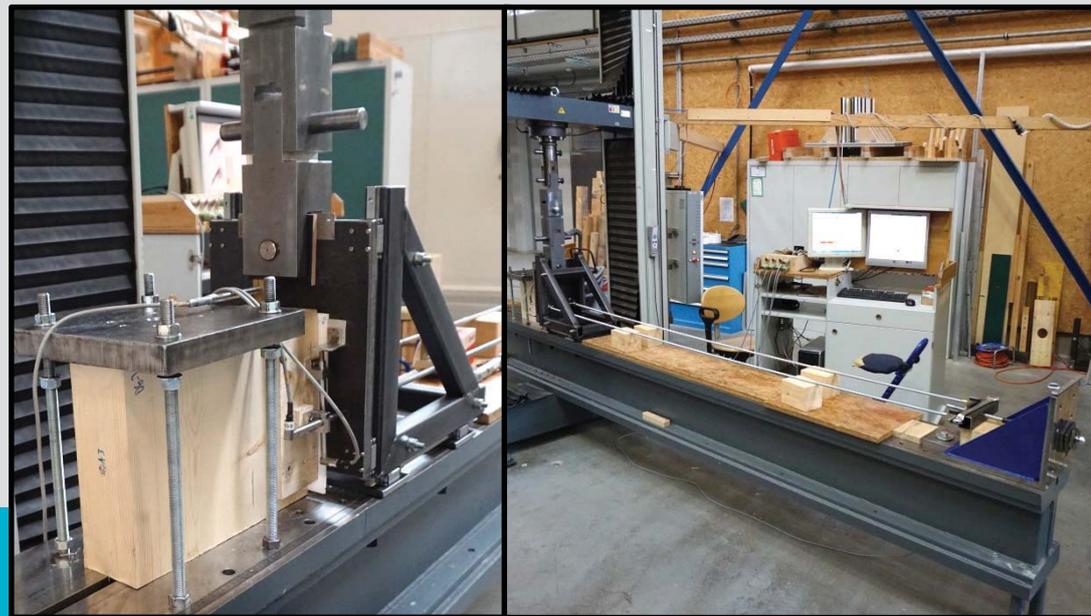


# Prüftechnische Untersuchung kombiniert beanspruchter selbstbohrender Holzschrauben

M-4-7/2016



**Thomas Markus LAGNER**  
Institut für Holzbau und Holztechnologie  
Technische Universität Graz





Thomas Markus LAGGNER, BSc

# **Prüftechnische Untersuchung kombiniert beanspruchter selbstbohrender Holzschrauben**

## **MASTERARBEIT**

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

Eingereicht an der  
**Technischen Universität Graz**

Betreuer

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

Dipl.-Ing. Georg FLATSCHER  
Institut für Holzbau und Holztechnologie

Graz, März 2016



# EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG AFFIDAVIT

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

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

---

Datum / Date

---

Unterschrift / Signature



# Danksagung

In den folgenden Zeilen möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die mich während meines Studiums und während der Entstehung dieser Masterarbeit begleitet, gefördert und motiviert haben.

Zu Beginn möchte ich mich bei den Mitarbeitern des Instituts für Holzbau und Holztechnologie, der holz.bau forschung gmbh und des Labors für konstruktiven Ingenieurbau bedanken. Sie haben mich bei den praktischen Arbeiten in der Werkstatt unterstützt und mich auch in einer Vielzahl von Gesprächen beraten und motiviert.

Des Weiteren geht mein Dank besonders an:

Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerhard Schickhofer, der mich mit seinen lehrreichen interessanten Vorträgen, sowie den persönlichen Gesprächen, noch mehr für den Holzbau begeistern konnte. Er gab mir die Chance zu meiner Tätigkeit als Studienassistent am Institut für Holzbau und Holztechnologie. Außerdem bekam ich von ihm die Möglichkeit der Durchführung dieser Masterarbeit.

Herrn Dipl.-Ing. Georg Flatscher, der mir das Thema dieser Arbeit vorschlug und mich mit viel Engagement erstklassig bei der Verfassung dieser Masterarbeit betreute. Er bot mir jederzeit ein offenes Ohr für meine Fragen und Anliegen und investierte immer die notwendige Zeit für die ausführliche Beantwortung dieser.

Herrn Dipl.-Ing. Manfred Augustin und Herrn Ing. Bernd Heissenberger, die mir mit ihren Erfahrung und wertvollen Hinweisen oft weitergeholfen haben.

Meine Studienkollegen und Freunde, Eva Virgolini, Hannes Glatz, Tanja Scherr, Rita Wolf und Darko Pejic mit denen ich eine lustige und sehr lehrreiche Zeit genießen durfte. Ohne sie hätte ich das Studium nicht in dieser kurzen Zeit und mit diesem Erfolg abschließen können.

Abschließend möchte ich meiner gesamten Familie danken. Sie ist mir eine verlässliche Stütze in meinem Leben und hat mich immer in meinen Entscheidungen unterstützt. Ohne sie wäre ich nicht der Mensch der ich bin. Besonderes nennen möchte ich:

Meine Eltern, Ingrid und Martin Laggner, die mir ein behütetes zu Hause gaben und das Studium ermöglichten. Sie taten viel mehr für mich als man in Worten beschreiben kann.

Meine Geschwister, Franziska, Peter und Florian Laggner, mit denen ich eine aufregende Kindheit genossen habe.

Die Eltern meiner Freundin, Sonja und Arthur Milowiz, ihre Geschwistern Michelle und Marcel Milowiz und ihren Großvater Johann Glantschnigg, die mich während der Zeit in Graz begleitet und gefördert haben.

Meine Freundin, Miriam Milowiz, der ich vor allem für ihre Geduld und den Rückhalt, den sie mir bedingungslos entgegen brachte, danken will. 🐭

**DANKE.**



# Kurzfassung

Selbstbohrende Holzschrauben zählen wegen ihrer hohen axialen Tragfähigkeit zu den wichtigsten Verbindungsmitteln im modernen Holzbau. Aufgrund von geometrischen Randbedingungen kann üblicherweise keine ausschließlich axiale Belastung erfolgen und es kommt zu einer Kombination aus axialer und lateraler Beanspruchung. Diese kombinierte Beanspruchung wurde bisher für selbstbohrende Schrauben nicht ausführlich untersucht. Deshalb wurden in dieser Arbeit mehrere Prüfserien durchgeführt, um das tatsächliche Lastverformungsverhalten zu klären. Für diesen Zweck musste eine neue Prüfkongfiguration entwickelt werden, die eine unabhängige Steuerung der einzelnen Kraftkomponenten erlaubt.

Mit den Prüfergebnissen wurde die laut Eurocode 5 gültige quadratische Interaktion der Tragfähigkeiten als konservatives Berechnungsmodell bestätigt. Des Weiteren konnten mittels nichtlinearer Regressionsanalyse besser passende Hochzahlen für die Interaktion gefunden werden. Bei der Untersuchung der Steifigkeiten von kombiniert belasteten Schrauben wurde beobachtet, dass es keine Beeinflussung zwischen lateraler und axialer Steifigkeit bei gleichzeitiger Belastung gibt. Deswegen ist es möglich, die Modellierung einer Schraube über zwei unabhängige Federn zu realisieren.

Durch die unabhängige Laststeuerung der einzelnen Kraftkomponenten wurde gezeigt, welchen Einfluss die Reihenfolge der Lastaufbringung (gleichzeitig oder hintereinander) auf die Tragfähigkeiten und Steifigkeiten hat.

# Abstract

Due to their high axial load carrying capacity, self-tapping screws are frequently used as fasteners in modern timber engineering. However, caused by geometrical boundary conditions, a pure axial loading of self-tapping screws is hardly given in most practical cases; usually a combination of axial and lateral loads has to be transmitted. Aiming to extent the limited knowledge regarding combined loaded self-tapping screws, an experimental campaign regarding this topic was conducted within the frame of the present thesis. For this purpose a new test configuration enabling a separate control of axial and lateral load components was developed.

The gathered test results principally confirm the quadratic interaction scheduled in Eurocode 5 as a conservative design model. Nevertheless, more suitable exponents for the interaction formula were determined by a nonlinear regression analysis. Furthermore, investigations regarding the elastic stiffness of combined loaded screws have shown that there is no decisive interaction between lateral and axial stiffness under a simultaneous load application. As a consequence, modelling of screws can be realized by two independent springs.

Caused by the independent load control of the two force components, the test results also enable to examine the influence of load application (simultaneous or sequential) to load carrying capacities and elastic stiffness values.



---

# Inhaltsverzeichnis

<b>KAPITEL 1: EINLEITUNG</b> .....	<b>1</b>
1-1 MOTIVATION.....	1
1-2 ZIEL DER ARBEIT .....	2
<b>KAPITEL 2: STAND DER TECHNIK</b> .....	<b>3</b>
2-1 SELBSTBOHRENDE HOLZSCHRAUBEN .....	3
2-1.1 Beanspruchung in Schraubenachse .....	6
2-1.1.1 Versagensmechanismen und Tragfähigkeiten .....	7
2-1.1.2 Steifigkeiten.....	12
2-1.2 Beanspruchung rechtwinklig zur Schraubenachse .....	14
2-1.2.1 Versagensmechanismen und Tragfähigkeiten .....	19
2-1.2.2 Steifigkeiten.....	24
2-1.3 Kombinierte Beanspruchung .....	25
2-1.3.1 Tragfähigkeiten.....	25
2-1.3.2 Steifigkeiten.....	27
2-2 PRÜFKONZEPTE - KOMBINIERT BEANSPRUCHUNG.....	28
2-3 RESÜMEE UND ERKENNTNIS.....	34
<b>KAPITEL 3: ENTWICKLUNG DER PRÜFANORDNUNG</b> .....	<b>35</b>
3-1 ALLGEMEINES ZU DEN VORVERSUCHEN .....	35
3-1.1 Versuchskörper.....	35
3-1.2 Stahlblech und Gewindestangen.....	36
3-1.3 Selbstbohrende Holzschrauben.....	36
3-2 VERSUCHSKONFIGURATION 1 .....	37
3-2.1 Vorversuch V01.....	38
3-2.2 Vorversuch V02.....	39
3-2.3 Vorversuch V03.....	41
3-2.4 Zusammenfassung und Beurteilung Versuchskonfiguration 1 .....	42
3-3 VERSUCHSKONFIGURATION 2 .....	43
3-3.1 Vorversuche V10, V11 und V13 .....	43
3-3.2 Vorversuch V12.....	45
3-3.3 Vorversuch V14.....	46

---

3-3.4	Vorversuch V15 .....	48
3-3.5	Vorversuche V16, V17, V18 und V19 .....	50
3-3.6	Vorversuche V20 und V25 .....	52
3-3.7	Vorversuche V21, V22 und V27 .....	53
3-3.8	Vorversuche V23, V24 und V26 .....	53
3-3.9	Zusammenfassung und Beurteilung Versuchskonfiguration 2 .....	55
3-4	PRÜFKONFIGURATION .....	56
<b>KAPITEL 4: PRÜFUNGEN .....</b>		<b>59</b>
4-1	MATERIAL .....	59
4-1.1	Prüfkörper .....	59
4-1.2	Selbstbohrende Holzschrauben .....	61
4-2	PRÜFSERIEN .....	63
4-3	PRÜFDURCHFÜHRUNG .....	64
<b>KAPITEL 5: ERGEBNISSE UND DISKUSSION .....</b>		<b>67</b>
5-1	AUSWERTUNG .....	67
5-1.1	Tragfähigkeit .....	67
5-1.2	Steifigkeit .....	67
5-1.3	Beurteilung der Messergebnisse .....	68
5-2	TRAGFÄHIGKEITEN .....	68
5-2.1	Rechnerische Abschätzung der Tragfähigkeiten .....	68
5-2.1.1	Tragfähigkeit bei ausschließlich axialer Beanspruchung .....	69
5-2.1.2	Tragfähigkeit bei ausschließlich lateraler Beanspruchung .....	69
5-2.1.3	Tragfähigkeiten bei kombinierter Beanspruchung .....	70
5-2.2	Prüftechnisch ermittelte Tragfähigkeiten .....	70
5-2.2.1	Tragfähigkeit bei ausschließlich axialer Beanspruchung .....	70
5-2.2.2	Tragfähigkeit bei ausschließlich lateraler Beanspruchung .....	71
5-2.2.3	Tragfähigkeiten bei kombinierter Beanspruchung .....	71
5-3	STEIFIGKEITEN .....	78
5-3.1	Rechnerische Abschätzung der Steifigkeiten .....	78
5-3.1.1	Steifigkeit bei ausschließlich axialer Beanspruchung .....	78
5-3.1.2	Steifigkeit bei ausschließlich lateraler Beanspruchung .....	79
5-3.2	Prüftechnisch ermittelte Steifigkeiten .....	79
5-3.2.1	Steifigkeit bei ausschließlich axialer Beanspruchung .....	79

---

5-3.2.2	Steifigkeit bei ausschließlich lateraler Beanspruchung .....	80
5-3.2.3	Steifigkeit bei kombinierter Beanspruchung .....	80
<b>KAPITEL 6: ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....</b>		<b>89</b>
6-1	ZUSAMMENFASSUNG .....	89
6-1.1	Prüfkonfiguration .....	89
6-1.2	Tragfähigkeit .....	91
6-1.3	Steifigkeit .....	92
6-2	AUSBLICK .....	94
<b>ANHANG A VERZEICHNISSE .....</b>		<b>I</b>
A-1	Literaturverzeichnis .....	I
A-2	Abbildungsverzeichnis .....	IV
A-3	Tabellenverzeichnis .....	VII
<b>ANHANG B ROHDICHTEN UND HOLZFEUCHTEN .....</b>		<b>I</b>
<b>ANHANG C TRAGFÄHIGKEITEN UND STEIFIGKEITEN.....</b>		<b>I</b>
<b>ANHANG D KRAFT-VERSCHIEBUNGS-DIAGRAMME DER PRÜFSERIEN.....</b>		<b>I</b>



# KAPITEL 1: EINLEITUNG

## 1-1 MOTIVATION

---

Durch die umfangreichen Untersuchungen von selbstbohrenden Holzschrauben sind die axialen Eigenschaften weitestgehend bekannt. Demzufolge findet man auch in der Literatur und den technischen Regelwerken ausgereifte Rechenmodelle für diese Art der Beanspruchung.

Für die Berechnung der Tragfähigkeit im rechten Winkel zur Schraubenachse (= lateral) wird üblicherweise ein modifiziertes Berechnungsmodell nach Johansen [14] laut ÖNORM EN 1995-1-1 [25] verwendet. Da dieses Modell eigentlich auf Untersuchungen von Stabdübeln beruht und die Größe des Seileffekts mit Erfahrungswerten aus Prüfungen abgeschätzt wird, ist zu erwarten, dass die Vorhersagegenauigkeit nicht so hoch ist, wie bei den eigens für Schrauben ermittelten Modellen der axialen Tragfähigkeit.

Prinzipiell wird versucht, aufgrund der größeren axialen Tragfähigkeit, selbstbohrende Holzschrauben hauptsächlich in axialer Richtung zu beanspruchen. Aus geometrischen Gründen ist jedoch meist eine ausschließlich axiale Belastung nicht möglich. Daher kommt es zur kombinierten Belastung aus Abscheren und Herausziehen. Hinsichtlich der Steifigkeiten und Tragfähigkeiten bei einer kombinierten Beanspruchung findet man für selbstbohrende Holzschrauben jedoch nur wenige Literaturquellen.

Die ÖNORM EN 1995-1-1 [25] sieht eine quadratische Interaktion der jeweiligen Tragfähigkeiten vor, welche ursprünglich von Ehlbeck & Siebert [10] für Nägel definiert wurde. Andere Quellen wie Blaß et al. [4] beschrieben diese Interaktion allerdings als konservativ, weswegen eine Klärung des genauen Verhaltens notwendig wäre; vergleiche Blaß et al. [4].

Bei Laschenstößen mit einer Schraubenneigung von  $45^\circ$  werden in der Literatur die Eigenschaften auf Abscheren vernachlässigt. Begründen lässt sich dies mit dem Vergleich der axialen Steifigkeit von Schrauben mit der lateralen Steifigkeit. Bei lateralen Belastungen kommt es zu einem viel verformungsfreudigeren (weichen) Verhalten, das eine Versagensankündigung bietet.

Laut Gehri [12] kann über den Winkel zwischen Kraftrichtung und Schraubenachse der Verlauf der Last-Verschiebungskurve gezielt beeinflusst werden, sodass ein möglichst gutmütiges Verhalten erreicht wird. Abbildung 1.1 stellt die Ergebnisse seiner Untersuchungen an einem Laschenstoß bei unterschiedlich schräg eingedrehten Schrauben dar.

Die aufgezählten Eckdaten zeigen, dass es viele interessante noch zu klärende Punkte bei kombinierten Beanspruchungen von Schrauben gibt.

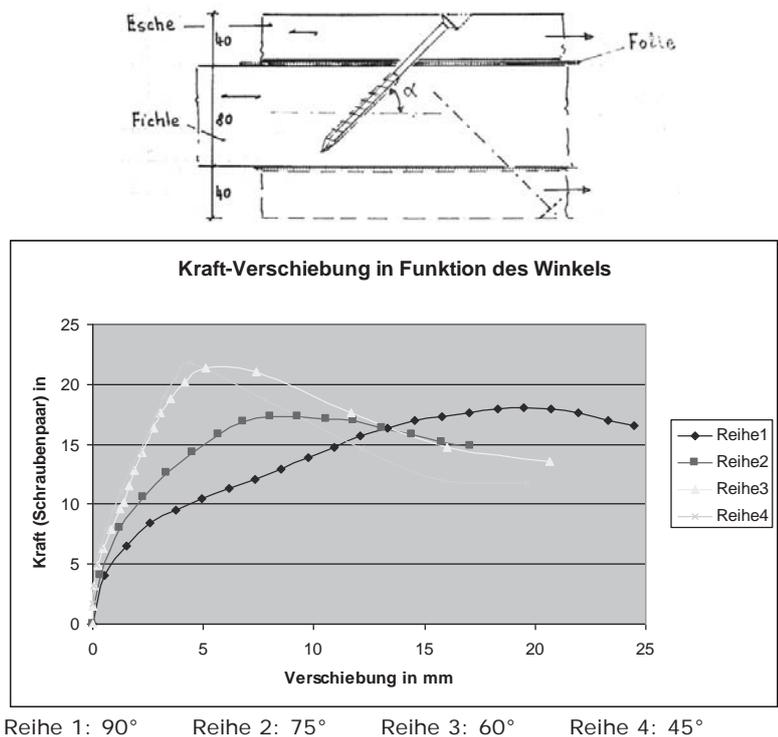


Abbildung 1.1: Einfluss Schrauben-Kraft-Winkel auf Last-Verformungsverhalten bei Laschenstoß [12]

## 1-2 ZIEL DER ARBEIT

Das Ziel dieser Arbeit ist es, auf Basis von systematisch durchgeführten Prüfungen, die prinzipiellen Zusammenhänge von kombiniert beanspruchten selbstbohrenden Holzschrauben zu analysieren und darzustellen.

Hierzu zählt auch ein möglicher Einfluss von der Reihenfolge der Lastaufbringung auf die Tragfähigkeiten und Steifigkeiten. Um dies untersuchen zu können, muss die Prüfkongfiguration es ermöglichen, die einzelnen Lastkomponenten (axial und lateral) unabhängig voneinander zu steuern.

Im Allgemeinen gibt es für kombinierte Beanspruchungen keine standardisierte Versuchsanordnung. Meist wird bei den Prüfanordnungen von anderen Forschern die kombinierte Belastung durch die Schiefstellung eines Prüfkörpers in einer Zugprüfmaschine erreicht. Dabei sind jedoch die beiden Kraftkomponenten über den Winkel voneinander abhängig und nicht getrennt steuerbar. Deswegen ist es notwendig, eine neue Prüfkongfiguration zu entwickeln, die alle gewünschten Anforderungen erfüllt.

Als Ergebnis dieser Arbeit soll das in der ÖNORMEN 1995-1-1 [25] verankerte quadratische Interaktionsmodell mittels Prüfungsergebnissen beurteilt werden.

Neben der Tragfähigkeit liegt ein Hauptaugenmerk dieser Arbeit auch am Parameter Steifigkeit. Dies gilt sowohl für die Interaktion zwischen axialer und lateraler Steifigkeit, aber auch für eine mögliche Modellierung einer Schraube bei einer kombinierten Beanspruchung.

## KAPITEL 2: STAND DER TECHNIK

### 2-1 SELBSTBOHRENDE HOLZSCHRAUBEN

---

[3], [7], [8], [25], [29], [31], [32], [34]

Selbstbohrende Holzschrauben werden zur mechanischen Verbindung von Holz-Holz- oder Holz-Stahl-Anschlüssen eingesetzt und sind über herstellerspezifische technische Zulassungen geregelt. Sie haben im Gegensatz zu Stabdübeln oder den Schrauben nach DIN 571 den großen Vorteil, dass kein Vorbohren mehr notwendig ist, was wiederum einen sehr wirtschaftlichen Einsatz ermöglicht. Deshalb und durch die vielseitigen Einsatzmöglichkeiten ist die selbstbohrende Holzschraube aus dem modernen Ingenieurholzbau nicht mehr wegzudenken.

Eine selbstbohrende Holzschraube besteht aus der Schraubenspitze, einem Gewindeteil, einem Schaft sowie dem Schraubenkopf (siehe Abbildung 2.1). Zurzeit gibt es zu jedem der vier angeführten Schraubenteile die verschiedensten Ausbildungsformen. Dies hängt mit der vielseitigen Anwendung und dem für unterschiedliche Einsatzzwecke beziehungsweise Systeme optimierten Aufbau der Schraube zusammen. Prinzipiell werden Vollgewindeschrauben (Gewinde von der Schraubenspitze bis zum Schraubenkopf => Schaft entfällt) und Teilgewindeschrauben (Gewinde nur über einen Teil der Gesamtlänge) gefertigt.

Bei der Schraubenherstellung wird zuerst eine Passivierung als Korrosionsschutz der Schraube und anschließend eine Gleitbeschichtung (Wachs, Polymere, Silikon) zur Reibungsverminderung beim Eindrehen aufgebracht. Zur weiteren Reduktion des benötigten Eindrehmoments werden Schrauben häufig mittels Bohrspitze, Schneidengewinde, Verdichter oder Reibschaft zwischen Gewindeteil und Schaft ausgeführt. Außerdem verringern diese Elemente auch die Gefahr des Spaltens beim Eindrehen. Heutzutage sind Schrauben mit einem Durchmesser bis 14 mm und mit Längen bis 1500 mm ohne Probleme herstellbar.

Die Abmessungen einer Schraube (siehe Abbildung 2.1) sind gekennzeichnet durch den Nenndurchmesser  $d$  (= Gewindeaußendurchmesser), den Kerndurchmesser  $d_c$ , den Schaftdurchmesser  $d_s$ , den Kopfdurchmesser  $d_h$ , die Schraubengesamtlänge  $L$  und die effektive Schraubenlänge  $L_{ef}$ . Weitere wichtige Parameter für das Gewinde sind Gewindeganghöhe, Flankenform und Flankenneigung. Das Verhältnis von Kerndurchmesser der Schraube  $d_c$  zu Nenndurchmesser  $d$  liegt bei selbstbohrenden Holzschrauben zwischen 0,6 und 0,9.

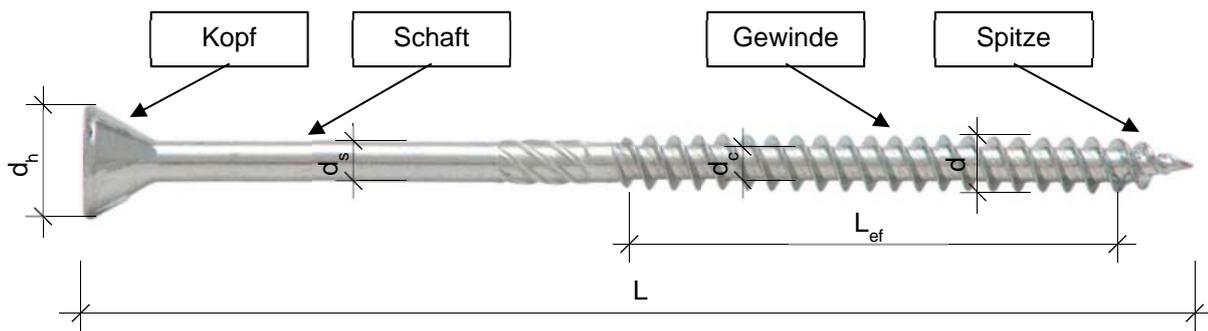


Abbildung 2.1: Aufbau - Selbstbohrende Holzschraube [1]

Bei Holzschrauben nach DIN 571 ist aufgrund des eingeschnittenen Gewindes der Schaftdurchmesser gleich dem Gewindeaußendurchmesser (= Nenndurchmesser). Im Gegensatz dazu ist bei selbstbohrenden Holzschrauben das Gewinde aufgerollt und daher ist der Schaftdurchmesser kleiner als der Nenndurchmesser (siehe Abbildung 2.1). Um höhere Stahlfestigkeiten zu erhalten, werden die selbstbohrenden Holzschrauben nach dem Aufrollen des Gewindes gehärtet.

Die Einsatzgebiete von selbstbohrenden Holzschrauben kann man laut Ringhofer et al. [31] prinzipiell in zwei unterschiedliche Gruppen aufteilen: in „aktive“ und „passive“ Anwendungen. Unter „aktiver“ Anwendung versteht man, dass die Schraube die Aufgabe des „Verbindens“ von mehreren Bauteilen hat und so die Kraft von einem Bauteil ins andere leitet. In diese Gruppe gehören unter anderem Normalkraftverbindungen wie Fachwerksknoten, Querkraftverbindungen (Haupt-Nebenträger-Anschlüsse), Momentenverbindungen (eher noch selten) oder Verbindungslinien in der Holz-Massivbauweise mit Brettsperrholz. Zu den „passiven“ Anwendungen zählen sämtliche Verschraubungen, welche den Zweck haben das Tragverhalten eines Bauteiles zu verbessern beziehungsweise über den Nutzungszeitraum zu erhalten. Hierzu gehören beispielsweise Querdrukverstärkungen (Auflager), Querkzugverstärkungen (Ausklinkungen, Durchbrüche, Firstpunkte), Schubverstärkungen und Verstärkungen von primär auf Abscheren beanspruchten Verbindungen (Stabdübel- bzw. Bolzenverbindungen).

Eine andere Unterteilung kann nach der Beanspruchungsrichtung in axial, lateral oder kombiniert beanspruchte Schrauben getroffen werden. Aufgrund der hohen Steifigkeit und Tragfähigkeit im Vergleich mit den Eigenschaften senkrecht zur Schraubenachse, ist die primäre Belastungsrichtung von selbstbohrenden Schrauben axial auf Herausziehen oder Hineindrücken. Eine ausschließlich axiale Belastung ist allerdings wegen geometrischen Randbedingungen nur selten möglich. Daher kommt es in den meisten Fällen zu einer kombinierten Beanspruchung der Schraube (axial und lateral zugleich).

Ein Beispiel dafür ist der Laschenstoß, wie er in Abbildung 2.2 dargestellt ist, wobei häufig in den Berechnungsmodellen der rechtwinklig zur Schraubenachse wirkende Scherwiderstand vernachlässigt wird. Diese Vorgehensweise ist meist wegen des geringen Einflusses möglich, aber bei Winkeln  $> 60^\circ$  kommt es, wie in Abbildung 1.1 gezeigt, zur Tragfähigkeitsreduktion.



[15]

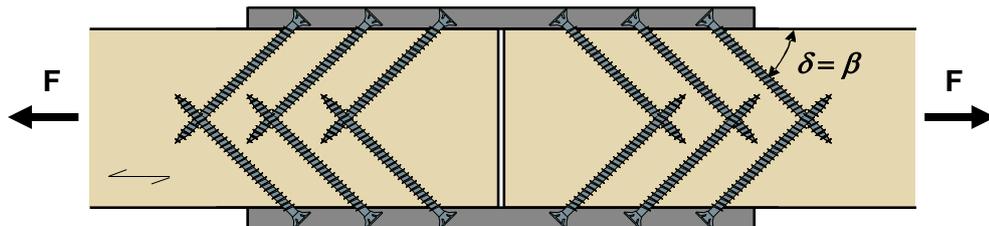


Abbildung 2.2: Laschenstoß mit geneigten Schrauben

Ein anderer Anwendungsfall bei dem es zu einer kombinierten Beanspruchung der Schraube kommt ist das in Abbildung 2.3 (links unten: Schrägzug) dargestellte Transportankersystem. Durch die Neigung der Schraube in Lasttrichtung (Abbildung 2.3 rechts unten: Axialzug) kann die maximale Tragfähigkeit dieses Hebeseystems noch gesteigert werden, wobei auf die geforderten geometrischen Randbedingungen zu achten ist. Abbildung 2.3 oben zeigt den möglichen Einsatz des Transportankers mit Einfräsung.

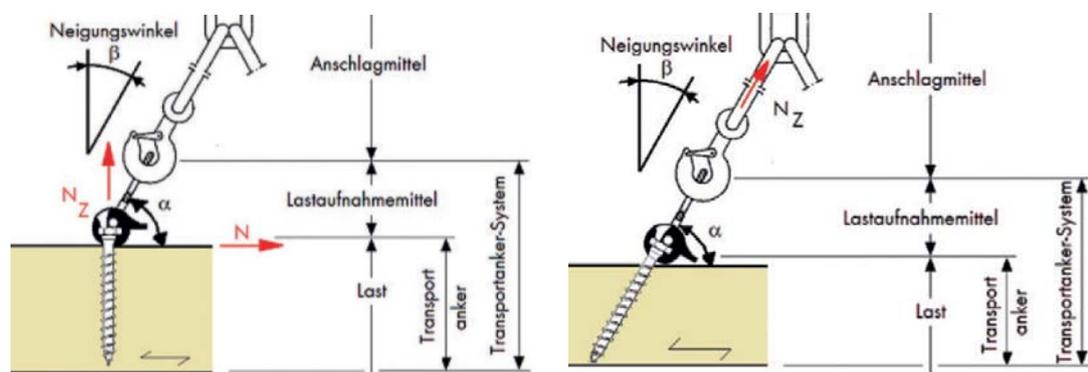


Abbildung 2.3: Transportanker [2]

## 2-1.1 BEANSPRUCHUNG IN SCHRAUBENACHSE

[7], [8], [25], [34]

Selbstbohrende Holzschrauben werden aufgrund ihrer hohen axialen Tragfähigkeit häufig in modernen Holzbauten eingesetzt. Um das hohe Tragvermögen der Schrauben auch nutzen zu können, ist jedoch die Einhaltung der technischen Regeln notwendig.

### Mindestabstände

Um das Blockscheren und das Aufspalten infolge von Querkzug aufgrund des Eindrehens ohne vorbohren zu verhindern, sind für die Bemessung und Konstruktion von Schraubverbindungen Mindestabstände notwendig.

In Abbildung 2.4 wird dargestellt, welche verschiedenen Mindestabstände in Anlehnung an ÖNORM EN 1995-1-1 [25] eingehalten werden müssen. Die Mindestabstände  $a_1$  und  $a_2$  werden immer im rechten Winkel zur Schraubenachse zwischen zwei Schrauben gemessen, wobei  $a_1$  den Abstand in Faserrichtung und  $a_2$  den Abstand rechtwinklig zur Faserrichtung beschreibt. Zusätzlich zu den Abständen untereinander sind auch die Mindestabstände  $a_{1,c}$  vom Schwerpunkt des Schraubengewindes im Bauteil zum Hirnholzende und  $a_{2,c}$  vom Schwerpunkt des Schraubengewindes im Bauteil zum Rand nachzuweisen. Bei axial beanspruchten Schrauben wird kein Unterschied zwischen beanspruchtem und nicht beanspruchtem Hirnholz beziehungsweise Rand gemacht. Dies gilt nicht für auf Abscheren oder kombiniert beanspruchte Schrauben.

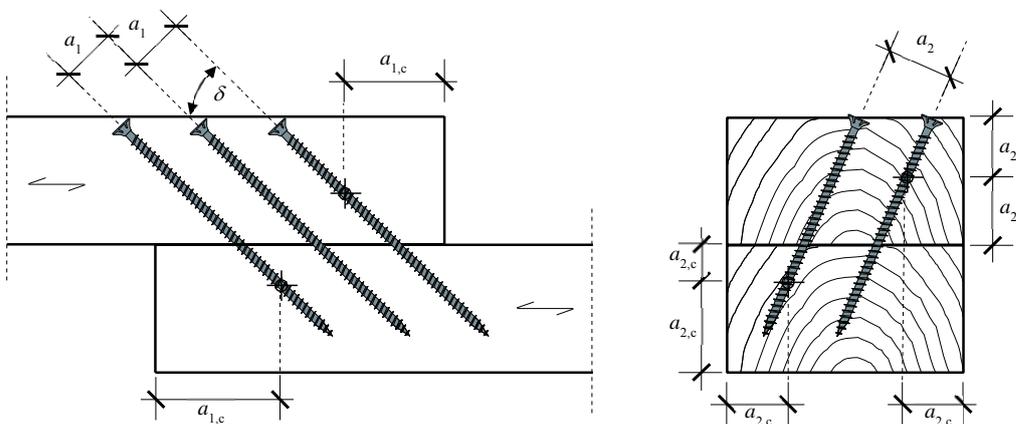


Abbildung 2.4: Mindestabstände geneigter Schrauben in Anlehnung an [25]

Die Tabelle 2.1 zeigt die laut ÖNORM EN 1995-1-1 [25] geforderten Mindestabstände und vergleicht diese mit den Mindestabständen aus Zulassungen von drei verschiedenen Schraubenherstellern. Aus dem Vergleich der geforderten Abstände erkennt man, dass der Eurocode 5 prinzipiell eher konservative Werte liefert und keine flächenbezogene Zusatzregel eingehalten werden muss. Außerdem ist es auffällig, dass der Abstand  $a_{1,c}$  in den Zulassungen um die Hälfte verringert wurde.

**Tabelle 2.1: Mindestabstände für axial beanspruchte Schrauben**

	$a_1$	$a_2$	$a_{1,c}$	$a_{2,c}$	sonstige Regel
<b>ÖNORM EN 1995-1-1 [25]</b>	7 d	5 d	10 d	4 d	
<b>ETA-11-0190 [8]</b>	5 d	2,5 d	5 d	3 d	$a_1 a_2 \leq 25 d^2$
<b>ETA-12-0132 [6]</b>	5 d	2,5 d	5 d	4 d	$a_1 a_2 \leq 25 d^2$
<b>Z-9.1-656 [7]</b>	5 d	2,5 d	5 d	4 d	$a_1 a_2 \leq 25 d^2$

### **Gruppenwirkung – effektive Verbindungsmittelanzahl $n_{ef}$**

Aufgrund von unvermeidbaren Ungenauigkeiten (Fertigungstoleranzen, geometrische Toleranzen, u.a.) kommt es zu einer ungleichmäßigen Beanspruchung von einzelnen Verbindungsmitteln in einer Gruppe. Daher entspricht der Widerstand der Gruppe nicht der Summe der einzelnen Verbindungsmittelwiderstände. Prinzipiell sind die Berechnungsmodelle für ein Verbindungsmittel ausgelegt und um auf die Tragfähigkeit der Verbindung schließen zu können, erfolgt eine Multiplikation mit der effektiven Verbindungsmittelanzahl  $n_{ef}$ . Die effektive Verbindungsmittelanzahl  $n_{ef}$  wird nach ÖNORM EN 1995-1-1 [25] für auf herausziehen beanspruchte Schrauben mit Formel (2.1) berechnet.

$$n_{ef} = n^{0,9} \quad (2.1)$$

Für schräg eingedrehte Schrauben mit einem Winkel  $30^\circ \leq \varepsilon \leq 60^\circ$  zwischen Schraubenachse und Scherfuge ist laut ETA-11/0190 [8] die Ermittlung der effektiven Verbindungsmittelanzahl  $n_{ef}$  nach Formel (2.2) zu ermitteln.

$$n_{ef} = \max \left\{ \begin{array}{l} 0,9 \cdot n \\ n^{0,9} \end{array} \right\} \quad (2.2)$$

## 2-1.1.1 Versagensmechanismen und Tragfähigkeiten

[3], [7], [8], [25], [34]

Bei axial beanspruchten selbstbohrenden Holzschrauben sind folgende verschiedene Versagensmodi möglich:

- Stahlbruch – Versagen der Schraube
- Ausziehversagen des eingedrehten Gewindeteils – Versagen des Holzes im Bereich der Schraube
- Knickversagen bei druckbelasteten Schrauben – Versagen der Schraube aufgrund ihrer Schlankheit
- Kopfdurchziehen – Versagen des Holzes
- Blockscheren – Versagen des Holzes

### Stahlbruch – Zugtragfähigkeit der Schraube

Bei selbstbohrenden Holzschrauben ist in Abhängigkeit von der Holzrohddichte und der Härting der Schrauben ab einer Einschraubtiefe von rund  $20 \cdot d$  mit einem Versagen des Stahls zu rechnen [3]. Kommt es zu diesem Versagensmodus, ist die größtmögliche Ausnutzung der Schraube erreicht. Aus diesem Grund bringt eine Vergrößerung der Eindrehtiefe keine Tragfähigkeitssteigerung und deshalb werden Schrauben mit deutlich größeren Längen meist als Verstärkungen von Verbindungen oder des Holzes (passive Maßnahmen) eingesetzt.

