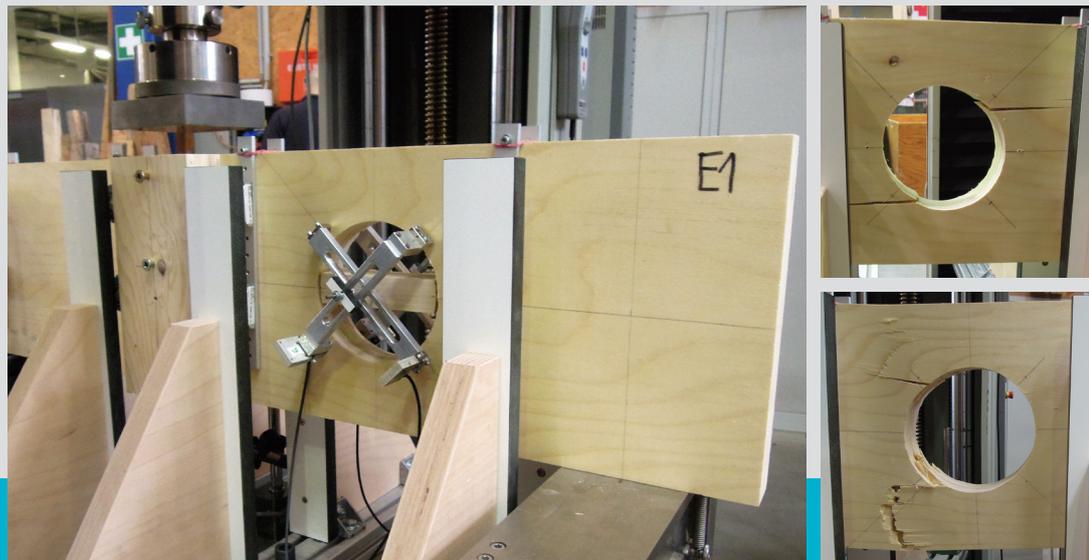


# Trag- und Verformungsverhalten von unterschiedlich verstärkten Durchbrüchen in dünnwandigen Trägern aus FSH und FSP

M-4-3/2017



**Benjamin Taibon**  
Institut für Holzbau und Holztechnologie  
Technische Universität Graz





Benjamin Taibon, BSc.

# **Trag- und Verformungsverhalten von unterschiedlich verstärkten Durchbrüchen in dünnwandigen Trägern aus FSH und FSP**

## **MASTERARBEIT**

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

Eingereicht an der  
**Technischen Universität Graz**

Betreuer  
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerhard Schickhofer  
Institut für Holzbau und Holztechnologie

DI Julia Dröscher  
Institut für Holzbau und Holztechnologie

DI Severin Zimmer  
Institut für Holzbau und Holztechnologie

Graz, März 2017



# EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

## AFFIDAVIT

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

*I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.*

---

Datum / Date

---

Unterschrift / Signature



# Danksagung

Ich bedanke mich herzlich bei Univ.-Prof. Dipl.-Ing Dr.techn. Gerhard Schickhofer für die Möglichkeit diese Arbeit am Institut für Holzbau und Holztechnologie zu verfassen sowie für die Bereitstellung aller benötigten Materialien und Geräte. Außerdem möchte ich mich für seine vielen lehrreichen Vorträge bedanken, mit denen er es schafft die Studenten für den Holzbau zu begeistern.

Bedanken möchte ich mich ganz besonders bei Dipl.-Ing. Julia Dröscher für die stets hilfreiche Beantwortung meiner zahlreichen Fragen und bei Dipl.-Ing. Severin Zimmer für die sehr kompetente Betreuung, die anregenden Diskussionen und die Korrektur meiner Arbeit.

Bei allen Mitarbeitern des Instituts für Holzbau und Holztechnologie sowie der holz.bau forschung gmbh, die mich beim Verfassen dieser Arbeit unterstützt haben, möchte ich mich bedanken. Ganz besonders gedankt sei Ing. Bernd Heissenberger. Er war mir beim Herstellen der Prüfkörper und bei der Durchführung der Versuche eine große Hilfe.

Der größte Dank gilt meinen Eltern Martina und Lorenz. Sie haben mir stets bedingungslos ermöglicht all meine Interessen zu verfolgen und standen immer hinter meinen Entscheidungen. Danken möchte ich auch meinem Bruder Maximilian und meiner gesamten Familie, welche eine wichtige Stütze in meinem Leben sind. Besonders bedanken möchte ich mich noch bei meiner Freundin Claudia, sowie allen anderen, die mein Studium in Graz zu einer unvergesslichen Zeit gemacht haben.



# Kurzfassung

Einen wichtigen Aspekt eines jeden Bauwerkes stellt die Gebäudetechnik dar. Da in vielen Fällen die zur Verfügung stehende Raumhöhe voll ausgenutzt werden soll, ist es oftmals notwendig, Heizungs-, Lüftungs- oder Wasserrohrleitungen auf einer Ebene mit der tragenden Struktur anzuordnen. Dies führt unumgänglich zu Kreuzungspunkten, welche mittels Öffnungen in den Trägern gelöst werden können. Der Vorteil der dadurch gewonnenen Platzersparnis resultiert allerdings in einer nicht zu vernachlässigenden Schwächung des tragenden Bauteiles. Aus diesem Grund ist eine wirksame Verstärkung des durchbrochenen Trägerbereiches notwendig, um die Tragfähigkeit eines undurchbrochenen Trägers wieder weitgehend herzustellen.

Tragende Elemente aus Furnierschichtholz erfreuen sich wachsender Beliebtheit und werden immer häufiger im mehrgeschossigen Wohnungsbau, aber auch im Hallenbau eingesetzt. In der vorliegenden Arbeit werden Durchbrüche mit verschiedenen Verstärkungsvarianten bei Furnierholzträgern thematisiert, wobei der Fokus auf die runde Ausführungsvariante gelegt wurde. Ziel dabei ist es, das Verhalten des Durchbruchsquerschnittes bei Belastung sowie die Versagensmechanismen zu untersuchen, um die Wirkungsweise und das Potenzial der gewählten Verstärkungsmethoden einschätzen zu können.

Einführend wird ein kurzer Überblick über den Werkstoff Holz gegeben sowie die Eigenschaften und Herstellung des Furniers erklärt. Anschließend folgt die Darstellung der in einer umfassenden Literaturrecherche gewonnenen Kenntnisse über die Vorgehensweise zur Spannungsermittlung und die gängigsten Verstärkungsmethoden im Durchbruchbereich. Einen wesentlichen Teil der Arbeit stellt die versuchstechnische Untersuchung von unterschiedlich verstärkten Durchbrüchen mit einem Dreipunkt-Biegeversuch dar. Die Herstellung der Prüfkörper und deren unterschiedliche Verstärkungen erfolgte am Institut für Holzbau und Holztechnologie an der Technischen Universität Graz.

Bei den durchgeführten Biegeversuchen konnte festgestellt werden, dass Verstärkungen durchaus eine Tragfähigkeitssteigerung im Bereich des Durchbruches zur Folge haben. Außerdem können die am Durchbruchrand auftretenden Querkraftkräfte bis zu einem gewissen Grad umgelagert und von der eingesetzten Verstärkungsmaßnahme aufgenommen werden. Dies führt zu einer Erhöhung des Lastniveaus der Erstrissbildung. Die genauen Ergebnisse der Versuchsauswertung werden am Ende der Arbeit übersichtlich dargestellt und die daraus gewonnenen Erkenntnisse aufgezeigt und diskutiert.

Ein weiterer Teil der Arbeit beschäftigt sich mit der Ermittlung der Schubfestigkeit des für die Furnierträger verwendeten Grundmaterials. Hierfür wurden im Anschluss an die Biegeversuche aus den unbeschädigten Teilen der Furnierholzträger wiederum Prüfkörper gewonnen, welche zur Durchführung von Scherprüfungen bei Belastung im Winkel von  $14^\circ$  zur Faserrichtung verwendet wurden.



# Abstract

Building services constitutes an important aspect of every building. Since the available room height shall be fully utilized in most instances, it is often necessary to arrange heating, ventilation or water pipes on the same level as the supporting structure. This fact inevitably leads to intersections, which can be arranged by means of openings in the beams. The advantage of the resulting savings in overall room height, however, results in a considerable weakening of the supporting component. Therefore, an effective reinforcement of the opening is necessary, in order to restore the load capacity of an unweakened beam as much as possible. Load-bearing elements made from laminated veneer lumber are becoming increasingly popular and are used in multi-storey housing constructions, as well as in hall construction more frequently.

In the present thesis, holes in joists with different reinforcement variants are discussed regarding beams made of laminated veneer lumber. Thereby the focus is placed on the round design variant. As a main objective, the behaviour of the weakened cross-sections during stress as well as the failure mechanisms are examined in order to gain knowledge of the behaviour and the potential of the respective reinforcement methods.

First, a brief overview of timber as a material as well as the properties and production of veneers will be provided. In the following part, the findings of a comprehensive literature research on the procedure for the determination of stresses in areas around holes in joists and the most common methods of reinforcement will be presented. The main part of the thesis are experimental investigations of different reinforced openings by means of a three-point bending test. The test specimens and their different reinforcements were produced at the Institute of Timber Engineering and Wood Technology at the Technical University of Graz.

The three-point bending tests have shown that reinforcements can indeed increase the load bearing capacity in areas around holes. Additionally, the tension forces perpendicular to the grain occurring at the hole edge can be partially redistributed and carried by the applied reinforcement. This leads to an increased load level of crack initiation. The results of the test evaluation are summarized at the end of the paper and presented together with a discussion of the findings.

Furthermore, an additional chapter of the thesis deals with the determination of the shear strength of the base material used for the veneer beams. For this purpose, further test specimens were obtained from undamaged parts of the veneer beam carriers from the three-point bending tests. These specimens were then used to carry out shear tests at an angle of 14 degrees to the grain direction.



# Inhaltsverzeichnis

<b>KAPITEL 1: EINLEITUNG</b> .....	<b>1</b>
1-1 ANATOMIE DES HOLZES .....	1
1-1.1 Stammebene .....	2
1-1.2 Makroebene .....	3
1-1.3 Mikroebene .....	3
1-1.4 Nanoebene .....	6
1-2 FURNIERHOLZ .....	7
1-2.1 Herstellung von Einzelfurnieren.....	8
1-2.1.1 Vorbereitung.....	9
1-2.1.2 Kochen oder Dämpfen.....	9
1-2.1.3 Sägen, Schälen und Messern der Furniere.....	9
1-2.2 Eigenschaften und Aufbau von Furnierschicht und Furniersperrholz.....	13
1-3 DURCHBRÜCHE .....	16
1-3.1 Berechnung der Spannungen .....	16
1-3.1.1 Stand der Norm.....	17
1-3.1.2 Stand der Forschung .....	20
1-3.2 Verstärkung von Durchbrüchen.....	26
1-3.2.1 Stand der Norm.....	26
1-3.2.2 Stand der Forschung .....	28
<b>KAPITEL 2: MATERIAL UND METHODEN</b> .....	<b>40</b>
2-1 MATERIAL .....	40
2-1.1 Furnier .....	40
2-1.2 Bestimmung der Holzfeuchte .....	41
2-1.3 Bestimmung der Rohdichte .....	42
2-1.4 Korrekturfaktoren .....	42
2-1.5 Klebstoff.....	43
2-2 GERÄTE .....	44
2-3 PRÜFKÖRPERHERSTELLUNG .....	47
2-3.1.1 Furnierschichtholzträger mit Durchbruch .....	47
2-3.1.2 Schubprüfkörper 14° .....	50
2-4 PRÜFKONFIGURATIONEN.....	52
2-4.1 Biegeprüfung mit durchbrochenen Trägern .....	52
2-4.2 Scherprüfungen im Winkel von 14° .....	58
2-5 VORABSCHÄTZUNG.....	59
2-5.1 Durchbruchsversuche .....	59

2-5.1.1	Belastungsgeschwindigkeit.....	59
2-5.1.2	Auflagerpressung.....	61
2-5.2	Scherversuche 14°.....	61
2-6	PRÜFDURCHFÜHRUNG.....	63
2-6.1.1	Durchbruchversuche.....	63
2-6.1.2	Scherversuche 14°.....	65
2-7	AUSWERTUNGSMETHODEN.....	67
2-7.1	Durchbruchversuche.....	67
2-7.1.2	Bestimmung des Schubmoduls.....	71
2-7.1.3	Ermittlung aller relevanten Spannungen.....	72
2-7.2	Scherversuche 14°.....	77
2-7.2.1	Bestimmung der Schubfestigkeit.....	77
2-7.2.2	Bestimmung des Schubmoduls.....	77
2-7.3	Statistische Auswertung.....	78
<b>KAPITEL 3: ERGEBNISSE.....</b>		<b>79</b>
3-1	HOLZFEUCHTE UND ROHDICHTE.....	79
3-1.1	Durchbruchversuche.....	79
3-1.2	Scherversuche 14°.....	81
3-2	BRUCHCHARAKTERISTIK UND BRUCHLAST.....	83
3-2.1	Durchbruchversuche.....	83
3-2.1.2	Serie A.....	86
3-2.1.3	Serie B.....	88
3-2.1.4	Serie C.....	90
3-2.1.5	Serie D.....	92
3-2.1.6	Serie E.....	94
3-2.1.7	Reserveträger.....	96
3-2.2	Scherversuche 14°.....	97
3-2.2.1	Furnierschichtholz.....	97
3-2.2.2	Furniersperrholz.....	101
<b>KAPITEL 4: DISKUSSION.....</b>		<b>104</b>
4-1	DURCHBRUCHVERSUCHE.....	104
4-1.1	Referenzserie.....	107
4-1.2	Innenliegende Verstärkung.....	108
4-1.3	Außenliegende Verstärkung.....	109
4-1.4	Unverstärkter Durchbruch.....	110
4-2	SCHERVERSUCHE 14°.....	111
<b>KAPITEL 5: ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....</b>		<b>113</b>

---

<b>ANHANG A</b>	<b>VERZEICHNISSE .....</b>	<b>I</b>
A-1	Literaturverzeichnis .....	I
A-2	Normen und Zulassungen .....	II
A-3	Abbildungsverzeichnis .....	III
A-4	Tabellenverzeichnis .....	VII





Für jedes Aufgabengebiet haben sich im Laufe der Evolution verschiedene Zellformen mit speziellen Eigenschaften entwickelt. (Kollmann, 1951)

Die Struktur des Holzes lässt sich in fünf Ebenen betrachten:

- Stammebene
- Makroebene
- Mikroebene
- Nanoebene
- molekulare Ebene

Um den Aufbau und die damit verbundenen besonderen Eigenschaften des Holzes zu verdeutlichen, wird im Folgenden auf jede Ebene erklärend eingegangen. Die Informationen sind dabei von Schickhofer (2006) entnommen. Davon abweichende Quellen sind explizit angegeben. (Schickhofer, 2006)

### 1-1.1 STAMMEBENE

Schneidet man ein Keilstück aus einem Baum, so kann man im Querschnitt von außen nach innen folgende Schichten erkennen:

- Außenrinde bzw. Borke
- Innenrinde bzw. Bast
- Kambium, eine dünne Schicht lebender Zellen, welche für das Dickenwachstum des Baumes verantwortlich sind
- Holzmasse, bestehend aus Kern und Splint, sie macht den größten Teil des Stammes aus
- Markstrang

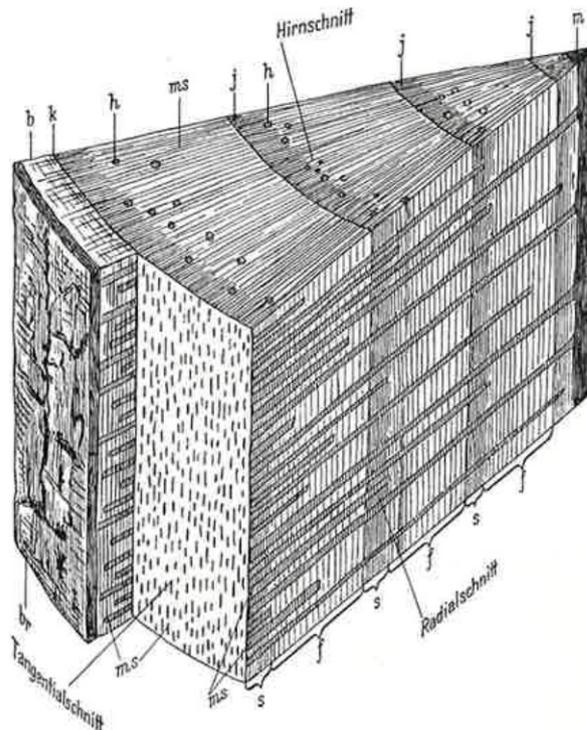


Abb. 1.2 Querschnitt einer vierjährigen Kiefer mit Bast „b“, Borke „br“, Frühholz „f“, Harzkanal „h“, Jahrringgrenze „j“, Kambium „k“, Mark „m“, Markstrahl „ms“, Spätholz „s“ (Kollmann, 1951)

Ein Baum bildet in den ersten Jahren seines Lebens sogenanntes juveniles Holz, welches unmittelbar um die Markröhre liegt. *Juveniles* Holz zeichnet sich im Normalfall durch breitere Jahrringe und somit schnellerem Wachstum aus. Die Holzeigenschaften verbessern sich von Jahr zu Jahr, erst ab dem 20. Wachstumsjahr bleiben sie in etwa konstant. Ab diesem Zeitpunkt wird das Holz *adultes* Holz genannt.

Im weiteren Alterungsprozess kommt es zu einem Verkernungsprozess, welcher den Stamm in Splint- und Kernholz teilt.

Zum Kernholz zählt der innere Bereich des Stammes. In ihm kommen keine lebenden Zellen mehr vor. Der Kern trägt nur mehr zur Standsicherheit des Baumes bei. Er zeichnet sich auch durch veränderte physikalisch-mechanische Eigenschaften aus, so ist er meist dunkler, trockener, schwerer und härter als Splintholz.

Der Splint ist der äußere Teil des Stammes und umgibt den Kern. Er besteht aus lebenden, aktiven Holzzellen und ist zuständig für die Wasserweiterleitung und die Speicherung. Neben seiner helleren Farbe ist der Splint meist weniger widerstandsfähig als der Kern und somit eher durch holzerstörende Insekten und Pilze gefährdet.

## 1-1.2 MAKROEBENE

Die Makroebene eines Stammes ist mit freiem Auge oder einer Lupe sichtbar.

Jeder Baum besitzt unter der Rinde, beim sogenannten Kambium, eine ringförmige Zuwachszone. In Klimazonen mit Jahreszeitenwechsel lässt sich dieser Zuwachs anhand der Jahrringe deutlich erkennen. Das Wachstum eines gesamten Jahres setzt sich zusammen aus dem schnell wachsenden Frühholz (heller breiter Ring, gebildet zu Beginn der Vegetationsperiode) und dem Spätholz (schmäler dunkler Ring, gebildet im Sommer). Aufgrund dieser Tatsache lässt sich am unteren Stammquerschnitt anhand der Jahrringanzahl auf das Alter des Baumes, sowie auf wachstumsbeeinflussende Faktoren (z. B. Klimaänderungen) schließen. Bäume in subtropischen und tropischen Gebieten bilden ebenso ringförmige Zuwachszonen aus, diese sind jedoch abhängig von Regen- und Trockenzeiten und somit nicht den Jahrringen entsprechend.

Ein weiteres Element der Makroebene sind die sogenannten Holzstrahlen oder auch Markstrahlen. Sie kommen bei allen Nadel- und Laubhölzern vor, sind allerdings bei jeder Holzart in Größe, Häufigkeit und Vorkommen verschieden. Holzstrahlen sind im Stammquerschnitt radial zum Stammmittelpunkt ausgerichtet und dienen als Leitungen der vom Baum gebildeten Stoffe.

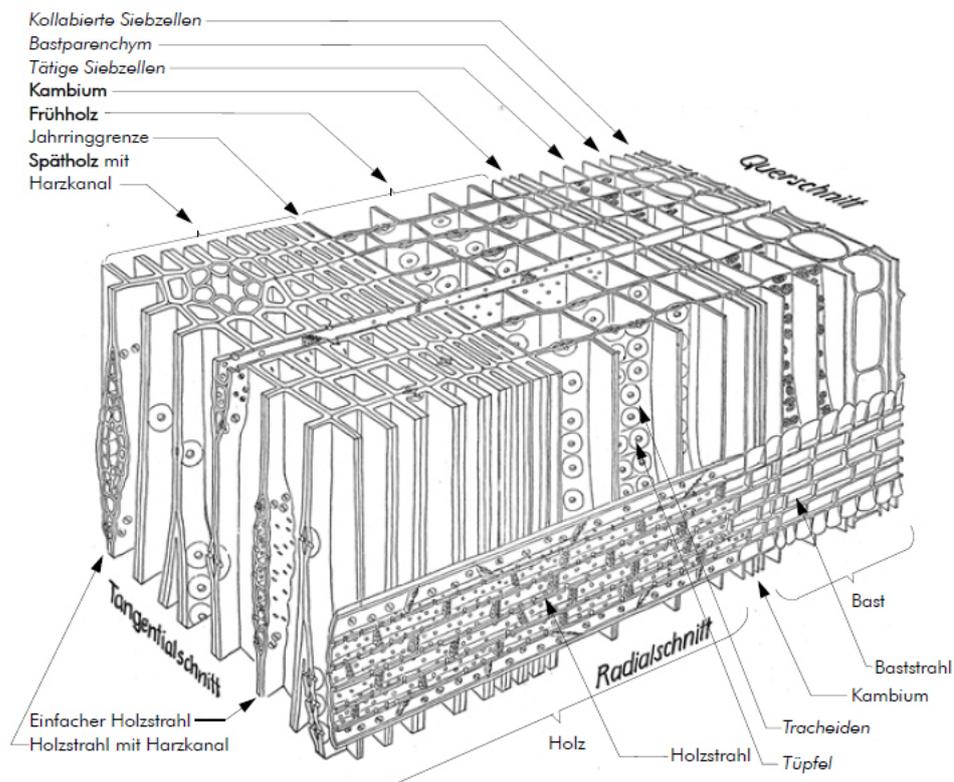
Im Spätholz einiger Nadelbäume kommen zudem sogenannte Harzkanäle vor. Sie führen in axialer sowie radialer Richtung und dienen der Produktion und zum Transport des Baumharzes.

## 1-1.3 MIKROEBENE

Um die Mikroebene eines Baumes betrachten zu können, wird ein Mikroskop benötigt. Holz besteht aus Millionen von Zellen, welche unterschiedlicher Art, Größe, Form, Anzahl und Verteilung sind. Gruppenweise auftretende gleichartige Zellen werden als Gewebe bezeichnet. Entsprechend der unter Kap. 1-1 aufgezählten Hauptaufgaben der Holzzellen unterscheidet man die drei großen Gruppen Festigungs-, Leit- und Speichergewebe. Ein Großteil der Zellen ist parallel zur Stammachse ausgerichtet (ausgenommen z. B. Holzstrahlen, Harzkanäle), man spricht deshalb von „Faserrichtung“.

Aneinandergrenzende Zellen sind mittels Öffnungen in der Zellwand miteinander verbunden, um Wasser- und Nährstofftransport zu gewährleisten. Diese Öffnungen werden als Tüpfel bezeichnet.

Entwicklungsgeschichtlich betrachtet sind Nadelhölzer älter als Laubhölzer und haben einen vergleichsweise einfachen und regelmäßigen Aufbau. Das Nadelholzgewebe besteht lediglich aus zwei verschiedenen Zelltypen: Tracheiden und Parenchymzellen.



**Abb. 1.3** Dreidimensionale Darstellung des Holzkörpers, des Kambium und des Bast am Beispiel der Lärche (Schickhofer, 2006)<sup>1)</sup>

Die Langstracheiden sind die Urform aller Holzzellen und bilden mit über 90% den größten Teil des Nadelholzkorpers. Diese langgestreckten Zellen sind axial ausgerichtet, und im Querschnitt betrachtet, in regelmäßigen radialen Reihen angeordnet. Der tangentielle Durchmesser der Tracheiden bleibt zwischen Früh- und Spätholz nahezu identisch, wobei der radiale Durchmesser beim Spätholz deutlich geringer gegenüber dem Frühholz ist. Die Wanddicke der Zellen ist bei den Spatholztracheiden ebenso größer. Aus diesen zwei Tatsachen begründet sich der Unterschied in der Rohdichte zwischen Spät- und Frühholz. (Schickhofer, 2006)

Eine Übersicht über die Anordnung und Funktion verschiedenster Nadelholzzellen ist in Tab. 1.1 gegeben.

<sup>1)</sup> Ursprüngliche Quelle: Mägdefrau, K. (1951) Botanik

**Tab. 1.1 Anordnung, Bezeichnung und Funktion unterschiedlicher Nadelholzzellen (Schickhofer, 2006)**

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

Laubholzbäume haben gegenüber den Nadelholzarten einen wesentlich komplizierteren Holzaufbau. Neben den Tracheiden und Parenchymzellen kommen eine Reihe weiterer Zelltypen hinzu, wie z. B. Gefäßtracheiden und Librifasern, welche in der Tab. 1.2 aufgelistet und kurz beschrieben werden. (Schickhofer, 2006)

Tab. 1.2 Anordnung, Bezeichnung und Funktion unterschiedlicher Laubholzzellen (Schickhofer, 2006)

Anordnung	Zelltyp	Beschreibung	Anteil rund	Funktion
axial	<b>Gefäße</b> (Tracheen)	röhrenförmige Vereinigungen axial verlaufender Gefäßglieder. <b>Gefäße</b> sind weitlumige, an den Enden perforierte, tote, verholzte Zellen; im Frühholz tonnenförmig, im Spätholz faserförmig	10 % - 20 %	Wasserleitung
	Gefäßtracheiden (vasculare Tracheiden, unvollständige Gefäßglieder)	ähneln in Form und Größe den schmalen Gefäßgliedern, aber allseitig geschlossen (keine Enddurchbrechungen), begleiten die Gefäße		Wasserleitung
	vasizentrische Tracheiden	kurz, in unmittelbarer Nähe eines Gefäßes, verschiedentlich auch im Fasergrundgewebe (z. B. Eiche, Edelkastanie)		Wasserleitung
	Fasertracheiden (Fasern mit Hoffüpfeln)	langgestreckte, mehr oder weniger dickwandige, meist englumige Zellen		Festigung
	<b>Libriformfasern</b> (Holz-) Fasern, Sklerenchymfasern)	langgestreckte, mehr oder weniger dickwandige, meist englumige Zellen	50 % – 60 %	Festigung
	Längsparenchym (Axial-, Strang-, vertikales Parenchym)	2 Zellformen: • fusiforme Zellen: querwandlos, faserförmig, oft stockwerkartig angeordnet • Parenchymstränge aus fusiformen Parenchymzellen Anordnung des Längsparenchyms wichtiges Bestimmungsmerkmal	europ. bis 10 %, nicht europ. 10 % – 20 %	Speicherung
Epithelzellen der Harzkanäle*	parenchymatische Zellen, die die Harzkanäle auskleiden		Harzausscheidung	
radial (Holzstrahl)	<b>Holzstrahlparenchym</b>	radial ausgerichtet, bandartig aufgehäufte Holzstrahlzellen; Zusammensetzung, Anordnung und Größe der Holzstrahlen wichtiges Bestimmungsmerkmal	10 % - 20 %	Speicherung
	Epithelzellen der Harzkanäle*	parenchymatische Zellen, die die Harzkanäle auskleiden		Harzausscheidung

\* Harzkanäle bei tropischen Holzarten vorkommend  
fettgedruckte Zelltypen: Ständig vorkommend (Gefäße, Holzstrahlen) bzw. überwiegend vorkommend (Libriformfasern); andere holzartenabhängig vorkommend

## 1-1.4 NANOEBENE

Betrachtet man den Werkstoff Holz auf Nanoebene, so stellt man fest, dass es sich dabei um einen Verbundwerkstoff handelt, welcher im Wesentlichen aus den makromolekularen Zellwandkomponenten Cellulose, Hemicellulose, Lignin und Pektinen besteht.

Nach Vorstellung des „Neuen Zellwandmodells“ von Zimmer & Sell (1997) besteht eine Zellwand wie in Abb. 1.4 dargestellt aus einer Mittellamelle (M), einer Primärwand (P) und einer dreischichtigen Sekundärwand (S1, S2, S3). Zwei aneinander liegende Zellen teilen sich die Mittellamelle, welche zu

einem großen Teil aus Lignin besteht und somit eine hohe Druckfestigkeit aufweist. Auf ihr bauen alle anderen Zellwandschichten auf. Die Primärwand wird gemeinsam mit der Mittellamelle oft unter dem Namen „Mittelschicht“ zusammengefasst, da sie mikroskopisch schlecht unterschieden werden können. Den größten Teil einer Zellwand nimmt die Sekundärwand ein. Sie ist in lamellaren Schichten aufgebaut und besitzt einen sehr großen Celluloseanteil. Die Sekundärwand wird in drei Teile geteilt, welche sich in ihrer Dicke, dem Cellulosegehalt und der Orientierung ihrer Cellulosefibrillen unterscheiden. (Schickhofer, 2006)

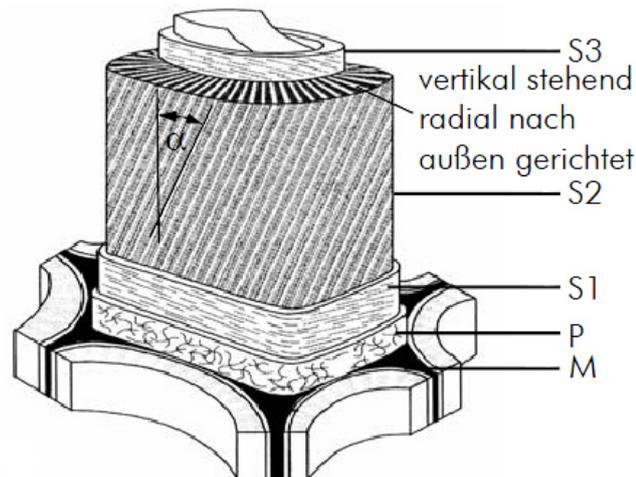


Abb. 1.4 Zellwandmodell (Zimmer & Sell, 1997)

Auf die molekulare Ebene und somit den atomaren Aufbau der einzelnen Holzbestandteile wird im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter eingegangen.

## 1-2 FURNIERHOLZ

Aus dem natürlich gewachsenen Material Holz lassen sich mittels verschiedenster industrieller Bearbeitungsschritte eine Vielzahl von Holzwerkstoffen herstellen. Eine Besondere Gruppe bilden dabei die aus Furnieren erzeugten Produkte. Als Furnier bezeichnet man dünne Holzblätter, welche man gemessert, geschält oder gesägt aus einem Stamm gewinnt.

Holzurniere fanden bereits im Altertum Anwendung zur Herstellung von Einlegearbeiten und zur Veredelung von Schnittkanten. Nach den anfänglich ausschließlich ästhetischen Beweggründen veranlassten wirtschaftliche Gesichtspunkte die Menschen erst im achtzehnten Jahrhundert dazu, Furniere vermehrt im Möbelbau und zur Fertigung von geschwungenen Formen zu verwenden. Die wissenschaftlichen Erkenntnisse um das Tragverhalten von quer- und schichtverleimten Furnieren führte erst Anfang des zwanzigsten Jahrhunderts zum ingenieurmäßigen Einsatz in Tragstrukturen. (Kollmann, 1955)

Um als statisch wirksames Element in Bauwerken zum Einsatz zu kommen, müssen die Einzelfurniere zu mehrschichtigen Platten verleimt werden. Bei Furnierschichtholz, oder kurz LVL (engl. laminated veneer lumber) handelt es sich laut Definition der ÖNORM EN 14279:2009 um einen „*Verbund aus Furnieren, in dem die Furniere vorwiegend in derselben Faserrichtung ausgerichtet sind*“. Angemerkt sei in diesem Zusammenhang, dass diese Definition Furnierschichtholz mit eingebauten Querlagen nicht ausschließt. Das bedeutet, LVL kann auch als Sperrholz ausgeführt werden. Laut ÖNORM EN 313-2:2000 ist Sperrholz definiert als ein „*Holzwerkstoff aus einem Verbund miteinander verklebter Lagen, wobei die Faserrichtung aufeinanderfolgender Lagen meistens rechtwinklig zueinander verlaufen*“.

Eine übersichtliche Darstellung zur Einteilung der Furnierarten bietet die DIN 68330, welche in Abb. 1.5 dargestellt ist. Die Einteilung erfolgt primär nach der Art der Verwendung und nach der Art der Herstellung.

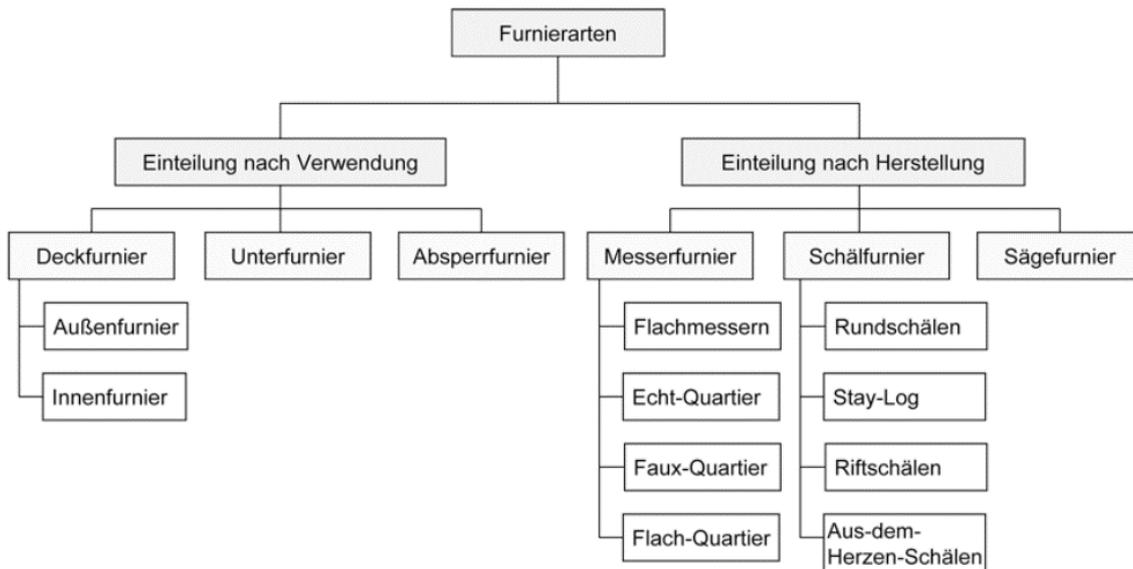


Abb. 1.5 Übersicht zur Einteilung der Furnierarten nach DIN 68330

## 1-2.1 HERSTELLUNG VON EINZELFURNIEREN

Um aus einem runden Baumstamm das fertige Furnierblatt zu erhalten sind eine Reihe von Bearbeitungsschritten notwendig. In Abb. 1.6 ist eine Beispielübersicht über die Reihenfolge der notwendigen Prozesse gegeben. Nach der sachgemäßen Lagerung der Stämme werden sie zunächst gedämpft, um das Holz geschmeidig zu machen und den Schäl- oder Messervorgang zu erleichtern. Im Anschluss werden die Stämme auf die bearbeitbare Länge der Schäl- oder Messermaschine formatiert. Nach dem Herstellen der einzelnen Holzblätter folgt der Zuschnitt der noch feuchten Furniere, welche anschließend getrocknet und sortiert werden.

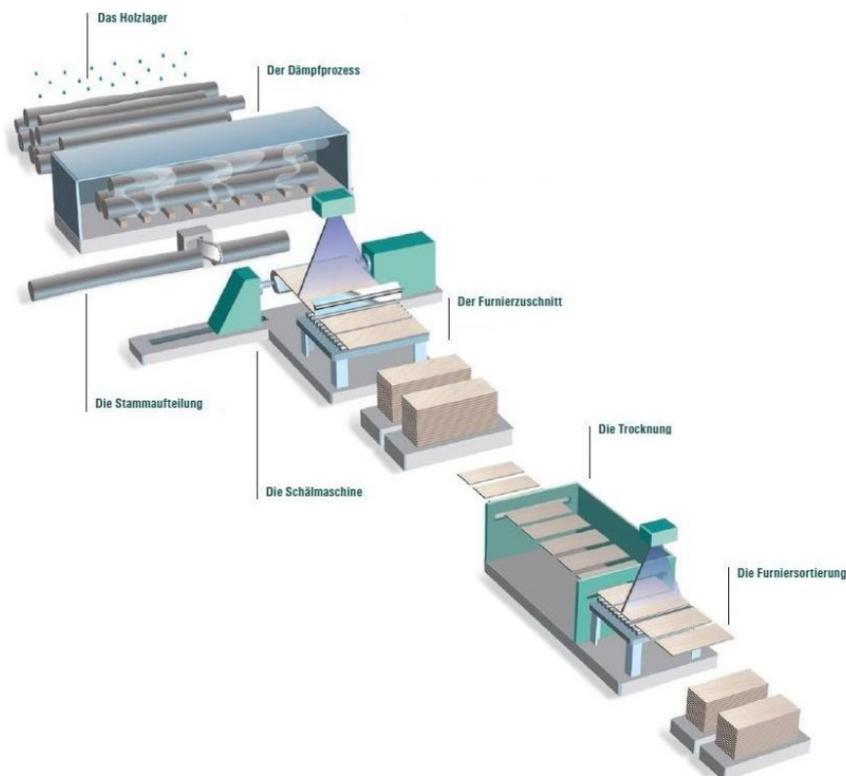


Abb. 1.6 Übersicht über die einzelnen Prozesse der Furnierherstellung am Beispiel von Schälrfurnieren (Becker & Zimmer, 2014)

In Abb. 1.6 ist ein Beispielprozess für die Herstellung von Schäl furnieren dargestellt. Da es allerdings verschiedene Methoden gibt, um vom Stamm zum fertigen Furnier zu gelangen, werden im Folgenden die einzelnen Schritte der Herstellung etwas ausgeführt.

### 1-2.1.1 Vorbereitung

Für die Produktion von Furnieren ist bereits die richtige Lagerung des Rundholzes von großer Bedeutung. Die Stämme müssen feuchtgehalten werden, damit keine Trocknungsrisse entstehen können. In seltenen Fällen werden auch mechanische Hilfsmittel, wie beispielsweise Eisenklammern, verwendet, welche ins Hirnholz eingetrieben werden und so die Rissbildung unterbinden sollen. (Kollmann, 1962)

Als Vorbereitung auf den Messer- bzw. Schälvorgang werden die Stämme zunächst entrindet, wobei zeitgleich der Baum von Fremdkörpern, wie Steine, Nägel oder Schmutz befreit wird.

### 1-2.1.2 Kochen oder Dämpfen

Wird zur Furnierherstellung das Messer- oder Schälverfahren verwendet, so wird das entrindete Rundholz zunächst in einem heißen Wasserbad gekocht oder gedämpft. Holzarten, welche beim Kochen ihre Farbe (hauptsächlich Edelhölzer) ungewünscht verändern, werden nicht gekocht. Aus diesen Holzsorten wird mittels Sägeverfahren Furnier hergestellt.

Da dies allerdings nur in wenigen Fällen erforderlich ist, erfolgt ein Großteil der Furnierherstellung mittels Schälen oder Messern. Aus diesem Grund ist eine Dämpf- oder Kochanlage ein wichtiger Bestandteil eines jeden Furnierwerks. Die Angaben über Dämpf- und Kochtemperatur sowie die Dauer des Vorganges schwanken in der Literatur und den Betriebsanweisungen der Praxis stark. Dies liegt sicherlich daran, dass dieser Vorgang von vielerlei Faktoren abhängt: Holzart, Stammdurchmesser, Stammlänge, Rohdichte... (Kollmann, 1955)

Nur sehr wenige Hölzer sind von Natur aus so weich, dass sie sich waldfrisch messern bzw. schälen lassen. Bei allen anderen Hölzern wird durch den Dämpfvorgang die Plastizität eines Stammes erhöht, was den Messer- oder Schälvorgang wesentlich verbessert. Ein positiver Nebeneffekt des Kochens ist zudem, dass sich Schmutz und Rindenreste vom Stamm lösen.

Unter dem Begriff „Kochen“ versteht man das Behandeln des Holzes mit heißem Wasser, wobei die Wassertemperatur den Siedepunkt nicht überschreitet. Die Temperatur und Dauer des Kochvorganges wird meist nach Erfahrungswerten der jeweiligen Produktionsstätte gewählt und ist wesentlich für die spätere Furnierqualität. Die Stämme sollten so lange gekocht werden, bis eine erforderliche Mindesttemperatur erreicht ist und es zu einer möglichst gleichmäßigen Temperaturverteilung über den Rundholzquerschnitt kommt. (Kollmann, 1962)

Beim sogenannten „Dämpfen“ kommt es zu einem Wärmeaustausch von Holz und heißem Dampf in der Luft. Man unterscheidet zwei wesentliche Dämpfverfahren: das direkte und das indirekte Dämpfverfahren. Beim direkten Verfahren wird der Dampf außerhalb der Dämpfgrube erzeugt und über Rohre dorthin geleitet. Dabei soll darauf geachtet werden, den Dampf möglichst gleichmäßig einzuleiten und nicht direkt auf das Holz zu leiten. Beim indirekten Verfahren hingegen befindet sich am Boden der Dämpfgrube ein Wasserbad. Mit Heizschlangen wird so das Wasser zum Kochen gebracht. Dieses Verfahren ermöglicht einen gleichmäßigeren Temperaturanstieg, was zu einem schonenderen Dämpfvorgang des Holzes führt. Generell ist darauf zu achten, dass die Stämme so gut wie möglich vom Dampf umspült werden können.

Zu schnelles Aufheizen führt zum Aufreißen des Holzes. Zu lange Dämpfzeiten führen zu inneren Spannungen und verursachen ebenfalls Risse im Holz. Deshalb kann es bei sehr dicken Stämmen von Vorteil sein, nur so weit zu dämpfen, dass bis zu einem Durchmesser von etwa 40 cm geschält werden kann. Danach wird der Restquerschnitt wiederum in die Dämpfgrube gegeben. (Kollmann, 1962)

### 1-2.1.3 Sägen, Schälen und Messern der Furniere

Um Furniere herzustellen gibt es verschiedene Verfahren. Zu den spanlosen Arten der Herstellung zählen die Messer- und Schälmethode. Bei diesen Varianten gilt es jedoch, das Holz durch sorgfältige

Vorbehandlung geschmeidig und somit schneidfähig zu machen. Im Gegensatz dazu wird auch als spangebende Alternative das sogenannte Sägefurnier produziert.

Um eine hinreichende Furnierqualität zu erreichen und gleichmäßige Dicke, glatte Oberflächen sowie Riss- und Bruchfreiheit zu garantieren nennt Kollmann (1962) folgende Voraussetzungen:

- Verwendung geeigneter Holzarten
- ausreichende Stammqualität bezüglich Faserverlauf und Wuchs
- sorgfältige Vorbehandlung (Kochen/Dämpfen) sofern erforderlich
- Wahl der Schnittgeschwindigkeit
- Maschinen möglichst vibrationsfrei
- Schliff, Form und Ausrichtung von Messer und Druckleiste
- rechtzeitiger Wechsel von Werkzeugen
- Korrosionsschutz der Eisenteile, um Verfärbungen auf das Holz zu vermeiden.

## Sägen

Sägefurniere sind aufgrund des großen Schnittverlustes die teuersten Furniere. Dieses, mittels einer Segmentkreissäge durchgeführte Verfahren, ist die älteste Art der maschinellen Furnierherstellung. Damit lassen sich Furnierdicken von 1 mm sägen. Bei Verwendung von speziellen Sägeblättern und in Abhängigkeit der Holzart ist eine Dicke von 0,5 bis 0,8 mm herstellbar. Die Schnittbreite der Sägeblätter liegt in einem Bereich zwischen 1 bis 1,6 mm, der Durchmesser der Säge liegt üblicherweise zwischen 1,5 und 5,5 m. Die Herstellung von Sägefurnier ist deutlich zeitaufwändiger als bei anderen Herstellungsverfahren und wird in heutiger Zeit nur mehr bei sehr hohen Qualitätsanforderungen eingesetzt. (Kollmann, 1955)

## Schälen

Beim sogenannten Schälen wird der Holzblock entlang seiner faserparallelen Achse eingespannt und gedreht. Während des Drehvorganges erfolgt das Abschneiden des Furnierblattes vom Block. Das Messer bleibt während dem Schälvorgang starr, es wird lediglich pro Umdrehung des Stammes um die gewünschte Furnierdicke zur Drehachse hin verschoben. Damit beide Seiten des Furniers glatt und bruchfrei sind, muss das Holz während des Schneidevorganges vor der Messerschneide von einer Druckleiste zusammengedrückt werden. Diese Druckleiste dient zum einen zur Führung des Stammes bei der Drehbewegung, zum anderen wird das Holz so vor dem Schneiden verdichtet, um eine Spaltung des Holzes an der dem Messer zugewandten Seite zu verhindern. Wie wichtig dieser aufgebrachte Druck ist, wird in Abb. 1.7 deutlich. Der Radius der Außenseite des Furnierblattes ist um die Furnierstärke größer als der Radius der Innenseite. Die geschälten Furniere werden jedoch trotz ihrer geringen Krümmung in den weiteren Bearbeitungsschritten stets flachliegend transportiert. Die Beschaffenheit der beiden Furnierseiten ist unterschiedlich, man spricht auch von der „geschlossenen“ (Druckleisten-) Seite und der „offenen“ (Messer-)Seite. (Kollmann, 1955)



*Abb. 1.7 Vergrößerte Ansicht eines Schälmessers mit loser Druckleiste (links) und andgedrückter Druckleiste (rechts) beim Schälen eines 7,9 mm starken Gelbbirkenfurniers (Kollmann, 1955)*

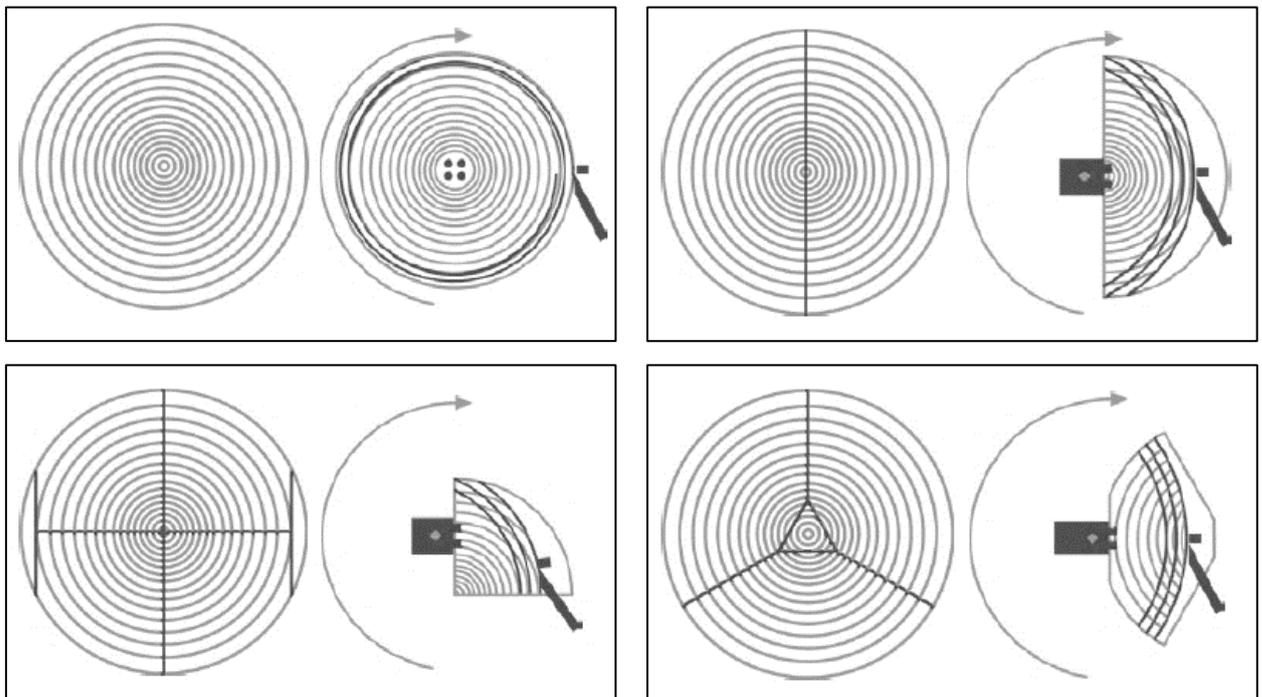
Je nach Art der Blockeinspannung unterscheidet Wagenführ et al. (2011) folgende Schälbezeichnungen, welche auch in Abb. 1.8 dargestellt sind:

Beim *Rundschälen* wird der gesamte Stamm an seiner Mittelachse eingespannt und gedreht. Das Schälmesser ist parallel zur Drehachse ausgerichtet und schiebt sich mit konstanter Geschwindigkeit gegen den Schälklotz. Dadurch wird spiralförmig das Furnierblatt abgetrennt, welches theoretisch eine Länge der gesamten Abwicklungsfläche des Stammes besitzt.

Beim *Stay-Log-Schälen* wird der Stamm zunächst halbiert, um ihn dann mit seiner Kernseite am Drehbalken zu befestigen und von der Außenseite her zu schälen. Aufgrund der Drehung des halbierten Stammes kommt es zu einer exzentrischen Drehbewegung, weshalb diese Variante auch *Exzentrisch-Schälen* genannt wird. Die Position des Schälmessers ist so gewählt, dass die Jahrringe in einem sehr flachen Winkel angeschnitten werden.

Wird ein Stamm geviertelt und an einer der beiden ebenen Seiten eingespannt, spricht man von *Riftschälen*. Geschält wird von der gegenüber liegenden Seite, die Drehbewegung des Blockes ist auch in diesem Fall exzentrisch.

Zum *Aus-dem-Herzen-Schälen* wird der Stamm in drei oder vier Teile geschnitten und an der Außenseite abgeflacht. Dort wird der Block auch am Drehbalken eingespannt, um ihn von seiner Kernseite her (aus dem Herzen) zu schälen. (Wagenführ, et al., 2011)



**Abb. 1.8 Übersicht über verschiedene Schälmethoden: Rundschälen (o.l.), Stay-Log-Schälen (o.r.), Riftschälen (u.l.) und Aus-dem-Herzen-Schälen (u.r.) (Wagenführ, et al., 2011)**

Unterschiedliche Schälmethoden werden oftmals eingesetzt, wenn eine bestimmte Maserung des Furniers gewünscht wird. Die Wahl von speziellen Verfahren hat somit großteils optische Gründe. Für die Herstellung des Rohmaterials zur Fertigung von tragenden Bauteilen, wie Trägern und Platten, wird fast ausschließlich das Rundschälverfahren verwendet. Die großen Vorteile liegen dabei vor allem in der Schnelligkeit des Schälprozesses und dem Fakt, dass dabei ein sehr langes Furnierblatt (theoretisch die gesamte Abwicklungslänge des Stammes) entsteht, welches beliebig zugeschnitten werden kann und somit das Herstellen von großflächigen Bauteilen wesentlich vereinfacht. Das Fügen und Stoßen von vielen kleinen Einzelfurnierblättern entfällt ebenso. Außerdem kommt es beim spanlosen Schneidevorgang zu keinem Querschnittsverlust, was eine gute Ausbeute zur Folge hat. Aus diesen Gründen eignet sich das Rundschälverfahren am besten zur automatisierten Serienproduktion von Furnierwerkstoffen. (Schickhofer, 2006)

## Messern

Wird ein Furnierblatt von einem Furnierblock geschnitten, indem sich der Block horizontal oder vertikal über ein Messer bewegt, spricht man von Messern. Abhängig davon, ob das Messer parallel oder senkrecht zur Faserrichtung geführt wird dabei zwischen Längs- und Quermessern unterschieden.

Ähnlich wie beim Hobeln erfolgt die Schnittführung beim Längsmessern parallel zur Faser. Die erzielte Oberflächenqualität ist dabei sehr gut, es sind Dicken zwischen 0,3 und 13 mm herstellbar. In Deutschland wird hauptsächlich Quermessern eingesetzt, dabei gibt es im Wesentlichen vier verschiedene Schnitttechniken, welche unterschiedliche Furnierbilder erzeugen:

Beim sogenannten *Flachmessern* wird der Baumstamm halbiert, die Stammhälfte wird mit der Kernseite am Messertisch befestigt und von außen her gemessert. Das Furnierbild ändert sich im Laufe des Messervorganges, da anfangs die Fasern in einem flachen Winkel angeschnitten werden, im weiteren Verlauf wächst der Anschnittwinkel jedoch bis er nahezu 90° erreicht.

Zum *Echt-Quartier-Messern* wird der Stamm in vier Teile geschnitten und so aufgespannt, dass das Messer annähernd im rechten Winkel zu den Jahrringen schneidet.

Beim *Faux-Quartier-Messern* wird der Baumstamm ebenso geviertelt und an einer der radial verlaufenden Schnittflächen eingespannt. Dabei kommt es ähnlich wie beim Flachmessern am Beginn des Messervorganges zu einem Anschnitt in flachem Winkel zur Faser, im weiteren Verlauf nimmt der Anschnittwinkel jedoch zu.

Das *Flach-Quartier-Messern* entspricht im Wesentlichen dem Flachmessern, allerdings wird hierbei anstelle eines halben Stammes nur ein Viertelstamm verwendet. (Wagenführ, et al., 2011)

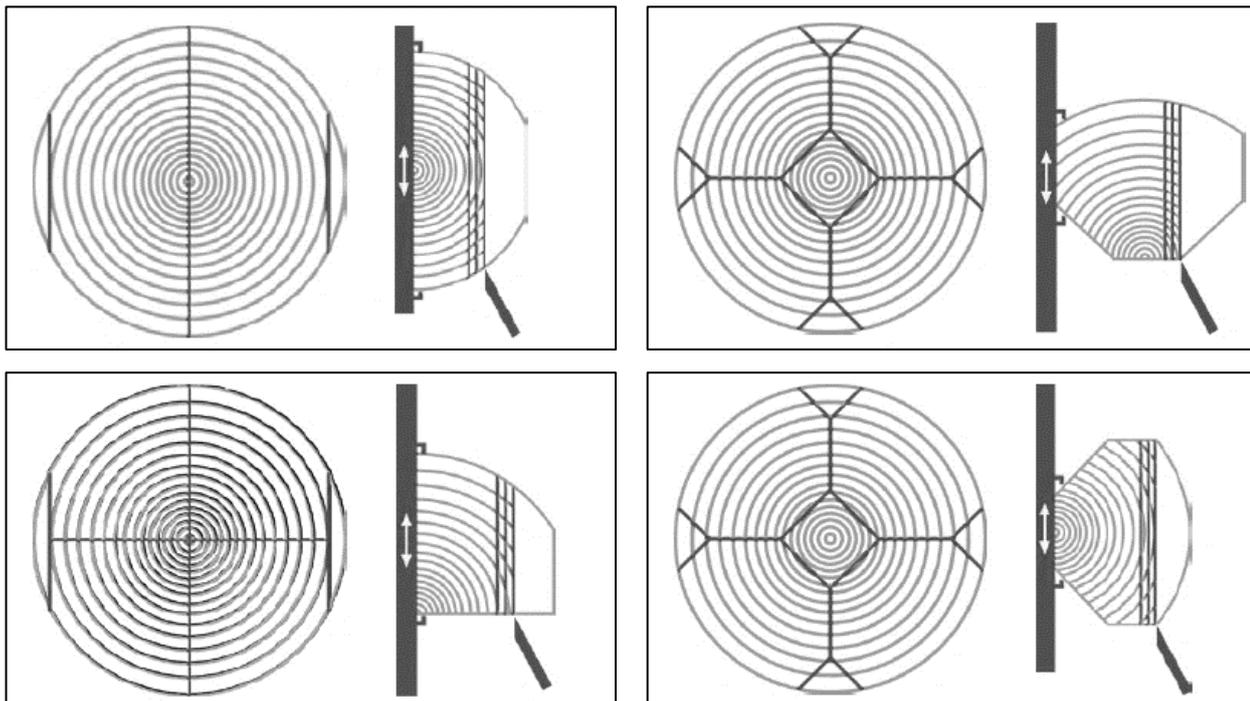


Abb. 1.9 Übersicht über verschiedene Messermethoden: Flachmessern (o.l.), Echt-Quartier-Messern (o.r.), Faux-Quartier-Messern (u.l.) und Flach-Quartier-Messern (u.r.) (Wagenführ, et al., 2011)

## Zuschneiden und Trocknen

Bei allen Messer- und Sägefurnieren und bei den meisten Arten der Schäl furniere ist die Länge der Blätter abhängig von der Stammlänge, die Breite ist herstellungstechnisch bedingt. Lediglich beim Schäl furnier wird ein „endlos“ langes Blatt erzeugt, welches unmittelbar nach dem Schälvorgang auf die gewünschte Breite zugeschnitten wird.

Da die Furniere nach dem Schälen aufgrund des vorangegangenen Dämpf- bzw. Kochvorganges nass sind, müssen sie getrocknet werden. Die gewünschte Holzfeuchte nach dem Trocknen liegt je nach

Anforderung zwischen 6 und 12%. Zu trockene Furniere sind brüchig und spröde, zu feuchte hingegen sind gefährdet durch Pilzbefall oder chemischen Reaktionen.

Der Trockenvorgang wird in den meisten Fällen mittels Heißluft in Durchlauföfen bei Temperaturen zwischen 60°C und 180°C durchgeführt. Die genaue Temperatur sowie die Trocknungsdauer hängen stark von der Holzsorte, aber auch von der Dicke der Furniere und der gewünschten Endfeuchtigkeit ab. Viele Furniere neigen aufgrund der Dichteunterschiede zwischen Früh- und Spätholz der Jahrringe dazu, im Verlauf des Trockenvorganges wellig zu werden. Um diesem Effekt entgegen zu wirken, werden die Trocknungsanlagen häufig mit zusätzlichen heißen Walzen ausgestattet, welche eine Art Bügeleffekt erzielen. Einige Hölzer (wie z.B. Buche) neigen dazu, beim Trocknen sehr starke Wellen zu bilden. In diesen Fällen reicht das Walzen nicht mehr aus, die Furniere müssen durch zusätzliches Pressen geglättet werden. (Wagenführ, et al., 2011)

## 1-2.2 EIGENSCHAFTEN UND AUFBAU VON FURNIERSCHICHT UND FURNIERSPERRHOLZ

Bei Holz handelt es sich um ein natürlich gewachsenes Material. Jeder Baum besitzt sogenannte Wuchsmerkmale, welche als „Strukturstörungen“ angesehen werden können. Diese Merkmale beeinträchtigen die Tragfähigkeits- und Steifigkeitseigenschaften eines Holzes in Bauteilgröße. Zu den wichtigsten Wuchsmerkmalen zählen Astigkeit, Faserneigung bzw. Drehwuchs, Jahrringbreite und juveniles Holz. Merkmalsfreies Holz besitzt deutlich bessere Festigkeits- und Steifigkeitskenngrößen als Holz mit Strukturfehlern. Ist in einem Vollholzträger beispielsweise ein Ast, so kann es aufgrund der dortigen lokalen Schwächung zu frühzeitigem Versagen führen. (Schickhofer, 2006)

Um dem entgegenzuwirken wird im Ingenieurholzbau das Holz „sortiert“, um mechanische und physikalische Eigenschaften zu homogenisieren. So wird zum Beispiel ein Brettschichtholzträger aus zusammengeleimten Einzelbrettern hergestellt. Diese Bretter werden zunächst durch visuelle und maschinelle Sortierung verschiedenen Güteklassen zugeordnet. Unzulässig große Äste, Rindeneinschlüsse oder andere unerwünschte Wuchsmerkmale werden aussortiert.

Tritt bei einem Konstruktionsvollholz eine Fehlstelle (beispielsweise ein Ast) auf, so reicht er zumeist über einen Großteil des Querschnittes, die Schwächung ist somit immens. Kommt bei einem Brettschichtholzträger dieselbe Fehlstelle vor, so ist diese lokal auf eine einzelne Lamelle beschränkt. Die statistische Wahrscheinlichkeit, dass in einem bestimmten Querschnitt Fehlstellen in mehreren Lamellen gleichzeitig auftreten, ist gering. Man spricht vom Prozess der Homogenisierung, da durch die schichtweise Verleimung von Holz das Gesamtverhalten des Trägers dem von merkmalsfreiem Holz angenähert wird. Je kleiner die unterschiedlichen Teilmengen (sprich Brettdicken) sind, desto geringer ist der Einfluss einer Fehlstelle auf den Gesamtquerschnitt. Der Homogenisierungseffekt wird dadurch noch stärker, die Streuung der Materialeigenschaften wird geringer, somit werden charakteristischen Festigkeits- und Steifigkeitswerte erhöht. (Schickhofer, 2006)

Da Furniere in der Regel sehr dünn sind, zeigt die Homogenisierung besonders große Wirkung. Werden mehrere einzelne Furnierlagen faserparallel verklebt spricht man von Furnierschichtholz. Die Furniere werden mit dichtschießenden Schäftungsfugen gestoßen, welche um mindestens 150 mm versetzt angeordnet werden. Wenn einzelne Lagen im rechten Winkel zur Haupttragrichtung angeordnet sind, so wird von Furniersperrholz gesprochen.

Furnierschicht- und Furniersperrholz kann aus verschiedenen Holzsorten hergestellt werden. Zu den wichtigsten Herstellern in Europa zählt im Bereich Nadelholz das finnische Unternehmen Metsä Wood (ehemals Finnforest, Produktname „Kerto“) und im Bereich von Laubholz das deutsche Unternehmen Pollmeier (Produktbezeichnung „Baubuche“).

Da in der vorliegenden Arbeit mit Nadelholzfurnieren bestehend aus Fichte gearbeitet wurde, und als Grundlage für die Wahl des Schichtaufbaus und der angesetzten Werkstoffkenngrößen die Zulassung von Kerto<sup>2)</sup> diente, wird im Folgenden kurz auf die Herstellung und die Eigenschaften von Kerto eingegangen.

---

<sup>2)</sup> Zulassungsnummern: Z-9.1-100 (2016) und Z-9.1-847 (2016)

## Kerto-S und Kerto-Q

Kerto besteht aus mehreren Schichten von Nadelholzfurnieren. In den meisten Fällen kommt finnisches Fichtenholz zum Einsatz. Die Einzelfurniere werden mittels Schälverfahren produziert und weisen eine Dicke von 3 mm auf. Unmittelbar nach dem Schälen werden die Furniere in einem Durchlaufverfahren mit versetzten Stößen geklebt, dabei wird ein Phenolharz-Klebstoff verwendet. In der Heißpresse wird das Furnier bei etwa 140°C und einem Druck von rund 1,5 N/mm<sup>2</sup> gepresst. So ist es möglich bis zu 25 m lange Platten zu fertigen. (MetsäWood, 2014) (Schickhofer, 2006)

In Abb. 1.10 sind die wesentlichen Herstellungsprozesse übersichtlich dargestellt.

