-11,9	Steg		-75,0	5,9	-11,7
Steg		0	6,6	0,0	Steg		0,0	6,5	0,0
Steg		0	6,6	0,0	Steg		0,0	6,5	0,0
Steg		75,0	6,0	11,9	Steg		75,0	5,9	11,7
Gurt		75,0	2,2	11,9	Gurt		75,0	2,1	11,7
Gurt		155,0	0,0	24,6	Gurt		155,0	0,0	24,2

Tab. 3.10 Ergebnisse der Spannungsberechnung der Serie III (links) und der Serie IV (rechts).



Serie V (C40, 150/80)					Serie VI (C24, 300/80)				
Bereich	E	$z_i$	$\tau$	$\sigma$	Bereich	E	$z_i$	$\tau$	$\sigma$
[#]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[mm]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[#]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[mm]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
Gurt	14000	-155,0	0,0	-23,4	Gurt	11000	-155,0	0,0	-24,7
Gurt		-75,0	2,1	-11,3	Gurt		-75,0	2,2	-12,0
Steg		-75,0	5,7	-11,3	Steg		-75,0	6,0	-12,0
Steg		0	6,3	0,0	Steg		0,0	6,6	0,0
Steg		0	6,3	0,0	Steg		0,0	6,6	0,0
Steg		75,0	5,7	11,3	Steg		75,0	6,0	12,0
Gurt		75,0	2,1	11,3	Gurt		75,0	2,2	12,0
Gurt		155,0	0,0	23,4	Gurt		155,0	0,0	24,7

Tab. 3.11 Ergebnisse der Spannungsberechnung der Serie V (links) und der Serie VI (rechts).

## Hauptversuche

### 4.1 Anforderungen und Prüfaufwand

Für die Hauptversuche werden sieben Serien (6 Serien für Schubprüfungen und 1 Serie für Biegeprüfungen) mit unterschiedlichen Abmessungen, davon zwei Serien mit unterschiedlichen Holzklassen, verwendet. Die gewählte Holzart für den Gurt und für den Steg ist die Fichte. Die Ware wurde bei der Firma „Sägewerk Hans Bichler“ angekauft.

#### 4.1.1 Ausgangsmaterial und Herstellung der I-Träger

Nach den vorangegangenen Berechnungen im Kapitel 3, Abschnitt 3.3 wurde folgende Holzliste (Tab. 4.1), zuzüglich einer Reservemenge, (insgesamt 48,9 [m<sup>3</sup>]) für die Versuchsdurchführung bei der Firma „Sägewerk Hans Bichler“ geordert.

Serie	Material	Stück	Breite	Höhe	Länge	Volumen
[--]	[--]	[#]	[mm]	[mm]	[mm]	[m <sup>3</sup> ]
<b>Steglamellen:</b>						
I	Fichte C24	45	40	75	985	0,13
II	Fichte C24	45	40	150	1970	0,53
III	Fichte C16	45	80	150	1970	1,06
IV	Fichte C24	45	80	150	1970	1,06
V	Fichte C40	45	80	150	1970	1,06
VI	Fichte C24	30	80	300	3940	2,84
<b>Biegeversuch:</b>						
VII	Fichte C24	45	80	150	2850	1,54

Tab. 4.1 Holzliste für die Fa. Sägewerk Hans Bichler.

Serie	Material	Stück	Breite	Höhe	Länge	Volumen
[-]	[-]	[#]	[mm]	[mm]	[mm]	[m <sup>3</sup> ]
<b>Gurtlamellen:</b>						
für die Serie I	Fichte T30E11*	90	110	40	985	0,39
für die Serie II	Fichte T30E11*	90	110	80	1970	1,56
für die Serie III	Fichte T24E8*	90	220	80	1970	3,12
für die Serie IV	Fichte T24E11*	90	220	80	1970	3,12
für die Serie V	Fichte T24E13*	90	220	80	1970	3,12
für die Serie VI	Fichte T20E11*	60	220	160	3940	8,32

Tab. 4.1 Holzliste für die Fa. Sägewerk Hans Bichler.

\* Materialanforderung: T bezeichnet die Zugfestigkeit (z.B.: T30 =  $f_{t,05} = 30$  [N/mm<sup>2</sup>]) und E bezeichnet den E-Modul  $\cdot 10^3$  (z.B.: E11 =  $E_{0,mean} = 11000$  [N/mm<sup>2</sup>])

Um Schwindrisse im Querschnitt zu vermeiden, musste das Holz vor der Anlieferung schonend auf  $u = 12\%$  Holzfeuchte getrocknet werden. Eine weitere Anforderung an die Firma war es, den Holzquerschnitt (Steg) für alle Prüfkörper immer im gleichen Abstand zum Mark aus dem Stamm herauszuschneiden. Hierbei wurde das Probenmaterial aus einem mehrteiligen Einschnitt mit einem konstanten radialen Abstand zwischen dem Mark und der „rechten Seite“ des Probekörpers von rund 60 mm entnommen.

#### 4.1.1.1 Maschinelle Holz-Sortierung

Da die Ware unsortiert angeliefert wurde, musste sie im Vorhinein in Steg- und in Gurtlamellen aufgeteilt werden. Weiters folgte eine Einteilung in die Festigkeitsklassen. Unter Verwendung der positiven Korrelationsbeziehung zwischen dem E-Modul und der Festigkeit wurde zuerst der dynamische E-Modul, zur späteren Klassierung des Probenmaterials, ermittelt.

Um sicher zu stellen, dass die Gurtlamellen die Normalspannungen in der Biegezugzone aufnehmen können, wurden sie einem „proof loading“ unterzogen.

„Proof loading“ bedeutet, dass jedes einzelne Stück einer gewissen Vorbelastung (Prüflast; engl. proof load) ausgesetzt wurde. Dies geschah mittels der Zugprüfmaschine `ignum_z_850` (siehe Abschnitt 4.1.2) des Instituts für Holzbau und Holztechnologie an der Technischen Universität Graz.

All jene Stücke die dieser Belastung nicht standhielten, mussten zwangsweise ausgeschieden werden. Somit konnte eine gewisse Mindestfestigkeit der Gurtlamellen garantiert werden.

Die Ermittlung des dynamischen Elastizitätsmoduls geschah mit Hilfe der erweiterten Längsschwingungsmessung von Eiser und Kastner [20]. Der Hintergrund dieser Vorgehensweise war es, ein Sortiersystem auf der Basis der Eigenfrequenzmessung zu

entwickeln. Hier wird der zu untersuchende Holzkörper durch einen Impuls auf die Stirnfläche in Schwingung versetzt. Auf der anderen Stirnfläche wird ein Beschleunigungsaufnehmer angebracht und das zeitliche Signal erfasst. Mit Hilfe einer Fast-Fourier-Transformation wird nun das Signal in ein Frequenzspektrum übergeführt. Durch diese Überleitung kann die erste Eigenfrequenz bestimmt werden und unter Einbeziehung der Länge und der Dichte des Probekörpers der dynamische E-Modul  $E_{\text{dyn}}$  bestimmt werden (Glg. 4.1).

$$E_{\text{dyn}} = \frac{4}{n^2} \cdot l^2 \cdot \rho \cdot f^2 \cdot 10^{-6} \quad 4.1$$

$l$  ... Prüfkörperlänge [m]

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

$n$  ... Ordnung der Schwingung [-]

$f$  ... erste Eigenfrequenz [Hz]

Bei der erweiterten Schwingungsmessung wird die durch den Impuls erzeugte Amplitudenform bei der Auswertung berücksichtigt. Bisher war diese Amplitudenform von der Stärke des Aufpralls des Hammers auf die Stirnfläche abhängig. Um diese Abhängigkeit zu berücksichtigen, musste ein Impulshammer (Abschnitt 4.1.2) verwendet werden.

#### 4.1.1.2 Ermittlung der charakteristischen Eigenschaften der Prüfkörper

##### Bestimmung der Maße

Um für weitere Berechnungen, z.B. für die Rohdichte, die Maße des Prüfkörpers zu bestimmen, muss im Vorhinein die Breite und die Dicke jeweils der Länge nach an vier Stellen gemessen und anschließend der Mittelwert gebildet werden. Für diese Erfassung der Geometrie wird eine digitale Schiebelehre (Mitoya) mit einer Messgenauigkeit von  $\pm 0,1$  mm verwendet. Für die Länge der Lamelle reicht ein Rollmaßband mit Millimetergenauigkeit aus. Diese Vorgehensweise entspricht sinngemäß dem in der ÖNORM EN 408 [67] beschriebenen Verfahren.

##### Bestimmung der Feuchte

Wie schon im Vorhinein in dieser Diplomarbeit beschrieben, hat die Holzfeuchtigkeit einen wesentlichen Einfluss auf die mechanischen Holzeigenschaften. Deshalb wird vor jeder Prüfung darauf geachtet, dass die Prüfkörper nach ÖNORM EN 408 [67] in einem Normklima von  $20 \text{ °C} \pm 2 \text{ °C}$  und einer relativen Luftfeuchtigkeit von  $65\% \pm 5\%$  konditioniert werden, sodass sich im Holz ein Ausgleichsfeuchte von  $12\% \pm 2\%$  einstellt.

Vor der Prüfung wird mittels einer elektrischen Widerstandsmessung (Hydromette M2050 der Firma Gann) die Holzfeuchte der Prüfkörper untersucht. Die Genauigkeit des Holzfeuchtemessgerätes liegt bei  $\pm 3\%$ .

Um einen genauen Ist-Zustand der Holzfeuchte nach dem Bruch zu bekommen, wird unmittelbar nach dem Versagen eine Darrprobe herausgeschnitten. Nach dem Wiegen kommt die Probe in einen Darrofen der mit  $103 \text{ °C} \pm 2 \text{ °C}$  das Holzstück auf Masse-

konstanz trocknet. Danach wird die Masse nochmals ermittelt und der Feuchtegehalt nach der Glg. 4.2 bestimmt (ÖNORM EN 13183-1 [69]).

$$u = \frac{m_u - m_{tr}}{m_{tr}} \cdot 100 \quad [\%] \quad 4.2$$

$m_u$  ... die Masse des Prüfkörpers [g] vor der Trocknung, inkl Holzfeuchte  $u$

$m_{tr}$  ... die Masse des Prüfkörpers [g] nach der Trocknung (Massekonstanz)

### Bestimmung der Rohdichte

Die Rohdichte ist der Quotient aus der Masse und dem Volumen des Holzstücks, einschließlich der Hohlräume und des enthaltenen Wassers, siehe Glg. 4.3. Da der Feuchtegehalt des Holzes je nach Klima schwankt, schwankt auch die Rohdichte. Deshalb wird die Rohdichte immer mit dem dazugehörigen Feuchtegehalt angegeben.

$$\rho_u = \frac{m_u}{V_u} \quad [\text{kg}/\text{m}^3] \quad 4.3$$

$m_u$  ... Masse bei einem Feuchtegehalt  $u$  [kg]

$V_u$  ... Volumen bei einem Feuchtegehalt  $u$  [m<sup>3</sup>]

#### 4.1.1.3 Verleimung der Träger

Die Verbindung zwischen dem Steg und dem Gurt wird unter Verwendung eines einkomponenten Polyurethankleber (Purbond, [98]) und einer fremden Feder gebildet. Hierbei dient die fremde Feder zur Gewährleistung einer genauen Positionierung der Steglamelle (siehe Abb. 4.1). Außerdem wird durch den Zuwachs der Oberfläche eine größere Klebefläche gebildet und dadurch eine leistungsfähigere Verbindung hergestellt.

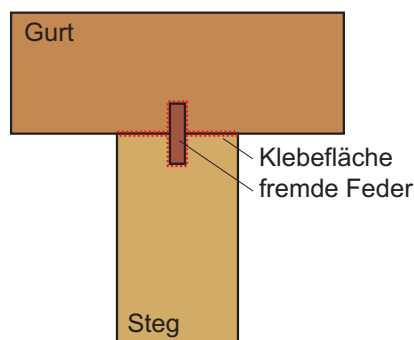


Abb. 4.1 Skizze einer Nut- und fremden Feder-Verbindung.

## 4.1.2 Prüfgeräte

Für das Prüfvorhaben werden unterschiedliche Prüfgeräte verwendet. Um einen Überblick zu schaffen, werden sie in diesem Teil der Diplomarbeit gezeigt und näher beschrieben. Alle Geräte befinden sich im Lignum Test Center der Technischen Universität Graz am Institut für Holzbau und Holztechnologie.

### 4.1.2.1 Digitale Schiebelehre und Rollmeter

Die Schiebelehre der Firma Mitoya (Abb. 4.2) besitzt eine digitale Ziffernanzeige was ein schnelles Ablesen gewährleistet. Der Messschieber besitzt eine Genauigkeit von  $\pm 0,1$  mm. Der Rollmeter (Abb. 4.3) wird für größere Längen eingesetzt und besitzt eine Genauigkeit im halben Millimeterbereich.



Abb. 4.2 Digitale Schiebelehre des Lignum Test Centers der Technischen Universität Graz.



Abb. 4.3 Rollmeter des Lignum Test Centers der Technischen Universität Graz.

#### 4.1.2.2 Waage

Die Messung der Masse wird mit der Waage Sartorius EA60 EDE-1 (Abb. 4.4) bewerkstelligt. Das Gerät wiegt auf 1/100 Gramm genau.



Abb. 4.4 Waage des Lignum Test Centers der Technischen Universität Graz.

#### 4.1.2.3 Feuchtemessgerät

Das Holzfeuchtemessgerät Hydromette M2050 der Firma Gann (Abb. 4.5) bestimmt die Holzfeuchte mittels elektrischer Widerstandsmessung. Hierfür werden zwei Rammelektroden M 18 mit isoliertem Schaft in das Holz quer zur Faser eingetrieben. Dieses Gerät misst im Prüfbereich von 6-18% Feuchtegehalt mit einer Genauigkeit von  $\pm 3\%$ . Diese Prüfung wird unmittelbar vor dem Versuch angewendet und dient rein zur Abschätzung der Holzfeuchte des Prüfkörpers.



Abb. 4.5 Holzfeuchtemessgerät des Lignum Test Centers der Technischen Universität Graz.

#### 4.1.2.4 Versuchsaufbau – erweiterte Schwingungsmessung

Die Schwingungsmessung, welche von Eiser und Kastner [20] an der TU-Graz (Institut für Holzbau und Holztechnologie) entwickelt wurde, besteht aus mehreren Komponenten. In der Abb. 4.6 wird der für den Impuls notwendige Impulshammer gezeigt. An der Spitze befindet sich ein Sensor der den Impuls bzw. das Signal über ein Datenkabel an den Koppler weitergibt.



Abb. 4.6 Für die Frequenzmessung eingesetzter Impulshammer.

Um auf der anderen Seite des Holzträgers die benötigte Zeit des Impulses aufzunehmen wird ein Beschleunigungsaufnehmer, welcher in der Abb. 4.7 gezeigt wird, benötigt. An einer Seite wurde dieser mit einer Schraube verklebt, um eine kraftschlüssige Verbindung mit dem Holz herstellen zu können. Die Daten werden wieder mittels einem Datenkabel an den Rechner bzw. an eine Steuerungskonsole weitergeleitet.

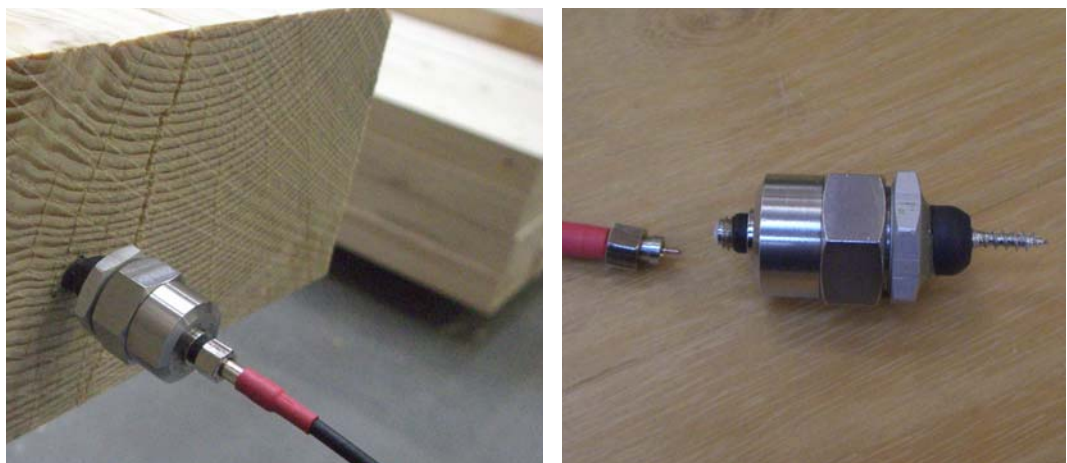


Abb. 4.7 Für die Frequenzmessung eingesetzter Beschleunigungsaufnehmer.



Um die Signale vom Impulshammer und vom Beschleunigungsaufnehmer zu fassen wird ein sogenannte Koppler benötigt (Abb. 4.8 rechts). Die kombinierten Daten werden im Anschluss mittels Datenkabel (Anschlussblock Abb. 4.8 links) an den Rechner bzw. an die Software weitergeleitet und dort verarbeitet.

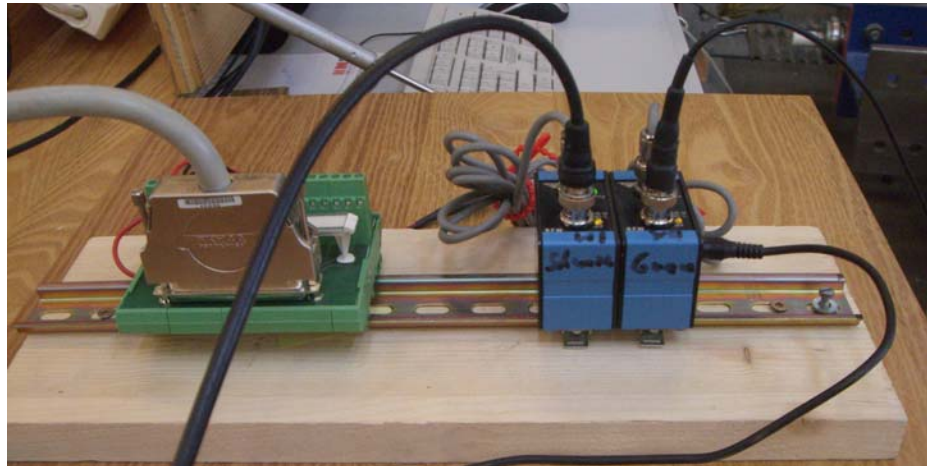


Abb. 4.8 Komponenten der Schwingungsmessung: Anschlussblock inkl. Datenkabel (links), Koppler für den Impulshammer und den Beschleunigungsaufnehmer (rechts)

#### 4.1.2.5 Presse

Die hydraulische Heizplattenpresse LZT 160-SF (Abb. 4.9) der Firma Langzauner wird für das Anbringen (Verkleben) der Gurte an den Steg verwendet. Sie kann einen Druck von  $42 \text{ [N/cm}^2\text{]}$  auf einer Fläche von  $3,9 \text{ [m}^2\text{]}$  erzeugen.