Beim Stahlbruch handelt es sich um ein reines Stahlversagen. Laut ETA-11/0190 [8] ist jedoch für die Bemessung einer auf Druck beanspruchten Schraube maximal nur die Tragfähigkeit beim Erreichen der Streckgrenze anzusetzen. Die Berechnung des Widerstandes einer Schraubverbindung auf Stahlbruch nach ÖNORM EN 1995-1-1 [25] errechnet sich mittels folgender Formel (2.3).

$$F_{t,Rk} = n_{ef} \cdot f_{tens,k} \quad (2.3)$$

- $F_{t,Rk}$  charakteristische Zugtragfähigkeit der Verbindung
- $f_{tens,k}$  charakteristischer Zugwiderstand der Schraube nach ÖNORM EN 14592 [24]
- $n_{ef}$  wirksame Verbindungsmittellanzahl aufgrund der Gruppenwirkung

### Ausziehtragfähigkeit

Bei diesem Versagensmodus kommt es zu einem Schub- beziehungsweise Scherversagen des Holzes im Bereich der Schraube. Jedoch ist die Form des Bruches abhängig vom Winkel zwischen Schraubenachse und Faserrichtung. Das idente Versagensbild kann auch beim Hineindrücken der Schrauben ins Holz auftreten. Aus diesem Grund wird die Tragfähigkeit gegen Hineindrücken ident zur Ausziehtragfähigkeit berechnet.

Nach der ÖNORM EN 1995-1-1 [25] kann die Ausziehtragfähigkeit für Durchmesser  $\geq 6$  mm bzw.  $\leq 12$  mm und einem Verhältnis  $d_c/d$  im Bereich von 0,6 bis 0,75 nach Formel (2.4) ermittelt werden. Die geforderten Randbedingungen werden bei selbstbohrenden Holzschrauben so gut wie immer eingehalten.

$$F_{ax,\alpha,Rk} = \frac{n_{ef} \cdot f_{ax,k} \cdot d \cdot l_{ef} \cdot k_d}{1,2 \cdot \cos^2 \delta + \sin^2 \delta} \quad (2.4)$$

mit:  $f_{ax,k} = 0,52 \cdot d^{-0,5} \cdot l_{ef}^{-0,1} \cdot \rho_k^{0,8}$        $k_d = \min \{ d/8; 1,0 \}$

- $F_{ax,\alpha,Rk}$  charakteristische Ausziehtragfähigkeit einer Schraubengruppe unter einem Winkel  $\delta$  zwischen Faserrichtung und Schraubenachse
- $f_{ax,k}$  charakteristischer Ausziehparameter rechtwinklig zur Faserrichtung
- $d$  Gewindeaußendurchmesser in [mm]
- $l_{ef}$  Einbindtiefe der Schraube im Holzbauteil [mm]
- $k_d$  Korrekturfaktor für den Einfluss des Durchmessers

- $\rho_k$  charakteristischer Wert der Rohdichte in  $[\text{kg}/\text{m}^3]$
- $\delta$  Winkel zwischen Faserrichtung und Schraubenachse  $\delta \geq 30^\circ$
- $n_{ef}$  wirksame Verbindungsmittellanzahl aufgrund der Gruppenwirkung

In der ETA-11/0190 [8] ist das Berechnungsmodell laut Formel (2.5) verankert. Hier sind die Ausziehparameter  $f_{ax,k}$  für verschiedene Randbedingungen (z.B. Schraubentyp, Schraubendurchmesser) in Versuchen nach ÖNORM EN 1382 [21] bestimmt worden und in der Zulassung festgeschrieben.

$$F_{ax,\alpha,Rk} = n_{ef} \cdot k_{ax} \cdot f_{ax,k} \cdot d \cdot l_{ef} \cdot \left( \frac{\rho_k}{350} \right)^{0,8} \quad (2.5)$$

mit:

$$k_{ax} = 1,0 \quad 45^\circ \leq \delta \leq 90^\circ$$
$$k_{ax} = 0,3 + \frac{0,7 \cdot \delta}{45^\circ} \quad 0^\circ \leq \delta < 45^\circ$$

- $F_{ax,\alpha,Rk}$  charakteristische Ausziehtragfähigkeit einer Schraubengruppe unter Winkel  $\delta$  zwischen Faserrichtung und Schraubenachse
- $f_{ax,k}$  charakteristischer Ausziehparameter bei  $\rho_k = 350 \text{ kg}/\text{m}^3$
- $d$  Gewindeaußendurchmesser in  $[\text{mm}]$
- $l_{ef}$  Einbindetiefe der Schraube im Holzbauteil  $[\text{mm}]$
- $k_{ax}$  Korrekturfaktor für den Winkel  $\delta$  zwischen Faserrichtung und Schraubenachse
- $\rho_k$  charakteristischer Wert der Rohdichte in  $[\text{kg}/\text{m}^3]$
- $n_{ef}$  wirksame Verbindungsmittellanzahl aufgrund der Gruppenwirkung

### **Knickversagen bei druckbelasteten Schrauben**

Die Abbildung 2.5 zeigt das Knickversagen der Schrauben aufgrund ihrer großen Schlankheit.



**Abbildung 2.5: Knickversagen bei Druckbelasteten Schrauben [34]**

Im Allgemeinen wird die Tragfähigkeit einer druckbeanspruchten Schraube aus dem Minimum von Tragfähigkeit gegen Hineindrücken, der Stahltragfähigkeit und der Knicklast berechnet. Die Tragfähigkeit gegen Hineindrücken kann ident zur Ausziehtragfähigkeit ermittelt werden.

Die ÖNORM EN 1995-1-1 [25] gibt kein Modell zur Ermittlung der Knicklast vor. Im Gegensatz dazu stellt die ETA-11/0190 [8] die folgende Berechnungsmethode zur Ermittlung der Knicklast, welche mit Hilfe eines Abminderungsbeiwertes (Knickbeiwert) arbeitet, zur Verfügung. Die Stahltragfähigkeit auf Druck wird, wie zuvor beschrieben, auf die Tragfähigkeit beim Erreichen der Streckgrenze limitiert.

$$N_{pl,Rk} = \frac{\pi \cdot d_c^2}{4} \cdot f_{y,k} \quad (2.6)$$

$$N_{pl,Rd} = \frac{N_{pl,k}}{\gamma_{M1}} \quad (2.7)$$

$N_{pl,Rk}$  charakteristischer Wert der plastischen Normalkrafttragfähigkeit

$N_{pl,Rd}$  Bemessungswert der plastischen Normalkrafttragfähigkeit

$d_c$  Gewindekerndurchmesser in [mm]

$f_{y,k}$  charakteristischer Wert der Streckgrenze in [N/mm<sup>2</sup>]

$\gamma_{M1}$  Teilsicherheitsfaktor nach EN 1993-1-1:  $\gamma_{M1} = 1,0$

$$N_{ki,k} = \sqrt{c_h \cdot E_s \cdot I_s} \quad (2.8)$$

$$\text{mit: } c_h = (0,19 + 0,012 \cdot d) \cdot \rho_k \cdot \left( \frac{90^\circ + \delta}{180^\circ} \right) \quad I_s = \frac{\pi \cdot d_c^4}{64}$$

$N_{ki,k}$  charakteristische ideal-elastische Knicklast

$E_s$  Elastizitätsmodul des Stahls  $E_s = 210.000 \text{ N/mm}^2$

$I_s$  Flächenträgheitsmoment [mm<sup>4</sup>]

$d$  Gewindeaußendurchmesser in [mm]

$\delta$  Winkel zwischen Faserrichtung und Schraubenachse  $30^\circ \leq \delta \leq 90^\circ$

$\rho_k$  charakteristischer Wert der Rohdichte in [kg/m<sup>3</sup>]

$$\bar{\lambda}_k = \sqrt{\frac{N_{pl,Rk}}{N_{ki,k}}} \quad (2.9)$$

$$k = 0,5 \cdot \left( 1 + 0,49 \cdot (\bar{\lambda}_k - 0,2) + \bar{\lambda}_k^2 \right) \quad (2.10)$$

$\bar{\lambda}_k$  bezogener Schlankheitsgrad

$$\kappa_c = 1,0 \quad \bar{\lambda}_k \leq 0,2$$

$$\kappa_c = \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \bar{\lambda}_k^2}} \quad \bar{\lambda}_k > 0,2 \quad (2.11)$$

$\kappa_c$  Knickbeiwert

$$F_{b,Rd} = n_{ef} \cdot \kappa_c \cdot N_{pl,Rd} \quad (2.12)$$

$F_{b,Rd}$  Bemessungsknicklast der Schraubengruppe

$n_{ef}$  wirksame Verbindungsmittellanzahl aufgrund der Gruppenwirkung

### Kopfdurchziehtragfähigkeit

Allgemein ist der Versagensmodus Kopfdurchziehen nur bei Holz-Holz-Verbindungen relevant, da bei Stahlblech-Holz-Verbindungen kein lokales Versagen des Stahlbleches zu erwarten ist.

Nach ÖNORM EN 1995-1-1 [25] wird die Kopfdurchziehtragfähigkeit nach Formel (2.13) berechnet.

$$F_{head,Rk} = n_{ef} \cdot f_{head,k} \cdot d_h^2 \cdot \left( \frac{\rho_k}{\rho_a} \right)^{0,8} \quad (2.13)$$

$F_{head,Rk}$  charakteristischer Durzieh Widerstand unter einem Winkel  $\delta \geq 30^\circ$  zur Faser

$f_{head,k}$  charakteristischer Kopfdurchziehparameter

$d_h$  Durchmesser des Schraubenkopfes

$\rho_k$  charakteristischer Wert der Rohdichte in [kg/m<sup>3</sup>]

$\rho_a$  zugehörige Rohdichte nach ÖNORM EN 14592 [24] in [kg/m<sup>3</sup>]

$n_{ef}$  wirksame Verbindungsmittellanzahl aufgrund der Gruppenwirkung

Die Kopfdurchziehparameter können mittels Versuchen nach ÖNORM EN 1383 [22] je nach Schraubentyp ermittelt werden oder aus den herstellerspezifischen europäisch technischen Zulassungen für bestimmte Holzwerkstoffe, Mindestdicken und Maximalrohdsichten entnommen werden.

### Blockscheren

Dieser Versagensmechanismus kann bei einer Gruppe von Verbindungsmitteln, die nahe aneinander angeordnet sind, auftreten. Abbildung 2.11 zeigt das Blockscheren von einer Schraubengruppe, die rechtwinklig zur Faser eingedreht ist. Grund für dieses Versagen ist eine Überschreitung der Querkraft- und / oder der Schubfestigkeit des Holzes. Um dieses spröde ungewollte Holzversagen zu verhindern, sind die laut Normen oder Zulassungen geforderten Mindestabstände einzuhalten.



Abbildung 2.6: Blockscherversagen von axial beanspruchten Schrauben [16]

### 2-1.1.2 Steifigkeiten

[4], [8], [33], [36]

Der Verschiebungsmodul  $K_{ser}$  einer axial beanspruchten selbstbohrenden Holzschraube kann laut Blaß et al. [4] für einen Schrauben-Faser-Winkel von  $90^\circ$  nach Formel (2.14) ermittelt werden. Trotz 799 Prüfungen konnte Blaß et al. [4] für kleinere Winkel als  $90^\circ$  keine Gleichung durch eine multiple Regressionsanalyse bestimmen. Er begründet das damit, dass einige traglastrelevante Parameter nicht ausreichend variiert wurden.

Des Weiteren warnt Blaß et al. [4] vor der Verwendung dieser Formel für Schrauben anderer Hersteller beziehungsweise für nicht geprüfte Durchmesser (geprüfte Durchmesser: 6 mm, 7.5 mm, 8 mm, 10 mm und 12 mm).

$$K_{ser} = 234 \cdot (\rho \cdot d)^{0,2} \cdot l_{ef}^{0,4} \quad (2.14)$$

- $K_{ser}$  Verschiebungsmodul [N/mm]
- $d$  Nenndurchmesser der Schraube [mm]
- $\rho$  Rohdichte des Holzes in [kg/m<sup>3</sup>]
- $l_{ef}$  Einbindetiefe der Schraube im Holzbauteil [mm]

Die ETA-11/0190 [8] verwendet für alle Winkel zwischen Schraube und Faser eine modifizierte Form des von Blaß et al. [4] veröffentlichten Modells, in dem eine Rohdichte von rund 410 kg/m<sup>3</sup> unabhängig von der Holzart (Rohdichte) festgesetzt wird (siehe Formel (2.15)).

$$K_{ser} = 780 \cdot d^{0,2} \cdot l_{ef}^{0,4} \quad (2.15)$$

In der ETA-12/0063 [36] ist das Modell aus Formel (2.16) verankert, wobei dieses Modell deutlich höhere Steifigkeiten liefert, als das oben angeführte Modell nach Blaß et al. [4] beziehungsweise der ETA-11/0190 [8].

$$K_{ser} = 25 \cdot d \cdot l_{ef} \quad (2.16)$$

Ringhofer et al. [33] schlägt ein Modell zur Berechnung der axialen Steifigkeit  $K_{ser}$  für Schrauben nach der Formel (2.17) vor.

$$K_{ser} = k_{ser} \cdot d \cdot \pi \cdot l_{ef} \quad (2.17)$$

$k_{ser}$  Herausziehsteifigkeitsparameter nach Ringhofer et al. [33] [ $\text{N}/\text{mm}^3$ ]

Der Steifigkeitsparameter  $k_{ser}$  wurde von Ringhofer et al. [33] nach Formel (2.18) definiert, wobei er abhängig von der Rohdichte  $\rho$ , dem Winkel zwischen Schraubenachse und Faserrichtung  $\delta$ , der Anzahl an durchgeschraubten Schichten und von möglichen Fugen ist. Für Vollholz ist der Modifikationsfaktor  $k_{sys} = 1,0$  zu setzen, da nur eine Schicht durchgeschraubt wird. Das Modell bezieht sich auf eine Referenzrohndichte  $\rho_{ref}$  von  $428 \text{ kg}/\text{m}^3$ .

$$k_{ser} = k_{ax} \cdot k_{sys} \cdot k_{ser,ref} \cdot \left( \frac{\rho}{\rho_{ref}} \right)^{k_p} \quad (2.18)$$

$$\text{mit: } k_p = 0,75 \quad \text{für } \left\{ \begin{array}{l} 0^\circ \leq \delta \leq 90^\circ \\ 6 \text{ mm} \leq d \leq 12 \text{ mm} \\ 10 \text{ mm} \leq l_{ef} \leq 310 \text{ mm} \end{array} \right\}$$

$$\text{und: } \begin{array}{ll} k_{ax} = 1,0 & 45^\circ \leq \delta \leq 90^\circ \\ k_{ax} = c + \frac{(1-c) \cdot \delta}{45^\circ} & 0^\circ \leq \delta \leq 45^\circ \end{array}$$

$$c = \frac{1}{k_{90}} \quad k_{90} = 1,0 \text{ bei der Steifigkeitsermittlung}$$

Prinzipiell wird zuerst ein Referenzsteifigkeitsparameter  $k_{ser,ref}$  nach Formel (2.19) ermittelt. Anschließend kommt es über Modifikationsbeiwerte zur Beschreibung des Verhaltens unter Berücksichtigung von Randbedingungen (siehe Formel (2.18)).

$$k_{ser,ref} = 24,7 \cdot \rho^{0,75} \cdot d^{-1,70} \cdot l_{ef}^{-0,60} \quad (2.19)$$

## 2-1.2 BEANSPRUCHUNG RECHTWINKLIG ZUR SCHRAUBENACHSE

[25], [34]

Bei rechtwinklig zur Schraubenachse beanspruchten Schrauben ist grundsätzlich zu unterscheiden, ob es sich um eine einschnittige oder mehrschnittige Stahl-Holz- oder Holz-Holz-Verbindung handelt. Je nach Einordnung in eine Kategorie, sind verschiedene Versagensmodi möglich. Die Einflussparameter der Tragfähigkeit einer auf Abscheren beanspruchten Holzschraube sind der Durchmesser, die Holz- und Stahldicken, die Lochleibungsfestigkeit des Holzes, das Fließmoment der Schraube und vor allem die Tragfähigkeitssteigerung durch die Seilwirkung.

### Mindestabstände

Um das Aufspalten des Holzes infolge von Querzug und das Blockscheren zu verhindern, werden so wie bei axialer Belastung auch beim Abscheren, Mindestabstände der Schrauben gefordert. Abbildung 2.7 stellt den Winkel  $\alpha$  (Faser zu Krafrichtung) dar und definiert, welche Abstände einzuhalten sind.

Die Mindestabstände  $a_1$  und  $a_2$  sind gleich wie bei axialer Beanspruchung zwischen zwei Schrauben in beziehungsweise quer zur Faserrichtung definiert. Beim Messen von  $a_{3,c}$  und  $a_{3,t}$ , vom Schwerpunkt des Schraubengewindes im eingedrehten Bauteil bis zum Hirnholz, wird in Abhängigkeit von der Belastungsrichtung zwischen beanspruchtem Hirnholz ( $a_{3,t}$ ) und nicht beanspruchtem Hirnholz ( $a_{3,c}$ ) unterschieden. Dieselbe Unterscheidung ist auch bei den Mindestabständen  $a_{4,c}$  und  $a_{4,t}$  zu treffen, nur dass der Abstand zum Rand und nicht zum Hirnholz gemessen wird.

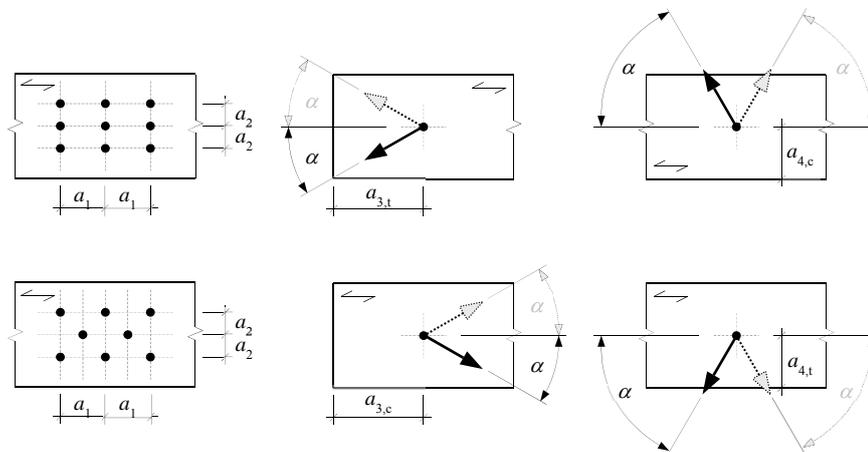


Abbildung 2.7: Mindestabstände Schrauben in Anlehnung an [25]

In Bezug auf die Mindestabstände werden selbstbohrende Holzschrauben, welche in Schraubenachse und/oder rechtwinklig zur Schraubenachse beansprucht sind, nach ÖNORM EN 1995-1-1 [25] in Abhängigkeit des effektiven Durchmessers ( $d_{ef} = 1,1 d_c$ ) in zwei Gruppen geteilt. Ist der effektive Durchmesser kleiner gleich 6 mm, werden Holzschrauben wie Nägel betrachtet ansonsten wie Bolzen. In Tabelle 2.2 sieht man den Vergleich zwischen den Mindestabständen laut ÖNORM EN 1995-1-1 [25].

**Tabelle 2.2: Mindestabstände: rechtwinklig zur Achse beanspruchte Schrauben lt. EC5 [25]**

	$d_{ef} \leq 6 \text{ mm}$ (entsprechen Nägel)			$d_{ef} > 6 \text{ mm}$ (entsprechen Bolzen)
	ohne Vorbohrung		mit Vorbohrung	
	$\rho_k \leq 420 \text{ kg/m}^3$	$420 < \rho_k \leq 500 \text{ kg/m}^3$		
<b>Abstand <math>a_1</math></b> <b>(in Faserrichtung)</b>	$d < 5 \text{ mm}$ $(5 + 5 \cos \alpha) \cdot d$	$(7 + 8 \cos \alpha) \cdot d$	$(4 + \cos \alpha) \cdot d$	$(4 + \cos \alpha) \cdot d$
	$d \geq 5 \text{ mm}$ $(5 + 7 \cos \alpha) \cdot d$			
<b>Abstand <math>a_2</math></b> <b>(rechtwinklig zur Faserrichtung)</b>	$5 d$	$7 d$	$(3 + \sin \alpha) \cdot d$	$4 d$
<b>Abstand <math>a_{3,t}</math></b> <b>(beanspruchtes Hirnholz)</b>	$(10 + 5 \cos \alpha) \cdot d$	$(15 + 5 \cos \alpha) \cdot d$	$(7 + 5 \cos \alpha) \cdot d$	$\max\{7 d; 80 \text{ mm}\}$
<b>Abstand <math>a_{3,c}</math></b> <b>(unbeanspruchtes Hirnholz)</b>	$10 d$	$15 d$	$7 d$	$\max\{4 d; (1 + 6 \sin \alpha) \cdot d\}$
<b>Abstand <math>a_{4,t}</math></b> <b>(beanspruchter Rand)</b>	$d < 5 \text{ mm}$ $(5 + 2 \sin \alpha) \cdot d$	$d < 5 \text{ mm}$ $(7 + 2 \sin \alpha) \cdot d$	$d < 5 \text{ mm}$ $(3 + 2 \sin \alpha) \cdot d$	$\max\{3 d; (2 + 2 \sin \alpha) \cdot d\}$
	$d \geq 5 \text{ mm}$ $(5 + 5 \sin \alpha) \cdot d$	$d \geq 5 \text{ mm}$ $(7 + 5 \sin \alpha) \cdot d$	$d \geq 5 \text{ mm}$ $(3 + 4 \sin \alpha) \cdot d$	
<b>Abstand <math>a_{4,c}</math></b> <b>(unbeanspruchter Rand)</b>	$5 d$	$7 d$	$3 d$	$3 d$

Es ist zu hinterfragen, ob die Zuordnung von Schrauben zu Bolzen oder Nägel in solcher Art und Weise verwendet werden sollte, da es beim Grenzübergang zwischen Bolzen und Nägel zu einem großen Sprung der Mindestabstände kommt. Das nachfolgende Beispiel soll dieses Problem verdeutlichen:

Eine Holzschraube mit dem Durchmesser von 8 mm und einem Gewindekerndurchmesser von 5,3 mm wird laut ÖNORM EN 1995-1-1 als Nagel betrachtet ( $d_{ef} = 5,83 \text{ mm} < 6 \text{ mm}$ ). Die Schraube wird ohne vorbohren in ein Holz mit  $\rho_k \leq 420 \text{ kg/m}^3$  im Winkel  $\alpha = 0^\circ$  (Faser-Kraftrichtung) eingedreht. Unter diesen Randbedingungen ergeben sich die Mindestabstände  $a_1 = (5 + 7 \cos \alpha) \cdot d = 12 \cdot d = 96 \text{ mm}$  und  $a_2 = 5 \cdot d = 40 \text{ mm}$ . Nun wird unter denselben Voraussetzungen eine Schraube mit einem Durchmesser von 10 mm und einem Gewindekerndurchmesser von 6,2 mm betrachtet. In diesem Fall wird die Schraube als Bolzen angesehen ( $d_{ef} = 6,82 \text{ mm} > 6 \text{ mm}$ ). Die geforderten Mindestabstände ergeben sich dadurch mit  $a_1 = (4 + \cos \alpha) \cdot d = 5 \cdot d = 50 \text{ mm}$  und  $a_2 = 4 \cdot d = 40 \text{ mm}$ . Beim Vergleich dieser Werte sieht man, dass eine Schraube mit einem Durchmesser von 10 mm laut Norm einen kleineren Abstand in Faserrichtung benötigt als eine Schraube mit 8 mm Durchmesser. Dies zeigt, dass die Regelung in der Norm überdacht werden sollte.

Um dieses Problem zu umgehen, schreiben viele Zulassungen vor, dass unabhängig vom Durchmesser die Mindestabstände von vorgebohrten / nicht vorgebohrten Nägeln für Schrauben in vorgebohrten / nicht vorgebohrten Holzbauteilen zu wählen sind [6], [7], [8], [36].

### **Gruppenwirkung – effektive Verbindungsmittelanzahl $n_{ef}$**

Wie bei axial beanspruchten Schrauben gibt es, auch bei den auf Abscheren belasteten Schrauben durch eine ungleichmäßige Beanspruchung, die Gruppenwirkung. Nach ÖNORM EN 1995-1-1 [25] sind Schrauben zur Ermittlung der effektiven Verbindungsmittelanzahl pro Schraubenreihe  $n_{ef}$  so wie zuvor bei den Mindestabständen in Abhängigkeit des effektiven Durchmesser in die zwei Gruppen Nägel oder Bolzen zu teilen ( $d_{ef} \leq 6 \text{ mm}$  oder  $> 6 \text{ mm}$ ).

Für Nägel gilt das folgende Berechnungsmodell.

$$n_{ef} = n^{k_{ef}} \quad (2.20)$$

$n_{ef}$       wirksame Verbindungsmittelanzahl pro Reihe aufgrund der Gruppenwirkung

$n$         Verbindungsmittelanzahl pro Reihe

$k_{ef}$       Korrekturfaktor nach Tabelle 2.3

Die Werte für den Korrekturfaktor  $k_{ef}$  sind in Abhängigkeit des Abstandes  $a_1$  der Tabelle 2.3 zu entnehmen und für Zwischenwerte von  $a_1$  ist eine lineare Interpolation zulässig.

**Tabelle 2.3: Werte für  $k_{ef}$  nach ÖNORM EN 1995-1-1 [25]**

Nagelabstand	nicht vorgebohrt	vorgebohrt
$a_1 \leq 14 d$	1,0	1,0
$a_1 = 10 d$	0,85	0,85
$a_1 = 7 d$	0,7	0,7
$a_1 = 4 d$	-	0,5

Bei der Einteilung der Schrauben als Bolzen ist die Ermittlung von  $n_{ef}$  mittels den Formeln (2.21) und (2.22) durchzuführen, wobei für Kraft-Faserrichtungs-Winkel zwischen  $0^\circ$  und  $90^\circ$  linear interpoliert werden darf.

$$\text{Kraft in Faserrichtung (0}^\circ\text{)} \quad n_{ef} = \min \left\{ \begin{array}{l} n \\ n^{0,9} \cdot \sqrt[4]{\frac{a_1}{13 \cdot d}} \end{array} \right\} \quad (2.21)$$

$$\text{Kraft quer zur Faserrichtung (90}^\circ\text{)} \quad n_{ef} = n \quad (2.22)$$

$d$  Nenndurchmesser der Schraube [mm]

$a_1$  Abstand der in Faserrichtung hintereinander liegenden Schrauben [mm]

Schickhofer [34] fasst das oben beschriebene Berechnungsmodell von Bolzen in der Formel (2.23) zusammen und schlägt vor, es für alle Schrauben unabhängig vom effektiven Durchmesser anzuwenden.

$$n_{ef} = \left( n^{0,9} \cdot \sqrt[4]{\frac{a_1}{10 \cdot d}} \right) \cdot \frac{90 - \alpha}{90} + n \cdot \frac{\alpha}{90} \quad (2.23)$$

$\alpha$  Winkel zwischen Faserrichtung und Krafrichtung

### Seilwirkung (= Seileffekt)

Die Seilwirkung ist bei auf Abscheren beanspruchten Holzschrauben ein wesentlicher Faktor zur Erhöhung der Tragfähigkeit. Durch die Verbiegung (Schrägstellung) der Schraube bei den Versagensmodi (b), (d) und (e) (siehe Abbildung 2.9) ergibt sich eine axiale Kraft in der Schraube, welche über das Einhängen des Schraubengewindes im Holz weitergeleitet wird [13]. Die Abbildung 2.8 zeigt, dass diese axiale Kraft in eine zur Holzfaser normale Komponente und eine zur Holzfaser parallele Komponente aufgeteilt werden kann. Die Normalkomponente führt zu einer Zusammenpressung ( $\sigma_{nor}$ ) der beiden Bauteile womit bei geschlossener Fuge eine Reibungskraft in der Fuge entsteht, welche durch die Multiplikation der normalen Komponente mit dem entsprechenden Reibungskoeffizienten berechnet wird. Die Reibungskraft wirkt so wie die parallele Komponente entgegen der äußeren Kraft  $F$  und dadurch ergibt sich eine Steigerung der Tragfähigkeit. Dies ist der sogenannte Seileffekt = Seilwirkung (siehe Formel (2.24)).

$$\Delta R_k = F_{par} + F_{nor} \cdot \mu \quad (2.24)$$

$\Delta R_k$  Seilwirkung (= Seileffekt)

$F_{par}$  parallel zu den Bauteilen wirkende Kraftkomponente

$F_{nor}$  normal zu den Bauteilen wirkende Kraftkomponente

$\mu$  Reibungskoeffizient (Reibungsbeiwert)

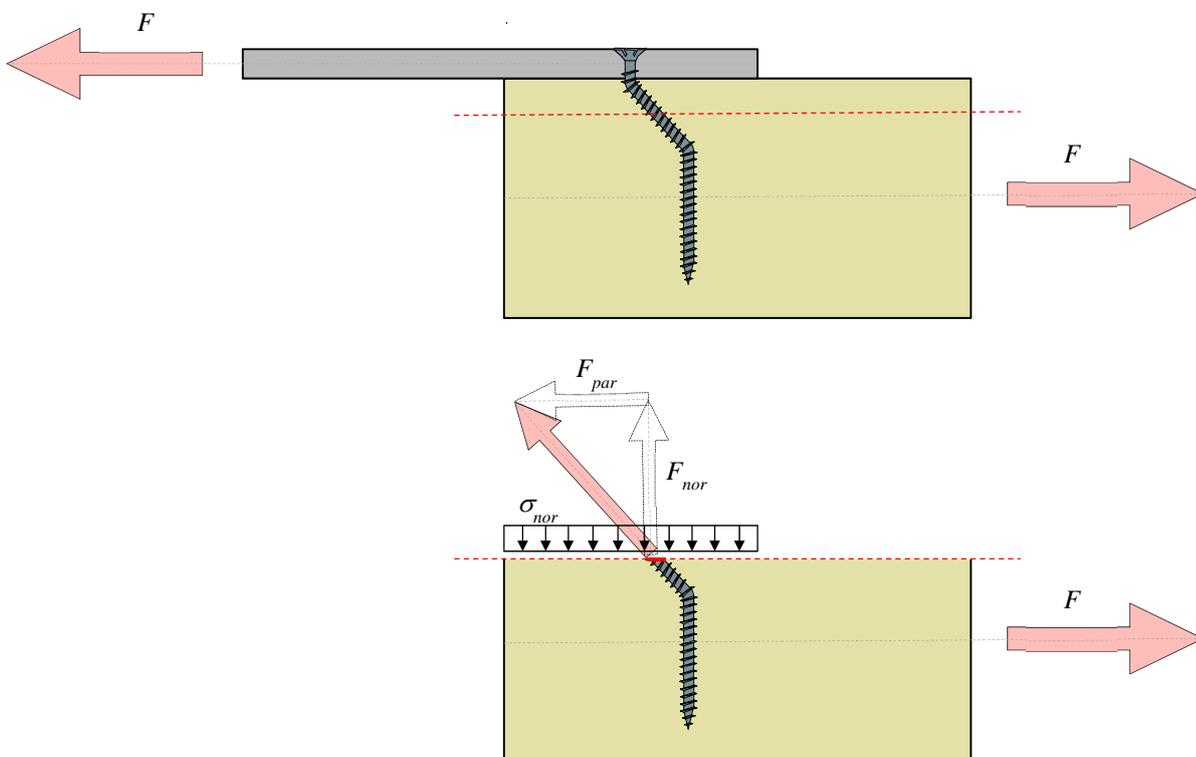


Abbildung 2.8: Seileffekt

Da die durch die Schrägstellung entstehende axiale Kraft und somit auch die einzelnen Komponenten  $F_{par}$  und  $F_{nor}$  nicht einfach zu ermitteln sind, schlägt die ÖNORM EN 1995-1-1 [25] für selbstbohrende Holzschrauben folgendes vereinfachtes Berechnungsmodell vor.

$$\Delta R_k = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,25 \cdot F_{ax,Rk} \\ F_{Rk} \end{array} \right\} \quad (2.25)$$

$\Delta R_k$  Seilwirkung (= Seileffekt)

$F_{ax,Rk}$  Bemessungswert der Tragfähigkeit unter Lasten in Richtung der Schraubenachse

$F_{Rk}$  Bemessungswert aus Theorie nach Johansen ohne Seilwirkung

### 2-1.2.1 Versagensmechanismen und Tragfähigkeiten

[7], [8], [25], [34]

Nachfolgend wird nur die einschnittige Holz-Stahlblech-Verbindung betrachtet. Dieser Verbindungstyp entspricht der in den weiteren Kapiteln gezeigten Einbauart der Schraube. Zur Berechnung anderer Verbindungstypen sind die Johansen-Gleichungen in der ÖNORM EN 1995-1-1 [25] zu finden.

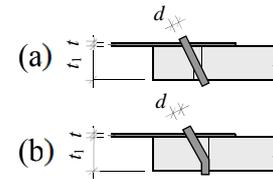
#### Johansen-Gleichungen

Die unterschiedlichen Versagensmodi nach Theorie von Johansen ergeben sich aus den Parametern Durchmesser, Holz- und Stahldicken, Lochleibungsfestigkeit und Fließmoment der Schraube. Zusätzlich ist noch bei einschnittigen Holz-Stahlblech-Verbindungen zu unterscheiden, ob es sich um ein „dünn“ ( $t \leq 0,5 d$ ) oder ein „dickes“ ( $t \geq d$ ) Stahlblech handelt, wobei im Zwischenbereich linear interpoliert wird. Diese Zuteilung ist notwendig, da es bei einem „dünnen“ Stahlblech eine zu geringe Verdrehungsbehinderung der Schraube gibt, um ein zweites Fließgelenk ausbilden zu können (siehe Abbildung 2.9). Zur Ermittlung der Tragfähigkeit werden die folgenden Formeln nach [25] verwendet, wobei jede links definierte Formel einen rechts gezeigten Versagensmodus beschreibt.

Laut ÖNORM EN 1995-1-1 [25] entspricht der Durchmesser  $d$  dem effektiven Schraubendurchmesser  $d_{ef}$ . Nach [7], [8] und [34] ist jedoch der effektive Durchmesser dem Gewindeaußendurchmesser (= Nenndurchmesser) gleich zu setzen.

