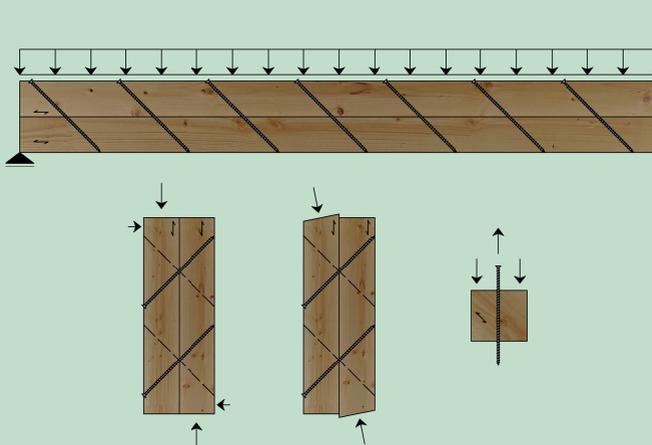


H. J. Blaß

Y. Steige

## Steifigkeit axial beanspruchter Vollgewindeschrauben





H. J. Blaß und Y. Steige

## **Steifigkeit axial beanspruchter Vollgewindeschrauben**

Titelbild: Prüfkörperarten zur Ermittlung der axialen Steifigkeit

**BAND 34**

Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau

---

Herausgeber

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Holzbau und Baukonstruktionen

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hans Joachim Blaß

# Steifigkeit axial beanspruchter Vollgewindeschrauben

H. J. Blaß

Y. Steige

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Holzbau und Baukonstruktionen

Karlsruher Institut für Technologie  
Holzbau und Baukonstruktionen

Die Arbeiten wurden gefördert aus Mitteln des Deutschen Instituts für Bautechnik und des Fachverbands Werkzeugindustrie e.V.

#### 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, pictures and graphs – is licensed  
under a Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License  
(CC BY-SA 4.0): <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.en>*



*The cover page is licensed under a Creative Commons  
Attribution-No Derivatives 4.0 International License (CC BY-ND 4.0):  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/deed.en>*

Print on Demand 2018 – Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier

ISSN 1860-093X

ISBN 978-3-7315-0826-7

DOI 10.5445/KSP/1000085040





# Vorwort

Die Steifigkeit axial beanspruchter Vollgewindeschrauben ist bisher nur wenig untersucht. Die axiale Steifigkeit kommt besonders beim Nachweis der Gebrauchstauglichkeit zum Tragen und hat somit einen Einfluss auf das Verformungsverhalten des gesamten Tragsystems. Außerdem hat die axiale Steifigkeit einen direkten Einfluss auf die Schnittgrößenverteilung in Tragsystemen wie z.B. biegesteife Rahmenecken, Fachwerkträger oder nachgiebig verbundene Biegeträger. Auch die Lastverteilung in Verbindungen mit geneigt angeordneten Vollgewindeschrauben wird durch die axiale Steifigkeit signifikant beeinflusst. Die derzeit zur Verfügung stehenden Berechnungsmodelle weichen jedoch deutlich voneinander ab, sodass für unterschiedliche Schrauben große quantitative Unterschiede in der Steifigkeitsberechnung vorhanden sind.

Dieser Forschungsbericht beschäftigt sich mit der Bestimmung der Steifigkeiten von axial beanspruchten Vollgewindeschrauben anhand geeigneter Prüfmethoden sowie der Herleitung einer allgemeinen Berechnungsgleichung. Die Untersuchungen beruhen auf insgesamt 290 durchgeführten Versuchen.

Die Finanzierung dieses Forschungsvorhaben erfolgte durch das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) und den Fachverband Werkzeugindustrie e.V..

Die Verfasser



# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	1
2	Aktuelle Rechenwerte für den axialen Verschiebungsmodul .....	3
3	Zusammentragen und Auswertung bisheriger Versuche .....	7
4	Prüfmethoden.....	11
4.1	Durchführung und Auswertung.....	13
4.2	Druckscherversuche.....	15
4.3	Diagonalscherversuche.....	22
4.4	Ausziehversuche.....	25
5	Nachweis der Eignung der Prüfmethode – Scherversuche.....	29
5.1	Biegeversuche .....	29
5.2	Druckscherversuche.....	34
5.3	Gegenüberstellung.....	37
6	Parameteranalyse .....	43
6.1	Einfluss der Einbindetiefe .....	46
6.2	Einfluss des Gewindeaußendurchmessers.....	51
6.3	Einfluss des Einschraubwinkels .....	55
6.4	Einfluss der Vorbohrung und der Holzfeuchte .....	60
6.5	Modell für die axiale Steifigkeit .....	69
7	Bewertung und Gegenüberstellung der Prüfmethode .....	79
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	83
	Literaturverzeichnis.....	85
	Formelzeichen .....	87
	Anlagen.....	93



# 1 Einleitung

Die selbstbohrende Holzschraube ist durch ihre große axiale Tragfähigkeit und Steifigkeit ein wichtiges stiftförmiges Verbindungsmittel im Ingenieurholzbau. Um große Kräfte in Verbindungen zu übertragen, wird eine geneigte oder gekreuzte Anordnung bevorzugt. Auf diese Weise werden Tragfähigkeiten und Steifigkeiten in den Verbindungen erzielt, die die entsprechenden Werte bei Beanspruchung auf Abscheren um ein Mehrfaches übersteigen. Angaben zur axialen Tragfähigkeit und Steifigkeit finden sich u. a. in allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen oder europäischen technischen Bewertungen.

Während die axiale Tragfähigkeit mit diesen Regelungen zuverlässig und wirklichkeitsnah berechnet wird, führen derzeitige Berechnungsmodelle für die axiale Steifigkeit zu großen quantitativen Unterschieden, so dass sich in der Berechnung für Standardfälle Unterschiede bis zu einem Faktor vier ergeben können. Der Grund hierfür liegt größtenteils in den unterschiedlichen experimentellen Verfahren zur Ermittlung der axialen Steifigkeit. Um selbstbohrende Holzschrauben zuverlässig und wirtschaftlich in Hochbaukonstruktionen aus Holz einzusetzen, erfordert es eine realitätsnahe Erfassung der Verbindungssteifigkeiten.

Beispielsweise hat die axiale Steifigkeit von geneigt und gekreuzt angeordneten Holzschrauben, mit der die Verbindungssteifigkeit ermittelt wird, im Ingenieurholzbau direkten Einfluss auf die Schnittgrößenverteilung von eingespannten Stützen, biegesteifen Rahmenecken und nachgiebig verbundenen Biegeträgern.

Angesichts der beschriebenen Berechnungsunterschiede hinsichtlich der axialen Steifigkeit ist es erforderlich, eine geeignete robuste Prüfmethode zu entwickeln, mit der die Steifigkeit von axial beanspruchten Vollgewindeschrauben bestimmt werden kann und darauf aufbauend ein zutreffendes Berechnungsmodell abzuleiten. An dieser Stelle setzt die Forschungsarbeit an, deren Ergebnisse in diesem Bericht zusammengefasst sind.

Die Ergebnisse beruhen auf 290 systematisch durchgeführten Versuchen zur Steifigkeitsermittlung. Die geplante Versuchsanzahl des Forschungsvorhabens umfasste insgesamt 350 Versuche, darunter 250 Versuche mit kleinteiligen Prüfkörpern und 100 Systemversuche mit nachgiebig verbundenen Biegeträgern. Abweichend davon wurden mit kleinteiligen Prüfkörpern insgesamt 270 Versuche durchgeführt. Eine Versuchsanzahl von 20 Systemversuchen wurde als ausreichend angesehen, um ein schlüssiges Ergebnis zu erzielen.

## 2 Aktuelle Rechenwerte für den axialen Verschiebungsmodul

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden die Rechenwerte für den axialen Verschiebungsmodul  $K_{ser}$ , der der axialen Steifigkeit entspricht, für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit, der in den allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen (abZ) und europäischen technischen Bewertungen (ETA) für Holzschrauben zur Verwendung als Holzverbindungsmittel zu finden sind, zusammengetragen. Die folgenden beiden unterschiedlichen Rechenwerte für den axialen Verschiebungsmodul sind zu finden:

$$K_{ser} = 780 \cdot d^{0,2} \cdot \ell_{ef}^{0,4} \quad \text{in N/mm} \quad (\text{z.B.: ETA-11 / 0190}) \quad (1)$$

$$K_{ser} = 25 \cdot d \cdot \ell_{ef} \quad \text{in N/mm} \quad (\text{z.B.: ETA-12/0062}) \quad (2)$$

Beide Rechenwerte sind von den Parametern „Gewindeaußendurchmesser der Schraube  $d$ “ und der „wirksamen Einbindtiefe  $\ell_{ef}$ “ abhängig.

Die Rohdichte  $\rho$  und der Einschraubwinkel  $\alpha$  haben keinen Einfluss auf die beiden Rechenwerte. Mit gleichen Eingangswerten (z.B.  $d = 8$  mm und  $\ell_{ef} = 200$  mm) erhält man mit der Gleichung (2) die 4,0-fache Steifigkeit im Vergleich zur Gleichung (1).

Bild 2-1 zeigt den Rechenwert des Verschiebungsmoduls über den Gewindeaußendurchmesser. Dabei wurde die Einbindtiefe mit  $10 d$  gewählt. Die zuvor beschriebene Problematik der zahlenmäßig unterschiedlichen Rechenwerte wird durch das Diagramm verdeutlicht. Besonders für große Gewindeaußendurchmesser und Einbindetiefen unterscheiden sich die Rechenwerte gravierend. Dies kann nicht durch die unterschiedlichen Schraubeneigenschaften erklärt werden, sondern muss in den uneinheitlichen Prüfverfahren bzw. Verschiebungsmessungen liegen.

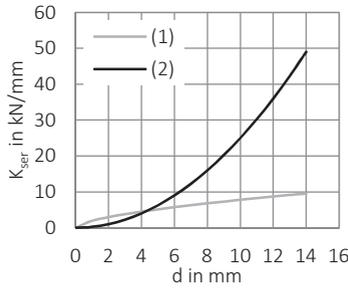


Bild 2-1 Gegenüberstellung der Rechenwerte des axialen Verschiebungsmoduls

Zusätzlich gibt es für den Anwendungsfall Holz-Beton-Verbundsysteme eigene abZs bzw. ETAs. Hier wird u. a. ein Zahlenwert für den Verschiebungsmodul mit linearer Abhängigkeit von der Einbindetiefe  $\ell_{ef}$  angegeben. In diesem Forschungsvorhaben wird auf die Rechenwerte für Holz-Beton-Verbundsysteme nicht weiter eingegangen.

Der Verschiebungsmodul beeinflusst das Verformungsverhalten von Tragsystemen. Zusätzlich hat er einen direkten Einfluss auf die Schnittgrößenverteilung für Anwendungen wie nachgiebig verbundene Biegeträger, eingespannte Stützen und biege-steife Rahmenecken. Die Auswirkung der zwei zahlenmäßig unterschiedlichen Rechenwerte nach den Gleichungen (1) und (2) soll anhand eines Beispiels mit einem nachgiebig verbundenen Biegeträger (siehe Bild 2-2) verdeutlicht werden.

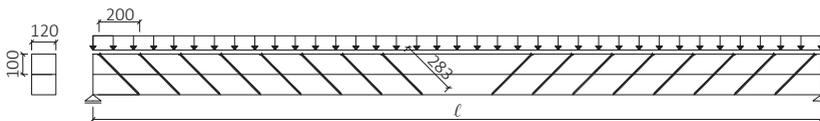


Bild 2-2 Beispiel eines nachgiebig verbundenen Biegeträgers

Zwei Bauteile mit einer Länge von  $\ell = 3,6$  m, einer Höhe von 100 mm und einer Breite von 120 mm werden mit geneigten Vollgewindeschrauben mit einem Gewindeaußendurchmesser  $d = 8$  mm unter einem Einschraubwinkel von

$\alpha = 45^\circ$  nachgiebig mit einander verbunden. Die Belastung  $q_d$  wird zu 3 kN/m angenommen. Die wirksame Einbindetiefe der Schrauben beträgt  $\ell_{ef} = 141,5$  mm und der Schraubenabstand  $s = 200$  mm. Mit dem  $\gamma$ -Verfahren wurden die Biege- und Schubspannungen berechnet, die Ergebnisse sind im Bild 2-3 dargestellt. Die Visualisierung der Schubspannung erfolgte vereinfacht durch einen Polygonzug. Der Biegeträger wurde mit unterschiedlichen Steifigkeitswerten berechnet:

- Vollstab (starrer Verbund),  $\gamma_1 = 1$
- Einzelstäbe (kein Verbund),  $\gamma_1 = 0$
- Nachgiebiger Biegeträger mit  $K_{ser,1}$  nach Gleichung (1),  $\gamma_1 = 0,066$
- Nachgiebiger Biegeträger mit  $K_{ser,2}$  nach Gleichung (2),  $\gamma_1 = 0,19$

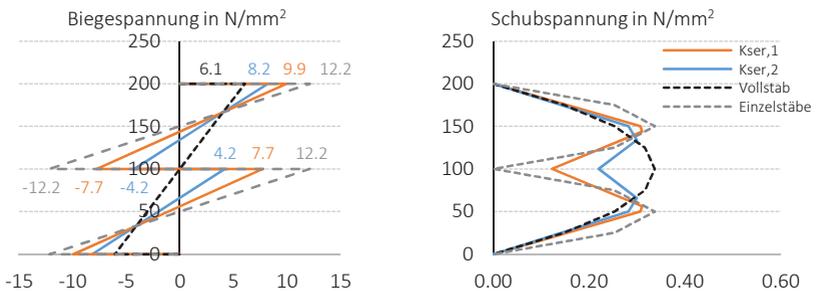


Bild 2-3 Vergleich der Schnittgrößenverteilung eines starr, nicht und nachgiebig verbundenen Biegeträgers

Mit einem Unterschied des axialen Verschiebungsmoduls von 19,7 kN/mm erhält man eine Randspannungsdifferenz von 1,7  $N/mm^2$ . Dies bedeutet, die Randspannung reduziert sich um 17 % bei einem 3,3-fach größeren axialen Verschiebungsmodul. Um mit der Gleichung (1) die gleiche Randspannung zu erhalten, müssten das Dreifache an Schrauben angeordnet werden. Dieses Beispiel zeigt den wirtschaftlichen Aspekt, der durch die beiden quantitativ unterschiedlichen Gleichungen hervorgerufen wird, und die Wichtigkeit der Klärung der Ursache dieser Unterschiede auf.



### 3 Zusammentragen und Auswertung bisheriger Versuche

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens erfolgte eine Literaturrecherche, um bestehende Versuchsdaten zusammen zu tragen. Innerhalb dieser Versuchsdaten wurden folgende drei Versuchsarten verwendet:

- Druckscherversuche (DRS)
- Zugscherversuche (ZS)
- Ausziehversuche (A)

Die Tabelle 3-1 gibt einen Überblick über die Versuchsdaten mit der Art des Versuchsaufbaus, Schraubenbelastung, verwendetes Material und Einschraubwinkel. Die letzte Spalte beinhaltet Kürzel, welche später in Bild 3-1 und Bild 3-2 verwendet werden.

Tabelle 3-1 Zusammenstellung bisheriger Versuche aus Literaturstellen

Versuchsaufbau	Belastung der Schraube	Material	Einschraubwinkel	Kürzel
A	Zug/Druck	C24	45°	A_1_C24
	Zug	C40	45°	A_1_C40
		Kerto S/Q	45°	A_1_Kerto
ZS	Zug-Scher	GL 28h, Stahl	45°	ZS_1
DRS	Zug-Scher	C24	45°	DRS_1_C24_//
		Kerto S/Q	45°	DRS_1_Kerto_//
	Gekreuzt	C24	45°	DRS_1_C24_X
		Kerto S/Q	45°	DRS_1_Kerto_X
A	Zug	NH nach DIN EN 28970	45°	A_2
DRS	Gekreuzt	nicht bekannt	45°	DRS_2_X
	Zug-Scher		45°	DRS_2_//
A	Zug	Kerto S	45°	A_3
A	Zug	GL 24h	30°	A_4_30°
			60°	A_4_60°

Die vorhandenen Versuchsdaten wurden hinsichtlich ihres Verschiebungsmoduls  $k_s$  ausgewertet. Für die Druckscher- und Zugscherversuche entspricht dieser der gesamten Verbindungssteifigkeit in Fugenrichtung. Dagegen entspricht der ermittelte Verschiebungsmodul  $k_s$  der Ausziehversuche der axialen Steifigkeit  $k_{ax}$  in Richtung der Schraubenachse. Um einen Vergleich zwischen den jeweiligen Steifigkeitswerten ziehen zu können, muss die Fugensteifigkeit der Druckscher- und Zugscherversuche in die axiale Steifigkeit  $k_{ax}$  pro Schraube für eine Seite der Scherfuge umgerechnet werden. Die Erläuterung dieser Umrechnung erfolgt im weiteren Verlauf dieses Berichtes. Aus diesem Grund werden im ersten Schritt nur die Ausziehversuche betrachtet.

Bild 3-1 und Bild 3-2 zeigen die axialen Steifigkeiten der Ausziehversuche in Abhängigkeit der Gleichungen (1) und (2), die in den abZs bzw. ETAs zu finden sind (siehe Kapitel 2). Dabei wird ersichtlich, dass die Gleichung (1) die axiale Steifigkeit der Ausziehversuche deutlich unterschätzt. Die Gleichung (2) hingegen bildet die hier aufgeführten Versuchsdaten deutlich besser ab.

Diese erste Betrachtung macht deutlich, dass die axiale Steifigkeit berechnet nach Gleichung (1) die Versuchsdaten nur unzureichend wiedergibt. Die Ursache wird in der ausgewählten Prüfmethode mit der dazugehörigen Wegmessung, die zur Entstehung der Gleichung (1) verwendet wurde, vermutet.

Aus den vorliegenden Versuchsdaten kann aufgrund der uneinheitlichen Prüfmethoden und fehlenden Informationen kein mechanisches Modell für die axiale Steifigkeit und keine ersten Aussagen über die Einflussparameter abgeleitet werden.

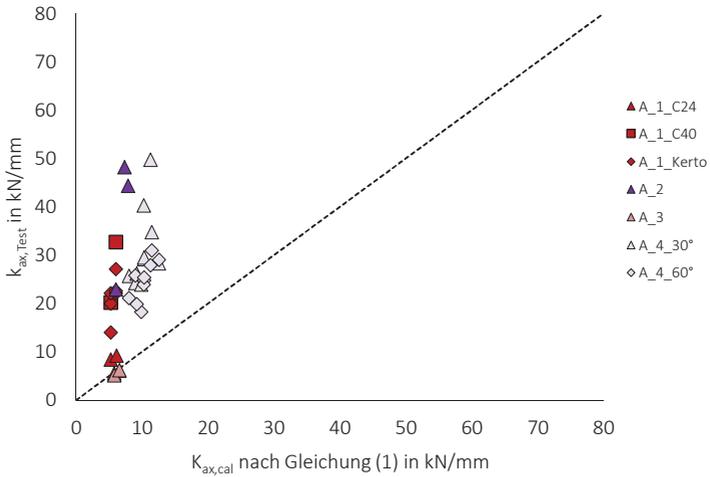


Bild 3-1 Axiale Steifigkeit der Ausziehversuche über Rechenwert nach Gleichung (1)

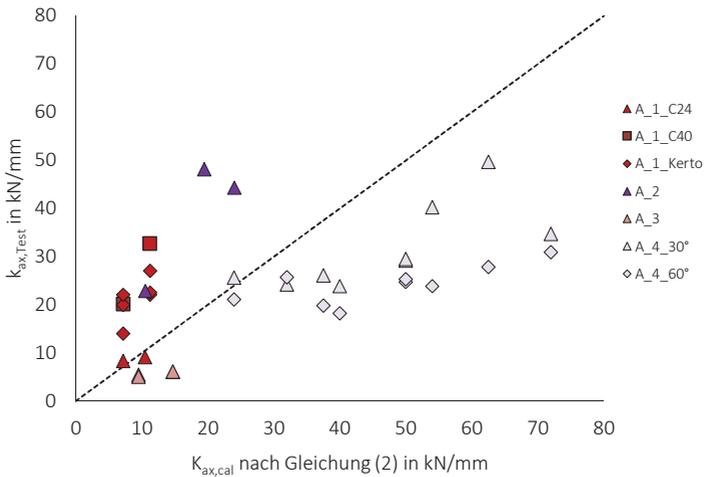


Bild 3-2 Axiale Steifigkeit der Ausziehversuch über Rechenwert nach Gleichung (2)



## 4 Prüfmethoden

Die axiale Steifigkeit wird für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit benötigt. Darüber hinaus wird sie für den Nachweis der Tragfähigkeit z. B. bei nachgiebig verbundenen Biegeträgern relevant. Dieser Anwendungsfall wird für die Suche nach einer geeigneten Prüfmethode herangezogen.

Die axiale Steifigkeit soll anhand von kleinteiligen Versuchen ermittelt werden und anschließend z.B. auf den benannten Anwendungsfall eines nachgiebig verbundenen Biegeträgers übertragbar werden.

Dabei werden folgende drei Prüfmethoden untersucht:

- Druckscherversuch
- Diagonalscherversuch
- Ausziehversuch

Bild 4-1 stellt die Systematik der Übertragbarkeit der benannten kleinteiligen Versuche auf den Anwendungsfall eines nachgiebig verbundenen Biegeträgers dar.

Mit den Druckscher- und Diagonalscherversuchen (kurz Scherversuchen) wird eine Verbindungssteifigkeit in Richtung der Fuge ermittelt.

Durch die Ausziehversuche wird direkt die axiale Steifigkeit bestimmt. Um die unterschiedlichen Prüfmethoden vergleichen zu können, wird die Fugensteifigkeit der Scherversuche in die axiale Steifigkeit pro Schraube und Scherfuge überführt.

Abweichend zur Versuchsplanung gemäß des Forschungsantrages wurden keine Zugscherversuche durchgeführt. Um eine planmäßige Kräfteinleitung bei einem Zugscherversuch zu ermöglichen, sollte dieser mit vier Scherfugen ausgeführt werden. Daraus ergibt sich ein hoher Prüfaufbau-, Mess- und Materialaufwand. Aus diesem Grund wurde von der Steifigkeitsermittlung mittels Zugscherversuchen abgesehen.

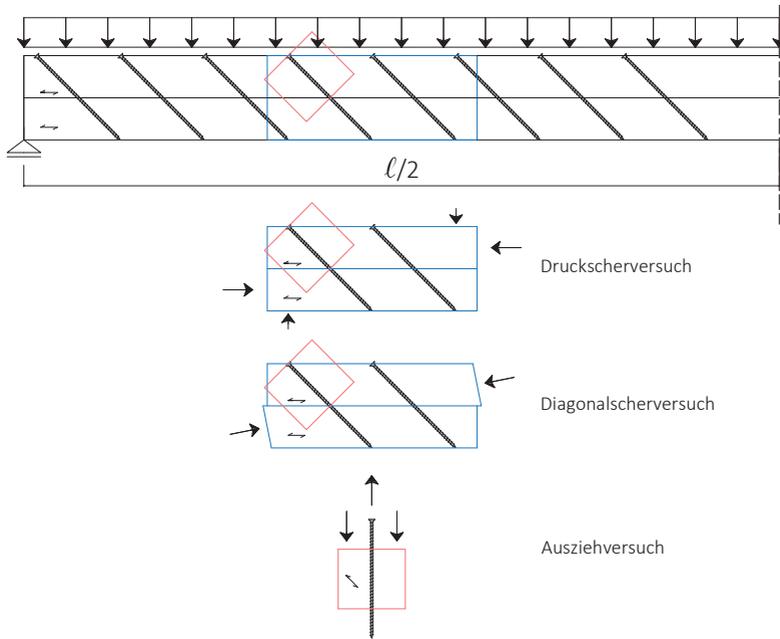


Bild 4-1 Ermittlung der axialen Steifigkeit anhand von kleinteiligen Versuchen

Im ersten Schritt dieses Kapitels wird auf die Versuchsdurchführung und die Auswertung der Verbindungssteifigkeit eingegangen, die für alle Versuche einheitlich durchgeführt wurde.

Anschließend werden die drei Prüfmethode mit ihren Besonderheiten beschrieben und die Umrechnung der Verbindungssteifigkeit in die axiale Steifigkeit erläutert.

## 4.1 Durchführung und Auswertung

Die Durchführung und Auswertung der Versuche erfolgt in Anlehnung an DIN EN 26891:1991.

Hierbei werden die Prüfkörper bis 40 % der geschätzten Höchstlast  $F_{est}$  mit einer Geschwindigkeit von  $0,2 F_{est}$  kN/min belastet, nach einer 30 Sekunden langen Haltezeit auf 10 %  $F_{est}$  mit gleicher Geschwindigkeit entlastet und anschließend wieder bis 70 %  $F_{est}$  belastet. Ab diesen Punkt erfolgt die Belastung durch eine Wegsteuerung bis zum Versagen oder bis zu einer Verschiebung von 15 mm.

Die Auswertung der Verbindungssteifigkeit des sogenannten Verschiebungsmoduls erfolgt nach zwei Verfahren. Einmal die Auswertung des Anfangsverschiebungsmoduls  $k_i$ , dieser entspricht der Steigung der Geradengleichung durch den Ursprung und den Punkt bei einer Last von 40 %  $F_{est}$ . Der Anfangsverschiebungsmodul kann einen Anfangsschlupf beinhalten, der z.B. bei Scherversuchen durch das Anlegen der beiden Holzbauteile hervorgerufen wird. Im Gegensatz dazu wird mit dem zweiten Verfahren ein modifizierter Verschiebungsmodul  $k_s$  berechnet. Dieser entspricht der Steigung der Geradengleichung durch die beiden Punkte bei 10 % und 40 %  $F_{est}$ . Somit bleibt ein möglicherweise vorhandener Anfangsschlupf unberücksichtigt.

Bild 4-2 zeigt exemplarisch die Auswertung beider Verschiebungsmoduln anhand des Versuchs 5-4. Links ist die gesamte Last-Verschiebungskurve bis kurz nach Erreichen von  $F_{max}$  und rechts der Anfangsbereich mit den Geraden des Verschiebungsmoduls  $k_i$  und  $k_s$  dargestellt. Mit diesem Beispiel wird ersichtlich, dass  $k_i$  den linearen Verlauf der Last-Verschiebungskurve weniger gut als  $k_s$  beschreibt. Zusätzlich wird mit  $k_i$  ein kleinerer Steifigkeitswert ermittelt, der den Anfangsschlupf enthält und somit nicht die Wirklichkeit abbildet.

Aus diesem Grund wird bei den innerhalb dieses Forschungsvorhabens durchgeführten Versuchen nur der  $k_s$ -Wert bestimmt.

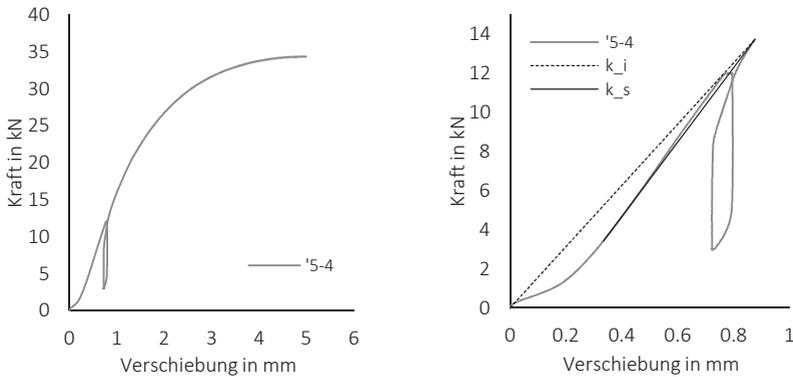


Bild 4-2 Auswertungsvergleich von  $k_i$  und  $k_s$  anhand des Versuchs 5-4

Im Gegensatz zum Vorgehen nach DIN EN 26891:1991 wird der modifizierte Verschiebungsmodul mit der Maximallast  $F_{\max}$  gemäß der Gleichung (3) und nicht mit der Schätzlast  $F_{\text{est}}$  ermittelt.

$$k_s = \frac{0,4 \cdot F_{\max} - 0,1 \cdot F_{\max}}{v_{04} - v_{01}} \quad (3)$$

Dabei wird darauf geachtet, dass die Auswertung des Verschiebungsmoduls im linear-elastischen Bereich erfolgt. Dies bedeutet, dass die Punkte zur Bestimmung des Verschiebungsmoduls individuell an den jeweiligen Versuch angepasst werden, wenn der Anfangsschlupf über den Bereich zwischen 0 bis 10 %  $F_{\max}$  hinausgeht.

Im weiteren Verlauf dieses Berichts wird  $k_s$  auch als Verbindungssteifigkeit bezeichnet. Die axiale Steifigkeit wird  $k_{ax}$  benannt und ist die Steifigkeit pro Schraube und im Falle eines Scherversuchs pro Anschlussseite in Richtung der Schraubenachse.

Der Kleinbuchstabe **k** steht für Versuchswerte und ein Großbuchstabe **K** für das Ergebnis aus einer Berechnungsgleichung.

## 4.2 Druckscherversuche

Eine Möglichkeit zur Bestimmung der Steifigkeit axial beanspruchter Vollgewindeschrauben ist durch kleinteilige Druckscherversuche. Die gewählte Prüfkörpergeometrie und der Versuchsaufbau sind in Bild 4-3 dargestellt. Links ist der Prüfkörper mit einer geneigten (Variante geneigt) und rechts mit einer gekreuzten Schraubenanordnung (Variante gekreuzt) dargestellt.

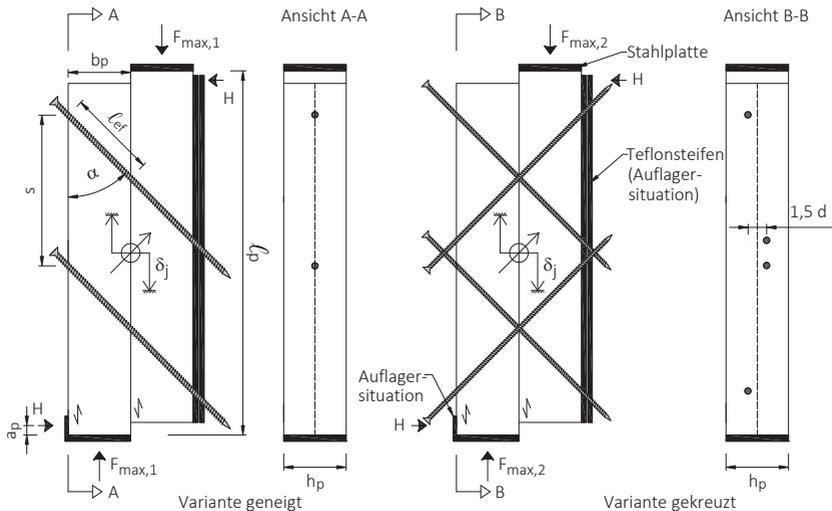


Bild 4-3 Prüfmethode – Druckscherversuch

Die Schraubenanzahl für die Variante geneigt und gekreuzt sind jeweils zwei bzw. vier. Die Schrauben werden mit einem Einschraubwinkel  $\alpha$  eingedreht. Die Anordnung der Schrauben für die Variante geneigt erfolgt in der Mitte der Ansicht, siehe Ansicht A-A. Bei der gekreuzten Variante sind die Schrauben versetzt angeordnet, damit es zu keiner Berührung der Schrauben eines Kreuzes kommt. Der Abstand im Kreuzungspunkt wird nach der Empfehlung in ETA-11/0190 zu  $1,5 d$  gewählt und die Schraubenkreuze sind, wie in der Ansicht B-B gekennzeichnet, angeordnet. Diese Anordnung soll Zusatzmomente im Prüfkörper verhindern.

Der Prüfkörper muss aufgrund der exzentrischen Lasteinleitung in horizontaler Richtung gehalten werden (siehe Auflagersituation für die Variante gekreuzt). Die somit entstehende Horizontalauflegerkraft  $H$  wird im Abstand  $a_p$  vom Hirnholzende bis zur Mitte der Auflagerfläche angenommen.

Die Krafteinleitung erfolgt durch eine Druckkraft auf das rechte Bauteil. Um eine freie Verschiebung des rechten Bauteils zu gewährleisten, werden am Prüfkörper und an der Auflagerlagerung jeweils Teflonstreifen befestigt. Die Schraubenspitze sowie der Schraubenkopf befinden sich außerhalb des Prüfkörpers, damit die gesuchte Steifigkeit von beiden Komponenten nicht beeinflusst wird.

Laut dem Fachwerkmodell von [1] und [2] wird bei Variante geneigt eine zusätzliche parallel zur Fuge wirkende Kraftkomponente durch die rechtwinklig zur Fuge wirkende Druckkraftkomponente aus der Schraubkraft über Reibung aktiviert. Aufgrund der Auflagersituation kommt es durch die Auflagerkraft  $H$  zu einer weiteren Laststeigerung durch Reibung.

Der Anteil der Abscherkomponente der Schraube wird vernachlässigt.

Das Kräftegleichgewicht für die Variante geneigt ist in Bild 4-4 auf der linken Seite abgebildet. Aus dieser Überlegung beträgt die maximal übertragbare Kraft  $F_{\max,1}$  für die Variante geneigt nach Gleichung (4):

$$F_{\max,1} = 2 \cdot F_{ax,||} + 2 \cdot \mu \cdot F_{ax,\perp} + \mu \cdot \frac{F_{\max,1} \cdot b_p}{(\ell_p - 2 \cdot a_p)} \quad (4)$$

Mit

$F_{ax,||} = F_{ax} \cdot \cos \alpha$       Kraftkomponente der axialen Schraubkraft  $F_{ax}$   
parallel zur Fuge

$\mu$       Reibbeiwert

$F_{ax,\perp} = F_{ax} \cdot \sin \alpha$       Kraftkomponente der axialen Schraubkraft  $F_{ax}$   
senkrecht zur Fuge

$b_p$       Prüfkörperbreite (siehe Bild 4-3)

$\ell_p$       Prüfkörperlänge (siehe Bild 4-3)

$a_p$       Abstand des horizontalen Auflagerpunkt, gemessen  
jeweils von der Hirnholzseite (siehe Bild 4-3)

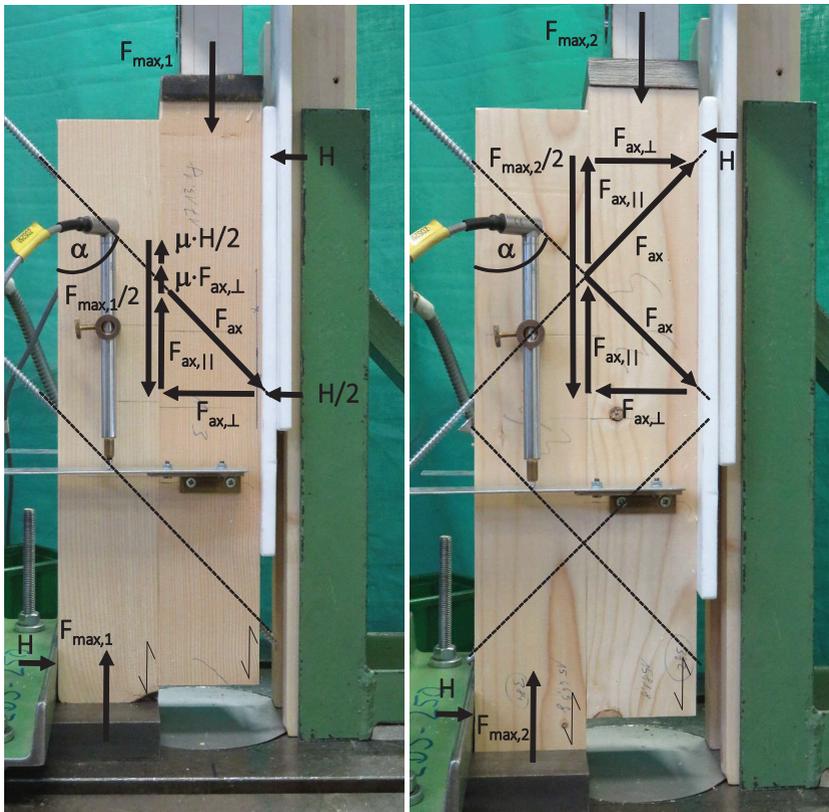


Bild 4-4 Kräftegleichgewicht des Druckscherversuchs Variante geneigt (links) und Variante gekreuzt (rechts)

Für die Variante gekreuzt wird angenommen, dass die Anteile der Schraubenkräfte rechtwinklig zur Faser sich gegenseitig aufheben und aus diesem Grund keine zusätzliche Laststeigerung durch Reibung erfolgt. Des Weiteren wird angenommen, dass die Auflagerkraft  $H$  ohne Aktivierung von Reibung über die Druckschrauben aufgenommen wird.

Das Kräftegleichgewicht für diese Variante ist in Bild 4-4 rechts veranschaulicht. Die maximale Kraft  $F_{\max,2}$  beträgt nach Gleichung (5):

$$F_{\max,2} = 4 \cdot F_{ax,||} \quad (5)$$

Um alle Kraftkomponenten aus Gleichung (4) zu bestimmen, fehlt die Angabe des Reibbeiwertes  $\mu$ . Das Vorgehen zur Ermittlung des Reibbeiwerts resultiert aus den zuvor beschriebenen Annahmen. Durch die Winkelbeziehung für die Variante gekreuzt kann aus der maximalen Kraft  $F_{\max,2}$  die reine Ausziehkraft  $F_{ax}$  berechnet werden. Nach Einsetzen der so berechneten Ausziehkraft in die Gleichung (4) und einer anschließenden Umformung, kann der Reibbeiwert durch Gleichung (6) bestimmt werden.

$$\mu = \frac{F_{\max,1} - \frac{F_{\max,2}}{2}}{\frac{F_{\max,2}}{2} \cdot \tan \alpha + \frac{F_{\max,1} \cdot b_p}{h_p - 2 \cdot a_p}} \quad (6)$$

Die Voraussetzung für dieses Vorgehen ist, dass die Prüfkörper der Variante geneigt und gekreuzt aus demselben Holz hergestellt sind. Da dies nur bedingt möglich ist, wird die Rohdichte als Richtwert herangezogen.

Die Holzauswahl erfolgt so, dass die Prüfkörper der beiden Varianten geneigt und gekreuzt aus Hölzern mit einer ähnlichen Rohdichte hergestellt wurden. Damit wird für jeden Versuchskörper der Variante geneigt ein Reibbeiwert bestimmt.

Direkt nach der Versuchsdurchführung wird für alle Versuchskörper die Rohdichte und Holzfeuchte ermittelt und anhand der Rohdichteergebnisse überprüft, ob die zuvor zugeteilten Versuche der Variante geneigt und gekreuzt zusammenpassen. Bei großen Rohdichteabweichungen erfolgt eine Neusortierung zur Bestimmung des Reibbeiwerts.

Die Zuteilung der Versuche der Varianten geneigt zu gekreuzt ist in

Tabelle A6 Anlage 2 (S. 100) aufgeführt.

Die Durchführung und Auswertung der Versuche erfolgt wie in Kapitel 4.1 beschrieben. Zur Ermittlung der Verbindungssteifigkeit  $k_s$  wird die Relativverschiebung der beiden Holzbauteile zueinander durch zwei induktive Wegaufnehmer, die auf beiden Seiten des Prüfkörpers befestigt sind, gemessen (siehe Bild 4-3) und anschließend gemittelt. Die Verbindungssteifigkeit  $k_s$  entspricht der gesamten Steifigkeit der Verbindung parallel zur Fuge für zwei Schrauben bzw. zwei Schraubenkreuze.

Zur Bestimmung der axialen Steifigkeit  $k_{ax}$ , der Steifigkeit parallel zur Schraubenachse pro Anschlussseite, muss  $k_s$  umgerechnet werden. Die Umrechnung erfolgt mit dem Prinzip der virtuellen Kräfte. Die Vorgehensweise wird in [3] S.391 ff. für das Beispiel eines Schraubenkreuzes hergeleitet. Die axiale Steifigkeit  $k_{ax}$  pro Anschlussseite für die Variante gekreuzt kann mit Gleichung (7) unter Annahme, dass die Einbindetiefe  $\ell_{ef}$  in beiden Bauteilen gleich lang ist und keine Reibungseinflüsse vorhanden sind, berechnet werden.

$$k_{ax} = \frac{k_s}{2 \cdot \cos^2 \alpha} \quad (7)$$

Für die Variante geneigt wird das gleiche Prinzip angewendet und die Umrechnung erfolgt mit Gleichung (8).

$$k_{ax} = \frac{k_s}{\cos^2 \alpha} \quad (8)$$

Wie zuvor beschrieben enthält die Variante geneigt einen Reibungsanteil, verursacht durch die Schraubenkraftkomponente parallel zur Fuge und die Auflagerkraft  $H$ . Da diese in Abhängigkeit mit der einwirkenden aufgebrachten Kraft  $F$  stehen, erhöht sich die Reibungskraft mit zunehmender Last und wirkt damit wie eine linear-elastische Feder. Bild 4-5 stellt auf der linken Seite das angenommene Federmodell für die Druckscherversuche der Variante geneigt da. Für die Variante gekreuzt wird angenommen, dass keine Reibung vorhanden ist. Das Federmodell ist auf der rechten Seite im Bild 4-5 aufgeführt.

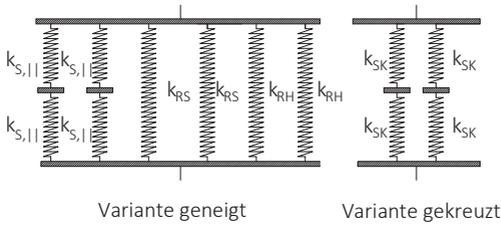


Bild 4-5 Federmodell für die Variante geneigt und gekreuzt

Aus diesen Überlegungen berechnet sich die Verbindungssteifigkeit  $k_s$  für die Variante geneigt mit der Gleichung (9) und für die Variante gekreuzt mit der Gleichung (10).

$$k_s = k_{s,I} + 2 \cdot k_{RS} + 2 \cdot k_{RH} \quad (9)$$

$$k_s = k_{SK} \quad (10)$$

Mit

- $k_{s,I}$  Steifigkeit der Schrauben einer Anschlussseite parallel zur Fuge
- $k_{RS}$  Steifigkeit der Reibung aus der senkrecht zur Fuge wirkenden Schraubenkraftkomponente
- $k_{RH}$  Steifigkeit der Reibung aus der Auflagerkraft H
- $k_{SK}$  Steifigkeit des Schraubenkreuzes einer Anschlussseite parallel zur Fuge

Um eine reine axiale Steifigkeit ohne Reibeinflüsse zu erhalten, muss der Anteil der Reibung abgezogen werden. Die Reibungsfedern  $k_{RS}$  und  $k_{RH}$  wirken parallel zu den Schraubenfedern, somit ändert sich nur die Kraftverteilung und die Verformung für die parallel geschalteten Federn ist gleich groß.

Mit diesen Vorüberlegungen wird die Verbindungssteifigkeit mit der reinen Ausziehungskomponente der Schraube  $F_{ax,||}$  parallel zur Fuge ermittelt.  $F_{ax,||}$  berechnet sich nach einer Umformung der Gleichung (4) mit der Gleichung (11).

$$F_{ax,||} = \frac{F_{max,1} \cdot \left( 1 - \frac{\mu \cdot b_p}{(l_p - 2 \cdot a_p)} \right)}{2 \cdot (1 + \mu \cdot \tan \alpha)} \quad (11)$$

Für die Umrechnung von  $F_{max,1}$  in  $F_{ax,||}$  wird  $F_{max,1}$  mit dem Term  $f_r$  (siehe Gleichung (12)) multipliziert. Der Faktor  $\frac{1}{2}$  in Gleichung (11) ergibt sich aus der Schraubenanzahl von zwei Schrauben bei einer Variante geneigt, da die Schraubenanzahl in Gleichung (8) schon berücksichtigt ist, entfällt dieser.

$$f_r = \frac{\left( 1 - \frac{\mu \cdot b_p}{(l_p - 2 \cdot a_p)} \right)}{(1 + \mu \cdot \tan \alpha)} \quad (12)$$

Zur Berücksichtigung des Reibeinflusses auf die axiale Steifigkeit  $k_{ax}$  wird anschließend die Gleichung (8) mit dem Term  $f_r$  multipliziert und man erhält die Gleichung (13).

$$k_{ax} = \frac{k_s \cdot \left( 1 - \frac{\mu \cdot b_p}{(l_p - 2 \cdot a_p)} \right)}{\cos^2 \alpha \cdot (1 + \mu \cdot \tan \alpha)} \quad (13)$$

Nach der Versuchsdurchführung werden der Einschraubwinkel und die Einbindtiefe gemessen. In den Ergebnistabellen in der Anlage 2 sind die Mittelwerte der gemessenen Winkel  $\alpha_{Labor}$  und die Einbindtiefe  $l_{ef,Labor}$  für jeden Versuch angegeben. Wenn eine absolute Abweichung von  $1,5^\circ$  des Sollwinkels vom gemessenen Winkel überschritten wird, erfolgt die Auswertung des Reibbeiwerts und der axialen Steifigkeit mit dem tatsächlichen Winkel  $\alpha_{Labor}$ . Da in diesem Fall für die Variante geneigt und gekreuzt unterschiedliche Winkel vorhanden sein können, wird die Gleichung (6) um die Winkel  $\alpha_1$  für Variante geneigt und  $\alpha_2$  für Variante gekreuzt erweitert. Der Reibbeiwert wird anschließend mit der erweiterten Gleichung (14) berechnet.

$$\mu = \frac{F_{\max,1} - \frac{F_{\max,2} \cdot \cos \alpha_1}{2 \cdot \cos \alpha_2}}{\frac{F_{\max,2}}{2 \cdot \cos \alpha_2} \cdot \sin \alpha_1 + \frac{F_{\max,1} \cdot b_p}{h_p - 2 \cdot a_p}} \quad (14)$$

### 4.3 Diagonalscherversuche

Eine weitere Methode zur Bestimmung der axialen Steifigkeit von Vollgewinde-schrauben ist mittels Diagonalscherversuche. Diese sind eine Abwandlung der Druckscherversuche. Bild 4-6 zeigt die Prüfgeometrie und den Versuchsaufbau.