Abb. 4.9 Hydraulische Heizplattenpresse des Lignum Test Centers der Technischen Universität Graz.

#### 4.1.2.6 Zugprüfmaschine

Die Zugprüfeinrichtung lignum-z-850 (Abb. 4.10) ermöglicht die Durchführung von statischen Zugversuchen im Bereich von 0 bis 850 kN [31]. Das Gerät überträgt die Zugkraft, welche durch ein Hydraulikaggregat erzeugt wird, über zwei Klemmplattenpaare aus gehärtetem Stahl in den Prüfkörper. Die Erfassung der Messdaten erfolgt durch das Gerät Spider 8, welches mit der Kraftmessdose verbunden ist. Durch ein Programm (Catman 3.1) können die Daten ausgewertet werden.

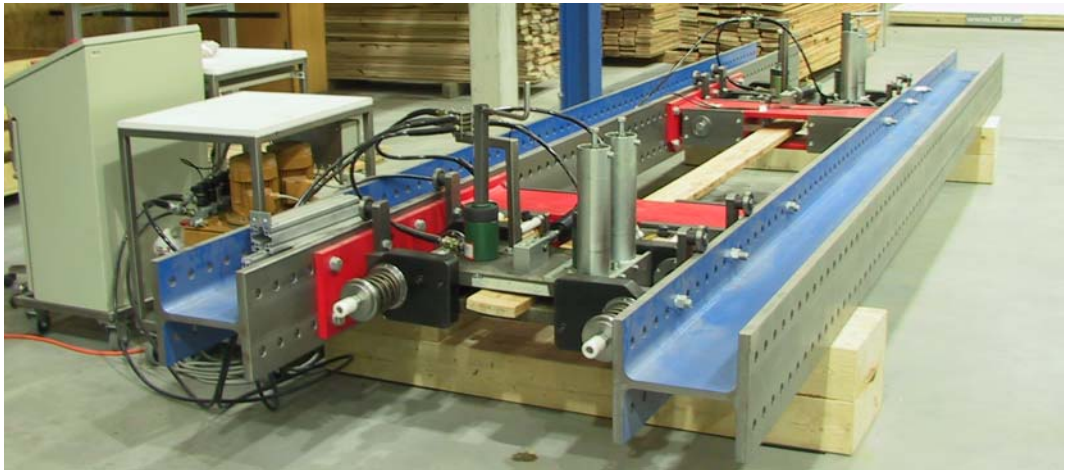


Abb. 4.10 Zugprüfeinrichtung des Lignum Test Centers der Technischen Universität Graz.

#### 4.1.2.7 Universalprüfmaschine

Die Universalprüfmaschine lignum\_uni\_275 der Firma Zwick (Abb. 4.11) ermöglicht die Durchführung von Biege-, Schub-, Druck- und Zugversuchen. Dieses Gerät hat einen Belastungsbereich von 0 bis  $\pm 275$  kN. Hier werden die Kräfte über einen Zylinder in den Prüfkörper eingebracht. Das Gerät kann über eine Kraftmessdose die eingesetzte Kraft und zugleich den Weg den der Kolben zurücklegt wiedergeben. Die Datenauswertung geschieht mittels dem PC-Programm Catman 3.1.



Abb. 4.11 Universalprüfmaschine des Lignum Test Centers der Technischen Universität Graz.

#### 4.1.2.8 Darrschrank

Die genaueste Form der Feuchtebestimmung von Holzproben ist die Darmethode. Hier wird dem Prüfkörper ein ca. 50 g (mindestens 20 g) schweres Probestück herausgeschnitten und gewogen. Anschließend kommt das Probestück in den Darrschrank (Umlufttrockenschrank UT 12 der Firma Heraeus, Abb. 4.12) wo es bei 103 °C bis zur Massenkonstanz getrocknet wird. Der Gewichtsunterschied vor und nach der Trocknung ist der Feuchtegehalt, welcher im Holz gebunden war.



Abb. 4.12 Darrschrank des Lignum Test Centers der Technischen Universität Graz.

### 4.1.3 Prüfablauf

Nach der Anlieferung der Ware muss sie für das im Abschnitt 3.3 beschriebene Prüfverfahren zuerst in drei Gruppen geteilt werden. Die erste Gruppe beinhaltet die eigentliche Prüfware, sprich die Steglamellen. In der zweiten Gruppe befindet sich das Gurtmaterial und in der dritten Serie sind die Prüfkörper für den Biegeversuch. Der Biegeversuch dient zur Bestätigung der zuvor ermittelten dyn. E-Module sowie zur Abklärung der Beziehung Schubfestigkeit vs. Biegefestigkeit wie u. a. in der ÖNORM EN 338 [63] (und auch implizit in der ÖNORM EN 1194 [68]) verankert ist.

Als nächster Schritt werden die Holzfeuchte, die Abmessungen und der dyn. E-Modul bestimmt bzw. ermittelt, um die Holzlamellen der zugehörigen Holzklassen zuzuordnen.

Die Gurtlamellen werden anschließend mittels der Zugprüfmaschine geprüft (proof loading) um sicherzustellen, dass sie die zu erwartenden Normalspannungen aufnehmen können. Jetzt erst werden die Holzlamellen auf die in der Berechnung ermittelten Längen zugeschnitten.

Um den Steg genau zentrisch über dem Gurt zu positionieren wird eine Nut mit fremder Feder angeordnet. Nach der Aushärtung müssen noch die Löcher für die Vollgewindeschrauben (Schmid-Schrauben [97]) gebohrt und die Schrauben versenkt werden (in den Kräfteinleitungsbereichen). Schlussendlich werden die Träger noch in die Klimakammer, um die in der ÖNORM EN 408 [67] vorgeschlagene Holzfeuchte für die Versuche zu gewährleisten, konditioniert.



Abb. 4.13 Klimakammer des Lignum Test Centers der Technischen Universität Graz.

### 4.1.3.1 Versuchsumfang

Das Versuchsvorhaben beinhaltet sechs Serien für die Schubversuche und eine Serie für den Biegeversuch. Die Serien I-VI bestehen jeweils aus 45 Prüfkörper, die Serie VII umfasst 30 Prüfkörper. Somit ergibt sich eine Prüfrägeranzahl von 300 Versuchen. Um den Einfluss der Geometrieänderung und der Holzklassenänderung auf die Schubfestigkeit zu untersuchen, wurde von einer Serie zur nächsten Serie immer ein Parameter geändert. In der Abb. 4.14 werden diese Änderungen in Beziehung gebracht. Es werden nur die eigentlichen Prüfkörper, sprich die Stege, gezeigt.

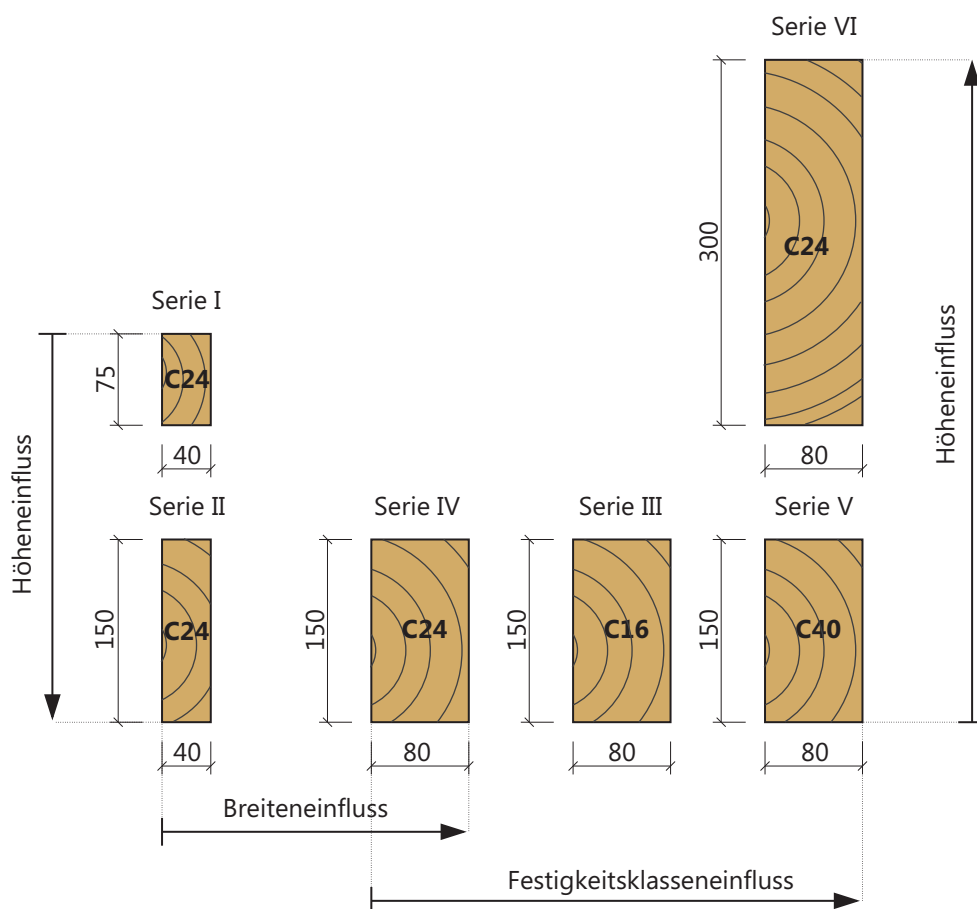


Abb. 4.14 Darstellung der Beziehungen der einzelnen Serien zueinander.

Aufgrund des Leistungsumfangs ist die Beschreibung bzw. die Durchführung des Prüfvorhabens nicht mehr Bestandteil der Diplomarbeit. Jedoch wird nach dieser Arbeit das Vorhaben am Institut für Holzbau und Holztechnologie verifiziert. Die theoretischen Berechnungsabläufe werden im Anhang gezeigt.

## Vertiefende Betrachtung zum Einfluss von Größeneffekten auf die Schubfestigkeit von Voll- u. Brettschichtholz auf Basis einer umfangreichen Literaturrecherche

Wie aus den bisherigen nationalen und internationalen Arbeiten bekannt ist, unterliegt die Schubfestigkeit einem Größeneffekt. Dies zeigt sich in der Abnahme der Schubfestigkeit mit Zunahme der auf Schub beanspruchten Fläche. Um hier eine eingehendere Tendenz bzw. Quantifizierung dieser Beziehung diskutieren zu können, wurden auf Basis einer umfangreichen Literaturrecherche die Schubfestigkeitswerte, ermittelt anhand von Biegeprüfungen, gesammelt und in weiterer Folge in Beziehung gebracht.

Um die Ergebnisse vergleichen zu können ist es notwendig, die Schubfestigkeiten in Abhängigkeit der beanspruchten Schubflächen auf eine gemeinsame Basis wie z.B. Holzfeuchte  $u = 12\%$  zu korregieren. Falls keine Angaben zu solchen Randbedingungen in den recherchierten Arbeiten gemacht wurden, galt es adäquate Annahmen zu treffen oder die Publikation aus dem Vergleich auszuschließen.

Der Vergleich wurde primär auf Basis der Mittelwerte und Variationskoeffizienten der gewichteten Versuchsergebnisse durchgeführt. Unter der Annahme einer lognormalverteilten Schubfestigkeit wurden zudem die 5%- und 95%-Quantilwerte ermittelt. Die Ermittlung der Schubfläche fußte auf Angaben bzw. auf den gegebenen Proportionen von Skizzen unter allg. Annahme eines Lastausbreitungswinkels von  $\alpha = 30^\circ$  (= korrigierte Schubfläche, Abschnitt 1.10).

Mittels der errechneten Schubfläche konnten auch die Ergebnisse der unterschiedlichen Prüfkfigurationen miteinander verglichen werden, da hier nur eine Seite bzw. ein Teil des Trägers (ein Versagensbereich der Versagenskette entlang eines Prüfkörpers) herangezogen wurde. Die Prüfkfigurationen (3-Punkt-, 4-Punkt- und 5-Punkt-Biegeversuch) besitzen immer nur zwei potentielle Versagensbereiche.

Trotzdem gibt es noch weitere Einflüsse die in der Zusammenfassung der Daten nicht berücksichtigt wurden und deren Auswirkung auf die Schubfestigkeit in weiterer Folge noch zu untersuchen wäre:

- Einfluss der unterschiedlichen Holzarten
- Einfluss der Prüfgeschwindigkeit
- Einfluss der unterschiedlichen Festigkeitsklassen
- Einfluss der Lasteinleitungsplatten der einzelnen Prüfkfigurationen
- Einfluss der verwendeten Klebstoffe bei BSH-Träger
- Einfluss der Lamellenanzahl bei BSH-Träger
- Einfluss der Orientierung der Jahrringe im Prüfkörper
- Einfluss der Geometrieunterschiede (Rechteckquerschnitt zu I-Querschnitt)

Alle diese Einflüsse wurden aufgrund unzureichender Literaturdaten in den folgenden Tabellen (Tab. 5.2, Tab. 5.3, Tab. 5.4, Tab. 5.5) bzw. Diagrammen (Abb. 5.1, Abb. 5.2, Abb. 5.3, Abb. 5.4) nicht gesondert berücksichtigt.

Insgesamt konnten aus 18 Berichten Schubfestigkeitswerte von 168 Prüfserien gesammelt werden. Da für die einzelnen Gegenüberstellungen, aufgrund fehlender Angaben, nicht alle Daten verwertbar waren, wird in der Tab. 5.1 die Anzahl derjenigen gezeigt, die in weiterer Folge in den Diagrammen wieder zu finden sind.

Holzart	Bereich	$f_{v,05}$	$f_{v,mean}$	$f_{v,95}$
VH	$A_s$	45	63	45
	V	81	99	81
	h	-	99	-
	b	-	99	-
BSH	$A_s$	43	45	43
	V	43	72	43
	h	-	72	-
	b	-	72	-
Gesamt		168		

Tab. 5.1 Anzahlen der verwendeten Datenserien für die jeweiligen Gegenüberstellungen

Referenz	A <sub>s,korr</sub>	f <sub>v,mean,12</sub>	f <sub>v,05,12</sub>	f <sub>v,95,12</sub>	Holzart		u	VA	n	b	h	l <sub>span</sub>	Anmerkung
[-]	[mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]		[%]	[-]	[#]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]
Poussa et al. [73]	2.799	8,6	7,4	9,9	ScP	VH	12,0%	4pB	40	42	95	1080	I-QS; 30% BV; → in Auswertung (MW, S) nicht berücksichtigt!
	2.799	8,3	7,3	9,4	F	VH	12,0%	4pB	40	42	95	1080	
Rammer et al. [76]	4.056	8,7	6,5	11,2	D	VH	21,7%	5pB	11	36	237	2370	R-QS; rd. 62% SV, BA → CDA berücksichtigt → SW: MW, S
	10.779	8,3	6,6	10,2	D	VH	24,6%	5pB	30	99	202	2020	
	23.289	6,9	5,1	9,1	D	VH	24,6%	5pB	17	98	302	3020	
	21.701	6,8	5,5	8,3	D	VH	23,9%	5pB	17	95	350	3500	
Rammer, McLean [77]	k. A.	11,1	7,7	15,2	ES	VH	22,0%	5pB	57	51	102	1020	R-QS; → CDA
		10,6	6,3	16,2	ES	VH	22,0%	5pB	40	51	203	2030	
		9,4	6,7	12,7	ES	VH	22,0%	5pB	30	102	203	2030	
		5,6	4,2	7,3	ES	VH	22,0%	5pB	30	102	305	3050	
		5,1	4,1	6,4	ES	VH	22,0%	5pB	30	102	356	3560	
		13,2	11,5	15,1	SoP	VH	22,0%	5pB	56	51	102	1020	
		10,2	7,0	14,3	SoP	VH	22,0%	5pB	42	51	203	2030	
		9,2	7,9	10,7	SoP	VH	22,0%	5pB	30	102	203	2030	
		7,7	6,3	9,3	SoP	VH	22,0%	5pB	25	102	305	3050	
		6,7	4,8	8,9	SoP	VH	22,0%	5pB	30	102	356	3560	
		12,8	10,2	15,7	SoP	VH	12,0%	5pB	60	51	102	1020	
		10,7	8,2	13,7	SoP	VH	12,0%	5pB	30	51	203	2030	
		11,3	7,9	15,5	SoP	VH	12,0%	5pB	59	102	203	2030	
		8,3	5,9	11,3	SoP	VH	12,0%	5pB	29	102	305	3050	
		7,4	6,4	8,5	SoP	VH	12,0%	5pB	30	102	356	3560	
Lackner [44]	3.611	7,1	5,3	9,4	F	VH	11,6%	3pB	4	40	145	1051	R-QS; nur SV
	8.468	5,7	4,3	7,4	F	VH	13,2%	3pB	5	80	170	1260	
	11.955	6,3	4,5	8,3	F	VH	10,6%	3pB	5	80	240	1680	
Korin [42]	1.713	10,9	9,4	12,5	RWW	VH	10,0%	3pB	5	45 (18)	95	500	I-QS (eingeschnitten); nur SB → u. SW der f <sub>v</sub>
	1.713	14,8	11,2	19,0	SoYP	VH	9,0%	3pB	3	45 (18)	95	500	
	1.713	12,4	11,2	13,8	FRW	VH	11,0%	3pB	4	45 (18)	95	500	
	1.713	11,6	10,9	12,3	SWW	VH	11,0%	3pB	3	45 (18)	95	500	
	1.713	9,9	8,6	11,4	SPF	VH	11,0%	3pB	3	45 (18)	95	500	
	642	9,4	7,4	11,6	RWW	VH	10,0%	5pB	3	40 (13)	95	1140	
	642	12,0	7,7	17,6	SoYP	VH	9,0%	5pB	5	41 (13)	95	1140	
	642	10,4	9,6	11,3	FRW	VH	11,0%	5pB	3	42 (13)	95	1140	
	642	10,0	8,4	11,8	SWW	VH	11,0%	5pB	5	43 (13)	95	1140	
		9,8	7,4	12,6	SPF	VH	11,0%	5pB	3	44 (13)	95	1140	
Lam et al. [45]	2.652	9,5	7,8	11,5	D	VH	12,0%	5pB	50	38	185	1110	R-QS; SA (alle Serien) rd. 40%; BV inkl. → k. CDA → U. der f <sub>v</sub> ; k. COV → A: CoV=12% → zur Ermittlung MW auf Basis von Median! (f <sub>v</sub> ~2pLND)
	2.652	7,9	6,4	9,5	Hf	VH	12,0%	5pB	50	38	185	1110	
	2.652	7,7	6,3	9,3	SPF	VH	12,0%	5pB	50	38	185	1110	
Korin [41]	1.808	9,2	8,2	10,3	P(S)	VH	12,0%	3pB	4	45 (19)	95	450	I-QS (eingeschnitten); A: nur SB (da tw. Werte ausgeschlossen)
	1.808	10,0	8,6	11,5	LpP(C)	VH	12,0%	3pB	4	45 (19)	95	450	
	1.808	8,9	4,3	15,8	SPF(C)	VH	12,0%	3pB	5	45 (19)	95	450	
	1.808	9,1	6,0	13,1	SPF(C)	VH	12,0%	3pB	5	45 (19)	95	450	
	1.808	8,1	7,2	9,1	S(Y)	VH	12,0%	3pB	4	45 (19)	95	450	

