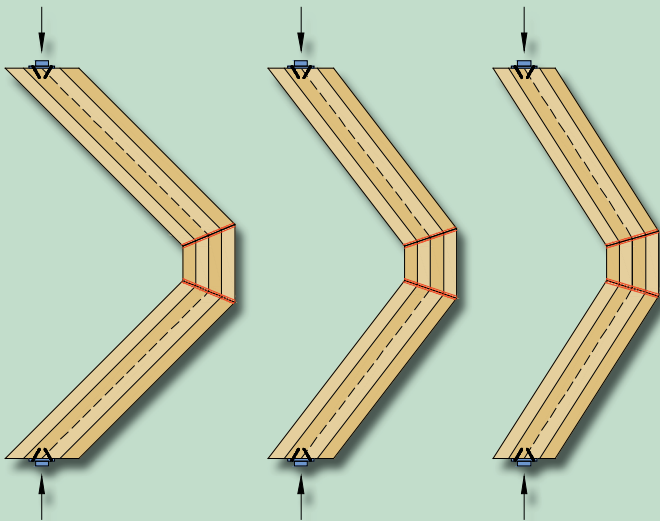


H. J. Blaß  
M. Flaig

## Keilgezinkte Rahmenecken und Satteldachträger aus Brettsperrholz





H. J. Blaß, M. Flaig

**Keilgezinkte Rahmenecken und  
Satteldachträger aus Brettsperrholz**

Titelbild: Keilgezinkte Rahmenecken aus Brettsperrholz

**BAND 29**

Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau

---

Herausgeber  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Holzbau und Baukonstruktionen  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hans Joachim Blaß

# Keilgezinkte Rahmenecken und Satteldachträger aus Brettsperrholz

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsgemeinschaften AiF unter dem Förderkennzeichen KF2007008HF2 gefördert.

H. J. Blaß  
M. Flaig

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Holzbau und Baukonstruktionen

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



Forschungsberichte, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften, 2015

## Hinweis

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

## Impressum



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
KIT Scientific Publishing  
Straße am Forum 2  
D-76131 Karlsruhe

KIT Scientific Publishing is a registered trademark of Karlsruhe  
Institute of Technology. Reprint using the book cover is not allowed.

[www.ksp.kit.edu](http://www.ksp.kit.edu)



*This document – excluding the cover – is licensed under the  
Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 DE License  
(CC BY-SA 3.0 DE): <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/de/>*



*The cover page is licensed under the Creative Commons  
Attribution-No Derivatives 3.0 DE License (CC BY-ND 3.0 DE):  
<http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/de/>*

Print on Demand 2015

ISSN 1860-093X

ISBN 978-3-7315-0381-1

DOI 10.5445/KSP/1000047039







# Vorwort

Im vorliegenden Bericht sind die Ergebnisse der im Rahmen des Projektes *„Entwicklung eines Verfahrens zur Herstellung großer Satteldachträger und Dreigelenkrahmen aus Brettsperrholz mittels Keilverzinkung“* durchgeführten Forschungsarbeiten zusammengefasst. Ziel des Forschungsvorhabens war es, die zur Herstellung und Bemessung von Satteldachträgern und Rahmenecken aus Brettsperrholz erforderlichen Kenntnisse zu erlangen und damit die Grundlage für eine baurechtliche Regelung zu schaffen. Hierzu wurden insgesamt mehr als 900 Versuche durchgeführt und ein Rechenmodell für die numerische Simulation der Tragfähigkeit von Universal-Keilzinkenverbindungen in Brettsperrholz entwickelt.

Das Forschungsvorhaben wurde von Holzbau und Baukonstruktionen des Karlsruher Instituts für Technologie und der W. u. J. Derix GmbH & CO in Kooperation durchgeführt. Die Entwicklung der Herstellungsverfahren und die Herstellung der Prüfkörper unterlagen der Firma Derix. Die Planung, Durchführung und Auswertung der Versuche sowie die Entwicklung eines Programmes für die numerische Simulation von Tragfähigkeitsversuchen und die Herleitung von Bemessungsansätzen erfolgten am Karlsruher Institut für Technologie durch Herrn Dr.-Ing. Marcus Flaig. Für die Vorbereitung und den Aufbau der Versuche sowie die Einrichtung der Messtechnik waren die Mitarbeiter des Karl-Möhler-HolzbauLaboratoriums verantwortlich.

Allen Beteiligten ist für ihre Mitarbeit zu danken.

Die Verfasser



# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Universal-Keilzinkenverbindung.....	5
2.1	Ausgangssituation.....	5
2.2	Keilzinkenprofil für Brettsperrholz.....	8
3	Experimentelle Untersuchungen .....	11
3.1	Übersicht.....	11
3.2	Herstellung und Abmessungen der Prüfkörper.....	13
3.3	Druckversuche mit geraden Brettsperrholzträgern .....	20
3.4	Biegeversuche mit geraden Brettsperrholzträgern.....	31
3.5	Biegeversuche mit geraden Bretttschichtholzträgern.....	48
3.6	Biegeversuche mit Brettsperrholz-Satteldachträgern.....	55
3.7	Versuche mit Brettsperrholz-Rahmenecken .....	65
4	Numerische Simulation .....	81
4.1	FE-Modell.....	81
4.2	Simulationsprogramm .....	90
4.3	Versagenskriterium.....	92
4.4	Versuche zur Ermittlung von Regressionsgleichungen .....	94
4.5	Durchgeführte Simulationsrechnungen .....	117
5	Bemessungsvorschlag.....	123
5.1	Brettsperrholzträger mit gerader Stabachse.....	123
5.2	Brettsperrholzträger mit geknickter Stabachse .....	128
6	Zusammenfassung und Ausblick .....	135
	Literatur.....	137
	Anlagen.....	141



# Formelzeichen

## Buchstaben und Abkürzungen

$a$	Abstand
$b$	Breite; Brett-/Lamellenbreite
$f$	Festigkeit
$h$	Höhe
$k$	Faktor, Beiwert
$l$	Stützweite, Länge
$n$	Anzahl; Anzahl der Brettlagen innerhalb der Elementdicke
$m$	Anzahl der Lamellen innerhalb von Längslagen
$r$	Korrelationskoeffizient
$s$	Zinkenspiel, Standardabweichung
$t$	Dicke, Lagendicke
$u$	Verschiebung, Durchbiegung
$A$	Fläche
$E$	Elastizitätsmodul
$F$	Kraft
$G$	Schubmodul
$I$	Flächenträgheitsmoment
$L$	Länge
$LFJ$	Universal-Keilzinkenverbindung (Large Finger Joint)
$M$	Moment
$N$	Normalkraft
$V$	Querkraft
$W$	Widerstandsmoment
$\Delta$	Differenz, Abstand
$\alpha$	Schnittwinkel
$\beta$	Öffnungs-, Neigungswinkel
$\nu$	Verschwächungsgrad
$\rho$	Rohdichte
$\sigma$	Normalspannung
$\tau$	Schubspannung
$COV$	Variationskoeffizient

*MAX* größter Wert  
*MEAN* Mittelwert  
*MIN* kleinster Wert  
*R<sup>2</sup>* Bestimmtheitsmaß

#### Indizes

BSP Brettsperrholz  
c Druck  
CA Kreuzungsfläche  
cross quer, Querlage  
d Bemessungswert  
dyn dynamisch, durch Schwingungsmessung ermittelt  
eff wirksam  
est Schätzwert, Vorhersagewert  
ges gesamt  
gross Bruttowert  
LFJ Universal-Keilzinken Verbindung  
k charakteristischer Wert  
KF Kontaktfuge  
lam Lamelle  
lok lokal  
long longitudinal, Längslage  
m Biegung  
max größter Wert  
mean Mittelwert  
min kleinster Wert  
net Nettowert  
r Randspannung  
R Rollschub, Residuum  
t Zug  
u feucht, Feuchtegehalt  
 $\alpha$  Winkel zur Faserrichtung  
0 in Faserrichtung der Längslagen  
90 rechtwinklig zur Faserrichtung der Längslagen  
05 5%-Quantil  
10-40 zwischen 10% und 40% der Bruchlast

# 1 Einleitung

Hallentragwerke mit Spannweiten zwischen 20 m und 40 m sind eines der wichtigsten Einsatzgebiete des Ingenieurholzbaus. Bei den genannten Spannweiten zählen Satteldachträger mit geraden oder gekrümmten Untergurten und Dreigelenkrahmen zu den am weitesten verbreiteten Trägerformen, die bislang weitgehend aus Brettschichtholz hergestellt werden. Die begrenzte Schub- und Querkzugfestigkeit von Brettschichtholz hat jedoch in der Vergangenheit zu zahlreichen Schäden an solchen Bauteilen geführt. Insbesondere bei Trägern mit sehr großen Abmessungen treten infolge der geringen Querkzug- und Schubfestigkeit von Brettschichtholz häufig Risse auf.

Der Rissempfindlichkeit des Brettschichtholzes wird heute mit aufwändigen Verstärkungen oder durch eine restriktive Begrenzung der schadensverursachenden Schub- und Querkzugspannungen begegnet. Beispiele hierfür sind die in aktuellen Bemessungsnormen geforderten Querkzugbewehrungen bei Satteldachträgern und die Reduzierung der Tragfähigkeit von querkzugbeanspruchten keilgezinkten Rahmenecken auf 20% des Wertes bei Querkdruckbeanspruchung.

Biegeträger aus Brettsperrholz weisen bei Querkzugbeanspruchung ein deutlich günstigeres Verhalten auf: In Plattenebene wirkende Querkzugspannungen können von den im Material vorhandenen Querlagen aufgenommen werden und die Anfälligkeit gegenüber Rissen ist sehr gering. Die Anwendungsmöglichkeiten von Biegeträgern aus Brettsperrholz für den Hallenbau sind derzeit jedoch stark eingeschränkt. Zum einen, weil die Produktionslängen in der Regel auf 16 m bis 18 m begrenzt sind, zum anderen, weil in Plattenebene beanspruchte Brettsperrholzträger, im Gegensatz zu Brettschichtholzträgern, nicht mit gekrümmter Achse hergestellt werden können. Um Brettsperrholzträger mit Spannweiten über 18 m herstellen zu können, sind daher einfach herzustellende Bauteilstöße mit hoher Biegetragfähigkeit erforderlich. Ermöglicht die gewählte Verbindung auch das Zusammenfügen von Brettsperrholzträgern unter Winkeln ungleich  $180^\circ$ , sind neben geraden Trägern mit Stützweiten über 18 m auch Satteldachträger und Rahmenecken aus Brettsperrholz realisierbar.

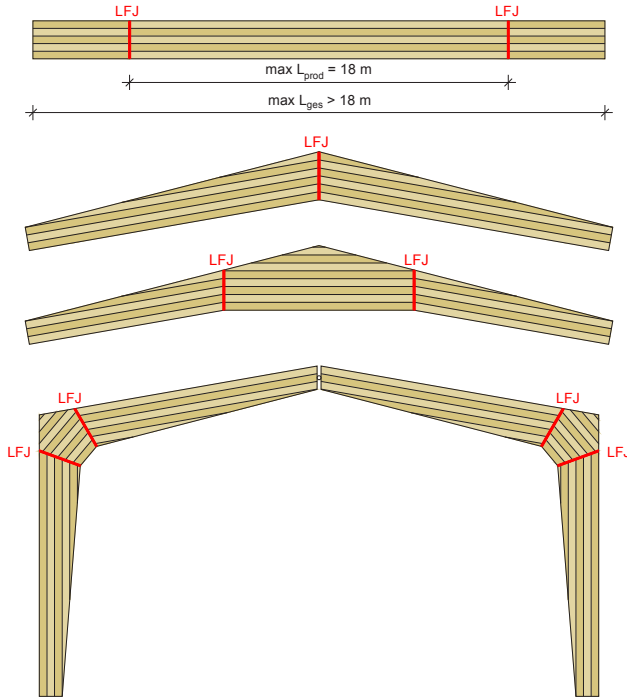


Bild 1-1: Durch den Einsatz von Universal-Keilzinkenverbindungen realisierbare Trägerabmessungen und Trägerformen

Für die Herstellung solcher Bauteilstöße in Brettsperrholzträgern erscheinen geklebte Universal-Keilzinkenverbindungen (engl. large finger joint, Abk. LFJ), wie sie in Brettschichtholz-Konstruktionen bereits verwendet werden, gut geeignet. Einige der wichtigsten Gründe hierfür sind:

- die hohe Tragfähigkeit von Universal-Keilzinkenverbindungen bezogen auf den Bruttoquerschnitt der verbundenen Bauteile,
- die Möglichkeit, Bauteile unter nahezu beliebigen Winkeln zusammenzufügen,
- die Herstellung der Verbindung im Rahmen des industriellen Fertigungsprozesses von Brettsperrholz.



Darüber hinaus kann, wegen der Ähnlichkeit der Werkstoffe, auf die langjährigen Erfahrungen mit Universal-Keilzinkenverbindungen in Brettschichtholz zurückgegriffen werden, beispielsweise bei der Abfolge von Herstellungsprozessen, der Auswahl geeigneter Klebstoffe und Pressverfahren und den erforderlichen Produktionsbedingungen. Nicht zuletzt kann in Betrieben, die bereits Universal-Keilzinkenverbindungen in Brettschichtholz herstellen, auf geschultes und qualifiziertes Personal zurückgegriffen werden. Trotz vieler Gemeinsamkeiten, weisen die beiden Werkstoffe Brettspertholz und Brettschichtholz jedoch erhebliche Unterschiede in Struktur und Tragverhalten auf. Die verfügbaren Regelungen für Universal-Keilzinkenverbindungen in Brettschichtholz, etwa für die Herstellung, Qualitätssicherung und Bemessung, können daher nicht ohne weiteres auf Universal-Keilzinkenverbindungen in Brettspertholz übertragen werden.

Ziel des Forschungsvorhabens war es, die technischen Grundlagen für die Herstellung und Bemessung von Brettspertholzträgern mit großer Spannweite sowie Satteldachträgern und Rahmenecken aus Brettspertholz zu schaffen. Hierzu sollte zunächst eine an den strukturellen Aufbau des Werkstoffes angepasste Universal-Keilzinkenverbindung entwickelt werden. Durch Versuche sollte dann die Tragfähigkeit der neu entwickelten Universal-Keilzinkenverbindung in geraden Brettspertholzträgern, Satteldachträgern und Rahmenecken ermittelt werden. Anhand der Versuchsergebnisse sollte dann ein in der Praxis anwendbares Bemessungsverfahren hergeleitet werden. Zusammen mit den im Rahmen früherer Forschungsarbeiten ermittelten Ansätzen für die Bemessung von in Plattenebene beanspruchten Brettspertholzträgern mit konstantem oder linear veränderlichem Querschnitt (Flaig 2013) wäre damit die Bemessung und Dimensionierung großer Satteldachträger und Dreigelenkrahmen aus Brettspertholz möglich.



## 2 Universal-Keilzinkenverbindung

### 2.1 Ausgangssituation

Universal-Keilzinkenverbindungen in Brettsper Holz werden herstellungsbedingt, wie in Brettschichtholz, parallel zur größeren Querschnittseite gefräst. Anders als bei Bauteilen aus Brettschichtholz, bei denen die einzelnen Brett lamellen flach im Querschnitt liegen und das Zinkenprofil in die breite Seite der einzelnen Brett lamellen gefräst wird, liegen bei Bauteilen aus Brettsper Holz die Lamellen in Plattenebene flach und kreuzweise gestapelt übereinander, sodass das Zinkenprofil in die Schmalseiten bzw. die Hirnholzflächen der Bretter gefräst wird.

#### 2.1.1 Verschwächungsgrad

Bei Biegeträgern aus Brettsper Holz sind die Lamellen der Längslagen stehend im Querschnitt angeordnet. Diese Anordnung der Lamellen und der strukturelle Aufbau von Brettsper Holz, mit in Dickenrichtung abwechselnd angeordneten Längs- und Querlagen, führen dazu, dass bei Universal-Keilzinkenverbindungen in Brettsper Holzträgern der in den einzelnen Lagen tatsächlich vorhandene Verschwächungsgrad des Keilzinkenprofils vom Verhältnis aus Lagendicke und Zinkenteilung und vom Lagenaufbau abhängig ist. Sind die Lagendicken von Längs- und Querlagen keine ganzzahligen Vielfachen der halben Zinkenteilung  $p$  des verwendeten Keilzinkenprofils, dann ist der Verschwächungsgrad in den einzelnen Lagen nicht gleich groß und kann, wegen der im Verhältnis zur Zinkenteilung  $p$  relativ geringen Dicke  $t_{\text{lam}}$  der einzelnen Brett lagen, deutlich höher sein als der nominelle Verschwächungsgrad des verwendeten Keilzinkenprofils.

Für das in EN 387 als Beispiel eines geeigneten Profils für Universal-Keilzinkenverbindungen in Brettschichtholz angegebene und in der Praxis häufig verwendete Profils 50-12-2 beträgt der nominelle Verschwächungsgrad  $2/12 = 0,167$ . Der in einem Bauteil tatsächlich vorhandene Verschwächungsgrad am Zinkengrund ergibt sich jedoch als Quotient aus der Summe der Zinken gründe  $n \cdot b_{\text{cut}}$  und der Bauteildicke  $t_{\text{gross}}$ .

$$v = \frac{n \cdot b_{\text{cut}}}{t} \quad (2-1)$$

Dabei ist  $b_{\text{cut}}$  Breite des Zinkengrundes des Keilzinkenprofils

$t$  Lamellen – /Bauteildicke

$n$  maximale Anzahl der Zinkengründe

innerhalb der Brettdicke  $t_{\text{lam}}$

$$n = \min \left\{ 1; \frac{1}{b_{\text{cut}}} \cdot \left( t_{\text{lam}} - \left\lfloor \frac{t_{\text{lam}}}{p} \right\rfloor \cdot p \right) \right\} + \left\lfloor \frac{t_{\text{lam}}}{p} \right\rfloor$$

mit  $p$  Zinkenteilung des Keilzinkenprofils

$\left\lfloor \frac{t_{\text{lam}}}{p} \right\rfloor$  ganzzahliger Teil des Quotienten  $t_{\text{lam}}/p$

Aus Gleichung (2-1) wird ersichtlich, dass nur für Bauteile, deren Dicke ein ganzzahliges Vielfaches des Zinkenabstandes  $p$  ist, der nominelle mit dem vorhandenen Verschwächungsgrad überein stimmt. Für alle anderen Fälle ist der vorhandene Verschwächungsgrad größer als der nominelle, wobei für Bauteile mit sehr großer Dicke der vorhandene Verschwächungsgrad stets gegen den nominellen Wert strebt. Bei kleinen Bauteildicken kann der Unterschied zwischen nominellem und tatsächlich vorhandenem Verschwächungsgrad jedoch erheblich sein. Für die in Brettsper Holz am häufigsten verwendeten Lamellendicken zwischen 20 mm und 60 mm kann bei Verwendung des Profils 50-12-2 der Verschwächungsgrad bis zu 0,231 anstelle 0,167 betragen (vgl. Tabelle 2-1).

Tabelle 2-1: maximaler Verschwächungsgrad  $v_{\text{max}}$  in Abhängigkeit der Lamellendicke  $t_{\text{lam}}$  für das Profil 50 – 12 - 2

$t_{\text{lam}}$	20	22	24	26	28
$v_{\text{max}}$	0,200	0,182	0,167	<b>0,231</b>	0,214
$t_{\text{lam}}$	30	32	34	36	38
$v_{\text{max}}$	0,200	0,188	0,176	0,167	0,211
$t_{\text{lam}}$	40	42	44	46	48
$v_{\text{max}}$	0,200	0,190	0,182	0,174	0,167
$t_{\text{lam}}$	50	52	54	56	58
$v_{\text{max}}$	0,200	0,192	0,185	0,179	0,172

## 2.1.2 Randzinken

Aus ästhetischen Gründen werden die äußersten Zinken häufig als Randzinken mit verbreitertem, rechtwinklig zur Bauteiloberfläche abgesetztem Zinkengrund ausgebildet, sodass an den Rändern der Keilzinkenverbindungen keine flach auslaufenden Zinken mit ausgefransten Spitzen entstehen. Die Dicke solcher Randzinken ergibt sich aus dem Abstand des letzten Zinkengrundes von der Bauteiloberfläche. Sie ist damit abhängig vom Quotienten aus der Bauteildicke  $t_{\text{gross}}$  und der Zinkenteilung  $p$ . Für symmetrische Universal-Keilzinkenverbindungen, bei denen jedes der beiden zu verbindenden Bauteile eine Randzinke und einen verbreiterten Zinkengrund erhält (siehe Bild 2-1), kann die Dicke der Randzinke in Abhängigkeit der Zinkenteilung und der Breite des Zinkengrundes beim gewählten Keilzinkenprofil berechnet werden. Aus Gleichung (2-2) wird ersichtlich, dass die Breite der Randzinke von der Bauteildicke  $t_{\text{gross}}$  abhängt, wenn diese kein ganzzahliges Vielfaches der Zinkenteilung ist.

$$t_{\text{RZ}} = \frac{1}{2} \cdot \left[ t_{\text{gross}} - \left( \left\lfloor \frac{t_{\text{gross}}}{p} \right\rfloor - 0,5 \right) \cdot p \right] + \frac{b_{\text{cut}}}{2} \quad (2-2)$$

Dabei ist  $t_{\text{RZ}}$  Dicke der Randzinke am Zinkengrund  
 $t_{\text{gross}}$  Gesamtdicke der BSP – Platte  
 $\left\lfloor t_{\text{gross}} / p \right\rfloor$  ganzzahliger Teil des Quotienten  $t_{\text{gross}} / p$

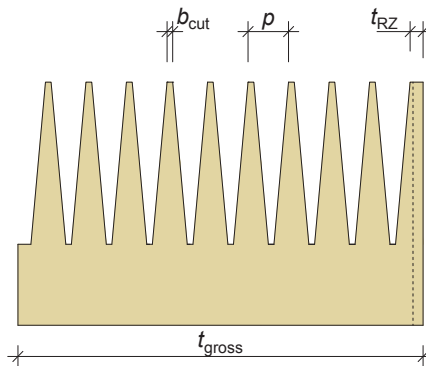


Bild 2-1: Universal-Keilzinkenverbindung mit Randzinke; Bezeichnungen

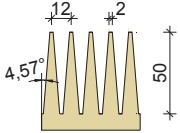
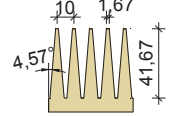
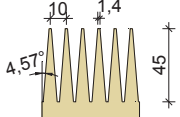
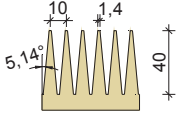
## 2.2 Keilzinkenprofil für Brettsperrholz

Um bei Universal-Keilzinkenverbindungen in Brettsperrholz einen vom Lagenaufbau unabhängigen Verschwächungsgrad und eine konstante Dicke der Randzinken zu erhalten, müssen Lagendicken und Zinkenteilung aufeinander abgestimmt werden. Um den Markt übersichtlicher zu gestalten, wird unter Brettsperrholzherstellern die Begrenzung der zur Herstellung von Brettsperrholz verwendeten Brettdicken auf Vielfache von 10 mm diskutiert. Diese Einschränkung wurde als Grundlage für die Entwicklung eines Universal-Keilzinkenprofils für Bauteile aus Brettsperrholz angenommen.

Ein modifiziertes Keilzinkenprofil mit einer Zinkenteilung von  $t = 10$  mm wurde in Anlehnung an das in EN 387 angegebene Profil 50-12-2 entworfen. Die gewählte Zinkenteilung liefert bei Verwendung von Brettlamellen, deren Dicke ein ganzzahliges Vielfaches von 5 mm ist, einen konstanten Verschwächungsgrad und eine konstante Randzinkendicke. Durch das Verkleinern der Zinkenteilung von 12 mm auf 10 mm ergibt sich, ausgehend vom Profil 50-12-2 und unter Beibehaltung aller Größenverhältnisse und Winkel, ein Profil 41,67-10-1,67. Auf der Grundlage dieses Profils wurden zwei Varianten mit ganzzahliger Zinkenlänge, 45 mm und 40 mm und einer Schnittbreite an der Zinkenspitze von 1,4 mm entworfen. Wegen der gedrungeneren Zinkenform und der vermeintlich größeren Robustheit der Zinken wurde entschieden, das Profil 40-10-1,4 im weiteren Verlauf des Forschungsvorhabens zu verwenden und ein entsprechendes Fräswerkzeug herstellen zu lassen.

Unter der Voraussetzung, dass für Längs- und Querlagen nur ganzzahlige Vielfache von 5 mm als Lagendicken verwendet werden, ergeben sich für das modifizierte Keilzinkenprofil 40-10-1,4 ein vom Lagenaufbau unabhängiger Verschwächungsgrad von 0,14 und eine konstante Randzinkendicke von  $(2,5 + 1,4/2) = 3,2$  mm. Der nominelle Verschwächungsgrad des neuen Profils ist mit 0,14 etwas geringer als beim Profil 50-12-2. Der Flankenwinkel hingegen ist mit  $5,14^\circ$  geringfügig größer als beim Profil 50-12-2: Der Wert liegt aber noch unter den Flankenwinkeln von Keilzinkenverbindungen in Brettlamellen, die bis zu  $6^\circ$  betragen. In Tabelle 2-2 sind die geometrischen Kenngrößen der betrachteten Keilzinkenprofile zusammengestellt.

Tabelle 2-2: betrachtete Profile für Universal-Keilzinkenverbindungen in Bauteilen aus Brettsperrholz

Profil		$\ell$ in mm	$p$ in mm	$b$ in mm	$p/\ell$ -	$\alpha$ in °	$\nu$ -
EN 387 50 – 12 – 2		50	12	2	0,24	4,57	0,167
VAR0 42 – 10 – 1,67		41,67	10	1,67	0,24	4,57	0,167
VAR1 45 – 10 – 1,4		45	10	1,4	0,22	4,57	0,140
VAR2 40 – 10 – 1,4		40	10	1,4	0,25	5,14	0,140
Es bedeuten:	$\ell_j$ Zinkenlänge $p$ Zinkenteilung $\alpha$ Flankenwinkel	$b_{cut}$ Breite des Zinkengrundes $p/\ell$ Zinkenschlantheit $\nu$ Verschwächungsgrad des Profils					

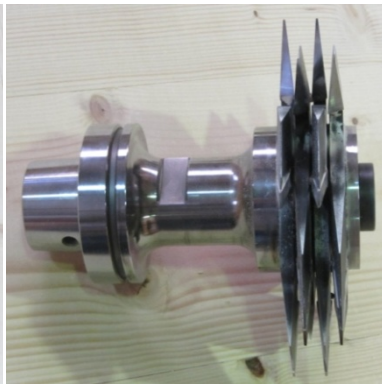
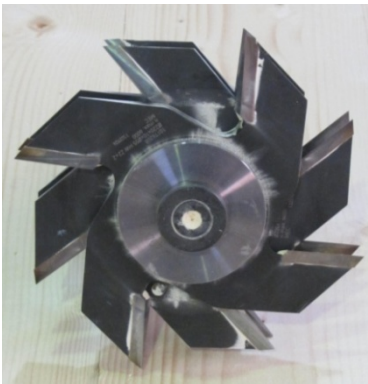


Bild 2-2: Fräs Werkzeug für das neu entwickelte Keilzinkenprofil 40-10-1,4





## 3 Experimentelle Untersuchungen

### 3.1 Übersicht

Ein wesentlicher Teil der im Rahmen des Forschungsvorhabens durchgeführten Forschungsarbeit war die experimentelle Ermittlung der Tragfähigkeit und Steifigkeit von Universal-Keilzinkenverbindungen in Brettsperrholzträgern durch Versuche an Prüfkörpern mit bauteilähnlichen Dimensionen. Neben den Versuchen in Bauteilgröße wurden Versuche an Einzellamellen mit Universal-Keilzinkenverbindung durchgeführt, um Eingangsdaten für ein Rechenmodell für die numerische Simulation der Tragfähigkeit von Brettsperrholzträgern mit Universal-Keilzinkenverbindungen zu ermitteln. Alle Versuche wurden an kalibrierten Prüfmaschinen nach DIN EN ISO 7500-1:2004-11 durchgeführt. Die Messung von Kräften und Verschiebungen erfolgte mit einer Messrate von 1 Hz.

Die Versuchsreihen mit Prüfkörpern in Bauteilgröße können in Versuche mit gerader Bauteilachse und Versuche mit geknickter Bauteilachse unterteilt werden. Die durchgeführten Versuchsreihen mit Brettsperrholzträgern mit gerader Bauteilachse umfassen Versuche zur Ermittlung der Druckfestigkeit und Drucksteifigkeit in Richtung der Längslagen, sowie Biegeversuche zur Ermittlung der Biegefestigkeit und der Biegesteifigkeit bei Beanspruchung in Plattenebene und rechtwinklig zur Plattenebene. Um die aus den Versuchsergebnissen ermittelten Festigkeiten und Steifigkeiten besser beurteilen zu können, wurden bei allen Versuchsreihen mit gerader Bauteilachse Referenzversuche mit Prüfkörpern ohne Universal-Keilzinkenverbindung durchgeführt. Zur Ermittlung der Tragfähigkeit des neu entwickelten Keilzinkenprofils in Brettschichtholz, wurden zehn Biegeversuche mit Brettschichtholzträgern mit Universal-Keilzinkenverbindung durchgeführt.

Die Tragfähigkeit von Bauteilen mit geknickter Bauteilachse wurde durch Biegeversuche mit Brettsperrholz-Satteldachträgern und Versuche mit Brettsperrholz-Rahmenecken ermittelt, wobei die Universal-Keilzinkenverbindung in den geprüften Satteldachträgern durch öffnende Momente,

in den Rahmenecken hingegen durch eine Kombination aus schließenden Momenten und Druck-Normalkräften beansprucht wurden. Sowohl bei den Satteldachträgern als auch bei den Rahmenecken wurde der Winkel zwischen den durch die Universal-Keilzinkenverbindungen gestoßenen Bauteil variiert. Damit konnte die Tragfähigkeit der Universal-Keilzinkenverbindung in Abhängigkeit des Winkels zwischen der Universal-Keilzinkenverbindung und einem rechtwinklig zur Bauteilachse verlaufenden Schnitt (= Schnittwinkel der Universal-Keilzinkenverbindung) ermittelt werden.

Bei den durchgeführten Zug-, Druck- und Biegeversuchen mit Universal-Keilzinkenverbindungen in Einzellamellen wurde der Schnittwinkel der Universal-Keilzinkenverbindungen ebenfalls variiert, sodass in den anhand der Versuchsergebnisse ermittelten Regressionsgleichungen der Zusammenhang zwischen dem Schnittwinkel und den mechanischen Eigenschaften der Universal-Keilzinkenverbindungen abgebildet werden konnte. Mit Hilfe des Rechenmodells kann dadurch die Tragfähigkeiten von Universal-Keilzinkenverbindungen mit Schnittwinkel im experimentell untersuchten Intervall zwischen 0 und 25° ermittelt werden.

*Tabelle 3-1: Übersicht der durchgeführten Versuchsreihen und Anzahl der Versuche*

Versuchsreihe		LFJ	REF
Brettsperrholzträger			
gerade Achse	Druck	15	15
	Biegung in Plattenebene	15	15
	Biegung rechtwinklig zur Plattenebene	2 x 10	2 x 10
geknickte Achse	Satteldachträger	3 x 5	
	Rahmenecken	3 x 5	
Brettschichtholzträger			
	Biegung hochkant	10	
Einzellamellen			
	Zug	256	
	Druck	256	
	Biegung	256	

## 3.2 Herstellung und Abmessungen der Prüfkörper

Die Herstellung der Brettsperrholzelemente, das Zuschneiden der Prüfkörper sowie das Fräsen und Verkleben der Universal-Keilzinkenverbindungen erfolgte, mit Ausnahme des Zuschnitts der Prüfkörper für die Versuche mit Einzellamellen, im Werk der Derix GmbH&Co.KG in Niederkrüchten. Zunächst wurden drei- bzw. sechslagige Brettsperrholzplatten gemäß den in ETA-11-0189 definierten Anforderungen hergestellt. Nach dem Aushärten des Klebstoffs wurden aus den Brettsperrholzplatten die einzelnen Prüfkörper bzw. deren Teile zugeschnitten. Anschließend wurden die Universal-Keilzinkenverbindungen gefräst und verklebt. Beim Verkleben wurde der Klebstoff von Hand mit einem Pinsel aufgetragen und mit Hilfe einer Holzschablone in Form des Zinkenprofils verteilt. Das Zusammenpressen der beiden Teile erfolgte mit Hilfe hydraulischer Pressen, die ebenfalls von Hand bedient wurden.



*Bild 3-1: Fräsen der Universal-Keilzinkenverbindung bei einer dreilagigen Brettsperrholzplatte*



*Bild 3-2: Verkleben der Universal-Keilzinkenverbindung bei einer dreilagigen Brettsperrholzplatte zur Herstellung von Lamellen-Zugprüfkörpern*

### 3.2.1 Lagenaufbau

Für die Lamellen der Prüfkörper wurden vorwiegend Bretter der Holzart Fichte (*Picea abies*) verwendet. In den Querlagen waren vereinzelt auch Bretter aus Kiefernholz (*Pinus sylvestris*) vorhanden. Gemäß den Angaben der Derix GmbH&Co.KG entsprach das verwendete Brettmaterial der Festigkeitsklasse C24 (Sortierklasse S10 nach DIN 4074, Brettsortierung). Für die Prüfkörper aller Versuchsreihen wurden insgesamt nur zwei unterschiedliche Lagenaufbauten verwendet: ein dreilagiger Aufbau mit zwei Längs- und einer dazwischen liegenden Querlage und ein sechslagiger Aufbau, der durch das Übereinanderlegen von zwei dreilagigen Aufbauten gebildet wurde. Für die Längslagen beider Aufbauten wurden 40 mm dicke Brettlamellen, für die Querlagen 20 mm dicke Brettlamellen verwendet. Sowohl beim drei- als auch beim sechslagigen Aufbau betrug damit der Anteil der Querlagen am Gesamtquerschnitt 20%. Die beiden Aufbauten wurden gewählt, da die Anordnung von Längs- und Querlagen symmetrisch zur Schwerebene des Gesamtquerschnittes ist und die Längslagen symmetrisch um die Querlagen herum angeordnet sind.

Aufgrund der zuletzt genannten Eigenschaft sind die gewählten Lagenaufbauten besonders vorteilhaft für Beanspruchungen in Plattenebene. Zum einen weisen sie einen hohen Anteil an den für die Biegetragfähigkeit wichtigen Längslagen auf; zum anderen sind, wegen der symmetrischen Anordnung der Längslagen bezüglich der Querlagen, die bei Beanspruchung in Plattenebene auftretenden Schubspannungen in den Kreuzungsflächen zwischen Längs- und Querlagen in allen Kreuzungsflächen innerhalb der Querschnittsdicke gleich groß.

Für alle Versuche in Bauteilgröße mit in Plattenebene beanspruchten Prüfkörpern wurde der sechslagige Aufbau mit einer Gesamtdicke von 200 mm verwendet. Zur Ermittlung der Biegefestigkeit bei Beanspruchung rechtwinklig zur Plattenebene wurden Brettsperrholzplatten mit sowohl drei- als auch sechslagigem Aufbau geprüft. Der dreilagige Aufbau wurde zudem für die Herstellung der Prüfkörper für die Versuche mit Universal-Keilzinkenverbindungen in Einzellamellen verwendet.

### 3.2.2 Zuschnitt

Zur Herstellung der Prüfkörper in Bauteilgröße wurden Streifen mit einer Breite von 600 mm quer zur Richtung der Längslagen zugeschnitten. Bei den in Plattenebene beanspruchten Prüfkörpern (gerade Druck- und Biegeträger, Satteldachträger und Dreigelenkrahmen) betrug damit die Querschnittshöhe einheitlich 600 mm. Die rechtwinklig zur Plattenebene beanspruchten Prüfkörper (gerade Biegeträger) hatten eine Breite von 600 mm. Bei allen Prüfkörpern betrug die Breite der Brettlamellen 150 mm. Die Schnittfugen wurden beim Zuschneiden so angelegt, dass die Längslagen eines Prüfkörpers aus jeweils vier ganzen Lamellen bestanden.

Der Zuschnitt der Plattenstreifen zur Herstellung der Prüfkörper für die Versuche mit Universal-Keilzinkenverbindungen in Einzellamellen erfolgte analog dem Vorgehen bei den Prüfkörpern in Bauteilgröße. Zunächst wurden dreilagige Brettsperrholzplatten hergestellt, aus denen dann Streifen mit jeweils vier Lamellen je Längslage zugeschnitten wurden. Da später die einzelnen Prüfkörper für die Zug- und Druckversuche rechtwinklig zur Stoßfuge (Universal-Keilzinkenverbindungen) herausgetrennt wurden, wurden teilweise Brettbreiten größer 150 mm verwendet. Nach dem Fräsen der Universal-Keilzinkenverbindungen wurden die Plattenstreifen miteinander verklebt und an die Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine geliefert, wo der Zuschnitt der einzelnen Prüfkörper erfolgte (siehe Abschnitt 4.4.1).

### 3.2.3 Universal-Keilzinkenverbindungen

Das Fräsen der Keilzinkenverbindungen erfolgte auf einer CNC-gesteuerten Maschine. Im Allgemeinen wiesen die Keilzinken nach dem Fräsvorgang saubere Konturen und glatte Oberflächen auf. Da der Zuschnitt der Trägerhöhe bzw. der Plattenbreite nach dem Fräsen der Zinken erfolgte, waren die Zinken auch in den Schmalseiten der Brettsperrholzplatten in der Regel nicht ausgefranst und wiesen scharfe Kanten auf. Im Bereich von Ästen brachen die Zinken teilweise bereits während des Fräsvorgangs ab. Bild 3-3 zeigt einen dreilagigen Prüfkörper mit im Bereich von Ästen in einer Längslage abgebrochenen Zinken. Im Bild beträgt der Anteil der ausgefallenen Zinken etwa  $220 \text{ mm} / (8 \cdot 600 \text{ mm}) = 4,6\%$  bezogen auf die Gesamtlänge aller acht Zinken in den beiden Längslagen.

Die Keilzinken der Prüfkörper wurden nach dem Fräsvorgang stichprobenartig auf Fehlstellen infolge von Ästen untersucht. Der Umfang der Stichprobe umfasste Keilzinken in mehr als 200 Brettlamellen von Längslagen. Die kumulierte Länge der Fehlstellen in den Längslagen betrug bei den überprüften Keilzinken etwas mehr als 1% bezogen auf die Gesamtlänge aller Zinken in den betrachteten Lamellen.

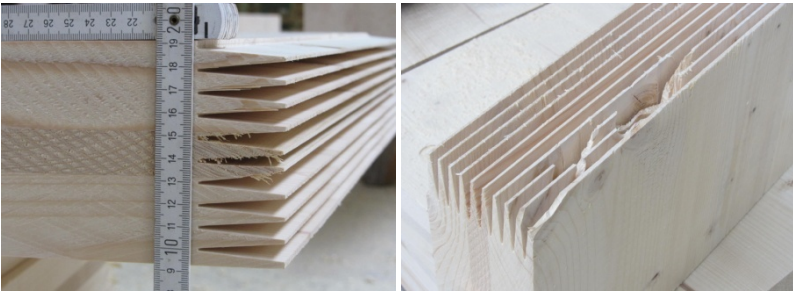


Bild 3-3: Gutes Fräsergebnis mit scharfen Konturen und glatten Oberflächen (links); Abgebrochene Zinken im Bereich von Ästen

In allen Prüfkörpern wurden die Universal-Keilzinkenverbindungen mit einer 3,2 mm breiten Randzinke ausgeführt, sodass auch die äußersten Zinken der Decklagen saubere und scharfe Konturen aufwiesen.

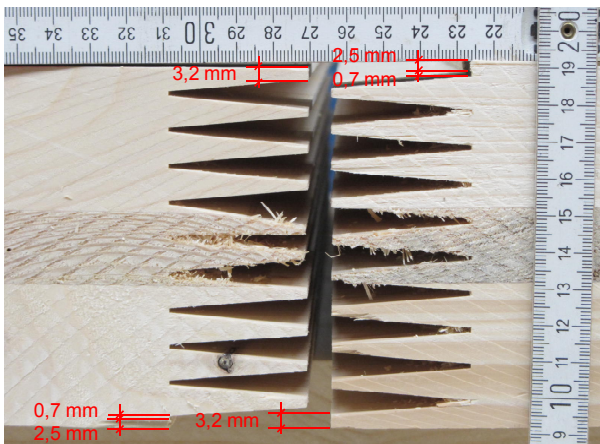


Bild 3-4: Randzinken in einem dreilagigen Brettsperrelement

### 3.2.4 Produktionstoleranzen und Zinkenspiel

Während des Forschungsvorhabens wurden zwei durch die Herstellung beeinflussbare Größen identifiziert, die den in einer Universal-Keilzinkenverbindung verfügbaren Querschnitt und damit die Tragfähigkeit einer Verbindung maßgeblich beeinflussen. Dies ist zum einen die Abweichung Lage des Zinkenprofils von der vorgesehenen Position in Richtung der Plattendicke (Produktionstoleranz  $\Delta t$  in Dickenrichtung), zum anderen der als Zinkenspiel  $s$  bezeichnete Abstand zwischen den Zinkenspitzen des einen Bauteils und dem Zinkengrund des anderen Bauteils in einer Universal-Keilzinkenverbindung.

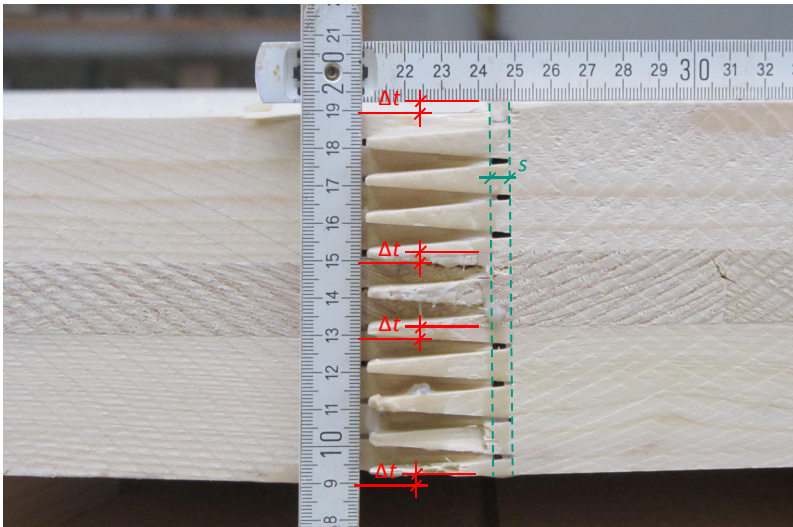


Bild 3-5: Produktionstoleranz  $\Delta t$  in Dickenrichtung und Zinkenspiel  $s$

Bei nahezu allen Prüfkörpern wich die Position der Zinken nach dem Fräsen von der planmäßigen Lage in Dickenrichtung ab. Die Dickentoleranzen betragen bis zu 6 mm und waren nach dem Verkleben der Universal-Keilzinkenverbindungen in Form stufiger Absätze in der Oberfläche der Decklagen der Prüfkörper sichtbar. Die durch das versetzte Stoßen der Bauteile entstehenden Absätze in Dickenrichtung führen zu einer Reduzierung des zur Lastübertragung verfügbaren Querschnitts in den

Keilzinkenverbindungen. Während sich bei massiven Querschnitten die in einer Keilzinkenverbindung verfügbare Querschnittsdicke um das Maß der Dickentoleranz verringert, wirken sich bei Brettsperrholzträgern Produktionstoleranzen in Dickenrichtung deutlich stärker aus, da die für die Biegetragfähigkeit maßgebenden Längslagen in mehreren durch Querlagen voneinander getrennten Blöcken im Querschnitt angeordnet sind. Daher wird nicht die Gesamtdicke eines Bauteils, sondern die Dicke jeder Längslage, bei mehreren aufeinanderfolgenden Längslagen die Dicke jedes Längslagenblocks, um die Produktionstoleranz reduziert. Insgesamt wird damit die Dicke des für die Biegetragfähigkeit maßgebenden Querschnitts der Längslagen um die  $(n_{\text{cross}} + 1)$ -fache Toleranz in Dickenrichtung reduziert, wobei  $n_{\text{cross}}$  die Anzahl der Querlagen im Querschnitt ist.

Das Zinkenspiel  $s$  ist die zweite durch den Herstellungsprozess beeinflussbare Größe, die nennenswerten Einfluss auf den in einer Universal-Keilzinkenverbindung verfügbaren Querschnitt und damit auf deren Tragfähigkeit hat. Bei allen Universal-Keilzinkenverbindungen ist ein gewisses Zinkenspiel erforderlich, um das Abfließen überschüssigen Klebstoffes durch die verbleibenden Kanäle an den Zinkenspitzen nach außen zu ermöglichen. Das erforderliche (oder erreichbare) Zinkenspiel einer Universal-Keilzinkenverbindung ist daher unter anderem von der aufgetragenen Klebstoffmenge, der Viskosität des Klebstoffes und der Presszeit abhängig. Letztlich beeinflusst nicht das Zinkenspiel  $s$ , sondern die effektive Breite des Zinkengrundes  $b_{\text{tip,eff}}$  und die Klebefugendicke  $d_L$  die Tragfähigkeit einer Keilzinkenverbindung. Die beiden Größen hängen jedoch direkt vom Zinkenspiel  $s$  ab und können in Abhängigkeit des Flankenwinkels  $\alpha$  berechnet werden.

$$b_{\text{tip,eff}} = b_{\text{cut}} + 2 \cdot s \cdot \tan \alpha \quad (3-1)$$

$$d_L = s \cdot \sin \alpha \quad (3-2)$$

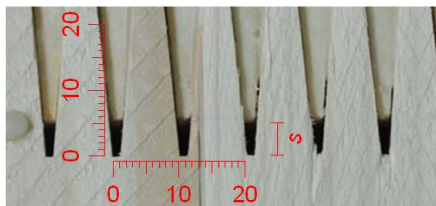


Bild 3-6: Zinkenspiel  $s$  in der Universal-Keilzinkenverbindungen eines Prüfkörpers



### 3.2.5 Effektiver Verschwächungsgrad

Der effektive Verschwächungsgrad einer Universal-Keilzinkenverbindung ist definiert als das Verhältnis aus der Summe der Fehlflächen in einem Schnitt entlang der Zinkenspitzen und dem ungeschwächten Querschnitt eines Bauteils. Neben dem nominellen Verschwächungsgrad  $\nu$  des Keilzinkenprofils wirken sich daher auch Randzinken, Produktionstoleranzen  $\Delta t$  in Dickenrichtung und das Zinkenspiels  $s$  infolge der Vergrößerung des Zinkengrundes auf den effektiven Verschwächungsgrad aus. Unter Berücksichtigung der genannten Einflussgrößen kann der effektive Verschwächungsgrad für massive Querschnitte ohne Querlagen nach Gleichung (3-3) berechnet werden.

$$\nu_{\text{eff, Jam}} = (1 - \nu_{\text{eff}}) \cdot \frac{\Delta t + t_{\text{RZ}}}{t_{\text{lam}}} + \nu_{\text{eff}} \quad (3-3)$$

Bei Brettsperrholzträger muss die  $(n_{\text{cross}} + 1)$ -fache Toleranz in Dickenrichtung berücksichtigt werden. Der effektive Verschwächungsgrad ergibt sich damit zu

$$\nu_{\text{eff, BSP}} = (1 - \nu_{\text{eff}}) \cdot \frac{(n_{\text{cross}} + 1) \cdot \Delta t + t_{\text{RZ}}}{t_{\text{net, long}}} + \nu_{\text{eff}} \quad (3-4)$$

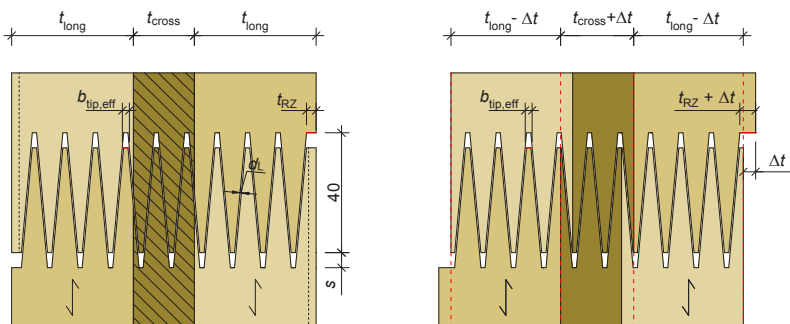


Bild 3-7: Universal-Keilzinkenverbindung in einem dreilagigen Brettsperrholz ohne (links) und mit (rechts) Produktionstoleranz in Dickenrichtung

### 3.3 Druckversuche mit geraden Brettsperrholzträgern

Zur Ermittlung der Druckfestigkeit und des Druck-Elastizitätsmoduls in Richtung der Längslagen wurden in drei Versuchsreihen Brettsperrholzträger mit und ohne Universal-Keilzinkenverbindung sowie Träger mit einer rechtwinklig zur Plattenebene angeordneten Kontaktfuge geprüft.