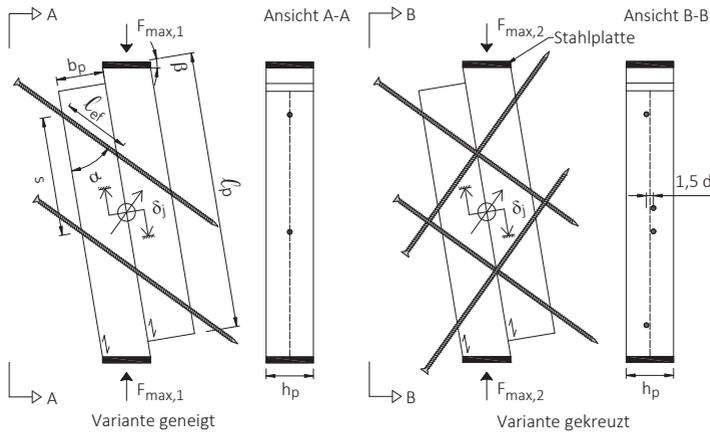


Bild 4-6 Prüfmethode – Diagonalscherversuch

Die Prüfkörper werden so konzipiert, dass die Wirkungslinie der eingeleiteten Kraft durch den Schwerpunkt des Prüfkörpers verläuft. Aus diesem Grund werden bei diesem Prüfaufbau keine horizontalen Auflagerungen benötigt. Durch die Einleitung der Druckkraft unter einem Winkel  $\beta$  zur Faserrichtung erhält man eine Kraftkomponente  $F_{\max,||}$  parallel und  $F_{\max,\perp}$  rechtwinklig zur Fuge (Gleichungen (15)).

$$F_{max,||} = F_{max} \cdot \cos \beta \quad F_{max,\perp} = F_{max} \cdot \sin \beta \quad (15)$$

Die geometrischen Gegebenheiten werden wie bei den Druckscherversuchen ausgeführt. Ebenfalls wird eine Variante geneigt und gekreuzt untersucht. Die Berechnung der zu übertragbaren Kraft dieser Prüfkörper kann mit der gleichen Überlegung wie für die Druckscherversuche erfolgen. Die Maximalkraft parallel zur Fuge  $F_{max,1,||}$  der Variante geneigt und  $F_{max,2,||}$  der Variante gekreuzt berechnet sich somit mit Gleichung (16) und (17). Das Kräftegleichgewicht der Variante geneigt und gekreuzt ist in Bild 4-7 dargestellt.

$$F_{max,1,||} = 2 \cdot F_{ax,||} + 2 \cdot \mu \cdot F_{ax,\perp} \cdot \tan \alpha + \mu \cdot F_{max,1,\perp} \cdot \tan \beta \quad (16)$$

$$F_{max,2,||} = 4 \cdot F_{ax,\perp} \quad (17)$$

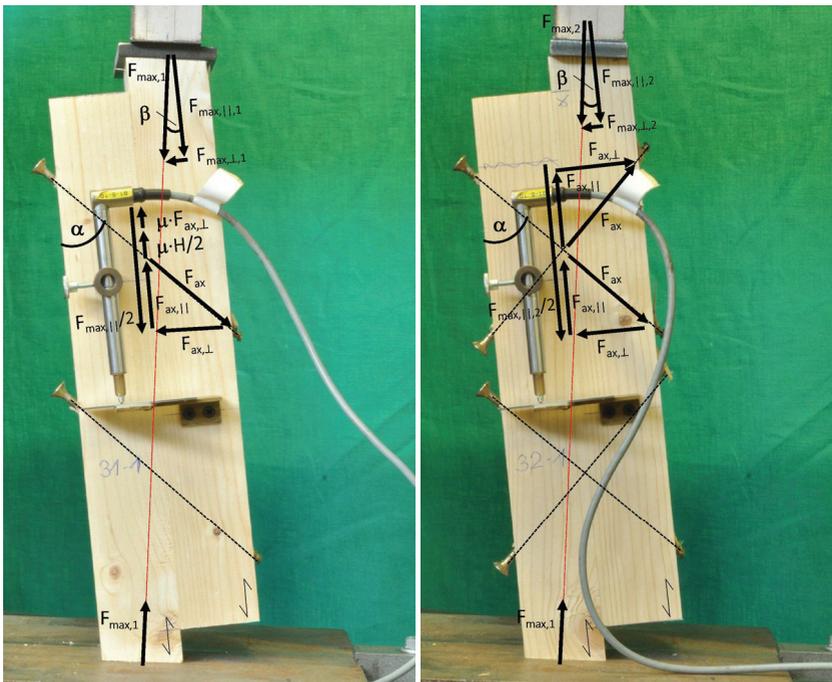


Bild 4-7 Kräftegleichgewicht der Diagonalscherversuche Variante geneigt (links) und Variante gekreuzt (rechts)

Der Reibbeiwert  $\mu$  wird mit der gleichen Herangehensweise wie für die Prüfmethode der Druckscherversuche abgeschätzt und wird mit Gleichung (18) berechnet.

$$\mu = \frac{F_{\max,1||} - \frac{F_{\max,2||}}{2}}{\frac{F_{\max,2||}}{2} \cdot \tan \alpha + F_{\max,1||} \cdot \tan \beta} \quad (18)$$

Die Versuchsdurchführung und Auswertung erfolgt wie in Kapitel 4.1 beschrieben. Die Verbindungssteifigkeit  $k_s$  wird bei dieser Prüfkörpergeometrie mit der Kraft  $F_{\max,||}$  parallel zur Fuge (Gleichung (15)) berechnet. Die Verschiebung entspricht der Relativverschiebung der beiden Holzbauteile zueinander, die durch den gemittelten Weg zweier induktiver Wegaufnehmer, die auf beiden Seiten des Prüfkörpers befestigt sind (siehe Bild 4-6), erfasst wird.

Die axiale Steifigkeit wird für die Variante geneigt und gekreuzt durch Gleichung (19) bzw. (20) ermittelt. Die Herleitung der Gleichungen erfolgt analog zu den Druckscherversuchen.

$$k_{ax} = \frac{k_s \cdot (1 - \mu \cdot \tan \beta)}{\cos^2 \alpha \cdot (1 + \mu \cdot \tan \alpha)} \quad (19)$$

$$k_{ax} = \frac{k_s}{2 \cdot \cos^2 \alpha} \quad (20)$$

Nach der Versuchsdurchführung werden der tatsächliche Einschraubwinkel und die tatsächliche Einbindetiefe gemessen, die in Anlage 3 als Mittelwert eines Versuchskörpers in den Ergebnistabellen aufgeführt sind. Bei Abweichungen vom Sollwinkel ab  $1,5^\circ$  wird die axiale Steifigkeit mit dem tatsächlichen Winkel und der Reibbeiwert mit der Gleichung (21) bestimmt.  $\alpha_1$  entspricht dem Winkel für die Variante geneigt und  $\alpha_2$  für die Variante gekreuzt.

$$\mu = \frac{F_{\max,1||} - \frac{F_{\max,2||} \cdot \cos \alpha_1}{2 \cdot \cos \alpha_2}}{\frac{F_{\max,2||}}{2 \cdot \cos \alpha_2} \cdot \sin \alpha_1 + F_{\max,1||} \cdot \tan \beta} \quad (21)$$

## 4.4 Ausziehversuche

Die dritte aufgeführte Prüfmethode zur Ermittlung der axialen Steifigkeit von Vollgewindeschrauben ist der Ausziehversuch. Die Geometrie des Prüfkörpers wird in Anlehnung an DIN EN 1382 gewählt und ist in Bild 4-8 mit dem zugehörigen Versuchsaufbau dargestellt.

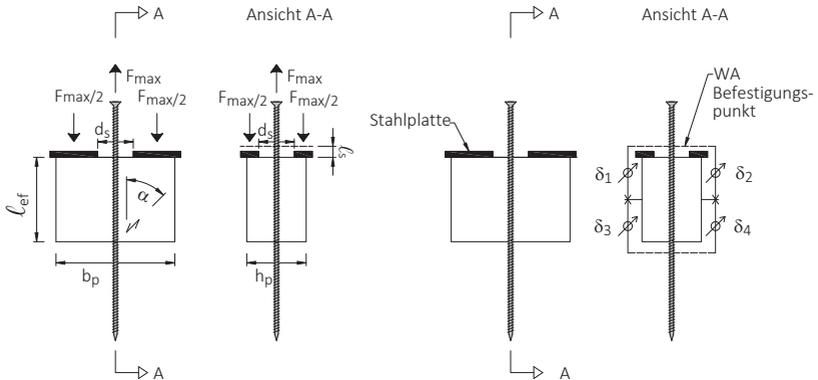


Bild 4-8 Prüfmethode – Ausziehversuch

Abhängig vom Schraubenkopf erfolgt die Kräfteinleitung entweder über eine Hülse, in die der Schraubenkopf eingehängt und anschließend gezogen wird oder über eine Einspannung des Gewindes. Der Holzprüfkörper wird durch eine Stahlplatte und seitlich darauf angebrachte Profile gehalten, die am Prüfmaschinentisch befestigt sind. Die Stahlplatte besitzt eine Öffnung mit einem Durchmesser von ca.  $d_s = 6d$ , um ein unbeeinflusstes Herausziehen der Schraube zu gewährleisten.

Die Wahl der Wegmessung beruht auf den Ergebnissen einer Short Term Scientific Mission der COST Action FP1402 [4]. Im Rahmen dieses Forschungsauftrags wurden drei unterschiedliche Arten von Wegmessungen für einen Ausziehversuch untersucht. Die Wegmessung erfolgte durch sechs induktive Wegaufnehmer. Es wurden die Relativverschiebung zwischen Schraube und Stahlplatte (WM1) und die Relativverschiebung der Schraube des oberen

(WM2) und unteren Teils (WM3) zur Schwerelinie des Prüfkörpers, identisch zur Wegmessung wie sie in Bild 4-8 dargestellt ist, gemessen.

In Bild 4-9 sind die untersuchten Wegmessungen dargestellt. Die Zuordnung der einzelnen Wegmessungen zu den Bezeichnungen WM1, WM2 und WM3 wird im Folgenden aufgeschlüsselt.

- WM1:  $\delta_{1,TUG}$  und  $\delta_{2,TUG}$
- WM2:  $\delta_{1,KIT}$  und  $\delta_{2,KIT}$
- WM3:  $\delta_{3,KIT}$  und  $\delta_{4,KIT}$

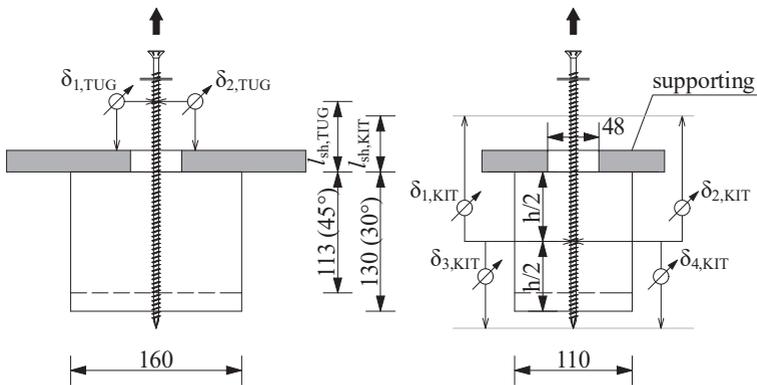


Bild 4-9 Versuchsaufbau aus [4]

Bild 4-10 zeigt exemplarisch die Last-Verschiebungskurve für alle drei gemittelten Wegmessungen. Aus diesem Bild geht hervor, dass durch die Wegmessung gemäß WM1 geringere Steifigkeiten ermittelt wurden als mit WM2. Dies spiegelt sich in allen innerhalb des Forschungsauftrags durchgeführten Versuchen wider.

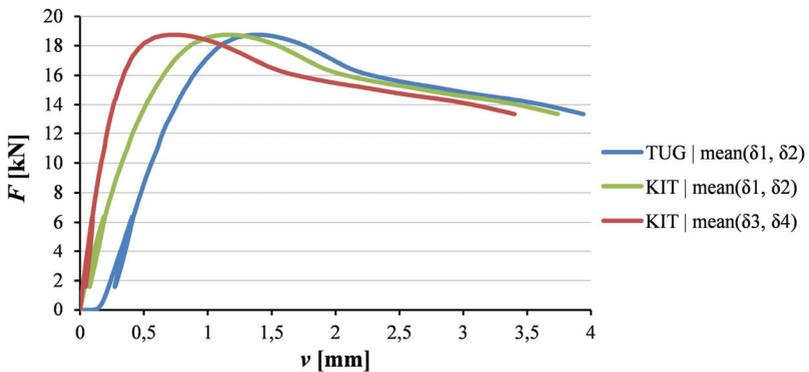


Bild 4-10 Last-Verschiebungskurven aus [4]

Ein Grund hierfür könnten durch die Wegmessung WM1 zusätzlich enthaltene Eindrückungen infolge des Anlegens des Holzprüfkörpers an die Stahlplatte sein.

Im Weiteren wird ersichtlich, dass durch die Wegmessung WM3 die größten Steifigkeitswerte ermittelt werden. Es wird die Annahme getroffen, dass die Normalspannung in der Schraube im Bereich oberhalb des Prüfkörpers bis zur Holzfläche konstant ist, sich innerhalb des Prüfkörpers linear abbaut und unterhalb des Prüfkörpers Null beträgt. Die freie Stahldehnung, die oberhalb des Prüfkörpers mitgemessen wird, wird von den Wegmessungen WM1 und WM2 abgezogen.

Die Wegmessung WM3 enthält keine freie Stahldehnung. Mit dieser Wegmessung wird somit die reine Verschiebung der Schraube relativ zum Holz gemessen. Nun ist die Frage, welche Wegmessung relevant ist. Betrachtet man den Anwendungsfall eines nachgiebig verbundenen Biegeträgers, bei dem zur Berechnung die Fugensteifigkeit benötigt wird, beinhaltet diese Fugensteifigkeit die Stahldehnung und die Nachgiebigkeit des Holzes auf Herausziehen der Schraube. Somit ist die Wegmessung WM2 relevant.

Die Art der Wegmessung für die Ausziehversuche innerhalb dieses Forschungsvorhabens wird rechts im Bild 4-8 veranschaulicht. Sie erfolgt durch vier induktive Wegaufnehmer. Es wird einmal die Relativverschiebung zwischen der

Schraube oberhalb des Prüfkörpers und den Schwerpunkt des Prüfkörpers ( $\delta_1$  und  $\delta_2$ ) entsprechend der Wegmessung WM2 gemessen. Zur Vollständigkeit wird auch der Weg zwischen der Schraube unterhalb des Prüfkörpers und den Schwerpunkt des Prüfkörpers ( $\delta_3$  und  $\delta_4$ ) entsprechend der Wegmessung WM 3 mitgemessen. Die Wegaufnehmer sind an der Schraube befestigt (siehe gestrichelte Linie im Bild 4-8).

Die Versuchsdurchführung und die Auswertung erfolgte wie in Kapitel 4.1 beschrieben. Für die Auswertung der Verbindungssteifigkeit  $k_s$  werden jeweils die gemessenen Wege  $\delta_1, \delta_2$  für eine obere Verbindungssteifigkeit  $k_{s,o}$  und  $\delta_3, \delta_4$  für eine untere Verbindungssteifigkeit  $k_{s,u}$  gemittelt und herangezogen. Die somit ermittelte Verbindungssteifigkeit  $k_{s,o}$  entspricht der axialen Steifigkeit  $k_{ax}$ . Die Wegaufnehmerbefestigung an der Schraube befindet sich aus Montagegründen in einem gewissen Abstand zur Prüfkörperober- bzw. unterkante. Somit beinhalten die Wegmessungen  $\delta_1$  und  $\delta_2$  die freie Stahldehnung. Für die Bestimmung der Verbindungssteifigkeit  $k_{s,o}$  wird daher die Stahldehnung von den gemessenen Verschiebungen  $\delta_1$  und  $\delta_2$  abgezogen (siehe Gleichung (22)). Die hierzu benötigte Normalspannung  $\sigma_{ax}$  der Schraube wird mit der Kernfläche der Schraube berechnet.

$$v = \frac{\delta_1 + \delta_2}{2} - \frac{\sigma_{ax}}{E_s} \cdot \ell_s \quad (22)$$

Mit

$v$	Mittelwert der Verschiebungen
$\delta_j$	Verschiebung eines induktiven Wegaufnehmers $j$
$E_s$	E-Modul Stahl 210 000 N/mm <sup>2</sup>
$\ell_s$	Länge zwischen Oberkante des Prüfkörpers und der Wegaufnehmerbefestigung

## 5 Nachweis der Eignung der Prüfmethode – Scherversuche

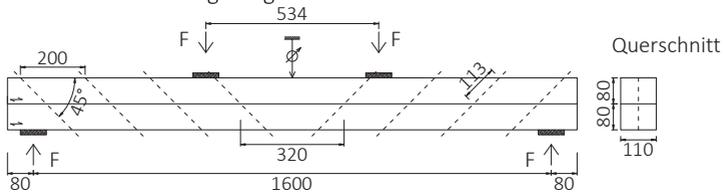
Zur Überprüfung der Eignung der gewählten Prüfmethode Scherversuche wurden jeweils 20 Druckscherversuche und geometrisch gleich ausgeführte nachgiebig verbundene Biegeträger geprüft. Die Fugensteifigkeit der nachgiebig verbundenen Biegeträger wurde anschließend durch geeignete Verfahren aus der Mittendurchbiegung zurückgerechnet und den Ergebnissen der Verbindungssteifigkeit der Druckscherversuche gegenübergestellt.

Innerhalb der jeweils 20 Versuchsreihen wurden die Einbindetiefe (113 mm und 130 mm) und der Einschraubwinkel (45° und 30°) variiert. Für die Druckscherversuche wurde als Verbindungsmittel eine Vollgewindeschraube 8 x 430 mm mit einem Kerndurchmesser von 5,1 mm, der durch fünf stichprobenartige Messungen ermittelt wurde, verwendet. Die Biegeversuche wurden mit einem identischen Schraubentyp 8 x 350 mm ausgeführt. Der Kopf sowie die Spitze der Schraube befanden sich außerhalb der Prüfkörper.

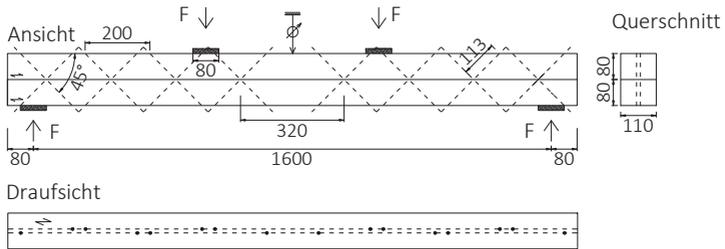
### 5.1 Biegeversuche

Es wurden vier Versuchsreihen mit je fünf nachgiebig verbundenen Biegeträgern geprüft. Die Geometrie und der Versuchsaufbau der Versuchsreihen B1 bis B4 ist im Bild 5-1 dargestellt. Die Versuche wurden anhand von Vier-Punkt-Biegeversuchen in Anlehnung an DIN EN 408:2010 durchgeführt. Bild 5-2 zeigt einen Versuchskörper (B1-1) vor der Versuchsdurchführung. Die Spannweite der Biegeträger betrug 10 h.

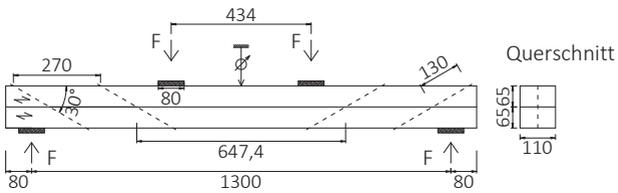
Reihe B1 - Variante geneigt



Reihe B3 - Variante gekreuzt



Reihe B2 - Variante geneigt



Reihe B4 - Variante gekreuzt

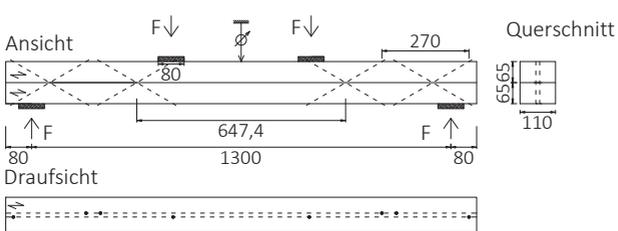


Bild 5-1 Versuchsaufbau der Reihen B1 bis B4, Maße in mm

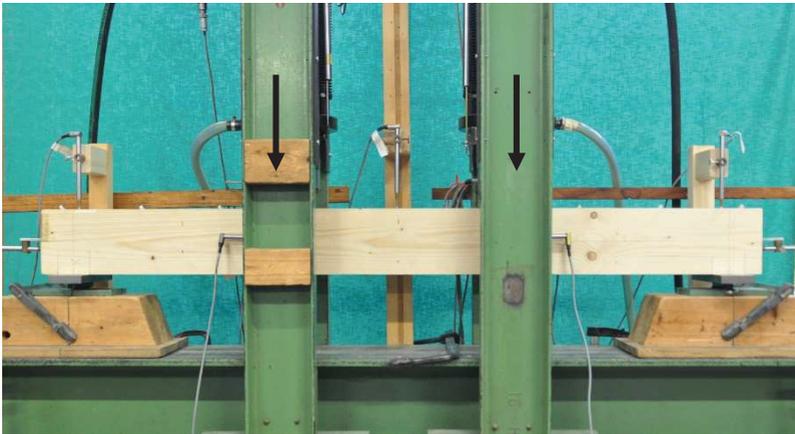


Bild 5-2 Prüfkörper vor der Versuchsdurchführung (Versuch B1-1)

Die Belastungsgeschwindigkeit wurde so gewählt, dass die Höchstlast nach 5 min ( $\pm 2$  min) erreicht wurde. Die Krafteinleitung erfolgte in den Drittelpunkten.

Ebenfalls wie bei den Druckscherversuchen wurde jeweils eine Variante mit einer geneigten und einer gekreuzten Schraubenanordnung geprüft.

Die Prüfkörper wurden aus Vollholz hergestellt, die mittlere Rohdichte betrug  $451 \text{ kg/m}^3$  ( $v = 11,5 \%$ ) und die mittlere Holzfeuchte  $14,7 \%$  ( $v = 7,33 \%$ ). Zur Ermittlung der Fugensteifigkeit wurde die Mittendurchbiegung  $w_m$  des Biegeträgers mit einem induktiven Wegaufnehmer gemessen. Beispielhaft sind in Bild 5-3 die Last-Verschiebungskurven der Versuchsreihe B1 bis zu einer Kraft von 18 kN aufgeführt. Die weiteren Last-Verschiebungskurven der Biegeversuche sind im Anhang 1 in Bild A2 bis Bild A5 (S. 97 bis 98) dargestellt.

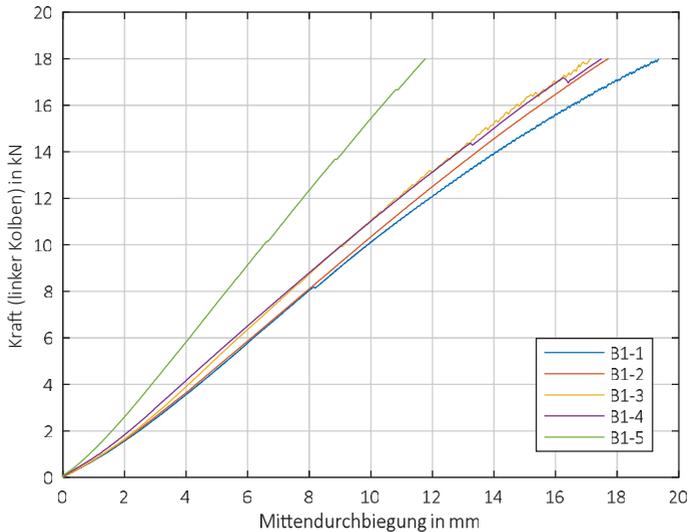


Bild 5-3 Last-Verschiebungskurven der Reihe B1

Vor der Montage der Prüfkörper wurde der dynamische E-Modul der Einzelbauteile anhand einer Längsschwingung (Longitudinalschwingung) gemessen. Dieser wird später für die Auswertung der Fugensteifigkeit herangezogen.

Die effektive Biegesteifigkeit wird innerhalb des linearen Bereichs zwischen 10 % und 40 %  $F_{max}$  anhand der Gleichung (23) berechnet.

$$(EI)_{ef} = \frac{0,4 \cdot F_{max} - 0,1 \cdot F_{max}}{w_{m,04} - w_{m,01}} \cdot \frac{23}{648} \cdot \ell^3 \quad (23)$$

Mit

- $F_{max}$  Maximallast
- $w_{m,04}$  Mittendurchbiegung bei 40% der Maximalkraft
- $w_{m,01}$  Mittendurchbiegung bei 10% der Maximalkraft
- $\ell$  Stützweite zwischen den Auflagerpunkten

Tabelle 5-1 beinhaltet die Mittelwerte der Ergebnisse der nachgiebig verbundenen Biegeträger mit den zugehörigen Variationskoeffizienten innerhalb einer Versuchsreihe. Die Ergebnisse aller Biegeversuche sind im Anhang 1 in Tabelle A1 bis Tabelle A4 (S. 95 bis 96) aufgeführt.

Tabelle 5-1 Ergebnisse der Biegeversuche B1–B4

Reihe	$F_{\max,L}$ in kN	$F_{\max,R}$ in kN	$E_{dyn}$ in N/mm <sup>2</sup>	$h_i$ in mm	$b_i$ in mm	$(E)_{ef}$ in Nmm <sup>2</sup>	$\rho$ in kg/m <sup>3</sup>	$u$ in %
B1	26,5 (23,6 %)	26,8 (23,6 %)	12500 (17,4 %)	80 (0,148 %)	110 (0,115 %)	1,79E+11 (17,6 %)	453 (13,1 %)	14,1 (4,78 %)
B2	21,3 (5,91 %)	21,2 (6,44 %)	11900 (10,2 %)	65 (0,155 %)	110 (0,110 %)	8,87E+10 (6,36 %)	446 (10,9 %)	15,7 (3,44 %)
B3	29,6 (20,9 %)	29,8 (21,0 %)	13200 (9,75 %)	80 (0,172 %)	110 (0,075 %)	2,16E+11 (11,1 %)	460 (12,5 %)	13,7 (7,69 %)
B4	23,0 (17,9 %)	23,0 (16,2 %)	12000 (11,1 %)	65 (0,062 %)	110 (0,207 %)	1,11E+11 (10,4 %)	444 (10,6 %)	15,2 (2,70 %)

Das Versagensbild über alle Versuchsreihen war identisch. Bevor es zum Biegezugversagen des Trägers kam, war eine große gegenseitige Verschiebung der verbundenen Bauteile zu beobachten, wie in Bild 5-4 (Versuch B2-1) illustriert wird. Bild 5-5 zeigt den Biegezugbruch für den Versuch B1-1.

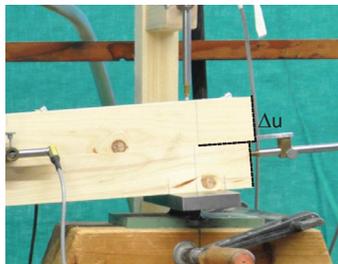


Bild 5-4 Verschiebung der nachgiebig verbundenen Bauteile zueinander (Versuch B2-1)



Bild 5-5 Versagensbild (Versuch B1-1)

## 5.2 Druckscherversuche

Die zum Vergleich durchgeführten Druckscherversuche entsprechen den Versuchsreihen 1 bis 4. Die Geometrie ist dem Bild 5-6 und Bild 5-7 zu entnehmen.

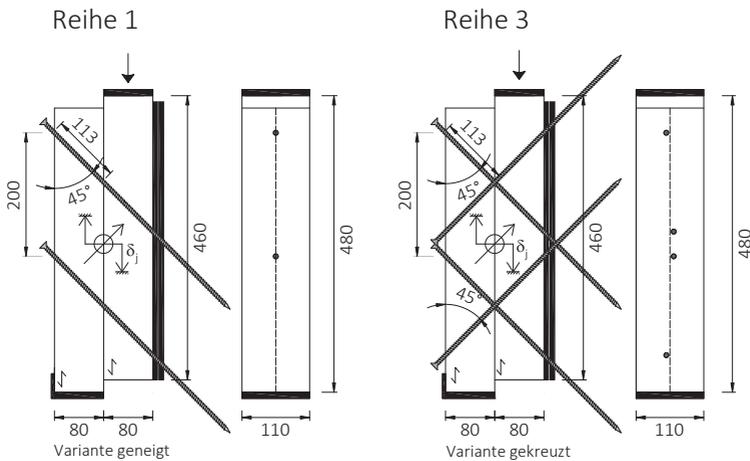


Bild 5-6 Versuchsaufbau der Reihen 1 und 3

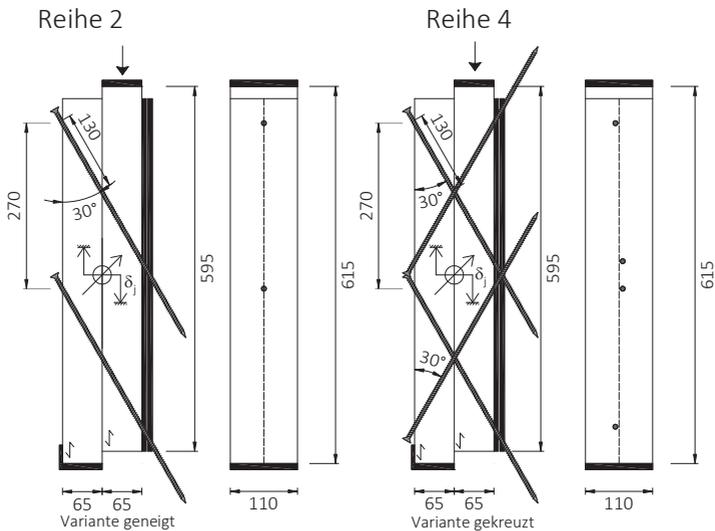


Bild 5-7 Versuchsaufbau der Reihen 2 und 4

Die Prüfkörper wurden aus Vollholz hergestellt. Die mittlere Rohdichte betrug  $410 \text{ kg/m}^3$  ( $v = 8,40 \%$ ) und die mittlere Holzfeuchte  $12,2 \%$  ( $v = 3,75 \%$ ). Die Versuche wurden mit dem beschriebenen Vorgehen in Kapitel 4.1 (S. 15f.) durchgeführt und ausgewertet.

Tabelle 5-2 stellt die Mittelwerte der Ergebnisse der Druckscherversuche zusammen mit den dazugehörigen Variationskoeffizienten. Für den Vergleich der Ergebnisse wird ausschließlich die Fugensteifigkeit bzw. die Verbindungssteifigkeit  $k_s$  benötigt.

Tabelle 5-2 Ergebnisse der Druckscherversuche 1–4

Reihe	$F_{max}$ in kN	$V_{max}$ in mm	$k_s$ in kN/mm	$\rho$ in kg/m <sup>3</sup>	$u$ in %
1	35,9 (18,7 %)	2,55 (10,9 %)	24,2 (14,4 %)	409 (9,18 %)	12,3 (4,47 %)
2*)	39,7 (10,8 %)	1,80 (6,90 %)	33,0 (14,4 %)	412 (8,25 %)	12,5 (3,76 %)
3	48,5 (16,4 %)	1,87 (15,4 %)	44,6 (14,2 %)	412 (9,00 %)	12,2 (3,24 %)
4	62,5 (17,9 %)	1,43 (10,8 %)	70,0 (8,26 %)	407 (10,1 %)	11,9 (1,56 %)

\*) Reihe 2-3 Steifigkeitsauswertung im Bereich zwischen 15 % und 45 %  $F_{max}$

Die Last-Verschiebungskurven sowie die Ergebnistabellen der einzelnen Druckscherversuche sind im Anlage 2 in Bild A7 bis Bild A10 und Tabelle A7 bis Tabelle A16 (S. 95 bis 104) dargestellt.

Die Versagensursache innerhalb der vier Versuchsreihen war gleich. Während der Versuchsdurchführung, war eine Relativverschiebung der beiden Bauteile zueinander zu beobachten (siehe links im Bild 5-8). Nach der Versuchsdurchführung wurde exemplarisch ein Prüfkörper geöffnet (siehe rechts im Bild 5-8). Der geöffnete Prüfkörper weist keine sichtbare Verformung der Schraube auf. Als Versagensursache wird ein Herausziehen der Schraube vermutet.

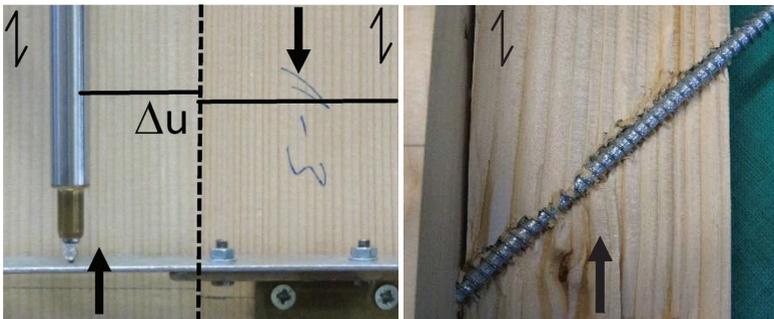


Bild 5-8 Versagensbild links (Versuch 1-3), geöffneter Prüfkörper rechts (Versuch 1-2)

## 5.3 Gegenüberstellung

Für die Gegenüberstellung der Biegeversuche und der Druckscherversuche müssen zuvor die Verbindungssteifigkeiten  $k_s$  der Biegeversuche ermittelt werden.

Die Auswertung erfolgt nach den folgenden zwei Verfahren:

- $\gamma$ -Verfahren
- Schubanalogieverfahren

Das  $\gamma$ -Verfahren ist ein Berechnungsverfahren für nachgiebig verbundene Querschnitte bestehend aus bis zu drei Querschnittsteilen (DIN EN 1995-1-1:2010-12 Anhang B). Über einen Beiwert  $\gamma$ , der zwischen 0 und 1 beträgt, werden die Steineranteile der Einzelteilquerschnitte, die zur Gesamtbiegesteifigkeit des Trägers in Rechnung gezogen werden können, abgemindert.

Das Verfahren gilt für Einfeldträger mit einer sinusförmigen Belastung und kann auf den Anwendungsfall eines Einfeldträgers mit gleichmäßiger Streckenlast angewendet werden. Eine weitere Anforderung ist die konstante oder entsprechend des Querkraftverlaufs abgestufte Verbindungsmittelanordnung über die Trägerlänge. Dabei muss die Bedingung erfüllt sein, dass der maximale Verbindungsmittelabstand  $s_{\max}$  das Vierfache des minimalen Verbindungsmittelabstands  $s_{\min}$  nicht übersteigt. Für eine abgestufte Verbindungsmittelanordnung wird ein effektiver Verbindungsmittelabstand  $s_{\text{ef}}$  nach Gleichung (24) ermittelt.

$$s_{\text{ef}} = 0,75 \cdot s_{\min} + 0,25 \cdot s_{\max} \quad (24)$$

Durch die schräge Anordnung der Verbindungsmittel entsteht in der Mitte des Trägers ein Kreuzungspunkt, der zu einem größeren Verbindungsmittelabstand in der Mitte führt. In Tabelle 5-3 sind die minimalen und maximalen sowie die effektiven Verbindungsmittelabstände innerhalb der Versuchsreihen, die später auch für die Berechnung herangezogen werden, zusammengestellt.

Tabelle 5-3 Verbindungsmittelabstände der Biegeversuche

Reihe	$\ell$	$s_{\min}$	$s_{\max}$	$s_{\text{ef}}$	n	$n_{\text{ef}}$
	in mm	in mm	in mm	in mm		
B1	1600	200	320	230	8	6,96
B2	1300	270	647	364	4	3,57
B3	1600	200	320	230	16 (8*)	6,96*
B4	1300	270	647	364	8 (4*)	3,57*

\* Anzahl der Schraubenkreuze

Für die Auswertung der Verbindungssteifigkeit  $k_s$  nach dem  $\gamma$ -Verfahren wird im ersten Schritt der Wert  $\gamma_1$  ermittelt. Dazu wird die Gleichung (25) zur Ermittlung der wirksamen Biegesteifigkeit nach dem  $\gamma$ -Verfahren für einen nachgiebig verbundenen Biegeträger aus zwei Einzelbauteilen verwendet.

$$(EI)_{\text{ef}} = E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_2 + \gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot a_1^2 + \gamma_2 \cdot E_2 \cdot A_2 \cdot a_2^2 \quad (25)$$

Mit

- $E_i$  E-Modul des Einzelquerschnitts  $i$
- $I_i$  Flächenträgheitsmoment des Einzelquerschnitts  $i$
- $A_i$  Fläche des Einzelquerschnitts  $i$
- $a_i$  Abstand der Schwereachse des Einzelquerschnitts  $i$  von der Spannungsebene

$$\gamma_2 = 1,0$$

Für die E-Moduln der Einzelbauteile ( $E_1$  und  $E_2$ ) werden die zuvor bestimmten dynamischen E-Moduln, die in den Ergebnistabellen in der Anlage in Tabelle A1 bis Tabelle A4 (S. 95–96) aufgeführt sind, herangezogen. Zwischen statischen und dynamischen E-Moduln besteht ein prozentualer Unterschied. Die Untersuchungen in [5] zeigten einen Unterschied von 5,6 % zwischen dem statischen und dynamischen E-Modul, ermittelt aus der Längsschwingung. Innerhalb dieses Forschungsvorhabens wird der Unterschied vereinfacht zu 5 % angenommen. Die wirksamen Biegesteifigkeiten  $(EI)_{\text{ef}}$  entsprechen den Ergebnissen der Auswertung der Biegeversuche nach Gleichung (23) und sind in der Anlage 1 in Tabelle A1 bis Tabelle A4 (S. 95–96) aufgeführt.

Die geometrischen Größen  $h_i$ , die zur Bestimmung von  $A_i$ ,  $I_i$  und  $a_i$  benötigt werden, entsprechen den gemessenen Querschnittsmaßen der einzelnen Bauteile. Nach der Ermittlung von  $\gamma_1$  kann die Verbindungssteifigkeit  $k_{s,\gamma,1}$  über die Gleichung (26) zurückgerechnet werden.

$$k_{s,\gamma,1} = \frac{\pi^2 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot s_{ef} \cdot \gamma_1}{\ell^2 \cdot (1 - \gamma_1)} \quad (26)$$

In Gleichung (26) geht die Verbindungsmittelanzahl  $n$  indirekt durch den Term  $s_{ef}/\ell$  mit ein. Der effektive Verbindungsmittelabstand  $s_{ef}$  für die jeweilige Versuchsreihe ist in Tabelle 5-3 aufgeführt. Mit diesem lässt sich eine effektive Verbindungsmittelanzahl  $n_{ef}$  ermitteln, die nicht in jedem Fall mit der tatsächlich vorhandenen Verbindungsmittelanzahl  $n$  übereinstimmt. In Tabelle 5-3 sind die effektive Verbindungsmittelanzahl  $n_{ef}$  und die tatsächliche Verbindungsmittelanzahl  $n$  für jede Versuchsreihe angegeben. Aus diesem Grund wird eine zweite Auswertungsvariante des  $\gamma$ -Verfahrens angewendet, welches die tatsächliche Verbindungsmittelanzahl  $n$  berücksichtigt, indem der Term  $s_{ef}/\ell$  durch  $1/n$  ersetzt wird (vgl. Gleichung (27)).

$$k_{s,\gamma,2} = \frac{\pi^2 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot \gamma_1}{n \cdot \ell \cdot (1 - \gamma_1)} \quad (27)$$

Die Ergebnisse der Auswertung sind in Tabelle 5-4 aufgeführt.

Als zweites Verfahren zur Auswertung der Verbindungssteifigkeit  $k_s$  wurde das Schubanalogieverfahren nach [6] angewendet. Dieses Verfahren ist auf verschiedenste Arten von Verbundquerschnitten anwendbar. Aus dem realen Verbundträger wird ein ideeller Träger, bestehend aus einem Träger A und B, mit Hilfe eines Stabwerksprogramms simuliert. Dem Träger A werden die Eigenanteile der Biegesteifigkeiten und dem Träger B die Steineranteile der Einzelquerschnitte der Biegesteifigkeiten, die Nachgiebigkeit der Verbindung und die Schubverformungseigenschaften der Einzelquerschnitte zugeteilt. Der Träger A ist dabei schubstarr. Die Verbindung der beiden ideellen Träger A und B erfolgt über dehnstarre Pendelstäbe.

Die Ermittlung der Verbindungssteifigkeit  $k_{s,\text{schub}}$  anhand des Schubanalogieverfahrens erfolgt iterativ in Schritten. Der gesuchte Wert  $k_{s,\text{schub}}$  befindet sich

in der Ersatzschubsteifigkeit  $S^B$  des ideellen Trägers B, die für den beschriebenen Fall mit der Gleichung (28) berechnet wird.

$$\frac{1}{S^B} = \frac{1}{a^2} \cdot \left[ \frac{s}{k_{s,\text{schub}}} + \frac{d_1}{2 \cdot G_1 \cdot b_1} + \frac{d_2}{2 \cdot G_2 \cdot b_2} \right] \quad (28)$$

Mit

a	Abstand der Schwerpunkte der beiden äußeren Schichten
s	Verbindungsmitteleabstand, entspricht $s_{\text{min}}$
$d_i$	Dicke bzw. Höhe der Einzelquerschnitte $i$ , entspricht $h_i$
$G_i$	Schubmodul der Einzelquerschnitte $i$
$b_i$	Breite der Einzelquerschnitte $i$

Die für die Auswertung benötigten Querschnittsabmessungen der Einzelbauteile sind in den Ergebnistabellen in Anlage 1 in den Tabelle A1 bis Tabelle A4 (S. 95–96) aufgeführt. Für den Schubmodul  $G_i$  der Einzelquerschnitte wird ein mittlerer Schubmodul von  $G_{\text{mean}} = 740 \text{ N/mm}^2$  angenommen. Dieser wurde auf Grundlage des ermittelten  $E_{\text{mean,stat.}}$  von  $11.780 \text{ N/mm}^2$  und der mittleren Rohdichte von  $451 \text{ kg/m}^3$  angenommen. Es kann von einer Festigkeitsklasse zwischen C27 und C30 gemäß DIN EN 338:2016-07 ausgegangen werden.  $G_{\text{mean}}$  wird durch eine lineare Interpolation zwischen den Tabellenwerten von C27 und C30 ermittelt.

Im ersten Schritt wird der ideale Träger mit Hilfe eines Stabwerksprogramms mit den Materialkennwerten der tatsächlichen Biegeversuche simuliert. Die Auswertung erfolgt anhand der Geradenverschiebung des Bereiches von 10 %  $F_{\text{max}}$  und 40 %  $F_{\text{max}}$  in den Nullpunkt. Anschließend wird die Belastung von jetzt 30 %  $F_{\text{max}}$  auf das System aufgebracht und der Schubmodul  $G^B$  des ideellen Trägers B so variiert, dass die Durchbiegung, die sich bei einer Belastung von 30 %  $F_{\text{max}}$  bei der Versuchsdurchführung eingestellt hat, erreicht wird. Im nächsten Schritt wird durch den so ermittelten Schubmodul  $G^B$  die Verbindungssteifigkeit  $k_{s,\text{schub}}$  durch Umformung der Gleichung (28) mit Gleichung (29) zurückgerechnet.

$$k_{s,\text{schub}} = \frac{S_{\text{min}}}{\frac{a^2}{S^B} - \frac{d_1}{2 \cdot G_1 \cdot b_1} - \frac{d_2}{2 \cdot G_2 \cdot b_2}} \quad (29)$$

Mit

- $S^B = G^B \cdot (h_B \cdot b_B)$  Ersatzschubsteifigkeit des Trägers B  
 $G^B$  Durch ein Stabwerksprogramm ermittelter Schubmodul des Trägers B  
 $h_B$  Höhe des ideellen Trägers B  
 $b_B$  Breite des ideellen Trägers B

Tabelle 5-4 beinhaltet die gemittelten Ergebnisse der Auswertung des Schubanalgieverfahrens.

Für die Gegenüberstellung der Biegeversuche und der Druckscherversuche wird nur die Verbindungsteifigkeit bezogen auf ein Verbindungsmittel bzw. für die Variante gekreuzt für ein Schraubenkreuz benötigt. Somit muss die Verbindungsteifigkeit  $k_s$  der Druckscherversuche jeweils durch zwei dividiert werden. Die Verbindungsteifigkeit  $k_{s,D}$  bezogen auf eine Schraube bzw. Schraubenkreuz ist in Tabelle 5-4 angeben.

Tabelle 5-4 Gegenüberstellung der Biegeversuche mit den Druckscherversuchen

Reihe	$\gamma_1$	$k_{s,\gamma,1}$ in kN/mm	$k_{s,\gamma,2}$ in kN/mm	$k_{s,\text{schub}}$ in kN/mm	$k_{s,D}$ in kN/mm
B1 / 1	0,102 (10,7 %)	10,7 (18,0 %)	9,27 (18,0 %)	12,5 (18,1 %)	12,1 (14,4 %)
B2 / 2	0,096 (30,9 %)	17,8 (24,4 %)	15,9 (24,4 %)	17,5 (22,1 %)	16,5 (14,4 %)
B3 / 3	0,154 (16,3 %)	17,8 (19,4 %)	15,5 (19,4 %)	21,2 (20,0 %)	22,3 (14,2 %)
B4 / 4	0,172 (7,58 %)	36,9 (14,4 %)	32,9 (14,4 %)	36,6 (12,7 %)	35,0 (8,26 %)

Die Gegenüberstellung der Mittelwerte der Biegeversuche und der Druckscherversuche wird durch das in Bild 5-9 dargestellte Balkendiagramm verdeutlicht. Zusätzlich zu den Mittelwerten ist die Spanne der Werte angegeben.

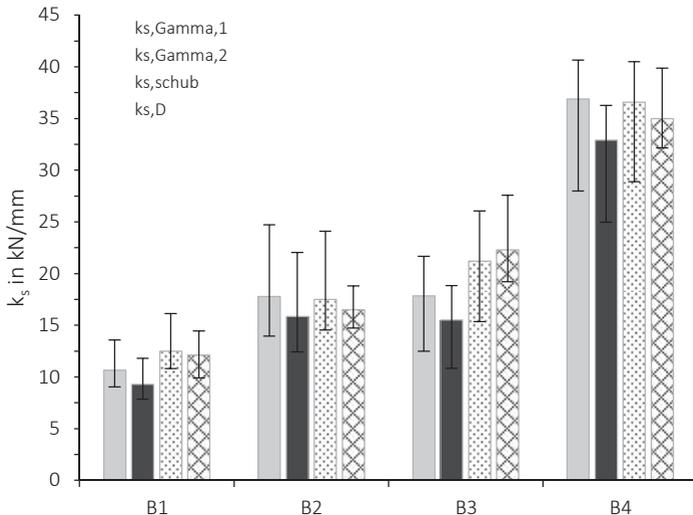


Bild 5-9 Gegenüberstellung der Ergebnisse der Biegeversuche und der Druckscherversuche

Die Auswertung mit Hilfe des Schubanalogieverfahrens ergibt eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Druckscherversuche. Die Abweichungen belaufen sich im Mittel auf 4,63 %. Die Auswertungsvarianten mit dem  $\gamma$ -Verfahren weisen im Mittel größere Abweichungen auf. Die Variante berechnet mit  $s_{ef}(k_{s,\gamma,1})$  weicht im Mittel um 11,3 % und die Variante berechnet mit  $n(k_{s,\gamma,2})$  um 16,0 % ab. Die Ursache für diese größeren Abweichungen ist in der Belastungsart der durchgeführten Vier-Punkt-Biegeversuche zu finden. Das  $\gamma$ -Verfahren stellt für andere Belastungsarten als den Einfeldträger mit sinusartiger Belastung nur eine Näherungslösung dar. Die Gegenüberstellung zeigt, dass die kleinteiligen Prüfkörper der Druckscherversuche den Anwendungsfall eines nachgiebig verbundenen Biegeträgers gut abbilden. Die Bewertung der Eignung der Ausziehversuche erfolgt im späteren Verlauf des Berichts durch die Gegenüberstellung mit den Scherversuchen.

## 6 Parameteranalyse

Die in den abZs und ETAs zu findenden Berechnungsgleichungen weisen eine Abhängigkeit der axialen Steifigkeit von den Parametern Einbindetiefe  $l_{ef}$  sowie Gewindeaußendurchmesser  $d$  auf. Um ein Modell bzw. eine allgemein gültige Berechnungsgleichung für die axiale Steifigkeit zu entwickeln, wurde die Auswirkung möglicher Einflussparameter auf die axiale Steifigkeit untersucht. Die Parameteranalyse erfolgte an kleinteiligen Versuchskörpern mit den nachstehenden Parametern:

- Einbindetiefe  $l_{ef}$
- Gewindeaußendurchmesser  $d$
- Einschraubwinkel  $\alpha$
- Holzfeuchte  $u$
- Vorbohrung

Die Untersuchungen erfolgten anhand der in Kapitel 4 (S.11 ff.) beschriebenen Prüfmethode Druckscher-, Diagonalscher- und Ausziehversuche. Dabei wurde zwischen Druckscher- und Diagonalscherversuchen variiert. In den meisten Fällen wurde parallel zu den Scherversuchen zum Vergleich eine Reihe von Ausziehversuchen durchgeführt. Die Versuchsbezeichnung ist so gewählt, dass eine alleinstehende Zahl einer Scherversuchsreihe entspricht und der dazugehörige Ausziehversuch durch die gleiche Zahl und mit einem „1“ gekennzeichnet ist.

Die Parameter wie das Verhältnis Kerndurchmesser zu Gewindeaußendurchmesser, Gewindesteigung und Spitzenform wurden im Rahmen dieser Parameteranalyse nicht weiter untersucht. Aufgrund der großen Streuungen innerhalb der axialen Steifigkeit wurden Schrauben mit einer ähnlichen Geometrie herangezogen, um einen Unterschied für die vermuteten Hauptparameter wie die Einbindetiefe und den Gewindeaußendurchmesser herauszuarbeiten.

Besonders für Gewindeaußendurchmesser ab 8 mm sind keine großen Variationen für Vollgewindeschrauben der unterschiedlichen Hersteller für den Parameter Verhältnis von Kerndurchmesser zu Gewindeaußendurchmesser zu beobachten. Aus diesem Grund erfolgte keine genauere Betrachtung. Für die kleinteiligen Versuche wurden die in Tabelle 6-1 aufgeführten Vollgewindeschraubentypen verwendet.

Tabelle 6-1 Verwendete Schraubentypen

Typ	d in mm	L in mm	d <sub>k</sub> in mm	Kopfform
A	6	200	3,8	ZK
B	10	400	6,4	SK
C	8	350	4,9	SK
D	8	430	5,1	SK

Die Versuchskörper wurden aus Vollholz hergestellt. Die Hölzer für die Scherversuche hatten eine mittlere Rohdichte von  $\rho_m = 430 \text{ kg/m}^3$  ( $v = 8,55 \%$ ) und diejenigen für die Ausziehversuche von  $\rho_m = 430 \text{ kg/m}^3$  ( $v = 8,34 \%$ ). Die relative Häufigkeitsverteilung der Rohdichte für die Scherprüfkörper ist in Bild 6-1 und für die Ausziehprüfkörper in Bild 6-2 aufgeführt. Die Holzfeuchte mit Ausnahme der Probekörper zur Untersuchung des Holzfeuchteinflusses (Versuchsreihen 9–12 und 9.1–12.1) betrug  $u_m = 12,0 \%$  ( $v = 6,20 \%$ ) für die Scherprüfkörper und  $u_m = 12,5 \%$  ( $v = 4,97 \%$ ) für die Ausziehprüfkörper.