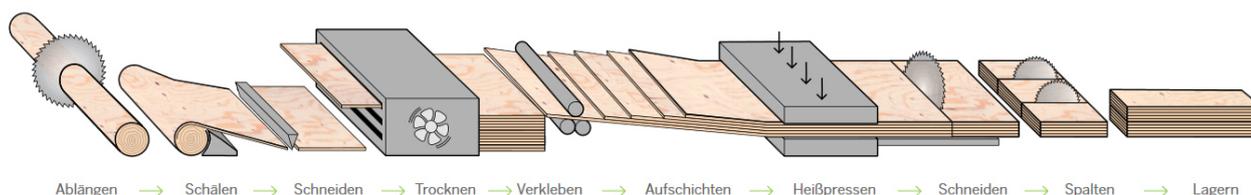


Abb. 1.10 Herstellungsprozess von Kerto (MetsäWood, 2014)

Die maximal herstellbare Breite liegt bei 2,5 m. Handelt es sich bei der hergestellten Platte ausschließlich um Furniere mit derselben Faserorientierung spricht man von Furnierschichtholz, oder Kerto-S. Diese Platten sind in Dicken zwischen 21 mm (7-schichtig) und 75 mm (25-schichtig) erhältlich. Werden innenliegende Querlagen angeordnet handelt es sich um Furniersperrholz mit dem Namen Kerto-Q. Die Plattenstärken reichen hier ebenfalls von 21 mm bis 75 mm. Der Schichtaufbau ist stets symmetrisch. Sämtliche hergestellte Aufbauten von Kerto-Q sind in Tab. 1.3 aufgelistet.

Tab. 1.3 Produzierte Schichtaufbauten von Kerto-Q mit Plattenstärke „t“, Anzahl aller Furnierschichten „m“, Anzahl der Querlagen „n“ aus der Zulassung Z-9.1-847 (2016)

t <sup>1)</sup> [mm]	m <sup>2)</sup>	"KERTO-Q <sup>®</sup> "		"KERTO-Qp <sup>®</sup> "	
		n <sup>4)</sup>	Aufbausymbol <sup>3)</sup>	n <sup>4)</sup>	Aufbausymbol <sup>3)</sup>
21	7	2	—  —  oder   — —		
24	8	2	—  —		
27	9	2	—  —		
33	11	2	—    —		
39	13	3	—  —  —  —	2	—    —  —
45	15	3	—    —    —	2	—    —    —
51	17	3	—    —    —	2	—    —    —
57	19	4	—  —    —  —	2	—    —    —
63	21	5	—  —  —  —  —	2	—    —    —
69	23	5	—    —  —  —  —	2	—    —    —
75	25	5	—    —  —  —  —	2	—    —    —

Aufgrund der dünnen Einzelemente und dem infolgedessen hohen Grad der Homogenisierung erreicht Furnierschichtholz im Vergleich zu Brettschichtholz bessere Materialkenngrößen. Dies wird erreicht, da die Fehlstellen bei der Produktion des Furnierschichtholzes minimiert und über die gesamte Platte verteilt werden. Außerdem ist Kerto bei Änderung der Holzfeuchtigkeit sehr formstabil. (MetsäWood, 2014). In Tab. 1.4 sind die charakteristischen Festigkeits- und Steifigkeitskennwerte aus der Kerto Anwendungszulassung aufgelistet. Die Werte stammen aus den jeweiligen produktspezifischen Leistungserklärungen des Herstellers.

Tab. 1.4 Charakteristische Festigkeits- und Steifigkeitskennwerte aller Kerto-Produkte gemäß der Leistungserklärung des Herstellers laut Zulassung Z-9.1-847 (2016)

Art der Beanspruchung	Bezeichnung	Kerto S	Kerto Q		Kerto Qp	
	Neendicke [mm]	$21 \leq t \leq 90$	$21 \leq t \leq 24$	$27 \leq t \leq 75$	$39 \leq t \leq 51$	$54 \leq t \leq 75$
<b>Charakteristische Festigkeitskennwerte [N/mm<sup>2</sup>]</b>						
<b>Plattenbeanspruchung</b>						
Biegung    z. Faser	$f_{m,0,flat,k}$	50	32	36	36	36
Biegung $\perp$ z. Faser	$f_{m,90,flat,k}$	-	8 <sup>1)</sup>	8	NPD	NPD
Druck	$f_{c,90,flat,k}$	1,8	2,2	2,2	siehe LE	siehe LE
Schub	$f_{v,flat,k}$	2,3	1,3	1,3	1,3	1,3
<b>Scheibenbeanspruchung</b>						
Biegung	$f_{m,0,edge,k}$	44	28	32	36	38
Zug parallel	$f_{t,0,k}$	35	19	26	28	30
Zug rechtwinklig	$f_{t,90,edge,k}$	0,8	6	6	3	2,5
Druck parallel	$f_{c,0,k}$	35	19	26	28	30
Druck senkrecht	$f_{c,90,edge,k}$	6	9	9	6	6
Schub	$f_{v,edge,k}$	4,1	4,5	4,5	4,1	4,1
<b>Steifigkeitskennwerte [N/mm<sup>2</sup>]</b>						
Elastizitätsmodul	$E_{0,mean}$	13800	10000	10500	11700	12300
Elastizitätsmodul	$E_{0,05}$	11600	8300	8800	9800	10300
Elastizitätsmodul	$E_{90,mean}$	-	1200 <sup>1)</sup>	2000	NPD	NPD
Schubmodul	$G_{mean,edge}$	600	600	600	600	600
	$G_{mean,flat}$	600	60	120	120	120
<b>Weitere Kennwerte</b>						
Rohdichte	$\rho$ [ kg/m <sup>3</sup> ]	510	510	510	510	510
char. Rohdichte	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	480	480	480	480	480
Klasse des Brandverhaltens		D-s1,d0	D-s1,d0	D-s1,d0	D-s1,d0	D-s1,d0
Streuungsparameter s		0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
<sup>1)</sup> Für B = 21 mm und den Furnieraufbau I-III-I darf $f_{m,90,flat,k} = 14 \text{ N/mm}^2$ bzw. $E_{90,mean} = 3300 \text{ N/mm}^2$ angenommen werden.						

## 1-3 DURCHBRÜCHE

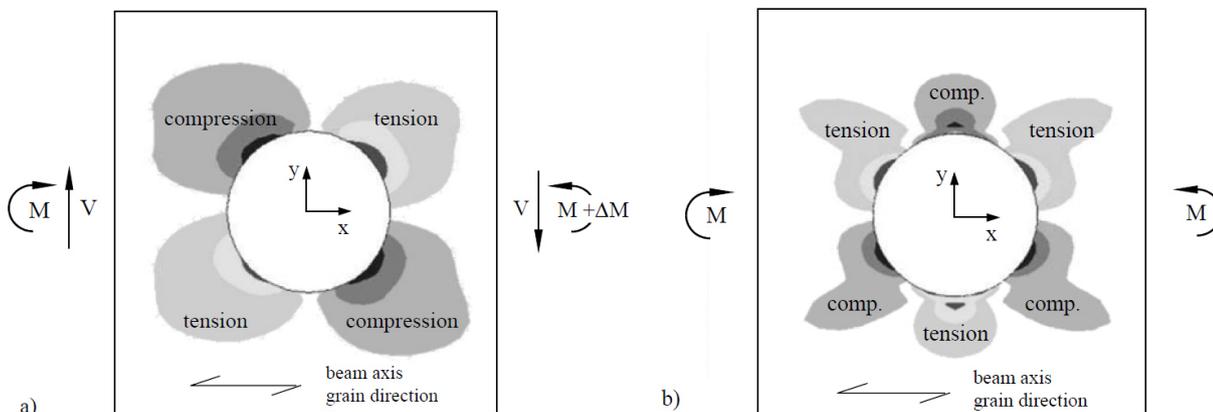
Im Hochbau kommt es häufig vor, dass tragende Strukturen und Leitungen der Gebäudetechnik sich kreuzen, da sie aus Gründen der Raum- und somit Kostenersparnis bevorzugt auf gleicher Höhe geführt werden. Diese Kreuzungspunkte machen die Ausführung eines Durchbruchs in der Tragstruktur notwendig. Die Installationen, beispielsweise Heizungs- oder Lüftungsrohre, Strom- oder Wasserleitungen, können so geradewegs durch den Träger geführt werden. Gleichzeitig bewirkt ein Durchbruch allerdings eine erhebliche Querschnittsreduktion und somit eine wesentliche Schwächung des Trägers an eben jener Stelle. Öffnungen in Trägern haben üblicherweise eine runde oder rechteckige Form. Die Aussparungen im Träger bewirken eine Störung des Kraftflusses, es kommt zu Umlenkkräften im Träger und zu daraus folgenden Spannungskonzentrationen am Durchbruchrand.

Um der Schwächung des Trägers sowie einem spröden Versagen aufgrund der Spannungskonzentration entgegenzuwirken, werden verschiedenste Methoden der Verstärkung eingesetzt. Ziel ist es, die Tragfähigkeit und Steifigkeit eines undurchbrochenen Trägers wieder herzustellen.

Im Folgenden wird nun auf die Berechnung der maßgebenden Spannungen am Durchbruchrand, sowie auf die Bemessung möglicher Verstärkungen eingegangen und ein kurzer Überblick über verschiedene Forschungsberichte gegeben.

### 1-3.1 BERECHNUNG DER SPANNUNGEN

Wie bereits erwähnt, kommt es aufgrund der fehlenden Querschnittsfläche im Bereich des Durchbruchs zu einer Störung des Kraftflusses im Träger. Die Schubspannungen können nicht mehr über die gesamte Trägerhöhe übertragen werden, infolge dessen müssen sie auf die verbleibende Querschnittsfläche umgelagert werden. Aufgrund der Umlagerungen entstehen rund um den Durchbruch Kraftkomponenten quer zur Faserrichtung. Auch das Biegemoment leistet einen Beitrag zu den Querdruck- bzw. Querkzugkräften. Die Lage und Größe dieser Kräfte hängt im Wesentlichen mit dem Verhältnis aus  $M/V$  und den Durchbruchs- und Querschnittsabmessungen zusammen. (Aicher & Höfflin, 2004)



**Abb. 1.11 Lage und Vorzeichen der Spannungen senkrecht zur Faserrichtung bei a)  $M/V = 1,5 \cdot h$  und reiner Momentenbelastung b)  $M/V = \infty$  mit einer Durchbruchgröße von  $d/h = 0,4$  (Aicher & Höfflin, 2004)**

Wie in Abb. 1.11 ersichtlich, bilden sich bei runden Durchbrüchen und einer Belastung mit positiver Querkraft und positivem Moment jeweils zwei gegenüberliegende Bereiche von Querkzug und Querkdruck aus. Dabei liegt der maximale Wert der Spannung direkt am Durchbruchrand in einem Winkel von etwa  $45^\circ$  zur Vertikalen (siehe Abb. 1.12 links). Bei reiner Momentenbeanspruchung (Abb. 1.12 rechts) hingegen treten rund um den Durchbruch jeweils drei Querkzug- und Querkdruckbereiche auf. Die Stelle der maximalen Querkzugspannung liegt in diesem Fall in der oberen Trägerhälfte am Durchbruchrand in einem Winkel von etwa  $60^\circ$  zur Vertikalen. An den querkzugbelasteten Stellen treten bei unverstärkten Durchbrüchen üblicherweise die ersten Risse auf, welche in weiterer Folge zum Versagen führen. (Aicher & Höfflin, 2004)

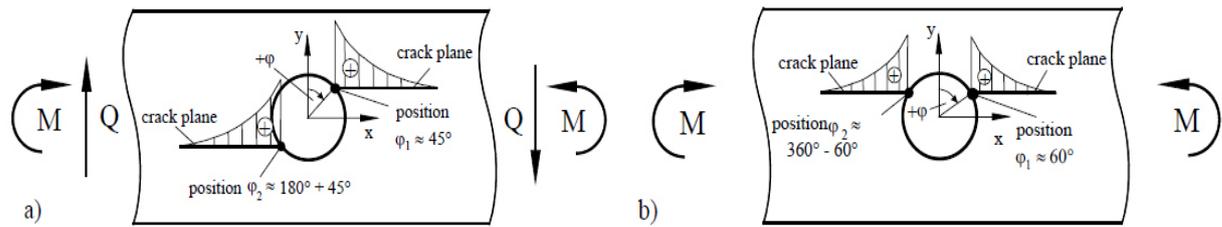


Abb. 1.12 Darstellung der Spannungsverteilung senkrecht zur Faser an den meistbeanspruchten Stellen am Durchbruchrand bei a)  $M/V < \infty$  und b)  $M/V = \infty$  (Aicher & Höflin, 2004)

Im Folgenden wird auf unterschiedliche Berechnungsmethoden eingegangen, welche zum Teil in den Normen verankert sind, zum Teil auch aus aktuellen Forschungsberichten hervorgehen.

### 1-3.1.1 Stand der Norm

In einem Entwurf des Eurocode 5 aus dem Jahr 2002 gab es den Vorschlag, für rechteckige und runde Durchbrüche ein ähnliches Tragverhalten wie bei rechtwinkligen und schrägen Ausklinkungen anzunehmen. (Larsen, 2011)

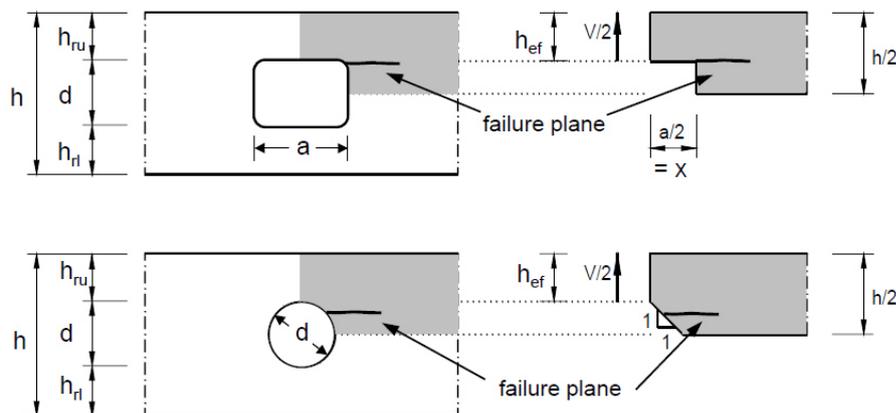


Abb. 1.13 Modellierungsvorschlag für rechteckige und runde Durchbrüche aus den Entwürfen zu EC5 (Aicher & Höflin, 2004)

Obwohl das Rechenmodell starke geometrische Ähnlichkeiten zum eigentlichen Durchbruch aufweist, stellte sich bei Bauteilversuchen heraus, dass dieser Ansatz der Bemessung häufig auf der unsicheren Seite liegt und aus diesem Grund nicht in die finale Version des EC5 eingearbeitet wurde. (Larsen, 2011)

Eine andere Methode der Nachweisführung ist hingegen in den nationalen Anhängen zum Eurocode 5 in Deutschland und Österreich verankert. Für die nachfolgenden Erklärungen wird der österreichische nationale Anhang als Grundlage verwendet (ÖNORM B 1995-1-1:2015). Da bei den im Zusammenhang mit dieser Arbeit durchgeführten Versuchen ausschließlich runde Durchbrüche betrachtet wurden, wird nicht näher auf die rechteckige Ausführungsvariante eingegangen.

Im Allgemeinen gelten die Formeln für Biegeträger aus Brettschichtholz und Furnierschichtholz, dabei sind folgende geometrische Randbedingungen einzuhalten:

- bei unverstärkten Durchbrüchen:  
 $l_A \geq 0,5 * h$  ;  $l_V \geq h$  ;  $l_Z \geq 1,5 * h$  , jedoch mindestens 300 mm ;  
 $a \leq 2,5 * h_d$  ;  $h_{ro}$  und  $h_{ru} \geq 0,35 * h$  ;  $h_d \leq 0,15 * h$
- bei verstärkten Durchbrüchen:  
 $l_A \geq 0,5 * h$  ;  $l_V \geq h$  ;  $l_Z \geq h$  , jedoch mindestens 300 mm ;  
 $a \leq 2,5 * h_d$  ;  $h_{ro}$  und  $h_{ru} \geq 0,25 * h$  ;  
 $h_d \leq 0,40 * h$  bei außenliegenden Verstärkungen  
 $h_d \leq 0,30 * h$  bei innenliegenden Verstärkungen

Die soeben genannten Bezeichnungen sind in Abb. 1.14, welche aus der Norm entnommen sind, dargestellt.

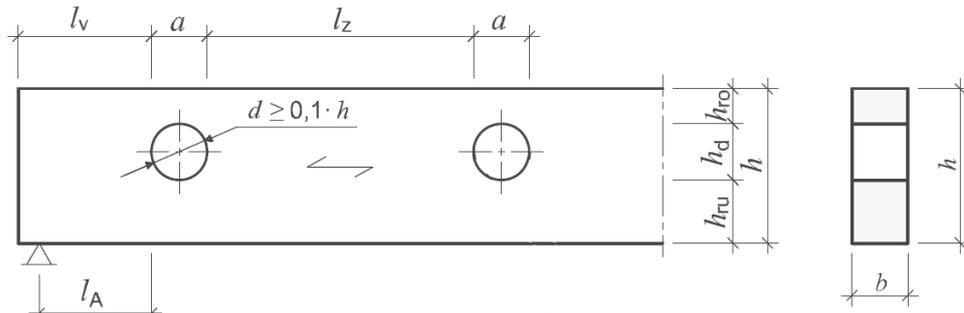


Abb. 1.14 Geometrische Vorgaben laut ÖNORM B 1995-1-1:2015

Laut ÖNORM B 1995-1-1:2015 sind für unverstärkte Durchbrüche drei Spannungskomponenten an den Durchbruchrändern nachzuweisen: Querzugspannungen, Schubspannungen und Biegespannungen im Nettoquerschnitt.

Dabei errechnen sich die Querzugspannungen anhand folgender Gleichung:

$$\sigma_{t,90,d} = \frac{F_{t,90,d}}{0,5 * l_{t,90} * b_{ef} * k_{t,90}} \leq f_{t,90,d} \quad (1.1)$$

mit

$$k_{t,90} = \min \left\{ \left( \frac{450}{h} \right)^{0,5} \right. \quad (1.2)$$

wobei

$\sigma_{t,90,d}$	... Bemessungswert Querzugspannungen [N/mm <sup>2</sup> ]
$F_{t,90,d}$	... Bemessungswert Querzugkraft [N]
$l_{t,90}$	... Lastverteilungslänge [mm]
$b_{ef}$	... wirksame Breite ( $b_{ef} = k_{cr} * b$ laut ÖNORM B 1995-1-1:2015 Glg. 6.13a) [mm]
$f_{t,90,d}$	... Bemessungswert Zugfestigkeit rechtwinklig zur Faser [N/mm <sup>2</sup> ]
$h$	... Trägerhöhe [mm]

In diesem Berechnungsmodell wird angenommen, dass die durch den Durchbruch hervorgerufene Querzugkraft eine annähernd dreieckige Spannungsverteilung zur Folge hat. Die Spannung ist dabei in Österreich über die Querschnittsbreite konstant anzunehmen (da laut nationaler Festlegung  $k_{cr} = 1,0$ ), der maximale Spannungswert am Durchbruchrand baut sich, wie in Abb. 1.15 ersichtlich, linear über den Abstand  $l_{t,90}$  vom Durchbruch ausgehend ab. Der Nachweis gilt als erfüllt, wenn die ermittelte Querzugspannung den Bemessungswert der Querzugfestigkeit nicht überschreitet.

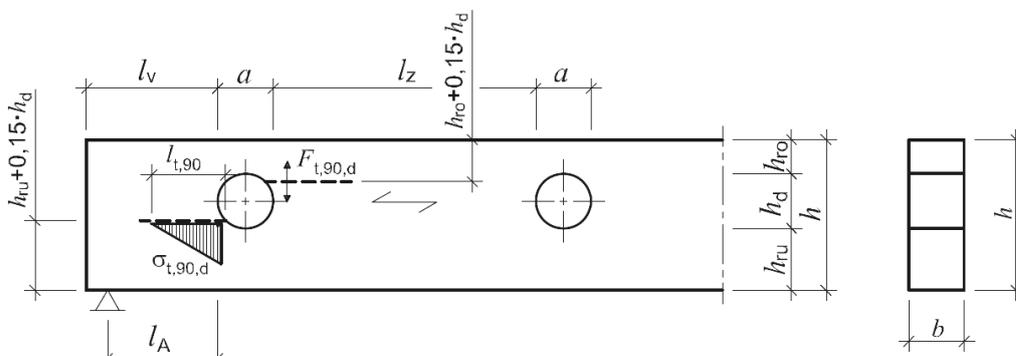


Abb. 1.15 Lineare Spannungsverteilung am Durchbruchrand laut ÖNORM B 1995-1-1:2015

Der Bemessungswert der Querkzugkraft  $F_{t,90,d}$  setzt sich aus zwei Komponenten zusammen:

$$F_{t,90,d} = F_{t,V,d} + F_{t,M,d} \quad (1.3)$$

Der Anteil aus der Querkraft resultiert aus den Schubspannungen, die im Lochbereich nicht mehr übertragen werden können und errechnet sich mit:

$$F_{t,V,d} = \frac{V_d * h_d}{4 * h} \left[ 3 - \left( \frac{h_d}{h} \right)^2 \right] \quad (1.4)$$

Aber auch das im Träger auftretende Moment leistet einen Beitrag:

$$F_{t,M,d} = 0,008 * \frac{M_d}{h_r} \quad (1.5)$$

wobei

$F_{t,V,d}$	... Anteil an Querkzugkraft zufolge Querkraft [N]
$V_d$	... Bemessungswert der Querkraft am Durchbruchrand [N]
$h_d$	... Durchbruchhöhe [mm]
$h$	... Gesamthöhe Querschnitt [mm]
$F_{t,M,d}$	... Anteil an Querkzugkraft zufolge Moment [N]
$M_d$	... Bemessungswert des Momentes am Durchbruchrand [Nmm]
$h_r$	... rechnerische Höhe

Für kreisrunde Durchbrüche darf dabei laut ÖNORM B 1995-1-1:2015 anstelle von  $h_d$  der Wert  $0,7 * h_d$  eingesetzt werden. Die rechnerische Höhe  $h_r$  wird bei kreisförmigen Durchbrüchen mit folgender Gleichung berechnet:

$$h_r = \min \left\{ \begin{array}{l} h_{ro} + 0,15 * h_d \\ h_{ru} + 0,15 * h_d \end{array} \right. \quad (1.6)$$

Für die Berechnung der Lastverteilungslänge  $l_{t,90}$  gilt:

$$l_{t,90} = 0,35 * h_d + 0,5 * h \quad (1.7)$$

Ist der Nachweis der Querkzugspannungen erfüllt, gilt es des Weiteren die Schubspannungen an den Durchbruchsecken nachzuweisen. Hierfür muss folgende Bedingung erfüllt werden:

$$\tau_d = k_\tau * \frac{1,5 * V_d}{b_{ef} * (h - h_d)} \leq f_{v,d} \quad (1.8)$$

mit

$$k_\tau = 1,85 * \left( 1 + \frac{a}{h} \right) * \left( \frac{h_d}{h} \right)^{0,2} \quad (1.9)$$

wobei

$\tau_d$	... Bemessungswert Schubspannung [N/mm <sup>2</sup> ]
$k_\tau$	... Beiwert zur Ermittlung des Maximalwertes der Schubspannung [-]
$V_d$	... Bemessungswert der Querkraft am Durchbruchrand [N]
$b_{ef}$	... wirksame Breite ( $b_{ef} = k_{cr} * b$ laut ÖNORM B 1995-1-1:2015 Glg. 6.13a) [mm]
$h$	... Gesamthöhe Querschnitt [mm]
$h_d$	... Durchbruchhöhe [mm]
$a$	... Durchbruchlänge [mm] bei Kreisen $a = h_d$
$f_{v,d}$	... Bemessungswert Schubfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]

Als dritter und letzter spezieller Nachweis bei Durchbrüchen ist laut ÖNORM B 1995-1-1:2015 die Biegespannung an den Durchbruchsrändern zu berechnen.

$$\frac{\frac{M_d}{W_n} + \frac{M_{o,d}}{W_o}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (1.10)$$

$$\frac{\frac{M_d}{W_n} + \frac{M_{u,d}}{W_u}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (1.11)$$

mit

$$M_{o,d} = \frac{A_o}{A_u + A_o} * V_d * \frac{a}{2} \quad (1.12)$$

$$M_{u,d} = \frac{A_u}{A_u + A_o} * V_d * \frac{a}{2} \quad (1.13)$$

wobei

$M_d$	... Bemessungswert des Biegemomentes am Durchbruchrand [N/mm <sup>2</sup> ]
$W_n$	... wirksames Widerstandsmoment des Nettoquerschnittes an der Durchbruchsstelle [mm <sup>3</sup> ]
$V_d$	... Bemessungswert der Querkraft am Durchbruchrand [N]
$f_{m,d}$	... Bemessungswert der Biegefestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
$W_{o/u}$	... Widerstandsmoment des Ober- bzw. Untergurtes [mm <sup>3</sup> ]
$A_{o/u}$	... Fläche des Ober- bzw. Untergurtes [mm <sup>2</sup> ] mit $A_{o/u} = b * h_{r\ o/u}$
$h_{ro}, h_{ru}, b$	... Abmessungen gemäß Abb. 1.15
$a/2$	... Hebelarm [mm]

Bei dem Nachweis handelt es sich um eine kombinierte Beanspruchung des Trägers, zum einen hervorgerufen durch das globale Biegemoment, welches im Bereich des Durchbruchs vom Nettoquerschnitt aufgenommen wird, zum anderen durch ein von der Querkraft abgeleitetes Sekundärmoment. Die Querkraft am Durchbruchrand wird aufgrund der Querschnittsflächen des Ober- bzw. Untergurtes gewichtet aufgeteilt und auch von den Einzelquerschnitten des jeweiligen Gurtes mit den zugehörigen Nettoquerschnittswerten aufgenommen. Laut ÖNORM B 1995-1-1:2015 ist für kreisrunde Durchbrüche der Nachweis der Biegerandspannungen aus der Trägerwirkung am nutzbaren Nettoquerschnitt ausreichend, das heißt Sekundärmomente bleiben unberücksichtigt.

### 1-3.1.2 Stand der Forschung

Aicher et al. (2007) entwickelte einen alternativen Berechnungsansatz auf Basis der sogenannten *Weibull*-Theorie. Diese probabilistische Festigkeitsbetrachtung eignet sich besonders gut für stochastisch defektbehaftete, sprödebrüchige Materialien, wie zum Beispiel Holz. Versagenswahrscheinlichkeiten aufgrund inhomogener Spannungsverteilung in verschiedenen Bauteilgrößen lassen sich mit diesem, auch als Materialschädigungsmodell bezeichneten, Ansatz beschreiben. Für Holzbau-Bemessungsprobleme findet dieses Modell international Anwendung. Beispielsweise basiert der Querkzug-Nachweis für gekrümmte, sowie satteldachförmige Brettschichtholzträger in der DIN 1052:2004 auf diesem Ansatz. (Aicher, et al., 2007)

Wird in einem Träger eine Öffnung vorgesehen, so können unter Last die Biege- und Schubspannungen nicht mehr ungestört übertragen werden. Es kommt zu Spannungsumlagerungen im Durchbruchsbereich. In weiterer Folge kommt es unter Zugrundelegung eines ebenen Spannungszustandes zu lokalen Spannungsüberhöhungen der drei Spannungskomponenten  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  und  $\tau_{xy}$ . Unter Annahme eines voll quadratischen Interaktionskriteriums wird deutlich, dass die Zugspannungskomponente quer zur Faser  $\sigma_y$  (entspricht  $\sigma_{t,90}$ ) mit mehr als 90% den Hauptanteil der Interaktion übernimmt. Aus diesem Grund wird

in Übereinstimmung mit der DIN 1052:2004 die Zugfestigkeit rechtwinklig zur Faserrichtung als Versagenskriterium angesetzt. (Aicher, et al., 2007)

Deshalb gilt folgende Bedingung zu erfüllen:

$$\sigma_{t,90,d} \leq f_{t,90,eff,d} \quad (1.14)$$

mit

$$f_{t,90,eff,d} = f_{t,90,d} * k_{size} * k_{dis} * k_{kalib} \quad (1.15)$$

$$f_{t,90,d} = f_{t,90,k} * \frac{k_{mod}}{\gamma_M} \quad (1.16)$$

$$k_{size} = \left( \frac{\Omega_0}{\Omega} \right)^{0,2} \quad (1.17)$$

$$\Omega_0 = 0,01 \text{ m}^3 \quad (1.18)$$

wobei

$\sigma_{t,90,d}$	... Bemessungswert der Querkzugspannung [N/mm <sup>2</sup> ]
$f_{t,90,eff,d}$	... Bemessungswert der Querkzugfestigkeit, berücksichtigt mittels versch. Faktoren [N/mm <sup>2</sup> ]
$k_{dis}$	... Faktor zur Berücksichtigung der ungleichförmigen Spannungsverteilung [-]
$k_{kalib}$	... Kalibrierungsfaktor unter Berücksichtigung von Bauteilversuchen [-]
$f_{t,90,k}$	... charakteristischer Wert der Querkzugfestigkeit gültig für ein Bezugsvolumen $\Omega_0 = 0,01 \text{ m}^3$ [N/mm <sup>2</sup> ]
$k_{mod}$	... Modifikationsbeiwert nach EN 1995-1-1:2004 zur Berücksichtigung von Nutzungsklasse und Lasteinwirkungsdauer [-]
$\gamma_M$	... Teilsicherheitsbeiwert [-]
$k_{size}$	... Volumenfaktor (entspricht $k_{vol}$ ) zur Berücksichtigung des querkzugbeanspruchten Volumens [-]

Die Gleichungen entsprechen den Bemessungsgleichungen nach der EN 1995-1-1:2004 und der DIN 1052:2004 zur Bemessung auf Querkzugbeanspruchungen von gekrümmten oder satteldachförmigen Trägern. Lediglich der Kalibrierungsfaktor  $k_{kalib}$  wird ergänzt, welcher zur Anpassung an Bauteilversuchsergebnissen genutzt wird. Um die Querkzugnachweise aus der Norm als Vorlage verwenden zu können wird der Faktor hier speziell angeführt, er ließe sich jedoch auch beispielsweise im Faktor  $k_{dis}$  miteinbeziehen.

Querkzugbeanspruchungen sind stark volumenabhängig. Dieser Größeneinfluss wird im Eurocode 5 mit dem sogenannten Volumenfaktor berücksichtigt. Für die Gleichung  $k_{size} = k_{vol} = (\Omega_0/\Omega)^{1/m}$  wird ein Referenzvolumen von  $\Omega_0 = 0,01 \text{ m}^3$  herangezogen, der Faktor  $m = 5$  wurde bei eigenen Untersuchungen für europäisches Fichtenholz bestimmt. (Aicher, et al., 2007)

Um den bemessungsrelevanten Wert der Querkzugspannungen zu errechnen werden Gleichungen benutzt, welche sich auf Grundlage von Parameterstudien mittels Software und unter Berücksichtigung des Durchbruchgrößenverhältnisses  $h_d/h$ , des Schnittgrößenverhältnisses  $M_d/V_d$  sowie des Krümmungsverhältnisses bei gekrümmten Trägern  $h/r_m$  herleiten. Den Berechnungen wurde ein ebener Spannungszustand und orthotropes Materialverhalten, sowie Steifigkeitsverhältnisse und Querkontraktionszahl für Brettschichtholz laut DIN EN 1194:1999 zugrunde gelegt. Die Ergebnisse der Spannungsverteilungen der FE-Untersuchungen bestätigten sich bei umfangreichen Dehnungsmessungen an experimentellen Versuchsreihen. Die im Folgenden angeführten Gleichungen gelten für einen einzelnen kreisrunden Durchbruch. Sind mehrere Durchbrüche nebeneinander angeordnet, so gilt der Mindestabstand  $l_z \geq h$  einzuhalten, da es bei geringerem Abstand zu einer zusätzlichen Spannungserhöhung kommt. (Aicher, et al., 2007)

## Spannung zufolge Querkraft

In einem geraden Träger ergibt sich unter einer fiktiven reinen Querkraft eine parabolische Schubspannungsverteilung über die Querschnittshöhe. Im Bereich des Durchbruchs wird der Fluss dieser Spannungen gestört, sie müssen mittels Spannungen rechtwinklig zur Faser umgelagert werden. Der Maximalwert der daraus resultierenden Querkzugspannungen liegt am Durchbruchrand im Winkel von  $40^\circ$  zur Faserrichtung und bestimmt sich mit sehr guter Näherung wie folgt:

$$\sigma_{t,V,d} = \frac{3}{2} * \frac{V_d}{b * h} * \left( 1,23 + 0,82 * \frac{d}{h} \right) \quad (1.19)$$

wobei

$\sigma_{t,V,d}$	... Bemessungswert der Querkzugspannung zufolge Querkraft [N/mm <sup>2</sup> ]
$V_d$	... Bemessungswert der Querkraft in Durchbruchmitte [N]
$b$	... Querschnittsbreite [mm]
$h$	... Querschnittshöhe [mm]
$d$	... Durchbruchsdurchmesser [mm]

Bei gekrümmten Trägern im Krümmungsbereich  $0 \leq h/r_m \leq 0,2$  gibt es nur geringfügige Unterschiede in der Spannungsverteilung bei reiner Querkraftbeanspruchung. (Aicher, et al., 2007)

## Spannung zufolge Biegemoment

Wird ein gerader Träger mit einem reinen Moment belastet, müssen im Bereich des Durchbruchs ausschließlich Biegeformalspannungen umgelagert werden. Der resultierende Maximalwert der auftretenden Querkzugspannungen liegt in diesem Fall bei  $60^\circ$  zur Faserrichtung und errechnet sich näherungsweise mit folgender Beziehung:

$$\sigma_{t,M,d} = 0,1 * \frac{6 * M_d}{b * h^2} * \frac{d}{h} \quad (1.20)$$

wobei

$\sigma_{t,M,d}$	... Bemessungswert der Querkzugspannung zufolge Biegemoment [N/mm <sup>2</sup> ]
$M_d$	... Bemessungswert des Biegemomentes in Durchbruchmitte [N]
$b$	... Querschnittsbreite [mm]
$h$	... Querschnittshöhe [mm]
$d$	... Durchbruchsdurchmesser [mm]

In einem gekrümmten Träger kommt es bei positiver Momentenbeanspruchung zusätzlich zu Biegespannungen parallel zur Faserrichtung sowie Zugspannungen im rechten Winkel zur Faser. Auch wenn sich die Biegespannungsverteilung bei gekrümmten Trägern im undurchbrochenen Bereich kaum ändert, so hängen die näherungsweise parabolisch über die Querschnittshöhe verteilten Querkzugspannungen bereits bei einem Träger ohne Durchbruch empfindlich von seiner Krümmung  $h/r_m$  ab. Infolgedessen ändert sich auch die resultierende Querkzugspannung im Durchbruchsbereich bei gekrümmten Trägern und lässt sich mittels folgender Gleichung mit guter Näherung bestimmen: (Aicher, et al., 2007)

$$\sigma_{t,M,d} = \frac{6 * M_d}{b * h^2} * \left( 0,43 \frac{h}{r_m} + 0,1 \frac{d}{h} \right) \quad (1.21)$$

wobei

$r_m$	... Krümmungsradius [mm]
-------	--------------------------

## Spannung zufolge kombinierter Momenten-Querkraftbeanspruchung

Im Allgemeinen kommt es meist zu einer kombinierten M/V-Beanspruchung welche durch lineare Superposition von Glg. (1.19) und (1.21) zu einem konservativem Spannungswert führen, da wie bereits beschrieben, die Maximalwerte der getrennt betrachteten Belastungen nicht an derselben Stelle am Durchbruchrand liegen. Eine deutlich bessere Abschätzung ergibt deshalb laut Aicher et al. (2007) Glg. (1.22).

$$\sigma_{t,90,d} = (\sigma_{t,M,d} + \sigma_{t,V,d}) * k_{M/V} \quad (1.22)$$

mit

$$k_{M/V} = \begin{cases} 0,9 & \text{für } M_d \neq 0; V_d \neq 0 \\ 1,0 & \text{für } V_d = 0 \end{cases} \quad (1.23)$$

## Formbeiwert $k_{dis}$ der Querkzugspannung

Der in Glg. (1.15) angegebene Zusammenhang zur Berechnung der effektiven Querkzugfestigkeit ergibt sich aus der Weibull-Maßstabgesetzmäßigkeit für Bauteile mit unterschiedlichen Größen und Spannungsvölligkeiten. Die Versagenswahrscheinlichkeit eines mit der Spannung  $\sigma$  beanspruchten Volumens  $\Omega$  berechnet sich ohne Berücksichtigung von Spannungsinteraktionen mit

$$F_{\Omega} = 1 - e^{-\int_{\Omega} (\sigma/\sigma_0)^m d\Omega} = 1 - e^{-\Omega(\sigma_{wei}/\sigma_0)^m} \quad (1.24)$$

mit

$$\sigma_{wei} = \left[ \frac{1}{\Omega} * \int_{\Omega} \sigma(x, y, z)^m d\Omega \right]^{\frac{1}{m}} = \frac{\sigma_{ref}}{k_{dis}} \quad (1.25)$$

wobei

$F_{\Omega}$	... Versagenswahrscheinlichkeit [-]
$\sigma_{wei}$	... Weibull-Spannung [N/mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_{ref}$	... Referenzspannungswert [N/mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_0$	... Weibull-Bezugsspannungswert [N/mm <sup>2</sup> ]
$m$	... Weibull-Größenexponent [-]
$\Omega$	... beanspruchtes Volumen [mm <sup>3</sup> ]
$k_{dis}$	... Spannungsformbeiwert [-]

Der Referenzspannungswert  $\sigma_{ref}$  kann beliebig gewählt werden und wird in vorliegendem Beispiel wie üblich als höchstmöglicher Spannungswert im Integrationsbereich gewählt. Das bedeutet  $\sigma_{ref} = \sigma_{t,90,max}$ . Da es sich im Falle des Durchbruches um einen annähernd ausschließlich in der Trägerebene veränderlichen Spannungszustand  $\sigma_y(x, y)$  handelt, ergibt sich in der beanspruchten Fläche  $A = \Omega/b$ :

$$k_{dis} = k_{dis,A} = \frac{\sigma_{t,90,max}}{\sigma_{wei,A}} \quad (1.26)$$

mit

$$\sigma_{wei} = \sigma_{wei,A} = \left[ \frac{1}{A} * \int_A \sigma(x, y, )^m dA \right]^{\frac{1}{m}} \quad (1.27)$$

Der Formbeiwert zur Berücksichtigung des Verlaufs der Querkzugspannungen hängt unmittelbar mit dem angesetzten Integrationsbereich  $A$  zusammen. Dieser Bereich wird in der Bemessungsgleichung Glg. (1.17) explizit mit dem Größenfaktor  $k_{size}$  berücksichtigt und ergibt sich in den meisten Fällen durch die Bauteilabmessungen und/oder die Belastungssituation. Kommt es infolge von Querschnittsstörungen zu Spannungsfeldern, so sind diese wie am Beispiel der Durchbrüche, lokal begrenzt und klingen verhältnismäßig schnell ab. Weiters werden unter der üblicherweise erfüllten Bedingung, Weibull-Exponent  $m > 1$ , größere Spannungen stärker gewichtet als kleinere. Das bedeutet, kleine Spannungen im Abklingbereich der Spannungserhöhungen bei größer werdenden Abstand vom Durchbruchrand haben keinen nennenswerten Einfluss auf die Weibull-Spannung. Der Integrationsbereich aufgrund des querkzugbeanspruchten Volumens lässt sich unter Berücksichtigung von Aicher & Höfflin (2006) durchgeführter Vergleichsrechnungen wie folgt berechnen:

$$A = 0,5 * d * [0,5 * d * (\cos 20^\circ - \cos 80^\circ)] = 0,19 d^2 \quad (1.28)$$

$$\Omega = A * b \quad (1.29)$$

Der Spannungsformbeiwert  $k_{dis}$  für verschiedene Schnittgrößenverhältnisse  $M_d/V_d$  und Trägerkrümmungen  $h/r_m$  lässt sich Tab. 1.5 entnehmen. Aus dieser Übersicht geht hervor, dass für einen geraden Träger ( $h/r_m = 0$ ) unter einer kombinierten Beanspruchung ( $V_d \neq 0$ ) näherungsweise ein Wert von  $k_{dis} = 1,8$  angenommen werden kann. (Aicher, et al., 2007) (Aicher & Höfflin, 2006)

**Tab. 1.5 Spannungsformbeiwert  $k_{dis}$  in Abhängigkeit vom Belastungsverhältnis und Trägerkrümmung (Aicher, et al., 2007)**

$M_d/V_d$	$h/r_m$							
	0,1	0,05	0,03	0,025	0,02	0,01	0,005	0
0 – 2*h	1,63	1,7	1,72	1,73	1,74	1,75	1,77	1,79
5*h	1,6	1,7	1,74	1,75	1,75	1,77	1,8	1,83
10*h	1,59	1,7	1,75	1,77	1,79	1,82	1,85	1,88
$\infty$ = reines M	1,59	1,73	1,83	1,86	1,89	1,93	1,99	2,04

### **Kalibrierungsfaktor des Weibull-Ansatzes**

In Glg. (1.15) zur Berechnung der effektiven Querkzugfestigkeit findet sich der Kalibrierparameter  $k_{kalib}$ . Dieser errechnet sich durch die Minimierung der Fehlerquadrate zwischen rechnerischen, charakteristischen Querkrafttragfähigkeiten und den experimentell ermittelten Ergebnissen für Durchriss- bzw. Höchstlast über 13 verschiedene Versuchsreihen. Die Bedeutung der Begriffe wird in Abb. 1.16 veranschaulicht. Um das Bemessungsmodell an die Durchrisslasten anzupassen erhält man  $k_{kalib} = 1,03$ , was im Mittel eine Übereinstimmung von  $0,98 \pm 0,14$  ergibt. Für eine Anpassung des Modells an die experimentell ermittelten Höchstlasten erhält man  $k_{kalib} = 1,45$  mit einer mittleren Übereinstimmung von  $0,99 \pm 0,10$ . Im Hinblick auf eine mögliche normative Integration des Bemessungsansatzes und in Anbetracht von Gründen der Sicherheitsrelevanz und Gebrauchstauglichkeit schlägt Aicher et al. (2007) vor, den an die Durchrisslasten angepassten Kalibrierfaktor zu verwenden. Die Begründung hierfür lautet, dass in 29% aller durchgeführten Versuche die Durchrisslasten mit dem plötzlichen spröden Bauteilversagen übereinstimmen und infolgedessen zugleich den Höchstlasten entsprechen. In allen anderen Fällen, unabhängig von der Größe des Abstandes zwischen Durchriss- und Höchstlast, kam es zwischen den beiden Lastniveaus zu einem stabilen Rissfortschritt. Da aus Gründen der Langzeitstandsicherheit (Kriechrisswachstum) derartige Rissbildungen im Gebrauchszustand inakzeptabel sind, ist eine Bemessung der Bauteile auf ein rissfreies Lastniveau sinnvoll. (Aicher, et al., 2007)

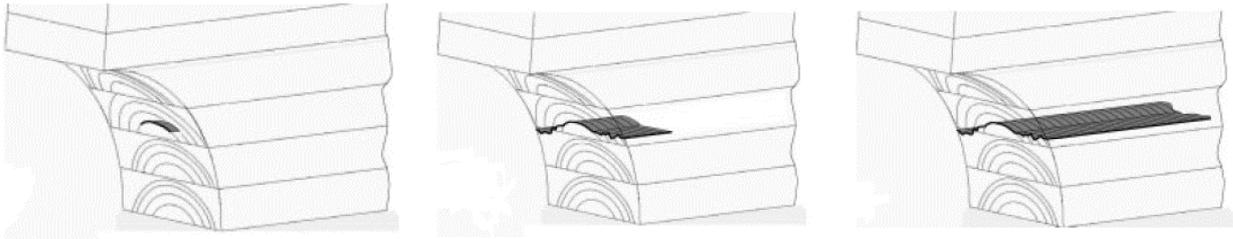


Abb. 1.16 Darstellung der Schädigungsentwicklung am Durchbruchrand, Anriss und Rissfortschritt in Querschnittsebene (links), Durchriss mit beginnendem Rissfortschritt in Trägerlängsrichtung (mitte), weiterer Rissfortschritt in Trägerlängsrichtung bis zum Versagen bei Höchstlast (rechts) (Aicher, et al., 2007)

### Vergleich des Bemessungsmodells mit den Nachweisen laut DIN 1052:2004 und prEN1995-1-1:2003

Das neue Bemessungsmodell auf Basis der Weibull-Theorie ergibt für Träger bis zu einer Querschnittshöhe von rund 0,5 m für alle Holzfestigkeitsklassen (GL24h bis GL36c)<sup>3)</sup> ähnliche Werte wie die Berechnung laut DIN 1052:2004, welche zudem gut und konservativ mit den charakteristischen Durchbruchlasten aus den experimentellen Ergebnissen übereinstimmen. Der im Eurocode 5 enthaltene Bemessungsansatz errechnet, je nach Holzfestigkeitsklasse, Tragfähigkeiten welche den Wert des Weibull- bzw. DIN-Ansatzes um bis zu dem 2,2-fachen überschreiten (siehe Abb. 1.17). Bei zunehmender Bauteilgröße nehmen die Unterschiede zwischen den Bemessungsmodellen deutlich zu. So kommt es DIN 1052:2004 zu einer erheblichen Überschätzung der Tragfähigkeit, da der Größeneffekt der gesteigerten Trägerhöhe linear berücksichtigt wird. Diese Annahme hat sich laut experimentell ermittelten Ergebnissen allerdings als unzureichend herausgestellt. Die rechnerischen Tragfähigkeiten laut prEN 1995-1-1:2003 liefern bei großen Trägerhöhen wiederum die höchsten Werte, der Unterschied zur DIN 1052:2004 fällt jedoch hier deutlich geringer aus da der Größeneffekt nicht linear, sondern mit dem Faktor  $\sqrt{h}$  einfließt. Die zutreffendsten Ergebnisse liefert der Weibull-Ansatz. Dieser schafft es, den Größeneinfluss am besten abzubilden und ist zudem anhand umfangreicher Versuche kalibriert. (Aicher, et al., 2007)

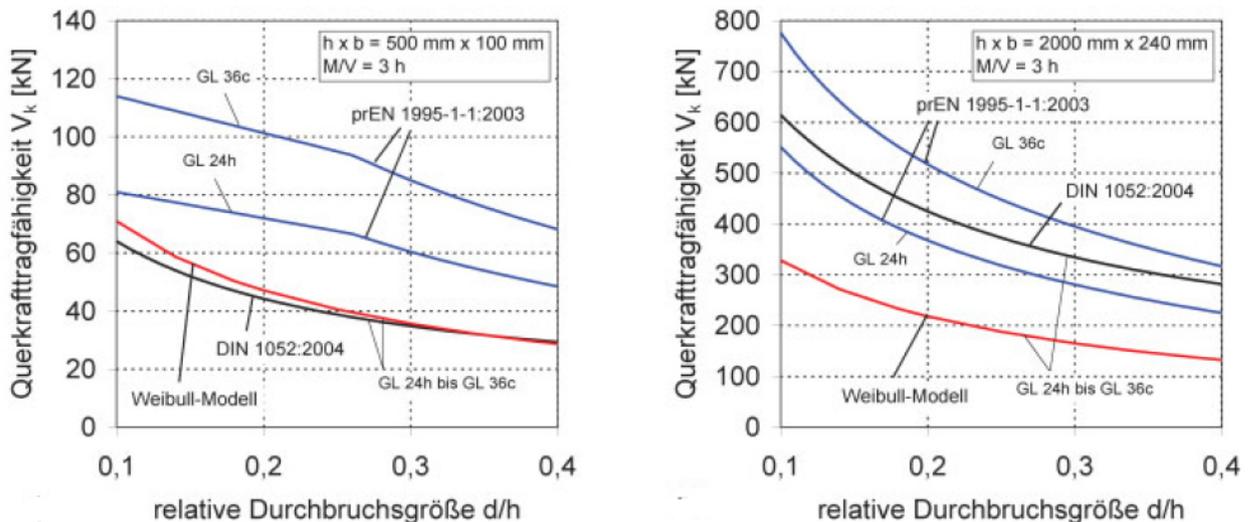


Abb. 1.17 Darstellung der Querkrafttragfähigkeit von BSH-Trägern mit verschiedenen Durchbruchgrößen am Beispiel eines Trägers mit Querschnittshöhe  $h = 500 \text{ mm}$  (links) im Vergleich zu einem Träger mit  $h = 2000 \text{ mm}$

<sup>3)</sup>Anm. Die für den Weibull-Ansatz sowie die DIN 1052:2004 maßgebende Querkrafttragfähigkeit ist festigkeitsklassenunabhängig, der Bemessungsansatz nach prEN 1995-1-1:2003 hingegen bezieht sich auf die Schubfestigkeit, welche zwischen den Festigkeitsklassen variiert. (Aicher, et al., 2007)

## 1-3.2 VERSTÄRKUNG VON DURCHBRÜCHEN

### 1-3.2.1 Stand der Norm

In der Praxis kommt es häufig vor, dass die benötigte Geometrie von Öffnungen in Trägern aus Leimholz die zulässigen Grenzwerte für unverstärkte Durchbrüche überschreiten (siehe Kap. 1-3.1.1). Für diesen Fall bietet der nationale Anhang der Norm ÖNORM B 1995-1-1:2015 unter Einhaltung weiterer Grenzwerte ein Nachweiskonzept für zwei verschiedene lokale Verstärkungsmaßnahmen: zum einen kann im Durchbruchbereich beidseitig durch Aufkleben von Holzwerkstoffplatten oder Brettern eine verbesserte Tragfähigkeit erzielt werden, zum anderen können die zum frühzeitigen Versagen führenden Querkraftkräfte von eingeklebten bzw. eingeschraubten Stahlstäben aufgenommen werden.

Die Bemessung der benötigten Verstärkung erfolgt auf Grundlage der rechnerischen Querkraft  $F_{t,90,d}$ . Diese errechnet sich auch im Falle einer vorzunehmenden Verstärkung unverändert mit Hilfe der Glg. (1.3). Die Querkraft ist dabei vollständig von der Verstärkung aufzunehmen, die Zugfestigkeit des Holzes senkrecht zur Faser wird nicht berücksichtigt.

Die ebenso erforderlichen Nachweise der Schubspannungen an den Durchbruchsecken sowie der Nachweis der Biegespannungen an den Durchbruchsrändern sind, wie in Kap. 1-3.1.1 beschrieben, zu führen.

Wird die Verstärkung mittels beidseitig aufgeklebter Holzwerkstoffplatten ausgeführt, so ist unter der Annahme von gleichmäßig verteilter Klebefugenspannung folgende Bedingung einzuhalten:

$$\frac{\tau_{ef,d}}{f_{k,d}} \leq 1,0 \quad (1.30)$$

mit

$$\tau_{ef,d} = \frac{F_{t,90,d}}{2 * a_r * h_{ad}} \quad (1.31)$$

wobei

$\tau_{ef,d}$	...Bemessungswert der Klebefugenspannung [N/mm <sup>2</sup> ]
$F_{t,90,d}$	...Bemessungswert der Querkraft [N]
$h_{ad}$	...anzusetzende Höhe, bei kreisförmigen Durchbrüchen $h_{ad} = h_1 + 0,15 * h_d$ [mm]
$f_{k,d}$	...Bemessungswert der Klebefugensfestigkeit $f_{k2,d}$ laut Tab. NA.J.1 ÖNORM B 1995-1-1:2015 bzw. der Rollschubfestigkeit $f_{r,d}$ , wobei gilt $f_{k,d} = \min\{f_{k2,d}; f_{r,d}\}$ [N/mm <sup>2</sup> ]

Die Querkraftspannungen, welche im Träger wirken, werden über die Verklebung an die außen angebrachten Holzwerkstoffplatten übertragen. Aus diesem Grund muss die Zugspannung in den Verstärkungsplatten nachgewiesen werden.

$$k_k * \frac{\sigma_{t,d}}{f_{t,d}} \leq 1,0 \quad (1.32)$$

mit

$$\sigma_{t,d} = \frac{F_{t,90,d}}{2 * a_r * t_r} \quad (1.33)$$

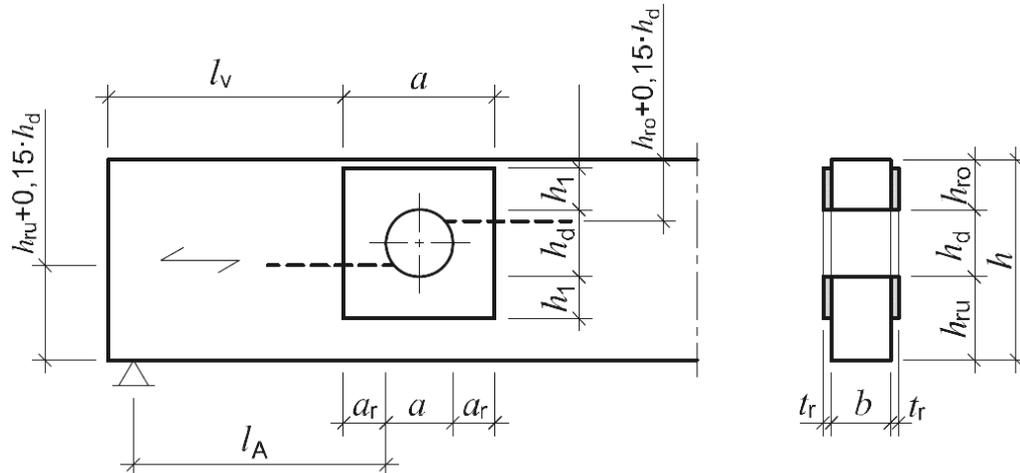
wobei

$k_k$	...Beiwert zur Berücksichtigung ungleicher Spannungsverteilungen in Verstärkungsplatten, $k_k$ darf 2,0 gesetzt werden [-]
$\sigma_{t,d}$	...Bemessungswert der Zugspannungen [N/mm <sup>2</sup> ]
$f_{t,d}$	...Bemessungswert der Zugfestigkeit der Verstärkungsplatte in Richtung der Kraft $F_{t,90,d}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
$F_{t,90,d}$	...Bemessungswert der Querkraft im Träger [N]

Für die Geometrie der Verstärkungsplatten gilt einzuhalten:

$$0,25 * a \leq a_r \leq 0,30 * (h_d + h) \quad \text{und} \quad h_1 \geq 0,25 * a$$

Die Bezeichnungen  $a_r, h_1, h_d$  sowie  $t_r$  sowie die restlichen geometrischen Definitionen lassen sich aus Abb. 1.18 entnehmen.



**Abb. 1.18** Seitlich aufgeklebte Holzwerkstoffplatten laut ÖNORM B 1995-1-1:2015

Da Holzwerkstoffplatten ebenso wie Holz ein orthotropes Werkstoffverhalten aufweisen, ist laut ÖNORM B 1995-1-1:2015 auf die Faserrichtung beim Anbringen der Verstärkung zu achten sowie bei der Bemessung zu berücksichtigen.

Eine weitere Möglichkeit der Verstärkung von Durchbrüchen bieten innenliegende eingeklebte Stahlstäbe. Diese dürfen allerdings nur eingesetzt werden, wenn der Schubnachweis am Durchbruchrand laut Glg. (1.8) erfüllt ist. Ähnlich der Klebefugenspannung zwischen Träger und außen aufgeklebter Verstärkungsplatte muss in diesem Fall die Klebefugenspannung zwischen Holz und Stahlstab nachgewiesen werden. Hierfür gilt folgender Zusammenhang:

$$\frac{\tau_{ef,d}}{f_{k1,d}} \leq 1,0 \quad (1.34)$$

mit

$$\tau_{ef,d} = \frac{F_{t,90,d}}{n * d_r * \pi * l_{ad}} \quad (1.35)$$

wobei

$\tau_{et,d}$	... Bemessungswert der Klebefugenspannung [N/mm <sup>2</sup> ]
$F_{t,90,d}$	... Bemessungswert der Querkraft im Träger [N]
$l_{ad}$	... wirksame Stahlstablänge für kreisrunde Durchbrüche $l_{ad} = \begin{cases} h_{ru} + 0,15 * h_d \\ h_{ro} + 0,15 * h_d \end{cases}$ [mm]
$n$	... Anzahl der Stahlstäbe, in Trägerlängsrichtung darf nur eine Stabreihe in Rechnung gestellt werden
$d_r$	... Außendurchmesser des Stahlstabes
$f_{k1,d}$	... Bemessungswert der Klebefugenspannung [N/mm <sup>2</sup> ]

Die Länge der eingeklebten Stahlstäbe hat mindestens  $2 * l_{ad}$  zu betragen, wobei der Durchmesser  $d_r = 20 \text{ mm}$  nicht überschreiten darf. Für die Mindestabstände der Stäbe untereinander sowie der Randabstände gilt:

$$\begin{aligned} -a_2 &> 4 * d_r \\ -a_{3,c} &> 2,5 * d_r \\ -a_{4,c} &> 2,5 * d_r \end{aligned}$$

Die Anordnung der Stahlstäbe am Durchbruchrand, sowie die Bedeutung der geometrischen Bezeichnungen sind in Abb. 1.19 ersichtlich.

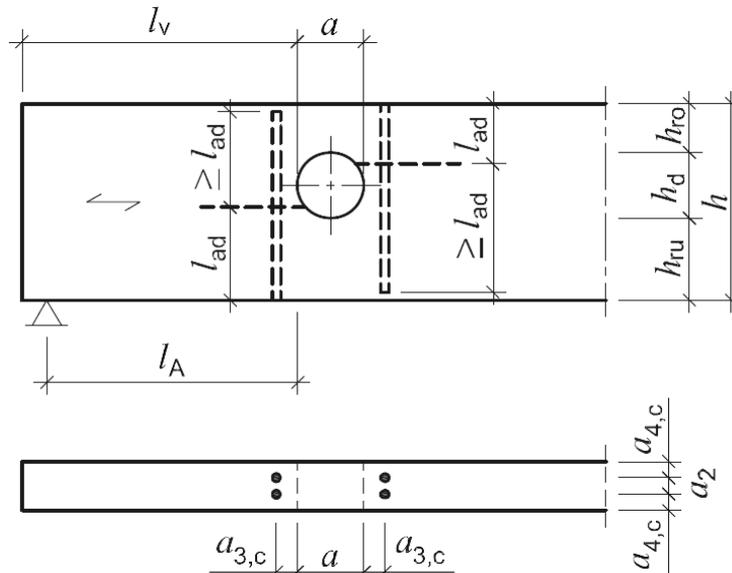


Abb. 1.19 Eingeklebte Stahlstäbe laut ÖNORM B 1995-1-1:2015

Zusätzlich zum Nachweis der Klebefugenspannung müssen die Stahlstäbe noch auf die auftretende Zugspannung im Stahlquerschnitt nachgewiesen werden. Wird die Verstärkung eingeschraubt statt geklebt, so sollen laut ÖNORM B 1995-1-1:2015 Vollgewindeschrauben verwendet werden. Die Nachweise sind sinngemäß identisch, die Kraftübertragung von Stahl auf Holz erfolgt nun über den Auszieh Widerstand des Gewindes an Stelle der Klebefuge.

### 1-3.2.2 Stand der Forschung

Es gibt eine Reihe von Veröffentlichungen, welche die laut ÖNORM B 1995-1-1:2015 zur Verstärkung von Durchbrüchen zulässigen vertikal angeordneten Gewindestangen bzw. Vollgewindeschrauben mittels FEM-Analysen genauer betrachten. So haben beispielsweise Aicher & Höfflin (2009) einen kreisrunden Durchbruch modelliert und sich die Unterschiede zwischen unverstärkten und jenen mit eingeklebten Stahlstäben verstärkten Durchbruches angesehen. Die Spannungsverteilung senkrecht zur Faser rund um die Trägeröffnung wird durch die Gewindestangen nur unwesentlich verändert, es kommt nach wie vor zu Quersugspannungsspitzen direkt am Durchbruchrand. (Aicher & Höfflin, 2009)

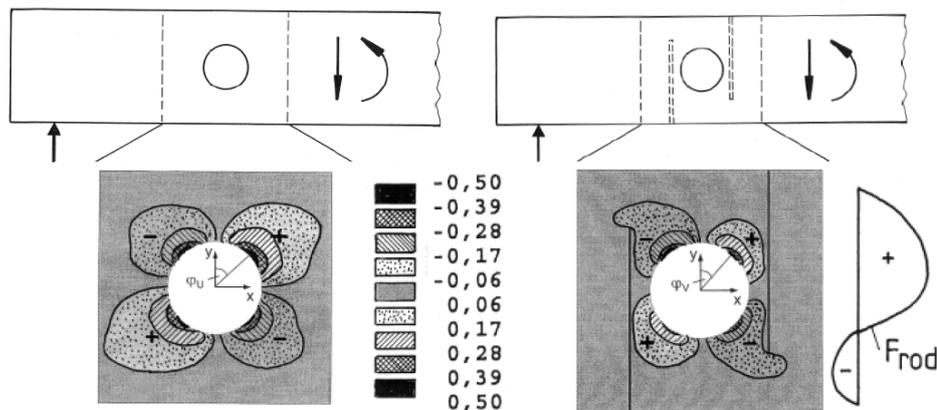


Abb. 1.20 Schematische Darstellung der Quersugspannungen am unverstärkten Durchbruch (links) sowie mit senkrecht angeordneten Verstärkungsstäben (rechts) (Aicher & Höfflin, 2009)

Aicher & Höfflin (2009) führten in diesem Zusammenhang auch experimentelle Versuche durch. Dabei verglichen sie eine Referenzserie von BSH-Trägern mit unverstärkten runden Durchbrüchen mit zwei verstärkten Serien. Bei der Verstärkungsmethode wurde zwischen selbstbohrenden Vollgewindeschrauben und eingeklebten Gewindestangen variiert. Bei dem Versuchsaufbau handelte es sich um einen Vierpunkt-Biegeversuch, welcher in Abb. 1.21 schematisch dargestellt ist. Es wurden Brettschichtholzträger verschiedener Hersteller der Festigkeitsklasse GL32h verwendet. Der Durchmesser des Durchbruches betrug  $h_d = 180 \text{ mm}$  (entspricht  $h_d/h = 0,4$ ), welcher bei allen Versuchskörpern an derselben Stelle angeordnet war. Die verstärkenden Stahlstäbe wurden so ausgelegt, dass die Schubtragfähigkeit der Träger mit Durchbruch jener eines undurchbrochenen Trägers entsprechen sollten. Ausgehend von der maximal aufnehmbaren Querkraft des Trägervollquerschnittes wird mit Hilfe der Formeln aus der DIN 1052:2008 (entsprechen jenen aus der ÖNORM B 1995-1-1:2015 siehe Kap. 1-3.1.1) eine daraus resultierende Querkraft am Durchbruch berechnet. Die Verstärkung ist nun so dimensioniert, dass die axiale Tragfähigkeit die Kraft übersteigt  $R_{ax,k} > F_{t,90,k}$ .

Die Berechnung der Schubtragfähigkeit wurde je mit und ohne Berücksichtigung des Faktors  $k_{cr}$  durchgeführt. Der Faktor reduziert die Bauteilbreite auf  $2/3$ , um den Effekt der Rissbildung in Holzbauteilen bei Alterung und klimatischen Einwirkungen abzubilden.