#### 3.3.1 Versuchsmaterial

Die Gesamtlänge der Prüfkörper betrug bei allen Reihen 1200 mm. Die Universal-Keilzinkenverbindungen und die Kontaktstöße waren jeweils in der Mitte der Prüfkörperlänge angeordnet und die Stoßfugen verliefen rechtwinklig zur Plattenebene und rechtwinklig zur Richtung der Decklagen. Die Prüfkörper aller drei Versuchsreihen hatten den in Abschnitt 3.2 beschriebenen sechslagigen Aufbau, bestehend aus vier Längs- und zwei Querlagen mit einer Gesamtdicke von 200 mm. Die Querschnittsbreite betrug 600 mm. Bei der Herstellung der Prüfkörper mit Universal-Keilzinkenverbindungen und beim Einbau der Prüfkörper mit Kontaktfugen wurde darauf geachtet, dass in den Verbindungen bzw. den Stoßfugen die Enden unterschiedlicher Brettlamellen aufeinandertrafen. Der Längenschnitt der Prüfkörper erfolgte auf einer Formatkreissäge mit einer Schnitttiefe von 220 mm, sodass die Lasteinleitungsflächen in einem Arbeitsgang hergestellt werden konnten und praktisch keine Unebenheiten aufwiesen.

Tabelle 3-2: Versuchsreihen zur Ermittlung der Druckfestigkeit von Brettsperrholzträgern mit und ohne Universal-Keilzinkenverbindung und mit Kontaktfuge

Reihe	Anzahl $n$	Höhe $h$ in mm	Breite $b_{\text{brutto}}$ in mm	Länge $\ell$ in mm	Lagenaufbau $t_{\text{long}} / t_{\text{cross}}$ in mm
D600LFJ	15	600	200	1.200	<u>40-20-40-40-20-40</u>
D600REF	15	600	200	1.200	<u>40-20-40-40-20-40</u>
D600KF	15	600	200	2 x 600	<u>40-20-40-40-20-40</u>

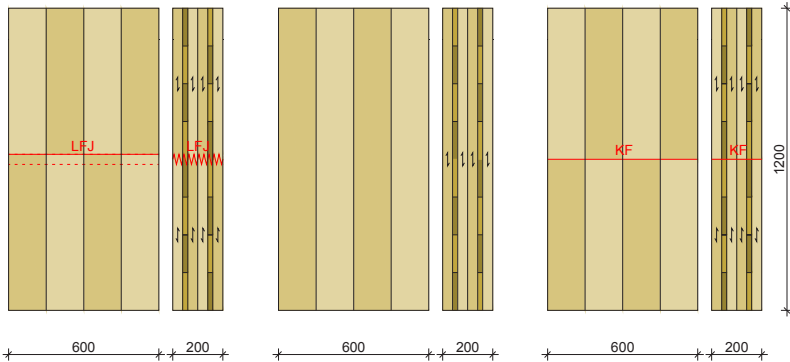


Bild 3-8: Abmessungen und Aufbau der Druckprüfkörper mit und ohne Universal-keilzinkenverbindung und mit Kontaktfuge

Bei den Prüfkörpern mit Universal-Keilzinkenverbindungen wurden die Produktionstoleranzen in Dickenrichtung in zwei Punkten auf jeder der beiden gegenüberliegenden Oberflächen der Decklagen gemessen. Das Zinkenspiel  $s$  der Universal-Keilzinkenverbindungen wurde in den beiden gegenüberliegenden Schmalseiten der Prüfkörper gemessen. Nach der Versuchsdurchführung wurden etwa 30 mm dicke Proben über den gesamten Querschnitt der Prüfkörper entnommen, an denen die Rohdichte und die Holzfeuchte im Darrversuch ermittelt wurden. Bei den Prüfkörpern der Reihe D600REF wurde jeweils eine, bei den Prüfkörpern der Reihen D600LFJ und D600KF jeweils zwei Proben, eine auf jeder Seite der Universal-Keilzinkenverbindungen/Stoßfuge, entnommen. In Tabelle 3-3 sind die Mittelwerte der gemessenen Größen zusammengestellt.

Tabelle 3-3: Rohdichte, Holzfeuchte und Produktionstoleranz und Zinkenspiel der Druckprüfkörper

Reihe	$\rho_{\text{mean}}$ in $\text{kg/m}^3$	$HF_{\text{mean}}$ in %	$\Delta t_{\text{mean}}$ in mm	$s_{\text{mean}}$ in mm
D600LFJ	454	10,6	1,2	2,5
D600REF	446	10,8		
D600KF	447	10,5		

### 3.3.2 Versuchsdurchführung

Die Durchführung der Versuche der Reihen D600LFJ und D600REF erfolgte nach DIN EN 408. Bei den Prüfkörpern der Reihe D600KF wurde zusätzlich die lokale Verformung im Bereich der Kontaktfuge gemessen. Die Einleitung der Druckkraft erfolgte zentrisch unter Verwendung von Kugelkalotten, um ungewollte Beanspruchungen durch Biegemomente zu vermeiden. Die Last wurde mit konstanter Geschwindigkeit aufgebracht, wobei die Vorschubgeschwindigkeit des Belastungskolbens zwischen 0,01 mm/s und 0,05 mm/s betrug.

Zur Messung der Verformungen wurden vier induktive Wegaufnehmer mit einer Messlänge von 10 mm und einer Messgenauigkeit von 1% verwendet. Bei den Reihen D600LFJ und D600REF wurden die Wegaufnehmer in den Drittpunkten der Querschnittsbreite angebracht, sodass in jeder der beiden gegenüberliegenden Oberflächen an jeweils zwei Stellen die Längenänderung innerhalb einer Messlänge von 800 mm gemessen werden konnte. Um den Anteil der lokalen Verformungen im Bereich der Kontaktfuge zu ermitteln, wurden bei den Prüfkörpern der Reihe D600KF zwei der vier Wegaufnehmer dazu verwendet, die Längenänderung innerhalb einer Messlänge von 60 mm zu messen.

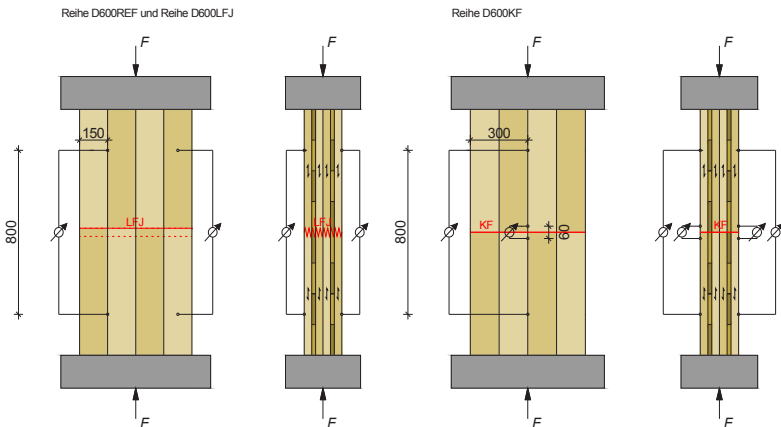


Bild 3-9: Versuchsanordnung für Druckversuche mit geraden BSP-Trägern mit und ohne Universal-Keilzinkenverbindung (links) und mit Kontaktfuge (rechts)

### 3.3.3 Versuchsergebnisse

In Bild 3-10, Bild 3-11 und Bild 3-12 sind typische Versagensformen der drei Versuchsreihen gezeigt.

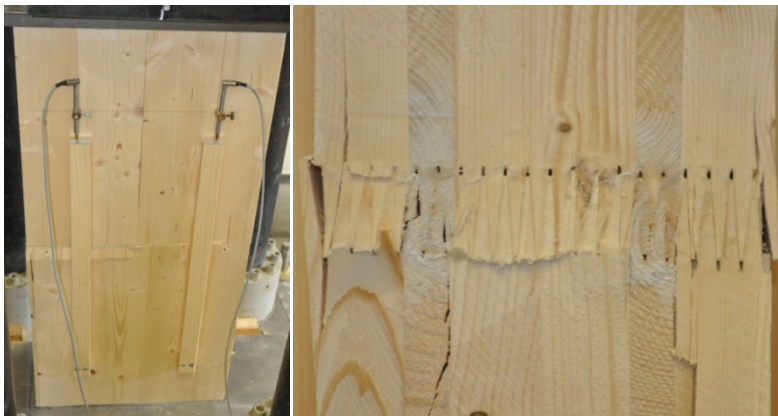
Bei den Prüfkörpern der Referenzreihe D600REF trat das Versagen an unterschiedlichen Stellen innerhalb der Prüfkörperlänge ein. Bei allen Prüfkörpern der Versuchsreihe waren nach dem Erreichen der Höchstlast die bei Druckversagen typischen Druckfalten erkennbar. Vereinzelt knickten auch Lamellen der Decklagen rechtwinklig zur Plattenebene aus, wobei Risse in der benachbarten Querlage entstanden und sich die ausknickenden Lamellen vom Rest des Querschnitts ablösten.

Bei allen Prüfkörpern der Reihe D600LFJ trat das Versagen in den Universal-Keilzinkenverbindungen ein, wobei stets die Druckfestigkeit in einem Schnitt durch den Zinkengrund erreicht wurde. Bei zwei Prüfkörpern knickten auch hier einzelne Lamellen der Decklagen rechtwinklig zur Plattenebene aus.

Bei allen Prüfkörpern mit Kontaktfuge trat ein lokales Druckversagen in den Kontaktflächen auf. Nach dem Versagen waren in den Kontaktflächen reliefartige Abdrücke der Jahrringe auf der jeweils gegenüberliegenden Kontaktfläche sichtbar. Bei den meisten Prüfkörpern der Reihe traten zusätzlich Druckfalten in den Lamellen der Längslagen abseits der Kontaktfugen auf.



Bild 3-10: Typisches Versagensbild bei Versuchsreihe D600REF mit Druckfalten in den Lamellen der Längslagen



*Bild 3-11: Typisches Versagensbild bei Versuchsreihe D600LFJ mit lokalem Druckversagen am Zinkengrund der Universal-Keilzinkenverbindung*



*Bild 3-12: Typisches Versagensbild bei Versuchsreihe D600KF mit lokalem Druckversagen in der Kontaktfuge*

Bild 3-13 und Bild 3-14 zeigen die Last-Verformungskurven der Prüfkörper aller drei Versuchsreihen.

Beim Vergleich der Kurven in den beiden Diagrammen in Bild 3-13 ist die Reduzierung der Tragfähigkeit infolge der Universal-Keilzinkenverbindung deutlich zu erkennen. Auf die Steifigkeit der Prüfkörper hat die Universal-Keilzinkenverbindung hingegen nur wenig Einfluss, wie die in beiden Diagrammen annähernd gleich große Steigung der Kurven zeigt.

Bei den Prüfkörpern der Reihe D600KF ist die Reduzierung der Höchstlast bezogen auf die Referenzversuche geringer als bei den keilgezinkten Prüfkörpern. Die Steifigkeit ist jedoch infolge der zusätzlichen lokalen Verformungen an der Kontaktfuge deutlich reduziert. Bei Erreichen der Höchstlast wurde innerhalb der Messlänge von 60 mm an der Kontaktfuge eine lokale Verformung von im Mittel etwa 1,2 mm gemessen. Dies entspricht nahezu 50% der bei den Referenzprüfkörpern der Reihe D600REF unter der Höchstlast aufgetretenen Gesamtverformung. In Bild 3-14 ist zu erkennen, dass sich die lokalen Verformungen bei den Prüfkörpern der Reihe D600KF aus einem Anfangsschlupf, einem elastischen und einem plastischen Verformungsanteil zusammensetzen, Anfangsschlupf und plastische Verformung zusammen jedoch den weitaus größten Teil der gesamten lokalen Verformungen ausmachen.

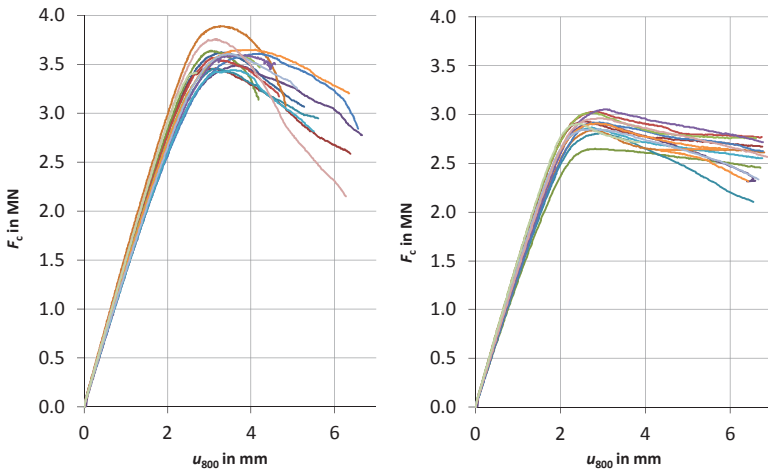


Bild 3-13: Last-Verformungskurven für die Druckversuche der Reihen D600REF (links) und D600LFJ (rechts)

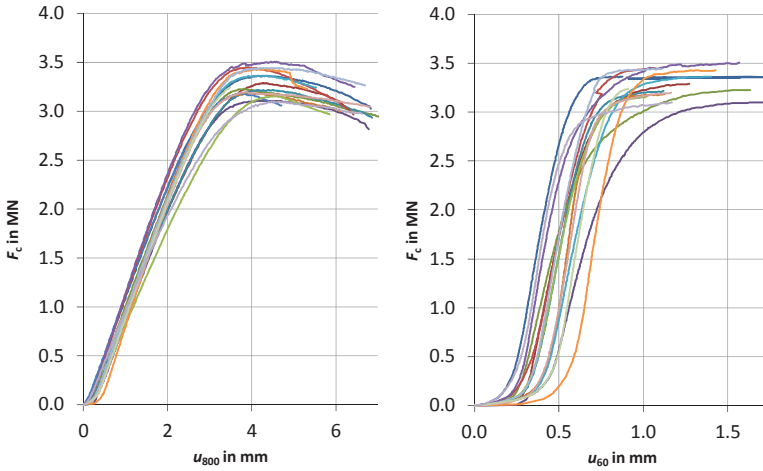


Bild 3-14: Last-Verformungskurven für die Druckversuche der Reihe D600KF; links: Gesamtverformung  $u_{800}$ ; rechts lokale Verformung  $u_{60}$  an der Kontaktfuge für  $F_c \leq F_{max}$

Für alle Versuchsreihen wurde aus den Höchstlasten die auf den Querschnitt der Längslagen  $A_{net,long}$  bezogene Druckfestigkeit der Prüfkörper berechnet.

$$f_{c,0,net} = \frac{F_{max}}{A_{net,long}} \quad (3-5)$$

In Tabelle 3-4 sind die Mittelwerte der Druckfestigkeit und der nach EN 14358 berechnete charakteristische Wert der Druckfestigkeit angegeben. Die Ergebnisse der einzelnen Versuche sind in Anlage 1 zusammengestellt. In der vierten Spalte der Tabelle 3-4 sind die aus der Druckfestigkeit der jeweiligen Versuchsreihe und der Druckfestigkeit der Referenzreihe berechneten Verhältniswerte angegeben. Für die Versuchsreihe D600LFJ ist in der letzten Spalte der Tabelle zusätzlich der Wert  $(1 - v_{eff})$  angegeben. Der Wert gibt den Anteil des am Zinkengrund der Universal-Keilzinkenverbindungen vorhandenen Querschnitts der Längslagen, bezogen auf den ungeschwächten Querschnitt der Längslagen an, wobei der zur Berechnung des Wertes verwendete effektive Verschwächungsgrad



unter Berücksichtigung der gemessenen Dickentoleranzen und des Zinkenspieles der Prüfkörper ermittelt wurde.

Vergleicht man die Werte in der dritten und sechsten Spalte der Tabelle, so wird deutlich, dass bei den Prüfkörpern mit Universal-Keilzinkenverbindung die auf den Restquerschnitt am Zinkengrund bezogene Druckfestigkeit und die Druckfestigkeit der Referenzprüfkörper, mit einer Abweichung von nur 3,4%, nahezu identisch sind. Anders ausgedrückt entspricht die Drucktragfähigkeit von Brettsperrholzträgern mit Universal-Keilzinkenverbindungen der mit dem Faktor  $(1 - v_{\text{eff}})$  reduzierten Drucktragfähigkeit des ungeschwächten Querschnitts.

Bei den Prüfkörpern mit Kontaktfuge ist die Druckfestigkeit gegenüber den Referenzversuchen um etwa 9% geringer. Da die Prüfkörperhälften beim Versuchsaufbau exakt aufeinander gesetzt wurden, ist die Festigkeitsreduzierung nicht, wie bei den keilgezinkten Prüfkörpern, durch eine (makroskopisch messbar) verringerte Querschnittsfläche begründbar. In Anbetracht der Bruchbilder liegt die Ursache der geringeren Festigkeit vielmehr in der Unterbrechung des Faserverlaufs mit der Folge, dass in der Kontaktfuge, anders als in anderen Querschnitten, Bereiche mit hoher Druckfestigkeit (Spätholzanteil) nicht übereinander liegen. Die Festigkeitsreduzierung bei Kontaktstößen wäre demnach unabhängig von den Abmessungen eines Bauteils konstant.

*Tabelle 3-4: Ermittelte Druckfestigkeiten von Brettsperrholzträger mit und ohne Universal-Keilzinkenverbindung (Reihen LFJ und REF) und mit Kontaktfuge (Reihe KF)*

Reihe	$f_{c,0,\text{net,mean}}$ in N/mm <sup>2</sup>	COV -	Verhältnis -	$f_{c,0,\text{net,k}}$ in N/mm <sup>2</sup>	$1 - v_{\text{eff,mean}}$ -
D600LFJ	30,7	0,035	0,812	28,5	0,785
D600REF	37,8	0,035	1	35,2	
D600KF	34,6	0,040	0,915	32,0	

$f_{c,0,k}$  charakteristische Druckfestigkeit nach EN 14358 mit  $k_s (n = 15) = 1,99$

Bei den Reihen D600LFJ und D600REF wurde aus den im Bereich zwischen 10% und 40% der Höchstlast gemessenen Verformungen  $u_{800}$  der Druck-Elastizitätsmodul nach Gleichung (3-6) berechnet. Wie die Druckfestigkeit, wurde auch der Druck-Elastizitätsmodul auf den Querschnitt der Längslagen bezogen.

$$E_c = \frac{\Delta F}{\Delta u} \cdot \frac{800}{A_{\text{net,Long}}} \quad (3-6)$$

Bei den Prüfkörpern der Reihe D600KF setzen sich die beiden gemessenen Verformungen  $u_{800}$  und  $u_{60}$  jeweils aus einer Längenänderung infolge von Dehnungen im Holz und einer lokalen Eindrückung in der Kontaktfuge zusammen. Für die Ermittlung der Steifigkeitskennwerte wurde angenommen, dass die Gesamtverformung bei den Prüfkörpern der Reihe D600KF durch das in Bild 3-15 dargestellte Federmodell abgebildet wird, bei dem die Dehnungen im Brettsperrholz umgekehrt proportional zur Dehnsteifigkeit  $EA$  sind und die lokalen Verformungen in der Kontaktfuge durch eine Federkonstante  $K$  (Verschiebungsmodul) beschrieben werden.

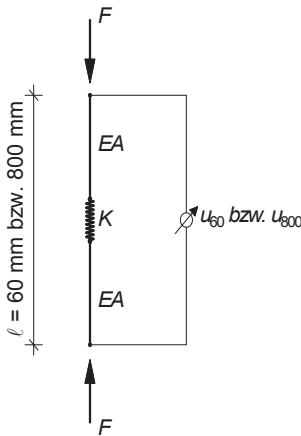


Bild 3-15: Federmodell zur Berechnung der Steifigkeitskennwerte bei den Prüfkörpern der Reihe D600KF

Anhand dieses Modells lassen sich die beiden gemessenen Verformungen  $u_{800}$  und  $u_{60}$  wie folgt angeben:

$$\left[ \begin{array}{l} \Delta u_{800} = \frac{\Delta F \cdot 800}{E_c \cdot A_{\text{net,long}}} + \frac{\Delta F}{K} \\ \Delta u_{60} = \frac{\Delta F \cdot 60}{E_c \cdot A_{\text{net,long}}} + \frac{\Delta F}{K} \end{array} \right] \quad (3-7)$$

Mit der Substitution  $m = \frac{\Delta u}{\Delta F}$  ergeben sich aus Gleichung (3-7) folgende Beziehungen für den Druck-Elastizitätsmodul und den Verschiebungsmodul  $K$  der Kontaktfuge:

$$\left[ \begin{array}{l} E_c = \frac{800 - 60}{A_{\text{net,long}} \cdot (m_{800} - m_{60})} \\ K = \frac{800 - 60}{800 \cdot m_{60} - 60 \cdot m_{800}} \end{array} \right] \quad (3-8)$$

In Tabelle 3-5 sind die nach Gleichung (3-6) und Gleichung (3-8) berechneten Werte der Druck-Elastizitätsmoduln und die auf Querschnittsfläche der Längslagen bezogenen Verschiebungsmoduln  $k_{\text{Fuge}} = K / A_{\text{net,long}}$  angegeben. Die mittleren Elastizitätsmoduln aller drei Reihen sind sehr ähnlich. Der Unterschied zwischen den für die Reihen D600LFJ und D600 REF ermittelten Werten beträgt lediglich 1,2%, der Mittelwert der Reihe D600KF liegt etwa 6 % unter den Werten der beiden anderen Reihen und damit ebenfalls im Bereich üblicher Streuungen. Der nach Gleichung (3-6) berechnete effektive Elastizitätsmodul der Reihe D600KF ist jedoch mit einem Mittelwert von 8041 N/mm<sup>2</sup> etwa ein Drittel geringer als die aus den entsprechenden Messwerten berechneten mittleren Elastizitätsmoduln der beiden anderen Versuchsreihen.

Tabelle 3-5: Steifigkeitskennwerte der geprüften Brettsperrholzträger mit und ohne Universal-Keilzinkenverbindung und mit Kontaktfuge

Reihe	$E_{c,\text{net,mean}}$ in N/mm <sup>2</sup>	COV -	Verhältnis -	$k_{\text{Fuge}}$ in N/mm <sup>3</sup>
D600LFJ	11.875	0,049	} 0,988	154
D600REF	12.016	0,043		
D600KF	11.222	0,062	} 0,934	

### 3.3.4 Zusammenfassung

Die Druckfestigkeit und der Druck-Elastizitätsmodul von in Plattenebene beanspruchten Brettsperrholzträgern mit und ohne Universal-Keilzinkenverbindung und mit Kontaktfuge wurden durch Versuche bestimmt. Das Verhältnis der für die Prüfkörper mit und ohne Universal-Keilzinkenverbindung ermittelten Druckfestigkeiten stimmt sehr gut mit dem Verhältnis aus dem effektiven Restquerschnitt am Zinkengrund und dem ungeschwächten Querschnitt der Längslagen überein. Bei keilgezinkten Brettsperrholzträgern kann daher der Nachweis der Druckspannungen mit dem Nettoquerschnitt am Zinkengrund geführt werden. Bei Brettsperrholzträgern mit Kontaktstößen ist mit einer um 10% reduzierten Druckfestigkeit, gegenüber Trägern ohne Stoßfuge, zu rechnen. Für alle drei Prüfkörpertypen liegen die ermittelten charakteristischen Druckfestigkeiten jedoch deutlich über den in Zulassungen festgelegten Festigkeitskennwerten: Für die Referenzprüfkörper ohne Stöße um 69%, für die Prüfkörper mit Kontaktstößen um 52% und für die keilgezinkten Prüfkörper, trotz der erheblichen Schwächung im Zinkengrund, um 36%.

Für die Versuchsreihe mit Universal-Keilzinkenverbindungen und die Referenzreihe ohne Stöße wurden Elastizitätsmoduln von im Mittel rund  $12000 \text{ N/mm}^2$  ermittelt. Der sehr geringe Unterschied dieser Werte von lediglich 1% zeigt, dass die Universal-Keilzinkenstöße keinen Einfluss auf die Drucksteifigkeit von BSP-Trägern haben. Im Gegensatz treten in den Kontaktstößen lokale Verformungen auf, die einen erheblichen Einfluss auf die Drucksteifigkeit haben können. Aus den durchgeführten Versuchen wurde ein mittlerer Verschiebungsmodul der Kontaktfugen von  $154 \text{ N/mm}^3$  ermittelt.

Die Variationskoeffizienten der Druckfestigkeiten und der Druck-Elastizitätsmoduln betragen zwischen 3,5% bis 4% bzw. 4,3% bis 6,2% und sind damit in Anbetracht des zur Herstellung der Prüfkörper verwendeten Brettmaterials der Festigkeitsklasse C24 sehr gering. Dies zeigt die hohe Homogenisierung innerhalb der Querschnitte, die auch ein wesentlicher Grund für die hohen Druckfestigkeiten von Brettsperrholz ist.

## 3.4 Biegeversuche mit geraden Brettsperrholzträgern

Zur Ermittlung der Biegefestigkeit von Universal-Keilzinkenverbindungen in geraden Brettsperrholzträgern wurden drei Versuchsreihen mit jeweils zehn bzw. fünfzehn Prüfkörpern durchgeführt. Um Vergleichswerte zur Ermittlung der Festigkeitsreduzierung infolge der Universal-Keilzinkenverbindungen zu bestimmen, wurden drei weitere Versuchsreihen mit Prüfkörpern ohne Universal-Keilzinkenverbindungen mit den jeweils gleichen Querschnitten durchgeführt. Zur Ermittlung der Biegefestigkeit der Universal-Keilzinkenverbindungen in geraden Biegeträgern wurden Versuchsreihen mit Beanspruchung in Plattenebene und rechtwinklig zur Plattenebene durchgeführt.

### 3.4.1 Versuchsmaterial

In den Versuchsreihen S600LFJ und S600REF wurde an jeweils 15 Trägern, mit und ohne Universal-Keilzinkenverbindungen, die Biegefestigkeit bei Beanspruchung in Plattenebene bestimmt. Der Lagenaufbau dieser Träger entsprach dem in Abschnitt 3.2 beschriebenen Aufbau mit vier Längs- und zwei Querlagen und einem Querlagenanteil von 20%. Die Querschnittshöhe der Träger betrug 600 mm und wurde gewählt, um die Biegefestigkeit der geprüften Brettsperrholzträger unmittelbar mit den auf eine Referenzhöhe von 600 mm bezogenen Festigkeitskennwerten von Brettschichtholzträgern vergleichen zu können.

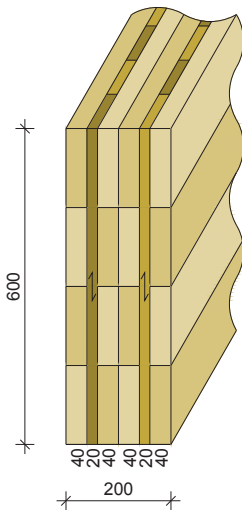
Zur Ermittlung der Biegefestigkeit rechtwinklig zur Plattenebene wurden Versuchsreihen mit zwei unterschiedlichen Plattendicken durchgeführt: In den Versuchsreihen P100LFJ und P100REF wurden 100 mm dicke Platten mit dreilagigem Aufbau geprüft, in den Versuchsreihen P200LFJ und P200REF hatten die Prüfkörper den in Abschnitt 3.2 beschriebenen sechslagigen Aufbau mit einer Gesamtdicke von 200 mm.

Eine Übersicht der zur Ermittlung der Biegefestigkeit von geraden Brettsperrholzträgern mit und ohne Universal-Keilzinkenverbindung durchgeführten Versuchsreihen ist in Tabelle 3-6 gegeben. Querschnitte und Lagenaufbauten der Prüfkörper sind in Bild 3-16 dargestellt.

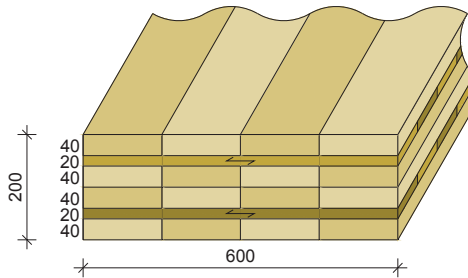
Tabelle 3-6: Versuchsreihen zur Ermittlung der Biegefestigkeit von geraden Brettsperrholzträgern mit und ohne Universal-Keilzinkenverbindung

Beanspruchung	Reihe	Anzahl	Höhe	Breite	Lagenaufbau
		$n$	$h$ in mm	$b$ in mm	$t_{\text{long}} / t_{\text{cross}}$ in mm
in Plattenebene	S600LFJ	15	600	200	<u>40-20-40-40-20-40</u>
	S600REF	15	600	200	<u>40-20-40-40-20-40</u>
rechtwinklig zur Plattenebene	P200LFJ	10	200	600	<u>40-20-40-40-20-40</u>
	P200REF	10	200	600	<u>40-20-40-40-20-40</u>
	P100LFJ	10	100	600	<u>40-20-40</u>
	P100REF	10	100	600	<u>40-20-40</u>

Reihen S600LFJ und S600REF



Reihen P200LFJ und P200REF



Reihen P100LFJ und P100REF

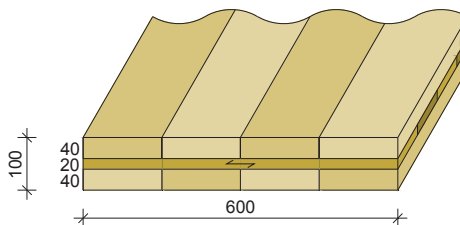


Bild 3-16: Querschnittsabmessungen und Lagenaufbau der Prüfkörper zur Ermittlung der Biegefestigkeit von geraden Brettsperrholzträgern mit und ohne Universal-Keilzinkenverbindung

Vor der Durchführung der Biegeversuche wurde bei den Prüfkörpern mit Universal-Keilzinkenverbindungen die Produktionstoleranz  $\Delta t$  in Dickenrichtung an jeweils vier Punkten und das Zinkenspiel  $s$  an jeweils zwei Punkten gemessen. Nach der Versuchsdurchführung wurden Proben über den gesamten Querschnitt entnommen, um die Rohdichte und die Holzfeuchte im Darrversuch zu bestimmen. Die Mittelwerte der gemessenen Größen sind, nach Versuchsreihen getrennt, in Tabelle 3-7 zusammengestellt.

*Tabelle 3-7: Rohdichte, Holzfeuchte und Produktionstoleranzen der geraden Brettspertholzträger mit und ohne Universal-Keilzinkenverbindung*

Reihe	$\rho_{\text{mean}}$ in $\text{kg/m}^3$	$HF_{\text{mean}}$ in %	$\Delta t_{\text{mean}}$ in mm	$s_{\text{mean}}$ in mm
S600LFJ	436	10,7	2,2	5
S600REF	442	10,5		
P200LFJ	449	10,5	2,8	5
P200REF	442	10,3		
P100LFJ	446	10,4	2,9	4
P100REF	454	10,6		

### 3.4.2 Versuchsdurchführung

Zur Ermittlung der Biegefestigkeit der Universal-Keilzinkenverbindungen wurden Vierpunkt-Biegeversuche mit Einzellasten in den Drittelpunkten der Spannweite durchgeführt. Die Stützweite betrug bei den Prüfkörpern mit Universal-Keilzinkenverbindungen das 15-fache der Trägerhöhe und bei den Prüfkörpern ohne Keilzinkenverbindung das 18-fache der Trägerhöhe. Bei allen Versuchsreihen wurden die Gesamtdurchbiegung in Feldmitte an der Trägeroberseite und die lokale Durchbiegung zwischen den beiden Einzellasten auf beiden Seiten der Prüfkörper in der neutralen Faser gemessen. Zur Messung der Gesamtdurchbiegung in Feldmitte wurde ein induktiver Wegaufnehmer mit einer Messlänge von 50 mm und einer Messgenauigkeit von 1% verwendet. Bei den Versuchsreihen S600 wurde zusätzlich ein Wegaufnehmer mit einem Messbereich bis 200 mm angebracht. Die lokalen Verformungen im querkraftfreien Trägerab-

schnitt, die zur Ermittlung des Biege-Elastizitätsmoduls verwendet wurden, wurden mit zwei induktiven Wegaufnehmern mit einer Messlänge von 10 mm und einer Messgenauigkeit von 1% gemessen.

Die Belastung wurde bis zu einer Last von 30% der geschätzten Bruchlast  $F_{est}$  kraftgesteuert mit einer konstanten Belastungsgeschwindigkeit von  $0,2 \cdot F_{est}$  pro Minute aufgebracht. Oberhalb von  $0,3 \cdot F_{est}$  bis zum Bruch wurde die Belastung weggesteuert mit konstanter Vorschubgeschwindigkeit aufgebracht. Die Geschwindigkeit des Belastungskolbens wurde so gewählt, dass die Höchstlast innerhalb von  $300 \pm 120$  s erreicht wurde. Soweit erforderlich, wurden die Prüfkörper gegen seitliches Ausweichen gesichert. Die Versuchsanordnungen für Träger mit und ohne Universal-Keilzinkenverbindung sind in Bild 3-17 und Bild 3-18 dargestellt. Die Stützweiten und Messlängen der einzelnen Versuchsreihen sind in Tabelle 3-8 angegeben.

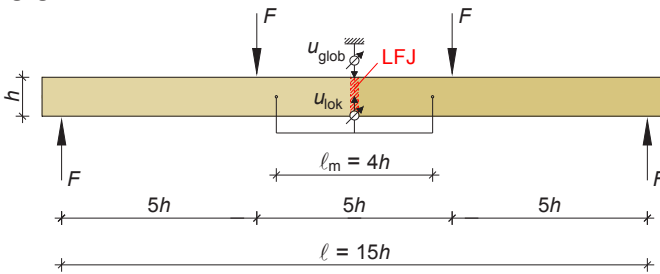


Bild 3-17: Versuchsanordnung für Biegeversuche mit geraden BSP-Trägern mit Universal-Keilzinkenverbindung

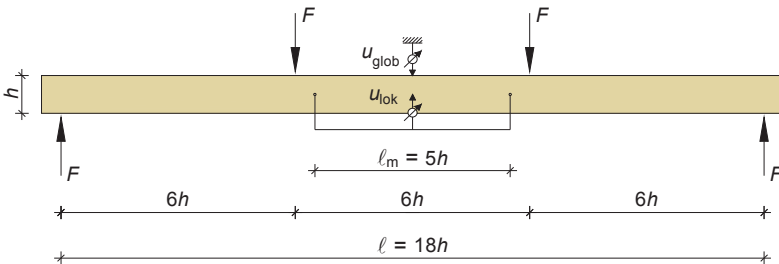


Bild 3-18: Versuchsanordnung für Biegeversuche mit geraden BSP-Trägern ohne Universal-Keilzinkenverbindung



Tabelle 3-8: Stützweiten und Messlängen bei den Versuchsreihen zur Ermittlung der Biegefestigkeit und des Biege-Elastizitätsmoduls

Beanspruchung	Reihe	Stützweite $\ell$	Messlänge $\ell_m$
		in mm	in mm
in Plattenebene	S600LFJ	9.000	2.400
	S600REF	10.800	3.000
rechtwinklig zur Plattenebene	P200LFJ	3.000	800
	P200REF	3.600	1.000
	P100LFJ	1.500	400
	P100REF	1.800	500

### 3.4.3 Versuchsergebnisse

Bild 3-19 bis Bild 3-24 zeigen typische Versagensformen der sechs Versuchsreihen zur Ermittlung der Biegefestigkeit. In den drei Versuchsreihen mit Universal-Keilzinkenverbindungen, S600LFJ, P200LFJ und P100LFJ, trat das Versagen bei allen Prüfkörpern durch Erreichen der Biegefestigkeit in der Keilzinkenverbindung ein. Die Bruchflächen verliefen bei allen Prüfkörpern in unmittelbarer Nähe der Keilzinken, wobei bei einem Teil der Prüfkörper die Zugfestigkeit entlang des Zinkengrundes (z.B. Bild 3-21, links) und bei anderen die Scherfestigkeit entlang der Zinkenflanken (z.B. Bild 3-23, links) erreicht wurde. Bei den meisten Prüfkörpern traten Mischformen der beiden Versagensarten auf (z.B. Bild 3-19). Bei Versagen durch Erreichen der Scherfestigkeit war meistens in den Bruchflächen entlang der Zinkenflanken ein in der Regel mit bloßem Auge gut erkennbarer, vollständiger Faserbelag vorhanden. Bei einigen Prüfkörpern wiesen die Scherflächen entlang der Flanken der Randzinken vereinzelt blanke Stellen ohne Faserbelag auf (z.B. Bild 3-19, links). Jedoch war der Anteil der Bereiche, in denen die Klebstoffschicht ohne Faserbelag sichtbar war, bezogen auf die gesamte Fläche der Randzinkenflanken so gering, dass auch bei diesen Prüfkörpern von einer ordnungsgemäßen Verklebung ausgegangen werden kann.



*Bild 3-19: Typisches Versagen bei Versuchsreihe S600LFJ durch Erreichen der Biegefestigkeit in der Universal-Keilzinkenverbindung (15 von 15 PK)*



*Bild 3-20: Typisches Versagen bei Versuchsreihe S600REF durch Erreichen der Biegefestigkeit in den Längslamellen der Zugzone (15 von 15 PK)*

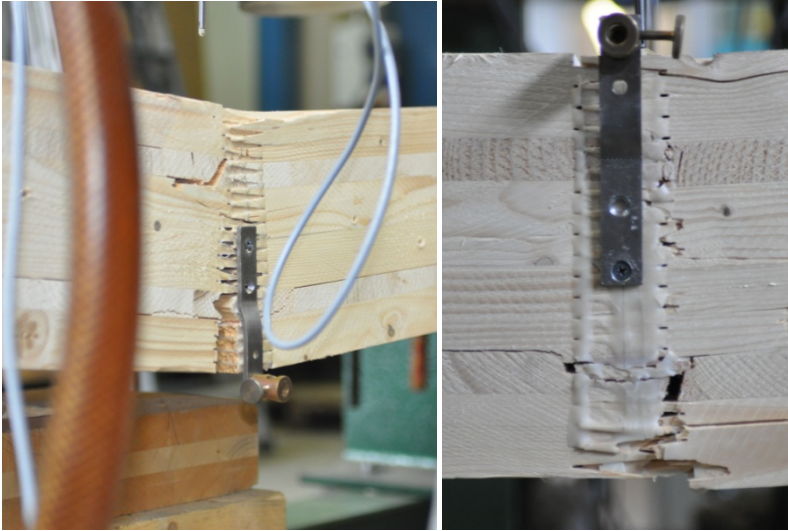


Bild 3-21: Typisches Versagen bei Versuchsreihe P200LFJ durch Erreichen der Biegefestigkeit in der Universal-Keilzinkenverbindung (10 von 10 PK)



Bild 3-22: Typisches Versagen bei Versuchsreihe P200REF durch Erreichen der Biegefestigkeit in der unteren Randlamelle (10 von 10 PK)

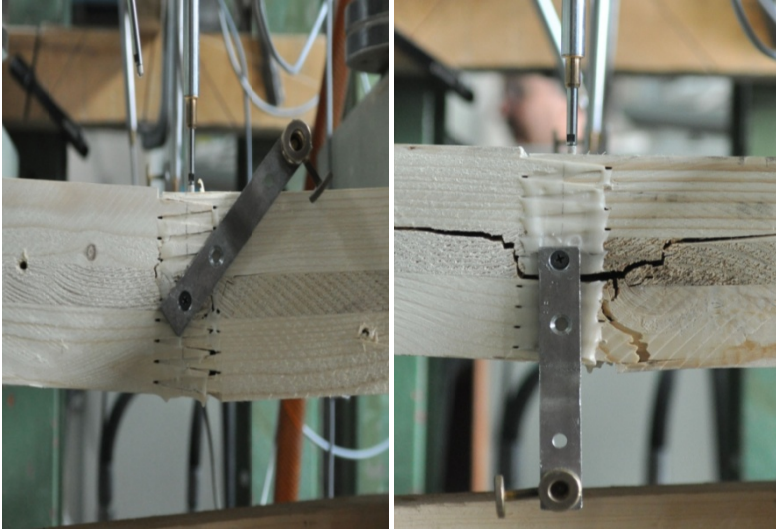


Bild 3-23: Typisches Versagen bei Versuchsreihe P100LFJ durch Erreichen der Biegefestigkeit in der Universal-Keilzinkenverbindung (10 von 10 PK)

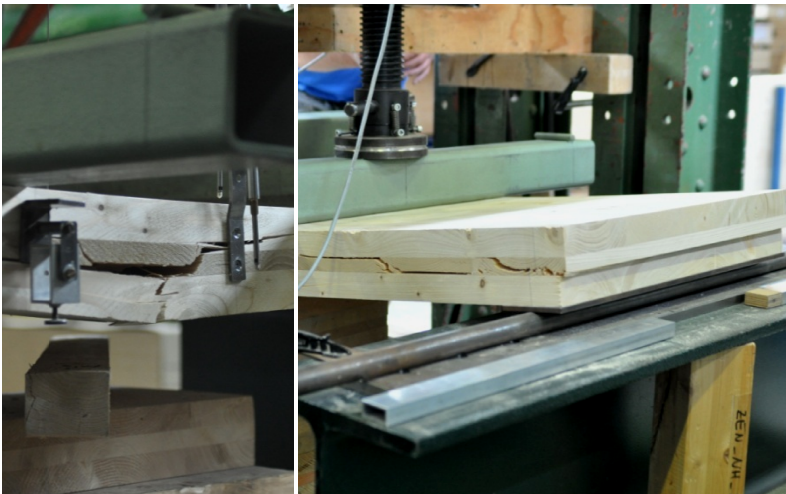


Bild 3-24: Typische Versagensformen bei Versuchsreihe P100REF; links: Erreichen der Biegefestigkeit in den Lamellen der Zugzone (4 von 10 PK), rechts: Erreichen der Rollschubfestigkeit in der Querlage (6 von 10 PK)

Bei allen Prüfkörpern der Referenzreihen S600REF und P200REF trat das Versagen durch Erreichen der Biegefestigkeit in den Längslamellen der Zugzone ein (vgl. Bild 3-20 und Bild 3-22). Die Prüfkörper der Reihe P100REF versagten hingegen mehrheitlich durch Rollschubspannungen in der Querlage (Bild 3-24, links). Nur bei vier der insgesamt zehn Prüfkörper dieser Reihe wurde das Versagen durch Biegespannungen in den Lamellen der Decklage ausgelöst. Ursache für das vorzeitige Versagen der Prüfkörper durch Rollschubspannungen ist die ungünstige Anordnung der Querlage in der Mitte der Querschnittshöhe, wo die größten Schubspannungen wirken. Im Gegensatz dazu ist bei den Prüfkörpern der Reihe P200REF der Abstand der Querlagen von der Schwerlinie so groß, dass die geringe Schubfestigkeit der Querlagen nicht maßgebend für die Biegetragfähigkeit wird.

In Bild 3-25 bis Bild 3-30 sind die Last-Verformungskurven der sechs Versuchsreihen dargestellt. Auf der Abszisse der Diagramme ist jeweils die Gesamtdurchbiegung in Feldmitte angegeben.

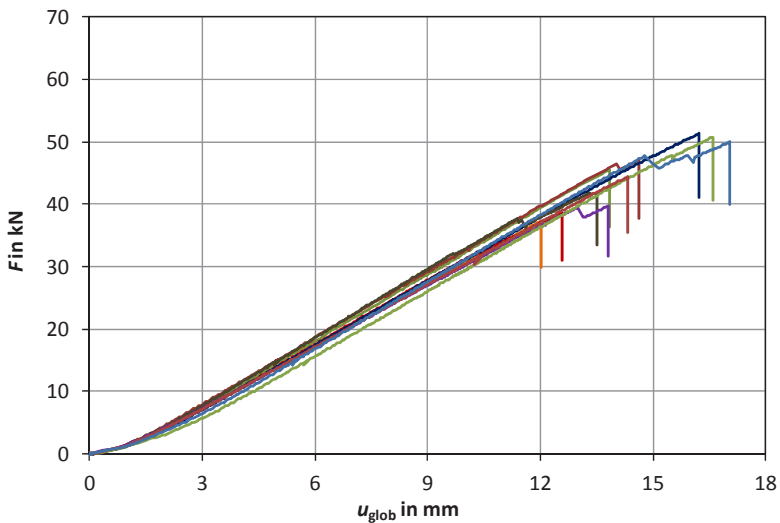


Bild 3-25: Last-Durchbiegungs-Kurven der Versuchsreihe P100LFJ

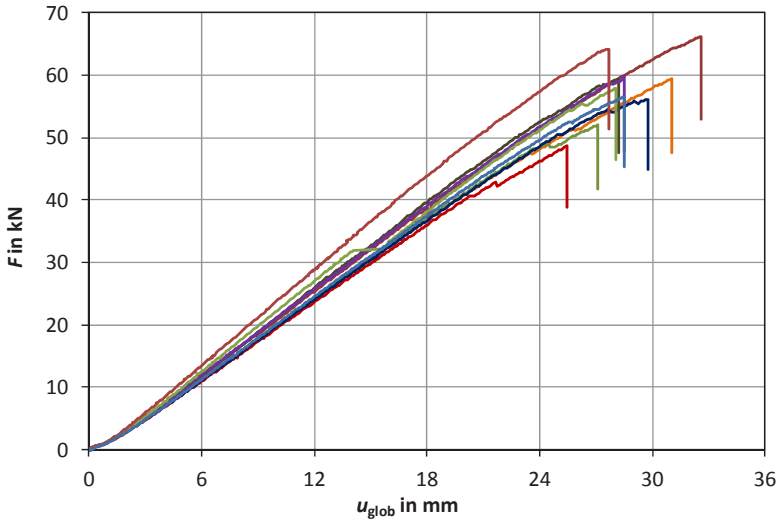


Bild 3-26: Last-Durchbiegungs-Kurven der Versuchsreihe P100REF

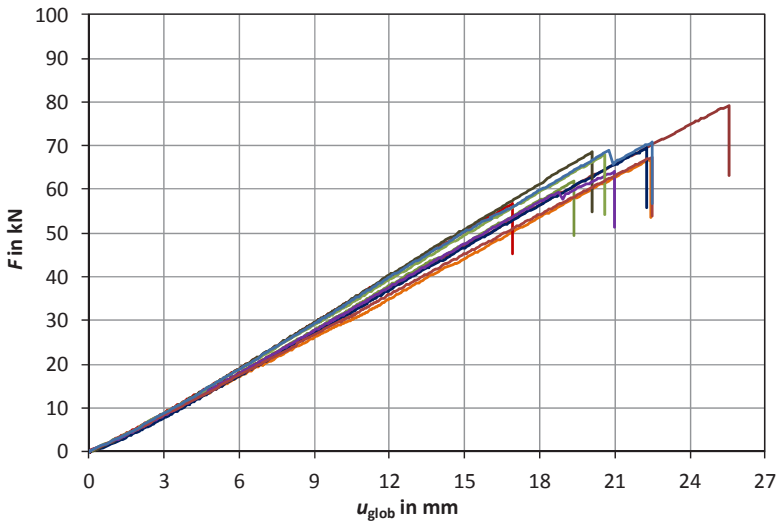


Bild 3-27: Last-Durchbiegungs-Kurven der Versuchsreihe P200LFJ

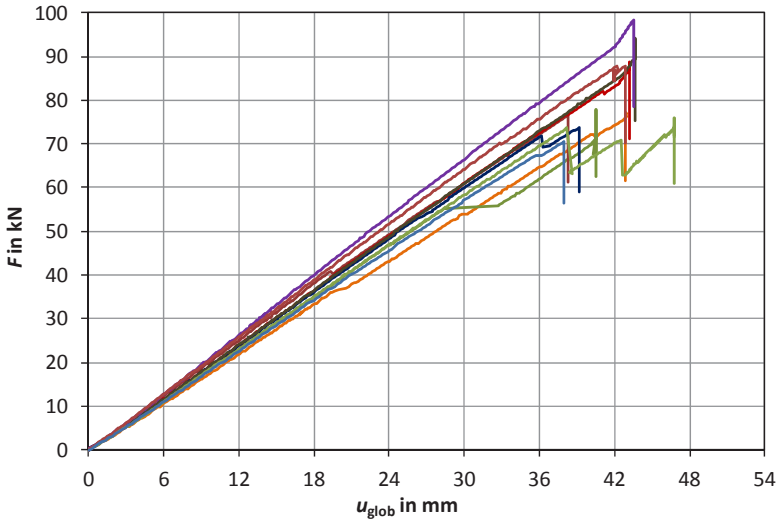


Bild 3-28: Last-Durchbiegungs-Kurven der Versuchsreihe P200REF

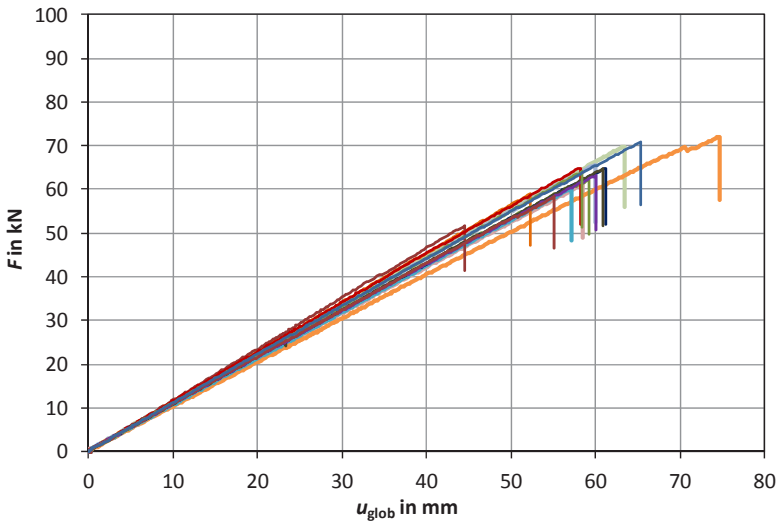


Bild 3-29: Last-Durchbiegungs-Kurven der Versuchsreihe S600LFJ

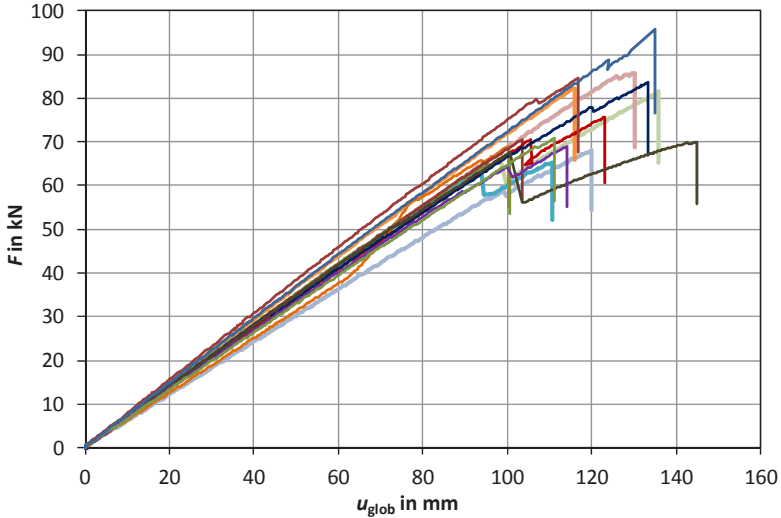


Bild 3-30: Last-Durchbiegungs-Kurven der Versuchsreihe S600REF

Aus den Höchstlasten der einzelnen Versuche wurden die Biegefestigkeiten der Prüfkörper berechnet. Bei den Versuchsreihen S600 wurde die Biegefestigkeit auf die Querschnittsbreite  $t_{\text{net,long}}$  der Längslagen bezogen und nach Gleichung (3-9) berechnet.

$$f_{m,\text{net}} = \frac{6 \cdot M_{\text{max}}}{h^2 \cdot t_{\text{net,long}}} \quad (3-9)$$

Bei den Prüfkörpern der Reihen P200 und P100 wurden zur Ermittlung der Biegefestigkeit die effektiven Flächenträgheitsmomente nach dem  $\gamma$ -Verfahren berechnet. Dabei wurden für den Elastizitätsmodul der Längslagen und den Rollschubmodul der Querlagen die Werte für Nadel-schnittholz der Festigkeitsklasse C24 nach EN 338 angesetzt.