Tab. 5.2 Zusammenfassung der gesammelten Daten aus der Literaturrecherche, Teil 1/4



Referenz	A <sub>s,korr</sub>	f <sub>v,mean,12</sub>	f <sub>v,05,12</sub>	f <sub>v,95,12</sub>	Holzart		u	VA	n	b	h	l <sub>span</sub>	Anmerkung
[-]	[mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]		[%]	[-]	[#]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]
Breitinger et al. [9]	4.098	8,3	5,5	12,0	RP	VH	12,0%	5pB	80	35	70	840	R-QS; SV und BV → nicht in Auswertung unterschieden, aber BV relativ gleichmäßig verteilt
	5.269	7,8	5,2	11,0	RP	VH	12,0%	5pB	80	35	90	1080	
	8.196	7,0	4,8	9,8	RP	VH	12,0%	5pB	80	35	140	1680	
	16.977	5,9	3,9	8,5	RP	VH	12,0%	5pB	80	35	290	3480	
	4.098	9,4	6,9	12,4	RP	VH	12,0%	5pB	80	35	70	840	
	5.269	8,9	6,3	12,1	RP	VH	12,0%	5pB	80	35	90	1080	
	8.196	8,3	6,1	11,0	RP	VH	12,0%	5pB	80	35	140	1680	
	16.977	6,5	4,6	8,8	RP	VH	12,0%	5pB	80	35	290	3480	
	4.098	11,6	8,8	14,8	RP	VH	12,0%	5pB	80	35	70	840	
	5.269	10,4	7,9	13,3	RP	VH	12,0%	5pB	80	35	90	1080	
	8.196	10,0	7,7	12,6	RP	VH	12,0%	5pB	80	35	140	1680	
	16.977	7,6	5,9	9,6	RP	VH	12,0%	5pB	80	35	290	3480	
	5.269	8,8	5,6	13,0	RP	VH	12,0%	5pB	80	45	70	840	
	6.774	8,1	5,6	11,1	RP	VH	12,0%	5pB	80	45	90	1080	
	10.538	7,2	4,5	10,8	RP	VH	12,0%	5pB	80	45	140	1680	
21.828	6,2	4,3	8,5	RP	VH	12,0%	5pB	80	45	290	3480		
10.538	8,7	6,4	11,5	RP	VH	12,0%	5pB	80	45	140	1680		
10.538	9,7	7,5	12,3	RP	VH	12,0%	5pB	80	45	140	1680		
Keenan et al. [37]	k. A.	8,1	7,0	9,2	WS	VH	8,0%	3pB	6	25	25	100	R-QS; komb. AB; verstärkt mit white elm; tang. JRL; 91/108 SV in Serie A ; alle Daten berücksichtigt → U. der f <sub>v</sub> !
		7,3	5,9	8,8	WS	VH	8,0%	3pB	6	50	25	100	
		6,3	5,0	7,8	WS	VH	8,0%	3pB	6	75	25	100	
		8,6	7,1	10,2	WS	VH	8,0%	3pB	6	25	50	200	
		7,9	5,9	10,2	WS	VH	8,0%	3pB	6	50	50	200	
		6,6	5,5	7,9	WS	VH	8,0%	3pB	6	75	50	200	
		8,2	7,5	9,0	WS	VH	8,0%	3pB	6	25	75	300	
		7,7	6,0	9,7	WS	VH	8,0%	3pB	6	50	75	300	
6,6	5,7	7,5	WS	VH	8,0%	3pB	6	75	75	300			
Keenan et al. [37]	k. A.	8,2	7,4	9,0	WS	VH	8,0%	3pB	6	25	25	100	R-QS; komb. AB; verstärkt mit white elm; rad. JRL; 91/108 SV in Serie A ; alle Daten berücksichtigt → U. der f <sub>v</sub> !
		8,1	7,0	9,4	WS	VH	8,0%	3pB	6	50	25	100	
		6,2	4,7	8,1	WS	VH	8,0%	3pB	6	75	25	100	
		9,2	8,3	10,1	WS	VH	8,0%	3pB	6	25	50	200	
		8,6	7,2	10,2	WS	VH	8,0%	3pB	6	50	50	200	
		6,6	5,2	8,3	WS	VH	8,0%	3pB	6	75	50	200	
		9,1	7,7	10,6	WS	VH	8,0%	3pB	6	25	75	300	
		8,6	7,9	9,4	WS	VH	8,0%	3pB	6	50	75	300	
6,8	5,5	8,3	WS	VH	8,0%	3pB	6	75	75	300			
Klöck [39]	91.102	5,6	4,6	6,8	F	BSH	12,0%	4pB	30	140	456	3048	R-QS, komb. AB (C35/C24), BSH ohne KZV; MUF; CDA; Daten rückgerechnet von Gumbel-Vert. auf 2pLND
Longworth [46]	3.681	8,5	7,0	10,1	D	BSH	10,7%	4pB	25	76	114	699	R-QS; komb. AB; BSH ohne KZV; tlw. BV → Werte nicht inkl. → tlw. somit u. SW der f <sub>v</sub>
	8.589	7,6	5,9	9,5	D	BSH	14,3%	4pB	27	76	267	1461	
	25.052	5,9	4,6	7,3	D	BSH	13,6%	4pB	26	222	267	1461	
	23.314	5,0	3,9	6,4	D	BSH	13,5%	4pB	24	76	724	3747	
	38.856	5,3	4,1	6,7	D	BSH	14,8%	4pB	28	127	724	3747	
Rammer, Soltis [75]	7.063	9,2	8,0	10,6	SoP	BSH	12,0%	5pB	20	76	279	2794	R-QS; komb. AB; nur SV → U. der f <sub>v</sub> !; Southern Pine allg. 74% SA
	49.349	6,4	5,4	7,5	SoP	BSH	10,5%	5pB	20	127	559	5588	

Tab. 5.3 Zusammenfassung der gesammelten Daten aus der Literaturrecherche, Teil 2/4

Referenz	$A_{s,korr}$	$f_{v,mean,12}$	$f_{v,05,12}$	$f_{v,95,12}$	Holzart	u	VA	n	b	h	$l_{span}$	Anmerkung	
[-]	[mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]	[%]	[-]	[#]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	
Keenan et al. [37]	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	BS	BSH	9,0%	3pB	2	20	100	300	R-QS; komb. AB; verstärkt mit Douglasie; 42/54 der Serie B SV → in Prüfkörpermitte (Neutralachse); alle Daten → u. f <sub>v</sub> !
					BS	BSH	9,0%	3pB	2	40	100	300	
					BS	BSH	9,0%	3pB	2	90	100	300	
					BS	BSH	9,0%	3pB	2	20	150	300	
					BS	BSH	9,0%	3pB	2	40	150	300	
					BS	BSH	9,0%	3pB	2	90	150	300	
					BS	BSH	9,0%	3pB	2	20	200	300	
					BS	BSH	9,0%	3pB	2	40	200	300	
					BS	BSH	9,0%	3pB	2	90	200	300	
					BS	BSH	9,0%	3pB	2	20	100	400	
					BS	BSH	9,0%	3pB	2	40	100	400	
					BS	BSH	9,0%	3pB	2	90	100	400	
					BS	BSH	9,0%	3pB	2	20	150	400	
					BS	BSH	9,0%	3pB	2	40	150	400	
					BS	BSH	9,0%	3pB	2	90	150	400	
					BS	BSH	9,0%	3pB	2	20	200	400	
					BS	BSH	9,0%	3pB	2	40	200	400	
					BS	BSH	9,0%	3pB	2	90	200	400	
					BS	BSH	9,0%	3pB	2	20	100	500	
					BS	BSH	9,0%	3pB	2	40	100	500	
					BS	BSH	9,0%	3pB	2	90	100	500	
BS	BSH	9,0%	3pB	2	20	150	500						
BS	BSH	9,0%	3pB	2	40	150	500						
BS	BSH	9,0%	3pB	2	90	150	500						
BS	BSH	9,0%	3pB	2	20	200	500						
BS	BSH	9,0%	3pB	2	40	200	500						
BS	BSH	9,0%	3pB	2	90	200	500						
13.112	5,0	3,8	6,5	SPF	BSH	9,0%	3pB	10	76	200	800	R-QS; komb. AB; 29/30 SV; nur SV in Daten → U. f <sub>v</sub>	
20.449	5,4	4,7	6,2	SPF	BSH	9,0%	3pB	10	76	400	1600		
34.171	5,6	5,2	6,1	SPF	BSH	9,0%	3pB	10	127	400	1600		
Keenan, Quaile [38]	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	D	VH	12,0%	3pB	2	25	25	102	R-QS; komb. AB; verstärkt mit Shagbark hickory; rad. JRL; gerund. Krafteinleitungsfläche - Längena: 10 mm; f <sub>v</sub> aus dem Diagramm herausgelesen!
					D	VH	12,0%	3pB	2	25	51	203	
					D	VH	12,0%	3pB	2	51	25	102	
					D	VH	12,0%	3pB	2	25	76	305	
					D	VH	12,0%	3pB	2	76	25	102	
					D	VH	12,0%	3pB	2	51	51	203	
					D	VH	12,0%	3pB	2	51	76	305	
					D	VH	12,0%	3pB	2	76	51	203	
					D	VH	12,0%	3pB	2	76	76	305	
					D	VH	12,0%	3pB	2	25	25	102	
					D	VH	12,0%	3pB	2	25	51	203	
					D	VH	12,0%	3pB	2	51	25	102	
					D	VH	12,0%	3pB	2	25	76	305	
					D	VH	12,0%	3pB	2	76	25	102	
					D	VH	12,0%	3pB	2	51	51	203	
					D	VH	12,0%	3pB	2	51	76	305	
D	VH	12,0%	3pB	2	76	51	203						
D	VH	12,0%	3pB	2	76	76	305						

Tab. 5.4 Zusammenfassung der gesammelten Daten aus der Literaturrecherche, Teil 3/4

Referenz	A <sub>s,korr</sub>	f <sub>v,mean,12</sub>	f <sub>v,05,12</sub>	f <sub>v,95,12</sub>	Holzart		u	VA	n	b	h	l <sub>span</sub>	Anmerkung
[-]	[mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]		[%]	[-]	[#]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]
Rammer, Soltis [75]	11.233	6,7	6,0	7,5	D	BSH	11,3%	5pB	20	79	305	3048	R-QS; komb. AB; nur SV → U. der f <sub>v</sub> ; Douglasie allg. 89% SA
	13.013	6,1	5,1	7,2	D	BSH	10,1%	5pB	20	111	292	2921	
	63.297	5,2	4,5	6,0	D	BSH	11,3%	5pB	20	130	610	6096	
Rammer, Soltis [75]	556	9,6	8,2	11,2	D	BSH	10,8%	5pB	26	38	140	1397	R-QS; hom. AB; nur SV → U. der f <sub>v</sub> ; Douglasie allg. 89% SA
	2.415	8,5	7,5	9,7	D	BSH	12,0%	5pB	14	64	165	1651	
	13.013	6,1	5,2	7,0	D	BSH	9,7%	5pB	15	111	292	2921	
Schickhofer [81]	81.897	3,5	2,7	4,5	F	BSH	12,0%	4pB	5	220 (100)	608 (352)	3040	I-QS; hom.; GL28h; nur SV; f <sub>v</sub> am Ort des Versagens
	24.025	4,4	3,4	5,5	F	BSH	12,0%	3pB	6	150 (100)	320 (192)	1600	
	81.897	3,9	3,0	5,0	F	BSH	12,0%	4pB	6	220 (100)	608 (352)	3040	
	81.897	3,7	2,9	4,6	F	BSH	12,0%	4pB	7	220 (100)	608 (352)	3040	
	81.897	4,4	3,7	5,1	F	BSH	12,0%	4pB	11	220 (100)	608 (352)	3040	I-QS; hom.; GL24h; nur SV; f <sub>v</sub> am Ort des Versagens
	81.897	4,1	3,8	4,4	F	BSH	12,0%	4pB	11	220 (100)	608 (352)	3040	
	81.897	3,5	2,9	4,3	F	BSH	12,0%	4pB	5	220 (100)	608 (352)	3040	
	16.525	5,6	4,1	7,6	F	BSH	12,0%	8pB	9	150 (100)	320 (192)	3600	
	42.642	3,6	k. A.	k. A.	F	BSH	12,0%	3pB	3	100	592 (352)	2960	R-QS; komb. (Kerto-S - Biegezug/-druck); GL28k; nur SV; f <sub>v</sub> am Ort des Versagens
	42.642	4,8	k. A.	k. A.	F	BSH	12,0%	3pB	3	100	592 (352)	2960	R-QS; komb. (Robinie - Biegezug/-druck); GL28k; nur SV; f <sub>v</sub> am Ort des Versagens
81.897	4,1	3,7	4,6	F	BSH	12,0%	4pB	15	220 (100)	608 (352)	3040	I-QS; hom.; GL32h; nur SV; f <sub>v</sub> am Ort des Versagens	
81.897	3,8	3,2	4,6	F	BSH	12,0%	4pB	15	220 (100)	608 (352)	3040	I-QS; hom.; GL36h; nur SV; f <sub>v</sub> am Ort des Versagens	
Yeh, Williamson [91]	111.176	4,4	3,8	4,9	D	BSH	11,4%	4pB	39	171	457	3048	R-QS; 82% SV; CDA
	51.362	4,7	4,0	5,4	D	BSH	11,5%	4pB	40	79	457	3048	R-QS; 73% SV; CDA
	111.472	5,5	4,5	6,6	SoP	BSH	11,0%	4pB	42	171	454	3048	R-QS; 62% SV; CDA
	51.499	5,0	4,3	5,8	SoP	BSH	10,3%	4pB	40	79	454	3048	R-QS; 92% SV; CDA
	69.963	5,1	4,0	6,4	SPF	BSH	14,5%	4pB	40	105	429	3048	R-QS; 43% SV; CDA
Rammer [74]	843	10,0	8,7	11,4	D	BSH	12,0%	5pB	9	152	130	650	R-QS; liegend; Auflager- u. Lasteinleitungsplatten aus Grafik über Verhältnisse zu h entnommen (geschätzt); nur SV berücksichtigt → u. f <sub>v</sub> !
	843	7,7	6,5	9,0	D	BSH	12,0%	5pB	18	130	152	760	R-QS; stehend; Auflager- u. Lasteinleitungsplatten aus Grafik über Verhältnisse zu d entnommen (geschätzt); nur SV → u. f <sub>v</sub> !
	1.691	6,2	4,8	7,8	D	BSH	12,0%	5pB	18	130	305	1525	
	2.323	5,8	4,7	7,0	D	BSH	12,0%	5pB	19	130	419	2095	
	3.171	4,8	3,8	6,1	D	BSH	12,0%	5pB	19	130	572	2860	
	4.225	4,6	3,9	5,4	D	BSH	12,0%	5pB	18	130	762	3810	
Foschi, Barrett [22]	7.513	8,8	7,3	10,5	D	BSH	12,0%	3pB	30	76	114	457	R-QS; komb. AB; von insgesamt 25/30 SV; nur SV in Daten → U. f <sub>v</sub>
	17.531	7,1	5,5	8,9	D	BSH	12,0%	3pB	30	76	267	1067	
	51.133	5,6	4,4	7,0	D	BSH	12,0%	3pB	30	222	267	1067	
	47.585	4,7	3,7	5,9	D	BSH	12,0%	3pB	30	76	724	2896	
	79.308	4,9	3,8	6,2	D	BSH	12,0%	3pB	30	127	724	2896	

Tab. 5.5 Zusammenfassung der gesammelten Daten aus der Literaturrecherche, Teil 4/4

**Abkürzungen Allg.:** Art der Versuchskonfiguration [VA]; Vollholz [VH]; Brettschichtholz [BSH]; keine Angaben [k. A.]; Klammerwerte bei den Abmessungen entspricht den Abmessungen der Stege

**Abkürzungen für Holzarten:** Scots Pine [ScP]; Fichte [F]; Douglasie [D]; Engelmann Spruce [ES]; Southern Pine [SoP]; Russian White Wood [RWW]; Southern Yellow Pine [SoYP]; Finish Red Wood [FRW]; Swedish White Wood [SWW]; Spruce Pine Fir [SPF]; Hem-fir [Hf]; Pine (Sweden) [P(S)]; Lodge pole Pine (Canada) [LpP(C)]; Spruce Pine Fir (Canada) [SPF(C)]; Spruce (Yugoslavia) [S(Y)]; Radiata Pine [RP]; white spruce [WS]; black spruce [BS]

**Abkürzungen der Anmerkungen:** I-Querschnitt [I-QS]; Rechteck-Querschnitt [R-QS]; Biegeversagen [BV]; Schubversagen [SV]; censored data analysis [CDA]; Schätzwert [SW]; Schubfestigkeit [ $f_v$ ]; Biegeanteil [BA]; Schubanteil [SA]; Variationskoeffizient [COV]; Mittelwert [MW]; Annahme [A.]; Aufbau [AB]; Unterschätzung [U]; Keilzinkenverbindung [KZV]; Jahrringlage [JRL]; homogener Aufbau [hom. AB]; kombinierter Aufbau [komb. AB]; radial [rad]; tangential [tang]; teilweise [tlw]; unterer [u.]; keine [k.]