Aicher & Höfflin (2009) kommen bei ihren Versuchen schließlich zum Erkenntnis, dass vertikal innenliegende Verstärkungen tatsächlich eine Erhöhung der Schubtragfähigkeit bewirken, diese gesteigerte Kapazität allerdings unter den rechnerischen Erwartungen laut DIN 1052:2008, und somit auf der unsicheren Seite, liegt. (Aicher & Höfflin, 2009)

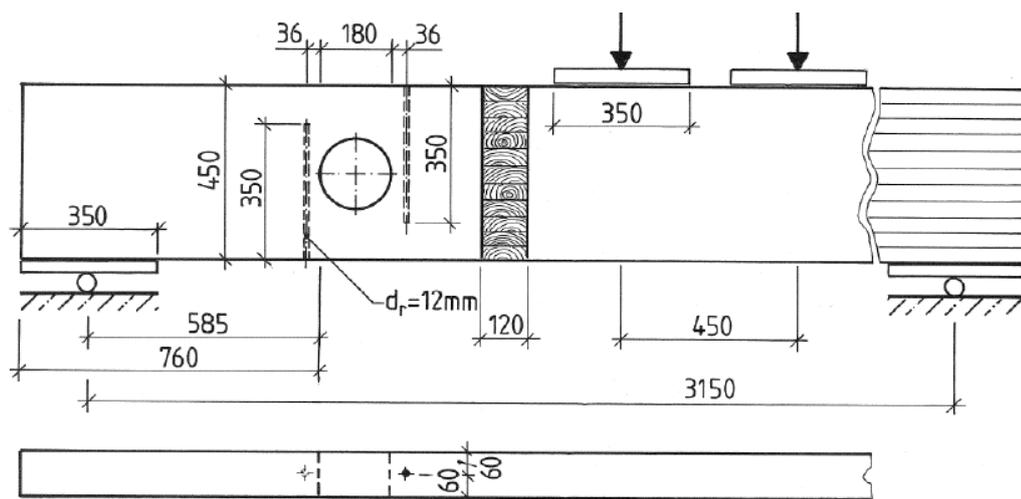


Abb. 1.21 Schematische Darstellung der Versuchskonfiguration (Aicher & Höfflin, 2009)

Zu ähnlichen Ergebnissen kommt Dröscher et al. (2016) bei ihren Untersuchungen zu verschiedensten Verstärkungsmaßnahmen bei runden Durchbrüchen mit Hilfe von Finite Elemente Software. Laut ihr kommt es bei senkrechter Verstärkung lediglich zu einer sehr geringen Reduzierung der Schub- sowie Querkzugspannungswerte am Durchbruchrand. Lediglich der Bereich in dem diese Spannungen auftreten wird verkleinert.

In weiterer Folge beschäftigt sich Dröscher et al. (2016) auch mit Verstärkungen, welche in einem Winkel von  $45^\circ$  rund um den Durchbruch angeordnet sind, auf Grundlage einer neuen Entwicklung des Unternehmens n'H neue Holzbau AG und Ernst Gehris<sup>4)</sup>. Sie stellt dabei fest, dass sowohl die Querkzug- als auch die Schubspannungen im Bereich des Durchbruchs gegenüber dem vertikal verstärkten Träger deutlich reduziert werden, und das bei beträchtlich gesteigertem Lastniveau. Die Kräfte, welche von den Verstärkungsstäben aufgenommen werden müssen, sind hingegen wesentlich größer. (Dröscher, et al., 2016)

<sup>4)</sup> Prof. DI Ernst Gehri, Emeritus, Professur für Holztechnologie, ETH Zürich, Schweiz

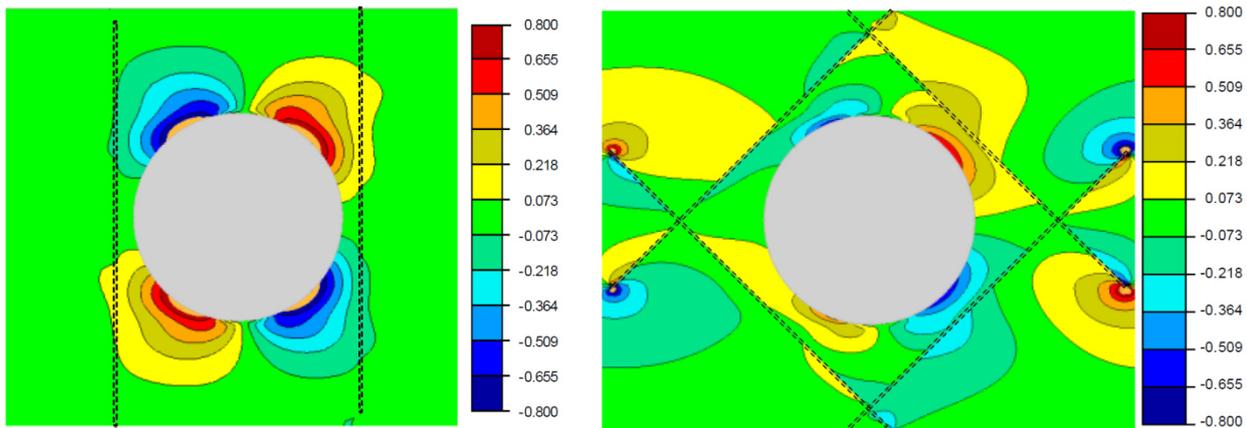


Abb. 1.22 Quersugspannungen bei vertikal (links) und schräg (rechts) angeordneten Verstärkungen (Dröscher, et al., 2016)

Ernst Gehri entwickelte in Zusammenarbeit mit der n`H neue Holzbau AG die bereits erwähnte Methode der Verstärkung von Durchbrüchen, welche sich ALP-GSA®-Verfahren nennt. Hierbei steht ALP für **a**lternative **l**oad **p**ath (alternativer Lastpfad), was konkret bedeutet, die im Durchbruchsbereich auftretenden und nicht mehr übertragbaren Kräfte werden auf einem alternativen Pfad um die Öffnung herumgeführt. Erreicht wird dies durch das Einbringen sogenannter GSA® (Gewindestangenanker) welche mit speziellem Harz eingeklebt werden. Die Orientierung der Gewindestangen erfolgt dabei entgegen den nationalen Anhängen zum EC5 in Deutschland und Österreich, sowie den Vorgaben der SIA 265:2012, nicht senkrecht zur Trägerachse, sondern in einem Winkel von 45° rund um den Durchbruch. Ziel dabei ist es, durch die Verstärkungsmaßnahmen die Tragfähigkeit eines ungestörten Trägers zu erreichen.

Dabei gilt laut Gehri (2014) der Grundsatz:

*„Die auf den Durchbruchsbereich (auf dem entfernten Holz) anfallenden Beanspruchungen bzw. resultierenden Kräfte sind durch anderweitige Elemente (alternative Wege) zu übernehmen“.*

Die Grundlage für die Berechnung bilden einfache Gleichgewichtszustände am Durchbruchrand. Dabei werden die dem Durchbruchquerschnitt zuordenbaren Schnittkräfte bestimmt, welche in weiterer Folge von den Gewindestangenankern aufgenommen werden müssen.

Im Folgenden werden die Rechenschritte zur Bestimmung der Kräfte in den Stahlstäben am Beispiel eines runden Durchbruches dargestellt. Berücksichtigt werden hierfür nur Moment und Querkraft, die Berechnung ist jedoch auf eine zusätzlich wirkende Normalkraft erweiterbar.

Der Anteil des Biegemomentes, welcher auf den Durchbruch entfallen würde, ergibt sich aus dem linearen Spannungsverlauf der Biegespannung mit:

$$\Delta M_{DB} = x^3 * M_{DB} \quad (1.36)$$

wobei

$\Delta M_{DB}$  ...Momentenanteil des Durchbruches [Nmm]  
 $M_{DB}$  ...maßgebendes Biegemoment am Durchbruchrand [Nmm]  
 $x$  ...Verhältnis der Durchbruchshöhe zur Trägerhöhe  $X = h_d/h$

Der Anteil der Querkraft ergibt sich laut Gehri (2014) durch die Störung des Schubflusses über die Länge  $l_{ef,DB}$  des Durchbruches. Hierfür wird nicht die tatsächliche Länge, sprich der eigentliche Durchmesser der Öffnung, in Rechnung gestellt, sondern die Diagonale eines um den Durchbruch gelegten Quadrates.

Die zu kompensierende Schubspannung ergibt sich somit aus:

$$\Delta S_{DB} = l_{ef,DB} * b * \tau_{max} \quad (1.37)$$

mit

$$\tau_{max} = \frac{1,5 * V_{DB}}{b * h} \quad (1.38)$$

wobei

- $\Delta S_{DB}$  ... Querkraftanteil über die Länge des gestörten Schubfeldes [N]
- $l_{ef,DB}$  ... effektive Länge des gestörten Schubfeldes mit  $l_{ef,DB} = \sqrt{2} * x * h$  [mm]
- $\tau_{max}$  ... maßgebende Schubbeanspruchung am Durchbruchrand [N/mm<sup>2</sup>]

Der Durchbruch wird mit diagonal angeordneten Gewindestangenankern verstärkt. Wie aus FEM-Untersuchungen bezüglich der Spannungen am Durchbruchrand hervorgeht (siehe Abb. 1.11) gibt es jeweils zwei gegenüberliegende Zug- und Druckdiagonalen. Die errechneten Komponenten, welche um den Durchbruch herumgeführt werden müssen, werden nun gedanklich in die Schnittpunkte der Diagonalen an der Ober- und Unterseite des Trägers verschoben. Die dort angesetzte Kraft in Richtung der Trägerachse kann nun in ein Kraftdreieck aufgeteilt werden, dessen Katheten in der Achse der Gewindestangenanker liegen. Mit Hilfe dieser Kräfte lassen sich die Verstärkungsstäbe nun dimensionieren. Gemäß SIA 265:2012 darf dabei die geringe Mitwirkung der Zugtragfähigkeit des Holzes rechtwinklig zur Faser nicht in Rechnung gestellt werden. Bei der Verifizierung des Rechenmodells mittels experimenteller Überprüfung wird dieser Anteil jedoch von Gehri mitberücksichtigt. Eine Darstellung des Modelles findet sich in Abb. 1.23. (Gehri, 2014)

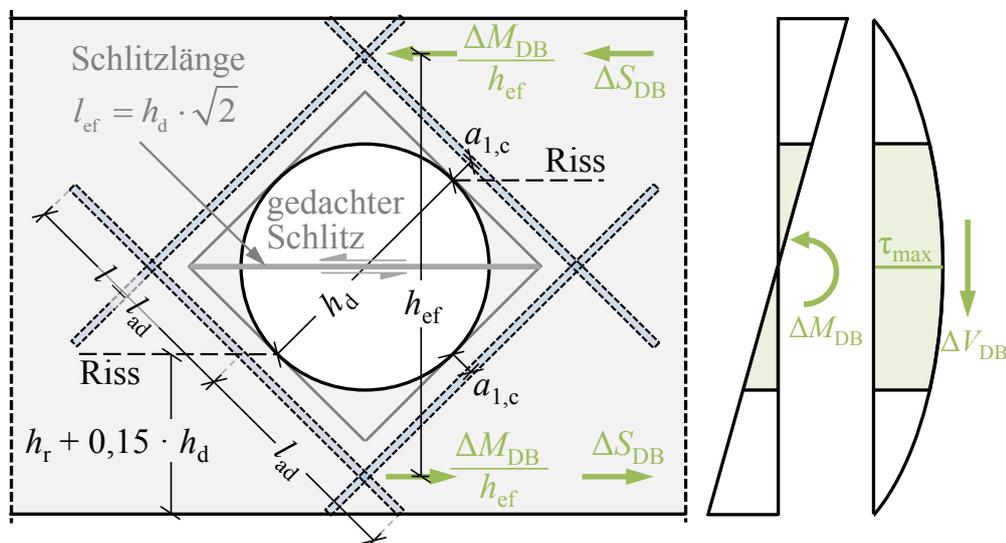


Abb. 1.23 Skizze zum Berechnungsmodell nach Gehri (2014) (Dröscher, et al., 2016)

Einen sehr ähnlichen Ansatz verfolgen Tapia & Aicher (2016) in ihrem Beitrag zur WCTE 2016. Sie untersuchen den Einfluss der Orientierung bzw. der Neigung der innenliegenden Verstärkung rund um Durchbrüche, ausgehend von der Tatsache, dass vertikal eingebrachte Verstärkungsstäbe, wie bereits erwähnt, bei experimentellen Versuchen nicht die in den nationalen Anhängen errechneten Tragfähigkeiten erreichen. (Aicher & Höfflin, 2009)

Tapia & Aicher (2016) erstellen mit der Finiten-Elemente-Software Abaqus ein 3D-Modell eines Brettschichtholzträgers der Festigkeitsklasse GL32h laut EN 14080:2013. Die Abmessungen des Querschnittes sowie der Durchmesser der Öffnung bleiben bei der Studie unverändert, als variable Parameter werden die Länge, der Durchmesser sowie die Neigung der Stahlstäbe angesetzt (siehe Abb. 1.24 links).

Es wird im Allgemeinen davon ausgegangen, dass die maximale Querkzugspannung am Durchbruchrand bei einem Winkel von etwa  $45^\circ$  ( $+180^\circ$ ) zur Trägerachse auftritt und sich im Träger infolgedessen auch an dieser Stelle die ersten Risse bilden. Aus diesem Grund wird der Drehpunkt, um welchen die Neigung der Verstärkungen verändert wird, auf eben diese Rissebene im Abstand von  $2,5 \cdot d_r$  vom äußersten Durchbruchrand gelegt (siehe Abb. 1.24 rechts). Die Verstärkungsstäbe sollen die Rissbildung an den Bereichen, an denen Querkzug auftritt, verhindern. In der Vorstellung eines Fachwerkmodells, wirken sie als Zugstäbe, Druckstäbe werden in diesem Fall keine eingebaut unter der Annahme, dass die Querdruckfestigkeit des Holzes ausreicht, um die auftretende Belastung aufzunehmen.

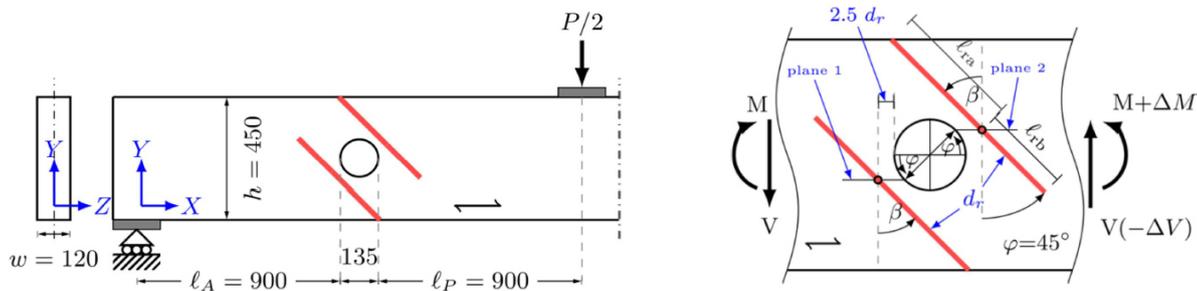


Abb. 1.24 Geometrie des 3D-Modells (links) und Anordnung der Verstärkung (rechts) (Tapia & Aicher, 2016)

Die Spannungsverteilung im Durchbruchsbereich wird nicht nur am ungerissenen Träger, sondern auch an einem Träger im bereits gerissenen Zustand betrachtet. Hierfür werden an den Ebenen an denen die Risse erwartet werden ( $45^\circ$  und  $+180^\circ$ ) vom Durchbruchrand bis zur Achse des Verstärkungsstabes Risse modelliert. Risswachstum infolge gesteigerter Belastung wird nicht berücksichtigt.

Bei den Untersuchungen lässt sich erkennen, dass der Winkel, in welchem die Verstärkung eingebracht wird, einen signifikanten Einfluss auf die auftretenden Spannungen hat.

Im Folgenden sind Spannungsverteilungen dargestellt, welche exemplarisch für einen Träger mit den in Abb. 1.24 (links) gegebenen Abmessungen und zwei gegenüberliegenden Stahlstäben im Winkel von  $45^\circ$  ermittelt werden. Der Durchmesser der Stäbe beträgt dabei  $d_r = 18 \text{ mm}$  und die Länge  $l_{r,b} = 200 \text{ mm}$ . Die Spannungen werden in der Ebene ausgewertet, in der die Erstrisse erwartet werden (bezeichnet als „plane 2“ in Abb. 1.24 rechts)

Im unverstärkten Zustand sind die errechneten Querkzugkräfte konstant über die Trägerbreite verteilt (dargestellt in gelb) und nehmen mit geringer werdendem Abstand zum Durchbruch exponentiell zu. In der Grafik (Abb. 1.25) lässt sich erkennen, dass senkrecht angeordnete Stäbe im Winkel von  $\beta = 0^\circ$  (entspricht  $90^\circ$  zur Faserrichtung) lediglich eine sehr geringe Reduzierung der Querkzugspannungen ermöglichen (dargestellt in rot), welche zudem nur in Trägermitte wirksam ist. Schräg eingebrachte Stäbe, in Abb. 1.25 am Beispiel von  $\beta = 45^\circ$  dargestellt, bewirken hingegen eine deutliche größere Reduzierung der Spannungen, welche außerdem über die gesamte Trägerbreite wirksam ist.

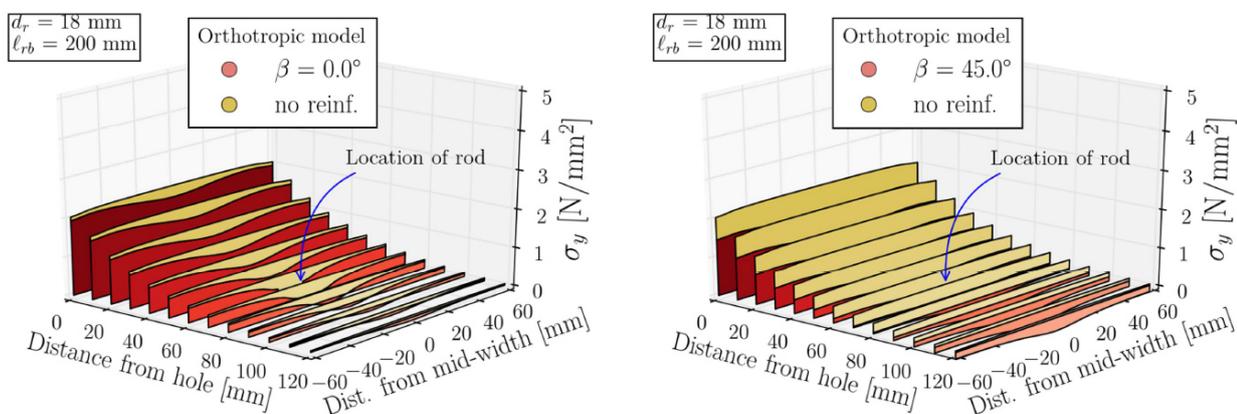
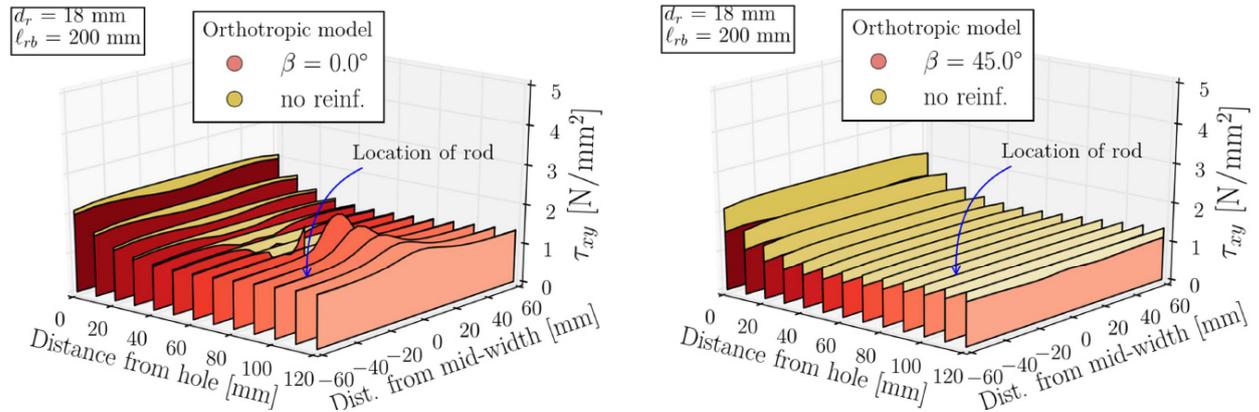


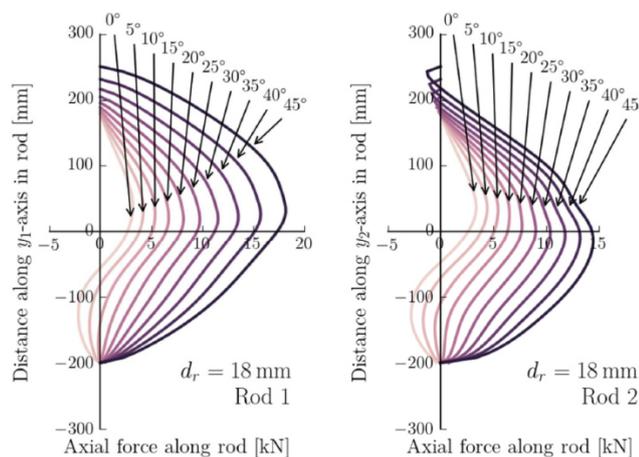
Abb. 1.25 Darstellung der Querkzugspannungen in Ebene „plane 2“ (siehe Abb. 1.24 rechts) mit einer Neigung der Verstärkungsstäbe von  $0^\circ$  (links) sowie einer Neigung von  $45^\circ$  (rechts) im Verhältnis zum unverstärkten Träger (Tapia & Aicher, 2016)

Ähnliche Ergebnisse zeigen sich bei der Darstellung der Schubspannungen am Durchbruchrand. Verstärkungen im Winkel von  $\beta = 0^\circ$  weisen in unmittelbarer Nähe zum Durchbruch sehr geringen Einfluss auf die Spannungen auf, an ihrer Stabachse hingegen werden sogar erhöhte Spannungen errechnet. Im Gegensatz dazu lässt sich bei schräg eingebrachten Stäben wiederum eine deutliche Reduzierung der Spannungen beobachten, welche ebenfalls auf die gesamte Trägerbreite Wirkung zeigt.



**Abb. 1.26 Darstellung der Schubspannungen in Ebene „plane 2“ (Abb. 1.24 rechts) mit einer Neigung der Verstärkungsstäbe von  $0^\circ$  (links) sowie einer Neigung von  $45^\circ$  (rechts) im Verhältnis zum unverstärkten Träger (Tapia & Aicher, 2016)**

Die Neigung der Verstärkungsstäbe hat auch einen direkten Einfluss auf die Kräfte, die diese aufnehmen. Tapia und Aicher (2016) stellen dies mit der Grafik in Abb. 1.27 dar. Je größer die Neigung der Verstärkungsstäbe wird, desto größer wird ihre Axialkraft. Der maximale Wert wird unter einem Winkel von  $45^\circ$  erreicht. Bemerkenswert in diesem Zusammenhang ist der Kraftverlauf entlang der Achse. Stark geneigte Stäbe sind ausschließlich Zugbeanspruchungen ausgesetzt, wobei Stäbe bis zu einem Winkel von  $10^\circ$  sowohl Zug- als auch Druckbelastungen erhalten. Der Grund dafür ist, dass geneigte Stäbe nicht mehr die der querzugbeanspruchten gegenüberliegende Zone mit Querdruckbeanspruchungen durchqueren (siehe Abb. 1.11). Der Beginn der Rissbildung wird in der Nähe der Stelle, an der die maximale Axialkraft auftritt erwartet. (Tapia & Aicher, 2016)



**Abb. 1.27 Axialkraft längs des Stabes mit einem Durchmesser von  $d_r = 18$  mm bei unterschiedlichen Neigungswinkeln zwischen  $\beta = 0^\circ$  und  $\beta = 45^\circ$  (wobei  $\beta = 0^\circ$  entspricht einem Winkel von  $90^\circ$  zur Faserrichtung (Tapia & Aicher, 2016)**

Tapia & Aicher (2016) bieten auch einen Berechnungsansatz zum Nachweis der Verstärkungsmethode. Die vorgeschlagenen Formeln berechnen die Axialkraft in den Stäben am bereits gerissenen Träger. Der Grund für diese Herangehensweise sind die Spannungsspitzen in unmittelbarer Nähe zum Durchbruchrand. Ausgehend von der Annahme, dass sich ein Riss bildet, der bis zu den

Verstärkungsstäben reicht und von diesen am weiteren Wachstum gehindert wird, können folgende Formeln<sup>4)</sup> angewendet werden:

$$F_r = \left[ (F_{r,V} * c_1 + F_{r,M} * c_2) \sin \beta * \sqrt{\frac{d_r}{w}} + F_{t,90} * c_3 * \frac{d_r}{\sqrt{w}} \right] * \frac{1}{\cos \beta} \quad (1.39)$$

$$F_{r,V} = w * \int_{y_1}^{y_0} \frac{V}{2 * I} * \left( \frac{h^2}{4} - y^2 \right) dy \quad (1.40)$$

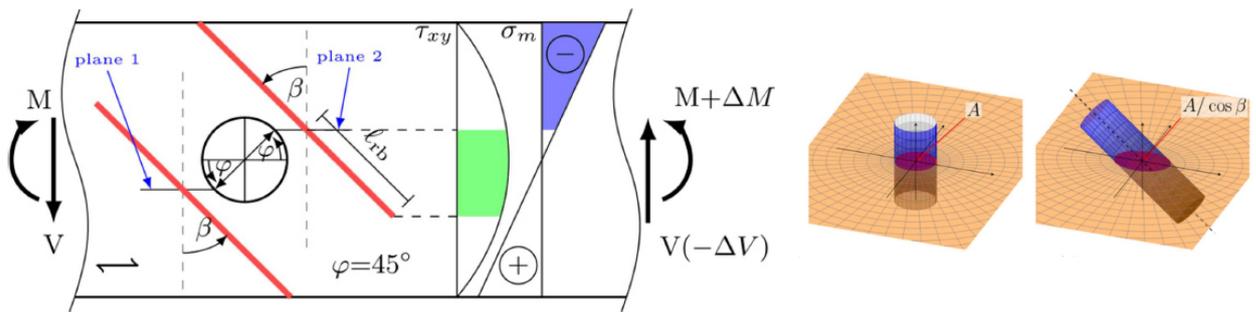
$$F_{r,M} = w * \int_{y_2}^{y_1} -\frac{M * y}{I} dy \quad (1.41)$$

wobei

$F_r$	...resultierende Axialkraft in der Stabverstärkung [N]
$F_{r,V}$	...Anteil der Schubspannung [N]
$F_{r,M}$	...Anteil der Biegespannung [N]
$F_{t,90}$	...Querzugkraft nach DIN EN 1995-1-1/NA:2013
$c$	...Kalibrierungsfaktoren, wobei $c_1 = 1.2$ ; $c_2 = 0.012$ ; $c_3 = 0.36$ [-]
$\beta$	...Neigungswinkel der Stabverstärkung [°]
$w$	...Trägerbreite [mm]
$V$	...Querkraft am jeweiligen Durchbruchrand [N]
$M$	...Moment am jeweiligen Durchbruchrand [Nmm]
$I$	...Flächenträgheitsmoment des Querschnittes [mm <sup>4</sup> ]
$y_0, y_1, y_2$	...Koordinaten der Integrationsgrenzen (siehe Abb. 1.28)

Die Formel zur Berechnung der Axialkraft setzt sich aus drei Teilen zusammen, welche mittels konstanter Faktoren kalibriert werden. Diese Faktoren  $c_1, c_2, c_3$  werden mittels der FE-Ergebnisse bestimmt. Außerdem wird mit den Termen  $\sqrt{d_r/w}$  sowie  $d_r/\sqrt{w}$  das Verhältnis zwischen Stabdurchmesser und Trägerbreite berücksichtigt, auf Einheitenreinheit wird an dieser Stelle verzichtet. Die Kraft  $F_{r,V}$  ergibt sich aus dem Integral der Schubspannung über die Trägerhöhe, ausgehend vom Stabende bis hin zur Rissebene (siehe Abb. 1.28 links).  $F_{r,M}$  hingegen entspricht dem Anteil der Biegespannungen, integriert zwischen Rissebene und Stabanfang. Auch die Querzugkraft  $F_{t,90}$  fließt in die Formel mit ein, diese wird nach der Norm DIN EN 1995-1-1/NA:2013 (entsprechend ÖNORM B 1995-1-1:2015 siehe Kap. 1-3.1.2) berechnet. Mit dem Faktor  $1/\cos \beta$  wird die Vergrößerung der Querschnittsfläche berücksichtigt, welche sich aufgrund des Schnittes eines schräg angeordneten Stabes mit der angenommenen Rissebene ergibt (siehe Abb. 1.28 rechts).

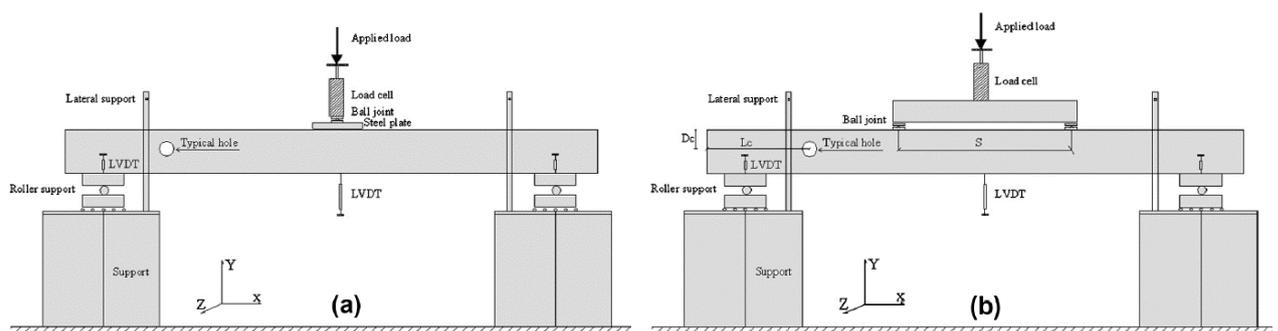
<sup>4)</sup> Anm. Die angeführten Formeln entsprechen aufgrund Fehlerhaftigkeit nicht exakt jenen der Quelle. In dieser Arbeit finden sich nach persönlicher Rücksprache (Dez.2016) mit dem Autor Tapia die korrigierten Versionen.



**Abb. 1.28** Darstellung der Integrationsgrenzen zur Berechnung der Axialkraft in den Verstärkungsstäben (links) und der vergrößerten projizierten Querschnittsfläche an der Rissebene eines schrägen Stabes (Tapia & Aicher, 2016)

Der Berechnungsansatz ist lediglich für runde Durchbrüche mit einem Verhältnis von  $h_d/h = 0.3$  gültig. Die Ergebnisse zeigen für einen Neigungswinkel von  $0^\circ - 45^\circ$  eine hohe Übereinstimmung mit den FE-Ergebnissen. Die Auswirkungen verschiedener Stabquerschnitte ( $12\text{ mm} < d_r < 18\text{ mm}$ ) und Trägerbreiten ( $100\text{ mm} < w < 120\text{ mm}$ ) auf die Berechnung werden erfasst. (Tapia & Aicher, 2016)

Ardalany et al. (2013) widmet sich in seiner Forschungsarbeit ebenfalls dem Thema der Durchbrüche und untersucht, unter anderem versuchstechnisch, das Verhalten von Öffnungen im Träger, sowie verschiedene Arten der Verstärkung, speziell im Holzwerkstoff Furnierschichtholz (LVL). Seine Ziele sind die Rissbildung am Durchbruchrand zu verhindern, sowie die Tragkapazität eines Trägers ohne Durchbruch wieder herzustellen. Die sehr umfangreich durchgeführte Versuchsreihe umfasst Träger mit verschiedenen Spannweiten, Querschnittshöhen und Durchbruchdurchmessern, welche stets auf Höhe der Trägerachse angeordnet sind. Die Trägerbreite bleibt unverändert bei 45 mm. Der Schwerpunkt wird auf runde Durchbrüche gelegt, einige Träger werden jedoch auch mit rechteckigen Durchbrüchen versehen. Bei diesen wird zudem zwischen ausgerundeten und scharfkantigen Durchbruchsecken unterschieden. Die Versuchskonfiguration sieht überwiegend einen Dreipunkt-Biegeversuch vor, ein kleiner Teil der Träger wird allerdings auch unter Vierpunktbiegung belastet. (Ardalany, et al., 2013)



**Abb. 1.29** Versuchskonfiguration des Dreipunkt-Biegeversuches (links) und des Vierpunkt-Biegeversuches (rechts) (Ardalany, et al., 2013)

Die Träger bestehen aus neuseeländischen Kieferfurnieren, welche eine mittlere Dichte von  $573\text{ kg/m}^3$  und einen Elastizitätsmodul von  $10.700\text{ N/mm}^2$  aufweisen. Bei getrennt durchgeführten Zugprüfungen wird die Querkzugfestigkeit des Materials bestimmt, welche bei etwa  $2\text{ N/mm}^2$  liegt. Vor dem Durchführen der Versuche werden die Prüfkörper unter Normbedingungen klimatisiert, welche in den

Trägern eine Ausgleichsfeuchte von etwa 8 – 10 % hervorrufen.

Um das Verhalten verschiedenster Verstärkungsmittel zu untersuchen werden folgende Varianten geprüft:

### **Schraubverstärkung**

Eine Variante zur Verstärkung des Durchbruchsrandes stellen Schrauben dar. Hierfür werden selbstbohrende Vollgewindeschrauben der Marke SPAX verwendet. Es wird ein Durchmesser von 8 mm gewählt. Die Schrauben werden auf zwei unterschiedliche Arten angeordnet. Neben der senkrechten Verstärkungsvariante werden auch schräg eingedrehte Schrauben untersucht, wobei der Winkel bei 45° festgelegt ist und die Schrauben aus Platzmangel lediglich an den querzugbeanspruchten Seiten eingesetzt werden.

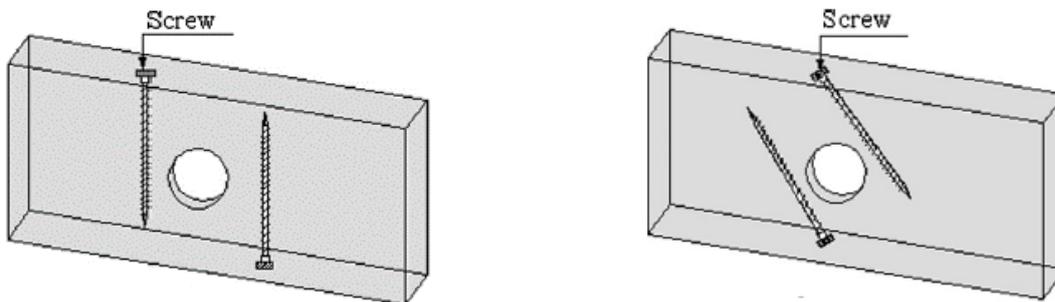


Abb. 1.30 Schematische Darstellung der vertikalen und schrägen Schraubverstärkung (Ardalany, et al., 2013)

### **Eingeklebte Gewindestangen**

Eine weitere Methode ist das Einkleben von Gewindestangen in Durchbruchsnähe. Untersucht wird bei dieser Variante unter anderem der Einfluss der Gewindestangenlänge. Zum einen werden die Stäbe über die gesamte Querschnittshöhe eingeklebt, zum anderen werden sie etwas verkürzt ausgeführt, so dass die Biegezugseite nur von einer Gewindestange durchbrochen wird. Die Gewindestangen besitzen einen Kerndurchmesser von 5,5 mm und werden mit einem Epoxidharz der Firma HILTI in ein Bohrloch mit 11 mm Durchmesser verklebt.

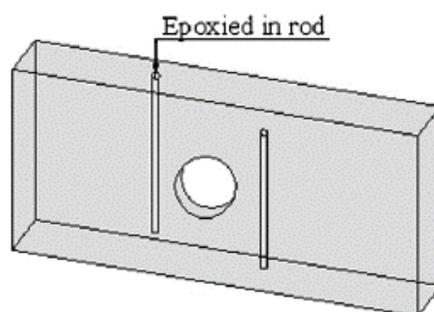


Abb. 1.31 Schematische Darstellung der eingeklebten Gewindestangen (Ardalany, et al., 2013)

### **Sperrholz**

Eine weitere sehr gängige und effektive Methode der Verstärkung von Durchbrüche ist das beidseitige Aufkleben von Sperrholzplatten. Dazu wird auf beiden Seiten des Trägers eine dreischichtige Kiefernurnierplatte (mittlere Dicke 8,8 mm) mittels Nagelpressverklebung aufgebracht. Durch die vollflächige Verklebung werden Spannungsumlagerungen vom Träger auf die Verstärkungsplatten begünstigt, was eine bessere Verteilung der am Durchbruchrand auftretenden Spannungsspitzen auf eine

größere Fläche ermöglicht. Aus diesem Grund lassen sich Öffnungen mit großem  $h_d/h$ -Verhältnis mittels aufgeklebter Sperrholzplatten effektiver verstärken als mit Schrauben. Untersucht wird ebenso eine Variante, bei der lediglich auf einer Seite des Trägers eine Sperrholzplatte aufgeklebt wird.

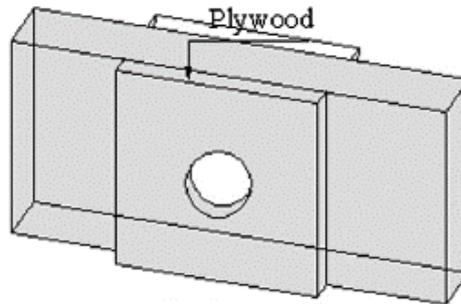


Abb. 1.32 Schematische Darstellung der außen aufgeklebten Sperrholzplatten (Ardalany, et al., 2013)

### **Angenagelte Stahlplatte**

Als letzte Verstärkungsmöglichkeit werden angenagelte Stahlplatten untersucht. Die Wirkungsweise ist jener der aufgeklebten Sperrholzplatten ähnlich, jedoch ist der Verbund zwischen Holz und Stahl aufgrund der fehlenden Verklebung nicht vollflächig. Somit können auftretende Risse nicht am Wachstum behindert werden. Die umzulagernden Kräfte müssen von den Nägeln an die Stahlplatte übertragen werden.

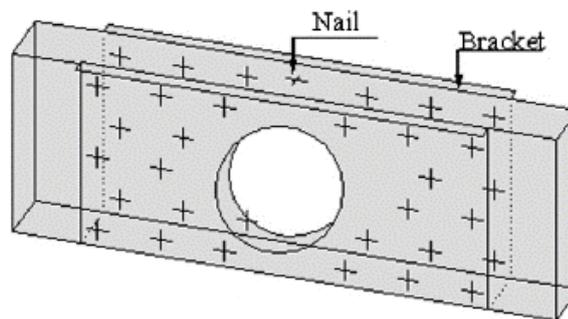


Abb. 1.33 Schematische Darstellung der angenagelten Metallplatten (Ardalany, et al., 2013)

Ardalany et al. (2013) untersuchte auch Träger mit unverstärkten Durchbrüchen. Bei Steigerung der Last trat der erste Riss beim kreisförmigen Durchbruch in etwa beim Winkel von  $45^\circ$  (beim rechteckigen Durchbruch im oberen Eck) an der zur Feldmitte hin gerichteten Seite der Öffnung auf. Bei weiterer Laststeigerung öffnet sich diagonal gegenüber der zweite Riss. Diese wachsen nun stetig, bis es schließlich zum Schubversagen kommt. Dieses eben genannte Verhalten ist jedoch stark vom Durchmesser der Öffnung abhängig. So führen sehr kleine Durchmesser von bis zu 50 mm (laut Bericht APA EWS-G535A:2010) zu keiner Reduktion der Tragfähigkeit. Dies hat zur Folge, dass die geprüften Träger in Feldmitte aufgrund der Biegespannungen versagen. Bei größeren Durchmessern kommt es jedoch bei unverstärkten Durchbrüchen meist zur Rissbildung am Durchbruchrand und in weiterer Folge zum Versagen. (Ardalany, et al., 2013)

Beim Einsatz von Schrauben zur Verstärkung von Durchbrüchen kommt es bei den Versuchen ebenfalls zur Rissbildung am Durchbruchrand. Diese vergrößern sich auch so lange, bis sie die Schrauben erreichen, welche weiteres Risswachstum verhindern. Dies bewirkt eine Steigerung der Tragfähigkeit. Bei der Versuchskonfiguration von Ardalany et al. (2013) führte die Steigerung bis zu einem Verhältnis von  $h_d/h = 0,4$  so weit, dass das Versagen nicht mehr im Durchbruchsbereich, sondern in Feldmitte auftrat.

Bei größeren Durchmessern trat nach wie vor ein Versagen im Durchbruchsbereich auf, vermutlich aufgrund von einer Kombination von Spannungskonzentrationen an den Schrauben, sowie der Querschnittsschwächung, hervorgerufen durch die Bohrlöcher der Schrauben. (Ardalany, et al., 2013) Eingeklebte Gewindestangen haben eine mit Schrauben vergleichbare Wirkung. In diesem Zusammenhang ist jedoch anzumerken, dass es bei der Variante, bei der beide Gewindestangen den gesamten Träger durchdringen, zu einer derartigen Querschnittsschwächung kommt, dass ein Biegezugversagen im Durchbruchsbereich provoziert wird. Aus diesem Grund wird an der Trägerunterseite eine dünne Metallplatte aufgeklebt, um die Biegezugseite zu verstärken. (Ardalany, et al., 2013)

Als sehr effektive Methode der Verstärkung stellt sich beidseitig aufgeklebtes Sperrholz dar. Das Risswachstum am Durchbruchrand wird unterbunden und das Versagen tritt in Trägermitte auf. Auch Träger mit einseitig aufgeklebtem Sperrholz wurden untersucht. Diese zeigten zwar im Vergleich mit unverstärkten Durchbrüchen ein verbessertes Verhalten, die entstehenden Risse können an der nicht beklebten Seite des Trägers jedoch ungehindert wachsen und führten schließlich zum Versagen. (Ardalany, et al., 2013)

Bei der Versuchsreihe mit angenagelten Metallblechen zeigt sich wiederum der große Einfluss des Lochdurchmessers. Vermag das Blech bei kleinen Durchmessern den Durchbruch noch so weit zu verstärken, dass ein Biegeversagen in Feldmitte auftritt, so kann es bei größeren Durchmessern das Risswachstum am Durchbruch nicht mehr verhindern. Da Blech und Holz lediglich durch Nägel miteinander verbunden sind, kommt es bei größeren Belastungen zusätzlich zum negativen Effekt durch Spannungskonzentrationen an den einzelnen Nägeln und Beulverformungen in der Stahlplatte. (Ardalany, et al., 2013)

Zusammenfassend lässt sich folgendes festhalten: bei den Versuchen zeigt sich, dass Durchbrüche bis zu einer Größe von 50 mm keinerlei Auswirkungen auf die Tragfähigkeit der Träger hatten, wobei größere Öffnungen zu einer signifikanten Reduzierung der Lastkapazität führten. Ardalany et al. (2013) stellte fest, dass bei der getesteten Versuchskonfiguration sowohl vertikal angeordnete Schrauben und eingeklebte Gewindestangen, als auch schräg eingebrachte Schrauben im Winkel von  $45^\circ$  bis zu einem Verhältnis von  $h_d/d = 0,4$  die Tragfähigkeit des ungestörten Trägers wiederherstellen können und zu einem Biegeversagen in Feldmitte führten. Anzumerken ist, dass innenliegende Stabverstärkungen die Rissbildung am Durchbruchrand nicht verhindern können, das Risswachstum wird allerdings begrenzt. Als noch effektivere Methode der Verstärkung stellt sich beidseitig aufgeklebtes Sperrholz dar. Die Schwächung, welche der Durchbruch hervorruft kann bis zu einem Verhältnis von  $h_d/d = 0,5$  von der Verstärkung aufgefangen werden. Aufgrund der Verklebung und dem daraus folgenden vollflächigem Verbund werden am Durchbruchrand auftretende Spannungsspitzen umgelagert. So konnte die Rissbildung unmittelbar unterdrückt werden. Einseitig aufgeklebte Sperrholzplatten stellen sich hingegen als wenig effektiv heraus da an der unverstärkten Seite die zum Versagen führenden Risse entstanden und bei weiterer Laststeigerung ungehindert wachsen konnten. Die Methode einen Durchbruch mit angenagelten Stahlplatten zu verstärken führte im Vergleich mit einer komplett unverstärkten Öffnung sehr wohl zu einer Steigerung des Tragvermögens, die Kapazität eines ungestörten Trägers wurde allerdings nicht erreicht. Der ungleichmäßige, nachgiebige Verbund aufgrund der Vernagelung ist dafür verantwortlich.

In Abb. 1.34 sind laut Ardalany et al. (2013) die Lastkapazitäten der verschiedenen untersuchten Verstärkungsmethoden vergleichend dargestellt.

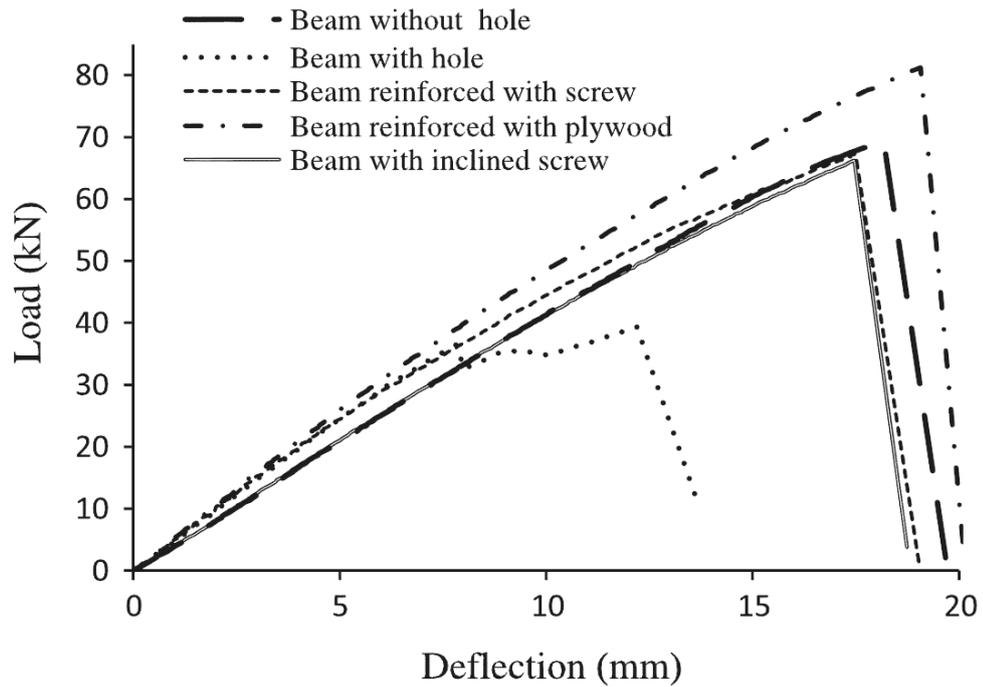


Abb. 1.34 Darstellung der Lastkapazität unterschiedlicher Verstärkungsmaßnahmen (Ardalany, et al., 2013)

## KAPITEL 2: MATERIAL UND METHODEN

Im zweiten Kapitel wird zunächst das Ausgangsmaterial der Fichtenfurniere beschrieben. Anschließend wird auf die Bestimmung der Holzfeuchte und Rohdichte inklusive der Korrekturfaktoren bei Abweichungen von Normbedingungen eingegangen. Außerdem werden einige Informationen über die verwendeten Klebstoffe angegeben. Darauf folgend sind die wichtigsten Geräte, welche zur Herstellung der Prüfkörper benötigt wurden, aufgezählt und kurz beschrieben. Dann wird näher auf die durchgeführten Arbeitsschritte bei der Fertigung der einzelnen Prüfkörper eingegangen, sowie die gewählte Prüfkörperkonfiguration vorgestellt. Anschließend folgt eine kurze Vorabschätzung der erwarteten Tragfähigkeiten, sowie der dazugehörigen Endverformung, welche zur Bestimmung der Belastungsgeschwindigkeit benötigt wurde. Außerdem werden die einzelnen Schritte der Prüfdurchführung aufgezählt und beschrieben. Im letzten Teil folgen noch Erklärungen zu den gewählten Methoden der Auswertung.

### 2-1 MATERIAL

---

#### 2-1.1 FURNIER

Die Furniere wurden in Zusammenhang mit der Masterarbeit von Schwabl (2016) „Kombinierte Nutzung von Fichtenstarkholz zur Schäl furnier- und Schnittholzerzeugung“ in Auftrag gegeben. Diese Arbeit beschäftigt sich unter anderem mit der Abschätzung der erzielbaren Ausbeute beim Schalen von Starkholzstämmen und anschließendem Einschneiden des Restquerschnittes in einem Sägewerk. Hierfür wurden an zehn Fichtenstämmen Schälversuche durchgeführt. Das daraus gewonnene Material wurde im Rahmen dieser Arbeit zur Produktion der durchbrochenen Träger und in weiterer Folge der Scherprüfkörper verwendet. Die folgenden Informationen über die Furnierproduktion wurden aus der Arbeit von Schwabl (2016) entnommen und zusammengefasst.

Als Ausgangsmaterial zur Herstellung der Versuchskörper dienten Fichtenstämmen mit einer Länge von 4 m und einem mittleren Durchmesser zwischen 76 und 94 cm. Die Stämme wurden im Furnierwerk Merkscha Furnirica in Celje, Slowenien zu Furnieren verarbeitet. Als Fertigungsverfahren wurde die Methode des Schälens gewählt. Da mit der Schälmaschine im Furnierwerk eine maximale Länge von 3,3 m verarbeitet werden konnte, mussten die Stämme noch vor dem Kochen an beiden Seiten abgelängt werden. Nach dem Entrinden wurden die Stämme zweieinhalb Tage in der Kochgrube gekocht, anfangs bei niedrigen Temperaturen, in den letzten 16 Stunden bei etwa 100°C. Nach dem Kochvorgang wurden die Rundhölzer möglichst zentrisch an der Schälmaschine eingespannt und „angeschält“ bis sie eine komplett kreiszylindrische Form aufwiesen. In dem slowenischen Furnierwerk werden keine Endlosfurniere erzeugt, es werden schichtweise einzelne Furnierblätter abgetragen. Dies wird erreicht, indem der Stamm mit wenigen Zentimeter tiefen Längsschnitten versehen wird. Der Schälvorgang wird dann so lange fortgesetzt, bis ein erneuter Einschnitt notwendig ist. Wenn eine geringe Furnierbreite gewünscht wird, kann am Umfang auch mehrfach eingeschnitten werden. Die Stämme wurden bis zu einem Restrollendurchmesser von etwa 35 cm geschält. Um festzustellen, welche Holz ausbeute aus einem Starkholzstamm erzielbar ist, wurden die Restrollen anschließend in dem Sägewerk der Mayr-Melnhof Holz Holding AG in Leoben eingeschnitten. Die Furniere wurden nach dem Trocknen an das Institut für Holzbau und Holztechnologie nach Graz geliefert. (Schwabl, 2016)

## 2-1.2 BESTIMMUNG DER HOLZFEUCHTE

Der Werkstoff Holz ist ein sogenannter kapillarporöser Stoff und besitzt aufgrund seines Aufbaus die Eigenschaft, in Abhängigkeit seiner Umgebungsbedingungen, Feuchtigkeit aufzunehmen oder abzugeben. Weiters ist Holz dazu in der Lage, aufgrund seiner porösen Struktur Feuchtigkeit mittels kapillaren Transportprozessen in seinem Inneren zu transportieren. (Niemz, 1993)

Der Feuchtegehalt hat dabei einen beträchtlichen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des Holzes. Die Bezugsholzfeuchte besitzt im Zusammenhang mit prüftechnischen Untersuchungen die größte Relevanz und ist jene Feuchte, die sich im Holz unter Lagerung bei einer Temperatur von 20°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 65% einstellt. Sie liegt laut EN 384:2016 für die meisten Holzarten bei etwa 12%. Abweichungen davon sollten möglichst gering gehalten werden.

Für experimentelle Versuche sind die Prüfkörper bis zur Versuchsdurchführung klimatisiert zu lagern. Die Zeitdauer ist von der Holzart und Bauteilbeschaffenheit abhängig, muss jedoch mindestens so lang gewählt sein, bis sich im Bauteil die Holzgleichsfeuchte einstellen kann. Bei zerstörenden Bauteilprüfungen ist laut EN 13183-1:2004 unmittelbar nach der Versuchsdurchführung ein Prüfkörper zur Bestimmung der Holzfeuchte herauszuschneiden, welcher ein Maß von  $\geq 20\text{ mm}$  in Faserlängsrichtung aufweisen und den gesamten Querschnitt umfassen muss. Die Abmessungen sind in Abb. 2.1 dargestellt.

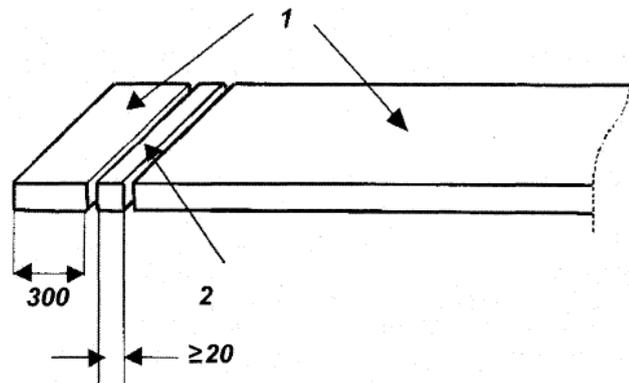


Abb. 2.1 Darstellung der Stelle zur Prüfkörperentnahme (2) aus einem Bauteil (1) laut EN 13183-1:2004

Der Prüfkörper muss unmittelbar nach dem Schneiden gewogen werden. Danach wird er in einem Darrschrank bei einer Temperatur von  $(103 \pm 2)^\circ\text{C}$  so lange getrocknet, bis der Masseunterschied zwischen zwei Wägevorgängen im Abstand von zwei Stunden 0,1% nicht überschreitet. Das Holz wird dann als darrtrocken bezeichnet.

Die Holzfeuchtigkeit errechnet sich laut EN 13183-1:2004 mit folgender Gleichung:

$$u = \frac{m_1 - m_0}{m_0} * 100 \quad (2.1)$$

wobei

- $u$  ... Holzfeuchtegehalt [%]
- $m_1$  ... Masse des Prüfkörpers vor dem Trockenvorgang [g]
- $m_0$  ... Masse des Prüfkörpers nach dem Trockenvorgang [g]

### 2-1.3 BESTIMMUNG DER ROHDICHTE

Als Rohdichte  $\rho_u$  des Holzes bezeichnet man den Quotienten aus der Masse  $m_u$  und dem äußeren Volumen  $V_u$  des makroskopischen Holzkörpers. Dabei ist der Porenraum und das darin enthaltene Wasser inkludiert. (Schickhofer, 2006)

$$\rho_u = \frac{m_u}{V_u} \quad (2.2)$$

wobei

$\rho_u$	...Rohdichte des Holzes mit der Holzfeuchte $u$ [kg/cm <sup>3</sup> ]
$m_u$	...Masse des Prüfkörpers mit der Holzfeuchte $u$ [kg]
$V_u$	...äußeres Volumen des Prüfkörpers mit der Holzfeuchte $u$ [cm <sup>3</sup> ]

Die Rohdichte ist abhängig von dem Verhältnis aus Zellwand- und Porenanteil und schwankt aus diesem Grund zwischen den verschiedenen Holzarten deutlich. Aber auch innerhalb derselben Holzart gibt es wuchs- und standortbedingte Abweichungen. Frühholz besitzt aufgrund seiner strukturellen Beschaffenheit bekanntlich eine relativ geringe Dichte, in etwa zwischen 250 und 350 kg/m<sup>3</sup>. Dem gegenüber steht das wesentlich dichtere Spätholz, welches eine Dichte von ca. 850 bis 1000 kg/m<sup>3</sup> besitzt. So wirkt sich vor allem die Jahrringbreite, bzw. die jeweilige Dicke von Früh- und Spätholzanteil auf die Rohdichte aus. (Schickhofer, 2006)

Gemäß ON EN 323:2005 erfordert die Ermittlung der Rohdichte zwei Messungen:

- Massenbestimmung
- Volumenbestimmung

Zur Massenbestimmung wird eine Waage benötigt, welche das Gewicht auf 0,01 g genau bestimmen kann. Die Volumenbestimmung kann bei quader- oder würfelförmigen Holzproben mittels Messung von Länge, Breite und Höhe und nachfolgender geometrischer Berechnung erfolgen. Ist der Probenkörper unregelmäßig geformt, so kann das Volumen mittels dem Verdrängungsverfahren auch volumetrisch bestimmt werden.

### 2-1.4 KORREKTURFAKTOREN

Wie bereits erwähnt, schwanken die mechanischen Eigenschaften des Holzes mit Änderung der Holzfeuchtigkeit. Da die Holzfeuchte der Prüfkörper selten exakt bei 12% liegt, müssen die ermittelten Kenngrößen auf die Referenzholzfeuchte umgerechnet werden.

Die Korrektur der Rohdichte erfolgt laut EN 384:2016 um 0,5% je Prozentpunkt Holzfeuchteunterschied mittels folgender Gleichung

$$\rho = \rho(u) * [1 - 0,005 * (u - u_{ref})] \quad (2.3)$$

wobei

$\rho$	...Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]
$u$	...Holzfeuchte bei der Prüfung ( $8\% \leq u \leq 20\%$ )
$u_{ref}$	...Bezugsholzfeuchte ( $u_{ref} = 12\%$ )

EN 384:2016 liefert neben der Korrekturformel für Rohdichte noch analoge Formeln zur Umrechnung von Druckfestigkeit sowie Elastizitätsmodul. Zur Korrektur von Schubfestigkeit und Schubmodul werden keine Angaben gemacht.

Laut Gehri (2010) kommt es bei steigender Holzfeuchte zu einer Reduzierung der Schubfestigkeit, da das eingelagerte Wasser die Reibung zwischen den Fasern verringert und so den Scherwiderstand herabsetzt. Zur Korrektur der Scherfestigkeit gibt er folgende Formel an:

$$f_{v,u\%} = f_{v,12\%} * [1 - 0,025 * (u - 12\%)] \quad (2.4)$$

wobei

$f_{v,u\%}$	... Festigkeitswert bei der Holzfeuchte zum Zeitpunkt der Prüfung [N/mm <sup>2</sup> ]
$f_{v,12\%}$	... Festigkeitswert bei der Bezugsholzfeuchte von 12 % [N/mm <sup>2</sup> ]
$u$	... Holzfeuchte bei der Prüfung [%]

Laut Gehri (2010) kann je Prozentpunkt Holzfeuchtigkeit mit einer Änderung der Schubfestigkeit bei Brettschichtholz um 2,5% gerechnet werden. Dasselbe gilt auch für den Schubmodul. Diese Annahme deckt sich mit der von Kollmann (1951) getroffenen Aussage. Laut ihm kommt es je Prozentpunkt Holzfeuchte zu einer maximalen Veränderung der Scherfestigkeit um 3%, allerdings sind eher leicht niedrigere Werte anzusetzen. Aus diesem Grund wird für die Auswertung mit dem von Gehri (2010) vorgeschlagenen Wert von 2,5% gerechnet.

Auffällig ist, dass die Norm EN 384:2016 als Grundgesamtheit zur Bestimmung des Prozentsatzes die Messgröße bei vorliegender Holzfeuchte heranzieht. Gehri (2010) hingegen bezieht sich bei der Ermittlung des Korrekturwertes bereits auf den Wert der Messgröße bei 12% Holzfeuchtigkeit. Diese unterschiedliche Herangehensweise führt zu leicht abweichenden Ergebnissen.

Die Korrektur der Biegespannungen ist laut EN 384:2016 im Holzfeuchtebereich zwischen 8% und 18% nicht notwendig.

## 2-1.5 KLEBSTOFF

Beim Herstellen der Prüfkörper wird zum Verkleben der Furnierträger, sowie zum Ankleben der außenliegenden Verstärkungsplatten und der Lamellen zur Verbreiterung des Kraftereinleitungsquerschnittes ein flüssiger Einkomponenten-Polyurethanklebstoff ohne Zusatz von Lösungsmitteln und Formaldehyd verwendet. Dieser erhärtet unter dem Einfluss von Material- und Luftfeuchtigkeit der Umgebung. Während der Härtung des Klebstoffes kommt es durch die chemische Reaktion zu einem leichten Aufschäumen.

Damit der chemische Vorgang des Erhärtungsprozesses die gefügten Holzteile bestmöglich verbindet, muss ein bestimmter Pressdruck gewährleistet werden. Beim verwendeten Klebstoff ist laut Datenblatt der im Holzleimbau üblicherweise verwendete Pressdruck von 0,6 bis 0,8 N/mm<sup>2</sup> angegeben. Der Klebstoffauftrag erfolgt mit einer speziellen Auftragsmaschine im Durchlaufverfahren, dabei wird eine Menge von mindestens 180 g/m<sup>2</sup> aufgetragen. Die Presszeit ist abhängig von Temperatur und Feuchtegehalt des Holzes. Bei geraden Trägern bei einer Temperatur von 20°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 65% ist eine Mindestpresszeit von 6,5 Stunden einzuhalten. Nach einer Zeit von 48 Stunden bei 20°C hat der Klebstoff seine Endfestigkeit erreicht.<sup>5)</sup>

Zum Verkleben der außen aufgetragenen Sperrholzplatten wird jedoch ein anderer Klebstoff verwendet: ein flüssiger Zweikomponenten-Melaminharzkleber. Dieser setzt sich aus Harz und Härter zusammen und erhärtet bei einer chemischen Reaktion ohne Bedarf an Feuchtigkeit. Die Erhärtungsgeschwindigkeit wird dabei vom Mischungsverhältnis beeinflusst und ist zudem stark temperaturabhängig. Es wird eine Auftragsmenge von 320 – 500 g/m<sup>2</sup> empfohlen, der Pressdruck sollte bei Weichholz zwischen 0,8 – 1,2 N/mm<sup>2</sup> liegen. Genauere Informationen lassen sich dem technischen Merkblatt des Klebstoffes entnehmen.<sup>6)</sup>

<sup>5)</sup> Siehe Produktdatenblatt PURBOND HB 181

<sup>6)</sup> Siehe Technisches Merkblatt Prefere 4546

## 2-2 GERÄTE

Im Zuge der Herstellung der Prüfkörper und dem anschließenden Prüfvorgang wurde mit einer Reihe von verschiedenen Geräten gearbeitet. Die wichtigsten werden im Folgenden kurz beschrieben.

### Furnierpresse

Nach dem Auftrag des Klebstoffes wurden die Einzelfurniere zu Paketen geschichtet und gepresst. Dies erfolgte mit einer Furnierpresse der Marke „Langzauner“. Der Pressdruck wird bei diesem Gerät mit zehn hydraulischen Zylindern aufgebracht, welche eine maximale Druckkraft von 160 t erzeugen können. Dabei lässt sich der Druck stufenlos regulieren. Wenn nicht die gesamte Pressfläche von 3,0 m \* 1,35 m benötigt wird, können auch nur sechs Hydraulikzylinder betrieben werden. Für spezielle Klebevorgänge können die Pressplatten beheizt werden. Im Zuge dieser Arbeit wurde bei den einzelnen Herstellungsschritten mit unterschiedlichem Pressdrücken gearbeitet (siehe Kap. 2-3).