- Dünnes Blech ( $t \leq 0,5 d$ )

$$R_k = \min \begin{cases} 0,4 \cdot f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d \\ 1,15 \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,k} \cdot f_{h,1,k} \cdot d} + \Delta R_k \end{cases}$$



- Dickes Blech ( $t \geq d$ )

$$R_k = \min \begin{cases} f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d \\ f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d \cdot \left[ \sqrt{2 + \frac{4 \cdot M_{y,k}}{f_{h,1,k} \cdot t_1^2 \cdot d}} - 1 \right] + \Delta R_k \\ 2,3 \cdot \sqrt{M_{y,k} \cdot f_{h,1,k} \cdot d} + \Delta R_k \end{cases}$$

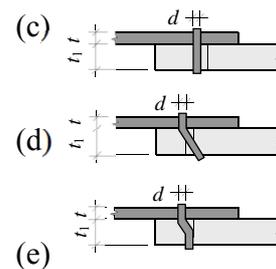


Abbildung 2.9: Versagensmodi [34]

Zur Ermittlung des Versagensmodus kann auch das in Abbildung 2.10 dargestellte Möller-Diagramm verwendet werden. Mit Hilfe des Verhältnisses  $t/d$  (Y-Achse) und des Faktors  $k_m$  (X-Achse) wird ein Punkt im Diagramm definiert. Je nachdem in welchem Bereich der Punkt liegt, ist ein anderer Versagensmodus zu erwarten. Bei Versagensmodi mit Fließgelenkbildung ist prinzipiell ein duktiler Last-Verformungsverhalten zu erwarten. Daher sind die bevorzugten Versagensmodi bei der Berechnung einer Verbindung die Modi (e) und (b). Ein weiterer bei Schrauben sehr relevanter Faktor ist, dass nach dem Bilden eines Fließgelenkes der zuvor beschriebene Seileffekt  $\Delta R_k$  auftritt und somit die Tragfähigkeit noch weiter erhöht wird.

Die Grenzen zwischen den Versagensmodi in Abbildung 2.10 sind im Gegensatz zu [34] ohne Sicherheitsfaktoren ermittelt worden (charakteristisches Lastniveau). Um den Grenzwert zwischen Bereich (a) und (b) zu ermitteln, werden die jeweiligen Berechnungsansätze, wie in Formel (2.26) gezeigt, gleichgesetzt, wobei der Anteil des Seileffekts vernachlässigt wird.

$$0,4 \cdot f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d = 1,15 \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,k} \cdot f_{h,1,k} \cdot d} \quad (2.26)$$

Nach dem Umformen der obigen Gleichung erhält man, dass in Formel (2.27) gezeigte Ergebnis.

$$k_{m,(a)-(b)} \triangleq \frac{t_1}{\sqrt{\frac{M_{y,k}}{f_{h,1,k} \cdot d}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,15^2}{0,4^2}} = 4,066 \quad (2.27)$$

Die beiden weiteren Grenzwerte  $k_{m,(c)-(d)}$  und  $k_{m,(d)-(e)}$  werden mit derselben Vorgehensweise ermittelt. Die Ausgangsgleichungen und die Ergebnisse sind in den Formeln (2.28) bis (2.32) dargestellt.

$$f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d = f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d \cdot \left[ \sqrt{2 + \frac{4 \cdot M_{y,k}}{f_{h,1,k} \cdot t_1^2 \cdot d}} - 1 \right] \quad (2.28)$$

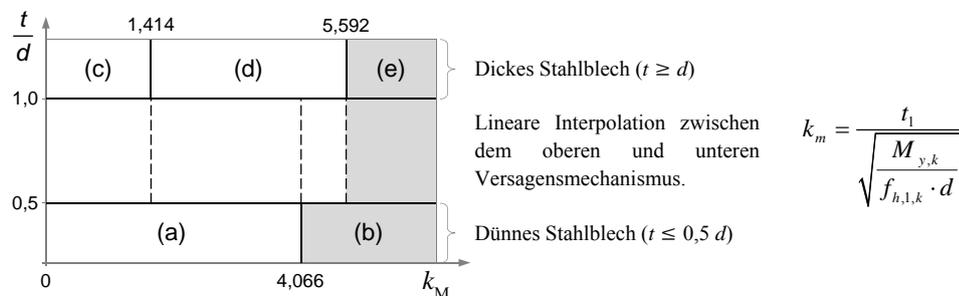
$$k_{m,(c)-(d)} \hat{=} \frac{t_1}{\sqrt{\frac{M_{y,k}}{f_{h,1,k} \cdot d}}} = \sqrt{2} = 1,414 \quad (2.29)$$

Bei der Ermittlung des Grenzwertes  $k_{m,(d)-(e)}$  ist es notwendig, die in Formel (2.31) angeführte Gleichung vierter Ordnung zu lösen. Von den vier erhaltenen Ergebnissen ist jedoch nur eines für die aktuelle Fragestellung relevant, da  $k_{m,(d)-(e)}$  größer als  $k_{m,(c)-(d)}$  sein muss (siehe Formel (2.32)).

$$f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d \cdot \left[ \sqrt{2 + \frac{4 \cdot M_{y,k}}{f_{h,1,k} \cdot t_1^2 \cdot d}} - 1 \right] = 2,3 \cdot \sqrt{M_{y,k} \cdot f_{h,1,k} \cdot d} \quad (2.30)$$

$$k_{m,(d)-(e)}^4 \cdot \left( \frac{9}{4} - 2 \right) + k_{m,(d)-(e)}^2 \cdot \left[ -3 \cdot (2,3^2 - 4) - 4 \right] + (2,3 - 4)^2 = 0 \quad (2.31)$$

$$\Rightarrow k_{m,(d)-(e)} = \left\{ \begin{array}{l} \cancel{-5,592} \\ \cancel{-0,461} \\ \cancel{0,461} \\ 5,592 \end{array} \right\} = 5,592 \quad (2.32)$$



**Abbildung 2.10: Möller-Diagramm für einschnittige Holz-Stahlblech-Verbindungen in Anlehnung an [34] (Grenzen geändert auf charakteristisches Lastniveau)**

Der Seileffekt ist prinzipiell eine Folge von einem Versagensmechanismus mit Fließmomentenbildung oder einer Stiftverdrehung. Mit dieser Betrachtungsweise ist das Möller-Diagramm, wie es hier dargestellt ist, ohne Einschränkungen anwendbar.

Doch die ÖNORM EN 1995-1-1 [25] nimmt den Seileffekt als Einfluss auf den Versagensmechanismus in der Minimumbedingung mit. Nach der Verwendung des Diagramms (Abbildung 2.10) ist die geforderte Minimumbedingung zu kontrollieren, da in der Ermittlung der Grenzen der Seileffekt wie zuvor beschrieben nicht berücksichtigt wurde. Ohne Kontrolle könnte nach der Festlegung des Versagensmodus das Minimum von einem Versagensmodus mit Seileffekt auf einem ohne Seileffekt verschoben werden.

Ein weiterer zu klärender Punkt ist, ob beim Versagensmechanismus (a) aufgrund der Schiefstellung des Stiftes nicht auch ein Seileffekt berücksichtigt werden kann, unter der Voraussetzung, dass der Stift durch zum Beispiel Reibung, Gewindegänge oder Muttern mit Beilagscheibe zurückgehalten wird.

### Fließmoment und Lochleibungsfestigkeit

Die ÖNORM EN 1995-1-1 [25] erlaubt die rechnerische Ermittlung des Fließmoments  $M_y$  mittels der Formel (2.33). Dieses Berechnungsmodell stammt von der Ermittlung des Fließmomentes von Bolzen beziehungsweise Nägeln und wurde in der Norm auch für Schrauben übernommen. Der praktische Einsatz der Formel (2.33) ist aufwendig, da die charakteristische Zugfestigkeit  $f_{u,k}$  nur über Rückrechnung der Zugtragfähigkeit und einer effektiven Querschnittsfläche ermittelt werden kann.

$$M_{y,k} = 0,3 \cdot f_{u,k} \cdot d_{ef}^{2,6} \quad (2.33)$$

$M_{y,k}$  charakteristischer Wert des Fließmomentes [Nmm]

$f_{u,k}$  charakteristischer Wert der Zugfestigkeit [N/mm<sup>2</sup>]

$d_{ef}$  effektiver Durchmesser der Schraube [mm] ( $d_{ef} = 1,1 d_c$ )

Im Gegensatz zur Norm wird das Fließmoment ( $M_y$ ) in den Schraubenzulassungen von den meisten Schraubenherstellern in Abhängigkeit des Nenndurchmessers direkt angegeben. Diese Tabellenwerte sind aus Prüfungen der jeweiligen Schraubenart nach ÖNORM EN 409 [27] ermittelt worden. Somit sollten diese Werte, jenen der oben angeführten Berechnungsmethode vorgezogen werden.

Bei der Ermittlung der Lochleibungsfestigkeit  $f_h$  laut ÖNORM EN 1995-1-1 [25] werden die Schrauben in Abhängigkeit des effektiven Durchmessers  $d_{ef}$  in die Berechnungsmodelle von Nägeln und Bolzen geteilt. Für den Fall, dass  $d_{ef} \leq 6$  mm ist, erfolgt die Berechnung wie bei Nägeln (siehe Formeln (2.34) und (2.35)).

nicht vorgebohrt: 
$$f_{h,k} = 0,082 \cdot \rho_k \cdot d_{ef}^{-0,3} \quad (2.34)$$

vorgebohrt: 
$$f_{h,k} = 0,082 \cdot \rho_k \cdot (1 - 0,01 \cdot d_{ef}) \quad (2.35)$$

$f_{h,k}$  charakteristische Lochleibungsfestigkeit [N/mm<sup>2</sup>]

$d_{ef}$  effektiver Durchmesser der Schraube [mm]

$\rho_k$  charakteristische Rohdichte [kg/m<sup>3</sup>]

Die Ermittlung der Lochleibungsfestigkeit der Schraube als Bolzen ( $d_{ef} > 6$  mm) ist nach Formel (2.36) durchzuführen, wobei hier auch im Gegensatz zu den Formeln (2.34) und (2.35) der Parameter  $\alpha$  (Winkel zwischen Kraft und Faserrichtung) mit berücksichtigt wird.

$$f_{h,k} = \frac{0,082 \cdot \rho_k \cdot (1 - 0,01 \cdot d_{ef})}{k_{90} \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \quad (2.36)$$

$$\text{mit: } k_{90} = \begin{cases} 1,35 + 0,015 \cdot d & \text{für Nadelhölzer} \\ 1,30 + 0,015 \cdot d & \text{für Furnierschichtholz} \\ 0,90 + 0,015 \cdot d & \text{für Laubholz} \end{cases}$$

$\alpha$  Winkel zwischen Kraft- und Faserrichtung ( $0^\circ - 90^\circ$ )

Ein alternatives Berechnungsmodell der Lochleibungsfestigkeit  $f_h$  ist in der ETA-11/0190 [8] verankert. Die Lochleibungsfestigkeit von nicht vorgebohrten Nadelholzbauteilen wird mit Hilfe der Formel (2.37) ermittelt; für vorgebohrte Bauteile aus Nadel-, Buchen- oder Eichenholz ist Formel (2.38) anzuwenden. Beide Formeln sind in Anlehnung an die ÖNORM EN 1995-1-1 [25] entwickelt worden, doch adaptierte man das Model, um das Verhalten von Schrauben besser beschreiben zu können.

$$\text{nicht vorgebohrt: } f_{h,k} = \frac{0,082 \cdot \rho_k \cdot d^{-0,3}}{2,5 \cdot \cos^2 \delta + \sin^2 \delta} \quad (2.37)$$

$$\text{vorgebohrt: } f_{h,k} = \frac{0,082 \cdot \rho_k \cdot (1 - 0,01 \cdot d)}{2,5 \cdot \cos^2 \delta + \sin^2 \delta} \quad (2.38)$$

$f_{h,k}$  charakteristische Lochleibungsfestigkeit [ $\text{N/mm}^2$ ]

$\delta$  Winkel zwischen Faserrichtung und Schraubenachse ( $0^\circ - 90^\circ$ )

$d$  Nenndurchmesser der Schraube [mm]

$\rho_k$  charakteristische Rohdichte [ $\text{kg/m}^3$ ] (maximal bis  $590 \text{ kg/m}^3$ )

Vergleicht man die Regelungen der ÖNORM EN 1995-1-1 [25] mit jenen der ETA-11/0190 [8] erkennt man Unterschiede, wie zum Beispiel der Einfluss des Winkels  $\delta$  (Faser-Schraubenrichtung) und nicht mehr des Winkels  $\alpha$  (Faser-Kraftrichtung). Durch die Änderung des Winkels sind auch die Winkelfunktionen unterhalb des Bruches getauscht und ein anderer Korrekturfaktor eingefügt. Nach der ETA-11/0190 [8] gibt es auch keine Unterteilung der Schrauben anhand ihres effektiven Durchmessers. Es ist aber zu unterscheiden, ob die Schrauben vorgebohrt sind oder nicht.

### **Blockscheren**

Auch bei rechtwinklig zur Achse beanspruchten Holzschrauben ist darauf zu achten, dass der in Abbildung 2.6 dargestellte Versagensmechanismus Blockscheren nicht auftritt, da es sich um ein sprödes Zug- beziehungsweise Schubversagen des Holzes handelt. Zur Vermeidung des Blockscherens ist in der ÖNORM EN 1995-1-1 [25] zusätzlich zu den Mindestabständen noch ein Modell zur Berechnung der charakteristischen Blockschertragfähigkeit von Holz-Stahlblech-Verbindungen verankert.

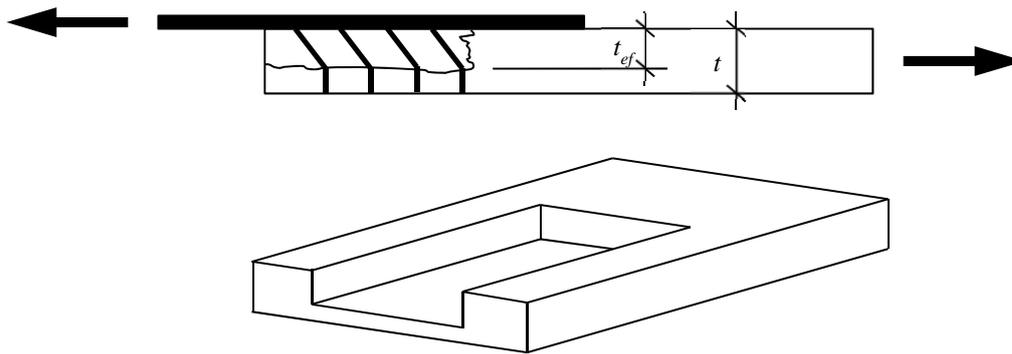


Abbildung 2.11: Blockscherversagen von lateral beanspruchten Schrauben [25]

## 2-1.2.2 Steifigkeiten

[9], [25], [35]

In der zurückgezogenen DIN 1052 [9] wurde noch zwischen Schrauben in vorgebohrten oder nicht vorgebohrten Löchern unterschieden (siehe Formeln (2.39) und (2.40)). Es ist jedoch keine Unterteilung zwischen Holz-Holz- und Holz-Stahlblech-Verbindung vorgesehen.

nicht vorgebohrt: 
$$K_{ser} = \frac{\rho_k^{1,5}}{25} \cdot d^{0,8} \quad (2.39)$$

vorgebohrt: 
$$K_{ser} = \frac{\rho_k^{1,5}}{20} \cdot d \quad (2.40)$$

$K_{ser}$  Verschiebemodul rechtwinklig zur Schraubenachse [N/mm]

$d$  Nenndurchmesser der Schraube [mm]

$\rho_k$  charakteristische Rohdichte [kg/m<sup>3</sup>]

Die ÖNORM EN 1995-1-1 [25] berücksichtigt den Unterschied des Vorbohrns nicht mehr und gibt für die Ermittlung des Verschiebemoduls pro Verbindungsmittel pro Scherfuge von rechtwinklig zur Achse beanspruchten Holzschrauben in einer Holz-Holz-Verbindung folgende Formeln an.

$$K_{ser} = \frac{\rho_m^{1,5}}{23} \cdot d_c \quad (2.41)$$

$d_c$  Kerndurchmesser der Schraube [mm]

$\rho_m$  mittlere Rohdichte [kg/m<sup>3</sup>]

Die Umrechnung von einer Holz-Holz-Verbindung auf eine Stahl-Holz Verbindung erfolgt mittels Multiplikation mit dem Faktor 2,0. Dieser Faktor lässt sich mechanisch aus der seriellen Wirkungsweise von zwei Federn herleiten. Die Formel (2.42) zeigt die für Stahl-Holz-Verbindungen gültige Gleichung.

$$K_{ser} = 2 \cdot \frac{\rho_m^{1,5}}{23} \cdot d_c \quad (2.42)$$

Die zurzeit gültige SIA 265 [35] bietet im Vergleich zu den zuvor angeführten Modellen bei der Steifigkeitsermittlung von Schrauben eine detailliertere Unterscheidung, wie in Tabelle 2.4 ersichtlich ist. Der effektive Durchmesser der Schraube  $d_{ef}$  ist gleich dem Schaftdurchmesser  $d_s$  zu setzen für den Fall, dass die Scherfuge mindestens  $4 \cdot d$  vom Gewindebereich entfernt ist. Für alle anderen Fälle entspricht der effektive Durchmesser  $d_{ef}$  dem 1,1 fachen Gewindekerndurchmesser  $d_c$  ( $d_{ef} = 1,1 d_c$ ). Im Gegensatz zur ÖNORM EN 1995-1-1 [25] beziehen sich die Rechenmodelle nach der SIA 265 [35] auf die charakteristische Rohdichte  $\rho_k$  und nicht auf den Mittelwert  $\rho_m$ .

**Tabelle 2.4: Berechnung der Steifigkeit für den Gebrauchszustand laut SIA 265 [35]**

		<b>Holz – Holz - Verbindung</b>	<b>Stahl – Holz - Verbindung</b>
<b>Kraft parallel zur Faserrichtung</b>	ohne vorbohren	$60 \cdot d_{ef}^{1.7}$	$120 \cdot d_{ef}^{1.7}$
	mit vorbohren	$3 \cdot \rho_k^{0.5} \cdot d_{ef}^{1.7}$	$6 \cdot \rho_k^{0.5} \cdot d_{ef}^{1.7}$
<b>Kraft rechtwinklig zur Faserrichtung</b>	ohne vorbohren	$30 \cdot d_{ef}^{1.7}$	$60 \cdot d_{ef}^{1.7}$
	mit vorbohren	$1.5 \cdot \rho_k^{0.5} \cdot d_{ef}^{1.7}$	$3 \cdot \rho_k^{0.5} \cdot d_{ef}^{1.7}$

## 2-1.3 KOMBINIERTE BEANSPRUCHUNG

Man spricht von einer kombinierten Beanspruchung der Schraube, sobald die Richtung der Schraubenachse und der resultierenden Kraft nicht übereinstimmen beziehungsweise nicht rechtwinklig aufeinander sind; das bedeutet  $0^\circ < \beta < 90^\circ$  ( $\beta$  = Winkel zwischen Schraubenachse und resultierenden Kraft). Zur Bemessung solcher Schrauben wird die Gesamtlast in eine axiale und eine laterale Komponente zerlegt und es ist ein Interaktionsnachweis zu führen.

### 2-1.3.1 Tragfähigkeiten

[4], [5], [10], [11], [25], [34]

Aus den Prüfungen von Flatscher et al. [11] erkennt man ein Verhältnis von axialer zu lateraler Tragfähigkeit  $F_{ax}/F_v$  von rund 2. Für üblich eingesetzte Schrauben passt auch dieses prüftechnische Verhältnis mit dem berechneten Verhältnis der beiden Komponenten nach den zuvor angeführten Formeln gut zusammen.

Bei gleichzeitigem Auftreten von axialen und lateralen Kräften können die maximalen Tragfähigkeiten nicht erreicht werden. Deshalb ist es notwendig, ein geeignetes Interaktionsmodell zu haben, welches das Verhalten bei kombinierter Beanspruchung gut beschreiben kann.

$$F_{\alpha,Rd} = \frac{F_{ax,Rd} \cdot F_{v,Rd}}{F_{ax,Rd} \cdot \sin^2 \beta + F_{v,Rd} \cdot \cos^2 \beta} \quad (2.43)$$

$F_{ax,Rd}$  Bemessungswert der Tragfähigkeit unter Lasten in Richtung der Schraubenachse

$F_{v,Rd}$  Bemessungswert der Tragfähigkeit unter Lasten rechtwinklig zur Schraubenachse

$\beta$  Winkel zwischen resultierender Kraft und Schraubenachse

Eine Interaktion der beiden Komponenten Abscheren und Herausziehen ist mithilfe der Formel (2.43) möglich. Sie ist eine trigonometrische Funktion, die in Anlehnung an die Hankinson-Interaktion von Holzdruckfestigkeit entwickelt wurde. DeBonis & Bodig [5] und Ehlbeck & Siebert [10] beschreiben diese Formel als eine eher ungeeignete Näherung des Verhaltens, aber sie ergänzen, dass die Formel auf der sicheren Seite liegend ist.

$$\frac{F_{ax,Ed}}{F_{ax,Rd}} + \frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} \leq Z \quad (2.44)$$

mit:  $Z = 1 + K \cdot \sin 2\beta$

$F_{ax,Ed}$  Bemessungswert der Einwirkung unter Lasten in Richtung der Schraubenachse

$F_{ax,Rd}$  Bemessungswert der Tragfähigkeit unter Lasten in Richtung der Schraubenachse

$F_{v,Ed}$  Bemessungswert der Einwirkung unter Lasten rechtwinklig zur Schraubenachse

$F_{v,Rd}$  Bemessungswert der Tragfähigkeit unter Lasten rechtwinklig zur Schraubenachse

$K$  Amplitude der Sinuskurve

$\beta$  Winkel zwischen resultierender Kraft und Schraubenachse

Die Formel (2.44) zeigt die von DeBonis & Bodig [5] im Jahr 1975 für glattschaftige Nägel vorgeschlagene Interaktionsformel. Bei ihren Prüfungen verwendeten sie nur Nägel mit einem Durchmesser von 3,3 mm. Die Nägel wurden jedoch unterschiedlich weit in drei verschiedene nordamerikanische Holzarten eingeschlagen um die damit einhergehenden Einflüsse zu untersuchen. DeBonis & Bodig ermittelten einen Wert  $K$ , der aufgrund der Veränderung der oben genannten Parameter zwischen 0,151 und 1,406 schwankt. Doch aufgrund von zu wenigen Prüfungen empfahlen sie, auf der sicheren Seite liegend,  $K$  gleich Null zu setzen. Für diesen Fall ( $K = 0$ ) stellt die Formel (2.44) eine einfache lineare Interaktion dar.

Um ein Interaktionsmodell zu bestätigen, führten Ehlbeck & Siebert [10] weitere Versuche mit glatten Nägeln aber auch mit Rillennägel und Schraubnägel durch. Sie ermittelten aus ihren Prüfergebnissen einen Wert für  $K$  von  $\sim 0,3$ . Jedoch empfehlen sie, als einfachere Berechnungsweise mit ebenso guter Anpassung, für glattschaftige runde Nägel die normale lineare Interaktion und für Schraub- und Rillennägel die Ellipsenfunktion aus Formel (2.45). Für Schrauben wurde diese Interaktionsformel von McLain & Carroll [17] im Jahr 1990 als konservativ bestätigt.

$$\left(\frac{F_{ax,Ed}}{F_{ax,Rd}}\right)^2 + \left(\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}}\right)^2 \leq 1,0 \quad (2.45)$$

$F_{ax,Ed}$  Bemessungswert der Einwirkung unter Lasten in Richtung der Schraubenachse

$F_{ax,Rd}$  Bemessungswert der Tragfähigkeit unter Lasten in Richtung der Schraubenachse

$F_{v,Ed}$  Bemessungswert der Einwirkung unter Lasten rechtwinklig zur Schraubenachse

$F_{v,Rd}$  Bemessungswert der Tragfähigkeit unter Lasten rechtwinklig zur Schraubenachse

In der ÖNORM EN 1995-1-1 [25] dient die Formel (2.45) auch für den Nachweis von kombiniert beanspruchten selbstbohrenden Holzschrauben. Jedoch ist anzumerken, dass im Gegensatz zur Norm laut Schickhofer [34] der Seileffekt in der Bestimmung des Bemessungswertes der Tragfähigkeit rechtwinklig zur Schraubenachse auf der sicheren Seite liegend vernachlässigt werden sollte. Eine Begründung dafür ist, dass es durch die Verformung der Schraube zu einer zusätzlichen axialen Beanspruchung kommt, welche aber schon im anderen Term des Nachweises berücksichtigt wird.

Blaß et al. [4] untersuchten das Verhalten des Ausziehparameters bei kombinierten Beanspruchungen (Herausziehen und Abscheren) und erkannten, dass der Ausziehwiderstand bei steigender Querbelastung kleiner wird. Die quadratische Interaktion (siehe Formel (2.45)) ist lt. Blaß et al. [4] ein „sehr“ konservatives Berechnungsmodell, da selbst bei Erreichen der Lochleibungsfestigkeit noch mehr als zwei Drittel der Tragfähigkeit auf Herausziehen vorhanden ist. Des Weiteren wird laut [4] bei einem kombinierten Versagen die Lochleibungsfestigkeit in der Regel nur lokal in der Nähe der Fuge erreicht, was wiederum Traglastreserven ergibt.

### 2-1.3.2 Steifigkeiten

[5], [11], [17]

Prinzipiell liegt das prüftechnisch ermittelte Verhältnis zwischen axialer Steifigkeit und lateraler Steifigkeit  $K_{ser,ax}/K_{ser,v}$  nach Flatscher et al. [11] bei rund 35. Dies ist jedoch nur ein grober Richtwert, da im Allgemeinen die Streuungen der Steifigkeiten im Vergleich zu den Tragfähigkeiten höher sind und so auch der Wert des Verhältnisses stark schwankt.

Wie bei den Tragfähigkeiten stellt sich auch hier die Frage, wie sich die Steifigkeit mit dem Winkel zwischen Krafrichtung und Schraubenachse ändert, das heißt, wie die Interaktion zwischen axialer Steifigkeit und lateraler Steifigkeit aussieht.

Für den Zusammenhang der Steifigkeiten von Nägeln schlagen DeBonis & Bodig [5] die halb-logarithmische Beziehung aus Formel (2.46) vor.

$$\log K_{\beta} = A + B \cdot \beta \quad (2.46)$$

$K_{\beta}$  Steifigkeitsmodul in Richtung der aufgebracht Last gemessen

$\beta$  Winkel zwischen resultierender Kraft und Schraubenachse

$A, B$  Konstanten die von Holzrohddichte und Eindrehtiefen abhängen

Die Konstanten  $A$  und  $B$  wurden von DeBonis & Bodig nur für Nägel in gewöhnlicher Douglasie (Pseudotsuga menziesii) mit einer Einschlagtiefe von zehnmal dem Durchmesser ( $d = 3,3$  mm) ermittelt. In ihren Prüfungen stellten sie zusätzlich noch fest, dass die laterale Steifigkeit bei simultaner Lastaufbringung linear mit steigender Axialkomponente zunimmt.

McLain & Carroll [17] konnten in ihren Untersuchungen keine Interaktionsformel für Steifigkeiten von kombiniert beanspruchten Schrauben bestätigen, doch sie schlagen trotzdem als konservative Vorgehensweise zur Ermittlung der Steifigkeit im Winkel zur Schraubenachse eine Interaktion mittels trigonometrischer Funktion, in Anlehnung an Formel (2.43) vor.

## 2-2 PRÜFKONZEPTE - KOMBINIERTE BEANSPRUCHUNG

[4], [5], [10], [17], [30]

Um das Verhalten von Nägeln unter einer kombinierten Beanspruchung (Herausziehen und Abscheren) zu untersuchen, entwickelten DeBonis & Bodig [5] die in Abbildung 2.12 dargestellte Prüfkfiguration. Als Grundlage für diese Prüfkfiguration diente der aus dem Stahlbau kommende Untersuchungsbericht von Munse & Cox [18] zu kombiniert beanspruchten Nieten aus dem Jahr 1956; siehe Abbildung 2.13.

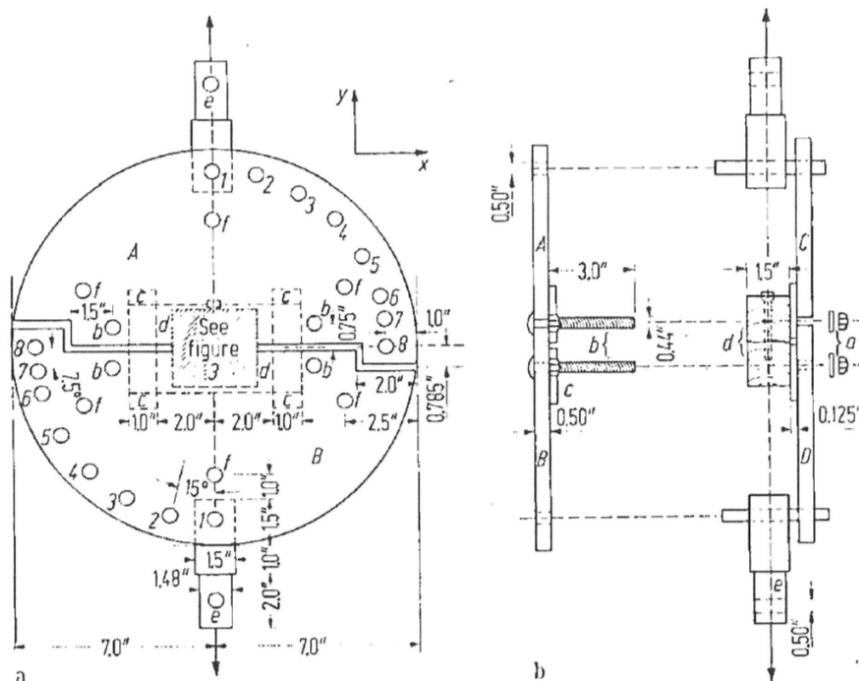
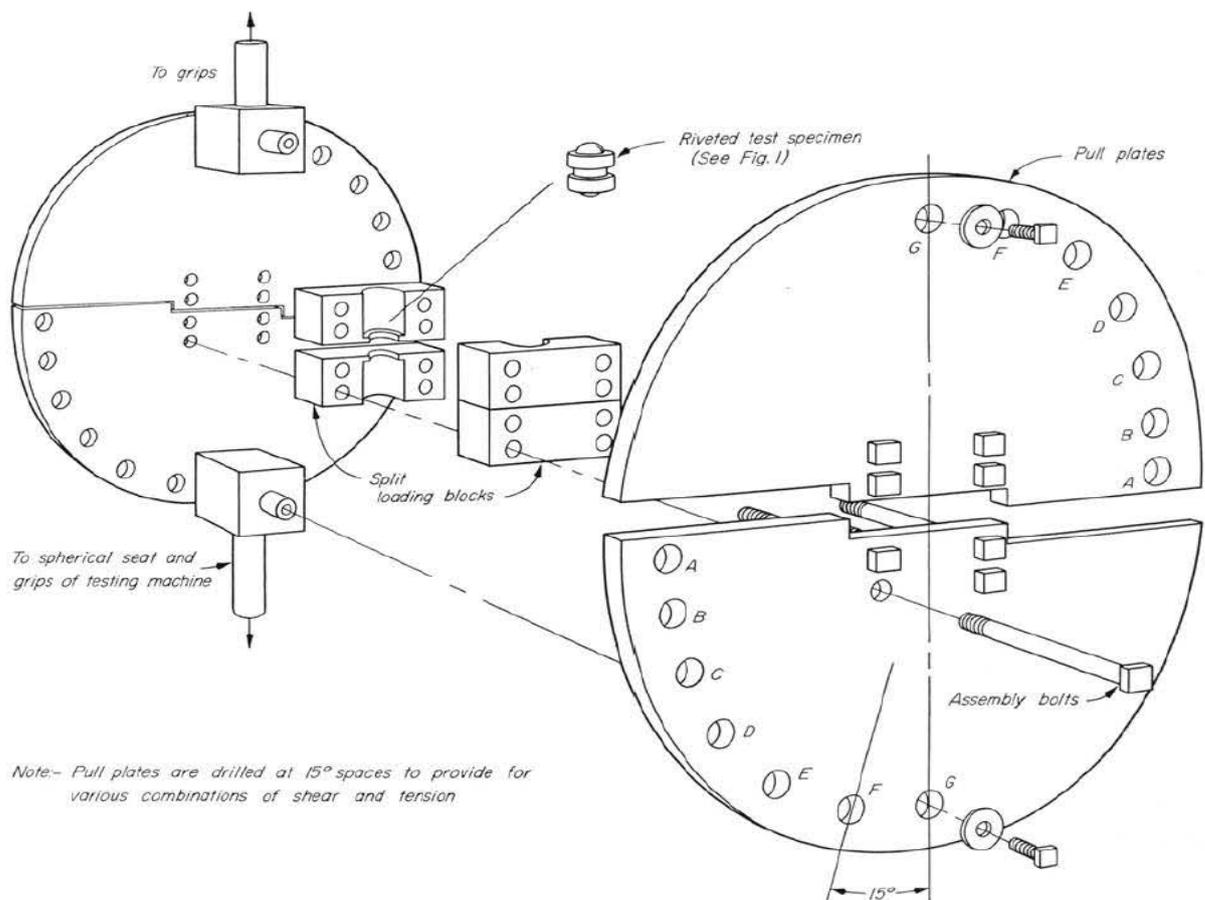


Abbildung 2.12: Prüfkfiguration nach DeBonis & Bodig [5]

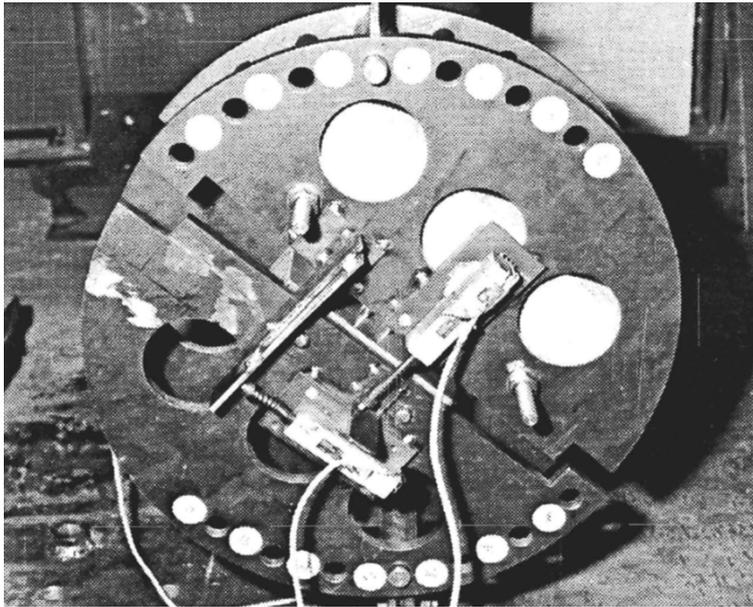


**Abbildung 2.13: Prüfung von Nieten unter kombinierter Belastung nach Munse & Cox [18]**

Die Versuchsanordnung von DeBonis & Bodig [5] besteht aus vier stählernen Halbkreisscheiben, wobei je zwei miteinander über Stahlbolzen verbunden werden. Im Zwischenraum ist der eigentliche Prüfkörper fixiert. Dieser besteht aus zwei Holzkörpern die mittels eines Nagels verbunden sind. Die Holzkörper sind an je zwei Halbkreisen (oben bzw. unten) mittels Klemmbolzen befestigt. Die Halbkreisscheiben haben acht Löcher mit denen man den Winkel zwischen Krafrichtung und Nagelachse einstellen kann. Die Last wird mittels einer Zugprüfmaschine aufgebracht.

Um die Steifigkeit der Nagelverbindung zu ermitteln, werden sowohl die lateralen, als auch die axialen Verschiebungen der Stahlhalbkreisscheiben mittels induktiven Wegaufnehmern mitgemessen.

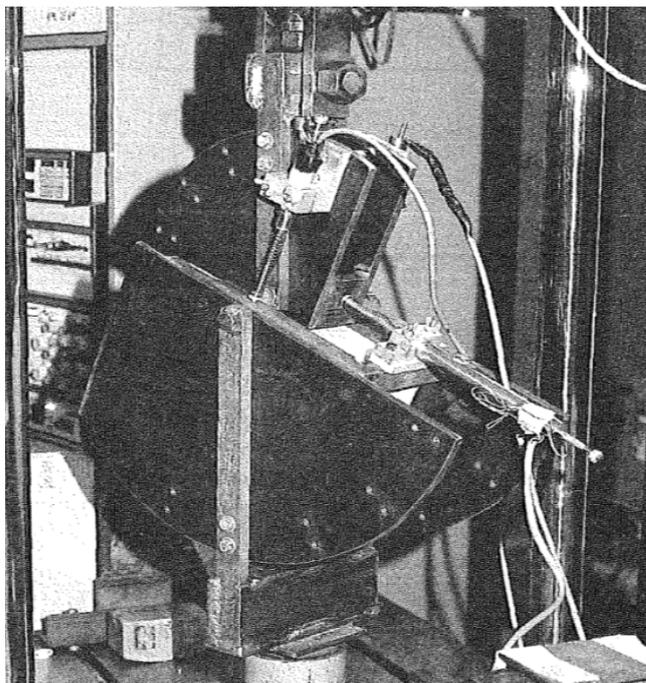
In Abbildung 2.14 sieht man, dass möglichst große Löcher in die Stahlhalbkreisscheiben geschnitten sind, um Gewicht zu sparen und somit ein leichteres Manipulieren zu ermöglichen.