Tabelle 3-9:  $\gamma$ -Werte und effektive Flächenträgheitsmomente für die Prüfkörper der Versuchsreihen P200 und P100

Reihe	$\gamma_1$	$a_1$	$h_1/2$	$I_{\text{eff}}$
	-	mm		in mm <sup>4</sup>
P200LFJ	0,838	80,0	20	$2,86 \cdot 10^8$
P200REF	0,882	80,0	20	$2,99 \cdot 10^8$
P100LFJ	0,564	38,4	20	$3,71 \cdot 10^7$
P100REF	0,651	36,3	20	$4,00 \cdot 10^7$

Mit den in Tabelle 3-9 angegebenen Werten wurden die Biegefestigkeiten der rechtwinklig zur Plattenebene beanspruchten Prüfkörper nach Gleichung (3-10) berechnet.

$$f_{m,\text{net}} = \frac{M_{\text{max}}}{I_{\text{eff}}} \cdot \left( \gamma_1 \cdot a_1 + \frac{h_1}{2} \right) \quad (3-10)$$

In Tabelle 3-10 sind die für die einzelnen Versuchsreihen berechneten mittleren und charakteristischen Biegefestigkeiten und deren Variationskoeffizienten zusammengestellt. Die Ergebnisse der einzelnen Versuche sind in Anlage 2 zusammengestellt.

Für die keilgezinkten Prüfkörper sind in der vierten Spalte der Tabelle 3-10 die Quotienten aus der mittleren Biegefestigkeit der Versuchsreihen mit Universal-Keilzinkenverbindungen und der Biegefestigkeit der jeweiligen Referenzreihe angegeben. Der in der letzten Spalte der Tabelle angegebene Wert  $1 - \nu_{\text{eff,mean}}$  entspricht dem mittleren Anteil des innerhalb einer Versuchsreihe am Zinkengrund der Universal-Keilzinkenverbindungen vorhandenen Restquerschnittes der Längslagen, bezogen auf den ungeschwächten Querschnitt der Längslagen. Die Unterschiede zwischen den Werten in der vierten und sechsten Spalte der Tabelle sind mit nur 4% bis 6% sehr gering. Die Biegetragfähigkeit von Universal-Keilzinkenverbindungen in Brettsperrholzträgern kann daher, bei Beanspruchung in Plattenebene und rechtwinklig zur Plattenebene, durch Multiplikation der Biegetragfähigkeit des ungeschwächten Querschnitts mit dem Faktor  $(1 - \nu_{\text{eff}})$  berechnet werden.

Tabelle 3-10: Ermittelte Biegefestigkeiten der geraden Brettsper Holzträger mit und ohne Universal-Keilzinkenverbindung

Reihe	$f_{m,net,mean}$ in N/mm <sup>2</sup>	COV -	Verhältnis -	$f_{m,net,k}$ in N/mm <sup>2</sup>	$1-V_{eff,mean}$ -
S600LFJ	20,3	0,084	0,696	17,1	0,726
S600REF	29,2	0,118		23,0	
P200LFJ	20,5	0,087	0,683	17,0	0,718
P200REF	30,0	0,118		23,4	
P100LFJ	25,0	0,116	0,658	19,5	0,677
P100REF	38,1	0,089		31,3	

$f_{m,net,k}$  charakteristische Biegefestigkeit nach EN 14358 mit  $k_s$  ( $n = 15$ ) = 1,99 bzw.  $k_s$  ( $n = 10$ ) = 2,10

In Bild 3-31 sind die experimentell bestimmten Biegefestigkeiten der Reihe S600REF den durch numerische Simulation mit Hilfe eines Rechenmodells ermittelten Biegefestigkeiten von Brettsper Holzträgern (vgl. Flaig, 2013) gegenübergestellt.

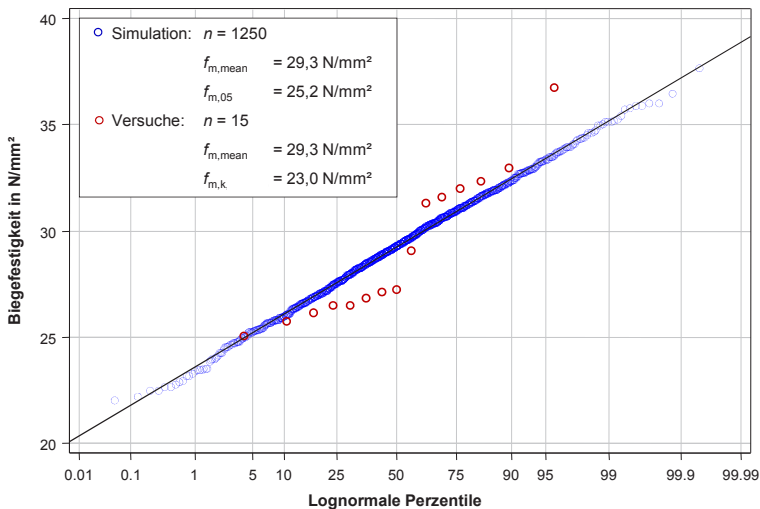


Bild 3-31: Empirische Häufigkeitsverteilung der simulierten und experimentell ermittelten Biegefestigkeit in plattenebene beanspruchte Brettsper Holzträger für mit vier Längslagen und vier Lamellen je Längslage

Der Vergleich der beiden Häufigkeitsverteilungen zeigt in Anbetracht der geringen Anzahl der experimentellen Daten eine sehr gute Übereinstimmung, sowohl bei den Mittelwerten als auch bei den empirischen 5%-Quantilen. Die im Rahmen der Referenzversuche ermittelten Biegefestigkeiten bestätigen damit die bislang nicht verifizierten Ergebnisse der numerischen Simulation der Biegefestigkeit von in Plattenebene beanspruchten Brettsperrholzträgern.

Aus der lokalen Durchbiegung zwischen 10% und 40% der Höchstlast wurde bei allen Versuchsreihen der Biege-Elastizitätsmodul der geprüften Brettsperrholzträger bestimmt. Bei den Versuchsreihen S600 wurden die auf den Querschnitt der Längslagen bezogenen Elastizitätsmoduln nach Gleichung (3-11) berechnet.

$$E_{\text{lok,net}} = \frac{2}{16} \cdot \frac{\Delta M_{10-40}}{\Delta u_{10-40}} \cdot \frac{\ell_m^2}{I_{\text{net,long}}} \quad (3-11)$$

Bei den Versuchsreihen P200 und P100 wurden zur Berechnung der Elastizitätsmoduln die effektiven Flächenträgheitsmomente  $I_{\text{eff}}$  nach Tabelle 3-9 verwendet.

$$E_{\text{lok}} = \frac{2}{16} \cdot \frac{\Delta M_{10-40}}{\Delta u_{10-40}} \cdot \frac{\ell_m^2}{I_{\text{eff}}} \quad (3-12)$$

Vor der Durchführung der Biegeversuche wurden außerdem bei allen Prüfkörpern zur Ermittlung des dynamischen Elastizitätsmoduls die Eigenfrequenz der Longitudinalschwingung, die Abmessungen und die Masse bestimmt. Wie der lokale Biege-Elastizitätsmodul bei den Reihen S600 wurden auch die dynamischen Elastizitätsmoduln auf den Querschnitt der Längslagen bezogen.

$$E_{\text{dyn}} = 4 \cdot f^2 \cdot L^2 \cdot \rho \cdot \frac{t_{\text{gross}}}{t_{\text{net,long}}} \quad (3-13)$$

Die Dehnsteifigkeit der Querlagen wurde in Gleichung (3-13) vernachlässigt, da sie, unter Annahme eines Elastizitätsmoduls rechtwinklig zur Faserrichtung des Holzes von 400 N/mm<sup>2</sup>, bei den Prüfkörpern nur 0,9% der gesamten Dehnsteifigkeit beträgt.

$$\frac{EA_{\text{cross}}}{EA_{\text{gross}}} = \frac{20 \cdot 400}{20 \cdot 400 + 80 \cdot 11000} = 0,009 \quad (3-14)$$

In Tabelle 3-11 sind die Mittelwerte der dynamischen Elastizitätsmoduln und der lokalen Biege-Elastizitätsmoduln der durchgeführten Versuchsreihen mit geraden Brettsperrholzträgern zusammengestellt.

Sowohl die dynamischen als auch die statischen Elastizitätsmoduln aller Versuchsreihen liegen in der Größenordnung von etwa 12.000 N/mm<sup>2</sup>. Die durch Schwingungsmessung ermittelten dynamischen Elastizitätsmoduln streuen insgesamt sehr wenig, sodass der Variationskoeffizient der Mittelwerte nur 2,0% beträgt. Bei den statisch ermittelten lokalen Elastizitätsmoduln ist die Streuung der Mittelwerte mit einem Variationskoeffizienten von 5,0% deutlich größer. Ursache hierfür ist der vergleichsweise geringe mittlere Elastizitätsmodul der Reihe S600LFJ, der um etwa 12% kleiner ist als der Mittelwert der übrigen fünf Versuchsreihen. Ohne den Mittelwert der Reihen P100LFJ ergibt sich für die Mittelwerte der lokalen Elastizitätsmoduln ein Variationskoeffizient von 2,4%, der mit dem für die Mittelwerte der dynamischen Elastizitätsmoduln berechneten Wert sehr gut übereinstimmt.

*Tabelle 3-11: Ermittelte Elastizitätsmoduln der geraden Brettsperrholzträger mit und ohne Universal-Keilzinkenverbindung*

Reihe	$E_{\text{dyn,net,mean}}$ In N/mm <sup>2</sup>	COV -	$E_{\text{lok,net,mean}}$ In N/mm <sup>2</sup>	COV -	$E_{\text{lok}}/E_{\text{dyn}}$
S600LFJ	11.884	0,035	11.283	0,045	0,949
S600REF	12.203	0,054	12.385	0,085	1,015
P200LFJ	12.219	0,035	12.323	0,060	1,009
P200REF	12.127	0,055	12.686	0,069	1,046
P100LFJ	11.984	0,039	12.830	0,088	1,071
P100REF	12.596	0,076	13.042	0,102	1,035

Der auffällige niedrige Mittelwert des lokalen Elastizitätsmoduls der Reihe S600LFJ deutet darauf hin, dass bei Brettsperrholzträgern mit Universal-Keilzinkenverbindungen, die in Plattenebene beansprucht werden, lokale Verformungsanteile auftreten, die sich nennenswert auf die Gesamtdurchbiegung auswirken. Ähnliche Beobachtungen, die bei der Auswertung der in Abschnitt 3.6 beschriebenen Versuche mit Brettsperrholz-Satteldachträgern gemacht wurden, führten letztlich dazu, dass bei den Versuchsreihen mit Brettsperrholz-Rahmenecken die lokalen Verdrehungen in den Universal-Keilzinkenverbindungen gemessen und zur Ermittlung der Drehfedersteifigkeit der Keilzinkenstöße herangezogen wurden. Auf der Grundlage dieser Ergebnisse wurden die lokalen Elastizitätsmoduln der Versuchsreihe S600LFJ neu berechnet. Die Ergebnisse der Neuauswertung sind in Abschnitt 3.7 angegeben.

#### 3.4.4 Zusammenfassung

Durch Versuche an Brettsperrholzträgern mit und ohne Universal-Keilzinkenverbindung wurden die Biegefestigkeit und der Biege-Elastizitätsmodul bei Beanspruchung in Plattenebene und rechtwinklig zur Plattenebene bestimmt.

Für beide Beanspruchungsrichtungen ergab sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen der auf den effektiven Restquerschnitt am Zinkengrund bezogenen Biegefestigkeit der geprüften Träger mit Universal-Keilzinkenverbindung und der Biegefestigkeit der Referenzreihen ohne Universal-Keilzinkenverbindung, sodass die Biegetragfähigkeit von Brettsperrholzträgern im Bereich von Universal-Keilzinkenverbindungen durch Multiplikation der Biegetragfähigkeit des ungeschwächten Querschnitts mit dem Faktor  $(1 - \nu_{\text{eff}})$  berechnet werden kann.

Die Versuchsergebnisse deuten darauf hin, dass die Universal-Keilzinkenverbindungen bei in Plattenebene beanspruchten Brettsperrholzträgern einen nennenswerten Einfluss auf die Gesamtverformung haben. Bei Beanspruchung rechtwinklig zur Plattenebene ist anhand der Versuchsergebnisse kein Einfluss der Universal-Keilzinkenverbindung auf Biegesteifigkeit erkennbar.

## 3.5 Biegeversuche mit geraden Brettschichtholzträgern

Zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Universal-Keilzinkenverbindungen in Brettschichtholz, die mit dem für Brettsperrholz entwickelten Profil hergestellt wurden, wurden zehn Biegeversuche mit keilgezinkten Brettschichtholzträgern durchgeführt.

### 3.5.1 Versuchsmaterial

Wie bei den Brettsperrholzträgern wurden die Universal-Keilzinkenverbindungen mit einer 3,2 mm breiten Randzinke ausgeführt und die Zinken der Universal-Keilzinkenverbindung verliefen parallel zur Querschnittshöhe. Die geprüften Brettschichtholzträger entsprachen der Festigkeitsklasse GL24h nach DIN 1052:2008. Sie hatten eine Höhe von 600 mm und eine Breite von 120 mm. Die Lamellendicke betrug 40 mm.

*Tabelle 3-12: Versuchsreihe zur Ermittlung der Biegefestigkeit von geraden Brettschichtholzträgern mit Universal-Keilzinkenverbindung*

Beanspruchung	Reihe	Anzahl	Höhe	Breite	Stützweite	Messlänge
		$n$	$h$ in mm	$b$ in mm	$l$ in mm	$l_m$ in mm
hochkant	BSH600	10	600	120	6.600	1.800

Vor der Versuchsdurchführung wurden, wie bei den geprüften Brettsperrholzträgern, die Produktionstoleranz in Dickenrichtung und das Zinkenspiel gemessen. Nach der Versuchsdurchführung wurden an zwei über den gesamten Querschnitt entnommenen Proben die Rohdichte und die Holzfeuchte bestimmt.

Tabelle 3-13: Rohdichte, Holzfeuchte und Produktionstoleranzen der geraden Brettsperrholzträger mit und ohne Universal-Keilzinkenverbindung

Reihe	$\rho_{\text{mean}}$ kg/m <sup>3</sup>	$HF_{\text{mean}}$ %	$\Delta t_{\text{mean}}$ in mm	$s_{\text{mean}}$ in mm
BSH600	465	11,1	1,5	5

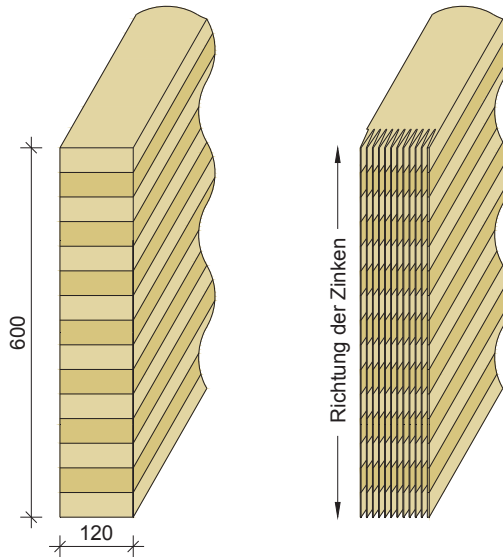


Bild 3-32: Querschnitt der Prüfkörper zur Ermittlung der Biegefestigkeit von Universal-Keilzinkenverbindung in Brettschichtholz

### 3.5.2 Versuchsdurchführung

Zur Ermittlung der Biegefestigkeit der Universal-Keilzinkenverbindungen wurden Vierpunkt-Biegeversuche mit zwei Einzellasten, die im Abstand von  $4 \cdot h$  von den beiden Trägersauflagern angeordnet waren, durchgeführt. Die Stützweite betrug das 12-fache der Trägerhöhe  $h$ , sodass der Trägerabschnitt zwischen den Lasteinleitungspunkten ebenfalls eine Länge von  $4 \cdot h$  hatte. An der Trägersoberseite in Feldmitte wurde die Gesamtdurchbiegung gemessen. Die lokale Durchbiegung wurde innerhalb einer Messlänge von  $3 \cdot h$  zwischen den beiden Einzellasten auf beiden Seiten der Prüfkörper in der neutralen Faser gemessen. Zur Messung der Gesamt-

durchbiegung in Feldmitte wurde ein induktiver Wegaufnehmer mit einer Messlänge von 50 mm und einer Messgenauigkeit von 1% verwendet. Die lokalen Verformungen im querkräftfreien Trägerabschnitt, die zur Ermittlung des Biege-Elastizitätsmoduls verwendet wurden, wurden mit zwei induktiven Wegaufnehmern mit einer Messlänge von 10 mm und einer Messgenauigkeit von 1% gemessen.

Die Belastung wurde bis zu einer Last von 30% der geschätzten Bruchlast  $F_{est}$  kraftgesteuert mit einer konstanten Belastungsgeschwindigkeit von  $0,2 \cdot F_{est}$  pro Minute aufgebracht. Oberhalb von  $0,3 \cdot F_{est}$  bis zum Bruch wurde die Belastung weggesteuert mit konstanter Vorschubgeschwindigkeit aufgebracht. Die Geschwindigkeit des Belastungskolbens so gewählt, dass die Höchstlast innerhalb von  $300 \text{ s} \pm 120 \text{ s}$  erreicht wurde. Soweit erforderlich, wurden die Prüfkörper gegen seitliches Ausweichen gesichert. Die Versuchsanordnungen ist in Bild 3-33 dargestellt.

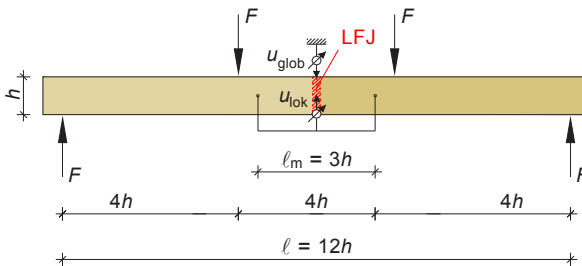


Bild 3-33: Versuchsanordnung bei den Biegeversuchen mit geraden BSH-Trägern mit Universal-Keilzinkenverbindung

### 3.5.3 Versuchsergebnisse

Alle zehn geprüften Brettschichtholzträger versagten in der Universal-Keilzinkenverbindung in Feldmitte, wobei das Versagen stets von der Biegezugzone ausging. Bei den meisten Prüfkörpern wiesen die Bruchflächen, wie auch bei den Brettsperrholzträgern, entweder reines Zugversagen im Zinkengrund, Scherversagen in den Klebeflächen entlang der Zinkenflanken oder Mischformen der beiden Versagensarten (Bild 3-34). Bei drei der zehn Prüfkörper trat in der äußersten Randlamelle der Zugzone ausschließlich Scherversagen entlang der Zinkenflanken ein. Die Bruchflächen



chen hatten weitgehend einen gut sichtbaren Faserbelag, wiesen jedoch auch blanke Stellen auf, an denen die Klebstoffschicht ohne Faserbelag erkennbar war (Bild 3-35). Insgesamt deuten die Bruchbilder der drei betroffenen Prüfkörper auf eine, zumindest im Teilbereich der Randlamellen, nicht ordnungsgemäß funktionierende Verklebung hin. Die Tragfähigkeiten der drei betroffenen Prüfkörper, die signifikant unter den Werten der restlichen Prüfkörper liegen, deuten ebenfalls auf eine unzureichende Verklebung hin.



Bild 3-34: gute Verklebung der Universal-Keilzinkenverbindung bei Prüfkörper BSH600-8



Bild 3-35: schlechte Verklebung der Universal-Keilzinkenverbindung bei Prüfkörper BSH600-7

Das Diagramm in Bild 3-36 zeigt die Last-Verformungskurven aller zehn Versuche. Im Diagramm ist das spröde Versagen der Prüfkörper deutlich zu erkennen. Die Kurven der drei schlecht verklebten Prüfkörper, mit Bruchlasten um 50 kN, sind ebenfalls gut sichtbar.

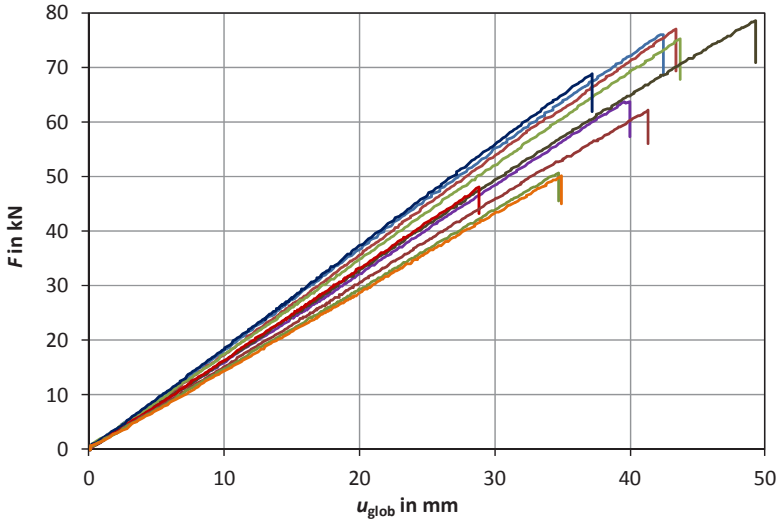


Bild 3-36: Last-Durchbiegungs-Kurven der geprüften Brett-schichtholzträger mit Universal-Keilzinkenverbindungen

Aus den Höchstlasten der Versuche wurde die auf den ungeschwächten Querschnitt bezogene Biegefestigkeit der Brett-schichtholzträger berechnet. Der Mittelwert der Biegefestigkeit und das nach EN 14358 berechnete 5%-Quantil wurden für alle zehn Prüfkörper der Versuchsreihe sowie für die sieben Prüfkörper mit guter Verklebung, unter Ausschluss der drei schlecht verklebten Träger, ermittelt. Der ebenfalls auf den ungeschwächten Querschnitt bezogene Elastizitätsmodul  $E_{lok}$  wurde für den Abschnitt der Last-Verformungs-Kurven zwischen 10% und 40% der Höchstlast aus der Durchbiegung im querkraftfreien Bereich zwischen den Lasteinleitungspunkten nach Gleichung (3-17) berechnet.

$$E_{lok} = \frac{3}{2} \cdot \frac{\Delta M_{10-40}}{\Delta u_{10-40}} \cdot \frac{\ell_m^2}{b \cdot h^3} \quad (3-15)$$

Vor der Durchführung der Biegeversuche wurde die Eigenfrequenz der Longitudinalschwingung zur Ermittlung des dynamischen Elastizitätsmoduls gemessen. Wie bei der Biegefestigkeit wurden die Mittelwerte des statischen und des dynamischen Elastizitätsmoduls für alle zehn Prüfkörper und für die sieben Prüfkörper mit guter Verklebung berechnet. Die Mittelwerte der statischen Elastizitätsmoduln liegen mit  $12.000 \text{ N/mm}^2$  bzw.  $12.500 \text{ N/mm}^2$  im Bereich der für die Festigkeitsklasse erwarteten Werte. Auch die aus den Mittelwerten des statischen und dynamischen Elastizitätsmoduls berechneten Verhältniswerte von 0,94, für alle Prüfkörper, bzw. 0,95, für die sieben Prüfkörper mit guter Verklebung, entsprechen den in der Literatur angegebenen Verhältnis zwischen statischem und dynamischem Elastizitätsmodul. Die für die Prüfkörper 9 und 10 ermittelten Werte des statischen und des dynamischen Elastizitätsmoduls sind jedoch deutlich kleiner als die Messwerte der restlichen Prüfkörper. Ob die niedrigen Werte auf die schlechte Verklebung der Universal-Keilzinkenverbindung zurückzuführen ist, konnte jedoch nicht geklärt werden.

In Tabelle 3-14 und Tabelle 3-15 sind die wesentlichen Ergebnisse der Versuchsreihe angegeben. Die Ergebnisse der einzelnen Versuche sind in Anlage 3 zusammengestellt.

*Tabelle 3-14: Ermittelte Biegefestigkeiten der geraden Brettschichtholzträger mit Universal-Keilzinkenverbindung*

Reihe	$f_{m,\text{mean}}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{m,k}$ N/mm <sup>2</sup>	COV -	1- $V_{\text{eff,mean}}$ -
BSH600 (alle)	21,7	14,2	0,185	
BSH600 (ohne 7, 9, 10)	23,9	19,0	0,094	0,745

$f_{m,k}$  charakteristische Biegefestigkeit nach EN 14358 mit  $k_s (n = 10) = 2,10$  bzw.  $k_s (n = 7) = 2,32$

*Tabelle 3-15: Ermittelte Elastizitätsmoduln der geraden Brettschichtholzträger mit Universal-Keilzinkenverbindung*

Reihe	$E_{\text{dyn,mean}}$ N/mm <sup>2</sup>	COV -	$E_{\text{lok,mean}}$ N/mm <sup>2</sup>	COV -
BSH600 (alle)	12.795	0,086	12.059	0,101
BSH600 (ohne 7, 9, 10)	13.169	0,072	12.487	0,085

### 3.5.4 Zusammenfassung

Die Biegefestigkeit und der Elastizitätsmodul von Universal-Keilzinkenverbindungen in Brettschichtholzträgern, mit dem neu entwickelten Keilzinkenprofil 40-10-1,4, wurden durch Versuche ermittelt. Bei drei der zehn Prüfkörper wurde eine unzureichende Verklebung der Universal-Keilzinkenverbindungen festgestellt. Werden die schlecht verklebten Prüfkörper bei der Berechnung der mittleren und der charakteristischen Biegefestigkeit berücksichtigt, ergeben sich Werte, die deutlich unter den für die geprüfte Festigkeitsklasse zu erwartenden Werten liegen. Werden die drei schlecht verklebten Prüfkörper hingegen als Ausreißer betrachtet, ergeben sich deutlich höhere Biegefestigkeiten: Bezogen auf den effektiven Querschnitt in der Universal-Keilzinkenverbindung ergibt sich eine mittlere Biegefestigkeit von  $23,9 / (1 - \nu_{\text{eff,mean}}) = 32,1 \text{ N/mm}^2$  und ein charakteristischer Wert von  $19,0 / (1 - \nu_{\text{eff,mean}}) = 25,5 \text{ N/mm}^2$ . Vergleicht man diese Werte mit den in der Literatur angegebenen experimentell ermittelten Biegefestigkeiten von Brettschichtholzträgern (z.B. Schickhofer, 1996) erscheint das neu entwickelte Keilzinkenprofil 40-10-1,4 auch zur Verbindung von Bauteilen aus Brettschichtholz gut geeignet.

## 3.6 Biegeversuche mit Brettsperrholz-Satteldachträgern

Die Entwicklung von Universal-Keilzinkenverbindungen zur Herstellung großer Satteldachträger aus Brettsperrholz mit Spannweiten über 18 m war eines der erklärten Ziele des Forschungsvorhabens. Bei Satteldachträgern, die wie in Bild 1-1 dargestellt, aus zwei oder drei unter einem Winkel kleiner  $180^\circ$  miteinander verbundenen Teilen bestehen, werden die Universal-Keilzinkenverbindungen durch öffnende Momente beansprucht, d.h. in den innenliegenden Ecken der stumpfen Winkel treten Biegezugspannungen auf. Im Schnitt durch die Universal-Keilzinkenverbindung wirken diese Spannungen unter einem Winkel zur Faserrichtung, sodass im Material neben Spannungen in Richtung der Längslagen auch Spannungen in Richtung der Querlagen und Schubspannungen entstehen. Wegen der unter einem Winkel zur Faserrichtung der Längslagen wirkenden Spannungen ist mit einer, gegenüber geraden Trägern, reduzierten Festigkeit zu rechnen. Darüber hinaus treten an den innenliegenden, einspringenden Ecken deutlich erhöhte Spannungen auf (vgl. Abschnitt 4.1). Beide Effekte, die Reduzierung der Festigkeit und der Anstieg der Spannungen, sind abhängig vom Öffnungswinkel  $\beta$  eines Satteldachträgers oder, allgemein ausgedrückt, vom Winkel zwischen den Bauteilachsen zweier verbundener Bauteile.

### 3.6.1 Versuchsmaterial

Zur Ermittlung der Biegefestigkeit von Universal-Keilzinkenverbindungen bei Beanspruchung durch öffnende Momente wurden drei Versuchsreihen mit unterschiedlichen Öffnungswinkeln durchgeführt. Die Prüfkörper wurden aus zwei gleichlangen, geraden Brettsperrholzträgern hergestellt, die unter Winkeln von  $170^\circ$ ,  $150^\circ$  und  $130^\circ$  gestoßen wurden. Der Schnittwinkel  $\alpha$  der Universal-Keilzinkenverbindungen, der bei den Prüfkörpern dem Neigungswinkel der beiden Schenkel entspricht, ergibt sich unmittelbar aus dem Öffnungswinkel  $\beta$ . Entsprechend dem Vorzeichen der einwirkenden Momente werden die Schnittwinkel bei den Satteldachträgern mit positivem Vorzeichen definiert.

$$\alpha = \frac{180^\circ - \beta}{2} \quad (3-16)$$

Die beiden Schenkel der Satteldachträger hatten den in Abschnitt 3.2 beschriebenen Lagenaufbau mit einer Gesamtdicke von 200 mm. Die Höhe der Querschnitte rechtwinklig zur Trägerachse betrug, wie in den Versuchsreihen der vorangegangenen Abschnitte, 600 mm. In Tabelle 3-16 sind Anzahl und Abmessungen der geprüften Satteldachträger zusammengestellt.

*Tabelle 3-16: Versuchsreihen zur Ermittlung der Biegefestigkeit von Universal-Keilzinkenverbindungen bei Schnittwinkeln  $\alpha > 0^\circ$  und öffnenden Momenten (Brettsperrholz-Satteldachträger)*

Reihe	Anzahl n	Schnitt- winkel $\alpha$ in °	Höhe h in mm	Breite $b_{\text{brutto}}$ in mm	Stütz- weite $\ell$ in mm	Mess- länge $\ell_m$ in mm
SD600-05	5	5	600	200	9.000	3.000
SD600-15	5	15	600	200	9.000	3.000
SD600-25	5	25	600	200	9.000	3.000

Vor der Versuchsdurchführung wurden wie zuvor die Produktionstoleranz in Dickenrichtung und das Zinkenspiel bei allen Prüfkörpern gemessen. Nach der Versuchsdurchführung wurden an zwei über den gesamten Querschnitt entnommenen Proben mit die Rohdichte und die Holzfeuchte bestimmt.

*Tabelle 3-17: Rohdichte, Holzfeuchte und Produktionstoleranzen der Brettsperrholz-Satteldachträger*

Reihe	$\rho_{\text{mean}}$ in kg/m <sup>3</sup>	$HF_{\text{mean}}$ in %	$\Delta t_{\text{mean}}$ in mm	$s_{\text{mean}}$ in mm
SD600-05	451	11,0	0,9	5
SD600-15	447	10,7	1,5	6
SD600-25	448	11,1	1,4	5,5

### 3.6.2 Versuchsdurchführung

Die Biegeversuche mit Brettsperrholz-Satteldachträgern wurden als Vierpunkt-Biegeversuche in Anlehnung an DIN EN 408 durchgeführt. Bei allen drei Versuchsreihen betrug die Stützweite 9000 mm und die beiden Einzellasten wurden in den Drittelpunkten der Stützweite an der Oberseite der Träger eingeleitet. Wie bei den Versuchen mit geraden Brettsperrholzträgern wurde die Gesamtdurchbiegung in der Mitte der Stützweite an der Trägeroberseite gemessen. Die lokale Durchbiegung wurde innerhalb einer Messlänge von  $4 \cdot h$  zwischen den beiden Einzellasten auf beiden Seiten der Prüfkörper in der neutralen Faser gemessen. Zur Messung der Gesamtdurchbiegung in Feldmitte wurde ein induktiver Wegaufnehmer mit einer Messlänge von 50 mm verwendet. Die lokalen Verformungen im querkraftfreien Trägerabschnitt wurden mit zwei induktiven Wegaufnehmern mit einer Messlänge von 10 mm gemessen. Die Versuchsanordnung ist in Bild 3-37 und Bild 3-38 dargestellt.

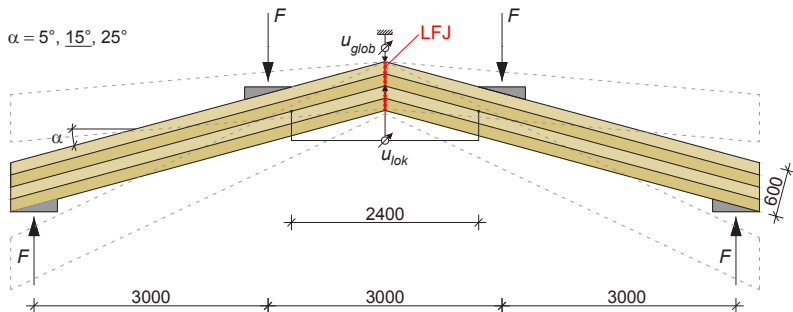


Bild 3-37: Versuchsanordnung zur Ermittlung der Biegefestigkeit von Universal-Keilzinkenverbindungen in Brettsperrholz-Satteldachträgern

Die Belastung wurde bis 30% der geschätzten Bruchlast kraftgesteuert mit einer konstanten Belastungsgeschwindigkeit von  $0,2 \cdot F_{\text{est}}$  pro Minute aufgebracht. Oberhalb von  $0,3 \cdot F_{\text{est}}$  bis zum Bruch wurde die Belastung weggesteuert mit konstanter Vorschubgeschwindigkeit aufgebracht. Die Geschwindigkeit des Belastungskolbens wurde so gewählt, dass die Höchstlast innerhalb von  $300 \text{ s} \pm 120 \text{ s}$  erreicht wurde. Soweit erforderlich, wurden die Prüfkörper gegen seitliches Ausweichen gesichert.



*Bild 3-38: Prüfkörper der Versuchsreihe SD25 im Prüfstand*

### 3.6.3 Versuchsergebnisse

Bei allen 15 Prüfkörpern trat das Versagen in der Universal-Keilzinkenverbindung, ausgehend von der unteren, einspringenden Ecke, durch Erreichen der Biegefestigkeit in den untersten Lamellen der Längslagen ein. Bei keinem der Prüfkörper waren, weder vor noch nach dem Erreichen der Höchstlast, Risse oder sonstige Schäden infolge von Zugspannungen quer zur Trägerachse erkennbar. Auch die Kreuzungsflächen zwischen Längs- und Querlagen im Bereich der Universal-Keilzinkenverbindungen wiesen keine erkennbaren Schäden auf. Bild 3-39 zeigt drei Beispiele des für alle Versuchsreihen typischen Bruchbildes.





Bild 3-39: Beispiele für das typische Versagen bei den Versuchsreihen mit Brettsperrholz-Satteldachträgern; links: Versuchsreihe SD600-05, Mitte: Versuchsreihe SD600-15; rechts: Versuchsreihe SD600-25

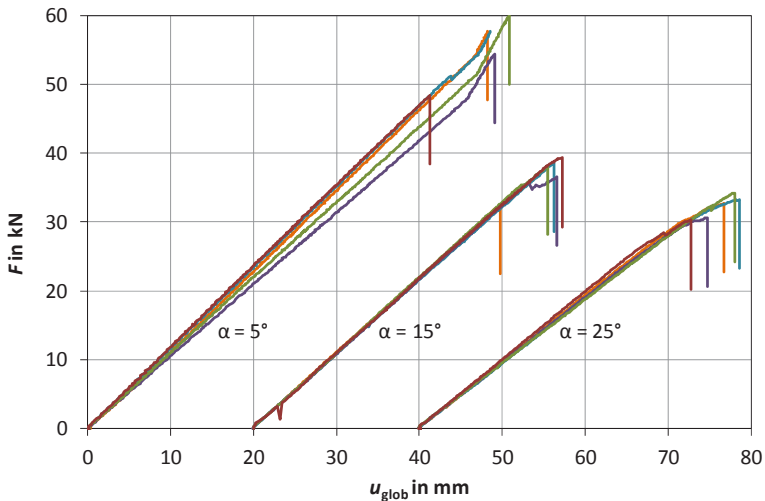


Bild 3-40: Last-Verschiebungskurven der Versuchsreihen SD5, SD15 und SD25

In Bild 3-40 sind die Last-Verformungskurven aller drei Versuchsreihen dargestellt. Im Diagramm ist die Reduzierung der Traglast mit zunehmendem Schnitt- bzw. Neigungswinkel  $\alpha$  deutlich erkennbar. Aus den Höchstlasten wurden für alle Prüfkörper die auf den Querschnitt der Längslagen rechtwinklig zur Trägerachse bezogene Biegefestigkeit der Universal-

Keilzinkenverbindungen berechnet. Die Ergebnisse der Auswertung der einzelnen Versuche sind in Anlage 4 zusammengestellt.

In Tabelle 3-18 sind der Mittelwert und der nach EN 14358 berechnete charakteristische Wert der Biegefestigkeit für die drei Versuchsreihen angegeben. Die in der Tabelle angegebenen Festigkeiten bestätigen, die bereits in Bild 3-40 erkennbare Abnahme der Biegefestigkeit mit zunehmendem Schnittwinkel  $\alpha$ . In der dritten Spalte der Tabelle 3-18 sind die Variationskoeffizienten der Biegefestigkeit angegeben. Wie bei der Biegefestigkeit der Universal-Keilzinkenverbindungen in geraden Brettsperrholzträgern ist auch bei den Satteldachträgern die Streuung der Biegefestigkeit verhältnismäßig gering. Die Werte  $(1 - v_{\text{eff,mean}})$  in der letzten Spalte der Tabelle geben das mittlere Verhältnis zwischen dem in den Universal-Keilzinkenverbindungen vorhandenen Restquerschnitt der Längslagen bezogen auf den ungeschwächten Querschnitt der Längslagen an.

Tabelle 3-18: *Ermittelte Biegefestigkeiten Brettsperrholz-Satteldachträger*

Reihe	$f_{m,\alpha,\text{net,mean}}$ in N/mm <sup>2</sup>	COV -	$f_{m,\alpha,\text{net,k}}$ in N/mm <sup>2</sup>	$1 - v_{\text{eff,mean}}$ -
SD600-05	17,7	0,082	14,3	0,747
SD600-15	11,8	0,074	9,8	0,719
SD600-25	10,3	0,052	9,0	0,730

$f_{m,\alpha,\text{net,k}}$  charakteristische Biegefestigkeit nach EN 14358 mit  $k_s (n = 5) = 2,46$

Die in Tabelle 3-18 angegebenen Biegefestigkeiten sind auf den ungeschwächten Querschnitt der Längslagen bezogen, der bei allen Prüfkörpern gleich groß ist. Die Werte enthalten damit sowohl den Einfluss der unterschiedlich großen Verschwächungsgrade der Universal-Keilzinkenverbindung als auch den des Schnittwinkels  $\alpha$ .

Um die Abhängigkeit der Biegefestigkeit vom Schnittwinkel  $\alpha$  ohne störende Einflüsse des Verschwächungsgrades ermitteln zu können, wurden die Biegefestigkeit auf den in den Universal-Keilzinkenverbindungen tatsächlich vorhandenen Restquerschnitt der Längslagen bezogen. In Bild 3-41 sind die durch  $(1 - v_{\text{eff,mean}})$  dividierten Biegefestigkeiten über dem Schnittwinkel  $\alpha$  aufgetragen. In der Grafik sind zusätzlich die in den Versuchsreihen S600REF

und S600LFJ für gerade Brettsperrholzträger ermittelten Biegefestigkeiten angegeben, wobei die Werte für die Reihe S600LFJ ebenfalls die durch  $(1 - \nu_{\text{eff,mean}})$  dividierten Werte angegeben sind.

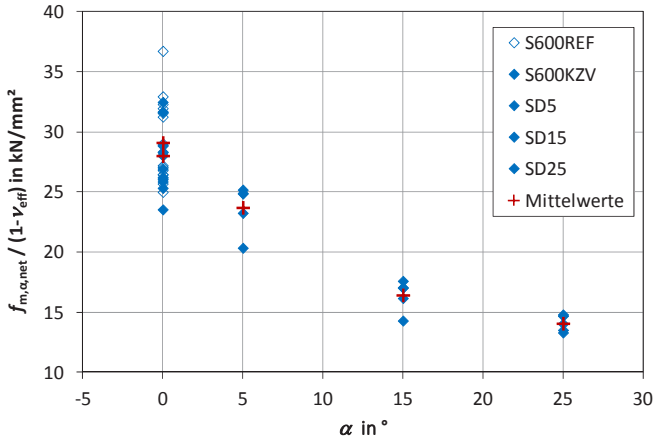


Bild 3-41: Auf den Restquerschnitt der Längslagen bezogene Biegefestigkeit der Brettsperrholz-Satteldachträger über dem Schnittwinkel  $\alpha$

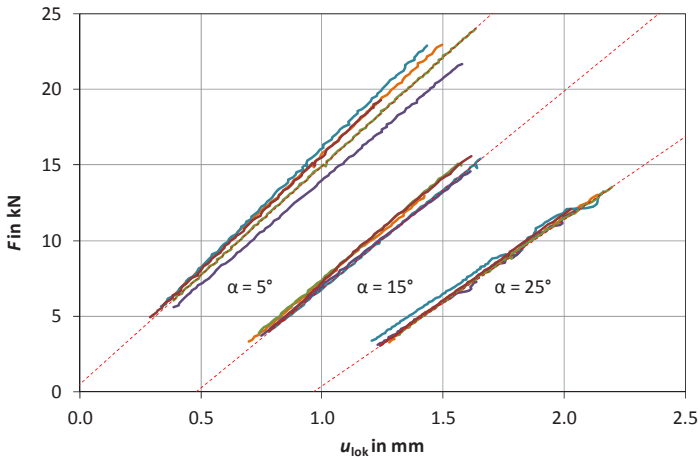


Bild 3-42: Last-Verformungs-Kurven der lokalen Durchbiegung der Brettsperrholz-Satteldachträger für den Bereich zwischen 10% und 40% der Höchstlast

Aus der Steigung der in Bild 3-42 dargestellten Last-Verformungs-Kurven der lokalen Durchbiegung wurden die Elastizitätsmoduln der Brettsperrholz-Satteldachträger nach Gleichung (3-17) berechnet. Dabei wurden der in Bild 3-43 dargestellte geometrische Zusammenhang zwischen der gemessenen Durchbiegung  $u_{lok}$  und der Durchbiegung  $u_{90}$  rechtwinklig zur Trägerachse und die tatsächliche Länge der Trägerachse berücksichtigt.

$$(EI)_{loc} = \frac{2}{16} \cdot \frac{M \cdot L^2}{u_{90} \cdot \cos^2 \alpha} = \frac{2}{16} \cdot \frac{F \cdot L^3}{u_{lok} \cdot \cos \alpha} \quad (3-17)$$

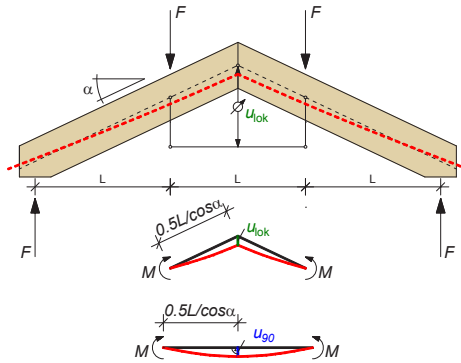


Bild 3-43: Zusammenhang zwischen der gemessenen Verformung  $u_{lok}$  und der Verformung  $u_{90}$  rechtwinklig zur Stabachse

Die Mittelwerte der ermittelten Elastizitätsmoduln sind in Tabelle 3-19 angegeben.

Tabelle 3-19: Ermittelte Elastizitätsmoduln der Brettsperrholz-Satteldachträger

Reihe	$E_{lok,mean}$ in $N/mm^2$	COV
SD600-05	11.488	0,050
SD600-15	10.642	0,031
SD600-25	9.432	0,030

In Bild 3-44 sind die aus den einzelnen Versuchen ermittelten Werte über dem Schnittwinkel  $\alpha$  aufgetragen. Im Diagramm sind zusätzlich zu den Elastizitätsmoduln der Satteldachträger auch die für die geraden Brettsperrholzträger mit und ohne Universal-Keilzinkenverbindung ermittelten Werte eingetragen.