Abb. 2.2 Furnierpresse „Langzauner“ LZT 160-SF

### Klebstoffauftragsmaschine

Um eine möglichst gleichmäßige Klebstoffverteilung zu gewährleisten, wurde bei der Herstellung der durchbrochenen Träger mit einer automatischen Klebstoffauftragsmaschine gearbeitet. Bei diesem Gerät werden die zu beklebenden Teile mit Hilfe von angetriebenen Rollen durch einen Klebstoffvorhang geschickt. Der Klebstoff wird dabei mittels Pressluft aus einem Metallfass gefördert. Damit nicht unnötig Klebstoff verbraucht wird, schaltet sich die Druckluft nur an, wenn die Maschine mit Fügeteilen beschickt wird und so eine Laserschranke ausgelöst wird. Da mit der Klebstoffauftragsmaschine nur ein 30 cm breiter Klebstoffvorhang erzeugt werden kann, wurde die endgültige Trägerbreite mit 27 cm gewählt, um die Herstellung zu erleichtern. Die einzelnen Furniere besaßen eine Breite von ca. 30 cm; nach dem Kleben wurden sie mit der Kreissäge zugeschnitten.



Abb. 2.3 Klebstoffauftragsmaschine während des Klebevorganges

## Langlochbohrmaschine und Oberfräse

Um die Löcher für die Querdruckverstärkungsschrauben vorzubohren, wurde eine Langlochbohrmaschine verwendet. Diese besitzt einen kleinen Maschinentisch und eine waagrecht ausgerichtete Bohrspindel, welche mit einem Hebel in der Ebene zweiachsig bewegt werden kann.

Zum Herstellen des Durchbruches wurde mit einer Oberfräse gearbeitet. Diese in der Frästiefe verstellbare Maschine wird händisch geführt. Um die Form und Position bei allen Versuchskörpern identisch fertigen zu können, wurde eine kreisrunde Schablone verwendet, welche am Träger fixiert wurde. So konnte der Durchbruch in mehreren Frässhritten hergestellt werden.



Abb. 2.4 Langlochbohrmaschine (links) und Oberfräse (rechts)

## Universalprüfmaschine

Die Versuchsdurchführung erfolgte mit Hilfe der Universalprüfmaschine Z-250 der Firma Zwick (Deutschland), welche eine Last von  $\pm 275 \text{ kN}$  aufbringen kann. Die Kraft wird bei diesem Modell über eine Antriebsspindel mechanisch aufgebracht. Die Messung der Last erfolgt über eine in der Maschine integrierte Kraftmessdose; der Traversenweg wird ebenso aufgezeichnet. An der Maschine lassen sich verschiedene Lasteinleitungsplatten und Auflagerböcke montieren. Zur Krafteinleitung wurde für die vorliegende Arbeit eine quadratische Metallplatte mit einer Kantenlänge von  $10 \text{ cm}$  verwendet. Im Falle der Biegeversuche wurden zwei Auflagerböcke im Abstand von  $985 \text{ mm}$  angeordnet, welche ebenso eine  $10 \text{ cm}$  breite Auflagerplatte aus Metall besitzen und gelenkig gelagert sind. An den Maschinentisch wurden noch zusätzlich Holzwinkel montiert, welche als Kipphalterung dienten und ein seitliches Ausweichen des Trägers bei Belastung verhinderten. In Abb. 2.5 ist die Universalprüfmaschine mit dem Aufbau für die Durchbruchversuche dargestellt. Der Träger war an vier Stellen beidseitig gegen Kippen gesichert. Zwischen den Trägern und der Kipphalterung wurden Rollen eingelegt, um die Reibung zu minimieren.



Abb. 2.5 Universalprüfmaschine mit dem Aufbau für die Durchbruchversuche

### Messsystem

Um die Schubsteifigkeit der Furnierholzträger zu bestimmen, wurde die Verzerrung eines vordefinierten Schubfeldes laut ON EN 408:2012 gemessen. Hierfür wurden vier Stück Dehnungsaufnehmer mit DMS-System der Marke HBM mit der Bezeichnung DD1 verwendet. Diese besitzen einen Messbereich von  $\pm 2,5 \text{ mm}$  (Linearitätsabweichung  $\pm 0,05 \%$ ) und wurden auf eine brückenförmige Messbasis montiert und überkreuzt auf dem Prüfkörper angebracht (siehe Kap. 2-7.1.2 und Abb. 2.14).

Die Durchbiegung des Trägers sowie die Verzerrung der Scherfuge bei den Schubprüfungen wurden mittels induktiver Wegaufnehmer mit Tastspitze gemessen. Der Messweg war bei beiden Versuchsreihen unterschiedlich: bei den Durchbruchversuchen wurde ein WA20 verwendet (Nennmessweg  $20 \text{ mm}$ ), im Falle der Scherversuche kam ein WA 10 (Nennmessweg  $10 \text{ mm}$ ) zum Einsatz. Die Linearitätsabweichung liegt bei diesen Wegaufnehmern bei  $\pm 0,2 \%$ . Der Hersteller dieser war ebenso die Firma HBM. Die Messsysteme sind in Abb. 2.6 dargestellt.



Abb. 2.6 Dehnungsaufnehmer DD1 (links) und induktiver Wegaufnehmer (rechts) (Quelle: [www.hbm.com](http://www.hbm.com))

## **Darrschrank**

Mit dem Trockenschrank der Firma Heraeus kann die Holzfeuchte mittels der Darmethode bestimmt werden. Das Gerät arbeitet mit natürlicher Konvektion in einem Temperaturbereich bis zu 250° C. Nähere Informationen über die Art und Weise der Holzfeuchteermittlung finden sich in Kap. 2-1.2.



*Abb. 2.7 Darrschrank*

## **2-3 PRÜFKÖRPERHERSTELLUNG**

Die Versuchskörper bestehen aus Fichtenfurnieren und wurden am LTC (Lignum Test Center) in Graz unter der Leitung des Institutes für Holzbau und Holztechnologie hergestellt. Dabei wurden nicht nur die Furnierholzträger zur Durchführung der Durchbruchversuche selbst produziert, auch die bei Serie C und D außen aufgeklebten Sperrholzplatten wurden im Labor gefertigt. Nachdem die Prüfungen mit den durchbrochenen Trägern abgeschlossen waren, wurden die unbeschädigten Trägerhälften verwendet um damit Schubprüfungen im Winkel von 14° durchzuführen. Die Adaptierung der Prüfkörper und der Zuschnitt zur Schubprüfkonfiguration wurden ebenfalls im Labor selbst durchgeführt. Die Vorgehensweise bei der Herstellung sowie eine Beschreibung der benötigten Arbeitsschritte sind im Folgenden angeführt. Anzumerken gilt, dass die Prüfkörper abseits aller Bearbeitungen stets in der Klimakammer unter Normbedingungen (20° C, 65% rel. Luftfeuchtigkeit) gelagert wurden.

### **2-3.1.1 Furnierschichtholzträger mit Durchbruch**

#### **Materialauswahl**

Die einzelnen, durch Schälen produzierten, Rohfurniere wurden getrocknet, aufeinandergeschichtet und zu einem Paket auf eine Holzpalette geschnürt, geliefert. Es handelte sich bei dem Material um ein sogenanntes Schäl furnier (zu Erklärungen bezgl. Herstellung siehe Kap 1-2.1). Die Furnierblätter hatten eine Breite von etwa 1,2 m und eine Länge von bis zu 3,3 m. Die Furniere waren teilweise gerissen und wiesen Astlöcher auf, ebenso war ihre Form aufgrund des Schälvorganges und der natürlichen Wuchsform des Stammes meist sehr unregelmäßig. Je nach Größe und Zustand eines Furnierblattes ließen sich daraus 2-6 Einzellamelle mit den ungefähren Rohmaßen der späteren Prüfkörper gewinnen. Dabei wurde darauf geachtet, Risse und Astlöcher möglichst auszusortieren, ohne jedoch zu viel Rohmaterial dabei zu verschwenden. Die für die Versuchskörper verwendeten Furniere stammen alle vom selben Baum.

Nach dem Aussortieren folgte der erste grobe Zuschnitt mit der Kreissäge zu den Rohmaßen von ca.  $l/h = 130/30\text{ cm}$ . Die Wahl der Breite begründet sich mit den Abmessungen der zum Kleben

verwendeten Durchlaufmaschine. Diese kann einen 30 cm breiten Klebstoffvorhang erzeugen, durch den die Einzellamellen geschickt werden. Dann wurden die Furniere aussortiert und zu Paketen von je 13 Einzellamellen zusammengestellt. Da die Materialkenngrößen des Holzes bekanntlich über die Stammstärke variieren, wurde darauf geachtet, die Furniere bei der Schichtung möglichst gut zu durchmischen. Da wie in Kap. 1-2.1.3 erwähnt auch die Beschaffenheit der beim Schälen dem Messer zugewandten Seite und jener dem Druckbalken zugewandten Seite verschieden ist, wurden die Furniere auch abwechselnd um 180° um die Längsachse geneigt, um den Querschnittsaufbau möglichst zu homogenisieren. Anschließend wurden die Pakete der Einzellamellen in die Klimakammer gegeben.



*Abb. 2.8 Rohmaterial für die Herstellung der Prüfkörper*

## **Klimatisieren**

Die Furniere waren zunächst in der Prüfhalle gelagert. Das Klima dort entspricht nicht den von der Norm EN 484:2016 vorgesehenen 20° C Umgebungstemperatur und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 65%. Damit sich im Holz die Ausgleichsfeuchte einstellen kann, muss das Material ausreichende Zeit bei konstanten Normbedingungen klimatisiert werden. Bei vielen Holzarten ist eine Holzausgleichsfeuchte von rund 12% zu erwarten.

Die Holzfeuchtigkeit spielt auch für die Verklebung der Furniere eine große Rolle. Der verwendete Klebstoff entzieht beim Erhärtungsprozess seiner Umgebung, und damit vor allem dem Holz, Feuchtigkeit. Um eine optimale Verklebung zu gewährleisten, benötigt der Klebstoff laut Datenblatt eine Holzfeuchtigkeit von mindestens 10%. Ansonsten kann das Holz durch einen Sprühnebel leicht mit Wasser benetzt werden, um ausreichend Feuchtigkeit zu gewährleisten.

Aufgrund der trockenen Bedingungen in der Prüfhalle wurden die zugeschnittenen Furniere nach dem Zuschnitt in die Klimakammer gegeben, um die Holzfeuchte nach oben zu korrigieren. Nach etwa zweieinhalb Wochen in der Klimakammer wurde bei einigen kleinen Probestücken die Holzfeuchte mittels Darrtrocknungsmethode überprüft, welche knapp über 10% lag. Somit war das Rohmaterial bereit zur Verklebung.

## **Kleben**

Zum Verkleben der Furnierholzträger wurde ein flüssiger Einkomponenten-Polyurethanklebstoff verwendet (siehe 2-1.5). Um einen gleichmäßigen Klebstoffauftrag zu garantieren, wurde mit einer automatischen Klebstoffauftragsmaschine gearbeitet. Die drei Prüfkörper der Serie E waren als Furniersperrholzträger geplant und besaßen jeweils drei Querlagen. Diese Querlagen mussten vor dem eigentlichen Kleben noch vorbereitet werden. Hierfür wurden einzelne etwa 30 cm lange Furnierstücke nebeneinandergelegt und mit einem Furnierklebeband provisorisch fixiert, sodass auch sie durch den Klebstoffvorhang der Maschine geschickt werden konnten. Die Faserorientierung der Querlagen war 90° zur Trägerlängsrichtung.

Beim eigentlichen Klebevorgang wurde die Klebstoffauftragsmaschine von einer Person nacheinander mit den einzelnen Furnierblättern beschickt, welche dann automatisch über Rollen durch den

Klebstoffvorhang geführt wurden. Am anderen Ende der Maschine wurden die Furniere von zwei Personen entnommen und möglichst schnell zu den jeweiligen 13-schichtigen Paketen zusammengestellt (siehe Abb. 2.9 links). Aus Platzgründen wurden pro Presszyklus vier Träger hergestellt, der Klebevorgang musste deswegen viermal durchgeführt werden, um alle 16 Versuchskörper zu produzieren.

## **Pressen**

Nach dem Kleben wurden je vier Träger in die Presse gegeben. Der eingestellte Pressdruck ergab bezogen auf die Gesamtfläche der Prüfkörper etwa eine Spannung von  $0,7 \text{ N/mm}^2$ . Das Herstellen der Furnierholzträger benötigte aufgrund der erforderlichen Presszeit insgesamt zwei Tage. Die ersten vier Träger wurden am Morgen verklebt und gepresst, nachmittags nach etwa 7 Stunden wurden sie herausgenommen und direkt in die Klimakammer gegeben. Dann wurden die nächsten vier Träger verklebt und in die Presse gegeben, wo sie über Nacht blieben. Am nächsten Tag war das Vorgehen dasselbe.



*Abb. 2.9 Stapelung der mit Klebstoff benetzten Einzelfurniere (links) und Einlegen von jeweils vier Versuchskörpern in die Furnierpresse (rechts)*

## **Zuschneiden**

Nach dem Pressen folgte das Zuschneiden der Träger. Die Prüfkörper wurden mit der Kreissäge auf ihre endgültigen Maße geschnitten. Die Abmessungen sind in Kap. 2-4.1 dargestellt.

## **Herstellen der außen aufgeklebten Furniersperrholzplatten**

Wie bereits erwähnt, wurden die Durchbrüche der Prüfkörper von Serie C und Serie D mit außen aufgeklebten Sperrholzplatten verstärkt. Diese Platten besaßen jeweils eine Gesamtstärke von  $7,5 \text{ mm}$  und hatten einen 5-schichtigen gesperrten Aufbau aus  $1,5 \text{ mm}$  dicken Schäl furnieren.

Die Platten waren genauso hoch wie der Furnierschichtholzträger und ragten an beiden Seiten der Öffnung im Träger je  $10 \text{ cm}$  in Achsrichtung über den Durchbruchrand hinaus (siehe Kap 2-4.1). Nach dem Aussortieren der großen Einzelfurniere erfolgte der erste grobe Zuschnitt mit etwas Übermaß gegenüber den Endabmessungen. Dabei wurden 6 Platten mit der Decklage vertikal zur Trägerachse ausgerichtet hergestellt (Serie C), sowie 6 Platten, bei denen die Faserrichtung der Decklage diagonal im Winkel von  $45^\circ$  angeordnet war. Für die Verklebung wurde ein Zwei-Komponenten-Klebstoff verwendet, welcher ohne Feuchtigkeitzufuhr aus der Umgebung erhärtet. Aus diesem Grund mussten die Furniere vorher nicht klimatisiert werden (siehe Kap. 2-1.5). Der Klebstoff wurde in dem, auf dem Produktdatenblatt angegebenen, Verhältnis abgemischt und mit einer Zahnpachtel gleichmäßig auf der Holzoberfläche verteilt. Der Druck in den hydraulischen Kolben der Presse wurde so eingestellt, dass sich eine Pressspannung von  $0,6 \text{ N/mm}^2$  auf die Sperrholzplatten ergab. Nach dem Pressvorgang wurden die Platten auf die richtige Länge geschnitten. Die Breite der Sperrholzplatten wurde allerdings größer als die Trägerbreite belassen, der Überstand wurde nachträglich mit einer Oberfräse bündig gefräst.

Zum Ankleben der Sperrholzplatten an die Furnierholzträger wurde wiederum der Polyurethanklebstoff

HB 181 verwendet, welcher wiederum händisch mit einer Zahnpachtel aufgetragen wurde. Da die Sperrholzplatten nicht ausreichend lange klimatisiert waren und sich somit keine Ausgleichsfeuchte einstellen konnte, wurden sowohl Platten als auch Träger, wie in der Zulassung des Klebstoffes beschrieben, leicht mit einem Sprühnebel aus Wasser benetzt. Es wurde wiederum ein Pressdruck von  $0,6 \text{ N/mm}^2$  eingestellt.

## **Bohren, Fräsen**

Als nächstes wurde der Durchbruch gefertigt. Hierfür wurde eine Schablone mit einem Durchmesser von  $135 \text{ mm}$  hergestellt und an dem Träger befestigt. Nun konnte mit Hilfe einer Oberfräse der Durchbruch gefräst werden. Die Fräse wurde dabei in mehreren Schritten um je ca.  $5 \text{ mm}$  zugestellt, da es nicht möglich war, die gesamte Trägertiefe in einem Durchgang zu fertigen. Mit derselben Fräse wurden, unter Verwendung eines Anschlagringes am Fräskopf, die überstehenden Plattenteile der aufgeklebten Sperrhölzer mit der Trägerober- und -unterkante bündig gefräst.

Für die Auflagerverstärkung und den Krafteinleitungspunkt waren Schraubverstärkungen vorgesehen. Die Schrauben wurden mit einem Durchmesser von  $12 \text{ mm}$  gewählt, und mussten vorgebohrt werden. Um die Bohrungen perfekt in ihrer Lage und zentrisch am Träger zu positionieren, wurde zunächst mit einer Langlochbohrmaschine und einem Holzspiralbohrer ein kurzes Bohrloch hergestellt. Anschließend konnte mit einem Akkuschauber und einem Holzschlangenbohrer das Bohrloch händisch auf die gewünschte Tiefe gebohrt werden. Damit der Schraubenkopf bündig mit der Trägerkante abschließen konnte, wurden die Bohrungen noch mittels eines Senkkopfbohrers an der Standbohrmaschine gesenkt. Die schräg angeordneten Verstärkungsschrauben am Durchbruchsrand besaßen ebenfalls einen Durchmesser von  $12 \text{ mm}$  und mussten vorgebohrt werden. Die Bohrung im Winkel von  $45^\circ$  herzustellen gestaltete sich als etwas schwieriger. Hierfür wurde eine eigene Schablone hergestellt, welche am Träger aufgesetzt wurde, um den sehr schlanken Schlangenbohrer zu führen und ein möglichst gerades Bohrloch herzustellen. Diese Bohrlöcher mussten nicht versenkt werden, da die Schrauben nicht bündig mit der Holzoberkante eingedreht wurden.

## **Adaptierung der Prüfkörper**

Da sich beim ersten durchgeführten Versuch eines Prüfkörpers der Serie A zeigte, dass zwei Schrauben als Verstärkung am Krafteinleitungspunkt nicht ausreichten, musste dieser Trägerbereich noch durch weitere Maßnahmen verstärkt werden. Zusätzliche Schrauben waren aufgrund der geringen Trägerbreite und der relativ beengten Platzverhältnisse in Trägerlängsrichtung nicht möglich. Deshalb wurde entschieden, den Krafteinleitungsbereich mittels Verbreiterung durch außen aufgeklebte Laschen zu verstärken. Für die Laschen wurden Stücke aus handelsüblichem Kerto-S verwendet, welche mit ihrer Faserrichtung senkrecht zur Trägerachse aufgeklebt wurden. So konnte die Kraft der Prüfmaschine direkt über Flächenpressung auf die Stirnfläche der Laschen übertragen werden und von dort über die Klebefuge in den Träger gelangen. Obwohl die ursprünglich geplanten Querdruckschrauben in Feldmitte aufgrund der nunmehr geringen Steifigkeit gegenüber den Laschen aus Kerto-S kaum mehr Wirkung zeigen dürften, wurden sie aufgrund der Tatsache, dass sämtliche Träger bereits vorgebohrt waren, trotzdem eingeschraubt. Um dem Aufspalten der Furniere in Feldmitte entgegenzuwirken, wurde zudem im oberen Bereich des Trägers, unmittelbar unterhalb der Krafteinleitung eine Schraube durch beide Laschen und den Träger angeordnet. Diese sollte die Furnierschichten bei auftretenden Querkraften zusammenhalten.

### **2-3.1.2 Schubprüfkörper $14^\circ$**

Nach dem Abschließen der Biegeversuche mit den durchbrochenen Furnierholzträgern wurden die Prüfkörper weiterverwendet, um bei Scherversuchen im Winkel von  $14^\circ$  die Schubfestigkeit des Materials zu ermitteln. So war jene Hälfte des Trägers, an welcher die Öffnung positioniert war, nach Ende der Biegeprüfungen in allen Fällen zerstört und nicht mehr weiter zu verwenden. Die andere Hälfte hingegen war bis auf wenige Ausnahmen unbeschädigt. So war es möglich, aus jeder nicht zerstörten

Trägerhälfte je zwei neue Versuchskörper für die Schubprüfungen zu gewinnen. Welche Arbeitsschritte für die Herstellung ebenjener notwendig waren, wird im Folgenden kurz beschrieben.

### **Zuschneiden**

Der Auflagerbereich mit den Bohrungen für die Querdruckverstärkung, sowie die Feldmitte mit den aufgeklebten Laschen wurde zunächst mit der Kreissäge abgeschnitten. Das so entstehende Trägerstück wurde anschließend noch in der Höhe geteilt und auf die Außenmaße der Schubprüfkonfiguration zugeschnitten. Somit ergeben sich Rechteckquerschnitte mit den ungefähren Rohmaßen von  $l/b/h = 350/134/40\text{ mm}$ . Da Aufgrund der geringen Querschnittsfläche die Krafteinleitung nicht ausschließlich über den Furnierholzquerschnitt erfolgen konnte war es notwendig, den Prüfkörper mit jeweils vier aufgeklebten Verstärkungslaschen zu verbreitern. Als Material hierfür wurde Pollmeier Baubuche gewählt. Die Stücke wurden ebenso mit der Kreissäge mit den Abmessungen von etwa  $l/b/h = 300/50/40\text{ mm}$  zugeschnitten.

### **Kleben und Pressen**

Die Prüfkörper aus Fichtenfurnierholz wurden bereits zum Durchführen der Biegeprüfungen stets in der Klimakammer gelagert. Aus Zeitgründen wurde auf ein Klimatisieren bei Normbedingungen im Falle der Baubuche verzichtet. Da wiederum der Klebstoff Purbond HB 181 verwendet wurde, mussten die Buchenteile zunächst mit einem leichten Sprühnebel aus Wasser benetzt werden, um ausreichend Feuchtigkeit für den chemischen Erhärtungsprozess des Klebstoffes bereitzustellen. Der Klebstoffauftrag erfolgte erneut händisch mit einer Zahnpachtel und einer Menge von etwa  $150\text{ g/m}^3$ . Im ersten Klebedurchgang wurden zwei Verstärkungslaschen auf eine Seite des Prüfkörpers geklebt; nach dem Erhärten etwa 6 Stunden später wurden die Laschen an der Rückseite aufgeklebt. Gepresst wurde mit allen 10 Hydraulikkolben bei einem Pressdruck von  $0,6\text{ N/mm}^2$ . Nach dem Pressvorgang wurden die Prüfkörper in der Klimakammer gelagert.



*Abb. 2.10 Händischer Klebstoffauftrag mit Zahnpachtel (links) und Einlegen der Probekörper in die Furnierpresse (rechts)*

### **Formatieren und Bohren**

Um die nach dem Kleben noch rechteckigen Prüfkörper in ihre endgültige Form (siehe Kap. 2-4.2) zu bringen, mussten sie noch mit der Kreissäge formatiert werden. Zum Schneiden der schrägen Flächen wurde das Sägeblatt um  $14^\circ$  zur Vertikalen geneigt. Um die Stufen aus dem Prüfkörper zu schneiden, wurde das Sägeblatt in der Schnitttiefe verstellt, um mit dem Schnitt genau die gewünschte Höhe zu erreichen. Um an den Krafteinleitungspunkten das Aufspalten der Furnierlagen des Prüfkörpers zu verhindern, wurde im Abstand von  $2\text{ cm}$  zum Rand eine Schraube zur Querkzugverstärkung angeordnet. Zunächst wurde hierfür mit der Standbohrmaschine das Bohrloch vorgebohrt. Um durch den gesamten Prüfkörper durchzubohren, musste das Bohrloch noch mit einem Akkuschauber mit Schlangenbohrer verlängert werden.



Abb. 2.11 Zuschneiden der Prüfkörper auf die endgültige Form

### **Adaptierung der Prüfkörper**

Für die Prüfkörper der Serie E, welche aus Furniersperrholz mit drei innenliegenden Querlagen bestanden, war eine Adaptierung der Prüfkörper notwendig. Bei Belastung kam es zu einem unbeabsichtigten Rollschubversagen im Bereich der Krafteinleitung. Erwünscht hingegen war ein Schubversagen in der dafür vorgesehenen Scherfuge. Um die Krafteinleitung aus den aufgeklebten Laschen in den Prüfquerschnitt zu verbessern und Rollschubversagen zu unterbinden, wurden über Kreuz angeordnete Schraubverstärkungen im Winkel von  $45^\circ$  durch die Laschen und den Prüfquerschnitt ausgeführt. Um die Löcher in  $45^\circ$  vorzubohren, wurde mit einer Langlochbohrmaschine gearbeitet. Die Prüfkörper wurden auf dem Bearbeitungstisch im korrekten Abstand und Winkel eingerichtet und mit einem Exzenter geklemmt. Nun konnte der Bohrkopf mit einem Hebel in Bewegung gesetzt werden. Da die realisierbare Bohrtiefe jedoch relativ gering war, musste im Anschluss jedes Bohrloch noch mit dem Akkuschauber händisch durch den gesamten Querschnitt gebohrt werden.

## **2-4 PRÜFKONFIGURATIONEN**

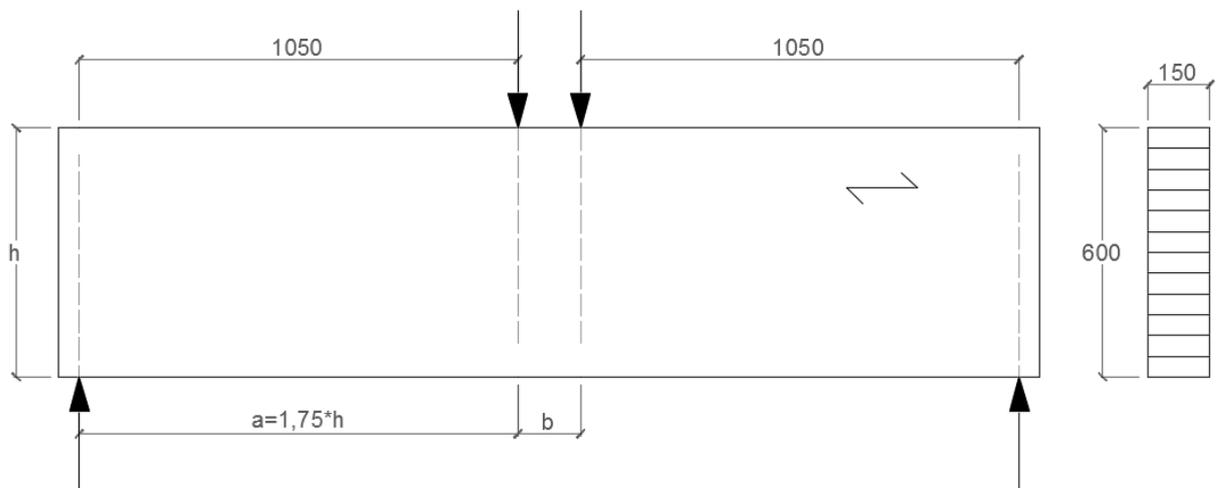
Im Zuge dieser Arbeit wurden zwei verschiedene Versuchsreihen durchgeführt. Das Hauptaugenmerk war dabei auf den Prüfungen der durchbrochenen Furnierholzträger, wobei die Auswirkung und die Effektivität unterschiedlicher Verstärkungsmaßnahmen untersucht, und in Relation mit der Tragfähigkeit eines undurchbrochenen Trägers gesetzt wurden. Die Furnierholzplatten aus denen die Versuchskörper bestanden, wurden selbst produziert und unterlagen somit keiner Produktnorm bzw. Zulassung. Aus diesem Grund gab es keine genauen Angaben über Steifigkeits- bzw. Festigkeitskennwerte. Da es sich bei den Durchbruchversuchen, wie im Folgenden unter Kap. 2-4.1 beschrieben, um eine sogenannte Schubprüfkonfiguration handelt, bei der die Versuchskörper erwartungsgemäß auf Schubbruch versagen, war die Schubfestigkeit der Träger wesentlich für die Auswertung. Deshalb wurden nach den Biegeversuchen mit den unbeschädigten Resten der ersten Versuchsreihe noch zusätzliche Scherprüfungen zur Bestimmung der Schubfestigkeit durchgeführt. Die genauen Prüfkonfigurationen sowie Beschreibungen zu den verschiedenen Prüfserien werden im Folgenden erläutert.

### **2-4.1 BIEGEPRÜFUNG MIT DURCHBROCHENEN TRÄGERN**

Bei den spannungstheoretischen Untersuchungen der Durchbruchperipherie mittels FE-Analysen hat sich gezeigt, dass die durch die Öffnung im Träger hervorgerufenen Querspannungen maßgeblich für das Versagen eines durchbrochenen Trägers verantwortlich sind. Wie aus den bekannten Formeln der ÖNORM B 1995-1-1:2015, aber auch aus themenbezogenen Forschungen (siehe Kap. 1-3.1.2) hervorgeht, werden diese quer zur Faser ausgerichteten Kräfte durch zwei Komponenten bestimmt: der durch die Aussparung im Träger gestörte Schubfluss, aber auch das am Durchbruch auftretende Biegemoment tragen einen Teil zu den Querspannungen bei. Wie aus der Literaturrecherche deutlich wird ist der Beitrag, welcher aus den Umlenkkraften der Schubbeanspruchung hervorgeht, wesentlich höher als jener der Biegebeanspruchung.

Gehri (2010) setzt sich in seiner Arbeit mit schubbeanspruchten Trägern auseinander. Er untersucht Brettschichtholzträger hinsichtlich ihrer Schubfestigkeiten und –steifigkeiten in Abhängigkeit von verschiedenen Holzfeuchtigkeiten, Temperaturen, Belastungsarten und –richtungen, sowie unter Berücksichtigung des Einflusses von Volumen- und Größeneffekt.

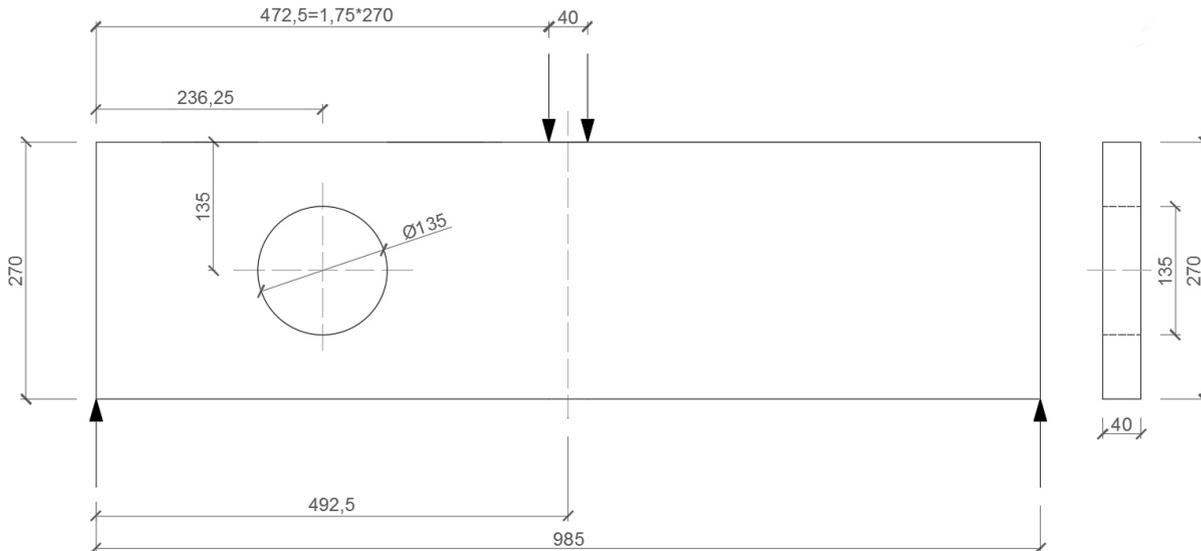
In einem tragenden Bauteil unter Last kommt es in den meisten Fällen zu einer Interaktion von Querkraft und Biegemoment. Dabei ist vor allem die Größe der Momentenbeanspruchung wesentlich von der Spannweite abhängig. Gehri schlägt eine Schubprüfkonfiguration vor, bei welcher die Spannweite von der Trägerhöhe abhängt. Es handelt sich dabei um einen Vierpunktbiegeversuch, wobei der Abstand zwischen den Krafteinleitungspunkten der Trägerbreite entspricht. Die Länge zwischen Auflagerpunkt und Krafteinleitungspunkt ergibt sich zu  $1,75 \cdot$  Trägerhöhe  $h$ . Aus diesen Verhältnissen erhält man einen Prüfkörper, welcher aufgrund seiner verhältnismäßig kurzen Spannweite bei Belastung stark schubbeansprucht wird. Im Allgemeinen wird die Querkraftbelastung für das Versagen des Trägers maßgebend, da es zu einem Schubversagen kommt ehe in Feldmitte der Wert der Biegefestigkeit erreicht wird. Da wie bereits erwähnt die Querkraft am Durchbruchrand den Hauptanteil zur Querkraftbelastung beiträgt, eignet sich diese Prüfkonfiguration um den Einfluss von Schub an einem Träger mit Durchbruch zu untersuchen.



**Abb. 2.12 Schubprüfkonfiguration nach Gehri (2010)**

Gehri selbst führt mit dieser Schubprüfkonfiguration Versuche auch an durchbrochenen Trägern durch, um das von ihm entwickelte Verstärkungsverfahren der schräg eingeklebten Gewindestangen zu testen (siehe Kap. 1-3.2.2). An ungestörten Trägern kommt es zu Schubversagen ausgehend vom Krafteinleitungspunkt bis über das Auflager zum Trägerende hin. Im Falle der Durchbrüche ist die Verstärkung mittels Gewindestangenanker so effektiv, dass es ebenfalls zum Schubversagen in der ungestörten Feldhälfte kommt. Bei keinem der von Gehri untersuchten Prüfkörper kam es zu einem Biegeversagen.

Die von Gehri vorgeschlagene Prüfkonfiguration wird für die vorliegende Arbeit verwendet und adaptiert. So ergeben sich die in Abb. 2.13 dargestellten Abmessungen.



**Abb. 2.13 Darstellung der Prüfkonfiguration**

Die Trägerhöhe wurde aus produktionstechnischen Gründen (siehe Kap. 2-3) mit 270 mm festgelegt, wodurch sich für die Schubprüfkonfiguration nach Gehri (2010) eine Spannweite von 985 mm ergibt. Der Abstand zwischen Auflager und Krafteinleitungspunkt betrug demnach  $1,75 \cdot 270 = 472,5 \text{ mm}$ , auf halber Länge davon wurde der Durchbruch angeordnet. Dieser hatte einen Durchmesser von  $h_d = h / 2$ . Die Querschnittsbreite ergab sich aus dem 13-schichtigen Aufbau bestehend aus 3 mm dicken Einzelfurnieren in etwa mit 40 mm. Dieser Abstand war auch für die Entfernung zwischen den zwei Krafteinleitungspunkten der Vierpunktbiegeprüfung vorgesehen. Da der Abstand allerdings so gering war, wurde zur Krafteinleitung der Einfachheit halber auf die zwei Punktlasten verzichtet, und eine Metallplatte der Länge 100 mm verwendet, was in Wirklichkeit zu einem Dreipunktbiegeversuch führte. Die aufgrund der geringen Trägerbreite sehr begrenzte Fläche zur Krafteinleitung erreichte ebenso wie die geringe Auflagerfläche nicht die laut Vorabschätzung notwendige Tragkapazität bezüglich Querdruck (siehe Kap 2-5). Deshalb war eine Verstärkung dieser Stellen unumgänglich. Gewählt wurden Vollgewindeschrauben mit einem Durchmesser von 12 mm und einer Länge von 230 mm, welche in Faserrichtung im Abstand  $a_1 = 5 \cdot d = 5 \cdot 12 \text{ mm} = 60 \text{ mm}$  an den Auflagern sowie in Trägermitte eingeschraubt wurden.

Der Prüfkörper war aufgrund seines geringen b/h-Verhältnisses kippgefährdet. Um seitliches Ausweichen des Trägers auszuschließen, wurde der Träger an vier Stellen mit Hilfe von stabilen Holzwinkeln gelagert. Um einen anderweitigen unerwünschten Einfluss der Kipphalterungen auf die Versuchsdurchführung auszuschließen, wurde der Kontakt zwischen ihnen und dem Träger mittels Rollenlager möglichst reibungsfrei gestaltet. Der Abstand der Kipphalterungen zueinander war annähernd gleichmäßig über die Trägerspannweite verteilt.

Der Versuch sollte gemäß ON EN 789:2005 weggrößengesteuert durchgeführt werden. Zudem soll die Versuchsdurchführung in einem Zeitraum von  $300 \pm 120 \text{ sec}$  liegen. Eine Abschätzung der erwarteten Lastniveaus und Endverformungen ist in Kap. 2-5 zu finden. Ausgehend von dieser Abschätzung wurde die Belastungsgeschwindigkeit so gewählt, dass die Endverformung (somit auch das Versagen) in etwa nach der vorgeschriebenen Zeit zu erwarten war.

Die Universalprüfmaschine ZWICK Z-250 zeichnet während dem Versuch den Maschinenweg und die aktuelle Kraft, gemessen mittels Kraftmessdose, auf. Zusätzlich wird in Trägermitte an der Unterseite die Durchbiegung des Trägers mittels Wegaufnehmer gemessen. Um den Schubmodul der Versuchskörper bestimmen zu können, wird laut ON EN 408:2012 die Verzerrung eines Schubfeldes auf beiden Seiten des Trägers gemessen. Im Falle eines Durchbruchs wird dieses Messkreuz mit Hilfe einer Halterung zentrisch über der Öffnung angeordnet, um so die Berechnung des Verzerrungsmoduls eines durchbrochenen Trägerteiles zu ermöglichen.



*Abb. 2.14 Anordnung der Wegaufnehmer um die Verzerrung des Schubfeldes zu messen*

Zur Untersuchung verschiedener Verstärkungsmethoden wurden die Prüfkörper schließlich in fünf Serien, bezeichnet mit fortlaufenden Großbuchstaben, eingeteilt. Pro Serie wurden drei Prüfkörper hergestellt, insgesamt wurden somit 15 Versuche durchgeführt. Da bei jedem Pressvorgang vier Träger in der Presse Platz fanden, wurden in Summe 16 Träger produziert. Der 16. Träger wurde als Reserve angesehen. Sollte es bei einem der Prüfkörper zu unerwarteten Problemen kommen, so hätte dieser durch den Reserveträger ersetzt werden können. Grundsätzlich besaßen die Prüfkörper alle identische Abmessungen, ebenso blieben Spannweite, Messsysteme und Auflagerverstärkung unverändert. Die Unterschiede hinsichtlich der Verstärkung zwischen den einzelnen Prüfserien werden im Folgenden kurz erläutert.

### **Serie A**

Bei Serie A handelte es sich um die Referenzserie. Der Querschnitt der Träger dieser Serie war nicht aufgrund eines Durchbruchs gestört. Aus diesem Grund handelte es sich um einen reinen Dreipunktbiegeversuch mit dem Ziel, Schubversagen zu provozieren (vgl. Gehri 2010). Das erreichte Lastniveau dient als Ausgangspunkt, um die Leistungsfähigkeit der einzelnen Verstärkungen zu bewerten. Somit lässt sich eine Aussage über das Potenzial der Tragfähigkeitswiderherstellung jeder Verstärkungsvariante treffen.

### **Serie B**

In Anlehnung an die von Gehri (2014) durchgeführten Versuche von Durchbrüchen, welche mit Gewindestangenanker verstärkt wurden, und die theoretischen Untersuchungen von Dröscher et al. (2016) wurde für die Serie B eine Verstärkung des Durchbruches mittels Vollgewindeschrauben gewählt. Wie bereits in mehreren Untersuchungen festgestellt wurde, ist eine Verstärkung mit vertikal angeordneten Schrauben wenig zielführend (vgl. Aicher & Höfflin, 2009 sowie Dröscher et al., 2016). Da aus FE-Studien hervorgeht, dass der wirksamste Winkel zur Verstärkung von Durchbrüchen bei  $45^\circ$  liegt (vgl. Tapia & Aicher, 2016) wird diese Anordnung für die Serie B gewählt. Je näher die Schrauben im Bereich der auftretenden Querkzugspannungen am Durchbruchrand angeordnet sind, desto wirksamer sind sie beim Verhindern der Rissbildung. Um möglichst große Kräfte übertragen zu können, werden nach einer vorangegangenen Vorabschätzung Schrauben mit dem Durchmesser  $d = 12 \text{ mm}$  gewählt. Die Schrauben werden in einem Winkel von  $45^\circ$  an den Querkzugseiten des Durchbruches mit einer Länge von  $l_r = 270 \text{ mm}$  eingeschraubt. Der Mindestabstand zwischen Lochrand und Schraubenachse wird mit  $a = 2 * d = 24 \text{ mm}$  in radialer Richtung bei  $45^\circ$  am Durchbruch gewählt. Auf Schrauben an den Querkdruckseiten des Durchbruches muss aufgrund der begrenzten Platzverhältnisse im schmalen Furnierschichtholzträger verzichtet werden. Die Querkdruckspannungen müssen vom Holz aufgenommen

werden. Da nur Vollgewindeschrauben  $\text{\O}12/320 \text{ mm}$  zu Verfügung standen, wurden sie einfach auf die gewählte Länge von  $270 \text{ mm}$  eingedreht und ragten aus dem Prüfkörper heraus.

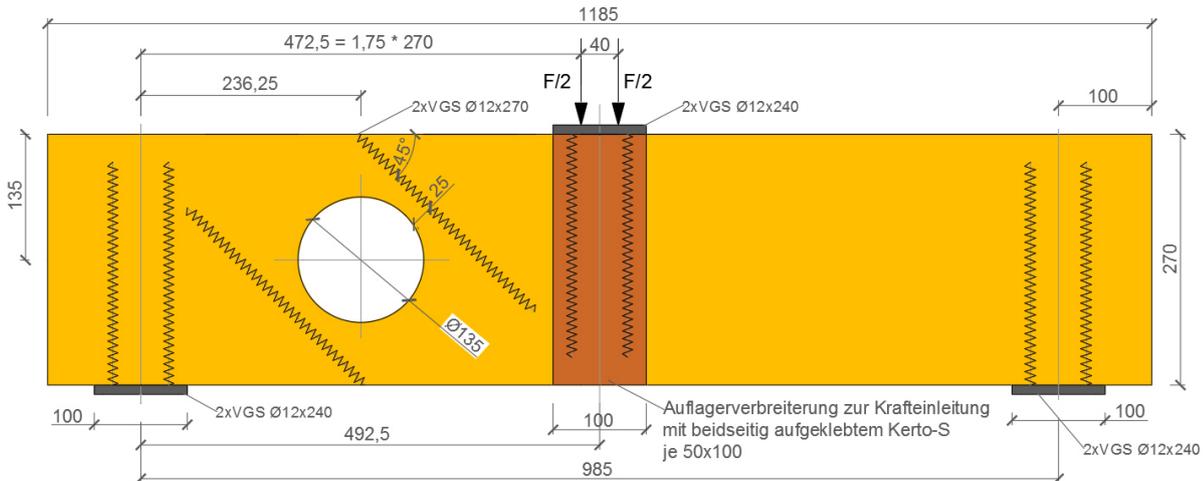


Abb. 2.15 Prüfkonfiguration der Serie B mit Schraubverstärkung im Winkel von  $45^\circ$

### Serie C

Wie aus verschiedenen Versuchsreihen hervorgeht (vgl. Ardalany et al., 2013) ist die Verstärkung von Durchbrüchen mit Hilfe von außen aufgeklebten Holzwerkstoffplatten eine äußerst effektive Methode. Eine Möglichkeit zur Nachweisführung ist auch in den Normen verankert. Auf Grundlage der ÖNORM B 1995-1-1:2015 werden die Abmessungen der Platten definiert. Die gewählte Plattengröße reichte über die gesamte Querschnittshöhe und ragte auf beiden Seiten des Durchbruches um  $100 \text{ mm}$  hinaus. Die Stärke der einzelnen Platten wurde in Abhängigkeit der aus Sperrholz bestehenden Serie E angeordneten Querlagen gewählt. So sollten die Gesamtdicken der vertikal verlaufenden Furnierblätter bei beiden Serien gleich groß sein. Die drei Querlagen der Serie E hatten eine Gesamtdicke von  $9 \text{ mm}$ . Um dieselbe Breite für die außenliegenden Platten zu erhalten, wurde ein 5-schichtiger gesperrter Aufbau ( | - | - | ), bestehend aus  $1,5 \text{ mm}$  dicken Einzelfurnieren, gewählt. Die Decklagenorientierung der Sperrholzplatten wurde beim Ankleben senkrecht zur Trägerachse angeordnet.

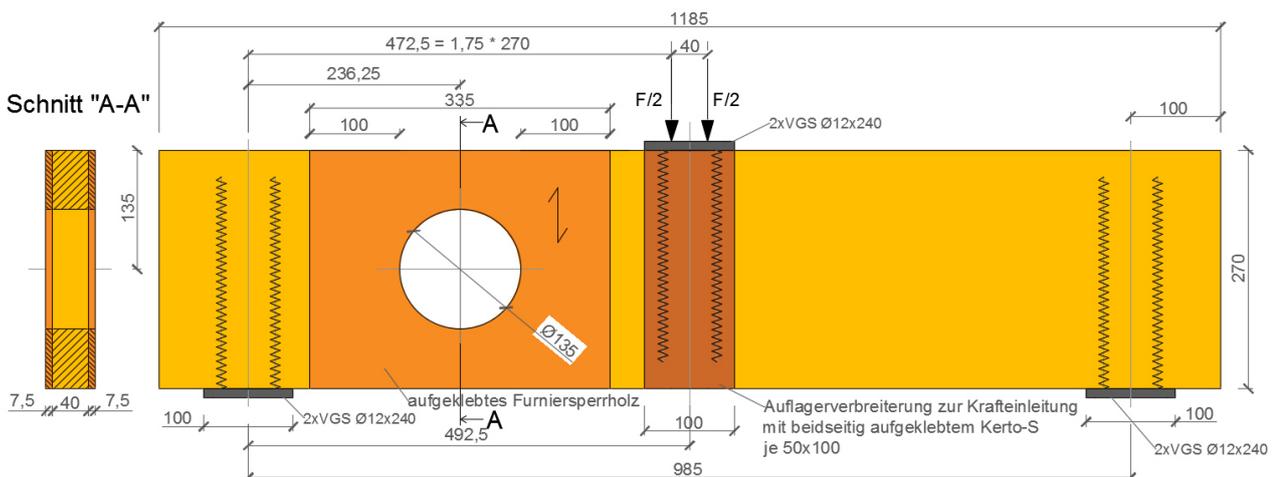


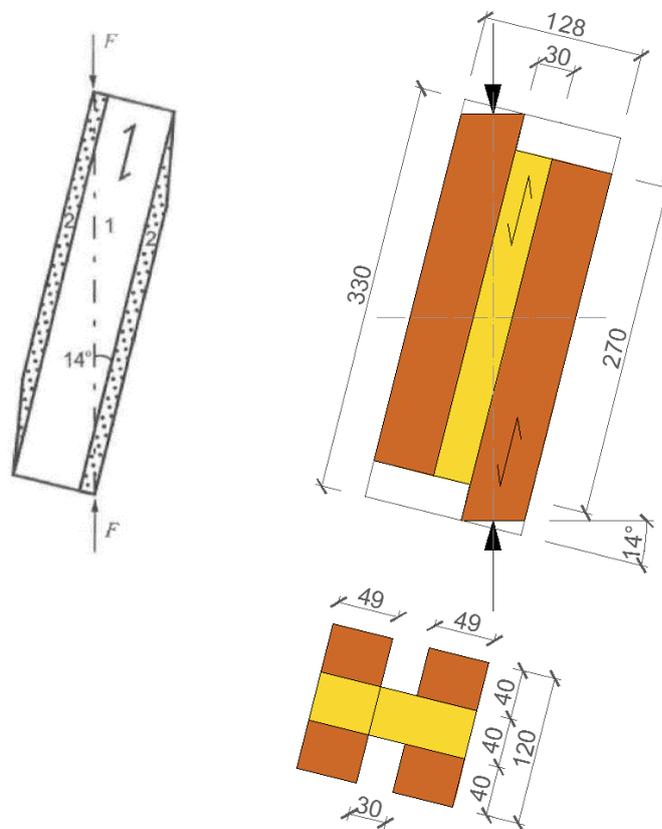
Abb. 2.16 Prüfkonfiguration der Serie C mit außen aufgeklebten Sperrholzplatten im Winkel von  $90^\circ$  zur Faserrichtung



ausgerichteter Faserrichtung aufgeklebt wurde. Bei Belastung erfolgte die Krafteinleitung nun planmäßig mittels Druckbeanspruchung der aufgeklebten Laschen in Faserrichtung. Über die Klebefuge zwischen Lasche und Träger wurde die Last dann in den Trägerquerschnitt eingeleitet. Aufgrund des verbreiterten Querschnittes wurde auch das seitliche Ausweichen der Schrauben verhindert. Zudem wurde unmittelbar unter der Trägeroberkante eine Schraube senkrecht zur Trägerebene durch Laschen und Träger angeordnet, um ein eventuelles Aufspalten des Trägers aufgrund von Querkraft aus der Trägerebene zu unterbinden. Diese Verstärkungsmaßnahmen wurden bei allen weiteren Versuchskörpern durchgeführt. In weiterer Folge gab es keine Probleme der Krafteinleitung mehr.

## 2-4.2 SCHERPRÜFUNGEN IM WINKEL VON 14°

Die Scherprüfungen erfolgten in Anlehnung an die ÖNORM EN 408:2012. Diese sieht eine Prüfkonfiguration vor, in der die Faserrichtung des Prüfkörpers um 14° zur Vertikalen geneigt, und mit einer Druckkraft beaufschlagt wird. Die Krafteinleitung erfolgt laut Norm über aufgeklebte Bleche. Eine schematische Darstellung der Versuchskonfiguration ist in Abb. 2.18 ersichtlich.



**Abb. 2.18 Schematische Darstellung der Prüfkonfiguration laut ÖNORM EN 408:2012 (links) und Darstellung der gewählten Abmessungen (rechts)**

Im vorliegenden Fall wurde jedoch anstelle von Stahlblechen Furnierschichtholz aus Buche verwendet. Da die Schubfestigkeit bekanntlich größenabhängig ist, wird als Länge der Scherfuge die Höhe des ursprünglichen Trägers angesetzt, damit die querkraftbeanspruchten Flächen bei beiden Versuchsreihen identisch sind und sich somit vergleichbare Werte ergeben. Bei der Vorabschätzung der zu erwartenden Last wurde die erforderliche Klebefläche berechnet, welche nötig war, um die Kraft von den aufgeklebten Laschen in den Prüfkörper zu übertragen. Diese war so groß, dass zwei Laschen, wie in der Norm an den Außenkanten angeordnet, nicht ausreichten. So wurden insgesamt vier Laschen angeordnet, welche an die Decklagen des Prüfkörpers aufgeklebt wurden. Die Breite der Scherfuge wurde mit 30 mm gewählt. Außerdem sollte die Wirkungslinie der resultierenden Kraft durch den Mittelpunkt der Scherfuge laufen. Aufgrund all dieser Bedingungen und der geometrischen Zusammenhänge ergeben sich für den Versuchskörper die in Abb. 2.18 (rechts) dargestellten Abmessungen.

Auch dieser Versuch soll laut ÖNORM EN 408:2012 weggrößengesteuert erfolgen und eine gesamte Prüfdauer von  $300 \pm 120 \text{ sec}$  aufweisen. Die Zwick Universalprüfmaschine zeichnet den Maschinenweg und die Prüfkraft automatisch auf. Nebenbei wurde auch die Verzerrung der Scherfuge gemessen, um Rückschlüsse auf den Schubmodul ziehen zu können. Dies konnte bewerkstelligt werden, indem auf halber Länge der Scherfuge ein Wegmesser angeordnet war, welcher über einen L-Winkel die Relativverschiebung der zwei Laschen zueinander maß. Um ein Aufspalten der Furnierlagen des Prüfkörpers bei Belastung zu vermeiden, wurde an den Auflagerpunkten eine Querschraube eingedreht. Für die Prüfkörper der Serie E (Furniersperrholz) mussten zusätzlich kreuzweise diagonal Schrauben angeordnet werden, da es beim ersten Versuch dieser Serie im Bereich der Krafteinleitung zu einem Rollschubversagen in den Querlagen kam.

## 2-5 VORABSCHÄTZUNG

### 2-5.1 DURCHBRUCHSVERSUCHE

#### 2-5.1.1 Belastungsgeschwindigkeit

Der Versuch wurde laut ON EN 789:2005 weggrößengesteuert durchgeführt. Aus diesem Grund war es notwendig, eine Annahme zur maximalen Durchbiegung zum Zeitpunkt des Versagens zu treffen, um daraus eine Belastungsgeschwindigkeit rückrechnen zu können. Dies gestaltete sich jedoch als schwierig, da die Versuchskörper selbst produziert wurden und so keine genaue Angabe zu Festigkeits- und Steifigkeitswerten gemacht werden konnte. Aufgrund des hohen V/M-Verhältnisses ist neben der Biegeverformung auch der Anteil der Schubverformung nicht zu vernachlässigen. Auch lässt sich der Effekt des Durchbruches, sowie der Verstärkungen, auf die Trägersteifigkeit und somit die Durchbiegung schwer abschätzen. Zur ersten groben Abschätzung wurden die Materialkenngrößen aus der Zulassung von Kerto verwendet. Der Schichtaufbau des Trägers war ident, als Material wird bei Kerto ebenso Fichte verwendet.

Für die Abschätzung war zunächst die Bestimmung der Mittelwerte aller relevanten Festigkeitskennwerte notwendig. Hierfür wurde eine Streuung des Materials von  $COV = 10\%$  angenommen. Somit ergeben sich die in Tab. 2.1 und Tab. 2.2 angeführten Werte. Die 5%-Fraktilewerte der Festigkeiten werden aus der Kerto-Zulassung entnommen und anhand Glg. (2.5) in Mittelwerte umgerechnet. Der Elastizitätsmodul ist in der Zulassung bereits als charakteristischer Wert und als Mittelwerte angegeben, für den Schubmodul finden sich lediglich Angaben zum Mittelwert.

$$f_m = \frac{f_{0,05}}{(1 - 1,645 * COV)} \quad (2.5)$$

Tab. 2.1 Materialkenngrößen aus der Kerto S-Zulassung und die dazu errechneten Mittelwerte

<b>Biegung</b>	$f_{m,k} = 44 \text{ N/mm}^2$	$f_{m,mean} = 52,6 \text{ N/mm}^2$
<b>Querzug</b>	$f_{t,90,k} = 0,8 \text{ N/mm}^2$	$f_{t,90,mean} = 0,95 \text{ N/mm}^2$
<b>Querdruck</b>	$f_{c,90,k} = 6 \text{ N/mm}^2$	$f_{c,90,mean} = 7,2 \text{ N/mm}^2$
<b>Schub</b>	$f_{v,k} = 4,1 \text{ N/mm}^2$	$f_{v,mean} = 4,9 \text{ N/mm}^2$
<b>Elastizitätsmodul</b>	$E_{0,mean} = 13800 \text{ N/mm}^2$	
<b>Schubmodul</b>	$G_{mean} = 600 \text{ N/mm}^2$	

Die Berechnung der Materialkenngrößen im Falle von Furniersperrholz wurde unter denselben Annahmen durchgeführt. Die Prüfserie E besaß einen gesperrten Schichtaufbau und wurde dem Produkt Kerto-Q nachgeahmt. Da der Träger im Biegeversuch eine Scheibe darstellt, sind in Tab. 2.1 die Festigkeits- und Steifigkeitswerte einer Scheibenbelastung aufgelistet. Hierbei ist die Haupttragrichtung des Furniersperrholzes parallel zur Trägerlängsachse ausgerichtet. Die Kennwerte des Materials bei Belastung als Platte werden nicht angegeben.

**Tab. 2.2 Materialkenngrößen aus der Kerto Q-Zulassung und die dazu errechneten Mittelwerte**

<b>Biegung</b>	$f_{m,k} = 32 \text{ N/mm}^2$	$f_{m,mean} = 38,3 \text{ N/mm}^2$
<b>Querzug</b>	$f_{t,90,k} = 6 \text{ N/mm}^2$	$f_{t,90,mean} = 7,2 \text{ N/mm}^2$
<b>Querdruk</b>	$f_{c,90,k} = 9 \text{ N/mm}^2$	$f_{c,90,mean} = 10,8 \text{ N/mm}^2$
<b>Schub</b>	$f_{v,k} = 4,5 \text{ N/mm}^2$	$f_{v,mean} = 5,4 \text{ N/mm}^2$
<b>Elastizitätsmodul</b>	$E_{0,mean} = 10500 \text{ N/mm}^2$	
<b>Schubmodul</b>	$G_{mean} = 600 \text{ N/mm}^2$	

Die Prüfkfiguration war darauf ausgelegt, im Träger Schubversagen zu erreichen. Aus diesem Grund ergibt sich für den Träger ohne Durchbruch unter Annahme von  $f_{v,mean}$  aus Tab. 2.1 und der Schnittkraftverteilung eines Dreipunkt-Biegeversuches folgender Zusammenhang:

$$\frac{\tau_{max}}{f_{v,mean}} = \frac{1,5 * \frac{F_{max}}{2}}{h * b} \leq 1,0 \quad (2.6)$$

wobei

$F_{max}$	...Bruchlast [N]
$b$	...Querschnittsbreite [mm]
$h$	...Querschnittshöhe [mm]
$f_{v,mean}$	...Mittelwert der Schubfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]

Wird diese Gleichung nun nach  $F_{max}$  aufgelöst, so erhält man eine ungefähre Bruchlast von  $F_{max} = 70,5 \text{ kN}$ .

Die Berechnung der Verformung erfolgte mit Hilfe des Prinzips der virtuellen Arbeit über die Integration des Momenten- und Querkraftverlaufes eines Dreipunkt-Biegeversuches. Die Schubverformung wurde mitberücksichtigt.

$$w = \frac{1}{E * I} \int M * \bar{M} dx + \frac{1}{G * A} \int V * \bar{V} dx \quad (2.7)$$

Unter Anwendung der Glg. (2.7) erhält man bei einer Last von  $70,5 \text{ kN}$  eine Endverformung von etwa  $w = 4,23 \text{ mm}$ . Um bei dem Träger ohne Durchbruch eine Prüfdauer von  $300 \text{ sec}$  zu erreichen wird demzufolge eine Belastungsgeschwindigkeit von ungefähr  $0,85 \text{ mm/min}$  benötigt.

Da der Mittelwert der angesetzten Schubfestigkeit eher als Unterschätzung angesehen wurde, kam beim ersten Versuch der Serie A eine Belastungsgeschwindigkeit von  $1 \text{ mm/min}$  zum Einsatz. Dabei stellte sich heraus, dass die Tragfähigkeit tatsächlich deutlich höher lag und die Versuchsdauer aus diesem Grund zu lang war. Für alle weiteren Versuche wurde die Last schließlich mit einer Geschwindigkeit von  $1,5 \text{ mm/min}$  aufgebracht. Ein genaueres Abschätzen wurde aufgrund der schwer erfassbaren Steifigkeitsunterschiede der Verstärkungsmaßnahmen am Durchbruch nicht vorgenommen. Ebenso war

es schwierig im Vorhinein eine genaue Aussage über die Versagensart und die erwartete Maximallast zu treffen. Es wurde jedoch davon ausgegangen, dass die Träger mit Durchbruch nicht die Tragkapazität des ungestörten Trägers erreichen können und die Bruchlast somit darunter liegt. Die Belastungsgeschwindigkeit von  $1,5 \text{ mm/min}$  eignete sich bei allen Prüfserien gut, da obwohl die erwarteten Lasten geringer waren, die maximalen Verformungen aufgrund der ebenso geringeren Steifigkeiten zufolge des Durchbruches, ähnlich ausfielen. Lediglich bei dem Reserveträger, welcher komplett unverstärkt geprüft wurde, kam erneut eine Belastungsgeschwindigkeit von  $1 \text{ mm/min}$  zum Einsatz.

### 2-5.1.2 Auflagerpressung

Aufgrund der geringen Auflagerfläche und der doch sehr hohen Lasten wurde die Auflagerpressung abgeschätzt. Hierfür wurde die Formel laut ON B 1995-1-1:2015 für Druckbeanspruchungen rechtwinklig zur Faser angesetzt. Diese besagt:

$$\frac{\sigma_{c,90}}{k_{c,90} * f_{c,90,mean}} = \frac{\frac{F_{c,90}}{A_{ef}}}{k_{c,90} * f_{c,90,mean}} \leq 1,0 \quad (2.8)$$

wobei

$\sigma_{c,90}$	... Querdruckspannung [N/mm <sup>2</sup> ]
$f_{c,90}$	... Querdruckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
$k_{c,90}$	... Beiwert zur Berücksichtigung der Art der Einwirkung und des Grades der Druckverformung [-]
$F_{c,90}$	... Druckkraft rechtwinklig zur Faserrichtung [N]
$A_{ef}$	... wirksame Kontaktfläche [mm <sup>2</sup> ]

Unter Querdruckbelastung kommt es in der Regel zu keinem Bruchversagen des Bauteiles, der Querdrucknachweis dient im Allgemeinen dazu, die plastische Verformung zu begrenzen. Der Beiwert  $k_{c,90}$  liegt bei Belastung mit beidseitigem Vorholz bei 1,75. Löst man nun die Glg. (2.8) nach  $F_{c,90}$  auf, erhält man eine Tragfähigkeit der Kontaktfläche von etwa  $50 \text{ kN}$ . Diese dürfte laut Vorabschätzung der Maximallast in Kap. 2-5.1.1 für die Auflager ausreichend sein (die Prüfkraft wird zu gleichen Teilen auf die zwei Auflager verteilt), in Feldmitte an der Stelle der Krafteinleitung wird die Tragfähigkeit jedoch deutlich überschritten. Aus diesem Grund wird dort eine Querdruckverstärkung benötigt. Für diese werden zwei Vollgewindeschrauben  $\emptyset 12/240 \text{ mm}$  verwendet, welche bei der Herstellung der Träger im Labor vorrätig waren und laut ihrer Zulassung eine charakteristische Tragfähigkeit gegen Herausziehen/Hineindrücken von etwa  $33 \text{ kN}$  und eine Tragfähigkeit gegen Ausknicken von etwa  $23,8 \text{ kN}$  aufweisen.<sup>7)</sup> Für diese Abschätzung wurde eine Rohdichte der Träger von  $380 \text{ kg/m}^3$  angenommen. Um Verformungen an den Auflagern zu minimieren, wurden dort dieselben Schrauben angeordnet. Der Abstand zwischen den Schraubenachsen betrug  $a_1 = 5 * d_n = 5 * 12 = 60 \text{ mm}$ . Wie sich bei den Versuchen allerdings herausstellte, war die Stelle der Krafteinleitung nicht ausreichend verstärkt. Die Gründe dafür und die daraus resultierenden Gegenmaßnahmen sind in Kap. 2-4.1 erklärt.

### 2-5.2 SCHERVERSUCHE 14°

Die Scherversuche wurden, wie bereits erwähnt, im Anschluss an die Biegeprüfungen der durchbrochenen Träger durchgeführt. Bei Prüfungen an den Trägern mit Durchbruch hat sich gezeigt, dass die Schubfestigkeit des Materials um einiges höher lag als zunächst erwartet, nämlich im Bereich bei etwa  $8 \text{ N/mm}^2$ .