*Abbildung 2.14: Weiterentwicklung der Anordnung nach DeBonis & Bodig durch Reyer & Linzner [30]*

Die Prüfkongfiguration von DeBonis & Bodig [5] wurde in weiteren Forschungsvorhaben verwendet, um einerseits noch mehr Versuchsdaten zu gewinnen und andererseits auch noch unterschiedliche Einflussparameter zu untersuchen. Dafür waren auch Adaptierungen der Konfigurationen notwendig.

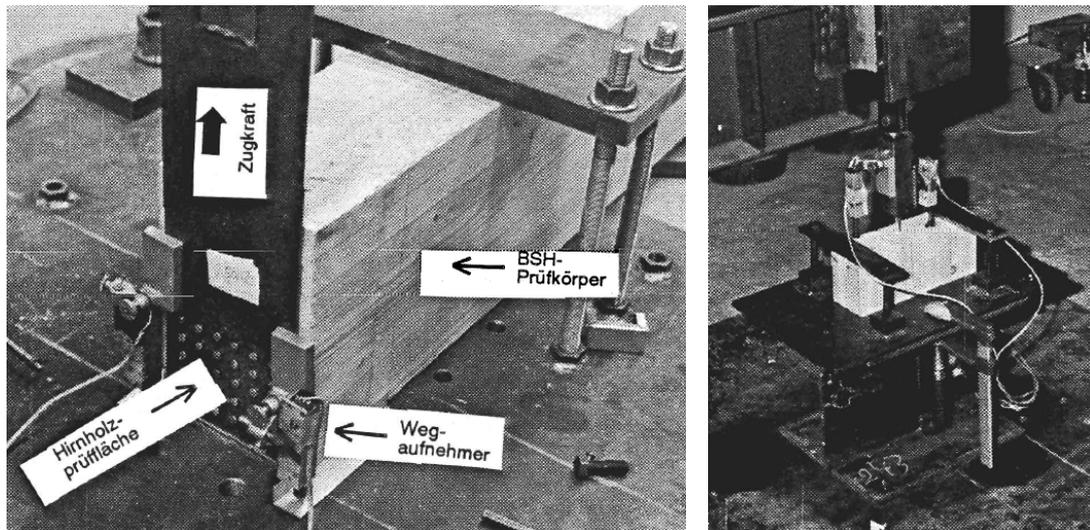
Ehlbeck & Siebert [10] prüften Rillennägel und Schraubnägel in einer einschnittigen Holz-Holz-Verbindung. Ihre Untersuchungen sind auch die Grundlage für die im EC5 angeführte quadratische Interaktion. (siehe 2-1.3 Kombinierte Beanspruchung)



*Abbildung 2.15: Konfigurationen nach McLain & Carroll [17]*

Mit dem Ziel die quadratische Interaktion von Ehlbeck & Siebert [10] auch für einschnittige Holz-Stahlblech-Verbindungen zu bestätigen, veränderten McLain & Carroll [17] die Konfiguration (siehe Abbildung 2.15) und prüften statt Nägel Holzschrauben.

Reyer & Linzner [30] untersuchten die Tragfähigkeit von Hirnholzschrauben/-nägel in einschnittigen Holz-Stahlblech-Verbindungen für unterschiedliche Belastungsrichtungen. Neben den Untersuchungen mit dem Prüfrad von DeBonis & Bodig wurden zusätzliche Schub- und Zugprüfungen mit alternativen Konfigurationen durchgeführt (siehe Abbildung 2.16).



*Abbildung 2.16: Konfigurationen nach Reyner & Linzner [30] (links: Abscheren / rechts: Herausziehen)*

Die Prüfkonzfiguration nach DeBonis & Bodig [5] und auch die adaptierten Anordnungen führen zu einer gleichzeitigen Erhöhung der Normal- und Querbelastung. Das konstante Verhältnis zwischen den beiden Lastrichtungen wird dabei durch den Winkel zwischen Schraubenachse und Kraftrichtung gesteuert. Abbildung 2.17 zeigt das Kraftdreieck, welches bei der Belastung eines Prüfkörpers, eingebaut in die Prüfanordnung nach DeBonis & Bodig, entsteht.  $F$  stellt die mittels Prüfmaschine aufgebrachte vertikal wirkende Last dar, die in eine axiale Komponente  $F_{ax}$  und eine laterale Komponente  $F_v$  aufgeteilt werden kann.

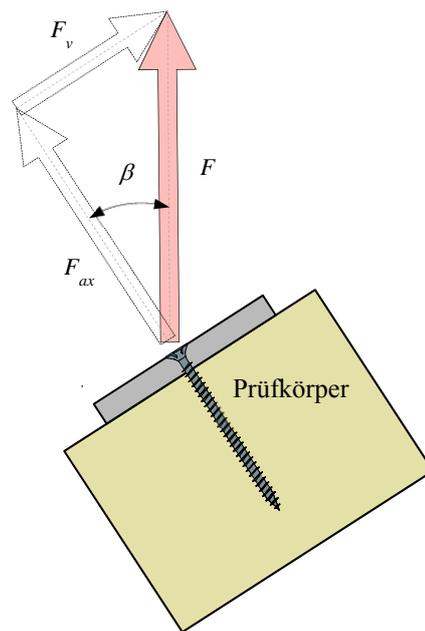


Abbildung 2.17: Aufteilung der Kräfte

$$F_{ax} = F \cdot \cos \beta \quad (2.47)$$

$$F_v = F \cdot \sin \beta \quad (2.48)$$

$$\frac{F_v}{F_{ax}} = \frac{F \cdot \sin \beta}{F \cdot \cos \beta} = \tan \beta \quad (2.49)$$

- $F$  aufgebrachte Kraft (= Gesamtbelastung)
- $F_{ax}$  axial wirkender Kraftanteil (= Normalbelastung)
- $F_v$  senkrecht zur Achse wirkender Kraftanteil (= Querbelastung)
- $\beta$  Winkel zwischen Krafrichtung und Schraubenachse

Aufgrund von größeren Verformungen beim Erreichen der lateralen Tragfähigkeit stellt sich die Frage, ob die Art der Lastaufbringung das Versuchsergebnis maßgeblich beeinflusst, das heißt, ob das hintereinander Aufbringen der beiden Komponenten andere Tragfähigkeiten liefert. Um dies zu untersuchen, ist eine Prüfkongfiguration notwendig, welche eine unabhängige Belastung der beiden Richtungen ermöglicht.

Die von Blaß et al. [4] verwendete Prüfanordnung (siehe Abbildung 2.18 und Abbildung 2.19) ermöglicht im Gegensatz zu der Konfiguration nach DeBonis & Bodig [5] eine solche voneinander unabhängige Lastaufbringung. Vergleicht man diese Prüfanordnungen weiter miteinander, erkennt man, dass hier statt einer einschnittigen Verbindung eine zweisechnittige Verbindung geprüft wird.

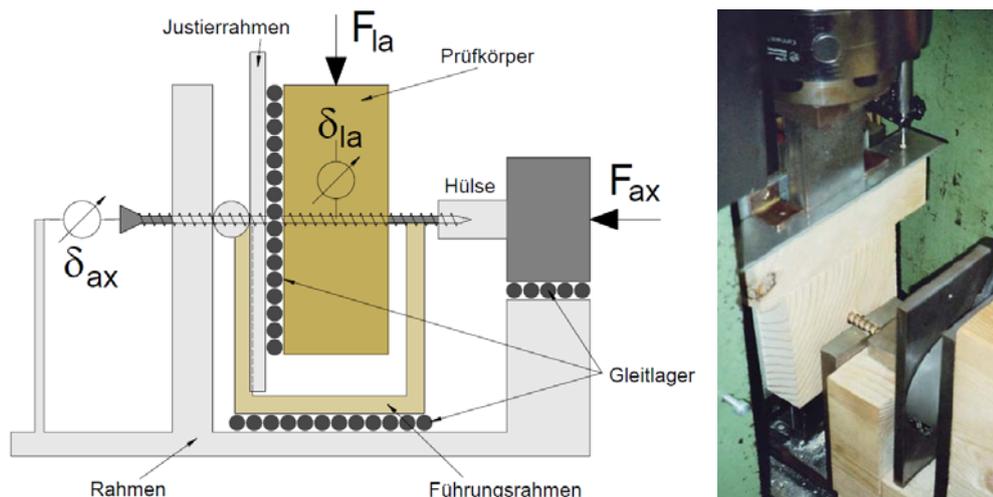


Abbildung 2.18: Versuchskonfiguration nach Blaß et al. [4]

Abbildung 2.18 zeigt einmal das Prinzip der Prüfkongfiguration im Schnitt (links) dargestellt und einmal einen tatsächlich eingebauten Prüfkörper (rechts). Im Schnitt erkennt man drei Gleitschichten, die notwendig sind, um eine möglichst reibungsfreie translatorische Bewegung zu ermöglichen. Um die mögliche Verbiegung der Schraube aufgrund der Querbelastung zu verhindern, wird bei dieser Prüfkongfiguration die Holzbrettdicke (= Eindrehtiefe) absichtlich sehr gering gehalten ( $2,5 \cdot d$  und  $3,3 \cdot d$ ). Da die minimale Einschraubtiefe nach [8] viermal den Nenndurchmesser beträgt, stellt diese Anordnung eine nicht reale Einsatzart der Schraube dar. Der eigentliche Zweck der Konfiguration, die Ermittlung des Auszieh-widerstandes unter Querbelastung, wird jedoch erfüllt.

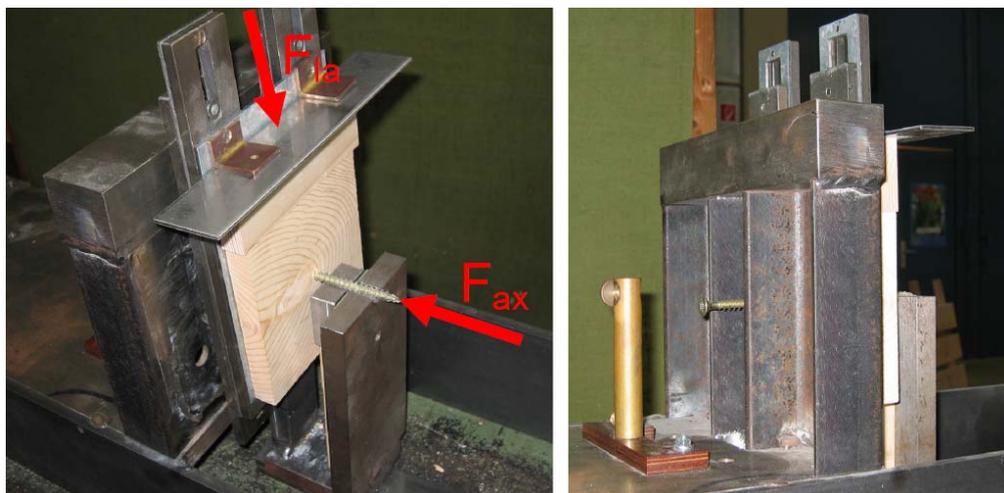


Abbildung 2.19: Versuchskonfiguration nach Blaß et al. [4]

Die axiale Last wird über Druck von einer Hülse auf die Schraubenspitze aufgebracht und mittels einer Kraftmessdose gemessen. Die Querbelastung wird über eine Universalprüfmaschine auf den Holzkörper aufgebracht (siehe Abbildung 2.19). Es werden die lokalen Verschiebungen in horizontaler und vertikaler Richtung zwischen Schraube und Holzkörper gemessen.

Blaß et al. benutzten diese Konfiguration für die Ermittlung des Auszieh Widerstandes bei gleichzeitiger Querbelastung und schließen damit auf die Interaktion zwischen Abscheren und Herausziehen. Allerdings sind in ihrem Bericht die Tragfähigkeiten (Kräfte) der einzelnen Versuche nicht so angeführt, dass man ein typisches Interaktionsdiagramm (Kraft axial - Kraft lateral) erstellen kann, sondern ihre Aussagen begründen sich auf einem Diagramm von Ausziehparameter und Lochleibungsfestigkeit.

## 2-3 RESÜMEE UND ERKENNTNIS

---

Zur Ermittlung der axialen und lateralen Tragfähigkeiten gibt es eine Vielzahl von Berechnungsmöglichkeiten. Ähnliches gilt auch für die Steifigkeiten mit dem Unterschied, dass die Modelle nicht so weit entwickelt sind, wie die Tragfähigkeitsmodelle.

Vergleicht man die axiale und die laterale Tragfähigkeit miteinander, so ergibt sich ein Verhältnis  $F_{ax}/F_v$  von rund 2 [11]; zwischen axialer Steifigkeit und lateraler Steifigkeit  $K_{ser,ax}/K_{ser,v}$  findet sich hingegen ein Verhältnis von rund 35 [11].

Bei der kombinierten Beanspruchung von Schrauben können nicht die vollen Tragfähigkeiten ausgenutzt werden und so wird für Schrauben eine quadratische Interaktion der axialen und lateralen Beanspruchung als konservative Herangehensweise empfohlen. Dieses Interaktionsmodell wurde aus Untersuchungen von Ring- und Schraubnägeln [10] in die ÖNORM EN 1995-1-1 [25] übernommen.

Für eine Interaktion der lateralen und axialen Steifigkeiten gibt es in der ÖNORM EN 1995-1-1 [25] keine Regelung und auch die diversen Schraubenzulassungen stellen keine Informationen bereit.

Prinzipiell wurden in der Literatur nur Prüfungen mit zwei unterschiedlichen Prüfkonfigurationen dargestellt. Einerseits der Konfiguration nach DeBonis & Bodig [5] (kombinierte Beanspruchung über Schiefstellung des Prüfkörpers in Universalprüfmaschine) und andererseits mit der nach Blaß et al. [4] (zwei unabhängig steuerbare Druckzylinder).

Da im Folgenden auch der Einfluss der Art der Lastaufbringung auf das Versuchsergebnis untersucht werden soll, ist es notwendig, dass die Prüfkonfiguration eine unabhängige Kraftsteuerung der beiden Richtungen ermöglicht. Da bei der Prüfkonfiguration nach DeBonis & Bodig [5] die Kräfte immer über den Winkel im gleichen Verhältnis zueinander anwachsen und nicht getrennt steuerbar sind, ist diese demzufolge nicht zielführend.

Im Gegensatz dazu sind bei der Prüfkonfiguration nach Blaß et al. [4] die Kraftkomponenten voneinander getrennt steuerbar. Der Aufbau stellt jedoch nicht die „reale“ Einsatzart von Schrauben dar (zu geringe Eindretiefen  $< 4 \cdot d$ , zweischnittige Verbindung). Durch die geringe Eindringtiefe wird die Verbiegung der Schraube verhindert und der Seileffekt kann nicht zur Tragfähigkeitssteigerung genutzt werden. Zusätzlich wäre noch zu prüfen, wie groß der Reibungseinfluss der drei Gleitschichten auf das Messergebnis ist.

Aufgrund dieser Analyse ist keine der zuvor angeführten Prüfanordnungen in der Lage, alle gewünschten Anforderungen (voneinander unabhängige Lastaufbringung, möglichst reibungsfreie Lagerung, nur eine Scherfuge, reale Einbauverhältnisse) zu erfüllen. So ist es erforderlich, eine neue Konfiguration in Anlehnung an die bestehenden Anordnungen zu entwickeln.

## KAPITEL 3: ENTWICKLUNG DER PRÜFANORDNUNG

### 3-1 ALLGEMEINES ZU DEN VORVERSUCHEN

---

Mit Hilfe der zu entwickelnden Prüfkonfiguration soll eine einschnittige geschraubte Holz-Stahlblech-Verbindung auf ihr Verhalten bei axialer, lateraler sowie kombinierter Belastung geprüft werden können, wobei eine voneinander unabhängige Steuerung der einzelnen Kraftkomponenten verwendet wird. Zusätzlich ist zu gewährleisten, dass mögliche Reibungskräfte keinen relevanten Einfluss auf die Versuchsergebnisse haben.

Bei den Versuchen und später bei den Prüfungen, werden vor allem die Daten hinsichtlich Tragfähigkeit und Steifigkeit untersucht. Um auf die Steifigkeiten rückschließen zu können, werden bei allen Versuchen mittels induktiver Wegaufnehmer die lokalen Verformungen zwischen Stahlblech und Holzprüfkörper gemessen. Außerdem wird mit Hilfe der gemessenen Verformungen kontrolliert, ob es zu Verdrehungen des Holzprüfkörpers beziehungsweise des Stahlbleches kommt.

#### 3-1.1 VERSUCHSKÖRPER

Die Versuchskörper aller Vorversuche wurden aus Kanthölzern der Holzart Fichte (*Picea Abies*) vom Bestand des Institutes für Holzbau und Holztechnologie der TU Graz gefertigt. Die Holzrohddichte befand sich im Bereich von 460 bis 560 kg/m<sup>3</sup> bei einer Holzfeuchte zwischen 14 und 15 Prozent. Die Kanthölzer wurden so aussortiert, dass sie möglichst keine Äste im Bereich der später eingedrehten Schrauben aufwiesen.

Für die Versuchskonfiguration 1 wurden aus den Kanthölzern (~ 4050/210/110 mm; Länge/Breite/Dicke) die benötigten Holzkörper mit den Abmessungen 300/200/100 mm hergestellt.

Um von den Kanthölzern auf die gewünschten Abmessungen der Versuchskonfiguration 2 von 300/500/100 mm (Länge/Breite/Dicke) zu kommen, wurden zuerst fünf einzelne Kanthölzer mit den Abmessungen 201/300/100 mm miteinander verklebt. Als Klebstoff diente der Polyurethan-Klebstoff PURBOND HB S309 mit einer aufgetragenen Menge von 150 g/m<sup>2</sup>. Der notwendige Pressdruck wurde, wie in Abbildung 3.1 gezeigt, mittels Druckzylindern, die auf Schienen befestigt waren, aufgebracht. Die Prüfkörper blieben für eine Dauer von vier Stunden in der Pressvorrichtung. Nach der Aushärtung des Klebstoffes, wurden die verleimten Holzkörper mittig in Faserrichtung getrennt und auf die erforderliche Länge von 300 mm gekürzt.



*Abbildung 3.1: Versuchskörperherstellung*

### 3-1.2 STAHLBLECH UND GEWINDESTANGEN

Die für die Prüfkonfiguration verwendeten Stahlteile wurden in der Stahlgüteklasse S235 ausgebildet. Die eingesetzten Gewindestangen der Festigkeitsklasse 8.8 weisen ein metrisches und in gewissen Fällen auch ein Feingewinde auf.

### 3-1.3 SELBSTBOHRENDE HOLZSCHRAUBEN

Da das Ziel der Prüfungen die Untersuchung der Tragfähigkeitsinteraktion und der Steifigkeitsinteraktion ist, wurde versucht, die Streuungen der Tragfähigkeiten gering zu halten. Daher wurde für die axiale Beanspruchung der Schraube der Versagensmodus Stahlbruch und nicht Herausziehen gewählt. Diese Überlegungen wurden auch schon bei den Vorversuchen verwendet, um die Konfigurationen auf die späteren Randbedingungen zu testen.

Der Versagensmodus Stahlbruch wird vereinfacht über die große Eindrehtiefe ( $> 20 \cdot d$ ) gewährleistet [3]. Für lateral beanspruchte Schrauben wird der Versagensmodus (e) mit der Bildung von zwei Fließgelenken erwartet, da die Schraube eine große Schlankheit besitzt (Verhältnis Einbindelänge zu Durchmesser ist groß) und es sich um ein „dickes“ Stahlblech handelt.

Für alle Vorversuche wurden selbstbohrende Vollgewindeschrauben der Firma Würth eingesetzt. Die technischen Daten der Schraube sind in Tabelle 3.1 angeführt.

*Tabelle 3.1: Technische Daten der Schrauben [8]*

<b>Ø 6</b>	
<b>Hersteller</b>	Würth
<b>Zulassung</b>	ETA-11-0190 [8]
<b>Typ</b>	Assy
<b>Gewinde</b>	Vollgewinde
<b>Nenndurchmesser <math>d</math> [mm]</b>	6
<b>Gewindekerndurchmesser <math>d_c</math> [mm]</b>	3,9
<b>Kopfdurchmesser <math>d_h</math> [mm]</b>	12
<b>Länge <math>L</math> [mm]</b>	160
<b>Kopfform</b>	Senkkopf
<b>Spitze</b>	Vollspitze
<b>charakteristischer Wert der Zugtragfähigkeit <math>f_{tens,k}</math> [kN]</b>	11,0

## 3-2 VERSUCHSKONFIGURATION 1

Wie in Abbildung 3.2 ersichtlich, verfolgte die Versuchskonfiguration 1 die Grundidee von einem beweglichen Prüfkörper und einem fixierten Stahlblech (folgend nur Anschlussblech). Das Anschlussblech war ein Stahlblech mit den Abmessungen 220/120/15 mm (Länge/Breite/Dicke), das über zwei Stahlgestelle auf der Universalprüfmaschine (Zwick Universal 250) fixiert wurde. Der Holzprüfkörper wurde mit der zu prüfenden Schraube am Anschlussblech befestigt.

Die laterale Kraftkomponente wurde mittels der zuvor erwähnten Universalprüfmaschine über Druck auf den Prüfkörper aufgebracht und führte zu der gewünschten Scherbeanspruchung der Schraube. Um die horizontale Bewegung des Prüfkörpers nicht zu behindern, wurde mittels zwei Rundstäben eine horizontale Gleitebene zwischen Prüfkörper und Prüfmaschine geschaffen.

Wie in Abbildung 3.2 ersichtlich ist, sollte die axiale Kraftkomponente (Zug) mit Hilfe eines an einem Winkel befestigten Druckzylinders und über einen Stahlrahmen indirekt als Druckkraft aufgebracht werden. Der zwischen Druckzylinder und Stahlrahmen positionierte Rundstahl war für das Ermöglichen einer gleichzeitigen vertikalen Verformung bei kombinierter Beanspruchung vorgesehen. Wie im Weiteren beschrieben, wurden mit dieser Prüfkonfiguration jedoch lediglich einige Scherversuche durchgeführt, da kein geeigneter Druckzylinder inklusive Steuerungseinheit mit überschaubaren finanziellen Mitteln verfügbar war.

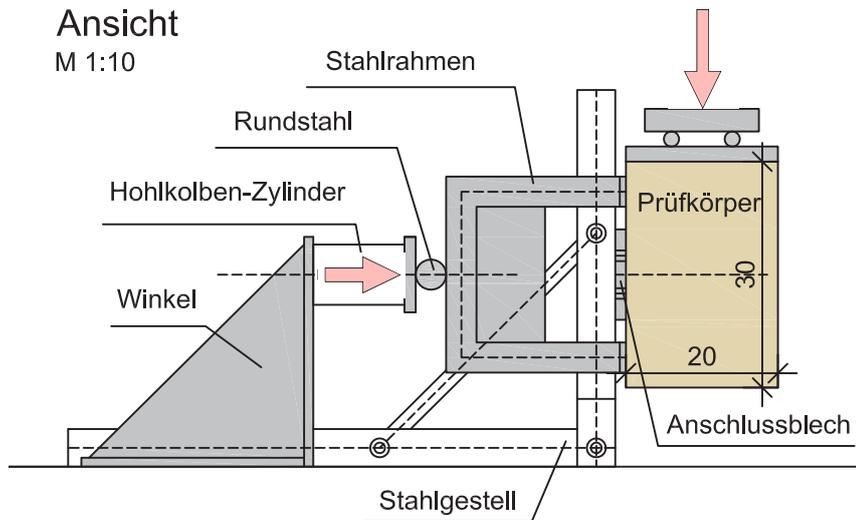


Abbildung 3.2: Grundidee Versuchskonfiguration 1

### 3-2.1 VORVERSUCH V01

Die Abbildung 3.3 zeigt, wie die Belastung über eine Kalotte, zwei Rundstäbe und ein Stahlblech in den Prüfkörper eingeleitet wird. Der Prüfkörper war, wie zuvor beschrieben, mittels einer selbstbohrenden Schraube am Anschlussblech befestigt. Das Anschlussblech wurde über zwei Stahlgestelle in seiner Lage fixiert.

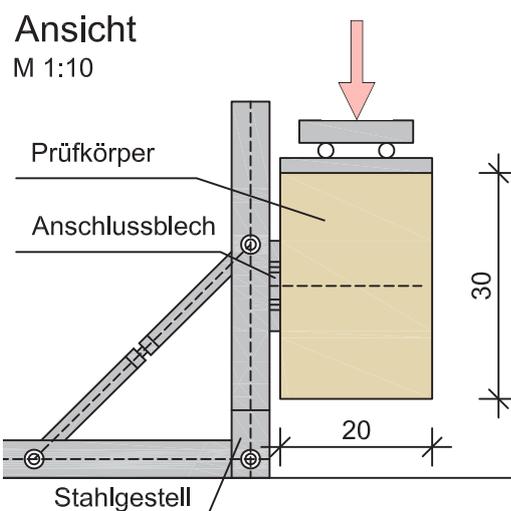


Abbildung 3.3: Versuchsaufbau - Vorversuch V01 - Abscheren

Aus dem in Abbildung 3.4 dargestellten Kraft-Verschiebungs-Diagramm ist ersichtlich, dass das Versuchsergebnis stark von Reibungseinflüssen geprägt ist. Ab einer Last von rund fünf Kilonewton kommt es zu einem ruckartigen Nachrutschen des Prüfkörpers am Anschlussblech. Durch die Reibung zwischen Holz und Anschlussblech ist in diesem Vorversuch die laterale Tragfähigkeit ( $F_v = 8,9$  kN; bestimmt nach Abschnitt 5-1.1) und die laterale Steifigkeit ( $K_{ser,v} = 2,9$  kN/mm; bestimmt nach Abschnitt 5-1.2) größer als in den folgenden Vorversuchen, bei denen der Einfluss der Reibung weitestgehend unterbunden wurde (vergleiche z. B. Vorversuch V02 und V03).

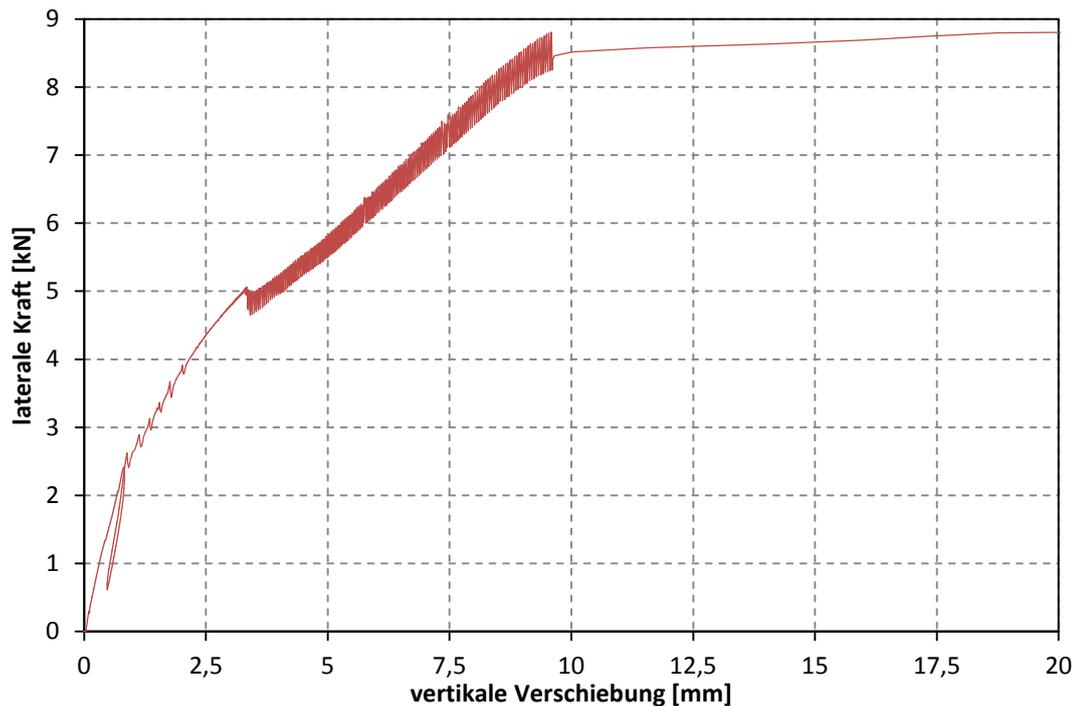


Abbildung 3.4: Kraft – Verschiebungs-Diagramm (Vorversuch V01 – reines Abscheren)

### 3-2.2 VORVERSUCH V02

Um die Größe des Einflusses, der beim Vorversuch V01 auftretenden Reibung beurteilen zu können, wurde beim Vorversuch V02 der gleiche Aufbau wie zuvor verwendet. Der einzige Unterschied war, dass zwischen Prüfkörper und Anschlussblech zwei Schichten PTFE (Polytetrafluorethylen beziehungsweise Teflon) eingelegt wurden, um die Reibung möglichst gering zu halten.

Abbildung 3.5 zeigt rechts den beim Vorversuch V02 eingesetzten Versuchsaufbau und links das Anschlussblech samt Befestigungsgestell vor dem Einbau des Prüfkörpers.

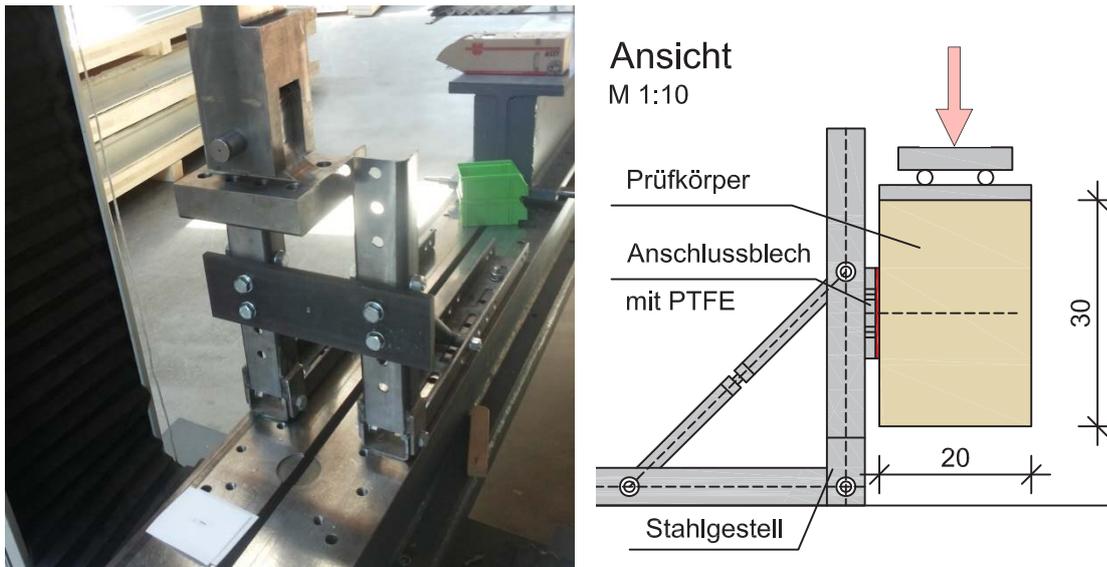


Abbildung 3.5: Versuchsaufbau - Vorversuch V02 - Abscheren

Aus dem Kraft-Verschiebungs-Diagramm des Vorversuchs V02 (siehe Abbildung 3.6) ist deutlich zu sehen, dass hier das ruckartige Nachrutschen des Prüfkörpers verhindert werden konnte. Des Weiteren ist auch die wesentlich geringere laterale Tragfähigkeit ( $F_v = 6,5 \text{ kN}$ ) sowie Steifigkeit ( $K_{\text{ser},v} = 1,0 \text{ kN/mm}$ ) zu erkennen.

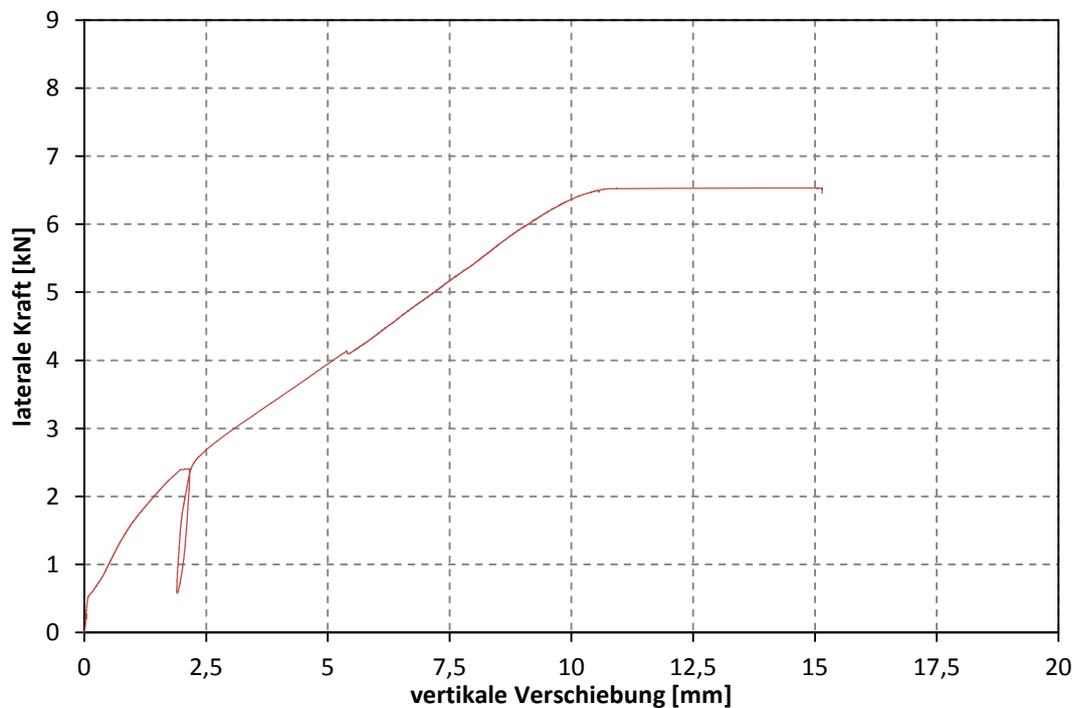
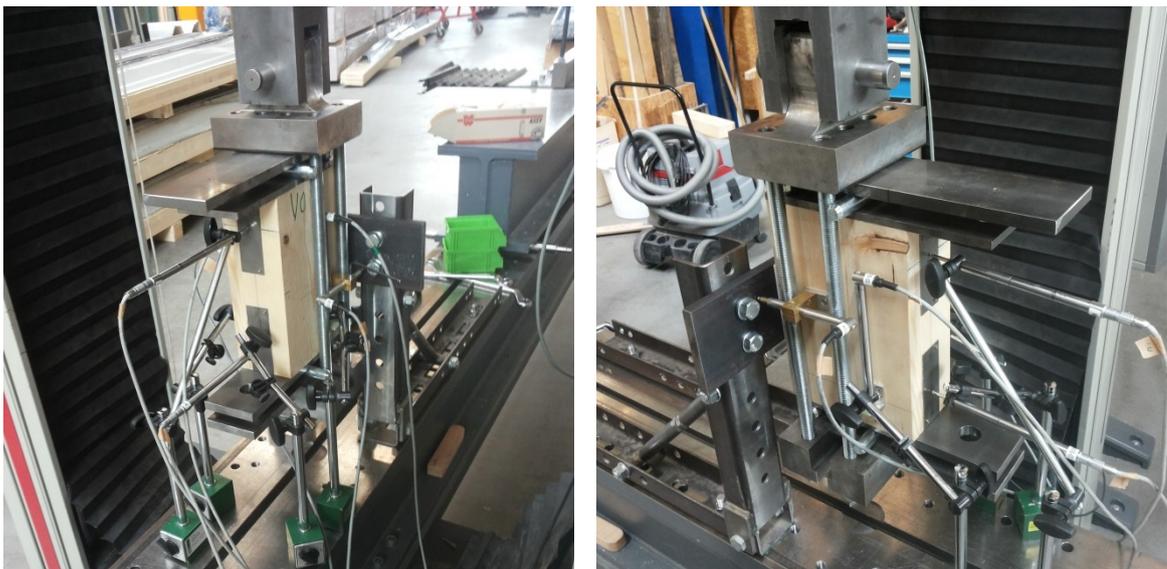


Abbildung 3.6: Kraft-Verschiebungs-Diagramm (Vorversuch V02 - reines Abscheren)

### 3-2.3 VORVERSUCH V03

Vorversuch V03 ist wiederum eine Weiterentwicklung von Vorversuch V02. Hier wurde versucht, die Verdrehung des Prüfkörpers zu minimieren. Daher wurde der Holzkörper mittels vier Gewindestangen  $\varnothing 20$  an der Prüfmaschine fixiert (siehe Abbildung 3.7). Um die horizontale Verschiebung des Prüfkörpers gewährleisten zu können, wurden wiederum Rundstäbe zwischen Holz und Stahlkonstruktion eingelegt.