### Analyse der Daten aus der Literaturrecherche hinsichtlich des Größeneinflusses

In diesem Abschnitt gilt es, den Größeneffekt anhand von Beziehungen der Schubfestigkeit vs. definierter Geometrien (Längenmaße, Flächen, Volumina) unter Verwendung der Ergebnisse aus der Literatur zu analysieren. Da die Statistiken der Versuchsserien aus der Literatur auf verschiedene Prüfumfängen basieren werden diese (Mittelwerte, 5%- und 95%-Quantilwerte) in der Ermittlung von repräsentativen Ausgleichsfunktionen gemäß dem Serenumfang gewichtet. Dies geschieht unter Verwendung der Methode der „Kleinsten Fehlerquadrate“, unter Mitwirkung der gewichteten Residuen. Als Ausgleichsfunktion wurde gemäß der Weibull Theorie (Spröddbruch Theorie) [95] eine Potenzfunktion gewählt.

In der Abb. 5.1 sieht man im Hintergrund (graue Einzeldaten) die Statistiken der recherchierten Daten. Als punktierte Linie wird die gewichtete Funktion auf dem 95%-Niveau dargestellt und strichliert die gewichtete Funktion auf dem 5%-Niveau. Die durchgezogene Funktion entspricht der gewichteten Mittelwertfunktion einerseits für das Voll- (VH) bzw. das Brettschichtholz (BSH). Der Verlauf der Funktionen lässt erahnen, dass diese sich im späteren Verlauf annähern. Der Grund dafür ist die geringer werdende Streuung in den Schubfestigkeiten mit zunehmend beanspruchter Schubfläche. Hier muss noch erwähnt werden, dass die unterschiedlichen Datenanzahl der Niveaus auch ein Abweichen der Funktionsverläufe zueinander bewirkt.

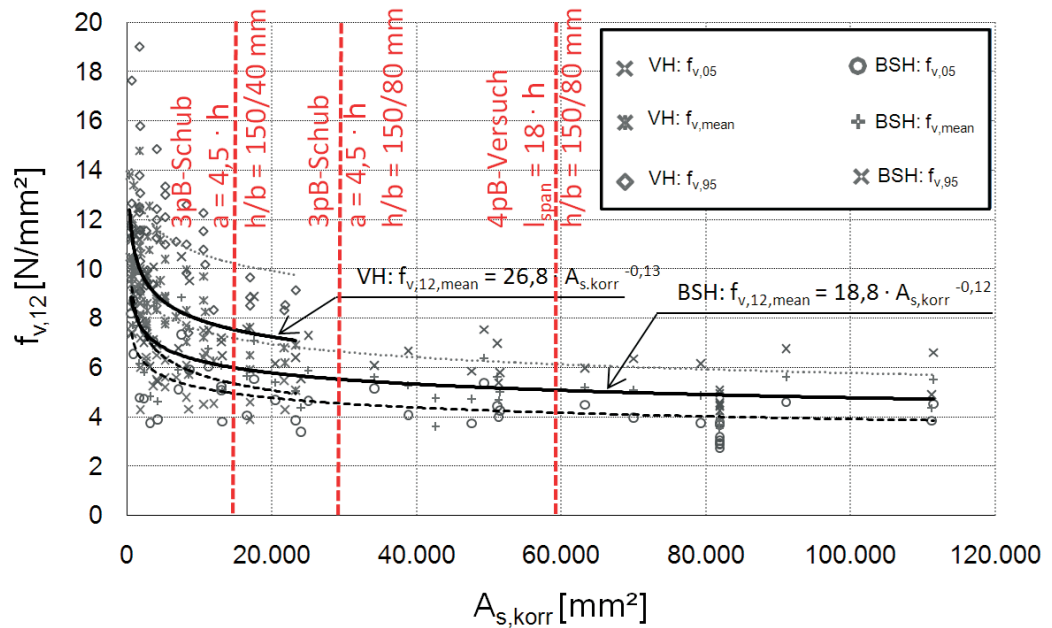


Abb. 5.1 Beziehung Schubfestigkeit  $f_{v,12}$  (12% Holzfeuchte) vs. korrigierte Schubfläche  $A_{s,korr}$

Vertikal sind noch drei einzelne Referenzquerschnitte eingezeichnet. Die Flächen ( $A_{s,korr}$ ) von den 3-Punkt-Biegeversuchen stammen aus den Prüfkongfigurationen, welche in dieser Diplomarbeit erarbeitet wurden (mit  $a = 4,5 \cdot h_{pr}$ ). Der 4-Punkt-Biegeversuch wird aus der ÖNORM EN 408 [67] entnommen. Als Referenzquerschnitt wird ein  $h / b = 150 / 80$  mm mit der Trägerlänge  $l = 18 \cdot h$  herangezogen. Die allg. Berechnung der korrigierten Schubflächen wird im Abschnitt 3.1.1.1 gezeigt.

Interessant ist hier noch zu erkennen, dass beide Funktionsverläufe (Vollholz und Brett-schichtholz) die fast gleiche Potenzzahl, sprich die gleiche Abminderung der Schubfestigkeit mit zunehmend beanspruchter Schubfläche aufweisen.

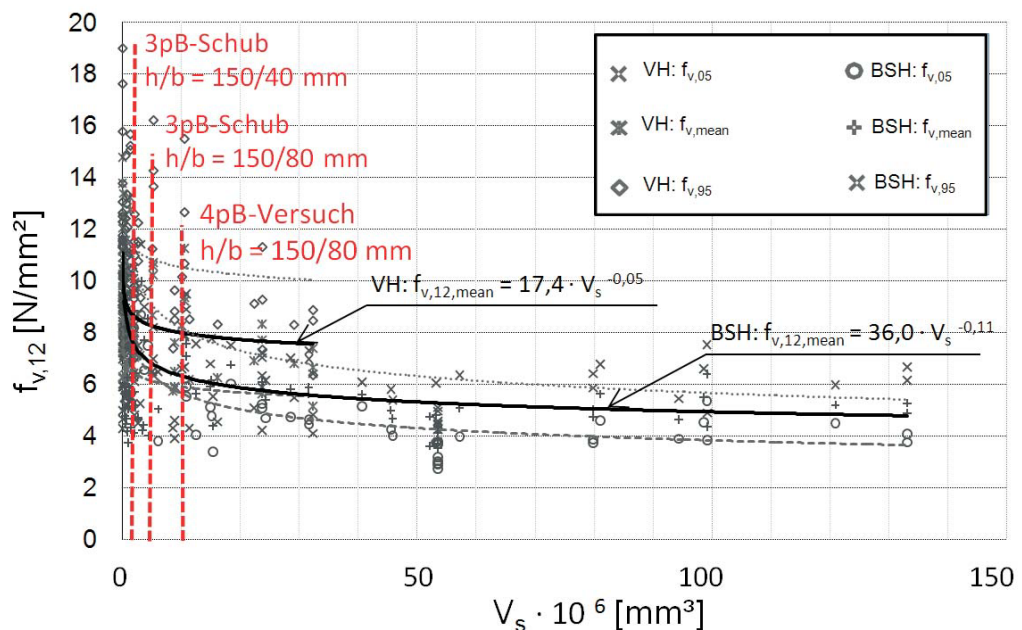


Abb. 5.2 Beziehung Schubfestigkeit (12% Holzfeuchte) vs. beanspruchtem Schubvolumen

In bisherigen Literaturquellen wird oft von der Beziehung zwischen Schubfestigkeit und dem beanspruchten Volumen geschrieben. Für das Volumen wird die nicht korrigierte Schubfläche ( $A_s = a \cdot b_{pr}$ ) mit der Trägerhöhe multipliziert. Auch sind in dieser Abb. 5.2 die nicht parallel geführten Funktionsverläufe auffallend, die aber aus der unterschiedlichen Anzahl der verwendeten Prüfserien in den Ermittlung der Ausgleichsfunktionen der unterschiedlichen Statistiken hervorgerufen wurde. Wiederum sind die drei Referenzquerschnitte eingezeichnet um eine Abschätzung der Schubfestigkeit in Abhängigkeit des beanspruchten Volumens für das Voll- und Brettschichtholz zu gewinnen.

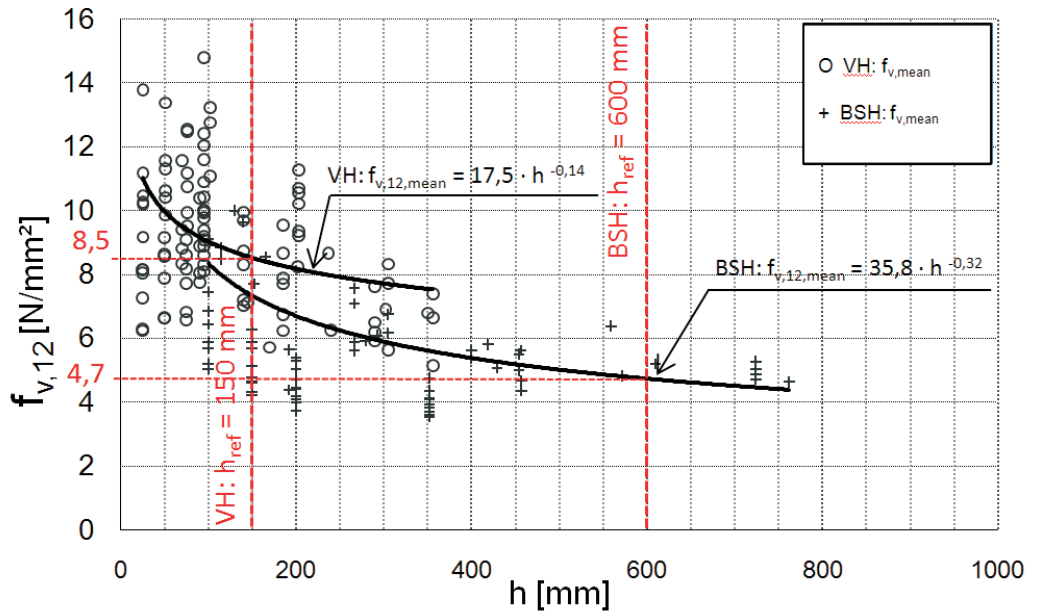


Abb. 5.3 Beziehung Schubfestigkeit (12% Holzfeuchte) vs. Trägerhöhe

In der Abb. 5.3 ist die Beziehung zwischen der Schubfestigkeit und der Trägerhöhe dargestellt. In diesem Diagramm werden nur mehr die gewichteten Funktionsverläufe der Mittelwerte gezeigt. Als Referenzhöhen werden fürs Vollholz  $h = 150 \text{ mm}$  und fürs Brett-schichtholz  $h = 600 \text{ mm}$  eingezeichnet.

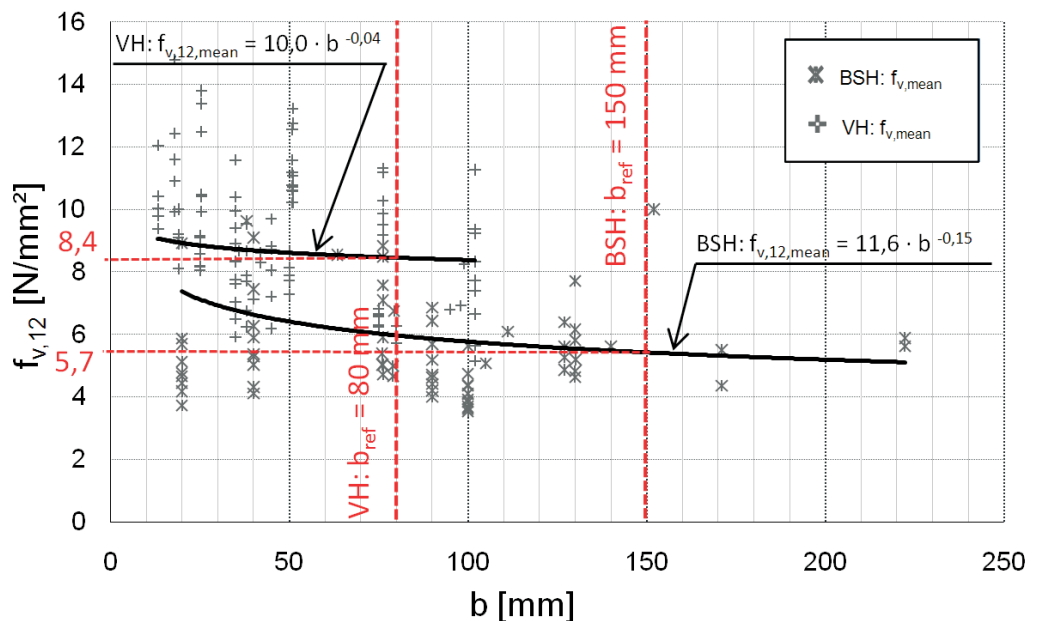


Abb. 5.4 Beziehung Schubfestigkeit (12% Holzfeuchte) vs. Trägerbreite

Als letzte Beziehung wird die Schubfestigkeit der Trägerbreite gegenübergestellt (Abb. 5.4). Als Referenzbreiten werden für Vollholzträger  $b = 80$  mm und für Brett-schichtholzträger  $b = 150$  mm gezeigt. Hier ist zu erkennen, dass die Funktionsverläufe der beide Holzaufbauten (VH u. BSH) eine geringe Steigung haben. Dies ist entweder auf den untergeordneten Einfluss der Breite auf die Schubfestigkeit oder auf die nicht zusammenhängenden Literaturdaten zurück zu führen. Deshalb wird im Anschluss an diese Arbeit versucht solche Unsicherheiten anhand des im Kapitel 4 (Hauptversuche) vorgeschlagenen Projekts abzuklären.

Weiters bestätigt sich die Wahl der Referenzabmessungen. Der Vergleich zwischen der Abb. 5.3 und der Abb. 5.4 zeigt, dass die Schubfestigkeitswerte bei den besagten Referenzstellen nahezu identisch sind. Hier ist noch zu erwähnen, dass eine genaue Gegenüberstellung nur bei der Verwendung einer gleichen Grundgesamtheit möglich wäre.

Allgemein ist bei den vier gezeigten Diagrammen zu erkennen, dass die mittlere Schubfestigkeit  $f_{v,mean}$  der Vollholzträger höher, als die der Brett-schichtholz-Träger ist.

Um den Größeneffekt in Bezug auf die Schubfestigkeit zu beschreiben, ist die Gegenüberstellung der Schubfestigkeit mit der Schubflächen (Abb. 5.1) am geeignetsten, da die herangezogene Ebene (Schubfläche) genau dem Bruchbereich entspricht und weil bei dieser Gegenüberstellung die Ausgleichsfunktionen der Datenpunkte sehr geringe Variationen haben.

Problematisch hingegen ist die Handhabung im baupraktischen Bereich, da die Festlegung der Schubflächen einiger Kenntnisse über das Trägersystem bedarf. Die Schubfläche ist abhängig von der Art der Belastung (Querkraftverlauf), der Querschnittsform, der Prüfkfiguration und ob Verstärkungsmaßnahmen vorhanden sind. Um diese Einflussparameter für den baupraktischen Bereich abzudecken, bedarf es noch weitere Überlegungen im Hinblick auf die Vereinfachungen der Anwendbarkeit.





Als geeignete Methode zur Einleitung der hohen Prüfkräfte konnte die Vollgewinde-schrauben als Verstärkungen positiv bewertet werden. Bei den Vorversuchen war kein einziges Versagen auf Querdruck zu beobachten.

Einen kritischen Bereich stellt noch das Prüfen von Proben der unteren Festigkeitsklassen dar. Es hat sich gezeigt, dass sich bei diesen Materialgütern zwar eine beträchtliche geringe Biegefestigkeit, aber zum Teil sogar aufgrund des Verdübelungseffekt erhöhte Schubfestigkeiten erwartet werden können und somit eine erhöhte Wahrscheinlichkeit eines frühzeitigen Versagens auf Biegung besteht. Um dem entgegen zu wirken, muss auf die richtige Wahl der Gurtlamellen, sprich festigkeitsklassen-konformen E-Modul bei gleichzeitig ausreichend hoher Zugfestigkeit, geachtet werden.

## 6.2 Fazit der Literaturrecherche im Bezug auf den Größeneffekt auf die Schubfestigkeit

Auf Basis der durchgeführten Literaturrecherche kann festgestellt werden, dass die Abhängigkeit der Schubfestigkeit vom beanspruchten Volumen bzw. der beanspruchten Schubfläche als allg. anerkannt gilt. Hierbei zeigt sich eine Abnahme der Schubfestigkeit mit steigender Schubfläche bzw. steigendem beanspruchten Volumen. Auch die Beeinflussbarkeit der Schubfestigkeit z.B. durch die Holzfeuchte, die Holzart, die Temperatur, die Prüfkonfiguration, die Lage der Jahrringe im Prüfkörper, die Anzahl der Holzlamellen bei einem BSH-Träger, usw. konnte durch die Literaturquellen belegt werden.

Um den Größeneffekt für Vollholzträger in Beziehung mit der Schubfestigkeit zu beschreiben, ist die Beziehung zwischen der Schubfläche und der Schubfestigkeit als geeignet anzusehen. Als Schubfläche wird hier ausschließlich jene Fläche, welche theoretisch frei von Querdruckeinflüssen angesehen wird, betrachtet.