Die ausführliche Darstellung der Versuchsgeometrien, Versuchsergebnissen, sowie die Last-Verschiebungskurven sind in der Anlage 2 und Anlage 3 (S. 99–169) zusammengestellt. Für jede Versuchsreihe der Ausziehversuche werden zwei Diagramme angegeben, für die Wegmessung am oberen sowie am unteren Rand. Die dargestellte Verschiebung am oberen Rand des Prüfkörpers ist eine modifizierte Verschiebung ohne die freie Stahldehnung außerhalb des Holzes. Dementsprechend sind zwei Steifigkeitswerte  $k_{s,u}$  und  $k_{s,o}$  resultierend aus der Wegmessung am unteren bzw. am oberen Rand in den Ergebnistabellen angegeben.

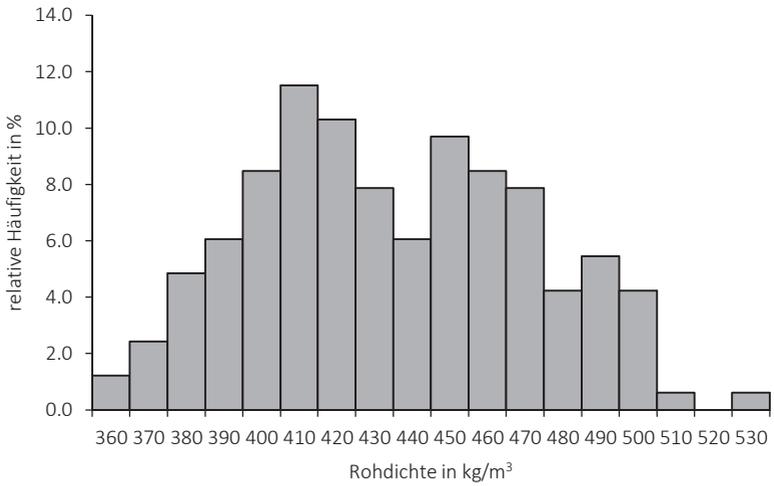


Bild 6-1 Häufigkeitsverteilung der Rohdichte – Scherversuche (165 Werte)

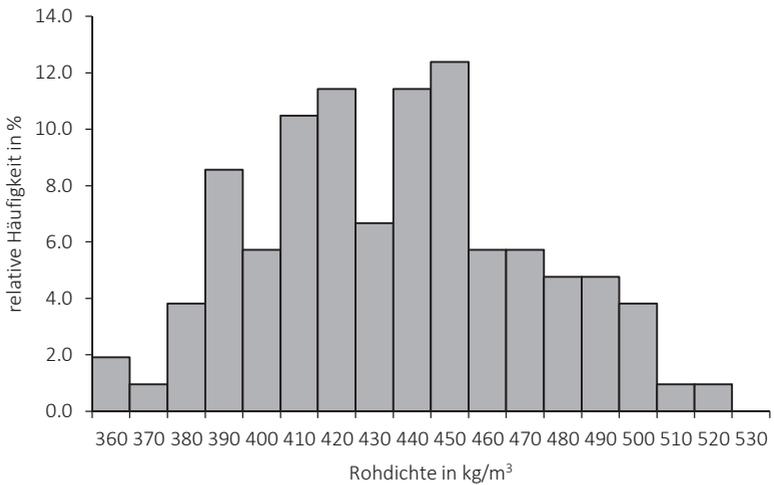


Bild 6-2 Häufigkeitsverteilung der Rohdichte – Ausziehversuche (105 Werte)

Alle Versuchsreihen wurden gemäß dem Vorgehen in Kapitel 4 (S.11 ff.) durchgeführt und ausgewertet. Nach den Versuchsdurchführungen wurden die tatsächlichen Einschraubwinkel und Einbindetiefen an den einzelnen Prüfkörpern gemessen. Diese sind in den Ergebnistabellen in der Anlage 2 und Anlage 3 (S. 101–165) aufgeführt. Wurde eine Abweichung größer als  $1,5^\circ$  vom gemessenen Winkel zum Sollwinkel festgestellt, erfolgt die Auswertung der axialen Steifigkeit und des Reibbeiwerts mit den gemessenen Winkeln.

Im ersten Schritt wird der Einfluss der aufgezählten Parameter einzeln und anschließend zur Findung eines Berechnungsmodells für die axiale Steifigkeit von Vollgewindeschrauben in Kombination betrachtet.

## 6.1 Einfluss der Einbindetiefe

Zur Untersuchung des Einflussparameters der Einbindetiefe  $\ell_{ef}$  auf die axiale Steifigkeit wurden jeweils zehn Diagonalscherversuchsreihen (29–38) und Ausziehversuchsreihen (29.1, 31.1, 1.1, 35.1 und 37.1) herangezogen. Die Prüfkörpergeometrien sind in Bild 6-3 und in Tabelle 6-2 und Tabelle 6-3 dargestellt. Die Einbindetiefen  $\ell_{ef}$  wurden innerhalb dieser Versuchsreihen in Fünferschritten abhängig vom Gewindeaußendurchmesser  $d$  bis zu  $25 d$  variiert – mit Ausnahme der Versuchsreihen 33 und 34. Diese wurden mit einer Einbindetiefe von  $14,1 d$  anstatt  $15 d$  ausgeführt. Die Prüfkörperbreite  $b_p$  ergibt sich aus einer Winkelbeziehung nach Gleichung (30).

$$b_p = \ell_{ef} \cdot \sin \alpha \quad (30)$$

Der Einschraubwinkel  $\alpha$  betrug bei allen Versuchskörpern  $45^\circ$ . Der Drehwinkel  $\beta$  des Prüfkörpers ergab sich aus der Bedingung, dass die Wirkungslinie der Krafteinleitung durch den Schwerpunkt des Prüfkörpers gehen sollte. Der Schraubenabstand  $s$  wird durch die Bedingung, dass die Schraubenköpfe der Druck- und Zugschraube der beiden Schraubenkreuze bei der Variante gekreuzt einen Abstand von 50 mm (für Reihe 33 und 34: 40 mm) haben sollen, bestimmt.

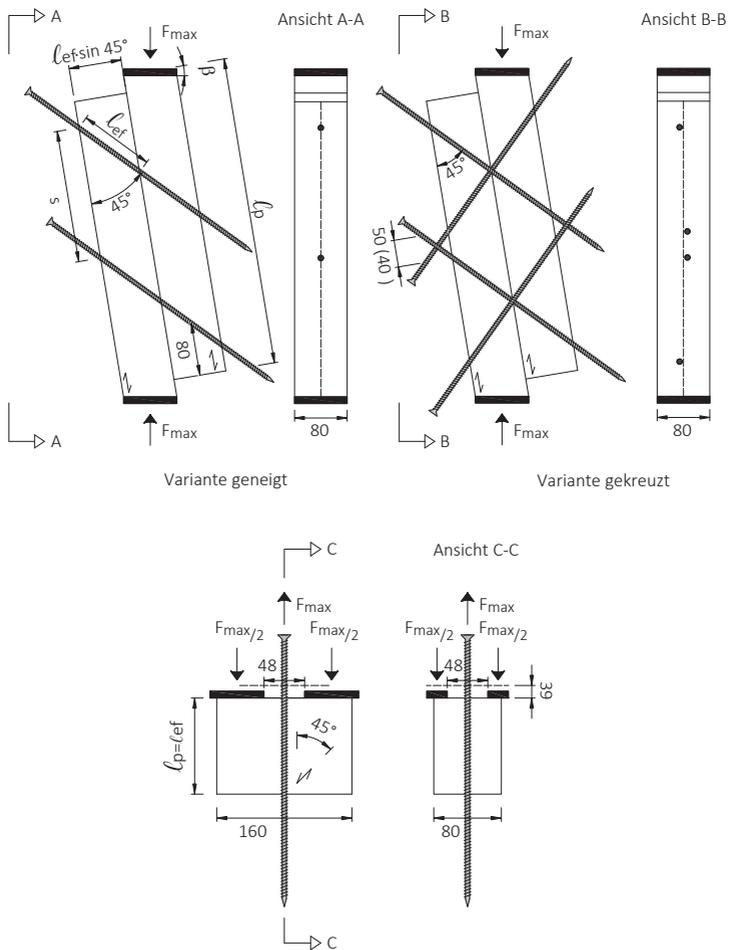


Bild 6-3 Versuchskörper der Diagonalscher- und Ausziehversuche zur Untersuchung des Einflusses der Einbindetiefe, Maße in mm

Tabelle 6-2 Geometrie der Prüfkörper der Diagonalscherversuche

Reihe	$b_p$ in mm	$l_p$ in mm	$\beta$ in °	$l_{ef}$ in mm	d in mm	$d_k$ in mm	s in mm	Variante
29 / 30	28,3	316	4,83	40	8	4,9	107	geneigt / gekreuzt
31 / 32	56,6	404	7,68	80	8	4,9	163	geneigt / gekreuzt
33 / 34	80	467	9,46	113	8	4,9	200	geneigt / gekreuzt
35 / 36	113	580	10,9	160	8	4,9	276	geneigt / gekreuzt
37 / 38	141	669	11,9	200	8	5,1	333	geneigt / gekreuzt

Tabelle 6-3 Geometrie der Prüfkörper der Ausziehversuche

Reihe	$l_p$ in mm	$l_{ef}$ in mm	d in mm	$d_k$ in mm
29.1	40	40	8	4,9
31.1	80	80	8	4,9
1.1	113	113	8	5,1
35.1	160	160	8	4,9
37.1	200	200	8	5,1

Für die Versuchsreihen 29–36 und 29.1, 31.1 und 35.1 wurde der Schraubentyp C 8 x 350 mm mit einem Kerndurchmesser  $d_k = 4,9$  mm und für die anderen Versuchsreihen der Schraubentyp D 8 x 430 mm mit einem Kerndurchmesser von  $d_k = 5,1$  mm verwendet.

Während der Versuchsdurchführung der Diagonalscherversuche wurde die Verschiebung der beiden Holzbauteile zueinander beobachtet. Bis auf die Versuche 35-1, 35-3, 35-5, 37-1 bis 37-3 und 38-3 war vermutlich das Herausziehenversagen der Schrauben maßgebend. Bei den aufgezählten Versuchen kam es zu einem Stahlversagen einer oder mehrerer Schrauben, das in den meisten Fällen kurz nach dem Lastabfall eintrat.

Bei den Ausziehversuchen war das Versagensbild ein Herausziehen der Schraube.

Die Auswertung der Versuche ergeben die in den Tabelle 6-4 und Tabelle 6-5 aufgeführten Mittelwerte mit den dazugehörigen Variationskoeffizienten.

In Bild 6-4 sind die axialen Steifigkeiten der Diagonalscherversuche 29–38 und die Ausziehversuche 29.1, 31.1, 1.1, 35.1 und 37.1 über die Einbindetiefe aufgetragen. Zusätzlich ist für jede Prüfmethode eine Trendlinie mit aufgeführt. In allen Fällen wird deutlich, dass die axiale Steifigkeit unterproportional mit der Einbindetiefe ansteigt. Auf die signifikanten Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Prüfmethode n wird in Kapitel 7 eingegangen.

Tabelle 6-4 Ergebnisse der Diagonalscherversuche

Reihe	F <sub>max</sub> in kN	V <sub>max</sub> in mm	k <sub>s</sub> in kN/mm	k <sub>ax</sub> in kN/mm	μ	ρ in kg/m <sup>3</sup>	u in %
29	13,7 (10,5 %)	2,56 (10,7 %)	12,8 (16,3 %)	15,0 (25,7 %)	0,545 (40,3 %)	442 (8,61 %)	11,1 (4,25 %)
30	17,1 (14,6 %)	2,07 (8,66 %)	20,4 (19,1 %)	19,8 (21,3 %)		417 (8,50 %)	11,0 (3,46 %)
31	23,0 (20,3 %)	2,21 (9,03 %)	20,6 (21,1 %)	33,7 (9,07 %)	0,169 (66,2 %)	420 (8,30 %)	11,7 (3,74 %)
32	38,3 (7,32 %)	1,85 (10,5 %)	42,1 (9,89 %)	41,6 (10,2 %)		434 (6,76 %)	10,8 (5,11 %)
33	36,1 (5,54 %)	2,57 (9,89 %)	25,2 (3,24 %)	38,2 (9,67 %)	0,257 (35,7 %)	443 (6,78 %)	12,0 (2,78 %)
34	55,2 (12,0 %)	2,05 (9,63 %)	52,3 (13,5 %)	52,3 (13,5 %)		455 (7,18 %)	11,6 (1,20 %)
35	53,9 (11,4 %)	4,22 (36,5 %)	29,8 (12,2 %)	36,3 (8,33 %)	0,469 (23,9 %)	413 (5,67 %)	12,3 (5,51 %)
36	66,7 (6,65 %)	2,86 (16,3 %)	46,6 (3,26 %)	46,1 (3,34 %)		427 (5,66 %)	12,7 (6,41 %)
37	57,8 (11,1 %)	3,61 (21,2 %)	28,0 (31,3 %)	36,5 (23,5 %)	0,349 (45,0 %)	433 (5,38 %)	12,6 (1,10 %)
38	81,0 (3,23 %)	2,54 (9,60 %)	58,3 (9,48 %)	54,6 (14,7 %)		446 (6,33 %)	12,2 (1,83 %)

Tabelle 6-5 Ergebnisse der Ausziehversuche

Reihe	F <sub>max</sub> in kN	V <sub>max,u</sub> in mm	V <sub>max,o</sub> in mm	k <sub>s,u</sub> in kN/mm	k <sub>s,o</sub> in kN/mm	ρ in kg/m <sup>3</sup>	u in %
29.1	5,32 (2,68 %)	0,841 (11,2 %)	0,901 (12,0 %)	14,2 (20,1 %)	12,3 (17,7 %)	452 (12,0 %)	12,6 (1,30 %)
31.1	10,5 (14,2 %)	0,663 (5,27 %)	0,803 (4,05 %)	40,1 (30,3 %)	26,1 (16,3 %)	421 (8,00 %)	12,2 (4,64 %)
1.1	16,8 (9,54 %)	0,778 (12,8 %)	1,03 (6,97 %)	47,3 (18,2 %)	29,3 (18,7 %)	411 (7,41 %)	12,1 (2,79 %)
35.1	20,4 (7,38 %)	0,573 (38,1 %)	1,34 (10,8 %)	93,0 (33,0 %)	31,5 (10,2 %)	428 (7,30 %)	12,4 (6,74 %)
37.1	23,2 (1,99 %)	0,629 (51,0 %)	1,68 (12,4 %)	139 (33,8 %)	34,3 (12,0 %)	414 (5,70 %)	12,7 (6,07 %)

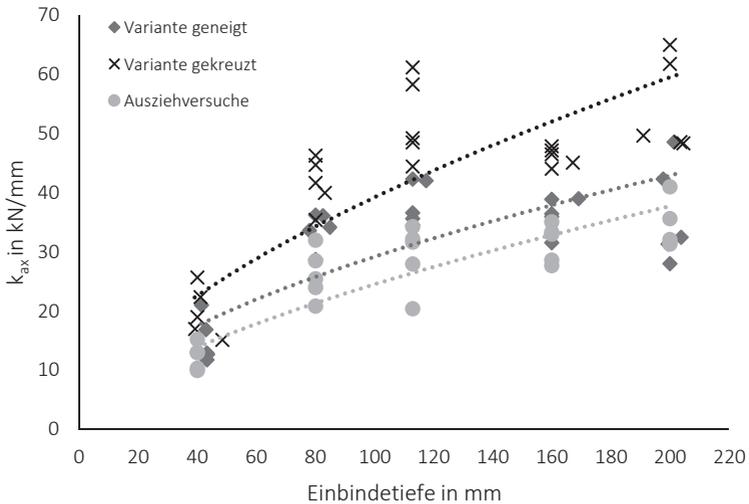


Bild 6-4 Versuchsergebnisse der axialen Steifigkeit in Abhängigkeit der Einbindetiefe

## 6.2 Einfluss des Gewindeaußendurchmessers

Einen weiteren bedeutenden Einfluss auf die axiale Steifigkeit hat der Gewindeaußendurchmesser  $d$ . Zur Untersuchung dieses Einflussparameters wurden insgesamt sechs Druckscherversuchsreihen (1, 3 und 15–18) und drei Ausziehversuchsreihen (1.1, 15.1 und 17.1) durchgeführt. Bild 6-5 zeigt die Prüfkörpergeometrie und Tabelle 6-6 und Tabelle 6-7 die dazugehörigen Maße. Die Einbindetiefe betrug stets  $14,1d$  mit einem Einschraubwinkel von  $45^\circ$ . Die weiteren geometrischen Gegebenheiten ergeben sich aus der Abhängigkeit des Gewindeaußendurchmesser  $d$ . Der Schraubenabstand  $s$  ergibt sich aus der Bedingung, dass der Abstand der Druck- und der Zugschraube der beiden Schraubenkreuze für die Variante gekreuzt 40 mm betragen soll.

Für die Versuchsreihen wurde die Schraubentypen A 6 x 200 mm, B 10 x 400 mm und D 8 x 430 mm verwendet.

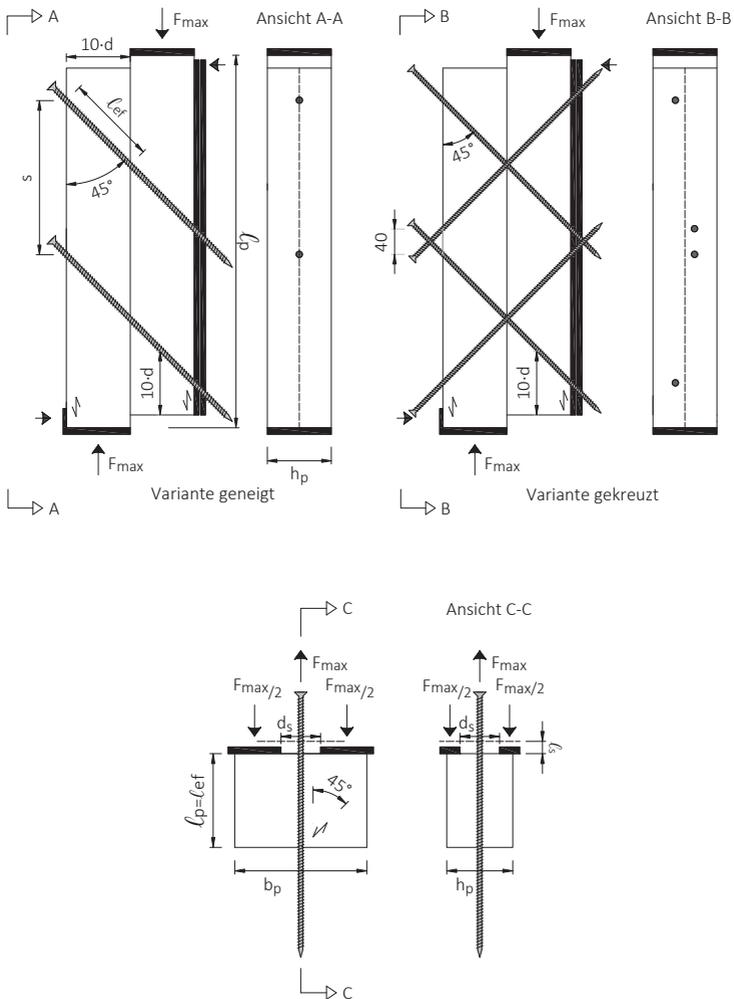


Bild 6-5 Versuchskörper der Druckscher- und Ausziehversuche zur Untersuchung des Einflusses des Gewindeaußendurchmessers, Maße in mm

Tabelle 6-6 Geometrie der Prüfkörper der Druckscherversuche

Reihe	$b_p$ in mm	$h_p$ in mm	$l_p$ in mm	$l_{ef}$ in mm	$d$ in mm	$d_k$ in mm	$s$ in mm	Variante
15 / 16	60	60	380	84,9	6	3,8	160	geneigt / gekreuzt
1 / 3	80	110	480	113	8	5,1	200	geneigt / gekreuzt
17 / 18	100	100	580	141,4	10	6,4	240	geneigt / gekreuzt

Tabelle 6-7 Geometrie der Prüfkörper der Ausziehversuche

Reihe	$b_p$ in mm	$h_p$ in mm	$l_p$ in mm	$l_{ef}$ in mm	$l_s$ in mm	$d_s$ in mm	$d$ in mm	$d_k$ in mm
15.1	120	60	84,9	84,9	variiert	36	6	3,8
1.1	160	110	113	113	39	50	8	5,1
17.1	200	100	141	141	variiert	60	10	6,4

Während der Versuchsdurchführung war die gegenseitige Verschiebung der beiden Holzbauteile zueinander über alle Druckscherversuchsreihen zu beobachten. Für die Ausziehversuche entsprach das Versagensbild dem Herausziehen der Schraube.

Die Mittelwerte und die zugehörigen Variationskoeffizienten der Versuchsergebnisse sind in Tabelle 6-8 und Tabelle 6-9 aufgestellt.

Nach den Versuchen wurde der tatsächliche Einschraubwinkel gemessen. Dabei war auffällig, dass bei der Reihe 15 und 16 im Mittel ein Einschraubwinkel von  $51,4^\circ$  ( $v = 3,133\%$ ) vorhanden war. Für Abweichungen ab  $1,5^\circ$  erfolgten die axiale Steifigkeitsauswertung und die Ermittlung des Reibbeiwertes mit den tatsächlichen ermittelten Winkeln.

Tabelle 6-8 Ergebnisse der Druckscherversuche

Reihe	F <sub>max</sub> in kN	v <sub>max</sub> in mm	k <sub>s</sub> in kN/mm	k <sub>ax</sub> in kN/mm	μ	ρ in kg/m <sup>3</sup>	u in %
15	19,0 (18,3 %)	2,06 (9,16 %)	18,1 (14,7 %)	30,4 (13,9 %)	0,331 (25,4 %)	424 (7,34 %)	10,9 (7,45 %)
16	24,8 (16,5 %)	1,80 (7,34 %)	27,3 (19,5 %)	35,9 (14,9 %)		416 (6,71 %)	10,9 (6,58 %)
1	35,9 (18,7 %)	2,55 (10,9 %)	24,2 (14,4 %)	32,9 (17,4 %)	0,381 (39,0 %)	409 (9,18 %)	12,3 (4,47 %)
3	48,5 (16,4 %)	1,87 (15,4 %)	44,6 (14,2 %)	44,6 (14,2 %)		412 (9,00 %)	12,2 (3,24 %)
17	50,5 (7,72 %)	2,64 (13,2 %)	36,9 (5,63 %)	51,4 (9,16 %)	0,360 (22,4 %)	411 (6,73 %)	11,9 (5,46 %)
18	69,8 (10,2 %)	2,45 (11,8 %)	55,8 (11,9 %)	55,8 (11,9 %)		414 (6,20 %)	12,1 (1,85 %)

Tabelle 6-9 Ergebnisse der Ausziehversuche

Reihe	F <sub>max</sub> in kN	v <sub>max,u</sub> in mm	v <sub>max,o</sub> in mm	k <sub>s,u</sub> in kN/mm	k <sub>s,o</sub> in kN/mm	ρ in kg/m <sup>3</sup>	u in %
15.1	9,82 (11,5 %)	0,608 (11,8 %)	0,842 (10,5 %)	44,5 (40,9 %)	20,2 (25,4 %)	438 (10,5 %)	12,2 (8,74 %)
1.1	16,8 (9,54 %)	0,778 (12,8 %)	1,04 (6,97 %)	47,3 (18,2 %)	29,3 (18,7 %)	411 (7,41 %)	12,1 (2,79 %)
17.1	23,9 (14,4 %)	0,806 (16,3 %)	1,40 (40,1 %)	73,5 (38,3 %)	33,2 (17,3 %)	412 (8,88 %)	11,5 (5,70 %)

In Bild 6-6 sind die Versuchsergebnisse der axialen Steifigkeiten der Druckscher-, sowie der Ausziehversuche über den Gewindeaußendurchmesser  $d$  aufgetragen. Für alle Prüfmethode beschreibt das Quadrat des Gewindeaußendurchmessers die axiale Steifigkeit recht gut. Da die Einbindetiefe in Abhängigkeit vom Gewindeaußendurchmesser mit  $14,1d$  gewählt wurde, bedeutet eine quadratische Beziehung eine lineare Abhängigkeit bei gleichen Einschraubtiefen. Anzumerken ist, dass die Variante geneigt und gekreuzt einen konvexen und die Ausziehversuche einen konkaven Verlauf aufweist.

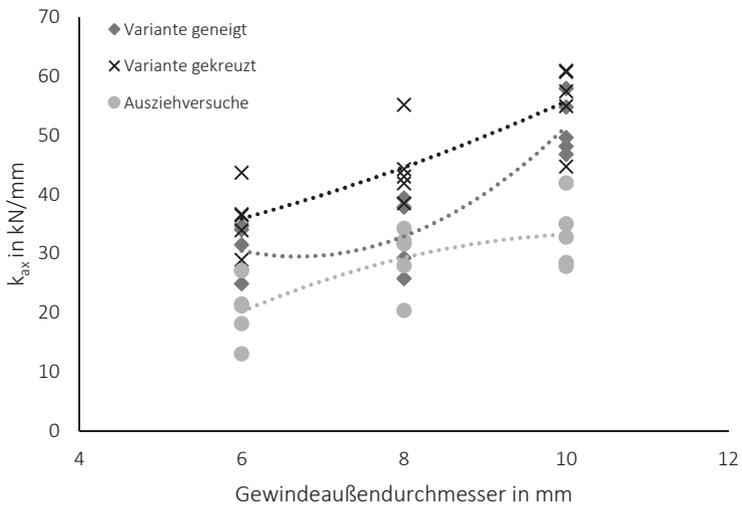


Bild 6-6 Versuchsergebnisse der axialen Steifigkeit in Abhängigkeit vom Gewindeaußendurchmesser

## 6.3 Einfluss des Einschraubwinkels

Als dritter Parameter wurde der Einschraubwinkel untersucht. Für diese Untersuchung wurden insgesamt sieben Diagonalscherversuchsreihen (21–28), zwei Druckscherversuchsreihen (2 und 4) und vier Ausziehversuchsreihen (1.1, 21.1, 23.1 und 27.1) durchgeführt. In Bild 6-7 sind die Prüfgeometrien der Diagonalscherversuche und der Ausziehversuche dargestellt und die dazugehörigen Maße sind in Tabelle 6-10 und Tabelle 6-11 aufgeführt. Die geometrischen Daten für die Druckscherversuche 2 und 4 sind in Kapitel 5.2 (S. 34 ff.) erläutert. Innerhalb dieser Versuchsreihen wurde der Einschraubwinkel in Zehnerschritten variiert von  $20^\circ$  bis  $60^\circ$  – mit Ausnahme des Winkels von  $50^\circ$ . Die Einbindetiefe ist für alle Versuchskörper  $\ell_{ef} = 130$  mm. Die Breite des Prüfkörpers ergibt sich aus einer Winkelbeziehung und der vorgegebenen Einbindetiefe mit der Gleichung (30). Als Schraubentyp wurde der Typ D 8 x 430 mm gewählt.

Für die Reihe 25 wird aufgrund der fehlenden zugehörigen Versuchsreihe Variante gekreuzt der Reibbeiwert mit 0,4 angenommen.

Das Versagensbild der Scherversuche war für alle Versuche gleich, während der Versuchsdurchführung war eine gegenseitige Verschiebung der beiden Holzbauteile zueinander zu beobachten. Bei den Ausziehversuchen kam es zu einem Herausziehen der Schraube.

Die Mittelwerte und die zugehörigen Variationskoeffizienten der Versuchsergebnisse sind in Tabelle 6-12 und Tabelle 6-13 zusammengestellt.

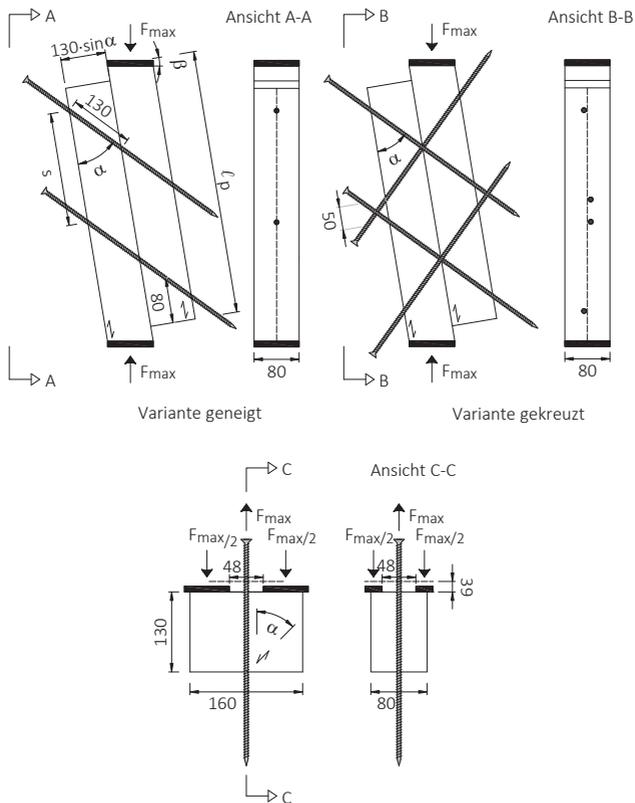


Bild 6-7 Versuchskörper für Diagonalscher- und Ausziehversuche zur Untersuchung des Einflusses des Einschraubwinkels, Maße in mm

Tabelle 6-10 Geometrie der Prüfkörper der Diagonalscherversuche

Reihe	$b_p$ in mm	$\ell_p$ in mm	$\beta$ in °	$\alpha$ in °	d in mm	$d_k$ in mm	s in mm	Variante
21 / 22	113	439	14,2	60	8	5,1	180	geneigt / gekreuzt
23 / 24	83,6	536	8,66	40	8	5,1	249	geneigt / gekreuzt
25	65	600	6,03	30	8	5,1	270	geneigt
27 / 28	44,6	599	4,13	20	8	5,1	295	geneigt / gekreuzt

Tabelle 6-11 Geometrie der Prüfkörper der Ausziehversuche

Reihe	$\alpha$ in °	d in mm	$d_k$ in mm
21.1	60	8	5,1
23.1	40	8	5,1
2.1	30	8	5,1
27.1	20	8	5,1

Tabelle 6-12 Ergebnisse der Diagonalscherversuche

Reihe	F <sub>max</sub> in kN	v <sub>max</sub> in mm	k <sub>s</sub> in kN/mm	k <sub>ax</sub> in kN/mm	μ	ρ in kg/m <sup>3</sup>	u in %
21	38,8 (16,9 %)	5,76 (20,4 %)	15,2 (18,7 %)	34,3 (13,4 %)	0,302 (10,6 %)	426 (9,92 %)	11,9 (3,56 %)
22	46,7 (13,9 %)	3,83 (19,3 %)	28,3 (14,7 %)	53,3 (7,35 %)		424 (7,63 %)	11,9 (3,39 %)
23	43,1 (4,52 %)	2,11 (7,72 %)	35,0 (2,68 %)	33,8 (7,52 %)	0,642 (12,5 %)	433 (7,69 %)	12,3 (2,89 %)
2	39,7 (10,8 %)	1,80 (6,90 %)	33,0 (11,2 %)	34,6 (22,5 %)	0,387 (55,2 %)	412 (8,25 %)	12,5 (3,76 %)
4	62,5 (17,9 %)	1,43 (10,8 %)	70,0 (8,26 %)	46,7 (8,26 %)		407 (10,1 %)	11,9 (1,56 %)
24	51,5 (9,30 %)	1,96 (9,17 %)	47,8 (17,0 %)	39,1 (14,5 %)		429 (10,6 %)	12,1 (3,20 %)
25	44,2 (10,5 %)	1,45 (6,01 %)	49,3 (8,01 %)	49,3 (7,43 %)	0,40 <sup>1)</sup>	428 (8,42 %)	12,2 (4,54 %)
27	32,5 (11,7 %)	1,35 (16,2 %)	44,0 (11,6 %)	39,1 (15,7 %)	0,601 (56,3 %)	426 (9,43 %)	11,9 (5,16 %)
28	52,1 (5,92 %)	1,01 (10,1 %)	105 (8,48 %)	57,3 (8,39 %)		430 (9,50 %)	11,5 (2,75 %)

<sup>1)</sup> Reibbeiwert wird zu 0,4 angenommen

Tabelle 6-13 Ergebnisse der Ausziehversuche

Reihe	F <sub>max</sub> in kN	v <sub>max,u</sub> in mm	v <sub>max,o</sub> in mm	k <sub>s,u</sub> in kN/mm	k <sub>s,o</sub> in kN/mm	ρ in kg/m <sup>3</sup>	u in %
21.1	18,7 (10,7 %)	0,947 (16,9 %)	1,38 (8,34 %)	69,6 (30,5 %)	33,4 (12,6 %)	434 (6,21 %)	12,8 (2,31 %)
23.1	17,4 (6,81 %)	0,73 (37,7 %)	1,02 (18,3 %)	78,6 (39,8 %)	35,6 (13,9 %)	436 (7,23 %)	12,8 (0,857 %)
2.1	18,2 (12,8 %)	0,553 (13,7 %)	0,971 (11,4 %)	72,4 (12,1 %)	30,9 (19,5 %)	412 (9,76 %)	12,4 (3,14 %)
27.1	15,8 (17,7 %)	0,415 (22,4 %)	0,708 (11,1 %)	86,2 (12,0 %)	37,0 (12,7 %)	425 (5,43 %)	12,7 (2,96 %)

In Bild 6-8 sind die Versuchsergebnisse der axialen Steifigkeit  $k_{ax}$  über dem Einschraubwinkel aufgetragen. Aus den Ergebnissen lässt sich keine eindeutige



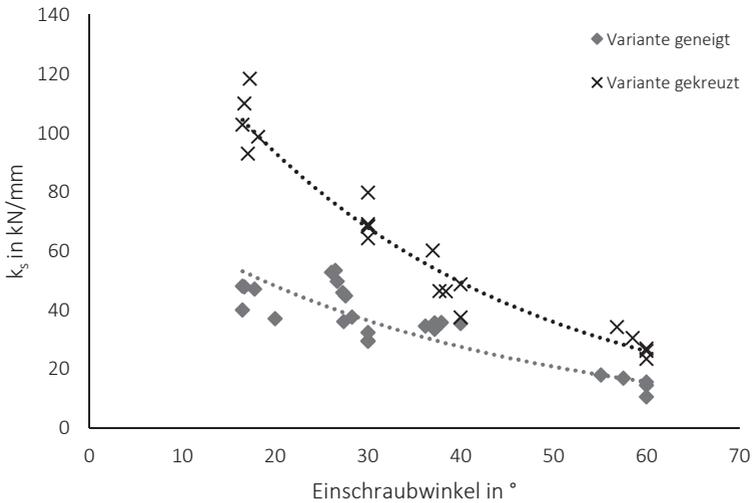


Bild 6-9 Versuchsergebnisse der Verbindungssteifigkeit in Abhängigkeit des Einschraubwinkels

## 6.4 Einfluss der Vorbohrung und der Holzfeuchte

In diesem Abschnitt wird der Einfluss einer Vorbohrung und der Holzfeuchte auf die axiale Steifigkeit untersucht. Insgesamt wurden 12 Druckscherversuche (Reihe 1–12) und 12 Ausziehversuche (1.1–12.1) geprüft. Innerhalb dieser Versuchsreihen wurde der Einschraubwinkel zwischen 30° und 45° und die Einbindtiefe zwischen 113 mm und 130 mm variiert. Die Geometrie ist in Bild 6-10 und tabellarisch in Tabelle 6-14 und Tabelle 6-15 angegeben. Für alle Versuche wurde der Schraubentyp D 8 x 430 mm gewählt.

Die Versuchsreihen 1–4 und 1.1–4.1 wurden als Referenzreihen geprüft. Die Holzfeuchte bei diesen Versuchen betrug im Mittel 12,3 % ( $v = 3,53$  %). Die Schrauben wurden ohne Vorbohrung eingebracht.

Hingegen wurden bei den Versuchsreihen 5–8 und 5.1–8.1 die Prüfkörper zuvor mit einem Durchmesser von 5 mm entsprechend des Kerndurchmessers von  $d_k = 5,1$  mm vorgebohrt. Die Holzfeuchte betrug im Mittel 12,6 % ( $v = 5,49$  %).

Durch die Versuchsreihen 9–12 und 9.1–12.1 sollte der Einfluss der Holzfeuchte untersucht werden. Im Mittel betrug diese 20,3 % ( $v = 5,52$  %). Die Schrauben dieser Versuchsreihen wurden ohne Vorbohren eingedreht.

Die Versagensursache in allen Versuchsreihen war das Herausziehen der Schraube aus dem Holz, welches bei den Druckscherversuchen indirekt durch die gegenseitige Verschiebung der Holzbauteile zueinander und direkt bei den Ausziehversuchen über das Herausziehen der Schraube beobachtet wurde.

Die Versuchsergebnisse sind in Tabelle 6-16 und Tabelle 6-17 anhand der Mittelwerte und den dazugehörigen Variationskoeffizienten zusammengestellt. Zusätzlich aufgeführt sind die mittleren Rohdichten  $\rho_{12}$  für eine Holzfeuchte von 12 %, berechnet mit der Gleichung (31) nach [7].

$$\rho_u = \rho_0 \cdot \frac{1+u}{1+0,84 \cdot \rho_0} \quad (31)$$

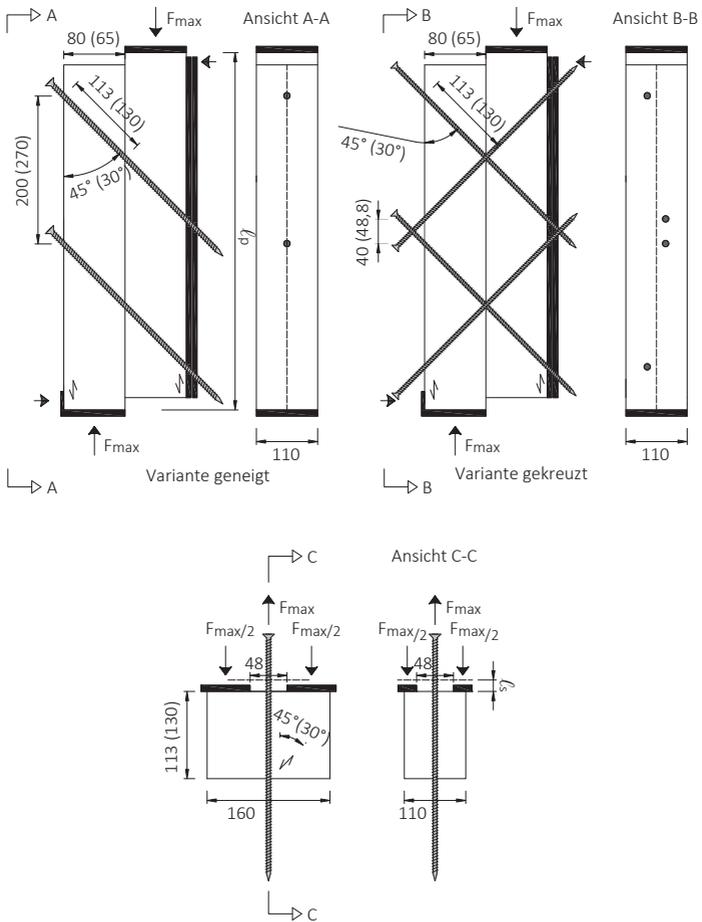


Bild 6-10 Versuchskörper der Druckscher- und Ausziehversuche zur Untersuchung des Einflusses der Vorbohrung und der Holzfeuchte, Maße in mm

Tabelle 6-14 Geometrie der Prüfkörper der Druckscherversuche

Reihe	$b_p$ in mm	$l_p$ in mm	$l_{ef}$ in mm	$\alpha$ in °	D in mm	$d_k$ in mm	s in mm	Variante	Besonderheit
1 / 3									Referenz
5 / 7 9 / 11	80	480	113	45	8	5,1	200	geneigt / gekreuzt	vorgebohrt feucht
2 / 4									Referenz
6 / 8 10 / 12	65	615	130	30	8	5,1	270	geneigt / gekreuzt	vorgebohrt feucht

Tabelle 6-15 Geometrie der Prüfkörper der Ausziehversuche

Reihe	$l_{ef}$ in mm	$\alpha$ in °	d in mm	$d_k$ in mm	Besonderheit
1.1 / 3.1					Referenz
5.1 / 7.1 9.1 / 11.1	113	45	8	5,1	vorgebohrt feucht
2.1 / 4.1					Referenz
6.1 / 8.1 10.1 / 12.1	130	30	8	5,1	vorgebohrt feucht

Tabelle 6-16 Ergebnisse der Druckscherversuche

Reihe	$F_{\max}$	$v_{\max}$	$k_s$	$k_{ax}$	$\mu$	$\rho$	$u$	$\rho_{12}$
	in kN	in mm	in kN/mm	in kN/mm		in kg/m <sup>3</sup>	in %	in kg/m <sup>3</sup>
1	35,9 (18,7 %)	2,55 (10,9 %)	24,2 (14,4 %)	32,9 (17,4 %)	0,381 (39,0 %)	409 (9,18 %)	12,3 (4,47 %)	408 (9,51 %)
2	39,7 (10,8 %)	1,80 (6,90 %)	33,0 (11,2 %)	34,6 (22,5 %)	0,387 (55,2 %)	412 (8,25 %)	12,5 (3,76 %)	410 (8,22 %)
3	48,5 (16,4 %)	1,87 (15,4 %)	44,6 (14,2 %)	44,6 (14,2 %)		412 (9,00 %)	12,2 (3,24 %)	411 (8,89 %)
4	62,5 (17,9 %)	1,43 (10,8 %)	70,0 (8,26 %)	46,7 (8,26 %)		407 (10,1 %)	11,9 (1,56 %)	407 (10,1 %)
5	29,5 (16,2 %)	4,77 (17,3 %)	13,5 (27,9 %)	20,3 (28,8 %)	0,435 (21,3 %)	431 (12,0 %)	13,0 (1,99 %)	429 (11,9 %)
6	29,8 (4,40 %)	2,23 (9,34 %)	26,6 (9,75 %)	29,1 (10,6 %)	0,392 (39,8 %)	421 (6,71 %)	12,1 (7,30 %)	421 (6,45 %)
7	38,2 (15,6 %)	3,18 (13,7 %)	27,0 (14,9 %)	29,1 (9,76 %)		427 (10,3 %)	13,1 (2,72 %)	424 (10,2 %)
8	46,1 (8,35 %)	1,83 (14,0 %)	47,9 (7,75 %)	33,5 (3,68 %)		427 (7,01 %)	12,0 (6,50 %)	427 (7,05 %)
9	32,8 (13,6 %)	2,27 (6,59 %)	25,9 (26,5 %)	37,6 (23,1 %)	0,312 (58,0 %)	475 (6,47 %)	19,7 (1,86 %)	456 (6,49 %)
10*)	39,6 (13,0 %)	1,68 (15,7 %)	38,5 (9,71 %)	36,7 (14,1 %)	0,550 (28,7 %)	438 (12,5 %)	20,0 (3,31 %)	419 (12,8 %)
11	47,3 (11,6 %)	1,94 (8,23 %)	47,0 (10,3 %)	47,8 (11,9 %)		482 (7,32 %)	20,5 (3,09 %)	462 (7,26 %)
12	56,1 (10,2 %)	1,45 (10,8 %)	68,4 (10,5 %)	46,1 (9,95 %)		456 (10,3 %)	19,9 (9,35 %)	437 (10,1 %)

\*) Steifigkeitsauswertung im Bereich zwischen 50 % und 60 %  $F_{\max}$

Tabelle 6-17 Ergebnisse der Ausziehversuche

Reihe	F <sub>max</sub> in kN	V <sub>max,u</sub> in mm	V <sub>max,o</sub> in mm	k <sub>s,u</sub> in kN/mm	k <sub>s,o</sub> in kN/mm	ρ in kg/m <sup>3</sup>	u in %	ρ <sub>12</sub> in kg/m <sup>3</sup>
1.1	16,8 (9,54 %)	0,778 (12,8 %)	1,03 (6,97 %)	47,3 (18,2 %)	29,3 (18,7 %)	411 (7,41 %)	12,1 (2,79 %)	411 (7,58 %)
2.1	18,2 (12,8 %)	0,553 (13,7 %)	0,971 (11,4 %)	72,4 (12,4 %)	30,9 (19,5 %)	412 (9,76 %)	12,4 (3,14 %)	411 (9,71 %)
3.1	15,9 (17,1 %)	0,686 (4,57 %)	0,991 (10,6 %)	54,4 (17,3 %)	26,8 (11,8 %)	407 (11,2 %)	12,4 (4,24 %)	406 (11,0 %)
4.1	19,0 (14,6 %)	0,539 (11,1 %)	0,945 (16,8 %)	65,8 (37,6 %)	30,5 (23,0 %)	411 (9,92 %)	12,4 (2,93 %)	410 (9,99 %)
5.1	15,9 (14,2 %)	0,869 (16,0 %)	1,23 (7,90 %)	49,7 (20,2 %)	25,3 (9,81 %)	433 (11,5 %)	13,1 (1,53 %)	430 (6,13 %)
6.1	18,3 (9,15 %)	0,701 (7,95 %)	1,02 (7,48 %)	66,0 (46,2 %)	30,9 (15,5 %)	425 (7,35 %)	12,2 (6,53 %)	424 (6,34 %)
7.1	16,0 (14,8 %)	0,743 (13,9 %)	1,16 (6,64 %)	45,4 (28,2 %)	24,0 (21,2 %)	437 (11,5 %)	13,1 (0,342 %)	435 (10,3 %)
8.1	18,8 (6,18 %)	0,744 (5,89 %)	1,11 (8,25 %)	56,2 (17,2 %)	31,5 (8,62 %)	435 (5,70 %)	12,3 (4,20 %)	434 (4,97 %)
9.1	14,2 (19,8 %)	0,720 (13,4 %)	0,996 (9,30 %)	46,8 (28,2 %)	26,7 (18,0 %)	464 (6,16 %)	20,8 (6,48 %)	443 (5,48 %)
10.1	15,0 (14,5 %)	0,599 (13,1 %)	0,977 (7,31 %)	68,3 (19,2 %)	28,5 (9,17 %)	435 (4,36 %)	20,5 (5,37 %)	415 (4,30 %)
11.1	14,4 (18,1 %)	0,755 (11,4 %)	1,01 (7,58 %)	47,7 (41,6 %)	27,8 (23,2 %)	465 (7,32 %)	20,8 (5,92 %)	444 (18,1 %)
12.1	15,1 (12,4 %)	0,566 (17,5 %)	0,879 (10,41 %)	69,7 (21,4 %)	33,7 (7,27 %)	437 (5,18 %)	20,1 (6,53 %)	418 (5,27 %)

In Bild 6-11 und Bild 6-12 sind die Ergebnisse der axialen Steifigkeiten der drei untersuchten Reihen der Druckscherversuche und der Ausziehversuche aufgeführt. Die Zahl „1“ steht für die Referenzversuche, „2“ für die Versuchskörper mit einer Vorbohrung und „3“ für die Versuchskörper mit einer höheren Holzfeuchte.

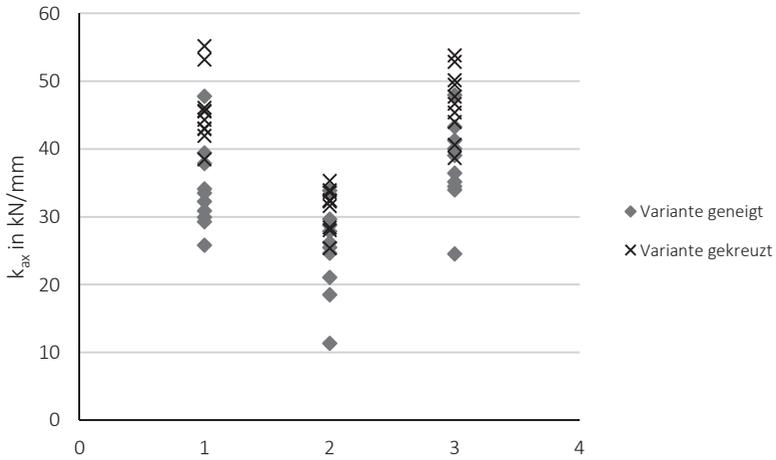


Bild 6-11 Versuchsergebnisse der Druckscherversuche zur Parameteruntersuchung der Vorbohrung und Holzfeuchte

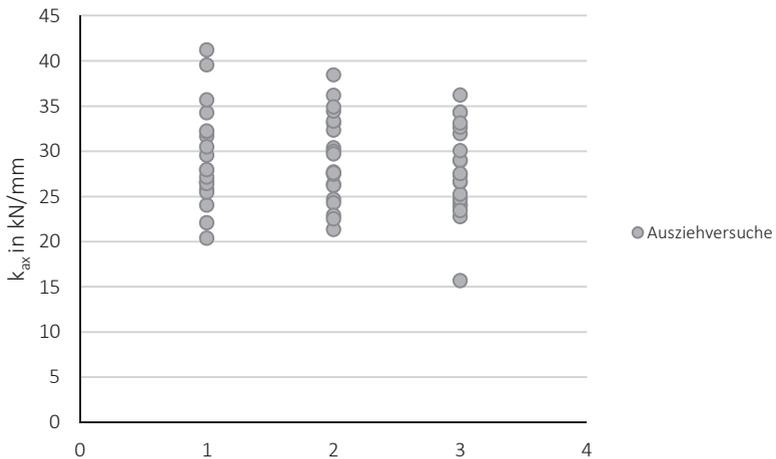


Bild 6-12 Versuchsergebnisse der Ausziehversuche zur Parameteruntersuchung der Vorbohrung und Holzfeuchte

Bei den Druckscherversuchen ist auffällig, dass die Versuchsreihen 5–8 (2) signifikant niedrigere axiale Steifigkeiten aufweisen als bei den anderen Versuchsreihen. Die Reduzierung der axialen Steifigkeit der Druckscherversuche mit Vorbohrung im Vergleich zu den Referenzversuchen beträgt im Mittel 29,2 %.