*Abbildung 3.7: Versuchsaufbau - Vorversuch V03 - Abscheren*

Bei diesem Versuch wurden die Wegaufnehmer bei rund 4,8 kN entfernt (siehe Abbildung 3.8), um diese beim Bruch der Schraube nicht zu beschädigen.

Die beim Vorversuch V03 ermittelte Tragfähigkeit  $F_v$  von 6,7 kN lag in der Größenordnung des Vorversuches V02. Des Weiteren stimmen auch die Steifigkeiten ( $K_{ser,v} = 0,7$  kN/mm) dieser beiden Vorversuche ausreichend gut überein. Die gewünschte Verringerung der Prüfkörperverdrehung konnte jedoch nicht erreicht werden.

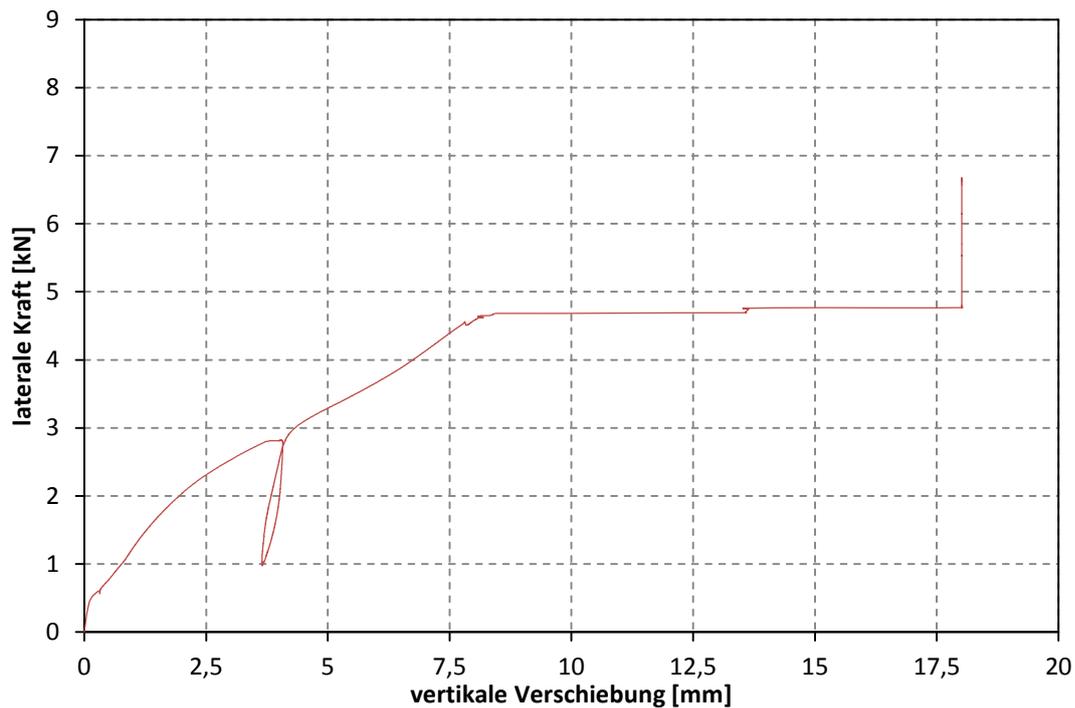


Abbildung 3.8: Kraft-Verschiebungs-Diagramm (Vorversuch V03 – reines Abscheren)

### 3-2.4 ZUSAMMENFASSUNG UND BEURTEILUNG VERSUCHSKONFIGURATION 1

Betrachtet man die Ergebnisse der Vorversuche mit dieser Konfiguration, so fallen folgende Punkte auf:

- Die zwei Schichten PTFE zwischen Holz und Anschlussblech sind notwendig, um die Reibungseinflüsse zu minimieren.
- Bei allen drei Vorversuchen mit dieser Konfiguration kam es zu einer Verdrehung des Körpers. Dies hängt mit dem „großen“ horizontalen Abstand zwischen der Scherfuge und dem Kräfteinleitungspunkt (rund 70 mm) beziehungsweise dem dadurch entstehenden Moment zusammen. Die Verdrehung konnte auch durch das Hochspannen des Prüfkörpers bei V03 nicht verhindert werden.

Des Weiteren stellte sich heraus, dass die Einleitung der axialen Komponente über Druck in der ursprünglich geplanten Variante nur schwer zu realisieren war. Besonders der absehbare finanzielle Aufwand für die Anschaffung eines entsprechenden Druckzylinders und der benötigten Steuerungssoftware lieferten den Grund eine alternative Konfiguration anzudenken.

## 3-3 VERSUCHSKONFIGURATION 2

Inspiziert von den Scherversuchen nach Reyer & Linzner [30] (siehe Abbildung 2.16), wurde bei Versuchskonfiguration 2 der Holzprüfkörper mittels Gewindestangen und einer massiven Stahlplatte auf dem Prüfmaschinenenträger fixiert (siehe Abbildung 3.9); das beweglich ausgeführte Anschlussblech hatte die Abmessungen 400/300/20 mm (Länge/Breite/Dicke).

Die laterale (vertikale) Kraftaufbringung erfolgte wie bei Versuchskonfiguration 1 mittels der Universalprüfmaschine, nur dass es sich hier statt einer Druckkraft um eine Zugkraft handelte. Um die horizontale (axiale) Verschiebung des Anschlussbleches zu ermöglichen, wurde zwischen dieser und der Traverse der Prüfmaschine eine Gelenkkette eingebaut (vergleiche Abbildung 3.12).

Um die axiale Kraftkomponente definiert aufbringen zu können, wurde eine Feingewindestange mit einem Dehnmessstreifen (DMS) bestückt und entsprechend kalibriert (mehr dazu bei 3-3.3 Vorversuch V14). Die Steuerung der Belastung erfolgte über das Festziehen einer Mutter am Ende dieser Gewindestange (siehe Abbildung 3.9). Wie ebenfalls in Abbildung 3.9 dargestellt, wurde die axiale Beanspruchung von der Feingewindestange über ein System von Gewindestangen sowie zwei kleine Bleche in das verschiebliche Anschlussblech eingeleitet. Um bei einer vertikalen Verschiebung des Anschlussbleches (bei gleichzeitiger lateraler Beanspruchung) die Verdrehung des Stangensystems möglichst gering zu halten, wurde dieses mit einer Länge von 3,1 m ausgeführt. Somit konnte auch der entstehende vertikale Kraftanteil gering gehalten werden.

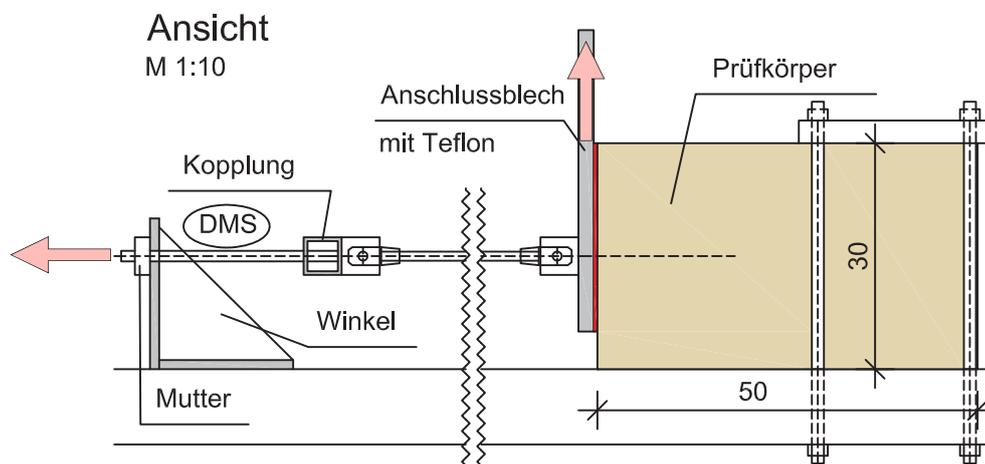


Abbildung 3.9: Grundidee Versuchskonfiguration 2

### 3-3.1 VORVERSUCHE V10, V11 UND V13

Die Vorversuche V10, V11 und V13 wurden nach der in Abbildung 3.10 dargestellten Versuchsanordnung durchgeführt, wobei die Belastung der Schrauben ausschließlich lateral erfolgte.

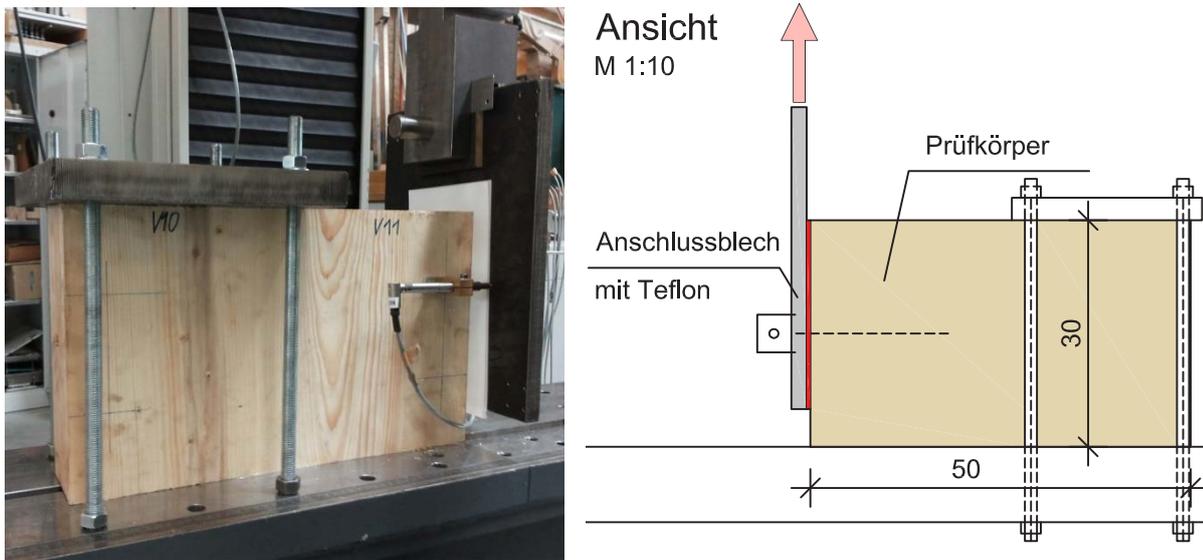


Abbildung 3.10: Versuchsaufbau - Vorversuch V10, V11, V13 - Abscheren

Abbildung 3.11 vergleicht die Kraft-Verschiebungs-Diagramme der Vorversuche V10, V11, V13. Man erkennt, dass die Tragfähigkeiten und die Form der Prüfverläufe gut zusammenpassen. Die zugehörigen Versuchsergebnisse sind in Tabelle 3.2 zusammengefasst. Der Unterschied der Steifigkeiten der Vorversuche V10 und V11 ist deutlich, doch zeigen die Prüfungsergebnisse in Abschnitt 5-3.2.2 ähnliche Bereiche der Verteilung.

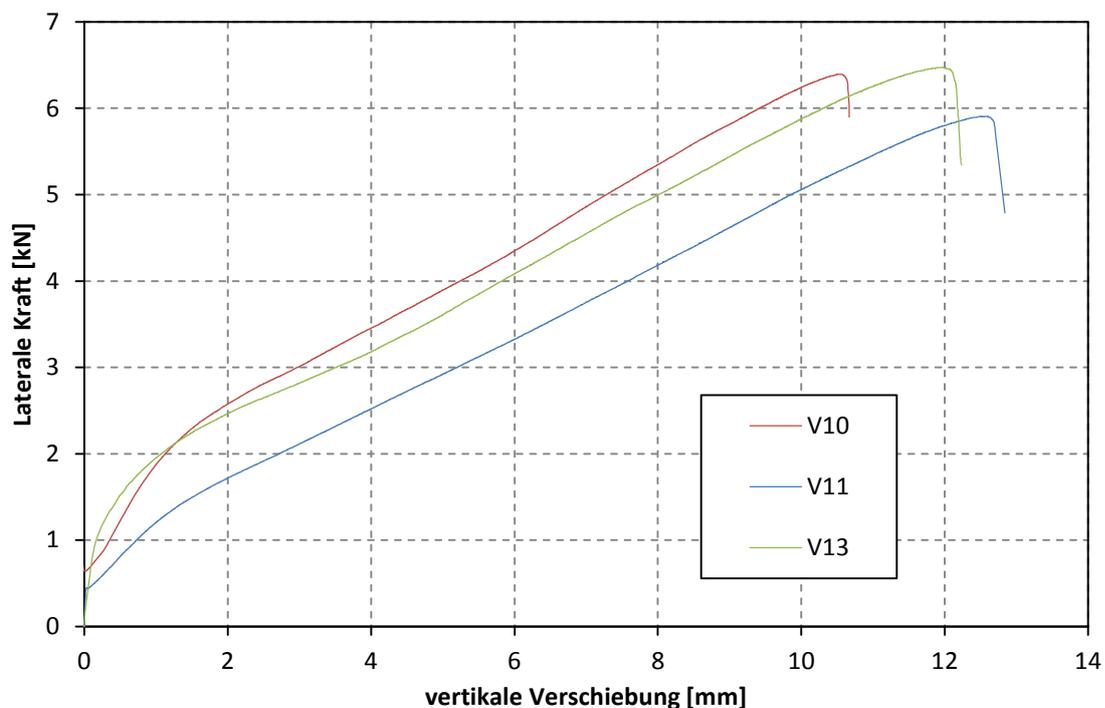


Abbildung 3.11: Kraft-Verschiebungs-Diagramm (Vorversuch V10, V11, V13 - reines Abscheren)

*Tabelle 3.2: ermittelte laterale Tragfähigkeit und Steifigkeit der Vorversuche V10, V11 und V13*

	Laterale Tragfähigkeit $F_v$	Laterale Steifigkeit $K_{ser,v}$
Vorversuch V10	6,4 kN	1,0 kN/mm
Vorversuch V11	5,9 kN	0,5 kN/mm
Vorversuch V13	6,5 kN	0,9 kN/mm

### 3-3.2 VORVERSUCH V12

Bei diesem Vorversuch wurde erstmals die axiale Lastaufbringung getestet und hierfür der in Abbildung 3.12 dargestellte Aufbau verwendet.



*Abbildung 3.12: Versuchsaufbau - Vorversuch V12 - Herausziehen*

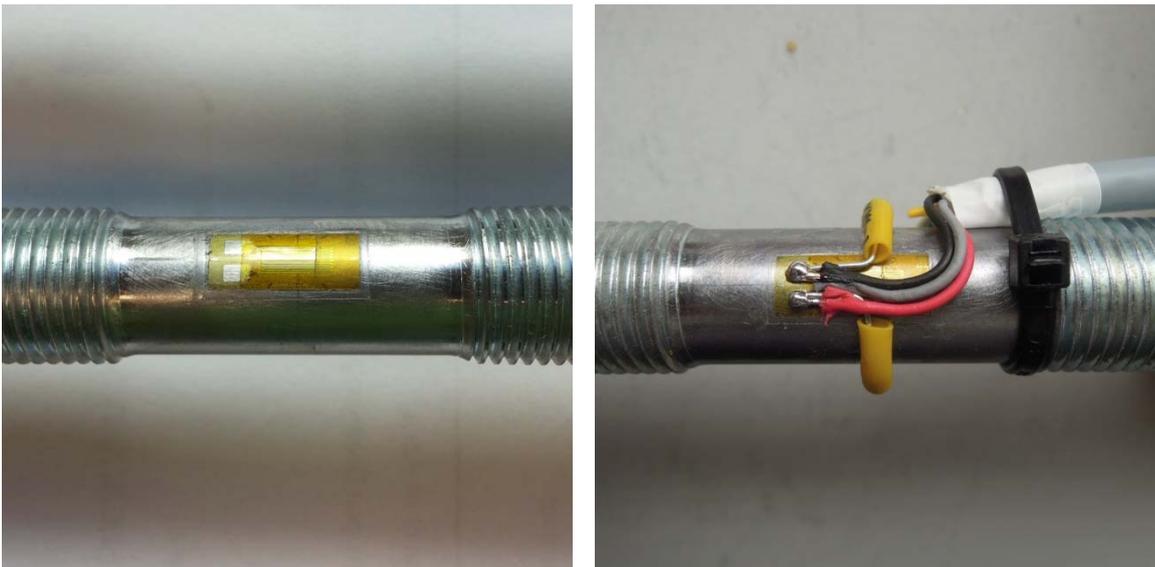
Wie zuvor erwähnt, erfolgte die axiale Beanspruchung mittels einer Feingewindestange beziehungsweise die Steuerung mit dem Festdrehen einer Mutter. Die Verbindung des Anschlussbleches mit der Prüfmaschine diente in diesem Fall nur zur Lagesicherung in vertikaler Richtung. Durch die eingebaute Gelenkkette waren dennoch horizontale Verformungen des Anschlussbleches möglich.

Bei diesem Vorversuch wurde noch keine axiale Last gemessen, da dieser Versuch nur als Überprüfung der Machbarkeit gedacht war. Gemessen wurden lediglich die globalen und lokalen Horizontalverformungen des Anschlussbleches.

Als Ergebnis dieses Versuches konnte festgestellt werden, dass die geplante Lastaufbringung grundsätzlich funktioniert. Des Weiteren zeigte sich, dass eine Verdrehung des Anschlussbleches zu erwarten ist; darauf wird beim Vorversuch V14 noch genauer eingegangen.

### 3-3.3 VORVERSUCH V14

Der Vorversuch V14 war fast identisch zu dem Vorversuch V12, nur dass hier auf der Gewindestange zwei als Halbbrücke geschaltete Dehnmessstreifen (DMS) des Herstellers HBM zur Kraftmessung aufgeklebt waren (siehe Abbildung 3.13).



*Abbildung 3.13: Dehnmessstreifen auf Gewindestange (links: aufgeklebt; rechts: verkabelt)*

Die Funktionsweise von Dehnmessstreifen ist, dass über eine Spannungsänderung  $\Delta V$  in Millivolt pro Volt auf eine Dehnung  $\varepsilon$  in mm/m rückgeschlossen werden kann. Durch eine Kalibrierung dieser Dehnungsmessung kann die Steifigkeit der Stahlstange ermittelt werden beziehungsweise direkt der Zusammenhang zwischen Spannungsänderung und Kraft abgeleitet werden.

In Abbildung 3.14 sieht man links die verwendete Konfiguration zur Kalibrierung der Gewindestange. Bei der Kalibrierung wurde die Zugbelastung kraftgesteuert (250 N/s) mittels der Universalprüfmaschine (Zwick Universal 250) mit mehrmaliger Be- und Entlastung aufgebracht. Der genaue Lastzyklus sah folgendermaßen aus: Belastung auf 5 kN – Entlastung auf 200 N - Belastung auf 10 kN – Entlastung auf 200 N - Belastung auf 15 kN – Entlastung auf 200 N - Belastung auf 20 kN – Entlastung auf 200 N - Belastung auf 25 kN – Entlastung auf 200 N - Belastung auf 30 kN – Halten der Kraft für mindestens 30 Sekunden.

Der Zusammenhang zwischen Spannungsänderung und Kraft ist ein nahezu linearer Verlauf, wie in Abbildung 3.14 rechts am Messergebnis deutlich erkennbar ist. Daher wurde mittels linearer Regressionsanalyse eine Ausgleichsgerade ( $R^2 = 0,9999$ ) ermittelt, welche für die späteren Kraftmessungen mit der Gewindestange als Kalibrierungskurve gilt. Der beschriebene Kalibrierungsprozess wurde an mehreren Tagen durchgeführt und die erhaltenen Kurven stimmen sehr gut überein.

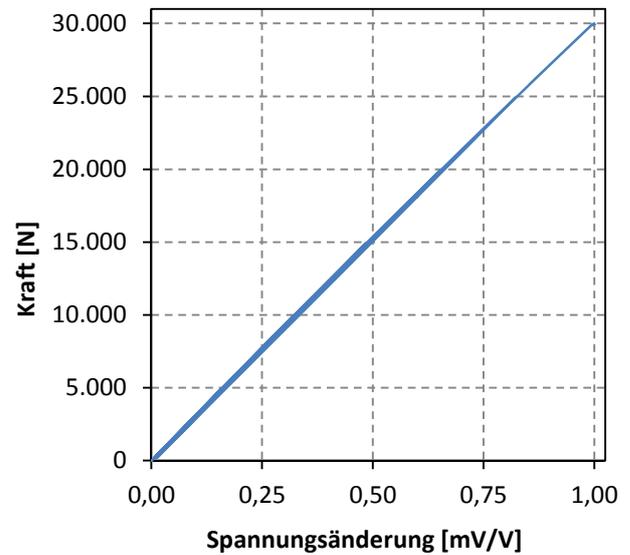
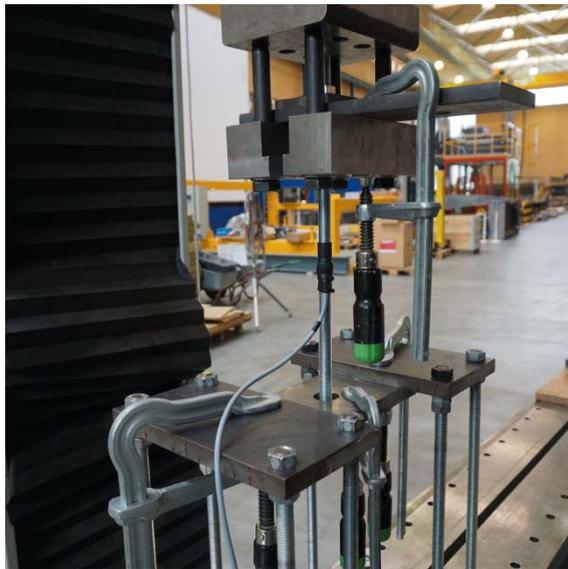


Abbildung 3.14: Kalibrierung der Gewindestange mit DMS (links: Anordnung; rechts: Messergebnis)

Die Gewindestange wurde beim Vorversuch horizontal eingebaut (siehe Abbildung 3.15 links) und gleich wie bei der Kalibrierung rein axial belastet. Die axiale Lastaufbringung erfolgte ident zum Vorversuch V12 mittels des Festziehens der Mutter. Um dabei möglichst geringe Drehwiderstände zu erhalten, wurden zwei Schichten PTFE zur Reibungsverminderung zwischen zwei Beilagbleche gegeben, welche wiederum zwischen Mutter und Stahlwinkel angeordnet waren (siehe Abbildung 3.15 rechts).

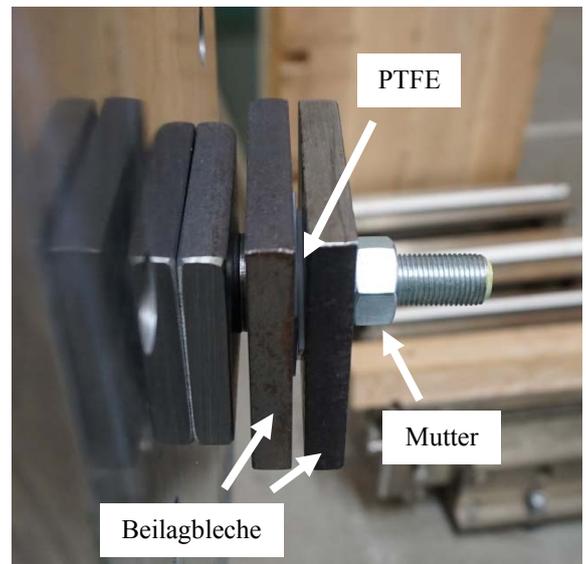
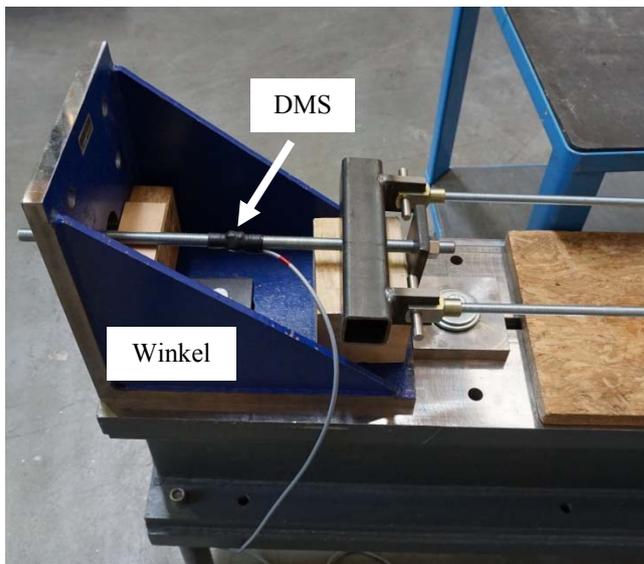


Abbildung 3.15: links: eingebaute Gewindestange mit DMS; rechts: Mutter mit PTFE Schichten

Während des Versuches wurden die lokalen Verformungen zweimal seitlich vom Holzkörper in Höhe und Richtung der Schraubenachse (Wegaufnehmer WA 10-05 und WA 10-06) und einmal 185 mm oberhalb der Schraube in Achsrichtung gemessen. Das Ergebnis dieser Messung ist als Kraft–Verschiebungs-Diagramm in Abbildung 3.16 dargestellt und man erkennt, dass es bei der Beanspruchung zu einer Verdrehung des Anschlussbleches kommt (Unterschied WA 10-07 zu WA 10-05 und WA 10-06). Zwischen den Wegaufnehmern WA 10-05 und WA 10-06 gibt es auch eine geringe Verdrehung, doch durch die geringe Größe ist sie als nicht kritisch zu betrachten.

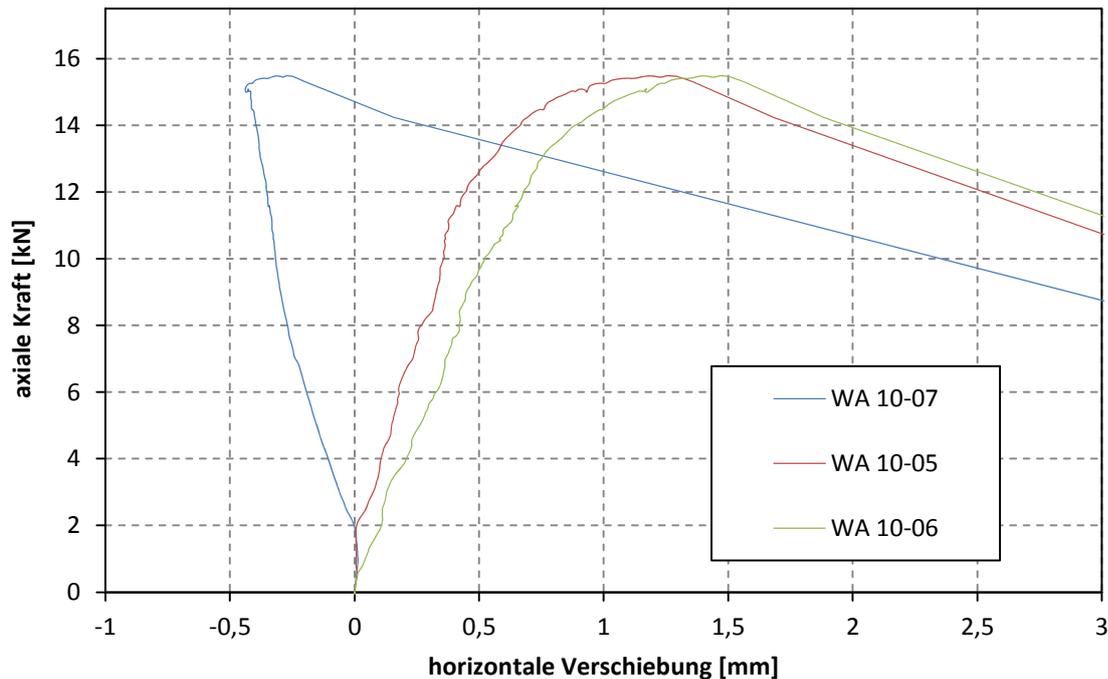


Abbildung 3.16: Kraft–Verschiebungs-Diagramm (Vorversuch V14 – reine axiale Belastung)

### 3-3.4 VORVERSUCH V15

Um die im Vorversuch V14 aufgetretenen Verdrehungen zu verhindern, wurde eine zusätzliche Führung des Anschlussbleches angeordnet. Die Führung bestand aus zwei geschweißten Rahmen, welche mittels drei horizontalen Streben verbunden wurden. Die Streben waren Hohlprofile, die mit innenliegenden Gewindestangen vorgespannt wurden.

Damit die Führung die notwendige horizontale und vertikale Bewegungsmöglichkeit zulässt, aber trotzdem Rotationen des Anschlussbleches verhindert, erfolgte die Lagerung mit Hilfe von Linearlagern der Firma Bosch (siehe Abbildung 3.17). Die Führungsschienen des Linearlagers waren jeweils an den horizontalen und vertikalen Schenkeln der geschweißten Rahmen mittels Schrauben befestigt. Die Fixierung der Laufschiene erfolgte wiederum mit Schrauben am Anschlussblech beziehungsweise am Träger der Prüfmaschine.



*Abbildung 3.17: Führung des Anschlussbleches*

Mit Ausnahme des Hinzufügens der Führung des Anschlussbleches waren der Versuchsaufbau und Ablauf ident wie der des Vorversuches V14.

Die Abbildung 3.18 zeigt das Kraft–Verschiebungs-Diagramm des Vorversuches V15; wieder mit den drei Wegaufnehmern WA 10-07, WA 10-05 und WA 10-06. Vergleicht man dieses Diagramm mit der Abbildung 3.16 erkennt man deutlich den Einfluss der Führung. Die zuvor vorhandene Verdrehung des Anschlussbleches um die horizontale Achse (Unterschied zwischen WA 10-07 und den beiden anderen) war nun nur noch gering und die Verdrehung um die vertikale Achse konnte nahezu vollständig verhindert werden.

Die Tragfähigkeiten und Steifigkeiten der beiden Versuche sind fast gleich groß, wie in Tabelle 3.3 erkennbar ist. Dies ist ein Indiz, dass der Einfluss der Reibung in den Linearlagern vernachlässigbar klein ist.

*Tabelle 3.3: ermittelte axiale Tragfähigkeit und Steifigkeit der Vorversuche V14 und V15*

	axiale Tragfähigkeit $F_{ax}$	axiale Steifigkeit $K_{ser,ax}$
Vorversuch V14	15,5 kN	21,1 kN/mm
Vorversuch V15	15,6 kN	19,6 kN/mm

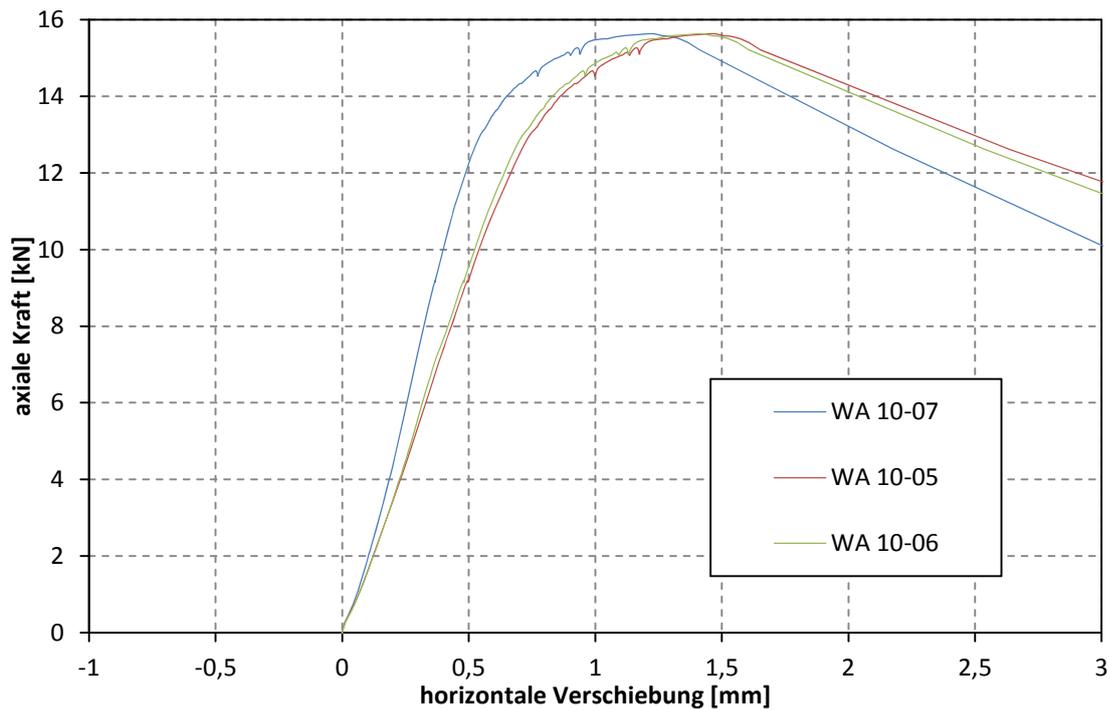


Abbildung 3.18: Kraft-Verschiebungs-Diagramm (Vorversuch V15 – reine axiale Belastung)

### 3-3.5 VORVERSUCHE V16, V17, V18 UND V19

Um den Einfluss der Führung auf die laterale Tragfähigkeit und Steifigkeit zu klären, wurde die Schraube beim Vorversuch V16 gleich wie bei den Vorversuchen V10, V11 und V13 nur lateral beansprucht. Die Prüfanordnung inklusive der Messanordnung ist in Abbildung 3.19 dargestellt.



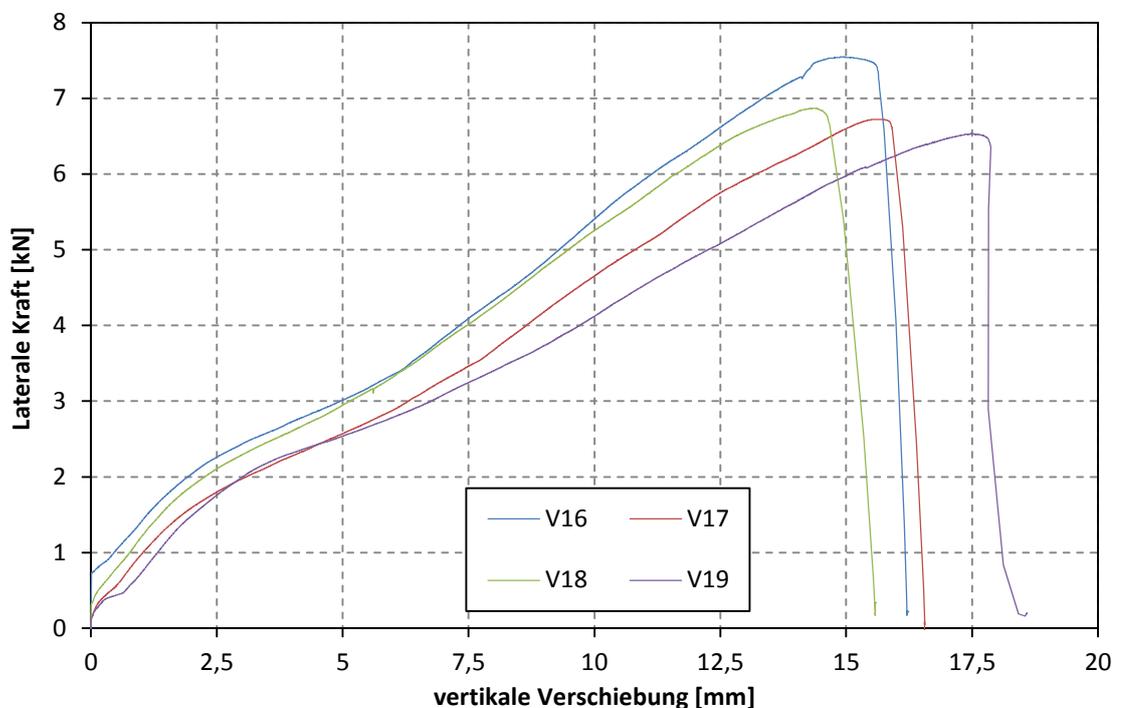
Abbildung 3.19: Prüfaufbau inklusive Messanordnung für Vorversuch V16

Da die Tragfähigkeit des Vorversuches V16 mit 7,5 kN deutlich höher ist, als die zuvor gemessenen Tragfähigkeiten, wurden die Vorversuche V17, V18 und V19 ident zum Vorversuch V16 durchgeführt. Damit wurde geprüft, ob es einen deutlichen Reibungseinfluss durch die Führung gibt. Die Tabelle 3.4 zeigt die ermittelten lateralen Tragfähigkeiten und Steifigkeiten der Vorversuche V16 bis V19.