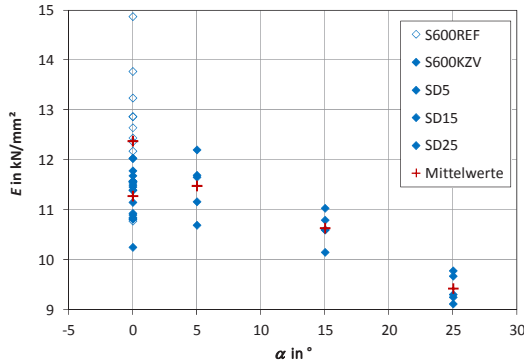


Bild 3-44: Elastizitätsmoduln von in Plattenebene beanspruchten Brettsperrholzträgern mit Universal-Keilzinkenverbindung über dem Schnittwinkel  $\alpha$

Die Werte in Tabelle 3-19 und das Diagramm in Bild 3-44 zeigen eine deutliche Abnahme des Elastizitätsmoduls mit zunehmendem Schnittwinkel  $\alpha$ . Die Streuungen innerhalb der Versuchsreihen sind relativ gering und die Unterschiede zwischen den einzelnen Versuchsreihen so deutlich, dass der Steifigkeitsverlust nicht auf streuende Materialeigenschaften zurückgeführt werden kann. Vielmehr deutet die scheinbare Abnahme des Elastizitätsmoduls darauf hin, dass gegenseitige Verdrehungen der beiden Trägerhälften in den Universal-Keilzinkenverbindungen einen signifikanten und mit zunehmendem Schnittwinkel stärker werdenden Einfluss auf die gemessene Gesamtdurchbiegung haben. Wie bereits in Abschnitt 3.4 beschrieben, wurden aufgrund dieser Vermutung die lokalen Verdrehungen in den Universal-Keilzinkenverbindungen der Brettsperrholz-Rahmenecken gemessen und zur Ermittlung der Drehfedersteifigkeit der Universal-Keilzinkenstöße verwendet. In Abschnitt 3.7 sind die unter Berücksichtigung der Nachgiebigkeit der Universal-Keilzinkenverbindungen berechneten Elastizitätsmoduln der Brettsperrholz-Satteldachträger angegeben.

### 3.6.4 Zusammenfassung

Zur Ermittlung der Biegefestigkeit von Universal-Keilzinkenverbindungen in Brettspertholz-Satteldachträgern wurden Biegeversuche mit drei unterschiedlichen Öffnungswinkeln kleiner  $180^\circ$  durchgeführt. Alle Prüfkörper versagten durch Erreichen der Biegezugfestigkeit in den einspringenden Ecken der Universal-Keilzinkenverbindungen. Die am Bauteilknick auftretenden Querspannungen hatten keinen erkennbaren Einfluss auf die Tragfähigkeit der geprüften Satteldachträger.

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass die Biegefestigkeit der Universal-Keilzinkenverbindungen mit zunehmendem Schnittwinkel  $\alpha$  signifikant abnimmt. Die Biegesteifigkeit der geprüften Satteldachträger sinkt mit zunehmendem Schnittwinkel ebenfalls.

## 3.7 Versuche mit Brettsperrholz-Rahmenecken

Neben der Entwicklung großer Brettsperrholz-Satteldachträger war die Entwicklung von Brettsperrholz-Rahmenecken ein weiteres wichtiges Ziel des Forschungsvorhabens. Biegesteife Rahmenecken von Zwei- und Dreigelenkrahmen werden hauptsächlich durch schließende Momente und Normalkräfte beansprucht. Werden die Rahmen durch äußere Horizontale Lasten beansprucht, können in den Rahmenecken auch öffnende Momente auftreten, die jedoch in der Regel deutlich kleiner sind als die durch vertikale Lasten verursachten schließenden Eckmomente. Die in den Rahmenecken wirkenden Querkräfte sind bei keilgezinkten Rahmenecken von eher untergeordneter Bedeutung.

### 3.7.1 Versuchsmaterial

Zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Universal-Keilzinkenverbindungen in Brettsperrholz bei Beanspruchung durch schließende Momente und Normalkräfte wurden Versuche an Rahmenecken mit unterschiedlichen Öffnungswinkeln  $\beta$  von  $90^\circ$ ,  $105^\circ$  und  $115^\circ$  durchgeführt. Um die Schnittwinkel klein zu halten, wurden alle Prüfkörper mit zwei Universal-Keilzinkenstößen und einem dazwischen liegendem Eckstück ausgeführt. Auf Versuche mit Rahmenecken, die durch öffnende Momente beansprucht werden, wurde verzichtet, da die entsprechenden Tragfähigkeiten aus den Versuchen mit Brettsperrholz-Satteldachträgern abgeleitet werden können. Wie bei den Satteldachträgern wurde auch bei den Rahmenecken das Vorzeichen des Schnittwinkels entsprechend dem Vorzeichen des einwirkenden Moments definiert.

Die Querschnitte aller Prüfkörper hatten eine Höhe von 600 mm und den in Abschnitt 3.2 beschriebenen sechslagigen Aufbau mit einer Gesamtdicke von 200 mm und eine Querlagenanteil von 20%. In Tabelle 3-20 sind die durchgeführten Versuchsreihen und die Abmessungen der Prüfkörper zusammengestellt. Wie bei den in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen Versuchsreihen wurde auch bei den Prüfkörpern der Versuche mit Rahmenecken die Produktionstoleranz in Dickenrichtung und das Zinkenspiel bei aller Universal-Keilzinkenverbindungen gemessen. Die Rohdichte und die Holzfeuchte im Darrversuch wurden nach der Ver-

suchsdurchführung für jedes der drei Teilstücke eines Prüfkörpers an einer über den gesamten Querschnitt entnommenen Probe bestimmt. In Tabelle 3-21 sind die Mittelwerte der gemessenen Größen für jeder der drei Versuchsreihen angegeben. Die Messwerte der einzelnen Prüfkörper sind in Anlage 5 zusammengestellt.

Tabelle 3-20: Versuchsreihen mit Brettsperrholz-Rahmenecken

Reihe	Anzahl $n$	Schnitt winkel $\alpha$ in °	Höhe $h$ in mm	Breite $b_{\text{brutto}}$ in mm	System- länge $l_{\text{ges}}$ in mm	Last- ausmitte $e$ in mm
RE600-90	5	-22,5	593	200	6.095	1.926
RE600-105	5	-18,75	593	200	5.514	1.495
RE600-115	5	-16,25	593	200	5.229	1.250

Tabelle 3-21: Rohdichte, Holzfeuchte und Produktionstoleranzen der Brettsperrholz Rahmenecken

Reihe	$\rho_{\text{mean}}$ in kg/m <sup>3</sup>	$HF_{\text{mean}}$ in %	$\Delta t_{\text{mean}}$ in mm	$S_{\text{mean}}$ in mm
RE600-90	458	11,8	3,0	6,0
RE600-105	463	11,6	3,2	5,4
RE600-115	469	11,2	2,9	5,3

### 3.7.2 Versuchsdurchführung

Zur Durchführung der Versuche wurden die Prüfkörper stehend in einen Prüfraumen eingebaut und durch eine an den Enden der beiden Schenkel angreifende vertikale Kraft belastet. Die Lagerung erfolgte über Kugelkalotten. Die über Eck gemessene Länge wurde mit 4500 mm bei allen Prüfkörpern gleich groß gewählt, sodass sich für die einzelnen Versuchsreihen unterschiedliche Lastausmitten  $e$  und unterschiedliche Verhältnisse aus Moment und Normalkraft in den Rahmenecken ergaben. Die Gesamtverformung der Prüfkörper wurde in der Wirkungslinie der einwirkenden Kraft



mit einem Seilzug-Wegaufnehmer mit einer Messlänge von 500 mm gemessen. Der Versuchsaufbau ist in Bild 3-45 und Bild 3-46 gezeigt.

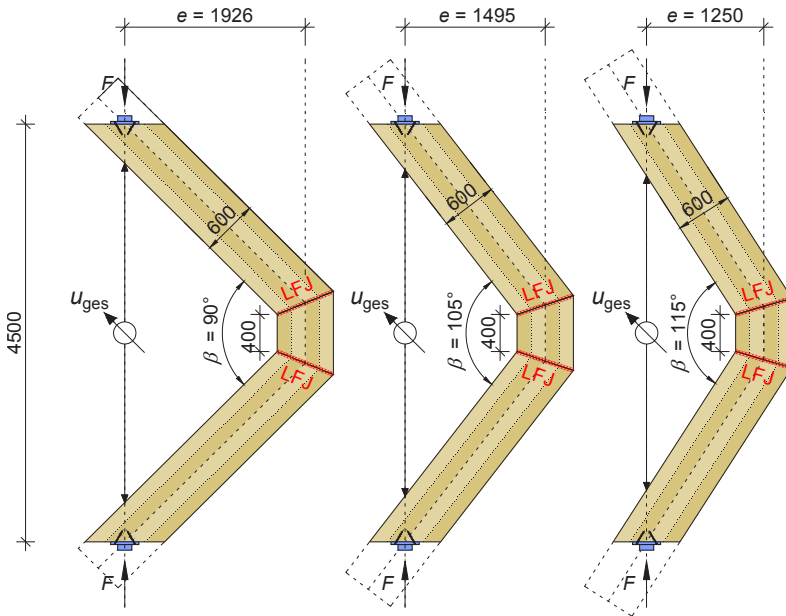


Bild 3-45: Versuchsaufbau bei den Versuchen mit Brettsperrholz-Rahmenecken (von links nach rechts: Reihe RE600-90, RE600-105 und Reihe RE600-115)

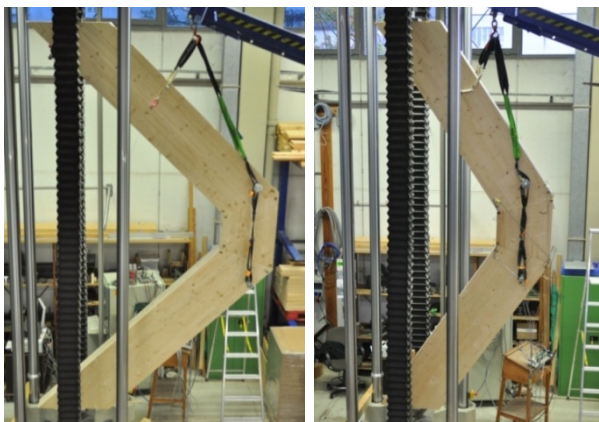


Bild 3-46: Prüfkörper der Reihe RE600-90 (links) und RE600-115 (rechts)

Da die Ergebnisse der Versuchsreihen mit keilgezinkten geraden Brettsperrholzträgern und mit Brettsperrholz-Satteldachträgern darauf hindeuteten, dass gegenseitige Verdrehungen in den Universal-Keilzinkenverbindungen einen wesentlichen Beitrag zur Gesamtverformung leisten und dieser Anteil mit zunehmendem Schnittwinkel  $\alpha$  ansteigt, wurden bei den Versuchsreihen mit keilgezinkten Brettsperrholz-Rahmenecken die lokalen Verformungen unmittelbar an den Universal-Keilzinkenverbindungen gemessen. Hierzu wurden an jeder der beiden Universal-Keilzinkenverbindungen vier Induktive Wegaufnehmer mit einer Messbereich von 10 mm angebracht, mit denen die lokalen Verschiebungen  $u_{\text{lok},i}$  rechtwinklig zur Stoßfuge zwischen den beiden verbundenen Bauteilen gemessen wurden (Bild 3-47).

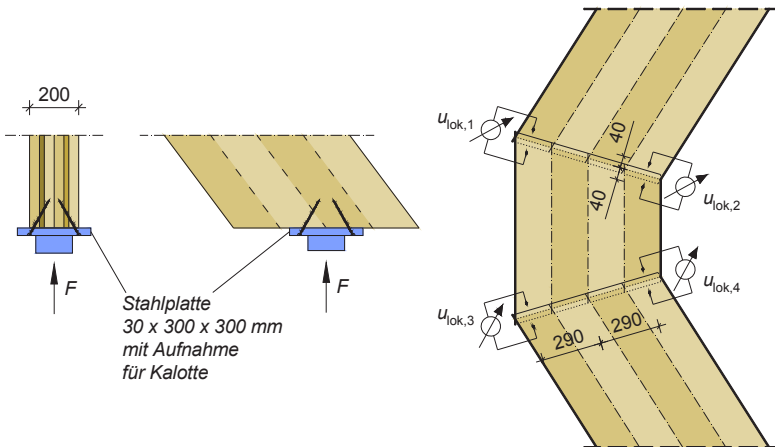


Bild 3-47: Lasteinleitung (links) und Messung der lokalen Verformungen in den Universal-Keilzinkenverbindungen (rechts) bei den Versuchen mit Brettsperrholz-Rahmenecken

### 3.7.3 Versuchsergebnisse - Festigkeiten

Von den beiden in jedem Prüfkörper vorhandenen Universalkeilzinkenverbindungen versagte unter der erreichten Höchstlast jeweils nur eine, wobei das Versagen stets in der Verbindung mit dem größeren effektiven Verschwächungsgrad eintrat. Bei allen Prüfkörpern trat das Versagen letztlich durch Erreichen der Biegezugfestigkeit an der äußeren durch

Biegezugspannungen beanspruchten Ecke der Universal-Keilzinkenverbindungen ein. Bild 3-49 und Bild 3-48 zeigen das für alle Versuchsreihen typische Versagensbild.

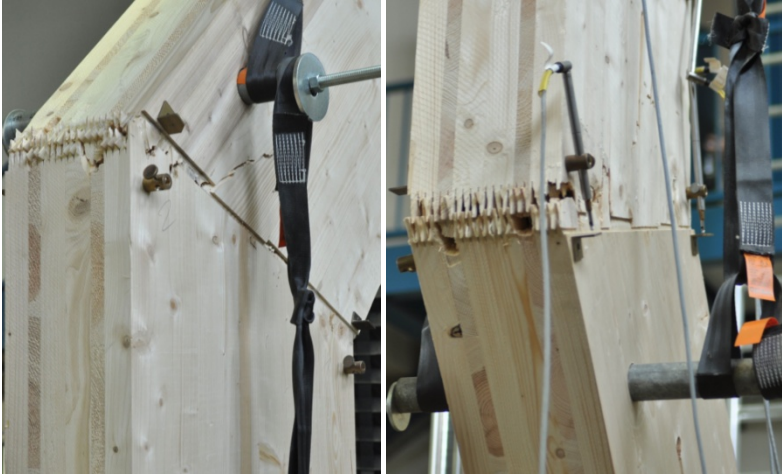


Bild 3-48: Prüfkörper RE900-90-4 (links) und RE600-105-5 (rechts) nach dem Erreichen der Höchstlast



Bild 3-49: Prüfkörper RE600-115-5 nach dem Erreichen der Höchstlast

In Bild 3-50 ist für alle geprüften Brettsperholz-Rahmenecken die aufgebrauchte Last über der Gesamtverformung der Prüfkörper aufgetragen. An den Last-Verschiebungskurven ist zu erkennen, dass bei vielen Prüfkörpern

pern die Steigung der Last-Verformungskurven deutlich flacher wird. Der Verlust der Biegesteifigkeit deutet auf Schädigungen in der Biegedruckzone der Rahmenecken hin, wo die Druckspannungen betragsmäßig deutlich größer sind als die Biegezugspannungen in der äußeren Ecke. Dennoch waren während und nach der Versuchsdurchführung keine Druckfalten an den Bauteiloberflächen erkennbar.

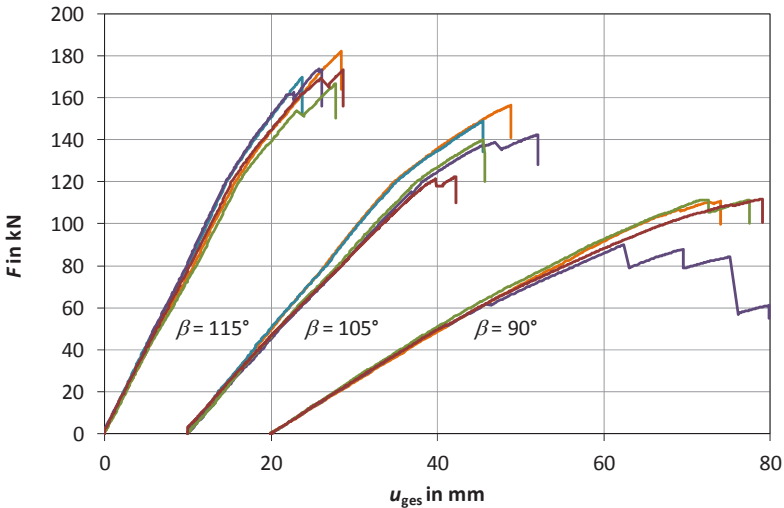


Bild 3-50: Last Verschiebungs-Kurven für die Prüfkörper der Reihen RE

Im Eckstück des Prüfkörpers RE600-90-3 war in einer der außenliegenden Längslagen eine Lamelle stumpf gestoßen. Bei diesem Prüfkörper beträgt die erreichte Bruchlast nur etwa 80% der bei den restlichen Versuchen der Reihe RE600-90 erreichten Bruchlast. Die lilafarbene Last-Verschiebungskurve dieses Versuchs hebt sich deutlich von den anderen Last-Verschiebungskurven der Reihe ab. Bei der Auswertung der Versuche wurden die Ergebnisse dieses Versuchs daher außer Acht gelassen.



Bild 3-51: Stumpf gestoßene Längslamelle im Eckstück des Prüfkörpers RE600-90-3

Aus der aufgebrachten Höchstlast wurde unter Annahme einer linearen Spannungsverteilung für jeden Prüfkörper die Biegespannung  $\sigma_{M,net}$ , die Normalspannung  $\sigma_{N,net}$ , und, durch Überlagerung der beiden Spannungsanteile, die Zug- und Druckspannungen in den äußersten Fasern berechnet. Alle Spannungen wurden mit den Schnittgrößen im Eckstück berechnet und sind auf den Querschnitt der Längslagen in einem Schnitt rechtwinklig zur Achse des Eckstücks bezogen. Aus der durch Überlagerung ermittelten Druckspannung in der inneren Ecke wurde für jede Versuchsreihe der charakteristische Wert der Biegedruckfestigkeit  $f_{m,net,k}$  nach EN 14359 berechnet.

In Tabelle 3-22 sind die ermittelten Werte der Spannungen und Festigkeiten sowie die aus den mittleren effektiven Verschwächungsgraden der Versuchsreihen berechneten Werte ( $1 - v_{eff,mean}$ ) zusammengestellt.

Tabelle 3-22: Bruchspannungen bei den Brettsper Holz-Rahmenecken

Reihe	$\sigma_{M,net,mean}$ in N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_{N,net,mean}$ in N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_{mt,net,mean}$ in N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_{mc,net,mean}$ in N/mm <sup>2</sup>	COV	$f_{m,net,k}$ in N/mm <sup>2</sup>	$1 - v_{eff,mean}$ -
RE600-90	22,5	-1,16	21,4	-23,7	0,087	18,1	0,693
RE600-105	22,6	-1,50	21,1	-24,1	0,090	19,1	0,697
RE600-115	23,0	-1,82	21,2	-24,8	0,034	21,9	0,694

$f_{m,net,k}$  charakteristische Biege(-druck)-festigkeit nach EN 14358 mit  $k_s (n = 5) = 2,46$

Die in Tabelle 3-22 angegebenen Spannungen und Festigkeiten sind auf den nominellen Querschnitt der Längslagen bezogen. In den Werten sind daher implizit Einflüsse aus der effektiven Verschwächung am Zinkengrund und der Einfluss des Schnittwinkels enthalten. In Bild 3-52 sind die Randspannungen  $\sigma_{mc,net}$  und  $\sigma_{mt,net}$  auf den tatsächlich vorhandenen Querschnitt der Prüfkörper in der Keilzinkenverbindung – unter Abzug der effektiven Verschwächung am Zinkenrund – bezogen. Die Diagramme zeigen damit die Abhängigkeit der Biegefestigkeit vom Schnittwinkel  $\alpha$  ohne den Einfluss der unterschiedlichen Verschwächungsgrade. Zum Vergleich sind in der Grafik die in der Versuchsreihe S600LFJ für gerade Brettsperrholzträger ermittelten Biegefestigkeiten angegeben.

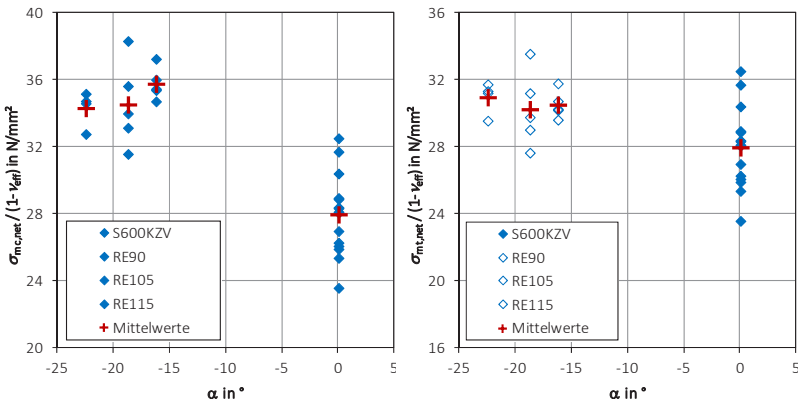


Bild 3-52: Auf den Restquerschnitt der Längslagen bezogene Randspannungen bei den Brettsperrholz-Rahmenecken; links: Druck; rechts: Zug

### 3.7.4 Versuchsergebnisse - Steifigkeiten

Bild 3-53, Bild 3-54 und Bild 3-55 zeigen exemplarisch die Last-Verformungskurve der lokalen Verschiebungen in den Universal-Keilzinkenverbindungen für jeweils einen Prüfkörper der drei Versuchsreihen. Bei Betrachtung der Kurven wird deutlich, dass in der Druckzone der Universal-Keilzinkenverbindungen bereits vor dem Erreichen der Bruchlast die Druckfestigkeit erreicht war und erhebliche nicht-elastische Verformungen auftraten.

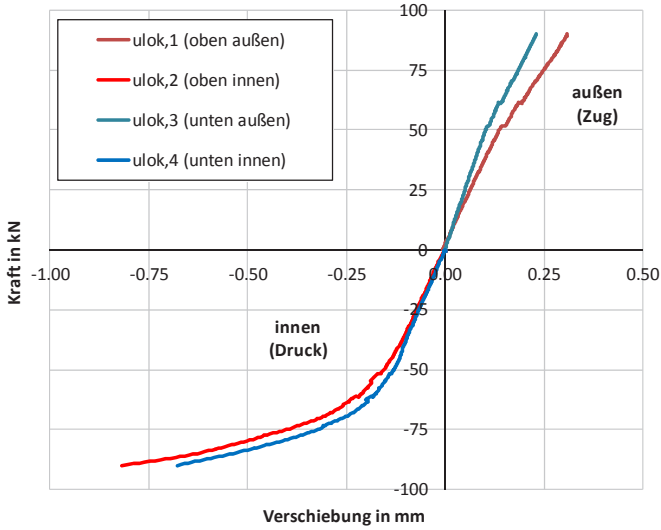


Bild 3-53: Lokale Verformungen  $u_{lok,i}$  in den Universal-Keilzinkenstößen des Prüfkörpers RE600-90-03

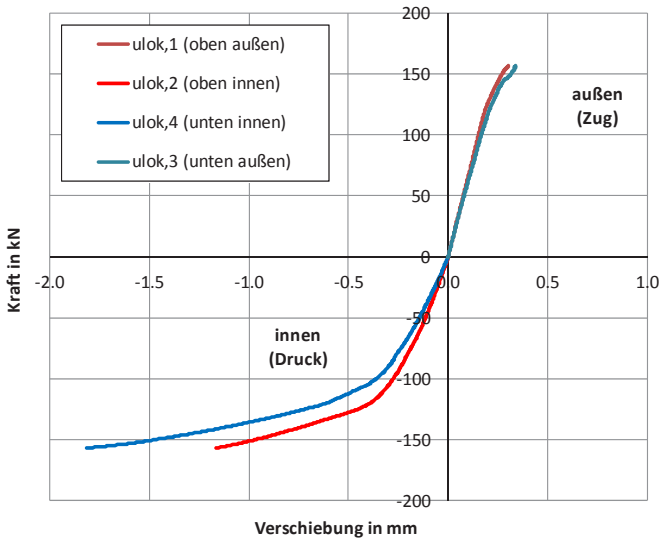


Bild 3-54: Lokale Verformungen  $u_{lok,i}$  in den Universal-Keilzinkenstößen des Prüfkörpers RE600-105-05

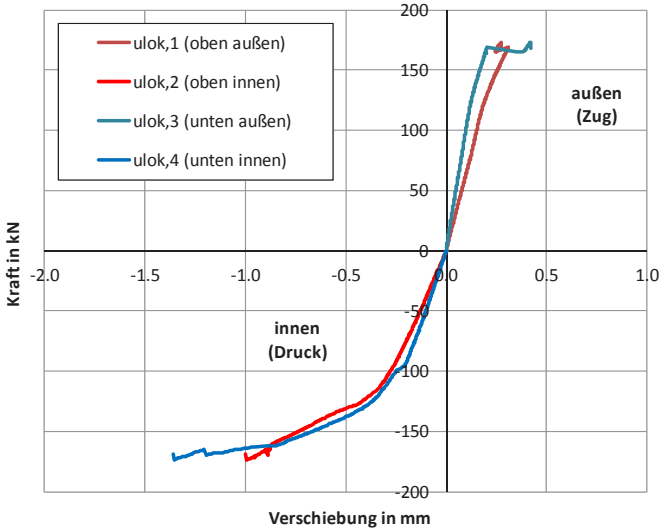


Bild 3-55: Lokale Verformungen  $u_{lok,i}$  in den Universal-Keilzinkenstößen des Prüfkörpers RE600-115-01

Die lokalen Verformungen  $u_{lok,i}$  in den Rahmenecken wurden verwendet, um die Drehfedersteifigkeiten der Universal-Keilzinkenverbindungen zu ermitteln. Da die Universal-Keilzinkenverbindungen in den Prüfkörpern der Reihen RE600 durch eine Normalkraft und ein Biegemoment beansprucht wurden, setzten sich auch die lokalen Verformungen aus zwei entsprechenden Anteilen zusammen:

$$u_{lok,j} = u_{Nj} + u_{Mj} \quad (3-18)$$

Mit den Querschnittswerten der Fuge ( $h_{fuge} = h/\cos \alpha$ ) können die beiden aus der Normalkraft und dem Biegemoment in der Rahmenecke resultierenden Verformungsanteile der lokalen Verschiebungen an den Messstellen nach Gleichung (3-19) bzw. Gleichung (3-20) berechnet werden.

$$u_N = \frac{F \cdot \cos \alpha}{k \cdot A_{Fuge}} \quad (3-19)$$

$$u_M = \frac{F \cdot e \cdot 290\text{mm}}{k \cdot I_{y,Fuge}} \quad (3-20)$$



Durch Einsetzen der beiden Ausdrücke in Gleichung (3-18) und Auflösen nach  $k$  erhält man für den Verschiebungsmodul der Universal-Keilzinkenverbindung die Beziehung

$$k = \frac{F}{u_{\text{ges}}} \cdot \left( \frac{\cos \alpha}{A_{\text{Fuge}}} \pm \frac{e \cdot 290 \text{ mm}}{l_{y, \text{Fuge}}} \right) \quad (3-21)$$

In Tabelle 3-23 sind die Kleinst-, Größt- und Mittelwerte der für die drei Versuchsreihen ermittelten Verschiebungsmoduln angegeben. Die für die einzelnen Prüfkörper ermittelten Verschiebungsmoduln sind in Anlage 5 zusammengestellt.

Tabelle 3-23: Aus den Versuchen mit Rahmenecken ermittelte Verschiebungsmoduln der Universal-Keilzinkenverbindungen

Reihe	$k_{\text{min}}$ in N/mm <sup>3</sup>	$k_{\text{mean}}$ in N/mm <sup>3</sup>	$k_{\text{max}}$ in N/mm <sup>3</sup>
RE600-90	54,4	65,2	71,5
RE600-105	64,6	76,3	88,1
RE600-115	75,1	84,2	108

An den in Tabelle 3-23 angegebenen Werten ist deutlich zu erkennen, dass der Verschiebungsmodul  $k$  der Universal-Keilzinkenverbindungen mit zunehmendem Schnittwinkel  $\alpha$  abnimmt. In Bild 3-56 sind die experimentell ermittelten Verschiebungsmoduln über dem Schnittwinkel aufgetragen. Mit Hilfe einer linearen Regression wurde der in Gleichung (3-27) angegebene Zusammenhang zwischen dem Schnittwinkel  $\alpha$  und dem Verschiebungsmodul  $k$  der Universal-Keilzinkenverbindungen ermittelt.

$$k = 133 - 3,01 \cdot |\alpha| \quad \text{mit } k \text{ in N/mm}^3 \text{ und } \alpha \text{ in } ^\circ \quad (3-22)$$

$$r = 0,425 \quad s_R = 9,38 \quad n = 15$$

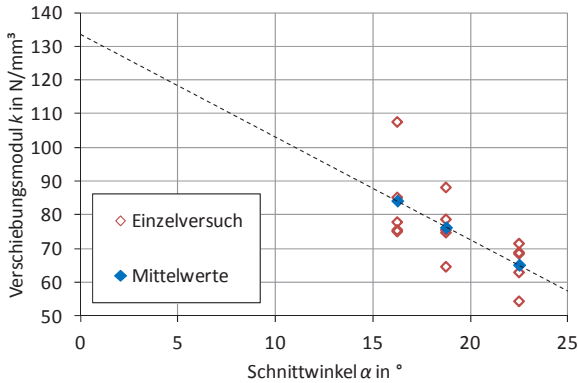


Bild 3-56: Verschiebungsmodul  $k$  der Universal-Keilzinkenstöße über dem Schnittwinkel  $\alpha$

Zur Überprüfung der aus den lokalen Verschiebungen ermittelten Verschiebungsmoduln  $k$  wurde die Gesamtverformung der Rahmenecken unter Berücksichtigung der Verdrehungen in den Universal-Keilzinkenstößen berechnet und mit den gemessenen Verformungen verglichen. Neben den durch die Nachgiebigkeit der Universal-Keilzinkenstöße verursachten Verformungsanteilen wurden hierzu die aus Normalkräften, Querkräften und Biegemomenten resultierenden Verformungsanteile mit Hilfe des Prinzips der virtuellen Kräfte berechnet.

$$u_N = \int_0^{\ell} \frac{N \cdot \bar{N}}{E \cdot A} \cdot dx = F \cdot \left( \frac{2 \cdot \ell_1 \cdot \cos^2 2\alpha + \ell_2}{E \cdot A} \right) \quad (3-23)$$

$$u_V = \int_0^{\ell} \frac{V \cdot \bar{V}}{G \cdot A} \cdot dx = F \cdot \left( \frac{2 \cdot \ell_1 \cdot \sin^2 2\alpha}{G \cdot A} \right) \quad (3-24)$$

$$u_M = \int_0^{\ell} \frac{M \cdot \bar{M}}{E \cdot I} \cdot dx = F \cdot \left( \frac{\frac{2}{3} \cdot \ell_1 + \ell_2}{E \cdot I} \right) \cdot \ell_1^2 \cdot \sin^2 2\alpha \quad (3-25)$$

$$u_{K_\varphi} = \frac{M \cdot \bar{M}}{K_\varphi} = F \cdot \left( \frac{\ell_1^2 \cdot \sin^2 2\alpha}{K_\varphi} \right) \quad (3-26)$$

Die Gesamtverformung wurde als Summe der einzelnen Verformungsanteile berechnet.

$$u_{\text{ges}} = u_{\text{N}} + u_{\text{V}} + u_{\text{M}} + u_{\text{K}_p} \quad (3-27)$$

Die zur Ermittlung der der Verformungsanteile  $u_{\text{N}}$ ,  $u_{\text{V}}$  und  $u_{\text{M}}$  erforderlichen Materialkennwerte, Elastizitätsmodul und Schubmodul, der geraden Abschnitte der Brettsperrholz-Rahmenecken wurden durch Schwingungsmessung ermittelt. Hierzu wurden an zwölf geraden Teilstücken, die aus den Prüfkörpern der Versuchsreihen mit Rahmenecken herausgetrennt wurden, die Eigenfrequenzen der Längsschwingung und der Biegeschwingung 1. Ordnung gemessen. Aus den gemessenen Frequenzen wurden der auf den Querschnitt der Längslagen bezogene Elastizitätsmodul und der auf den Gesamtquerschnitt bezogene effektive Schubmodul der Brettsperrholzträger ermittelt. In Tabelle 3-24 sind die Messwerte und die daraus abgeleiteten Größen zusammengestellt.

*Tabelle 3-24: Aus den Eigenfrequenzen abgeleitete Steifigkeitskennwerte von geraden Teilstücken der Rahmenecken*

Prüfkörper	$L$ in mm	$m$ in kg	$f_{\text{long}}$ in Hz	$E_{\text{dyn,net,long}}$ in N/mm <sup>2</sup>	$f_{\text{lat,1}}$ in Hz	$G_{\text{dyn,gross,eff}}$ in N/mm <sup>2</sup>
RE600-115-01o	1.783	100,3	1.310	13.000	518	476
RE600-115-01u	1.778	102,1	1.277	12.529	507	437
RE600-115-02o	1.754	99,4	1.337	13.191	525	438
RE600-115-02u	1.667	93,6	1.372	12.431	548	417
RE600-115-03o	1.771	101,2	1.333	13.481	529	467
RE600-115-03u	1.750	103,0	1.304	12.973	509	430
RE600-115-04o	1.780	101,1	1.302	12.920	519	454
RE600-115-04u	1.776	100,1	1.312	12.954	513	428
RE600-115-05o	1.792	101,5	1.315	13.323	522	465
RE600-115-05u	1.747	97,6	1.312	12.432	532	450
RE600-90-5o	1.933	104,2	1.195	12.173	450	378
RE600-90-5u	1.940	108,6	1.170	12.215	450	413
				12.173		378
				12.802		438
				13.481		476

Zur Berechnung der Gesamtverformung der geprüften Brettsperrholz-Rahmenecken wurden der auf die Längslagen bezogene statische Elastizitätsmodul mit  $0,94 \cdot 12802 \approx 12.000 \text{ N/mm}^2$  angenommen. Für den auf den Bruttoquerschnitt bezogenen effektiven Schubmodul wurde ein Wert von  $438 \text{ N/mm}^2$  angesetzt. Für die Drehfedersteifigkeiten der Universal-Keilzinkenverbindungen in den Rahmenecken wurden die mittleren Verschiebungsmoduln der einzelnen Versuchsreihen gemäß Tabelle 3-23 angesetzt. In Tabelle 3-25 sind die berechneten und die gemessenen Werte der Gesamtverformung zusammengestellt. Für die berechneten Verformungen sind außerdem der prozentualen Anteile an der Gesamtverformung angegeben.

Tabelle 3-25: *Gemessene und berechnete Gesamtverformung der geprüften Rahmenecken*

Reihe	$u_{\text{ges,test}}$ in mm/kN	$u_{\text{ges,cal}}$ in mm/kN	$u_{\text{N,cal}}$ in %	$u_{\text{V,cal}}$ in %	$u_{\text{M,cal}}$ in %	$u_{\text{K}\phi,\text{cal}}$ in %
RE600-90	0,400	0,362	0,8	17,2	73,1	8,9
RE600-105	0,215	0,207	1,5	20,0	69,8	8,6
RE600-115	0,132	0,142	2,4	21,6	67,7	8,3

Vergleicht man die im Versuch gemessene Gesamtverformung mit den berechneten Werten, ergibt sich insgesamt eine gute Übereinstimmung. Für die Rahmenecken RE600-90 ist die berechnete Gesamtverformung jedoch durchweg etwa 10% kleiner als die gemessenen Werte und für die Rahmenecken RE600-115 liegen die Rechenwerte um etwa 8% über den Messwerten.

Die Biegeverformungen stellen mit etwa 70% den größten Anteil an der Gesamtverformung dar. Die durch die Normalkräfte verursachten Verformungsanteile sind hingegen, mit 1% bis 2% der Gesamtverformung, sehr gering und für praktische Belange vernachlässigbar. Der Anteil der Schubverformungen ist mit 17% bis 22% beträchtlich und sollte bei der Bemessung berücksichtigt werden. Dies gilt auch für die aus der Nachgiebigkeit der Universal-Keilzinkenverbindungen in den Rahmenecken

resultierenden Verformungen, die bei den Prüfkörpern immerhin 8% bis 9% der Gesamtverformung betragen.

### 3.7.5 Nachgiebigkeit der Universal-Keilzinkenverbindungen

Zur Klärung der Frage, ob die verhältnismäßig kleinen Elastizitätsmoduln der geraden Brettsperrholzträger der Reihe S600LFJ und der Brettsperrholz-Satteldachträger der Reihen SD600 auf gegenseitige Verdrehungen der Bauteilachsen in den Stoßfugen zurückzuführen sind, wurden die aus der Nachgiebigkeit der Universal-Keilzinkenverbindungen resultierenden Verformungsanteile im Rahmen einer Neuauswertung der Versuche berücksichtigt.

Da experimentell ermittelte Werte der Verschiebungsmoduln  $k$  nur für Schnittwinkel zwischen  $16,25^\circ$  und  $22,5^\circ$  vorliegen, mussten die Verschiebungsmoduln für Schnittwinkel außerhalb dieses Intervalls durch eine Extrapolation mit Hilfe von Gleichung (3-27) berechnet werden. Die nachfolgenden Auswertungen enthalten daher große Unsicherheiten und stellen nur eine grobe Abschätzung dar.

In Tabelle 3-26 sind die Ergebnisse der ersten Auswertung und der Neuauswertung zusammengestellt. In der ersten Zeile ist als Vergleichswert zusätzlich der aus den Referenzversuchen der Reihe S600REF ermittelte mittlere Elastizitätsmodul angegeben.

*Tabelle 3-26: Unter Berücksichtigung der Nachgiebigkeit der Universal-Keilzinkenverbindungen berechnete Elastizitätsmoduln*

Reihe	$E_{lok,mean}$ in N/mm <sup>2</sup>	$k_{\varphi}$ in N/mm <sup>3</sup>	$E_{lok,mean,k\varphi}$ in N/mm <sup>2</sup>
S600REF	12.385	-	
S600LFJ	11.283	133	12.104
SD600-05	11.488	118	12.417
SD600-15	10.642	88	11.665
SD600-25	9.432	58	10.529

Für die Versuchsreihen S600LFJ und SD600-05 ergeben sich aus der Neuauswertung mittlere Elastizitätsmoduln, die sehr gut mit dem Vergleichswert der Reihe S600REF übereinstimmen. Auch für die Reihe SD600-15 ist die Übereinstimmung noch gut, der bei der Neuauswertung bestimmte mittlere Elastizitätsmodul der Reihe SD600-25 erscheint jedoch im Vergleich mit den restlichen Werten deutlich zu gering.

Eine mögliche Ursache für die Abweichung könnte in der Extrapolation der Verschiebungsmoduln liegen. Dem widerspricht jedoch die Tatsache, dass die Übereinstimmung für die am weitesten außerhalb des Intervalls mit Versuchswerten liegenden Schnittwinkel am besten ist. Eine andere Ursache könnte sein, dass insbesondere bei Universal-Keilzinkenverbindungen mit großen Schnittwinkeln, wegen der stark nichtlinearen Spannungsverteilung, die Nachgiebigkeit der Verbindungen bei Beanspruchung durch öffnende und schließende Momente unterschiedlich ist.

Trotz der Extrapolation der Verschiebungsmoduln, bestätigen die Ergebnisse der Neuauswertung insgesamt die Vermutung, dass die Universal-Keilzinkenverbindungen einen signifikanten, messbaren Einfluss auf die Biegesteifigkeit haben.

### 3.7.6 Zusammenfassung

Die Tragfähigkeit von keilgezinkten Brettsperrholz-Rahmenecken mit unterschiedlichen Öffnungswinkeln wurde durch Versuche ermittelt. Unter der Annahme einer linearen Spannungsverteilung wurden aus den Höchstlasten die Randspannungen in der Zug- und Druckzone berechnet. Die berechneten Biegerandspannungen übersteigen bei allen drei Versuchsreihen die für die geraden Brettsperrholzträger mit Universal-Keilzinkenverbindung ermittelte Biegefestigkeit deutlich. Im Mittel sind die rechnerischen Druckspannungen in der inneren Ecke um etwa 24%, rechnerischen Zugspannungen um etwa 9% größer als die Biegefestigkeit der Universal-Keilzinkenverbindungen in den geprüften geraden Brettsperrholzträgern.

Aus den lokalen Verformungen an den Stoßfugen wurde der Verschiebungsmodul der Universal-Keilzinkenverbindungen in Abhängigkeit des Schnittwinkels bestimmt. Die unter Berücksichtigung der Nachgiebigkeit der Universal-Keilzinkenverbindungen berechnete Gesamtverformung stimmt gut mit den im Versuch gemessenen Werten der Gesamtverformung überein.

## 4 Numerische Simulation

Ergänzend zu den experimentellen Untersuchungen wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens ein Rechenmodell für die numerische Simulation der Tragfähigkeit von Universal-Keilzinkenverbindungen in Brettsperrholzträgern entwickelt. Als Grundlage des Rechenmodells wurde ein für die Simulation der Biegefestigkeit von in Plattenebene beanspruchten Brettsperrholzträgern ohne Keilzinkenverbindungen verwendet. Das weiterentwickelte Rechenmodell besteht wie die ursprüngliche Version aus zwei wesentlichen Teilen. Der erste Teil ist ein Programm, in dem mit Hilfe der Monte Carlo Methode die mechanischen Kenngrößen von Brettlamellen und Universal-Keilzinkenverbindungen numerisch erzeugt werden, der zweite Teil ist ein finite Elemente Modell, in dem die strukturellen und geometrischen Eigenschaften der simulierten Träger abgebildet sind. In den folgenden Abschnitten werden nur die grundlegenden Eigenschaften des ursprünglichen Rechenmodells und die im Rahmen des Forschungsvorhabens vorgenommenen Änderungen und Ergänzungen beschrieben. Eine Beschreibung des ursprünglichen Rechenmodells ist in Flaig (2013) und Blaß et al. (2008) gegeben.

### 4.1 FE-Modell

In Plattenebene beanspruchte Brettsperrholzträger können als Verbundträger betrachtet werden, deren einzelne Querschnittsteile aus den übereinander angeordneten Brettlamellen der Längslagen bestehen. Für die Modellierung wird angenommen, dass die Lamellen der Längslagen an den Schmalseiten nicht verklebt sind, sondern nur indirekt, über die Verklebung in den Kreuzungsflächen mit benachbarten Querlagen, miteinander verbunden werden. Schubkräfte und quer zur Stabachse wirkende Kräfte müssen daher über die geklebten Kreuzungsflächen zwischen Längs- und Querlamellen übertragen werden.

### 4.1.1 Gittermodell

Im FE-Modell werden die einzelnen Lamellen der Längs- und Querlagen durch Balkenelemente abgebildet, die nur in den Kreuzungspunkten miteinander verbunden sind. Hierdurch entsteht ein Gitter aus Balkenelementen, in dem die vertikalen und horizontalen Abstände zwischen den Knoten gerade der Lamellenbreite der Längs- bzw. Querlagen entsprechen.

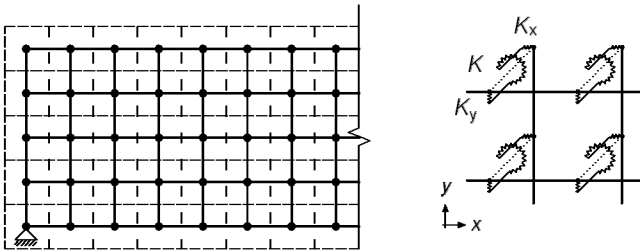


Bild 4-1: Gittermodell zur Berechnung der Spannungen in Brettsperrholzträgern mit Federelementen  $K_x$ ,  $K_y$  und  $K_\phi$  zur Abbildung der Nachgiebigkeiten in den Kreuzungsflächen

Es werden Balkenelemente verwendet, die den Einfluss von Schubverformungen berücksichtigen (Timoshenko-Balken). Die Lamellen der Längslagen werden im Modell mit den Steifigkeiten der angenommenen Brettquerschnitte abgebildet. Die Lamellen der Querlagen werden mit realistischer Schubsteifigkeit und sehr großer Biegesteifigkeit ( $EI \rightarrow \infty$ ) abgebildet, um unrealistische Biegeverformungen zu vermeiden.

Die Nachgiebigkeit der Verbindungen in den Kreuzungsflächen wird im Modell mit Hilfe von Federelementen berücksichtigt. Zur Berechnung der Federkonstanten  $K_x$ ,  $K_y$  und  $K_\phi$  wird ein Verschiebungsmodul  $K = 5 \text{ N/mm}^3$  angenommen.

Im Bereich von Bauteilknicke wurde das Gittermodell an die Trägergeometrie angepasst. Bild 4-2 zeigt die Entwicklung des Gittermodells im Bereich von Bauteilknicke. Wie bei geraden Trägern werden die Lamellen der Längs- und Querlagen durch einzelne, nachgiebig miteinander gekoppelte Balkenelemente abgebildet. Dadurch werden im Modell die



wesentlichen strukturellen Eigenschaften auch im Bereich der Bauteilknicke wirklichkeitsnah erfasst. Zur besseren Vergleichbarkeit der Rechenergebnisse wurden folgende vereinfachende Annahmen bei der Modellierung im Bereich der Bauteilknicke getroffen:

- die Drehfedersteifigkeit der trapezförmigen Kreuzungsflächen am Knick wird näherungsweise mit den polaren Flächenträgheitsmomenten flächengleicher Rechtecke berechnet (Bild 4-2 links und Bild 4-3)
- im Schnittpunkt der Achsen der beiden auf der Biegezugseite eines Knickes liegenden Längslamellen schneiden sich stets auch die Achsen zweier Querbretter (Bild 4-2 rechts)
- im Modell werden nur „ganze Abschnitte“ von Querlamellen abgebildet, deren Länge der Breite  $b_L$  einer Längslamelle entspricht (Bild 4-2 Mitte und rechts)

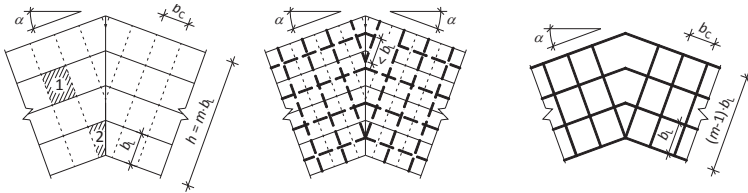


Bild 4-2: Entwicklung des Gittermodells im Bereich von Bauteilknicke; links: Umriss der Längs- und Querlamellen; Mitte: Umriss und Schwerachsen der Lamellen; rechts: Balkenelemente im FE-Modell

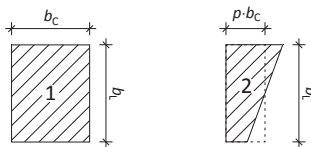


Bild 4-3: ganze Kreuzungsfläche (1) und trapezförmige (Teil-) Kreuzungsfläche am Bauteilknick (2) mit flächengleichem Rechteck

#### 4.1.2 Biegespannungen in den Längslagen

Bei geraden Biegeträgern aus Brettsper Holz kann in guter Näherung von einer linearen Verteilung der Biegespannungen innerhalb der Trägerhöhe

ausgegangen werden. Bei Bauteilen mit geknickter Achse ist die Spannungsverteilung in der Umgebung des Knickes nicht-linear. In Bild 4-4 links sind die Normalkräfte und die Biegemomente in den Randlamellen eines Trägers mit geknickter Stabachse schematisch dargestellt. Die rechte Bildhälfte zeigt den Verlauf der Biegerandspannungen am oberen und unteren Trägerrand, sowie den linearen Verlauf der Biegespannungen über die Bauteilhöhe in einiger Entfernung vom Bauteilknick und den nichtlinearen Verlauf unmittelbar am Bauteilknick.

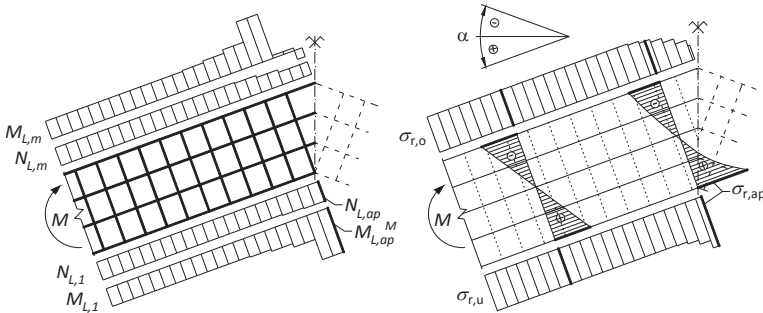


Bild 4-4: links: Normalkräfte  $N_L$  und Biegemomente  $M_L$  in den Randlamellen; rechts: Verlauf der Biegerandspannungen  $\sigma_r$  und Verlauf der Biegespannungen innerhalb der Trägerhöhe in einigem Abstand von Knick und unmittelbar am Knick

Die betragsmäßig größte Biegerandspannung tritt bei Bauteilen mit geknickter Achse, unabhängig vom Vorzeichen des einwirkenden Momentes, d.h. unabhängig vom Vorzeichen des Schnittwinkels, immer in der inneren einspringenden Ecke eines Bauteilknicks auf. Bei öffnenden (positiven) Momenten treten in der inneren Ecke Biegezugspannungen auf. Die Biegedruckspannungen in der äußeren Ecke sind betragsmäßig deutlich geringer. Die Biegedruckfestigkeit wird daher bei Beanspruchung durch positive Momente bei weitem nicht erreicht, sodass allein die Biegezugfestigkeit das Versagen und damit die Tragfähigkeit der Universal-Keilzinkenverbindung bestimmt. Bei schließenden (negativen) Momenten hingegen treten in der inneren Ecke Biegedruckspannungen auf. Diese Spannungen können die Biegedruckfestigkeit überschreiten, bevor die Biegezugfestigkeit in der äußeren Ecke erreicht ist. Das Erreichen der

Druckfestigkeit in der inneren Ecke führt jedoch wegen des plastischen Verhaltens von Holz bei Druckbeanspruchung nicht unmittelbar zum Versagen der gesamten Universal-Keilzinkenverbindung, sondern lediglich zu einer Spannungumlagerung innerhalb des Querschnitts. Die Umlagerung verursacht eine Verschiebung der Spannungsnullebene in Richtung der Biegezugseite und damit verbunden einen Anstieg der maximalen Biegezugspannung, der letztlich zum Versagen der Verbindung führt.