Anschließende Beobachtungen zeigten, dass es bei diesen Versuchen durch die Verwendung eines biegeweichen Bohrers mit einem Durchmesser von 5 mm zu einem Verlaufen der Bohrlöcher kam. Für die Variante geneigt bedeutet dies, dass die Schrauben zusätzlich geneigt und teils gebogen im Prüfkörper eingebracht waren, vgl. Bild 6-13 links. Bei der Variante gekreuzt trafen sich aus diesem Grund die Zug- und Druckschraube, was durch einen Stahlabrieb an den Kreuzungspunkten ersichtlich wurde (siehe rechts in Bild 6-13). Dies hatte zur Folge, dass die Gewindeflanken der Schrauben beschädigt wurden und es zu einem Abweichen der Schrauben von den Bohrlochkanälen, wie in Bild 6-14 für den Versuch 8-2 beispielhaft aufgeführt ist, kam.



Bild 6-13 Schnitt durch einen Schraubenkanal links (Versuch 6-5) und Kreuzungspunkt der Schrauben bei einer Variante gekreuzt rechts (Versuch 7-5)

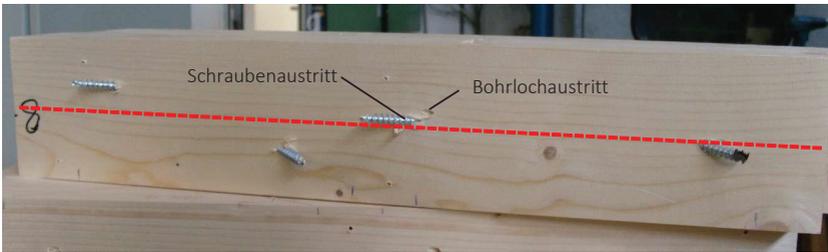


Bild 6-14 Rückseite des Prüfkörpers mit den Austrittslöchern der Schraube und der Bohrung (Versuch 8-2)

Diese Beobachtungen erklären die niedrigeren axialen Steifigkeiten, da auch bei den Ausziehversuchen zwischen den Referenzversuchen (1) und den Versuchen mit einer Vorbohrung (2) kein signifikanter Unterschied vorhanden ist.

Bei der Montage von schräg bzw. gekreuzt eingebrachten Vollgewindeschrauben ist zu beachten, dass diese exakt einbracht werden, um ein Verlaufen der Schraube und eine Beschädigung der Gewindeflanken zu verhindern. Sonst kann es zu einer Reduzierung der axialen Steifigkeit und Tragfähigkeit führen.

Um den Einfluss der Holzfeuchte zu ermitteln, werden die axialen Steifigkeitswerte in Abhängigkeit der Rohdichte korrigiert, da bei den Versuchsreihen unterschiedliche mittlere Rohdichten  $\rho_{\text{mean},12}$  vorhanden waren. Der Korrekturfaktor  $f$  berechnet sich aus den Quotienten von der Rohdichte der Referenzversuche und der Rohdichte der jeweiligen zu untersuchenden Versuchsreihe. Mit diesem Faktor  $f$  wird anschließend die axiale Steifigkeit multipliziert. Die Gegenüberstellung der gemittelten korrigierten axialen Steifigkeiten  $k_{\text{ax,mean,cor}}$  mit dem dazugehörigen Faktor  $f$  wird in Tabelle 6-18 illustriert.

Tabelle 6-18 Gegenüberstellung der Referenzreihe zu den Reihen 5–12 und 5.1–12.1

Reihen	$\rho_{\text{mean},12}$ in kg/m <sup>3</sup>	$k_{\text{ax,mean}}$ in kN/mm	Faktor f	$k_{\text{ax,mean,cor}}$ in kN/mm
1-4	409	39,5	1	39,5
1.1-4.1	409	29,3	1	29,3
5-8	425	28,0	0,96	26,9
5.1-8.1	431	27,9	0,95	26,5
9-12	444	41,3	0,92	38,0
9.1-12.1	430	29,2	0,95	27,7

Die Gegenüberstellung zeigt, dass eine Holzfeuchteerhöhung bis zu 20 % auf die axiale Steifigkeit keine wesentliche Auswirkung hat.

## 6.5 Modell für die axiale Steifigkeit

Zur Entwicklung eines Modells zur Beschreibung der axialen Steifigkeit wird eine nichtlineare Regression durchgeführt. Für das Modell werden die Ergebnisse der zuvor durchgeführten Parameteranalyse herangezogen.

Die zu untersuchenden Parameter waren die Einbindetiefe  $\ell_{ef}$ , der Gewindeaußendurchmesser  $d$ , der Einschraubwinkel  $\alpha$ , die Holzfeuchte und der Einfluss einer Vorbohrung. Es wurde gezeigt, dass die Einbindetiefe bei allen Versuchen unterproportional in die axiale Steifigkeit eingeht. Der Gewindeaußendurchmesser hat einen linearen Einfluss und ein signifikanter Einfluss des Einschraubwinkels konnte für Winkel zwischen 20° bis 60° nicht festgestellt werden.

Darüber hinaus wurde festgestellt, dass eine Holzfeuchte bis zu 20 % vernachlässigt werden kann. Montagefehler durch zum Beispiel ein Verlaufen der Vorbohrlöcher oder durch Berührung zweier sich kreuzender Schrauben und die damit verursachte Beschädigung der Schraubenflanken haben gezeigt, dass dadurch eine Steifigkeitsreduzierung von mehr als 29,2 % verursacht werden kann. Die Versuchsreihen 5–8 zur Ermittlung des Einflusses der Vorbohrung werden aus diesem Grund für die Regressionsanalyse nicht berücksichtigt. Des Weiteren wurde durch erste Regressionsuntersuchungen

der Ausziehversuch 15.1-2 als Ausreißer erkannt und in den weiteren Analysen nicht berücksichtigt.

Zusätzlich ist der Einfluss der Rohdichte zu beachten, dieser ist in der zuvor durchgeführten Parameteranalyse nicht berücksichtigt worden. Für die Regression wird die Rohdichte bei einer Holzfeuchte von 12 % verwendet, die mit der Gleichung (31) berechnet wird.

Das Berechnungsmodell für die axiale Steifigkeit  $K_{ax}$  soll damit der Gleichung (32) entsprechen.

$$K_{ax} = a \cdot d^b \cdot \ell_{ef}^c \cdot \rho^d \cdot \alpha^e \quad (32)$$

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass zwischen der Variante geneigt (\\) und gekreuzt (X) sowie den Ausziehversuchen (A) ein systematischer quantitativer Unterschied besteht. Aus diesem Grund werden die drei Prüfmethode im ersten Schritt getrennt betrachtet, danach alle Scherversuche zusammen, Variante geneigt mit den Ausziehversuchen und schließlich alle durchgeführten Versuche. Die Bestimmung der Konstanten a bis e erfolgt in fünf Schritten, die in der Tabelle 6-19 tabellarisch für alle Versuchswerte aufgeführt sind. Nach jedem Schritt wird eine Konstante festgehalten, die durch die Formatierung **fett** gekennzeichnet ist.

Tabelle 6-19 Schritte der nichtlinearen Regression

Schritte	Versuchs- werte	Anzahl N	Konstanten					R <sup>2</sup>	e <sub>mean</sub>	s(e)
			a	b	c	d	e			
1	\\	75	0,0187	1,06	0,369	0,639	-0,0749	0,48	-2,83·10 <sup>-2</sup>	6,76
	X	70	0,414	0,421	0,437	0,304	-0,0273	0,55	-6,42·10 <sup>-2</sup>	7,02
	A	104	0,0066	0,582	0,571	0,859	-0,206	0,58	-1,94·10 <sup>-2</sup>	4,44
	\\ + X	145	0,0469	0,711	0,395	0,576	-0,0252	0,39	-2,39·10 <sup>-2</sup>	8,58
	\\ + A	179	0,0091	0,851	0,475	0,763	-0,136	0,44	-1,41·10 <sup>-2</sup>	6,48
	\\ + X + A	249	0,0114	0,707	0,467	0,759	-0,0682	0,33	-1,52·10 <sup>-1</sup>	9,14
2	\\	75	0,0213	<b>1</b>	0,372	0,633	-0,0731	0,47	-8,81·10 <sup>-3</sup>	6,76
	X	70	0,370	0,415	0,443	0,303	<b>0</b>	0,55	-4,07·10 <sup>-2</sup>	7,03
	A	104	0,0064	<b>0,6</b>	0,570	0,86	-0,206	0,58	-2,85·10 <sup>-2</sup>	4,45
	\\ + X	145	0,0461	0,706	<b>0,4</b>	0,575	-0,024	0,40	3,10·10 <sup>-2</sup>	8,58
	\\ + A	179	0,0078	0,833	<b>0,5</b>	0,771	-0,133	0,46	2,41·10 <sup>-2</sup>	6,49
	\\ + X + A	249	0,0092	0,678	0,478	0,755	<b>0</b>	0,32	4,95·10 <sup>-3</sup>	9,16
3	\\	75	0,0146	<b>1</b>	0,384	0,642	<b>0</b>	0,47	-5,80·10 <sup>-2</sup>	6,81
	X	70	0,384	<b>0,4</b>	0,444	0,302	<b>0</b>	0,55	-4,61·10 <sup>-2</sup>	7,03
	A	104	0,0049	<b>0,6</b>	<b>0,6</b>	0,878	-0,205	0,59	5,72·10 <sup>-3</sup>	4,45
	\\ + X	145	0,0423	0,702	<b>0,4</b>	0,577	<b>0</b>	0,39	-4,69·10 <sup>-2</sup>	8,59
	\\ + A	179	0,0062	0,777	<b>0,5</b>	0,749	<b>0</b>	0,42	-3,06·10 <sup>-2</sup>	6,60
	\\ + X + A	249	0,0087	<b>0,7</b>	0,477	0,757	<b>0</b>	0,32	-3,65·10 <sup>-2</sup>	9,16
4	\\	75	0,0132	<b>1</b>	<b>0,4</b>	0,646	<b>0</b>	0,48	-0,078	6,82
	X	70	0,388	<b>0,4</b>	0,444	<b>0,3</b>	<b>0</b>	0,55	-5,88·10 <sup>-2</sup>	7,03
	A	104	0,0043	<b>0,6</b>	<b>0,6</b>	<b>0,9</b>	-0,206	0,59	1,79·10 <sup>-2</sup>	4,45
	\\ + X	145	0,0425	<b>0,7</b>	<b>0,4</b>	0,577	<b>0</b>	0,39	-4,43·10 <sup>-2</sup>	8,59
	\\ + A	179	0,0058	<b>0,8</b>	<b>0,5</b>	0,752	<b>0</b>	0,42	-1,02·10 <sup>-2</sup>	6,60
	\\ + X + A	249	0,0075	<b>0,7</b>	<b>0,5</b>	0,763	<b>0</b>	0,34	1,55·10 <sup>-2</sup>	9,16
5	\\	75	0,0095	<b>1</b>	<b>0,4</b>	<b>0,7</b>	<b>0</b>	0,48	0,053	6,82
	X	70	0,48	<b>0,4</b>	<b>0,4</b>	<b>0,3</b>	<b>0</b>	0,51	-0,134	7,06
	A	104	0,0020	<b>0,6</b>	<b>0,6</b>	<b>0,9</b>	<b>0</b>	0,54	-1,80·10 <sup>-2</sup>	4,71
	\\ + X	145	0,0369	<b>0,7</b>	<b>0,4</b>	<b>0,6</b>	<b>0</b>	0,39	-4,07·10 <sup>-2</sup>	8,59
	\\ + A	179	0,0043	<b>0,8</b>	<b>0,5</b>	<b>0,8</b>	<b>0</b>	0,42	-1,20·10 <sup>-2</sup>	6,60
	\\ + X + A	249	0,0060	<b>0,7</b>	<b>0,5</b>	<b>0,8</b>	<b>0</b>	0,34	4,00·10 <sup>-2</sup>	9,16

Die nichtlineare Regression für alle Scherversuche und Ausziehversuche ergeben das Berechnungsmodell nach Gleichung (33) und (34).

$$K_{ax} = 0,0369 \cdot d^{0,7} \cdot \ell_{ef}^{0,4} \cdot \rho^{0,6} + e \quad (33)$$

$$R^2 = 0,39 \quad N = 145 \quad e \text{ (Mean} = -4,07 \cdot 10^{-2}; s = 8,59)$$

$$K_{ax} = 0,002 \cdot d^{0,6} \cdot \ell_{ef}^{0,6} \cdot \rho^{0,9} + e \quad (34)$$

$$R^2 = 0,54 \quad N = 104 \quad e \text{ (Mean} = -1,80 \cdot 10^{-2}; s = 4,71)$$

Mit

$K_{ax}$	Berechnungswert der axialen Steifigkeit in kN/mm
$d$	Gewindeaußendurchmesser in mm
$\ell_{ef}$	Einbindetiefe in mm
$\rho$	Rohdichte in $\text{kg/m}^3$
$e$	Residuen bzw. Fehler

Bild 6-15 und Bild 6-16 zeigen links die Versuchsdaten sämtlicher Scher- bzw. Ausziehversuche über den Erwartungswerten nach Gleichung (33) bzw. (34) und rechts die normierten Residuen  $e$  über den Erwartungswert. Die Verteilung der normierten Residuen für die Scherversuche und die Ausziehversuche weisen eine gleichmäßige Verteilung auf.

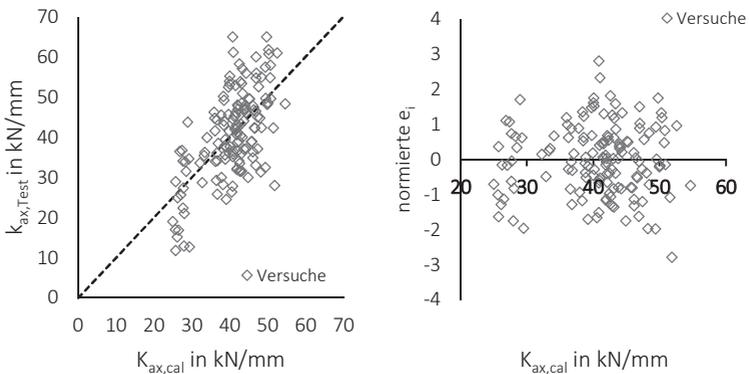


Bild 6-15 Axiale Steifigkeit der Scherversuche (links) und normierte Residuen  $e_i$  (rechts) über den Werten nach Gleichung (33)

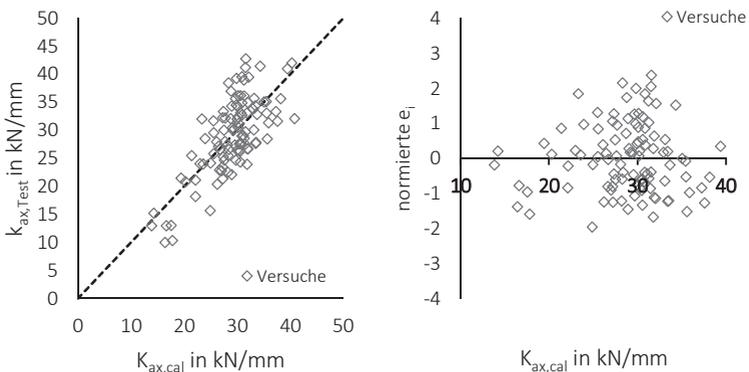


Bild 6-16 Axiale Steifigkeit der Ausziehversuche (links) und normierten Residuen  $e_i$  (rechts) über den Werten nach Gleichung (34)

Zur Überprüfung der Berechnungsmodelle nach Gleichung (33) und (34) werden die normierten Residuen über die Parameter Durchmesser, Einschraubwinkel, Einbindtiefe und Rohdichte aufgetragen (siehe Bild 6-17 und Bild 6-18).

Bei den Scherversuchen sowie bei den Ausziehversuchen zeigen die Parameter Einschraubwinkel und Rohdichte einen unauffälligen Kurvenverlauf.

Dagegen ist bei der Betrachtung des Durchmessers für die Scherversuche auffällig, dass die normierten Residuen für einen Durchmesser 6 und 10 mm größtenteils positiv sind. Dies kann an der geringen Versuchsanzahl liegen. Es ist zu empfehlen, weitere Untersuchungen mit unterschiedlichen Durchmessern durchzuführen. Der Vergleich der normierten Residuen in Abhängigkeit von der Einbindetiefe zeigt, dass bei kleinen Einbindetiefen die normierten Residuen größtenteils negativ sind. Für die Ausziehversuche gilt dies auch für Einbindetiefen ab 150 mm. Dies kann auch in der Versuchsanzahl begründet sein. Daher ist zu empfehlen, weitere Untersuchungen mit variierenden Einbindetiefen durchzuführen.

Die nichtlineare Regression mit allen Versuchsdaten erscheint nicht sinnvoll, da die Abweichungen zwischen den Prüfmethoden zu groß sind und daraus ein Bestimmtheitsmaß von lediglich 0,34 resultiert.

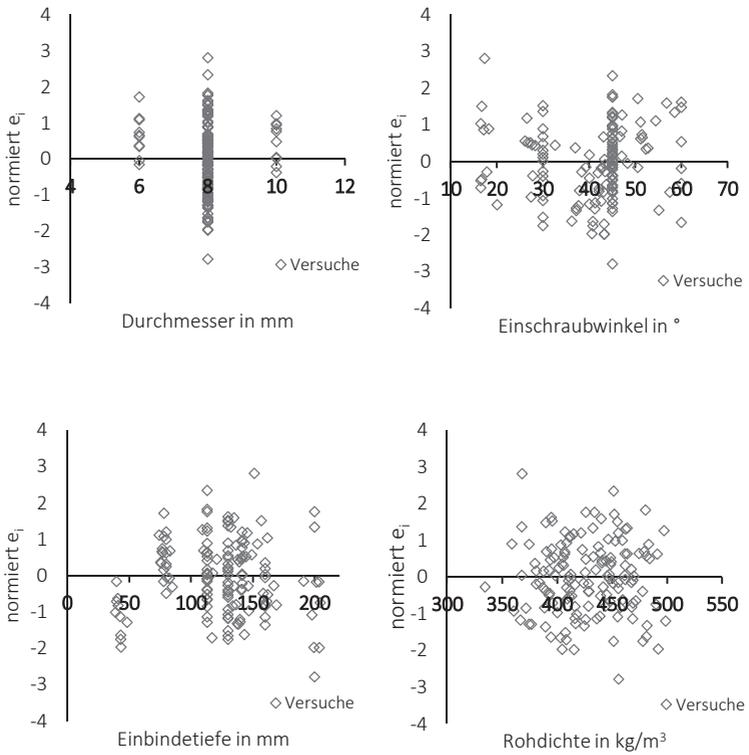


Bild 6-17 Normierte Residuen  $e_i$  der Scherversuche in Abhängigkeit der Einflussparameter Durchmesser, Einschraubwinkel, Einbindetiefe und Rohdichte

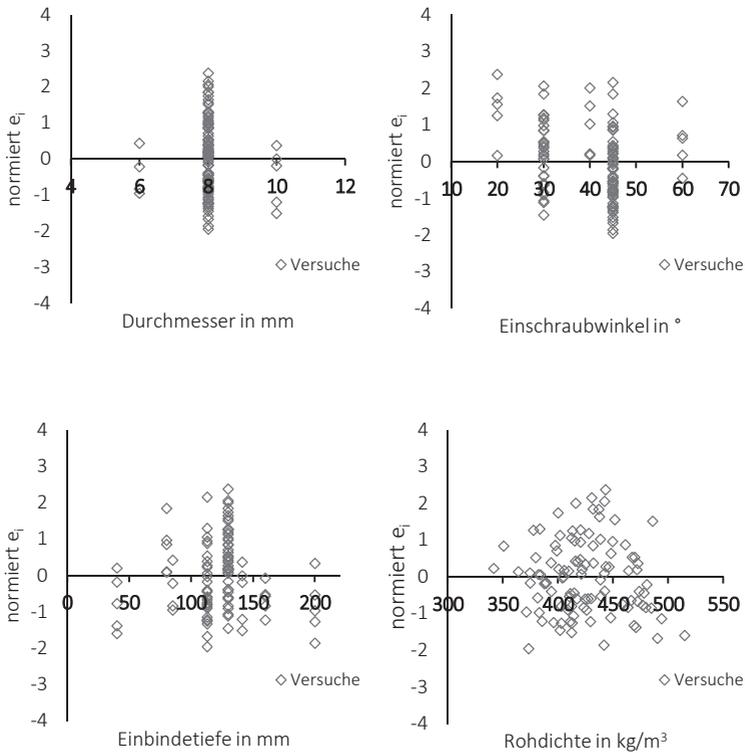


Bild 6-18 Normierte Residuen  $e_i$  der Ausziehversuche in Abhängigkeit der Einflussparameter Durchmesser, Einschraubwinkel, Einbindetiefe und Rohdichte

Die Werte nach den Berechnungsgleichungen (33) und (34) werden den Versuchsergebnissen und den in Kapitel 3 beschriebenen Versuchsdaten aus der Literatur in Bild 6-19 für die Scherversuche und in Bild 6-20 für die Ausziehversuche gegenübergestellt. Dafür werden die Verbindungssteifigkeiten der vorhandenen Versuchsdaten in die axiale Steifigkeit  $k_{ax}$  umgerechnet. Der Reibungseinfluss für die Versuchsdaten aus den Literaturstellen wird vereinfachend vernachlässigt. Tabelle 3-1 (S. 7) zeigt die Zusammenstellung

der Versuchsergebnisse aus der Literatur mit den Besonderheiten der Versuche und die Aufschlüsselung der jeweiligen Kürzel, die in den Bild 6-19 und Bild 6-20 verwendet werden.

Die Versuchsdaten aus der Literatur sind in Anlage 5 für die Ausziehversuche und in Anlage 6 für Scherversuche aufgeführt.

Die Gegenüberstellungen der berechneten axialen Steifigkeit nach Gleichung (33) und (34) mit den Versuchsdaten aus den Literaturstellen weisen eine gute Übereinstimmung auf. Die Versuchsdaten der Ausziehversuche mit den Kürzeln A\_4\_30° und A\_4\_60° sind geringer als der Schätzwert. Die Wegmessungen aus diesen Untersuchungen, die für die Steifigkeitsauswertung herangezogen wurden, unterscheiden sich zu denen in diesem Bericht. Des Weiteren decken die in diesem Bericht vorgestellten Ausziehversuche nur den Steifigkeitsbereich zwischen 12 kN/mm und 42 kN/mm ab. Es ist zu empfehlen, weitere Untersuchungen mit größeren absoluten Steifigkeitswerten durchzuführen.

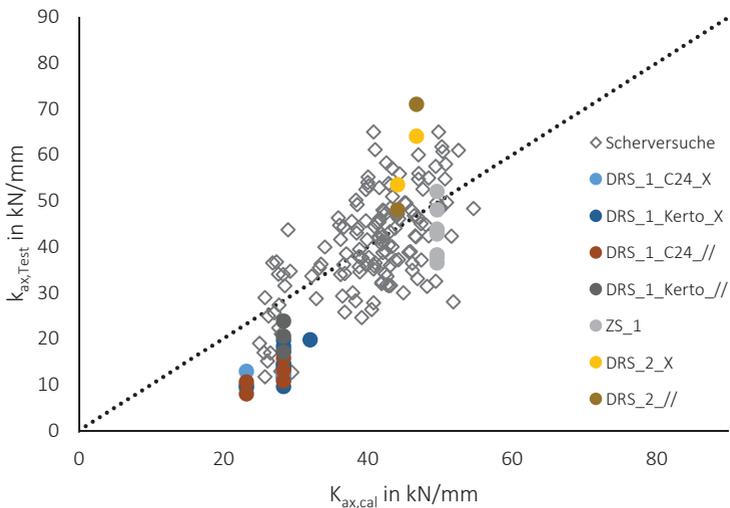


Bild 6-19 Axiale Steifigkeit der durchgeführten und in der Literatur zu findenden Scherversuche in Abhängigkeit des Berechnungswertes nach Gleichung (33)

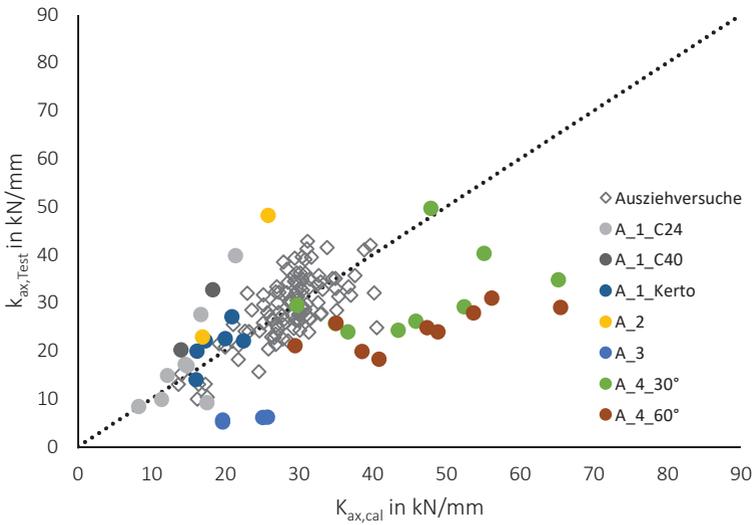


Bild 6-20 Axiale Steifigkeit der durchgeführten und in der Literatur zu findenden Ausziehversuche in Abhängigkeit des Berechnungswertes nach Gleichung (34)

# 7 Bewertung und Gegenüberstellung der Prüfmethode

Innerhalb dieses Kapitels werden die verwendeten Prüfmethode anhand der durchgeführten Versuche bewertet und gegenübergestellt. Die Versuche sind in Kapitel 6 beschrieben.

Bild 7-1 zeigt die axiale Steifigkeit aller Scherverversuche (Variante geneigt und gekreuzt) und Ausziehversuche über dem Produkt aus Gewindeaußendurchmesser  $d$  und Einbindtiefe  $l_{ef}$  aufgetragen.

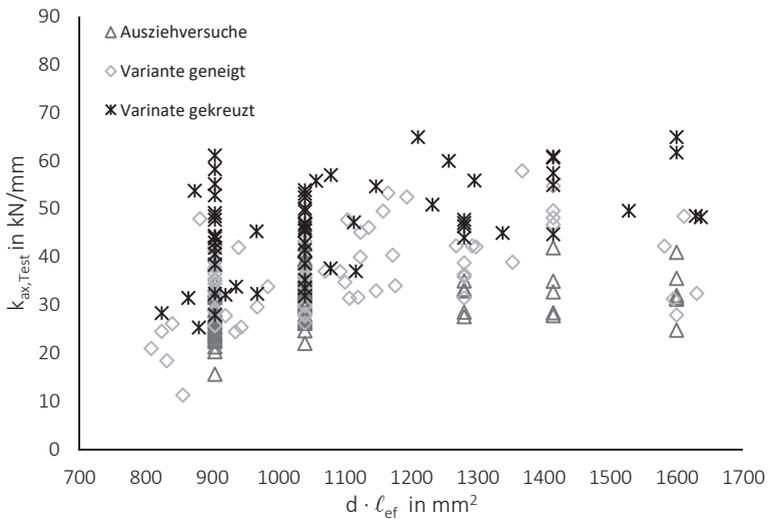


Bild 7-1 Axiale Steifigkeit aller durchgeführten Versuche über dem Produkt aus Gewindeaußendurchmesser und Einbindtiefe

Diese Darstellungsart wurde gewählt, da der Gewindeaußendurchmesser und die Einbindtiefe einen großen Einfluss auf die axiale Steifigkeit haben. Es wird ersichtlich, dass mit den Ausziehversuchen in der Tendenz die kleinsten Steifigkeitswerte und mit den Scherversuchen der Variante gekreuzt die größten Steifigkeitswerte erreicht werden. Dies wird mit den folgenden Überlegungen begründet.

Während der Durchführung der Ausziehversuche wurde das Herausdrehen der Schraube anhand der horizontalen Bewegung der Wegaufnehmer beobachtet, vgl. Bild 7-2.

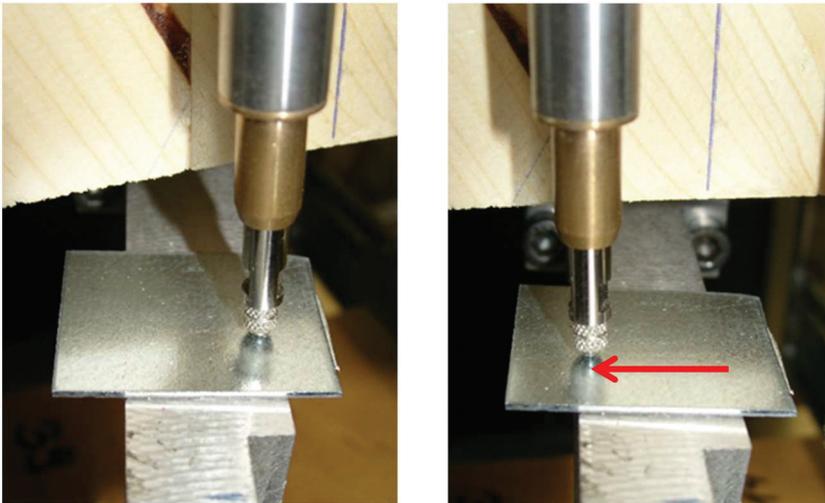


Bild 7-2 Horizontale Verschiebung des Wegaufnehmers, links vor und rechts nach der Versuchsdurchführung

Das Herausdrehen kann nur bei den Ausziehversuchen stattfinden, da die Drehung bei den Scherversuchen durch die entgegengesetzten Belastungsrichtungen in den beiden Holzbauteilen sich gegenseitig aufheben.

Zusätzlich erfolgte die Wegaufnehmerbefestigung in der Schwerachse des Holzprüfkörpers. Es muss geklärt werden, ob durch diese Befestigungsweise

zusätzliche Nachgiebigkeiten in die Verschiebungsmessung mit eingehen. Da es sich bei den Ausziehversuchen um sehr kleine Messwege handelt, ist dieser Versuchsaufbau zur Ermittlung der Steifigkeit sehr fehleranfällig. Aus diesem Grund wird davon abgeraten, die axiale Steifigkeit anhand von Ausziehversuchen zu bestimmen.

Im nächsten Schritt werden die Scherversuche betrachtet. Dazu zeigt Bild 7-3 den Vergleich der beiden Scherversuchsvarianten geneigt und gekreuzt für die mittlere Fugensteifigkeit  $k_s$  pro Schraube und die mittleren axialen Steifigkeiten  $k_{ax}$  für alle durchgeführten Versuchsreihen.

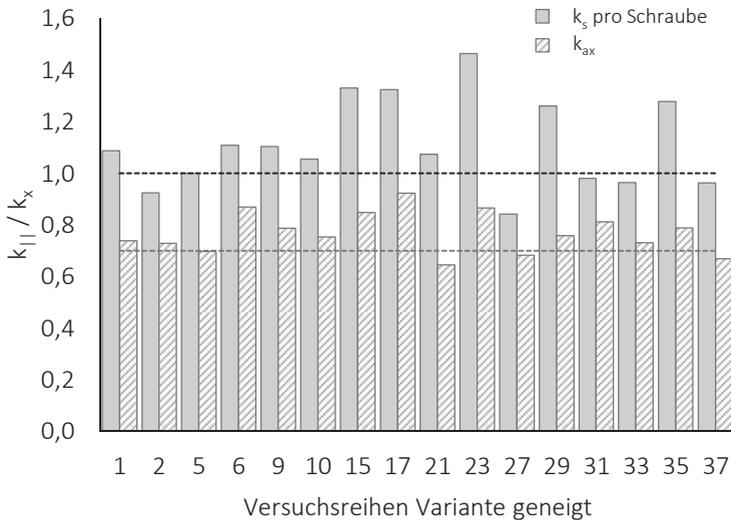


Bild 7-3 Division der Fugensteifigkeit pro Schraube beziehungsweise der Axialsteifigkeit der Variante geneigt zu gekreuzt

Es wird ersichtlich, dass für die Variante gekreuzt und geneigt nahezu gleiche  $k_s$ -Werte pro Schraube ermittelt werden mit einer mittleren Abweichung von nur 12 %. Lediglich die Reihen 15, 17, 29 und 35 weisen größere Unterschiede auf. Der Grund hierfür wird in den geometrischen Abweichungen wie Einschraubwinkel und Einschraubtiefe der Variante gekreuzt zur Variante

geneigt vermutet. Folglich ist die Wichtigkeit der sauberen Herstellung und Montage der Prüfkörper hervorzuheben. Dies sollte vor jeder Versuchsdurchführung geprüft werden.

Der Vergleich der axialen Steifigkeiten zeigt, dass  $k_{ax}$  der Variante gekreuzt im Mittel 22 % größer als  $k_{ax}$  der Variante geneigt ist. Die Ursache für diese Beobachtung kann zum jetzigen Zeitpunkt nicht benannt werden.

Schlussfolgernd kann empfohlen werden, die axiale Steifigkeit für Vollgewindeschrauben anhand von Scherversuchen der Variante gekreuzt zu ermitteln. Die somit ermittelte axiale Steifigkeit gilt auch für Verbindungen mit geneigten Schrauben, wie die Gegenüberstellung der Fugensteifigkeit in Bild 7-3 aufzeigt. Zusätzlich weist diese Prüfmethode eine gute Eignung für den Anwendungsfall von nachgiebig verbundenen Biegeträgern auf (vgl. Kapitel 5).

Des Weiteren ist der Prüfaufwand für die Scherversuche geringer als bei den Ausziehversuchen und die Steifigkeitsauswertung erfolgt bei größeren Verschiebungen und ist somit weniger fehlerbehaftet.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde die axiale Steifigkeit von Vollgewindeschrauben untersucht. Zur Bestimmung der axialen Steifigkeit wurden die drei Prüfmethode Druckscher-, Diagonalscher und Ausziehversuche verwendet. Durch die Gegenüberstellung der Druckscherversuche mit dem Anwendungsfall nachgiebig verbundener Biegeträger wurde eine gute Eignung dieser Prüfmethode zur Bestimmung der axialen Steifigkeit bestätigt. Das Hauptziel des Forschungsvorhabens bestand darin, eine geeignete Prüfmethode herauszuarbeiten, um die axiale Steifigkeit von Vollgewindeschrauben zu ermitteln. Die Ergebnisse dieser Arbeiten zeigten, dass Scherversuche mit einer gekreuzten Schraubenanordnung eine geeignete Prüfmethode darstellen und deren Ergebnisse unmittelbar für Verbindungen mit geneigter Schraubenanordnung herangezogen werden können.

Mit Hilfe von insgesamt 290 Versuchen wurde eine anschließende Parameteranalyse durchgeführt und die Hauptparameter Gewindeaußendurchmesser und Einbindetiefe identifiziert. Beruhend auf dieser Analyse wurden Berechnungsmodelle für die Scher- und Ausziehversuche durch eine nichtlineare Regression entwickelt.

Aufgrund einer geringen Versuchsanzahl für die Versuchsreihen mit unterschiedlichen Gewindeaußendurchmessern und mit sehr kleinen und sehr großen Einbindetiefen ergeben die Berechnungsmodelle in diesen Bereichen keine guten Übereinstimmungen mit den Berechnungswerten. Es ist zu empfehlen, dahingehende weitere Versuche durchzuführen.

Zusätzlich sollten im nächsten Schritt Schrauben unterschiedlicher Hersteller untersucht werden.

Der quantitative Unterschied in der axialen Steifigkeit der Prüfmethode anhand von Ausziehversuchen und Scherversuchen und innerhalb der Scherversuche der Variante geneigt zu gekreuzt sollte noch genauer ergründet werden.



# Literaturverzeichnis

- [1] Blaß, H. J.; Bejtka, I. (2003a): Selbstbohrende Holzschrauben und ihre Anwendungsmöglichkeiten. Holzbau Kalender 2004, 3. Jahrgang, Bruderverlag Karlsruhe, S.516–541
- [2] Blaß, H. J.; Bejtka, I. (2003b): Verbindungen mit geneigt angeordneten Schrauben. Bauen mit Holz – Fachzeitschrift für konstruktiven Holzbau und Ausbau. Ausgabe Oktober 2003. S.28–36
- [3] Blaß, H. J.; Sandhaas, C. (2016): Ingenieurholzbau – Grundlagen der Bemessung, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe
- [4] Ringhofer, A. (2016): Stiffness Properties of axially loaded self-tapping screws, short Term scientific mission Report, COST Action FP1402 COST-STSM-FP1402-30283
- [5] Görlacher, R. (1990): Klassifizierung von Brettschichtholzlamellen durch Messung von Longitudinalschwingungen. Karlsruher Bericht zum Ingenieurholzbau, Universitätsverlag Karlsruhe, Karlsruhe, S.152–155
- [6] Kreuzinger, H. (1999): Platten, Scheiben und Schalen – Ein Berechnungsmodell für gängige Statikprogramme. Bauen mit Holz – Fachzeitschrift für Konstruktiven Holzbau und Ausbau. Ausgabe Januar 1999. S.34–39
- [7] Kollmann, F. (1982): Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. 2: Auflage, Band 1, Reprint, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
- [8] Kevarinmäki, A. (2002): Joints with inclined screws. CIB-W18, paper 35-7-3, Kyoto, Japan
- [9] Krenn, H. (2009): Selbstbohrende Holzschrauben in hoch beanspruchten Bereichen. Research Report, holz.bau forschungs gmbh, Technische Universität Graz
- [10] Prüfberichte des Materialprüfamts für das Bauwesen der Technischen Universität München – Abteilung Holzbau und Baukonstruktionen (2003), unveröffentlicht
- [11] Prüfbericht der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich (2001), unveröffentlicht
- [12] Research Report of the Technical Research Center of Finland VTT (2005), unveröffentlicht

- [13] Blaß, H. J.; Bejtka, I.; Uibel, T. (2006): Tragfähigkeit von Verbindungen mit selbstbohrenden Holzschrauben mit Vollgewinde. Bd. 4, Karlsruher Bericht zum Ingenieurholzbau, Universitätsverlag Karlsruhe, Karlsruhe
- [14] Ayoubi, M. (2014): Zum Verbundverhalten von Vollgewindeschrauben mit großen Einbindelängen beim Einsatz als Bewehrung in Brettschichtholzbauteilen. Dissertation, RWTH Aachen

## **Normen**

- DIN EN 1995 1-1 (2010) 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 + AC2006 + A1:2008, DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin
- DIN EN 26891 (1991) Holzbauwerke. Verbindungen mit mechanischen Verbindungsmitteln. Allgemeine Grundsätze für die Ermittlung der Tragfähigkeit und des Verformungsverhaltens(ISO 6891:1983); Deutsche Fassung 26891:1991, DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin
- DIN EN 1382 (2016) Holzbauwerke – Prüfverfahren – Ausziehtragfähigkeit von Holzverbindungsmitteln; Deutsche Fassung EN 1382:2016, DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin
- DIN EN 408 (2010) 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 338 (2016) Bauholz für tragende Zwecke – Festigkeitsklassen; Deutsche Fassung EN 338:2016, DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin

## **Zulassungen**

- Europäische Technische Zulassung ETA-11/0190 vom 27.Juni 2013. Selbstbohrende Schrauben als Holzverbindungsmittel. Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin
- Europäische Technische Zulassung ETA-12/0062 vom 18.Juni 2012. Selbstbohrende Schrauben zur Verwendung im Holzbau, Österreichisches Institut für Bautechnik, Wien

# Formelzeichen

$a_p$	Abstand des horizontalen Auflagerpunktes, gemessen jeweils von der Hirnholzseite
$a_i$	Abstand der Schwereachse des Einzelquerschnitt $i$ von der Spannungsnullebene
$A_i$	Fläche des Einzelquerschnitts $i$
$b_B$	Breite des ideellen Trägers $B$ für das Schubanalogieverfahren
$b_i$	Breite der Einzelquerschnitte $i$
$b_p$	Prüfkörperbreite
$d$	Durchmesser, Gewindeaußendurchmesser von Schrauben
$d_i$	Dicke der Einzelquerschnitte $i$
$d_k$	Kerndurchmesser von Schrauben
$d_s$	Durchmesser der Öffnung der Stahlplatte für die Ausziehversuche
$e$	Fehler bzw. Residuen
$E_{dyn}$	Dynamischer E-Modul
$E_i$	E-Modul der Einzelquerschnitte $i$
$(EI)_{ef}$	Effektive Biegesteifigkeit
$e_{mean}$	Mittlerer Fehler bzw. Residuen
$E_s$	E-Modul von Stahl
$f$	Rohdichtekorrekturfaktor für die axiale Steifigkeit

$F_{ax}$	Kraft in Achsrichtung der Schraube
$F_{ax,\perp}$	Kraftkomponente der axialen Schraubenkraft senkrecht zur Fuge
$F_{ax,  }$	Kraftkomponente der axialen Schraubenkraft parallel zur Fuge
$F_{est}$	Geschätzte Kraft für einen Versuch
$F_{max}$	Maximalkraft
$F_{max,1}$	Maximalkraft eines Scherversuchskörpers Variante geneigt
$F_{max,2}$	Maximalkraft eines Scherversuchskörpers Variante gekreuzt
$F_{max,\perp}$	Komponenten der Maximalkraft eines Diagonalscherversuchs rechtwinklig zur Fuge
$F_{max,  }$	Komponenten der Maximalkraft eines Diagonalscherversuchs parallel zur Fuge
$f_r$	Faktor zur Berücksichtigung des Reibeinflusses bei der axialen Steifigkeit für Variante geneigt
$G^B$	Schubmodul des ideellen Trägers B für das Schubanalogieverfahren
$G_i$	Schubmodul der Einzelquerschnitte $i$
$G_{mean}$	Mittlerer Schubmodul
$H$	Horizontale Auflagerkraft für die Druckscherversuche
$h_B$	Höhe des ideellen Trägers B für das Schubanalogieverfahren
$h_i$	Höhe der Einzelquerschnitte $i$
$h_p$	Prüfkörperhöhe
$I_i$	Flächenträgheitsmoment der Einzelquerschnitte $i$
$K_{ax}$	Rechenwert für den Verschiebungsmodul in Richtung der Schraubenachse

---

$K_{ser}$	Rechenwert für den Verschiebungsmodul einer Verbindung
$k_{ax}$	Anfangsverschiebungsmodul in Richtung der Schraubenachse
$k_{ax,mean}$	Mittlerer Anfangsverschiebungsmodul in Richtung der Schraubenachse
$k_{ax,mean,cor}$	Mittlerer Anfangsverschiebungsmodul in Richtung der Schraubenachse
$k_i$	Anfangsverschiebungsmodul
$k_s$	Modifizierter Anfangsverschiebungsmodul bzw. Verbindungssteifigkeit
$k_{s,o}$	Modifizierter Anfangsverschiebungsmodul bzw. Verbindungssteifigkeit am oberen Rand eines Ausziehversuchs
$k_{s,Schub}$	Verbindungssteifigkeit eines nachgiebig verbundenen Biegeträgers berechnet mit dem Schubanalogieverfahren
$k_{s,\gamma,1}$	Verbindungssteifigkeit eines nachgiebig verbundenen Biegeträgers berechnet mit dem $\gamma$ -Verfahren der Variante mit $s_{ef}$
$k_{s,\gamma,2}$	Verbindungssteifigkeit eines nachgiebig verbundenen Biegeträgers berechnet mit dem $\gamma$ -Verfahren der Variante mit der tatsächlichen Schraubenanzahl
$k_{s,u}$	Modifizierter Anfangsverschiebungsmodul bzw. Verbindungssteifigkeit am unteren Rand eines Ausziehversuchs
$k_{RH}$	Steifigkeit der Reibung aus der Auflagerkraft H
$k_{RS}$	Steifigkeit der Reibung aus der senkrecht zur Fuge wirkenden Schraubenkomponente
$k_{SK}$	Steifigkeit des Schraubenkreuzteils parallel zur Fuge für eine Anschlussseite

$k_{s,  }$	Steifigkeit des Schraubenteils parallel zur Fuge für eine Anschlussseite
$l$	Länge bzw. Stützweite zwischen den Auflagerpunkten
$l_{ef}$	Wirksame Einbindetiefe
$l_{ef,Labor}$	Tatsächliche wirksame Einbindetiefe gemessen nach der Versuchsdurchführung an einem Prüfkörper
$l_p$	Prüfkörperlänge
$l_s$	Länge zwischen Oberkante des Ausziehversuchsprüfkörpers und der Wegaufnehmerbefestigung
Max	Maximalwert
Mean	Mittelwert
Min	Minimalwert
N	Anzahl
n	Schraubenanzahl
$n_{ef}$	Effektive Schraubenanzahl
$q_d$	Belastung in kN/m
$R^2$	Bestimmtheitsmaß
s	Standardabweichung
s	Verbindungsmittelabstand
$S^B$	Ersatzschubsteifigkeit des ideellen Trägers B für das Schubanalogieverfahren
$s_{min}$	Minimaler Verbindungsmittelabstand
$s_{max}$	Maximaler Verbindungsmittelabstand
u	Holzfeuchte
v	Variationskoeffizient

---

$v$	Mittelwert der Verschiebung
$v_{\max}$	Mittlere maximale Verschiebung
$v_{\max,o}$	Mittlere maximale Verschiebung am oberen Rand eines Ausziehversuchs
$v_{\max,u}$	Mittlere maximale Verschiebung am unteren Rand eines Ausziehversuchs
$w_{m,01}$	Mitteldurchbiegung der nachgiebig verbundenen Biegeträger gemessen bei 10% der Maximalkraft
$w_{m,04}$	Mitteldurchbiegung der nachgiebig verbundenen Biegeträger gemessen bei 40% der Maximalkraft
$\alpha$	Winkel zwischen Schraubenachse und Faserrichtung des Holzes bzw. Einschraubwinkel
$\alpha_{\text{Labor}}$	Tatsächlicher Einschraubwinkel gemessen nach der Versuchsdurchführung an einem Prüfkörper
$\alpha_1$	Einschraubwinkel für die Variante geneigt
$\alpha_2$	Einschraubwinkel für die Variante gekreuzt
$\beta$	Winkel zwischen eingeleiteter Kraft und Faserrichtung des Holzes für die Diagonalscherversuche
$\gamma_i$	Beiwert für die Einzelquerschnitte $i$ zur Berücksichtigung der Schubverformung für nachgiebig verbundene Biegeträger
$\delta_j$	Verschiebung eines induktiven Wegaufnehmers $j$
$\mu$	Reibungsbeiwert für Holz in Faserrichtung
$\rho$	Rohdichte
$\rho_{\text{mean},12}$	Mittlere Rohdichte bei einer Holzfeuchte von 12 %
$\rho_u$	Rohdichte bei Holzfeuchte $u$
$\rho_0$	Darrrohddichte bzw. Rohdichte bei Holzfeuchte 0 %

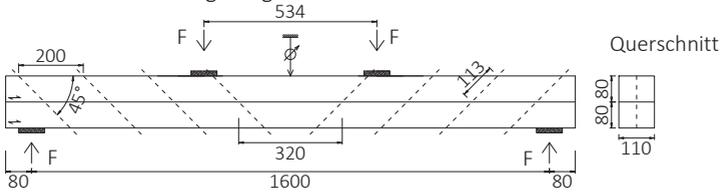


# Anlagen

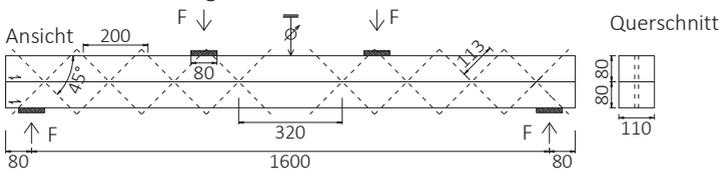
# Anlage 1

Versuchsergebnisse der nachgiebig verbundenen Biegeträger

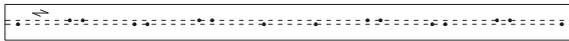
Reihe B1 - Variante geneigt



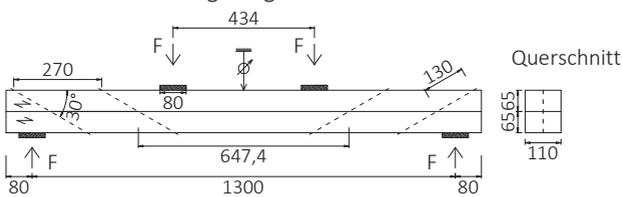
Reihe B3 - Variante gekreuzt



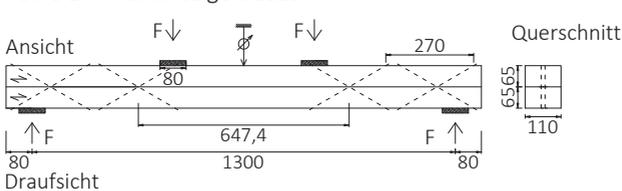
Draufsicht



Reihe B2 - Variante geneigt



Reihe B4 - Variante gekreuzt



Draufsicht



Bild A1 Versuchskörper der nachgiebig verbundenen Biegeträger (B1–B4)