**Tabelle 3.4: ermittelte laterale Tragfähigkeit und Steifigkeit der Vorversuche V16, V17, V18 und V19**

	laterale Tragfähigkeit $F_v$	laterale Steifigkeit $K_{ser,v}$
Vorversuch V16	7,5 kN	0,5 kN/mm
Vorversuch V17	6,7 kN	0,4 kN/mm
Vorversuch V18	6,9 kN	0,5 kN/mm
Vorversuch V19	6,5 kN	0,4 kN/mm

Abbildung 3.20 vergleicht die Kraft–Verschiebungs-Diagramme der Vorversuche V16, V17, V18 und V19 miteinander. Man erkennt beim Vorversuch V16 die erhöhte Tragfähigkeit. Der Verlauf passt allerdings gut mit den anderen Versuchen zusammen. Beim Vergleich Tragfähigkeiten aus Tabelle 3.4 mit jenen aus Tabelle 3.2 erkennt man eine geringe Steigerung. Diese Tragfähigkeitszunahme sollte mit einer zusätzlichen Prüferie bei den Hauptprüfungen untersucht werden.



**Abbildung 3.20: Kraft–Verschiebungs-Diagramm (Vorversuch V16, V17, V18, V19 – reines Abscheren)**

Da die Konfiguration mit Ergänzung einer Anschlussblechführung alle bisher geforderten Eigenschaften abdecken konnte, wurden nun bei den folgenden Vorversuchen (V20 bis V27) erstmals die kombinierten Tragfähigkeiten (lateral und axial) einer Schraube versuchstechnisch ermittelt. Außerdem sondierte man auch noch den Einfluss der Art der Lastaufbringung (gleichzeitig oder hintereinander) auf die Tragfähigkeit und Steifigkeit.

### 3-3.6 VORVERSUCHE V20 UND V25

Bei diesen beiden Vorversuchen erfolgte die Lastaufbringung zuerst nur axial bis zu einer festgelegten Kraft (V20: 8 kN; V25: 13 kN). Danach wurde die Schraube solange lateral belastet, bis es zum Versagen kam (kombinierte Belastung). Bis zum festgelegten Kraftwert ähneln die axialen Kraft-Verschiebungsverläufe daher jenen aus den beiden Vorversuchen V14 und V15 (reine axiale Belastung).

Beim Vergleich der lateralen Kraft-Verschiebungs-Diagramme der Vorversuche V20 und V25 mit jenen der Vorversuche V17, V18, V19 (reine laterale Belastung) ist eine Reduzierung der lateralen Tragfähigkeit sowie eine erhöhte Steifigkeit zu erkennen (vergleiche Abbildung 3.21).

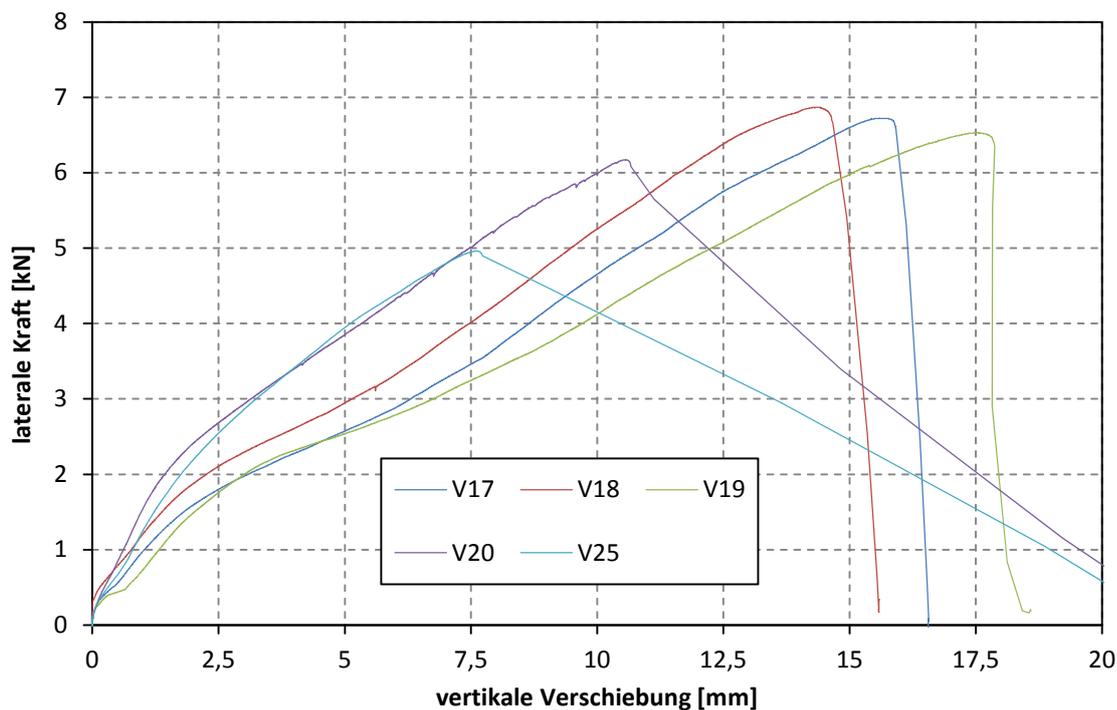


Abbildung 3.21: Vergleich: laterales Kraft-Verschiebungs-Diagramm (Vorversuch V17, V18, V19, V20, V25)

### 3-3.7 VORVERSUCHE V21, V22 UND V27

Die eingedrehten selbstbohrenden Holzschrauben wurden auch bei den Vorversuchen V21, V22 und V27 kombiniert belastet. Die Lastaufbringung erfolgte hier jedoch in umgekehrter Reihenfolge. Zuerst wurde nur die laterale Kraft bis zur gewünschten Größe aufgebracht (V21: 5,2 kN; V22: 6 kN; V27: 5 kN) und anschließend steigerte man die axiale Beanspruchung der Schraube bis zum Versagen.

Die lateralen Kraft-Verschiebungs-Verläufe der Vorversuche V21, V22 und V27 ähneln bis zum Erreichen der Haltekraft jenen der Vorversuche V17, V18 und V19 (reine laterale Belastung)

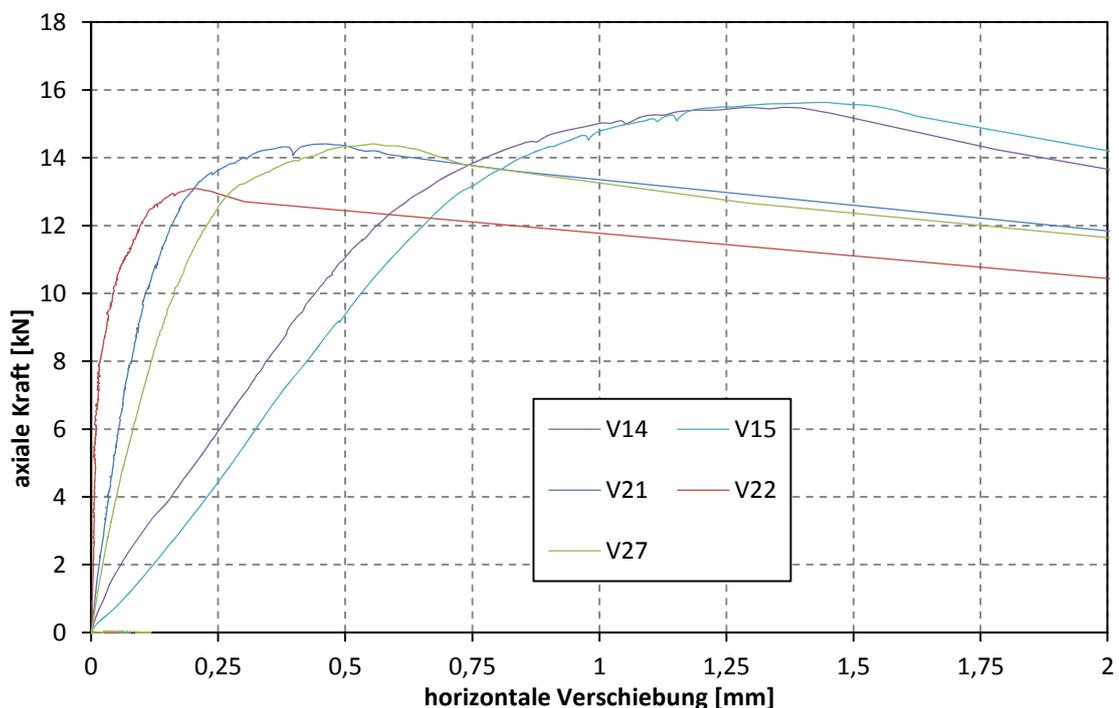


Abbildung 3.22: Vergleich: axiales Kraft-Verschiebungs-Diagramm (Vorversuch V14, V15, V21, V22, V27)

Abbildung 3.22 zeigt den Vergleich der axialen Kraft-Verschiebungs-Diagramme der kombiniert belasteten Vorversuche V21, V22 und V27 mit den rein axial belasteten Vorversuchen V14 und V15. Auch hier erkennt man die Reduzierung der Tragfähigkeit und Erhöhung der Steifigkeit bei kombinierter Belastung.

### 3-3.8 VORVERSUCHE V23, V24 UND V26

Bei den Vorversuchen V23, V24 und V26 wurden die axialen und lateralen Lasten gleichzeitig im konstanten Verhältnis  $F_v/F_{ax} = \tan \beta$  aufgebracht, wobei bei allen Versuchen der Winkel  $\beta$  zwischen Krafrichtung und Schraubenachse geändert wurde (V23:  $\beta = 45^\circ$ ; V24:  $\beta = 22,5^\circ$ ; V26:  $\beta = 10^\circ$ ).

Um diese gleichzeitige Lastaufbringung versuchstechnisch steuern zu können, wurde über die von der Prüfmaschine aufgebrachte laterale Last und dem vorgegebenen Winkel  $\beta$  die planmäßige axiale Last in „Echtzeit“ ermittelt und händisch mittels des Auf- und Zudrehens der Mutter auf der Feingewindestange eingestellt.

Folgend werden die axialen und lateralen Kraft–Verschiebungs-Diagramme der Vorversuche V23, V24 und V26 mit den rein axial beziehungsweise rein lateral beanspruchten Vorversuchen verglichen, um den Einfluss der kombinierten Belastung auf die Tragfähigkeit und die Steifigkeit darzustellen.

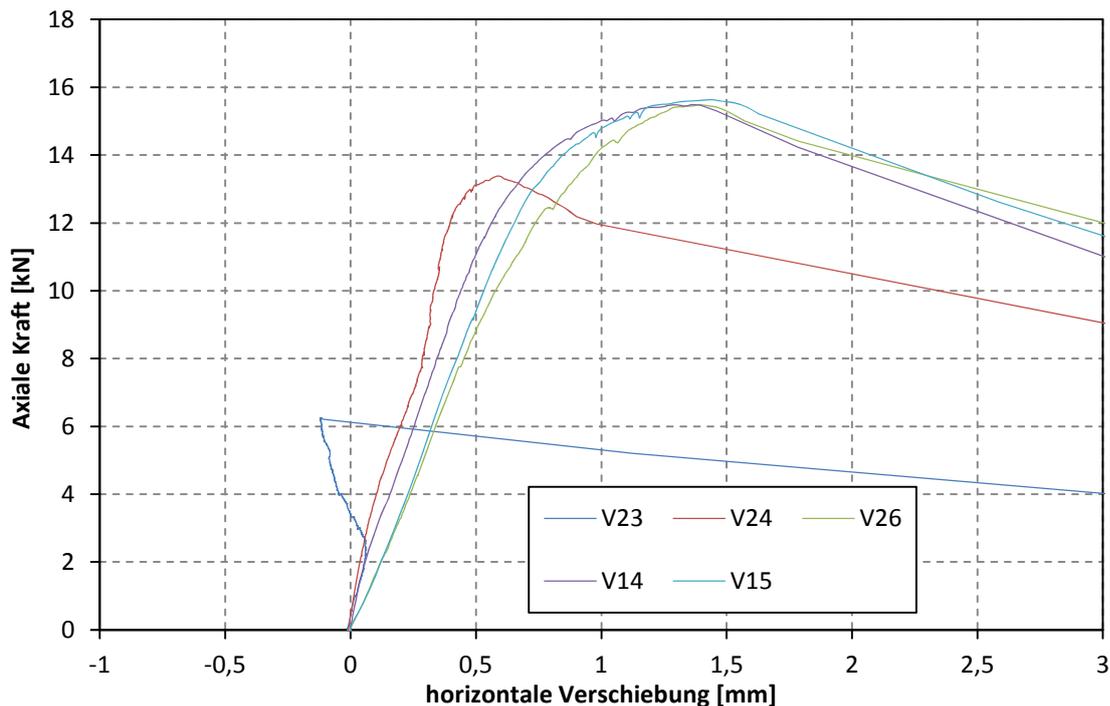


Abbildung 3.23: axiales Kraft–Verschiebungs-Diagramm (Vorversuch V14, V15, V23, V24, V26)

Abbildung 3.23 zeigt den Vergleich der axialen Kraft–Verschiebungs-Diagramme. Man erkennt hier eine deutlichere Tragfähigkeitsreduktion aufgrund der kombinierten Belastung als bei den Vorversuchen V21, V22 und V27 (siehe Abbildung 3.22); ein Anstieg der Steifigkeit ist hier jedoch nicht klar ersichtlich. Die für Vorversuch V23 erkennbare negative Verformung ist auf ein Anpressen des Anschlussbleches am Holzkörper zurückzuführen. Dieses Anpressen resultiert aus der Verformung der Schraube bei lateraler Belastung (Bildung von Fließgelenken und Schiefstellung der Schraube; vergleiche 2-1.1 Abschnitt Seileffekt Abbildung 2.8 und Hauptauswertung Abbildung 5.13 und Abbildung 5.14).

Der Vergleich der lateralen Kraft – Verschiebungs-Diagramme (siehe Abbildung 3.24) zeigt ebenfalls eine deutliche Reduktion der einzelnen Tragfähigkeiten durch die kombinierte Beanspruchung der Schraube. Bei der weiteren Betrachtung von Abbildung 3.24 ist keine wesentliche Erhöhung der lateralen Steifigkeit durch die kombinierte Belastung ersichtlich.

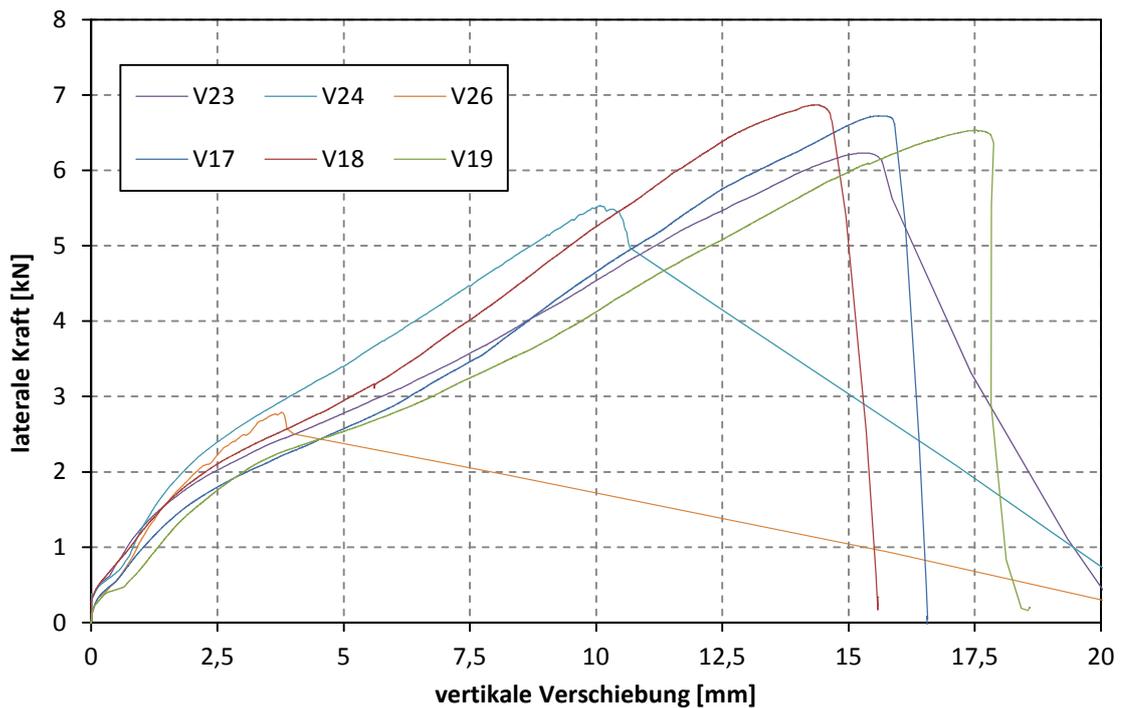


Abbildung 3.24: laterales Kraft-Verschiebungs-Diagramm (Vorversuch V17, V18, V19, V23, V24, V26)

### 3-3.9 ZUSAMMENFASSUNG UND BEURTEILUNG VERSUCHSKONFIGURATION 2

Die Versuchskonfiguration 2 ist mit Hilfe einer zusätzlichen Führung des Anschlussbleches in der Lage, alle geforderten Eigenschaften zu erfüllen. Die Führung verhindert die Rotation des Anschlussbleches, wie klar aus dem Vergleich der Vorversuche V14 mit V15 erkennbar ist. Der Einfluss der Führung auf das Messergebnis durch Reibung ist in axialer Richtung vernachlässigbar klein; in lateraler Richtung kam es jedoch zu einer geringen Tragfähigkeitssteigerung. Daher soll der Einfluss durch Reibung der Führungslager bei den Prüfungen mittels Prüfserien mit und ohne Führung nochmals genauer untersucht werden.

Die axiale Kraftaufbringung mittels Festziehens einer Mutter und die axiale Kraftmessung mittels auf der Feingewindestange aufgeklebten DMS (Dehnmessstreifen) funktioniert ohne Probleme. Durch die Kalibrierung der Gewindestange ist eine ausreichend genaue Kraftmessung möglich.

### 3-4 PRÜFKONFIGURATION

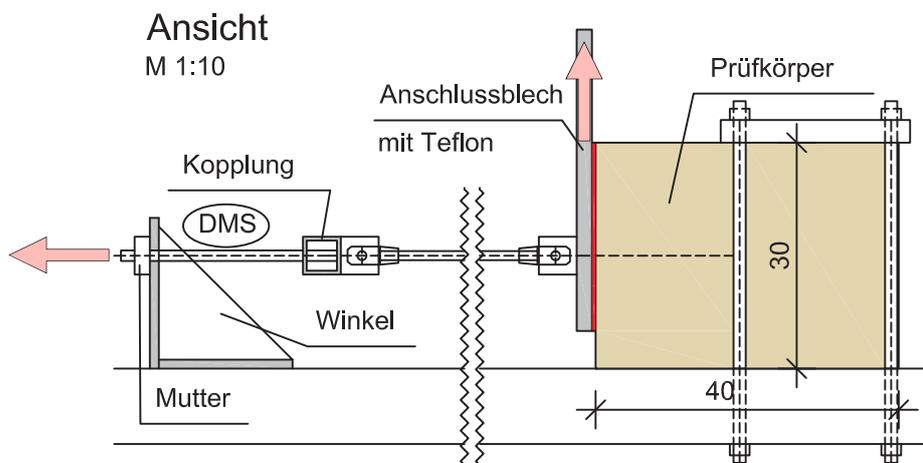


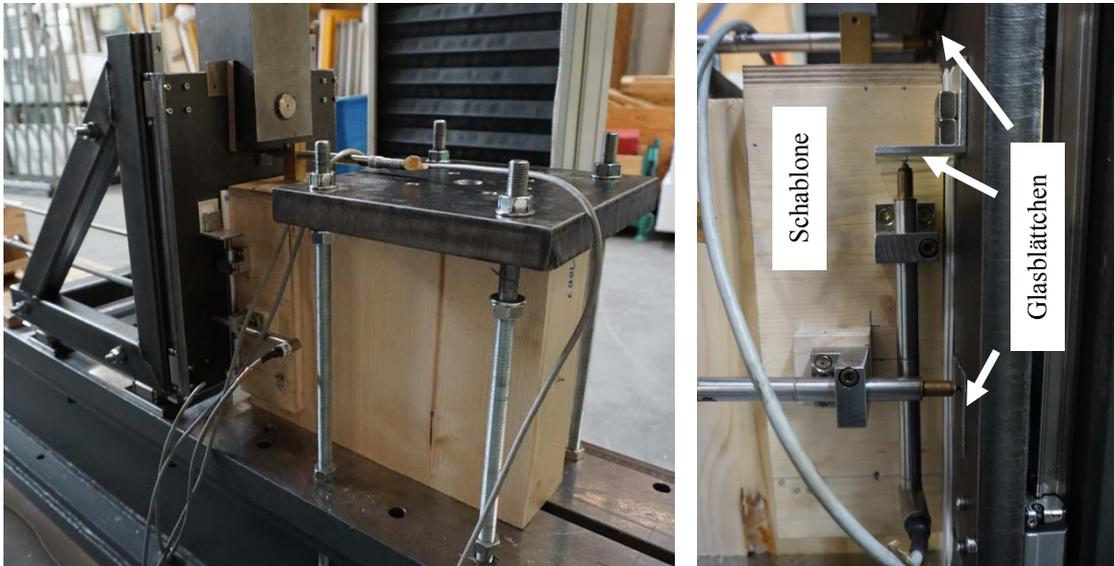
Abbildung 3.25: Prüfkfiguration (oben: umgesetzter Aufbau; unten: schematischer Plan)

Die für die Prüfungen grundsätzlich geltende Prüfkfiguration ist in der Abbildung 3.25 dargestellt. Sie entspricht prinzipiell der Versuchskonfiguration 2 mit Anschlussblechführung, wobei noch weitere, im Folgenden genauer erläuterte, Optimierungen vorgenommen wurden.

Die Verkleinerung der Abmessungen auf 300/400/100 mm (Länge/Breite/Dicke) erleichtert die Herstellung des Prüfkörpers, da nur mehr zwei Hölzer verklebt werden müssen (siehe 4-1.1 Prüfkörper).

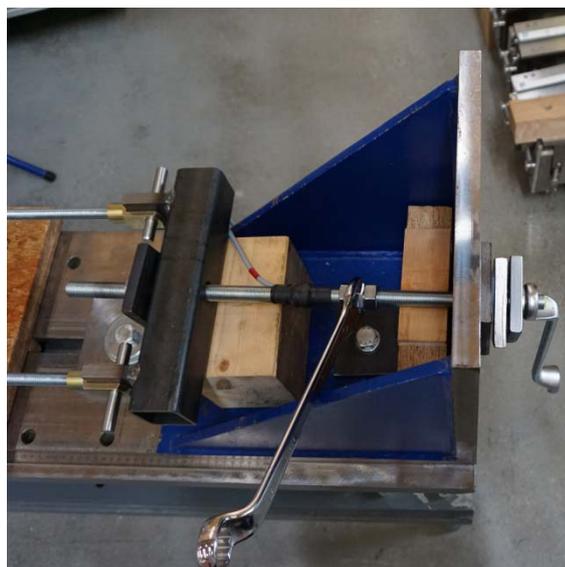
Als weitere Optimierung der Vorversuche werden bei den Prüfungen die Wegaufnehmer auf einer Holzschablone fixiert, um die Montagezeit zwischen den einzelnen Prüfungen zu verkürzen (siehe Abbildung 3.26). Die Schablone selbst wird einfach mittels zwei Schrauben am Prüfkörper befestigt.

Außerdem wird zwischen den Wegaufnehmerköpfen und den Messoberflächen ein Glasblättchen eingefügt, um die Ergebnisse durch Oberflächenunebenheiten nicht zu verfälschen.



*Abbildung 3.26 links: eingebauter Prüfkörper; rechts: Holzschablone zur Befestigung der Wegaufnehmer*

Um keine Torsionsspannungen im Querschnitt des Dehnmessstreifens durch das Festziehen der Mutter zu erhalten, werden drei zusätzliche Muttern auf der Feingewindestange angeordnet. Diese letzte Veränderung ist in Abbildung 3.27 gezeigt.



*Abbildung 3.27 Optimierung der axialen Lastaufbringung*



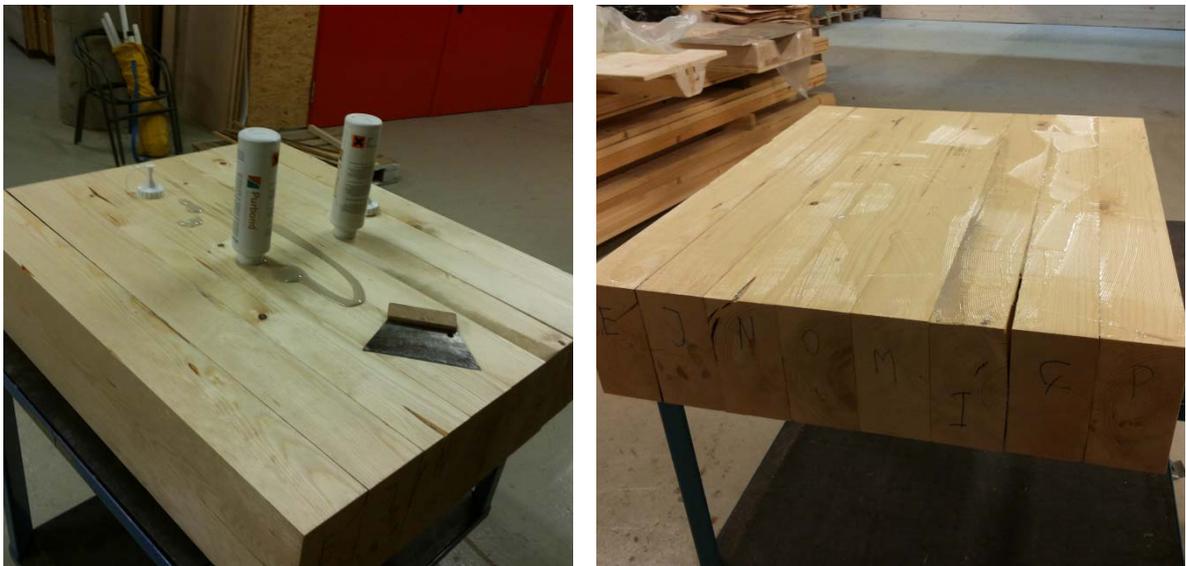
## KAPITEL 4: PRÜFUNGEN

### 4-1 MATERIAL

#### 4-1.1 PRÜFKÖRPER

Die Prüfkörper wurden aus Kanthölzern der Holzart Fichte (Picea Abies) des Bestands des Institutes für Holzbau und Holztechnologie der TU Graz gefertigt. Um Ausreißer der Tragfähigkeit nach oben zu vermeiden, wurde das Holz so sortiert, dass sich möglichst keine Äste im Bereich der später eingedrehten Schrauben befanden.

Die gelagerten Kanthölzer besaßen die Abmessungen ~ 4050/210/110 mm (Länge/Breite/Dicke). Um die gewünschten Abmessungen von 300/400/100 mm (Länge/Breite/Dicke) zu erhalten, waren mehrere Bearbeitungsschritte notwendig. Zuerst wurden die Hölzer auf die Abmessungen: 1000/200/105 mm abgelängt und gehobelt. Nach der Konditionierung in der Klimakammer verklebte man je zwei einzelne Kanthölzer miteinander. Als Klebstoff diente der Polyurethan-Klebstoff PURBOND HB S309, wobei die Dosierung der aufzutragenden Menge von 150 g/m<sup>2</sup> mittels Zahnpachtel erfolgte, wie in Abbildung 4.1 ersichtlich ist.



*Abbildung 4.1: Auftragung von Klebstoff*



*Abbildung 4.2: Prüfkörper in der hydraulischen Presse*

Die Holzkörper wurden mit einem Pressdruck von  $0,6 \text{ N/mm}^2$  für eine Dauer von 4 h in einer hydraulischen Presse belastet. Die Abbildung 4.2 zeigt die sich in der Presse befindenden Prüfkörper. Nach der vollständigen Aushärtung des Klebstoffes wurden die verleimten Holzkörper beidseitig gehobelt und anschließend auf die Länge von je 300 mm gekürzt.

### **Lagerung der Prüfkörper**

Die Prüfkörper wurden entsprechend ÖNORM ISO 554 [28] in einer Klimakammer bei 20 Grad Celsius und einer relativen Luftfeuchte von 65 Prozent gelagert, um eine konstante Holzfeuchte von rund 12 Prozent zu erhalten.

### **Messungen an den Prüfkörpern**

Von den einzelnen Kanthölzern wurde vor dem Verkleben die Rohdichte im konditionierten Zustand bestimmt, wobei die Außenabmessungen mittels Messschieber und die Masse mittels elektronischer Waage gemessen wurden.

Nach der Prüfung schnitt man aus dem knapp oberhalb der Schraube liegenden Holzbereich eine Darrprobe mit den Abmessungen 40/40/160 mm heraus. Von diesen Darrproben wurde wiederum die Rohdichte, aber auch die Holzfeuchte nach ÖNORM EN 13183-1 [20] bestimmt. Dazu wiegt man die Darrproben im feuchten Zustand und trocknet sie anschließend in einem Darrofen bei  $103 \pm 2 \text{ °C}$ , bis die Massendifferenz innerhalb eines Zeitraumes von zwei Stunden kleiner als 0,1 % ist.

Die Holzrohichte im konditionierten Zustand (= Zustand bei Prüfungen) befand sich im Bereich von 488 bis  $612 \text{ kg/m}^3$  (detaillierte Aufstellung aller Prüfungen siehe ANHANG B ). Die ermittelten Mittelwerte, Mediane und Variationskoeffizienten (CoV) der Rohdichten und Holzfeuchten sind für alle Prüferien in Tabelle 4.1 angegeben (ermittelt von den Darrproben).

*Tabelle 4.1: ermittelte Mittelwerte, Mediane und Variationskoeffizienten der Rohdichten und Holzfeuchten*

	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]			Holzfeuchte [%]		
	Mittelwert	Median	CoV	Mittelwert	Median	CoV
<b>Serie 01</b>	535	534	3,9%	13,2%	13,3%	2,0%
<b>Serie 02 + 16</b>	530	535	4,9%	13,3%	13,4%	2,6%
<b>Serie 03</b>	532	533	4,2%	13,3%	13,3%	1,9%
<b>Serie 04</b>	548	548	4,3%	13,5%	13,3%	5,0%
<b>Serie 05</b>	535	538	2,3%	13,3%	13,4%	2,8%
<b>Serie 06</b>	540	545	3,6%	13,1%	13,1%	1,8%
<b>Serie 07A</b>	532	542	3,2%	13,3%	13,3%	0,7%
<b>Serie 07B</b>	551	551	1,7%	13,5%	13,6%	3,1%
<b>Serie 08</b>	543	547	4,0%	13,5%	13,3%	3,8%
<b>Serie 09</b>	539	535	4,1%	13,5%	13,3%	2,3%
<b>Serie 10</b>	554	554	5,4%	13,4%	13,5%	2,2%
<b>Serie 11</b>	540	536	5,1%	13,2%	13,3%	1,9%
<b>Serie 12</b>	546	548	3,5%	13,3%	13,3%	1,8%
<b>Serie 13</b>	537	533	3,7%	13,5%	13,3%	4,3%
<b>Serie 14</b>	538	541	2,7%	13,4%	13,3%	3,3%
<b>Serie 15</b>	537	535	3,9%	13,2%	13,2%	3,0%

## 4-1.2 SELBSTBOHRENDE HOLZSCHRAUBEN

Um bei den hier vorgestellten Untersuchungen einen möglichen Einfluss unterschiedlicher Versagensmechanismen auf das Interaktionsverhalten zu vermeiden, wurden diese durch die Wahl der Verbindungsgeometrie entsprechend vorgegeben. Aufgrund der geringeren Streuung im Vergleich zum Versagensmechanismus „Herausziehen“ wurde für die axiale Beanspruchung ein Versagen auf Stahlbruch festgelegt und durch eine Mindesteindrehtiefe von  $l_{ef} > 20 \cdot d$  gewährleistet [3]. Aus der Verwendung eines „dicken“ Anschlussbleches ( $t \geq d$ ) sowie der großen Einbindetiefe der eingesetzten Holzschraube, resultierte für das laterale Versagen schlussendlich der Versagensmechanismus (e) mit der Bildung von zwei Fließgelenken. Die genauen Ermittlungen der Versagensmodi sind im Abschnitt 5-2.1 angeführt.

Zur Vergleichbarkeit aller Prüfungen wurden für alle Prüfserien derselbe Schraubentyp mit identen Abmessungen verwendet, wobei die technischen Daten der Schraube in Tabelle 4.2 angeführt sind. Außerdem fixierte man auch den Eindrehwinkel von  $90^\circ$  zwischen Faserrichtung und Schraubenachse für alle Prüfserien.

*Tabelle 4.2: Technische Daten der Schrauben [8]*

<b>Ø 6</b>	
<b>Hersteller</b>	Würth
<b>Zulassung</b>	ETA-11-0190 [8]
<b>Typ</b>	Assy Plus
<b>Gewinde</b>	Vollgewinde
<b>Nenndurchmesser <math>d</math> [mm]</b>	6
<b>Gewindekerndurchmesser <math>d_c</math> [mm]</b>	3,9
<b>Kopfdurchmesser <math>d_h</math> [mm]</b>	12
<b>Länge <math>L</math> [mm]</b>	160
<b>Kopfform</b>	Senkkopf
<b>Spitze</b>	Bohrspitze
<b>charakteristischer Wert des Fließmomentes <math>M_{y,k}</math> [Nm]</b>	9,5
<b>charakteristischer Wert der Zugtragfähigkeit <math>f_{tens,k}</math> [kN]</b>	11,0
<b>charakteristischer Wert des Bruchdrehmoments <math>f_{tor,k}</math> [Nm]</b>	10,0

## 4-2 PRÜFSERIEN

Der Prüfplan wird in Tabelle 4.3 dargestellt. Wie ersichtlich, wurden 156 Prüfungen durchgeführt, die in 17 Prüfserien eingeteilt sind. Bei allen Prüfserien wurde das Anschlussblech mit der Führung gegen eine Verdrehungen gesichert. Die einzigen Ausnahmen waren die als Referenz notwendigen Prüfserien 07A und 07B. Durch sie kann der Reibungseinfluss der Führung untersucht und dargestellt werden. Die Prüfserie 16 ist ident zur Prüfserien 02.