Bei FE-Analysen kam Ehrhart (2014) (siehe Kap. 2-7.2.1) zu dem Ergebnis, dass sich bei der Schubprüfkonfiguration im Winkel von  $14^\circ$  ein annähernd konstanter Schubspannungsverlauf einstellt. Aus diesem Grund wird die Abschätzung der Prüflast mit folgender Gleichung vorgenommen. (Ehrhart, 2014)

<sup>7)</sup> Zulassung Spax Z-9.1-519

$$\frac{\tau_{max}}{f_v} = \frac{F_{max} * \cos \alpha}{A_v} \leq 1,0 \quad (2.9)$$

wobei

$\tau_{max}$	...maximale Schubspannung in der Scherfuge [N/mm <sup>2</sup> ]
$f_v$	...Schubfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
$F_{max}$	...maximal aufnehmbarer Kraft [N]
$A_v$	...schubbeanspruchte Querschnittsfläche in der Scherfuge [mm <sup>2</sup> ]
$\alpha$	...Winkel der Krafrichtung zur Faserrichtung, im vorliegenden Fall 14° [°]

Wird nun eine Schubfestigkeit von  $8 \text{ N/mm}^2$  angesetzt, so erhält man als maximale Kraft einen Wert von  $F_{max} = 89 \text{ kN}$ . Diese Last gilt es in den Prüfkörper einzuleiten. Erreicht wird dies durch das Aufkleben von Krafteinleitungslaschen. In der ON EN 408:2012 sind hierfür Stahlbleche vorgesehen; im vorliegenden Fall werden allerdings aufgeklebte Laschen aus Baubuche verwendet. Da die Kraft von den Laschen über die Klebefuge in den Prüfkörper eingeleitet werden muss, ist zunächst die erforderliche Klebefugenfläche zu bestimmen. Diese errechnet sich unter Umformung mit folgender Gleichung:

$$\frac{\tau_{max,kf}}{f_{kf}} = \frac{F_{max}}{A_{kf}} \leq 1,0 \quad (2.10)$$

$\tau_{max,kf}$	...maximale Schubspannung in der Klebefuge [N/mm <sup>2</sup> ]
$f_{kf}$	...Klebefugenfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
$F_{max}$	...maximal aufnehmbare Kraft [N]
$A_{kf}$	...Fläche der Klebefuge [mm <sup>2</sup> ]

Erfahrungswerte haben gezeigt, dass bei einer sachgemäß ausgeführten Verklebung eine Festigkeit der Klebefuge von mindestens  $f_k = 3 \text{ N/mm}^2$  erreicht werden kann. Da zur Krafteinleitung je zwei Laschen aufgeklebt werden, wird die Klebefläche zusätzlich verdoppelt. Unter Anwendung von Glg. (2.10) ergibt sich eine Mindestbreite der Klebefläche von  $b_{erf} \approx 50 \text{ mm}$ . Hierbei wird der Anteil der Druckkraft, welcher direkt von Prüfkörper aufgenommen wird (die Laschen und der Prüfkörper sind an der Auflagerfläche bündig) nicht berücksichtigt. Obgleich es einen Steifigkeitsunterschied zwischen Fichtenfurnier und Baubuche längs zur Faser gibt, kann trotzdem davon ausgegangen werden, dass auch der Prüfkörper einen Teil der Last anzieht und somit die Klebefuge entlastet. Aus diesem Grund sowie der Tatsache, dass die Schubfestigkeit mit  $8 \text{ N/mm}^2$  sehr hoch angesetzt wird, lässt sich davon ausgehen, dass die Krafteinleitung mittels der aufgeklebten Laschen nachgewiesen ist.

## 2-6 PRÜFDURCHFÜHRUNG

---

Der Versuchsablauf erfolgte bei allen Prüfkörpern nach demselben Schema. Die wesentlichen Arbeitsschritte werden im Folgenden getrennt nach Versuchsart aufgelistet und beschrieben. Parallel zu jedem Versuch wurde ein Prüfprotokoll geführt, in welchem Bemerkungen zu Prüfparametern, Lastniveaus bei auftretenden Rissen, Bruchlast und andere Auffälligkeiten notiert wurden. Außerdem wurden die Versuche und die Versagensmerkmale fotografisch dokumentiert.

### 2-6.1.1 Durchbruchsversuche

#### **Beschriften der Prüfkörper**

Die Beschriftung der Versuchskörper erfolgt mit fortlaufenden Großbuchstaben und Zahlen. So wird mit den Buchstaben zwischen den verschiedenen Prüfserien unterschieden:

- Serie A: Referenzträger ohne Durchbruch
- Serie B: Schraubverstärkung 45°
- Serie C: außenliegende Sperrholzplatte mit Decklage in 90° zur Trägerachse
- Serie D: außenliegende Sperrholzplatte mit Decklage in 45° zur Trägerachse
- Serie E: Furniersperrholzträger, Verstärkung durch innenliegende Querlagen
- R: Reserveträger

Die jeweils drei Träger innerhalb jeder Serie werden weiters mit Ziffern unterschieden. So ergibt sich als Trägerbezeichnung A1, A2, A3, B1, usw.. Der Reserveträger erhält die Bezeichnung R1.

#### **Wiegen der Prüfkörper**

Bereits unmittelbar nach dem Zuschneiden und vor dem Herstellen jeglicher Bohrungen und dem Fräsen des Durchbruches sollten das Gewicht der Prüfkörper aufgenommen werden, um nach dem Abmessen der Geometrie auf die Rohdichte rückrechnen zu können. Die Masse wurde dabei auf 0,001 kg genau bestimmt. Der Wiegevorgang wurde jedoch fälschlicherweise erst durchgeführt, als bei zwei Trägern bereits der Durchbruch hergestellt war. Diese zwei Prüfkörper wurden in der Tabelle zur Berechnung der Rohdichte speziell gekennzeichnet, das Volumen des herausgeschnittenen Holzes wurde in der Berechnung abgezogen. Bei allen restlichen Prüfkörpern konnte die Masse des massiven Holzquaders gewogen werden.

#### **Aufnahme der Geometrie**

Um die Rohdichte bestimmen zu können, wird neben der Angabe des Gewichts auch das Volumen des Prüfkörpers benötigt. Die genauen Abmessungen fließen ebenso in die anschließende Auswertung mit ein. Die Länge des Prüfkörpers wurde mit einem Maßband gemessen. Die Höhe, Breite und der Durchmesser des Durchbruches wurden mit einem Messschieber auf 0,01 mm Genauigkeit bestimmt. Diese Messungen wurden doppelt durchgeführt und erfolgten jeweils an zwei unterschiedlichen Stellen. Die Ergebnisse wurden anschließend gemittelt.

#### **Eindreihen der Verstärkungsschrauben**

Vor dem Durchführen des eigentlichen Versuches mussten die Prüfkörper noch mit den Verstärkungsschrauben versehen werden. Die sechs Schrauben zur Verbesserung der Querdrucktragfähigkeit an den Auflagerpunkten, sowie in Feldmitte an der Stelle der Krafteinleitung, wurden mit einem Akkuschauber eingedreht und nachträglich mit einer Ratsche so justiert, dass der Schraubenkopf perfekt bündig mit der Holzoberfläche abschloss. Die Quersugschraube an der Oberkante des Trägers in Feldmitte wurde ebenso eingedreht. Bei den Prüfkörpern der Serie B wurden die Schrauben im Winkel von 45° am Durchbruch bis zur vorgesehenen Länge von  $l = 270 \text{ mm}$  eingeschraubt (siehe Abb. 2.15).

## Einbau des Prüfkörpers

Der Prüfkörper wurde auf die gelenkigen Auflagerplatten gestellt und zentrisch ausgerichtet. Des Weiteren wurden die Kipphalterungen angebracht und die Rollen zur Verminderung von Reibung zwischen der Halterung und dem Träger positioniert.

## Anbringen der Messeinrichtung

In Feldmitte wird an der Unterseite des Trägers zentrisch ein Wegmesser angebracht, mit welchem die Durchbiegung bestimmt wird. Dieser wird in den Prüfdaten mit dem Namen „Mitte“ bezeichnet. Außerdem wird über dem Durchbruch (bei den Trägern der Serie A an derselben Stelle) ein sogenanntes Messkreuz angeordnet. Dieses wird auf beiden Seiten des Trägers angebracht, um die Ergebnisse anschließend mitteln zu können. Mit dem Messkreuz wird die Verzerrung des Trägers aufgezeichnet, aus welcher sich auf den Schubmodul schließen lässt. Das Kreuz besteht aus zwei getrennten Brücken mit einer Länge von 160 mm, welche auf leicht versetzter Ebene geführt werden, damit sie sich im Kreuzungspunkt überlappen können. Für die Auswertung ist eine genaue Bezeichnung der Wegmesser wesentlich, die Positionierung soll bei jedem Versuch identisch sein. So wurde die Messbrücke, welche dem Träger näher war mit dem Zusatz „innen“ benannt, die überlappende Messbrücke bekam die Bezeichnung „außen“. Da an beiden Seiten des Trägers gemessen wurde, musste zudem noch zwischen den beiden Messkreuzen unterschieden werden. Dies erfolgte mit der Unterscheidung der dem Träger zugewandten Himmelsrichtungen. Aufgrund der Ausrichtung der Prüfmaschine in der Halle konnte so von einer Süd- (S) und einer Nordseite (N) gesprochen werden. Die Bezeichnung der einzelnen Wegaufnehmer war demnach:

- Mitte
- S-innen
- S-außen
- N-innen
- N-außen

Zur Montage der Messkreuze wurde eine eigene Halterung gebaut, welche mit kleinen Schrauben befestigt wurde. Die Wegaufnehmer wurden mittels Federkraft an die Halterung geklemmt, um sie zwar in ihrer Position zu halten, jedoch nicht komplett zu fixieren. In Abb. 2.19 ist exemplarisch die Nordansicht des Prüfaufbaues dargestellt. An der Südseite wurden die Messbrücken spiegelgleich angebracht.

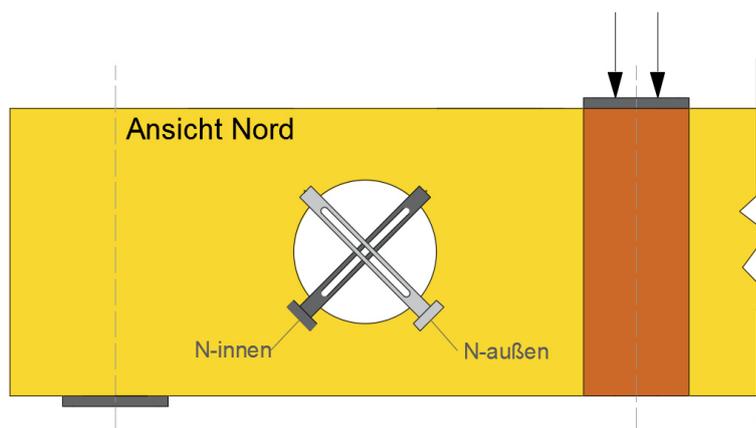


Abb. 2.19 Ansicht der Nordseite mit Bezeichnung der Messbrücken

## Start des Versuches

Der Versuch wurde weggesteuert durchgeführt, die Geschwindigkeit war dabei in jeder Serie verschieden und abhängig von der erwarteten Höchstlast. Die Universalprüfmaschine zeichnet den Maschinenweg und die Prüflast auf. Nach dem Anfahren der Prüfmaschine wurde bei Erreichen einer Vorkraft von 200 N der

Maschinenweg und die Kraft zu null gesetzt. Des Weiteren wurden die Wegaufnehmer der Schubfelder und der Durchbiegung aufgezeichnet.

Anfangs wurde besonders darauf geachtet, ob alle Messinstrumente sinnvolle Daten liefern. War dies nicht der Fall, konnte der Versuch bereits im elastischen Bereich gestoppt und der gesamte Aufbau kontrolliert werden. Der Versuchsablauf wurde fotografisch dokumentiert, Auffälligkeiten wurden in einem Prüfprotokoll festgehalten.

### **Entfernen der Messeinrichtung**

Die verwendeten Wegaufnehmer (DD1) sind nur zur Messung von kleinen Verformungen ausgelegt und können bei großen, plötzlichen Verformungen sehr leicht beschädigt werden. Aus diesem Grund wurden sie im Laufe des Versuches noch im linear-elastischen Bereich von dem Prüfkörper entfernt. Hierfür wurde der Versuch bei etwa 50% der erwarteten Maximallast für 30 Sekunden pausiert. Nach dem Abnehmen der Messeinrichtung konnte der Versuch fortgesetzt werden.

### **Bruch**

Nach dem Entfernen der Wegaufnehmer wurde die Belastung mit derselben Geschwindigkeit wie vorher bis zum Versagen gesteigert.

### **Ende der Prüfung**

Beim Erreichen der Höchstlast wurde der Versuch nicht abgebrochen, sondern noch etwas fortgeführt, um eventuell auch Erkenntnisse über das Nachbruchverhalten zu erlangen. Nach dem endgültigen Abbrechen des Versuches wurden die Rohdaten der Messung zur späteren Auswertung gespeichert. Jegliche Schrauben werden aus dem Prüfkörper entfernt und wiederverwertet.

### **Darrproben**

Da die Holzfeuchte der Prüfkörper zur Zeit des Versuches einen Einfluss auf die Ergebnisse hat, wurden entsprechend der Vorgaben der EN 13183-1:2004 Darrproben entnommen, um den Feuchtegehalt zu ermitteln. Die Proben wurden aus dem Bereich zwischen Durchbruch und Feldmitte mit den erforderlichen Maßen (siehe Kap. 2-1.2) herausgeschnitten, und nach Beschriften und Abwiegen in den Darrschrank gegeben. Nach etwa 48 Stunden wurden die nun darrtrockenen Proben aus dem Schrank geholt und erneut gewogen.

## 2-6.1.2 Scherversuche 14°

### **Beschriften der Prüfkörper**

Wie bereits erwähnt, konnten aus jedem Furnierholzträger zwei Prüfkörper für die Scherversuche gewonnen werden (siehe Kap. 2-3.1.2). Um jeden Prüfkörper seinem ursprünglichen Träger zuzuordnen zu können, wurde die frühere Bezeichnung beibehalten und um einen Kleinbuchstaben ergänzt. So wurden beispielsweise aus dem Träger A1 die Scherprüfkörper A1a und A1b hergestellt.

### **Wiegen der Prüfkörper**

Um die Bestimmung der Rohdichte zu vereinfachen, wurden die rechteckigen Prüfkörper mit ihren Rohmaßen gewogen, d.h. bevor sie in die endgültige Form der Prüfkfiguration geschnitten wurden. Das Wiegen wurde vor dem Aufkleben der Krafeinleitungslaschen durchgeführt.

### **Aufnahme der Geometrie**

Wie bereits beschrieben, wurden die rechteckigen Außenkonturen zur Rohdichteberechnung herangezogen. Diese wurden mit einem Messschieber an jeweils zwei verschiedenen Stellen auf 0,01 mm genau gemessen und anschließend gemittelt.

## **Eindreihen der Verstärkungsschrauben**

Wie in Kap. 2-4.2 beschrieben, wurden an den Krafteinleitungspunkten Querkzugsschrauben angeordnet, um ein Aufspalten der Furnierlagen des Prüfkörpers zu unterbinden. Diese Schrauben wurden, ebenso wie die schräg angeordneten Rollschubverstärkungen der Prüferserie E, unmittelbar vor jedem Versuch eingeschraubt.

## **Anbringen der Messeinrichtung**

Bei den Schubversuchen wurde die Verzerrung der Scherfuge messtechnisch ermittelt. Hierfür wurde die Relativverschiebung der Verstärkungslaschen zueinander gemessen (siehe Kap. 2-4.2). An einer Lasche wurde ein Wegaufnehmer befestigt, welcher über einem an der anderen Lasche befestigten L-Winkel die Verformung in Faserlängsrichtung des Prüfkörpers maß. Die Messung wurde wiederum an beiden Seiten des Prüfkörpers durchgeführt, damit bei der Auswertung die Messergebnisse gemittelt werden konnten.

## **Einbau des Prüfkörpers**

Der Prüfkörper wurde zentrisch unterhalb der Druckplatte der Universalprüfmaschine in senkrechter Position eingebaut. Damit alle Prüfkörper exakt an derselben Stelle stehen, wurde eine Schablone an dem Maschinentisch befestigt, welche den Standpunkt der Prüfkörper genau definierte. Die Wegaufnehmer wurden dann in die bereits montierten Halterungen eingesetzt.

## **Start des Versuches**

Auch in diesem Fall wurden die Versuche weggesteuert durchgeführt. Die gewählte Geschwindigkeit lag dabei für alle Versuchskörper bei  $0,7 \text{ mm/min}$ . Nach dem Aufbringen einer Vorkraft von  $200 \text{ N}$  setzte die Universalprüfmaschine den Traversenweg und die Messkraft auf null und begann mit der Messung. Im Laufe des Versuches wurden Auffälligkeiten in einem Prüfprotokoll notiert und mit einer Fotokamera dokumentiert.

## **Entfernen der Messeinrichtung**

Auch bei den Scherprüfungen wurden die sehr empfindlichen Wegaufnehmer im linear-elastischen Bereich, bei einem Lastniveau von etwa  $50 \text{ kN}$ , entfernt. Da es sich lediglich um zwei einzelne Messgeräte handelte, welche schnell entfernt werden konnten, wurde der Versuchsablauf nicht unterbrochen.

## **Bruch**

Der Versuch wurde stets mit konstanter Belastungsgeschwindigkeit gefahren, bis es beim Erreichen der Tragfähigkeit zum Versagen kam. In manchen Fällen (vor allem bei der Serie E mit Furniersperrholz) wurde nach dem Bruch noch weiter belastet.

## **Ende der Prüfung**

Nach dem Ende des Versuches wurden die Rohdaten der Messung für die nachfolgende Auswertung gespeichert. Die Schraubverstärkungen sowie die Halterungen der Messeinrichtung wurden demontiert. Um den Schubbruch besser ersichtlich zu machen wurden, sofern möglich, die getesteten Versuchskörper mit einem Brecheisen in zwei Hälften getrennt und fotografiert.

## **Darrproben**

Aufgrund der sehr geringen Abmessungen des gesamten Prüfkörpers und der Tatsache, dass die schmale unbelebte Oberfläche der Scherfuge meist durch den Schubbruch beschädigt war, ließen sich die in der EN 13183-1:2004 geforderten Mindestabmessungen zur Holzfeuchtebestimmung mittels Darrmethode nur schwer einhalten. Mit einer Bandsäge wurden von jedem Prüfkörper möglichst einheitliche Stücke

geschnitten, dann beschriftet, gewogen und in den Darrschrank gegeben. Durch eine erneute Wägung 48 Stunden später konnte die Holzfeuchte bestimmt werden.

## 2-7 AUSWERTUNGSMETHODEN

---

Nachdem alle Versuche abgeschlossen waren, erfolgte die Auswertung der Prüfergebnisse. Diese wurde mit der Software Microsoft Excel 2016 durchgeführt. Welche Schritte im Einzelnen durchgeführt wurden, wird im Folgenden beschrieben.

### 2-7.1 DURCHBRUCHSVERSUCHE

#### Einlesen der Messdaten

Der an die Prüfmaschine angeschlossene Computer zeichnet in einem Messprogramm alle für die Auswertung wichtigen Daten auf. Diese sind im Allgemeinen:

- Zeit  $t$  [s]
- Kraft  $F$  [N]
- Traversenweg der Prüfmaschine [mm]

Dazu gehören aber auch die jeweils angeschlossenen Messgeräte, im Falle der Durchbruchversuche das Schubkreuz an der Süd- und Nordseite, sowie die Durchbiegung in Feldmitte:

- S-innen [mm]
- S-außen [mm]
- N-innen [mm]
- N-außen [mm]
- Mitte [mm]

Bei den Scherprüfungen wurde wie bereits beschrieben, neben den allgemeinen Daten noch mittels Wegaufnehmer die Verzerrung der Schubfuge gemessen. Die Bezeichnung dabei war:

- Wegsensor 1 [mm]
- Wegsensor 2 [mm]

Die Daten werden von der Software in eine Textdatei geschrieben und ausgegeben. Als ersten Schritt der Auswertung werden die Messdaten in eine Excel-Datei importiert und übersichtlich angeordnet.

#### Kraft-Weg-Diagramm

Bevor die eigentliche Auswertung der Daten beginnt, werden die Messergebnisse zunächst einmal visualisiert. Dies erfolgt mittels der Darstellung eines Kraft-Weg-Diagrammes. In Abb. 2.20 ist exemplarisch das Diagramm des Prüfkörpers B1 ersichtlich. An der y-Achse ist die Kraft in [N] aufgetragen, an der x-Achse wird der Traversenweg in [mm] dargestellt. An der Darstellung der Rohdaten lässt sich deutlich erkennen, dass die Kurve zu Beginn nichtlinear verläuft. Dies liegt daran, dass der gesamte Prüfaufbau gewissen Imperfektionen unterliegt und sich unter Last erst einpendeln muss. Nach dieser Anfangsphase stellt sich ein linear-elastischer Bereich ein, bis bei  $40\text{ kN}$  der Versuch für 30 sec pausiert wurde, um die Messeinrichtung zu demontieren (durch kurze waagrechte Linie erkennbar). In dieser kurzen Zeit kommt es zu einem geringen, aber messbaren Kriechen im Holz (in Abb. 2.20 kaum erkennbar als kurze waagrechte Linie bei einer Last von  $40\text{ kN}$ ). Da der Versuch weggesteuert durchgeführt wurde, bleibt die Lasteinleitungsplatte während der Pause in ihrer Position stehen. Das Holz versuchte sich der Kraft zu entziehen und verformte sich weiter. Dies führte dazu, dass die gemessene Kraft in der Zeit der Unterbrechung abnahm. In weiterer Folge sind in der Kurve mehrere Lastabfälle ersichtlich. Diese deuten im Bereich von etwa  $45\text{ kN}$  zunächst die Erstrissbildung am Durchbruchrand an. Bei höheren Lasten kommt es mehrmals zu weiteren, teils noch deutlicher erkennbaren, Lastabfällen,

welche sprödes Risswachstum andeuten. Die Kraft-Weg-Diagramme jedes einzelnen Prüfkörpers werden in Kap. 3-2.1 dargestellt.

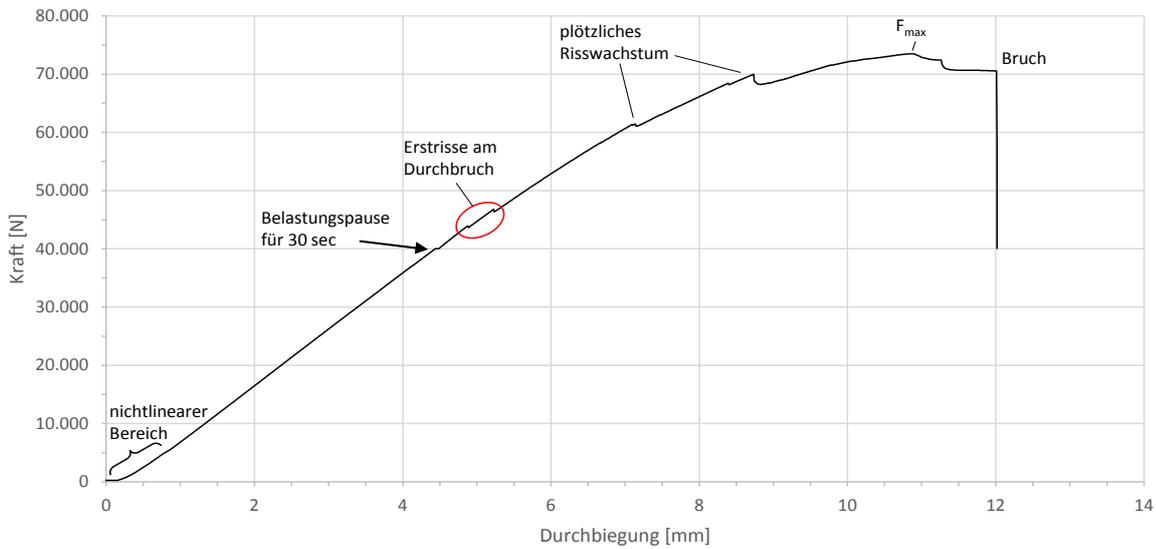


Abb. 2.20 Darstellung der Rohmessdaten des Prüfkörpers B1 im Kraft-Weg-Diagramm

Da der Anfang dieser Kurve nicht dem linear-elastischen Materialgesetz entspricht, wird dieser Bereich durch eine Gerade angenähert. Hierfür wird die Kurve von 0-10% der maximalen Last abgeschnitten und durch eine gerade Linie ersetzt, welche die Steigung besitzt, die mittels Excel im Bereich von 10%-40% der Maximallast errechnet wird. Da diese Gerade dadurch nicht mehr durch den Ursprung verläuft, wird die gesamte Kurve anschließend noch um den x-Achsen-Abschnitt zum Nullpunkt hin verschoben.

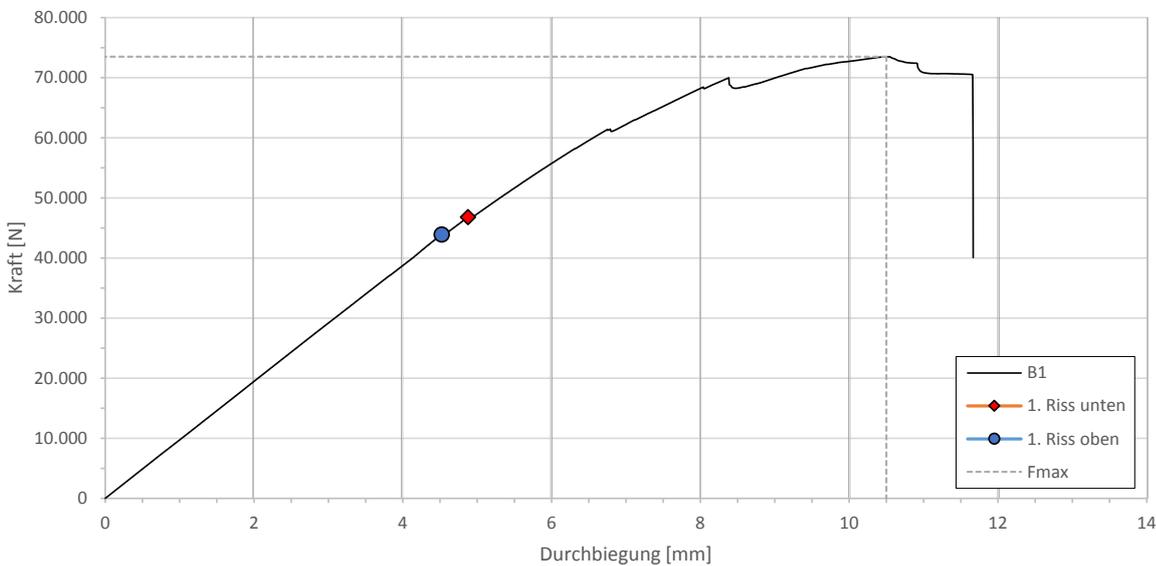
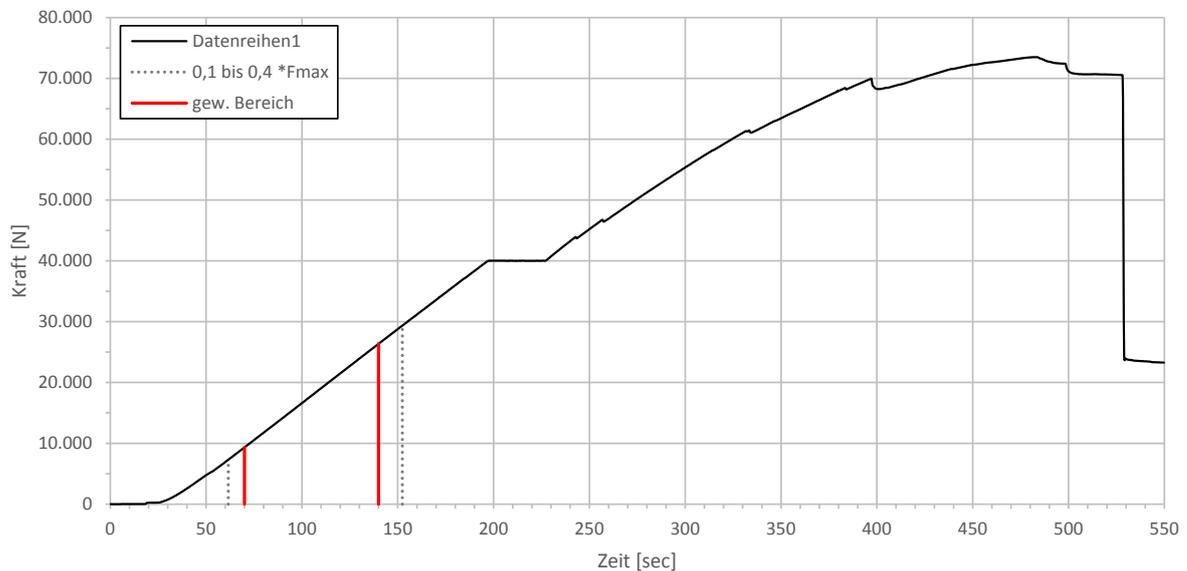


Abb. 2.21 Korrigierte Kurve mit Markierungen an den Stellen, wo erste Quersugrisse am Durchbruchrand auftreten, an der zur Feldmitte gerichteten Seite oben und diagonal gegenüberliegend am unteren Bereich des Durchbruches

Wie in 2-6.1.1 erklärt wird, wurde jeder Versuch bei etwa 50% der erwarteten Last für 30 sec pausiert, um die Messgeräte zu demontieren. In der Darstellung Abb. 2.21 wird dieses Kriechverhalten berücksichtigt und von den nachfolgenden Werten subtrahiert, um einen gleichförmigen Verlauf der Kurve zu erhalten. Außerdem werden dort jene Punkte markiert, an denen am Durchbruchrand die ersten Quersugrisse auftreten. Diese Werte werden bei der Auswertung herangezogen.

## Kraft-Zeit-Diagramm und Festlegen des Auswertebereiches

Laut EN 789:2005 soll der Auswertebereich zur Ermittlung von Steifigkeitskenngrößen zwischen 10% und 40% der Höchstlast  $F_{max}$  liegen, da in diesem Bereich ein linear-elastischer Verlauf zu erwarten ist. Um zu verdeutlichen, wo dieser Bereich in etwa liegt, wurden von jedem Prüfkörper Kraft-Zeit-Diagramme erstellt (siehe Abb. 2.22). An der y-Achse ist wiederum die Kraft in [N] aufgetragen, die x-Achse beschreibt die Zeit [sec]. In dieser Abbildung ist der Bereich zwischen 10% und 40% der Maximalkraft mit den schwarz punktierten Linien eingegrenzt. Die roten Linien beschreiben den letztendlich für die Auswertung gewählten Bereich. Diese Darstellung ist jener in Abb. 2.20 sehr ähnlich. Der einzige Unterschied betrifft die x-Achse. Auf dieser wird nun anstelle des Traversenweges die Zeit aufgetragen. Dies ist wichtig, da die Zeitschritte konstant vergehen, die gemessene Deformation hingegen nicht proportional mit der Zeit steigt. So lassen sich die Kräfte zu jedem Zeitpunkt der gesamten Prüfdauer ablesen. Aus diesem Grund ist die bei 40 kN eingehaltene Pause nun deutlich als waagrechte Linie in der Kurve erkennbar, da in dieser Zeit die Last nicht gesteigert wurde. Ansonsten erkennt man in dieser Darstellung ebenso die Lastabfälle bei Auftreten der Erstrisse am Durchbruchrand im Bereich bei etwa 45 kN, sowie weitere Rissbildung bei höheren Lasten.



**Abb. 2.22 Kraft-Zeit-Diagramm des Prüfkörpers B1 mit markiertem Bereich von 10% bis 40% von  $F_{max}$  (schwarz punktiert) und gewähltem Auswertebereich (rote Begrenzungslinien)**

Zur Berechnung der Schubsteifigkeit bei den Trägern mit Durchbruch wurde die Verzerrung eines Schubfeldes mittels eines Kreuzes aus Wegaufnehmer gemessen. Die Verformungsverläufe dieser Messinstrumente sind in Abb. 2.23 dargestellt. Hier wird der laut EN 789:2005 vorgegebene Bereich wiederum durch die schwarz punktierten Linien gekennzeichnet, der gewählte Auswertebereich wird durch die roten Linien begrenzt.

Diese Messung wurde zeitgleich an beiden Trägerseiten durchgeführt. Es lässt sich erkennen, dass die zwei gegenüberliegenden Messkreuze sehr ähnliche Dehnungen aufzeichnen. Das positive Vorzeichen der Verformung bedeutet, dass die außen liegenden Wegaufnehmer gedehnt werden, negative Verformung steht für eine Stauchung der innen liegenden Messbrücken (für Erklärungen bezüglich der Namensgebung siehe Kap. 2-6.1.1).

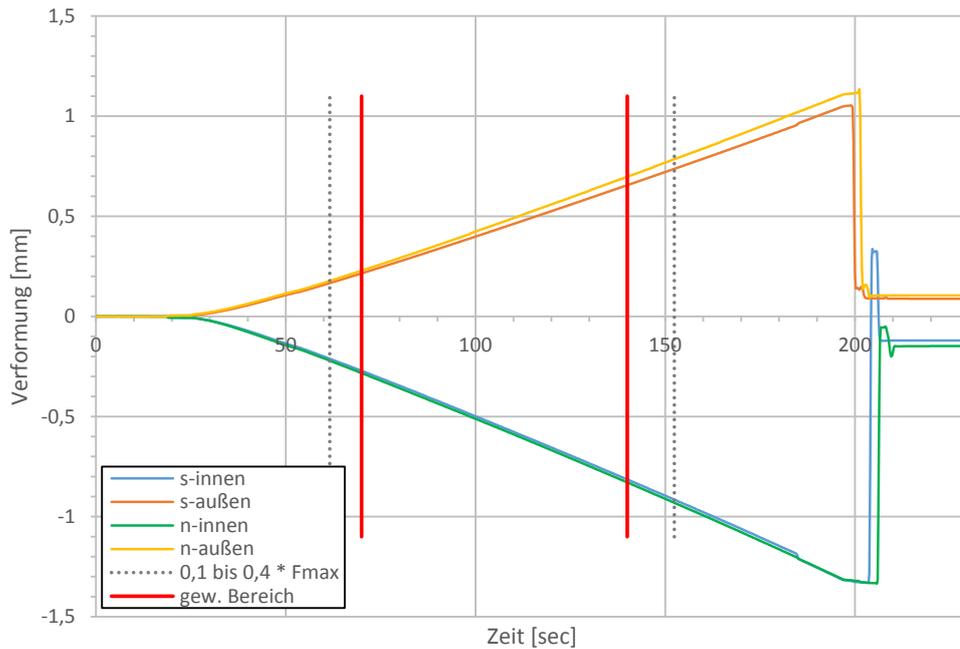


Abb. 2.23 Messwerte des Schubkreuzes des Prüfkörpers B1 mit markiertem Bereich von 10% bis 40% von  $F_{max}$  (schwarz punktiert) und gewähltem Auswertebereich (rote Begrenzungslinien)

Um zu ermitteln, in welchem Bereich der Verlauf der Messwerte am ehesten linear erfolgt, wird ein Diagramm erstellt, indem die Entwicklung der Steigung zwischen den einzelnen Messwerten dargestellt wird. Dies erfolgt über die Differenz eines jeden Messwertes mit dem vorhergehenden Messwert über die Gleichung:

$$\Delta w_i = w_{i+1} - w_i \quad (2.11)$$

In Abb. 2.24 wird ein Beispiel hierfür dargestellt. Die Linien zeigen den Verlauf der Steigung der vier Wegaufnehmer beider Messkreuze an. Ist die Steigung zwischen aufeinanderfolgenden Messpunkten konstant, so bedeutet es, dass sich die Verformung linear verhält. Dies wird in Abb. 2.24 durch einen annähernd horizontalen Verlauf (schwarze Gerade im gewählten Auswertebereich) angezeigt.

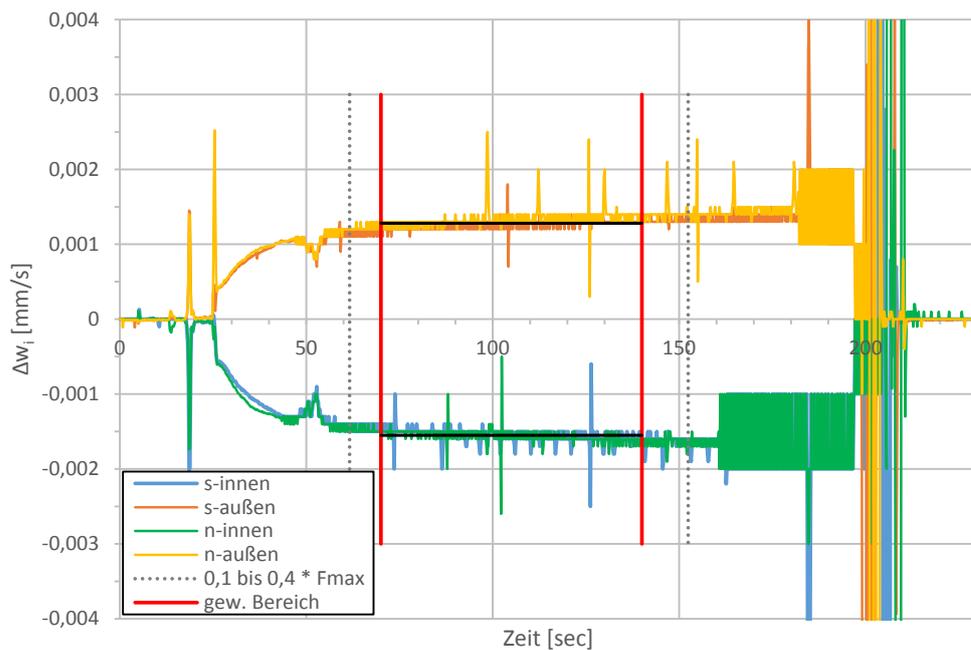


Abb. 2.24 Darstellung der Steigungsänderung der Dehnungsmesser über die Zeit

## Parametereingabe

Um die Messdaten auswerten zu können, bedurfte es noch einiger Parameter, welche händisch protokolliert wurden. Die wichtigsten Daten waren dabei die Höhe, Breite und Dicke des Trägers sowie der Durchmesser des Durchbruches. Außerdem wurden die im Prüfprotokoll aufgezeichneten Punkte, an welchen die ersten Risse am oberen und unteren Durchbruchrand auftraten, aus den Messdaten herausgesucht und notiert. Des Weiteren wurden die Tabellenblätter eingefügt, in denen die Berechnung der Rohdichte und der Holzfeuchtigkeit durchgeführt worden war.

## Ermittlung der wichtigsten Eckdaten

Nach der Eingabe und der Sortierung aller für die Berechnung wichtigen Parameter konnte mit der Auswertung begonnen werden. Hierfür wurde eine Tabelle erstellt, in der unter anderem folgende wichtige Eckdaten aufgelistet werden:

- Prüfzeit bis zum Bruch [s]
- Bruchlast  $F_{max}$  [kN]
- Traversenweg der Prüfmaschine [mm]
- Belastungsgeschwindigkeit [mm/min]
- Rohdichte [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] (siehe Kap. 2-1.3)
- Holzfeuchtigkeit [%] (siehe Kap. 2-1.2)
- Querschnittsgeometrien [mm]
- Schubmodul [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ]
- Kraft- und Spannungsgrößen, welche am Durchbruch relevant sind

### 2-7.1.2 Bestimmung des Schubmoduls

Die Berechnung des Schubmoduls erfolgt in Anlehnung an die in der ON EN 408:2012 angegebenen Formeln. Dabei werden die Diagonalen eines Quadrates, des sogenannten Schubfeldes gemessen. Bei Belastung kommt es zu einer Verzerrung des Quadrates, eine Diagonale wird kürzer, die andere länger. In diesem Fall errechnet sich der Schubmodul laut ON EN 408:2012 mit folgenden Gleichungen:

$$G_{tor,s} = \alpha * \frac{h_0}{b * h} * \frac{(V_{s,2} - V_{s,1})}{(w_2 - w_1)} \quad (2.12)$$

mit

$$\alpha = \frac{3}{2} - \frac{h_0^2}{4 * h^2} \quad (2.13)$$

wobei

$G_{tor,s}$	...Schubmodul [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ]
$b$	...Querschnittsbreite [mm]
$h$	...Querschnittshöhe [mm]
$h_0$	...Ausgangslänge der Messdiagonalen [mm]
$(V_{s,2} - V_{s,1})$	...Zunahme der Querkraft im betrachteten Auswertebereich [N]
$\alpha$	...Korrekturfaktor [-]
$(w_2 - w_1)/h_0$	...Verzerrung des Schubfeldes im betrachteten Auswertebereich [-]

Die Bezeichnung der Messdiagonalen ist in Abb. 2.25 dargestellt.

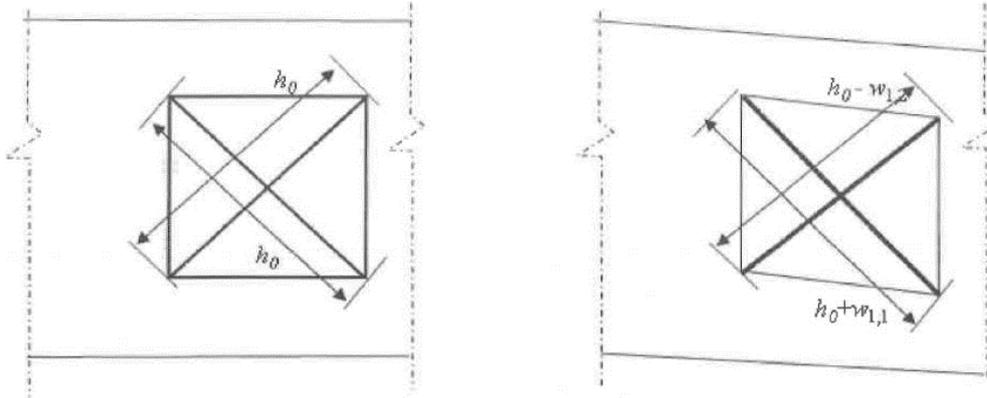


Abb. 2.25 Bezeichnung des Messkreuzes laut ON EN 408:2012

Zur Berechnung des Schubmoduls ist es wie bereits erwähnt nötig, einen Auswertebereich auszuwählen, der etwa im Bereich von 10% bis 40% der Bruchlast liegt. Es gilt anzumerken, dass an beiden Trägerseiten gegenüberliegende Messkreuze angeordnet waren. Die Werte der Wegaufnahme wurden jeweils gemittelt. Dabei bezeichnet der Name  $w_{innen}$  jene Messbrücke, welche sich räumlich betrachtet näher am Träger befinden und die sich stauchende Diagonale misst. Die äußere Messbrücke, welche die sich verlängernde Diagonale misst, wird hingegen mit  $w_{außen}$  benannt. Die in Gleichung (2.12) angegebenen Verformungen  $w_2$  und  $w_1$  stellen die Summen der Beträge beider Messdiagonalen an den jeweiligen Auswertungsgrenzen dar.

$$w_i = |w_{i,außen}| + |w_{i,innen}| \quad (2.14)$$

Die Schubspannungsverteilung bei einer Querkraftbelastung ist bekanntlich nicht konstant über den Querschnitt, sondern folgt einer Parabelform. Da mit dem Messkreuz die Verzerrung über einen begrenzten Bereich und nicht über die gesamte Querschnittshöhe bestimmt wird, muss mit dem Korrekturfaktor  $\alpha$  darauf Rücksicht genommen werden.

### 2-7.1.3 Ermittlung aller relevanten Spannungen

Zur Ermittlung der Spannungen werden eine Reihe verschiedenster Formeln angewendet. Diese stammen zum Teil aus Normen, zum Teil sind sie in Veröffentlichungen zu finden und wurden bereits in Kap. 1-3 angeführt. Die Auswertung erfolgt in Anlehnung an den Forschungsbericht „Prüftechnische Untersuchungen unterschiedlicher Verstärkungsmethoden für Träger mit großen runden Durchbrüchen“ von Dröscher et al. (2016). Im Folgenden werden die berechneten Spannungen aufgelistet und beschrieben. Dabei werden die Spannungswerte bei verschiedenen Lastniveaus ausgewertet. Betrachtet werden hierbei zum Teil sowohl die Bruchlast, als auch das Lastniveau bei Auftreten der ersten Risse am Durchbruchrand. Anzumerken ist, dass alle Spannungen auch zum Zeitpunkt des Bruches ausgewertet werden. Diese Spannungswerte sind allerdings nicht mit dem Festigkeitswert des Materials gleichzusetzen, da in den Versuchsreihen unterschiedliche Versagensmodi beobachtet wurden. (Dröscher, et al., 2016)

#### Querzugspannungen

Die durch den Durchbruch hervorgerufenen Umlagerungen im Träger erzeugen am Durchbruchrand quer zur Faser gerichtete Kraftkomponenten. Zur Berechnung dieser enthält die ÖNORM B 1995-1-1:2015 eine Reihe von Gleichungen, welche den Einfluss der Querkraft, aber auch den Anteil des Biegemomentes abbilden. Diese sind in Kap. 1-3.1.1 aufgelistet und erklärt. Wie aus zahlreichen Veröffentlichungen hervorgeht, ist das der Berechnung zugrunde gelegte Modell sehr ungenau und kann die tatsächlich auftretenden Spannungsspitzen bei runden Durchbrüchen schlecht erfassen. Trotzdem wird dieser Berechnungsansatz bei der Auswertung herangezogen. Die Querzugkräfte und die daraus

resultierenden Querkzugspannungen werden zum Zeitpunkt der Maximalkraft und an den Lastniveaus, an welchen am Durchbruchrand „oben“ und „unten“ die ersten Querkzugrisse auftraten, ausgewertet. Für die Serien C, D, E und R wird die maximal errechnete Querkzugkraft  $F_{t,90}$  in den Auswertungstabellen angegeben. Diese Kraft wird bei Serie E und R zur Berechnung der Querkzugspannungen herangezogen. Im Falle des unverstärkten Reserveträgers wird die Spannung an der gesamten Querschnittsbreite bei verschiedenen Lastniveaus ermittelt: zum Zeitpunkt des Bruches ( $\sigma_{t,90,max}$ ) sowie zum Zeitpunkt der Erstrissbildung am Durchbruchrand oben ( $\sigma_{t,90,o,cr}$ ) und unten ( $\sigma_{t,90,u,cr}$ ). Bei Serie E erfolgt die Berechnung nach dem gleichen Prinzip. Als angesetzte Breite zur Berechnung der Querkzugspannungen dient in diesem Fall allerdings nur die Gesamtstärke der Querlagen, da diese als verstärkende Maßnahme die quer zur Faser gerichteten Kräfte aufnehmen sollen. Spannungen, welche lediglich den Querlagen zugeordnet werden, sind in Kap. 3-2.1 mit dem Index „QL“ gekennzeichnet.

## Schubspannungen

Im Bereich des Durchbruches kommt es aufgrund des fehlenden Holzquerschnittes zu einer Störung des Schubflusses und somit zu einer Änderung der Schubspannungsverteilung. In der ÖNORM B 1995-1-1:2015 findet sich ein Schubspannungsnachweis, welcher die Schubspannungen am Durchbruchrand bestimmt und mit einem Faktor  $k_\tau$  Spitzenspannungen berücksichtigt. Die Gleichung findet sich in Kap. 1-3.1.1.

Aus dem Bericht von Dröscher et al. (2016) geht hervor, dass dieser Faktor die Spannungsspitzen in den Ecken von rechteckförmigen Durchbrüchen gut erfasst, bei Berechnung der Schubspannungen an runden Durchbrüchen allerdings zu einer enormen Überschätzung führt und somit ungeeignet ist. Außerdem gilt anzumerken, dass in der Norm bei der Berechnung der „Schubspannungen in den Durchbruchsecken“ keine Reduzierung des Durchbruchdurchmessers  $h_d = 0,7 * h_d$  erfolgt, wie es etwa bei der Berechnung der Querkzugspannungen der Fall ist. Dies führt unter Vernachlässigung des Faktors  $k_\tau$  dazu, dass der Nachweis im Prinzip die Schubspannungen am Nettoquerschnitt in Durchbruchmitte berechnet. Laut Dröscher et al. (2016) führt dies in ihren Untersuchungen zu einer Unterschätzung der Spannung im Vergleich zu den Ergebnissen von FE-Analysen um rund 7%. (Dröscher, et al., 2016)

Da keine weiteren Untersuchungen bezüglich des Einflusses verschiedenster Parameter auf die Abweichung des Nettoquerschnittsnachweises gegenüber FE-Berechnungen vorliegen, wird diese Abweichung in der Auswertung nicht berücksichtigt.

Um die einzelnen Träger und das Potenzial ihrer Verstärkung einschätzen zu können, wird als Vergleichswert die Schubspannung über den ungeschwächten Gesamtquerschnitt ermittelt. Im Falle der Prüfserie A entspricht dieser Wert der Schubfestigkeit, da bei diesen Trägern ein Schubbruch eintrat. Die Spannung bestimmt sich mit der Gleichung:

$$\tau = \frac{3 * V_{max}}{2 * b * h} \quad (2.15)$$

wobei

$\tau$	...maximale Schubspannung über den Gesamtquerschnitt [N/mm <sup>2</sup> ]
$V_{max}$	...Querkraft zum Zeitpunkt des Bruches [kN]
$b$	...Trägerbreite [mm]
$h$	...Trägerhöhe [mm]

Im Falle von außen aufgeklebten Sperrholzplatten rechnet Dröscher et al. (2016) eine „verschmierte“ Schubspannung über den Verbundquerschnitt. Dabei werden die Spannungen der jeweiligen Querschnittsteile unter Berücksichtigung des Schubsteifigkeitsverhältnisses zwischen Träger (aus Fichte) und Sperrholz (aus Buche) ermittelt. Da im vorliegenden Fall sowohl die Träger als auch die außen aufgeklebten Platten aus Fichte bestanden und unter denselben Bedingungen hergestellt wurden, kann davon ausgegangen werden, dass ähnliche Steifigkeitswerte vorliegen. Aus diesem Grund wird für die Auswertung der Schubspannungen im Durchbruchquerschnitt in dieser Arbeit nicht von einem Verbundquerschnitt ausgegangen, sondern vereinfacht eine Verbreiterung des Trägers um die Plattendicke angenommen. Somit ergibt sich für die Berechnung der Schubspannungen im Durchbruchquerschnitt folgende Gleichung:

$$\tau_{DB} = \frac{3 * V_{max}}{2 * (b + 2 * t) * (h - h_d)} \quad (2.16)$$

wobei

$\tau_{DB}$	...maximale Schubspannung in Durchbruchmitte [N/mm <sup>2</sup> ]
$t$	...Stärke der aufgeklebten Sperrholzplatte [mm]
$h_d$	...Durchbruchhöhe [mm]

Die Werte für die Schubspannungen im Durchbruchsquerschnitt werden in den Auswertungstabellen bereits aufgrund ihres Holzfeuchteunterschiedes korrigiert angeführt. Sie werden mit  $\tau_{DB,12}$  bezeichnet.

## Biegespannungen

Die Biegespannungen in Feldmitte ( $\sigma_{m,Feld}$ ) werden zum Zeitpunkt der Maximalkraft berechnet. Bei der aus Sperrholz bestehenden Serie E wird für die Berechnung der Biegespannungen nur die Querschnittsfläche der Längslagen in Rechnung gestellt. Diese Spannungen werden mit  $\sigma_{m,Feld,LL}$  bezeichnet.

Im Durchbruchsbereich werden weitere Biegespannungen ausgewertet. Laut ÖNORM B 1995-1-1:2015 ist bei kreisrunden Durchbrüchen der Nachweis der Biegerandspannungen am Nettoquerschnitt ausreichend. Der Einfluss der durch die Querkraft hervorgerufenen Sekundärmomente ist nur bei rechteckigen Durchbrüchen zu berücksichtigen. Es gilt jedoch anzumerken, dass in der Norm unverstärkte Durchbrüche einen Durchmesser von maximal  $0,15 * h$  aufweisen dürfen, die zulässige Größe reicht bei verstärkten Durchbrüchen bis zu  $0,4 * h$ . Je größer der Durchmesser desto größer auch der Einfluss der Sekundärmomente. Da im vorliegenden Fall Durchbrüche mit einem Durchmesser von  $0,5 * h$  untersucht wurden, sollen die Sekundärmomente nicht unberücksichtigt bleiben und werden nach dem Modell nach Dröscher et al. (2016) berechnet.

Dabei werden die Biegespannungen am Durchbruch an der Stelle von  $\alpha = 45^\circ$  (siehe Abb. 2.26 Schnitt 2) zur Faserrichtung am Durchbruch mit folgenden Gleichungen ermittelt:

$$\sigma_{m,45} = \frac{M_{y,45}}{W_{y,45}} + \frac{M_{y,sek,45}}{W_{y,Gurt,45}} \quad (2.17)$$

mit

$$W_{y,45} = \frac{b * [h^3 - (0,7 * h_d)^3]}{6} \quad (2.18)$$

$$W_{y,Gurt,45} = \frac{b * (h_r + 0,15 * h_d)^2}{6} \quad (2.19)$$

wobei

$\sigma_{m,45}$	...Biegespannung an der Stelle $\alpha = 45^\circ$ des Durchbruches [N/mm <sup>2</sup> ]
$M_{y,45}$	...globales Biegemoment an der Stelle $\alpha = 45^\circ$ des Durchbruches [Nmm]
$W_{y,45}$	...Widerstandsmoment an der Stelle $\alpha = 45^\circ$ des Durchbruches [mm <sup>3</sup> ]
$M_{y,sek,45}$	...Sekundärmoment an der Stelle $\alpha = 45^\circ$ des Durchbruches [Nmm]
$W_{y,Gurt,45}$	...Widerstandsmoment des Gurtes an der Stelle $\alpha = 45^\circ$ des Durchbruches [mm <sup>3</sup> ]
$b$	...Trägerbreite [mm]
$h$	...Trägerhöhe [mm]
$h_d$	...Durchmesser des Durchbruches [mm]
$h_r$	...Abstand von der Trägerkante zum Durchbruchrand siehe Abb. 2.26 [mm]

Des Weiteren werden die Biegespannungen unter Berücksichtigung des Sekundärmomentes am Durchbruchrand berechnet (siehe Abb. 2.26 Schnitt 3). Dabei wird der zur Feldmitte weisende Rand aufgrund des größeren globalen Biegemomentes maßgebend. Die verwendeten Gleichungen lauten:



Bei Serie D sind die außen aufgeklebten Sperrholzplatten im Winkel von  $45^\circ$  zur Trägerachse gedreht. In diesem Fall wird mit dem n-Ziffern-Verfahren die Querschnittswerte des Verbundquerschnittes berechnet. Der E-Modul der außen liegenden Sperrholzplatte im Winkel von  $45^\circ$  wird mit folgender Gleichung ermittelt: (Schickhofer, 2006)

$$E_\alpha = \frac{E_0 * E_{90}}{E_0 * (\sin \alpha)^3 + E_{90} * (\cos \alpha)^3} \quad (2.23)$$

wobei

- $E_\alpha$  ...E-Modul unter einem Winkel  $\alpha$  zur Faser [N/mm<sup>2</sup>]
- $E_0$  ...E-Modul parallel zur Faserrichtung [N/mm<sup>2</sup>]
- $E_{90}$  ...E-Modul quer zur Faserrichtung [N/mm<sup>2</sup>]

Als E-Modul parallel zur Faser wird laut Tab. 2.1 ein Wert von  $E_0 = 13.800 \text{ N/mm}^2$  angesetzt. Für die meisten Berechnungen ist es üblich, den E-Modul quer zur Faser zu vernachlässigen. In diesem Fall wird ein Wert von  $E_{90} = 300 \text{ N/mm}^2$  in Anlehnung an die ÖNORM EN 14080:2013 gewählt.

Somit erhält man ein Ergebnis von etwa  $E_{45} \sim 830 \text{ N/mm}^2$ . Mit diesem E-Modul der Sperrholzplatte in Trägerrichtung wird das n-Ziffern-Verfahren angewendet. Dabei werden die Trägheitsmomente des Verbundquerschnittes in Durchbruchmitte, bei  $45^\circ$  am Durchbruch und am Durchbruchrand berechnet, sowie die für die Berechnung der Sekundärmomente benötigten Trägheitsmomente der Gurtquerschnitte. In Tab. 2.3 ist eine Berechnung am Beispiel des Querschnittes in Durchbruchmitte bei Prüfkörper D1 dargestellt. Im den Auswertungstabellen sind die dabei errechneten Biegespannungen mit dem Index „Verb.“ gekennzeichnet.

**Tab. 2.3 Exemplarische Darstellung des n-Ziffern-Verfahrens zur Bestimmung des Flächenträgheitsmomente am Beispiel des Querschnittes in Durchbruchmitte bei Prüfkörper D1**

Nr.	b [mm]	h [mm]	h <sub>d</sub> [mm]	I <sub>y,i</sub> [mm <sup>4</sup> ]	E <sub>i</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	n <sub>i</sub> [-]	I <sub>y,i</sub> * n <sub>i</sub> [mm <sup>4</sup> ]
1	7,5	270,365	136,12	10.775.508	830,5	0,0602	648.463
2	41,375	270,365	136,12	59.444.887	13800	1	59.444.887
3	7,5	270,365	136,12	10.775.508	830,5	0,0602	648.463
$\Sigma$							60.741.812

### Nachweis der außenliegenden Sperrholzplatten

Im Nationalen Anhang (NA) der ÖNORM B 1995-1-1:2015 finden sich Formeln zum Nachweis der zur Verstärkung von Durchbrüchen dienenden außen aufgeklebten Sperrholzplatten (siehe Kap. 1-3.2.1). Dabei wird sowohl die Klebefugenspannung ( $\tau_{ef}$ ) mit Glg. (1.31) als auch die Zugspannung in der Platte selbst ( $\sigma_{t,FSP}$ ) mit Glg. (1.33) berechnet. Als Grundlage für diese Berechnungen dient stets die ebenso rechnerisch ermittelte Querzugkraft ( $F_{t,90}$ ) am Durchbruchrand. Diese muss von der Klebefuge an die Platte übertragen und von dieser aufgenommen werden können.

## 2-7.2 SCHERVERSUCHE 14°

Das Einlesen der Messdaten sowie die Auswahl des Auswertebereiches erfolgten nach dem gleichen Prinzip wie bei der Auswertung der Durchbruchversuche (siehe Kap 2-7.1). Auch für die Messergebnisse der Scherprüfungen wurden Kraft-Weg-Diagramme erstellt.

### 2-7.2.1 Bestimmung der Schubfestigkeit

Bei Untersuchungen mittels FE-Simulationen stellte Ehrhart (2014) fest, dass sich bei der in der Norm ON EN 408:2012 vorgegebenen Prüfkfiguration zur Bestimmung der Scherfestigkeit in Faserrichtung in der Scherfuge ein annähernd konstanter Schubspannungsverlauf einstellt (siehe Abb. 2.27). (Ehrhart, 2014)

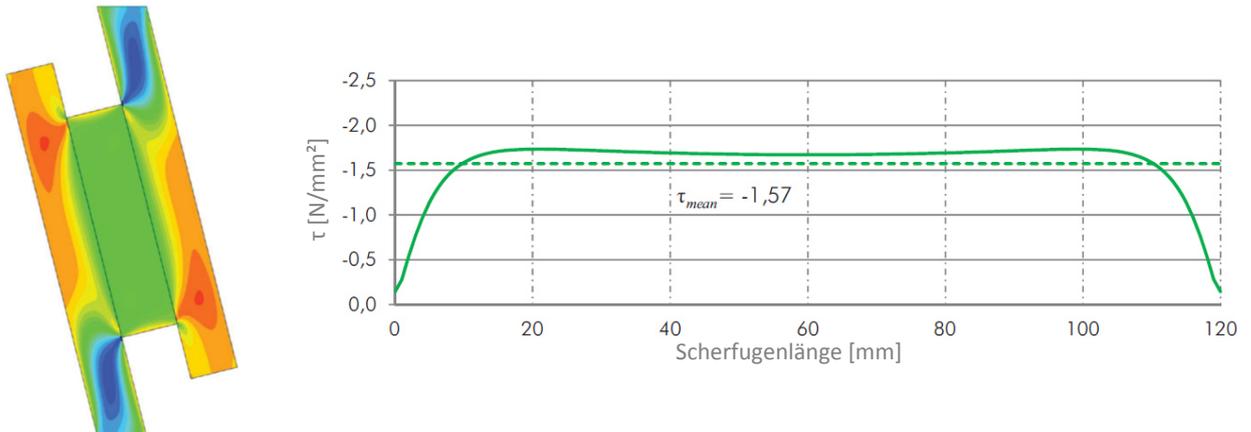


Abb. 2.27 Schubspannungsverteilung im Prüfkörper (links) und Verlauf der Schubspannungen in der Mittelachse der Scherfuge (rechts) (Ehrhart, 2014)

Aus diesem Grund wird für die Auswertung der Schubfestigkeit folgende Gleichung verwendet:

$$f_v = \frac{F_{max} * \cos 14^\circ}{A} = \frac{F_{max} * \cos 14^\circ}{l * b} \quad (2.24)$$

wobei

$f_v$	... Schubfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
$F_{max}$	... Bruchlast [N]
$b$	... Querschnittsbreite [mm]
$l$	... Länge der Scherfuge [mm]

### 2-7.2.2 Bestimmung des Schubmoduls

Der Schubmodul ergibt sich aus dem Quotient der Schubspannung und der Schubverzerrung mit folgender Gleichung:

$$G = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{F * \cos 14^\circ}{\frac{l * b}{\frac{w_{//}}{d}}} \quad (2.25)$$

wobei

$\tau$	... Schubspannung [N/mm <sup>2</sup> ]
$F$	... Prüfkraft [N]
$\gamma$	... Verzerrung [-]
$b$	... Querschnittsbreite [mm]
$l$	... Länge der Scherfuge [mm]
$w_{//}$	... Verschiebung parallel zur Scherfuge [mm]
$d$	... Breite der Scherfuge [mm]

### 2-7.3 STATISTISCHE AUSWERTUNG

Die geringe Anzahl der Prüfkörper bei den Durchbuchversuchen von nur je drei Stück pro Serie, macht eine umfangreiche statistische Auswertung nicht möglich. Aus diesem Grund wird als aussagekräftigster Wert in Kap. 3-2.1 meist der **Mittelwert** der Ergebnisse herangezogen. Um das Spektrum aller Resultate ersichtlich zu machen, wird zudem das **Minimum** und das **Maximum** angeführt.

Liegen zu einem bestimmten Kennwert mehrere Messdaten oder Berechnungsergebnisse vor (beispielsweise bei Holzfeuchte, Rohdichte, Schubfestigkeiten...), werden als zusätzliche statistische Parameter noch der **Variationskoeffizient** sowie der **5%-Quantilwert** berechnet. Die **Standardabweichung** wird mit der Software Microsoft Excel 2016 mit der Funktion „STABW.S“ aufgrund der geringen Stichprobenanzahl geschätzt.

Der 5%-Quantilwert (charakteristischer Wert) wird dabei auf Grundlage der ÖNORM EN 14358:2016 berechnet, welche die Anzahl der Stichproben berücksichtigt. Die Berechnung erfolgt dabei auf Basis der logarithmischen Normalverteilung.