Die während der Versuche mit Brettsperrholz-Satteldachträgern und Brettsperrholz-Rahmenecken gemachten Beobachtungen bestätigen das oben beschriebene Tragverhalten. Im FE-Modell wurde daher in der Biegedruckzone ein linear-elastisches, ideal-plastisches Materialmodell verwendet, das für negative Schnittwinkel das in den Versuchen beobachtete Materialverhalten in guter Näherung abbildet.

Da die Ermittlung der maximalen Biegerandspannungen in den inneren Ecken eine zentrale Stellung im gesamten Prozess der numerischen Simulation einnimmt sind die mit Hilfe des FE-Gittermodells berechneten Randspannungen nachfolgend beschrieben.

In Bild 4-5 und Bild 4-6 sind die mit Hilfe des FE-Modells ermittelten Verhältnisse zwischen der Biegezugspannung  $\sigma_{r,ap}$  am Bauteilknick und der Biegerandspannung  $\sigma_r$  in geraden Trägerabschnitten angegeben.

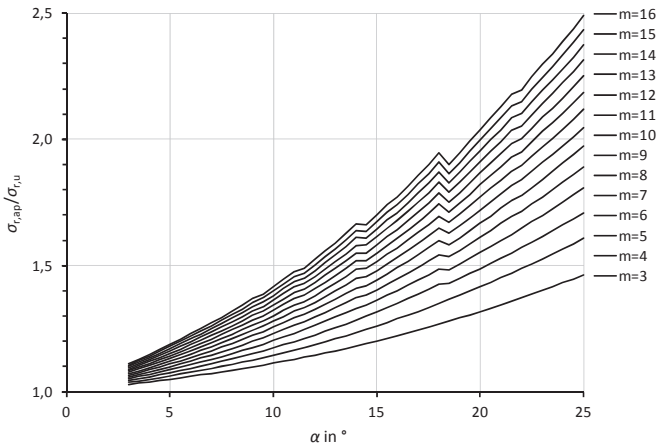


Bild 4-5: Quotient aus der Biegezugspannung am Bauteilknick und der äquivalenten Biegerandspannung eines geraden Brettsperrholzträgers für positive Schnittwinkel  $\alpha$

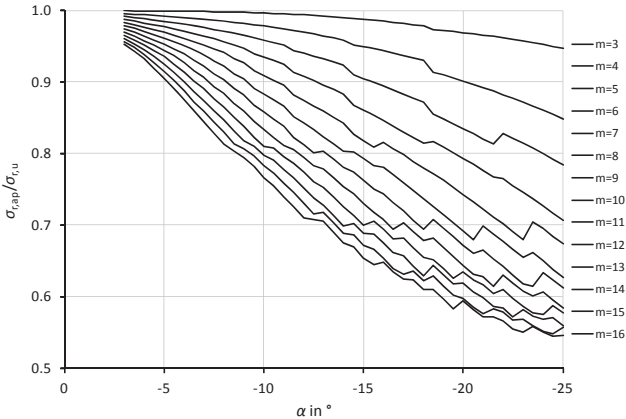


Bild 4-6: Quotient aus der Biegezugspannung am Bauteilknick und der äquivalenten Biegerandspannung eines geraden Brettspertholzträgers für negative Schnittwinkel  $\alpha$

Beide Bilder zeigen deutlich die Abhängigkeit der Biegezugspannung in der äußersten Faser sowohl vom Schnittwinkel als auch von der Anzahl der Lamellen in Richtung der Bauteilhöhe. Die im Verlauf der Kurven in Bild 4-5 zu erkennenden Unstetigkeiten sind eine unmittelbare Folge der Modellierung im Bereich der Bauteilknicke. Für positive Schnittwinkel werden mit zunehmendem Winkel  $\alpha$  die Abschnitte der Längslamellen, die zwischen den vom Schnittpunkt der beiden inneren Trägerkanten ausgehenden Querbretter und der Stoßfuge liegen, größer. Erreicht für einen bestimmten Winkel  $\alpha_u$  die Länge eines solchen Abschnittes bei einer innenliegenden Lamelle ( $1 < i < m$ ) die Breite  $b_c$  eines Querbrettes, dann wird für alle Winkel  $\alpha > \alpha_u$  ein weiterer Querbrettsabschnitt zwischen der  $i$ -ten und der  $m$ -ten Längslamelle im Modell abgebildet. Die zusätzlichen Querbrettelemente führen zu einer lokalen Umlagerung der Beanspruchungen im Bereich des Knickes und zu einer Reduzierung der Spannungsspitze am unteren Querschnittsrand. Bei negativen Schnittwinkeln reduziert sich die Anzahl der Querbrettsabschnitte mit größer werdendem Winkel  $|\alpha|$ . Die Winkel, bei denen die Sprünge auftreten sind abhängig vom Verhältnis der Lamellenbreiten  $b_{\text{long}}$  und  $b_{\text{cross}}$  in den Längs- und Querlagen, haben aber auf den globalen Kurvenverlauf nur wenig

Einfluss. Die in den Diagrammen dargestellten Kurven gelten für gleiche Lamellenbreiten in Längs- und Querlagen ( $b_{\text{long}} = b_{\text{cross}}$ ).

### 4.1.3 Berechnung der maximalen Biegerandspannungen

Unter Verwendung der Ergebnisse der durchgeführten FE-Berechnungen und analytischen Ansätze wurden Gleichungen zur Berechnung der maximalen Biegerandspannungen in den inneren, einspringenden Ecken von Brettsperrholzträgern mit geknickter Bauteilachse ermittelt.

Der Verlauf der in Bild 4-5 dargestellten Kurven zeigt, dass das Verhältnis  $\sigma_{r,\text{ap}}/\sigma_{r,\text{u}}$  aus der maximalen Biegerandspannung  $\sigma_{r,\text{ap}}$  am Knick und der Biegerandspannung  $\sigma_{r,\text{u}}$  in geraden Trägerabschnitten sowohl vom Schnittwinkel  $\alpha$  als auch von der Anzahl  $m$  der Längslamellen in Richtung der Trägerhöhe abhängig ist. Der Verlauf der Biegespannungen  $\sigma_{\text{ap}}$  am Knick entspricht qualitativ dem Spannungsverlauf bei Trägern mit konstanter Krümmung der Trägerachse. Für rechteckige Querschnitte können die Biegespannungen solcher kreisförmig gekrümmter Träger nach Gleichung (4-1) berechnet werden.

$$\sigma_m(y) = \frac{M}{W} \cdot \frac{h}{6 \cdot R} \cdot \left( \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{y}{R-y} - 1 \right) = \frac{M}{W} \cdot k_R \quad (4-1)$$

mit

$$\kappa = \frac{R}{h} \cdot \ln \left( \frac{1 + \frac{h}{2 \cdot R}}{1 - \frac{h}{2 \cdot R}} \right) - 1$$

Es bedeuten

- $R$  Krümmungsradius der Trägerachse
- $h$  Trägerhöhe
- $M$  Biegemoment (positive Momente erzeugen Zugspannungen am inneren Rand eines gekrümmten Trägers)
- $y$  Polarkoordinate in Richtung der Trägerhöhe ( $y$  ist positiv am inneren Rand eines gekrümmten Trägers)

Die analytische Lösung für gekrümmte Träger kann auch für Brettsperrholzträgern mit geknickter Bauteilachse verwendet werden, wenn ein fiktiver Krümmungsradius  $R_{\text{fikt}}$  in Abhängigkeit des Schnittwinkels  $\alpha$  definiert wird, wodurch auch das Verhältnis aus der maximalen Biegeandspannung am Knick und der Biegeandspannung des geraden Trägers als Funktion des Schnittwinkels dargestellt werden kann. Für Winkel  $\alpha \leq 25^\circ$  kann anstelle des Schnittwinkels in guter Näherung der Tangens des Winkels zur Beschreibung des Krümmungsradius verwendet werden.

$$R_{\text{fikt}} = \frac{a \cdot h}{\tan \alpha} \quad (4-2)$$

Der Zusammenhang zwischen Krümmungsradius, Schnittwinkel und Trägerhöhe lässt sich dann auch geometrisch darstellen (s. Bild 4-7)

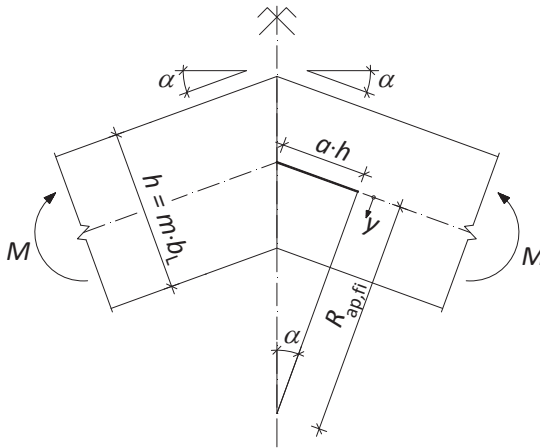


Bild 4-7: Geometrischer Zusammenhang zwischen fiktivem Krümmungsradius  $R_{\text{fikt}}$ , Schnittwinkel  $\alpha$  und Trägerhöhe  $h$

Bei Brettsperrholzträgern mit geknickter Trägerachse kann durch den mit einem fiktiven Radius berechneten Faktor  $k_R$  der Einfluss des Schnittwinkels auf die Biegeandspannung berücksichtigt werden. Der in Bild 4-5 zu erkennende Einfluss der Anzahl  $m$  der Lamellen innerhalb von Längslagen ist in diesem Faktor jedoch nicht enthalten und muss daher durch einen weiteren Faktor  $k_m$  berücksichtigt werden. Mit Hilfe einer Regressionsana-

lyse wurden der Faktor  $a$  in Gleichung (4-2) sowie ein funktionaler Zusammenhang zwischen dem Faktor  $k_m$  und der Anzahl  $m$  der Lamellen innerhalb von Längslagen für die hier betrachteten Schnittwinkel bis  $25^\circ$  ermittelt. Für den Faktor  $a$  in Gleichung (4-2) ergab sich ein Wert von 2,016, der zur Vereinfachung der Regressionsgleichung zu 2,0 gesetzt wurde. Der fiktive Radius wird damit

$$R_{\text{fikt}} = \frac{2 \cdot h}{\tan \alpha} \quad (4-3)$$

Durch Einsetzen von Gleichung (4-3) in Gleichung (4-1) kann der Faktor  $k_R$  als Funktion des Schnittwinkels  $\alpha$  angegeben werden. Im Folgenden wird daher die Bezeichnung  $k_\alpha$  verwendet. Mit  $y = h/2$  kann der Faktor  $k_\alpha$  für den inneren Bauteilrand wie folgt angegeben werden.

$$k_\alpha = k_R = \frac{\tan \alpha}{3} \cdot \left( \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{\tan \alpha}{1 - \tan \alpha} - 1 \right) \quad (4-4)$$

mit

$$\kappa = \frac{1}{2 \cdot \tan \alpha} \cdot \ln \left( \frac{1 + \tan \alpha}{1 - \tan \alpha} \right) - 1$$

Zur Beschreibung des Faktors  $k_m$  wurde eine Exponentialfunktion gewählt. Mit der Randbedingung, dass der Faktor  $k_m$  für  $\alpha = 0$  den Wert 1 annehmen muss, wurde folgende Regressionsgleichung bestimmt:

$$k_m = e^{(0,0134 \cdot \ln(m) - 0,0159) \cdot \alpha} \quad (4-5)$$

Die maximale Biegespannung am inneren Rand von Brettsperrholzträgern mit geknickter Stabachse kann damit wie folgt angegeben werden:

$$\sigma_{r,ap} = \frac{M}{W} \cdot k_\alpha \cdot k_m \quad (4-6)$$

Mit  $k_\alpha$  nach Gleichung (4-4) und  $k_m$  nach Gleichung (4-5). In Bild 4-8 ist das Produkt der beiden Faktoren für Winkel bis  $25^\circ$  und Querschnitte mit drei bis 16 Lamellen je Längslage grafisch ausgewertet. Die durch FE-Rechnung ermittelten Faktoren sind zum Vergleich durch Strichlinien dargestellt.

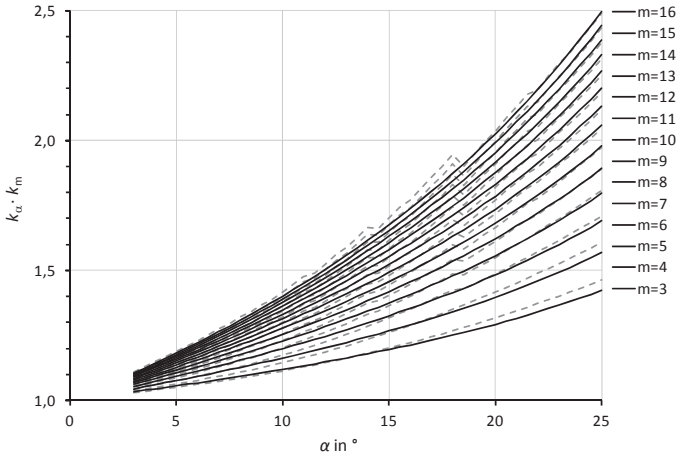


Bild 4-8: Spannungsspitzenfaktor ( $k_{\alpha} \cdot k_m$ ) nach Regressionsgleichung (durchgezogene Linien) und FE-Rechnung (gestrichelte Linien)

## 4.2 Simulationsprogramm

Im Simulationsprogramm werden die mechanischen Kenngrößen der Brettlamellen und der Universal-Keilzinkenverbindungen mit Hilfe der Monte-Carlo-Methode numerisch erzeugt. Grundlage der numerischen Simulation sind dabei Regressionsgleichungen, die anhand von Versuchsergebnissen ermittelt wurden. Für die Bretteigenschaften konnten die Regressionsgleichungen von einem existierenden Rechenmodell zur Simulation der Biegefestigkeit von geraden Brettschichtholzträgern übernommen werden. Für die mechanischen Eigenschaften von Brettlamellen mit Universal-Keilzinkenverbindungen waren hingegen keine Informationen aus früheren Forschungsarbeiten verfügbar. Zur Ermittlung der entsprechenden Regressionsgleichungen mussten daher zunächst Versuche durchgeführt werden. In Tabelle 4-1 sind die im Simulationsprogramm generierten mechanischen Kenngrößen sowie Angaben zur Herkunft der verwendeten Regressionsgleichungen zusammengestellt.



Tabelle 4-1: Im Rechenmodell verwendete Regressionsgleichungen für mechanische Kenngrößen

Element	mechanische Eigenschaften	Quelle
Brett	$f_t, E_t, f_c, E_c$	Blaß et al. (2008)
	$f_m, E_m$	Flaig (2013)
Keilzinkenverbindung	$f_{t,j}, E_{t,j}, f_{c,j}, E_{c,j}$	Blaß et al. (2008)
	$f_{m,j}, E_{m,j}$	Flaig (2013)
Universal-Keilzinkenverbindung	$f_{t,LFJ}, E_{t,LFJ}, f_{c,LFJ}, E_{c,LFJ}$	Abschnitt 4.3
	$f_{m,LFJ}, E_{m,LFJ}$	

Zur Simulation der Biegefestigkeit von Universal-Keilzinkenverbindungen werden im Modell zwei gerade Trägerabschnitte abgebildet, die unter beliebigen Schnittwinkeln miteinander verbunden werden können. Nach dem Erstellen des FE-Modells werden im Simulationsprogramm die mechanischen Eigenschaften der Brettlamellen generiert, wobei die Werte für die beiden Trägerhälften unabhängig voneinander erzeugt werden. Die mechanischen Eigenschaften der Zellen am Bauteilknick werden mit Hilfe der in Abschnitt 4.4.4 angegebenen Regressionsgleichungen für Universal-Keilzinkenverbindungen in Brettlamellen in Abhängigkeit des Schnittwinkels  $\alpha$  des simulierten Trägers berechnet. In der Biegedruckzone wird zur Abbildung des angenommenen linear-elastischen, ideal plastischen Materialverhaltes die simulierte Druckfestigkeit der einzelnen Brettabschnitte als Fließgrenze verwendet. In der Biegezugzone werden die simulierten Biege- und Zugfestigkeiten dazu verwendet das spröde Versagen einzelner Zellen im Rechenmodell zu identifizieren. Zur Simulation der Biegefestigkeit von Brettabschnitten mit Universal-Keilzinkenverbindung wird dabei je nach Drehrichtung des einwirkenden Biegemomentes – öffnend oder schließend – die Regressionsgleichung für Schnittwinkel  $\alpha > 0$  oder  $\alpha < 0$  verwendet.

Bei den durchgeführten Zugversuchen zur Ermittlung einer Regressionsgleichung für die Zugfestigkeit wurden die Universal-Keilzinkenverbindungen durch Zugspannungen parallel und quer zur Faserrichtung und Schubspannungen beansprucht. Eine vergleichbare Spannungscombina-

on tritt auch in der Biegezugzone von Brettsperrholzträgern auf, die durch öffnende Momente beansprucht werden. Zur Simulation von Brettsperrholzträgern mit positiven Schnittwinkeln  $\alpha$  wurde daher die Zugfestigkeit nach der in Abschnitt 4.4.4 angegebenen Regressionsgleichung (4-13) berechnet. Bei Beanspruchung durch schließende Momente treten im Bereich der Bauteilknicke jedoch Querdruck- anstelle der Querkzugspannungen bei öffnenden Momenten auf. Im Rahmen der Versuchsreihen zur Ermittlung der Regressionsgleichungen für Universal-Keilzinkenverbindungen in einzelnen Brettlamellen wurde die bei Brettsperrholzträgern mit negativen Schnittwinkeln  $\alpha$  auftretende Kombination aus Zugspannungen parallel zur Faser, Druckspannungen rechtwinklig zur Faser und Schubspannungen nicht untersucht, da diese Spannungskombination experimentell nicht abgebildet werden konnte. Bei der Durchführung erster Simulationsrechnungen wurde daher die Regressionsgleichung der Zugfestigkeit für positive Schnittwinkel  $\alpha > 0$  auch zur Simulation von Brettsperrholzträgern mit negativen Schnittwinkeln  $\alpha < 0$  herangezogen. Der Vergleich der simulierten Biegefestigkeit mit den Ergebnissen der Versuche mit Brettsperrholz-Rahmenecken zeigte jedoch, dass durch diese Vorgehensweise der günstige Einfluss der Querdruckspannungen nicht zutreffend erfasst wird, sodass für Schnittwinkel  $\alpha < 0$  die simulierten Biegefestigkeiten signifikant unter den experimentell ermittelten Werten lagen. Bei der Simulation der Biegefestigkeit von Brettsperrholzträgern mit Schnittwinkeln  $\alpha < 0$  wurde daher die Zugfestigkeit mit einem Schnittwinkel  $\alpha = 0$  berechnet. Die in Abschnitt 4.5 zeigen, dass durch diese Vorgehensweise eine gute Übereinstimmung mit den experimentell ermittelten Biegefestigkeiten erreicht wird.

### 4.3 Versagenskriterium

Nachdem alle mechanischen Eigenschaften im Simulationsprogramm numerisch erzeugt wurden, werden die Werte den entsprechenden Elementen im FE-Modell zugewiesen. Anschließend wird durch das Aufbringen und die schrittweise Erhöhung eines Biegemomentes ein virtueller Tragfähigkeitsversuch durchgeführt. Für jeden Lastschritt werden die in den einzelnen Elementen auftretenden Spannungen berechnet und mit den im Simu-

lationsprogramm generierten Festigkeitskennwerten verglichen. Das Versagen in einem Element tritt ein, wenn das Verhältnis aus Spannung und Festigkeit den Wert 1 erreicht. Nach dem Versagen eines Brettabschnittes wird die Steifigkeitsmatrix der entsprechenden Elemente im FE-Modell mit dem Faktor  $10^{-5}$  multipliziert. Durch dieses Vorgehen wird sichergestellt, dass in weiteren Lastschritten in den FE-Elementen der versagten Brettabschnitte die Spannungen  $\sigma_{ij} \approx 0$  sind. In weiteren Lastschritten wird die aufgebrachte Verschiebung solange erhöht, bis das Gesamtsystem kinematisch wird und damit das Versagen des Trägers erreicht ist. Aus der größten aufgebrachten Last wird dann die Biegefestigkeit des simulierten Träger berechnet. Unter Verwendung der mit Hilfe des FE-Modells berechneten Normalkräfte  $N_i$  und Biegemomente  $M_i$  sowie den simulierten Festigkeitseigenschaften der Brettlamellen wurde unter Annahme einer linearen Interaktion von Zug- und Biegespannungen in der Zugzone das in Gleichung (4-7) angegebene Versagenskriterium formuliert.

$$\frac{N_i}{A_i \cdot f_{t,j}} + \frac{M_i}{W_i \cdot f_{m,j}} = 1 \quad (4-7)$$

Da sowohl bei den durchgeführten Versuchen mit Brettsperrholz-Satteldachträgern als auch bei den Brettsperrholz-Rahmenecken das Versagen letztlich durch Biegezugspannungen ausgelöst wurde, wurde das Versagenskriterium nach Gleichung (4-7) unabhängig vom Vorzeichen des einwirkenden Biegemomentes für die numerische Simulation der Tragfähigkeit von Universal-Keilzinkenverbindungen verwendet.

Für negative Schnittwinkel wurden im Simulationsprogramm, wie bereits in Abschnitt 4.2 beschrieben, die Zugfestigkeiten  $f_{m,LFJ}$  der Brettlamellen für einen Schnittwinkel  $\alpha = 0^\circ$  generiert. Diese Anpassung war erforderlich, da bei den zur Ermittlung der Regressionsgleichung durchgeführten Zugversuchen mit Universal-Keilzinkenverbindungen nur die in Brettsperrholzträgern mit positiven Schnittwinkeln auftretende Spannungskombination mit Zug rechtwinklig zur Faser, nicht aber der bei negativen Schnittwinkeln auftretende Spannungszustand mit Querdruckspannungen zutreffend abgebildet wurde. Die numerische Simulation liefert daher bei Verwendung der Regressionsgleichung für die Zugfestigkeit für Brettsperrholzträger mit negativen Schnittwinkeln  $\alpha < 0$  deutlich zu geringe Festigkeiten.

## 4.4 Versuche zur Ermittlung von Regressionsgleichungen

Für die numerische Simulation der Biegefestigkeit von Universal-Keilzinkenverbindungen in Brettsperrholzträgern werden, neben den mechanischen Eigenschaften der Brettlamellen selbst, auch die mechanischen Eigenschaften der Universal-Keilzinkenverbindungen in den Brettlamellen benötigt. Zur Ermittlung von Regressionsgleichungen für die Zug-, Druck und Hochkantbiegefestigkeit und die entsprechenden Elastizitätsmoduln wurden daher Versuche mit Universal-Keilzinkenverbindungen in einzelnen Brettlamellen durchgeführt.

Um die Biegefestigkeit der Universal-Keilzinkenverbindungen in Abhängigkeit des Schnittwinkels  $\alpha$  simulieren zu können wurden alle mechanischen Eigenschaften der Brettlamellen mit Universal-Keilzinkenverbindungen für verschiedene Winkel ermittelt. Hierzu wurde der Schnittwinkel für den Bereich zwischen  $0^\circ$  und  $25^\circ$  in Schritten von  $5^\circ$ , variiert. Bei der Ermittlung der Biegefestigkeit wurde zwischen öffnenden und schließenden Momenten unterschieden. In Tabelle 4-2 ist eine Übersicht der durchgeführten Versuchsreihen gegeben.

*Tabelle 4-2: Versuche zur Ermittlung der mechanischen Kenngrößen von Universal-Keilzinkenverbindungen in einzelnen Brettlamellen*

Winkel $\alpha$	Anzahl Prüfkörper		
	Reihen EL-Z Zug	Reihen EL-D Druck	Reihen EL-B Biegung
$0^\circ$	96	96	96
$5^\circ$	32	32	2 x 16
$10^\circ$	32	32	2 x 16
$15^\circ$	32	32	2 x 16
$20^\circ$	32	32	2 x 16
$25^\circ$	32	32	2 x 16
Summe	256	256	256

### 4.4.1 Versuchsmaterial

Zur Herstellung der Prüfkörper aller Versuchsreihen wurden zunächst dreilagige Brettsperrholzplatten mit einer Gesamtdicke von 100 mm hergestellt, wobei die Dicke der beiden Längslamellen jeweils 40 mm und die Dicke der Querlagen 20 mm betrug. Aus den Brettsperrholzplatten wurden dann Streifen mit jeweils vier Längslamellen herausgeschnitten, aus denen wiederum durch Längszuschnitt unter verschiedenen Schnittwinkeln kürzere Stücke herausgetrennt wurden. Jeweils zwei der Teilstücke mit unterschiedlichen Schnittwinkeln wurden dann durch Universal-Keilzinkenverbindungen an den rechtwinklig oder schräg zu den Decklagen verlaufenden Kanten miteinander verbunden. Die Universal-Keilzinkenverbindungen wurden wie bei den geprüften Brettsperrholzträgern mit einer 3,2 mm breiten Randzinke und parallel zur Plattenebene verlaufenden Zinken ausgeführt.

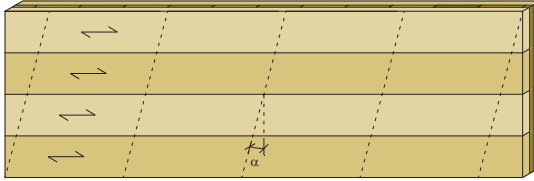
Aus jedem der auf diese Weise hergestellten Plattenstücke wurden dann acht Prüfkörper zugeschnitten, von denen jeder aus zwei durch Universal-Keilzinkenverbindung verbundenen Längslamellen bestand. In Dickenrichtung wurden die Brettsperrholzstreifen in der Mitte durchtrennt, sodass auf jeder Längslamelle eine halbe Querlage abzüglich der Schnittbreite verblieb. Durch das Belassen einer Querlage auf den Prüfkörpern sollte der Einfluss der kreuzweisen Verklebung benachbarter Brettlagen auf die Festigkeiten der Universal-Keilzinkenverbindungen bei zunehmendem Schnittwinkel berücksichtigt werden. Das prinzipielle Vorgehen beim Zuschnitt der Prüfkörper ist in Bild 4-9 dargestellt.

Die Prüfkörper zur Ermittlung der Zug- und Druckfestigkeit wurden rechtwinklig zu den Stoßfugen aus den Plattenstücken herausgetrennt, sodass an den Längsseiten der Prüfkörper die Fasern der Längslamellen unter dem Schnittwinkel  $\alpha$  der Universal-Keilzinkenverbindung angeschnitten waren. Bei den Prüfkörpern zur Ermittlung der Zugfestigkeit wurde die Querlage im Bereich der Klemmlänge entfernt, um ein vorzeitiges Rollschubversagen im Bereich der Lasteinleitung zu vermeiden.

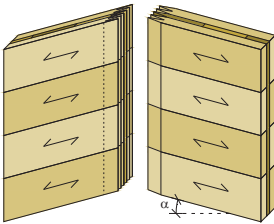
Die Prüfkörper zur Ermittlung der Biegefestigkeit wurden parallel zu den Kanten der Brettlamellen zugeschnitten, um bei der Durchführung der Versuche ein vorzeitiges Versagen durch Erreichen der Biegefestigkeit am

Schräg angeschnittenen Rand zu vermeiden. Die Abmessungen der Prüfkörper können Bild 4-10 entnommen werden.

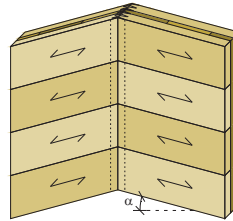
1. Produktion der BSP-Platten und Zuschnitt der Plattenstücke zur Herstellung der Universal-Keilzinkenverbindungen



2. Fräsen der Universal-Keilzinken

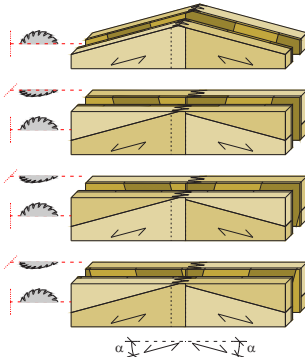


3. Verkleben der Universal-Keilzinkenverbindungen

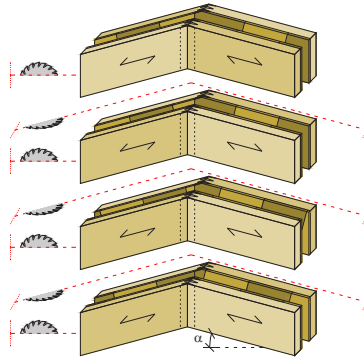


4. Heraustrennen einzelner Längsbretter mit einem Teil der benachbarten Querlage

Zug- und Druckprüfkörper: rechtwinklig zur Universal-Keilzinkenverbindung



Biegeprüfkörper: parallel zur Richtung der Längsbretter



Zuschneiden der Prüfkörper

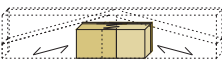


Bild 4-9: Herstellung der Prüfkörper für die Versuche mit Universal-Keilzinkenverbindungen in einzelnen Brettlamellen

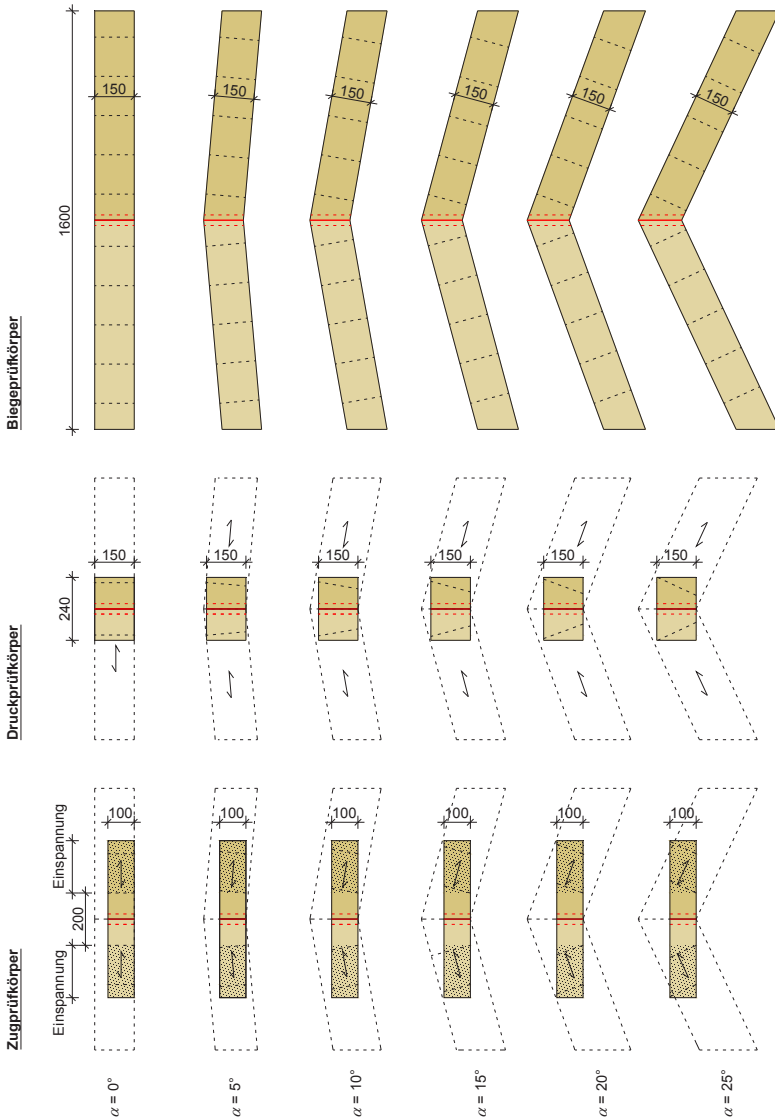


Bild 4-10: Prüfkörper für die Versuche zur Ermittlung der Zug-, Druck- und Biegefestigkeit von Brettlamellen mit Universal-Keilzinkenverbindungen

Das Zinkenspiel  $s$  wurde nach dem Verkleben der Universal-Keilzinkenverbindungen jedoch vor dem Zuschneiden der einzelnen Prüfkörper an den Brettsperrholzplattenstreifen gemessen. Die Produktionstoleranz in Dickenrichtung wurde an den einzelnen Prüfkörpern vor der Versuchsdurchführung gemessen. Nach der Durchführung der Versuche wurden die Rohdichte und die Holzfeuchte im Darrversuch bestimmt. Die Mittelwerte der gemessenen Größen sind für alle Versuchsreihen in Tabelle 4-3 zusammengestellt. In Anlage 6 sind die Ergebnisse in Form von Streudiagrammen dargestellt.

*Tabelle 4-3: Rohdichte, Holzfeuchte und Produktionstoleranzen der Prüfkörper zur Ermittlung der Zug-, Druck- und Biegefestigkeit von Brettlamellen mit Universal-Keilzinkenverbindungen*

Reihe	$\rho_{min,mean}$ in kg/m <sup>3</sup>	$HF_{mean}$ in %	$\rho_{max,mean}$ in kg/m <sup>3</sup>	$HF_{mean}$ in %	$\Delta t_{mean}$ in mm	$s$ in mm
EL-Z-0	401	11,3	454	11,4	1,3	5,9
EL-Z-5	381	9,9	431	10,0	1,8	6,0
EL-Z-10	398	11,4	458	11,4	0,9	5,5
EL-Z-15	403	11,4	459	11,2	1,7	5,7
EL-Z-20	378	9,9	409	9,5	1,7	5,8
EL-Z-25	372	9,7	438	9,5	2,0	6,2
EL-D-0	406	11,4	461	11,5	2,5	5,2
EL-D-5	395	10,5	434	10,5	1,3	5,7
EL-D-10	387	11,5	465	11,4	0,8	5,5
EL-D-15	405	11,6	462	11,6	1,1	5,4
EL-D-20	383	10,2	419	10,3	1,4	6,3
EL-D-25	386	10,3	343	10,2	1,3	5,9
EL-B-25neg	378	9,5	420	9,7	1,0	5,0
EL-B-20neg	372	9,4	413	9,9	1,6	5,6
EL-B-15neg	397	11,4	459	11,2	1,2	5,4
EL-B-10neg	401	11,4	460	11,4	1,3	5,7
EL-B-5neg	392	9,7	439	9,8	0,5	5,7
EL-B-0	393	9,9	438	10,0	1,1	6,3
EL-B-5pos	387	9,8	429	10,2	0,7	6,1
EL-B-10pos	397	11,5	456	11,2	1,5	6,2
EL-B-15pos	392	11,4	458	11,3	0,7	5,8
EL-B-20pos	386	10,1	421	9,3	1,5	5,8
EL-B-25pos	384	9,9	433	9,4	1,0	6,0



## 4.4.2 Versuchsdurchführung

### Versuche zur Ermittlung der Zugfestigkeit

Die Durchführung der Zugversuche erfolgte in Anlehnung an EN 408. Die Zugkraft wurde Klemmbacken in die Prüfkörper eingeleitet. Die Einspannlänge auf beiden Seiten der Prüfkörper betrug 200 mm, die freie Länge der Prüfkörper betrug ebenfalls 200 mm. Die Klemmbacken waren starr in den Rahmen der Prüfmaschine eingespannt, sodass ein seitliches Ausweichen der Prüfkörper ausgeschlossen war und der ebene Verformungszustand in einem auf Zug beanspruchten Brettsperrholzträger zutreffend abgebildet wurde. Bild 4-11 zeigt den schematischen Aufbau der Versuchseinrichtung.

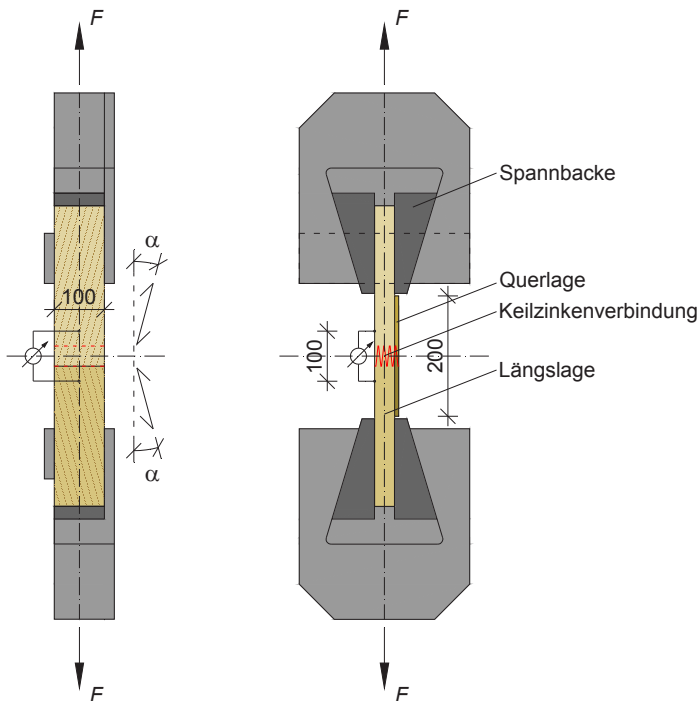


Bild 4-11: Versuchsaufbau und Prüfkörperabmessungen bei den Zugversuchen mit Universal-Keilzinkenverbindungen in Brettlamellen

Zur Ermittlung des Zug-Elastizitätsmoduls wurde die Dehnung innerhalb einer Länge von 100 mm auf beiden Seiten der Prüfkörper gemessen. Die Messung erfolgte mit Hilfe induktiver Wegaufnehmer mit einer Messlänge von 10 mm und einer Messgenauigkeit von 1%. Die Vorschubgeschwindigkeit des Belastungskolbens wurde so gewählt, dass die Höchstlast innerhalb von  $300 \text{ s} \pm 120 \text{ s}$  erreicht wurde.

### Versuche zur Ermittlung der Druckfestigkeit

Die Durchführung der Druckversuche erfolgte ebenfalls in Anlehnung an EN 408. Die Einleitung der Druckkraft erfolgte über Stahlplatten. Auf die Verwendung von Kugelkalotten wurde verzichtet, um den in druckbeanspruchten Brettsperrholz auftretenden ebenen Verformungszustand zu erzwingen. Um das Auftreten ungewollter Biegebeanspruchungen zu vermeiden, erfolgte der Längenzuschnitt der Prüfkörper mit einer Präzision-Formatkreissäge. Die Dehnung zur Ermittlung des Druck-Elastizitätsmoduls wurde an den beiden Schmalseiten der Prüfkörper innerhalb einer Messlänge von 100 mm gemessen. Die Messung erfolgte mit Hilfe induktiver Wegaufnehmer mit einer Messlänge von 10 mm und einer Messgenauigkeit von 1%. Die gesamte Versuchsanordnung ist in Bild 4-12 dargestellt. Die Belastung wurde weggesteuert aufgebracht. Die Vorschubgeschwindigkeit des Belastungskolbens wurde dabei so gewählt, dass die Höchstlast innerhalb von  $300 \text{ s} \pm 120 \text{ s}$  erreicht wurde.

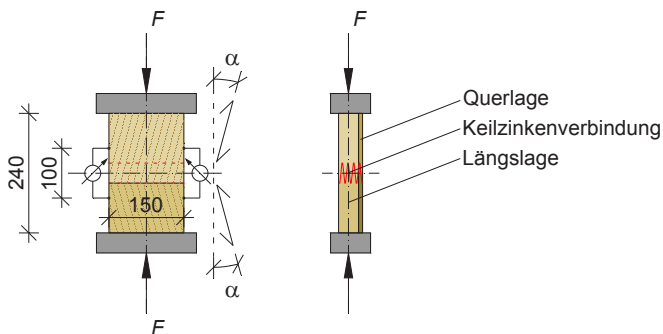


Bild 4-12: Versuchsaufbau und Prüfkörperabmessungen bei den Druckversuchen mit Universal-Keilzinkenverbindungen in Brettlamellen

## Versuche zur Ermittlung der Biegefestigkeit

Zur Ermittlung der Biegefestigkeit von Universal-Keilzinkenverbindungen in einzelnen Brettlamellen wurden Vierpunkt-Biegeversuche in Anlehnung an EN 408 durchgeführt. Jeweils die Hälfte der Prüfkörper mit Schnittwinkeln  $\alpha \neq 0$  wurden durch öffnende Momente (positive Schnittwinkel  $\alpha > 0$ ) bzw. durch schließende Momente (negative Schnittwinkel  $\alpha < 0$ ) beansprucht. Die Prüfkörper wurden hierzu mit nach oben bzw. nach unten geneigten Schenkeln in die Prüfvorrichtung eingebaut.

Da die Universal-Keilzinkenverbindung in der Mitte der Stützweite eine Sollbruchstelle darstellt, haben Stützweite und Abstand der Lasteinleitungspunkte keinen Einfluss auf die zu ermittelnde Biegefestigkeit. Die Stützweite wurde daher auf das Zehnfache der Lamellenbreite reduziert, um Biegebrüche außerhalb der Universal-Keilzinkenverbindungen weitgehend auszuschließen. Der Abstand der beiden Einzellasten von der Universal-Keilzinkenverbindung wurde mit 250 mm so groß gewählt, dass lokale Beanspruchungen infolge der Lasteinleitung ohne Auswirkung auf die ermittelten Biegefestigkeiten waren.

In der Mitte der Stützweite wurde die Gesamtdurchbiegung an der Trägeroberseite gemessen. Zur Ermittlung des Biege-Elastizitätsmoduls wurde die lokale Durchbiegung innerhalb einer Messlänge von 500 mm zwischen den beiden Einzellasten in der neutralen Faser auf beiden Seiten der Prüfkörper gemessen. Die Messung der Gesamtdurchbiegung in Feldmitte erfolgte mit Hilfe eines induktiven Wegaufnehmers mit einer Messlänge von 50 mm. Die lokalen Verformungen zwischen den beiden Einzellasten wurden mit zwei induktiven Wegaufnehmern mit einer Messlänge von 10 mm gemessen. Alle verwendeten Wegaufnehmer hatten eine Messgenauigkeit von 1%.

Die Belastung wurde bis zu einer Last von 30% der geschätzten Bruchlast  $F_{\text{est}}$  kraftgesteuert mit einer konstanten Belastungsgeschwindigkeit von  $0,2 \cdot F_{\text{est}}$  pro Minute aufgebracht. Oberhalb von  $0,3 \cdot F_{\text{est}}$  bis zum Bruch wurde die Belastung weggesteuert mit konstanter Vorschubgeschwindigkeit aufgebracht. Die Geschwindigkeit des Belastungskolbens wurde so gewählt, dass die Höchstlast innerhalb von  $300 \text{ s} \pm 120 \text{ s}$  erreicht wurde. Die Versuchsanordnung ist in Bild 4-13 dargestellt.

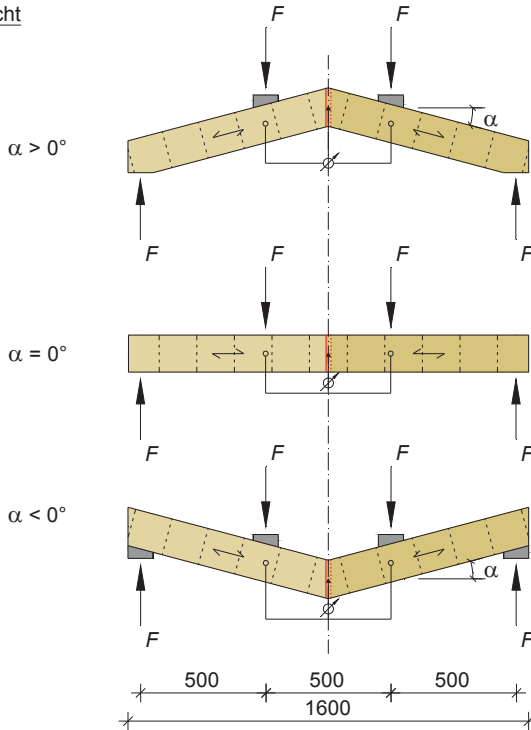
Ansicht

Bild 4-13: Versuchsaufbau und Prüfkörperabmessungen bei den Biegeversuchen mit Universal-Keilzinkenverbindungen in Brettlamellen

#### 4.4.3 Versuchsergebnisse

Nachfolgend sind für die Versuchsreihen mit Universal-Keilzinkenverbindungen in einzelnen Brettlamellen die beobachteten Versagensformen beschrieben und dargestellt. Die aus den Versuchen ermittelten Festigkeiten und Elastizitätsmoduln sind in Form von Streudiagrammen angegeben. In Anlage 6 sind darüber hinaus die ermittelten Elastizitätsmoduln und Festigkeiten in Abhängigkeit der kleineren Rohdichte bzw. des Elastizitätsmoduls dargestellt, die im Rahmen der durchgeführten Regressionsanalysen, neben dem Winkel  $\alpha$ , als jeweils einflussreichster Regressor identifiziert wurden. Nach der Versuchsdurchführung wurden die Prüfkörper außerdem auf innerhalb der Keilzinkenverbindungen liegenden Äste untersucht und es wurde

versucht, die Abmessungen der Äste zu messen. Da dies in vielen Fällen nicht möglich war, wurde letztlich nur die Anwesenheit von Ästen in einer Keilzinkenverbindung, jedoch keine Astabmessungen, dokumentiert. Der Anteil der Universal-Keilzinkenverbindungen mit Ästen war bei den durchgeführten Zug-, Druck- und Biegeversuchen etwa gleich groß und lag zwischen 19% und 22% aller geprüften Verbindungen.

Festigkeiten und Elastizitätsmoduln der geprüften Brettabschnitte wurden unter Berücksichtigung von Querschnittschwächungen infolge Produktionstoleranzen und Randzinken berechnet. Die weiter unten angegebenen Werte beziehen sich daher auf den, abzüglich der genannten Querschnittschwächungen, verbleibenden (Brutto-)Querschnitt der geprüften Universal-Keilzinkenverbindungen, mit einem Verschwächungsgrad von im Mittel 0,244, der sich aus dem gemessenen Zinkenspiel der Prüfkörper von im Mittel 5,8 mm ergibt. Durch die Verwendung dieser auf den verbleibenden (Brutto-) Querschnitt mit bekanntem Verschwächungsgrad bezogenen mechanischen Kennwerte bei der Ermittlung der Regressionsgleichungen können bei der Simulation der Biegefestigkeit von Universal-Keilzinkenverbindungen beliebige Zinkenspiele  $s$  und Produktionstoleranzen  $\Delta t$  berücksichtigt werden, indem die Festigkeits- und Steifigkeitskennwerte in Abhängigkeit des simulierten effektiven Verschwächungsgrades reduziert werden.

## Zugversuche

Bei 245 von 256 Prüfkörpern der Versuchsreihen zur Ermittlung der Zugfestigkeit trat das Versagen durch Erreichen der Zugfestigkeit in der Universal-Keilzinkenverbindung ein. Bei elf Prüfkörpern wurde die Zugfestigkeit im Bereich von Ästen oder anderen Schwachstellen in den Brettlamellen erreicht. In Tabelle 4-4 ist die Anzahl der Prüfkörper, bei denen das Versagen außerhalb der Universal-Keilzinkenverbindungen eintrat, für die einzelnen Versuchsreihen angegeben. Bei den Prüfkörpern der Reihen EL-Z-0 und EL-Z-5 mit Schnittwinkeln  $\alpha$  von  $0^\circ$  und  $5^\circ$  verliefen die Bruchflächen in der Regel vollständig oder zum größten Teil innerhalb der Universal-Keilzinkenverbindung. Bei Schnittwinkeln  $\alpha \geq 10^\circ$  ging das Versagen zwar ebenfalls stets von den Universal-Keilzinkenverbindungen aus, der Anteil der Bruchflächen, der innerhalb der Universal-Keilzinkenverbindungen lag, nahm jedoch mit zunehmendem Schnittwinkel ab. Stattdessen verliefen die Bruchflächen zunehmend entlang der Faserrichtung der Brettlamellen. Bild

4-14 bis Bild 4-19 zeigen die bei den unterschiedlichen Versuchsreihen beobachteten Versagensformen. In Bild 4-20 und Bild 4-21 sind die Rohdichten der verbundenen Brettlamellen sowie der Zug-Elastizitätsmodul und die Zugfestigkeit aller Prüfkörper über dem Schnittwinkel  $\alpha$  dargestellt.