*Tabelle 4.3: Prüfplan*

<b>Seriennummer</b>	<b>Winkel <math>\beta</math></b>	<b>Art der Lastaufbringung</b>	<b>Prüfungen pro Serie</b>
<b>01</b>	0°	rein axial bis Versagen	10
<b>02</b>	90°	rein lateral bis Versagen	10
<b>03</b>	10°	gleichzeitig	10
<b>04</b>	25°	gleichzeitig	10
<b>05</b>	45°	gleichzeitig	10
<b>06</b>	70°	gleichzeitig	10
<b>07A</b>	0°	rein axial bis Bruch ohne Führung	5
<b>07B</b>	90°	rein lateral bis Bruch ohne Führung	5
<b>08</b>	~ 10°	zuerst axial bis 13,0 kN; dann lateral bis Versagen	10
<b>09</b>	~ 10°	zuerst lateral bis 2,3 kN; dann axial bis Versagen	10
<b>10</b>	~ 25°	zuerst axial bis 10,4 kN; dann lateral bis Versagen	10
<b>11</b>	~ 25°	zuerst lateral bis 4,8 kN; dann axial bis Versagen	10
<b>12</b>	~ 45°	zuerst axial bis 5,6 kN; dann lateral bis Versagen	10
<b>13</b>	~ 45°	zuerst lateral bis 5,6 kN; dann axial bis Versagen	10
<b>14</b>	~ 70°	zuerst axial bis 2,2 kN; dann lateral bis Versagen	10
<b>15</b>	~ 70°	zuerst lateral bis 6,0 kN; dann axial bis Versagen	10
<b>16</b>	90°	rein lateral bis Versagen	6

Jede von den Prüfungen (entsprechend auch Prüfkörpern) erhält eine eindeutige Prüfnummer, die folgend aufgebaut ist. Sie besteht aus der zweistelligen Seriennummer und einer fortlaufenden einstelligen Zahl (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 0), die mittels Bindestrich getrennt sind. Zum Beispiel: 12-7 oder 08-0.

Der in Tabelle 4.3 angeführte Winkel  $\beta$  (zwischen resultierender Kraft und Schraubenachse) ist bei den Prüfserien 08 bis 15 nur ein Richtwert für den Endwinkel, der beim Erreichen des Versagens der Schraube vorhanden ist. Bei den Prüfserien 08, 10, 12, 14 wird der Winkel mittels der lateralen Kraftkomponente von  $0^\circ$  beginnend bis zum Bruch der Schraube gesteigert. Umgekehrtes gilt für die Serien 09, 11, 13, 15, da hier der Winkel mit Hilfe der axialen Komponente von  $90^\circ$  beginnend verkleinert wird.

Um die Rohdichteverteilung zwischen den einzelnen Prüfserien möglichst konstant zu halten, wurden zunächst alle Prüfkörper entsprechend ihrer Rohdichte (des Holzkörpers vor der Verklebung) sortiert und anschließend gleichmäßig auf die Prüfserien aufgeteilt.

Die Mittelwerte der Rohdichten der Darrproben der einzelnen Serien lagen schlussendlich zwischen  $530$  und  $554 \text{ kg/m}^3$  und der Variationskoeffizient (CoV) zwischen 1,7 und 5,4 Prozent. Die relativ geringen Werte der Variationskoeffizienten lassen sich vor allem auf die geringe Streuung des Grundmaterials zurückführen (siehe Tabelle 4.1).

## 4-3 PRÜFDURCHFÜHRUNG

---

Der Ein- und Ausbau des Prüfkörpers funktionierte relativ einfach und schnell. Zu Beginn wurde der Holzkörper mittels Stahlplatte gegen den Prüfmaschinenträger gespannt und damit in seiner Lage fixiert. Als nächstes wurde das Anschlussblech mit dem Prüfkörper über die zu prüfende Schraube verbunden. Bei allen Prüfungen wurde die Schraube mittels eines Drehmomentschlüssels mit  $8 \text{ Nm}$  festgezogen, um die Kontaktfuge zwischen Anschlussblech und Prüfkörper zu schließen. Anschließend schraubte man noch die Schablone mit den montierten Wegaufnehmern am Prüfkörper fest. Der Ausbau konnte aufgrund eines Versagens der Schraube noch schneller durchgeführt werden, indem man die Messschablone abnahm und die Stahlplatte löste.

Die Prüfungen selbst liefen wie zuvor im Prüfplan vorgesehen ab. Während der Prüfung wurden die axiale und die laterale Kraft gemessen. Außerdem maßen die Wegaufnehmer dreimal die axiale Verschiebung und zweimal die laterale Verschiebung. Über jede Prüfung wurde zusätzlich ein Handprotokoll mit den maximalen Kräften sowie mit eventuellen Besonderheiten der Prüfung geführt.

Die Geschwindigkeit der lateralen Lastaufbringung erfolgte immer konstant mit  $3 \text{ mm/min}$  weggesteuert. Bei der axialen Lastaufbringung wurde ebenfalls versucht, eine konstante zeitliche Zunahme des Wegs zu bekommen. Jedoch war dies durch die händische Steuerung nicht so exakt, wie bei der lateralen Lastaufbringung. Die axiale Geschwindigkeit wurde so gewählt, dass der Bruch beziehungsweise der axiale Lastzielwert circa 90 Sekunden nach Beginn der axialen Lastaufbringung ( $\pm 30$  Sekunden) erreicht war.

Bei den Prüfungen wurden, wie aus Tabelle 4.3 ersichtlich, drei unterschiedliche Arten der Lastaufbringung untersucht. Zum Einem wurde die gleichzeitige Aufbringung beider Kraftkomponenten im konstanten Verhältnis von  $\tan \beta$  zueinander und zum Anderen die Aufbringungen der Kräfte hintereinander untersucht. Beim hintereinander Aufbringen der Kräfte gab es zwei Möglichkeiten: Entweder wurde zuerst die axiale Belastung bis zu einer fixierten Kraft gesteigert und danach die laterale Kraft bis zum Versagen erhöht oder zuerst die lateral Belastung bis zu einer fixierten Kraft gesteigert und danach die axiale Kraft bis zum Versagen erhöht.

Die Durchführungsreihenfolge der Prüfungen entsprach ihrer Prüfkörpernummer. Es wurde bei Serie 01 begonnen und alle zehn Prüfungen durchgeführt und danach zur nächsten Serie weitergegangen. Die einzige Ausnahme stellten die Prüfserien 07A und 07B dar, da sie keine Führung des Anschlussbleches besaßen und durch diesen Umbauaufwand erst am Ende geprüft wurden. Die Abbildung 4.3 zeigt den Prüfaufbau der Serien 07A und 07B.



*Abbildung 4.3 Prüfaufbau der Serien 07A und 07B (ohne Führung des Anschlussbleches)*



## KAPITEL 5: ERGEBNISSE UND DISKUSSION

### 5-1 AUSWERTUNG

Folgend werden die Methoden zur Ermittlung der Tragfähigkeiten und Steifigkeiten aus den Messergebnissen der Prüfungen näher beschrieben.

#### 5-1.1 TRAGFÄHIGKEIT

Die axiale / laterale Tragfähigkeit ist die in einer Prüfung maximal erreichte axiale / laterale Kraft. Es ist jedoch darauf zu achten, dass, falls eine der beiden Kräfte konstant gehalten wird, nicht der maximale Wert von der nahezu konstant gehaltenen Kraft die Tragfähigkeit ist. In so einem Fall entspricht die Tragfähigkeit der zeitlich entsprechenden Kraft, die beim Erreichen der maximalen Kraft in der jeweils anderen Belastungsrichtung vorhanden ist.

#### 5-1.2 STEIFIGKEIT

In Anlehnung an die ÖNORM EN 26891 [26] kann die Steifigkeit  $K_{ser}$  von mechanischen Verbindungsmitteln als Sekantenmodul im Kraft-Verschiebungs-Diagramm ermittelt werden. Der erste Bestimmungspunkt liegt bei 10 Prozent und der zweite befindet sich bei 40 Prozent der geschätzten Höchstlast. Die geschätzte Höchstlast darf laut [26] um maximal 20 Prozent von der tatsächlichen Maximallast abweichen.

Um die Ungenauigkeiten aus der Wahl der geschätzten Höchstlast zu verhindern, kann die Steifigkeitsermittlung auch in Anlehnung an die ÖNORM EN 12512 [19] erfolgen. Dabei wird die Sekantensteifigkeit verwendet, welche über die Verschiebung beim Erreichen von 10 und 40 Prozent der tatsächlichen Maximallast definiert ist (siehe Formel (5.1)).

$$K_{ser} = \frac{F_{0,4} - F_{0,1}}{w_{0,4} - w_{0,1}} \quad (5.1)$$

$K_{ser}$	Verschiebungsmodul [N/mm]
$F_{0,4}, F_{0,1}$	40 % beziehungsweise 10 % der Maximallast [N]
$w_{0,4}, w_{0,1}$	Verformung bei 40 % beziehungsweise bei 10 % der Maximallast [mm]

Der Nachteil dieser Methode liegt jedoch darin, dass der Bereich der Steifigkeitsermittlung nicht konstant gehalten werden kann. Da es des Weiteren eine Beeinflussung der axialen und der lateralen Tragfähigkeit untereinander gibt, ist bei den Prüfungen nicht überall dieselbe Tragfähigkeit zu erreichen. Dies verstärkt den beschriebenen Effekt und erschwert den Vergleich von so ermittelten Steifigkeiten zwischen den einzelnen Prüfserien erheblich.

Daher werden für die hier durchgeführten Betrachtungen der Steifigkeit feste Kraftgrenzen für die Ermittlung der Steifigkeit definiert. Die laterale Steifigkeit wird im Bereich von 1,0 bis 2,0 kN und die axiale Steifigkeit im Bereich von 1,0 bis 5,0 kN ermittelt (Ausnahme: bei Prüfserien 05, 06 und 14 wird aufgrund der geringen axialen Last der Bereich auf 1,0 bis 2,0 kN verkleinert). Die so definierten Bereiche entsprechen in etwa 10 beziehungsweise 40 Prozent der reinen lateralen/axialen Tragfähigkeit.

### 5-1.3 BEURTEILUNG DER MESSERGEBNISSE

Vor der weiteren Verwendung der einzelnen Kenngrößen wurden diese einer Ausreißerbereinigung nach Tukey unterzogen. Dabei wird für jede Prüfserie ein Boxplot erstellt, wobei die Whisker über den (maximal) 1,5-fachen Interquartilsabstand definiert sind. Alle Werte, welche außerhalb der Whisker liegen, werden demzufolge als Ausreißer bezeichnet und für die weiteren Betrachtungen nicht herangezogen. Des Weiteren ist anzumerken, dass die Ermittlung der Ausreißer für die Tragfähigkeiten und Steifigkeiten unabhängig voneinander durchgeführt wurde. Dies hat wiederum zur Folge, dass Ausreißer der Tragfähigkeit keine Ausreißer der Steifigkeit sein müssen und umgekehrt.

## 5-2 TRAGFÄHIGKEITEN

---

### 5-2.1 RECHNERISCHE ABSCHÄTZUNG DER TRAGFÄHIGKEITEN

Die folgenden rechnerischen Abschätzungen der Tragfähigkeiten und Steifigkeiten sind notwendig, um die Ergebnisse der Prüfungen auch mit den vorhandenen Berechnungsmodellen vergleichen zu können. Für den Vergleich ist zu beachten, dass mit den Modellen die charakteristischen Tragfähigkeiten ermittelt werden und nicht die Bemessungswerte oder die Mittelwerte.

### 5-2.1.1 Tragfähigkeit bei ausschließlich axialer Beanspruchung

Die axiale Tragfähigkeit wird nach den Regelungen der ETA-11/0190 [8] ermittelt. Die bei der Prüfung eingebaute Schraube ( $\delta = 90^\circ$ ) hat eine effektive Gewindelänge von 135 mm und einen Nenndurchmesser von 6 mm. Die Zugfestigkeit  $f_{\text{tens}}$  und der Ausziehparameter der Schraube  $f_{\text{ax,k}}$  werden direkt aus der Zulassung entnommen. Die Formeln zur Berechnung sind dem Abschnitt 2-1.1.1 zu entnehmen. Die ermittelten Ergebnisse sind in der Tabelle 5.1 aufgelistet, wobei die axiale Tragfähigkeit das Minimum der Zugfestigkeit der Schraube und der Herausziehtragfähigkeit darstellt. Aufgrund der höheren Festigkeiten des Stahlbleches im Vergleich mit Holz, ist der Versagensmodus Kopfdurchziehen hier nicht relevant.

*Tabelle 5.1: rechnerische charakteristische axiale Tragfähigkeit der Schraube*

Schraubenzugtragfähigkeit $F_{\text{t,k}}$	Tragfähigkeit auf Herausziehen $F_{\text{ax,k}}$	axiale Tragfähigkeit $R_{\text{ax,k}}$
11,0 kN	12,2 kN	<b>11,0 kN</b>

### 5-2.1.2 Tragfähigkeit bei ausschließlich lateraler Beanspruchung

Auch die laterale Tragfähigkeit wird nach der für die geprüften Schrauben geltenden Zulassung ETA-11/0190 [8] berechnet, wobei diese teilweise auf die ÖNORM EN 1995-1-1 [25] verweist. Alle verwendeten Formeln sind im Abschnitt 2-1.2.1 angegeben. Das Fließmoment der Schraube ist in ETA-11/0190 [8] mit 9,5 kNm angegeben und die Berechnung der Lochleibungsfestigkeit wird mit Hilfe der Formel (2.37) durchgeführt ( $\rho_k = 490 \text{ kg/m}^3$ ). Die Ermittlung des Versagensmodus erfolgt mit Hilfe des in Abbildung 2.10 dargestellten Mlllerdiagramms, wobei die Anschlussblechdicke  $t = 20 \text{ mm}$  beträgt. Man erhält den erwarteten Versagensmodus (e) bei dem sich zwei Fliegelenke ausbilden, wodurch auch der Seileffekt (Formel (2.25)) die Tragfähigkeit nochmals erhöht. In Tabelle 5.2 sind die berechneten Einzelkomponenten und die laterale Gesamttragfähigkeit angeführt.

*Tabelle 5.2: rechnerische charakteristische laterale Tragfähigkeit der Schraube*

laterale Tragfähigkeit nach Johansen $F_{\text{v,k,Johansen}}$	Erhöhung der Tragfähigkeit durch Seileffekt $\Delta R_k$	laterale Tragfähigkeit $R_{\text{v,k}} = F_{\text{v,k,Johansen}} + \Delta R_k$
2,66 kN	2,66 kN	<b>5,3 kN</b>

### 5-2.1.3 Tragfähigkeiten bei kombinierter Beanspruchung

Mittels der in Formel (2.45) angeführten quadratischen Interaktion (Abschnitt 2-1.3.1) und über den im Prüfplan festgelegten Winkel  $\beta$ , der mit Hilfe der Winkelfunktionen den Zusammenhang von lateraler und axialer Kraft darstellt, werden die Tragfähigkeiten von den kombiniert beanspruchten Prüfungen abgeschätzt. Die ermittelten Tragfähigkeiten sind in der Tabelle 5.3 aufgelistet, jedoch sind aufgrund von den Vorversuchen und den Prüfergebnissen von Blaß et al. [4] höhere Traglasten zu erwarten.

*Tabelle 5.3: rechnerische charakteristische Tragfähigkeiten der Schraube bei kombinierter Belastung*

Winkel $\beta$	axiale Tragfähigkeit $R_{ax,k}$	laterale Tragfähigkeit $R_{v,k}$
0°	11,00 kN	0,00 kN
10°	10,33 kN	1,82 kN
25°	7,90 kN	3,69 kN
45°	4,77 kN	4,77 kN
70°	1,90 kN	5,22 kN
90°	0,00 kN	5,30 kN

## 5-2.2 PRÜFTECHNISCH ERMITTELTE TRAGFÄHIGKEITEN

Die gemessenen Tragfähigkeiten und Steifigkeiten sind für alle Prüfungen im ANHANG C angeführt. Außerdem zeigt der ANHANG D die axialen und lateralen Kraft-Verschiebungs-Diagramme der Prüfserien.

### 5-2.2.1 Tragfähigkeit bei ausschließlich axialer Beanspruchung

Die gemessenen Tragfähigkeiten nach der Ausreißerbereinigung befinden sich im Bereich von 13,6 kN bis 13,9 kN bei einem Mittelwert von 13,7 kN; der Variationskoeffizient CoV der Prüfserie 01 beträgt 0,7 %. Das empirische 5%-Quantil beträgt 13,59 kN und der nach ÖNORM EN 14358 [23] ermittelte charakteristische Wert liegt bei 12,3 kN. Vergleicht man diese Werte mit der axialen Tragfähigkeit laut der gültigen Zulassung (ETA-11/0190 [8];  $F_{ax,k} = 11$  kN), so erkennt man ein Unterschätzen der Tragfähigkeit in der Zulassung.

Um die Größe der Reibungskraft, die durch die Führung entsteht, abschätzen zu können, vergleicht man die Prüfserie 01 mit der Prüfserie 07A ( $F_{ax,k} = 13,1 \text{ kN}$  bis  $13,8 \text{ kN}$ ; Mittelwert  $13,4 \text{ kN}$ ). Es wurden die Mediane und die Mittelwerte der beiden Serien mittels Wilcoxon-Mann-Whitney Test und Student t-Test auf Signifikanz getestet (Signifikanzniveau 5%). Beide Tests bestätigen, dass es keine signifikante Abweichung der beiden Serien gibt und damit auch kein wesentlicher Einfluss durch Reibung zu erwarten ist.

Zusätzlich zu den bisher angeführten Prüfungen wurden zehn Schrauben auch mittels der Standardzugprüfkonfiguration nach ÖNORM EN 14592 [24] auf ihre Stahlbruchtragfähigkeit getestet und es wurde eine mittlere Tragfähigkeit von  $13,2 \text{ kN}$  bei einem Variationskoeffizienten CoV von  $1,5 \%$  gemessen. Diese Messergebnisse stimmen mit jenen der neuen Prüfkonfiguration gut überein und bestätigen nochmals den geringen Reibungseinfluss der Führung.

### 5-2.2.2 Tragfähigkeit bei ausschließlich lateraler Beanspruchung

Die Prüfserien 02 und 16 liefern maximal aufnehmbare laterale Kräfte von  $4,93 \text{ kN}$  bis  $7,26 \text{ kN}$  (Mittelwert =  $6,3 \text{ kN}$ ; empirisches 5 %-Quantil =  $5,2 \text{ kN}$ ). Der rechnerisch nach ÖNORM EN 1995-1-1 [25] ermittelte charakteristische Wert ( $F_{v,k} = 5,3 \text{ kN}$ ) stimmt gut mit dem empirischen 5 %-Quantil überein, jedoch ist der laut ÖNORM EN 14358 [23] ermittelte charakteristische Wert ( $4,9 \text{ kN}$ ) geringer.

Der sich für diese Prüfserie errechnete Variationskoeffizient CoV beträgt  $12 \%$  und liegt damit deutlich höher als jener bei ausschließlich axialer Belastung. Die Begründung dafür ist, dass das axiale Versagen ein reines Stahlzugversagen darstellt (eher geringe Streuungen) und beim lateralen Versagen das Fließmoment und der Holzprüfkörper (größere Streuungen der Eigenschaften), durch zum Beispiel die Lochleibungsfestigkeit, Einfluss auf das Ergebnis haben.

Im Gegensatz zu den Vorversuchen kam es bei den Prüfungen ohne Anschlussblechführung im Vergleich zu jenen mit Führung zu einer geringen Steigerung der mittleren Tragfähigkeit. Bei der Prüfserie ohne Führung (Prüfserie 07B) wurden Tragfähigkeiten von  $6,1 \text{ kN}$  bis  $6,8 \text{ kN}$  (Mittelwert =  $6,5 \text{ kN}$ ) erzielt. Die Messdaten der Serie 07B wurden mit jenen der Serien 02 und 16 (mit Führung) mittels Wilcoxon-Mann-Whitney Test und Student t-Test auf Signifikanz getestet. Diese Analysen zeigten, dass es keinen signifikanten Unterschied bei Prüfungen mit und ohne Führung gibt und so kein wesentlicher Einfluss der Führung zufolge von Reibung vorhanden ist.

### 5-2.2.3 Tragfähigkeiten bei kombinierter Beanspruchung

Abbildung 5.1 zeigt die Punktwolke aller durchgeführten Prüfungen, wobei die einzelnen Prüfserien durch die Punktfarben unterschieden werden. Aus dieser Abbildung ist deutlich erkennbar, dass es eine Interaktion zwischen axialer und lateraler Tragfähigkeit gibt. Beim Vergleich der Streuungen erkennt man, dass bei ausschließlich axialer Belastung (CoV =  $0,7 \%$ ) eine deutlich geringere Streuung als bei ausschließlich lateraler Belastung (CoV =  $12 \%$ ) vorhanden ist. Zusätzlich sieht man, dass bei kombinierter Beanspruchung die Reihenfolge der Lastaufbringung einen Einfluss auf die Streuung besitzt.

Des Weiteren sieht man in Abbildung 5.1, dass bei den Prüfserien 11, 13 und 15 (konstante laterale Belastung) im Vergleich zu ihren entsprechenden Prüfserien (04, 05, 06 = gleichzeitige Belastung beziehungsweise 10, 12, 14 = konstante axiale Belastung) höhere axiale Tragfähigkeiten erzielt werden. Diese Tragfähigkeitssteigerung zeigt deutlich den möglichen Einfluss der Art der Lastaufbringung. Bei den Serien 11, 13 und 15 wurde zuerst die laterale Komponente aufgebracht, welche mindestens 4,8 kN entsprach. Diese Last ist so groß, dass die Schraube sich bereits verbogen hat und somit auch der Seileffekt die Tragfähigkeit erhöht. Eine schlüssige Begründung der Laststeigerung in Kombination mit der axialen Beanspruchung konnte jedoch nicht gefunden werden.

Zusätzlich ist in Abbildung 5.1 eine geringfügige Tragfähigkeitssteigerung der Serien 12 und 14 im Vergleich zu den gleichzeitig belasteten Serien ersichtlich.

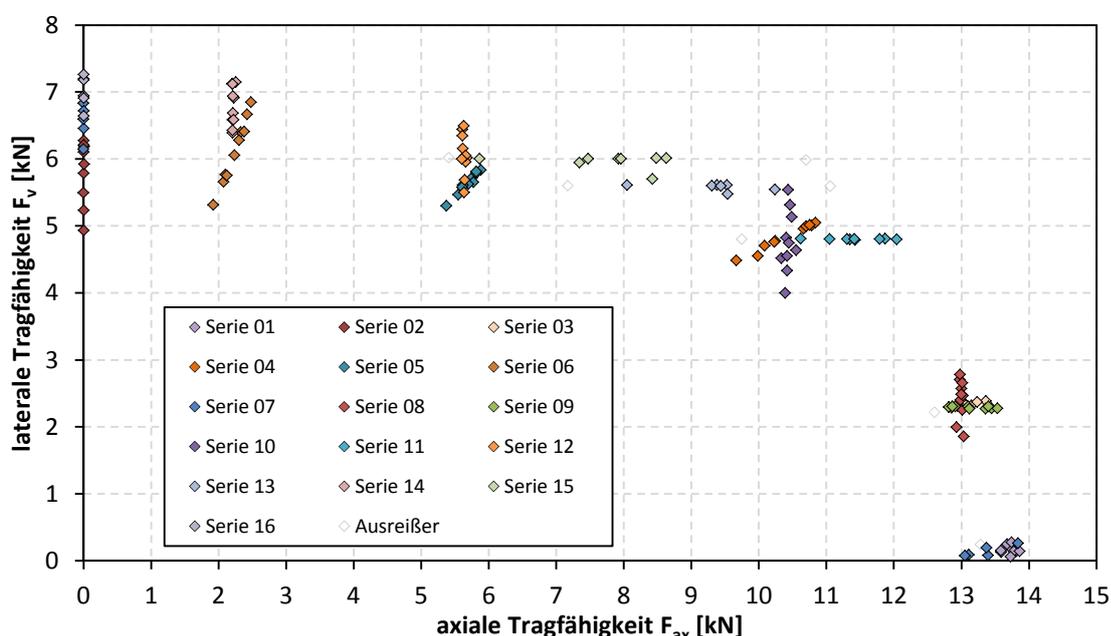


Abbildung 5.1: Punktwolke - Interaktion laterale und axiale Tragfähigkeit

Abbildung 5.2 stellt die Veränderung der Gesamttragfähigkeit in Abhängigkeit des Winkels  $\beta$  zwischen Krafrichtung und Schraubenachse bei gleichzeitiger Lastaufbringung dar. Jeder Boxplot entspricht einer Prüfserie und besteht aus Mittelwert (rotes Quadrat), charakteristischem Wert laut ÖNORM EN 14358 [23] (oranger Kreis), der Box (bestehend aus Median, unteres Quartil und oberes Quartil) und den oberen und unteren Whisker (als der maximal 1,5-fache Interquartilsabstand definiert).

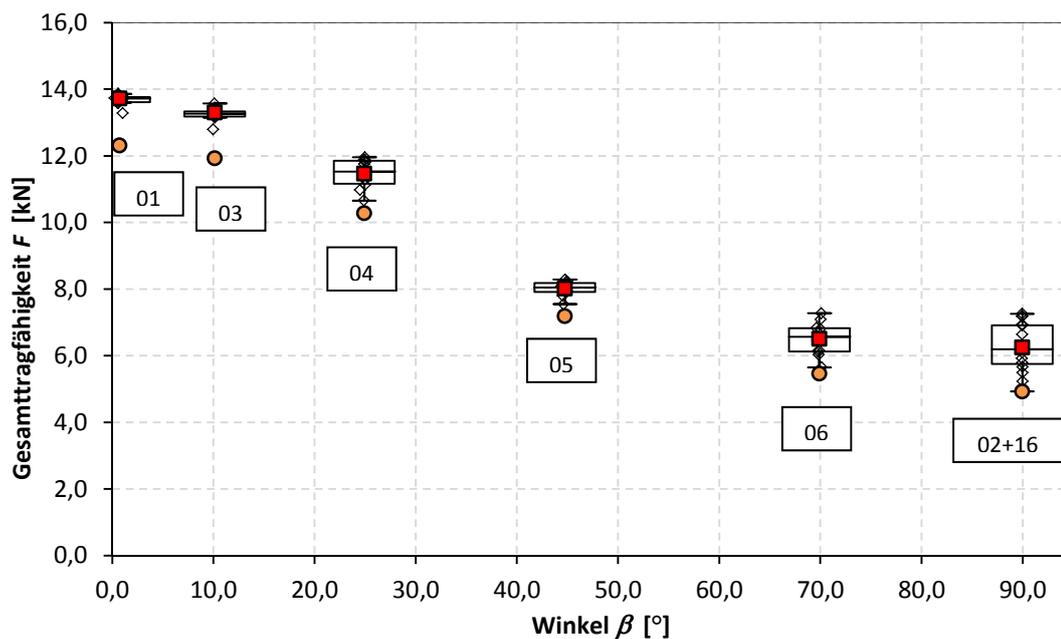


Abbildung 5.2: Boxplots Serien 01, 02+16, 03, 04, 05, 06 – gleichzeitige Belastung

Die Verläufe der Mittelwerte und charakteristischen Werte in Abbildung 5.2 gleichen stark dem Graph einer trigonometrischen Funktion in Anlehnung an die Hankinson-Interaktion (Formel (2.43)).

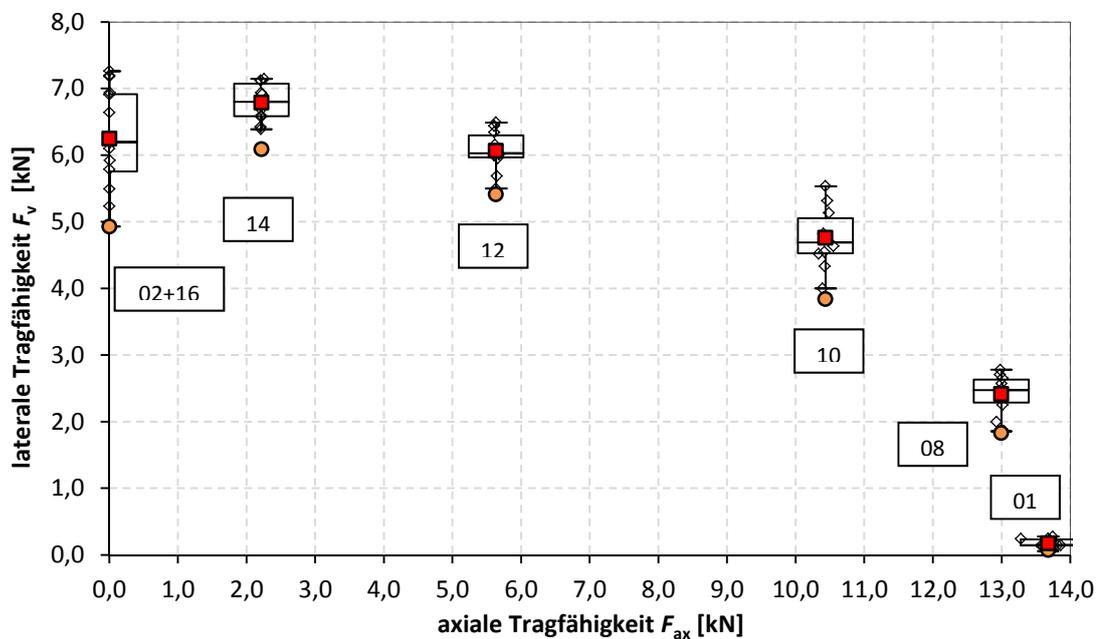


Abbildung 5.3: Boxplots Serien 01, 02+16, 08, 10, 12, 14 – konstante axiale Belastung

Bei konstanter axialer Beanspruchung und anschließender lateraler Belastung bis zum Versagen (Abbildung 5.3 ) wurde beobachtet, dass bei geringen axialen Lasten (Serie 14;  $F_{ax} = 2,2 \text{ kN}$ ) sogar eine Steigerung der lateralen Tragfähigkeit vorhanden ist. Der Mittelwert der Serie 12 (6,1 kN) weist nur einen geringen Unterschied von 3 Prozent zu jenen der Serie 02 und 16 auf. Bei der Betrachtung der beiden charakteristischen Werte dieser Serien erkennt man eine Steigerung um 10 Prozent bezogen auf die Serie 02 und 16. Ab einer axialen Kraft von rund 10 kN beginnt die laterale Tragfähigkeit jedoch stark abzufallen.

Die Abbildung 5.4 zeigt deutlich, dass die axiale Tragfähigkeit auch bei sequenzieller Lastaufbringung mit steigender lateraler Last abnimmt. Außerdem erkennt man eine starke Zunahme der Streuungen bei größer werdender lateraler Kraft im Bezug zur ausschließlich axial belasteten Prüfserie 01.

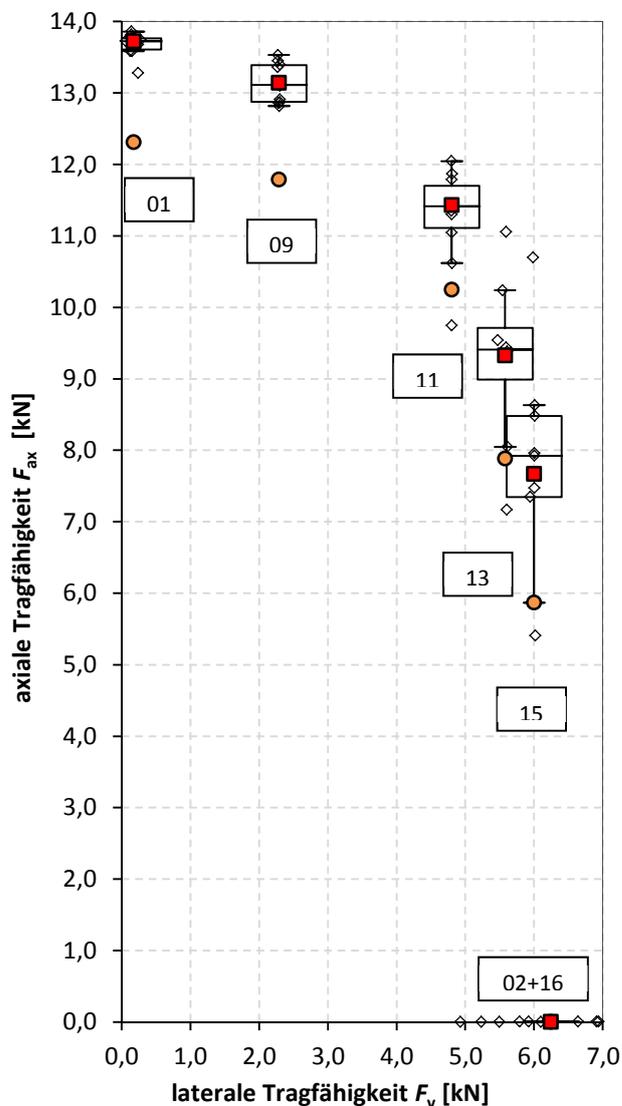


Abbildung 5.4: Boxplots Serien 01, 02+16, 09, 11, 13, 15 – konstante laterale Belastung

### Modell der Tragfähigkeitsinteraktion

Wie in Abschnitt 2-1.3.1 schon beschrieben, ist die gängige Form der Interaktion der Tragfähigkeiten wie in folgender Formel aufgebaut.

$$\left( \frac{F_{ax,E}}{F_{ax,R}} \right)^n + \left( \frac{F_{v,E}}{F_{v,R}} \right)^n \leq 1,0 \quad (5.2)$$

$F_{ax,Ed}$  Belastung in Richtung der Schraubenachse (axial)

$F_{ax,R}$  Tragfähigkeit bei ausschließlicher Belastung in Richtung der Schraubenachse (axial)

$F_{v,Ed}$  Belastung rechtwinklig zur Schraubenachse (lateral)

$F_{v,R}$  Tragfähigkeit bei ausschließlicher Belastung rechtwinklig zur Schraubenachse (lateral)

$n$  Hochzahl für Interaktion

In Abbildung 5.5 wird der Vergleich der Prüfergebnisse mit dem Bemessungsmodell (mit  $n = 2$ ) gezeigt. Wie zuvor erwähnt wird in der ETA-11/0190 [8] die axiale Tragfähigkeit konservativ eingeschätzt. Diese Festlegung führt auch dazu, dass es zu einem größeren Unterschied zwischen Prüfergebnissen und Rechenmodell kommt.

Die Prüfergebnisse werden in Abbildung 5.5 zur besseren Übersichtlichkeit in Gruppen zusammengefasst, welche die Reihenfolge der Lastaufbringung beschreiben.

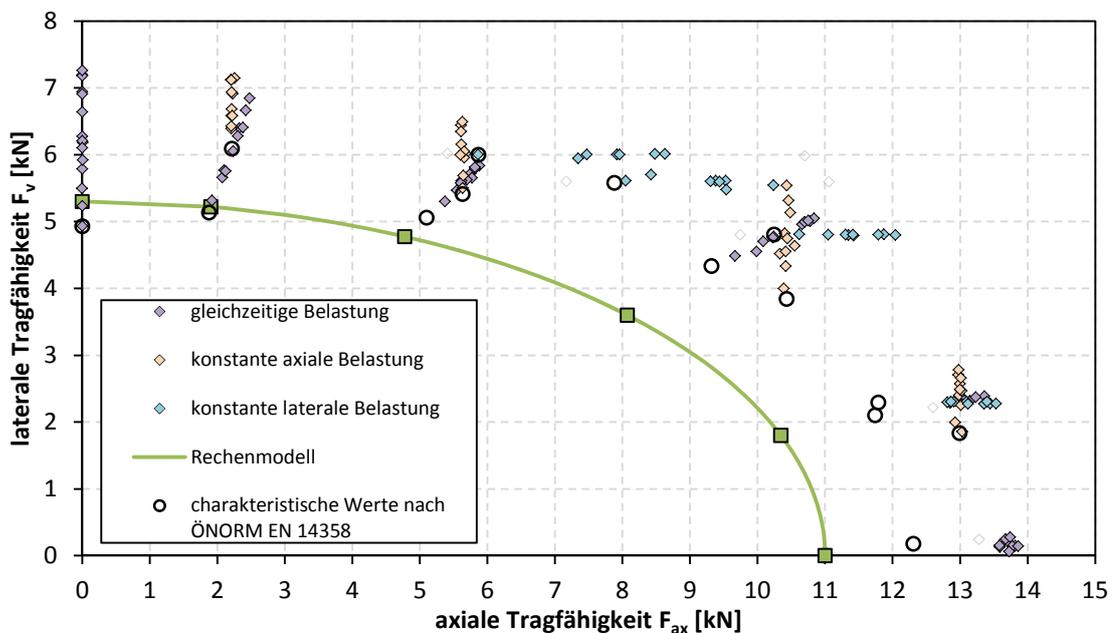


Abbildung 5.5: Vergleich Rechenmodell und Messergebnisse

Um die Gültigkeit der laut ÖNORM EN 1995-1-1 [25] zu verwendenden quadratischen Interaktion für die Prüfergebnisse selbst zu klären (Formel (2.45);  $n = 2$ ), wurden Kurven auf Grundlage der Mittelwerte beziehungsweise der empirischen 5 %-Quantile der Tragfähigkeit bei ausschließlich axialer und ausschließlich lateraler Beanspruchung ermittelt. Der Vergleich dieser Kurven mit den Prüfwerten ist in Abbildung 5.6 dargestellt. Man erkennt, dass die quadratische Interaktion für Mittelwerte und 5 %-Quantile eine konservative Näherung darstellt.