# KAPITEL 3: ERGEBNISSE

## 3-1 HOLZFEUCHTE UND ROHDICHTE

### 3-1.1 DURCHBRUCHSVERSUCHE

Die Holzfeuchtigkeit der Prüfkörper wurde unmittelbar nach Abschluss der Versuche mittels der Darmmethode bestimmt (siehe Kap. 2-1.2). Auffällig ist, dass die Holzfeuchtigkeit bei allen Prüfkörpern deutlich unterhalb des Normniveaus von 12% lag, nämlich im Bereich von etwa  $9\% \pm 1\%$ . Da der Feuchtegehalt des Holzes einen wesentlichen Einfluss auf die Materialkenngrößen besitzt, werden die aus den Messergebnissen berechneten Werte für die Auswertung auf die Bezugsholzfeuchte von 12% umgerechnet (siehe Kap. 2-1.4). Diese korrigierten Werte sind im Folgenden mit dem Index „12“ gekennzeichnet. Die Ergebnisse der Holzfeuchtemessungen sind in Abb. 3.1 dargestellt. Der Mittelwert aller Messungen lag bei  $u_{mean} = 9,1\%$ .

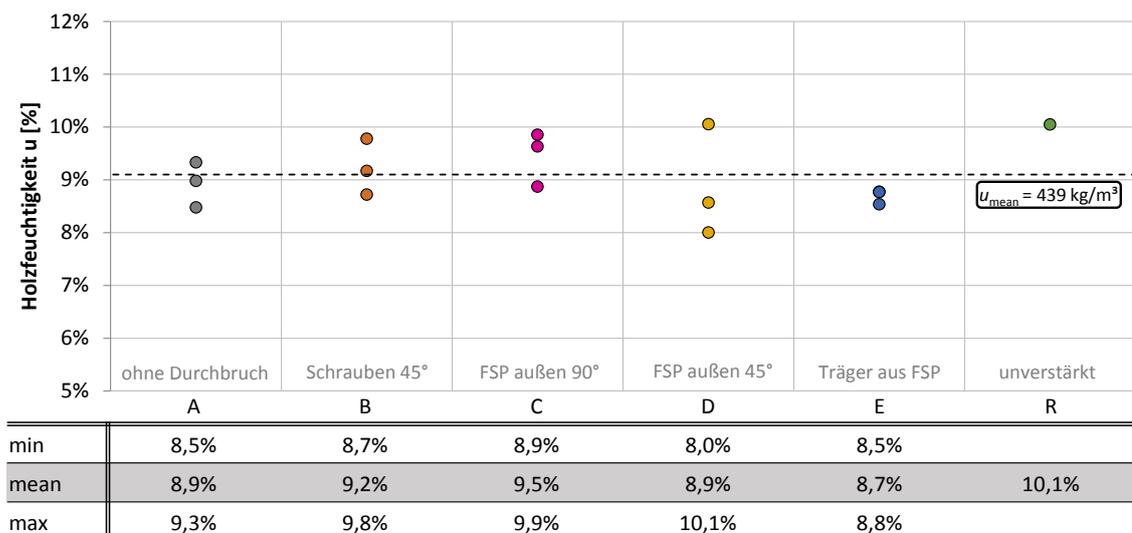


Abb. 3.1 Holzfeuchte u der Durchbruchsprüfkörper [%]

Die Rohdichte der Prüfkörper wurde bereits bei der Herstellung bestimmt. Hierfür wurden die geometrischen Abmessungen sowie die Masse eines jeden Trägers bestimmt und daraus auf die Dichte rückgerechnet. Die Prüfkörper waren zu diesem Zeitpunkt schon ausreichend lange unter Normbedingungen gelagert, dass sich die Ausgleichsfeuchte einstellen konnte. Da auch die Rohdichte wesentlich von der Holzfeuchtigkeit beeinflusst wird, finden sich in Abb. 3.2 die bereits auf die Bezugsholzfeuchte von 12% korrigierten Werte der Rohdichteverteilung aller Prüfserien. Die Werte reichten dabei von  $414 \text{ kg/m}^3$  bis  $465 \text{ kg/m}^3$ . Der Mittelwert aller Prüfkörper lag bei  $\rho_{12,mean} = 439 \text{ kg/m}^3$ .

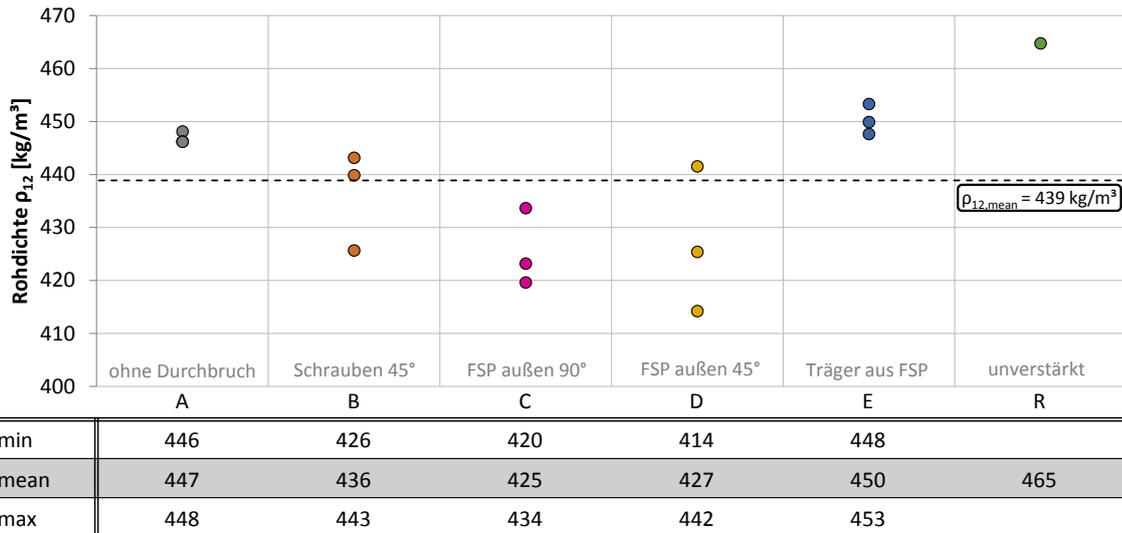


Abb. 3.2 Korrigierte Rohdichte  $\rho_{12}$  der Durchbruchsprüfkörper [kg/m<sup>3</sup>]

Die Holzfeuchte- sowie die Rohdichtewerte für jeden einzelnen Träger sind in Tab. 3.1 aufgeschlüsselt. Die Ergebnisse nach der Korrektur aufgrund der Holzfeuchteunterschiede sind ebenso angegeben.

Tab. 3.1 Holzfeuchtigkeit  $u$  [%], gemessene Rohdichte sowie korrigierte Rohdichte [kg/m<sup>3</sup>] der einzelnen Prüfkörper

	$u$ [%]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_{12}$ [kg/m <sup>3</sup> ]
A1	9,0%	441	448
A2	8,5%	439	446
A3	9,3%	440	446
B1	9,8%	438	443
B2	8,7%	419	426
B3	9,2%	434	440
C1	9,9%	429	434
C2	9,6%	415	420
C3	8,9%	417	423
D1	8,6%	434	442
D2	10,1%	410	414
D3	8,0%	417	425
E1	8,8%	443	450
E2	8,8%	446	453
E3	8,5%	440	448
R1	10,1%	460	465

min	8,0%	410	414
mean	9,1%	433	439
max	10,1%	460	465
5%-Q-log.NV	7,9%	392	397
STABW	0,6%	13,8	13,9
COV	0,07	0,03	0,03

### 3-1.2 SCHERVERSUCHE 14°

Auch bei den Prüfkörpern der Scherversuche wurden Holzfeuchtemessungen durchgeführt. Wie bereits mehrmals erwähnt, wurden aus jedem Träger der Durchbruchversuche zwei Prüfkörper zur Bestimmung der Schubfestigkeit hergestellt (mit Ausnahme von Träger A2, dieser konnte nicht mehr verwendet werden). Obwohl die Serienbezeichnung für die Scherversuche nicht mehr relevant ist (hier wurde für die Auswertung prinzipiell nur zwischen Furnierschicht- „FSH“ und Furniersperrholz „FSP“ unterschieden), werden die Messergebnisse in Abb. 3.3 dennoch ähnlich wie in Abb. 3.1 dargestellt, um eine bessere Vergleichbarkeit zu ermöglichen. Auch hier ergaben sich deutlich unterhalb von 12% liegende Werte. Die Holzfeuchtigkeiten waren bei den Scherprüfkörpern im Allgemeinen geringfügig höher als bei den Durchbruchversuchen, wobei der Mittelwert bei  $u_{mean} = 9,3\%$  lag.

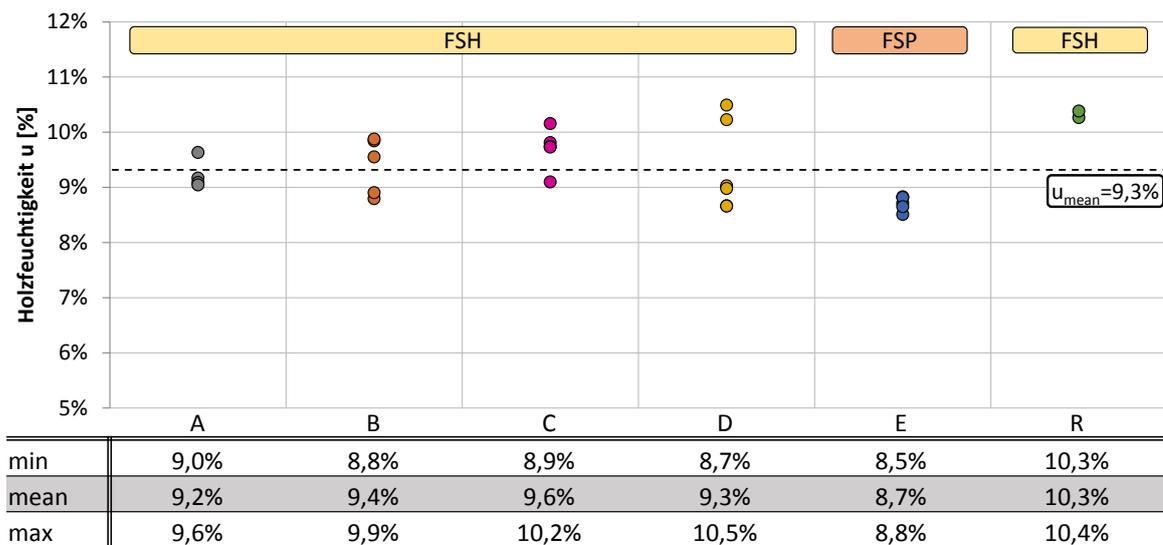


Abb. 3.3 Holzfeuchte u der Scherprüfkörper [%]

Auch in diesem Fall wurde die Rohdichte der Prüfkörper im Laufe der Herstellung bestimmt. Dazu wurden bereits vor dem Aufkleben der Krafteinleitungslaschen und dem endgültigen Formatieren die Masse und die Abmessungen der Prüfkörper erfasst. Nach der Holzfeuchtemessung konnten die Werte noch mittels Korrektur auf die Bezugsholzfeuchte umgerechnet werden. Die Werte lagen in einem Bereich zwischen  $418 \text{ kg/m}^3$  und  $455 \text{ kg/m}^3$ . Der Mittelwert aller Prüfkörper lag nur unmerklich höher als bei den Durchbruchversuchen, nämlich bei  $\rho_{12,mean} = 441 \text{ kg/m}^3$ .

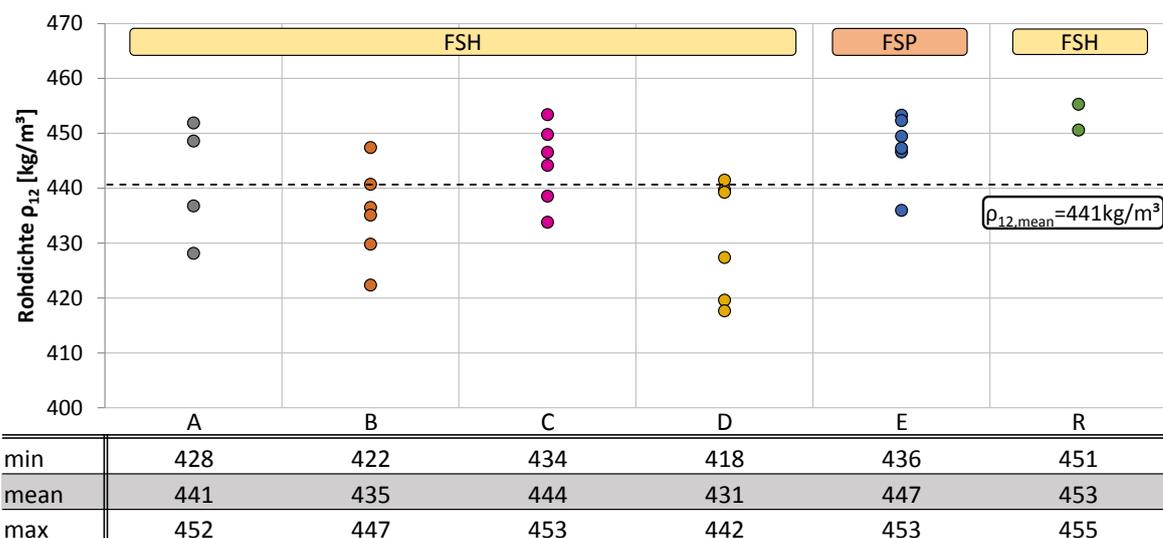


Abb. 3.4 Korrigierte Rohdichte  $\rho_{12}$  der Durchbruchsprüfkörper [ $\text{kg/m}^3$ ]

In Tab. 3.2 sind die Ergebnisse der Holzfeuchtemessung und der Rohdichtebestimmung angeführt. Des Weiteren finden sich in der Tabelle die korrigierten Werte der Rohdichte aufgrund der Holzfeuchteunterschiede. Prüfkörper, welche bereits eine gewisse Vorschädigung aufwiesen, wurden mit dem Namenszusatz „X“ gekennzeichnet.

**Tab. 3.2 Holzfeuchtigkeit  $u$  [%], gemessene Rohdichte sowie korrigierte Rohdichte  $[\text{kg}/\text{m}^3]$  der einzelnen Prüfkörper bei den Scherversuchen**

	$u$ [%]	$\rho$ [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	$\rho_{12}$ [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
A1aX	9,2%	442	449
A1bX	9,1%	431	437
A3a	9,0%	445	452
A3b	9,6%	423	428
B1a	9,8%	425	430
B1b	9,9%	443	447
B2a	8,8%	416	422
B2b	8,9%	430	437
B3a	9,6%	435	441
B3b	9,3%	429	435
C1a	10,2%	449	453
C1b	9,8%	445	450
C2a	9,7%	429	434
C2b	9,7%	442	447
C3a	9,1%	432	439
C3b	8,9%	437	444
D1a	9,0%	433	440
D1bX	9,0%	421	427
D2a	10,2%	438	442
D2b	10,5%	436	439
D3a	8,7%	413	420
D3b	8,7%	411	418
E1a	8,8%	446	453
E1b	8,7%	442	449
E2a	8,8%	445	452
E2b	8,5%	439	447
E3a	8,7%	429	436
E3b	8,6%	440	447
R1a	10,3%	451	455
R1b	10,4%	447	451
min	8,5%	411	418
mean	9,3%	435	441
max	10,5%	451	455
5%-Q <sub>-log,NV</sub>	8,3%	396	401
STABW	0,6%	10,8	10,5
COV	0,06	0,02	0,02

## 3-2 BRUCHCHARAKTERISTIK UND BRUCHLAST

### 3-2.1 DURCHBRUCHSVERSUCHE

In den folgenden Abbildungen findet sich ein genereller Überblick über die wichtigsten Messwerte und den daraus errechneten Spannungen und Steifigkeiten. Der für die Auswertung herangezogene Prüfumfang umfasste zwei Träger der Serie A (der Prüfkörper A2 wurde nur zur Berechnung des Schubmoduls herangezogen, diese Messung erfolgte im linear-elastischen Bereich, alle anderen Messergebnisse waren nicht zu verwenden), je drei Prüfkörper bei Serie B, C, D und E, sowie den einzelnen Reserveträger.

In den Grafiken sind im unteren Bereich der Diagramme Prozentwerte in farbig hinterlegten Feldern dargestellt. Diese stellen das Verhältnis der jeweiligen Kenngröße zum Referenzträger dar. Für diesen Vergleich wurden die Mittelwerte der einzelnen Serien herangezogen.

#### Bruchlast

In Abb. 3.5 sind die gemessenen Maximalkräfte eines jeden Versuchskörpers aufgetragen. Die Prozentzahl drückt in diesem Fall indirekt das Potenzial der eingesetzten Verstärkungsmethode in Hinblick auf die Tragfähigkeitswiederherstellung auf das Niveau eines undurchbrochenen Trägers aus. Auffällig ist, dass alle verstärkten Serien eine ähnliche Tragkapazität von etwa 2/3 der Referenzserie aufweisen. Der unverstärkte Durchbruch des Reserveträgers erreichte noch ein Lastniveau von 41% gegenüber dem Mittelwert der Referenzträger.

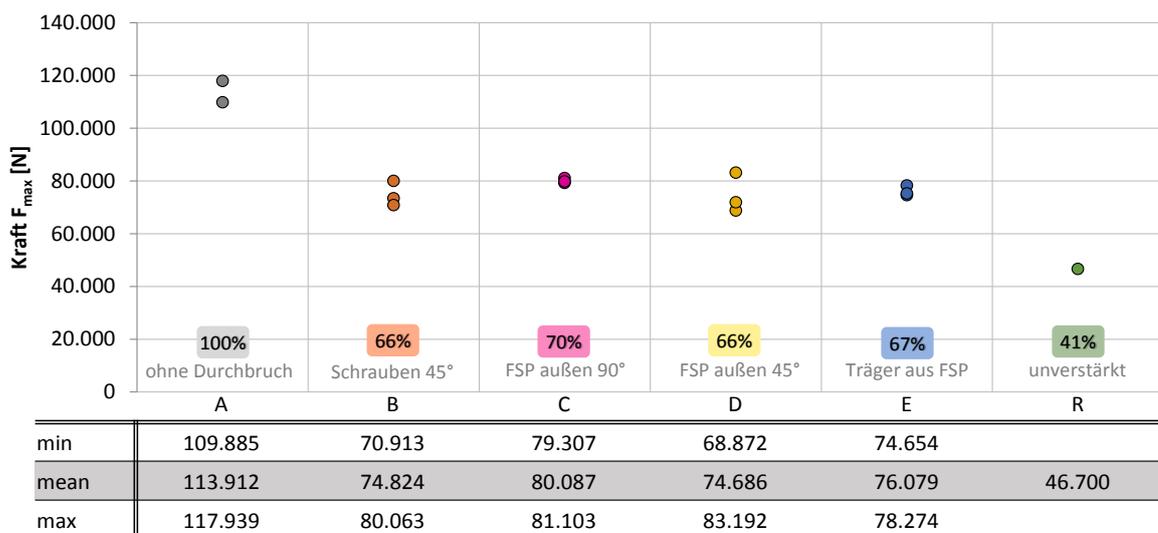


Abb. 3.5 Lastniveau beim Versagen  $F_{max}$  [kN]

#### Schubspannung am Gesamtquerschnitt

Ein weiterer Vergleich zwischen den einzelnen Prüfkörpern lässt sich mit der Schubspannung, berechnet am Gesamtquerschnitt, ziehen. Die Niveaus der Prozentangaben sind denen der Maximalkraft sehr ähnlich. In diesem Fall werden jedoch zusätzlich eventuelle Ungenauigkeiten der Trägergeometrie, sowie die Korrektur aufgrund der Holzfeuchteunterschiede mitberücksichtigt.

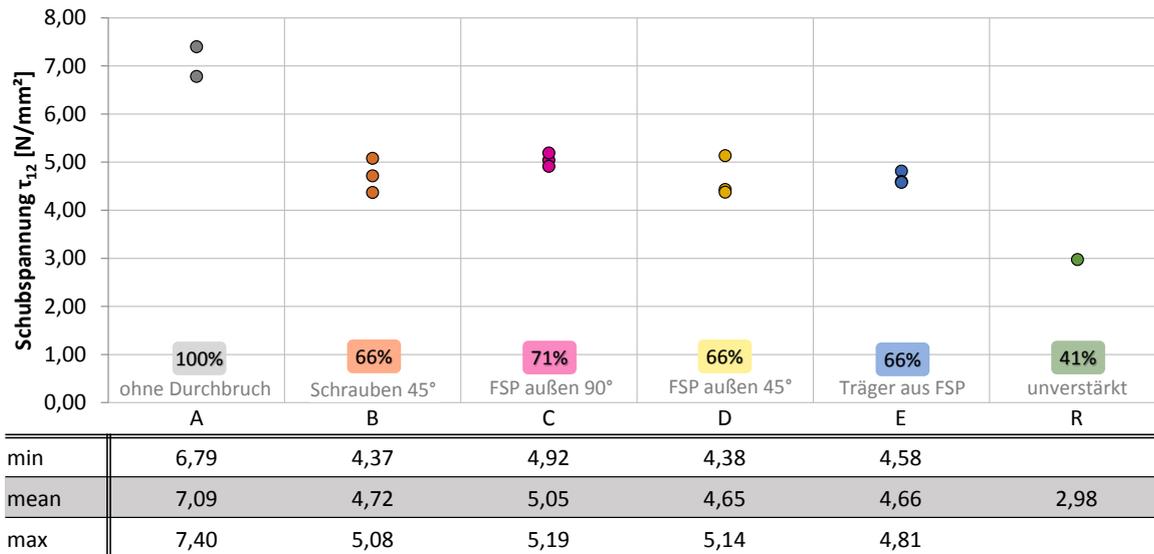


Abb. 3.6 Korrigierte Schubspannung  $\tau_{12}$  bezogen auf den Gesamtquerschnitt zum Zeitpunkt von  $F_{max}$  [N/mm<sup>2</sup>]

### Schubmodul $G_{xz}$ im Durchbruchsbereich

Wie in Kap. 2-4.1 beschrieben, wurde an den Trägern im Bereich des Durchbruches mit Hilfe von Messbrücken die Verzerrung eines vordefinierten Schubfeldes gemessen. Mit diesen Messdaten lässt sich unter Anwendung der in Kap. 2-7.1.2 angeführten Formeln auf den Schubmodul des Trägers schließen. Im Falle der ungestörten Träger der Referenzserie A entspricht der errechnete Wert dem Schubsteifigkeitsparameter des verwendeten Materials. Bei allen anderen Serien drückt der Wert den Schubmodul des Querschnittes im Durchbruchsbereich aus. Es lässt sich erkennen, dass der Schubmodul, und in direktem Zusammenhang damit die Schubsteifigkeit, bei dem unverstärkten Träger auf etwa ein Viertel der Referenzserie sinkt. Auffällig hierbei ist, dass mit den Verstärkungsmaßnahmen lediglich eine geringe Steigerung dieses Wertes möglich ist. Den höchsten Grad der Verbesserung erzielt dabei die Serie D, bei welcher das außen aufgeklebte Sperrholz im Winkel von 45° zur Trägerachse ausgerichtet war.

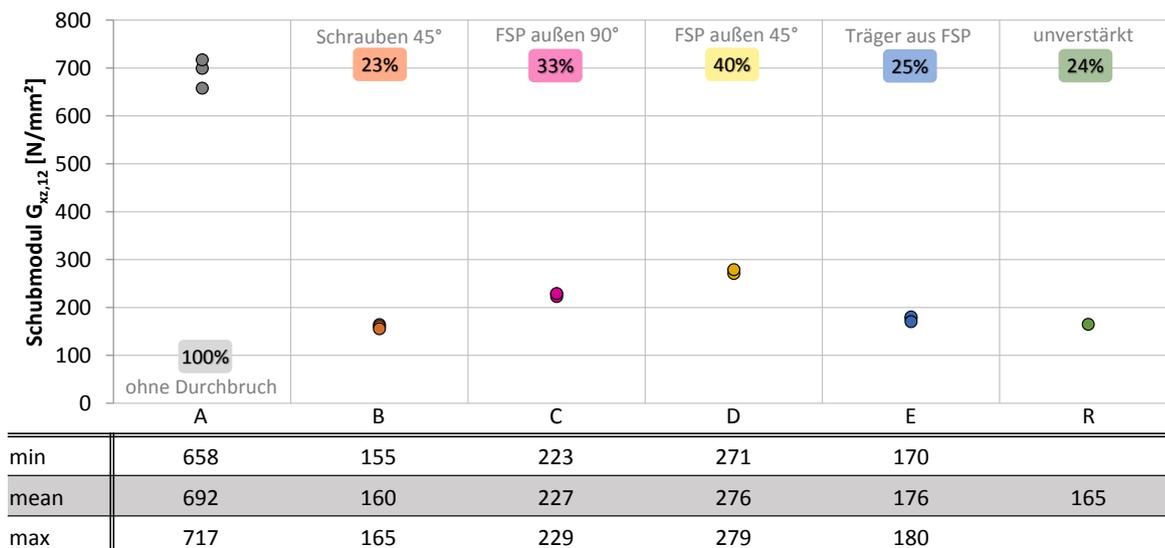


Abb. 3.7 Korrigierter Schubmodul  $G_{xz,12}$  im Durchbruchsbereich [N/mm<sup>2</sup>]

## **Bruchursache**

Im Zuge der Prüfdurchführung wurden bei den unterschiedlichen Versuchskörpern verschiedenen Bruchursachen festgestellt. Die häufigste Ursache stellte dabei das Biegeversagen im Nettoquerschnitt (Abkürzung NQ) des Durchbruchbereiches (Abkürzung DB) dar. Die zweithäufigste Bruchursache war Schubversagen. Dieses trat auf Höhe des unteren Risses am Durchbruch auf und reichte über das Auflager hinaus bis zum Trägerende. Die anfängliche Fehleinschätzung, welche zum Querdruckversagen bei Prüfkörper A2 zu einem Querdruckversagen am Krafteinleitungspunkt führte, wird in Kap. 2-3.1.1 erläutert. In Tab. 3.3 sind die Bruchlast und die Bruchursache jedes einzelnen Prüfkörpers angeführt.

**Tab. 3.3 Bruchursache jedes einzelnen Prüfkörpers**

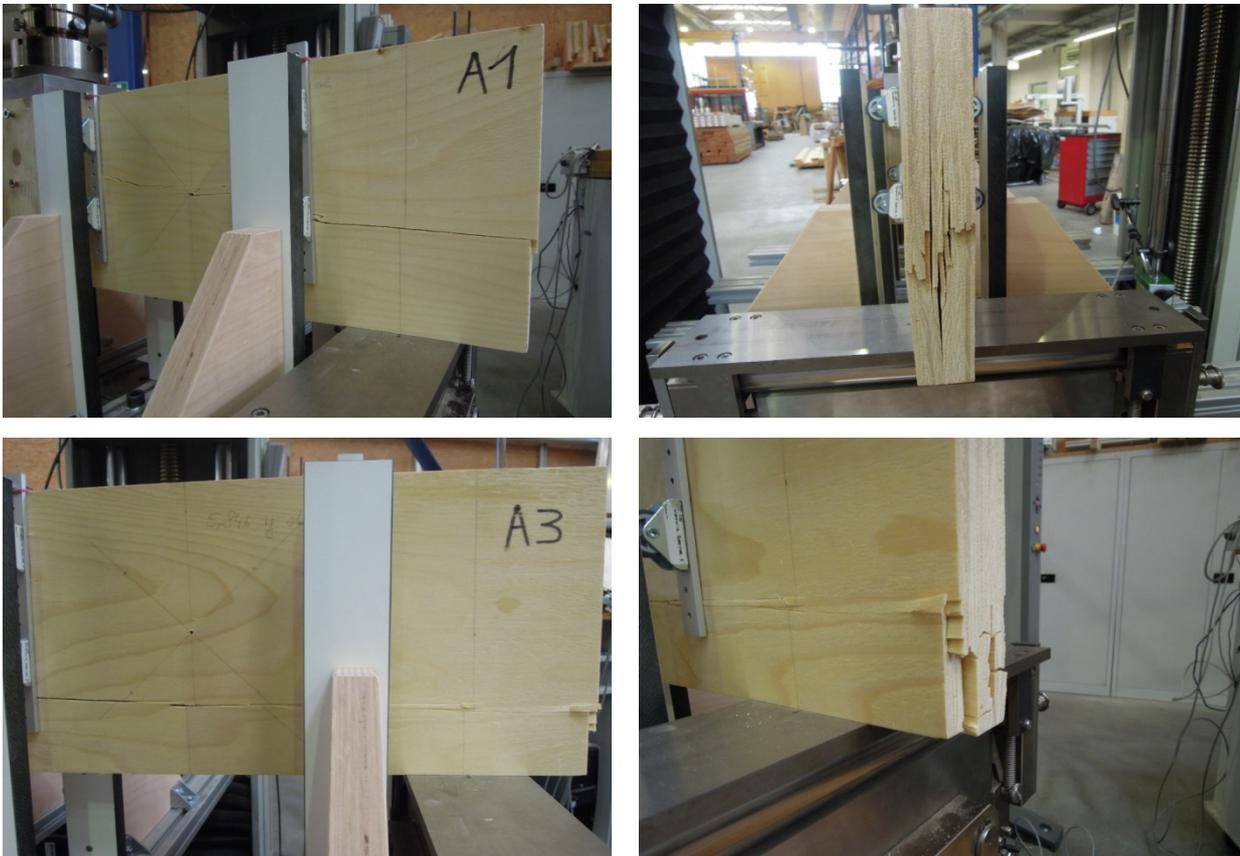
Prüfkörper	Fmax	Bruchursache
	[N]	
A1	109.885	Schubversagen
A2	61.094	Querdruck am Krafteinleitungspunkt
A3	117.939	Schubversagen
B1	73.495	Komb. aus Schubversagen und Biegeversagen am NQ in DB-Mitte
B2	70.913	Biegeversagen am NQ bei etwa 45°
B3	80.063	Biegeversagen am NQ bei etwa 45°
C1	79.307	Biegeversagen am NQ bei etwa 45°
C2	81.103	Biegeversagen am NQ bei etwa 45° gleichzeitig mit Schubversagen
C3	79.852	Biegeversagen am NQ in DB-Mitte
D1	83.192	Schubversagen
D2	68.872	Schubversagen
D3	71.995	Schubversagen
E1	78.274	Biegeversagen am NQ bei etwa 45°
E2	74.654	Biegeversagen am NQ bei etwa 45°
E3	75.308	Biegeversagen am NQ bei etwa 45°
R1	46.700	Schubversagen

Die starke Verschiedenheit aller getesteten Verstärkungsmaßnahmen (mit Ausnahme von Serie C und Serie D) resultiert im unterschiedlichen Verhalten der Träger bei Belastung und schlussendlich beim Bruch. Besonderheiten bei Steigerung der Last und die Versagensmerkmale wurden während der Versuchsdurchführung dokumentiert. Im Folgenden finden sich Abbildungen und Beschreibungen der einzelnen Serien, sowie Darstellungen der jeweiligen Kraft-Weg-Diagramme und eine Auflistung errechneter verstärkungsspezifischer Parameter.

### 3-2.1.2 Serie A

Bei der Serie A handelt es sich um die Referenzserie. Diese besitzt keine Durchbrüche und soll den Ausgangswert liefern, an welchem die Tragfähigkeit der verschiedenartig verstärkten Durchbrüche im Verhältnis zu einem ungestörten Träger bewertet wird. Bei den Versuchen der Serie A handelt es sich im Prinzip um einen Drei-Punkt-Biegeversuch nach dem Vorschlag von Gehri (2010) (siehe Kap. 2-4.1). Wie bereits erwähnt, kam es beim Belasten des ersten Versuchskörpers (A2) zu unerwartetem Querdruckversagen im Bereich der Krafteinleitung. Auch Bemühungen, dieses Versagen mit provisorischen querzugverstärkenden Schrauben in Feldmitte zu unterbinden, scheiterten. Da es so zu keinem Schubversagen kam, wurden vom Prüfkörper A2 lediglich die Messwerte des Schubfeldes mit einbezogen, welche im linear-elastischen Bereich aufgenommen wurden und so von der Versagensart unbeeinflusst sind.

Bei den zwei verbleibenden Prüfkörpern der Serie A kam es nach Verstärkungsmaßnahmen im Krafteinleitungsbereich zu dem angestrebten Schubbruch. Anzumerken gilt außerdem, dass es beim Eindrehen der Querdruckverstärkung an der durchbrochenen Trägerhälfte zu einem leichten Aufspalten des Trägers zwischen den Furnierlagen kam. In Abb. 3.8 ist der Schubbruch ersichtlich. Die Scherfuge, an welcher das Versagen auftrat, reichte von Feldmitte bis über das Auflager zum Trägerende.



*Abb. 3.8 Schubbruch bei Prüfkörper A1 (oben) sowie bei Prüfkörper A3 (unten)*

In Abb. 3.9 sind die Kraft-Weg-Diagramme der zwei aussagekräftigen Prüfkörper aus Serie A dargestellt. Aufgrund des Verlaufes der Kurve lässt sich erkennen, dass ein sprödes Versagen auftrat. Im Vergleich dazu ist hier noch die Arbeitslinie des Reserveträgers R1 eingefügt, an welchem ein unverstärkter Durchbruch getestet wurde. Die Versuchsbeschreibung des Reserveträgers findet sich in Kap. 0. Die Belastungsgeschwindigkeit lag bei den Prüfkörpern A1 und A3 bei  $1,5 \text{ mm/min}$ , bei R1 wurde eine Geschwindigkeit von  $1 \text{ mm/min}$  gewählt.

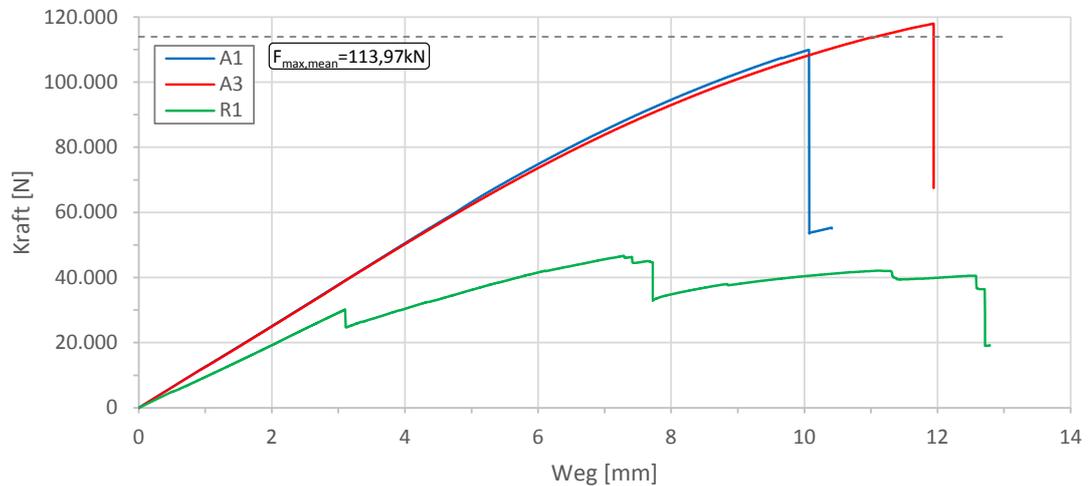


Abb. 3.9 Kraft-Weg-Diagramm der Serie A und dem Reserveträger

In Tab. 3.4 sind die erreichten Maximalkräfte aufgelistet. Für den Reserveträger sind zudem die Lastniveaus, an denen die ersten Risse am Durchbruchrand auftraten, angeführt. Bei Versuchskörper R1 fand die Rissbildung an beiden Durchbruchseiten gleichzeitig statt (siehe Abb. 3.9 erster Lastabfall).

Tab. 3.4 Bruchlasten mit dazugehörigen Verformungen von Serie A und dem Reserveprüfkörper R1, sowie Lastniveaus der Erstrissbildung

	A1	A3	mean	R1
$F_{\max}$ [kN]	109,95	117,98	113,97	46,70
$w(F_{\max})$ [mm]	10,07	11,94	11,00	7,29
$F_{\text{init,oben}}$ [kN]	-	-	-	30,21
$F_{\text{init,unten}}$ [kN]	-	-	-	30,21

Die berechneten Ergebnisse der Prüfsérie A sind in Tab. 3.5 zu finden. Der Vollständigkeit halber ist Prüfkörper A2 auch angeführt, von diesem wird jedoch nur der Wert des Schubmoduls, sowie der Rohdichte und der Holzfeuchtigkeit in die Gesamtauswertung mit einbezogen.

Tab. 3.5 Ergebnistabelle Serie A

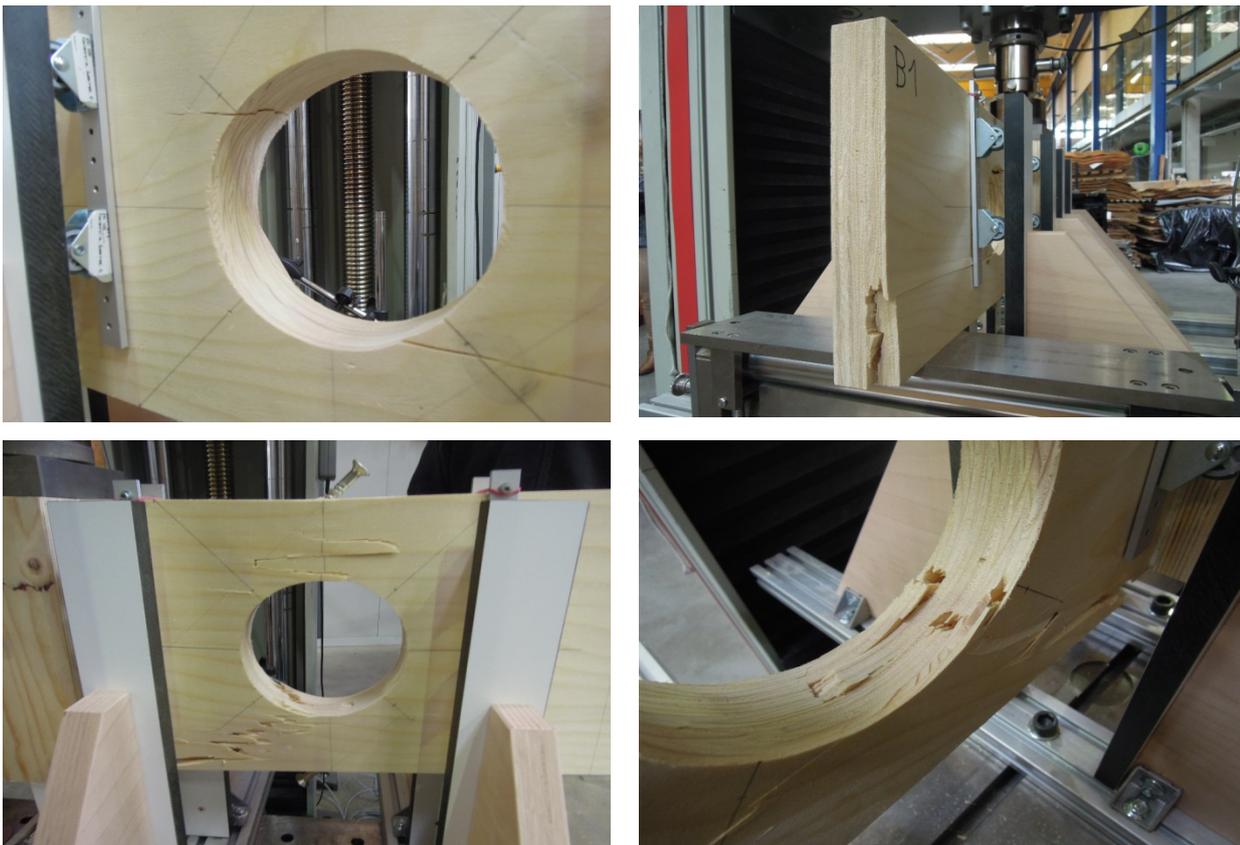
Serie A		Prüfkörper			min	mean	max	STABW	COV
		A1	A2	A3					
$\tau_{12}$		6,8	-	7,4	6,8	7,1	7,4	0,43	6,1%
$\sigma_{m,\text{Fel}}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	53,1	-	57,5	53,1	55,3	57,5	3,08	5,6%
$G_{xz,12}$		700	658	717	658	692	717	30	4,4%
$\rho_{12}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	448	446	446	446	447	448	1	0,2%
$u$	[%]	9,0%	8,5%	9,3%	8,5%	8,9%	9,3%	0,4%	4,8%

### 3-2.1.3 Serie B

Bei der Prüferserie B wurde der Durchbruch mit innenliegenden Vollgewindeschrauben verstärkt, welche im Winkel von  $45^\circ$  um den Durchbruch angeordnet waren (siehe Kap. 2-4.1). Diese sollen die am Durchbruchrand auftretenden Querkzugkräfte aufnehmen und ebenso die Schubkräfte um den Durchbruch herumführen. Die Belastungsgeschwindigkeit betrug bei der Prüferserie B  $1,5 \text{ mm/min}$ .

Im Laufe der Prüfdurchführung konnten am Durchbruchrand entstehende Querkzugrisse beobachtet werden, welche annähernd an der Stelle von etwa  $45^\circ$  ( $+180^\circ$ ) an der Kreisöffnung auftraten. Diese Risse verlängerten sich bei steigender Belastung, bis sie die Achse der innenliegenden Schraube erreichten. Dort wurde das weitere Risswachstum vorübergehend von der Verstärkungsschraube behindert, erst bei weiterer Laststeigerung setzte sich das Risswachstum bis über die Schraubenachse fort. Außerdem lässt sich eine leichte Verzerrung des Durchbruches selbst mit freiem Auge erkennen; er wird leicht oval. Dies lässt sich durch die verschiedenen Steifigkeitsverhältnisse zwischen schraubverstärktem Durchbruchrand und unverstärktem Durchbruchrand erklären.

Bei den Prüfkörpern B2 und B3 kam es im Bereich des Durchbruches zu einem Biegeversagen des Nettoquerschnittes. Dieser Bruch startete an der unteren Kante der Öffnung bei etwa  $45^\circ$  und zeigte in Richtung Feldmitte des Trägers. Auffällig ist dabei das Bruchbild (siehe Abb. 3.10 unten rechts). Dieses lässt vermuten, dass die Schraube in diesem Bereich zusätzliche Belastungen in dem Träger verursacht, da an den projizierten Flächen des Schraubendurchmessers der Trägerquerschnitt ausgerissen ist. Bei Versuchskörper B1 kam es zu einem kombinierten Versagen aus an der Hälfte der Trägerbreite und Biegung im Nettoquerschnitt des Durchbruches.



**Abb. 3.10** Querkzugrisse bei B3 (oben links), kombiniertes Versagen aus Schub und Biegung im Nettoquerschnitt bei B1 (oben rechts), Biegeversagen im Nettoquerschnitt bei B2 (unten)

In Abb. 3.11 ist das Kraft-Weg-Diagramm der drei Prüfkörper der Serie B dargestellt. Die entstehenden Querszugrisse am Durchbruchrand sind durch einen Kraftabfall in der Darstellung der Arbeitslinie kaum erkennbar, bei Betrachtung der numerischen Messwerte allerdings klar ersichtlich. In der Abbildung wird deutlich, dass nach einem linearen Kraftanstieg das Versagen spröde auftritt. Mit der waagrechten Linie wird der Mittelwert der Bruchlasten angezeigt.

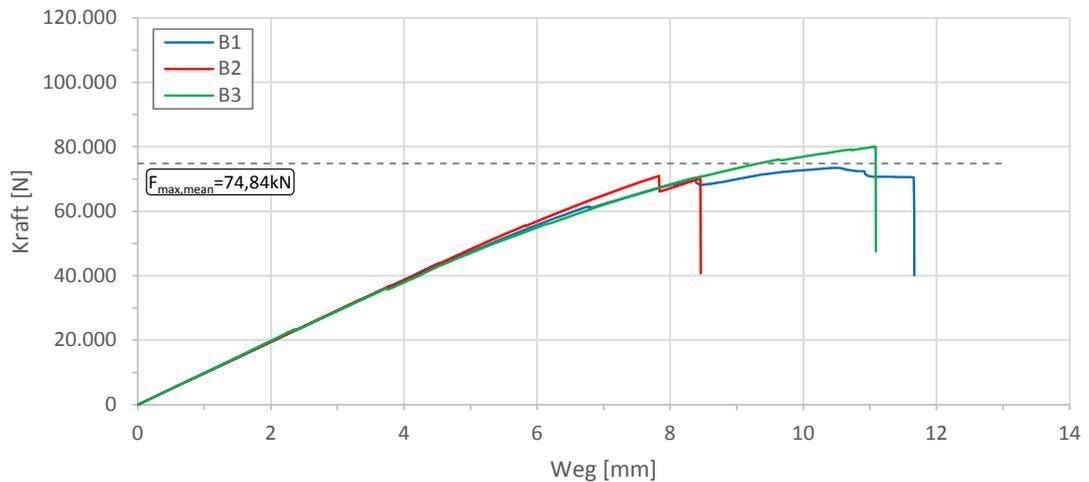


Abb. 3.11 Kraft-Weg-Diagramm der Serie B

In Tab. 3.6 sind die wichtigsten Eckdaten der Versuchsserie B aufgelistet. Dazu zählen neben der maximalen Prüflast und der Verformung zu diesem Zeitpunkt auch die Lastniveaus, an welchen am Durchbruchrand die Risse auftreten. Der erste Riss trat immer am oberen, der Feldmitte zugewandten Seite des Durchbruchrandes auf.

Tab. 3.6 Bruchlasten mit dazugehörigen Verformungen und Lastniveaus der Erstrissbildung von Prüfsrie B

	B1	B2	B3	mean
$F_{\max}$ [kN]	73,49	70,94	80,08	74,84
$w(F_{\max})$ [mm]	10,50	7,83	11,08	9,80
$F_{\text{init,oben}}$ [kN]	43,93	32,59	23,45	33,32
$F_{\text{init,unten}}$ [kN]	46,80	36,85	36,14	39,93

In Tab. 3.7 sind die für Serie B relevanten Berechnungsergebnisse ersichtlich. Interessant ist der Verlauf des Biegemomentes. Dieses ist aufgrund des Sekundärmomentes am Durchbruchrand bei 45° am größten.

Tab. 3.7 Ergebnistabelle Serie B

Serie B		Prüfkörper			min	mean	max	STABW	COV	
		B1	B2	B3						
$\tau_{12}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	4,72	4,37	5,08	4,4	4,7	5,1	0,36	7,5%	
$\tau_{DB,12}$		1,43	8,78	10,22	1,4	6,8	10,2	4,71	69,2%	
$F_{t,90}$	[N]	13.686	13.213	14.927	13.213	13.942	14.927	885	6,3%	
$\sigma_{m,\text{Feld}}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	36,28	34,43	39,66	34,4	36,8	39,7	2,65	7,2%	
$\sigma_{m,DB}$		19,92	18,91	21,79	18,9	20,2	21,8	1,46	7,2%	
$\sigma_{m,45^\circ}$		42,32	40,22	46,34	40,2	43,0	46,3	3,11	7,2%	
$\sigma_{m,\text{Rand}}$		33,67	31,99	36,85	32,0	34,2	36,9	2,47	7,2%	
$G_{xz,12}$			362	160	155	155	226	362	118	52,1%
$\rho_{12}$		[kg/m <sup>3</sup> ]	443	426	440	426	436	443	9	2,1%
u	[%]	9,8%	8,7%	9,2%	8,7%	9,2%	9,8%	0,5%	5,8%	

### 3-2.1.4 Serie C

Die Verstärkung der Durchbrüche bei Serie C erfolgte mit Hilfe von außen aufgeklebten Furniersperrholzplatten. Hierbei war die Decklagenorientierung um  $90^\circ$  zur Trägerachse gedreht. Diese Platten sollen die quer zur Faser auftretenden Kräfte im Bereich des Durchbruches aufnehmen. Hierfür ist eine Kraftumlagerung aus dem Träger in die Sperrholzplatten notwendig, welche über die Klebefuge erfolgen muss. Als Belastungsgeschwindigkeit wurde bei Prüfserie C wiederum  $1,5 \text{ mm/min}$  gewählt. Im Laufe der Versuchsführung kam es auch bei den Prüfkörpern der Serie C anfangs zu einem Aufreißen des Trägers am Durchbruchrand bei etwa  $45^\circ$  ( $+180^\circ$ ). Auffällig hierbei war allerdings, dass zunächst nur der Trägerquerschnitt den Riss aufwies, die Verstärkungsplatten hingegen unbeschädigt blieben. Bei weiterer Laststeigerung reichte der Riss jedoch letztendlich auch bis in die Verstärkungsplatten. Von der Stelle des Erstrisses am Durchbruchrand ausgehend breitete sich der Riss anschließend diagonal in einem Winkel von etwa  $35^\circ$ - $45^\circ$  zur Trägerober- und -unterseite aus. Als Versagensart trat schließlich bei den Versuchskörpern C1 und C2 ein Biegebruch im Nettoquerschnitt ein. Bei dem Versuchskörper C2 kam es zeitgleich außerdem zu einem Schubversagen, die Scherfuge lag dabei in etwa auf derselben Höhe, an welcher der Erstriss auftrat.



**Abb. 3.12** Erstrisse im Trägerquerschnitt bei C3 (oben links), Aufreißen der Verstärkungsplatten bei C1 (oben rechts), Schubversagen bei C2 mit gleichzeitigem Biegeversagen im Durchbruchsbereich (unten links) und Biegebruch im Nettoquerschnitt bei C3

In Abb. 3.13 ist das Kraft-Weg-Diagramm für die Prüfkörper der Serie C dargestellt. Auch bei der Methode, einen Durchbruch mit außen aufgeklebten Sperrholzplatten zu verstärken, tritt das Versagen spröde ein. Auffällig ist in dieser Versuchsreihe die geringe Streuung der Bruchlasten. Außerdem lässt sich in der Abbildung erkennen, dass in zwei von drei Fällen selbst nach dem Bruch noch eine gewisse Resttragfähigkeit vorhanden ist. Auch wenn die Messergebnisse nicht auf ein duktileres Versagen hindeuten, so kündigte sich der Bruch dennoch durch fortschreitendes Risswachstum in den Verstärkungsplatten an.

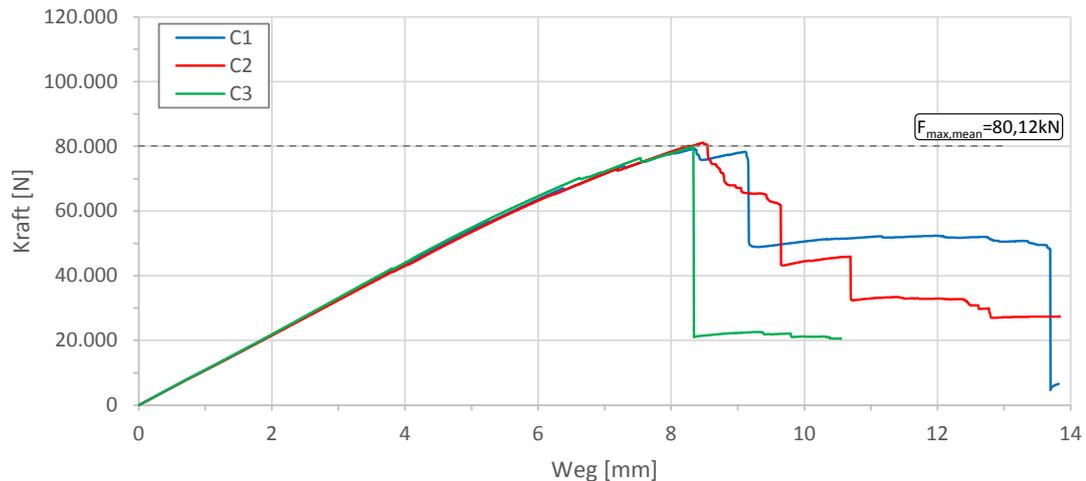


Abb. 3.13 Kraft-Weg-Diagramm der Serie C

In Tab. 3.8 sind wiederum die wesentlichen Messdaten aufgelistet. Im Falle von Prüfkörper C3 konnte das genaue Lastniveau der Erstrissbildung am oberen Durchbruchbereich während der Versuches nicht beobachtet werden. Selbst in den numerischen Messwerten konnte kein Lastabfall gefunden werden. Bei den anderen Prüfkörpern war der Lastabfall hingegen deutlich erkennbar.

Tab. 3.8 Bruchlasten mit dazugehörigen Verformungen und Lastniveaus der Erstrissbildung von Prüferserie C

	C1	C2	C3	mean
$F_{\max}$ [kN]	79,33	81,12	79,90	80,12
$w(F_{\max})$ [mm]	8,35	8,49	8,33	8,39
$F_{\text{init,oben}}$ [kN]	39,83	41,32	-	40,57
$F_{\text{init,unten}}$ [kN]	44,22	43,47	42,34	43,35

Die wichtigsten rechnerisch bestimmten Kenngrößen lassen sich Tab. 3.9 entnehmen. In diesem Fall werden speziell von der außen aufgeklebten Verstärkungsplatte abhängige Werte berechnet. So wird beispielsweise zur Bestimmung des Biegemomentes im Durchbruchbereich ein verbreiteter Querschnitt in Rechnung gestellt. Aus diesem Grund findet sich die maximale Biegespannung wiederum in Feldmitte anstelle des Nettoquerschnittes (siehe Serie B). Eine genaue Erklärung über die Definition der Bezeichnungen findet sich in Kap. 2-7.1.

Tab. 3.9 Ergebnistabelle Serie C

Serie C		Prüfkörper			min	mean	max	STABW	COV
		C1	C2	C3					
$\tau_{12}$		5,04	5,19	4,92	4,9	5,1	5,2	0,14	2,7%
$\tau_{\text{DB,Verb.,12}}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	7,44	7,66	7,28	7,3	7,5	7,7	0,19	2,6%
$\tau_{\text{ef}}$		0,84	0,86	0,85	0,8	0,9	0,9	0,01	1,3%
$F_{t,90}$	[N]	14.780	15.161	14.906	14.780	14.949	15.161	194	1,3%
$\sigma_{t,\text{FSP}}$		9,85	10,11	9,94	9,9	10,0	10,1	0,13	1,3%
$\sigma_{m,\text{Feld}}$		38,70	40,10	38,59	38,6	39,1	40,1	0,84	2,1%
$\sigma_{m,\text{DB,Verb.}}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	17,46	18,08	17,45	17,5	17,7	18,1	0,36	2,0%
$\sigma_{m,45^\circ,\text{Verb.}}$		37,12	38,55	37,18	37,1	37,6	38,5	0,81	2,1%
$\sigma_{m,\text{Rand,Verb}}$		29,52	30,61	29,54	29,5	29,9	30,6	0,62	2,1%
$G_{xz,12}$		229	223	229	223	227	229	4	1,6%
$\rho_{12}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	434	420	423	420	425	434	7	1,7%
$u$	[%]	9,9%	9,6%	8,9%	8,9%	9,5%	9,9%	0,5%	5,4%

### 3-2.1.5 Serie D

Die Prüfkörper der Serie D unterschieden sich äußerlich kaum von jenen der Serie C. Der einzige Unterschied war die Faserorientierung der außen aufgeklebten Sperrholzplatten, welche im Gegensatz zu Serie C nicht im Winkel von  $90^\circ$  zu Trägerachse, sondern mit einer Neigung von  $45^\circ$  zu Trägerachse angeordnet waren.

Die Belastung erfolgte bei Serie D wiederum mit einer Geschwindigkeit von  $1,5 \text{ mm/min}$ . Ähnlich wie bei allen bis dahin durchgeführten Versuchen kam es auch bei dieser Prüferserie zu einem Aufreißen des Holzes am Durchbruchrand. Der erste Riss konnte dabei stets am oberen Durchbruchrand im Winkel von etwa  $45^\circ$  an der zur Feldmitte zeigenden Seite der Öffnung beobachtet werden. Diagonal gegenüber am Lochdurchmesser trat bei weiterer Laststeigerung der nächste Riss auf. Ähnlich wie bei Serie C war der Riss bei Serie D anfänglich nur im Trägerquerschnitt zu erkennen. Die Verstärkungsplatten blieben zunächst unversehrt. Erst bei weiterer Laststeigerung reichten die Risse schließlich bis in die außen aufgeklebten Sperrholzplatten. Das Bruchbild war ebenso jenem aus Serie C sehr ähnlich, die Platten rissen in einem Winkel von etwa  $35^\circ$ - $45^\circ$  diagonal auf, bis es schlussendlich in einem Schubversagen endete. Die Scherfuge lag dabei in etwa auf der Höhe des Erstrisses am unteren Durchbruchrand. Da bei dem ersten Versagen die Prüflast zunächst nicht so stark abfiel, wurde noch weiter belastet, was einen Biegebruch des Nettoquerschnittes zur Folge hatte.



**Abb. 3.14** Erstrissbildung am oberen Durchbruchrand bei D1 (oben links), Aufreißen der Verstärkungsplatten im Winkel von  $45^\circ$  bei D1 (oben rechts), Schubversagen bis zum Trägerende bei D3 (unten links) und Biegeversagen im Nettoquerschnitt bei D2 bei Weiterbelastung des Prüfkörpers nach dem Schubbruch (unten rechts)

Eine Darstellung der Kraft-Weg-Diagramme von Prüferserie D findet sich in Abb. 3.15. Die waagrecht strichlierte Linie symbolisiert den Mittelwert der erreichten Bruchlasten. Es ist deutlich zu erkennen, dass nach dem Schubversagen eine gewisse Resttragkapazität vorhanden ist. Die Prüfkraft konnte nach dem Lastabfall nochmals gesteigert werden, bis es zu einem Biegeversagen im Durchbruchbereich kam.

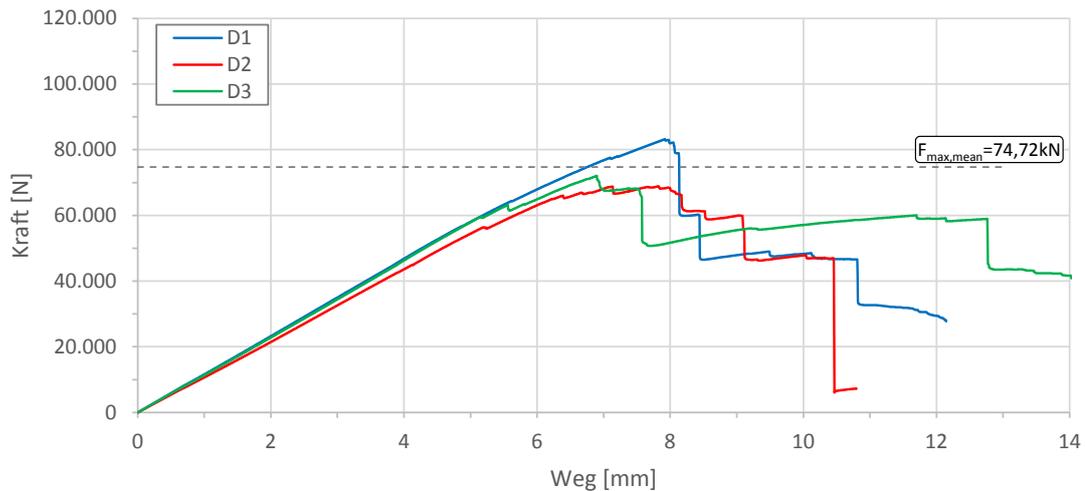


Abb. 3.15 Kraft-Weg-Diagramm der Serie D

In Tab. 3.10 sind wichtige Eckdaten aus Versuchsserie D aufgelistet. Auffällig ist hierbei, dass die Bruchlasten bei den drei Prüfkörper mehr streuen als bei Serie C. Wie bereits in Abb. 3.15 ersichtlich ist, wies der Prüfkörper D2 vor dem Bruch ein eher duktiler Verhalten auf. Dies resultiert in einer verhältnismäßig großen Verformung bei geringerer Last. Generell kann auch bei Prüferserie D nicht von einem duktilen Versagen gesprochen werden. Allerdings ließ sich der Bruchzeitpunkt aufgrund des Risswachstums in den Verstärkungsplatten bereits vorher erahnen.

Tab. 3.10 Bruchlasten mit dazugehörigen Verformungen und Lastniveaus der Erstrissbildung von Prüferserie D

	D1	D2	D3	mean
$F_{max}$ [kN]	83,23	68,88	72,05	74,72
$w(F_{max})$ [mm]	7,92	7,82	6,90	7,55
$F_{init,oben}$ [kN]	56,73	42,56	59,36	52,88
$F_{init,unten}$ [kN]	64,37	56,44	63,39	61,40

Auch bei Serie D werden dieselben Kenngrößen wie bei Serie C berechnet. Die Stärke der geneigten Sperrholzplatte wurde im Durchbruchbereich mit berücksichtigt (siehe Kap. 2-7.1.3). Die errechneten Werte sind in Tab. 3.11 aufgelistet.

Tab. 3.11 Ergebnistabelle Serie D

Serie D		Prüfkörper			min	mean	max	STABW	COV
		D1	D2	D3					
$\tau_{12}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	5,14	4,43	4,38	4,4	4,7	5,1	0,42	9,1%
$\tau_{DB,Verb.,12}$		7,59	6,50	6,44	6,4	6,8	7,6	0,65	9,5%
$\tau_{ef}$		0,88	0,73	0,76	0,7	0,8	0,9	0,08	10,4%
$F_{t,90}$	[N]	15.534	12.806	13.376	12.806	13.905	15.534	1.439	10,3%
$\sigma_{t,FSP}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	10,36	8,54	8,92	8,5	9,3	10,4	0,96	10,3%
$\sigma_{m,Feld}$		40,64	33,86	35,06	33,9	36,5	40,6	3,62	9,9%
$\sigma_{m,DB,Verb.}$		21,87	18,17	18,82	18,2	19,6	21,9	1,97	10,1%
$\sigma_{m,45^\circ,Verb.}$		46,58	38,56	39,91	38,6	41,7	46,6	4,30	10,3%
$\sigma_{m,Rand,Verb.}$		37,01	30,70	31,79	30,7	33,2	37,0	3,37	10,2%
$G_{xz,12}$		278	271	279	271	276	279	5	1,6%
$\rho_{12}$		[kg/m <sup>3</sup> ]	442	414	425	414	427	442	14
u	[%]	8,6%	10,1%	8,0%	8,0%	8,9%	10,1%	1,1%	11,9%

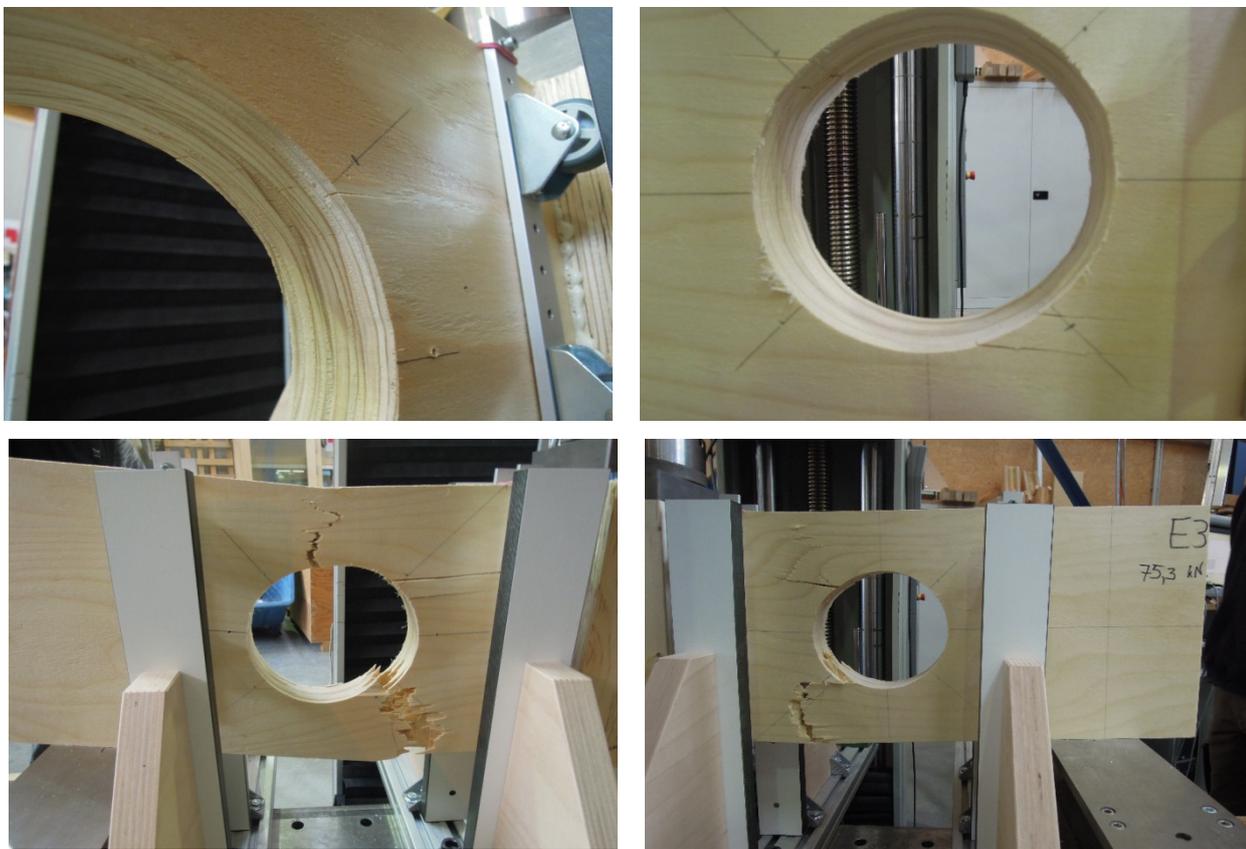
### 3-2.1.6 Serie E

Bei den Trägern der Serie E handelte es sich um Furniersperrholz, d.h. die Querkzugverstärkung im Bereich des Durchbruches sollte von den innen liegenden Querlagen aufgenommen werden. Somit wurde keine weiteren Verstärkungsmaßnahmen vorgenommen.