## 6.3 Ausblick

Um einen Vergleichswert mit den aus der Literatur gewonnen Ergebnissen zu bekommen, wird am Institut für Holzbau und Holztechnologie der TU-Graz die hier vorgeschlagene Prüfkonfiguration an unterschiedlichen Festigkeitsklassen und Querschnittsdimensionen im Anschluss an diese Arbeit verifiziert. Die Ergebnisse dienen zudem der Abklärung der Schubfestigkeit von Vollholz der Holzart Fichte (*Picea abies*) sowie des Größeneffektes.

---

## Literaturverzeichnis

- [1] Aicher S, Ohnesorge D (2009) Shear strength of glued laminated timber made from European beech timber. *European Journal of Wood and Wood Products*, Springer-Verlag, ISSN 0018-3768 (Print) 1436-736X (Online), 12 p.
- [2] Aicher S, Reinhardt H W (1993) Einfluß der Bauteilgröße in der linearen und nichtlinearen (Holz-) Bruchmechanik. *European Journal of Wood and Wood Products*, 3(51):215-220
- [3] ASTM D 143 (2000) Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber
- [4] ASTM D 245 (2002) Standard Practice for Establishing Structural Grades and Related Allowable Properties for Visually Graded Lumber
- [5] ASTM D 2555 (1998) Standard Test Methods for Establishing Clear Wood Strength Values
- [6] ASTM D 3737 (2005) Standard Practice for Establishing Allowable Properties for Structural Glued Laminated Timber (Glulam)
- [7] Barrett J D, Foschi R O (1977) Shear strength of uniformly loaded dimension lumber. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 4(1):86-95
- [8] Brandner R (2009) Brettschichtholz – Modellbildung. Präsentation, LV 208.472 Klebetechnologie und Holzwerkstoffe, Technischen Universität Graz, Institut Holzbau und Holztechnologie
- [9] Breitingner et al. (1994) In-grade wood beam-shear strength. In: *Proc. of Pacific Timber Engineering Conference*, (1):642-645

- [10] Colling F (1986) Einfluss des Volumens und der Spannungsverteilung auf die Festigkeit eines Rechteckträgers. *European Journal of Wood and Wood Products*, 5(44):179-183
- [11] Colling F (1986) Einfluss des Volumens und der Spannungsverteilung auf die Festigkeit eines Rechteckträgers: Volligkeitsbeiwerte, Anwendungsbeispiele. *European Journal of Wood and Wood Products*, 4(44):121-125
- [12] Dröger G, Stoy K H (1981) Grundzüge des neuzeitlichen Holzbaues – Konstruktionselemente – Berechnung und Ausführung. Band 1, Verlag von Wilhelm ernst & Sohn, München, ISBN-3-433-00596-6, p. 47
- [13] DIN 1052 (2004) Entwurf Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken – Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau
- [14] DIN 52185 (1976) Prüfung von Holz – Bestimmung der Druckfestigkeit parallel zur Faser
- [15] DIN 52186 (1978) Prüfung von Holz – Biegeversuch
- [16] DIN 52187 (1979) Prüfung von Holz – Bestimmung der Scherfestigkeit in Faserrichtung
- [17] DIN 52188 (1979) Prüfung von Holz – Bestimmung der Zugfestigkeit parallel zur Faser
- [18] DIN EN 1995 (2004) Eurocode 5 – Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1 Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau
- [19] Ehlbeck J, Kürth J (1992) Einfluß des querzugbeanspruchten Volumens auf die Tragfähigkeit gekrümmter Träger und Satteldachträger aus Brettschichtholz. *European Journal of Wood and Wood Products*, 1(50):33-40
- [20] Eisner A, Kastner E (2009) Die erweiterte Längsschwingungsmessung. Institut für Holzbau und Holztechnologie, Technische Universität Graz, 35 p.
- [21] enBR (2007) eurocodenahe Bemessungsrichtlinie – Holzbauwerke – Entwurf, Berechnung und Bemessung. österreichische Richtlinien
- [22] Foschi R, Barrett J (1976) Longitudinal shear strength of Douglas-fir. *Can. J. Civil Eng.*, 198-208 p.
- [23] Gehri E (2009) Eingeklebte Anker – Anforderungen und Umsetzungen. *Proceeding*, 15. Internationales Holzbau-Forum, Band 1, Fraunhofer Institut, ISBN 978-3-8167-8187-5, 14 p.

- [24] Gerhards C C (1980) Effect of Moisture Content and Temperature on the Mechanical Properties of Wood – An Analysis of Immediate Effects. *Wood and Fiber*, 14(1):4-36
- [25] <http://de.wikipedia.org/wiki/Anisotropie>  
Anisotropie (26.07.2010)
- [26] <http://de.wikipedia.org/wiki/Festigkeit>  
Festigkeit (26.07.2010)
- [27] <http://de.wikipedia.org/wiki/Größeneinfluss>  
Größeneinfluss (26.07.2010)
- [28] <http://de.wikipedia.org/wiki/Isotropie>  
Isotropie (26.07.2010)
- [29] <http://de.wikipedia.org/wiki/Orthotropie>  
Orthotropie (26.07.2010)
- [30] [http://de.wikipedia.org/wiki/Spannung\\_\(Mechanik\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Spannung_(Mechanik))  
Spannung (Mechanik) (26.07.2010)
- [31] [http://portal.tugraz.at/portal/page/portal/TU\\_Graz/Einrichtungen/Institute/Homepages/i2080/forschung/laboreinrichtung](http://portal.tugraz.at/portal/page/portal/TU_Graz/Einrichtungen/Institute/Homepages/i2080/forschung/laboreinrichtung)  
Laboreinrichtung des Lignum Test Center der Technischen Universität Graz (20.09.2010)
- [32] <http://www.wood.teknos.de>  
Endbeschichtungen, Aquatop 2600 (01.12.2010)
- [33] <http://www.linotech.se>  
Imprägnierung, Linogard Underhållsolja, (01.12.2010)
- [34] Javernig H (1997) Untersuchungen über die Verklebung von Robinie bei höheren Holzfeuchten, Universität Hamburg, Fachbereich Biologie, 123 p.
- [35] JCSS (2006) Joint Probabilistic Model Code. Part 3: Resistance Models, Timber. Joint Committee on Structural Safety
- [36] Keenan F J (1974) Shear strength of wood beams. *Forest Products Journal*, 24(9):63-70
- [37] Keenan F J, Kryla J, Kyokong B (1985) Shear strength of spruce glued-laminated timber beams. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 12:66-672
- [38] Keenan F J, Quaile A T (1978) Shear strength of small composite wood beams. *Wood Science and Technology*, Vol. 11, No 1, 9 p.

- [39] Klöck W (2005) Statistical analysis of the shear strength of glued laminated timber based on full-size flexure tests. *Otto-Graf-Journal*, 16:225-243
- [40] Kollman F (1951) *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Erster Band, 2. Auflage, 887-903
- [41] Korin U (1988) Shear strength in Bending of timber. *CIB-W18A (21):6-3*, Vancouver island, Canada, 20 p.
- [42] Korin U (1996) Determination of the shear strength of timber. *Proceedings of the International Wood Engineering Conference, USA*, (2):2/91-2/95
- [43] Kretschmann D, Green D (1994) Strength properties of low moisture content southern pine. *Proceedings of the Pacific Timber Engineering Conference, Gold Coast Australia*,(2):731-736
- [44] Lackner H (2009) *Bestimmung der Schubfestigkeit von Vollholzträgern*. Masterprojekt , Technische Universität Graz, Institut für Holzbau und Holztechnologie, 59 p.
- [45] Lam F, Yee H, Barrett J D (1995) Shear strength of Canadian softwood structural lumber. *CIB-W18 (28):6-1*, Copenhagen, Denmark, 15 p.
- [46] Longworth J (1977) Longitudinal Shear Strength of Timber Beams. *Forest Products Journal*, 27(8):19-23
- [47] Madsen B (1972) Duration of load tests for wet lumber subjected to bending. *Struct. Res. Ser. Rep. No. 4*, Dept. Civ. Eng., Univ.B.C., Vancouver
- [48] Madsen B (1973) Duration of load tests for dry lumber in bending. *Forest Products Journal*, No. 2, 21-28 p.
- [49] Madsen B (1975) Duration of load tests for wood in tension perpendicular to grain. *Forest Products Journal* No. 8, 48-53 p.
- [50] Madsen B (1995) Shear Strength of Douglas Fir Timber. *CIB-W18 (28):6-2*, Copenhagen, Denmark, 37 p.
- [51] Mattheck C (1997) *Design in der Natur*. Reihe Ökologie Band 1, 3. überarbeitete und erweiterte Neuauflage, Rombach Verlag
- [52] Meadows J C Jr. (1955) Longitudinal Shear in Wood Beams. *Forest Products Journal*, 6:337-339
- [53] Mistler H L (1979) *Die Tragfähigkeit des am Endauflager unten rechtwinklig ausgeklinkten Brettschichtholzträgers*. Dissertation, Universität (TH) Karlsruhe, 112 p.

- [54] Möhler (1972) Wirksame Querkraft bei Biegeträgern. Bauen mit Holz, 303-304 p.
- [55] Möhler K, Hemmer K (1977) Verformungs- und Festigkeitsverhalten von Nadelvoll- und Brettschichtholz bei Torsionsbeanspruchung. European Journal of Wood and Wood Products, Vol. 35, No 12, 473-478
- [56] Müller M, Sretenovic A, Gindl W, Grabner M, Wimmer R, Teischinger A (2004) Effects of macro- and micro-structural variability on the shear behavior of softwood. IAWA Journal, Vol. 25(2):231-243
- [57] Neuhaus H (2009) Ingenieurholzbau: Grundlagen – Bemessung – Nachweis – Beispiele. 2. Auflage, Vieweg+Teubner, ISBN 978-3-519-15248-4
- [58] Niemz P (1993) Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe. DRW-Verlag, Leinfelden-Echterdingen, ISBN 3-87181-324-9
- [59] Ohsawa J, Yoneda Y (1978) Shear test of woods as a model of defibration. J. Jap. Wood Res. Soc., 24(4):230-236
- [60] ON DIN 4074-xx (2004) Sortierung von Nadelholz nach der Tragfähigkeit Teil 1: Nadelschnittholz, Teil 3: Apparate zur Unterstützung der visuellen Sortierung von Schnittholz Anforderungen und Prüfung, Teil 4: Nachweis der Eignung zur apparativ unterstützten Schnittholzsortierung, Teil 5: Laubschnittholz
- [61] ON EN 14081-xx (2005) Holzbauwerke – Nach Festigkeit sortiertes Bauholz für tragende Zwecke mit rechteckigem Querschnitt; Teil 1: Allgemeine Anforderungen, Teil 2: Maschinelle Sortierung, Teil 3: Zusätzliche Anforderungen, Teil 4: Einstellungen von Sortiermaschinen
- [62] Obermayr B (1998) Entwicklung einer optimierten Versuchskonfiguration zur Ermittlung der Schubfestigkeit von Brettschichtholz. Diplomarbeit, Technische Universität Graz, Institut für Stahlbau, Holzbau und Flächentragwerke, 108 p.
- [63] ÖNORM EN 338 (2003) Bauholz für tragende Zwecke – Festigkeitsklassen
- [64] ÖNORM EN 384 (2004) Bauholz für tragende Zwecke – Bestimmung charakteristischer Werte für mechanische Eigenschaften und Rohdichte
- [65] ÖNORM EN 386 (2001) Brettschichtholz – Leistungsanforderungen und Mindestanforderungen an die Herstellung
- [66] ÖNORM EN 392 (1995) Brettschichtholz – Scherprüfung der Leimfuge

- [67] ÖNORM EN 408 (2009) Holzbauwerke – Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz – Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften
- [68] ÖNORM EN 1194 (1999) Holzbauwerke, Brettschichtholz, Festigkeitsklassen und Bestimmung charakteristischer Werte
- [69] ÖNORM EN 13183-1 (2004) Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz – Teil 1 – Bestimmung durch Darrverfahren
- [70] ÖNORM prEN 338 (2009) Bauholz für tragende Zwecke – Festigkeitsklassen
- [71] ÖNORM prEN 1194 (2008) Timber structures – glued laminated timber – strength classes and determination of characteristic values
- [72] ÖNORM prEN 14080 (2009) Timber Structures – Glued laminated timber and glued solid timber
- [73] Poussa M, Tukiainen P, Ranta-Maunus A (2007) Experimental study of compression and shear strength of spruce timber. CIB W18 (4):6-2, Bled, Slovenia, 9 p.
- [74] Rammer D R (1996) Shear Strength of Glued-Laminated Timber Beams and Panels. National conference on wood transportation structures, FPL-GTR-94, USDA Forest Service, Madison, WI, 192-200
- [75] Rammer D R, Soltis L A (1994) Experimental Shear Strength of Glued-Laminated Beams. FPL-RP-527. USDA, Forest Serv., Forest Prod. Lab., Madison, WI, 38 p.
- [76] Rammer D R, Soltis L A, Lebow P K (1996) Experimental Shear Strength of unchecked Solid – Sawn Douglas-Fir. FPL-RP-553. USDA, Forest Serv., Forest Prod. Lab., Madison, WI, 20 p.
- [77] Rammer D R, McLean D I (1996) Recent research on the shear strength of wood beams. Proceedings of the International Wood Engineering Conference, (2):2/96-2/103
- [78] Riyanto S D (1996) Comparative Test Methods for Evaluating Shear Strength of Structural Lumber. Dissertation, Oregon State University, 84 p.
- [79] Salzman C (2010) Ermittlung von Querdruckkenngrößen für Brettspertholz (BSP), Masterarbeit, Technische Universität Graz, Institut für Holzbau und Holztechnologie, 198 p.



- [80] Sano E (1961) Effects of temperature on the mechanical properties of wood. J. Jap. Wood Res. Soc. 7(4):147-150
- [81] Schanz M (2007) Manuskript zur Vorlesung – Mechanik B2 – Festigkeitslehre. Institut für Baumechanik, Technische Universität Graz, 169 p.
- [82] Schickhofer G (2001) Determination of shear strength values for GLT using visual and machine graded spruce laminations. CIB W18 (34):12-6, Venice, Italy, 25 p.
- [83] Schickhofer G (2006) Holzbau, der Roh- und Werkstoff Holz. Skriptum Teil A, Institut für Holzbau und Holztechnologie, Technische Universität Graz, 549 p.
- [84] Schickhofer G (2009) Holzbau, Nachweisführungen für Konstruktionen aus Holz. Skriptum, Teil B, Institut für Holzbau und Holztechnologie, Technische Universität Graz, 403 p.
- [85] SIA 265 (2003) Holzbau
- [86] Soltis L A, Gerhardt T D (1988) Shear design of wood beams: State of the art, Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-56. Madison, 9 p.
- [87] Soltis L A, Rammer D R (1994) Shear strength of unchecked glued-laminated beams. Forest Products Journal, 44(1):51-57
- [88] Spengler T (1982) Festigkeitsverhalten von Brettschichtholz unter zweiachsiger Beanspruchung, Bericht zur Zuverlässigkeitstheorie der Bauwerke, Heft 62, Technische Universität München, 63 p.
- [89] Sundström T, Kevarinmäki A, Toratti T (2010) Shear strength of glulam beams under varying humidity conditions, School of Science and Technology, Universität Aalto, 5 p.
- [90] Sundström T (2010) Shear resistance of glulam beams under varying humidity conditions. Master Thesis, School of Science and Technology, Universität Aalto, 128 p.
- [91] Theiler M, Frangi A (2009) Flächen aus Schichten – Steifigkeitswerte und Spannungsberechnung, SAH-Tagung: "Werkstoffkombinationen – ein Mehrwert für Holz", Schweizerische Arbeitsgemeinschaft für Holzforschung SAH, (41):53-64
- [92] Yeh B, Williamson T G (2001) Evaluation of Glulam Shear Strength Using A Full-Size Four-Point Test Method. CIB W18 (34):12-2, Venice, Italy, 13 p.

- [93] Yoshihara H, Furushima T (2003) Shear strengths of wood measured by various short beam shear test methods. *Wood Science and Technology*, 37(3-4):189-197
- [94] Weibull W (1939) A statistical theory of the strength of materials. Ingeniörsvetenskapsakademiens, Handlingar Nr. 151, Royal Swedish Institute
- [95] Wimmer R (2002) Forstnahe Holzforschung: Forschung an der Schnittstelle von Wald und Holz. Präsentation auf dem K<sub>net</sub>-Fachseminar „Holzeigenschaften und Strukturhierarchien“
- [96] Z-9.1-100 (2011) Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für KERTO-Furnierschichtholz, Deutsches Institut für Bautechnik
- [97] Z-9.1-509 (2011) Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung – Holzbauschrauben Star Drive Vollgewinde, Star Drive 2-Gewinde, Star Drive, Rapid, Rapid Perfekt und Rapid Komplex für die Befestigung von Dämmsystemen
- [98] Z-9.1-543 (2007) Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung – Klebstoffe „Purbond HB“ in Verbindung mit dem Auftragssystem KEBA für Keilzinkenverbindungen von Nadelholz

## Anhang

## 8.1 Versuchsplanung für die Hauptversuche

## 8.1.1 Serie I: 40/75, C24

	Prüfkörper	Gurtlamelle
Material	Fichte C24	Fichte C24
Höhe $h_{pr}$ und $h_1$ [mm]	75	40
Breite $b_{pr}$ und $b_1$ [mm]	40	110
Länge $l$ [mm]	985	
E-Modul $E_{0,mean}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	11.000	
Zugfestigkeit $f_{t,0,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	14	
Biegefestigkeit $f_{m,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	24	
Schubfestigkeit $f_{v,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	2,5	
Variable $a$ [mm]	$4,5 \cdot h = 337,5$	

Tab. 8.1 Technische Daten des Materials der Serie I.  
Kennwerte wurden aus der ÖNORM EN 338 [63] entnommen.