Tabelle A1 Ergebnisse der Reihe B1

Versuch	F <sub>max,L</sub> in kN	F <sub>max,R</sub> in kN	E <sub>dyn</sub> in N/mm <sup>2</sup>	h in mm	b in mm	EI <sub>ef</sub> in Nmm <sup>2</sup>	γ <sub>1</sub>	k <sub>s,γ,1</sub> in kN/mm	k <sub>s,γ,2</sub> in kN/mm	k <sub>s,Schub</sub> in kN/mm	ρ in kg/m <sup>3</sup>	u in %
B1-1-1	24,1	24,5	11400	80,3	110	1,58E+11	0,10	9,47	8,24	11,5	426	14,4
B1-1-2			10400	80,2	110						394	12,7
B1-2-1	23,2	23,4	10900	80,2	110	1,60E+11	0,10	9,02	7,84	10,8	457	14,9
B1-2-2			11900	80,2	111						415	14,8
B1-3-1	25,5	25,9	13100	80,0	110	1,72E+11	0,09	9,60	8,34	10,9	434	14,5
B1-3-2			12400	80,1	110						469	14,3
B1-4-1	22,2	22,5	11500	80,1	110	1,69E+11	0,12	11,6	10,1	13,2	414	13,6
B1-4-2			11000	80,4	110						411	13,5
B1-5-1	37,4	37,8	16400	80,1	110	2,34E+11	0,10	13,6	11,8	16,1	574	14,3
B1-5-2			16400	80,2	110						539	14,4
Min	22,2	22,5	10400	80,0	110	1,58E+11	0,09	9,02	7,84	10,8	394	12,7
Mean	26,5	26,8	12540	80,2	110	1,79E+11	0,10	10,7	9,27	12,5	453	14,1
Max	37,4	37,8	16400	80,4	111	2,34E+11	0,12	13,6	11,8	16,1	574	14,9
s	6,24	6,29	2185	0,119	0,127	3,14E+10	0,01	1,92	1,67	2,26	59,3	0,675
v	23,6	23,4	17,4	0,148	0,115	17,6	10,7	18,0	18,0	18,1	13,1	4,78

Tabelle A2 Ergebnisse der Reihe B2

Versuch	F <sub>max,L</sub> in kN	F <sub>max,R</sub> in kN	E <sub>dyn</sub> in N/mm <sup>2</sup>	h in mm	b in mm	EI <sub>ef</sub> in Nmm <sup>2</sup>	γ <sub>1</sub>	k <sub>s,γ,1</sub> in kN/mm	k <sub>s,γ,2</sub> in kN/mm	k <sub>s,Schub</sub> in kN/mm	ρ in kg/m <sup>3</sup>	u in %
B2-1-1	19,3	19,5	9860	65,4	110	7,93E+10	0,11	17,7	15,8	17,3	371	14,9
B2-1-2			10500	65,3	110						370	14,7
B2-2-1	22,1	22,5	12700	65,1	110	9,24E+10	0,09	18,2	16,2	16,7	452	16,0
B2-2-2			12600	65,3	110						446	15,8
B2-3-1	22,2	22,4	13100	65,3	110	9,18E+10	0,07	14,3	12,8	14,9	461	16,0
B2-3-2			13200	65,4	110						450	16,1
B2-4-1	22,0	21,3	12700	65,3	110	8,75E+10	0,07	13,9	12,4	14,6	452	16,1
B2-4-2			12200	65,2	110						433	15,4
B2-5-1	20,6	20,0	10500	65,3	110	9,24E+10	0,14	24,7	22,0	24,1	515	16,2
B2-5-2			11700	65,2	110						514	16,1
Min	19,3	19,5	9860	65,1	110	7,93E+10	0,07	13,9	12,4	14,6	370	14,7
Mean	21,3	21,2	11900	65,3	110	8,87E+10	0,10	17,8	15,9	17,5	446	15,7
Max	22,2	22,5	13200	65,4	110	9,24E+10	0,14	24,7	22,0	24,1	515	16,2
s	1,26	1,36	1211	0,101	0,121	5,64E+09	0,03	4,33	3,86	3,87	48,6	0,542
v	5,91	6,44	10,2	0,155	0,110	6,36	30,9	24,4	24,4	22,1	10,9	3,44

Tabelle A3 Ergebnisse der Reihe B3

Versuch	F <sub>max,L</sub> in kN	F <sub>max,R</sub> in kN	E <sub>dyn</sub> in N/mm <sup>2</sup>	h in mm	b in mm	E <sub>Ief</sub> in Nmm <sup>2</sup>	γ <sub>1</sub>	k <sub>s,γ,1</sub> in kN/mm	k <sub>s,γ,2</sub> in kN/mm	k <sub>s,Schub</sub> in kN/mm	ρ in kg/m <sup>3</sup>	u in %
B3-1-1			12100	80,1	110						419	13,6
B3-1-2	32,8	33,3	12600	80,3	110	2,09E+11	0,17	18,5	16,0	22,1	420	14,0
B3-2-1			12900	80,3	110						458	12,6
B3-2-2	32,0	31,9	12700	80,3	110	2,21E+11	0,17	19,7	17,1	23,9	453	12,6
B3-3-1			11900	80,0	110						423	12,5
B3-3-2	20,4	20,4	12400	80,4	110	2,00E+11	0,16	16,9	14,7	18,7	423	12,5
B3-4-1			13600	80,2	110						447	15,0
B3-4-2	26,6	27,1	12700	80,4	110	1,96E+11	0,11	12,5	10,8	15,4	428	15,1
B3-5-1			15300	80,1	110						576	14,2
B3-5-2	36,3	36,4	15600	80,0	110	2,56E+11	0,16	21,7	18,8	26,1	556	14,5
Min	20,4	20,4	11900	80,0	110	1,96E+11	0,11	12,5	10,8	15,4	419	12,5
Mean	29,6	29,8	13200	80,2	110	2,16E+11	0,15	17,8	15,5	21,2	460	13,7
Max	36,3	36,4	15600	80,4	110	2,56E+11	0,17	21,7	18,8	26,1	576	15,1
s	6,19	6,25	1283	0,138	0,083	2,40E+10	0,03	3,46	3,01	4,25	57,7	1,05
v	20,9	21,0	9,75	0,172	0,075	11,1	16,3	19,4	19,4	20,0	12,5	7,69

Tabelle A4 Ergebnisse der Reihe B4

Versuch	F <sub>max,L</sub> in kN	F <sub>max,R</sub> in kN	E <sub>dyn</sub> in N/mm <sup>2</sup>	h in mm	b in mm	E <sub>Ief</sub> in Nmm <sup>2</sup>	γ <sub>1</sub>	k <sub>s,γ,1</sub> in kN/mm	k <sub>s,γ,2</sub> in kN/mm	k <sub>s,Schub</sub> in kN/mm	ρ in kg/m <sup>3</sup>	u in %
B4-1-1			10100	65,3	110						368	14,5
B4-1-2	18,6	18,8	9940	65,3	110	9,11E+10	0,16	28,0	25,0	28,9	360	14,6
B4-2-1			12600	65,3	110						450	15,5
B4-2-2	24,5	24,9	11600	65,3	110	1,14E+11	0,18	40,4	36,0	38,8	462	15,1
B4-3-1			11900	65,3	111						466	15,4
B4-3-2	23,7	24,0	11800	65,2	110	1,15E+11	0,19	40,7	36,3	40,5	441	15,1
B4-4-1			13300	65,2	110						449	15,3
B4-4-2	19,4	19,7	11700	65,2	110	1,16E+11	0,17	39,4	35,2	38,9	477	15,2
B4-5-1			13000	65,3	110						514	15,3
B4-5-2	28,7	27,7	14200	65,3	110	1,21E+11	0,16	36,0	32,1	35,7	456	15,9
Min	18,6	18,8	9940	65,2	110	9,11E+10	0,16	28,0	25,0	28,9	360	14,5
Mean	23,0	23,0	12000	65,3	110	1,11E+11	0,17	36,9	32,9	36,6	444	15,2
Max	28,7	27,7	14200	65,3	111	1,21E+11	0,19	40,7	36,3	40,5	514	15,9
s	4,12	3,73	1331	0,041	0,229	1,16E+10	0,01	5,32	4,74	4,63	47,0	0,409
v	17,9	16,2	11,1	0,062	0,207	10,4	7,58	14,4	14,4	12,7	10,6	2,70

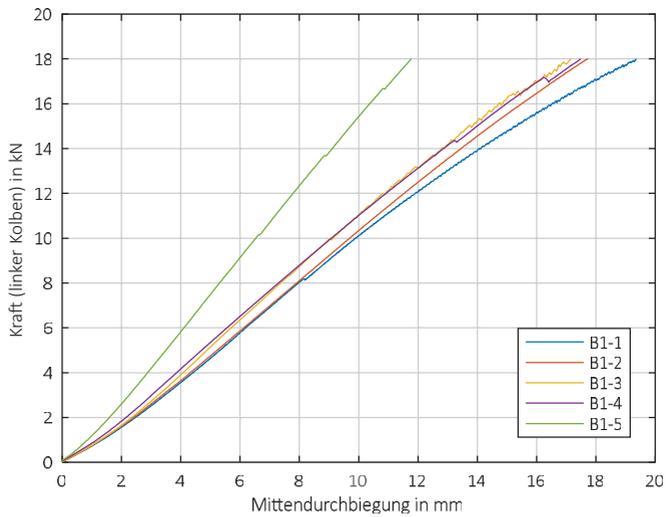


Bild A2 Last-Verschiebungs-Diagramm der Biegeversuche – B1

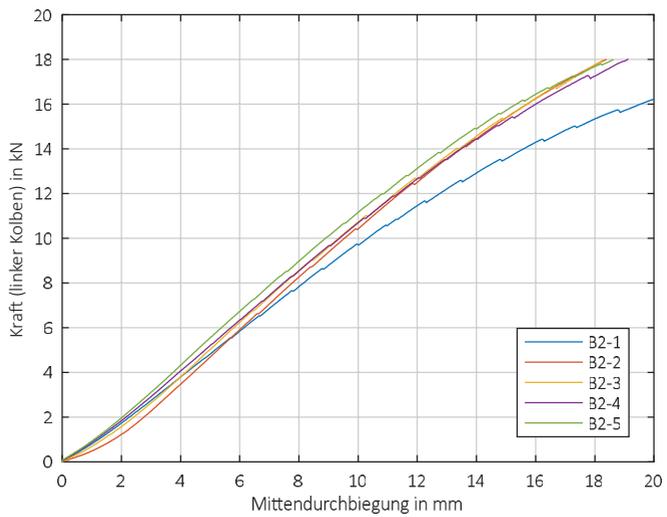


Bild A3 Last-Verschiebungs-Diagramm der Biegeversuche – B2

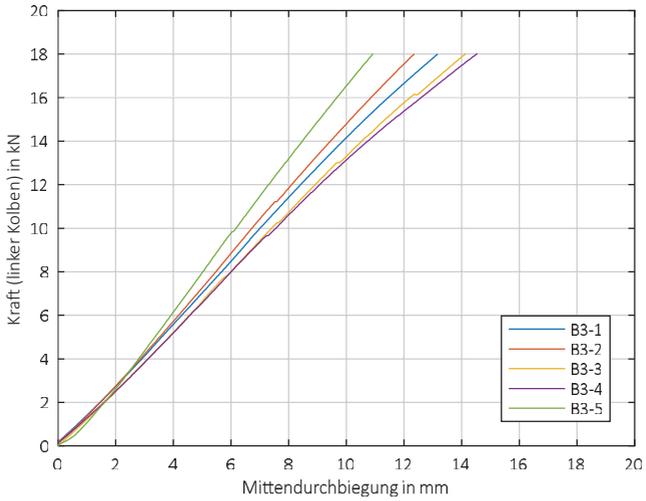


Bild A4 Last-Verschiebungs-Diagramm der Biegeversuche – B3

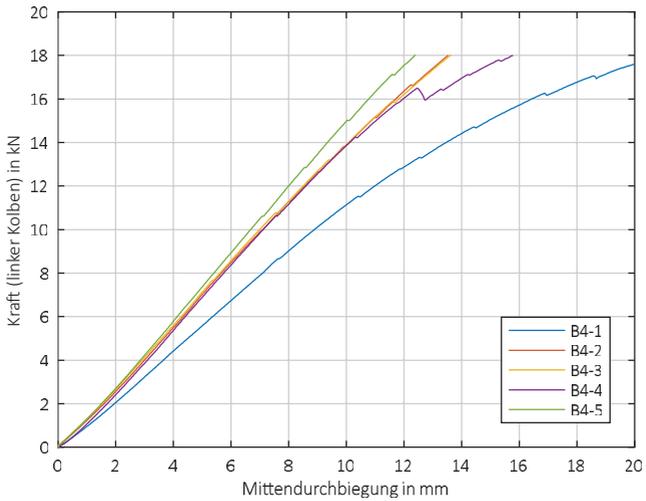


Bild A5 Last-Verschiebungs-Diagramm der Biegeversuche – B4

## Anlage 2

### Versuchsergebnisse – Druckscherversuche

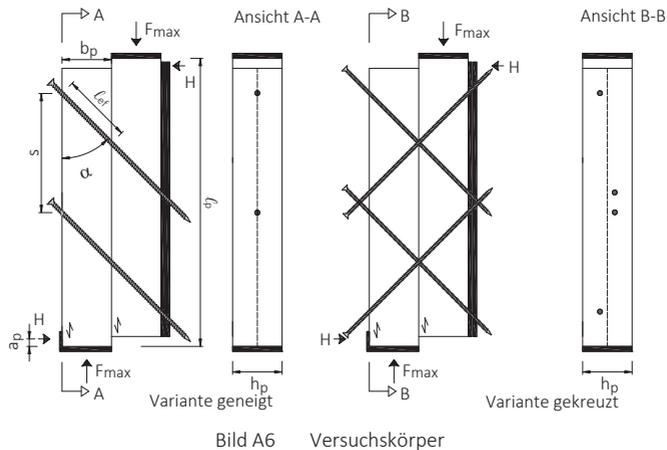


Tabelle A5 Geometrie der Prüfkörper der Druckscherversuche

Reihe	$b_p$ in mm	$h_p$ in mm	$l_p$ in mm	$a_p$ in mm	$l_{ef}$ in mm	$\alpha$ in °	$d$ in mm	$d_k$ in mm	$s$ in mm	Variante	Besonderheiten
1	80	110	480	20	113	45	8	5,1	200	geneigt	nicht vorgebohrt
2	65	110	615	20	130	30	8	5,1	270	geneigt	
3	80	110	480	20	113	45	8	5,1	200	gekreuzt	
4	65	110	615	20	130	30	8	5,1	270	gekreuzt	
5	80	110	480	10	113	45	8	5,1	200	geneigt	vorgebohrt
6	65	110	615	10	130	30	8	5,1	270	geneigt	
7	80	110	480	10	113	45	8	5,1	200	gekreuzt	
8	65	110	615	10	130	30	8	5,1	270	gekreuzt	
9	80	110	480	10	113	45	8	5,1	200	geneigt	Holzfeuchte im Mittel 20%
10	65	110	615	10	130	30	8	5,1	270	geneigt	
11	80	110	480	10	113	45	8	5,1	200	gekreuzt	
12	65	110	615	10	130	30	8	5,1	270	gekreuzt	
15	60	60	380	20	84,9	45	6	3,8	160	geneigt	nicht vorgebohrt
16	60	60	380	20	84,9	45	6	3,8	160	gekreuzt	
17	100	100	580	20	141,4	45	10	6,4	240	geneigt	
18	100	100	580	20	141,4	45	10	6,4	240	gekreuzt	

Tabelle A6 Rohdichtesortierung zur Ermittlung des Reibbeiwertes

Versuch		$\rho$ in kg/m <sup>3</sup>	$\alpha_1$ in °	Versuch		$\rho$ in kg/m <sup>3</sup>	$\alpha_2$ in °
1	1	379	45	3	3	381	45
1	2	374	45	3	1	375	45
1	3	413	45	3	4	434	45
1	4	412	45	3	2	405	45
1	5	468	45	3	5	464	45
2	1	363	30	4	1	359	30
2	2	401	27	4	2	390	30
2	3	408	30	4	3	395	30
2	4	440	30	4	4	425	30
2	5	447	28	4	5	468	30
5	1	376	50	7	1	371	45
5	2	406	48	7	2	407	51
5	3	404	52	7	3	413	47
5	4	498	49	7	4	472	47,6
5	5	473	51	7	5	472	45
6	1	391	34	8	1	391	32,7
6	2	412	33	8	2	418	33,8
6	3	414	34	8	3	422	34,7
6	4	423	32	8	4	430	30
6	5	468	35	8	5	474	30
9	1	425	43	11	1	425	45
9	2	467	45	11	2	482	45
9	3	499	47	11	4	521	47,1
9	4	489	45	11	5	489	45
9	5	497	45	11	3	497	45
10	1	351	30	12	1	380	30
10	2	431	30	12	2	451	30
10	3	449	28	12	3	465	32,6
10	4	465	30	12	4	483	30
10	5	496	30	12	5	502	30
15	1	384	51	16	1	379	52,8
15	2	407	48	16	2	407	54,4
15	3	420	51	16	3	408	51,1
15	4	448	52	16	4	439	51,5
15	5	461	51	16	5	449	50,5
17	1	366	45	18	1	390	45
17	2	415	45	18	2	396	45
17	3	411	45	18	3	409	45
17	4	426	45	18	4	422	45
17	5	439	47	18	5	454	45

Tabelle A7 Ergebnisse der Reihe 1

Versuch	F <sub>max</sub> in kN	V <sub>max</sub> in mm	k <sub>s</sub> in kN/mm	k <sub>ax</sub> in kN/mm	μ	ℓ <sub>ef,Labor</sub> in mm	α <sub>Labor</sub> in mm	ρ in kg/m <sup>3</sup>	u in %	Beobachtung
1-1	31,8	2,71	19,8	25,8	0,421	114	44,7	379	12,9	
1-2	30,7	2,17	22,1	29,2	0,403	113	45,4	374	12,8	
1-3	39,4	2,78	25,9	39,4	0,254	115	44,1	413	12,1	
1-4	31,6	2,34	24,3	37,8	0,230	110	46,5	412	12,5	Gegenseitige
1-5	46,2	2,76	28,9	32,2	0,599	116	43,6	468	11,5	Verschiebung der
Min	30,7	2,17	19,8	25,8	0,230	110	43,6	374	11,5	beiden Holzbau-
Mean	35,9	2,55	24,2	32,9	0,381	114	44,8	409	12,3	teile zueinander
Max	46,2	2,78	28,9	39,4	0,599	116	46,5	468	12,9	
s	6,73	0,278	3,49	5,73	0,149	2,30	1,14	37,5	0,552	
v	18,7	10,9	14,4	17,4	39,0	2,02	2,55	9,18	4,47	

Tabelle A8 Ergebnisse der Reihe 2

Versuch	F <sub>max</sub> in kN	V <sub>max</sub> in mm	k <sub>s</sub> in kN/mm	k <sub>ax</sub> in kN/mm	μ	ℓ <sub>ef,Labor</sub> in mm	α <sub>Labor</sub> in mm	ρ in kg/m <sup>3</sup>	u in %	Beobachtung
2-1	34,3	1,76	29,5	29,9	0,432	125	31,3	363	12,9	
2-2	37,4	1,66	36,0	34,1	0,510	128	27,4	401	12,2	
2-3 <sup>1)</sup>	45,7	1,99	29,6	27,8	0,569	133	29,3	408	12,0	
2-4	39,4	1,83	32,4	33,5	0,400	130	30,1	440	12,6	Gegenseitige
2-5	41,5	1,75	37,6	47,8	0,024	137	28,4	447	13,1	Verschiebung der
Min	34,3	1,66	29,5	27,8	0,024	125	27,4	363	12,0	beiden Holzbau-
Mean	39,7	1,80	33,0	34,6	0,387	131	29,3	412	12,5	teile zueinander
Max	45,7	1,99	37,6	47,8	0,569	137	31,3	447	13,1	
s	4,30	0,124	4,67	8,58	0,214	4,67	1,51	34,0	0,471	
v	10,8	6,90	14,4	25,3	55,2	3,57	5,14	8,25	3,76	

<sup>1)</sup> Steifigkeitsauswertung im Bereich zwischen 15 % und 45 % F<sub>max</sub>

Tabelle A9 Ergebnisse der Reihe 3

Versuch	F <sub>max</sub> in kN	V <sub>max</sub> in mm	k <sub>s</sub> in kN/mm	k <sub>ax</sub> in kN/mm	μ	ℓ <sub>ef,Labor</sub> in mm	α <sub>Labor</sub> in mm	ρ in kg/m <sup>3</sup>	u in %	Beobachtung
3-1	40,6	1,53	44,3	44,3		113	45,3	375	12,3	
3-2	49,2	1,72	43,0	43,0		113	45,2	405	11,9	
3-3	41,3	2,13	38,4	38,4		112	45,6	381	12,1	
3-4	59,9	1,76	55,2	55,2		115	44,2	434	11,9	Gegenseitige Verschiebung der beiden Holzbau- teile zueinander
3-5	51,5	2,21	41,9	41,9		115	44,0	464	12,8	
Min	40,6	1,53	38,4	38,4		112	44,0	375	11,9	
Mean	48,5	1,87	44,6	44,6		114	44,9	412	12,2	
Max	59,9	2,21	55,2	55,2		115	45,6	464	12,8	
s	7,95	0,288	6,31	6,31		1,41	0,709	37,1	0,394	
v	16,4	15,4	14,2	14,2		1,25	1,58	9,00	3,24	

Tabelle A 10 Ergebnisse der Reihe 4

Versuch	F <sub>max</sub> in kN	V <sub>max</sub> in mm	k <sub>s</sub> in kN/mm	k <sub>ax</sub> in kN/mm	μ	ℓ <sub>ef,Labor</sub> in mm	α <sub>Labor</sub> in mm	ρ in kg/m <sup>3</sup>	u in %	Beobachtung
4-1	52,3	1,31	68,3	45,5		127	30,8	359	12,1	
4-2	54,3	1,33	68,4	45,6		127	30,7	390	12,0	
4-3	64,4	1,40	79,8	53,2		131	29,8	395	11,8	
4-4	61,2	1,45	64,3	42,9		135	28,8	425	11,7	Gegenseitige Verschiebung der beiden Holzbau- teile zueinander
4-5	80,5	1,69	69,1	46,1		131	29,8	468	12,0	
Min	52,3	1,31	64,3	42,9		127	28,8	359	11,7	
Mean	62,5	1,43	70,0	46,7		130	30,0	407	11,9	
Max	80,5	1,69	79,8	53,2		135	30,8	468	12,1	
s	11,2	0,155	5,78	3,86		3,27	0,821	40,9	0,185	
v	17,9	10,8	8,26	8,26		2,51	2,74	10,1	1,56	

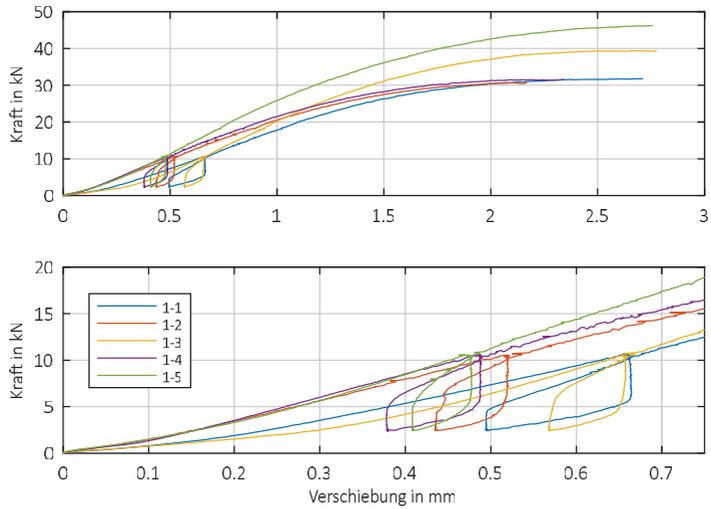


Bild A7 Last-Verschiebungs-Diagramm der Druckscherversuche – Reihe 1

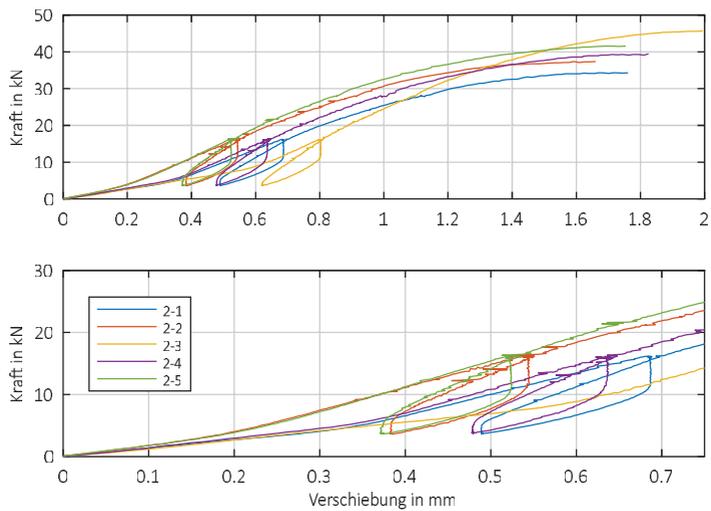


Bild A8 Last-Verschiebungs-Diagramm der Druckscherversuche – Reihe 2

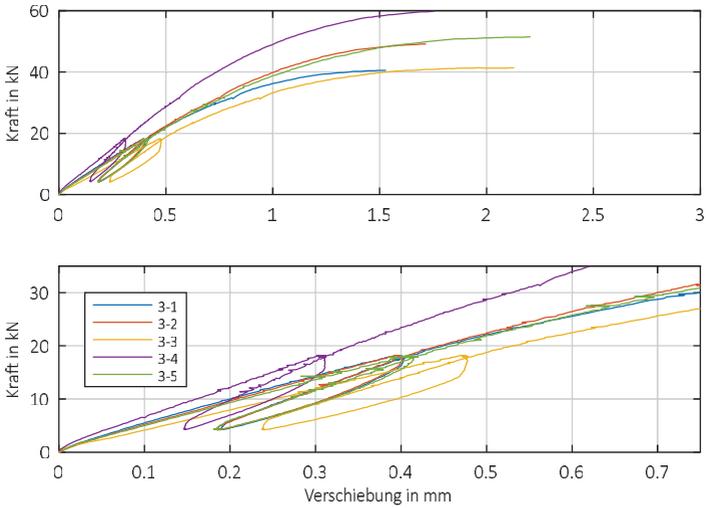


Bild A9 Last-Verschiebungs-Diagramm der Druckscherversuche – Reihe 3

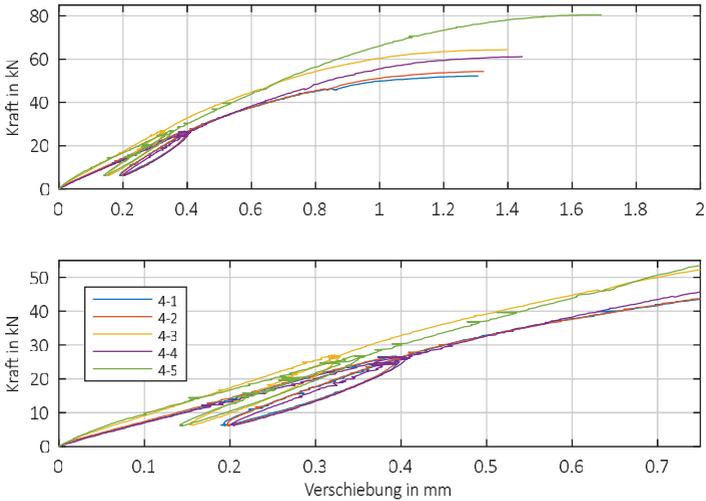


Bild A10 Last-Verschiebungs-Diagramm der Druckscherversuche – Reihe 4

Tabelle A11 Ergebnisse der Reihe 5

Versuch	$F_{\max}$ in kN	$V_{\max}$ in mm	$k_s$ in kN/mm	$k_{ax}$ in kN/mm	$\mu$	$\ell_{ef,Labor}$ in mm	$\alpha_{Labor}$ in mm	$\rho$ in kg/m <sup>3</sup>	$u$ in %	Beobachtung
5-1	23,2	4,46	11,4	18,5	0,341	104	50,1	376	12,6	
5-2	32,7	6,03	8,94	11,3	0,550	107	48,4	406	13,0	
5-3	25,8	4,39	13,6	21,1	0,454	101	52,3	404	13,1	
5-4	34,3	5,09	19,0	26,2	0,487	105	49,4	498	13,2	Gegenseitige Verschiebung der
5-5	31,6	3,89	14,7	24,6	0,340	103	51,1	473	13,3	
Min	23,2	3,89	8,94	11,3	0,340	101	48,4	376	12,6	beiden Holzbau- teile zueinander
Mean	29,5	4,77	13,5	20,3	0,435	104	50,3	431	13,0	
Max	34,3	6,03	19,0	26,2	0,550	107	52,3	498	13,3	
s	4,78	0,824	3,77	5,86	0,092	2,27	1,51	51,7	0,258	
v	16,2	17,3	27,9	28,8	21,3	2,18	3,01	12,0	1,99	

Tabelle A12 Ergebnisse der Reihe 6

Versuch	$F_{\max}$ in kN	$V_{\max}$ in mm	$k_s$ in kN/mm	$k_{ax}$ in kN/mm	$\mu$	$\ell_{ef,Labor}$ in mm	$\alpha_{Labor}$ in mm	$\rho$ in kg/m <sup>3</sup>	$u$ in %	Beobachtung
6-1	29,4	2,51	25,0	25,5	0,508	118	33,5	391	10,7	
6-2	27,8	2,01	23,8	29,6	0,169	121	32,5	412	12,6	
6-3	31,0	2,26	28,0	27,8	0,562	115	34,4	414	12,0	Gegenseitige Verschiebung der
6-4	29,9	2,34	30,3	33,8	0,320	123	31,9	423	13,0	
6-5	31,0	2,05	25,7	28,7	0,400	113	35,3	468	12,4	
Min	27,8	2,01	23,8	25,5	0,169	113	31,9	391	10,7	beiden Holz- bauteile zu-
Mean	29,8	2,23	26,6	29,1	0,392	118	33,5	421	12,1	
Max	31,0	2,51	30,3	33,8	0,562	123	35,3	468	13,0	einander
s	1,31	0,209	2,59	3,07	0,156	4,39	1,39	28,3	0,882	
v	4,40	9,34	9,75	10,6	39,8	3,72	4,15	6,71	7,30	

Tabelle A13 Ergebnisse der Reihe 7

Versuch	F <sub>max</sub> in kN	V <sub>max</sub> in mm	k <sub>s</sub> in kN/mm	k <sub>ax</sub> in kN/mm	μ	ℓ <sub>ef,Labor</sub> in mm	α <sub>Labor</sub> in mm	ρ in kg/m <sup>3</sup>	u in %	Beobachtung
7-1	34,2	2,53	32,4	32,4		113	45,3	371	12,7	
7-2	34,7	3,76	22,5	28,4		103	51,0	407	12,7	
7-3	33,4	3,19	23,6	25,4		110	47,0	413	13,3	
7-4	41,5	3,22	28,7	31,6		108	47,6	472	13,5	Gegenseitige Verschiebung der
7-5	47,1	3,21	28,0	28,0		113	45,4	472	13,2	
Min	33,4	2,53	22,5	25,4		103	45,3	371	12,7	beiden Holzbau- teile zueinander
Mean	38,2	3,18	27,0	29,1		110	47,3	427	13,1	
Max	47,1	3,76	32,4	32,4		113	51,0	472	13,5	
s	5,95	0,436	4,02	2,85		4,12	2,33	44,0	0,355	
v	15,6	13,7	14,9	9,76		3,76	4,93	10,3	2,72	

Tabelle A14 Ergebnisse der Reihe 8

Versuch	F <sub>max</sub> in kN	V <sub>max</sub> in mm	k <sub>s</sub> in kN/mm	k <sub>ax</sub> in kN/mm	μ	ℓ <sub>ef,Labor</sub> in mm	α <sub>Labor</sub> in mm	ρ in kg/m <sup>3</sup>	u in %	Beobachtung
8-1	41,9	1,46	45,9	32,4		121	32,7	391	11,0	
8-2	48,6	2,02	46,8	33,9		117	33,8	418	12,6	
8-3	41,9	1,68	43,6	32,2		115	34,7	422	12,3	
8-4	49,1	2,09	50,4	33,6		123	31,5	430	12,7	Gegenseitige Verschiebung der
8-5	49,0	1,90	52,9	35,3		126	31,4	474	11,3	
Min	41,9	1,46	43,6	32,2		115	31,4	391	11,0	beiden Holzbau- teile zueinander
Mean	46,1	1,83	47,9	33,5		120	32,8	427	12,0	
Max	49,1	2,09	52,9	35,3		126	34,7	474	12,7	
s	3,85	0,257	3,71	1,23		4,51	1,42	29,9	0,779	
v	8,35	14,0	7,75	3,68		3,75	4,32	7,01	6,50	

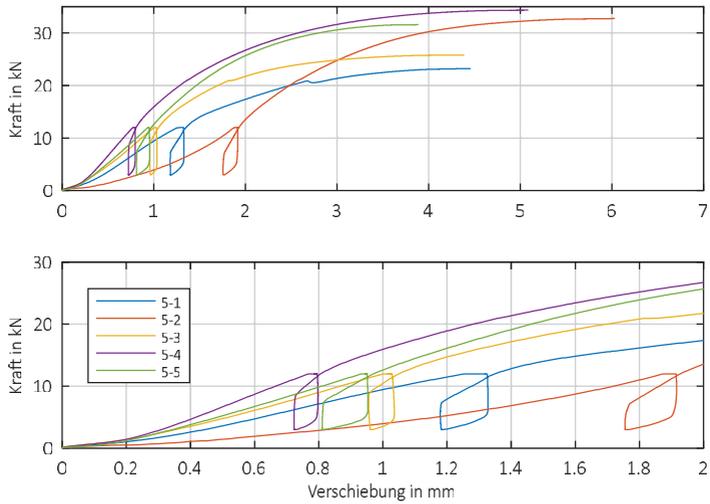


Bild A11 Last-Verschiebungs-Diagramm der Druckscherversuche – Reihe 5

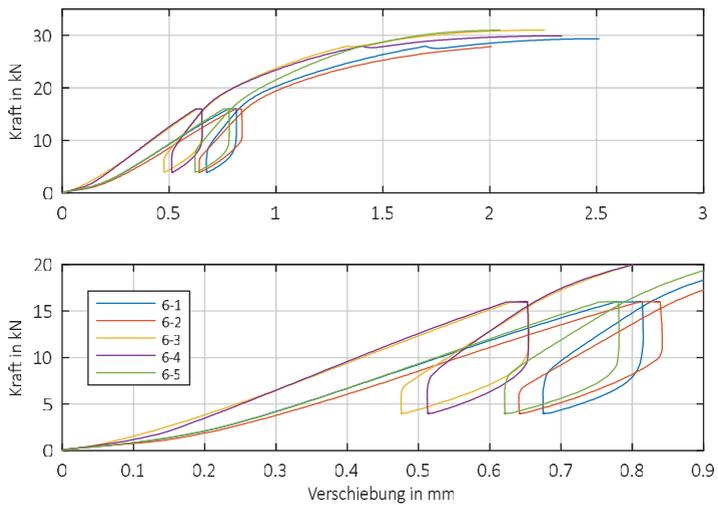


Bild A12 Last-Verschiebungs-Diagramm der Druckscherversuche – Reihe 6

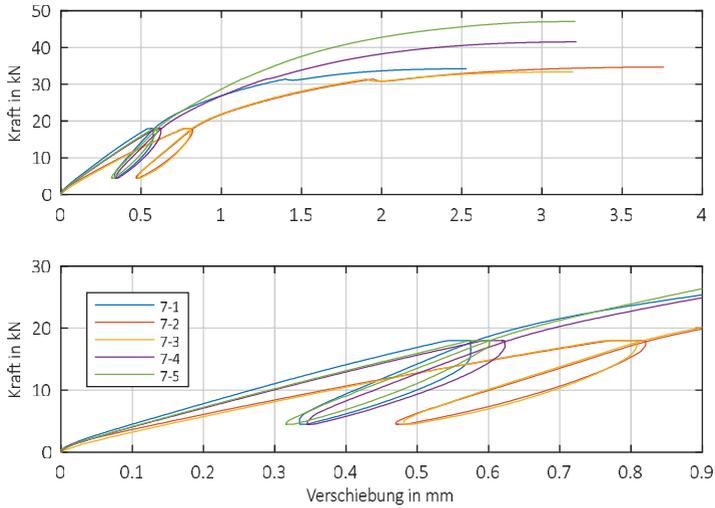


Bild A13 Last-Verschiebungs-Diagramm der Druckscherversuche – Reihe 7

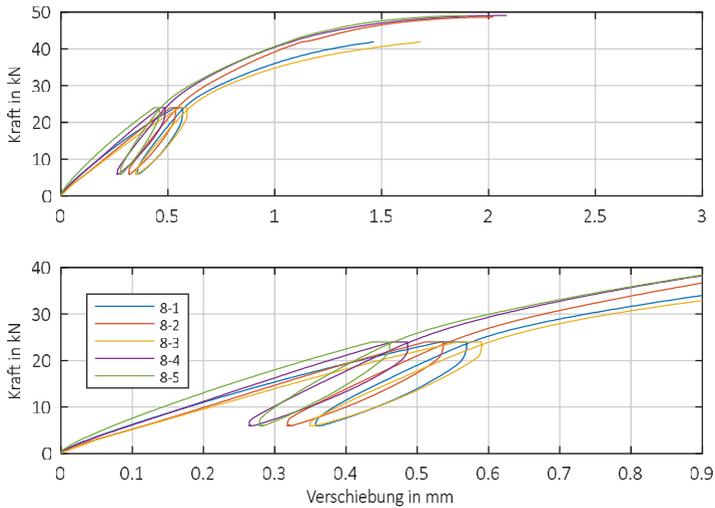


Bild A14 Last-Verschiebungs-Diagramm der Druckscherversuche – Reihe 8

Tabelle A15 Ergebnisse der Reihe 9

Versuch	$F_{\max}$ in kN	$V_{\max}$ in mm	$k_s$ in kN/mm	$k_{ax}$ in kN/mm	$\mu$	$\ell_{ef,Labor}$ in mm	$\alpha_{Labor}$ in mm	$\rho$ in kg/m <sup>3</sup>	$u$ in %	Beobachtung
9-1	29,3	2,44	18,8	24,5	0,374	117	43,2	425	19,1	
9-2	31,1	2,39	22,6	35,1	0,236	113	45,5	467	20,0	
9-3	33,3	2,24	27,7	48,0	0,176	110	46,6	499	20,0	
9-4	40,3	2,06	36,8	41,2	0,601	115	44,2	489	19,9	Gegenseitige
9-5	30,0	2,25	23,6	39,0	0,173	115	44,2	497	19,6	Verschiebung der
Min	29,3	2,06	18,8	24,5	0,173	110	43,2	425	19,1	beiden Holzbau-
Mean	32,8	2,27	25,9	37,6	0,312	114	44,7	475	19,7	teile zueinander
Max	40,3	2,44	36,8	48,0	0,601	117	46,6	499	20,0	
s	4,46	0,150	6,88	8,66	0,181	2,58	1,31	30,8	0,366	
v	13,6	6,59	26,5	23,1	58,0	2,27	2,93	6,47	1,86	

Tabelle A16 Ergebnisse der Reihe 10

Versuch	$F_{\max}$ in kN	$V_{\max}$ in mm	$k_s$ in kN/mm	$k_{ax}$ in kN/mm	$\mu$	$\ell_{ef,Labor}$ in mm	$\alpha_{Labor}$ in mm	$\rho$ in kg/m <sup>3</sup>	$u$ in %	Beobachtung
10-1	34,6	1,62	33,8	33,9	0,455	137	28,5	351	19,6	
10-2	34,3	1,47	38,0	36,4	0,535	132	29,5	431	20,7	
10-3	40,7	1,47	42,5	40,0	0,531	140	27,8	449	20,7	
10-4	41,6	1,72	42,0	43,3	0,410	131	29,7	465	20,1	Gegenseitige
10-5 <sup>1)</sup>	46,5	2,10	36,2	29,9	0,816	129	30,3	496	19,2	Verschiebung der
Min	34,3	1,47	33,8	29,9	0,410	129	27,8	351	19,2	beiden Holzbau-
Mean	39,6	1,68	38,5	36,7	0,550	134	29,1	438	20,0	teile zueinander
Max	46,5	2,10	42,5	43,3	0,816	140	30,3	496	20,7	
s	5,15	0,262	7,61	9,04	0,158	4,57	1,02	54,6	0,663	
v	13,0	15,7	21,1	26,1	28,7	3,41	3,50	12,5	3,31	

<sup>1)</sup> Steifigkeitsauswertung im Bereich zwischen 50 % und 60 %  $F_{\max}$

Tabelle A17 Ergebnisse der Reihe 11

Versuch	F <sub>max</sub> in kN	V <sub>max</sub> in mm	k <sub>s</sub> in kN/mm	k <sub>ax</sub> in kN/mm	μ	ℓ <sub>ef,Labor</sub> in mm	α <sub>Labor</sub> in mm	ρ in kg/m <sup>3</sup>	u in %	Beobachtung
11-1	39,3	1,85	43,9	43,9		115	43,9	425	19,9	
11-2	48,3	1,75	52,8	52,8		112	45,6	482	19,9	
11-3	49,7	1,89	47,7	47,7		110	46,5	497	20,9	
11-4	54,0	2,07	49,8	53,8		109	47,1	521	21,3	Gegenseitige Verschiebung der
11-5	45,1	2,14	40,6	40,6		113	45,2	489	20,5	
Min	39,3	1,75	40,6	40,6		109	43,9	425	19,9	beiden Holzbau- teile zueinander
Mean	47,3	1,94	47,0	47,8		112	45,7	482	20,5	
Max	54,0	2,14	52,8	53,8		115	47,1	521	21,3	
s	5,46	0,160	4,83	5,66		2,37	1,22	35,3	0,633	
v	11,6	8,23	10,3	11,9		2,12	2,67	7,32	3,09	

Tabelle A18 Ergebnisse der Reihe 12

Versuch	F <sub>max</sub> in kN	V <sub>max</sub> in mm	k <sub>s</sub> in kN/mm	k <sub>ax</sub> in kN/mm	μ	ℓ <sub>ef,Labor</sub> in mm	α <sub>Labor</sub> in mm	ρ in kg/m <sup>3</sup>	u in %	Beobachtung
12-1	52,1	1,21	75,2	50,1		133	29,2	380	17,2	
12-2	49,3	1,64	58,0	38,7		126	31,1	451	21,1	
12-3	57,1	1,45	64,4	45,4		121	32,6	465	21,9	
12-4	64,2	1,53	70,0	46,7		133	29,8	483	20,4	Gegenseitige Verschiebung der
12-5	57,6	1,41	74,2	49,5		129	30,5	502	18,9	
Min	49,3	1,21	58,0	38,7		121	29,2	380	17,2	beiden Holzbau- teile zueinander
Mean	56,1	1,45	68,4	46,1		128	30,6	456	19,9	
Max	64,2	1,64	75,2	50,1		133	32,6	502	21,9	
s	5,73	0,157	7,20	4,58		5,32	1,32	46,7	1,86	
v	10,2	10,8	10,5	9,95		4,14	4,32	10,2	9,35	

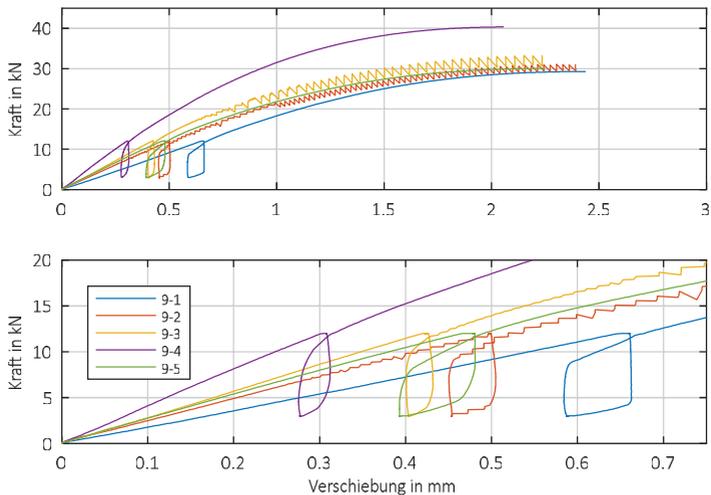


Bild A15 Last-Verschiebungs-Diagramm der Druckscherversuche – Reihe 9

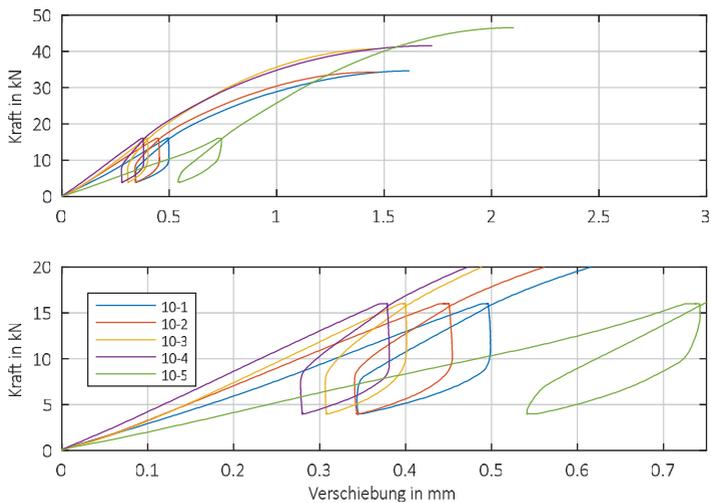


Bild A16 Last-Verschiebungs-Diagramm der Druckscherversuche – Reihe 10

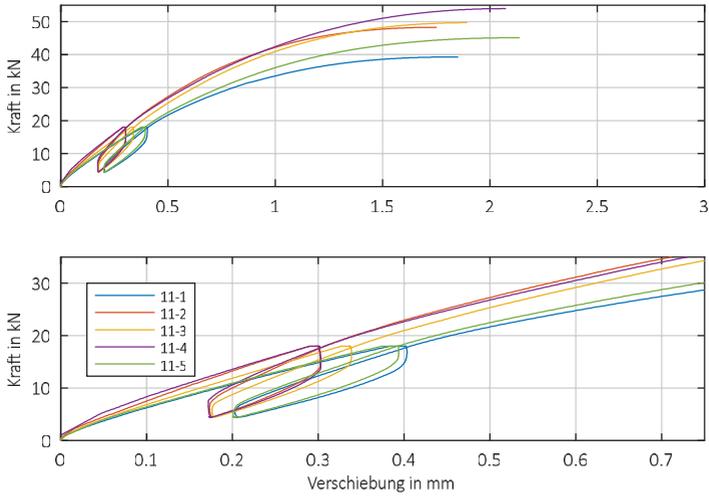


Bild A17 Last-Verschiebungs-Diagramm der Druckscherversuche – Reihe 11

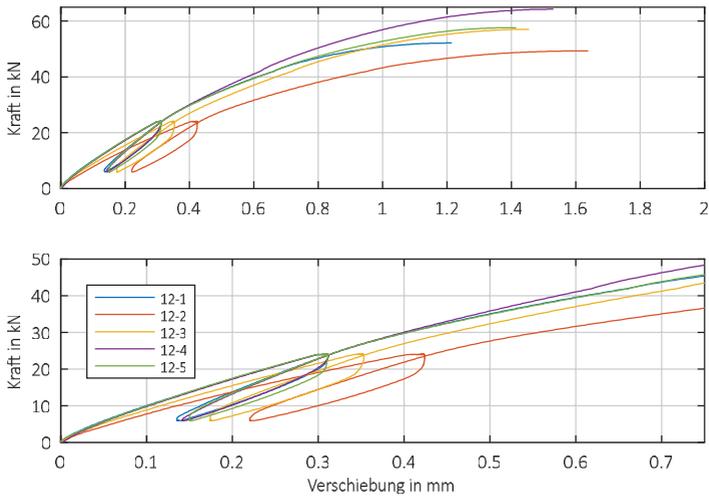


Bild A18 Last-Verschiebungs-Diagramm der Druckscherversuche – Reihe 12

Tabelle A19 Ergebnisse der Reihe 15

Versuch	$F_{\max}$ in kN	$V_{\max}$ in mm	$k_s$ in kN/mm	$k_{ax}$ in kN/mm	$\mu$	$\ell_{ef,Labor}$ in mm	$\alpha_{Labor}$ in mm	$\rho$ in kg/m <sup>3</sup>	$u$ in %	Beobachtung
15-1	14,2	2,01	14,2	24,9	0,283	78,1	50,5	384	11,8	
15-2	22,7	2,17	20,1	27,3	0,468	80,4	48,3	407	9,80	
15-3	20,0	1,78	20,4	34,0	0,353	76,9	51,4	420	10,6	
15-4	16,7	2,28	16,5	31,4	0,261	76,0	52,3	448	11,7	Gegenseitige
15-5	21,5	2,05	19,5	34,6	0,288	77,2	51,1	461	10,9	Verschiebung der
Min	14,2	1,78	14,2	24,9	0,261	76,0	48,3	384	9,8	beiden Holzbau-
Mean	19,0	2,06	18,1	30,4	0,331	77,7	50,7	424	10,9	teile zueinander
Max	22,7	2,28	20,4	34,6	0,468	80,4	52,3	461	11,8	
s	3,48	0,189	2,67	4,24	0,084	1,71	1,48	31,1	0,815	
v	18,3	9,16	14,7	13,9	25,4	2,19	2,92	7,34	7,45	