Die Versuche der Prüfserie E wurden wiederum mit einer Belastungsgeschwindigkeit von  $1,5 \text{ mm/min}$  durchgeführt.

Auch bei diesen Prüfkörpern kam es zunächst zu einer Rissbildung an den querkzugbeanspruchten Durchbruchsecken. Bei Serie E war jedoch auffällig, dass die Risse zunächst ausschließlich in den Längslagen auftraten, die drei innenliegenden Querlagen hingegen keine Risse aufwiesen.

Bei weiterer Laststeigerung kam es zu einem fortschreitenden Risswachstum, welcher an den Außenflächen des Träger erkennbar war. Da der Träger aufgrund der drei Querlagen nun nur mehr zehn Furnierschichten mit Faserorientierung in Längsrichtung besaß, war die Biegetragfähigkeit folglich geringer als bei den anderen Prüfserien. Aus diesem Grund kam es im Bereich des Durchbruches zu einem Biegeversagen des Nettoquerschnittes, noch bevor ein Schubversagen eintreten konnte.



**Abb. 3.16** Erstrissbildung ausschließlich in Längslagen bei E2 (oben links), weiteres Risswachstum am oberen und unteren Durchbruchrand bei E1 (oben rechts), Biegeversagen im Nettoquerschnitt des Durchbruches bei E1 (unten links) und E3 (unten rechts) an der zur Feldmitte zeigenden Durchbruchseite

In Abb. 3.17 ist das Kraft-Weg-Diagramm der Prüfserie E dargestellt. Die waagrechte Linie stellt das Niveau des Mittelwertes der drei Bruchlasten dar. Das Versagen trat spröde und ohne große Vorankündigung auf. Nach dem Bruch war keine Resttragkapazität im Träger vorhanden; der Versuch wurde deshalb nicht weitergeführt.

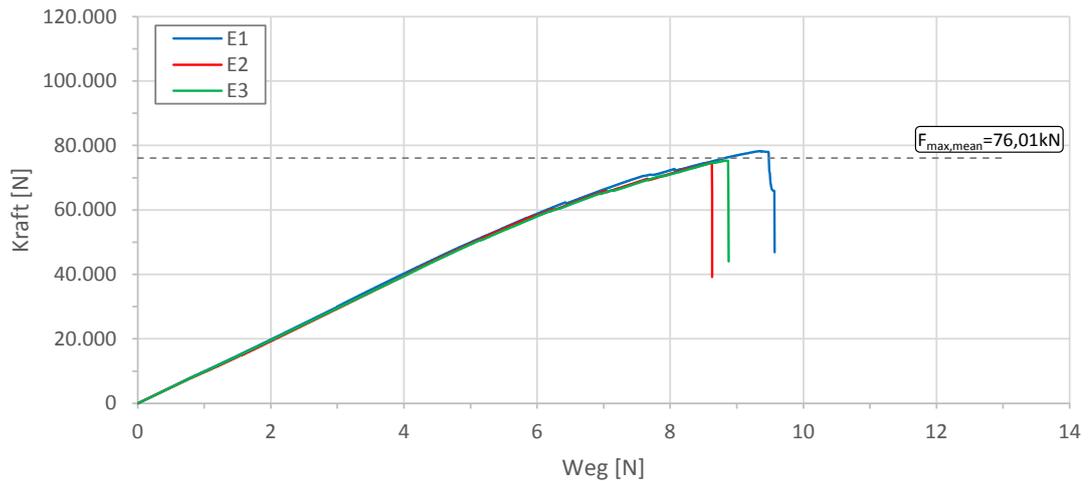


Abb. 3.17 Kraft-Weg-Diagramm der Serie E

In Tab. 3.12 finden sich die wichtigsten Eckdaten zu Prüfserie E. Es liegt eine verhältnismäßig geringe Streuung der Messergebnisse vor.

Tab. 3.12 Bruchlasten mit dazugehörigen Verformungen und Lastniveaus der Erstrissbildung von Prüfserie E

	E1	E2	E3	mean
$F_{\max}$ [kN]	78,28	74,69	75,32	76,10
$w(F_{\max})$ [mm]	9,34	8,62	8,87	8,95
$F_{\text{init,oben}}$ [kN]	52,12	46,03	49,39	49,18
$F_{\text{init,unten}}$ [kN]	57,56	52,62	50,63	53,60

Im Falle der aus Furniersperrholz bestehenden Serie E werden gewisse Rechenwerte lediglich auf die Querschnittsfläche der Längslagen, andere wiederum auf die Fläche der Querlagen bezogen. In Tab. 3.13 findet sich ein Überblick hierüber. Eine Erklärung zu den durchgeführten Berechnungen ist in Kap. 2-7.1 gegeben.

Tab. 3.13 Ergebnistabelle Serie E

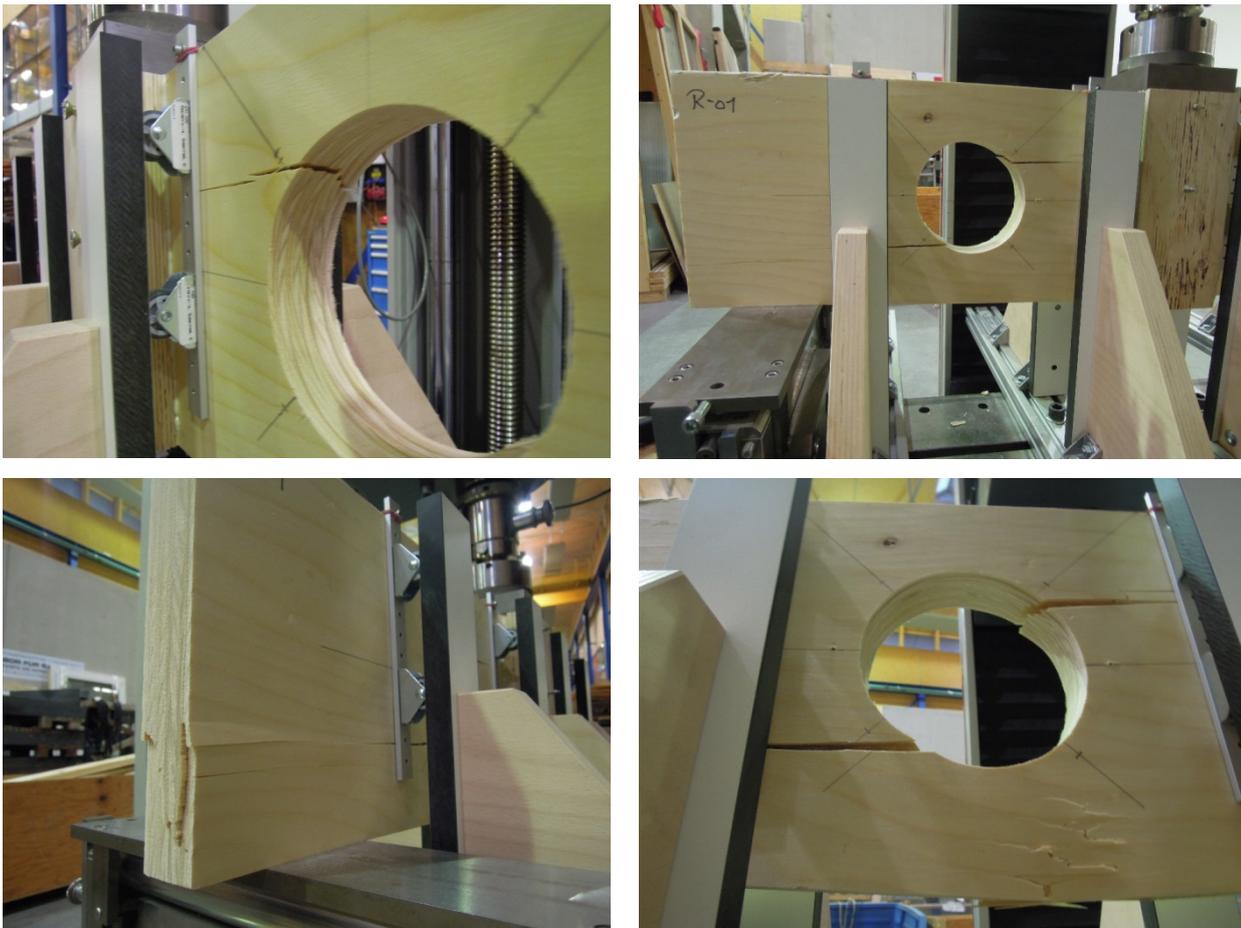
Serie E		Prüfkörper			min	mean	max	STABW	COV
		E1	E2	E3					
$\tau_{12}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	4,81	4,60	4,58	4,6	4,7	4,8	0,13	2,8%
$\tau_{DB,12}$		9,68	9,24	9,22	9,2	9,4	9,7	0,26	2,8%
$F_{t,90}$	[N]	14.596	13.921	14.051	13.921	14.189	14.596	358	2,5%
$\sigma_{t,90,QL,max}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	17,74	16,93	17,08	16,9	17,2	17,7	0,43	2,5%
$\sigma_{t,90,QL,o,cr}$		11,81	10,44	11,20	10,4	11,2	11,8	0,69	6,2%
$\sigma_{t,90,QL,u,cr}$		12,62	11,54	11,10	11,1	11,8	12,6	0,78	6,6%
$\sigma_{m,Feld,LL}$		48,32	46,16	46,18	46,2	46,9	48,3	1,24	2,6%
$\sigma_{m,DB,LL}$		26,55	25,36	25,38	25,4	25,8	26,5	0,68	2,6%
$\sigma_{m,45°,LL}$		56,48	53,96	54,02	54,0	54,8	56,5	1,44	2,6%
$\sigma_{m,Rand,LL}$		44,91	42,90	42,94	42,9	43,6	44,9	1,15	2,6%
$G_{xz,12}$		177	180	170	170	176	180	5	2,8%
$\rho_{12}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	450	453	448	448	450	453	3	0,6%
u	[%]	8,8%	8,8%	8,5%	8,5%	8,7%	8,8%	0,1%	1,6%

### 3-2.1.7 Reserveträger

Der Reserveträger mit der Bezeichnung R1 wurde unverstärkt geprüft. Dieser Versuchskörper wurde mit einer Belastungsgeschwindigkeit von  $1\text{ mm/min}$  geprüft.

Bei Belastung kam es am Durchbruchrand sowohl oben als auch unten gleichzeitig zu einem plötzlichen Aufreißen des Holzes. Diese Risse wurden mit steigender Last immer größer, bis der Träger auf Schub versagte. Die Scherfuge ging dabei vom Riss am unteren Durchbruchrand aus. Nach dem Schubbruch wurde noch weiter belastet, anschließend kam es noch zu einem Biegeversagen im Nettoquerschnitt. Das Kraft-Weg-Diagramm sowie die Maximal- und Erstrisslast des Prüfkörpers R1 sind in Kap. 3-2.1.2 der Referenzserie gegenübergestellt.

In Abb. 3.18 sind Fotos der Risspositionen und die Versagensart dargestellt.



**Abb. 3.18** Rissbildung bei Prüfkörper R1 (oben), Schubversagen auf Höhe des unteren Risses (unten links) und Biegeversagen im Nettoquerschnitt nach Weiterbelastung (unten rechts)

Die für den Reserveträger errechneten Ergebnisse sind in Tab. 3.14 zu finden.

Tab. 3.14 Ergebnistabelle Reserveprüfkörper R1

Serie R		R1	
$\tau_{12}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	2,98	
$\tau_{DB,12}$		5,98	
$F_{t,90}$	[N]	8.697	
$\sigma_{t,90,max}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	2,30	
$\sigma_{t,90,o,cr}$		1,49	
$\sigma_{t,90,u,cr}$		1,44	
$\sigma_{m,Feld}$		22,75	
$\sigma_{m,DB}$		12,49	
$\sigma_{m,45^\circ}$		26,54	
$\sigma_{m,Rand}$		21,12	
$G_{xz,12}$		165	
$\rho_{12}$		[kg/m <sup>3</sup> ]	465
u		[%]	10,1%

### 3-2.2 SCHERVERSUCHE 14°

Wie bereits mehrmals erwähnt, wurden aus den unbeschädigten Teilen der Biegeprüfungen erneut Prüfkörper zur Durchführung von Scherversuchen gewonnen. Diese wurden wiederum in zwei Serien eingeteilt: Prüfkörper aus Furnierschichtholz und Prüfkörper aus Furniersperrholz. Einzelheiten zu den Bruchcharakteristiken werden im Folgenden beschrieben.

#### 3-2.2.1 Furnierschichtholz

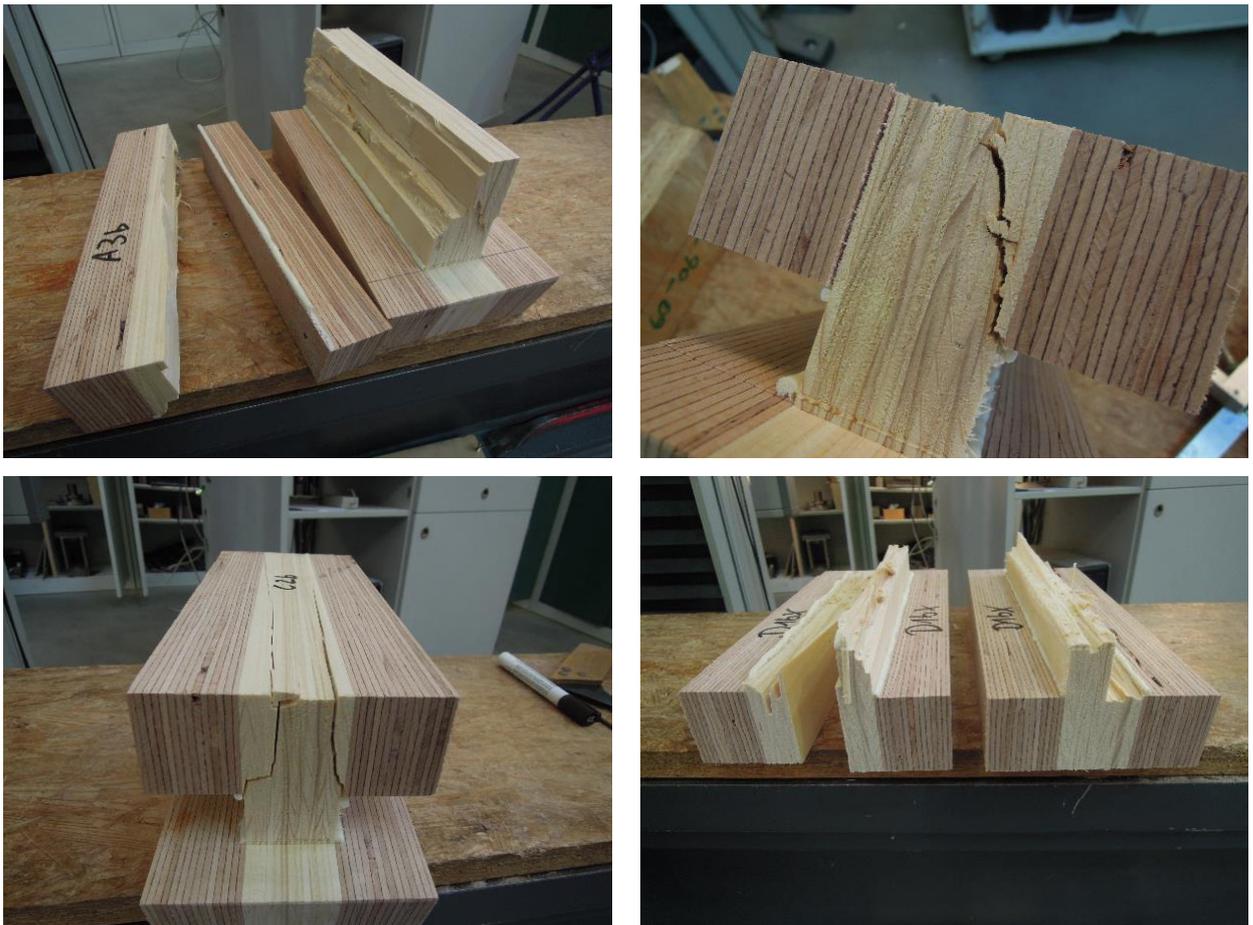
Insgesamt wurden 26 Prüfkörper für Scherversuche aus den Biegeprüfkörpern gewonnen. Davon wurden zwei, nämlich die Prüfkörper A2a und A2b, aussortiert, da sie durch die Biegeversuche bereits zu stark beschädigt waren. Übrig blieben 24 zum größten Teil unbeschädigte Prüfkörper. Lediglich drei wiesen kleine Risse zwischen den Furnierlagen auf, welche noch zusätzlich mit einem „X“ gekennzeichnet wurden (A1aX, A1bX und D1bX).

Die Scherprüfungen wurden weggrößengesteuert mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 0,7 mm/min durchgeführt. Es gab im Allgemeinen keine duktile Versagensankündigung. Es konnten bei steigender Last lediglich leichte Knackgeräusche wahrgenommen werden. In den meisten Fällen kam es bei Erreichen der Höchstlast zu einem spröden Schubversagen in der dafür vorgesehenen Schubfuge. Manche Probekörper zerbrachen selbstständig in zwei Teile. Die anderen wurden, sofern möglich, unter leichter Kraftaufwendung mit Hilfe eines Brecheisens in zwei Hälften getrennt, um den Bruch besser untersuchen zu können. Exemplarisch sind in Abb. 3.19 einige Probekörper dargestellt.



**Abb. 3.19** Scherbrüche bei den Prüfkörpern A1bX (oben links), B1b (oben rechts), C1b (unten rechts) und den nicht trennbaren B3b (unten links)

Bei einigen Versuchskörpern kam es nicht zu einem Schubversagen in der vorgesehenen Scherfuge. Dabei wurde Klebstoffversagen, sei es an den aufgeklebten Verstärkungslaschen als auch zwischen den Furnierlagen des Prüfkörpers selbst, beobachtet. Die Messdaten aus diesen Versuchen wurden für die Auswertung nicht berücksichtigt und flossen nicht in die Bestimmung des Schubfestigkeitswertes mit ein. Einige der nicht gewünschten Versagensarten sind in Abb. 3.20 dargestellt. Dies führte dazu, dass für die Auswertung Messdaten von 19 aussagekräftigen Versuchen zur Verfügung standen.



*Abb. 3.20 Versagen der Klebefuge zur Krafteinleitungslasche bei A3b (oben links), Abscheren des Holzes in Längsrichtung bei B1a (oben rechts) und C2b (unten links), Versagen der Klebefuge zwischen den Furnieren bei D1bX (unten links)*

In Tab. 3.15 sind die Werte der erreichten Maximalkraft aller Prüfkörper aus Furnierschichtholz ersichtlich. Darüber hinaus ist mittels Glg. (2.24) die zum Zeitpunkt des Bruches herrschende Schubspannung, also die Schubfestigkeit des Prüfkörpers berechnet, sowie der korrigierte Wert aufgrund des Holzfeuchteunterschiedes angegeben. Der Schubmodul errechnet sich laut Glg. (2.25). Wesentlichen Einfluss auf diesen Wert hat dabei die Breite des für die Berechnung der Verzerrung angesetzten Schubfeldes. Mit dem Wegaufnehmer wurde die Relativverschiebung der Krafteinleitungslaschen zueinander mit Hilfe eines L-Winkels ermittelt. Da es nicht möglich war, die Messung exakt an den Grenzen des Schubfeldes (Abstand der Messpunkte entspräche in diesem Fall der Breite der Scherfuge von 30 mm) durchzuführen, wurde das Messsystem etwas nach außen hin versetzt montiert, was in einem Abstand der Messpunkte zueinander von 50 mm resultierte.

Wäre der mit den Laschen verstärkte Teil der Krafteinleitung unendlich schubsteif, so würden in diesem Bereich keine Verformungen auftreten. Folglich wären alle gemessenen Verschiebungen der Breite der Scherfuge zuzuordnen. Hätten die Laschen hingegen keine Steigerung der Schubsteifigkeit des eigentlichen Prüfkörpers zur Folge, so wäre für die Berechnung der Verzerrung der tatsächliche Abstand der Messpunkte anzusetzen. Da im vorliegenden Fall keiner der beiden Grenzfälle zutrifft, muss davon ausgegangen werden, dass sich in Wirklichkeit ein Zustand zwischen den Extremen einstellt. Aus diesem Grund eignet sich der gewählte Versuchsaufbau nicht, um den Schubmodul zu ermitteln. Um trotzdem einen groben Überblick zu liefern, in welchem Spektrum die Steifigkeit zu erwarten ist, werden in Tab. 3.15 die Schubmodule beider Grenzfälle aufgelistet und aufgrund ihrer Holzfeuchte korrigiert. Es gilt anzumerken, dass diese Werte im Zusammenhang mit den Scherprüfungen ermittelt wurden, die Versuche jedoch nicht prinzipiell auf die Bestimmung des Schubmodules ausgelegt waren. Das größere Interesse galt der Ermittlung der Schubfestigkeit.

In Tab. 3.15 findet sich nun ein Überblick über die errechneten Werte. Die Kenngrößen der Prüfkörper, welche gelb hinterlegt sind, stammen nicht vom Versagensmodus Schubbruch. Diese sind hier nur der Vollständigkeit halber mit angeführt, wurden allerdings für die statistische Auswertung im unteren Bereich der Tabelle nicht mitberücksichtigt.

Die korrigierte Schubfestigkeit der Prüferserie lag im Mittel bei  $\tau_{max,12,mean} = 7,40\text{N/mm}^2$  und damit verhältnismäßig hoch. Die Streuung war hingegen mit lediglich 4% erstaunlich gering. Dies lässt sich vermutlich damit erklären, dass alle Prüfkörper aus dem Holz eines einzigen Stammes gefertigt waren. Außerdem ist aufgrund der dünnen Schichtstärke der Einzelfurniere ein starker Homogenisierungseffekt zu erwarten.

Tab. 3.15 Bruchlast, Schubfestigkeit und Schubmodul der Probekörper aus Furnierschichtholz

	$F_{max}$ [N]	$\tau_{max}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\tau_{max,12}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$G_{x=30}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$G_{x=30,12}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$G_{x=50}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$G_{x=50,12}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
A1aX	93.737	7,97	7,44	277	259	462	432
A1bX	90.872	7,86	7,33	272	254	454	423
A3a	96.799	8,41	7,83	294	274	490	456
A3b	85.317	7,37	6,95	239	226	398	376
B1a	84.256	7,37	6,99	228	216	380	360
B1b	92.315	8,04	7,63	263	250	439	417
B2a	89.389	7,78	7,20	277	256	461	427
B2b	94.218	8,14	7,55	275	256	459	426
B3a	86.649	7,63	7,19	249	234	414	390
B3b	91.187	7,89	7,38	239	224	399	373
C1a	94.201	8,13	7,77	296	283	494	472
C1b	93.123	8,07	7,66	273	259	455	431
C2a	86.562	7,59	7,19	225	213	375	355
C2b	88.704	7,69	7,28	260	246	434	411
C3a	98.344	8,37	7,81	303	283	505	471
C3b	92.745	7,90	7,34	302	280	503	467
D1a	82.225	7,05	6,56	245	228	408	380
D1bX	78.681	6,74	6,27	223	207	371	345
D2a	90.037	7,91	7,58	234	225	391	374
D2b	90.636	7,98	7,69	266	256	443	427
D3a	85.740	7,41	6,84	258	238	430	397
D3b	84.411	7,33	6,77	246	227	410	378
R1a	89.892	7,70	7,38	298	286	497	461
R1b	84.807	7,28	7,00	276	266	461	426
min	84.411	7,28	6,77	225	213	375	355
mean	90.825	7,86	7,40	270	254	450	421
max	98.344	8,41	7,83	303	286	505	472
5%-Q. log.NV	82.349	7,13	6,71	226	213	377	356
STABW	3.925	0,32	0,31	23	22	39	35
COV	0,04	0,04	0,04	0,09	0,09	0,09	0,08

In Abb. 3.21 sind die Arbeitslinien der für die Auswertung relevanten Prüfkörper aus Furnierschichtholz dargestellt. Es lässt sich erkennen, dass die Kurve in allen Fällen nach einem anfänglichen linear-elastischen Bereich leicht abfällt und schließlich in einem spröden Schubbruch endet. In wenigen Fällen besaßen einige Prüfkörper eine begrenzte Resttragfähigkeit, welche allerdings nicht mit einer erneuten Laststeigerung verbunden war, sondern lediglich etwas höhere Verformungen nach dem ersten Lastabfall ermöglichten. Der Mittelwert aller Maximallasten lag bei  $F_{max,mean} = 90,8\text{ kN}$ .

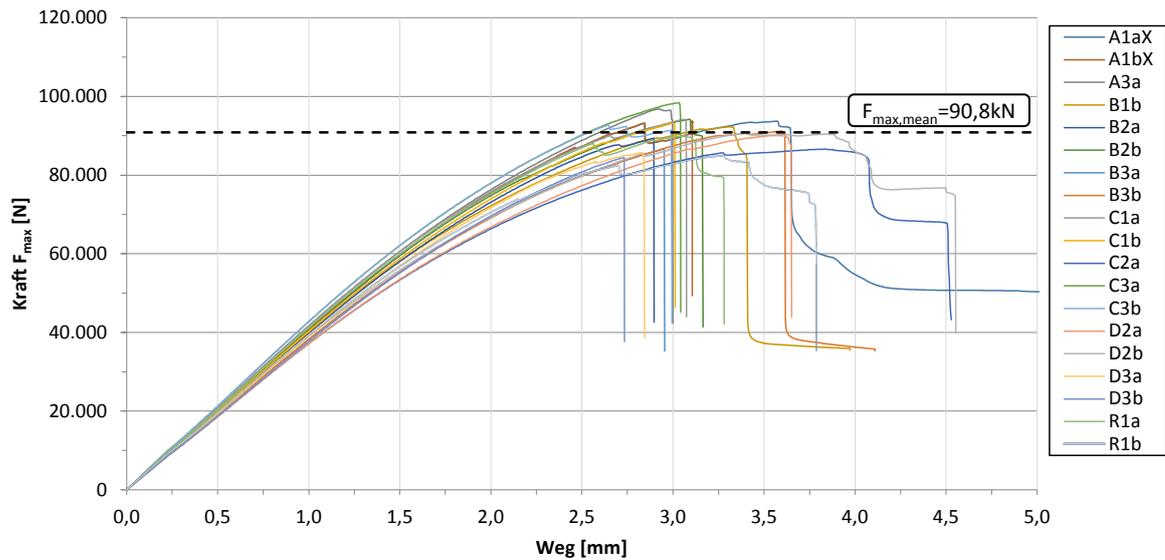
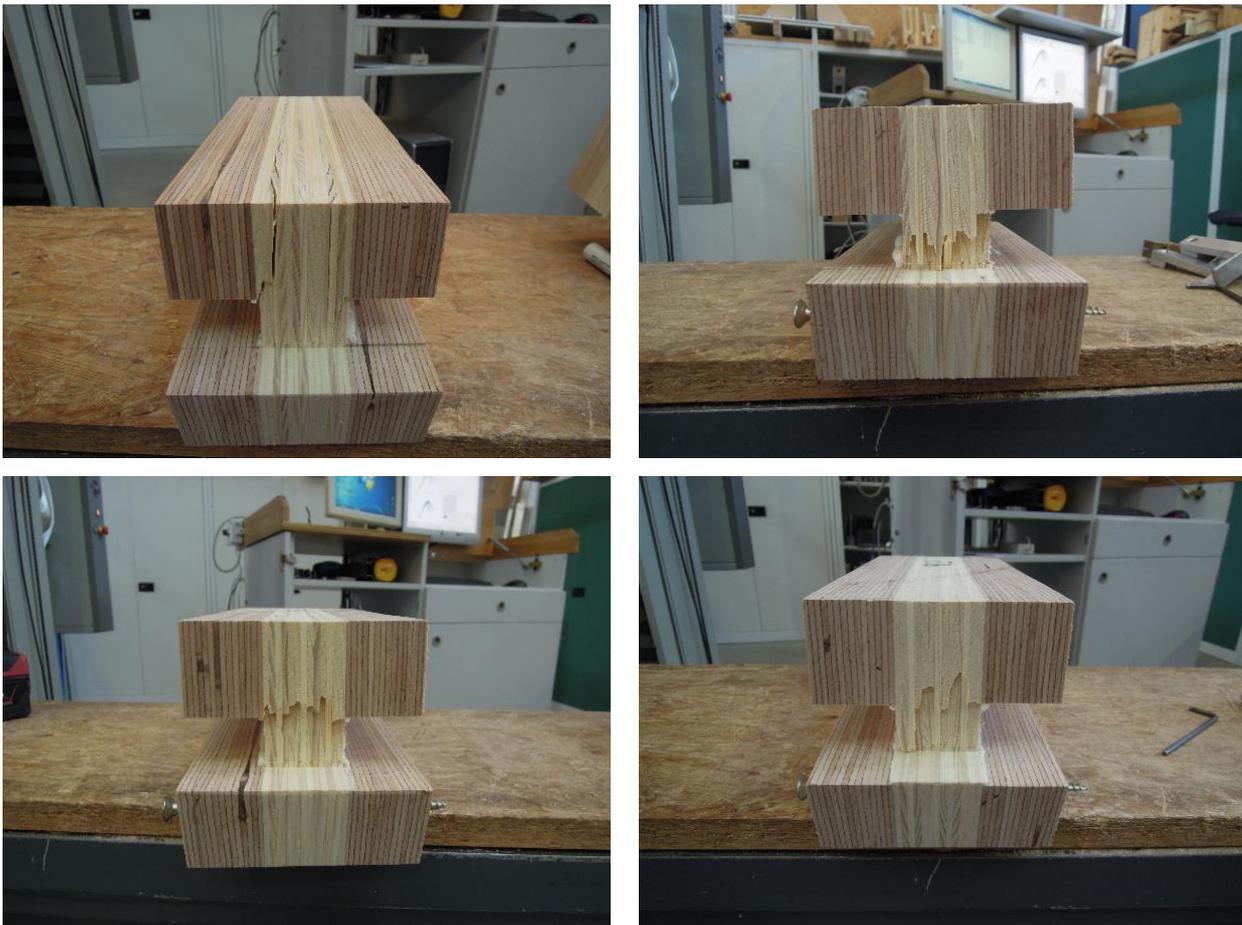


Abb. 3.21 Kraft-Weg-Diagramm der Probekörper aus Furnierschichtholz

### 3-2.2.2 Furniersperrholz

Aus den drei Trägern der Prüfserie E konnten insgesamt 6 Versuchskörper für die Scherprüfung gewonnen werden. Diese Serie bestand aus Furniersperrholz mit drei innenliegenden Querlagen. Auch in diesem Fall wurden die Versuche mit einer Belastungsgeschwindigkeit von  $0,7 \text{ mm/min}$  durchgeführt. Beim ersten Prüfkörper dieser Art kam es in den Querlagen im Bereich der Krafteinleitung zu einem Rollschubversagen (siehe Abb. 3.22 oben links). Um dem entgegen zu wirken, wurden alle weiteren Prüfkörper mit diagonal über Kreuz angeordneten Schrauben, welche im Winkel von  $45^\circ$  durch beide Krafteinleitungslaschen und den Prüfkörper reichten, verstärkt. Dadurch kam es zwar dennoch zum Auftreten von kleinen Rollschubrissen, anschließend zeigten die Schrauben jedoch ihre Wirkung und es konnte wiederum ein Schubbruch in der vorgesehenen Scherfuge erzielt werden. Die Versagensart war deutlich duktiler gegenüber den Versuchskörpern aus Furnierschichtholz. Die innen angeordneten Querlagen verhindern ein sprödes Schubversagen. Sie erfuhren eine Biegebeanspruchung und bewirkten selbst nach Erreichen der Höchstlast eine gewisse Resttragfähigkeit, begründet auf einem Einhängeeffekt der Querlagen in der Klebefuge. Deshalb war es auch nicht möglich, die Probekörper in zwei Teile zu teilen und die Scherfläche genauer zu untersuchen.



**Abb. 3.22** Rollschubversagen bei E1a (oben links), Schubbruch mit erkennbarem „Einhängen“ der Querlagen bei E2a (oben rechts), E2b (unten links) und E3b (unten rechts)

In Tab. 3.16 sind die Ergebnisse der Auswertung für die Prüferserie aus Furniersperrholz dargestellt. Da es bei dem Prüfkörper E1a zu Rollschubversagen anstelle eines Schubbruches kam, wurde dieser nicht für die statistische Auswertung mitberücksichtigt.

Für die in der Tabelle angeführten Schubmodule gelten dieselben Erklärungen wie bei der Prüferserie aus Furnierschichtholz. Die Werte stellen lediglich die Grenzwerte dar und sind somit nicht als tatsächliche Kenngrößen, sondern vielmehr als eingrenzende Richtwerte zu verstehen.

Die Streuung der Messergebnisse war auch bei den Prüfkörpern aus Furniersperrholz sehr gering und lag bei 4%. Die korrigierten Werte der Schubfestigkeit lagen etwas unterhalb der Serie aus Furnierschichtholz. Dies liegt daran, dass bei Serie E die Holzfeuchtigkeit deutlich unter dem Mittelwert der gesamten Prüfkörper lag (siehe Abb. 3.3), und somit die Korrektur aufgrund des Feuchteunterschiedes einen großen Einfluss hatte, auch wenn die direkt aus den Messergebnissen ermittelten Werte im Mittel etwas höher lagen. Die korrigierte Schubfestigkeit betrug demnach  $\tau_{max,12,mean} = 7,3N/mm^2$ .

Tab. 3.16 Bruchlast, Schubfestigkeit und Schubmodul der Probekörper aus Furniersperrholz

	$F_{\max}$ [N]	$\tau_{\max}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\tau_{\max,12}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$G_{x=30}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$G_{x=30,12}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$G_{x=50}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$G_{x=50,12}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
E1a	101.017	8,66	8,02	290	269	484	448
E1b	90.909	7,75	7,17	266	246	444	410
E2a	91.210	7,85	7,27	288	267	480	444
E2b	100.249	8,50	7,82	303	279	505	464
E3a	91.158	7,71	7,11	277	256	462	426
E3b	90.371	7,66	7,07	283	261	472	435
min	90.371	7,66	7,07	266	246	444	410
mean	92.779	7,89	7,29	283	262	472	436
max	100.249	8,50	7,82	303	279	505	464
5%-Q-log.NV	81.963	6,97	6,44	250	231	417	385
STABW	4.189	0,35	0,31	14	12	23	20
COV	0,05	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05

In Abb. 3.23 sind die Arbeitslinien aller für die Auswertung relevanten Prüfkörper aus Furniersperrholz im Kraft-Weg-Diagramm dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass das Versagen eher duktil erfolgte und zum Teil die Prüfkörper eine relativ hohe Resttragfähigkeit aufweisen. Der Prüfkörper E2b wies eine auffällig hohe Bruchlast von knapp über 100 kN auf, die restlichen Prüfkörper versagten bereits im Bereich bei etwa 91 kN.

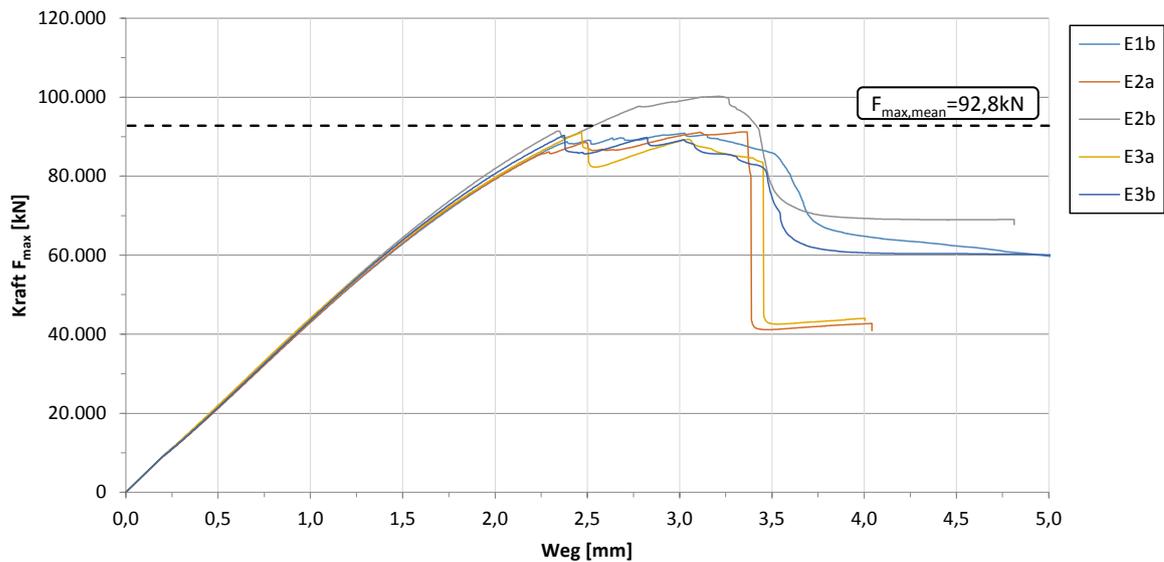


Abb. 3.23 Kraft-Weg-Diagramm der Probekörper aus Furniersperrholz

## KAPITEL 4: DISKUSSION

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der durchgeführten Versuchsreihen diskutiert und miteinander verglichen. Da sich die einzelnen Prüfserien in der Art ihrer Verstärkung stark unterscheiden, wird versucht, sie in vergleichbare Kategorien einzuteilen. Somit wird neben der Referenzserie und dem unverstärkten Reserveträger im Folgenden zwischen innenliegenden Verstärkungsmaßnahmen (Schrauben bei Serie B und Querlagen bei Serie E) und außenliegenden Verstärkungen (Sperrholzplatten bei Serie C und D) unterschieden.

### 4-1 DURCHBRUCHVERSUCHE

Die vorliegende Arbeit befasst sich bekanntlich mit dem Thema von Durchbrüchen in Furnierschicht- und Furniersperrholz. Hierfür wurden in einer umfassenden Literaturrecherche unterschiedliche Verstärkungsmethoden von Durchbrüchen ersichtlich, welche zum Teil in Normen verankert sind, zum Teil aber nur in Forschungsberichten untersucht werden. Generell lässt sich feststellen, dass Durchbruchverstärkungen als Forschungsthema hauptsächlich Träger aus Brettschichtholz behandelt, und sich verhältnismäßig wenige Veröffentlichungen dem Thema der Durchbrüche in Furnierwerkstoffen widmen. So war es das Ziel dieser Arbeit, eine Reihe von verschiedenen Methoden zur Verstärkung von Trägern aus Furnierschichtholz zu untersuchen. Die Gründe für die Wahl der verwendeten Verstärkungsarten sind in Kap. 2-4.1 diskutiert.

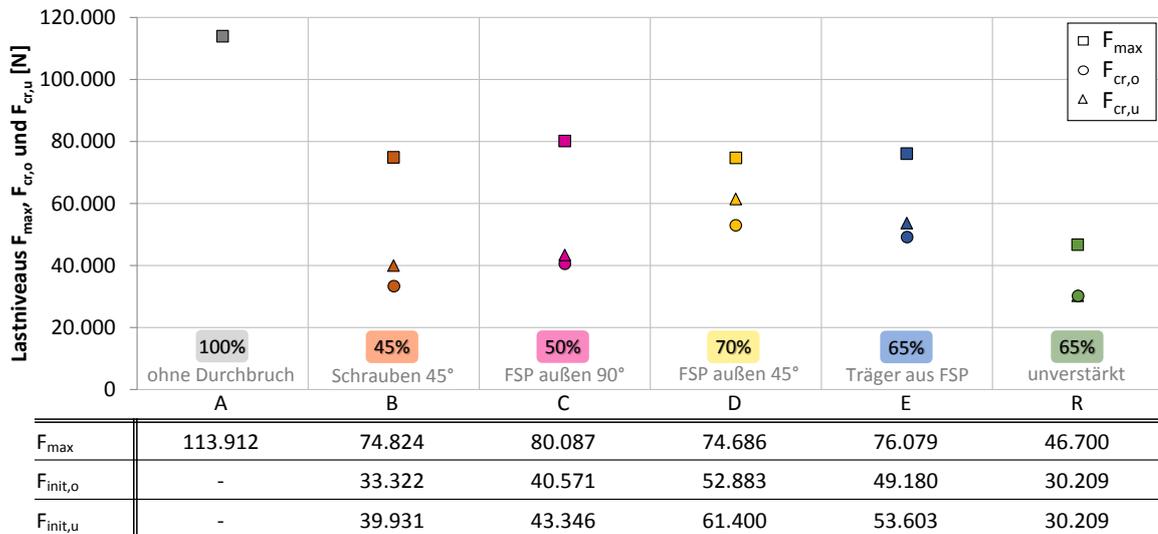
Da am Institut für Holzbau und Holztechnologie der Technischen Universität Graz ausreichend Rohfurnier lagernd war, wurde zu Beginn der Arbeit entschieden, alle getesteten Prüfkörper selbst herzustellen. Dies umfasste sämtliche Arbeitsschritte, begonnen bei Zuschnitt der Rohfurniere, über das Kleben und Pressen der Träger bis hin zum Fräsen und zum Verstärken des Durchbruches. Um den Arbeitsaufwand in Grenzen zu halten, wurde je Prüfserie ein Umfang von drei Prüfkörpern festgelegt. Die Trägerabmessungen und der Durchbruchdurchmesser waren bei allen Prüfkörpern konstant, die Art und Weise der Verstärkung war variabel. Dass sich die einzelnen Serien so stark voneinander unterscheiden macht einen Vergleich schwierig.

Die versuchstechnischen Untersuchungen sollten prinzipiell dazu dienen, das qualitative Verhalten der unterschiedlich verstärkten Träger zu untersuchen. Eine umfangreiche statistische Aussage ist aufgrund der geringen Anzahl von Prüfkörpern je Serie nicht möglich. Eine weitere Schwierigkeit bei der Auswertung stellte die Unklarheit über die Materialkenngrößen der selbst produzierten Prüfkörper dar. Vereinfacht wurden deshalb die Werte aus der Zulassung für Kerto übernommen (siehe Kap. 2-5).

Da die Versuchskonfiguration auf Schubversagen ausgelegt war, lag größtes Interesse an der Kenntnis des Schubfestigkeitswertes der Träger. Beim ersten Auswerten der Versuchsergebnisse wurde deutlich, dass die vorhandenen Festigkeiten stark von den Kerto-Kenngrößen abwichen. Deshalb wurden mit demselben Material im Anschluss an die Dreipunkt-Biegeversuche noch Schubversuche durchgeführt um zumindest einen Schubfestigkeitswert zu erhalten.

Laut Ardalany et al. (2013) ist das Ziel einer Verstärkungsmaßnahme, die Tragfähigkeit des durchbrochenen Trägers auf das Niveau eines ungestörten Trägers zurückzuführen. Ein weiteres wichtiges Kriterium ist außerdem, die Rissbildung und das Risswachstum der Querschlisse am Durchbruchrand zu unterbinden. Dies ist deshalb wichtig, da auch bei niedrigen Lasten, beispielsweise auf Niveau von Gebrauchstauglichkeit, keine Risse auftreten sollen, welche die Dauerhaftigkeit negativ beeinflussen. Die verschiedenen Verstärkungsmaßnahmen eignen sich unterschiedlich gut, um die Rissbildung zu unterbinden. In Abb. 4.1 sind die Lastniveaus, an welchen die Risse am oberen und

unteren Durchbruchrand auftraten der Maximalkraft gegenübergestellt. Für die Darstellung werden die Mittelwerte der jeweiligen Serien herangezogen.



**Abb. 4.1 Maximalkraft sowie Lastniveaus der Erstrissbildung am oberen und unteren Durchbruchrand als Serienmittelwerte**

Die in den farbig hinterlegten Feldern angegebenen Prozentwerte drücken das Verhältnis der Erstrisskraft zur Maximalkraft jeder einzelnen Serie aus. Dabei kann das Niveau des Erstrisses auch als Indikator für die Steifigkeit einer Verstärkung interpretiert werden. Je steifer eine Verstärkung, desto später kommt es zur Rissbildung. Im Falle des unverstärkten Reserveträgers bildet sich der erste Riss, wenn am Durchbruchrand die Querkzugfestigkeit des Holzes überschritten wird. Diese lag bei Prüfkörper R1 laut Tab. 3.14 bei  $\sigma_{t,90,o,cr} = 1,44 \text{ N/mm}^2$  am oberen und bei  $\sigma_{t,90,u,cr} = 1,49 \text{ N/mm}^2$  am unteren Durchbruchrand und trat zeitgleich bei einer Last von  $F_{cr,o/u} = 30,2 \text{ kN}$  auf. Dabei entspricht das Lastniveau in etwa einem Wert von etwa  $65\% * F_{max}$ . Die berechnete Querkzugspannung bei Erstriss übersteigt dabei den in Kap. 2-5 auf Grundlage der Kerto-Zulassung Z-9.1-847 (2016) abgeschätzten Wert der mittleren Querkzugfestigkeit von  $f_{t,90,mean} = 0,95 \text{ N/mm}^2$  deutlich (siehe Kap. 4-1.4). Für die Berechnung dieser Werte wurde das Nachweiskonzept der ÖNORM B 1995-1-1:2015 verwendet. Außerdem gilt anzumerken, dass lediglich ein einziger Prüfkörper unverstärkt geprüft wurde und es sich somit nicht unbedingt um einen repräsentativen Wert handelt.

Da die unterschiedlichen Verstärkungsmethoden die Spannungsverteilung am Querschnitt verändern, kann diese Berechnungsweise für die Serien mit verstärkten Durchbrüchen nicht verwendet werden. Aus diesem Grund werden sie im Folgenden auf Basis der erreichten Kraft bei Rissbeginn verglichen.

In Abb. 4.1 ist erkennbar, dass das Lastniveau der Erstrisse bei der mit Schrauben verstärkten Serie B im Verhältnis zum Reserveträger kaum gesteigert werden konnte, nämlich auf  $F_{cr,o/u} = 33,3 \text{ kN}$  (entspricht etwa  $45\% * F_{max}$ ). Dies liegt vor allem daran, dass die Schrauben einen gewissen Mindestabstand zum Durchbruchrand aufweisen müssen (im vorliegenden Fall  $2 * d = 24 \text{ mm}$ ) und somit die dort auftretenden Spannungsspitzen nicht auffangen können. Die volle Wirkung der Schraube kann sich erst entfalten, wenn das Risswachstum bereits bis zur Schraubenachse fortgeschritten ist. Eine Steigerung der Erstrisslast ließe sich erreichen, wenn der Abstand der Schraubenachse zum Durchbruchrand verringert würde. Allerdings hätte dies wahrscheinlich negative Auswirkungen bei steigender Last. Die Spannungskonzentrationen an der Schraube könnten zu einem Ausbrechen des reduzierten Holzquerschnittes führen.

Bei den Serien C (außen aufgeklebtes Sperrholz  $90^\circ$ ) und E (innenliegende Querlagen) hingegen reichten die verstärkenden Schichten des Holzes mit Faserrichtung im Winkel von  $90^\circ$  zur Trägerachse bis direkt zum Durchbruchrand. Da es sich aufgrund der Verklebung zudem um einen vollflächigen Verbund handelte, konnten die Spannungen umgelagert und von den verstärkenden Schichten aufgenommen werden. Dies führte dazu, dass die Risse am Durchbruchrand im Verhältnis zum unverstärkten Träger bei einem höheren Lastniveau auftraten. Bei Serie C trat der erste Riss im Mittel bei  $F_{cr,o} = 40,5 \text{ kN}$

( $50\% * F_{max}$ ) auf, bei Serie E hingegen wurden  $F_{cr,o} = 49,2 \text{ kN}$  ( $65\% * F_{max}$ ) erreicht. Bemerkenswert ist der Unterschied vor allem aus dem Grund, dass bei beiden Prüferien die Querschnittsfläche der quer zur Trägerachse orientierten Furnierlagen gleich groß war. Es sieht so aus, als ob bei gleichmäßiger Verteilung der Querlagen innerhalb des Trägerquerschnittes eine verbesserte Widerstandsfähigkeit gegenüber Querzug vorliegt, als wenn derselbe Anteil an Holzquerschnitt an der Außenseite aufgeklebt wird.

In diesem Vergleich der Erstrisslasten schneidet die Serie D (außen aufgeklebtes Sperrholz  $45^\circ$ ) am besten ab. Wie aus verschiedenen Veröffentlichungen hervorgeht (siehe Kap. 1-3.2.2), sind schräg eingedrehte Schrauben effektiver zum Verstärken von Durchbrüchen als im Winkel von  $90^\circ$  zur Trägerachse angeordnete. Diese Tatsache zeigt sich auch bei den außen aufgeklebten Sperrholzplatten. Diese erreichen im Mittel das höchste Lastniveau des Erstrisses aller Prüferien, nämlich  $F_{cr,o} = 52,9 \text{ kN}$ , was  $70\%$  von  $F_{max}$  entspricht.

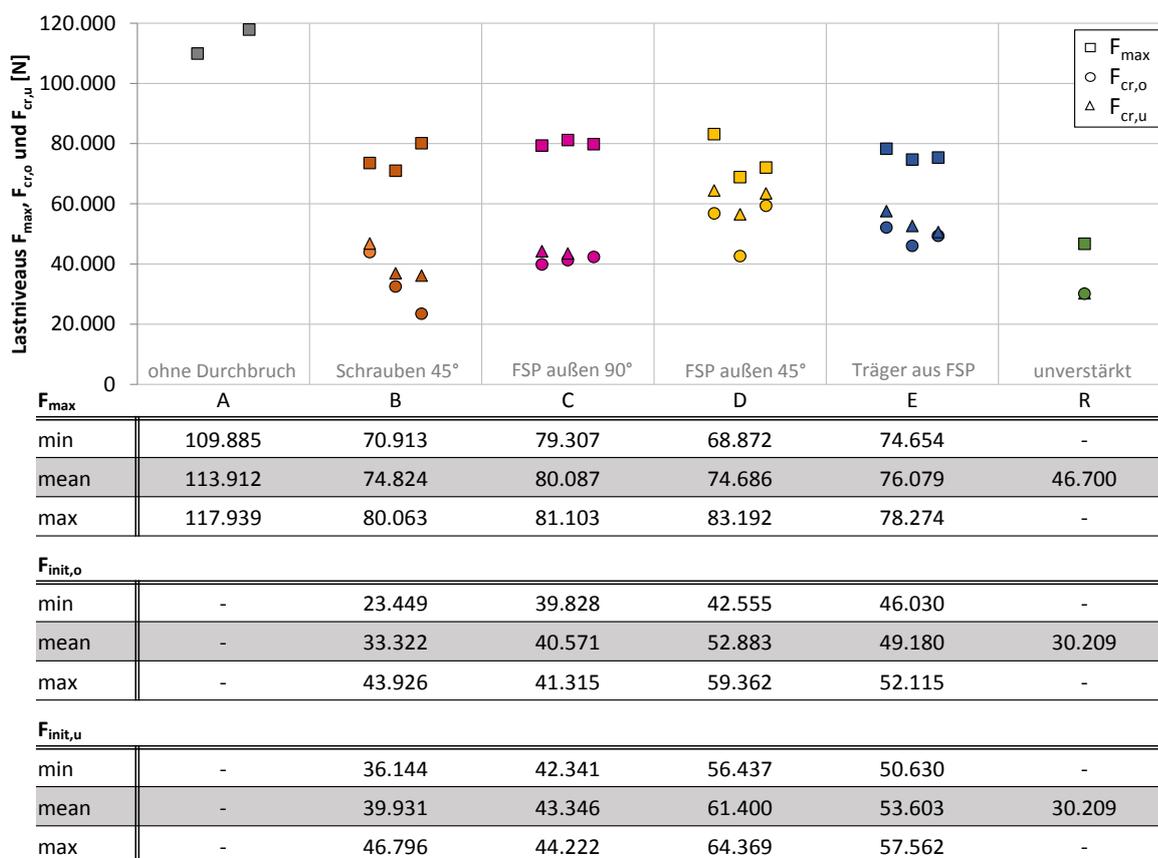


Abb. 4.2 Maximalkraft sowie Lastniveaus der Erstrissbildung am oberen und unteren Durchbruchrand jedes einzelnen Prüfkörpers

Da die Abweichungen innerhalb einer Prüferien zum Teil groß sind (vor allem bei Serie B und Serie D) erfolgt mit dem Vergleich der Mittelwerte eine leicht verzerrte Darstellung. Aus diesem Grund sind in Abb. 4.2 die Maximalkräfte und die Lastniveaus der Erstrisse am oberen und unteren Durchbruchrand jedes Prüfkörpers getrennt abgebildet (bei den Serien B-E entsprechen die Punkte links dem Prüfkörper mit dem Namenszusatz „1“, in der Mitte „2“ und rechts „3“). Es ist deutlich erkennbar, dass Serie C die geringste Streuung aller drei Lastniveaus aufweist, gefolgt von Serie E.

Bei Serie D weicht der Prüfkörper D2 stark von den Niveaus der zwei anderen Prüfkörper ab. Dies zeigte sich auch in einem abweichenden, fast duktilen Verhalten des Prüfkörpers (siehe Kap. 3-2.1.5). Es könnte sein, dass bei der Herstellung des Trägers oder der Verklebung mit den Verstärkungsplatten ein Arbeitsschritt nicht optimal ausgeführt wurde. Lässt man in der Betrachtung in Abb. 4.2 den Prüfkörper D2 außer Acht, so ergibt sich für diese Art der Verstärkung, vor allem für die Niveaus der Erstrissbildung am Durchbruchrand eine wesentlich kleinere Streuung der Messwerte.

Die Prüfsreihe B weist die größten Diskrepanzen bei den Erstrisskräften auf. Der Einfluss der Schrauben ist im Bereich der Spannungsspitzen unmittelbar am Durchbruchrand wahrscheinlich sehr gering. Somit ist das Auftreten des ersten Risses unmittelbar von der Querkzugfestigkeit des Holzes abhängig, welche im Allgemeinen einer großen Streuung unterliegt. Auffällig ist, dass der Prüfkörper B3, welcher die höchste Maximalkraft dieser Serie erreichte, den ersten Riss am oberen Durchbruchrand bereits bei einem niedrigeren Lastniveau als der unverstärkte Träger aufwies.

### 4-1.1 REFERENZSERIE

Die Referenzserie A diene, wie bereits mehrfach erwähnt, als Ausgangspunkt um die Tragfähigkeit der durchbrochenen Träger in ein Verhältnis setzen zu können. Außerdem sollte mit dieser Serie der Schubfestigkeitswert des Materials rückgerechnet werden.

In der ÖNORM EN 14080:2013 wird als Schubfestigkeit für Brettschichtholz ein Wert von  $f_{v,k} = 3,5 \text{ N/mm}^2$  angegeben, unabhängig von der betrachteten Holzqualität. Dies bedeutet, dass eine höhere Festigkeitsklasse des Holzes keine Steigerung der Schubtragfähigkeit zur Folge hat. In der Kerto-Zulassung Z-9.1-847 (2016) findet sich für das Furnierschichtholz Kerto-S ein Schubfestigkeitswert von  $f_{v,k} = 4,1 \text{ N/mm}^2$ . Unter Annahme eines Variationskoeffizienten von 10% erhält man einen Mittelwert von  $f_{v,mean} = 4,9 \text{ N/mm}^2$ . Diese Angaben gelten für Nenndicken von 21 mm bis 90 mm.

Sehr wohl einen Einfluss auf diese Materialkenngröße hat laut Gehri (2010) allerdings die Größe der schubbeanspruchten Fläche. Bei Serie A lag die Größe der Schubfläche bei  $A_{shear} = 18.900 \text{ mm}^2$ .  $A_{shear}$  ist dabei nicht die Querschnittsfläche, sondern die Fläche der Scherfuge, an welcher das Versagen eintritt. Zur Bestimmung des Mittelwertes der Schubfestigkeit dient laut Gehri (2010) folgende Gleichung:

$$f_{v,mean} = 100 * A_{shear}^{-0,28} \quad (4.1)$$

In Abb. 4.3 lässt sich erkennen, dass die rechnerische Schubspannung zum Zeitpunkt des Scherversagens bei Prüfkörper A1 ( $f_{v,12,A1} = 6,79 \text{ N/mm}^2$ ) und bei Prüfkörper A3 ( $f_{v,12,A3} = 7,4 \text{ N/mm}^2$ ) größer ist als die von Gehri (2010) angegebene Kurve besagt, und deutlich oberhalb des Wertes aus der Zulassung Z-9.1-847 (2016) liegt.

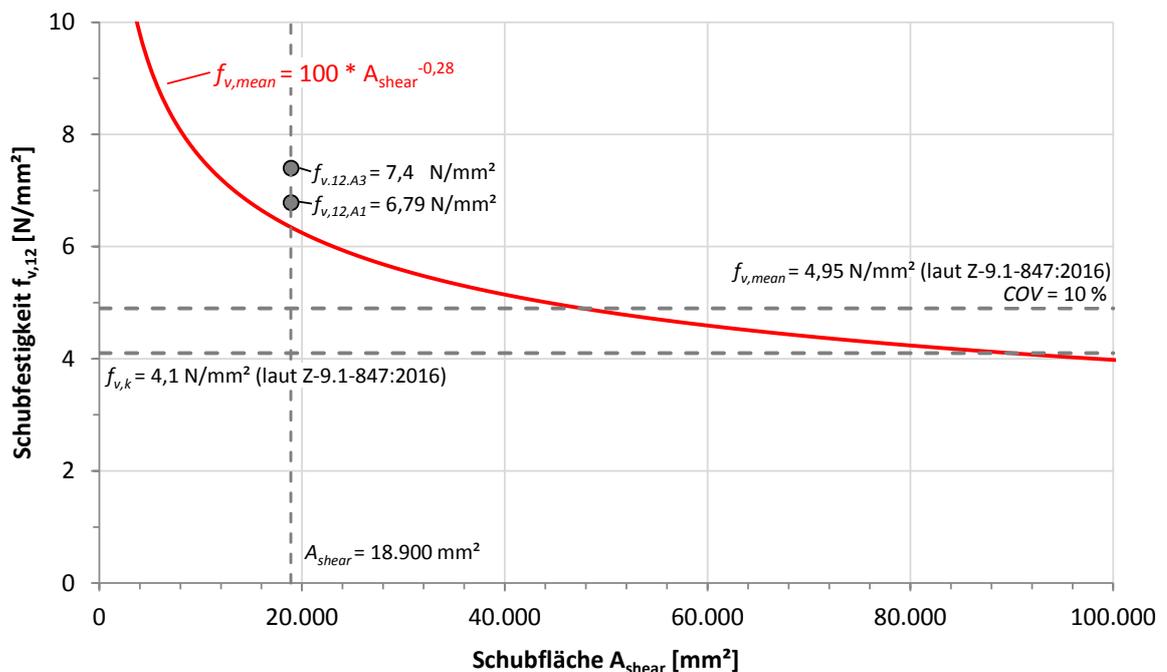


Abb. 4.3 Schubfestigkeit in Abhängigkeit der Scherfläche (Gehri, 2010)

## 4-1.2 INNENLIEGENDE VERSTÄRKUNG

Sowohl die Vollgewindeschrauben im Winkel von  $45^\circ$  bei Serie B, als auch die Querlagen der Furniersperrholzträger von Serie E können als innenliegende Verstärkung angesehen werden. Bis auf den Umstand, dass beide Varianten von außen nicht direkt sichtbar sind, haben sie jedoch kaum Gemeinsamkeiten. Im Gegensatz zur vollflächigen Verstärkung durch die Querlagen über die gesamte Trägerlänge, haben die Schrauben lediglich sehr lokalen Einfluss. Wie sich am Anfang von Kap. 4-1 in Abb. 4.2 deutlich zeigt, haben die Schrauben aufgrund ihres Abstandes zum Durchbruchrand kaum Auswirkungen auf die Erstrissbildung. Die Querlagen hingegen können die Querkraftkräfte am Durchbruch aufnehmen, und so die Rissbildung hinauszögern. Serie E erreicht hinter Serie D (aufgeklebte Sperrholzplatten  $45^\circ$ ) die zweithöchsten Erstrisslasten.

Der größte Vorteil der Sperrholzträger ist gleichzeitig auch ihr größter Nachteil: die Querlagen. Sie wirken als bereits in den Träger integrierte Querkraftverstärkung und verbessern nebenbei sowohl die Querkraft- als auch die Schubfestigkeit. Damit verbunden ist allerdings eine erhebliche Reduktion der Biegefestigkeit und des Biege-E-Moduls im Vergleich zu einem Träger aus Furnierschichtholz bei gleicher Querschnittsbreite. Laut Kerto-Zulassung Z-9.1-847 (2016) steht einer Biegefestigkeit bei Furnierschichtholz von  $f_{m,k,Kerto-s} = 44 \text{ N/mm}^2$  eine Biegefestigkeit bei Furniersperrholz von  $f_{m,k,Kerto-Q} = 32 \text{ N/mm}^2$  gegenüber. Dies entspricht einer Reduktion von etwa 28%. Anzumerken gilt, dass laut dieser Zulassung die Biegefestigkeit verschmiert über die gesamte Trägerbreite anzunehmen ist. Im vorliegenden Fall hatten die Träger der Serie E dieselbe Breite wie alle anderen Serien, nämlich 13 Furnierschichten zu je  $3 \text{ mm}$ . Drei dieser Schichten wurden im Trägerinneren jedoch mit einer Faserorientierung von  $90^\circ$  zur Trägerachse verklebt. Dies führte dazu, dass von der  $40 \text{ mm}$  betragenden Trägerbreite nur mehr  $31 \text{ mm}$  (etwa 78% der Gesamtbreite) für die Biegetragwirkung in Trägerlängsrichtung zur Verfügung standen (es wird angenommen, dass die Querlagen zur Biegetragfähigkeit keinen Beitrag leisten). Aufgrund dieser Schwächung trat bei allen drei Prüfkörpern der Serie E ein Biegebruch im Nettoquerschnitt des Durchbruches ein. Gemäß der Herleitung von Dröscher et al. (2016) ergeben sich unter Berücksichtigung der Sekundärmomente im Durchbruchsbereich bei  $45^\circ$  Biegespannungen von  $\sigma_{m,45,LL,mean} = 54 \text{ N/mm}^2$ . Für diese Berechnung wurde ausschließlich die Querschnittsfläche der Längslagen herangezogen. Vergleicht man diesen Wert mit den abgeschätzten Mittelwerten der Biegefestigkeit für Furnierschichtholz aus der Kerto-Zulassung in Kap. 2-5, so lässt sich eine relativ gute Übereinstimmung feststellen ( $f_{m,mean} = 52,6 \text{ N/mm}^2$ ).