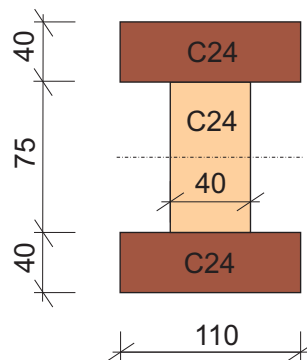


Abb. 8.1 Geometrie des Querschnitts der Versuchsreihe I

Regressionsgleichung nach Brandner [8]:

$$f_{v, \text{mean}} = -0,02 \cdot f_{t,0,l,k} + 4,5 \quad 8.1$$

$$f_{v, \text{mean}, (80/150)} = -0,02 \cdot 14,0 + 4,5 = 4,22 \text{ N/mm}^2$$

Die Berücksichtigung des Größeneffekts erfolgt auf Basis einer ersten Abschätzung mittels einer Potenzfunktion und einer Potenz von  $k_s = 0,2$ :

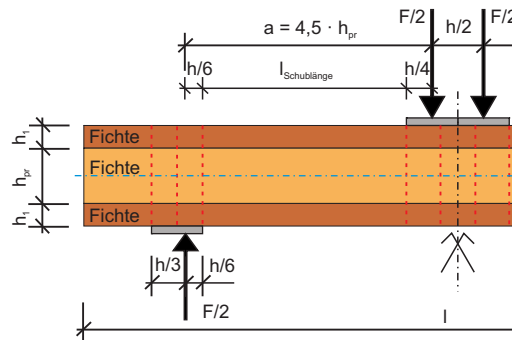


Abb. 8.2 theoretische Abmessung der Schublänge

$$f_{v, \text{mean}, (40/75)} = \left( \frac{A_{s, \text{ref}}}{A_s} \right)^{k_s} \cdot f_{v, \text{mean}, \text{ref}} = \left( \frac{81897}{\left( 337,5 - \frac{155}{6} - \frac{155}{4} \right) \cdot 40} \right)^{0,2} \cdot 4,22 \quad 8.2$$

$$f_{v, \text{mean}, (40/75)} = 6,4 \text{ N/mm}^2$$

Varianz:

$$\sigma^2 = (\text{COV} \cdot \mu)^2 \text{ mit der Annahme } \text{COV} = 20\% \quad 8.3$$

$$\sigma^2 = (0,2 \cdot 6,4)^2 = 1,638 \text{ [N/mm}^2\text{]}^2$$

Erwartungswert der auf die Normalverteilung hin transformierten logarithmischen normalverteilten Zufallsvariablen:

$$\mu_y = \ln \left[ \frac{\mu^2}{\sqrt{\mu^2 + \sigma^2}} \right] = \ln \left[ \frac{6,4^2}{\sqrt{6,4^2 + 1,638}} \right] = 1,825 \quad 8.4$$

Standardabweichung der auf die Normalverteilung hin transformierten logarithmischen normalverteilten Zufallsvariablen:

$$\sigma_y = \sqrt{\ln \left( \frac{\sigma^2}{\mu^2} + 1 \right)} = \sqrt{\ln \left( \frac{1,638}{6,4^2} + 1 \right)} = 0,198 \quad 8.5$$

Das 95%-Quantil ergibt sich mit:

$$f_{v, 95, (40/75)} = 8,6 \text{ N/mm}^2 \text{ (Berechnungsablauf siehe Abschnitt 3.1.1.2)}$$

Wertigkeit  $n_i$ :

$$n_i = \frac{E_i}{E} = \frac{11000}{11000} = 1,0 \quad 8.6$$

Der Schwerpunkt und gleichzeitig auch der Nullpunkt der Dehnungsebene bei reiner Biegung  $z_s$ :

$$z_s = 77,5 \text{ mm}$$

Weiters können das effektive Trägheitsmoment  $J_{ef}$ , die wirksame Querschnittsfläche  $A_{ef}$  und das effektive statische Moment  $S_{ef}$  bestimmt werden:

$$J_{ef} = \sum n_i \cdot J_i + \sum n_i \cdot A_i \cdot e_i^2 \quad 8.7$$

$$J_{ef} = 1,0 \cdot \frac{110 \cdot 40^3}{12} \cdot 2 + 1,0 \cdot \frac{40 \cdot 75^3}{12} + 2,0 \cdot 110 \cdot 40 \cdot 57,5^2$$

$$J_{ef} = 31674253 \text{ mm}^4 = 3,17 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$$

$$S_{ef,i} = \sum n_i \cdot A_i \cdot e_i \quad 8.8$$

$$S_{ef,Mitte} = 1,0 \cdot 40 \cdot 110 \cdot 57,5 + 1,0 \cdot 40 \cdot 37,5 \cdot 18,75 = 281125 \text{ mm}^3 = 2,81 \cdot 10^5 \text{ mm}^3$$

Für die Berechnung von Normal- und Schubspannungen können die folgenden Gleichungen verwendet werden:

$$\sigma_i = \frac{M}{E \cdot J_{ef}} \cdot e_i \cdot E_i \quad 8.9$$

$$\tau_i = \frac{V \cdot S_{ef,i}}{J_{ef} \cdot b} \quad 8.10$$

Aus der Glg. 8.10 wird nun die Querkraft ( $V$ ) ermittelt, indem man die Schubspannung mit der Schubfestigkeit gleichsetzt ( $\tau = f_{v,95,(40/75)}$ ), Glg. 8.11:

$$V = \frac{f_{v,95,(40/75)} \cdot J_{ef} \cdot b}{S_{ef,Mitte}} = \frac{8,6 \cdot 3,17 \cdot 10^7 \cdot 40}{2,81 \cdot 10^5} = 38669 \text{ N} \approx 38,7 \text{ kN} \quad 8.11$$

$$M = V \cdot a = 38669 \cdot 337,5 = 13050624 \text{ Nmm} \approx 13,1 \text{ kNm} \quad 8.12$$

Mit den bekannten Glg. 8.9 und Glg. 8.10 wird jetzt an jeder Stelle des Querschnitts die Schub- bzw. die Biegespannung bestimmt, siehe Abb. 8.3.

$E_{0,mean}$	$z_i$	$\sigma_m$	$\tau$
[N/mm <sup>2</sup> ]	[mm]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
11000	77,5	-31,9	0,0
	37,5	-15,5	2,8
	37,5	-15,5	7,7
	0	0,0	8,6
	0	0,0	8,6
	-37,5	15,5	7,7
	-37,5	15,5	2,8
	-77,5	31,9	0,0

Tab. 8.2 Theoretische Spannungsverteilung der Versuchsreihe I

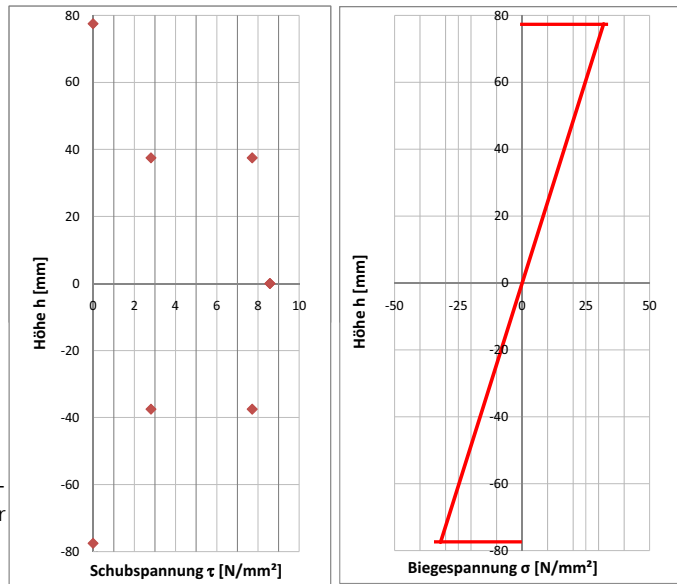


Abb. 8.3 Theoretische Auswertung der Versuchsreihe I.

### 8.1.2 Serie II: 40/150, C24

	Prüfkörper	Gurtlamelle
Material	Fichte C24	Fichte C24
Höhe $h_{pr}$ und $h_1$ [mm]	150	80
Breite $b_{pr}$ und $b_1$ [mm]	40	110
Länge $l$ [mm]	1970	
E-Modul $E_{0,mean}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	11.000	
Zugfestigkeit $f_{t,0,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	14	
Biegefestigkeit $f_{m,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	24	
Schubfestigkeit $f_{v,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	2,5	
Variable $a$ [mm]	$4,5 \cdot h = 675,0$	

Tab. 8.3 Technische Kennwerte des Materials der Serie II.  
Festigkeiten wurden aus der ÖNORM EN 338 [63] entnommen.

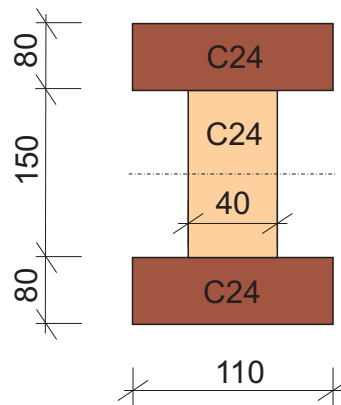


Abb. 8.4 Geometrie des Querschnitts der Versuchsreihe II

Regressionsgleichung nach Brandner [8]:

$$f_{v,mean} = -0,02 \cdot f_{t,0,l,k} + 4,5 \quad 8.13$$

$$f_{v,mean,(80/150)} = -0,02 \cdot 14,0 + 4,5 = 4,22 \text{ N/mm}^2$$

Die Berücksichtigung des Größeneffekts erfolgt auf Basis einer ersten Abschätzung mittels einer Potenzfunktion und einer Potenz von  $k_s = 0,2$ :

$$f_{v,mean,(40/150)} = \left( \frac{A_{s,ref}}{A_s} \right)^{k_s} \cdot f_{v,mean,ref} = \left( \frac{81897}{\left(675 - \frac{310}{6} - \frac{310}{4}\right) \cdot 40} \right)^{0,2} \cdot 4,22 \quad 8.14$$

$$f_{v,mean,(40/150)} = 5,5 \text{ N/mm}^2$$

Varianz:

$$\sigma^2 = (\text{COV} \cdot \mu)^2 \quad \text{mit der Annahme } \text{COV} = 20\% \quad 8.15$$

$$\sigma^2 = (0,2 \cdot 5,5)^2 = 1,21 \text{ [N/mm}^2\text{]}^2$$

Erwartungswert der auf die Normalverteilung hin transformierten logarithmischen normalverteilten Zufallsvariablen:

$$\mu_y = \ln \left[ \frac{\mu^2}{\sqrt{\mu^2 + \sigma^2}} \right] = \ln \left[ \frac{5,5^2}{\sqrt{5,5^2 + 1,21}} \right] = 1,685 \quad 8.16$$

Standardabweichung der auf die Normalverteilung hin transformierten logarithmischen normalverteilten Zufallsvariablen:

$$\sigma_y = \sqrt{\ln \left( \frac{\sigma^2}{\mu^2} + 1 \right)} = \sqrt{\ln \left( \frac{1,21}{5,5^2} + 1 \right)} = 0,198 \quad 8.17$$

Das 95%-Quantil ergibt sich mit:

$$f_{v,95,(40/150)} = 7,5 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{Berechnungsablauf siehe Abschnitt 3.1.1.2})$$

Wertigkeit  $n_i$ :

$$n_i = \frac{E_i}{E} = \frac{11000}{11000} = 1,0 \quad 8.18$$

Der Schwerpunkt und gleichzeitig auch der Nullpunkt der Dehnungsebene bei reiner Biegung  $z_s$ :

$$z_s = 155,0 \text{ mm}$$

Weiters können das effektive Trägheitsmoment  $J_{\text{ef}}$ , die wirksame Querschnittsfläche  $A_{\text{ef}}$  und das effektive statische Moment  $S_{\text{ef}}$  bestimmt werden:

$$J_{\text{ef}} = \sum n_i \cdot J_i + \sum n_i \cdot A_i \cdot e_i^2 \quad 8.19$$

$$J_{\text{ef}} = \frac{110 \cdot 80^3}{12} \cdot 2 + \frac{40 \cdot 150^3}{12} + 2 \cdot 110 \cdot 80 \cdot 115^2$$

$$J_{\text{ef}} = 253394024 \text{ mm}^4 = 2,53 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$$

$$S_{\text{ef},i} = \sum n_i \cdot A_i \cdot e_i \quad 8.20$$

$$S_{\text{ef},\text{Mitte}} = 1,0 \cdot 110 \cdot 80 \cdot 115 + 1,0 \cdot 40 \cdot 75 \cdot 37,5 = 1124491 \text{ mm}^3 = 1,13 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$



Für die Berechnung von Normal- und Schubspannungen können die folgenden Gleichungen verwendet werden:

$$\sigma_i = \frac{M}{E \cdot J_{ef}} \cdot e_i \cdot E_i \quad 8.21$$

$$\tau_i = \frac{V \cdot S_{ef,i}}{J_{ef} \cdot b} \quad 8.22$$

Aus der Glg. 8.10 wird nun die Querkraft (V) ermittelt, indem man die Schubspannung mit der Schubfestigkeit gleichsetzt ( $\tau = f_{v,95,(40/150)}$ ), Glg. 8.11:

$$V = \frac{f_{v,95,(40/150)} \cdot J_{ef} \cdot b}{S_{ef,Mitte}} = \frac{7,5 \cdot 2,53 \cdot 10^8 \cdot 40}{1,13 \cdot 10^6} = 67332 \text{ N} \approx 67,3 \text{ kN} \quad 8.23$$

$$M = V \cdot a = 67332 \cdot 675 = 45449100 \text{ Nmm} \approx 45,5 \text{ kNm} \quad 8.24$$

Mit den bekannten Glg. 8.9 und Glg. 8.10 wird jetzt an jeder Stelle des Querschnitts die Schub- bzw. die Biegespannung bestimmt, siehe Abb. 8.3.

$E_{0,mean}$	$z_i$	$\sigma_m$	$\tau$
[N/mm <sup>2</sup> ]	[mm]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
11000	155	-27,8	0,0
	75	-13,5	2,4
	75	-13,5	6,7
	0	0,0	7,5
	0	0,0	7,5
	-75	13,5	6,7
	-75	13,5	2,4
	-155	27,8	0,0

Tab. 8.4 Theoretische Spannungsverteilung der Versuchsreihe II

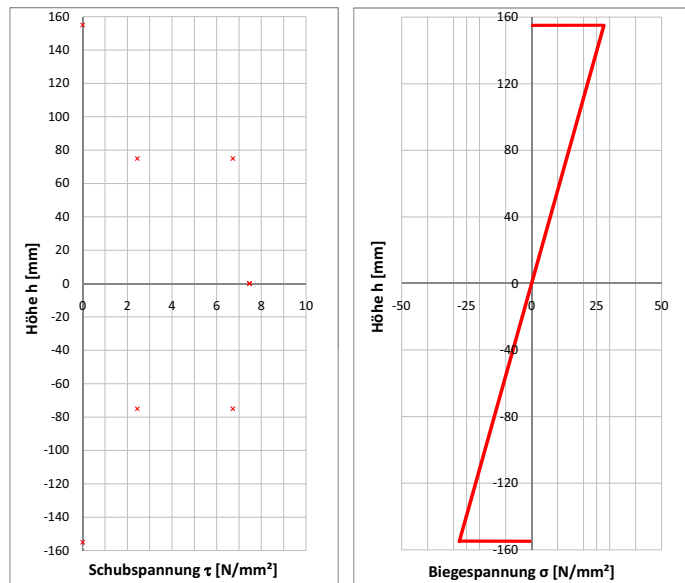


Abb. 8.5 Theoretische Auswertung der Versuchsreihe II.

### 8.1.3 Serie III: 80/150, C16

	Prüfkörper	Gurtlamelle
Material	Fichte C16	Fichte C16
Höhe $h_{pr}$ und $h_1$ [mm]	150	80
Breite $b_{pr}$ und $b_1$ [mm]	80	220
Länge $l$ [mm]	1970	
E-Modul $E_{0,mean}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	8.000	
Zugfestigkeit $f_{t,0,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	10	
Biegefestigkeit $f_{m,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	16	
Schubfestigkeit $f_{v,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	1,8	
Variable $a$ [mm]	$4,5 \cdot h = 675,0$	

Tab. 8.5 Technische Kennwerte des Materials der Serie III.  
Festigkeiten wurden aus der ÖNORM EN 338 [63] entnommen.