Tabelle A20 Ergebnisse der Reihe 16

Versuch	$F_{\max}$ in kN	$V_{\max}$ in mm	$k_s$ in kN/mm	$k_{ax}$ in kN/mm	$\mu$	$\ell_{ef,Labor}$ in mm	$\alpha_{Labor}$ in mm	$\rho$ in kg/m <sup>3</sup>	$u$ in %	Beobachtung
16-1	19,1	1,84	21,1	28,9		75,6	52,8	379	11,7	
16-2	23,9	1,91	24,7	36,4		74,4	54,4	407	10,1	
16-3	26,1	1,82	28,9	36,6		78,2	51,1	408	10,4	
16-4	24,3	1,85	26,3	33,9		76,8	51,5	439	11,7	Gegenseitige
16-5	30,4	1,57	35,4	43,7		78,2	50,5	449	10,9	Verschiebung der
Min	19,1	1,57	21,1	28,9		74,4	50,5	379	10,1	beiden Holzbau-
Mean	24,8	1,80	27,3	35,9		76,6	52,0	416	10,9	teile zueinander
Max	30,4	1,91	35,4	43,7		78,2	54,4	449	11,7	
s	4,09	0,132	5,32	5,35		1,67	1,58	27,9	0,719	
v	16,5	7,34	19,5	14,9		2,18	3,04	6,71	6,58	

Tabelle A21 Ergebnisse der Reihe 17

Versuch	$F_{\max}$ in kN	$V_{\max}$ in mm	$k_s$ in kN/mm	$k_{\max}$ in kN/mm	$\mu$	$\ell_{\text{ef,Labor}}$ in mm	$\alpha_{\text{Labor}}$ in mm	$\rho$ in kg/m <sup>3</sup>	$u$ in %	Beobachtung
17-1	45,5	2,43	35,5	46,8	0,405	139	45,9	366	10,9	
17-2	55,8	3,08	37,8	48,1	0,442	139	46,0	415	11,6	
17-3	48,6	2,38	36,1	49,6	0,359	143	44,3	411	12,4	
17-4	52,6	2,35	40,1	54,8	0,366	138	46,3	426	12,0	Gegenseitige Verschiebung der
17-5	49,7	2,97	35,0	57,9	0,228	137	47,0	439	12,5	
Min	45,5	2,35	35,0	46,8	0,228	137	44,3	366	10,9	beiden Holzbau- teile zueinander
Mean	50,5	2,64	36,9	51,4	0,360	139	45,9	411	11,9	
Max	55,8	3,08	40,1	57,9	0,442	143	47,0	439	12,5	
s	3,90	0,350	2,08	4,71	0,081	2,39	0,99	27,7	0,647	
v	7,72	13,2	5,63	9,16	22,4	1,72	2,17	6,73	5,46	

Tabelle A22 Ergebnisse der Reihe 18

Versuch	$F_{\max}$ in kN	$V_{\max}$ in mm	$k_s$ in kN/mm	$k_{\max}$ in kN/mm	$\mu$	$\ell_{\text{ef,Labor}}$ in mm	$\alpha_{\text{Labor}}$ in mm	$\rho$ in kg/m <sup>3</sup>	$u$ in %	Beobachtung
18-1	60,0	2,72	44,7	44,7		140	45,7	390	12,0	
18-2	71,0	2,46	55,0	55,0		138	46,5	396	12,2	
18-3	66,8	2,11	57,5	57,5		142	44,9	409	12,0	
18-4	71,8	2,20	60,7	60,7		141	45,2	422	12,0	Gegenseitige Verschiebung der
18-5	79,3	2,74	60,9	60,9		141	45,6	454	12,5	
Min	60,0	2,11	44,7	44,7		138	44,9	390	12,0	beiden Holzbau- teile zueinander
Mean	69,8	2,45	55,8	55,8		140	45,6	414	12,1	
Max	79,3	2,74	60,9	60,9		142	46,5	454	12,5	
s	7,09	0,288	6,63	6,63		1,52	0,607	25,6	0,224	
v	10,2	11,8	11,9	11,9		1,08	1,33	6,20	1,85	

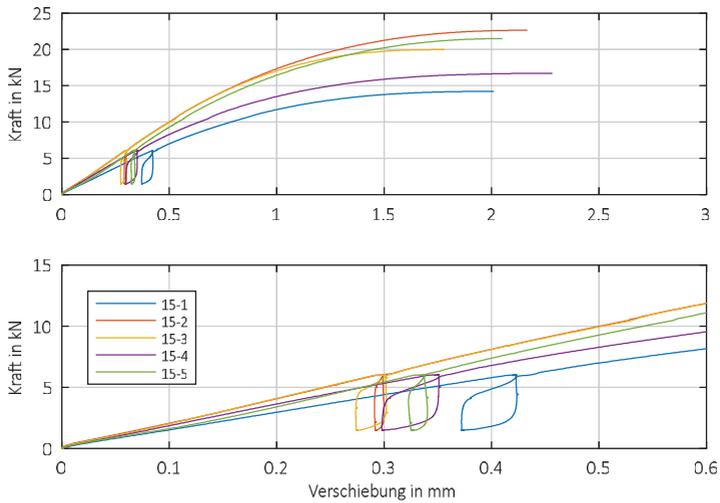


Bild A19 Last-Verschiebungs-Diagramm der Druckscherversuche – Reihe 15

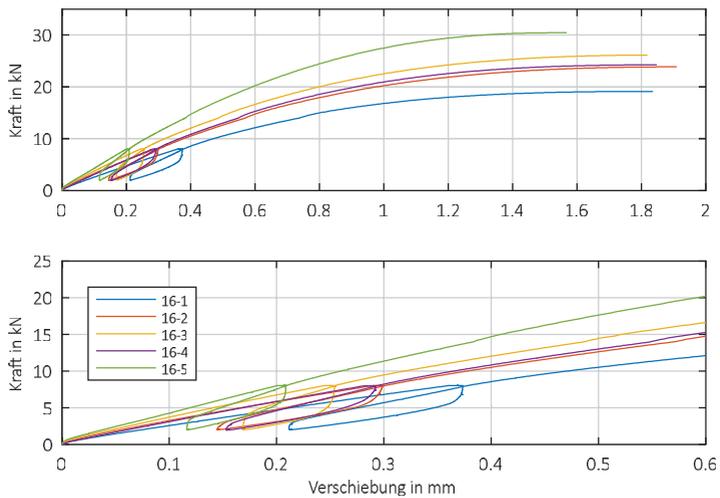


Bild A20 Last-Verschiebungs-Diagramm der Druckscherversuche – Reihe 16

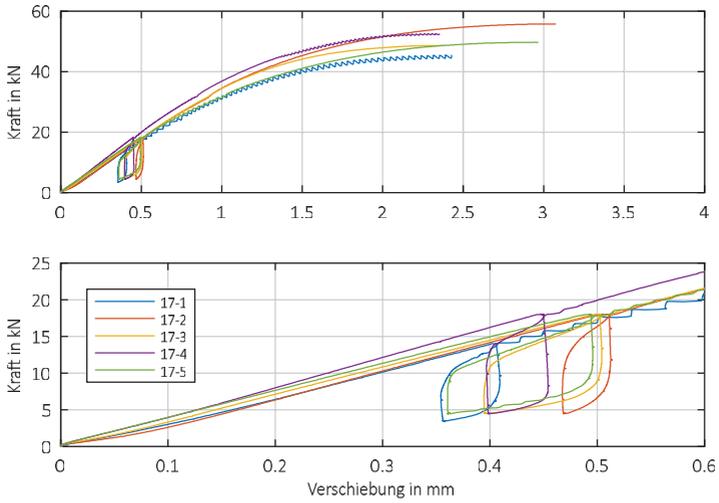


Bild A21 Last-Verschiebungs-Diagramm der Druckscherversuche – Reihe 17

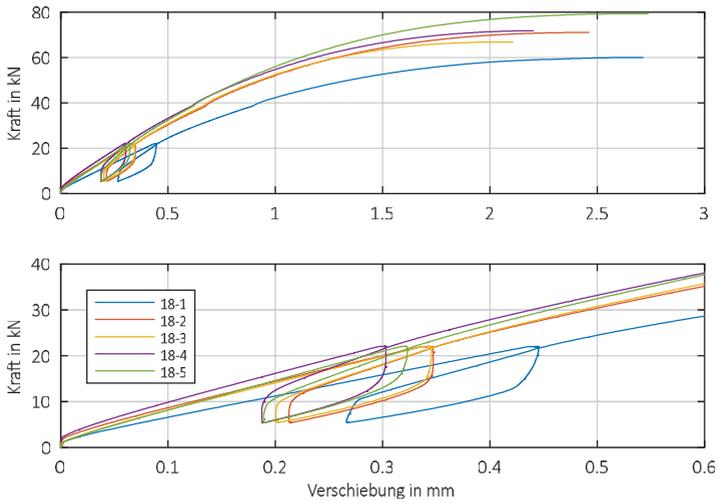


Bild A22 Last-Verschiebungs-Diagramm der Druckscherversuche – Reihe 18

## Anlage 3

### Versuchsergebnisse der Diagonalscherversuche

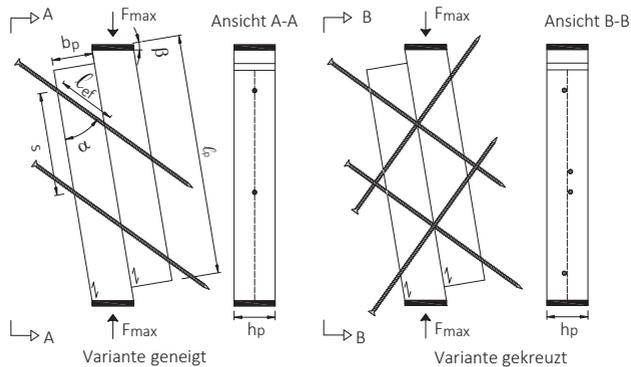


Bild A23 Versuchskörper der Diagonalscherversuche

Tabelle A23 Geometrie der Prüfkörper der Diagonalscherversuche

Reihe	$b_p$ in mm	$h_p$ in mm	$l_p$ in mm	$\beta$ in °	$l_{ef}$ in mm	$\alpha$ in °	$d$ in mm	$d_k$ in mm	$s$ in mm	Variante	Besonderheiten
21	113	80	439	14,2	130	60	8	5,1	180	geneigt	
22	113	80	439	14,2	130	60	8	5,1	180	gekreuzt	
23	83,6	80	536	8,66	130	40	8	5,1	249	geneigt	
24	83,6	80	536	8,66	130	40	8	5,1	249	gekreuzt	
25	65	80	600	6,03	130	30	8	5,1	270	geneigt	
27	44,6	80	599	4,13	130	20	8	5,1	295	geneigt	
28	44,6	80	599	4,13	130	20	8	5,1	295	gekreuzt	
29	28,3	80	316	4,83	40	45	8	4,9	107	geneigt	
30	28,3	80	316	4,83	40	45	8	4,9	107	gekreuzt	
31	56,6	80	404	7,68	80	45	8	4,9	163	geneigt	
32	56,6	80	404	7,68	80	45	8	4,9	163	gekreuzt	
33	80	80	467	9,46	113	45	8	4,9	200	geneigt	
34	80	80	467	9,46	113	45	8	4,9	200	gekreuzt	
35	113	80	580	10,9	160	45	8	4,9	276	geneigt	
36	113	80	580	10,9	160	45	8	4,9	276	gekreuzt	
37	141	80	669	11,9	200	45	8	5,1	333	geneigt	
38	141	80	669	11,9	200	45	8	5,1	333	gekreuzt	

Tabelle A24 Rohdichtesortierung zur Ermittlung des Reibbeiwertes

Versuch		$\rho$ in kg/m <sup>3</sup>	$\alpha_1$ in °	Versuch		$\rho$ in kg/m <sup>3</sup>	$\alpha_2$ in °
21	1	403	60	22	2	394	60
21	2	381	60	22	1	388	60
21	3	408	60	22	3	433	60
21	4	459	58	22	4	441	56,8
21	5	482	55	22	5	464	60
23	1	394	40	24	2	387	38,4
23	2	425	37	24	3	427	40
23	3	417	37	24	1	392	40
23	4	446	38	24	4	442	37
23	5	482	36	24	5	500	37,7
25	1	417	27				30
25	2	399	27				30
25	3	395	28				30
25	4	480	26				30
25	5	448	27				30
27	1	365	20	28	1	366	17,3
27	2	410	18	28	2	403	17,1
27	3	441	17	28	4	446	16,5
27	4	444	17	28	5	454	16,7
27	5	469	17	28	3	482	18,2
29	1	488	41	30	1	456	45
29	2	394	41	30	4	372	41,2
29	3	415	41	30	3	394	45
29	4	449	41	30	2	416	45
29	5	466	43	30	5	449	45
31	1	406	45	32	1	457	45
31	2	388	47	32	2	405	43,1
31	3	392	45	32	3	400	45
31	4	453	42	32	4	452	45
31	5	462	43	32	5	458	45
33	1	411	45	34	1	406	45
33	2	413	45	34	3	448	45
33	3	448	43	34	2	451	45
33	4	470	45	34	4	480	45
33	5	473	45	34	5	490	45

Tabelle A25 Rohdichtesortierung zur Ermittlung des Reibbeiwertes

Versuch		$\rho$ in $\text{kg/m}^3$	$\alpha_1$ in $^\circ$	Versuch		$\rho$ in $\text{kg/m}^3$	$\alpha_2$ in $^\circ$
35	1	388	45,0	36	1	398	45,0
35	2	389	45,0	36	2	405	45,0
35	3	416	42,0	36	4	439	45,0
35	4	439	45,0	36	5	452	45,0
35	5	431	45,0	36	3	443	43,3
37	1	406	43,0	38	1	425	42,9
37	2	417	43,0	38	3	427	45,0
37	3	458	45,0	38	5	492	42,1
37	4	430	43,0	38	2	433	45,0
37	5	457	43,0	38	4	456	39,3

Tabelle A26 Ergebnisse der Reihe 21

Versuch	$F_{\max}$ in kN	$V_{\max}$ in mm	$k_s$ in kN/mm	$k_{ax}$ in kN/mm	$\mu$	$\ell_{\text{ef,Labor}}$ in mm	$\alpha_{\text{Labor}}$ in mm	$\rho$ in $\text{kg/m}^3$	$u$ in %	Beobachtung
21-1	31,6	7,51	10,7	26,3	0,290	131	59,4	403	11,8	
21-2	33,2	5,36	14,5	37,5	0,259	131	59,4	381	11,8	
21-3	39,3	6,36	15,6	35,8	0,345	131	59,1	408	11,3	
21-4	42,2	4,62	17,0	37,1	0,297	134	57,5	459	12,5	Gegenseitige
21-5	47,7	4,95	18,0	34,8	0,318	137	55,1	482	12,1	Verschiebung der
Min	31,6	4,62	10,7	26,3	0,259	131	55,1	381	11,3	beiden Holzbau-
Mean	38,8	5,76	15,2	34,3	0,302	133	58,1	426	11,9	teile zueinander
Max	47,7	7,51	18,0	37,5	0,345	137	59,4	482	12,5	
s	6,57	1,18	2,84	4,59	0,032	2,84	1,87	42,3	0,42	
v	16,9	20,4	18,7	13,4	10,6	2,14	3,22	9,92	3,56	

Tabelle A27 Ergebnisse der Reihe 22

Versuch	F <sub>max</sub> in kN	V <sub>max</sub> in mm	k <sub>s</sub> in kN/mm	k <sub>ax</sub> in kN/mm	μ	ℓ <sub>ef,Labor</sub> in mm	α <sub>Labor</sub> in mm	ρ in kg/m <sup>3</sup>	u in %	Beobachtung
22-1	42,9	3,53	26,2	52,4		130	60,0	388	11,4	
22-2	39,0	3,20	27,0	53,9		130	60,4	394	11,6	
22-3	44,9	5,01	23,5	47,0		131	59,7	433	12,2	
22-4	54,3	3,34	34,2	57,0		135	56,8	441	12,3	Gegenseitige Verschiebung der
22-5	52,7	4,06	30,5	55,9		132	58,5	464	12,1	
Min	39,0	3,20	23,5	47,0		130	56,8	388	11,4	beiden Holzbau- teile zueinander
Mean	46,7	3,83	28,3	53,3		131	59,1	424	11,9	
Max	54,3	5,01	34,2	57,0		135	60,4	464	12,3	
s	6,51	0,738	4,14	3,91		2,11	1,45	32,3	0,402	
v	13,9	19,3	14,7	7,35		1,61	2,45	7,63	3,39	

Tabelle A28 Ergebnisse der Reihe 23

Versuch	F <sub>max</sub> in kN	V <sub>max</sub> in mm	k <sub>s</sub> in kN/mm	k <sub>ax</sub> in kN/mm	μ	ℓ <sub>ef,Labor</sub> in mm	α <sub>Labor</sub> in mm	ρ in kg/m <sup>3</sup>	u in %	Beobachtung
23-1	40,1	1,91	35,5	36,0	0,618	134	38,6	394	12,4	
23-2	43,7	2,08	35,7	31,5	0,764	138	37,2	425	12,2	
23-3	43,2	2,35	33,5	31,7	0,660	140	37,2	417	12,0	
23-4	45,4	2,06	35,7	37,0	0,544	137	37,9	446	12,9	Gegenseitige Verschiebung der
23-5	43,2	2,17	34,6	33,0	0,625	143	36,2	482	12,3	
Min	40,1	1,91	33,5	31,5	0,544	134	36,2	394	12,0	beiden Holzbau- teile zueinander
Mean	43,1	2,11	35,0	33,8	0,642	139	37,4	433	12,3	
Max	45,4	2,35	35,7	37,0	0,764	143	38,6	482	12,9	
s	1,95	0,163	0,938	2,54	0,080	3,52	0,914	33,3	0,356	
v	4,52	7,72	2,68	7,52	12,5	2,54	2,44	7,69	2,89	

Tabelle A29 Ergebnisse der Reihe 24

Versuch	$F_{\max}$ in kN	$V_{\max}$ in mm	$k_s$ in kN/mm	$k_{ax}$ in kN/mm	$\mu$	$\ell_{ef,Labor}$ in mm	$\alpha_{Labor}$ in mm	$\rho$ in kg/m <sup>3</sup>	$u$ in %	Beobachtung
24-1	49,7	1,91	48,7	41,5		134	39,0	392	11,6	
24-2	48,9	1,96	46,3	37,7		135	38,4	387	12,0	
24-3	47,0	2,21	37,5	31,9		136	38,8	427	12,3	
24-4	59,3	1,71	60,2	47,2		139	37,0	442	12,6	Gegenseitige
24-5	52,6	2,00	46,4	37,1		140	37,7	500	12,3	Verschiebung der
Min	47,0	1,71	37,5	31,9		134	37,0	387	11,6	beiden Holzbau-
Mean	51,5	1,96	47,8	39,1		137	38,2	429	12,1	teile zueinander
Max	59,3	2,21	60,2	47,2		140	39,0	500	12,6	
s	4,79	0,179	8,15	5,67		2,50	0,826	45,6	0,388	
v	9,30	9,17	17,0	14,5		1,83	2,16	10,6	3,20	

Tabelle A30 Ergebnisse der Reihe 25

Versuch	$F_{\max}$ in kN	$V_{\max}$ in mm	$k_s$ in kN/mm	$k_{ax}$ in kN/mm	$\mu^*)$	$\ell_{ef,Labor}$ in mm	$\alpha_{Labor}$ in mm	$\rho$ in kg/m <sup>3</sup>	$u$ in %	Beobachtung
25-1	46,7	1,45	53,5	53,3	0,40	146	26,5	417	12,6	
25-2	42,3	1,52	45,9	46,1	0,40	142	27,3	399	12,7	
25-3	37,0	1,30	44,8	45,2	0,40	141	27,6	395	12,4	
25-4	48,6	1,47	52,9	52,5	0,40	149	26,1	480	11,5	Gegenseitige
25-5	46,7	1,50	49,6	49,6	0,40	145	26,7	448	11,7	Verschiebung der
Min	37,0	1,30	44,8	45,2		140	26,1	395	11,5	beiden Holzbau-
Mean	44,2	1,45	49,3	49,3		144	26,8	428	12,2	teile zueinander
Max	48,6	1,52	53,5	53,3		149	27,6	480	12,7	
s	4,66	0,087	3,95	3,66		3,38	0,594	36,0	0,552	
v	10,5	6,01	8,01	7,43		2,34	2,21	8,42	4,54	

\*) Reibbeiwert wird zu 0,4 angenommen

Tabelle A31 Ergebnisse der Reihe 27

Versuch	F <sub>max</sub> in kN	V <sub>max</sub> in mm	k <sub>s</sub> in kN/mm	k <sub>ax</sub> in kN/mm	μ	ℓ <sub>ef,Labor</sub> in mm	α <sub>Labor</sub> in mm	ρ in kg/m <sup>3</sup>	u in %	Beobachtung
27-1	38,3	1,61	37,0	28,2	1,032	138	18,9	365	11,0	
27-2	34,1	1,07	47,0	40,4	0,687	146	17,8	410	12,5	
27-3	29,3	1,45	40,0	42,2	0,087	162	16,5	441	12,5	
27-4	31,2	1,43	47,8	42,4	0,590	159	16,7	444	11,7	Gegenseitige
27-5	29,4	1,19	48,0	42,3	0,608	161	16,5	469	12,0	Verschiebung der
Min	29,3	1,1	37,0	28,2	0,087	138,0	16,5	365	11,0	beiden Holzbau-
Mean	32,5	1,35	44,0	39,1	0,601	153	17,3	426	11,9	teile zueinander
Max	38,3	1,61	48,0	42,4	1,032	162	18,9	469	12,5	
s	3,80	0,218	5,10	6,14	0,338	10,7	1,06	40,1	0,615	
v	11,7	16,16	11,6	15,7	56,3	6,96	6,15	9,43	5,16	

Tabelle A32 Ergebnisse der Reihe 28

Versuch	F <sub>max</sub> in kN	V <sub>max</sub> in mm	k <sub>s</sub> in kN/mm	k <sub>ax</sub> in kN/mm	μ	ℓ <sub>ef,Labor</sub> in mm	α <sub>Labor</sub> in mm	ρ in kg/m <sup>3</sup>	u in %	Beobach- tung
28-1	52,4	0,98	118	64,9		151	17,3	366	11,0	
28-2	53,3	0,97	92,9	50,9		154	17,1	403	11,6	
28-3	47,2	1,04	98,7	54,7		143	18,2	482	11,4	Gegenseitige
28-4	56,7	1,19	103	55,9		162	16,5	446	11,9	Verschie-
28-5	50,8	0,88	110	60,0		157	16,7	454	11,8	bung der
Min	47,2	0,88	92,9	50,9		143	16,5	366	11,0	beiden Holz-
Mean	52,1	1,01	105	57,3		154	17,2	430	11,5	bauteile zu-
Max	56,7	1,19	118	64,9		162	18,2	482	11,9	einander
s	3,45	0,115	9,91	5,37		6,89	0,652	45,7	0,355	
v	6,62	11,3	9,48	9,38		4,49	3,80	10,6	3,08	

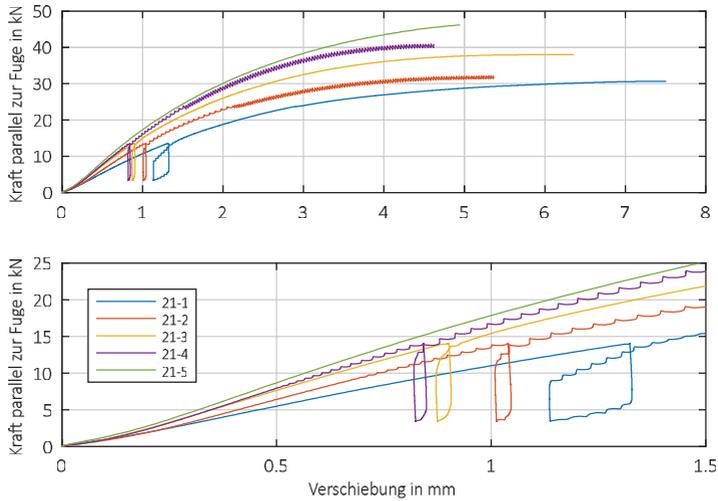


Bild A24 Last-Verschiebungs-Diagramm der Diagonalscherversuche – Reihe 21

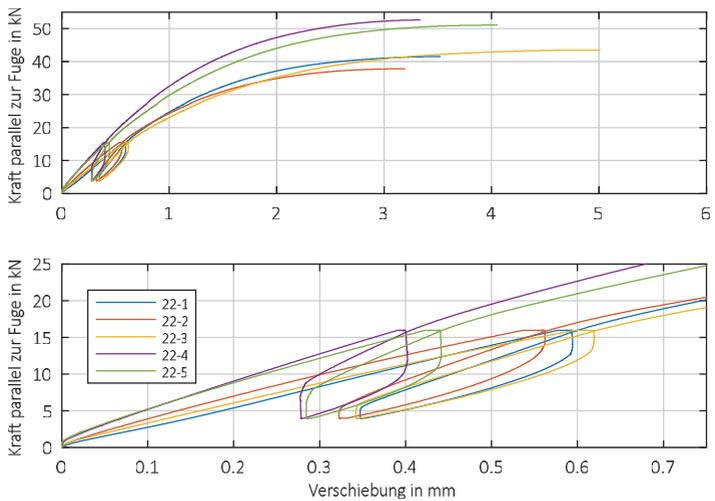


Bild A25 Last-Verschiebungs-Diagramm der Diagonalscherversuche – Reihe 22

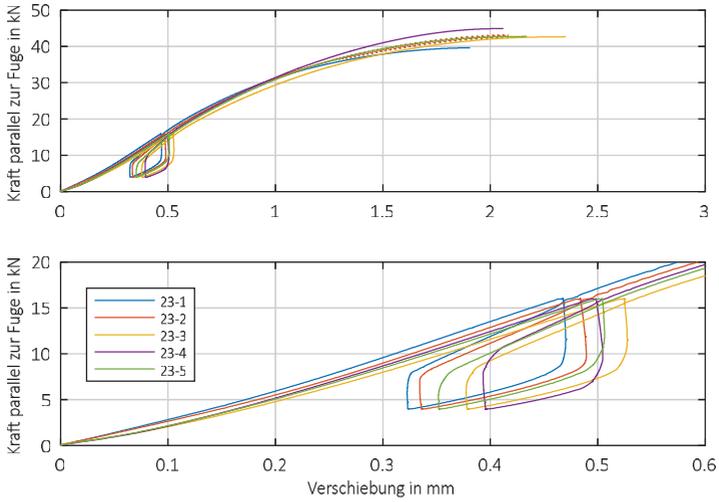


Bild A26 Last-Verschiebungs-Diagramm der Diagonalscherversuche – Reihe 23

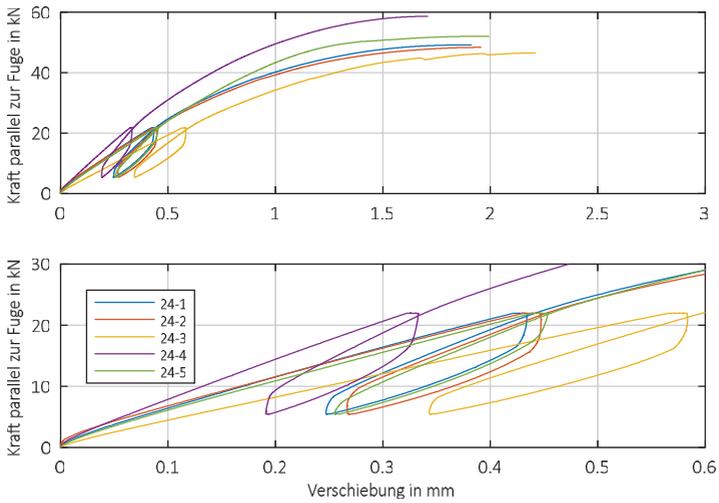


Bild A27 Last-Verschiebungs-Diagramm der Diagonalscherversuche – Reihe 24

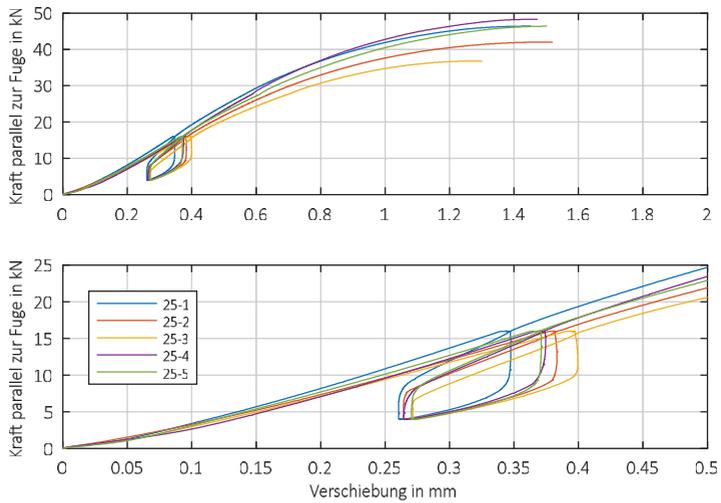


Bild A28 Last-Verschiebungs-Diagramm der Diagonalscherversuche – Reihe 25

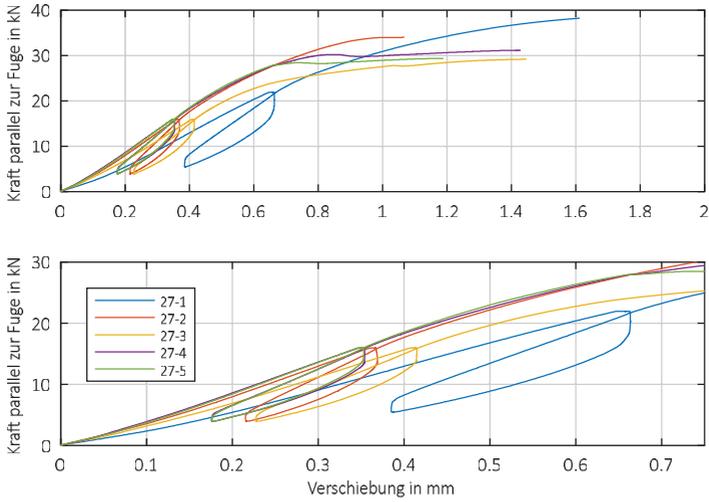


Bild A29 Last-Verschiebungs-Diagramm der Diagonalscherversuche – Reihe 27

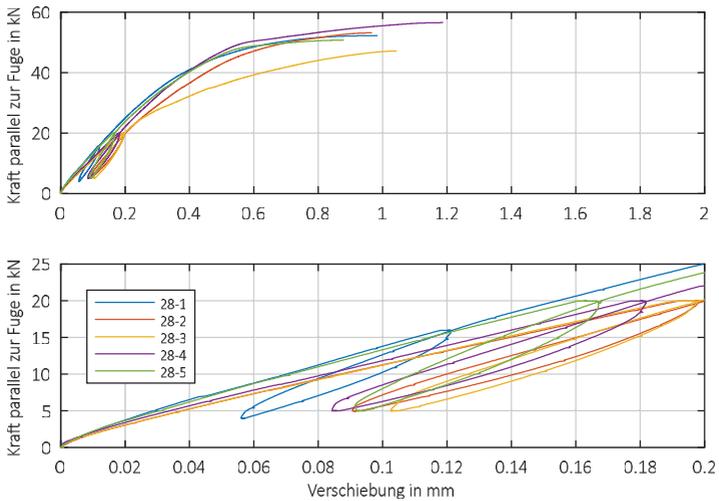


Bild A30 Last-Verschiebungs-Diagramm der Diagonalscherversuche – Reihe 28

Tabelle A33 Ergebnisse der Reihe 29

Versuch	$F_{\max}$ in kN	$V_{\max}$ in mm	$k_s$ in kN/mm	$k_{ax}$ in kN/mm	$\mu$	$\ell_{ef,Labor}$ in mm	$\alpha_{Labor}$ in mm	$\rho$ in kg/m <sup>3</sup>	$u$ in %	Beobachtung
29-1	14,7	2,59	10,1	12,6	0,402	43,5	40,6	488	10,5	
29-2	12,4	2,77	11,2	11,7	0,665	43,3	40,8	394	11,7	
29-3	12,1	2,63	13,7	16,8	0,440	42,9	41,3	415	11,5	
29-4	15,4	2,74	14,0	12,9	0,872	43,3	40,8	449	11,0	Gegenseitige
29-5	14,0	2,09	15,2	20,9	0,345	41,4	43,1	466	11,1	Verschiebung der
Min	12,1	2,09	10,1	11,7	0,345	41,4	40,6	394	10,5	beiden Holzbau-
Mean	13,7	2,56	12,8	15,0	0,545	42,9	41,3	442	11,1	teile zueinander
Max	15,4	2,77	15,2	20,9	0,872	43,5	43,1	488	11,7	
s	1,45	0,276	2,10	3,86	0,220	0,838	1,01	38,1	0,474	
v	10,5	10,7	16,3	25,7	40,3	1,95	2,45	8,61	4,25	

Tabelle A34 Ergebnisse der Reihe 30

Versuch	$F_{\max}$ in kN	$V_{\max}$ in mm	$k_s$ in kN/mm	$k_{ax}$ in kN/mm	$\mu$	$\ell_{ef,Labor}$ in mm	$\alpha_{Labor}$ in mm	$\rho$ in kg/m <sup>3</sup>	$u$ in %	Beobachtung
30-1	19,7	1,96	23,3	22,3		41,1	43,7	456	10,4	
30-2	15,3	1,91	16,9	16,9		39,2	46,5	416	11,2	
30-3	15,8	2,33	18,9	18,9		40,6	45,3	394	11,3	
30-4	14,9	2,19	17,1	15,1		48,5	41,2	372	11,0	Gegenseitige
30-5	20,0	1,98	25,6	25,6		40,4	45,3	449	11,2	Verschiebung der
Min	14,9	1,91	16,9	15,1		39,2	41,2	372	10,4	beiden Holzbau-
Mean	17,1	2,07	20,4	19,8		42,0	44,4	417	11,0	teile zueinander
Max	20,0	2,33	25,6	25,6		48,5	46,5	456	11,3	
s	2,50	0,179	3,90	4,22		3,74	2,03	35,5	0,380	
v	14,6	8,66	19,1	21,3		8,92	4,57	8,50	3,46	

Tabelle A35 Ergebnisse der Reihe 31

Versuch	F <sub>max</sub> in kN	V <sub>max</sub> in mm	k <sub>s</sub> in kN/mm	k <sub>ax</sub> in kN/mm	μ	ℓ <sub>ef,Labor</sub> in mm	α <sub>Labor</sub> in mm	ρ in kg/m <sup>3</sup>	u in %	Beobachtung
31-1	21,6	2,45	20,1	36,2	0,096	80,3	44,8	406	12,0	
31-2	18,7	2,07	17,3	33,6	0,087	77,9	47,0	388	12,0	
31-3	18,9	2,12	15,6	28,7	0,080	80,9	44,4	392	11,8	
31-4	28,4	2,40	24,6	34,1	0,283	84,9	41,9	453	10,9	Gegenseitige Verschiebung der beiden Holzbau- teile zueinander
31-5	27,6	2,01	25,5	36,1	0,299	82,5	43,4	462	11,8	
Min	18,7	2,01	15,6	28,7	0,080	77,9	41,9	388	10,9	
Mean	23,0	2,21	20,6	33,7	0,169	81,3	44,3	420	11,7	
Max	28,4	2,45	25,5	36,2	0,299	84,9	47,0	462	12,0	
s	4,67	0,200	4,36	3,06	0,112	2,62	1,88	34,9	0,436	
v	20,3	9,03	21,1	9,07	66,2	3,22	4,25	8,30	3,74	

Tabelle A36 Ergebnisse der Reihe 32

Versuch	F <sub>max</sub> in kN	V <sub>max</sub> in mm	k <sub>s</sub> in kN/mm	k <sub>ax</sub> in kN/mm	μ	ℓ <sub>ef,Labor</sub> in mm	α <sub>Labor</sub> in mm	ρ in kg/m <sup>3</sup>	u in %	Beobachtung
32-1	39,0	2,10	41,6	41,6		80,2	45,0	457	9,90	
32-2	36,3	1,63	42,6	39,9		83,1	43,1	405	11,1	
32-3	34,6	1,98	35,4	35,4		80,5	44,7	400	11,2	
32-4	41,4	1,86	46,2	46,2		80,2	45,0	452	10,6	Gegenseitige Verschiebung der beiden Holzbau- teile zueinander
32-5	40,1	1,70	44,7	44,7		80,3	44,9	458	11,2	
Min	34,6	1,63	35,4	35,4		80,2	43,1	400	9,9	
Mean	38,3	1,85	42,1	41,6		80,9	44,5	434	10,8	
Max	41,4	2,10	46,2	46,2		83,1	45,0	458	11,2	
s	2,80	0,195	4,16	4,25		1,25	0,826	29,3	0,551	
v	7,32	10,5	9,89	10,2		1,54	1,85	6,76	5,11	

Tabelle A37 Ergebnisse der Reihe 33

Versuch	$F_{\max}$ in kN	$V_{\max}$ in mm	$k_s$ in kN/mm	$k_{ax}$ in kN/mm	$\mu$	$\ell_{ef,Labor}$ in mm	$\alpha_{Labor}$ in mm	$\rho$ in kg/m <sup>3</sup>	$u$ in %	Beobachtung
33-1	33,7	2,19	25,5	35,6	0,349	116	44,0	411	11,8	
33-2	34,7	2,72	24,0	34,5	0,317	112	45,8	413	11,7	
33-3	36,0	2,52	25,5	42,0	0,129	118	43,3	448	12,2	
33-4	38,4	2,55	26,1	42,3	0,196	115	44,2	470	12,0	Gegenseitige
33-5	37,9	2,87	24,8	36,6	0,291	117	43,5	473	12,6	Verschiebung der
Min	33,7	2,19	24,0	34,5	0,129	112	43,3	411	11,7	beiden Holzbau-
Mean	36,1	2,57	25,2	38,2	0,257	116	44,2	443	12,0	teile zueinander
Max	38,4	2,87	26,1	42,3	0,349	118	45,8	473	12,6	
s	2,00	0,254	0,816	3,69	0,091	2,27	0,988	30,0	0,334	
v	5,54	9,89	3,24	9,67	35,7	1,96	2,24	6,78	2,78	

Tabelle A38 Ergebnisse der Reihe 34

Versuch	$F_{\max}$ in kN	$V_{\max}$ in mm	$k_s$ in kN/mm	$k_{ax}$ in kN/mm	$\mu$	$\ell_{ef,Labor}$ in mm	$\alpha_{Labor}$ in mm	$\rho$ in kg/m <sup>3</sup>	$u$ in %	Beobachtung
34-1	47,1	1,78	49,1	49,1		113	45,1	406	11,6	
34-2	61,0	1,98	61,1	61,1		115	44,2	451	11,7	
34-3	49,9	2,08	44,4	44,4		116	43,8	448	11,5	
34-4	62,1	2,10	58,2	58,2		116	43,7	480	11,7	Gegenseitige
34-5	55,8	2,33	48,5	48,5		115	44,3	490	11,4	Verschiebung der
Min	47,1	1,78	44,4	44,4		113	43,7	406	11,4	beiden Holzbau-
Mean	55,2	2,05	52,3	52,3		115	44,2	455	11,6	teile zueinander
Max	62,1	2,33	61,1	61,1		116	45,1	490	11,7	
s	6,62	0,198	7,07	7,07		1,13	0,569	32,6	0,139	
v	12,0	9,63	13,5	13,5		0,984	1,29	7,18	1,20	

Tabelle A39 Ergebnisse der Reihe 35

Versuch	F <sub>max</sub> in kN	V <sub>max</sub> in mm	k <sub>s</sub> in kN/mm	k <sub>ax</sub> in kN/mm	μ	ℓ <sub>ef,Labor</sub> in mm	α <sub>Labor</sub> in mm	ρ in kg/m <sup>3</sup>	u in %	Beobachtung
35-1	47,9	3,36	28,1	35,9	0,436	158	45,9	388	11,8	
35-2	51,1	6,93	25,7	31,5	0,481	160	45,3	389	11,8	
35-3	49,9	3,45	29,0	38,9	0,304	169	42,1	416	12,0	
35-4	57,9	4,01	30,5	36,4	0,511	164	43,9	439	13,3	Zugversagen +
35-5	62,5	3,33	35,5	38,8	0,611	160	45,2	431	12,9	Gegenseitige
Min	47,9	3,3	25,7	31,5	0,304	158,2	42,1	388	11,8	Verschiebung der beiden Holzbau- teile zueinander
Mean	53,9	4,22	29,8	36,3	0,469	162	44,5	413	12,3	
Max	62,5	6,93	35,5	38,9	0,611	169	45,9	439	13,3	
s	6,12	1,54	3,62	3,02	0,112	4,36	1,53	23,4	0,679	
v	11,4	36,5	12,2	8,33	23,9	2,69	3,44	5,67	5,51	

Tabelle A40 Ergebnisse der Reihe 36

Versuch	F <sub>max</sub> in kN	V <sub>max</sub> in mm	k <sub>s</sub> in kN/mm	k <sub>ax</sub> in kN/mm	μ	ℓ <sub>ef,Labor</sub> in mm	α <sub>Labor</sub> in mm	ρ in kg/m <sup>3</sup>	u in %	Beobachtung
36-1	61,1	2,64	44,0	44,0		157	46,1	398	11,8	
36-2	62,7	2,27	47,1	47,1		164	44,6	405	12,1	
36-3	70,4	2,98	47,5	45,0		167	43,4	443	12,6	
36-4	70,1	3,54	47,8	47,8		162	45,3	439	13,4	Gegenseitige
36-5	69,1	2,87	46,4	46,4		160	46,1	452	13,7	Verschiebung der
Min	61,1	2,27	44,0	44,0		157	43,4	398	11,8	beiden Holzbau- teile zueinander
Mean	66,7	2,86	46,6	46,1		162	45,1	427	12,7	
Max	70,4	3,54	47,8	47,8		167	46,1	452	13,7	
s	4,44	0,467	1,52	1,54		3,87	1,13	24,2	0,813	
v	6,65	16,3	3,26	3,34		2,39	2,50	5,66	6,41	

Tabelle A41 Ergebnisse der Reihe 37

Versuch	$F_{\max}$ in kN	$V_{\max}$ in mm	$k_s$ in kN/mm	$k_{ax}$ in kN/mm	$\mu$	$\ell_{\text{ef,Labor}}$ in mm	$\alpha_{\text{Labor}}$ in mm	$\rho$ in kg/m <sup>3</sup>	$u$ in %	Beobachtung
37-1	50,6	4,20	21,7	31,3	0,253	199	43,3	406	12,6	Zugversagen + Gegenseitige Verschiebung der beiden Holzbauteile zueinander
37-2	51,3	4,00	20,4	32,4	0,154	204	43,2	417	12,7	
37-3	61,8	4,31	23,0	28,0	0,478	*)	*)	458	12,9	
37-4	60,2	2,60	36,7	48,5	0,326	201	42,6	430	12,5	
37-5	64,8	2,96	38,5	42,3	0,535	198	42,6	457	12,6	
Min	50,6	2,60	20,4	28,0	0,154	198	42,6	406	12,5	
Mean	57,8	3,61	28,0	36,5	0,349	201	42,9	433	12,6	
Max	64,8	4,31	38,5	48,5	0,535	204	43,3	458	12,9	
s	6,42	0,778	8,78	8,57	0,157	2,60	0,397	23,3	0,139	
v	11,1	21,5	31,3	23,5	45,0	1,29	0,926	5,38	1,10	

\*) Laborwerte fehlen, Berechnung erfolgte mit Sollwerten

Tabelle A42 Ergebnisse der Reihe 38

Versuch	$F_{\max}$ in kN	$V_{\max}$ in mm	$k_s$ in kN/mm	$k_{ax}$ in kN/mm	$\mu$	$\ell_{\text{ef,Labor}}$ in mm	$\alpha_{\text{Labor}}$ in mm	$\rho$ in kg/m <sup>3</sup>	$u$ in %	Beobachtung
38-1	77,9	2,94	52,1	48,5		204	42,9	425	12,2	Zugversagen + Gegenseitige Verschiebung der beiden Holzbauteile zueinander
38-2	83,0	2,37	61,7	61,7		201	44,7	433	12,0	
38-3	84,2	2,43	64,9	64,9		202	43,7	427	12,2	
38-4	81,1	2,36	59,4	49,6		191	39,3	456	12,2	
38-5	79,0	2,60	53,2	48,3		205	42,1	492	12,6	
Min	77,9	2,36	52,1	48,3		191	39,3	425	12,0	
Mean	81,0	2,54	58,3	54,6		200	42,5	446	12,2	
Max	84,2	2,94	64,9	64,9		205	44,7	492	12,6	
s	2,62	0,244	5,52	8,05		5,46	2,05	28,3	0,222	
v	3,23	9,60	9,48	14,7		2,73	4,81	6,33	1,82	