Tabelle 4-4: Versagen außerhalb der Universal-Keilzinkenverbindungen bei den Versuchsreihen zur Ermittlung der Zugfestigkeit

Reihe	Schnittwinkel	Anzahl gesamt	Anzahl Versagen außerhalb LfJ
EL-Z-0	0	96	5
EL-Z-5	5	32	3
EL-Z-10	10	32	1
EL-Z-15	15	32	-
EL-Z-20	20	32	2
EL-Z-25	25	32	-



Bild 4-14: Typische Bruchbilder bei Reihe EL-Z-0 ( $\alpha = 0^\circ$ )

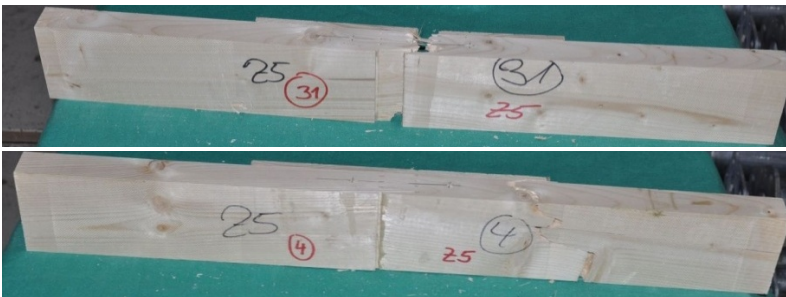


Bild 4-15: Typische Bruchbilder bei Reihe EL-Z-5 ( $\alpha = 5^\circ$ )



Bild 4-16: Typische Bruchbilder bei Reihe EL-Z-10 ( $\alpha = 10^\circ$ )



Bild 4-17: Typische Bruchbilder bei Reihe EL-Z-15 ( $\alpha = 15^\circ$ )



Bild 4-18: Typische Bruchbilder bei Reihe EL-Z-20 ( $\alpha = 20^\circ$ )



Bild 4-19: Typische Bruchbilder bei Reihe EL-Z-25 ( $\alpha = 25^\circ$ )

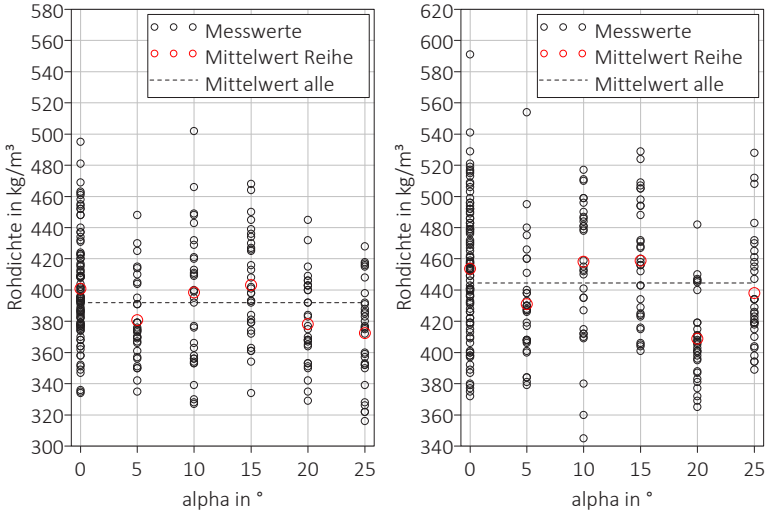


Bild 4-20: kleinere (links) und größere (rechts) Rohdichte der Zugprüfkörper über dem Schnittwinkel  $\alpha$

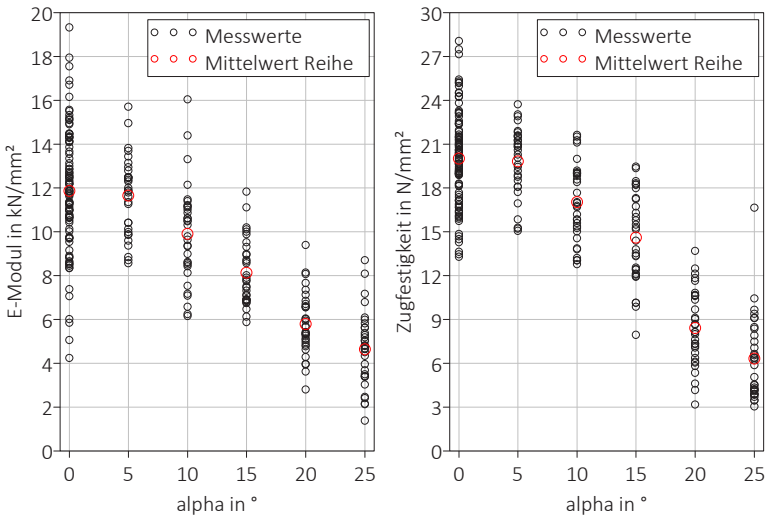


Bild 4-21: Zug-E-Modul (links) und Zugfestigkeit (rechts) von Brettabschnitten mit Universal-Keilzinkenverbindung über dem Schnittwinkel  $\alpha$



## Druckversuche

Bei allen 256 Prüfkörpern der Versuchsreihen zur Ermittlung der Druckfestigkeit trat das Versagen durch Erreichen der Druckfestigkeit in der Universal-Keilzinkenverbindung ein. Für Schnittwinkel bis  $10^\circ$  waren in den meisten Fällen nach dem Erreichen der Höchstlast Druckfalten in einem Schnitt durch den Zinkengrund der Universal-Keilzinkenverbindung zu erkennen. Teilweise trat das Versagen auch durch lokales Ausknicken einzelner Zinken ein. Mit zunehmendem Schnittwinkel wurden die Druckfalten weniger ausgeprägt. Bei Versuchsreihe EL-D-25 waren kaum noch Druckfalten erkennbar und es trat teilweise Schubversagen in Form von Rissen entlang der Faserrichtung ein. Bild 4-22 bis Bild 4-24 zeigen die beobachteten Versagensformen bei den unterschiedlichen Versuchsreihen. In Bild 4-25 und Bild 4-26 sind die Rohdichten der verbundenen Brettlamellen sowie der Druck-Elastizitätsmodul und die Druckfestigkeit aller Prüfkörper über dem Schnittwinkel  $\alpha$  dargestellt.



Bild 4-22: Typisches Versagen bei Reihe EL-D-0 ( $\alpha = 0^\circ$ )



Bild 4-23: Typisches Versagen bei Reihe EL-D-15 ( $\alpha = 15^\circ$ )

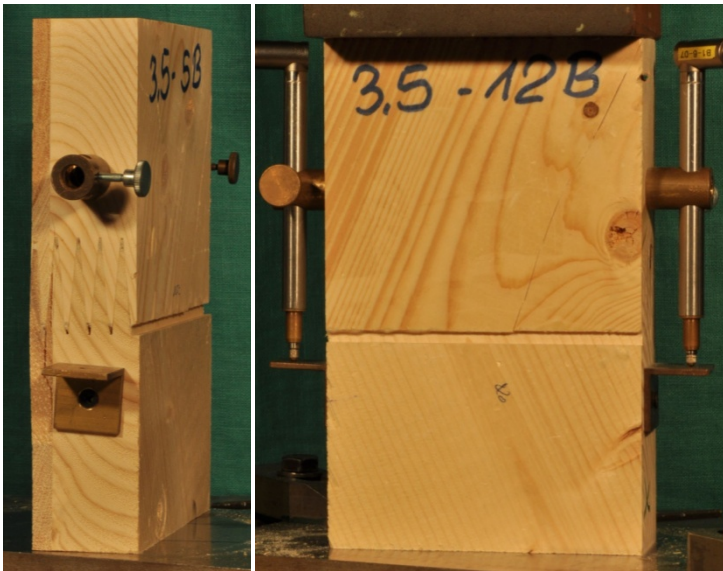


Bild 4-24: Typisches Versagen bei Reihe EL-D-25 ( $\alpha = 25^\circ$ )

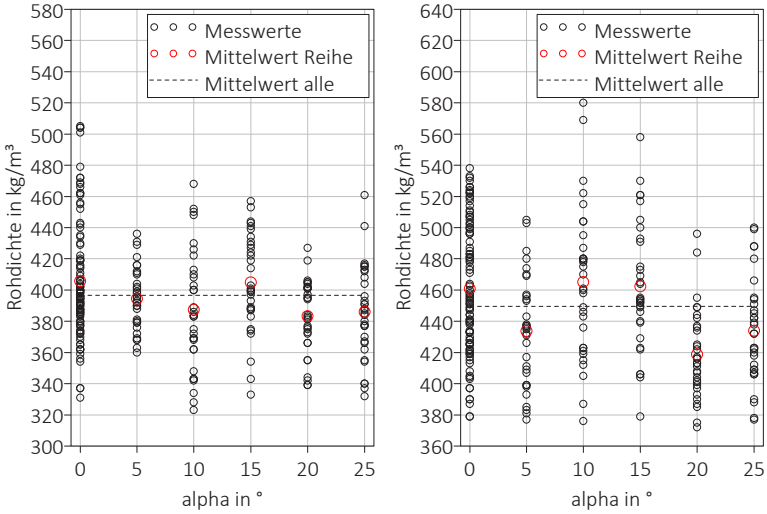


Bild 4-25: kleinere (links) und größere (rechts) Rohdichte der Druckprüfkörper über dem Schnittwinkel  $\alpha$

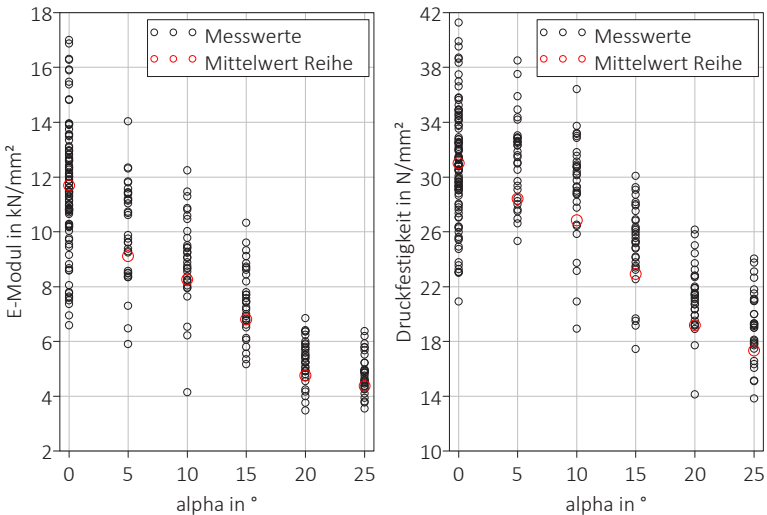


Bild 4-26: Druck-E-Modul (links) und Druckfestigkeit (rechts) von Brettabschnitten mit Universal-Keilzinkenverbindung über dem Schnittwinkel  $\alpha$

## Biegeversuche

Bei 228 der 256 Biegeprüfkörper trat das Versagen durch Erreichen der Biegefestigkeit in der Universal-Keilzinkenverbindung ein. 18 Prüfkörper versagten durch Erreichen der Biegefestigkeit außerhalb der Universal-Keilzinkenverbindung im Bereich von Ästen, bei 10 Prüfkörpern wurde die Biegefestigkeit in einer Keilzinkenverbindung in einer der beiden Brettlamellen erreicht. Bei Prüfkörpern, bei denen das Versagen in der Universal-Keilzinkenverbindung auftrat, verlief die Bruchlinie in den meisten Fällen entlang des Zinkengrundes. Bei etwa 10% der Prüfkörper trat das Versagen durch Erreichen der Scherfestigkeit entlang der Oberflächen der Zinkenflanken ein. Vereinzelt wurden auch Mischformen der beiden Versagensarten beobachtet, wobei in diesen Fällen das Scherversagen stets in den Scherflächen der Randzinke auftrat.

Bild 4-27 bis Bild 4-31 zeigen die beobachteten Versagensformen bei den unterschiedlichen Versuchsreihen. In Bild 4-32 und Bild 4-33 sind die Rohdichten der durch die Universal-Keilzinken verbundenen Brettlamellen angegeben. Der aus den Versuchen ermittelte lokale Biege-Elastizitätsmodul und die Biegefestigkeit der Prüfkörper sind in Bild 4-34 und Bild 4-35 dargestellt. Alle Größen sind in Abhängigkeit des Schnittwinkels angegeben.



Bild 4-27: Typisches Versagen bei Reihe EL-B-0 ( $\alpha = 0^\circ$ )

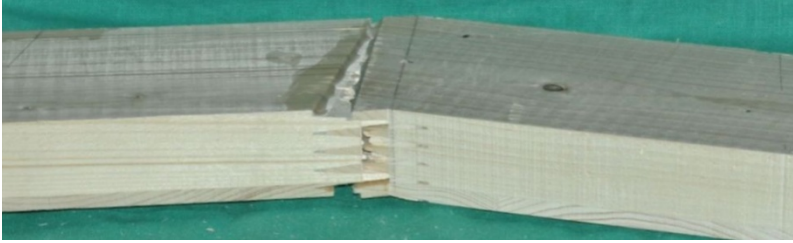


Bild 4-28: *Typisches Versagen bei Reihe EL-B-15 ( $\alpha = +15^\circ$ )*



Bild 4-29: *Typisches Versagen bei Reihe EL-B-25 ( $\alpha = +25^\circ$ )*



Bild 4-30: *Typisches Versagen bei Reihe EL-B-15 ( $\alpha = -15^\circ$ )*



Bild 4-31: *Typisches Versagen bei Reihe EL-B-25 ( $\alpha = -25^\circ$ )*

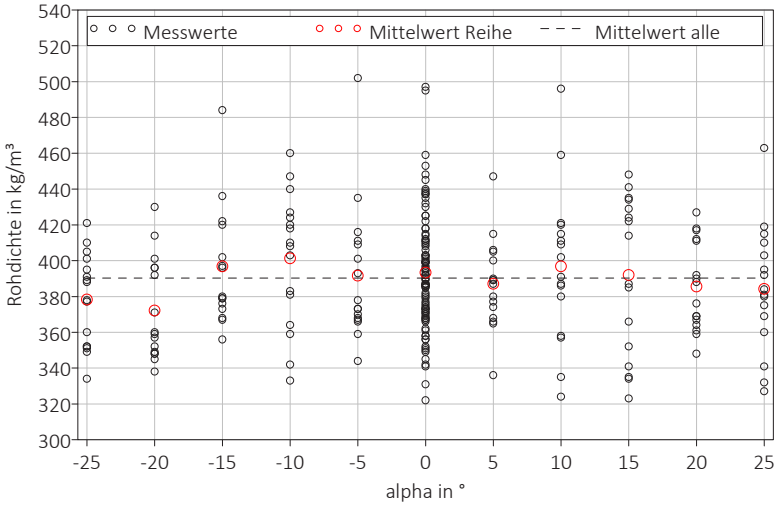


Bild 4-32: kleinere Rohdichte der Biegeprüfkörper über dem Schnittwinkel  $\alpha$

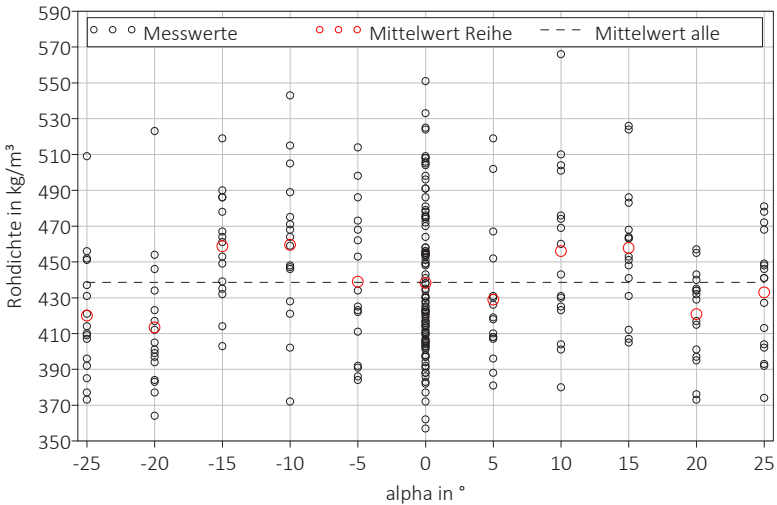


Bild 4-33: größere Rohdichte der Biegeprüfkörper über dem Schnittwinkel  $\alpha$

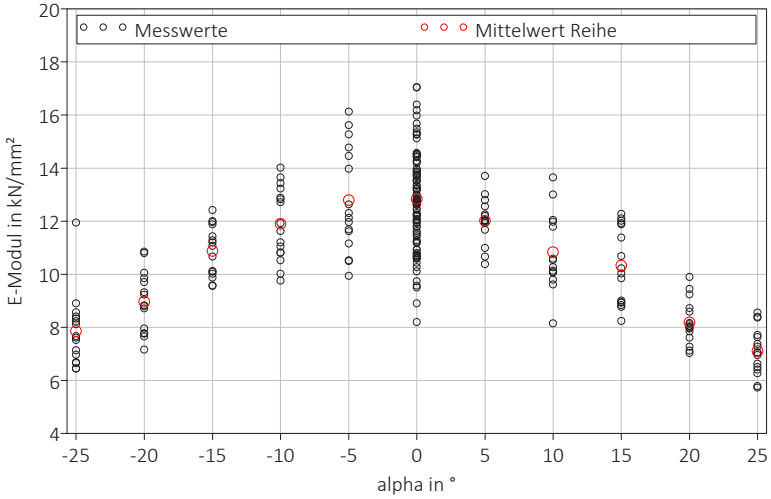


Bild 4-34: Biege-Elastizitätsmodul von Brettabschnitten mit Universal-Keilzinkenverbindung über dem Schnittwinkel  $\alpha$

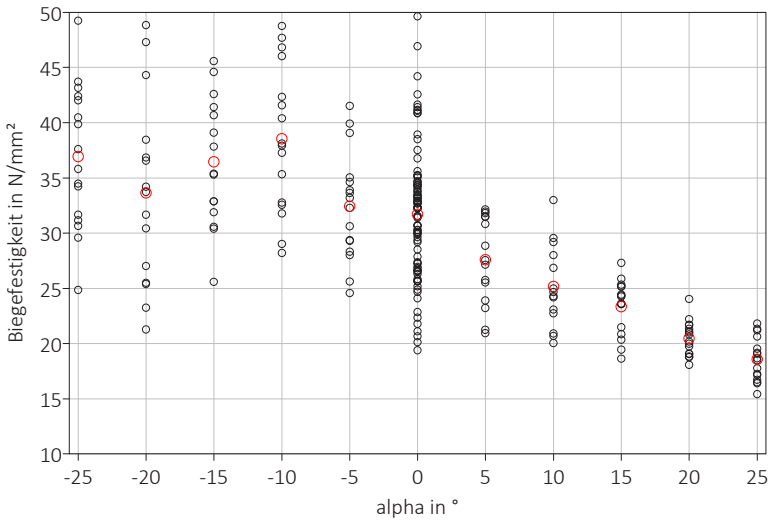


Bild 4-35: Biegefestigkeit von Brettabschnitten mit Universal-Keilzinkenverbindung über dem Schnittwinkel  $\alpha$

#### 4.4.4 Regressionsgleichungen

Anhand der Versuchsergebnisse wurden Regressionsgleichungen für die Festigkeiten und die Elastizitätsmoduln von Brettabschnitten mit Universal-Keilzinkenverbindungen ermittelt. Im Rahmen der hierzu durchgeführten multiplen Regressionsanalysen wurden die Anwesenheit von Ästen, die Rohdichte der beiden durch die Universal-Keilzinkenverbindung verbundenen Brettlamellen und der Schnittwinkel als mögliche Regressoren der Elastizitätsmoduln betrachtet. Bei der Ermittlung der Regressionsgleichungen für die Festigkeiten wurde zusätzlich der Elastizitätsmodul als Regressor verwendet. Da in den bereits im Simulationsprogramm vorhandenen Regressionsgleichungen die Darrrohdichte als Regressor verwendet wird, wurde vor der Durchführung der Regressionsanalyse die Darrrohdichte der Prüfkörper mittels der in Gleichung (4-8) angegebenen Beziehung berechnet. Das Volumenschwindmaß von Fichtenholz wurde dabei mit einem mittleren Wert von  $\alpha_{vu} \approx 0,84 \cdot \rho_0 \cdot u$  angenommen (vgl. Kollmann, 1951). Für die Holzfeuchte  $u$  wurde für jeden Prüfkörper der durch Darrprobe ermittelte Wert eingesetzt.

$$\rho_0 = \rho_u \cdot \frac{1+u}{1+\alpha_{vu}} \quad (4-8)$$

Bei den meisten Regressionsgleichungen führte die Verwendung beider Rohdichten nicht zu einer nennenswerten Verbesserung der Regressionsmodelle. Da für die Mehrheit der mechanischen Eigenschaften die Korrelation mit der kleineren Rohdichte größer war als für die größere Rohdichte, wurde für alle Regressionsgleichungen einheitlich die kleinere Rohdichte als Regressor verwendet. Ein signifikanter Einfluss der Äste konnte bei keiner der betrachteten mechanischen Eigenschaften festgestellt werden. In Tabelle 4-5 bis Tabelle 4-8 sind die Korrelationskoeffizienten nach Pearson für alle im Rahmen der Regressionsanalysen betrachteten Größen angegeben. Die ermittelten Regressionsgleichungen sind auf Seite 116 zusammengestellt. In den Gleichungen (4-9) bis (4-16) bedeuten

$r$	Korrelationskoeffizient nach Pearson
$s_R$	Standardabweichung der Residuen
$n$	Anzahl



Tabelle 4-5: Korrelationskoeffizienten für die Zugfestigkeit und den Zug-E-Modul der geprüften Brettabschnitte mit Universal-Keilzinkenverbindung

	$\ln(f_t)$	$\ln(E_t)$	$\rho_{0,\min}$	$\rho_{0,\max}$	$\cos \alpha$
$\ln(f_t)$	1	0,819	0,280	0,234	0,897
$\ln(E_t)$	0,819	1	0,296	0,281	0,848

Tabelle 4-6: Korrelationskoeffizienten für die Druckfestigkeit und den Biege-E-Modul der geprüften Brettabschnitte mit Universal-Keilzinkenverbindung

	$\ln(f_c)$	$\ln(E_c)$	$\rho_{0,\min}$	$\rho_{0,\max}$	$\cos \alpha$
$\ln(f_c)$	1	0,868	0,373	0,367	0,825
$\ln(E_c)$	0,868	1	0,311	0,390	0,871

Tabelle 4-7: Korrelationskoeffizienten für die Biegefestigkeit und den Biege-E-Modul der geprüften Brettabschnitte mit Universal-Keilzinkenverbindung für positive Winkel  $\alpha$

	$\ln(f_{m,\alpha>0})$	$\ln(E_{m,\alpha>0})$	$\rho_{0,\min}$	$\rho_{0,\max}$	$\cos \alpha$
$\ln(f_{m,\alpha>0})$	1	0,806	0,301	0,198	0,732
$\ln(E_{m,\alpha>0})$	0,806	1	0,371	0,320	0,822

Tabelle 4-8: Korrelationskoeffizienten für die Biegefestigkeit und den Biege-E-Modul der geprüften Brettabschnitte mit Universal-Keilzinkenverbindung für negative Winkel  $\alpha$

	$\ln(f_{m,\alpha<0})$	$\ln(E_{m,\alpha<0})$	$\rho_{0,\min}$	$\rho_{0,\max}$	$\cos \alpha$
$\ln(f_{m,\alpha<0})$	1	0,104	0,339	0,213	0,224
$\ln(E_{m,\alpha<0})$	0,104	1	0,471	0,476	0,758

$$\ln(E_{t,JKZV}) = -1,71 + 1,55 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_{0,min} + 10,5 \cdot \cos \alpha$$

$$r = 0,857 \quad s_R = 0,209 \quad n = 245 \quad (4-9)$$

mit  $E_{t,JKZV}$  in  $N/mm^2$ ;  $\rho_{0,min}$  in  $kg/m^3$ ;  $\alpha$  in  $^\circ$

$$\ln(E_{c,JKZV}) = -1,13 + 2,09 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_{0,min} + 9,65 \cdot \cos \alpha$$

$$r = 0,888 \quad s_R = 0,173 \quad n = 249 \quad (4-10)$$

mit  $E_{c,JKZV}$  in  $N/mm^2$ ;  $\rho_{0,min}$  in  $kg/m^3$ ;  $\alpha$  in  $^\circ$

$$\ln(E_{m,JKZV}) = 2,28 + 2,39 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_{0,min} + 6,27 \cdot \cos \alpha \quad ; \text{für } \alpha \geq 0$$

$$r = 0,876 \quad s_R = 0,116 \quad n = 171 \quad (4-11)$$

mit  $E_{m,JKZV}$  in  $N/mm^2$ ;  $\rho_{0,min}$  in  $kg/m^3$ ;  $\alpha$  in  $^\circ$

$$\ln(E_{m,JKZV}) = 3,58 + 2,41 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_{0,min} + 4,98 \cdot \cos \alpha \quad ; \text{für } \alpha \leq 0$$

$$r = 0,833 \quad s_R = 0,120 \quad n = 172 \quad (4-12)$$

mit  $E_{m,JKZV}$  in  $N/mm^2$ ;  $\rho_{0,min}$  in  $kg/m^3$ ;  $\alpha$  in  $^\circ$

$$\ln(f_{t,JKZV}) = -9,73 + 0,280 \cdot \ln(E_{t,JKZV}) + 8,89 \cdot 10^{-4} \cdot \rho_{0,min} + 9,80 \cdot \cos \alpha$$

$$r = 0,915 \quad s_R = 0,186 \quad n = 245 \quad (4-13)$$

mit  $f_{t,JKZV}, E_{t,JKZV}$  in  $N/mm^2$ ;  $\rho_0$  in  $kg/m^3$ ;  $\alpha$  in  $^\circ$

$$\ln(f_{c,JKZV}) = -2,11 + 0,293 \cdot \ln(E_{c,JKZV}) + 1,08 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_{0,min} + 2,42 \cdot \cos \alpha$$

$$r = 0,891 \quad s_R = 0,100 \quad n = 247 \quad (4-14)$$

mit  $f_{c,JKZV}, E_{c,JKZV}$  in  $N/mm^2$ ;  $\rho_0$  in  $kg/m^3$ ;  $\alpha$  in  $^\circ$

$$\ln(f_{m,JKZV}) = -4,28 + 0,561 \cdot \ln(E_{m,JKZV}) + 7,18 \cdot 10^{-4} \cdot \rho_{0,min} + 2,13 \cdot \cos \alpha$$

; für  $\alpha \geq 0$

$$r = 0,817 \quad s_R = 0,144 \quad n = 166 \quad (4-15)$$

mit  $f_{m,JKZV}, E_{m,JKZV}$  in  $N/mm^2$ ;  $\rho_0$  in  $kg/m^3$ ;  $\alpha$  in  $^\circ$

$$\ln(f_{m,JKZV}) = 2,85 + 0,461 \cdot \ln(E_{m,JKZV}) + 1,36 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_{0,min} - 4,24 \cdot \cos \alpha$$

; für  $\alpha \leq 0$

$$r = 0,520 \quad s_R = 0,172 \quad n = 167 \quad (4-16)$$

mit  $f_{m,JKZV}, E_{m,JKZV}$  in  $N/mm^2$ ;  $\rho_0$  in  $kg/m^3$ ;  $\alpha$  in  $^\circ$

## 4.5 Durchgeführte Simulationsrechnungen

Mit Hilfe des Rechenmodells zur numerischen Simulation von Brettsperrholzträgern mit Universal-Keilzinkenverbindungen können Zug-, Druck- und Biegefestigkeit sowie die Tragfähigkeit unter beliebigen Kombinationen der drei Beanspruchungen ermittelt werden. Daneben bietet das Rechenmodell die Möglichkeit, den Einfluss der Trägerabmessungen und des Lagenaufbaus auf die simulierten Festigkeitskennwerte zu untersuchen. Die im Rahmen des Forschungsvorhabens durchgeführten Simulationen beschränken sich jedoch auf die Biegefestigkeit von Universal-Keilzinkenverbindungen. Das erweiterte und modifizierte Rechenmodell wurde anhand der Ergebnisse der durchgeführten experimentellen Untersuchungen mit geraden Brettsperrholzträgern sowie mit Brettsperrholz-Satteldachträgern und Brettsperrholzrahmenecken überprüft. Hierzu wurden die untersuchten Konfigurationen mit Hilfe des Rechenmodells abgebildet und die durch numerische Simulation ermittelten Biegefestigkeiten den experimentell bestimmten Werten gegenübergestellt.

Zur Simulation der Biegefestigkeit von Universal-Keilzinkenverbindungen wurden im Rechenmodell zwei gerade Trägerhälften mit einer Länge von jeweils der fünffachen Trägerhöhe abgebildet und unter verschiedenen Schnittwinkeln zwischen  $-25^\circ$  und  $25^\circ$  miteinander verbunden. Im Gegensatz zu den experimentellen Untersuchungen wurden die einwirkenden Biegemomente im Rechenmodell nicht durch Kräftepaare erzeugt, sondern unmittelbar an den Enden der simulierten Träger als Momente aufgebracht. Für positive Schnittwinkel entspricht damit die Einwirkung im Rechenmodell jener in den Universal-Keilzinkenverbindungen der geprüften Brettsperrholz-Satteldachträger. Im Rechenmodell wurde bei negativen Schnittwinkeln ebenfalls eine reine Momentenbeanspruchung simuliert, wohingegen bei den geprüften Rahmenecken neben dem Biegemoment auch Normal und Querkräfte auftraten. Bei den Versuchen waren die aus den Druckkräften resultierenden Normalspannungen jedoch klein in Verhältnis zu den Biegespannungen. Der Einfluss der in den Versuchen aufgetretenen Querkräfte auf die Tragfähigkeit der Universal-Keilzinkenverbindungen wird ebenfalls als gering eingeschätzt, sodass

trotz der getroffenen Vereinfachung die Ergebnisse der numerischen Simulation mit den experimentell ermittelten Werten vergleichbar sind.

In Bild 4-36 und Bild 4-37 sind die Ergebnisse der numerischen Simulation von Universal-Keilzinkenverbindungen in Brettsperrholzträgern angegeben, deren Lagenaufbau und Querschnittsabmessungen jenen der geprüften Brettsperrholzträger entspricht. Die in den Diagrammen angegebenen Mittelwerte und charakteristischen Werte der simulierten Biegefestigkeit wurden aus jeweils 500 simulierten Einzelwerten berechnet. Im Rahmen der durchgeführten Simulationsrechnungen wurde der effektive Verschwächungsgrad  $v_{\text{eff}}$  zwischen dem nominellen Verschwächungsgrad des Keilzinkenprofils (0,14) und dem vorhandenen mittleren effektiven Verschwächungsgrad bei den durchgeführten Versuchsreihen variiert. Hierdurch kann einerseits die unter Berücksichtigung des in den Prüfkörpern vorhandenen effektiven Verschwächungsgrades  $v_{\text{eff}}$  simulierte Biegefestigkeit direkt mit den Versuchsergebnissen verglichen werden. Hierzu sind in den Diagrammen in Bild 4-36 und Bild 4-37 die experimentell ermittelten Biegefestigkeiten für die geraden Brettsperrholzträger der Reihe S600LFJ ( $v_{\text{eff,mean}} = 0,255$ ), die Brettsperrholz-Satteldachträger der Reihen SD600 ( $v_{\text{eff,mean}} = 0,268$ ) und die Brettsperrholz-Rahmenecken der Reihen RE600 ( $v_{\text{eff,mean}} = 0,305$ ) angegeben.

Darüber hinaus wird anhand der für die unterschiedlichen effektiven Verschwächungsgrade  $v_{\text{eff}}$  simulierten Werte ersichtlich, wie sehr sich eine Verringerung des Zinkenspiels  $s$  und der Produktionstoleranz  $\Delta t$  auf die Biegefestigkeit der Universal-Keilzinkenverbindungen auswirkt.

In den beiden Diagrammen in Bild 4-38 und Bild 4-39 sind die simulierten Biegefestigkeiten für Brettsperrholzträger mit zwei Längslagen angegeben. Der Vergleich mit den simulierten Festigkeiten für Querschnitte mit vier Längslagen zeigt, dass sich die Werte kaum unterscheiden. Anders als bei der Biegefestigkeit von Brettsperrholzträgern, die infolge von Homogenisierungseffekten mit zunehmender Anzahl der Längslagen größer wird, ist die Biegefestigkeit der Universal-Keilzinkenverbindungen unabhängig von der Anzahl der Längslagen. Die gilt auch für die Anzahl  $m$  der Bretter innerhalb der Längslagen, die in Bild 4-40 stellvertretend für die Trägerhöhe  $h = m \cdot b$  steht.

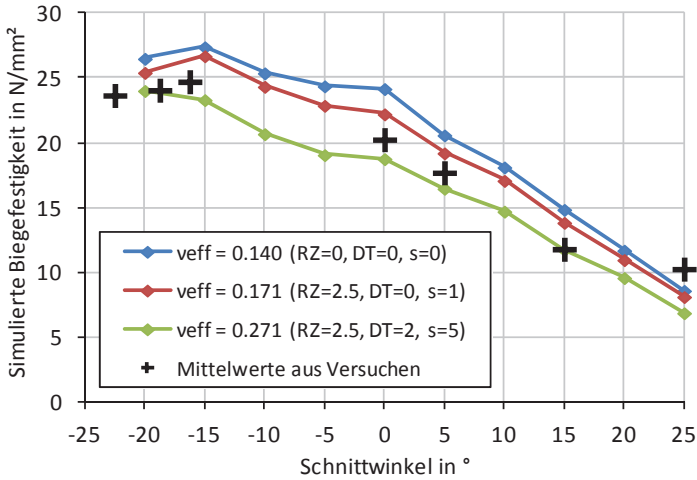


Bild 4-36: Mittelwerte der simulierten Biegefestigkeit über dem Schnittwinkel  $\alpha$  für Querschnitte mit  $n_{\text{long}} = 4$  Längslagen,  $h = 600$  mm und  $m = 4$  Lamellen je Längslage

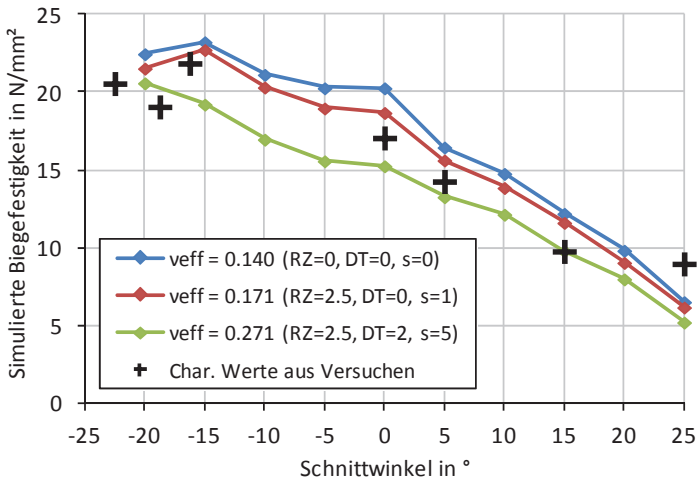


Bild 4-37: Charakteristische Werte der simulierten Biegefestigkeit über dem Schnittwinkel  $\alpha$  für Querschnitte mit  $n_{\text{long}} = 4$  Längslagen,  $h = 600$  mm und  $m = 4$  Lamellen je Längslage

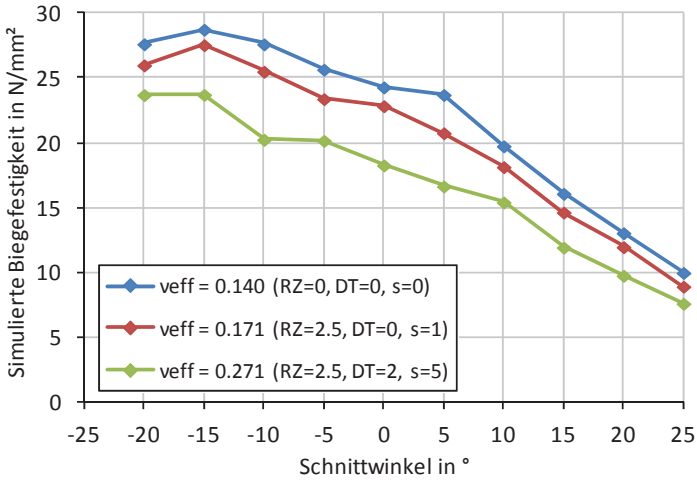


Bild 4-38: Mittelwerte der simulierten Biegefestigkeit über dem Schnittwinkel  $\alpha$  für Querschnitte mit  $n_{long} = 2$  Längslagen,  $h = 600$  mm und  $m = 4$  Lamellen je Längslage

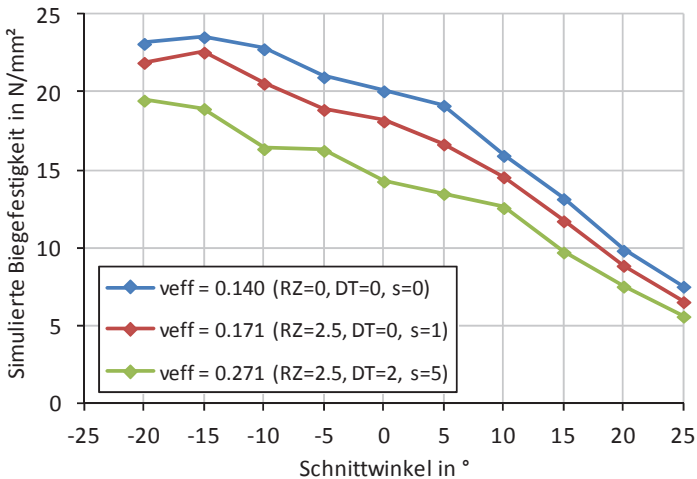


Bild 4-39: Charakteristische Werte der simulierten Biegefestigkeit über dem Schnittwinkel  $\alpha$  für Querschnitte mit  $n_{long} = 2$  Längslagen,  $h = 600$  mm und  $m = 4$  Lamellen je Längslage

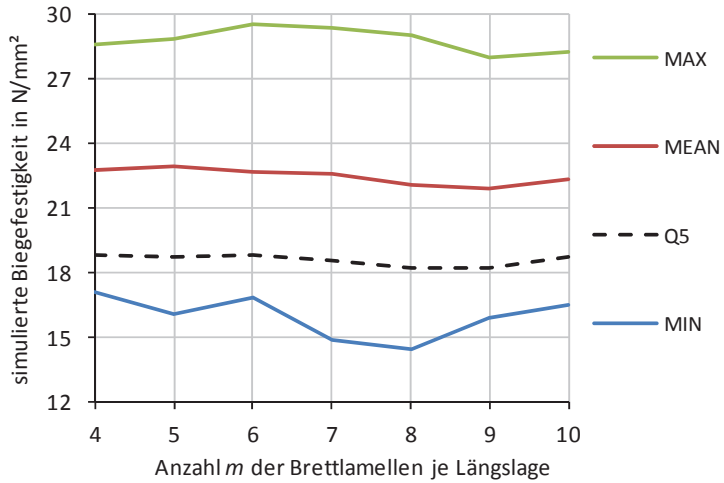


Bild 4-40: Simulierte Biegefestigkeit in Abhängigkeit der Anzahl  $m$  der Lamellen je Längslage für  $n_{long} = 4$ ,  $\alpha = 0^\circ$  und  $v_{eff} = 0,14$





## 5 Bemessungsvorschlag

Anhand der Ergebnisse der durchgeführten Versuche in Bauteilgröße wurden Ansätze für den Nachweis von Druck- und Biegebeanspruchungen hergeleitet, mit deren Hilfe die Dimensionierung und Bemessung von Universal-Keilzinkenverbindungen in Brettsperrholzträgern möglich ist. Die vorgeschlagenen Bemessungsgleichungen beruhen in weiten Teilen auf bekannten Ansätzen, sodass sie für den Tragwerksplaner gut verständlich und einfach anzuwenden sind.

Wie bei der Bemessung von Holzkonstruktionen allgemein üblich, wird der Nachweis der Tragfähigkeit von Universal-Keilzinkenverbindungen in Brettsperrholz in Form von Spannungsnachweisen geführt. Bei der Berechnung der für die Nachweise erforderlichen Spannungen in den Universal-Keilzinkenverbindungen werden, analog der Ermittlung der Spannungen in Brettsperrholz, nur die Brettlagen berücksichtigt, deren Faserichtung parallel zur Richtung der einwirkenden Spannungen verläuft. Die Schwächung des tragenden Querschnitts in den Universal-Keilzinkenverbindungen bleibt bei der Spannungsberechnung unberücksichtigt. Die Berücksichtigung der im Vergleich zum ungeschwächten Querschnitt reduzierten Tragfähigkeit der Universal-Keilzinkenverbindungen erfolgt stattdessen durch eine Abminderung der Festigkeitskennwerte.

### 5.1 Brettsperrholzträger mit gerader Stabachse

Die in Tabelle 5-1 zusammengestellten Ergebnisse der durchgeführten Druck- und Biegeversuche mit geraden Brettsperrholzträgern mit und ohne Universal-Keilzinkenverbindung zeigen, dass für alle Versuchsreihen das Verhältnis der Tragfähigkeit der keilgezinkten und der nicht keilgezinkten Prüfkörper sehr gut mit dem aus dem effektiven Verschwächungsgrad berechneten Wert  $(1 - v_{\text{eff}})$  übereinstimmt. In der Regel erfolgt daher beim vorgeschlagenen Bemessungsansatz die Ermittlung der reduzierten Festigkeitskennwerte der Universal-Keilzinkenverbindungen durch Multiplikation

der Festigkeitskennwerte der ungeschwächten Brettsperrholzquerschnitte mit dem effektiven Verschwächungsgrad  $v_{\text{eff}}$ .

Der effektive Verschwächungsgrad  $v_{\text{eff}}$  ist einerseits durch den Herstellungsprozess beeinflussbar, hängt aber bei Universal-Keilzinkenverbindungen mit Randzinken auch von der Dicke des Gesamtquerschnitts ab. Durch die Verwendung des effektiven Verschwächungsgrades  $v_{\text{eff}}$  zur Berechnung der Festigkeitskennwerte kann daher, anstelle einer pauschalen Reduzierung, die tatsächliche Beschaffenheit einer Universal-Keilzinkenverbindung bei der Bemessung berücksichtigt werden. Die herstellungsbedingten Größen Zinzenspiel und Dickentoleranz können zur Formulierung von Kriterien zur Qualitätssicherung verwendet werden.

*Tabelle 5-1: Ergebnisse der Versuche mit geraden Brettsperrholzträgern mit und ohne Universal-Keilzinkenverbindung*

Reihen	$f_{\text{LFJ,mean}}/f_{\text{REF,mean}}$	$(1 - v_{\text{eff}})_{\text{mean}}$	Verhältnis
S600LFJ / S600REF	0,696	0,726	0,959
P200LFJ / P200REF	0,683	0,718	0,952
P100LFJ / P100REF	0,658	0,677	0,972
D600LFJ / D600REF	0,812	0,785	1,034

### Druck in Plattenebene

Bei Beanspruchung durch Druckkräfte in Plattenebene können die Druckspannungen in den parallel zur einwirkenden Druckkraft verlaufenden Brettlagen mit der Netto-Querschnittsfläche dieser Lagen berechnet werden.

$$\sigma_{c,\text{net}} = \frac{F_c}{A_{\text{net,Jong}}} \quad (5-1)$$

Das Verhältnis der Druckfestigkeit von Brettsperrholzträgern mit und ohne Universal-Keilzinkenverbindung stimmt sehr gut mit dem aus dem effektiven Verschwächungsgrad berechneten Anteil  $(1 - v_{\text{eff}})$  des Restquerschnitts in der Universal-Keilzinkenverbindung überein, wobei die experimentell ermittelten 5%-Quantile der Druckfestigkeit für Brettsperr-

holzträger mit und ohne Universal-Keilzinkenverbindung deutlich über der in Zulassungen angegebenen charakteristischen Druckfestigkeit liegen. Da die Holzfeuchte der Prüfkörper im Mittel jedoch nur etwa 10% betrug, gelten die ermittelten Werte nur für die Nutzungsklasse 1. Bei höherer Holzfeuchte muss mit einer gegenüber den Versuchsergebnissen deutlich reduzierten Druckfestigkeit gerechnet werden. Nach Frese et al. (2012) ist in Nutzungsklasse 2 die Druckfestigkeit in Faserrichtung von Brettschichtholz um 1/3 geringer als in Nutzungsklasse 1. Wird für Brettspertholz die gleiche Abhängigkeit der Druckfestigkeit von der Holzfeuchte angenommen, ergibt sich anhand der Versuchsergebnisse die charakteristische Druckfestigkeit in Nutzungsklasse 2 zu  $2/3 \cdot 35,2 = 23,5 \text{ N/mm}^2$ .

Für die Bemessung von Universal-Keilzinkenverbindungen in Brettspertholz wird empfohlen, in Nutzungsklasse 2 den um  $(1 - v_{\text{eff}})$  reduzierten Rechenwert der charakteristischen Druckfestigkeit des ungeschwächten Brettspertholzes gemäß Gleichung (5-2) anzunehmen. In Nutzungsklasse 1 kann mit 50% höheren Werten gerechnet werden.

$$f_{c,net,k}^{\text{LFJ}} = (1 - v_{\text{eff}}) \cdot f_{c,net,k}^{\text{BSP}} \quad (5-2)$$

Der Nachweis kann dann nach Gleichung (5-3) geführt werden.

$$\frac{\sigma_{c,net}}{f_{c,net}^{\text{LFJ}}} \leq 1 \quad (5-3)$$

Bei der Bemessung von Brettspertholzträgern mit Kontaktfugen sollte eine, gegenüber ungestoßenen Brettspertholzträgern, um 10% reduzierte Druckfestigkeit angenommen werden.

$$f_{c,net,k}^{\text{KF}} = 0,9 \cdot f_{c,net,k}^{\text{BSP}} \quad (5-4)$$

### Biegung in Plattenebene

Bei Biegung in Plattenebene können die Biegespannungen in den parallel zur Stabachse verlaufenden Brettlagen unter Vernachlässigung der Nachgiebigkeit der Kreuzungsflächen mit dem Widerstandsmoment der Längslagen berechnet werden.

$$\sigma_{m,net} = \frac{M}{W_{net,Jong}} \quad (5-5)$$

Der aus den Versuchen mit nicht keilgezinkten Brettsperrholzträgern ermittelte charakteristische Wert der Biegefestigkeit entspricht nahezu dem in Zulassungen angegeben Rechenwert der Biegefestigkeit und das Verhältnis der Biegefestigkeit mit und ohne Universal-Keilzinkenverbindung stimmt sehr gut mit dem Wert  $(1 - \nu_{eff})$  überein. Die charakteristische Biegefestigkeit von Universal-Keilzinkenverbindungen bei in Plattenebene beanspruchten Brettsperrholzträgern kann daher für die Bemessung nach Gleichung (5-6) berechnet werden.

$$f_{m,k}^{LFJ} = (1 - \nu_{eff}) \cdot f_{m,k}^{BSP} \quad (5-6)$$

Der Spannungsnachweis wird dann nach Gleichung (5-7) geführt.

$$\frac{\sigma_{m,net,d}}{f_{m,d}^{LFJ}} \leq 1 \quad (5-7)$$

### Biegung rechtwinklig zur Plattenebene

Bei Beanspruchung rechtwinklig zur Plattenebene müssen die Biegespannungen in den parallel zur Spannrichtung verlaufenden Brettlagen unter Berücksichtigung der Schubverformungen in den Querlagen berechnet werden. Hierzu kann beispielsweise das in den Zulassungen angegebene  $\gamma$ -Verfahren oder das Schubanalogieverfahren verwendet werden. Der Einfluss der Universal-Keilzinkenverbindung kann bei der Ermittlung der Spannungen vernachlässigt werden.