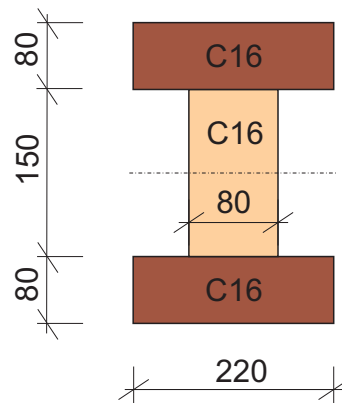


Abb. 8.6 Geometrie des Querschnitts der Versuchsreihe III

Regressionsgleichung nach Brandner [8]:

$$f_{v,mean} = -0,02 \cdot f_{t,0,l,k} + 4,5 \quad 8.25$$

$$f_{v,mean,(80/150)} = -0,02 \cdot 10,0 + 4,5 = 4,3 \text{ N/mm}^2$$

Die Berücksichtigung des Größeneffekts erfolgt auf Basis einer ersten Abschätzung mittels einer Potenzfunktion und einer Potenz von  $k_s = 0,2$ :

$$f_{v,mean,(40/150)} = \left( \frac{A_{s,ref}}{A_s} \right)^{k_s} \cdot f_{v,mean,ref} = \left( \frac{81897}{\left( 675 - \frac{310}{6} - \frac{310}{4} \right) \cdot 80} \right)^{0,2} \cdot 4,3 \quad 8.26$$

$$f_{v,mean,(80/150)} = 4,9 \text{ N/mm}^2$$

Varianz:

$$\sigma^2 = (\text{COV} \cdot \mu)^2 \quad \text{mit der Annahme } \text{COV} = 20\% \quad 8.27$$

$$\sigma^2 = (0,2 \cdot 4,9)^2 = 0,96 \text{ [N/mm}^2\text{]}^2$$

Erwartungswert der auf die Normalverteilung hin transformierten logarithmischen normalverteilten Zufallsvariablen:

$$\mu_y = \ln \left[ \frac{\mu^2}{\sqrt{\mu^2 + \sigma^2}} \right] = \ln \left[ \frac{4,9^2}{\sqrt{4,9^2 + 0,96}} \right] = 1,570 \quad 8.28$$

Standardabweichung der auf die Normalverteilung hin transformierten logarithmischen normalverteilten Zufallsvariablen:

$$\sigma_y = \sqrt{\ln \left( \frac{\sigma^2}{\mu^2} + 1 \right)} = \sqrt{\ln \left( \frac{0,96}{4,9^2} + 1 \right)} = 0,198 \quad 8.29$$

Das 95%-Quantil ergibt sich mit:

$$f_{v,95,(80/150)} = 6,6 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{Berechnungsablauf siehe Abschnitt 3.1.1.2})$$

Wertigkeit  $n_i$ :

$$n_i = \frac{E_i}{E} = \frac{8000}{8000} = 1,0 \quad 8.30$$

Der Schwerpunkt und gleichzeitig auch der Nullpunkt der Dehnungsebene bei reiner Biegung  $z_s$ :

$$z_s = 155,0 \text{ mm}$$

Weiter können das effektive Trägheitsmoment  $J_{ef}$ , die wirksame Querschnittsfläche  $A_{ef}$  und das effektive statische Moment  $S_{ef}$  bestimmt werden:

$$J_{ef} = \sum n_i \cdot J_i + \sum n_i \cdot A_i \cdot e_i^2 \quad 8.31$$

$$J_{ef} = 1,0 \cdot \frac{220 \cdot 80^3}{12} \cdot 2 + 1,0 \cdot \frac{80 \cdot 150^3}{12} + 2 \cdot 220 \cdot 80 \cdot 115^2$$

$$J_{ef} = 506788048 \text{ mm}^4 = 5,07 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$$

$$S_{ef,i} = \sum n_i \cdot A_i \cdot e_i \quad 8.32$$

$$S_{ef,Mitte} = 1,0 \cdot 220 \cdot 80 \cdot 115 + 1,0 \cdot 80 \cdot 75,5 \cdot 37,5 = 2248983 \text{ mm}^3 = 2,25 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

Für die Berechnung von Normal- und Schubspannungen können die folgenden Gleichungen verwendet werden:

$$\sigma_i = \frac{M}{E \cdot J_{ef}} \cdot e_i \cdot E_i \quad 8.33$$

$$\tau_i = \frac{V \cdot S_{ef,i}}{J_{ef} \cdot b} \quad 8.34$$

Aus der Glg. 8.10 wird nun die Querkraft (V) ermittelt, indem man die Schubspannung mit der Schubfestigkeit gleichsetzt ( $\tau = f_{v,95,(80/150)}$ ), Glg. 8.11:

$$V = \frac{f_{v,95,(80/150)} \cdot J_{ef} \cdot b}{S_{ef,Mitte}} = \frac{6,6 \cdot 5,07 \cdot 10^8 \cdot 80}{2,25 \cdot 10^6} = 119341 \text{ N} \approx 119,3 \text{ kN} \quad 8.35$$

$$M = V \cdot a = 119341 \cdot 675 = 80554898 \text{ Nmm} \approx 80,6 \text{ kNm} \quad 8.36$$

Mit den bekannten Glg. 8.9 und Glg. 8.10 wird jetzt an jeder Stelle des Querschnitts die Schub- bzw. die Biegespannung bestimmt, siehe Abb. 8.3.

$E_{0,mean}$	$z_i$	$\sigma_m$	$\tau$
[N/mm <sup>2</sup> ]	[mm]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
8000	155	-24,6	0,0
	75	-11,9	2,2
	75	-11,9	6,0
	0	0,0	6,6
	0	0,0	6,6
	-75	11,9	6,0
	-75	11,9	2,2
	-155	24,6	0,0

Tab. 8.6 Theoretische Spannungsverteilung der Versuchsreihe III

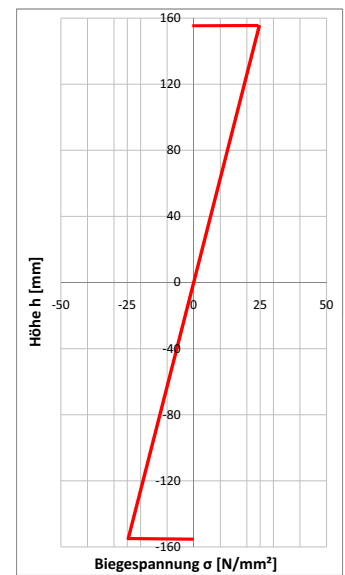
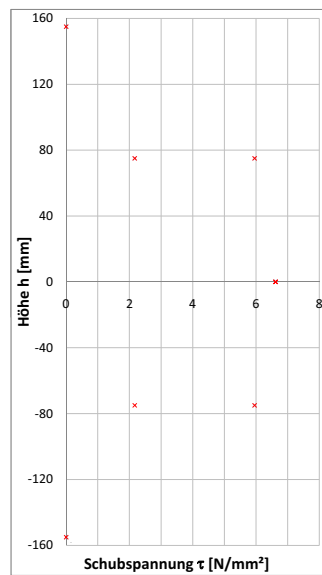


Abb. 8.7 Theoretische Auswertung der Versuchsreihe III.

### 8.1.4 Serie IV: 80/150, C24

	Prüfkörper	Gurtlamelle
Material	Fichte C24	Fichte C24
Höhe $h_{pr}$ und $h_1$ [mm]	150	80
Breite $b_{pr}$ und $b_1$ [mm]	80	220
Länge $l$ [mm]	1970	
E-Modul $E_{0,mean}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	11.000	
Zugfestigkeit $f_{t,0,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	14	
Biegefestigkeit $f_{m,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	24	
Schubfestigkeit $f_{v,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	2,5	
Variable $a$ [mm]	$4,5 \cdot h = 675,0$	

Tab. 8.7 Technische Kennwerte des Materials der Serie IV.  
Festigkeiten wurden aus der ÖNORM EN 338 [63] entnommen.

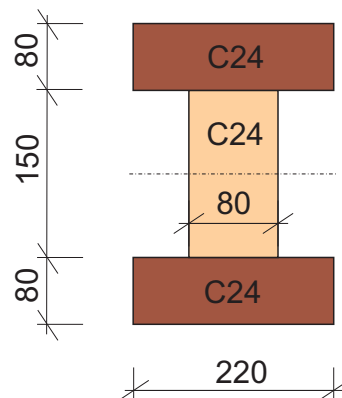


Abb. 8.8 Geometrie des Querschnitts der Versuchsreihe IV

Regressionsgleichung nach Brandner [8]:

$$f_{v,mean} = -0,02 \cdot f_{t,0,l,k} + 4,5 \quad 8.37$$

$$f_{v,mean,(80/150)} = -0,02 \cdot 14,0 + 4,5 = 4,22 \text{ N/mm}^2$$

Die Berücksichtigung des Größeneffekts erfolgt auf Basis einer ersten Abschätzung mittels einer Potenzfunktion und einer Potenz von  $k_s = 0,2$ :

$$f_{v,mean,(40/150)} = \left( \frac{A_{s,ref}}{A_s} \right)^{k_s} \cdot f_{v,mean,ref} = \left( \frac{81897}{\left( 675 - \frac{310}{6} - \frac{310}{4} \right) \cdot 80} \right)^{0,2} \cdot 4,22 \quad 8.38$$

$$f_{v,mean,(80/150)} = 4,8 \text{ N/mm}^2$$

Varianz:

$$\sigma^2 = (\text{COV} \cdot \mu)^2 \quad \text{mit der Annahme } \text{COV} = 20\% \quad 8.39$$

$$\sigma^2 = (0,2 \cdot 4,8)^2 = 0,922 \text{ [N/mm}^2\text{]}^2$$

Erwartungswert der auf die Normalverteilung hin transformierten logarithmischen normalverteilten Zufallsvariablen:

$$\mu_y = \ln \left[ \frac{\mu^2}{\sqrt{\mu^2 + \sigma^2}} \right] = \ln \left[ \frac{4,8^2}{\sqrt{4,8^2 + 0,922}} \right] = 1,549 \quad 8.40$$

Standardabweichung der auf die Normalverteilung hin transformierten logarithmischen normalverteilten Zufallsvariablen:

$$\sigma_y = \sqrt{\ln \left( \frac{\sigma^2}{\mu^2} + 1 \right)} = \sqrt{\ln \left( \frac{0,922}{4,8^2} + 1 \right)} = 0,198 \quad 8.41$$

Das 95%-Quantil ergibt sich mit:

$$f_{v,95,(80/150)} = 6,5 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{Berechnungsablauf siehe Abschnitt 3.1.1.2})$$

mit  $\phi_{(q)}$  = Quantilwert der Standardnormalverteilung

Wertigkeit  $n_i$ :

$$n_i = \frac{E_i}{E} = \frac{11000}{11000} = 1,0 \quad 8.42$$

Der Schwerpunkt und gleichzeitig auch der Nullpunkt der Dehnungsebene bei reiner Biegung  $z_s$ :

$$z_s = 155,0 \text{ mm}$$

Weiter können das effektive Trägheitsmoment  $J_{\text{ef}}$ , die wirksame Querschnittsfläche  $A_{\text{ef}}$  und das effektive statische Moment  $S_{\text{ef}}$  bestimmt werden:

$$J_{\text{ef}} = \sum n_i \cdot J_i + \sum n_i \cdot A_i \cdot e_i^2 \quad 8.43$$

$$J_{\text{ef}} = 1,0 \cdot \frac{220 \cdot 80^3}{12} \cdot 2 + 1,0 \cdot \frac{80 \cdot 150^3}{12} + 2 \cdot 220 \cdot 80 \cdot 115^2$$

$$J_{\text{ef}} = 506788048 \text{ mm}^4 = 5,07 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$$

$$S_{\text{ef},i} = \sum n_i \cdot A_i \cdot e_i \quad 8.44$$

$$S_{\text{ef},\text{Mitte}} = 1,0 \cdot 220 \cdot 80 \cdot 115 + 1,0 \cdot 80 \cdot 75,5 \cdot 37,5 = 2248983 \text{ mm}^3 = 2,25 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

Für die Berechnung von Normal- und Schubspannung können die folgenden Gleichungen verwendet werden:

$$\sigma_i = \frac{M}{E \cdot J_{ef}} \cdot e_i \cdot E_i \quad 8.45$$

$$\tau_i = \frac{V \cdot S_{ef,i}}{J_{ef} \cdot b} \quad 8.46$$

Aus der Glg. 8.10 wird nun die Querkraft (V) ermittelt, indem man die Schubspannung mit der Schubfestigkeit gleichsetzt ( $\tau = f_{v,95,(80/150)}$ ), Glg. 8.11:

$$V = \frac{f_{v,95,(80/150)} \cdot J_{ef} \cdot b}{S_{ef,Mitte}} = \frac{6,5 \cdot 5,07 \cdot 10^8 \cdot 80}{2,25 \cdot 10^6} = 117177 \text{ N} \approx 117,2 \text{ kN} \quad 8.47$$

$$M = V \cdot a = 117177 \cdot 675 = 79094688 \text{ Nmm} \approx 79,1 \text{ kNm} \quad 8.48$$

Mit den bekannten Glg. 8.9 und Glg. 8.10 wird jetzt an jeder Stelle des Querschnitts die Schub- bzw. die Biegespannungen bestimmt, siehe Abb. 8.3.

$E_{0,mean}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$z_i$ [mm]	$\sigma_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\tau$ [N/mm <sup>2</sup> ]
11000	155	-24,2	0,0
	75	-11,7	2,1
	75	-11,7	5,8
	0	0,0	6,5
	0	0,0	6,5
	-75	11,7	5,8
	-75	11,7	2,1
	-155	24,2	0,0

Tab. 8.8 Theoretische Spannungsverteilung der Versuchsreihe IV

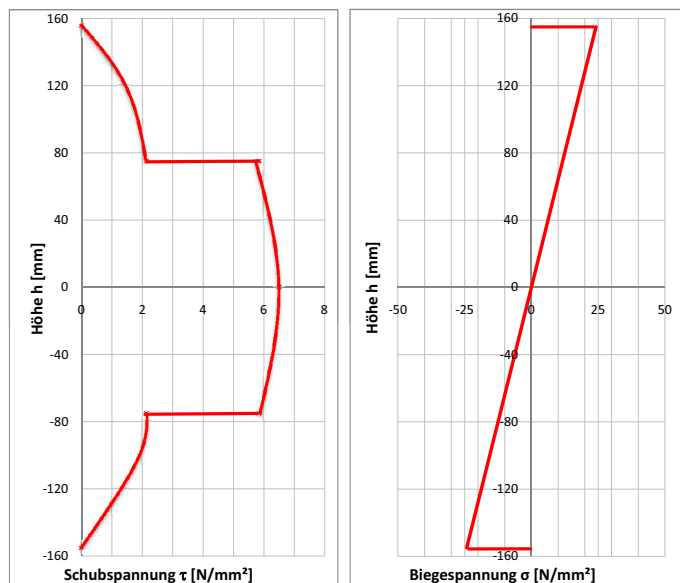


Abb. 8.9 Theoretische Auswertung der Versuchsreihe IV.

### 8.1.5 Serie V: 80/150, C40

	Prüfkörper	Gurtlamelle
Material	Fichte C40	Fichte C40
Höhe $h_{pr}$ und $h_1$ [mm]	150	80
Breite $b_{pr}$ und $b_1$ [mm]	80	220
Länge $l$ [mm]	1970	
E-Modul $E_{0,mean}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	14.000	
Zugfestigkeit $f_{t,0,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	24	
Biegefestigkeit $f_{m,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	40	
Schubfestigkeit $f_{v,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	3,8	
Variable $a$ [mm]	$4,5 \cdot h = 675,0$	

Tab. 8.9 Technische Kennwerte des Materials der Serie V.  
Festigkeiten wurden aus der ÖNORM EN 338 [63] entnommen.

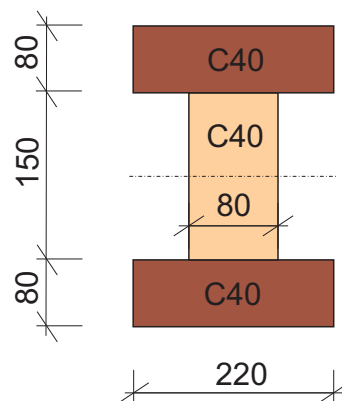


Abb. 8.10 Geometrie des Querschnitts der Versuchsreihe V

Regressionsgleichung nach Brandner [8]:

$$f_{v,mean} = -0,02 \cdot f_{t,0,l,k} + 4,5 \quad 8.49$$

$$f_{v,mean,(80/150)} = -0,02 \cdot 21,0 + 4,5 = 4,08 \text{ N/mm}^2 \quad 8.50$$

Die Berücksichtigung des Größeneffekts erfolgt auf Basis einer ersten Abschätzung mittels einer Potenzfunktion und einer Potenz von  $k_s = 0,2$ :

$$f_{v,mean,(40/150)} = \left( \frac{A_{s,ref}}{A_s} \right)^{k_s} \cdot f_{v,mean,ref} = \left( \frac{81897}{\left(675 - \frac{310}{6} - \frac{310}{4}\right) \cdot 80} \right)^{0,2} \cdot 4,08 \quad 8.51$$

$$f_{v,mean,(80/150)} = 4,6 \text{ N/mm}^2$$



Varianz:

$$\sigma^2 = (\text{COV} \cdot \mu)^2 \quad \text{mit der Annahme } \text{COV} = 20\% \quad 8.52$$

$$\sigma^2 = (0,2 \cdot 4,6)^2 = 0,846 \text{ [N/mm}^2\text{]}^2$$

Erwartungswert der auf die Normalverteilung hin transformierten logarithmischen normalverteilten Zufallsvariablen:

$$\mu_y = \ln \left[ \frac{\mu^2}{\sqrt{\mu^2 + \sigma^2}} \right] = \ln \left[ \frac{4,6^2}{\sqrt{4,6^2 + 0,846}} \right] = 1,506 \quad 8.53$$

Standardabweichung der auf die Normalverteilung hin transformierten logarithmischen normalverteilten Zufallsvariablen:

$$\sigma_y = \sqrt{\ln \left( \frac{\sigma^2}{\mu^2} + 1 \right)} = \sqrt{\ln \left( \frac{0,846}{4,6^2} + 1 \right)} = 0,198 \quad 8.54$$

Das 95%-Quantil ergibt sich mit:

$$f_{v,95,(80/150)} = 6,3 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{Berechnungsablauf siehe Abschnitt 3.1.1.2})$$

Wertigkeit  $n_i$ :

$$n_i = \frac{E_i}{E} = \frac{14000}{14000} = 1,0 \quad 8.55$$

Der Schwerpunkt und gleichzeitig auch der Nullpunkt der Dehnungsebene bei reiner Biegung  $z_s$ :

$$z_s = 155,0 \text{ mm}$$

Weiter können das effektive Trägheitsmoment  $J_{ef}$ , die wirksame Querschnittsfläche  $A_{ef}$  und das effektive statische Moment  $S_{ef}$  bestimmt werden:

$$J_{ef} = \sum n_i \cdot J_i + \sum n_i \cdot A_i \cdot e_i^2 \quad 8.56$$

$$J_{ef} = 1,0 \cdot \frac{220 \cdot 80^3}{12} \cdot 2 + 1,0 \cdot \frac{80 \cdot 150^3}{12} + 2 \cdot 220 \cdot 80 \cdot 115^2$$

$$J_{ef} = 506788048 \text{ mm}^4 = 5,07 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$$

$$S_{ef,i} = \sum n_i \cdot A_i \cdot e_i \quad 8.57$$

$$S_{ef,Mitte} = 1,0 \cdot 220 \cdot 80 \cdot 115 + 1,0 \cdot 80 \cdot 75,5 \cdot 37,5 = 2248983 \text{ mm}^3 = 2,25 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

Für die Berechnung von Normal- und Schubspannungen können die folgenden Gleichungen verwendet werden:

$$\sigma_i = \frac{M}{E \cdot J_{ef}} \cdot e_i \cdot E_i \quad 8.58$$

$$\tau_i = \frac{V \cdot S_{ef,i}}{J_{ef} \cdot b} \quad 8.59$$

Aus der Glg. 8.10 wird nun die Querkraft (V) ermittelt, indem man die Schubspannung mit der Schubfestigkeit gleichsetzt ( $\tau = f_{v,95,(80/150)}$ ), Glg. 8.11:

$$V = \frac{f_{v,95,(80/150)} \cdot J_{ef} \cdot b}{S_{ef,Mitte}} = \frac{6,3 \cdot 5,07 \cdot 10^8 \cdot 80}{2,25 \cdot 10^6} = 113211 \text{ N} \approx 113,2 \text{ kN} \quad 8.60$$

$$M = V \cdot a = 113211 \cdot 675 = 76417637 \text{ Nmm} \approx 76,4 \text{ kNm} \quad 8.61$$

Mit den bekannten Glg. 8.9 und Glg. 8.10 wird jetzt an jeder Stelle des Querschnitts die Schub- bzw. die Biegespannung bestimmt, siehe Abb. 8.3.