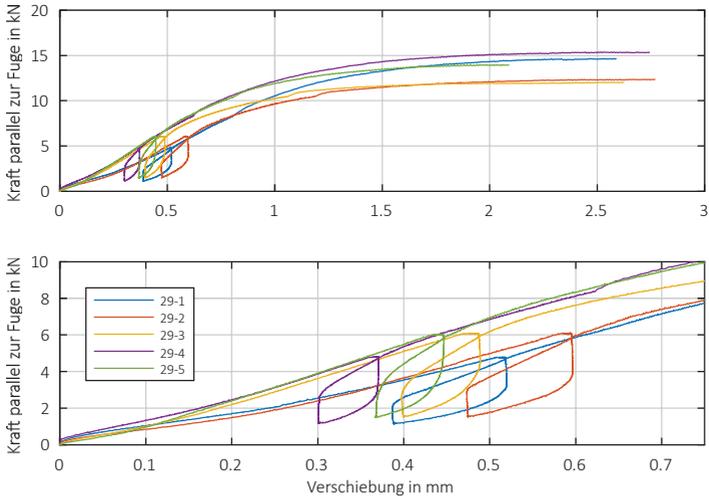


Bild A31 Last-Verschiebungs-Diagramm der Diagonalscherversuche – Reihe 29

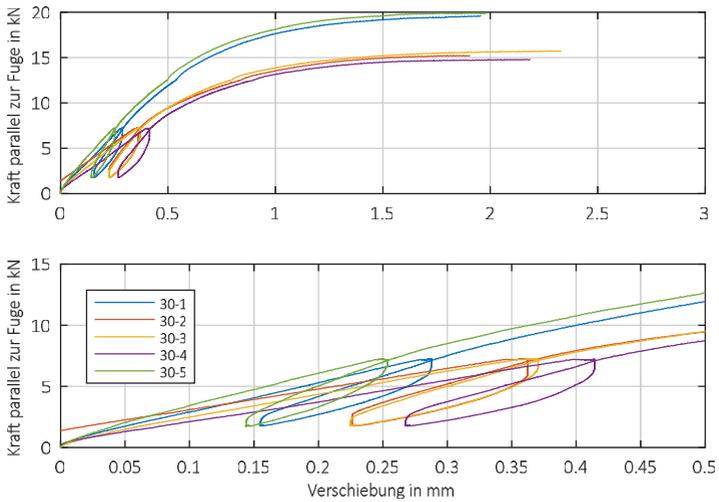


Bild A32 Last-Verschiebungs-Diagramm der Diagonalscherversuche – Reihe 30

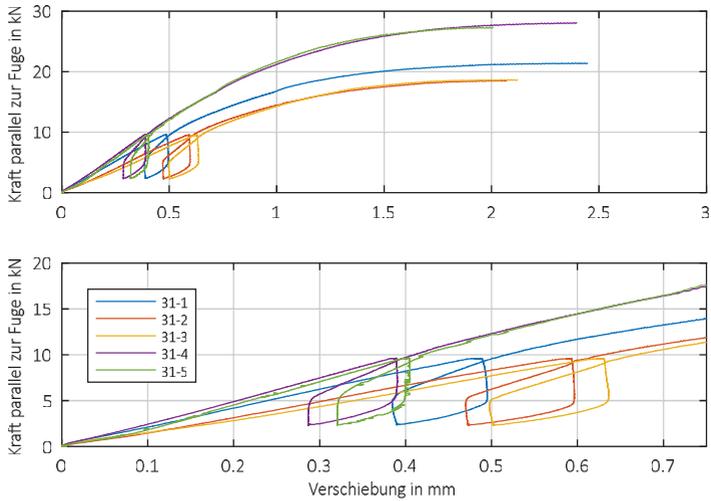


Bild A33 Last-Verschiebungs-Diagramm der Diagonalscherversuche – Reihe 31

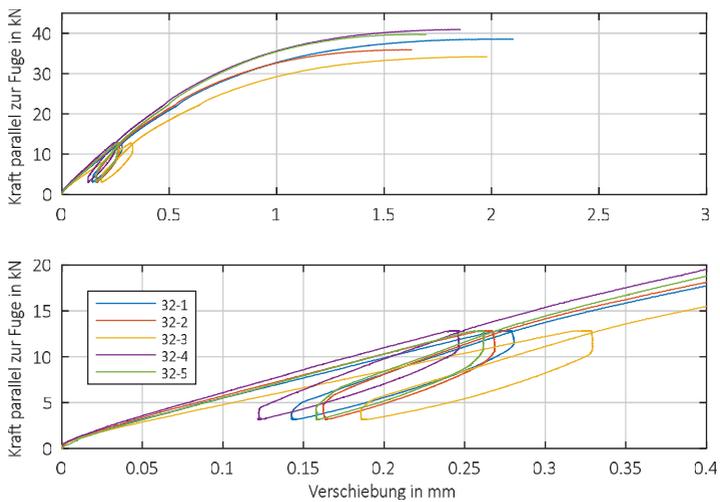


Bild A34 Last-Verschiebungs-Diagramm der Diagonalscherversuche – Reihe 32

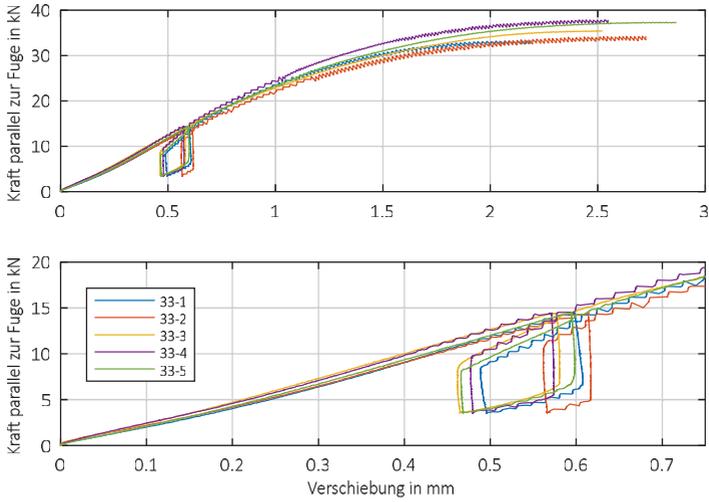


Bild A35 Last-Verschiebungs-Diagramm der Diagonalscherversuche – Reihe 33

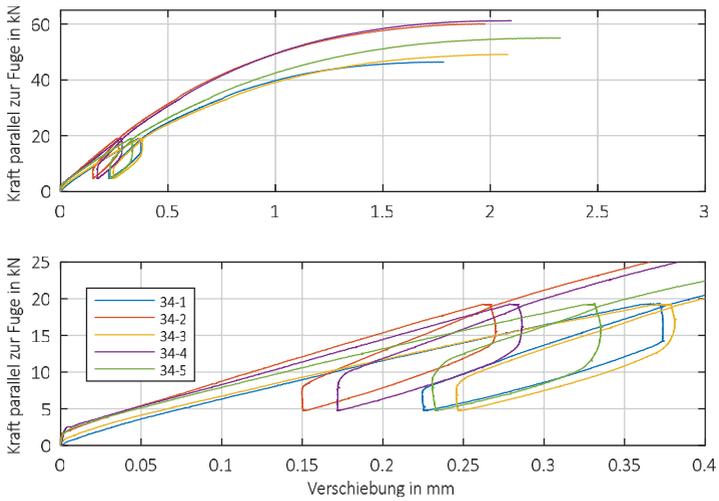


Bild A36 Last-Verschiebungs-Diagramm der Diagonalscherversuche – Reihe 34

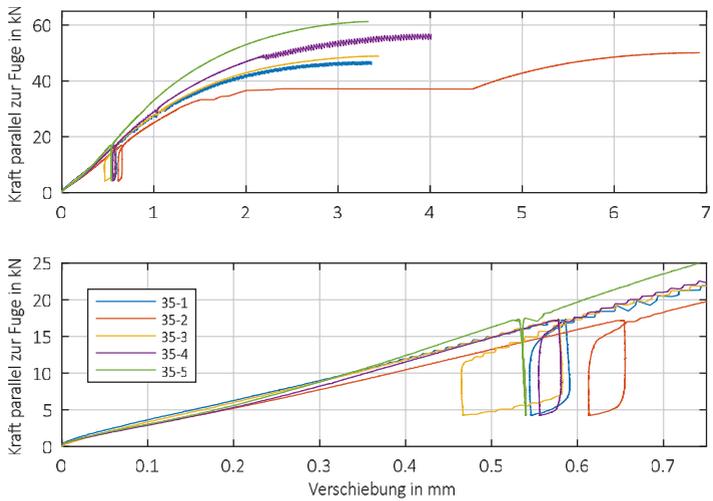


Bild A37 Last-Verschiebungs-Diagramm der Diagonalscherversuche – Reihe 35

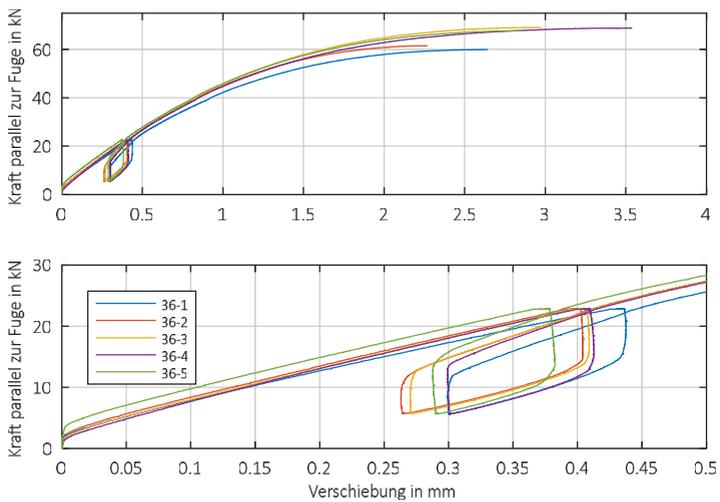


Bild A38 Last-Verschiebungs-Diagramm der Diagonalscherversuche – Reihe 36

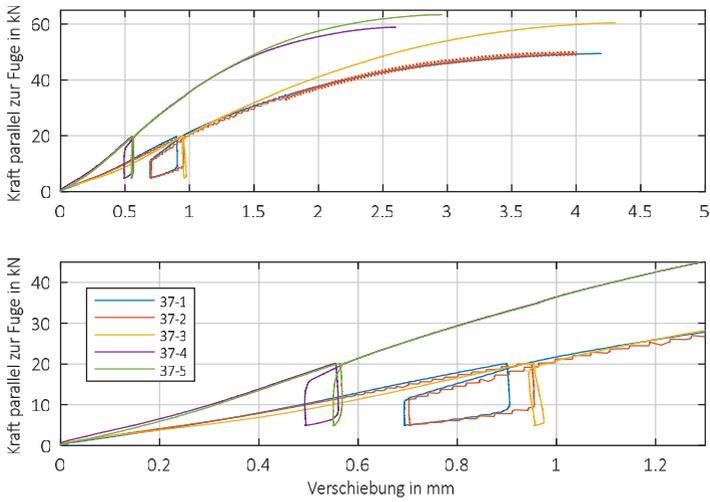


Bild A39 Last-Verschiebungs-Diagramm der Diagonalscherversuche – Reihe 37

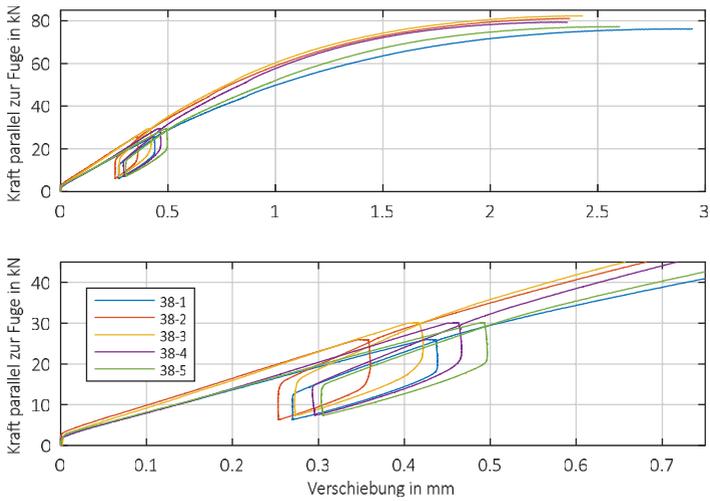


Bild A40 Last-Verschiebungs-Diagramm der Diagonalscherversuche – Reihe 38

## Anlage 4

### Versuchsergebnisse der Ausziehversuche

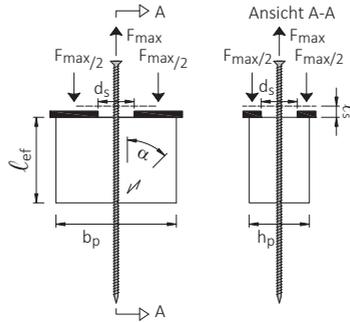


Bild A41 Versuchskörper der Ausziehversuche

Tabelle A43 Geometrie der Prüfkörper der Ausziehversuche

Reihe	$b_p$ in mm	$h_p$ in mm	$l_p$ in mm	$l_{ef}$ in mm	$l_s$ in mm	$d_s$ in mm	$\alpha$ in °	$d$ in mm	$d_k$ in mm	Besonderheiten
1.1			113	113			45			
2.1	160	110	130	130	39	50	30	8	5,1	
3.1			113	113			45			
4.1			130	130			30			
5.1			113	113			45			
6.1	160	110	130	130	30	50	30	8	5,1	vorgebohrt
7.1			113	113			45			
8.1			130	130			30			
9.1			113	113			45			
10.1	160	110	130	130	30	50	30	8	5,1	Holzfeuchte im Mittel 20%
11.1			113	113			45			
12.1			130	130			30			
15.1	120	60	84,9	84,9	vari-	36	45	6	3,8	
17.1	200	100	141	141	iert	60	45	10	6,4	
21.1							60			
23.1	160	80	130	130	39	50	40	8	5,1	
27.1							20			
29.1			40	40					4,9	
31.1	160	80	80	80	39	50	45	8	4,9	
35.1			160	160					4,9	
37.1			200	200					5,1	

Tabelle A44 Ergebnisse der Reihe 1.1

Versuch	F <sub>max</sub> in kN	V <sub>max,u</sub> in mm	V <sub>max,o</sub> in mm	k <sub>ax,u</sub> in kN/mm	k <sub>ax,o</sub> in kN/mm	ρ in kg/m <sup>3</sup>	u in %	Beobachtung
1.1-1	15,5	0,704	0,998	39,5	20,4	397	12,4	Herausziehen der Schrauben
1.1-2	16,5	0,722	0,939	42,5	31,6	384	12,1	
1.1-3	15,1	0,782	1,056	48,7	27,9	394	12,1	
1.1-4	18,7	0,735	1,133	61,5	32,1	421	12,2	
1.1-5	18,1	0,949	1,048	44,4	34,2	460	11,5	
Min	15,1	0,704	0,939	39,5	20,4	384	11,5	
Mean	16,8	0,778	1,035	47,3	29,3	411	12,1	
Max	18,7	0,949	1,133	61,5	34,2	460	12,4	
s	1,60	0,099	0,081	8,59	3,53	30,5	0,336	
v	9,54	12,8	6,82	18,2	15,4	7,41	2,79	

Tabelle A45 Ergebnisse der Reihe 2.1

Versuch	F <sub>max</sub> in kN	V <sub>max,u</sub> in mm	V <sub>max,o</sub> in mm	k <sub>ax,u</sub> in kN/mm	k <sub>ax,o</sub> in kN/mm	ρ in kg/m <sup>3</sup>	u in %	Beobachtung
2.1-1	15,9	0,535	0,85	60,5	29,5	352	12,6	Herausziehen der Schrauben
2.1-2	16,7	0,570	0,98	70,7	26,5	394	12,0	
2.1-3	20,8	0,638	1,15	80,6	30,5	421	12,0	
2.1-4	20,7	0,587	0,92	68,0	41,2	444	12,7	
2.1-5	17,1	0,435	0,95	82,0	26,6	450	12,8	
Min	15,9	0,435	0,85	60,5	26,5	352	12,0	
Mean	18,2	0,553	0,97	72,4	30,9	412	12,4	
Max	20,8	0,638	1,15	82,0	41,2	450	12,8	
s	2,33	0,076	0,125	8,99	3,52	40,2	0,390	
v	12,8	13,7	11,0	12,4	14,7	9,76	3,14	

Tabelle A46 Ergebnisse der Reihe 3.1

Versuch	$F_{\max}$	$V_{\max,u}$	$V_{\max,o}$	$k_{ax,u}$	$k_{ax,o}$	$\rho$	$u$	Beobachtung
	in kN	in mm	in mm	in kN/mm	in kN/mm	in kg/m <sup>3</sup>	in %	
3.1-1	12,2	0,656	0,841	41,4	24,0	343	12,5	Herausziehen der Schrauben
3.1-2	18,7	0,707	1,043	67,8	32,2	413	12,2	
3.1-3	14,4	0,670	0,984	52,5	25,8	384	11,9	
3.1-4	18,3	0,730	1,124	55,4	25,5	431	12,3	
3.1-5	16,0	0,665	0,962	54,9	26,4	462	13,3	
Min	12,2	0,656	0,841	41,4	24,0	343	11,9	
Mean	15,9	0,686	0,991	54,4	26,8	407	12,4	
Max	18,7	0,730	1,12	67,8	32,2	462	13,3	
s	2,73	0,031	0,128	9,41	1,99	45,4	0,527	
v	17,1	4,57	11,2	17,3	9,26	11,2	4,24	

Tabelle A47 Ergebnisse der Reihe 4.1

Versuch	$F_{\max}$	$V_{\max,u}$	$V_{\max,o}$	$k_{ax,u}$	$k_{ax,o}$	$\rho$	$u$	Beobachtung
	in kN	in mm	in mm	in kN/mm	in kN/mm	in kg/m <sup>3</sup>	in %	
4.1-1	16,9	0,498	0,887	74,1	27,1	366	12,8	Herausziehen der Schrauben
4.1-2	15,9	0,512	0,823	51,2	28,0	384	12,7	
4.1-3	19,2	0,607	1,12	57,5	22,1	402	12,0	
4.1-4	20,2	---*)	---*)	41,7	39,5	432	12,1	
4.1-5	22,9	---*)	---*)	105	35,7	469	12,6	
Min	15,9	0,498	0,823	41,7	22,1	366	12,0	
Mean	19,0	0,539	0,945	65,8	30,5	411	12,4	
Max	22,9	0,607	1,12	105	39,5	469	12,8	
s	2,78	0,060	0,174	24,7	4,28	40,7	0,365	
v	14,6	11,1	15,8	37,6	18,1	9,92	2,93	

\*) Wegaufnehmer abgerutscht

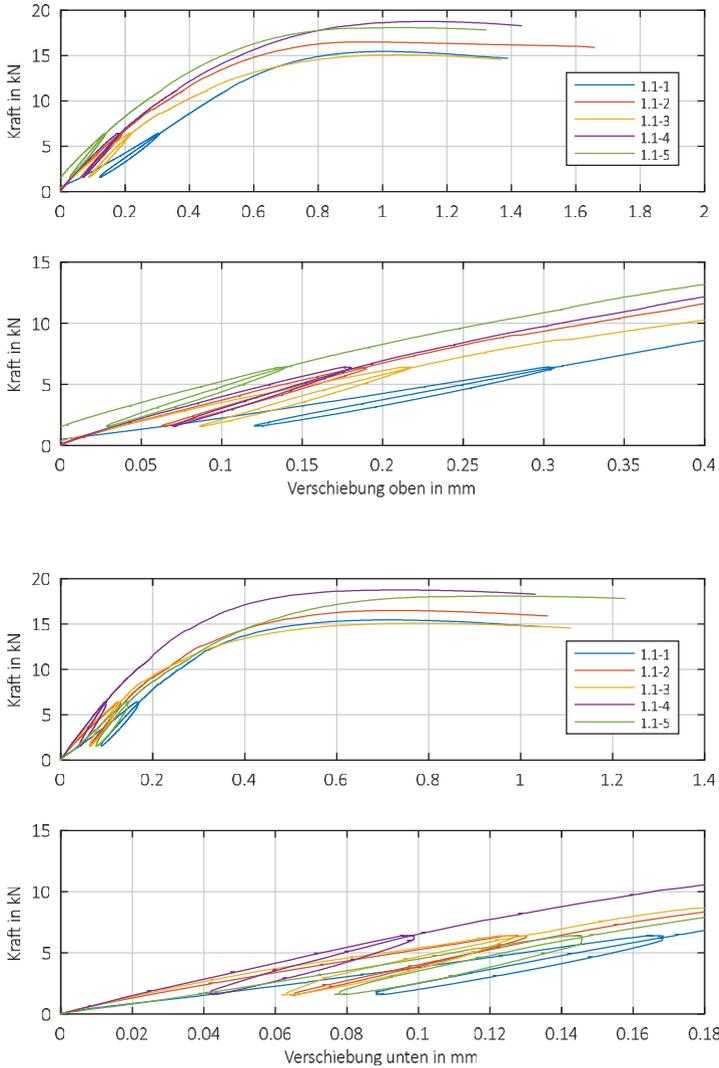


Bild A42 Last-Verschiebungs-Diagramm der Ausziehversuche – Reihe 1.1

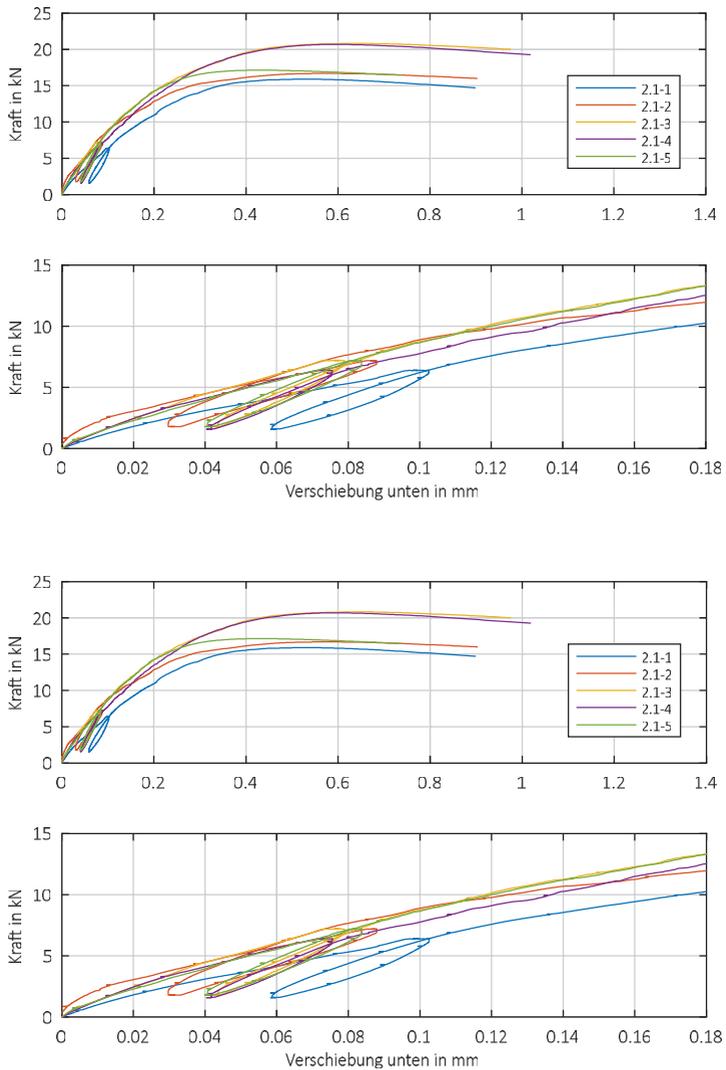


Bild A43 Last-Verschiebungs-Diagramm der Ausziehversuche – Reihe 2.1

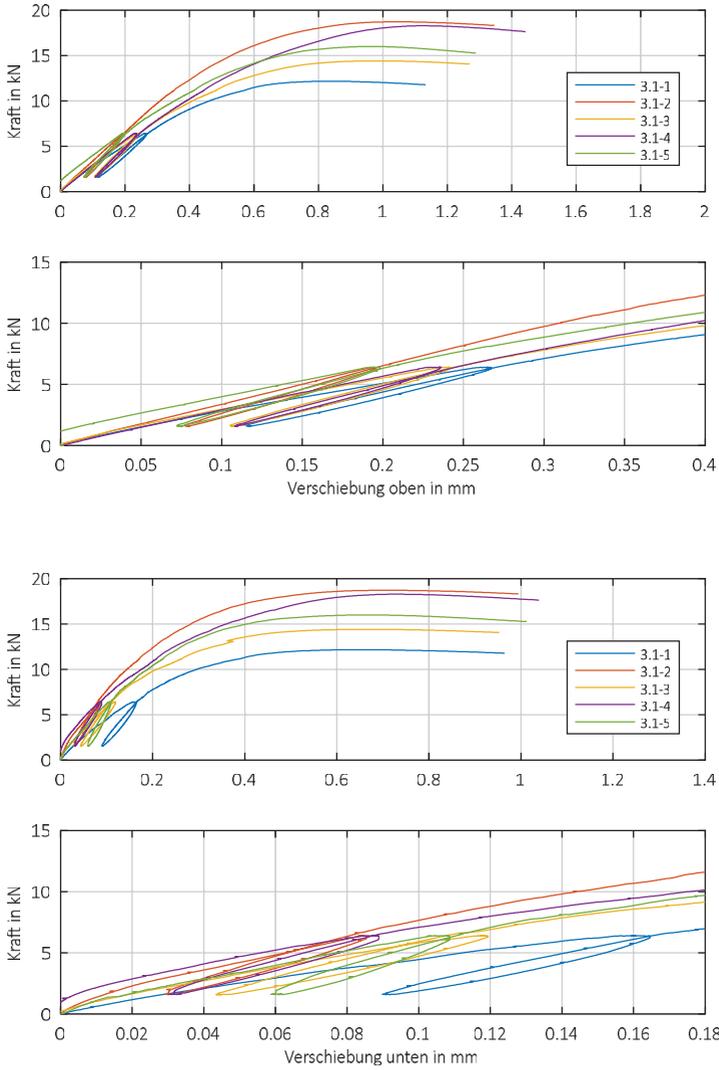


Bild A44 Last-Verschiebungs-Diagramm der Ausziehversuche – Reihe 3.1

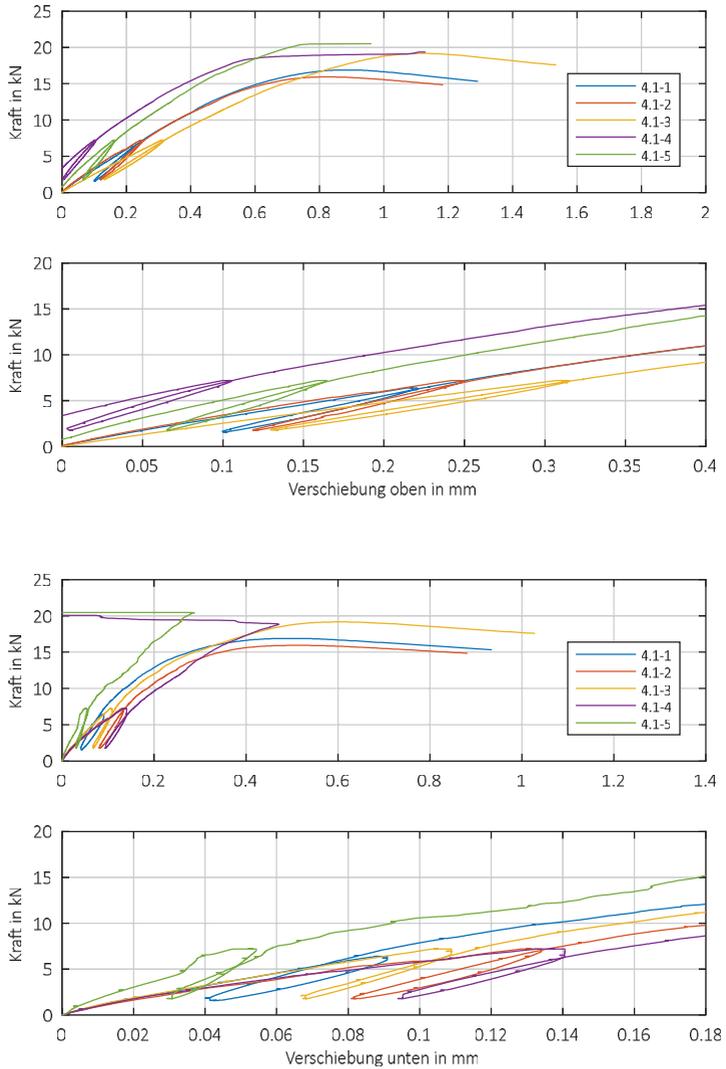


Bild A45 Last-Verschiebungs-Diagramm der Ausziehversuche – Reihe 4.1

Tabelle A48 Ergebnisse der Reihe 5.1

Versuch	F <sub>max</sub> in kN	V <sub>max,u</sub> in mm	V <sub>max,o</sub> in mm	k <sub>ax,u</sub> in kN/mm	k <sub>ax,o</sub> in kN/mm	ρ in kg/m <sup>3</sup>	u in %	Beobachtung
5.1-1	12,6	1,07	1,26	33,3	24,1	377	12,9	Herausziehen der Schrauben
5.1-2	16,5	0,802	1,21	58,4	26,5	406	12,9	
5.1-3	14,9	0,958	1,38	47,7	22,8	412	13,3	
5.1-4	16,8	0,795	1,23	52,5	23,9	493	13,1	
5.1-5	18,6	0,725	1,11	56,7	28,9	477	13,3	
Min	12,6	0,725	1,11	33,3	22,8	377	12,9	
Mean	15,9	0,869	1,23	49,7	25,3	433	13,1	
Max	18,6	1,07	1,38	58,4	28,9	493	13,3	
s	2,25	0,139	0,088	10,1	1,78	49,6	0,200	
v	14,2	16,0	6,54	20,2	8,29	11,5	1,53	

Tabelle A49 Ergebnisse der Reihe 6.1

Versuch	F <sub>max</sub> in kN	V <sub>max,u</sub> in mm	V <sub>max,o</sub> in mm	k <sub>ax,u</sub> in kN/mm	k <sub>ax,o</sub> in kN/mm	ρ in kg/m <sup>3</sup>	u in %	Beobachtung
6.1-1	15,8	0,664	0,944	44,2	27,3	387	10,9	Herausziehen der Schrauben
6.1-2	18,8	0,787	1,15	40,1	24,7	416	12,8	
6.1-3	17,4	0,706	1,01	60,9	31,9	418	12,0	
6.1-4	19,5	0,706	0,982	116	36,2	430	12,8	
6.1-5	19,9	0,640	1,01	68,2	34,3	473	12,5	
Min	15,8	0,640	0,94	40,1	24,7	387	10,9	
Mean	18,3	0,701	1,02	66,0	30,9	425	12,2	
Max	19,9	0,787	1,15	116	36,2	473	12,8	
s	1,67	0,056	0,081	30,5	3,27	31,2	0,797	
v	9,15	7,95	7,10	46,2	12,9	7,35	6,53	

Tabelle A50 Ergebnisse der Reihe 7.1

Versuch	F <sub>max</sub> in kN	V <sub>max,u</sub> in mm	V <sub>max,o</sub> in mm	k <sub>ax,u</sub> in kN/mm	k <sub>ax,o</sub> in kN/mm	ρ in kg/m <sup>3</sup>	u in %	Beobachtung
7.1-1	12,4	1,17 <sup>*)</sup>	9,12 <sup>*)</sup>	25,9	15,7	376	13,1	Herausziehen der Schrauben
7.1-2	16,4	0,883	1,24	40,1	23,4	415	13,1	
7.1-3	15,3	0,636	1,06	48,8	25,3	417	13,0	
7.1-4	17,3	0,709	1,15	55,0	26,6	497	13,1	
7.1-5	18,6	0,745	1,18	57,4	29,0	481	13,1	
Min	12,4	0,636	1,06	25,9	15,7	376	13,0	
Mean	16,0	0,743	1,16	45,4	24,0	437	13,1	
Max	18,6	0,883	1,24	57,4	29,0	497	13,1	
s	2,37	0,104	0,082	12,8	3,82	50,4	0,045	
v	14,8	13,9	6,44	28,2	18,7	11,5	0,342	

<sup>\*)</sup> Ausreißer gehen nicht in die Auswertung ein

Tabelle A51 Ergebnisse der Reihe 8.1

Versuch	F <sub>max</sub> in kN	V <sub>max,u</sub> in mm	V <sub>max,o</sub> in mm	k <sub>ax,u</sub> in kN/mm	k <sub>ax,o</sub> in kN/mm	ρ in kg/m <sup>3</sup>	u in %	Beobachtung
8.1-1	17,6	0,772	1,05	63,3	34,3	401	11,6	Herausziehen der Schrauben
8.1-2	18,4	0,752	1,11	43,9	27,5	426	12,6	
8.1-3	18,3	0,694	1,03	65,0	32,6	433	12,3	
8.1-4	18,9	0,796	1,10	47,7	33,1	449	13,0	
8.1-5	20,7	0,704	1,26	60,9	30,0	467	12,2	
Min	17,6	0,694	1,03	43,9	27,5	401	11,6	
Mean	18,8	0,744	1,11	56,2	31,5	435	12,3	
Max	20,7	0,796	1,26	65,0	34,3	467	13,0	
s	1,16	0,044	0,099	9,66	1,84	24,8	0,518	
v	6,18	5,89	7,99	17,2	7,13	5,70	4,20	

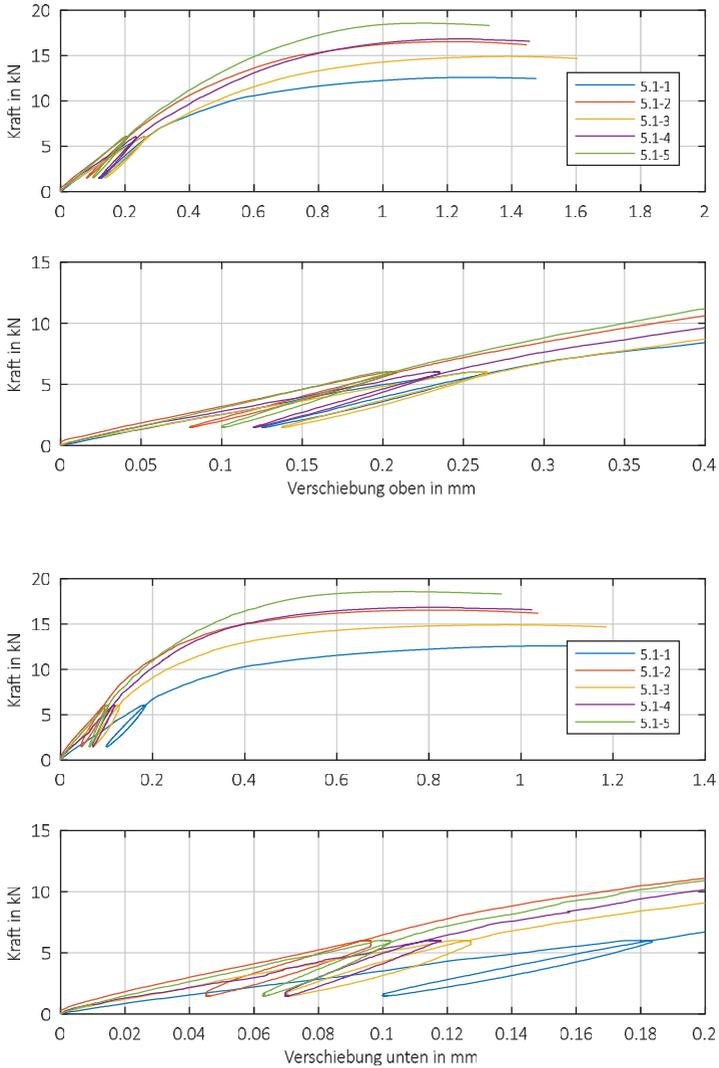


Bild A46 Last-Verschiebungs-Diagramm der Ausziehversuche – Reihe 5.1

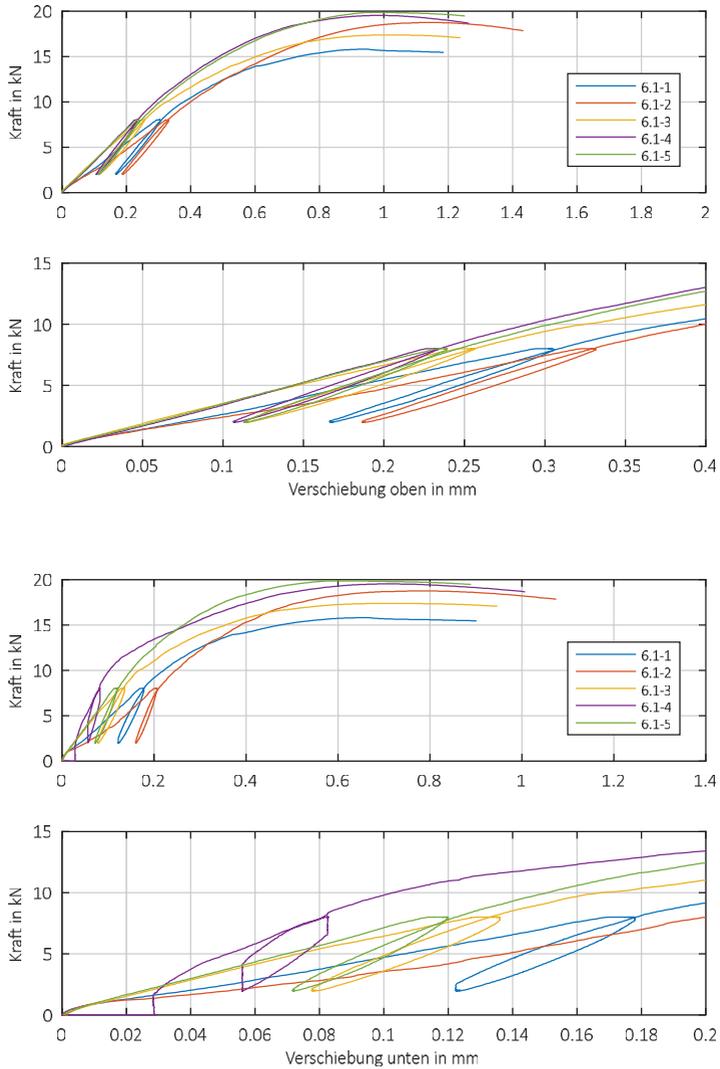


Bild A47 Last-Verschiebungs-Diagramm der Ausziehversuche – Reihe 6.1

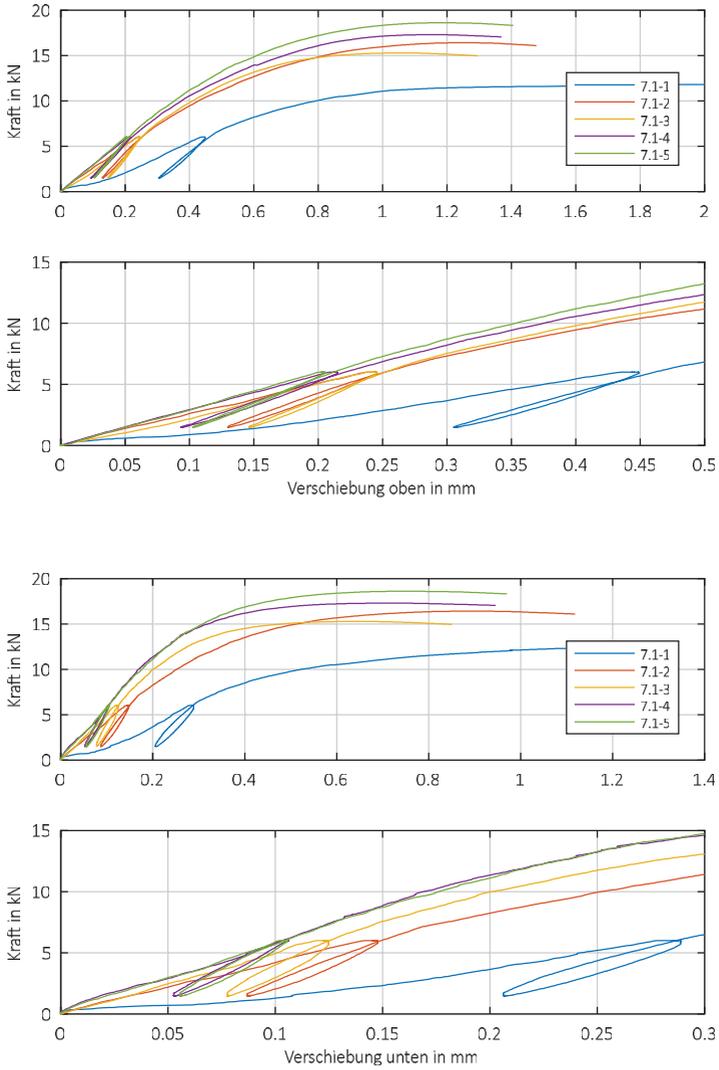


Bild A48 Last-Verschiebungs-Diagramm der Ausziehversuche – Reihe 7.1

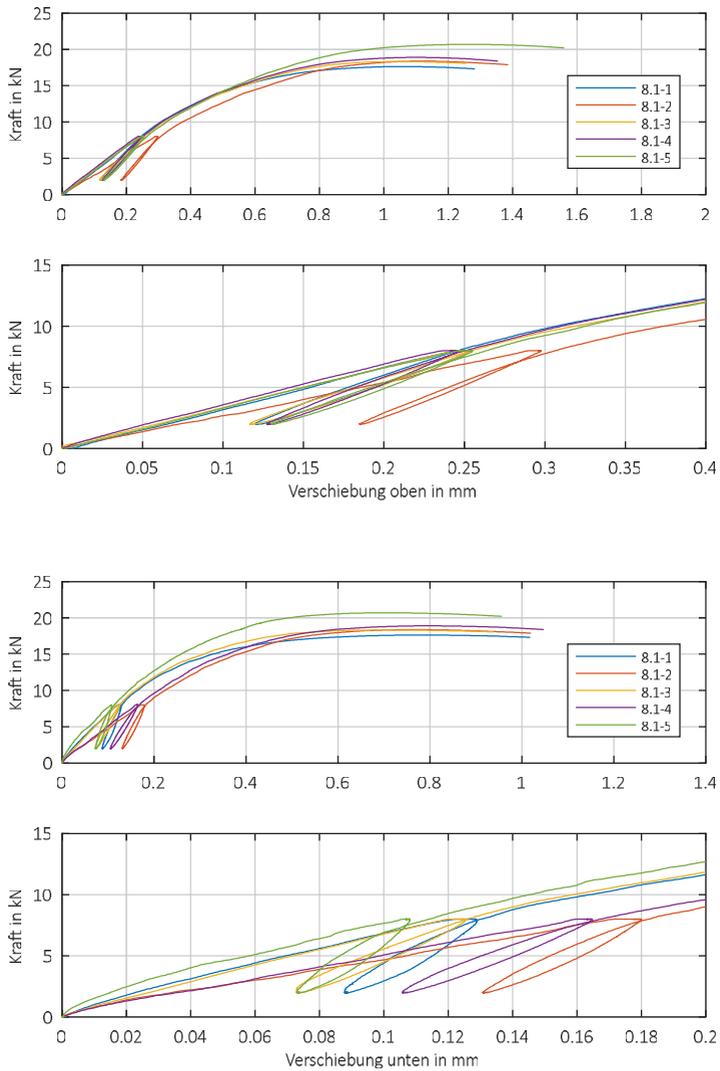


Bild A49 Last-Verschiebungs-Diagramm der Ausziehversuche – Reihe 8.1

Tabelle A52 Ergebnisse der Reihe 9.1

Versuch	F <sub>max</sub> in kN	V <sub>max,u</sub> in mm	V <sub>max,o</sub> in mm	k <sub>ax,u</sub> in kN/mm	k <sub>ax,o</sub> in kN/mm	ρ in kg/m <sup>3</sup>	u in %	Beobachtung
9.1-1	10,9	0,881	1,04	28,0	21,3	436	21,9	Herausziehen der Schrauben
9.1-2	17,0	0,658	0,873	46,1	30,4	463	20,0	
9.1-3	17,3	0,729	1,10	65,1	33,1	490	20,3	
9.1-4	13,1	0,695	1,04	49,3	24,7	435	19,4	
9.1-5	12,9	0,636	0,93	45,5	24,3	495	22,6	
Min	10,9	0,636	0,873	28,0	21,3	435	19,4	
Mean	14,2	0,720	1,00	46,8	26,7	464	20,8	
Max	17,3	0,881	1,10	65,1	33,1	495	22,6	
s	2,82	0,097	0,092	13,2	3,40	28,6	1,35	
v	19,8	13,4	8,40	28,2	15,2	6,16	6,48	

Tabelle A53 Ergebnisse der Reihe 10.1

Versuch	F <sub>max</sub> in kN	V <sub>max,u</sub> in mm	V <sub>max,o</sub> in mm	k <sub>ax,u</sub> in kN/mm	k <sub>ax,o</sub> in kN/mm	ρ in kg/m <sup>3</sup>	u in %	Beobachtung
10.1-1	12,7	0,568	0,899	82,4	30,0	402	21,8	Herausziehen der Schrauben
10.1-2	16,5	0,539	0,992	73,6	26,3	440	19,0	
10.1-3	16,4	0,524	0,924	76,9	32,3	441	20,8	
10.1-4	16,9	0,693	1,08	54,7	27,7	446	19,9	
10.1-5	12,6	0,673	0,987	54,0	26,2	448	21,2	
Min	12,6	0,524	0,899	54,0	26,2	402	19,0	
Mean	15,0	0,599	0,98	68,3	28,5	435	20,5	
Max	16,9	0,693	1,08	82,4	32,3	448	21,8	
s	2,18	0,088	0,069	13,1	1,80	19,0	1,10	
v	14,5	14,5	6,27	19,2	7,60	4,36	5,37	

Tabelle A54 Ergebnisse der Reihe 11.1

Versuch	F <sub>max</sub> in kN	V <sub>max,u</sub> in mm	V <sub>max,o</sub> in mm	k <sub>ax,u</sub> in kN/mm	k <sub>ax,o</sub> in kN/mm	ρ in kg/m <sup>3</sup>	u in %	Beobachtung
11.1-1	10,9	0,887	1,03	27,5	22,9	427	22,3	Herausziehen der Schrauben
11.1-2	17,3	0,653	0,935	76,4	38,4	450	20,0	
11.1-3	16,5	0,743	1,11	59,0	27,5	506	20,5	
11.1-4	13,2	0,717	1,05	41,2	22,5	447	19,3	
11.1-5	13,9	0,775	0,930	34,5	27,6	496	21,7	
Min	10,9	0,653	0,930	27,5	22,5	427	19,3	
Mean	14,4	0,755	1,01	47,7	27,8	465	20,8	
Max	17,3	0,887	1,11	76,4	38,4	506	22,3	
s	2,60	0,086	0,076	19,9	4,38	34,0	1,23	
v	18,1	11,4	6,87	41,6	18,9	7,32	5,92	

Tabelle A55 Ergebnisse der Reihe 12.1

Versuch	F <sub>max</sub> in kN	V <sub>max,u</sub> in mm	V <sub>max,o</sub> in mm	k <sub>ax,u</sub> in kN/mm	k <sub>ax,o</sub> in kN/mm	ρ in kg/m <sup>3</sup>	u in %	Beobachtung
12.1-1	13,9	0,490	0,798	79,8	33,3	400	21,9	Herausziehen der Schrauben
12.1-2	16,0	0,552	0,770	57,7	36,2	437	18,9	
12.1-3	16,5	0,511	0,944	87,2	34,4	436	20,8	
12.1-4	16,8	0,539	0,905	72,2	34,9	451	20,0	
12.1-5	12,4	0,738	0,979	51,6	29,7	459	18,8	
Min	12,4	0,490	0,770	51,6	29,7	400	18,8	
Mean	15,1	0,566	0,879	69,7	33,7	437	20,1	
Max	16,8	0,738	0,98	87,2	36,2	459	21,9	
s	1,88	0,099	0,090	14,9	1,62	22,6	1,31	
v	12,4	17,5	9,14	21,4	5,96	5,18	6,53	