Wie bei Biegebeanspruchung in Plattenebene kann die charakteristische Biegefestigkeit der Universal-Keilzinkenverbindung nach Gleichung (5-6) durch Multiplikation der Biegefestigkeit des Brettsperrholzträgers mit

dem Wert  $(1 - \nu_{\text{eff}})$  berechnet werden. Der Nachweis erfolgt dann nach Gleichung (5-7) durch Vergleich des Bemessungswertes der Biegerandspannung mit dem Bemessungswert der Biegefestigkeit der Universal-Keilzinkenverbindung. Auf den Nachweis der Schwerpunktspannung mit der Zug- bzw. Druckfestigkeit kann wie bei Brettsperrholz ohne Universal-Keilzinkenverbindung verzichtet werden.

### Zug in Plattenebene

Bei Zugbeanspruchung in Plattenebene wirken Zugspannungen nur in den parallel zur Kraftrichtung verlaufenden Brettlagen. Wie bei Druckbeanspruchung werden die einwirkenden Spannungen daher mit dem Nettoquerschnitt der Längslagen berechnet.

$$\sigma_{t,\text{net}} = \frac{F_t}{A_{\text{net},\text{Jong}}} \quad (5-8)$$

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden keine Versuche zur Ermittlung der Zugfestigkeit von Universal-Keilzinkenverbindungen in Brettsperrholzträgern durchgeführt. Aus den durchgeführten Zugversuchen mit Universal-Keilzinkenverbindungen in einzelnen Brettlamellen ergab sich jedoch eine auf den ungeschwächten Querschnitt bezogene charakteristische Zugfestigkeit, die mit  $13,3 \text{ N/mm}^2$  annähernd so groß ist, wie die charakteristische Zugfestigkeit des verwendeten Brettmaterials der Festigkeitsklasse C24.

Tabelle 5-2: *Ergebnisse der Zugversuche mit Universal-Keilzinkenverbindungen in Brettlamellen mit  $\alpha = 0^\circ$*

$n = 91$	$f_{t,\text{gross}}$	$f_{t,\text{net}}$	$1 - \nu_{\text{eff}}$
Mittelwert	18,1	26,6	0,680
5%-Quantil	13,3	19,6	

Auf der Grundlage dieser Ergebnisse kann, als konservative Abschätzung, die Zugfestigkeit von Universal-Keilzinkenverbindungen in Brettsperrholzträgern durch eine Reduzierung der Zugfestigkeit des verwendeten Brettmaterials mit dem Wert  $(1 - \nu_{\text{eff}})$  berechnet werden.

$$f_{t,k}^{\text{LFJ}} = (1 - \nu_{\text{eff}}) \cdot f_{t,k}^{\text{BSP}} \quad (5-9)$$

Der Nachweis lautet dann

$$\frac{\sigma_{t,\text{net}}}{f_{t,\text{net}}^{\text{LFJ}}} \leq 1. \quad (5-10)$$

## 5.2 Brettsperrholzträger mit geknickter Stabachse

Bei Brettsperrholzträgern mit geknickter Stabachse weicht im Bereich des Bauteilknicks die Verteilung der Spannungen innerhalb der Querschnittshöhe deutlich von dem in der Balkentheorie angenommenen linearen Verlauf ab. Abhängig vom Schnittwinkel  $\alpha$  der verbundenen Bauteile treten in den inneren einspringenden Ecken der Universal-Keilzinkenverbindungen deutlich höhere Spannungen als nach Balkentheorie auf, wohingegen die Spannung in der äußeren Ecke gegen Null strebt. In der unmittelbaren Umgebung der Universal-Keilzinkenverbindungen treten neben Normalspannungen in Richtung der Stabachse auch Spannungen quer zur Bauteilachse und Schubspannungen auf, die vom Schnittwinkel  $\alpha$  abhängig sind. Wird diese Spannungscombination, wie im Holzbau üblich, durch die Verwendung einer effektiven Biegefestigkeit beim Spannungsnachweis berücksichtigt, so nimmt, wegen der orthotropen Eigenschaften von Holz, die effektive Biegefestigkeit der Universal-Keilzinkenverbindungen mit zunehmendem Schnittwinkel  $\alpha$  ab.

Zu Beginn des Forschungsvorhabens wurde der Ansatz verfolgt, beide Einflüsse, den nichtlinearen Verlauf der Spannungen und die Reduzierung der Biegefestigkeit, unabhängig voneinander zu ermitteln und zur Formulierung eines Bemessungsansatzes zu verwenden. Die durchgeführten Versuche mit Brettsperrholzträgern mit geknickter Bauteilachse wurden

daher zunächst unter Verwendung der in Abschnitt 4.1.3 angegebenen Spannungsspitzenfaktoren ausgewertet. Die Festigkeitsreduzierung wurde anhand der Ergebnisse der durchgeführten Versuche mit Einzellamellen ermittelt. Es zeigte sich jedoch, dass die Überlagerung beider Effekte zu deutlich größeren Abminderungen der Biegefestigkeit führt, als bei den durchgeführten Versuchen mit Brettsperrholz-Satteldachträgern und Brettsperrholz-Rahmenecken beobachtet wurde.

Aufgrund der sehr konservativen Ergebnisse wurde der ursprüngliche Ansatz nicht weiter verfolgt. Beim nachfolgend vorgeschlagenen Bemessungsansatz werden die Spannungen am Bauteilknick stattdessen unter der vereinfachenden Annahme einer innerhalb der Bauteilhöhe linearen, vom Schnittwinkel  $\alpha$  unabhängigen Spannungsverteilung berechnet. Die gesamte schnittwinkelabhängige Änderung der Biegetragfähigkeit, infolge von Spannungsspitzen und Festigkeitsreduzierung, wird über eine Modifikation der Biegefestigkeit berücksichtigt. Zur Herleitung eines passenden Ansatzes für die Festigkeitsreduzierung wurden verschiedene aus der Literatur bekannte Ansätze betrachtet und mit den Ergebnissen der Versuche verglichen.

### **Beanspruchung durch öffnende Momente**

Bei den Versuchen mit durch positive, öffnende Momente beanspruchten Brettsperrholz-Satteldachträgern wurde eine deutliche Abnahme der Biegefestigkeit mit zunehmendem Schnittwinkel beobachtet. Zur Ermittlung der Biegefestigkeit der Universal-Keilzinkenverbindungen in Abhängigkeit des Schnittwinkels  $\alpha$  wurden die von Norris (1962) und Hankinson (1921) entwickelten Ansätze zur Ermittlung der Festigkeit unter einem Winkel zur Faser betrachtet. Der Ansatz von Hankinson wurde dabei in der in Eurocode 5 zur Berechnung der Druckfestigkeit unter einem Winkel zur Faser angegebenen Form verwendet, die eine Erweiterung des von Hankinson ursprünglich vorgeschlagenen Ansatzes darstellt. In Gleichung (5-11) und Gleichung (5-12) sind die aus den beiden Ansätzen abgeleiteten Abminderungsfaktoren  $k_\alpha$  zur Berechnung der Festigkeit unter einem Winkel  $\alpha$  angegeben. Um die Abminderungsfaktoren an die Ergebnisse der Versuche mit Universal-Keilzinkenverbindungen anzupassen, wurden die Faktoren  $a$  und  $b$  eingefügt.

$$k_{\alpha}^{\text{LFJ}} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{(1-\nu_{\text{eff}}) \cdot f_{\text{m},k}^{\text{BSP}}}{a_{\text{Norris}} \cdot f_{\text{t},90,k}^{\text{BSP}}}\right)^2 \cdot \sin^2 \alpha + \left(\frac{(1-\nu_{\text{eff}}) \cdot f_{\text{m},k}^{\text{BSP}}}{b_{\text{Norris}} \cdot f_{\text{v},k}^{\text{BSP}}}\right)^2 \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha} + \cos^4 \alpha} \quad (5-11)$$

$$k_{\alpha}^{\text{LFJ}} = \frac{1}{\left(\frac{(1-\nu_{\text{eff}}) \cdot f_{\text{m},k}^{\text{BSP}}}{a_{\text{Hankinson}} \cdot f_{\text{t},90,k}^{\text{BSP}}}\right)^2 \cdot \sin^2 \alpha + \left(\frac{(1-\nu_{\text{eff}}) \cdot f_{\text{m},k}^{\text{BSP}}}{b_{\text{Hankinson}} \cdot f_{\text{v},k}^{\text{BSP}}}\right)^2 \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha} + \cos^2 \alpha} \quad (5-12)$$

Zur Berechnung der Abminderungsfaktoren für die geprüften Brettsperrholz-Satteldachträger wurde die Biegefestigkeit der Universal-Keilzinkenverbindungen mit dem aus den Versuchen mit geraden Brettsperrholzträgern ermittelten charakteristischen Wert von 17,1 N/mm<sup>2</sup> angesetzt. Die effektive Zugfestigkeit  $f_{\text{t},90}$  rechtwinklig zur Trägerachse und die effektive Schubfestigkeit  $f_{\text{v}}$ , die in beiden Gleichungen vorkommen, wurden in Abhängigkeit des Querschnittaufbaus nach Gleichung (5-13) bzw. (5-14) berechnet (vgl. Flaig, 2013). Beide Werte sind, wie die Biegefestigkeit der Universal-Keilzinkenverbindung auf den Querschnitt der Längslagen bezogen.

$$f_{\text{t},90,k}^{\text{BSP}} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{t_{\text{net,cross}}}{t_{\text{net,long}}} \cdot f_{\text{t},0,k}^{\text{lam}} \\ \frac{n_{\text{CA}} \cdot b}{t_{\text{net,long}}} \cdot f_{\text{R},k}^{\text{lam}} \end{array} \right\} \quad (5-13)$$

$$f_{\text{v},k}^{\text{BSP}} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{t_{\text{gross}}}{t_{\text{net,long}}} \cdot f_{\text{v},k}^{\text{lam}} \\ n_{\text{CA}} \cdot b \cdot \frac{1}{2 \cdot t_{\text{net,long}} \cdot \left( \frac{1}{f_{\text{v,tot},k}^{\text{lam}}} \cdot \left( 1 - \frac{1}{m^2} \right) + \frac{2}{f_{\text{R},k}^{\text{lam}}} \cdot \left( \frac{1}{m} - \frac{1}{m^2} \right) \right)} \end{array} \right\} \quad (5-14)$$

Für die Festigkeitskennwerte der Brettlamellen in Gleichung (5-13) und (5-14) wurden die in Tabelle 5-3 angegebenen Werte angesetzt.



Tabelle 5-3: Festigkeitskennwerte für Brettlamellen der Festigkeitsklasse C24

$f_{t,0,k}^{\text{lam}}$ in N/mm <sup>2</sup>	$f_{v,k}^{\text{lam}}$ in N/mm <sup>2</sup>	$f_{R,k}^{\text{lam}}$ in N/mm <sup>2</sup>	$f_{v,\text{tor},k}^{\text{lam}}$ in N/mm <sup>2</sup>
14,0	4	1,1	2,75

Für die geprüften Satteldachträger mit  $m = 4$  Lamellen je Längslage und  $n_{\text{CA}} = 4$  Kreuzungsflächen in Richtung der Elementdicke erhält man damit effektive Festigkeiten von  $f_{t,90,k}^{\text{BSP}} = 3,5 \text{ N/mm}^2$  und  $f_{v,k}^{\text{BSP}} = 2,75 \text{ N/mm}^2$ .

Die auf diese Weise für die Prüfkörper berechneten Abminderungsfaktoren wurden mit Hilfe des Faktoren  $a$  und  $b$  in Gleichung (5-11) und Gleichung (5-12) an die Versuchsergebnisse angepasst. Für den Faktor  $k_\alpha$  nach Norris ergab sich die beste Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen für  $a_{\text{Norris}} = 1,0$  und  $b_{\text{Norris}} = 1,1$ . Beim erweiterten Ansatz nach Hankinson ist die Übereinstimmung für  $a_{\text{Hankinson}} = 2,5$  und  $b_{\text{Hankinson}} = 2,5$  am besten. In den Diagrammen in Bild 5-1 und Bild 5-2 sind die mit Hilfe der angepassten Abminderungsfaktoren nach Gleichung (5-11) bzw. Gleichung (5-12) berechneten Biegefestigkeiten und die experimentell ermittelten Biegefestigkeiten über dem Schnittwinkel  $\alpha$  dargestellt.

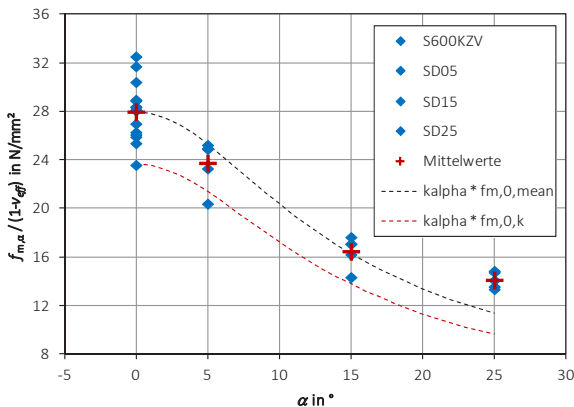


Bild 5-1: Versuchsergebnisse und Anpassung nach Gleichung (5-11) mit  $a_{\text{Norris}} = 1,0$  und  $b_{\text{Norris}} = 1,1$

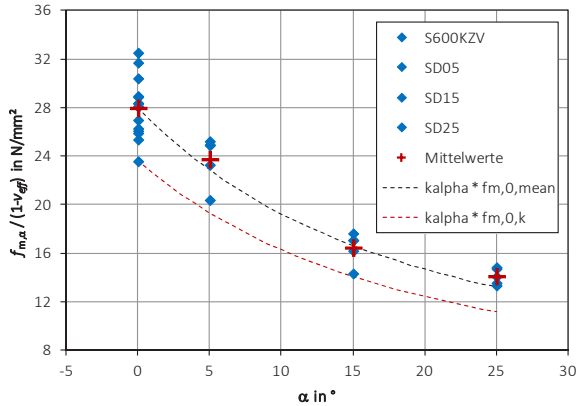


Bild 5-2: Versuchsergebnisse und Anpassung nach Gleichung(5-12) mit  $a_{Hankinson} = 2,5$  und  $b_{Hankinson} = 2,5$

Der Vergleich der beiden Diagramme zeigt, dass mit Hilfe des erweiterten Ansatzes von Hankinson eine deutlich bessere Anpassung an die Versuchsergebnisse erreicht wird. Dieser Ansatz wird daher beim vorgeschlagenen Bemessungskonzept verwendet.

### Beanspruchung durch schließende Momente

Für die durch schließende Momente beanspruchten Universal-Keilzinkenverbindungen mit negativen Schnittwinkeln in den geprüften Brettsperrholz-Rahmenecken ergeben sich, unter Annahme einer linearen Spannungsverteilung am Bauteilknick, größere Biegefestigkeiten als für die geprüften geraden Brettsperrholzträger mit einem Schnittwinkel  $\alpha = 0$ . Dies gilt sowohl für die berechneten Biegedruckspannungen in den innenliegenden, einspringenden Ecken, als auch für die Biegezugspannungen am äußeren Querschnittsrand (vgl. Abschnitt 3.7.3). Auf der sicheren Seite liegend werden die hohen Biegefestigkeiten im vorgeschlagenen Bemessungsansatz nicht berücksichtigt. Stattdessen wird vorgeschlagen, für negative Schnittwinkel  $\alpha < 0^\circ$  die Biegefestigkeit für gerade Brettsperrholzträger nach Gleichung (5-6) anzusetzen.

## Bemessungsvorschlag

Die Biegefestigkeit von Universal-Keilzinkenverbindungen in Brettsperrholzträgern mit geknickter Bauteilachse kann in Abhängigkeit des Schnittwinkels  $\alpha$  nach Gleichung (5-15) und Gleichung (5-16) berechnet werden.

Bei Beanspruchung durch positive (öffnende) Momente gilt für Schnittwinkel  $\alpha$  zwischen  $0^\circ$  und  $25^\circ$

$$f_{m,\alpha,k}^{LFJ} = \frac{(1 - \nu_{\text{eff}}) \cdot f_{m,k}^{\text{BSP}}}{\left( \frac{(1 - \nu_{\text{eff}}) \cdot f_{m,k}^{\text{BSP}}}{2,5 \cdot f_{t,90,k}^{\text{BSP}}} \cdot \sin^2 \alpha \right) + \left( \frac{(1 - \nu_{\text{eff}}) \cdot f_{m,k}^{\text{BSP}}}{2,5 \cdot f_{v,k}^{\text{BSP}}} \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha \right) + \cos^2 \alpha} \quad (5-15)$$

Bei Beanspruchung durch negative (schließende) Momente gilt für Schnittwinkel  $\alpha$  zwischen  $0^\circ$  und  $25^\circ$

$$f_{m,\alpha,k}^{LFJ} = (1 - \nu_{\text{eff}}) \cdot f_{m,k}^{\text{BSP}} \quad (5-16)$$

Für den Nachweis von aus Biegemomenten und Normalkräften resultierenden Spannungen in Universal-Keilzinkenverbindungen in Brettsperrholzträgern mit geknickter Stabachse wird folgendes Vorgehen vorgeschlagen:

- Ermittlung der Querschnittswerte der Längslagen in einem Schnitt rechtwinklig zur Richtung der Längslagen
- Berechnung der auf den Querschnitt der Längslagen bezogenen maximalen Randspannung durch Überlagerung von Biege- und Normalspannungen ohne Berücksichtigung von Spannungsspitzen
- Berechnung der Biegefestigkeit  $f_{m,\alpha}^{LFJ}$  in Abhängigkeit des Schnittwinkels nach Gleichung (5-15) oder (5-16)
- Vergleich der Randspannung mit der Biegefestigkeit  $f_{m,\alpha}^{LFJ}$

Das Diagramm in Bild 5-3 zeigt die nach Gleichung (5-15) und Gleichung (5-16) berechneten Biegefestigkeiten für Brettsperrholzträger aus Brettern der Festigkeitsklasse C24 und einem Querschnitt der dem der geprüften Brettsperrholz Satteldachträger und Rahmenecken entspricht. Der effektive Verschwächungsgrad wurde mit  $\nu_{\text{eff}} = 0,30$  angenommen.

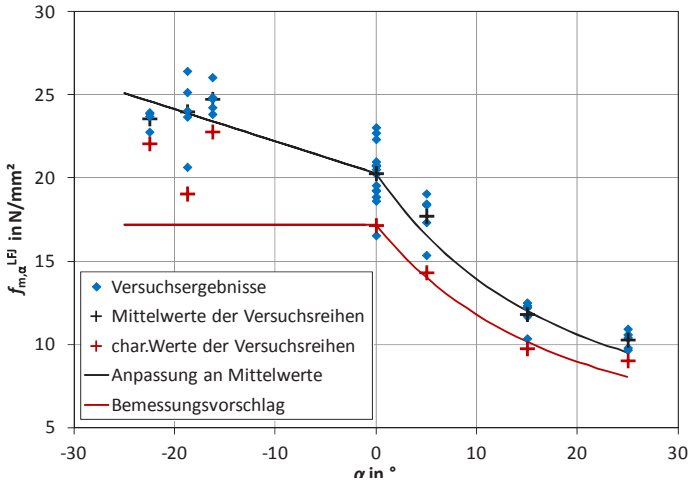


Bild 5-3: Nach Gleichung (5-15) bzw. Gleichung (5-16) berechnete Biegefestigkeiten von Universal-Keilzinkenverbindungen in Brettsperrholzträgern mit geknickter Stabachse

Zum Vergleich sind in Bild 5-3 die Ergebnisse der durchgeführten Versuchsreihen mit Brettsperrholz Satteldachträger und Rahmenecken noch einmal angegeben. Im Gegensatz zu den Diagrammen in Bild 5-1 und Bild 5-2 sind in Bild 5-3 nicht die durch den Wert  $(1 - \nu_{eff})$  dividierten Biegefestigkeiten, sondern die auf den Querschnitt der Längslagen bezogenen Rechenwerte angegeben. Die dargestellten Versuchsergebnisse enthalten daher den Einfluss der unterschiedlichen Verschwächungsgrade der Prüfkörper.

### Drehfedersteifigkeit bei Beanspruchung in Plattenebene

Zur Berechnung der Verformungen von Brettsperrholzträgern mit Universal-Keilzinkenverbindungen kann die Drehfedersteifigkeit der Keilzinkenstöße nach Gleichung (5-17) abgeschätzt werden.

$$K_{\varphi} = k \cdot I_{y,net,Fuge} = k \cdot \frac{b_{net,long} \cdot h^3}{12 \cdot \cos^3 \alpha} \quad (5-17)$$

mit

$$k = 133 - 3 \cdot |\alpha| \quad \text{mit } k \text{ in } N/mm^3 \text{ und } \alpha \text{ in } ^\circ \quad (5-18)$$

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden Universal-Keilzinkenverbindungen zur Herstellung von Satteldachträgern und Rahmenecken aus Brettsperrholz entwickelt. Die Tragfähigkeit der neu entwickelten Verbindung wurde in verschiedenen anwendungsbezogenen Konfigurationen geprüft und es wurden die für die Bemessung von Universal-Keilzinkenverbindungen in Brettsperrholz erforderlichen Ansätze für einen spannungsbasierten Tragfähigkeitsnachweis entwickelt.

Durch Versuche mit geraden Brettsperrholzträgern mit und ohne Keilzinkenverbindung wurde die Tragfähigkeitsreduzierung infolge der Universal-Keilzinkenverbindungen bestimmt. Der Einfluss des Schnittwinkels auf die Tragfähigkeit der Universal-Keilzinkenverbindungen wurde durch Versuche mit Brettsperrholz-Satteldachträgern und Brettsperrholz-Rahmenecken untersucht. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass die Biegefestigkeit von Universal-Keilzinkenverbindungen in Brettsperrholz weit weniger vom Schnittwinkel abhängig ist als dies bei Brettschichtholz der Fall ist. Bei Beanspruchung durch schließende Momente steigt die Biegefestigkeit mit zunehmendem Schnittwinkel sogar an. Bei Beanspruchung durch öffnende Momente ist die vom Schnittwinkel abhängige Reduzierung der Biegefestigkeit ebenfalls deutlich geringer als bei Brettschichtholz. Für praxisrelevante Fälle, mit Schnittwinkeln bis  $25^\circ$  liegt die Festigkeitsreduzierung unter 50%.

Neben dem Einfluss des Schnittwinkels wurden auch die Auswirkungen von Herstellungstoleranzen auf die Tragfähigkeit der Universal-Keilzinkenverbindungen untersucht. Wegen der wechselweisen Anordnung von Längs- und Querlagen wirken sich bei Universal-Keilzinkenverbindungen in Brettsperrholz Produktionstoleranzen in Dickenrichtung stärker aus als in Brettschichtholz. Eine weitere durch den Herstellungsprozess beeinflussbare Größe, die sich stark auf die Tragfähigkeit der Universal-Keilzinkenverbindungen auswirkt ist das Zinkenspiel. Bei der Ausführung von Brettsperrholzträgern mit Universal-Keilzinkenverbindungen sollten beide Größen im Rahmen der Qualitätssicherung überwacht werden.

Insgesamt ermöglichen die im Rahmen des Forschungsvorhabens erworbenen Kenntnisse die Herstellung und Bemessung tragfähiger Universal-Keilzinkenverbindungen in Brettsperrholzträgern. Mit den entwickelten Bemessungsansätzen wurden wesentliche Grundlagen für eine baurechtliche Regelung von Satteldachträgern und Rahmenecken aus Brettsperrholz geschaffen. Die Beschreibung der Festigkeitseigenschaften der Universal-Keilzinkenverbindungen in Abhängigkeit herstellungsbedingter Toleranzen ermöglicht die Festlegung von Kriterien zur Qualitätssicherung.

# Literatur

- Aicher S, Radovic B (1999) Untersuchungen zum Einfluß der Keilzinkengeometrie auf die Zugfestigkeit keilgezinkter Brettschichtholz-Lamellen, Holz als Roh- und Werkstoff, Heft 57, Springer-Verlag, Heidelberg
- Aicher S, Klöck W (1990) Spannungsberechnung zur Optimierung von Keilzinkenprofilen für Brettschichtholz-Lamellen. In: Bauen mit Holz, Heft 5, S. 356-362, Bruderverlag, Karlsruhe
- Aicher S (2003) Structural Adhesive Joints Including Glued-In Bolts. In: Timber Engineering, Chapter 18, pp333 – 363, Jon Wiley and Son LTD, Chichester
- Blaß HJ, Frese M, Glos P, Denzler J, Linsenmann P, Ranta-Maunus A (2008): Zuverlässigkeit von Fichten-Brettschichtholz mit modifiziertem Aufbau. Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau, Universität Karlsruhe (TH), Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen
- Frese M, Enders-Comberg M, Blaß HJ, Glos P (2012): Compressive strength of spruce glulam. In: European Journal of Wood and Wood Products, Band 70 Heft: 6, 2012
- Hankinson R L (1921): Investigation of crushing strength of spruce at varying angles of grain. Air service Information Circular III, No. 259, US Air Service
- Heimeshoff B (1976): Berechnung von Rahmenecken mit Keilzinkenverbindungen. In: Holzbau Statik Aktuell, Folge 1, S. 7-8
- Heimeshoff B, Seuß R (1982) Berechnung von Rahmenecken mit Keilzinkenverbindungen. Forschungsbericht, Universität München
- Kolb H (1966) Versuche zur Ermittlung der Tragfähigkeit geleimter Rahmenecken. In: Bauen mit Holz, Heft 8, S. 363-369, Bruderverlag, Karlsruhe
- Kolb H (1968) Festigkeitsuntersuchungen an gestoßenen und gekrümmten Bauteilen aus Brettschichtholz. In: Holz als Roh- und Werkstoff, Heft 7, S. 244-253, Springer-Verlag, Heidelberg
- Kolb H (1968) Versuche an geleimten Rahmenecken und Montagestößen (1. Teil). In: Bauen mit Holz, Heft 6, S. 266-271
- Kolb H (1968) Versuche an geleimten Rahmenecken und Montagestößen (2. Teil). In: Bauen mit Holz, Heft 10, S. 462-470, Bruderverlag, Karlsruhe

- Kolb H (1970) Festigkeitsverhalten von Rahmenecken. In: Bauen mit Holz, Heft 8, S. 387-392, Springer-Verlag, Heidelberg
- Kolb H (1974): Versuche mit verleimten Holzbauteilen. In: Holz als Roh- und Werkstoff, Heft 32, S. 257-262, Springer-Verlag, Heidelberg
- Kolb H Gruber R (1978): Prüfung von keilgezinkten Bauteilen aus Brettschichtholz mit Zwischenstücken aus Furnierplatten, Forschungsbericht der Fraunhofer-Gesellschaft/IRB, Nr. T 360
- Kolb H Radovic B (1980): Baustellenstöße bei großen Bauteilen aus Brettschichtholz. Forschungsbericht Nr. I.4-33251, FMPA Baden Württemberg, Otto-Graf-Institut, Stuttgart
- Kolb H Radovic B (1984): Untersuchungen zur Herstellung von Baustellenstößen bei großen Bauteilen aus Brettschichtholz, 2. Teil. Forschungsbericht Nr. I.4-33251/1, FMPA Baden Württemberg, Otto-Graf-Institut Stuttgart
- Kollmann F (1982) Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. 2. Aufl., Springer-Verlag, Heidelberg
- Komatsu K et. al (2001) Moment-resisting performance of glulam beam to column joints composed of various types of large finger joints. In: Proceedings of the International RILEM Symposium, Stuttgart, Germany, pp. 520-530
- Norris C B (1962) Strength of orthotropic materials subjected to combined stresses. Veröffentlichung des Forest Products Laboratory, United States Department of Agriculture, Forest Service, Madison 5, Wisconsin
- Scapozza C (1998) Application of Plywood in glued-laminated Portal Frames. In: Proceedings of the 5<sup>th</sup> World Conference on Timber Engineering, Montreux, Switzerland, Volume 1, pp. 153-160
- Schickhofer G (1995) Entwicklung leistungsfähiger Holzleimbauteile – Ergebnisse & Auswertung – Träger Betrieb B. In: Tagungsband zur Grazer Holzbau-Fachtagung 1995, Seiten E4/1 bis E4/34, Graz, Österreich
- Schickhofer G (1996) Development of efficient Glued Laminated Timber. In: Proceedings CIB-W18, Meeting 29, Paper 29-12-1, Bordeaux, France



---

**Normen**

- DIN EN 387. Brettschichtholz - Universal-Keilzinkenverbindungen - Leistungsanforderungen und Mindestanforderungen an die Herstellung; Deutsche Fassung EN 387:1999, DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin.
- DIN EN 408. Holzbauwerke – Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz – Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften; Deutsche Fassung EN 408:2010+A1:2012, DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin.
- DIN EN 1995-1-1. Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1995-1-1:2004 + AC:2006 + A1:2008, DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin.
- DIN EN 14358. Holzbauwerke – Berechnung der 5%-Quantile für charakteristische Werte und Annahmekriterien für Proben; Deutsche Fassung EN 14358:2006, DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin.
- prEN 16351. Holzbauwerke - Brettspertholz - Anforderungen; Deutsche Fassung 2011, DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin.



# Anlagen



# Anlage 1

## Versuchsergebnisse gerade Brettsperrholzträger (Druckversuche)

Reihe D600LFJ	gerade Brettsperrholzträgern mit Universal-Keilzinkenverbindung ( $h = 600$ mm)
Reihe D600REF	gerade Brettsperrholzträgern ohne Universal-Keilzinkenverbindung ( $h = 600$ mm)
Reihe D600KF	gerade Brettsperrholzträgern mit Kontaktfuge ( $h = 600$ mm)

Tabelle A-1: Ergebnisse Reihe D600 LFJ

Prüfkörper	$h$	$t_{\text{gross}}$	$t_{\text{net}}$	$\rho_1$	$\rho_2$	$HF_1$	$HF_2$	$F_{\text{max}}$	$f_{c,\text{net}}$	$E_{c,\text{net}}$	$\Delta t$	$v_{\text{eff}}$
Nr.	in mm	in mm	in mm	in kg/m <sup>3</sup>	in kg/m <sup>3</sup>	in %	in %	in kN	in N/mm <sup>2</sup>	in N/mm <sup>2</sup>	in mm	-
D600LFJ-01	593	201	160	434	455	10,0	10,0	3000	31,6		1,8	0,224
D600LFJ-02	593	201	160	467	469	10,4	10,2	2936	30,9	12320	1,6	0,221
D600LFJ-03	593	201	160	445	445	10,1	10,4	2648	27,9	10820	1,2	0,216
D600LFJ-04	593	201	160	446	467	10,2	10,2	2908	30,6	11837	1,2	0,216
D600LFJ-05	593	201	160	452	464	10,3	10,2	2808	29,6	11098	0,6	0,207
D600LFJ-06	593	201	160	467	451	11,0	11,0	2840	29,9	11325	1,6	0,221
D600LFJ-07	593	201	160	449	461	11,4	11,1	2919	30,8	11468	1,4	0,218
D600LFJ-08	593	201	160	464	464	11,1	11,0	3026	31,9	12663	0,8	0,210
D600LFJ-09	593	201	160	455	455	10,9	10,7	3020	31,8	12676	0,8	0,210
D600LFJ-10	593	201	160	452	457	10,9	10,2	3052	32,2	11541	0,9	0,211
D600LFJ-11	593	201	160	452	455	10,8	10,6	2866	30,2	12029	1,3	0,218
D600LFJ-12	593	201	160	443	449	10,9	10,7	2909	30,7	11924	1,4	0,218
D600LFJ-13	593	201	160	446	443	10,6	10,7	2852	30,1	12077	1,3	0,217
D600LFJ-14	593	201	160	451	444	10,6	11,1	2961	31,2	11827	1,1	0,215
D600LFJ-15	593	201	160	476	454	10,3	10,1	2903	30,6	12652	0,7	0,208
MIN				434		10,0		2648	27,9	10820	0,6	0,207
MEAN				454		10,6		2910	30,7	11875	1,2	0,215
MAX				476		11,4		3052	32,2	12676	1,8	0,224

Tabelle A-2: Ergebnisse Reihe D600 REF

Prüfkörper	$h$	$t_{\text{gross}}$	$t_{\text{net}}$	$\rho$	$HF$	$F_{\text{max}}$	$f_{c,\text{net}}$	$E_{c,\text{net}}$
Nr.	in mm	in mm	in mm	in kg/m <sup>3</sup>	in %	in kN	in N/mm <sup>2</sup>	in N/mm <sup>2</sup>
D600REF-01	593	201	160	454	10,9	3623	38,2	12387
D600REF-02	593	201	160	467	10,7	3459	36,5	12328
D600REF-03	593	201	160	438	11,0	3638	38,3	12377
D600REF-04	593	201	160	451	10,9	3487	36,8	11519
D600REF-05	593	201	160	446	10,9	3455	36,4	11713
D600REF-06	593	201	160	442	10,0	3890	41,0	13064
D600REF-07	593	201	160	429	10,0	3609	38,0	11371
D600REF-08	593	201	160	427	10,0	3567	37,6	12116
D600REF-09	593	201	160	465	10,5	3602	38,0	11917
D600REF-10	593	201	160	442	10,7	3593	37,9	11566
D600REF-11	593	201	160	432	10,4	3442	36,3	11403
D600REF-12	593	201	160	449	10,7	3652	38,5	11820
D600REF-13	593	201	160	444	10,2	3605	38,0	11530
D600REF-14	593	201	160	480	10,1	3756	39,6	12561
D600REF-15	593	201	160	436	10,3	3415	36,0	12564
				427	10,0	3415	36,0	11371
				447	10,5	3586	37,8	12016
				480	11,0	3890	41,0	13064

Tabelle A-3: Ergebnisse Reihe D600KF

Prüfkörper	$h$	$t_{\text{gross}}$	$t_{\text{net}}$	$\rho_1$	$\rho_2$	$HF_1$	$HF_2$	$F_{\text{max}}$	$f_{c,\text{net}}$	$E_{c,\text{net}}$	$E_{c,\text{net,eff}}$	$k_{\text{fuge}}$
Nr.	in mm	in mm	in mm	in kg/m <sup>3</sup>	in kg/m <sup>3</sup>	in %	in %	in kN	in N/mm <sup>2</sup>	in N/mm <sup>2</sup>	in N/mm <sup>2</sup>	in N/mm <sup>3</sup>
D600KF-01	592	201	160	430	447	10,1	10,7	3364	35,5	11262	8126	139
D600KF-02	593	201	160	443	442	10,8	10,4	3289	34,7	10135	7583	198
D600KF-03	592	201	160	418	444	10,9	10,7	3228	34,1	11193	8003	123
D600KF-04	592	201	160	432	428	10,9	10,2	3109	32,8	11273	7923	106
D600KF-05	593	201	160	419	438	10,9	10,8	3217	33,9	10644	7636	121
D600KF-06	592	201	160	436	455	10,8	10,4	3184	33,6	11035	8257	216
D600KF-07	593	201	160	434	444	10,9	11,1	3186	33,6	10816	8017	183
D600KF-08	593	201	160	456	458	11,2	10,7	3447	36,3	12234	8671	126
D600KF-09	593	201	160	448	462	11,2	10,9	3508	37,0	12014	8911	205
D600KF-10	593	201	160	457	462	11,2	11,0	3365	35,5	11604	8374	141
D600KF-11	592	201	160	458	457	11,2	10,8	3429	36,2	12424	8968	151
D600KF-12	592	201	160	459	447	11,2	11,0	3444	36,4	11260	8268	167
D600KF-13	592	201	160	435	464	10,2	11,0	3197	33,8	11185	7978	120
D600KF-14	593	201	160	439	461	10,5	11,0	3279	34,6	11222	8256	171
D600KF-15	593	201	160	420	454	10,5	11,1	3097	32,6	10027	7292	133
MIN				418	428	10,1	10,2	3097	32,6	10027	7292	106
MEAN				439	451	10,8	10,8	3289	34,7	11222	8151	153
MAX				459	464	11,2	11,1	3508	37,0	12424	8968	216



# Anlage 2

## Versuchsergebnisse gerade Brettsperrholzträger (Biegeversuche)

### Beanspruchung in Plattenebene

Reihe S600LFJ	Gerade Brettsperrholzträger mit Universal-Keilzinkenverbindung (h = 600 mm)
Reihe S600REF	Gerade Brettsperrholzträger ohne Universal-Keilzinkenverbindung (h = 600 mm)

### Beanspruchung rechtwinklig zur Plattenebene

Reihe P200LFJ	Gerade Brettsperrholzträger mit Universal-Keilzinkenverbindung (t = 200 mm)
Reihe P200REF	Gerade Brettsperrholzträger ohne Universal-Keilzinkenverbindung (t = 200 mm)
Reihe P100LFJ	Gerade Brettsperrholzträger mit Universal-Keilzinkenverbindung (t = 100 mm)
Reihe P100REF	Gerade Brettsperrholzträger ohne Universal-Keilzinkenverbindung (t = 100 mm)

Tabelle A-4: Ergebnisse Reihe S600LFJ

Prüfkörper	$h$	$t_{\text{gross}}$	$t_{\text{net}}$	$\rho_1$	$\rho_2$	$HF_1$	$HF_2$	$f_{m,\text{net}}$	$E_{\text{dyn}}$	$E_{\text{lok}}$	$\Delta t$	$v_{\text{eff}}$
Nr.	in mm	in mm	in mm	in kg/m <sup>3</sup>		in %		in N/mm <sup>2</sup>	in N/mm <sup>2</sup>	in N/mm <sup>2</sup>	in mm	-
S600LFJ-01	592	200	160	429	451	10,4	10,7	22,7	12033	11504	2,9	0,283
S600LFJ-02	593	200	160	440	443	10,8	11,1	18,6	11479	11574	1,6	0,265
S600LFJ-03	593	200	160	421	425	10,7	10,9	20,5	12090	11690	2,3	0,275
S600LFJ-04	593	200	160	423	421	10,7	10,9	20,3	11642	10820	2,5	0,278
S600LFJ-05	593	200	160	439	454	10,8	10,8	20,7	11733	10904	1,9	0,269
S600LFJ-06	593	200	160	442	432	10,9	10,8	20,8	11770	10854	1,3	0,261
S600LFJ-07	593	200	160	459	456	10,9	10,7	20,8	12533	11465	2,7	0,280
S600LFJ-08	593	200	160	450	443	10,8	10,5	16,6	12366	12038	3,9	0,298
S600LFJ-09	593	200	160	454	429	10,4	10,9	19,3	12228	11156	1,4	0,262
S600LFJ-10	593	200	160	445	439	11	10,9	18,9	12265	12038	2,0	0,271
S600LFJ-11	593	200	160	432	427	10,5	10,6	19,3	11614	10828	1,7	0,267
S600LFJ-12	593	200	160	426	407	10,4	10,4	23,0	10898	10258	3,4	0,291
S600LFJ-13	593	200	160	456	434	10,5	10,6	21,0	12059	11398	2,3	0,275
S600LFJ-14	593	200	160	417	433	10,7	10,6	19,6	11578	10936	2,3	0,275
S600LFJ-15	593	200	160	423	432	10,7	10,8	22,3	11971	11789	1,6	0,265
MIN				407		10,4		16,6	10898	10258	1,3	0,261
MEAN				436		10,7		20,3	11884	11283	2,2	0,274
MAX				459		11,1		23,0	12533	12038	3,9	0,298

Tabelle A-5: Ergebnisse Reihe S600REF

Prüfkörper	$h$	$t_{\text{gross}}$	$t_{\text{net}}$	$\rho$	$HF$	$f_{\text{m,net}}$	$E_{\text{dyn}}$	$E_{\text{lok}}$
Nr.	in mm	in mm	in mm	in kg/m <sup>3</sup>	in %	in N/mm <sup>2</sup>	in N/mm <sup>2</sup>	in N/mm <sup>2</sup>
S600REF-01	593	200	160	451	10,4	36,8	12588	13248
S600REF-02	594	200	160	442	11,1	32,3	13618	13779
S600REF-03	592	200	160	434	10,9	27,2	12507	11550
S600REF-04	593	200	160	444	11,0	26,5	12216	11404
S600REF-05	593	200	160	437	11,2	26,8		12183
S600REF-06	594	200	160	468	9,8	32,0	12176	11585
S600REF-07	593	200	160	439	10,5	29,1	12315	11580
S600REF-08	593	200	160	463	10,3	27,1	12522	12652
S600REF-09	593	200	160	454	10,4	25,7	12239	12877
S600REF-10	593	201	160	455	10,5	26,5	11004	10781
S600REF-11	593	201	160	436	10,0	25,0	12174	12372
S600REF-12	593	201	160	430	10,5	31,6		12870
S600REF-13	593	201	160	426	9,8	26,1	11130	14878
S600REF-14	593	201	160	423	10,7	33,0	11734	12447
S600REF-15	593	201	160	434	10,4	31,3	12409	11567
MIN				423	9,8	25,0	11004	10781
MEAN				442	10,5	29,1	12203	12385
MAX				468	11,2	36,8	13618	14878

Tabelle A-6: Ergebnisse Reihe P200LFJ

Prüfkörper	$b$	$t_{\text{gross}}$	$t_{\text{net}}$	$\rho_1$	$\rho_2$	$HF_1$	$HF_2$	$f_m$	$E_{\text{dyn}}$	$E_{\text{lok}}$	$\Delta t$	$v_{\text{eff}}$
Nr.	in mm	in mm	in mm	in kg/m <sup>3</sup>		in %		in N/mm <sup>2</sup>	in N/mm <sup>2</sup>	in N/mm <sup>2</sup>	in mm	-
P200LFJ-01	593	200	160	484	458	10,8	10,7	21,6	12659	13182	2,1	0,272
P200LFJ-02	593	200	160	440	444	10,9	10,7	20,5	12144	11349	1,5	0,264
P200LFJ-03	593	200	160	454	458	10,6	10,4	20,6	12409	12494	1,2	0,259
P200LFJ-04	593	200	160	458	445	10,8	10,5	19,5	12455	12552	1,0	0,256
P200LFJ-05	593	200	160	517	439	10,8	10,5	20,9	12829	13359	1,8	0,268
P200LFJ-06	593	200	160	421	423	10,2	10,0	21,2	11825	11900	5,5	0,321
P200LFJ-07	593	200	160	440	444	10,2	10,2	17,3	12011	13214	4,0	0,300
P200LFJ-08	593	200	160	451	449	10,1	10,3	24,1	11495	11876	3,3	0,290
P200LFJ-09	593	200	160	443	432	10,3	10,3	18,9	12548	11690	3,2	0,288
P200LFJ-10	593	200	160	430	451	10,3	10,5	20,3	11816	11618	4,1	0,301
MIN				421		10,0		17,3	11495	11349	1,0	0,256
MEAN				449		10,5		20,5	12219	12323	2,8	0,282
MAX				517		10,9		24,1	12829	13359	5,5	0,321

Tabelle A-7: Ergebnisse Reihe P200REF

Prüfkörper	$b$	$t_{\text{gross}}$	$t_{\text{net}}$	$\rho$	$HF$	$f_m$	$E_{\text{dyn}}$	$E_{\text{lok}}$
Nr.	in mm	in mm	in mm	in kg/m <sup>3</sup>	in %	in N/mm <sup>2</sup>	in N/mm <sup>2</sup>	in N/mm <sup>2</sup>
P200REF-01	593	200	160	460	10,6	25,6	12101	11729
P200REF-02	593	200	160	445	10,6	33,4	13058	13018
P200REF-03	593	200	160	467	10,7	27,6	12421	12061
P200REF-04	593	200	160	461	10,7	35,7	12936	14253
P200REF-05	593	200	160	445	10,8	34,2	12539	12548
P200REF-06	593	200	160	437	10,2	26,8	11268	12605
P200REF-07	593	200	160	416	9,9	32,2	11641	12891
P200REF-08	593	200	160	444	10,0	27,9	12512	13918
P200REF-09	593	200	160	428	9,8	28,3	11607	12309
P200REF-10	593	200	160	419	10,0	28,0	11190	11533
MIN				416	9,8	25,6	11190	11533
MEAN				442	10,3	30,0	12127	12686
MAX				467	10,8	35,7	13058	14253

Tabelle A-8: Ergebnisse Reihe P100LFJ

Prüfkörper	$b$	$t_{\text{gross}}$	$t_{\text{net}}$	$\rho_1$	$\rho_2$	$HF_1$	$HF_2$	$f_m$	$E_{\text{dyn}}$	$E_{\text{lok}}$	$\Delta t$	$v_{\text{eff}}$
Nr.	in mm	in mm	in mm	in kg/m <sup>3</sup>		in %		in N/mm <sup>2</sup>	in N/mm <sup>2</sup>	in N/mm <sup>2</sup>	in mm	-
P100LFJ-01	593	100	160	457	471	10,7	10,6	28,0	12595	11165	3,2	0,329
P100LFJ-02	593	100	160	420	444	10,4	10,4	24,9	11519	11971	3,5	0,338
P100LFJ-03	593	100	160	442	435	10,2	10,5	28,4	11833	12401	3,0	0,324
P100LFJ-04	593	100	160	449	424	10,2	10,3	22,2	11396	12910	2,6	0,310
P100LFJ-05	593	100	160	462	448	10,3	10,7	23,5	12425	14133	3,2	0,329
P100LFJ-06	593	100	160	439	437	10,2	10,1	28,8	11537	11213	2,5	0,309
P100LFJ-07	593	100	160	445	433	10,2	10,3	21,7	11896	14193	2,1	0,297
P100LFJ-08	593	100	160	467	440	10,4	10,4	26,4	12097	14029	2,0	0,294
P100LFJ-09	593	100	160	442	462	10,4	10,1	25,6	12560	13307	4,5	0,368
P100LFJ-10	593	100	160	471	429	10,6	10,2	20,9		12978	3,2	0,329
MIN				420		10,1		20,9	11396	11165	2,0	0,294
MEAN				446		10,4		25,0	11984	12830	3,0	0,323
MAX				471		10,7		28,8	12595	14193	4,5	0,368

Tabelle A-9: Ergebnisse Reihe P100REF

Prüfkörper	$b$	$t_{\text{gross}}$	$t_{\text{net}}$	$\rho$	$HF$	$f_m$	$E_{\text{dyn}}$	$E_{\text{lok}}$
Nr.	in mm	in mm	in mm	in kg/m <sup>3</sup>	in %	in N/mm <sup>2</sup>	in N/mm <sup>2</sup>	in N/mm <sup>2</sup>
P100REF-01	593	100	160	472	10,5	37,1	12361	13113
P100REF-02	593	100	160	448	10,3	42,1	14314	15843
P100REF-03	593	100	160	452	10,5	38,0	13886	15099
P100REF-04	593	100	160	478	10,8	39,2	12060	13322
P100REF-05	593	100	160	468	11,0	38,8	13028	13613
P100REF-06	593	100	160	446	10,8	36,8		13597
P100REF-07	593	100	160	425	10,3	31,9	11500	11314
P100REF-08	593	100	160	470	10,5	43,4	12457	13818
P100REF-09	593	100	160	438	10,3	34,2	11852	12421
P100REF-10	593	100	160	441	10,5	39,0	11908	11882
MIN				425	10,3	31,9	11500	11314
MEAN				454	10,6	38,1	12596	13402
MAX				478	11,0	43,4	14314	15843





# Anlage 3

## Versuchsergebnisse gerade Brettschichtholzträger

Reihe BSH600

Gerade Brettsperrholzträger mit Universal-  
Keilzinkenverbindung ( $h = 600 \text{ mm}$ )

Tabelle A-10: Ergebnisse Reihe BSH600

Prüfkörper	$h$	$b$	$\rho_1$	$\rho_2$	$HF_1$	$HF_2$	$f_m$	$E_{dyn}$	$E_{lok}$	$\Delta t$	$v_{eff}$
Nr.	in mm	in mm	in kg/m <sup>3</sup>		in %		in N/mm <sup>2</sup>	in N/mm <sup>2</sup>	in N/mm <sup>2</sup>	in mm	-
BSH600-01	600	120	485	480	11,6	11,5	25,3	13735	12940	0,5	0,249
BSH600-02	599	120	482	485	11,5	11,5	25,7	13611	13419	1,2	0,254
BSH600-03	599	120	502	475	11,6	11,5	25,0	12878	12353	2,4	0,261
BSH600-04	595	120	479	471	11,1	11,0	21,2	12362	11660	1,5	0,256
BSH600-05	596	120	499	491	11,5	11,4	26,2	12637	12012	1,2	0,254
BSH600-06	596	120	491	500	10,9	11,0	22,9	14831	14062	1,8	0,258
BSH600-07	595	120	453	448	10,8	10,7	16,0	13117	12305	0,8	0,251
BSH600-08	595	120	435	418	10,4	10,5	20,7	12129	10963	1,4	0,255
BSH600-09	599	120	434	433	10,5	10,6	16,9	11242	10583	1,6	0,256
BSH600-10	596	120	427	406	10,7	10,8	16,7	11402	10296	2,1	0,259
MIN			406		10,4		16,0	11242	10296	0,5	0,249
MEAN			465		11,1		21,7	12795	12059	1,5	0,255
MAX			502		11,6		26,2	14831	14062	2,4	0,261
ohne BSH600-7, -9, -10											
MIN			418		10,4		20,7	12129	10963	0,5	0,249
MEAN			478		11,2		23,9	13169	12487	1,4	0,255
MAX			502		11,6		26,2	14831	14062	2,4	0,261