Die im Winkel von  $45^\circ$  um den Durchbruch angeordneten Vollgewindeschrauben erreichen im direkten Vergleich mit der Referenzserie eine Tragfähigkeitswiederherstellung auf 66%. In den Normen ist diese Schraubenanordnung allerdings nicht verankert. In der Literatur hingegen finden sich zwei Modelle zur Bemessung schräg angeordneter Verstärkungsschrauben (siehe Kap. 1-3.2.2). Die Berechnung laut Gehri (2014) beruht auf Gleichgewichtsbetrachtungen der im Bereich des Durchbruches nicht übertragbaren Schub- und Biegespannungen und ermittelt daraus die Kräfte, welche in den Schrauben wirken. Tapia & Aicher (2016) hingegen stützen ihr Berechnungsmodell auf in FE-Simulationen berechneten Faktoren. Nachteil dabei ist allerdings, dass diese Berechnung nur auf bestimmte Randbedingungen kalibriert ist. Dröscher et al. (2016) führte im Zusammenhang mit ihren Untersuchungen zum Thema der Durchbrüche Versuche mit unterschiedlichen Verstärkungsvarianten bei Brettschichtholzträgern nach der Prüfkonfiguration laut Gehri (2014) (siehe Kap. 2-4) durch. Dabei wurden einige Prüfserien mit schräg angeordneten Schrauben oder eingeklebten Gewindestangen ausgeführt. Die Kraft in den Stäben wurde in einigen Fällen mit Hilfe von Dehnmessstreifen gemessen. Die Kräfte wurden auch mit dem Modell nach Gehri (2014) nachgerechnet. Dröscher et al. (2016) stellt fest, dass der umzulagernde Schubfluss, welcher im Modell über die Länge der Diagonale des den Durchbruch einschließenden Quadrates berechnet wird, sehr hoch erscheint. Laut Dröscher et al. ist die Annahme, der Schubfluss wird ausschließlich über die Länge des Durchbruchsdurchmessers verhindert, zutreffender. Außerdem erweitert Dröscher et al. das Modell, da laut ihr die im Modell vernachlässigte Mitwirkung des Holzes sehr wohl einen Einfluss besitzt. So ergab sich mit dem von Dröscher et al. adaptierten Modell eine gute Übereinstimmung mit den bei den Versuchen gemessenen Werten.

Im vorliegenden Fall wurde das Modell nach Gehri (2014) angewandt, um eine grobe Abschätzung der in den Schrauben zu erwartenden Kräfte zu erhalten. Aufgrund dieser Ergebnisse wurde der Durchmesser

der Schrauben mit 12 mm gewählt. Die geringe Trägerbreite machte allerdings das Anordnen von Schrauben an der querdruckbeanspruchten Seite des Durchbruches nicht möglich. Die Druckkräfte müssen vom Holz aufgenommen werden. Da im Zusammenhang mit dieser Arbeit die Kräfte in den Schrauben nicht gemessen wurden, kann keine Aussage über die Übereinstimmung mit den Schätzwerten getroffen werden. Generell lässt sich allerdings sagen, dass das Verhältnis von Schraubendurchmesser zu Trägerbreite bei den dünnwandigen Furnierholzträger bei  $d/h = 12/40 = 0,3$  liegt und damit sehr hoch ist. Dies führt zu einer wesentlichen Reduzierung des Holzquerschnittes durch die Schrauben. Dies zeigt sich bei den vorgefundenen Versagensmodi. In zwei Fällen kam es zu Biegeversagen im Bereich bei 45° am Durchbruch, im dritten Fall konnte ein kombiniertes Versagen aus Schub und Biegung festgestellt werden. Die rechnerischen Biegespannungen zum Zeitpunkt des Bruches ergaben, unter Vernachlässigung eventueller Einflüsse der Schrauben, allerdings nur einen Mittelwert von  $f_{m,45^\circ} = 43,0 \text{ N/mm}^2$ . Dieser Wert liegt etwas unterhalb der charakteristischen Biegefestigkeit von Kerto-S. Am Bruchbild ist außerdem zu erkennen, dass an den Flanken der Schrauben aufgrund der Kraftkonzentrationen lokales Scherversagen auftrat.

Der Schubmodul war mit einem Mittelwert von 23% des Referenzwertes der niedrigste aller untersuchten Prüfserien. Dieser Wert wurde bei allen Prüfkörpern im linear elastischen Bereich bestimmt, bevor es zu den ersten Rissbildungen kam. Da die Schrauben ihre Wirkung erst entfalten konnten, nachdem es aufgrund der Risse zu Verformungen kam, ist die mit der Messung ermittelte Steifigkeit im Grunde jene eines unverstärkten Durchbruches.

### 4-1.3 AUßENLIEGENDE VERSTÄRKUNG

Die außen aufgeklebten Sperrholzplatten bewirkten eine Wiederherstellung der Tragkapazität des Durchbruchbereiches auf etwa 2/3 des Wertes der Referenzserie. Serie C und Serie D unterschieden sich dabei lediglich in der Orientierung der Fasern der Sperrholzplatten: bei den Prüfkörpern der Serie C waren die Decklagen im Winkel von 90° zur Trägerachse orientiert, bei Serie D waren sie um 45° gedreht, was in einer Decklagenorientierung von 45° zur Trägerachse entlang der querzugbeanspruchten Seiten des Durchbruches resultiert. Für die in der vorliegenden Arbeit gewählte Plattenstärke der außenliegenden Sperrholzplatten lässt sich kein großer Unterschied zu den anderen Prüfserien bezüglich der Tragfähigkeit erkennen, wobei Serie C mit geringem Abstand die größten Bruchlasten erreichte.

Sehr wohl aber kam es zu einer Steigerung der ermittelten Schubsteifigkeiten im Durchbruchbereich. Hierbei zeigte sich, dass die außen aufgeklebten Verstärkungsplatten den Schubmodul deutlich erhöhen. Den höchsten Wert aller durchbrochenen Träger erreichte dabei die Serie D. Die Faserorientierung des Sperrholzes verlief parallel zur Messeinrichtung (siehe Kap. 2-4.1) und erhöhte dadurch die Dehnsteifigkeit der Sperrholzplatte in dieser Richtung. Die gemessene Verzerrung des Schubkreuzes wurde somit vermindert und resultierte folglich in einem höheren Schubmodul. Der Schubmodul konnte auf einen Wert von 40% der Messung aus der Referenzserie (sprich dem Schubmodul des reinen Holzquerschnittes) erhöht werden. Bei Serie C betrug dieser Wert immerhin noch 30% des Referenzschubmoduls. Die Tragfähigkeit der Prüfserie C erreichte die höchsten Werte aller durchgeführten Versuche mit Durchbrüchen. Diese lagen bei etwa 70% der Bruchlast aus Referenzserie A.

Wie aus verschiedenen Veröffentlichungen hervorgeht (siehe Kap. 1-3.2.2) ist es durchaus möglich, die Tragkapazität eines Durchbruches mit außen aufgeklebten Verstärkungen so weit zu steigern, bis sie das Niveau eines ungestörten Trägers sogar übersteigen kann. Hierfür spielt natürlich die Stärke und das Material der Verstärkungsplatten eine wesentliche Rolle. Im vorliegenden Fall begründet sich die gewählte Plattenstärke mit der Dicke der in Serie E innen angeordneten Querlagen. Um eine gewisse Vergleichbarkeit zu ermöglichen, sollte der quer zur Trägerachse angeordnete Holzanteil bei den Serien C-E identisch sein.

In der englischen Ausgabe des Nordic Glulam Handbook (Carling, et al., 2001), ursprüngliche Version in schwedisch „Nordisk Limträhandbok“, finden sich Richtwerte für die zu verwendete Plattenstärke von außen aufgeklebten Sperrholzplatten aus Buche oder Birke. Dabei ist eine Mindestdicke von 10 mm einzuhalten, die Faserorientierung der Decklagen soll achsparallel zum Träger ausgerichtet sein.

Als Ausgangswert für die Berechnung dient der Ausnutzungsgrad  $\mu$  des Gesamtquerschnittes auf

Schubbeanspruchung. In Abhängigkeit dessen ergibt sich somit ein Verhältnis von Plattenstärke zu Trägerbreite. Der Ausnutzungsgrad bestimmt sich mit folgender Gleichung:

$$\mu = \frac{1,5 * V}{b * h * f_{v,mean}} \quad (4.2)$$

wobei

- $\mu$  ...Ausnutzungsgrad [-]
- $V$  ...max. Querkraft [N]
- $b$  ...Querschnittsbreite des Trägers [mm]
- $h$  ...Höhe des Trägers [mm]
- $f_v$  ...Mittelwert der Schubfestigkeit [N/mm<sup>2</sup>]

Setzt man nun als Schubfestigkeit des Materials den Mittelwert der aus Serie A bestimmten Werte von  $f_{v,mean} = 7,1 \text{ N/mm}^2$  ein, so erhält man für die Serie C im Mittel einen Ausnutzungsgrad von  $\mu = 0,78$ , für Prüferie D einen Wert von  $\mu = 0,73$ . In Abb. 4.4 sind die Ausnutzungsgrade beider Serien in die Funktion, welche im Glulam Handbook (2001) beschrieben ist, eingefügt. Wird die benötigte Gesamtplattenstärke zwischen den vordefinierten Punkten linear interpoliert, so erhält man eine erforderliche Plattendicke von etwa  $t_{ges} = 55\%$  der Trägerbreite bei Serie C, sowie  $t_{ges} = 53\%$  der Trägerbreite bei Serie D. Im vorliegenden Fall entspricht die gewählte Plattenstärke von je  $7,5 \text{ mm}$  je Seite einem Anteil von lediglich  $37,5\%$  der Trägerbreite. (Carling, et al., 2001)

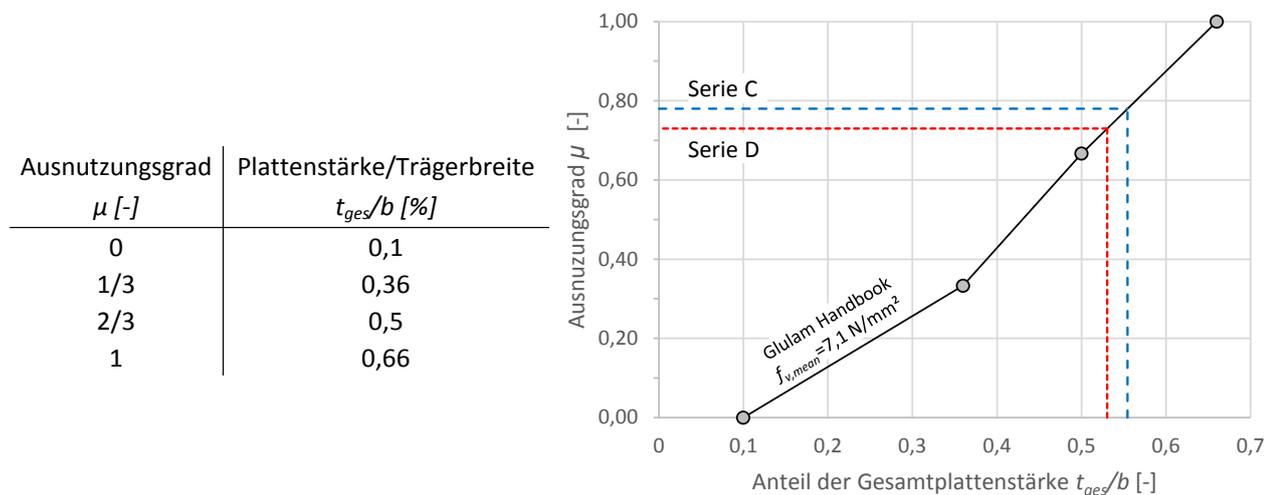


Abb. 4.4 Richtwerte zur Vordimensionierung außenliegender Verstärkungsplatten aus Buche oder Birke aus dem Glulam Handbook (Carling, et al., 2001)

Die Verstärkungsplatten im vorliegenden Fall bestanden weder aus Buche noch aus Birke, sondern wurden aus Fichtenfurnier hergestellt. Deshalb dient diese Betrachtung nicht als Vergleich, sondern lediglich um zu verdeutlichen, dass für die im Zusammenhang mit dieser Arbeit durchgeführten Versuche das Potenzial der Verstärkung mittels außen aufgeklebter Sperrholzplatten nicht vollends ausgeschöpft wurde.

#### 4-1.4 UNVERSTÄRKTER DURCHBRUCH

Im ursprünglichen Prüfplan war keine Serie mit unverstärktem Durchbruch vorgesehen. Da der Reserveträger, welcher als Ersatz bei etwaigen Problemen mit einem anderen Prüfkörper gedacht war, nicht benötigt wurde, wurde er nach Abschluss des eigentlichen Prüfumfanges noch unverstärkt geprüft. Wie zu erwarten war, kam es am Durchbruchrand im Bereich von  $45^\circ + 180^\circ$  zur Trägerachse zu Querszissen. Das Lastniveau des Erstrisses lag dabei bei etwa  $30,2 \text{ kN}$  und war damit das niederste aller Prüfserien. Errechnet man sich die daraus resultierende Querszugspannung mit Hilfe der Formeln aus ÖNORM B 1995-1-1:2015 so ergibt sich ein Maximalwert von  $\sigma_{t,90,u,cr} = 1,49 \text{ N/mm}^2$ . Die charakteristische Querszugfestigkeit von Kerto-S ist laut Zulassung Z-9.1-847 (2016) bei

$f_{t,90,k} = 0,8 \text{ N/mm}^2$ . Unter Annahme eines Varianzkoeffizienten von 10% ergibt sich ein Mittelwert von  $f_{t,90,mean} = 0,95 \text{ N/mm}^2$ . Somit liegt der errechnete Wert bei etwa dem 1,56-fachen der Festigkeit aus der Zulassung.

Bei steigender Last öffneten sich die Risse weiter, bis es auf der Höhe des unteren Risses zu einem Schubversagen kam. Wendet man den Schubnachweis von ÖNORM B 1995-1-1:2015 unter Vernachlässigung von  $k_\tau$  an, so erhält man zum Zeitpunkt des Bruches einen Wert von  $\tau_{DB,12} = 5,98 \text{ N/mm}^2$ . Dieses Niveau ist wiederum deutlich unter dem Mittelwert der von Prüfkörper A1 und A3 errechneten Schubfestigkeit ( $f_{v,12,mean} = 7,1 \text{ N/mm}^2$ ). Ohne Berücksichtigung von  $k_\tau$  handelt es sich um einen Nettoquerschnittsnachweis ohne Berücksichtigung von Spitzenspannungen, welche bei runden Durchbrüchen ebenso in geringem Maße vorkommen.

## 4-2 SCHERVERSUCHE 14°

Bei der Auswertung der Scherversuche zeigte sich, dass das für die durchbrochenen Träger verwendete und im Labor selbst hergestellte Furnierholz unerwartet hohe Schubspannungen erreichte. Die auf einen Holzfeuchtigkeitswert von 12% korrigierte Schubfestigkeit des Materials lag im Mittel bei  $f_{v,mean,FSH} = 7,4 \text{ N/mm}^2$  bei den Prüfkörpern der Serien A bis D und dem Reserveträger aus Furnierschichtholz, sowie bei  $f_{v,mean,FSP} = 7,29 \text{ N/mm}^2$  bei den Prüfkörpern aus Furniersperrholz der Serie E. Auffällig ist, dass der Wert, welcher aus den Schubversuchen der Furnierschichtholzkörper hervorgeht, sehr ähnlich dem Wert ist, welcher sich unter Anwendung von Glg. (4.1) bei Zugrundelegung der beanspruchten Scherfläche von  $A_{shear} = b * h = 40 * 270 = 10.080 \text{ mm}^2$  ergibt ( $A_{shear}$  entspricht in diesem Fall jener Querschnittsfläche der Scherfuge bei den Scherprüfkörpern). Die Schubfestigkeit beträgt demnach  $f_{v,mean} = 7,42 \text{ N/mm}^2$ .

Vergleicht man die geprüften Werte des Furnierschichtholzes mit den in Kap. 2-5 abgeschätzten Mittelwerten von  $f_{v,mean,Kerto-S} = 4,9 \text{ N/mm}^2$  aus der Kerto-S-Zulassung, so ergibt sich ein um rund 50% höherer Wert als die Leistungserklärung des handelsüblichen Produktes angibt. Im Falle von Furniersperrholz liegt diese Steigerung bei etwa 35% verglichen mit dem abgeschätzten Mittelwert von  $f_{v,mean,Kerto-Q} = 5,4 \text{ N/mm}^2$ .

Bei der Referenzserie A der Durchbruchversuche trat am ungestörten Träger Schubversagen ein. Errechnet man sich aus der Bruchlast und den Querschnittsabmessungen die zum Zeitpunkt des Bruches herrschende Schubspannung, so erhält man im Mittelwert eine Schubfestigkeit von  $f_{v,mean,A} = 7,09 \text{ N/mm}^2$ . Dieser Wert liegt nur etwas mehr als 4% unterhalb des mit Hilfe der Schubprüfungen ermittelten Kennwertes und stimmt somit gut überein. Anzumerken gilt in diesem Zusammenhang allerdings, dass die Belastungsrichtung bei den Versuchsreihen verschieden war. So erfolgte die Krafteinleitung bei den Biegeträgern im Winkel von 90° zur Faser, bei den Schubprüfungen hingegen im Winkel von 14° zur Faser.

Wie bereits in Kap. 3-2.2 angemerkt, war die gewählte Prüfkfiguration zur Bestimmung des Schubmoduls nicht geeignet. In der ÖNORM EN 408:2012 gibt es eine Vorlage, wie die Schubprüfkfiguration aussehen könnte. Laut dieser erfolgt die Krafteinleitung mittels aufgeklebter Stahllaschen. Da die Schubfestigkeit bekanntlich in Abhängigkeit der beanspruchten Scherfläche variiert, wurde diese bei den Schubprüfungen so gewählt, dass die Scherfläche jener Querschnittsfläche der durchbrochenen Träger entsprach. So sollte eine Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Prüfungen gewährleistet werden. Die Folge daraus waren relativ hohe erwartete Prüflasten, welche über die Klebefugenfläche, wie in der Norm vorgesehen, nicht in den Prüfkörper eingeleitet werden konnte. Aus diesem Grund wurde entschieden, die Anzahl der Krafteinleitungs-laschen zu verdoppeln, um die verfügbare Klebefläche zu vergrößern. Außerdem wurden aufgrund der einfacheren Bearbeitbarkeit Laschen aus Baubuche anstelle von Stahl gewählt. Je zwei Krafteinleitungs-laschen befanden sich gegenüberliegend an der Decklagenfläche des Prüfkörpers aufgeklebt (siehe Abb. 2.18). Die genaue Position der Messeinrichtung und der Einfluss derer auf die Messergebnisse wurde anfänglich nicht bedacht. Das daraus resultierende Problem bei der Ermittlung des Schubmoduls ist in Kap. 3-2.2 bereits kurz erklärt: die Verzerrung errechnet sich über die Relativverschiebung der Ränder der Scherfuge

zueinander. Nun war es im vorliegenden Fall nicht möglich, das Messsystem exakt an diesen Rändern zu befestigen. Die Punkte, an welchen der Wegaufnehmer und der dazugehörige Winkel befestigt wurden, waren in etwa  $10\text{ mm}$  von der Trennlinie zwischen Scherfuge und Verstärkungslaschen entfernt (siehe Abb. 4.5), was in einem Messabstand von insgesamt  $50\text{ mm}$  resultierte (Scherfugenbreite war  $30\text{ mm}$ ). Da der Verbundquerschnitt im Krafteinleitungsbereich nicht annähernd die Steifigkeit einer Stahllasche erreicht, kommt es auch in diesem unter Last zu nicht vernachlässigbaren Verformungen. Somit kann die gemessene Verzerrung nicht ausschließlich der Scherfuge zugeordnet werden. Um genauere Aussagen über den Anteil des Krafteinleitungsbereiches zur Gesamtverformung treffen zu können, könnte eine FE-Analyse unter Zugrundelegung der unterschiedlichen Materialeigenschaften von Fichte und Buche dienen. Selbst wenn man für die Krafteinleitungslaschen Stahlbleche einsetzen würde, könnte es dennoch im Trägerquerschnitt, welcher im vorliegenden Fall über die Scherfuge hinaus bis in den Krafteinleitungsbereich reicht, zu Deformationen kommen. Um die gemessene Verzerrung tatsächlich nur auf die Scherfuge beziehen zu können, eignet sich am besten die in der ÖNORM EN 408:2012 angeführte Versuchskonfiguration. Bei dieser wird die Kraft über Stahllaschen eingeleitet, welche an den Außenkanten des Prüfkörpers aufgeklebt wird. Da die Stahllaschen im Vergleich zum Holzquerschnitt eine sehr große Steifigkeit besitzen, kann davon ausgegangen werden, dass die gemessene Relativverschiebung der Laschen zueinander lediglich auf die Verzerrung der Scherfuge zurückzuführen ist. Da bei der gewählten Scherflächengröße die Klebefuge die einzuleitenden Lasten nicht bewältigen hätte können, wurde entschieden die Krafteinleitung auf die doppelte Fläche aufzuteilen. Um den Schubmodul des Materials zu bestimmen, müsste die Prüfkonfiguration bezüglich Scherfläche und der daraus resultierenden erwarteten Prüflast neu ausgelegt werden, um die Krafteinleitung wie in der Norm vorgesehen zu ermöglichen.



**Abb. 4.5** Position des Messsystems bei den Scherprüfkörpern

## KAPITEL 5: ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Im Hochbau kommt es häufig vor, dass tragende Strukturen, meist aufgrund von gebäudetechnischen Leitungen, mit Durchbrüchen versehen werden. Dabei führt nicht nur die Querschnittsreduktion zu einer Verminderung der Tragfähigkeit. Durch Spannungsumlagerungen im Bereich des Durchbruches treten neben erhöhten Schubspannungen auch zusätzliche, quer zur Faser wirkende Kräfte auf. Aufgrund der sehr geringen Tragfähigkeit von Holz im Winkel von  $90^\circ$  zur Faser, bedürfen insbesondere tragende Elemente aus diesem Werkstoff einer besonderen Verstärkung.

In der aktuellen Version des Eurocode 5 (EN 1995-1-1:2015) finden sich keine Angaben zur Bemessung von durchbrochenen Trägern. Im österreichischen nationalen Anhang hingegen (ÖNORM B 1995-1-1:2015) sind Formeln zum Nachweis von Durchbrüchen, sowie zur Bemessung von zwei verschiedenen Verstärkungsvarianten enthalten. Gültige Verstärkungsmaßnahmen sind dabei laut Norm die Verwendung von Schrauben oder eingeklebten Gewindestangen im Winkel von  $90^\circ$  zur Faser am Durchbruchrand, sowie der Einsatz von außen aufgeklebten Holzwerkstoffplatten im Durchbruchsbereich.

Im Rahmen dieser Masterarbeit wurde das Verhalten von unterschiedlich verstärkten, runden Durchbrüchen in dünnwandigen Trägern aus Furnierschicht- und Furniersperrholz versuchstechnisch untersucht. Hierfür wurden Dreipunkt-Biegeversuche an insgesamt 16 Prüfkörpern durchgeführt, welche in 6 verschiedene Serien eingeteilt wurden. Die Art der Verstärkung wurde zwischen den jeweiligen Prüferien variiert, Abmessungen und Durchbruchsdurchmesser ( $h_d = 0,5 * h$ ) blieben konstant. Dabei war je Serie eine Anzahl von 3 Trägern vorgesehen. Ein einzelner Reserveträger bildete die Prüferie R. Die Prüfkfiguration wurde in Anlehnung an Gehri (2014) gewählt und für die vorliegenden Randbedingungen adaptiert. Diese Konfiguration fand bereits bei ähnlichen Versuchen mit Brettschichtholzträgern Anwendung (vgl. Dröscher et al., 2016).

Die Referenzserie A wurde **ohne Durchbruch** geprüft. Ziel einer Verstärkung ist es, die Tragfähigkeit eines undurchbrochenen Trägers soweit es geht wiederherzustellen. Serie A diente deshalb als Ausgangswert, um das Potenzial der unterschiedlichen Verstärkungsvarianten zu vergleichen. Der angestrebte Schubbruch konnte bei zwei von drei Prüfkörpern erreicht werden (zur Erklärung der Probleme bei Prüfkörper A2 siehe Kap. 2-3.1.1). Die Schubfestigkeit lag dabei mit  $f_{v,12,mean} = 7,1 \text{ N/mm}^2$  deutlich über den Kennwerten, welche aus Zulassungen vergleichbarer Produkte (Z-9.1-847, 2016) entnommen werden können. Um eine Aussage über die Schubsteifigkeit des durchbrochenen Trägerbereiches treffen zu können, wurde mit Hilfe eines Messkreuzes der Schubmodul bestimmt. Bei Serie A ergab sich als Schubmodul des reinen Holzes ein Wert von  $G_{xz,12} = 692 \text{ N/mm}^2$ , welcher wiederum höher lag, als in erwähnten Produktdatenblättern angegeben.

Serie B wurde mit **Vollgewindeschrauben im Winkel von  $45^\circ$  zur Faser** am Durchbruchrand verstärkt. Wie aus verschiedenen Veröffentlichungen hervorgeht, eignen sich innenliegende Metallstäbe, welche schräg zur Faser angeordnet sind, besser zur Verstärkung von Durchbrüchen, als jene im Winkel von  $90^\circ$  zur Faser, wie in dem nationalen Anhang der ÖNORM B 1995-1-1:2015 vorgesehen. Aus Platzmangel konnten in den dünnwandigen Furnierschichtholzträgern jedoch nur die querzugbeanspruchten Seiten des Durchbruches mit Schrauben verstärkt werden. Die entstehenden Querdrukkomponenten müssen vom Holz aufgenommen werden. Somit ergab sich eine Tragfähigkeit welche in etwa bei 66% der Referenzserie lag. Eine weitere Möglichkeit die verschiedenen Verstärkungsvarianten zu vergleichen bietet das Lastniveau, an welchem am Durchbruch die ersten Querspannungen auftreten. Da die Schrauben einen gewissen Mindestabstand zur Öffnung aufweisen müssen, ist ihr Einfluss auf die Spannungsspitzen

unmittelbar am Durchbruchrand gering. Die verstärkende Wirkung der Schrauben zeigte sich erst bei fortgeschrittenem Risswachstum, wenn der Riss bis zur Schraubenachse reichte. Die Ermittlung des Schubmoduls erfolgte im linear-elastischen Bereich. Da zu diesem Zeitpunkt die Schraube kaum einen Einfluss auf den Träger besaß, lag im Grunde der Schubmodul eines unverstärkten Durchbruches vor. Der Mittelwert des Schubmoduls lag bei 23% der Referenzserie und ist somit der niedrigste Wert im Gesamtvergleich.

Zur Verstärkung der Prüfkörper aus Serie C wurden auf Grundlage der ÖNORM B 1995-1-1:2015 **außen aufgeklebte Sperrholzplatten im Winkel von 90° zur Trägerachse** gewählt. Die Wahl der Plattenstärke begründet sich dabei an den Schichtdicken der in Serie E (aus Furniersperrholz) innen angeordneten Querlagen: die Querschnittsfläche des Holzes, welche quer zur Trägerachse ausgerichtet war sollte bei beiden Fällen dieselbe sein, um eine gewisse Vergleichbarkeit zu ermöglichen. Serie C erreichte im Gesamtvergleich das größte Verstärkungspotenzial aller durchbrochenen Serien. Im Mittel lag die Bruchlast bei etwa 70% von jener der Referenzserie. Dadurch dass die aufgeklebte Sperrholzplatte bis unmittelbar zum Durchbruchrand reichte und die Verklebung einen vollflächigen Verbund schaffte, konnten Spannungsspitzen an der Öffnung durch Umlagerungen von der Verstärkungsplatte aufgenommen werden. Das Niveau der Rissbildung wurde dadurch leicht gehoben. Auch der Schubmodul konnte etwas erhöht werden. Dieser erreichte mit etwa 33% der Referenzserie den zweithöchsten Wert aller betrachteten Verstärkungsvarianten.

Wie bereits erwähnt, hat die Neigung von innenliegenden, stabförmigen Verstärkungsmitteln einen erheblichen Einfluss auf deren Wirkungsweise. Aus diesem Grund wurde bei Serie D untersucht, wie sich mit aufgeklebten Sperrholzplatten verstärkte Durchbrüche verhalten, wenn man die Neigung dieser ändert. Die Prüfserie D wurde mit **außen aufgeklebten Sperrholzplatten im Winkel von 45° zur Trägerachse** verstärkt. Der Aufbau und die Plattenstärke war ident mit Serie C, lediglich die Decklagenorientierung in Bezug auf die Trägerachse wurde geändert. Die Tragfähigkeit lag dabei etwas unterhalb von Serie C, nämlich bei 66% des Referenzwertes. Eine deutliche Steigerung gab es hingegen bei den Lastniveaus der Erstrissbildung. Hierbei konnten die höchsten Werte aller Prüfkörper erreicht werden. Ähnliches zeigte sich auch bei der Ermittlung des Schubmoduls. Da die Faserorientierung des Sperrholzes in diesem Fall parallel zur Messeinrichtung verlief, konnte die Verzerrung des Durchbruchbereiches dermaßen verringert werden, dass ein Schubmodul von 40% des Referenzwertes ermittelt wurde.

Bei Serie E wurde der gesamte Träger aus **Furniersperrholz** produziert. Die Verstärkung des Durchbruches übernahmen somit die im Sperrholz innen angeordneten Querlagen. Diese Variante erreichte eine Tragfähigkeit von 67% des Referenzwertes. Die Lastniveaus an denen am Durchbruchrand die ersten Risse auftraten lagen im Gesamtvergleich an zweiter Stelle hinter der Serie D. Der Schubmodul im Bereich des Durchbruches war bei den Furniersperrholzträgern sehr gering und erreichte nur 25% des Vergleichswertes der Referenzserie A. Ein weiterer Nachteil der Furniersperrholzträger war ihre verminderte Biegetragfähigkeit. Die innenliegenden Querlagen besitzen in Trägerlängsrichtung eine zu vernachlässigende Biegefestigkeit. Dies führte dazu, dass die drei Querlagen zu je 3 mm nicht zur Berechnung der Biegespannungen herangezogen werden konnten und somit, bei gleichbleibender Gesamtbreite im Vergleich zu den anderen Prüfserien, zu einer fiktiven Querschnittsreduktion um etwa 22% führten. Aus diesem Grund trat bei Serie E Biegeversagen im Nettoquerschnitt des Durchbruches ein.

Bei dem einzelnen Reserveträger wurde ein **unverstärkter Durchbruch** geprüft. Das Schubversagen trat in diesem Fall bei einem Niveau von 41% der Referenzserie auf. Die ersten Risse am Durchbruchrand traten in etwa bei derselben Last auf, wie bei Serie B. Der Schubmodul des unverstärkten Durchbruches lag bei 24% des ungestörten Holzes und damit im Bereich von Serie B und Serie E.

Nach Abschluss der Biegeversuche wurden aus den unzerstörten Trägerhälften neue Prüfkörper gewonnen, um die Schubfestigkeit des Grundmaterials zu bestimmen. Hierfür wurde als Grundlage für die Prüfkonfiguration die ÖNORM EN 408:2012 gewählt, welche eine Lasteinleitung im Winkel von 14° zur Faser vorsieht. Insgesamt wurden Schubversuche an 24 Prüfkörpern bestehend aus Furnierschichtholz (gewonnen aus Serie A-D und Reserveträger R), sowie an 6 Prüfkörpern aus Furniersperrholz (hergestellt aus Prüfserie E) durchgeführt.

Die Auswertung der Versuche ergab eine Schubfestigkeit des Furnierschichtholzes, welche um 50%

höher lag, als in den Zulassungen vergleichbarer Produkte (Z-9.1-847, 2016) angegeben. Der Größeneffekt der beanspruchten Scherfläche wird dabei allerdings nicht berücksichtigt. Dabei beeinflusst dieser den Schubfestigkeitswert viel stärker als beispielsweise die Güteklasse des Holzes. Wendet man eine Formel zur Abschätzung der mittleren Schubfestigkeit in Abhängigkeit der Scherfläche an (vgl. Gehri, 2010), so ergibt sich eine Abweichung des erwarteten Wertes zum ermittelten Wert von lediglich 1%.

Ein nicht ganz so deutlicher Unterschied lässt sich bei den Prüfkörpern aus Furniersperrholz erkennen. Der ermittelte Schubfestigkeitswert ist aber immerhin noch um 35% höher als der Vergleichswert aus der Zulassung (Z-9.1-847, 2016). Anzumerken gilt in diesem Fall, dass die Schubfestigkeit bei der Prüfserie aus Furniersperrholz geringer war als bei Furnierschichtholz, obwohl eigentlich höhere Festigkeiten zu erwarten waren.

Die gewählte Versuchskonfiguration eignete sich nicht um den Schubmodul zu bestimmen.

## **Ausblick**

Mit den im Zusammenhang mit vorliegender Arbeit durchgeführten Versuchen konnte ein grober Überblick über verschiedene Arten zur Verstärkung von Durchbrüchen in dünnwandigen Trägern aus Furnierschichtholz gewonnen werden. Die Ergebnisse dienen hauptsächlich zur qualitativen Einschätzung der Verstärkungsmethoden. Alle getroffenen Aussagen und Vergleiche zwischen den einzelnen Serien gelten für die in dieser Arbeit angeführten Resultate aus den durchgeführten Prüfungen und der Auswertung. Um allgemein gültige Aussagen bezüglich Bemessung und Leistungsfähigkeit verschiedener Verstärkungsmethoden an durchbrochenen Trägern aus Furnierschichtholz treffen zu können, bedarf es weiterer Untersuchungen. Dabei ist es unbedingt notwendig, jede der hier angeführten Prüfserien getrennt zu betrachten, und verschiedene Randbedingungen innerhalb jeder Serie zu variieren. Zu den wichtigsten Parametern, welche einen erheblichen Einfluss auf das Verhalten eines Durchbruches haben, zählen unter anderem:

- Durchbruchsdurchmesser (besonders das Verhältnis von  $h_d/h$ )
- Trägerbreite
- Einwirkung (besonders das M/V-Verhältnis)

Außerdem kann die Art und Weise der Verstärkung selbst noch in verschiedenen Parametern variiert werden. Bei Serie B beispielsweise lässt sich die Neigung der Schrauben, bzw. der Schraubendurchmesser und in diesem Zusammenhang das Verhältnis von Schraubendurchmesser zu Trägerbreite variieren. Wenn auch optisch nicht sehr ansprechend, haben außen aufgeklebte Sperrholzplatten sicherlich das größte Verstärkungspotential. Am Beispiel dieser kann bei genaueren Untersuchungen die Stärke der Platten sowie deren Aufbau verändert werden. Einen sehr interessanten und bislang kaum beachteten Aspekt stellt die Decklagenorientierung der Sperrholzplatten in Bezug auf die Trägerachse dar. Wie sich bei den durchgeführten Versuchen gezeigt hat, konnte bei schräg aufgeklebten Platten wider Erwarten keine Verbesserung hinsichtlich der Tragfähigkeit gegenüber im Winkel von  $90^\circ$  zu Trägerachse aufgeklebten Platten festgestellt werden. Lediglich das Lastniveau der Erstrissbildung am Durchbruchrand lag deutlich höher. Um genauere Erkenntnisse über die Tragwirkung und den Effekt von außen aufgeklebten Sperrholzplatten mit einer Decklagenorientierung  $\neq 90^\circ$  zur Trägerachse zu erlangen, sind genauere Untersuchungen notwendig. Hierbei wäre es wichtig, das Verhalten von Furniersperrholzplatte bei Schubbeanspruchungen in einem Winkel zu Faser versuchstechnisch zu ermitteln. Dazu könnte die im Zuge dieser Arbeit verwendete Prüfkonfiguration verwendet werden. Die Faserorientierung des Prüfkörpers aus Sperrholz in Bezug zur Belastungsrichtung könnte dabei als variabler Parameter untersucht werden. Eine weitere, äußerlich nicht erkennbare und somit optisch ansprechende Methode der Verstärkung stellen die innenliegenden Querlagen der Furniersperrholzträger aus Serie E dar. Durch die Querlagen geht jedoch bei gleichbleibender Querschnittsbreite eine Reduktion der Biegetragfähigkeit einher. Dies ließe sich mit einer Verbreiterung des Gesamtquerschnittes kompensieren. Der Vorteil der Querlagen ist, dass eine zusätzliche Verstärkung des Durchbruches nicht notwendig ist. Um dieselbe Biegetragfähigkeit wie bei Furnierschichtholzträgern zu erhalten, wird allerdings mehr Querschnitt und somit mehr Holz benötigt. Genauere Untersuchungen bezüglich Wirtschaftlichkeit wären anzudenken.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass Durchbrüche im Ingenieurholzbau ein sehr komplexes Problem darstellen. Aktuell wird im Zuge der Überarbeitung des Eurocode 5 an der Implementierung eines Nachweiskonzeptes betreffend Durchbrüchen gearbeitet. In diesem Zusammenhang ist der Fokus auf geeignete und wirkungsvolle Verstärkungsmaßnahmen äußerst wichtig. So wäre eine Erweiterung der bislang verwendeten nationalen Anwendungsdokumente (in Österreich und Deutschland) um schräg angeordnete Schrauben durchaus sinnvoll. In Zuge dessen könnte, auf Grundlage von noch durchzuführenden Untersuchungen, auch die Einführung eines Nachweiskonzeptes betreffend schräg aufgeklebten Sperrholzplatten diskutiert werden. Wie sich in dieser Arbeit gezeigt hat, stellen auch innenliegende Verstärkungen in Form von Trägern aus Furniersperrholz eine gute Alternative zu den bislang üblichen Verstärkungsmethoden dar. Umfangreichere Untersuchungen diesbezüglich (auch zur Verwendung von Brettsperrholz bei großformatigen Trägern) könnten durchaus auch zu einer Implementierung dieses Konzeptes in eine zukünftige Norm führen.

## ANHANG A VERZEICHNISSE

### A-1 Literaturverzeichnis

- Aicher & Höfflin, 2006. *Tragfähigkeit und Bemessung von Brettschichtholzträger mit runden Durchbrüchen - sicherheitsrelevante Modifikationen der Bemessungsverfahren nach Eurocode 5 und DIN 1052*, Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart: Forschungsschlussbericht DIBt.
- Aicher & Höfflin, 2009. *Glulam beams with holes reinforced by steel bars*. Stuttgart, MPA University of Stuttgart.
- Aicher, Höfflin & Reinhardt, 2007. Runde Durchbrüche in BSH-Trägern - Teil 2 - Tragfähigkeit und Bemessung. *Ernst & Sohn Bautechnik* 84 Heft 12.
- Aicher, S. & Höfflin, L., 2004. *New Design Model for Round Holes in Glulam Beams*, Stuttgart: MPA University of Stuttgart.
- Ardalany, M., Fragiacomio, M., Carradine, D. & Moss, P., 2013. Experimental behavior of Laminated Veneer Lumber (LVL) joists with holes and different methods of reinforcement. *Engineering Structures*, Band 56, pp. 2154-2164.
- Becker, R. & Zimmer, D., 2014. *Der Becker: Formholz Kompendium*. 3. Auflage Hrsg. s.l.:Bruns Druckwelt GmbH & Co KG.
- Carling, O. et al., 2001. *Nordic Glulam Handbook*. Stockholm: Svenstkt trä.
- Dröscher, J., Schickhofer, G. & Augustin, M., 2016. *Durchbrüche in Tragstrukturen aus BSH und BSP*, TU Graz: lignum, holz.bau forschungs gmbh.
- Dröscher, J., Schickhofer, G. & Augustin, M., 2016. *Prüftechnische Untersuchung unterschiedlicher Verstärkungsmethoden für Träger mit großen runden Durchbrüchen*, Graz: lignum, holz.bau forschungs gmbh.
- Ehrhart, T., 2014. *Materialbezogene Einflussparameter auf die Rollschubeigenschaften in Hinblick auf Brettspertholz*, Graz: Institut für Holzbau und Holztechnologie TU Graz.
- Gehri, 2010. *Shear problems in timber engineering - analysis and solutions*. Italy, WCTE 2010.
- Gehri, E., 2014. Tragmodell - Durchbruch mit GSA-Verstärkung.
- Kollmann, F., 1951. *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe - Erster Band*. 2. Auflage Hrsg. s.l.:Springer-Verlag.
- Kollmann, F., 1955. *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe - Zweiter Band*. 2. Auflage Hrsg. s.l.:Springer Verlag.
- Kollmann, F., 1962. *Furniere, Lagenhölzer und Tischlerplatten. Rohstoffe, Herstellung, Plankosten, Qualitätskontrolle usw.*. Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Larsen, H. J., 2011. Stress around holes in beams. *CIB-W18 Timber Structures Essay 3.1*.
- MetsäWood, 2014. *Ich bin Kerto*, Bremen: Metsä Wood Deutschland GMBH.
- Niemz, P., 1993. *Pysik des Holzes und der Holzwerkstoffe*. s.l.:DRW-Verlag.
- Schickhofer, G., 2006. *Holzbau - Nachweisführungen für Konstruktionen in Holz*, Graz: Institut für Holzbau und Holztechnologie, TU Graz.
- Schickhofer, G., 2006. *Holzbau, Der Roh- und Werkstoff Holz*, Graz: Institut für Holzbau und Holztechnologie TU Graz.
- Schwabl, E., 2016. *Kombinierte Nutzung von Fichtenstarkholz zur Schäl furnier- und Schnittholzerzeugung*, Graz: Institut für Holzbau und Holztechnologie TU Graz.

Tapia & Aicher, 2016. *Holes in glulam - orientation and design of internal reinforcement*. WCTE 2016 Vienna, s.n.

Wagenführ, A. et al., 2011. *Furnier im Innenausbau, Definition - Eigenschaften - Verarbeitung - Anwendungsbeispiele*, Dresden: Initiative Furnier + Natur e.V. (IFN).

## A-2 Normen und Zulassungen

ÖNORM EN 14279:2009 *Furnierschichtholz (LVL) - Definitionen, Klassifizierung und Spezifikationen*

ÖNORM EN 313-2:2000 *Sperrholz – Klassifizierung und Terminologie*

ÖNORM EN 14374:2004 *Holzbauwerke - Furnierschichtholz (LVL) – Anforderungen*

ÖNORM B 1995-1-1:2015 *Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau*

ÖNORM EN 14080:2013 *Holzbauwerke — Brettschichtholz und Balkenschichtholz — Anforderungen*

DIN 1052:2008 *Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken – Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau*

DIN EN 1194:1999 *Holzbauwerke - Brettschichtholz - Festigkeitsklassen und Bestimmung charakteristischer Werte*

SIA 265:2012 *Holzbau*

EN 14080:2013 *Timber structures – Glued laminated timber and glued solid timber – Requirements*

EN 384:2016 *Bauholz für tragende Zwecke - Bestimmung charakteristischer Werte für mechanische Eigenschaften und Rohdichte*

ÖNORM EN 323:2005 *Holzwerkstoffe - Bestimmung der Rohdichte*

ÖNORM 789:2005 *Holzbauwerke - Prüfverfahren - Bestimmung der mechanischen Eigenschaften von Holzwerkstoffen*

ÖNORM EN 408:2012 *Holzbauwerke - Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz - Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften*

ÖNORM EN 14358:2016 *Holzbauwerke – Berechnung und Kontrolle charakteristischer Werte*

Z-9.1-100 (2016) *Zusammengesetzte Bauteile aus Furnierschichtholz "Kerto S" und "Kerto Q"*

Z-9.1-847 (2016) *Furnierschichtholz "Kerto-S" und "Kerto-Q" nach EN 14374*

Z-9.1-607 (2014) *1K-PUR-Klebstoff PURBOND HB 181 für die Herstellung verklebter tragender Holzbauteile*

## A-3 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1	Darstellung der hierarchischen Ebenen des Holzaufbaus (University of Canterbury, 1996; Zeichnung von Mark Harrington).....	1
Abb. 1.2	Querschnitt einer vierjährigen Kiefer mit Bast „b“, Borke „br“, Frühholz „f“, Harzkanal „h“, Jahrringgrenze „j“, Kambium „k“, Mark „m“, Markstrahl „ms“, Spätholz „s“ (Kollmann, 1951).....	2
Abb. 1.3	Dreidimensionale Darstellung des Holzkörpers, des Kambium und des Basts am Beispiel der Lärche (Schickhofer, 2006) .....	4
Abb. 1.4	Zellwandmodell (Zimmer & Sell, 1997).....	7
Abb. 1.5	Übersicht zur Einteilung der Furnierarten nach DIN 68330.....	8
Abb. 1.6	Übersicht über die einzelnen Prozesse der Furnierherstellung am Beispiel von Schäl furnieren (Becker & Zimmer, 2014).....	8
Abb. 1.7	Vergrößerte Ansicht eines Schäl messers mit loser Druckleiste (links) und angedrückter Druckleiste (rechts) beim Schälen eines 7,9 mm starken Gelbbirkenfurniers (Kollmann, 1955) .....	10
Abb. 1.8	Übersicht über verschiedene Schäl methoden: Rundschäl en (o.l.), Stay-Log-Schäl en (o.r), Riftschäl en (u.l) und Aus-dem-Herzen-Schäl en (u.r.) (Wagenführ, et al., 2011)..	11
Abb. 1.9	Übersicht über verschiedene Messer methoden: Flachmessern (o.l), Echt-Quartier-Messern (o.r.), Faux-Quartier-Messern (u.l) und Flach-Quartier-Messern (u.r.) (Wagenführ, et al., 2011).....	12
Abb. 1.10	Herstellungsprozess von Kerto (MetsäWood, 2014).....	14
Abb. 1.11	Lage und Vorzeichen der Spannungen senkrecht zur Faserrichtung bei a) $M/V = 1,5 \cdot h$ und reiner Momentenbelastung b) $M/V = \infty$ mit einer Durchbruchgröße von $d/h = 0,4$ (Aicher & Höfflin, 2004).....	16
Abb. 1.12	Darstellung der Spannungsverteilung senkrecht zur Faser an den meistbeanspruchten Stellen am Durchbruchrand bei a) $M/V = <$ und b) $M/V = \infty$ (Aicher & Höfflin, 2004).....	17
Abb. 1.13	Modellierungsvorschlag für rechteckige und runde Durchbrüche aus den Entwürfen zu EC5 (Aicher & Höfflin, 2004) .....	17
Abb. 1.14	Geometrische Vorgaben laut ÖNORM B 1995-1-1:2015 .....	18
Abb. 1.15	Lineare Spannungsverteilung am Durchbruchrand laut ÖNORM B 1995-1-1:2015....	18
Abb. 1.16	Darstellung der Schädigungsentwicklung am Durchbruchrand, Anriss und Rissfortschritt in Querschnittsebene (links), Durchriss mit beginnendem Rissfortschritt in Trägerlängsrichtung (mitte), weiterer Rissfortschritt in Trägerlängsrichtung bis zum Versagen bei Höchstlast (rechts) (Aicher, et al., 2007) ...	25
Abb. 1.17	Darstellung der Querkrafttragfähigkeit von BSH-Trägern mit verschiedenen Durchbruchgrößen am Beispiel eines Träger mit Querschnittshöhe $h = 500 \text{ mm}$ (links) im Vergleich zu einem Träger mit $h = 2000 \text{ mm}$ .....	25
Abb. 1.18	Seitlich aufgeklebte Holzwerkstoffplatten laut ÖNORM B 1995-1-1:2015 .....	27
Abb. 1.19	Eingeklebte Stahlstäbe laut ÖNORM B 1995-1-1:2015.....	28
Abb. 1.20	Schematische Darstellung der Querkzugspannungen am unverstärkten Durchbruch (links) sowie mit senkrecht angeordneten Verstärkungsstäben (rechts) (Aicher & Höfflin, 2009) .....	28
Abb. 1.21	Schematische Darstellung der Versuchskonfiguration (Aicher & Höfflin, 2009).....	29
Abb. 1.22	Querkzugspannungen bei vertikal (links) und schräg (rechts) angeordneten Verstärkungen (Dröscher, et al., 2016).....	30
Abb. 1.23	Skizze zum Berechnungsmodell nach Gehri (2014) (Dröscher, et al., 2016).....	31

Abb. 1.24	Geometrie des 3D-Modells (links) und Anordnung der Verstärkung (rechts) (Tapia & Aicher, 2016).....	32
Abb. 1.25	Darstellung der Querspannungen in Ebene „plane 2“ (siehe Abb. 1.24 rechts) mit einer Neigung der Verstärkungsstäbe von 0° (links) sowie einer Neigung von 45° (rechts) im Verhältnis zum unverstärkten Träger (Tapia & Aicher, 2016).....	32
Abb. 1.26	Darstellung der Schubspannungen in Ebene „plane 2“ (Abb. 1.24 rechts) mit einer Neigung der Verstärkungsstäbe von 0° (links) sowie einer Neigung von 45° (rechts) im Verhältnis zum unverstärkten Träger (Tapia & Aicher, 2016).....	33
Abb. 1.27	Axialkraft längs des Stabes mit einem Durchmesser von $d_r = 18 \text{ mm}$ bei unterschiedlichen Neigungswinkeln zwischen $\beta = 0^\circ$ und $\beta = 45^\circ$ (wobei $\beta = 0^\circ$ entspricht einem Winkel von $90^\circ$ zur Faserrichtung (Tapia & Aicher, 2016).....	33
Abb. 1.28	Darstellung der Integrationsgrenzen zur Berechnung der Axialkraft in den Verstärkungsstäben (links) und der vergrößerten projizierten Querschnittsfläche an der Rissebene eines schrägen Stabes (Tapia & Aicher, 2016).....	35
Abb. 1.29	Versuchskonfiguration des Dreipunkt-Biegeversuches (links) und des Vierpunkt-Biegeversuches (rechts) (Ardalany, et al., 2013).....	35
Abb. 1.30	Schematische Darstellung der vertikalen und schrägen Schraubverstärkung (Ardalany, et al., 2013).....	36
Abb. 1.31	Schematische Darstellung der eingeklebten Gewindestangen (Ardalany, et al., 2013).....	36
Abb. 1.32	Schematische Darstellung der außen aufgeklebten Sperrholzplatten (Ardalany, et al., 2013).....	37
Abb. 1.33	Schematische Darstellung der angenagelten Metallplatten (Ardalany, et al., 2013).....	37
Abb. 1.34	Darstellung der Lastkapazität unterschiedlicher Verstärkungsmaßnahmen (Ardalany, et al., 2013).....	39
Abb. 2.1	Darstellung der Stelle zur Prüfkörperentnahme (2) aus einem Bauteil (1) laut EN 13183-1:2004.....	41
Abb. 2.2	Furnierpresse „Langzauner“ LZT 160-SF.....	44
Abb. 2.3	Klebstoffauftragsmaschine während des Klebevorganges.....	44
Abb. 2.4	Langlochbohrmaschine (links) und Oberfräse (rechts).....	45
Abb. 2.5	Universalprüfmaschine mit dem Aufbau für die Durchbruchversuche.....	46
Abb. 2.6	Dehnungsaufnehmer DD1 (links) und induktiver Wegaufnehmer (rechts) (Quelle: <a href="http://www.hbm.com">www.hbm.com</a> ).....	46
Abb. 2.7	Darrschrank.....	47
Abb. 2.8	Rohmaterial für die Herstellung der Prüfkörper.....	48
Abb. 2.9	Stapelung der mit Klebstoff benetzten Einzelfurniere (links) und Einlegen von jeweils vier Versuchskörpern in die Furnierpresse (rechts).....	49
Abb. 2.10	Händischer Klebstoffauftrag mit Zahnpachtel (links) und Einlegen der Probekörper in die Furnierpresse (rechts).....	51
Abb. 2.11	Zuschneiden der Prüfkörper auf die endgültige Form.....	52
Abb. 2.12	Schubprüfkonfiguration nach Gehri (2010).....	53
Abb. 2.13	Darstellung der Prüfkonfiguration.....	54
Abb. 2.14	Anordnung der Wegaufnehmer um die Verzerrung des Schubfeldes zu messen.....	55
Abb. 2.15	Prüfkonfiguration der Serie B mit Schraubverstärkung im Winkel von 45°.....	56
Abb. 2.16	Prüfkonfiguration der Serie C mit außen aufgeklebten Sperrholzplatten im Winkel von 90° zur Faserrichtung.....	56

Abb. 2.17	Prüfkonfiguration der Serie D mit außen aufgeklebten Sperrholzplatten im Winkel von 45° zur Faserrichtung.....	57
Abb. 2.18	Schematische Darstellung der Prüfkonfiguration laut ÖNORM EN 408:2012 (links) und Darstellung der gewählten Abmessungen (rechts) .....	58
Abb. 2.19	Ansicht der Nordseite mit Bezeichnung der Messbrücken.....	64
Abb. 2.20	Darstellung der Rohmessdaten des Prüfkörpers B1 im Kraft-Weg-Diagramm.....	68
Abb. 2.21	Korrigierte Kurve mit Markierungen an den Stellen, wo erste Quersugrisse am Durchbruchrand auftreten, an der zur Feldmitte gerichteten Seite oben und diagonal gegenüberliegend am unteren Bereich des Durchbruches .....	68
Abb. 2.22	Kraft-Zeit-Diagramm des Prüfkörpers B1 mit markiertem Bereich von 10% bis 40% von $F_{max}$ (schwarz punktiert) und gewähltem Auswertebereich (rote Begrenzungslinien).....	69
Abb. 2.23	Messwerte des Schubkreuzes des Prüfkörpers B1 mit markiertem Bereich von 10% bis 40% von $F_{max}$ (schwarz punktiert) und gewähltem Auswertebereich (rote Begrenzungslinien).....	70
Abb. 2.24	Darstellung der Steigungsänderung der Dehnungsmesser über die Zeit .....	70
Abb. 2.25	Bezeichnung des Messkreuzes laut ON EN 408:2012 .....	72
Abb. 2.26	Betrachtete Schnittufer zur Berechnung der Sekundärmomente (Dröscher, et al., 2016).....	75
Abb. 2.27	Schubspannungsverteilung im Prüfkörper (links) und Verlauf der Schubspannungen in der Mittelachse der Scherfuge (rechts) (Ehrhart, 2014).....	77
Abb. 3.1	Holzfeuchte $u$ der Durchbruchsprüfkörper [%].....	79
Abb. 3.2	Korrigierte Rohdichte $\rho_{12}$ der Durchbruchsprüfkörper [ $kg/m^3$ ].....	80
Abb. 3.3	Holzfeuchte $u$ der Scherprüfkörper [%].....	81
Abb. 3.4	Korrigierte Rohdichte $\rho_{12}$ der Durchbruchsprüfkörper [ $kg/m^3$ ].....	81
Abb. 3.5	Lastniveau beim Versagen $F_{max}$ [kN].....	83
Abb. 3.6	Korrigierte Schubspannung $\tau_{12}$ bezogen auf den Gesamtquerschnitt zum Zeitpunkt von $F_{max}$ [ $N/mm^2$ ].....	84
Abb. 3.7	Korrigierter Schubmodul $G_{xz,12}$ im Durchbruchsbereich [ $N/mm^2$ ] .....	84
Abb. 3.8	Schubbruch bei Prüfkörper A1 (oben) sowie bei Prüfkörper A3 (unten).....	86
Abb. 3.9	Kraft-Weg-Diagramm der Serie A und dem Reserveträger.....	87
Abb. 3.10	Quersugrisse bei B3 (oben links), kombiniertes Versagen aus Schub und Biegung im Nettoquerschnitt bei B1 (oben rechts), Biegeversagen im Nettoquerschnitt bei B2 (unten).....	88
Abb. 3.11	Kraft-Weg-Diagramm der Serie B.....	89
Abb. 3.12	Erstrisse im Trägerquerschnitt bei C3 (oben links), Aufreißen der Verstärkungsplatten bei C1 (oben rechts), Schubversagen bei C2 mit gleichzeitigem Biegeversagen im Durchbruchsbereich (unten links) und Biegebruch im Nettoquerschnitt bei C3 .....	90
Abb. 3.13	Kraft-Weg-Diagramm der Serie C.....	91
Abb. 3.14	Erstrissbildung am oberen Durchbruchrand bei D1 (oben links), Aufreißen der Verstärkungsplatten im Winkel von 45° bei D1 (oben rechts), Schubversagen bis zum Trägerende bei D3 (unten links) und Biegeversagen im Nettoquerschnitt bei D2 bei Weiterbelastung des Prüfkörpers nach dem Schubbruch (unten rechts).....	92
Abb. 3.15	Kraft-Weg-Diagramm der Serie D.....	93
Abb. 3.16	Erstrissbildung ausschließlich in Längslagen bei E2 (oben links), weiteres Risswachstum am oberen und unteren Durchbruchrand bei E1 (oben rechts),	

	Biegeversagen im Nettoquerschnitt des Durchbruches bei E1 (unten links) und E3 (unten rechts) an der zur Feldmitte zeigenden Durchbruchseite.....	94
Abb. 3.17	Kraft-Weg-Diagramm der Serie E.....	95
Abb. 3.18	Rissbildung bei Prüfkörper R1 (oben), Schubversagen auf Höhe des unteren Risses (unten links) und Biegeversagen im Nettoquerschnitt nach Weiterbelastung (unten rechts) .....	96
Abb. 3.19	Scherbrüche bei den Prüfkörpern A1bX (oben links), B1b (oben rechts), C1b (unten rechts) und den nicht trennbaren B3b (unten links).....	98
Abb. 3.20	Versagen der Klebefuge zur Krafeinleitungslasche bei A3b (oben links), Abscheren des Holzes in Längsrichtung bei B1a (oben rechts) und C2b (unten links), Versagen der Klebefuge zwischen den Furnieren bei D1bX (unten links).....	99
Abb. 3.21	Kraft-Weg-Diagramm der Probekörper aus Furnierschichtholz.....	101
Abb. 3.22	Rollschubversagen bei E1a (oben links), Schubbruch mit erkennbarem „Einhängen“ der Querlagen bei E2a (oben rechts), E2b (unten links) und E3b (unten rechts).....	102
Abb. 3.23	Kraft-Weg-Diagramm der Probekörper aus Furniersperrholz.....	103
Abb. 4.1	Maximalkraft sowie Lastniveaus der Erstrissbildung am oberen und unteren Durchbruchrand als Serienmittelwerte.....	105
Abb. 4.2	Maximalkraft sowie Lastniveaus der Erstrissbildung am oberen und unteren Durchbruchrand jedes einzelnen Prüfkörpers .....	106
Abb. 4.3	Schubfestigkeit in Abhängigkeit der Scherfläche (Gehri, 2010).....	107
Abb. 4.4	Richtwerte zur Vordimensionierung außenliegender Verstärkungsplatten aus Buche oder Birke aus dem Glulam Handbook (Carling, et al., 2001) .....	110
Abb. 4.5	Position des Messsystems bei den Scherprüfkörpern .....	112

## A-4 Tabellenverzeichnis

Tab. 1.1	Anordnung, Bezeichnung und Funktion unterschiedlicher Nadelholzzellen (Schickhofer, 2006) .....	5
Tab. 1.2	Anordnung, Bezeichnung und Funktion unterschiedlicher Laubholzzellen (Schickhofer, 2006) .....	6
Tab. 1.3	Produzierte Schichtaufbauten von Kerto-Q mit Plattenstärke „t“, Anzahl aller Furnierschichten „m“, Anzahl der Querlagen „n“ aus der Zulassung Z-9.1-847 (2016).....	14
Tab. 1.4	Charakteristische Festigkeits- und Steifigkeitskennwerte aller Kerto-Produkte gemäß der Leistungserklärung des Herstellers laut Zulassung Z-9.1-847 (2016) .....	15
Tab. 1.5	Spannungsformbeiwert $k_{dis}$ in Abhängigkeit vom Belastungsverhältnis und Trägerkrümmung (Aicher, et al., 2007).....	24
Tab. 2.1	Materialkenngrößen aus der Kerto S-Zulassung und die dazu errechneten Mittelwerte.....	59
Tab. 2.2	Materialkenngrößen aus der Kerto Q-Zulassung und die dazu errechneten Mittelwerte.....	60
Tab. 2.3	Exemplarische Darstellung des n-Ziffern-Verfahrens zur Bestimmung des Flächenträgheitsmomente am Beispiel des Querschnittes in Durchbruchmitte bei Prüfkörper D1 .....	76
Tab. 3.1	Holzfeuchtigkeit $u$ [%], gemessene Rohdichte sowie korrigierte Rohdichte [ $kg/m^3$ ] der einzelnen Prüfkörper.....	80
Tab. 3.2	Holzfeuchtigkeit $u$ [%], gemessene Rohdichte sowie korrigierte Rohdichte [ $kg/m^3$ ] der einzelnen Prüfkörper bei den Scherversuchen.....	82
Tab. 3.3	Bruchursache jedes einzelnen Prüfkörpers .....	85
Tab. 3.4	Bruchlasten mit dazugehörigen Verformungen von Serie A und dem Reserveprüfkörper R1, sowie Lastniveaus der Erstrissbildung .....	87
Tab. 3.5	Ergebnistabelle Serie A .....	87
Tab. 3.6	Bruchlasten mit dazugehörigen Verformungen und Lastniveaus der Erstrissbildung von Prüfserie B .....	89
Tab. 3.7	Ergebnistabelle Serie B.....	89
Tab. 3.8	Bruchlasten mit dazugehörigen Verformungen und Lastniveaus der Erstrissbildung von Prüfserie C .....	91
Tab. 3.9	Ergebnistabelle Serie C.....	91
Tab. 3.10	Bruchlasten mit dazugehörigen Verformungen und Lastniveaus der Erstrissbildung von Prüfserie D .....	93
Tab. 3.11	Ergebnistabelle Serie D .....	93
Tab. 3.12	Bruchlasten mit dazugehörigen Verformungen und Lastniveaus der Erstrissbildung von Prüfserie E .....	95
Tab. 3.13	Ergebnistabelle Serie E.....	95
Tab. 3.14	Ergebnistabelle Reserveprüfkörper R1 .....	97
Tab. 3.15	Bruchlast, Schubfestigkeit und Schubmodul der Probekörper aus Furnierschichtholz	100
Tab. 3.16	Bruchlast, Schubfestigkeit und Schubmodul der Probekörper aus Furniersperrholz ...	103

Dies ist eine Veröffentlichung des

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

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

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

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

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

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

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

Nummerierungssystematik der Schriftenreihe

S – Skripten, Vorlesungsunterlagen | F – Forschungsberichte  
V – Vorträge, Tagungen | M – Masterarbeiten

Institutskennzahl:

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

Fortlaufende Nummer pro Reihe und Institut / Jahreszahl