$E_{0,mean}$	$z_i$	$\sigma_m$	$\tau$
[N/mm <sup>2</sup> ]	[mm]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
14000	155	-23,4	0,0
	75	-11,3	2,1
	75	-11,3	5,7
	0	0,0	6,3
	0	0,0	6,3
	-75	11,3	5,7
	-75	11,3	2,1
	-155	23,4	0,0

Tab. 8.10 Theoretische Spannungsverteilung der Versuchsreihe V

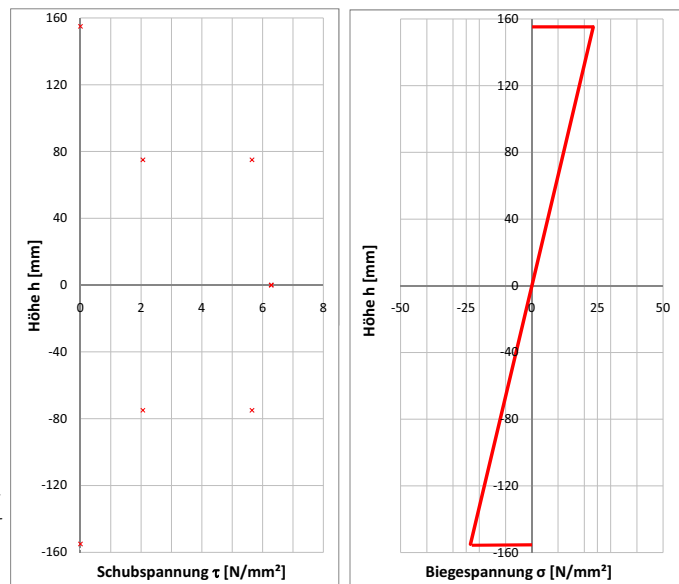


Abb. 8.11 Theoretische Auswertung der Versuchsreihe V.

### 8.1.6 Serie VI: 80/300, C24

	Prüfkörper	Gurtlamelle
Material	Fichte C24	Fichte C24
Höhe $h_{pr}$ und $h_1$ [mm]	300	160
Breite $b_{pr}$ und $b_1$ [mm]	80	220
Länge $l$ [mm]	3940	
E-Modul $E_{0,mean}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	11.000	
Zugfestigkeit $f_{t,0,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	14	
Biegefestigkeit $f_{m,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	24	
Schubfestigkeit $f_{v,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	2,5	
Variable $a$ [mm]	$4,5 \cdot h = 1350,0$	

Tab. 8.11 Technische Kennwerte des Materials der Serie VI.  
Festigkeiten wurden aus der ÖNORM EN 338 [63] entnommen.

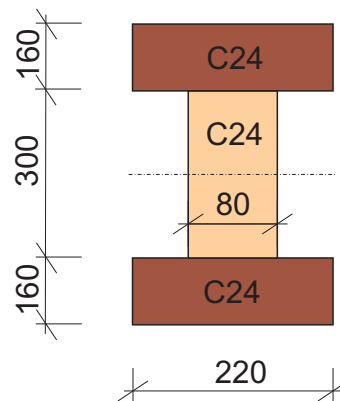


Abb. 8.12 Geometrie des Querschnitts der Versuchsreihe VI

Regressionsgleichung nach Brandner [8]:

$$f_{v,mean} = -0,02 \cdot f_{t,0,l,k} + 4,5 \quad 8.62$$

$$f_{v,mean,(80/150)} = -0,02 \cdot 14,0 + 4,5 = 4,22 \text{ N/mm}^2$$

Die Berücksichtigung des Größeneffekts erfolgt auf Basis einer ersten Abschätzung mittels einer Potenzfunktion und einer Potenz von  $k_s = 0,2$ :

$$f_{v,mean,(40/150)} = \left( \frac{A_{s,ref}}{A_s} \right)^{k_s} \cdot f_{v,mean,ref} = \left( \frac{81897}{\left(1350 - \frac{620}{6} - \frac{620}{4}\right) \cdot 80} \right)^{0,2} \cdot 4,22 \quad 8.63$$

$$f_{v,mean,(80/150)} = 4,2 \text{ N/mm}^2$$

Varianz:

$$\sigma^2 = (\text{COV} \cdot \mu)^2 \quad \text{mit der Annahme } \text{COV} = 20\% \quad 8.64$$

$$\sigma^2 = (0,2 \cdot 4,2)^2 = 0,706 \text{ [N/mm}^2\text{]}^2$$

Erwartungswert der auf die Normalverteilung hin transformierten logarithmischen normalverteilten Zufallsvariablen:

$$\mu_y = \ln \left[ \frac{\mu^2}{\sqrt{\mu^2 + \sigma^2}} \right] = \ln \left[ \frac{4,2^2}{\sqrt{4,2^2 + 0,706}} \right] = 1,416 \quad 8.65$$

Standardabweichung der auf die Normalverteilung hin transformierten logarithmischen normalverteilten Zufallsvariablen:

$$\sigma_y = \sqrt{\ln \left( \frac{\sigma^2}{\mu^2} + 1 \right)} = \sqrt{\ln \left( \frac{0,706}{4,2^2} + 1 \right)} = 0,198 \quad 8.66$$

Das 95%-Quantil ergibt sich mit:

$$f_{v,95,(80/300)} = 6,6 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{Berechnungsablauf siehe Abschnitt 3.1.1.2})$$

Wertigkeit  $n_i$ :

$$n_i = \frac{E_i}{E} = \frac{11000}{11000} = 1,0 \quad 8.67$$

Der Schwerpunkt und gleichzeitig auch der Nullpunkt der Dehnungsebene bei reiner Biegung  $z_s$ :

$$z_s = 310,0 \text{ mm}$$

Weiter können das effektive Trägheitsmoment  $J_{\text{ef}}$ , die wirksame Querschnittsfläche  $A_{\text{ef}}$  und das effektive statische Moment  $S_{\text{ef}}$  bestimmt werden:

$$J_{\text{ef}} = \sum n_i \cdot J_i + \sum n_i \cdot A_i \cdot e_i^2 \quad 8.68$$

$$J_{\text{ef}} = 1,0 \cdot \frac{220 \cdot 160^3}{12} \cdot 2 + 1,0 \cdot \frac{80 \cdot 300^3}{12} + 2 \cdot 220 \cdot 160 \cdot 230^2$$

$$J_{\text{ef}} = 4054304383 \text{ mm}^4 = 4,05 \cdot 10^9 \text{ mm}^4$$

$$S_{\text{ef},i} = \sum n_i \cdot A_i \cdot e_i \quad 8.69$$

$$S_{\text{ef},\text{Mitte}} = 1,0 \cdot 220 \cdot 160 \cdot 230 + 1,0 \cdot 80 \cdot 150 \cdot 75,5 = 8995932 \text{ mm}^3 = 9,0 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

Für die Berechnung von Normal- und Schubspannungen können die folgenden Gleichungen verwendet werden:

$$\sigma_i = \frac{M}{E \cdot J_{ef}} \cdot e_i \cdot E_i \quad 8.70$$

$$\tau_i = \frac{V \cdot S_{ef,i}}{J_{ef} \cdot b} \quad 8.71$$

Aus der Glg. 8.10 wird nun die Querkraft (V) ermittelt, indem man die Schubspannung mit der Schubfestigkeit gleichsetzt ( $\tau = f_{v,95,(80/300)}$ ), Glg. 8.11:

$$V = \frac{f_{v,95,(80/300)} \cdot J_{ef} \cdot b}{S_{ef,Mitte}} = \frac{6,6 \cdot 4,05 \cdot 10^9 \cdot 80}{9,0 \cdot 10^6} = 239402 \text{ N} \approx 239,4 \text{ kN} \quad 8.72$$

$$M = V \cdot a = 239402 \cdot 1350 = 323193064 \text{ Nmm} \approx 323,2 \text{ kNm} \quad 8.73$$

Mit den bekannten Glg. 8.9 und Glg. 8.10 wird jetzt an jeder Stelle des Querschnitts die Schub- bzw. die Biegespannung bestimmt, siehe Abb. 8.3.

$E_{0,mean}$	$z_i$	$\sigma_m$	$\tau$
11000	310	-24,7	0,0
	150	-12,0	2,2
	150	-12,0	6,0
	0	0,0	6,6
	0	0,0	6,6
	-150	12,0	6,0
	-150	12,0	2,2
	-310	24,7	0,0

Tab. 8.12 Theoretische Spannungsverteilung der Versuchsreihe VI

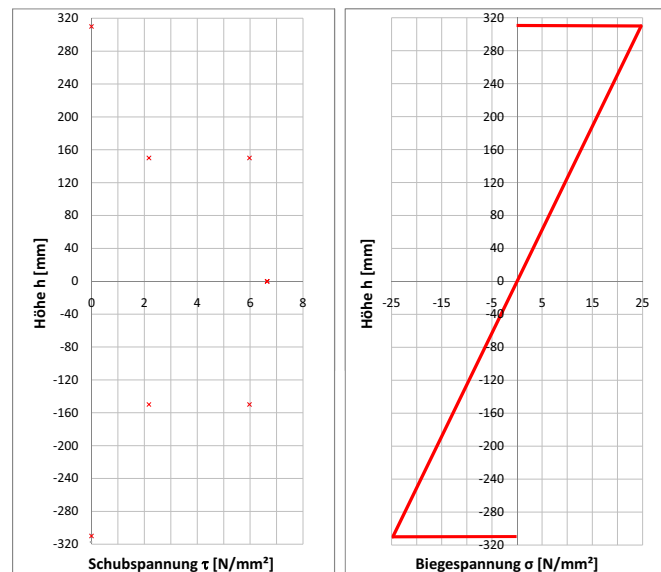


Abb. 8.13 Theoretische Auswertung der Versuchsreihe VI.

## 8.2 Nachweis der Auflagerverstärkung

Als Referenzsystem wird ein Träger der Serie VI genauer betrachtet, da hier die höchsten zu erwartenden Kräfte auf den Träger einwirken werden. Als Verstärkungsmittel werden Vollgewinde-Holzbauschrauben mit Senkkopf der Firma Schmid [97] verwendet. Die Bemessung wird in Anlehnung an die enBR [21] durchgeführt.

### 8.2.1 Holzeigenschaften

	Prüfkörper	Gurtlamelle
Material	Fichte C24	Fichte C24
Höhe h [mm]	300	160
Breite b [mm]	80	220
Länge l [mm]	3940	
Dichte $\rho_{k,12}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	380	
Druckfestigkeit $f_{c,90,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	2,5	
Teilsicherheitsbeiwert (Holz) $\gamma_m$ [--]	1,0*	
Modifikationsbeiwert (Holz) $k_{mod}$ [--]	1,0*	
Beiwert $k_{c,90}$ [--]	1,5	

Tab. 8.13 Materialkennwerte des I-Trägers der Hauptversuchsserie VI.  
\* Für die Versuche mit 1,0 gewählt.

### 8.2.2 Schraubeneigenschaften

	Vollgewindeschrauben
Material	Stahl
Schraubenlänge $l_{ef}$ [mm]	460
Schraubendurchmesser d [mm]	8,0
Schraubenkerndurchmesser $d_k$ [mm]	5,3
charakt. Wert der Fliesgrenze $f_{y,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	1000
charakt. Wert der Ausziehfestigkeit $f_{t,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	11,6
Teilsicherheitsbeiwert (Stahl) $\gamma_{m,St}$ [--]	1,0*

Tab. 8.14 Materialkennwerte der Vollgewindeschrauben  
\* Für die Versuche mit 1,0 gewählt.

Die Einpressfläche  $A_0$  entspricht der Fläche der Auflagerplatte:

$$A_0 = \frac{h}{2} \cdot b = \frac{300 + 2 \cdot 160}{2} \cdot 220 = 68200 \text{ mm}^2 \quad 8.74$$

Die Einpressfläche  $A_1$  an der Schraubenspitze errechnet sich wie folgt:

$$A_1 = l_{ef,1} \cdot b = (273 + 310 + 460) \cdot 80 = 83440 \text{ mm}^2 \quad 8.75$$

Der weitere Rechenweg wird nach der enBR [21] gezeigt.

Charakteristischer Wert der Normalkraft im vollplastischen Zustand bezogen auf den Schraubenkern:

$$N_{pl,k} = A_{ef} \cdot f_{y,k} = \left( \frac{5,3^2 \cdot \pi}{4} \right) \cdot 1000 = 22062 \text{ N} \quad 8.76$$

Charakteristischer Wert der Verzweigungslast der Schraube:

$$N_{ki,G,k} = 33300 \text{ N} \quad 8.77$$

Bezogener Schlankheitsgrad:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{N_{pl,k}}{N_{ki,G,k}}} = \sqrt{\frac{22062}{33300}} = 0,81 \Rightarrow k_{c,s} = 0,6 \quad 8.78$$

Bemessungswert der axialen Tragfähigkeit:

$$R_{s,d} = \min \left[ \begin{array}{l} d \cdot l_{ef} \cdot f_{1,k} \cdot \frac{k_{mod}}{\gamma_m} \\ \frac{k_{c,s} \cdot N_{pl,k}}{\gamma_{m,Stahl}} \end{array} \right] \quad 8.79$$

$$R_{s,d} = \min \left[ \begin{array}{l} 8 \cdot 460 \cdot 11,6 \cdot \frac{1,0}{1,0} \\ \frac{0,6 \cdot 22062}{1,0} \end{array} \right] = \min \left[ \begin{array}{l} 42688 \\ 13237 \end{array} \right] = 13237 \text{ N}$$

Bemessungswert der Tragfähigkeit:

$$R_{90,d} = \min \left[ \begin{array}{l} k_{c,90,d} \cdot f_{c,90,d} \cdot A_0 + n \cdot R_{s,d} \\ k_{c,90,d} \cdot f_{c,90,d} \cdot A_1 \end{array} \right] = \min \left[ \begin{array}{l} 1,5 \cdot 2,5 \cdot 68200 + 3 \cdot 13237 \\ 1,5 \cdot 2,5 \cdot 83440 \end{array} \right] \quad 8.80$$

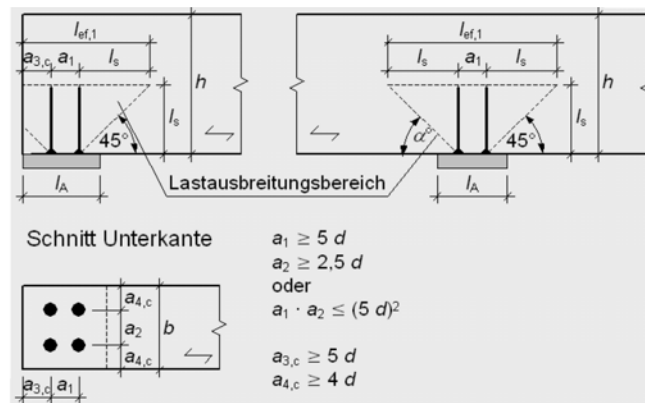
$$R_{90,d} = \min \left[ \begin{array}{l} 295461 \\ 312900 \end{array} \right] = 295461 \text{ N} \quad 8.81$$

Nachweis:

$$\frac{F_d}{R_{90,d}} \leq 1,0 \quad \Rightarrow \quad \frac{239402}{295461} = 0,81 \quad 8.82$$

Mit dem Ausnutzungsgrad von 81% ist somit die Wahl der Vollgewindeschrauben gerechtfertigt.

### 8.2.3 Mindestabstände



Tab. 8.15 Mindestabstände der Verstärkungsmittel (Vollgewindeschrauben) nach Schickhofer [84].

$a_1 = 150 \text{ mm}$	$<$	$5 \cdot d = 40 \text{ mm}$	ok
$a_2 = \text{keine zweite Schraubenreihe vorhanden}$			ok
$a_3 = 273 \text{ mm}$	$<$	$5 \cdot d = 40 \text{ mm}$	ok
$a_4 = 110 \text{ mm}$	$<$	$4 \cdot d = 32 \text{ mm}$	ok

Die Mindestabstände wurden durch die Wahl des Schraubendurchmessers von 8 mm eingehalten.

### 8.2.4 Zusammenfassung der gewählten Verstärkungsmaßnahmen

In der nachfolgenden Tab. 8.16 werden für jede Serie die Ergebnisse der Nachweisführung der Auflagerverstärkungen gezeigt. Der Rechenweg geschah nach dem gleichen Ablauf wie im Abschnitt 8.2 dargelegt.

Gruppierung	einwirkende Kraft F	Schraubenanzahl n	Schraubenlänge $l_{ef}$	Ausnutzungsgrad
[--]	[kN]	[#]	[mm]	[%]
Serie I	38,7	3	120	120
Serie II	67,3	3	240	100
Serie III	119,3	3	240	130
Serie IV	117,2	3	240	120
Serie V	113,2	3	240	110
Serie VI	239,4	3	460	81

Tab. 8.16 Zusammenfassung der Auflagerverstärkung der einzelnen Serien und deren Ausnutzungsgrade. Die Auswertung und die Anzahl der Schrauben gilt nur für einen Kräfteleitungsbereich vom Träger.



Die geringen Überschreitungen der Ausnutzungsgrade (Serien I, III-V) sind im akzeptablen Bereich da die einwirkenden Kräfte auf dem 95%-Niveau errechnet wurden, als Widerstand aber die Kennwerte auf dem 5%-Niveau herangezogen wurden.

Da jede Schraube (8 mm Durchmesser) mehrmals verwendet werden kann, werden 120 Stück mit der Länge 120 mm, 480 Stück mit der Länge 240 mm und 120 Stück mit der Länge 460 mm für das Prüfvorhaben der Hauptversuche benötigt.

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:

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

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  
10 – Labor für Konstruktiven Ingenieurbau

Fortlaufende Nummer pro Reihe und Institut / Jahreszahl