# Anlage 4

## Versuchsergebnisse keilgezinkte Brettsperrholz-Satteldachträger

Reihe SD600-05	Brettsperrholz-Satteldachträger mit Universal-Keilzinkenverbindung im First ( $\alpha = 5$ )
Reihe SD600-15	Brettsperrholz-Satteldachträger mit Universal-Keilzinkenverbindung im First ( $\alpha = 5$ )
Reihe SD600-25	Brettsperrholz-Satteldachträger mit Universal-Keilzinkenverbindung im First ( $\alpha = 5$ )

Tabelle A-11: Ergebnisse Reihe SD600-05 ( $\alpha = 5^\circ$ )

Prüfkörper	$h$	$t_{\text{gross}}$	$t_{\text{net}}$	$\rho_1$	$\rho_2$	$HF_1$	$HF_2$	$f_{m,\text{net}}$	$E_{\text{lok}}$	$\Delta t$	$v_{\text{eff}}$
Nr.	in mm	in mm	in mm	in kg/m <sup>3</sup>		in %		in N/mm <sup>2</sup>	in N/mm <sup>2</sup>	in mm	-
SD600-05-01	595	201	160	453	444	10,9	11,2	15,4	11661	0,3	0,263
SD600-05-02	595	202	160	454	429	10,6	11,0	19,1	11169	0,1	0,262
SD600-05-03	594	202	160	433	449	10,9	11,2	17,3	10700	0,9	0,272
SD600-05-04	593	202	160	458	454	11,1	11,0	18,5	12208	1,1	0,276
SD600-05-05	594	202	160	466	466	11,1	11,2	18,4	11699	1,4	0,279
MIN					429		10,6	15,4	10700	0,1	0,262
MEAN					451		11,0	17,7	11488	0,8	0,270
MAX					466		11,2	19,1	12208	1,4	0,279

Tabelle A-12: Ergebnisse Reihe SD600-15 ( $\alpha = 15^\circ$ )

Prüfkörper	$h$	$t_{\text{gross}}$	$t_{\text{net}}$	$\rho_1$	$\rho_2$	$HF_1$	$HF_2$	$f_{m,\text{net}}$	$E_{\text{lok}}$	$\Delta t$	$v_{\text{eff}}$
Nr.	in mm	in mm	in mm	in kg/m <sup>3</sup>		in %		in N/mm <sup>2</sup>	in N/mm <sup>2</sup>	in mm	-
SD600-15-01	593	201	160	466	446	10,7	10,6	12,5	11040	2,15	0,290
SD600-15-02	593	201	160	437	461	10,6	10,8	12,2	10802	1,70	0,284
SD600-15-03	593	201	160	443	455	10,7	10,7	11,7	10156	1,28	0,278
SD600-15-04	593	201	160	461	445	10,7	10,8	12,3	10604	1,25	0,277
SD600-15-05	594	201	160	434	424	10,7	10,8	10,4	10608	1,18	0,276
MIN					424		10,6	10,4	10156	1,2	0,276
MEAN					447		10,7	11,8	10642	1,5	0,281
MAX					466		10,8	12,5	11040	2,2	0,290

Tabelle A-13: Ergebnisse Reihe SD600-25 ( $\alpha = 25^\circ$ )

Prüfkörper	$h$	$t_{\text{gross}}$	$t_{\text{net}}$	$\rho_1$	$\rho_2$	$HF_1$	$HF_2$	$f_{\text{m,net}}$	$E_{\text{lok}}$	$\Delta t$	$v_{\text{eff}}$
Nr.	in mm	in mm	in mm	in kg/m <sup>3</sup>		in %		in N/mm <sup>2</sup>	in N/mm <sup>2</sup>	in mm	-
SD600-25-01	593	201	160	421	448	10,7	11,0	9,7	9787	2,40	0,294
SD600-25-02	593	202	160	437	455	11,0	11,1	10,9	9311	0,80	0,271
SD600-25-03	593	202	160	450	451	11,2	11,3	9,8	9258	0,95	0,273
SD600-25-04	594	202	160	465	451	11,1	11,3	10,6	9124	2,05	0,289
SD600-25-05	594	202	160	442	463	11,2	11,2	10,4	9679	0,60	0,268
MIN				421		10,7		9,7	9124	0,6	0,268
MEAN				448		11,1		10,3	9432	1,4	0,279
MAX				465		11,3		10,9	9787	2,4	0,294



# Anlage 5

## Versuchsergebnisse keilgezinkte Brettsperrholz-Rahmenecken

Reihe RE600-90	Keilgezinkte Brettsperrholz-Rahmenecken mit Zwischenstück ( $\beta = 90^\circ$ )
Reihe RE600-105	Keilgezinkte Brettsperrholz-Rahmenecken mit Zwischenstück ( $\beta = 105^\circ$ )
Reihe RE600-115	Keilgezinkte Brettsperrholz-Rahmenecken mit Zwischenstück ( $\beta = 115^\circ$ )

Tabelle A-14: Ergebnisse Reihe RE600-90 ( $\alpha = 22,5^\circ$ )

Prüfkörper	$h$	$t_{\text{gross}}$	$t_{\text{net}}$	$\rho_1$	$\rho_2$	$\rho_3$	$HF_1$	$HF_2$	$HF_3$	$\sigma_{M,\text{net}}$	$\sigma_{N,\text{net}}$	$\sigma_{C,\text{net}}$	$V_{\text{eff}}$
Nr.	in mm	in mm	in mm	in kg/m <sup>3</sup>			in %			in N/mm <sup>2</sup>	in N/mm <sup>2</sup>	in N/mm <sup>2</sup>	-
90-01	594	202	160	423	472	455	11,9	11,8	11,7	22,9	1,2	24,0	0,316
90-02	594	202	160	453	470	469	11,5	12,0	11,6	22,8	1,2	24,0	0,307
90-03	594	202	160	450	469	450	11,9	11,4	11,7				0,296
90-04	594	202	160	442	475	467	12,0	12,0	11,9	21,7	1,1	22,9	0,302
90-05	594	202	160	477	482	415	11,8	11,9	11,9	22,6	1,2	23,8	0,314
MIN						415			11,4	21,7	1,1	22,9	0,296
MEAN						458			11,8	22,5	1,2	23,7	0,307
MAX						482			12,0	22,9	1,2	24,0	0,316

Tabelle A-15: Ergebnisse Reihe RE600-105 ( $\alpha = 18,75^\circ$ )

Prüfkörper	$h$	$t_{\text{gross}}$	$t_{\text{net}}$	$\rho_1$	$\rho_2$	$\rho_3$	$HF_1$	$HF_2$	$HF_3$	$\sigma_{M,\text{net}}$	$\sigma_{N,\text{net}}$	$\sigma_{C,\text{net}}$	$V_{\text{eff}}$
Nr.	in mm	in mm	in mm	in kg/m <sup>3</sup>			in %			in N/mm <sup>2</sup>	in N/mm <sup>2</sup>	in N/mm <sup>2</sup>	-
105-01	593	202	160	466	446	463	11,9	11,8	11,9	19,4	1,3	20,7	0,343
105-02	594	202	160	444	437	480	11,8	11,7	12,0	22,3	1,5	23,8	0,283
105-03	594	202	160	447	439	468	11,9	11,8	11,3	22,6	1,5	24,1	0,322
105-04	595	202	160	469	467	467	11,3	11,5	11,6	23,7	1,6	25,2	0,257
105-05	594	202	160	500	469	483	11,5	11,6	11,2	24,9	1,6	26,5	0,308
MIN						437			11,2	19,4	1,3	20,7	0,257
MEAN						463			11,6	22,6	1,5	24,1	0,303
MAX						500			12,0	24,9	1,6	26,5	0,343



Tabelle A-16: Ergebnisse Reihe RE600-115 ( $\alpha = 16,25^\circ$ )

Prüfkörper	$h$	$t_{\text{gross}}$	$t_{\text{net}}$	$\rho_1$	$\rho_2$	$\rho_3$	$HF_1$	$HF_2$	$HF_3$	$\sigma_{M,\text{net}}$	$\sigma_{N,\text{net}}$	$\sigma_{c,\text{net}}$	$v_{\text{eff}}$	
Nr.	in mm	in mm	in mm	in kg/m <sup>3</sup>						in %	in N/mm <sup>2</sup>	in N/mm <sup>2</sup>	in N/mm <sup>2</sup>	-
115-01	594	202	160	473	457	471	11,3			23,0	1,8	24,8	0,299	
115-02	593	202	160	473	474	459	10,9	10,9	11,3	22,2	1,8	23,9	0,311	
115-03	594	202	160	473	482	460	11,4	11,3	11,4	23,1	1,8	24,9	0,308	
115-04	594	202	160	473	442	450		11,4	11,3	22,5	1,8	24,3	0,313	
115-05	594	202	160	489	483	480	11,0	11,2	11,4	24,2	1,9	26,1	0,298	
MIN					442			10,9		22,2	1,8	23,9	0,298	
MEAN					469			11,2		23,0	1,8	24,8	0,306	
MAX					489			11,4		24,2	1,9	26,1	0,313	

Tabelle A-17: Aus den lokalen Verformungen in den Rahmenecken ermittelte Verschiebungsmoduln  $k$  der Universal-Keilzinkenstöße in N/mm<sup>3</sup>

Versuch Nr.	RE600-90	RE600-105	RE600-115
	$\alpha = 22,5^\circ$	$\alpha = 18,75^\circ$	$\alpha = 16,25^\circ$
1	62,9	64,6	75,5
2	54,4	74,7	75,1
3	68,4	78,6	77,8
4	68,8	88,1	85,2
5	71,5	75,5	108
MIN	54,4	64,6	75,1
MEAN	65,2	76,3	84,2
MAX	71,5	88,1	108



# Anlage 6

## Versuchsergebnisse Einzellamellen

Reihen EL-Z	Zugversuche an keilgezinkten Einzellamellen mit Stoßwinkel zwischen $0^\circ$ und $25^\circ$
Reihen EL-D	Druckversuche an keilgezinkten Einzellamellen mit Stoßwinkel zwischen $0^\circ$ und $25^\circ$
Reihen EL-B	Biegeversuche an keilgezinkten Einzellamellen mit Stoßwinkel zwischen $-25^\circ$ und $25^\circ$

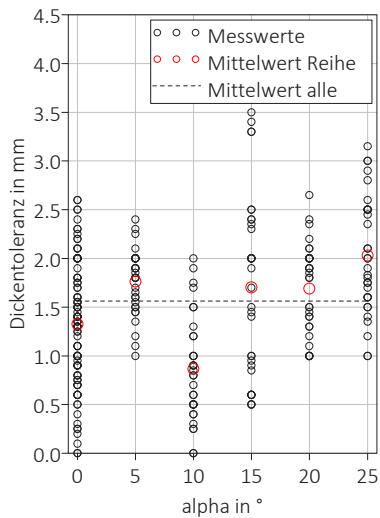


Bild A-1: Dicktolaranz in den Universalkeilzinkenverbindungen der Zugprüfkörper nach Versuchsreihen getrennt

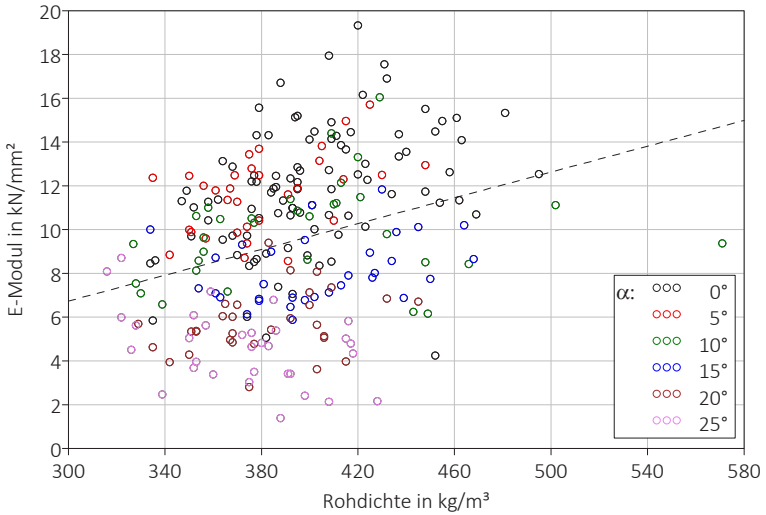


Bild A-2: Zug-Elastizitätsmodul von Brettabschnitten mit Universal-Keilzinkenverbindung über der kleineren Rohdichte

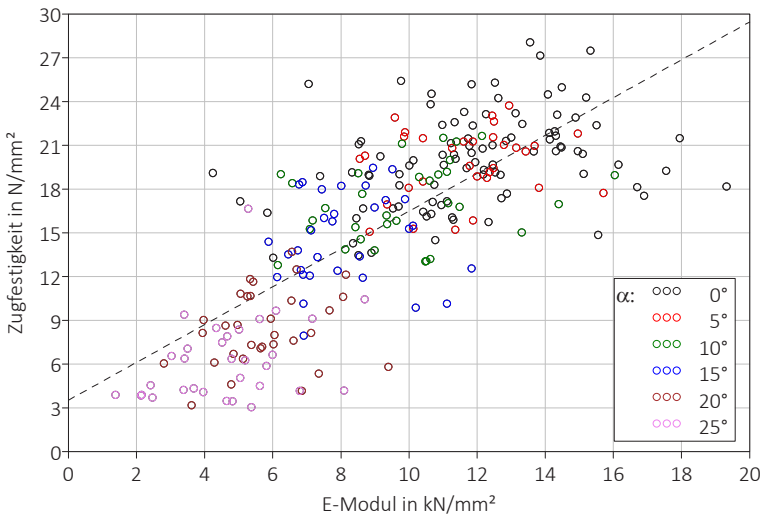


Bild A-3: Zugfestigkeit von Brettabschnitten mit Universal-Keilzinkenverbindung über dem Zug-Elastizitätsmodul

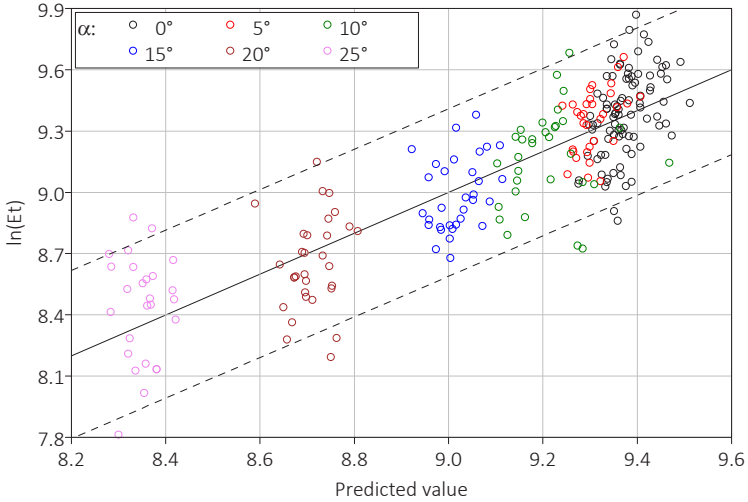


Bild A-4: Logarithmus des Zug-Elastizitätsmoduls von Brettabschnitten mit Universal-Keilzinkenverbindung über dem Vorhersagewert nach Gleichung (4-9)

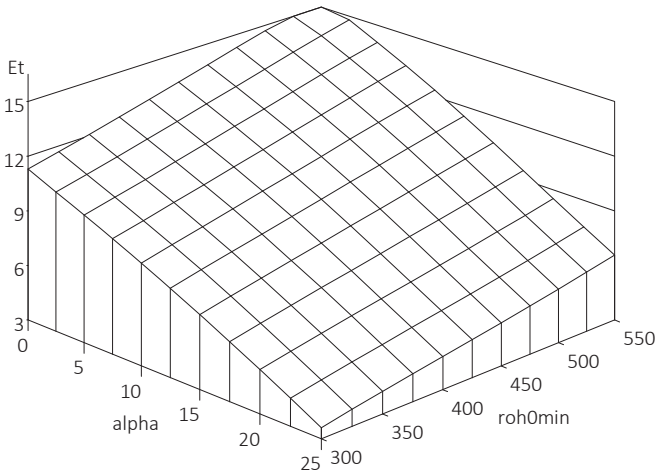


Bild A-5: Zug-Elastizitätsmodul von Brettabschnitten mit Universal-Keilzinkenverbindung nach Gleichung (4-9) mit  $E_t$  in kN/mm<sup>2</sup>,  $\rho_{0,min}$  in kg/m<sup>3</sup> und  $\alpha = 10^\circ$

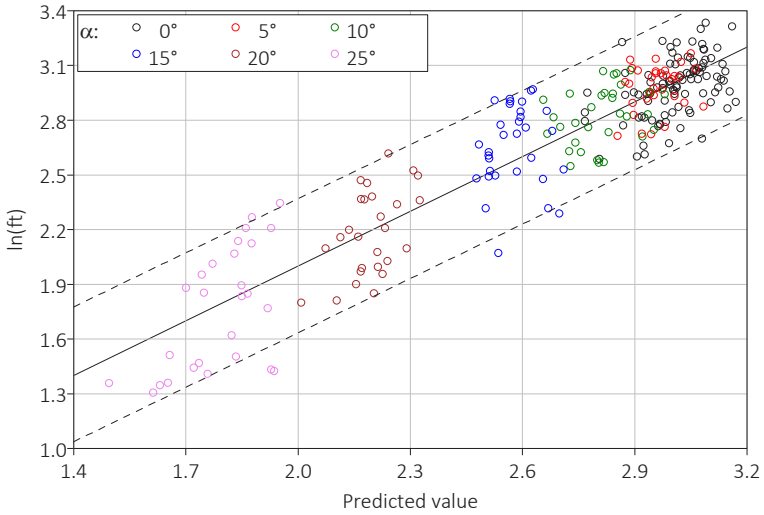


Bild A-6: Logarithmus der Zugfestigkeit von Brettabschnitten mit Universal-Keilzinkenverbindung über dem Vorhersagewert nach Gleichung (4-13)

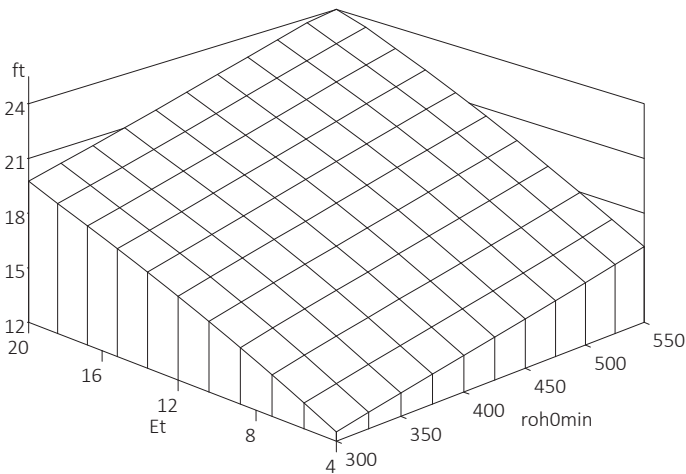


Bild A-7: Zugfestigkeit von Brettabschnitten mit Universal-Keilzinkenverbindung nach Gleichung (4-13) mit  $f_t$  in  $\text{kN/mm}^2$  und  $\rho_{0,\text{min}}$  in  $\text{kg/m}$  und  $\alpha = 10^\circ$

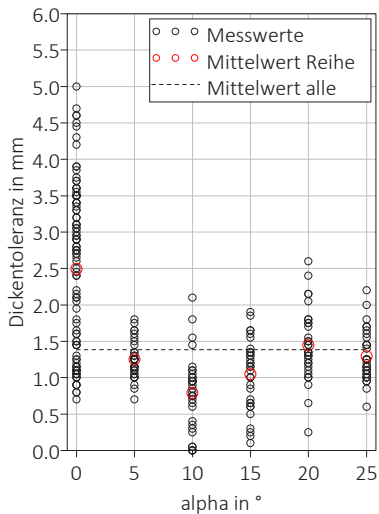


Bild A-8: Dicktolleranz in den Universalkeilzinkenverbindungen der Druckprüfkörper nach Versuchsreihen getrennt



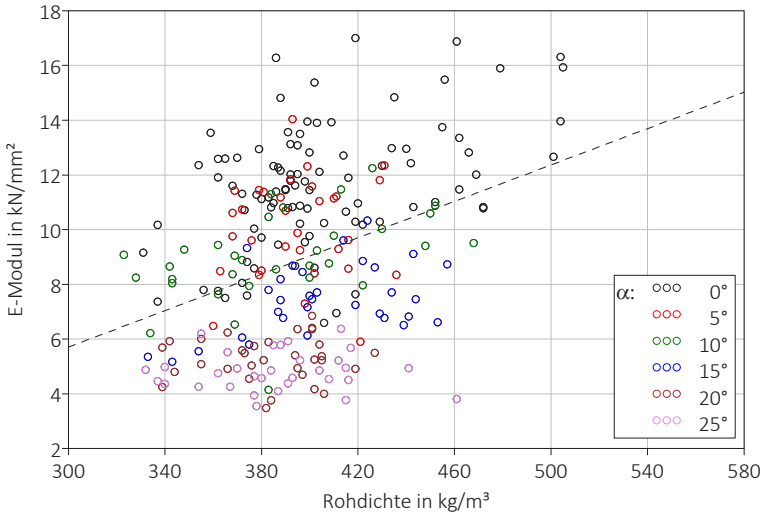


Bild A-9: Druck-Elastizitätsmodul von Brettabschnitten mit Universal-Keilzinkenverbindung über der kleineren Rohdichte

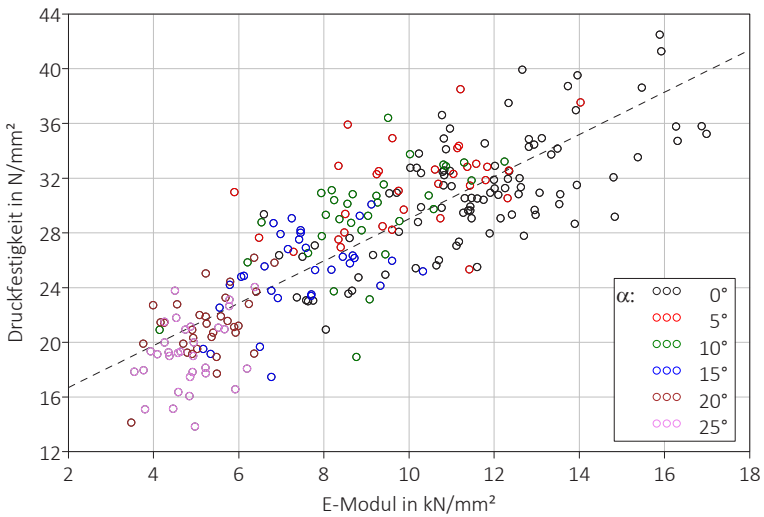


Bild A-10: Druckfestigkeit von Brettabschnitten mit Universal-Keilzinkenverbindung über dem Druck-Elastizitätsmodul

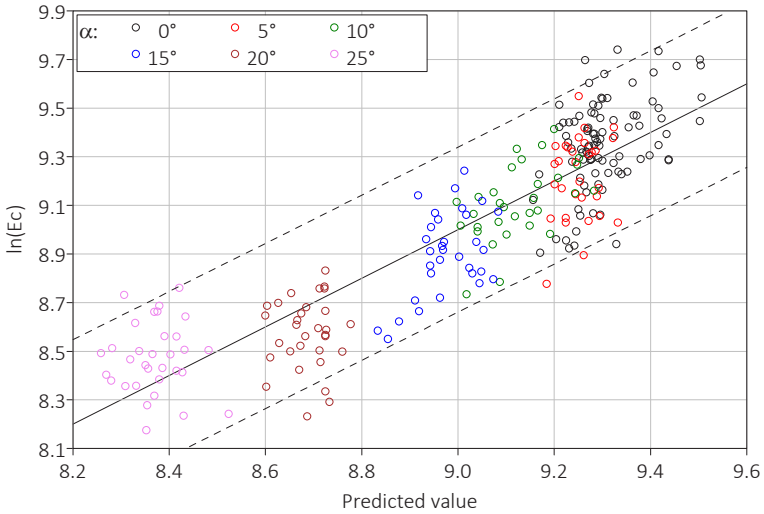


Bild A-11: Logarithmus des Druck-Elastizitätsmoduls von Brettabschnitten mit Universal-Keilzinkenverbindung über dem Vorhersagewert nach Gleichung (4-10)

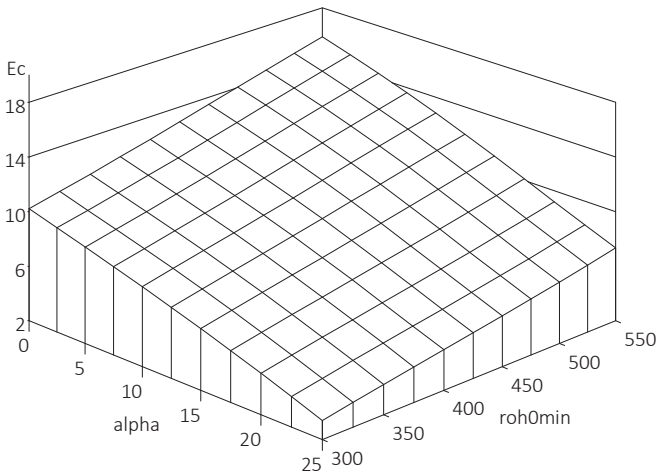


Bild A-12: Druck-Elastizitätsmodul von Brettabschnitten mit Universal-Keilzinkenverbindung nach Gleichung (4-10) mit  $E_c$  in  $\text{kN/mm}^2$ ,  $\rho_{0,\text{min}}$  in  $\text{kg/m}^3$  und  $\alpha = 10^\circ$

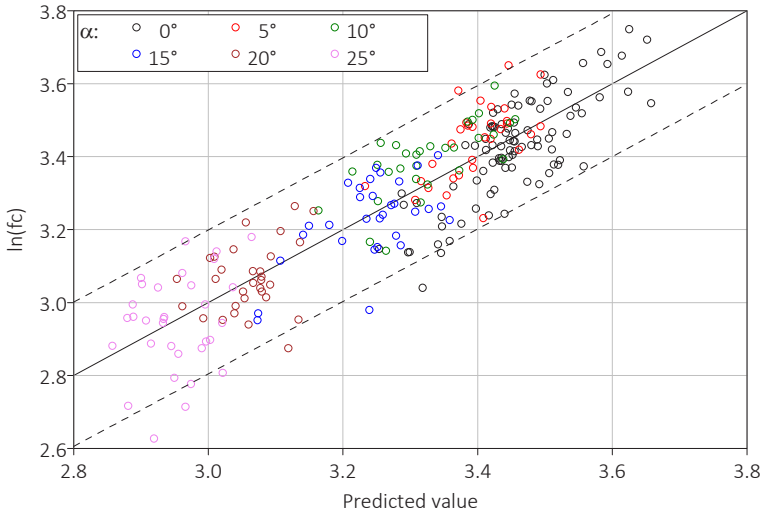


Bild A-13: Logarithmus der Druckfestigkeit von Brettabschnitten mit Universal-Keilzinkenverbindung über dem Vorhersagewert nach Gleichung (4-14)

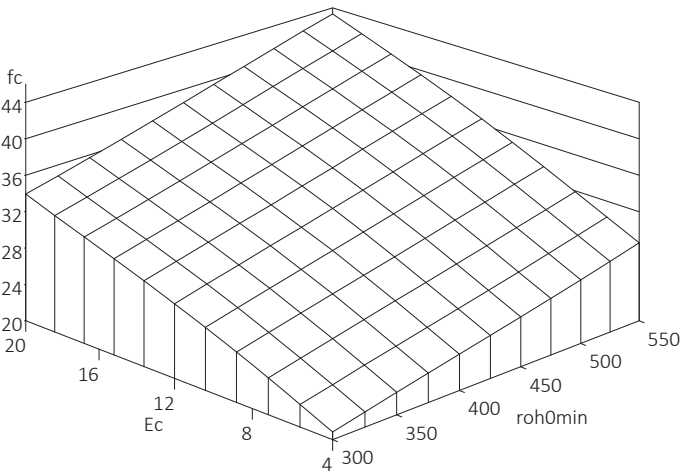


Bild A-14: Druckfestigkeit von Brettabschnitten mit Universal-Keilzinkenverbindung nach Gleichung (4-14) mit  $f_c$  in  $N/mm^2$  und  $\rho_{0,min}$  in  $kg/m^3$  und  $\alpha = 10^\circ$

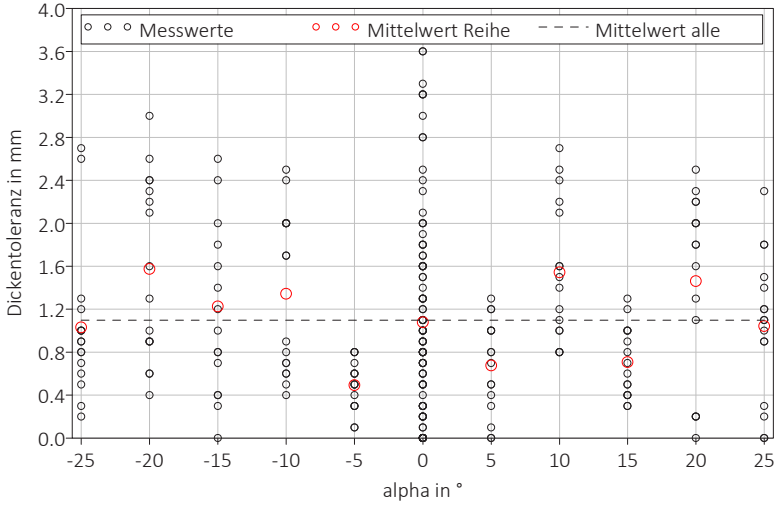


Bild A-15: Dickteleranz in den Universalkeilzinkenverbindungen der Biegeprüfkörper nach Versuchsreihen getrennt

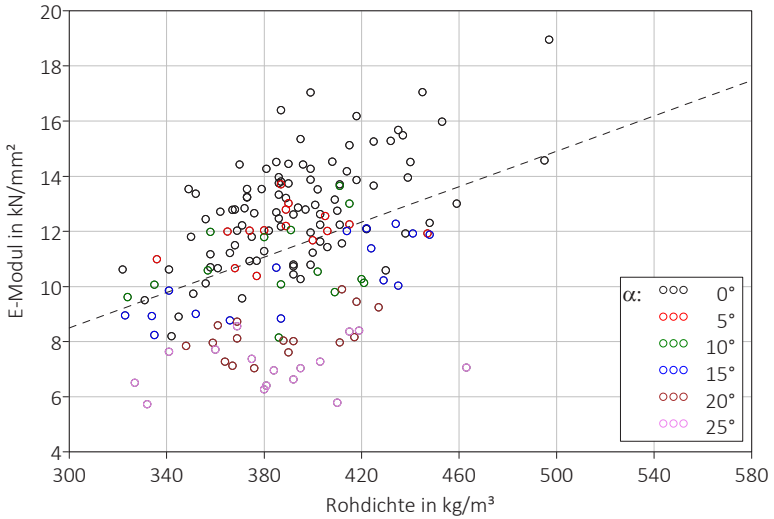


Bild A-16: Biege-Elastizitätsmodul von Brettabschnitten mit Universal-Keilzinkenverbindung über der kleineren Rohdichte ( $\alpha \geq 0^\circ$ )

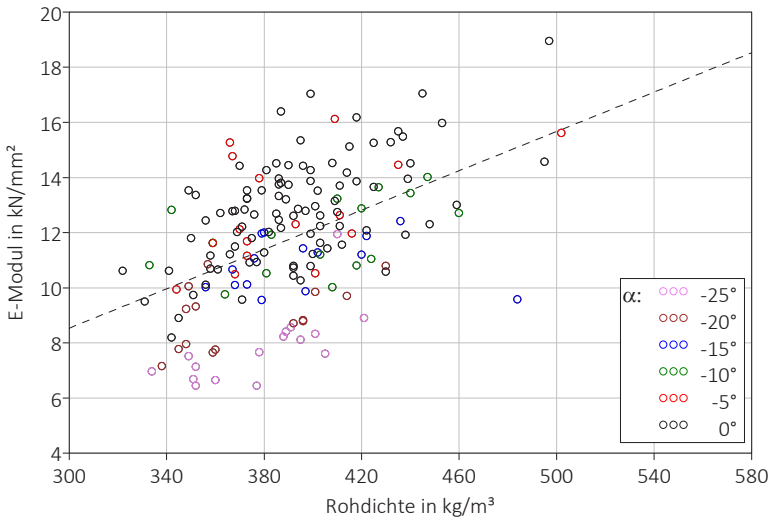


Bild A-17: Biege-Elastizitätsmodul von Brettabschnitten mit Universal-Keilzinkenverbindung über der kleineren Rohdichte ( $\alpha \leq 0^\circ$ )

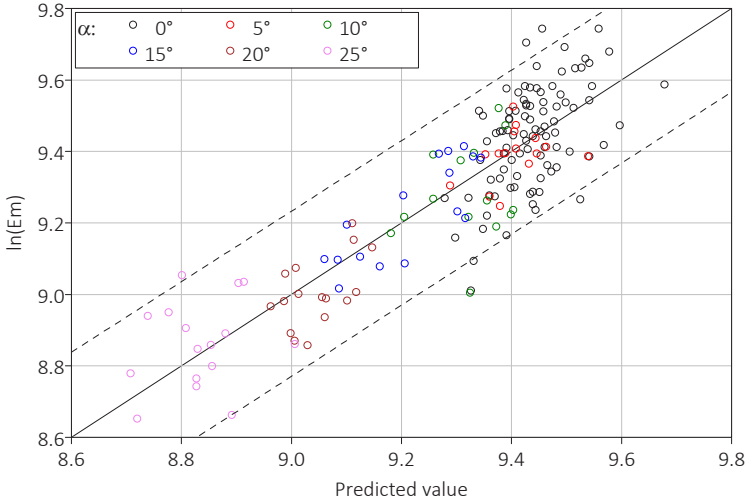


Bild A-18: Logarithmus des Biege-Elastizitätsmoduls von Brettabschnitten mit Universal-Keilzinkenverbindung über dem Vorhersagewert nach Gleichung (4-11) für Winkel  $\alpha \geq 0^\circ$

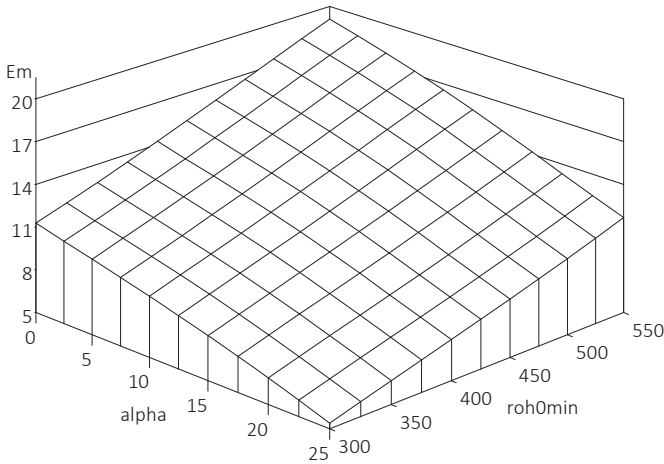


Bild A-19: Biege-Elastizitätsmodul von Brettabschnitten mit Universal-Keilzinkenverbindung nach Gleichung (4-11) mit  $E_m$  in  $\text{kN/mm}^2$ ,  $\rho_{0,min}$  in  $\text{kg/m}^3$  und  $\alpha = 10^\circ$

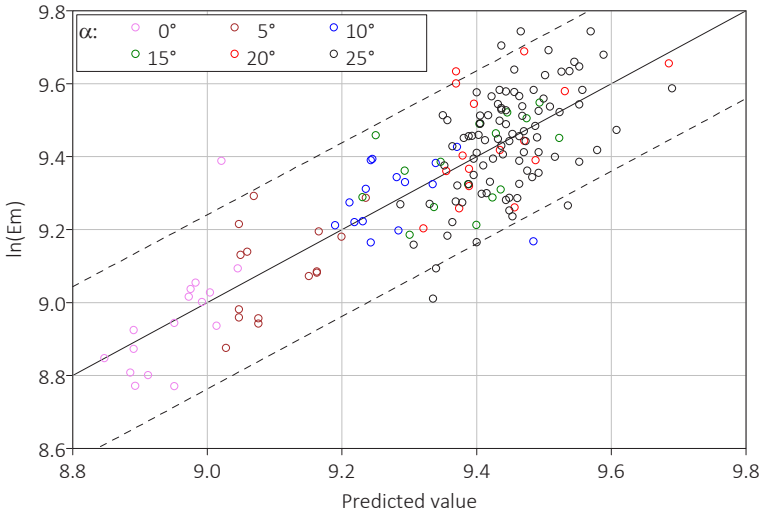


Bild A-20: Logarithmus des Biege-Elastizitätsmoduls von Brettabschnitten mit Universal-Keilzinkenverbindung über dem Vorhersagewert nach Gleichung (4-12) für Winkel  $\alpha \leq 0^\circ$

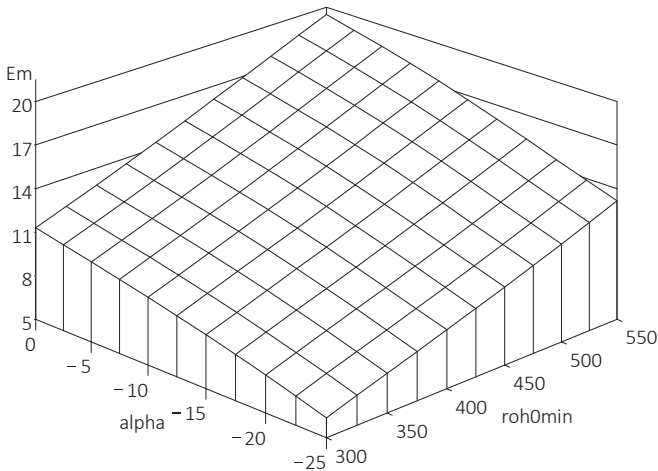


Bild A-21: Biege-Elastizitätsmodul von Brettabschnitten mit Universal-Keilzinkenverbindung nach Gleichung (4-12) mit  $E_m$  in  $\text{KN}/\text{mm}^2$ ,  $\rho_{0,min}$  in  $\text{kg}/\text{m}^3$  und  $\alpha = -10^\circ$

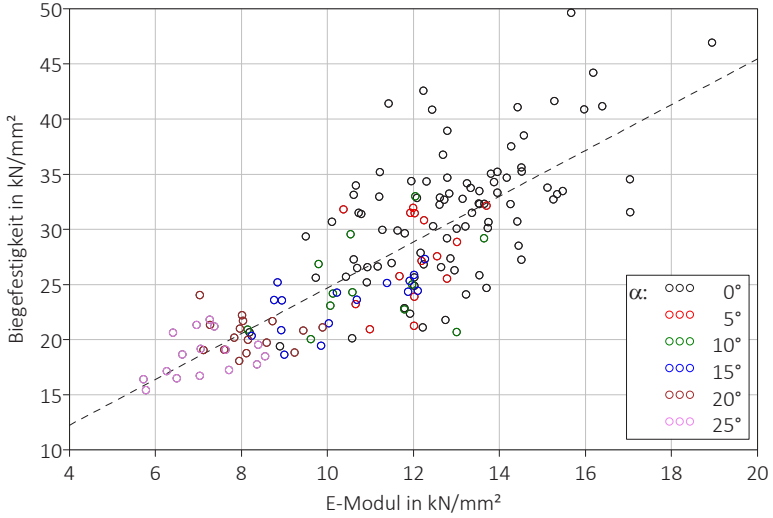


Bild A-22: Biegefestigkeit von Brettabschnitten mit Universal-Keilzinkenverbindung über dem Biege-Elastizitätsmodul ( $\alpha \geq 0^\circ$ )

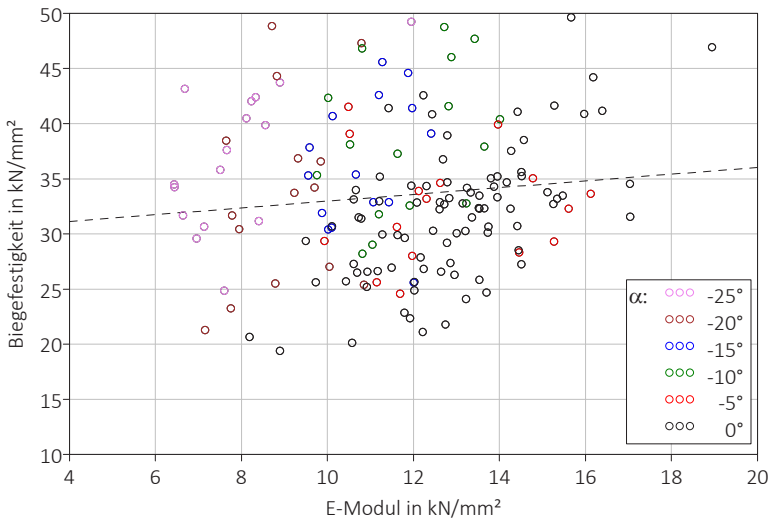


Bild A-23: Biegefestigkeit von Brettabschnitten mit Universal-Keilzinkenverbindung über dem Biege-Elastizitätsmodul ( $\alpha \leq 0^\circ$ )



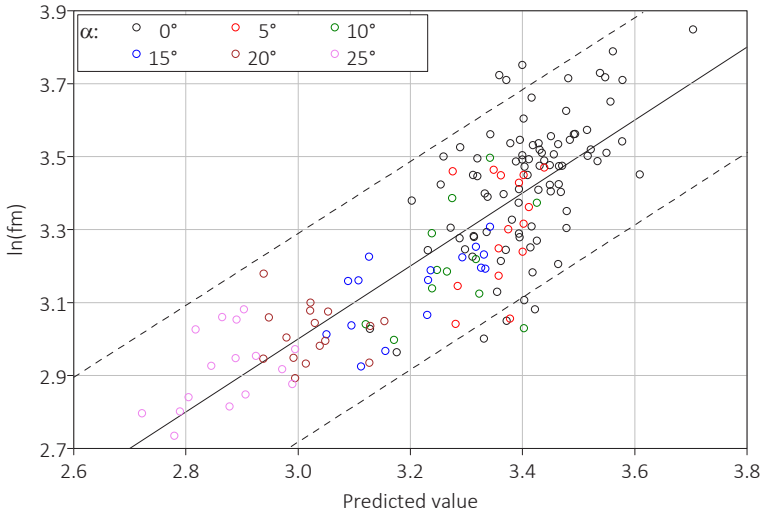


Bild A-24: Logarithmus der Biegefestigkeit von Brettabschnitten mit Universal-Keilzinkenverbindung über dem Vorhersagewert nach Gleichung (4-15) für Winkel  $\alpha \geq 0^\circ$

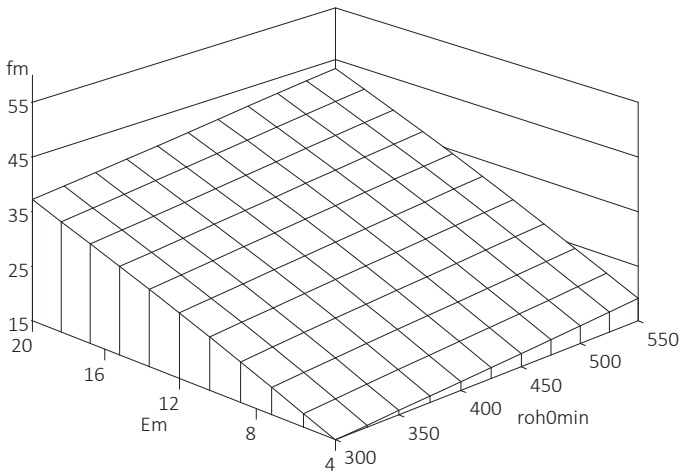


Bild A-25: Biegefestigkeit von Brettabschnitten mit Universal-Keilzinkenverbindung nach Gleichung (4-15) mit  $f_m$  in  $N/mm^2$  und  $\rho_{0,min}$  in  $kg/m$  und  $\alpha = 10^\circ$

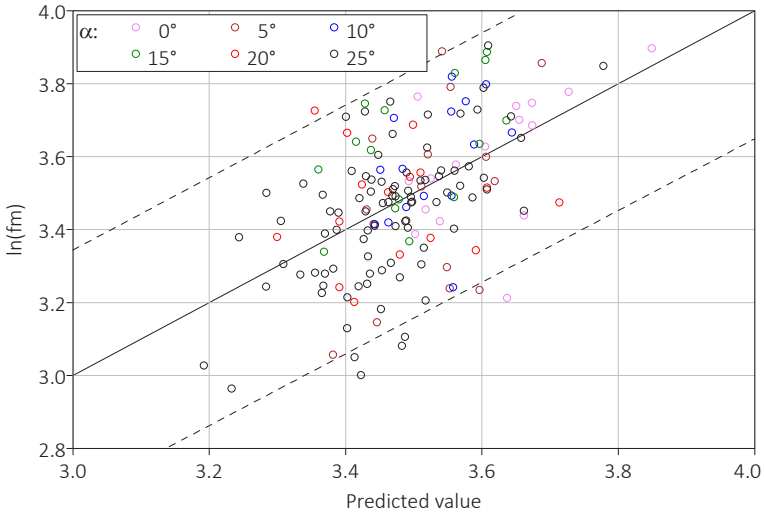


Bild A-26: Logarithmus der Biegefestigkeit von Brettabschnitten mit Universal-Keilzinkenverbindung über dem Vorhersagewert nach Gleichung (4-16) für Winkel  $\alpha \leq 0^\circ$

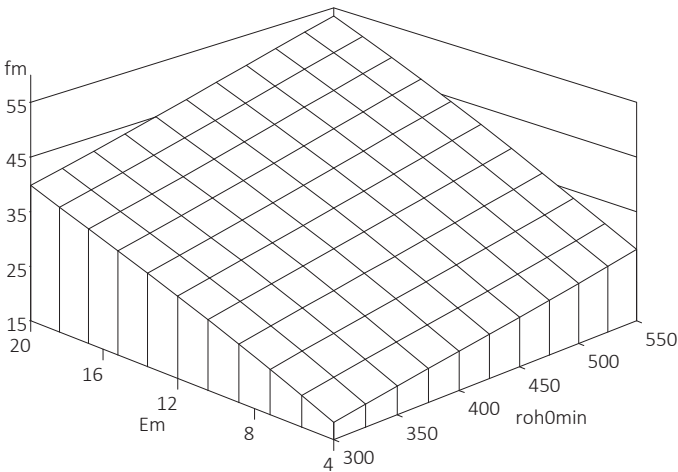


Bild A-27: Biegefestigkeit von Brettabschnitten mit Universal-Keilzinkenverbindung nach Gleichung (4-16) mit  $f_m$  in N/mm² und  $\rho_{0,min}$  in kg/m und  $\alpha = -10^\circ$



Satteldachträger und Dreigelenkrahmen mit biegesteifen Rahmenecken sind zwei der am häufigsten verwendeten Systeme für Hallentragwerke des Ingenieurholzbaus. Bei beiden Trägerformen treten infolge des gekrümmten oder geknickten Verlaufs Beanspruchungen quer zur Trägerachse auf. Aufgrund der im Material vorhandenen Querlagen und der daraus resultierenden hohen Festigkeiten in Querrichtung ist der Werkstoff Brettsperrholz zur Herstellung von Satteldachträger und Dreigelenkrahmen besonders geeignet. Weil die Produktionslängen von Brettsperrholz derzeit auf 16 m bis 18 m begrenzt sind und der Werkstoff in Plattenebene nicht gekrümmt werden kann, sind zur Herstellung großer Hallentragwerke aus Brettsperrholz leistungsfähige Bauteilstöße erforderlich.

Um die Anwendung von Brettsperrholz im Hallenbau zu ermöglichen, wurde im Rahmen eines Forschungsvorhabens eine an den Werkstoff Brettsperrholz angepasste Universal-Keilzinkenverbindungen entwickelt mit deren Hilfe Brettsperrholzträger mit Längen über 18 m sowie Satteldachträger und Rahmenecken aus Brettsperrholz realisierbar werden. Der vorliegende Forschungsbericht enthält die Ergebnisse der in verschiedenen anwendungsbezogenen Konfigurationen durchgeführten Tragfähigkeitsversuche mit der neu entwickelten Universal-Keilzinkenverbindungen und ein anhand der Versuchsergebnisse abgeleitetes, in der Praxis anwendbares Bemessungsverfahren für Universal-Keilzinkenverbindungen in Brettsperrholzträgern.