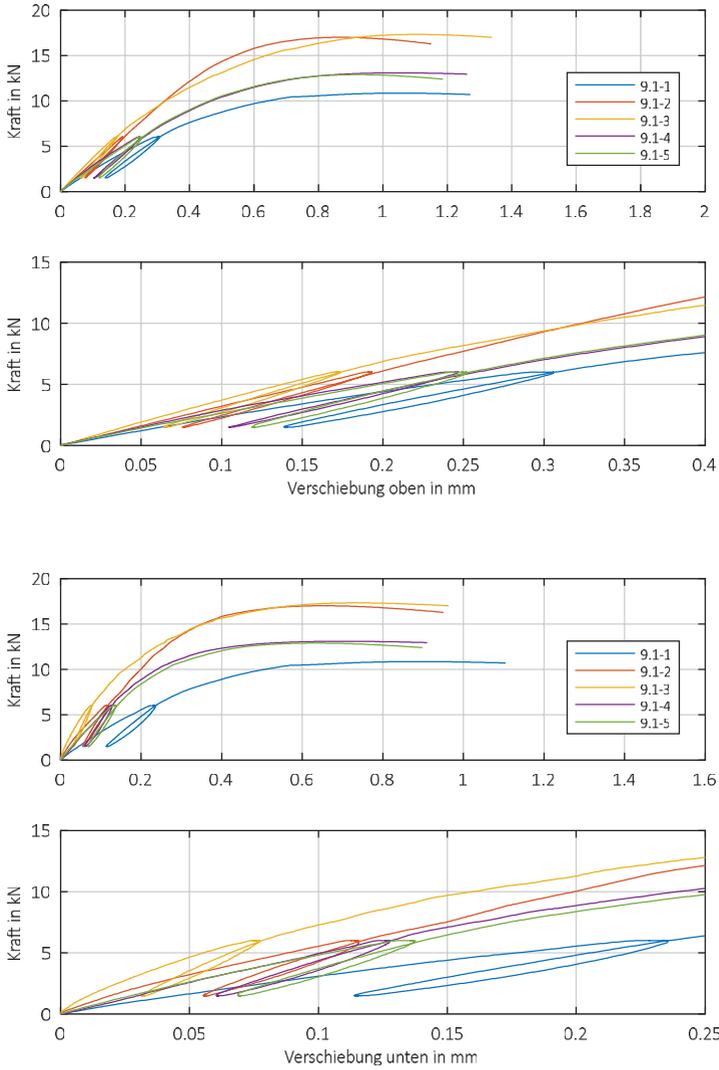


Bild A50 Last-Verschiebungs-Diagramm der Ausziehversuche – Reihe 9.1

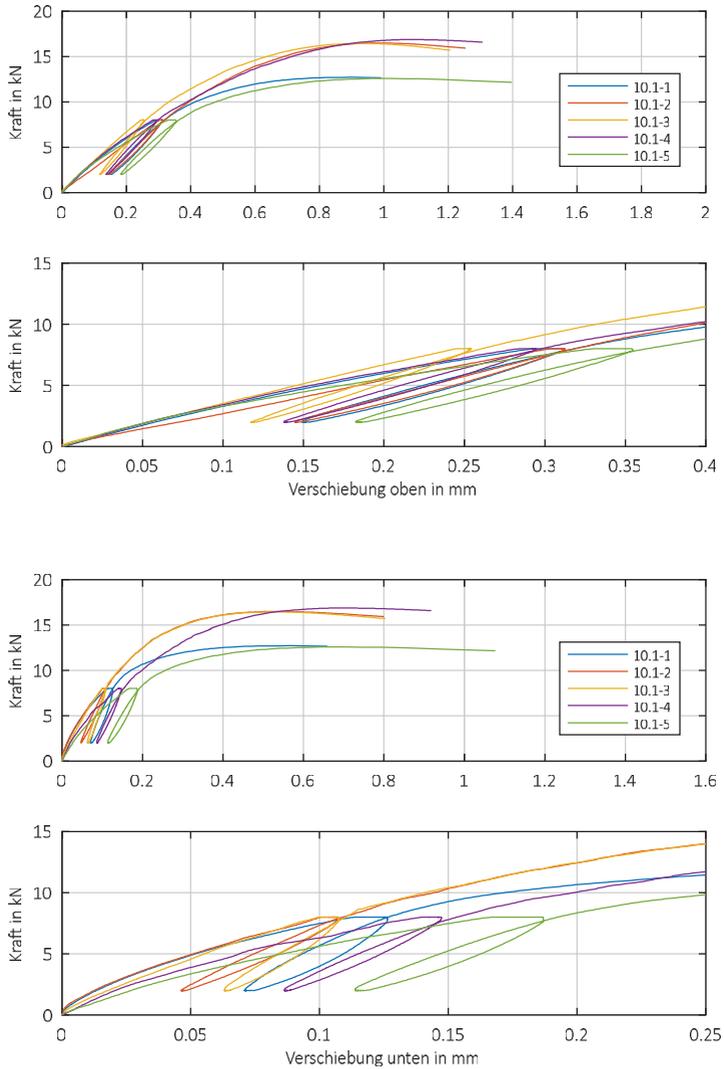


Bild A51 Last-Verschiebungs-Diagramm der Ausziehversuche – Reihe 10.1

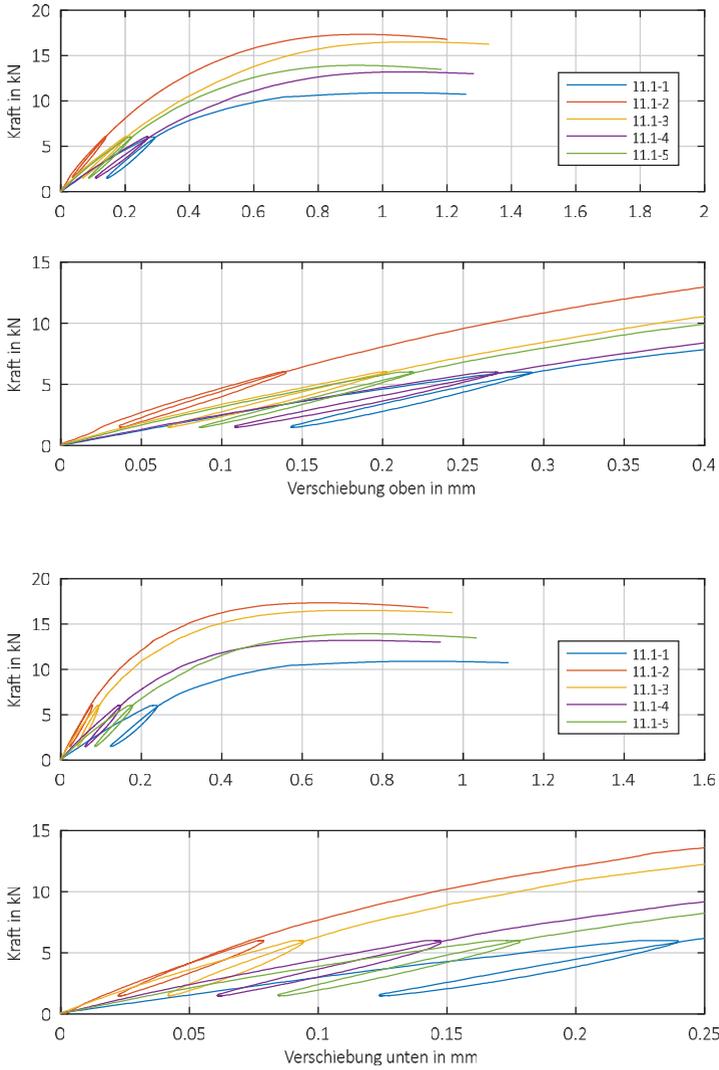


Bild A52 Last-Verschiebungs-Diagramm der Ausziehversuche – Reihe 11.1

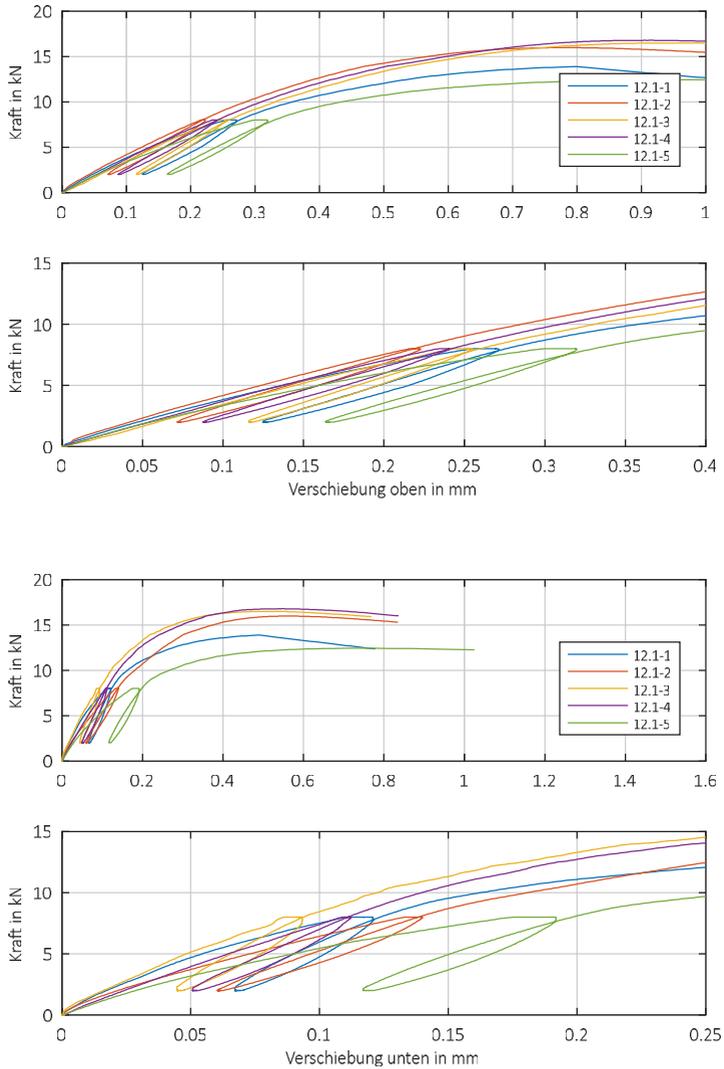


Bild A53 Last-Verschiebungs-Diagramm der Ausziehversuche – Reihe 12.1

Tabelle A56 Ergebnisse der Reihe 15.1

Versuch	F <sub>max</sub> in kN	V <sub>max,u</sub> in mm	V <sub>max,o</sub> in mm	k <sub>ax,u</sub> in kN/mm	k <sub>ax,o</sub> in kN/mm	ρ in kg/m <sup>3</sup>	u in %	Beobachtung
15.1-1	8,10	0,580	0,942	34,1	13,0	373	12,7	Herausziehen der Schrauben
15.1-2	10,8	0,527	0,709	73,7	27,1	436	10,3	
15.1-3	9,92	0,570	0,808	51,3	21,4	418	12,9	
15.1-4	9,45	0,660	0,858	32,5	18,2	481	12,5	
15.1-5	10,9	0,703	0,891	31,1	21,1	482	12,5	
Min	8,10	0,527	0,709	31,1	13,0	373	10,3	
Mean	9,82	0,608	0,842	44,5	20,2	438	12,2	
Max	10,9	0,703	0,942	73,7	27,1	482	12,9	
s	1,13	0,07	0,09	18,2	5,13	45,9	1,06	
v	11,5	11,8	10,5	40,9	25,4	10,5	8,74	

Tabelle A57 Ergebnisse der Reihe 17.1

Versuch	F <sub>max</sub> in kN	V <sub>max,u</sub> in mm	V <sub>max,o</sub> in mm	k <sub>ax,u</sub> in kN/mm	k <sub>ax,o</sub> in kN/mm	ρ in kg/m <sup>3</sup>	u in %	Beobachtung
17.1-1	21,6	0,990	1,19	48,5	32,8	385	10,8	Herausziehen der Schrauben
17.1-2	24,3	0,656	1,07	99,1	35,0	405	11,9	
17.1-3	19,8	0,887	1,14	40,0	27,8	383	10,8	
17.1-4	25,0	0,744	2,41	79,2	28,4	412	11,8	
17.1-5	28,8	0,754	1,22	101	42,0	473	12,2	
Min	19,8	0,656	1,07	40,0	27,8	383	10,8	
Mean	23,9	0,806	1,40	73,5	33,2	412	11,5	
Max	28,8	0,990	2,41	101	42,0	473	12,2	
s	3,45	0,132	0,563	28,2	5,74	36,5	0,656	
v	14,4	16,3	40,1	38,3	17,3	8,88	5,70	

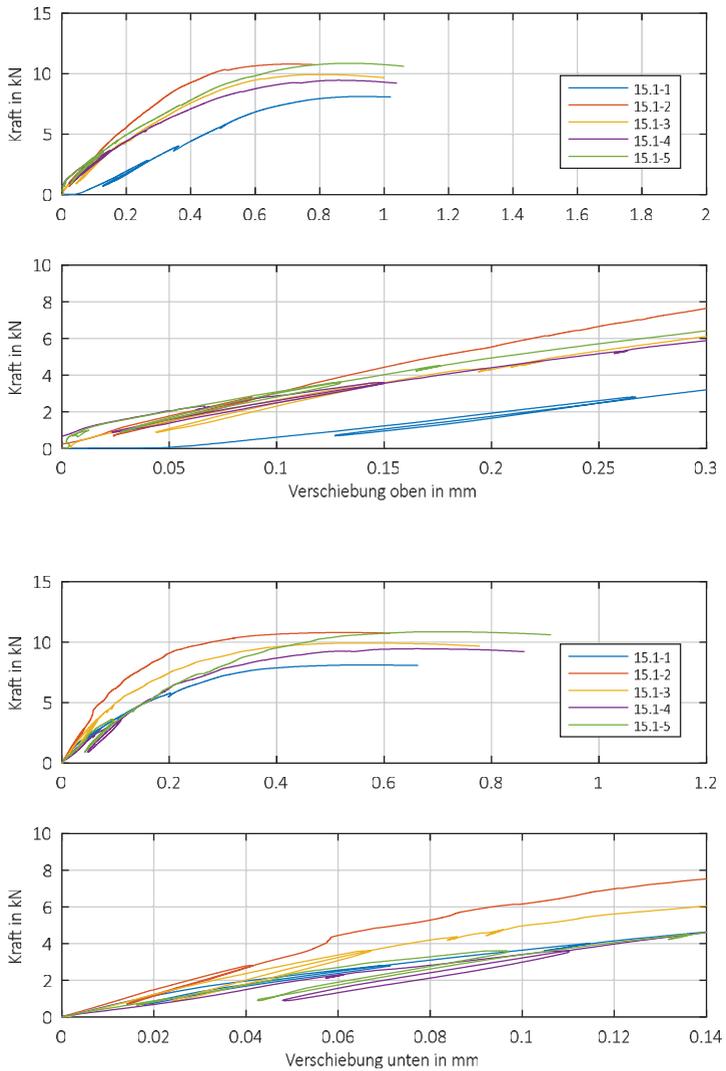


Bild A54 Last-Verschiebungs-Diagramm der Ausziehversuche – Reihe 15.1

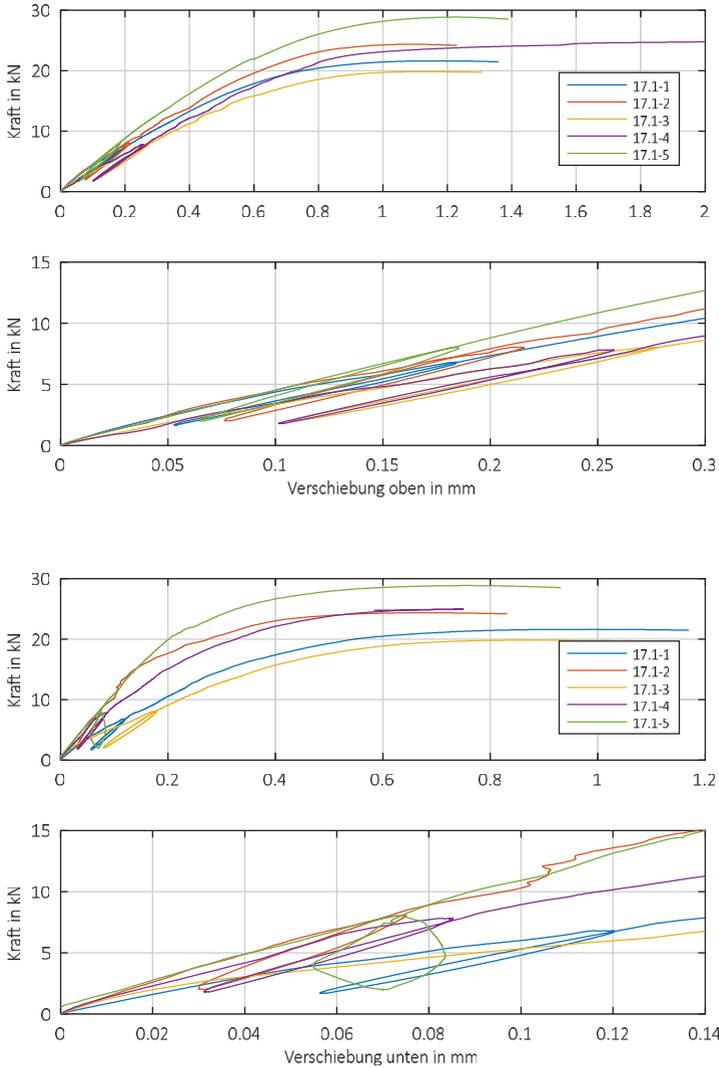


Bild A55 Last-Verschiebungs-Diagramm der Ausziehversuche – Reihe 17.1

Tabelle A58 Ergebnisse der Reihe 21.1

Versuch	F <sub>max</sub> in kN	V <sub>max,u</sub> in mm	V <sub>max,o</sub> in mm	k <sub>ax,u</sub> in kN/mm	k <sub>ax,o</sub> in kN/mm	ρ in kg/m <sup>3</sup>	u in %	Beobachtung
21.1-1	17,0	0,766	1,18	57,9	32,1	400	12,4	Herausziehen der Schrauben
21.1-2	17,3	1,11	1,44	43,0	27,4	414	13,1	
21.1-3	17,9	1,05	1,42	89,6	38,9	440	12,9	
21.1-4	21,9	0,785	1,38	64,8	34,9	451	13,1	
21.1-5	19,4	1,02	1,46	92,8	33,7	466	12,7	
Min	17,0	0,766	1,18	43,0	27,4	400	12,4	
Mean	18,7	0,947	1,38	69,6	33,4	434	12,8	
Max	21,9	1,11	1,46	92,8	38,9	466	13,1	
s	2,00	0,160	0,122	21,3	2,50	26,9	0,297	
v	10,7	16,9	7,88	30,5	9,79	6,21	2,31	

Tabelle A59 Ergebnisse der Reihe 23.1

Versuch	F <sub>max</sub> in kN	V <sub>max,u</sub> in mm	V <sub>max,o</sub> in mm	k <sub>ax,u</sub> in kN/mm	k <sub>ax,o</sub> in kN/mm	ρ in kg/m <sup>3</sup>	u in %	Beobachtung
23.1-1	17,9	0,576	0,944	91,7	36,1	440	12,6	Herausziehen der Schrauben
23.1-2	16,8	1,06	1,28	45,9	30,0	408	12,9	
23.1-3	16,9	0,453	0,838	111	39,3	418	12,8	
23.1-4	16,3	0,978	1,16	44,3	31,2	424	12,8	
23.1-5	19,2	0,563	0,890	100	41,4	488	12,8	
Min	16,3	0,453	0,838	44,3	30,0	408	12,6	
Mean	17,4	0,727	1,02	78,6	35,6	436	12,8	
Max	19,2	1,06	1,28	111	41,4	488	12,9	
s	1,19	0,274	0,182	31,3	2,84	31,5	0,110	
v	6,81	37,7	15,4	39,8	10,6	7,23	0,857	

Tabelle A60 Ergebnisse der Reihe 27.1

Versuch	F <sub>max</sub> in kN	V <sub>max,u</sub> in mm	V <sub>max,o</sub> in mm	k <sub>ax,u</sub> in kN/mm	k <sub>ax,o</sub> in kN/mm	ρ in kg/m <sup>3</sup>	u in %	Beobachtung
27.1-1	14,3	0,252	0,578	98,3	30,2	410	12,1	Herausziehen der Schrauben
27.1-2	12,6	0,436	0,709	87,2	37,0	402	12,8	
27.1-3	19,5	0,439	0,787	92,3	42,8	446	13,1	
27.1-4	14,8	0,481	0,729	82,4	35,6	415	12,7	
27.1-5	17,9	0,465	0,740	70,9	39,5	454	12,9	
Min	12,6	0,252	0,578	70,9	30,2	402	12,1	
Mean	15,8	0,415	0,708	86,2	37,0	425	12,7	
Max	19,5	0,481	0,787	98,3	42,8	454	13,1	
s	2,81	0,093	0,096	10,4	2,65	23,1	0,377	
v	17,7	22,4	11,3	12,0	9,61	5,43	2,96	

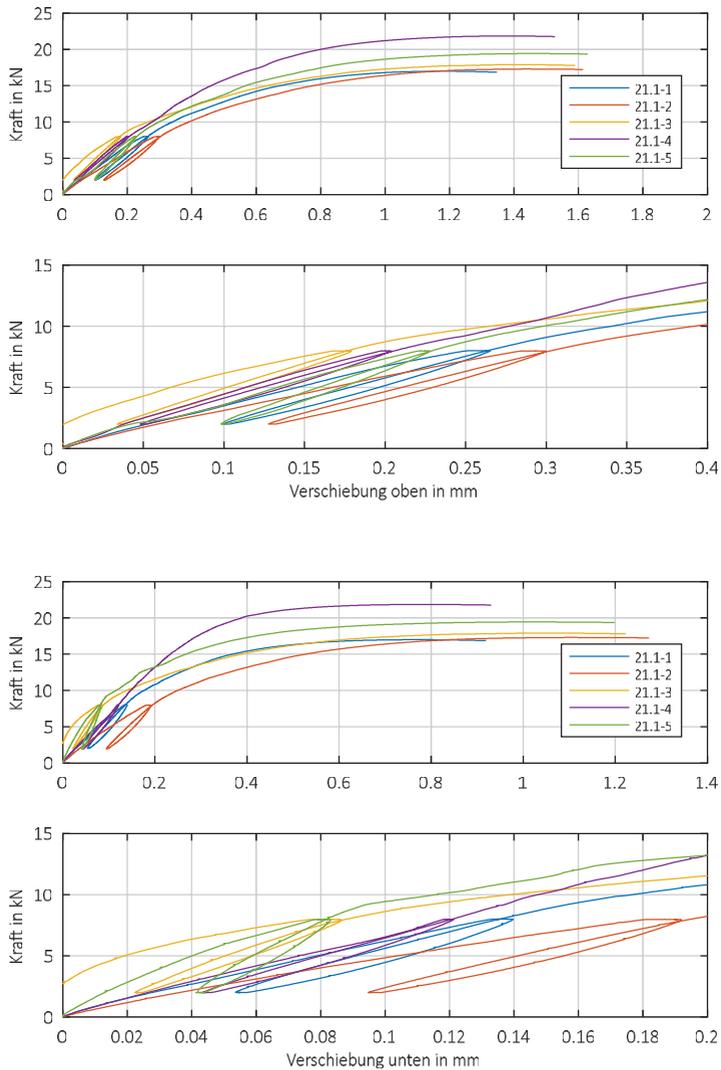


Bild A56 Last-Verschiebungs-Diagramm der Ausziehversuche – Reihe 21.1

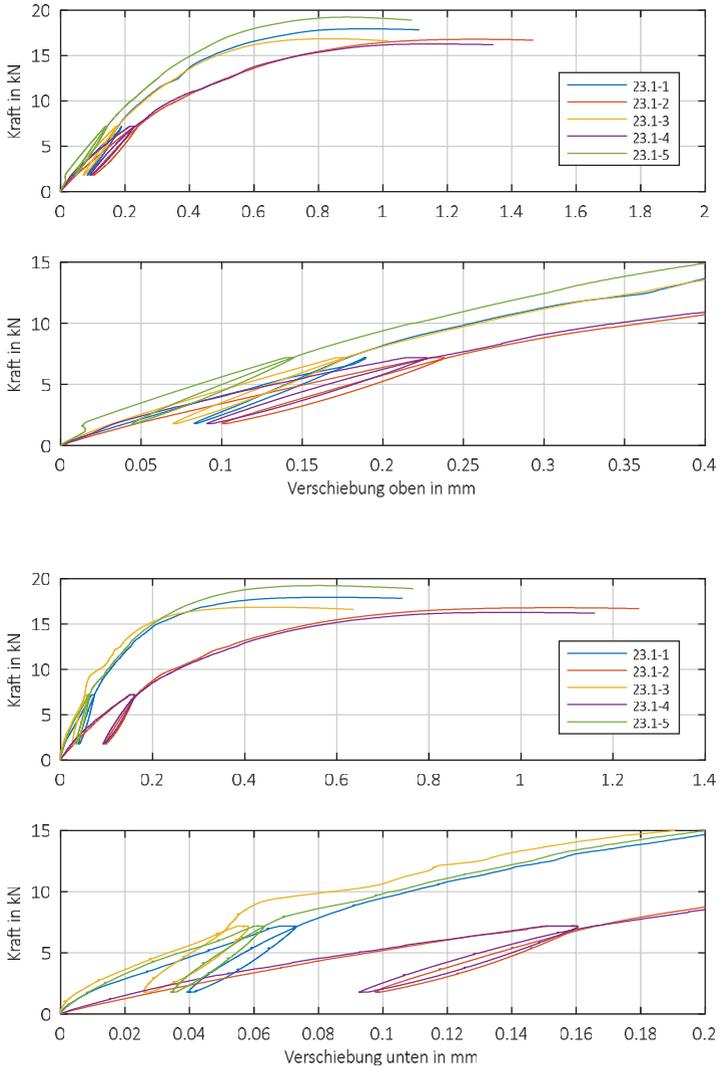


Bild A57 Last-Verschiebungs-Diagramm der Ausziehversuche – Reihe 23.1

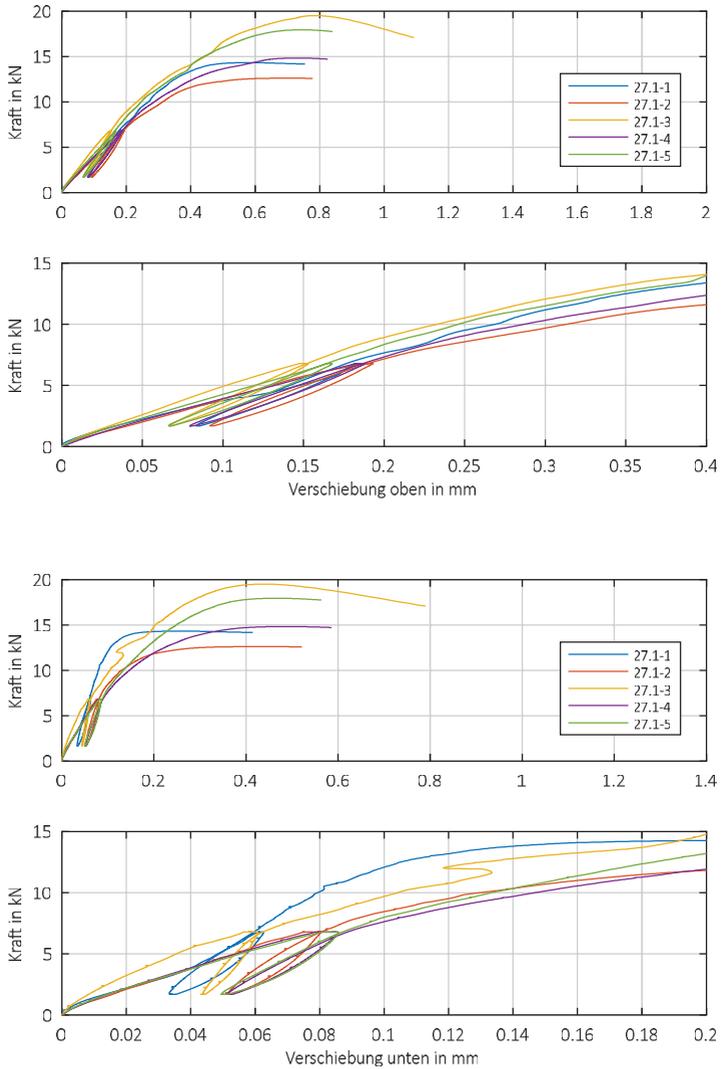


Bild A58 Last-Verschiebungs-Diagramm der Ausziehversuche – Reihe 27.1

Tabelle A61 Ergebnisse der Reihe 29.1

Versuch	F <sub>max</sub> in kN	V <sub>max,u</sub> in mm	V <sub>max,o</sub> in mm	k <sub>ax,u</sub> in kN/mm	k <sub>ax,o</sub> in kN/mm	ρ in kg/m <sup>3</sup>	u in %	Beobachtung
29.1-1	5,32	0,797	0,842	18,4	15,2	402	12,5	Herausziehen der Schrauben
29.1-2	5,47	0,963	1,04	12,6	10,3	517	12,8	
29.1-3	5,30	0,710	0,753	14,6	13,0	390	12,5	
29.1-4	5,10	0,860	0,920	10,7	9,92	472	12,5	
29.1-5	5,43	0,876	0,951	14,4	13,0	479	12,8	
Min	5,10	0,710	0,753	10,7	9,92	390	12,5	
Mean	5,32	0,841	0,901	14,2	12,3	452	12,6	
Max	5,47	0,963	1,04	18,4	15,2	517	12,8	
s	0,143	0,094	0,109	2,84	1,73	54,1	0,164	
v	2,68	11,2	11,4	20,1	15,8	12,0	1,30	

Tabelle A62 Ergebnisse der Reihe 31.1

Versuch	F <sub>max</sub> in kN	V <sub>max,u</sub> in mm	V <sub>max,o</sub> in mm	k <sub>ax,u</sub> in kN/mm	k <sub>ax,o</sub> in kN/mm	ρ in kg/m <sup>3</sup>	u in %	Beobachtung
31.1-1	9,10	0,722	0,851	29,9	20,8	374	11,7	Herausziehen der Schrauben
31.1-2	9,71	0,663	0,775	36,7	25,4	397	11,8	
31.1-3	9,53	0,635	0,786	60,3	32,0	437	12,0	
31.1-4	12,1	0,642	0,781	41,2	28,5	452	12,9	
31.1-5	12,2	0,651	0,824	32,2	24,0	444	12,8	
Min	9,10	0,635	0,775	29,9	20,8	374	11,7	
Mean	10,5	0,663	0,803	40,1	26,1	421	12,2	
Max	12,2	0,722	0,851	60,3	32,0	452	12,9	
s	1,49	0,035	0,034	12,1	2,69	33,7	0,568	
v	14,2	5,27	3,72	30,3	13,0	8,00	4,64	

Tabelle A63 Ergebnisse der Reihe 35.1

Versuch	F <sub>max</sub> in kN	V <sub>max,u</sub> in mm	V <sub>max,o</sub> in mm	k <sub>ax,u</sub> in kN/mm	k <sub>ax,o</sub> in kN/mm	ρ in kg/m <sup>3</sup>	u in %	Beobachtung
35.1-1	18,2	0,696	1,14	75,1	28,6	381	11,7	Herausziehen der Schrauben
35.1-2	21,1	0,571	1,54	94,3	33,3	462	11,4	
35.1-3	19,5	0,863	1,40	59,9	27,6	414	13,3	
35.1-4	21,7	0,310	1,32	141	33,0	441	12,8	
35.1-5	21,5	0,423	1,32	94,1	35,0	441	13,0	
Min	18,2	0,310	1,14	59,9	27,6	381	11,4	
Mean	20,4	0,573	1,34	93,0	31,5	428	12,4	
Max	21,7	0,863	1,54	141	35,0	462	13,3	
s	1,51	0,218	0,154	30,7	1,89	31,2	0,838	
v	7,38	38,1	9,94	33,0	7,87	7,30	6,74	

Tabelle A64 Ergebnisse der Reihe 37.1

Versuch	F <sub>max</sub> in kN	V <sub>max,u</sub> in mm	V <sub>max,o</sub> in mm	k <sub>ax,u</sub> in kN/mm	k <sub>ax,o</sub> in kN/mm	ρ in kg/m <sup>3</sup>	u in %	Beobachtung
37.1-1	23,0	0,884	1,79	93,7	31,3	383	12,0	Herausziehen der Schrauben
37.1-2	23,2	0,577	1,75	166	35,6	410	11,9	
37.1-3	22,5	1,00	1,92	106	31,6	406	13,2	
37.1-4	23,6	0,201	1,39	208	41,0	427	12,8	
37.1-5	23,6	0,480	1,55	122	32,0	446	13,7	
Min	22,5	0,201	1,39	93,7	31,3	383	11,9	
Mean	23,2	0,629	1,68	139,1	34,3	414	12,7	
Max	23,6	1,00	1,92	207,5	41,0	446	13,7	
s	0,462	0,321	0,203	47,0	2,34	23,6	0,773	
v	1,99	51,0	10,8	33,8	8,98	5,70	6,07	

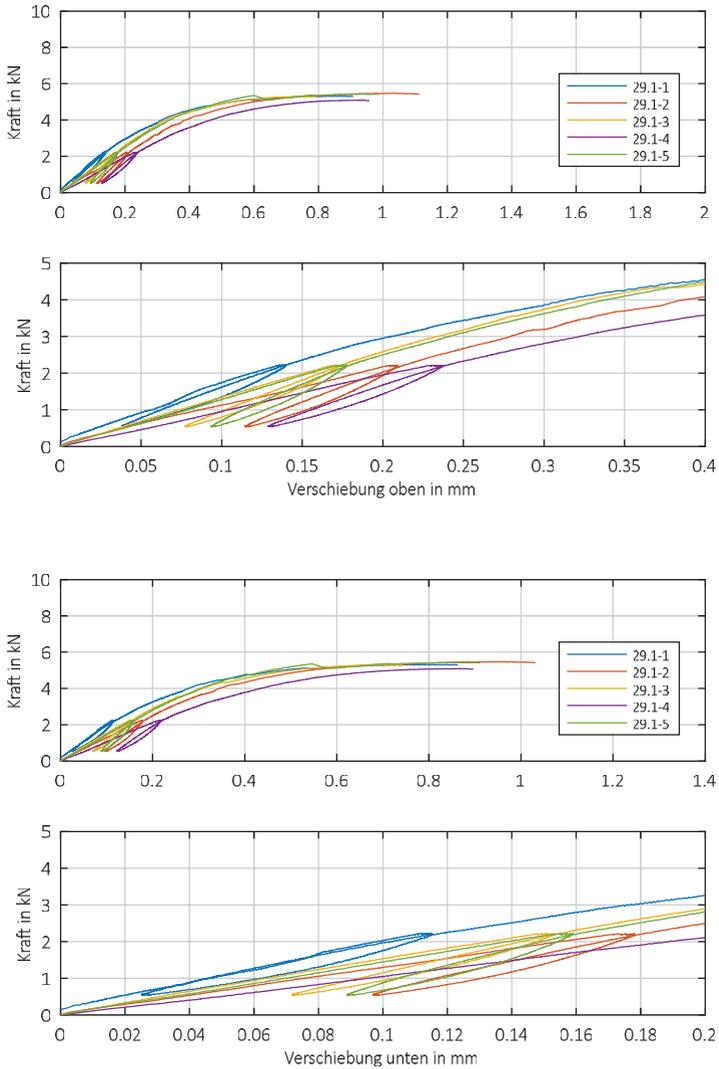


Bild A59 Last-Verschiebungs-Diagramm der Ausziehversuche – Reihe 29.1

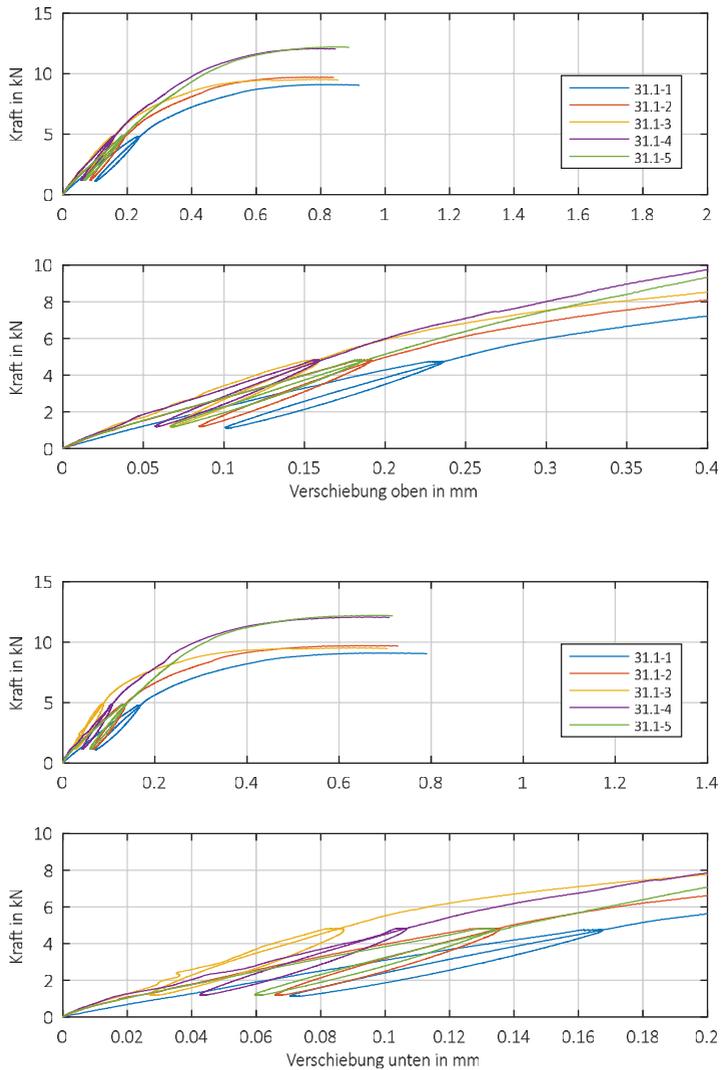


Bild A60 Last-Verschiebungs-Diagramm der Ausziehversuche – Reihe 31.1

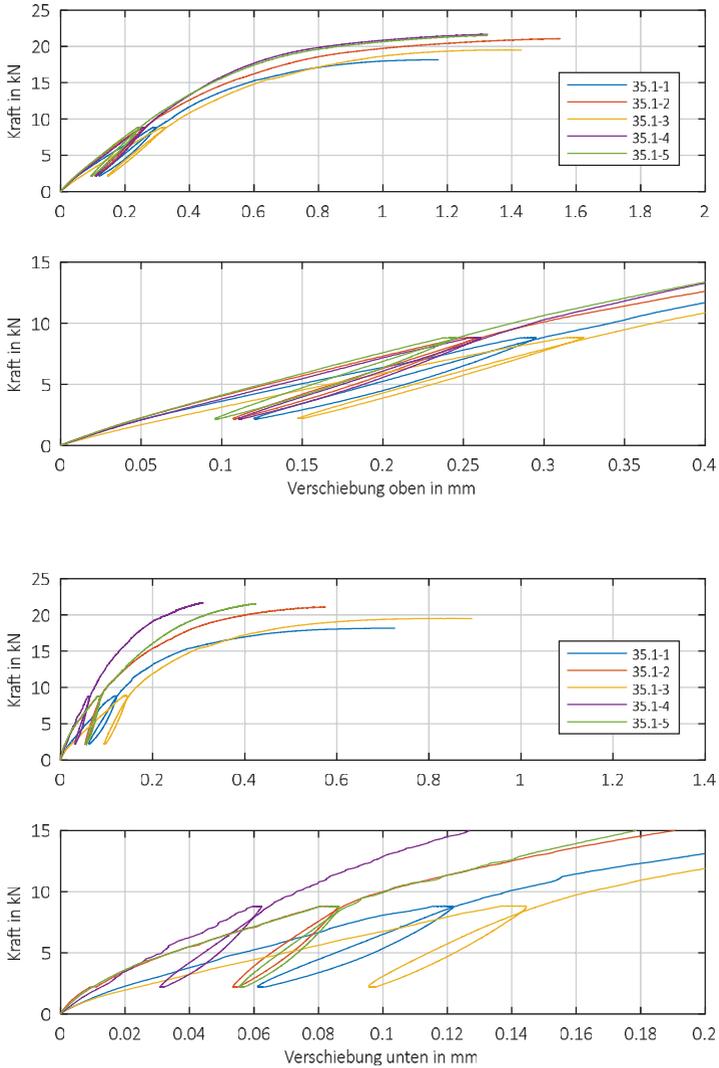


Bild A61 Last-Verschiebungs-Diagramm der Ausziehversuche – Reihe 35.1

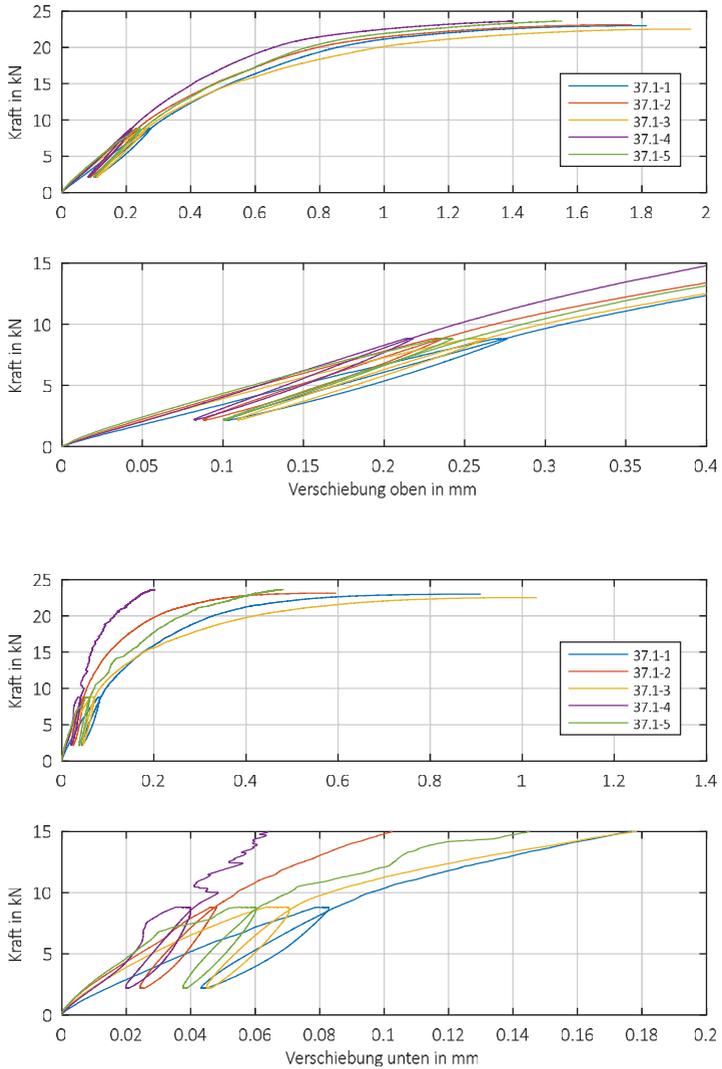


Bild A62 Last-Verschiebungs-Diagramm der Ausziehversuche – Reihe 37.1

## Anlage 5

Zusammenstellung der Versuchsdaten von Ausziehversuchen aus der Literatur

Tabelle A65 Zusammenstellung der Versuchsdaten der Ausziehversuche A\_1 [8]

Versuchs- anzahl	Belastung der Schraube	Werk- stoff	$\alpha$ in °	d in mm	$\ell_{ef}$ in mm	$\rho$ in kg/m <sup>3</sup>	$k_{ax}$ in kN/mm
113	Zug	C24	45	6,0	48	366	14,8
	Zug	C24		6,0	70	356	16,8
	Zug	C24		7,5	60	387	27,5
	Zug	C24		7,5	90	389	39,8
	Zug	C40		6,0	48	429	20,2
	Zug	C40		7,5	60	429	32,7
	Zug	C24		4,5	36	349	8,36
	Zug	C24		8,0	72	347	9,15
	Druck	C24		6,0	48	340	9,81
	Druck	C24		6,0	70	348	17,2
	Zug	Kerto-S		6,0	48	503	19,9
	Zug	Kerto-Q		6,0	48	543	22,1
	Zug	Kerto-S		6,0	48	499	14,0
	Zug	Kerto-S		7,5	60	498	27,1
	Zug	Kerto-Q		7,5	60	539	22,1
Zug	Kerto-S	7,5	60	474	22,5		

Tabelle A66 Zusammenstellung der Versuchsdaten der Ausziehversuche A\_2

Versuchs- anzahl	Belastung der Schraube	Werkstoff	$\alpha$ in °	d in mm	$\ell_{ef}$ in mm	$\rho$ in kg/m <sup>3</sup>	$k_{ax}$ in kN/mm
22		NH nach	45	8,9	108	433	44,3
20	Zug	DIN EN		6,5	65	410	22,9
20		28970		8,2	95	436	48,2

Tabelle A67 Zusammenstellung der Versuchsdaten der Ausziehversuche A\_3

Versuchs- anzahl	Belastung der Schraube	Werkstoff	$\alpha$ in °	d in mm	$\ell_{ef}$ in mm	$\rho$ in kg/m <sup>3</sup>	$k_{ax}$ in kN/mm
6				6,5	58,5	520	5,52
6	Zug	Kerto-S	45	8,2	71,8	509	6,06
6				6,5	58,5	519	5,11
6				8,2	71,8	524	6,16

Tabelle A68 Zusammenstellung der Versuchsdaten der Ausziehversuche A\_4 [14]

Versuchs- anzahl	Belastung der Schraube	Werkstoff	$\alpha$ in °	d in mm	$\ell_{ef}$ in mm	$\rho$ in kg/m <sup>3</sup>	$k_{ax}$ in kN/mm
3			60	8	120	440	21,1
1			60	8	160	440	25,7
3			60	8	200	450	18,2
3			60	10	150	440	19,8
3			60	10	200	457	24,8
3			60	10	250	452	27,9
3			60	12	180	449	23,9
2			60	12	240	433	31,0
3			60	12	300	443	29,0
3	Zug	GL 24h	30	8	120	444	29,5
3			30	8	160	446	29,3
3			30	8	200	482	24,2
3			30	10	150	416	23,9
3			30	10	200	441	26,1
3			30	10	250	440	29,2
3			30	12	180	439	49,7
3			30	12	240	424	40,2
3			30	12	300	440	34,7
1			30	10	200	459	28,3

## Anlage 6

Zusammenstellung der Versuchsdaten von Scherversuchen aus der Literatur

Berechnung der axialen Steifigkeit  $k_{ax}$ :

$$k_{ax} = \frac{2 \cdot k_s}{n \cdot n_{SF} \cdot \cos^2 \alpha}$$

Tabelle A69 Zusammenstellung der Versuchsdaten der Zugscherversuche ZS\_1 [9]

Versuchs- anzahl	Belas- tung der Schraub- e	Werk- stoff	Scherfu- genanzahl	Schrau- benanzahl (je SF)	$\alpha$ i °	d in mm	$\ell_{ef}$ in mm	$\rho$ in kg/m <sup>3</sup>	$k_{ax}$ in kN/mm
320 (229*)				1					52,0
119 (100*)				3					43,1
73 (67*)				5					38,2
124 (103*)	Zug-	GL 28h		2					48,0
124 (107*)	Scher	+ Stahl	2	3	45	8	180	454	43,9
69 (67*)				5					42,8
32 (29*)				8					37,7
44 (43*)				8					36,4

\* Versuchsanzahl ohne Ausreißer

Tabelle A70 Zusammenstellung der Versuchsdaten der Druckscherversuche DRS\_1 [8]

Versuchs- anzahl	Belastung der Schraube	Werk- stoff	Scher- fugen- anzahl	Schrau- benanz- ahl (je SF)	$\alpha$	d	$\ell_{ef}$	$\rho$	$k_{ax}$
					in °	in mm	in mm	in kg/m <sup>3</sup>	in kN/mm
	Gekreuzt	C24	2	2	45	6,0	50		9,40
	Gekreuzt	C24	2	2	45	6,0	50		12,9
	Gekreuzt	C24	2	2	45	7,5	50		9,11
	Gekreuzt	C24	2	2	45	7,5	56		12,8
	Gekreuzt	C24	2	2	45	7,5	56		13,6
	Gekreuzt	C24	2	4	45	7,5	56		11,7
	Gekreuzt	C24	2	4	45	7,5	56		11,8
	Gekreuzt	C24	2	4	45	7,5	56		11,6
	Gekreuzt	C24	2	8	45	7,5	56		11,6
	Gekreuzt	C24	2	8	45	7,5	56		11,7
	Gekreuzt	C24	2	2	45	7,5	56		11,0
	Gekreuzt	C24	2	2	45	7,5	56		12,9
	Gekreuzt	Kerto Q	2	2	45	7,5	56		18,4
	Gekreuzt	Kerto S	2	2	45	7,5	56		14,6
145	Gekreuzt	Kerto S <sup>1)</sup>	2	2	45	7,5	56	420 <sup>2)</sup>	14,4
	Gekreuzt	Kerto S	2	2	45	7,5	76		19,7
	Gekreuzt	Kerto S	2	2	45	6,0	56		13,6
	Gekreuzt	Kerto S	2	2	45	7,5	50		9,71
	Gekreuzt	Kerto Q	2	4	45	7,5	56		19,6
	Gekreuzt	Kerto S	2	4	45	7,5	56		17,4
	Gekreuzt	Kerto S	2	4	45	6,0	56		9,52
	Zug-Scher	C24	2	2	45	6,0	50		10,6
	Zug-Scher	C24	2	2	45	7,5	50		7,91
	Zug-Scher	C24	2	2	45	7,5	56		15,7
	Zug-Scher	C24	2	2	45	7,5	56		13,1
	Zug-Scher	C24	2	2	45	7,5	56		10,8
	Zug-Scher	Kerto Q	2	2	45	7,5	56		23,8
	Zug-Scher	Kerto S	2	2	45	7,5	56		17,0
	Zug-Scher	Kerto S	2	2		6,0	56		20,5

<sup>1)</sup> edge joint<sup>2)</sup> keine Angabe, wird daher angenommen

Tabelle A71 Zusammenstellung der Versuchsdaten der Druckscherversuche DRS\_2

Ver- suchsan- zahl	Belastung der Schraube	Werk- stoff	Scherfu- genanzahl	Schrau- benanzahl (je SF)	$\alpha$ in °	d in mm	$\ell_{ef}$ in mm	$\rho$ in kg/m <sup>3</sup>	$k_{ax}$ in kN/mm
6	Gekreuzt			4		8,2			53,5
6	Gekreuzt	nicht	2		45	8,9	135	440	64,0
6	Zug-Scher	bekannt		2		8,2			48,0
6	Zug-Scher					8,9			71,0



Im Ingenieurholzbau sind selbstbohrende Holzschrauben ein wichtiges stiftförmiges Verbindungsmittel, um große Zugkräfte in Verbindungen übertragen zu können. Während die Tragfähigkeit nach derzeitigem Stand der Technik zutreffend bestimmt werden kann, weisen gegenwärtig verfügbare Berechnungsmodelle für die axiale Steifigkeit untereinander große Unterschiede auf und entsprechende Berechnungsergebnisse sind daher fallweise widersprüchlich. Dies liegt in der Wahl der Prüfmethode zur Ermittlung der axialen Steifigkeit begründet.

In der vorliegenden Forschungsarbeit wurden unterschiedliche Prüfmethode zur Ermittlung der axialen Steifigkeit erprobt und analysiert. Auf Grundlage der Versuchsergebnisse wurde schließlich eine Prüfmethode identifiziert, die mit Experimenten an nachgiebig verbundenen Biegeträgern erfolgreich validiert wurde. Aufbauend auf den systematisch durchgeführten Versuchen wurden Berechnungsmodelle für die axiale Steifigkeit entwickelt.