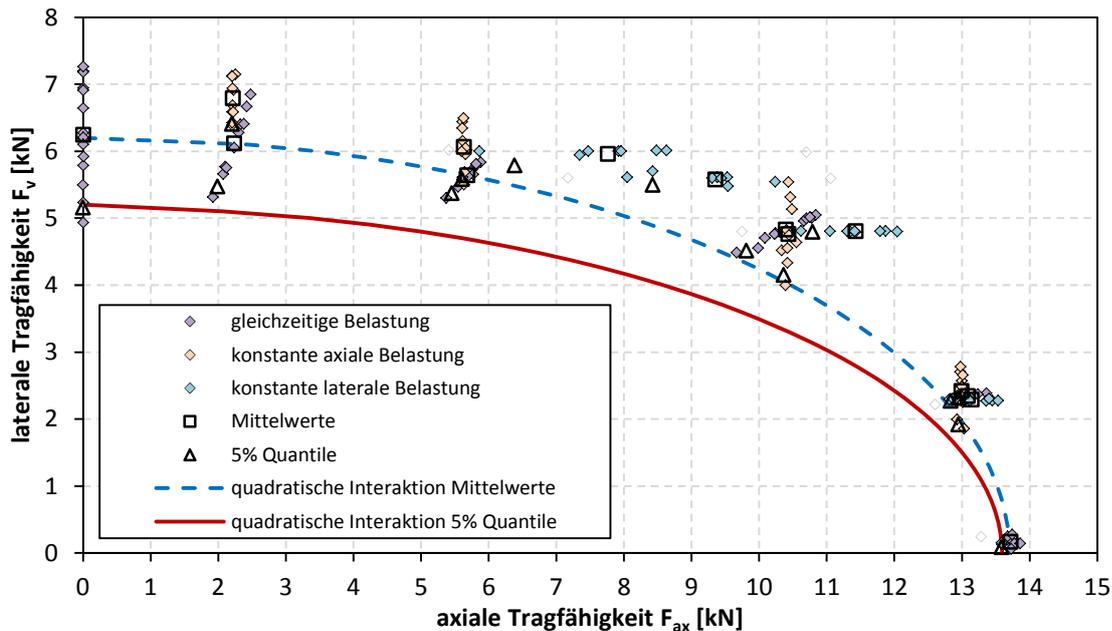


Abbildung 5.6: Überprüfung quadratische Interaktion

Um eine bessere Beschreibung der tatsächlichen Tragfähigkeitsabnahme zu erhalten, wurde mit Hilfe einer nichtlinearen Regressionsanalyse, nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate, nach besser passenden Hochzahlen für den Interaktionsnachweis gesucht. Dabei wurden die Analysen mit unterschiedlichen Prüfserien und auch mit dem 5 %-Quantil der Serien durchgeführt. Die ausschließlich axial beziehungsweise lateral ermittelten Tragfähigkeiten waren bei diesen Analysen fixierte Randpunkte (Mittelwert oder empirisches 5 %-Quantil). Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Tabelle 5.4 angeführt und in Abbildung 5.7 beziehungsweise Abbildung 5.8 grafisch dargestellt.

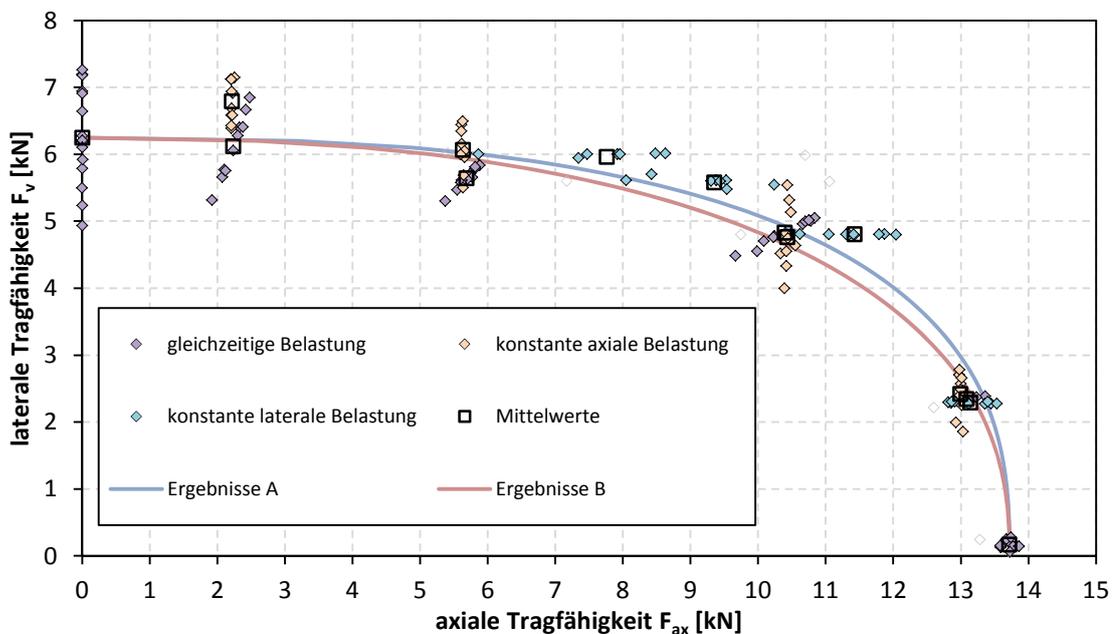
Wie aus Tabelle 5.4 ersichtlich ist, befinden sich die an die Messergebnisse gefitteten Hochzahlen im Bereich von 2,4 bis 3,6. Des Weiteren sind die Korrelationen zwischen Modell und Messergebnissen ausreichend groß und man kann bestätigen, dass die Grundform der Formel (5.2) für die Interaktion verwendet werden kann.

*Tabelle 5.4: ermittelte Hochzahlen für Interaktion*

	herangezogene Prüferien	Anmerkung	Hochzahl $n$	Pearson-Korrelation ( $F_{\text{soll}}$ mit $F_{\text{prüf}}$ )
<b>Ergebnisse A</b>	01 bis 16 (ohne 07)	alle Einzelwerte	2,70	0,9861
<b>Ergebnisse B</b>	01 bis 06 und 16	Einzelwerte gleichzeitige Beanspruchung	2,43	0,9926
<b>Ergebnisse C</b>	01 bis 16 (ohne 07)	5 %-Quantil aller Einzelwerte	3,59	0,9872
<b>Ergebnisse D</b>	01 bis 06 und 16	5 %-Quantil gleichzeitige Beanspruchung	3,14	0,9987

Für die Interaktion der Tragfähigkeiten sollten auf der sicheren Seite liegend die Ergebnisse B ( $n = 2,4$ ; für Mittelwerte) und D ( $n = 3,1$ ; für empirische 5 %-Quantile) verwendet werden, da diese für eine gleichzeitige Beanspruchung der Schraube gelten und so die geringsten Tragfähigkeiten aufweisen.

In Abbildung 5.7 werden die Kurven mit den für die Mittelwerte gefitteten Hochzahlen gezeigt und mit den Prüfergebnissen verglichen. Man sieht aus der Grafik, dass bei axialen Belastungen von 13 kN die laterale Tragfähigkeit gering überschätzt wird. Im Bereich der axialen Last von 7 bis 10 kN befinden sich die gefitteten Kurven unterhalb der meisten Messwerte (geringe Unterschätzung).



*Abbildung 5.7: ermittelte Hochzahlen für Interaktion (Mittelwerte)*

Abbildung 5.8 stellt die Interaktionskurven für die empirischen 5 %-Quantile dar, wobei man wie bei den Mittelwerten erkennt, dass bei hohen axialen Beanspruchungen die lateralen Tragfähigkeiten überschätzt werden. Zusätzlich bemerkt man auch die Unterschätzung der lateralen Tragfähigkeit bei axialer Last zwischen 2,0 kN und 9,0 kN.

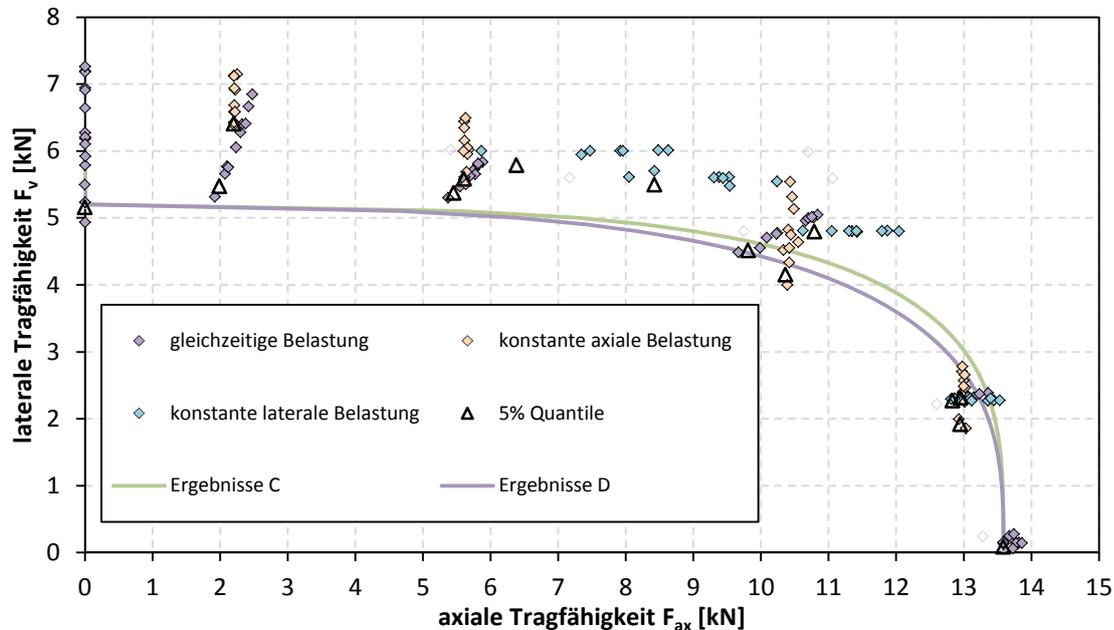


Abbildung 5.8: ermittelte Hochzahlen für Interaktion (empirisches 5 % Quantil)

## 5-3 STEIFIGKEITEN

### 5-3.1 RECHNERISCHE ABSCHÄTZUNG DER STEIFIGKEITEN

#### 5-3.1.1 Steifigkeit bei ausschließlich axialer Beanspruchung

Im Abschnitt 2-1.1.2 wurden verschiedene Modelle zur Abschätzung der axialen Steifigkeit dargestellt. Diese werden nun hier angewendet, um einen Vergleich mit den gemessenen Steifigkeiten durchführen zu können. Die Tabelle 5.5 zeigt die Ergebnisse der rechnerischen Abschätzungen, wobei in die Formeln eine charakteristische Rohdichte von  $490 \text{ kg/m}^3$  eingesetzt wurde (andere Kenngrößen so wie bei rechnerischer Ermittlung der Tragfähigkeiten). Obwohl die Zulassung der geprüften Schrauben die ETA-11/0190 [8] ist, wird zur zusätzlichen Vergleichsmöglichkeit auch die Berechnung der Steifigkeit laut ETA-12/0063 [36] (anderer Schraubenhersteller) durchgeführt.

*Tabelle 5.5: rechnerische axiale Steifigkeit  $K_{ser}$  der Schraube*

ETA-11/0190 [8]	Ringhofer et al. [33]	ETA-12/0063 [36]
7,9 kN/mm	18,2 kN/mm	20,3 kN/mm

### 5-3.1.2 Steifigkeit bei ausschließlich lateraler Beanspruchung

Die Abschätzung der lateralen Steifigkeit erfolgt mittels den in Abschnitt 2-1.3.2 angeführten Gleichungen. Es wird zusätzlich zu den bisher angeführten Werten noch die mittlere Rohdichte benötigt, welche mit 540 kg/m<sup>3</sup> eingesetzt wird. Die errechneten Steifigkeiten werden in Abhängigkeit des Berechnungsmodelles in Tabelle 5.6 dargestellt. Der laut DIN 1052 [9] errechnete Wert gilt, wie in der Norm vorgesehen, für Holz-Holz- und Holz-Stahlblech-Verbindungen.

*Tabelle 5.6: rechnerische laterale Steifigkeit  $K_{ser}$  der Schraube*

DIN 1052 [9]	ÖNORM EN 1995-1-1 [25]	SIA 265 [35]
1,8 kN/mm	4,3 kN/mm	0,7 kN/mm

## 5-3.2 PRÜFTECHNISCH ERMITTELTE STEIFIGKEITEN

Folgend werden die aus den Prüfungen ermittelten Steifigkeiten mit den berechneten Steifigkeiten verglichen. Des Weiteren wird überprüft, ob ein Zusammenhang zwischen axialer und lateraler Steifigkeit besteht (Interaktion). Prinzipiell werden bei den Steifigkeiten nur Mittelwerte und Streuungen angegeben und miteinander verglichen.

### 5-3.2.1 Steifigkeit bei ausschließlich axialer Beanspruchung

Die ermittelten Steifigkeiten liegen im Bereich von 26 kN/mm bis 48 kN/mm (Prüfserie 01; Mittelwert 39 kN/mm) bei einem Variationskoeffizient von 17 %. Dies zeigt deutlich, dass die Streuungen der Steifigkeiten größer sind als die der Tragfähigkeiten (CoV 0,7 %).

Aus dem Vergleich der zuvor ermittelten Berechnungsergebnissen mit den Messergebnissen erkennt man, dass die Berechnung deutlich geringere Ergebnisse liefert, wobei die Modelle nach Ringhofer et al. [33] (18,2 kN/mm) und ETA-12/0063 [36] (20,3 kN/mm; nicht für geprüfte Schraube gültig) näher bei den Messwerten liegen als das Modell nach ETA-11/0190 [8] (7,9 kN/mm; gültig für geprüfte Schraube).

### 5-3.2.2 Steifigkeit bei ausschließlich lateraler Beanspruchung

Die aus den Prüfserien 02 und 16 ermittelten Steifigkeiten befinden sich im Bereich von 0,6 kN/mm bis 1,3 kN/mm (Mittelwert 0,9 kN/mm) bei einem CoV von 22 %. Auch hier ist Streuung höher als bei den Tragfähigkeiten. Es ist auffallend, dass im Gegensatz zu den Tragfähigkeiten, bei den Steifigkeiten die Variationskoeffizienten von axialer und lateraler Richtung eine ähnliche Größenordnung aufweisen.

Vergleicht man die Messergebnisse mit den Berechnungsergebnissen, so sieht man, dass die Berechnung nach ÖNORM EN 1995-1-1 [25] und DIN 1052 [9] deutlich größere Werte liefert. Die Ergebnisse nach SIA 265 [35] stimmen mit 0,7 kN/mm gut mit dem Mittelwert der Messergebnissen überein.

### 5-3.2.3 Steifigkeit bei kombinierter Beanspruchung

So wie bei den Tragfähigkeiten wurde auch bei den Steifigkeiten versucht eine Interaktionsvorschrift zwischen axialen und lateralen Eigenschaften zu finden. Die in Abbildung 5.9 dargestellte Punktwolke lässt aber keinen klaren Zusammenhang zwischen axialer und lateraler Steifigkeit erkennen.

Darüber hinaus ist es bei den Prüfungen, die ausschließlich axial oder lateral belastet wurden, nicht möglich, axiale und laterale Steifigkeiten zu ermitteln. Deshalb wurde zu Darstellungszwecken bei diesen Steifigkeiten der jeweilige zweite Wert Null gesetzt.

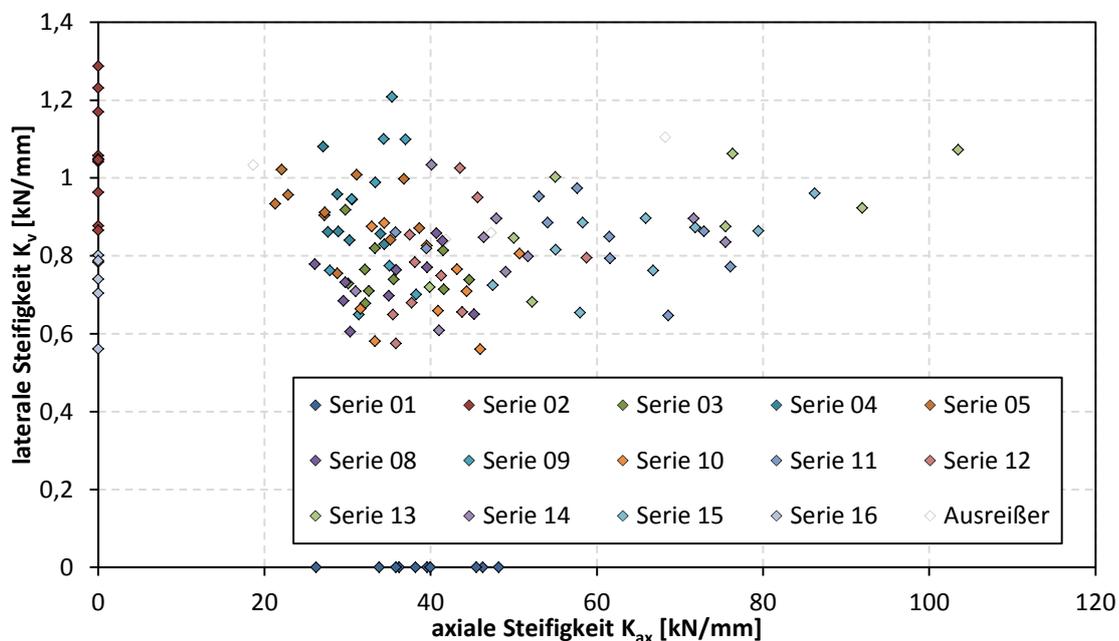


Abbildung 5.9: Punktwolke - Interaktion laterale und axiale Steifigkeit

Die axialen Steifigkeiten der Prüferserie 06 konnten aufgrund eines Anpressens des Anschlussbleches am Holzprüfkörper nicht korrekt ermittelt werden. Die Gründe dafür werden später in diesem Abschnitt noch näher erläutert (siehe Abbildung 5.13 und Abbildung 5.14).

### Axiale Steifigkeit bei kombinierter Beanspruchung

Abbildung 5.10 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Kraft-Schraubenachsen-Winkel  $\beta$  und der axialen Steifigkeit bei gleichzeitiger Lastaufbringung. Man erkennt eine Abnahme des Mittelwertes der axialen Steifigkeit mit Zunahme des Kraft-Schraubenachsen-Winkels. Bei einem Winkel von  $\beta = 45^\circ$  sind noch 75 Prozent der Steifigkeit von  $\beta = 0^\circ$  vorhanden. Der größte Anteil der Steifigkeitsabnahme tritt zwischen einem Winkel  $0^\circ$  und  $25^\circ$  auf. Zwischen den Serien 04 und 05 kommt es nur mehr zu einer Reduktion von rund 3 Prozent.

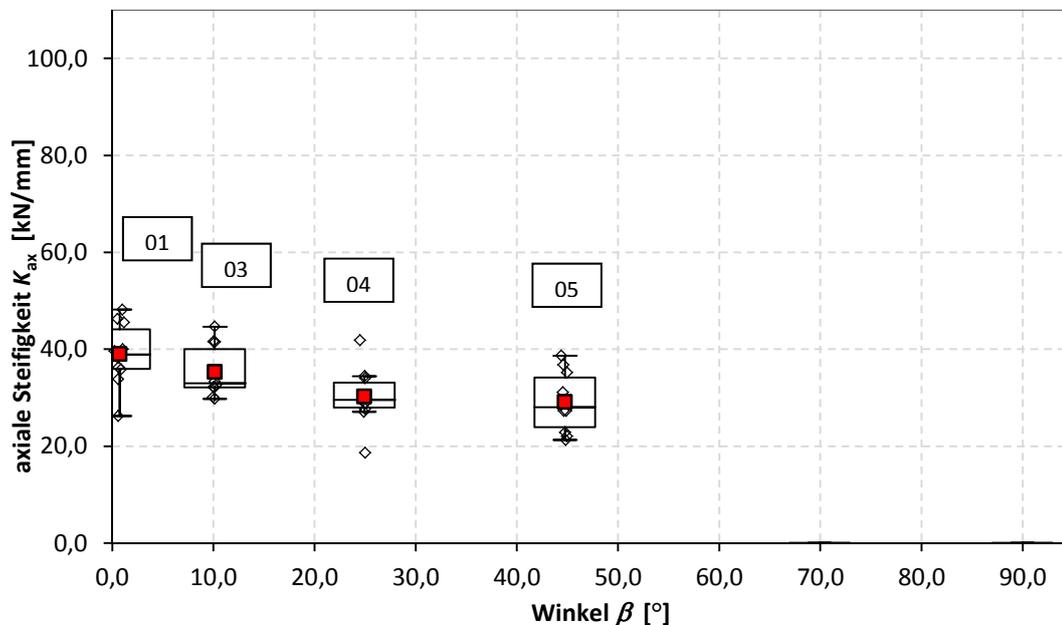


Abbildung 5.10: axiale Steifigkeit in Abhängigkeit des Winkels  $\beta$  - gleichzeitige Belastung

Die Veränderung der axialen Steifigkeit ist auch in Abbildung 5.11 zu sehen. Da die Prüferserien mit konstanter lateraler Belastung und anschließender axialer Lastaufbringung bis zum Versagen dargestellt sind, zeigt die Abszisse nicht mehr den Winkel  $\beta$ , sondern die laterale Belastung. Zwischen lateraler Belastung und dem Winkel  $\beta$  (im Bruchzustand) kann über die Winkelfunktionen umgerechnet werden.

Bei einer lateralen Last von 2,3 kN ( $\beta \sim 10^\circ$ ) wird der Mittelwert der axialen Steifigkeit um circa 14 Prozent der mittleren Steifigkeit der Serie 01 reduziert. Im Gegensatz zu Abbildung 5.10 kommt es bei hintereinander aufgebrachtten Lasten bei einem Winkel  $\beta$  von rund  $23^\circ$  ( $F_v = 5$  kN) zu einer Steigerung der Steifigkeit bezogen auf Serie 01 um 49 Prozent. Bei den Serien 13 und 15 sind noch größere Steigerungen von 75 und 68 Prozent vorhanden. Es wird vermutet, dass diese Steigerung auf die zuvor stattfindende laterale Verformung und Fließgelenkbildung zurückzuführen ist.

Außerdem sieht man in Abbildung 5.11 deutlich, dass die Streuungen der Steifigkeiten der Serien 11, 13, 15 höher als die der Serien 01 und 09 sind.

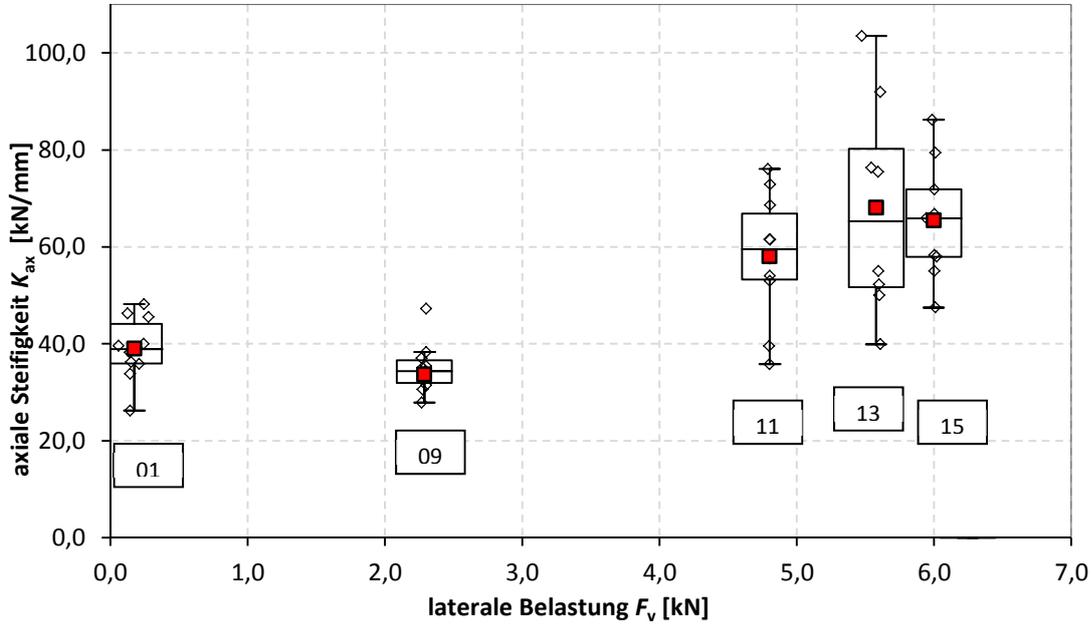


Abbildung 5.11: axiale Steifigkeit unter konstanter lateraler Belastung

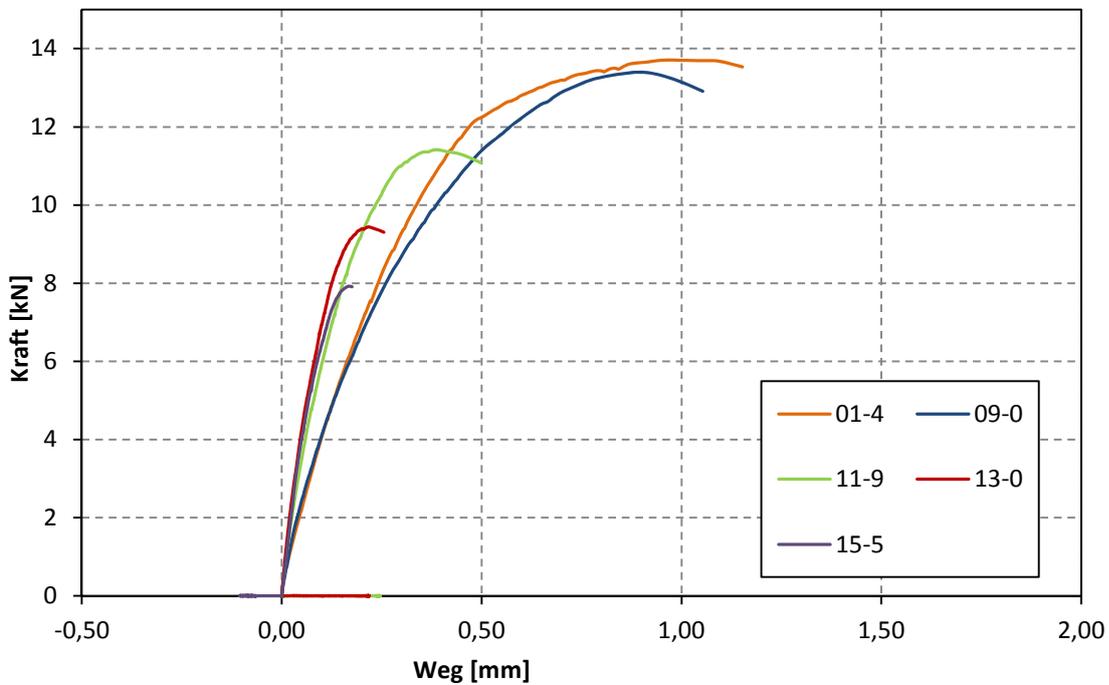
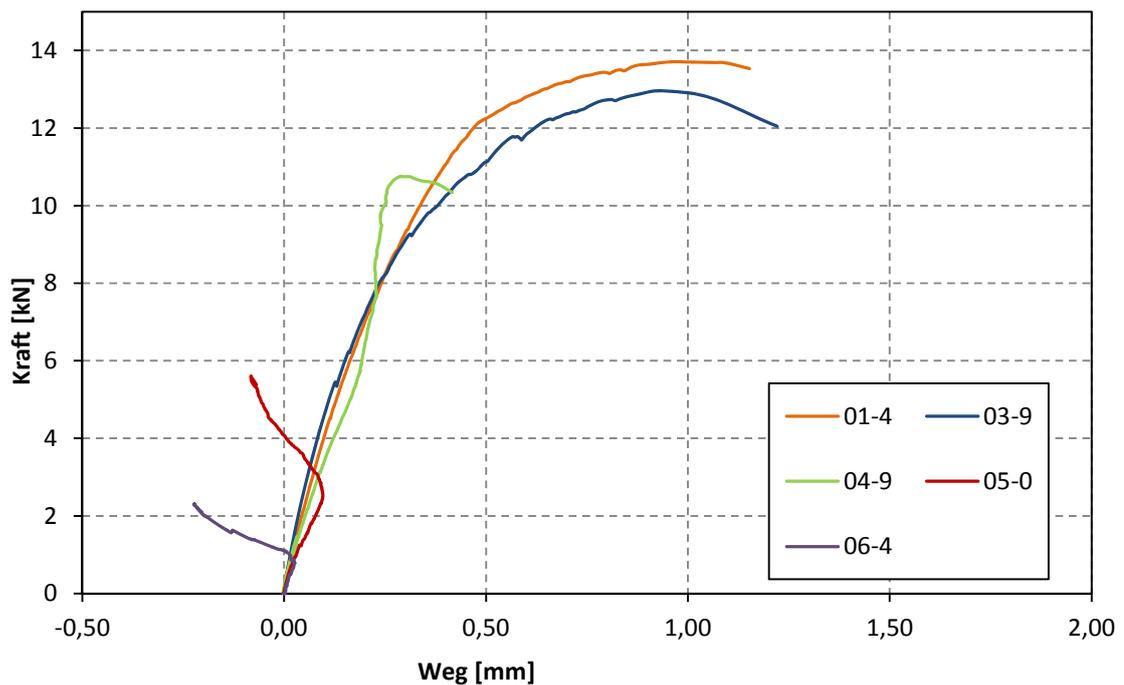


Abbildung 5.12: Vergleich: axiales Kraft-Verschiebungs-Diagramm bei konstanter lateraler Belastung

Bei der Betrachtung von repräsentativen Last-Verschiebungs-Kurven der unterschiedlichen Prüfserien mit konstanter lateraler Belastung erkennt man ebenfalls klar die zuvor beschriebene Steifigkeitssteigerung bei höheren Querlasten (Prüfserien 11, 13 und 15) (siehe Abbildung 5.12).

In Abbildung 5.13 sieht man eine negative Verformung des Anschlussbleches, das bedeutet, dass es zum Anpressen des Anschlussbleches am Holzkörper kommt. Bei der Prüfserie 06 ist der Bereich der Steifigkeitsermittlung (1 bis 2 kN) von diesem Effekt betroffen, wodurch diese Serie bei der Steifigkeitsermittlung nicht berücksichtigt wird.



**Abbildung 5.13: Vergleich: axiales Kraft-Verschiebungs-Diagramm bei gleichzeitig steigender lateraler Last**

Abbildung 5.14 stellt dar, warum es zum Anpressen des Anschlussbleches kommt. Infolge der lateralen Verschiebung des Anschlussbleches kommt es zu einer zusätzlichen axialen Belastung in der Schraube (siehe 2-1.1 Abschnitt Seileffekt). Diese Kraft bewirkt ein Anpressen des Anschlussbleches, wenn sie größer als die Kraft  $F_{AX}$  ist. Die Größe der Anpresskraft hängt direkt mit der lateralen Verformung und so auch mit der Größe der lateralen Kraft zusammen. Das heißt, je größer die laterale Verformung/Kraft desto höher wird die Anpresskraft.

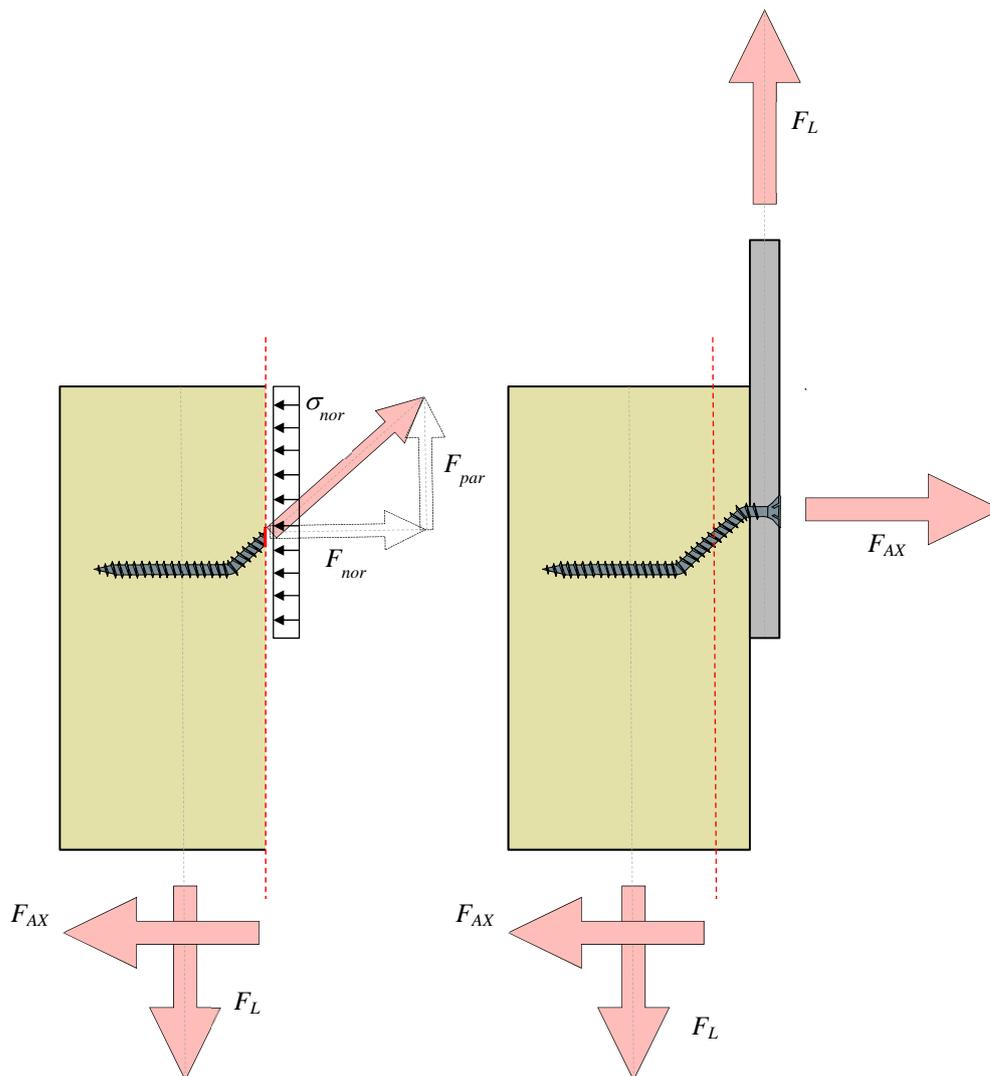


Abbildung 5.14: Anpressung des Anschlussbleches durch Verbiegung der Schraube

### Laterale Steifigkeit bei kombinierter Beanspruchung

Die Abbildung 5.15 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Winkel  $\beta$  und der lateralen Steifigkeit bei gleichzeitiger Belastung. In Bezug auf den Mittelwert der ausschließlich lateral belasten Prüfserien 02 und 16 kommt es bei den Serien 03, 04, 05, 06 (Verringerung des Winkel  $\beta$ ) zu einer Reduktion der lateralen Steifigkeit.

Die größte Abnahme des Mittelwertes tritt bei Serie 03 ( $\beta = 10^\circ$ ) mit 19 Prozent auf. Die mittleren Steifigkeiten der Serien 04 und 05 sind gleich groß (0,9 kN/mm) und somit sind auch die Reduktionen im Vergleich mit den Serien 02 und 16 von 2 Prozent ident. Die mit einem Winkel  $\beta$  von  $70^\circ$  geprüfte Serie 06 weist eine Reduktion der Steifigkeit von 11 Prozent auf.

Beim Vergleich der Streuungen aus Abbildung 5.15 erkennt man, dass mit Abnahme des Winkels  $\beta$  auch die vorhandene Streuung geringer wird.

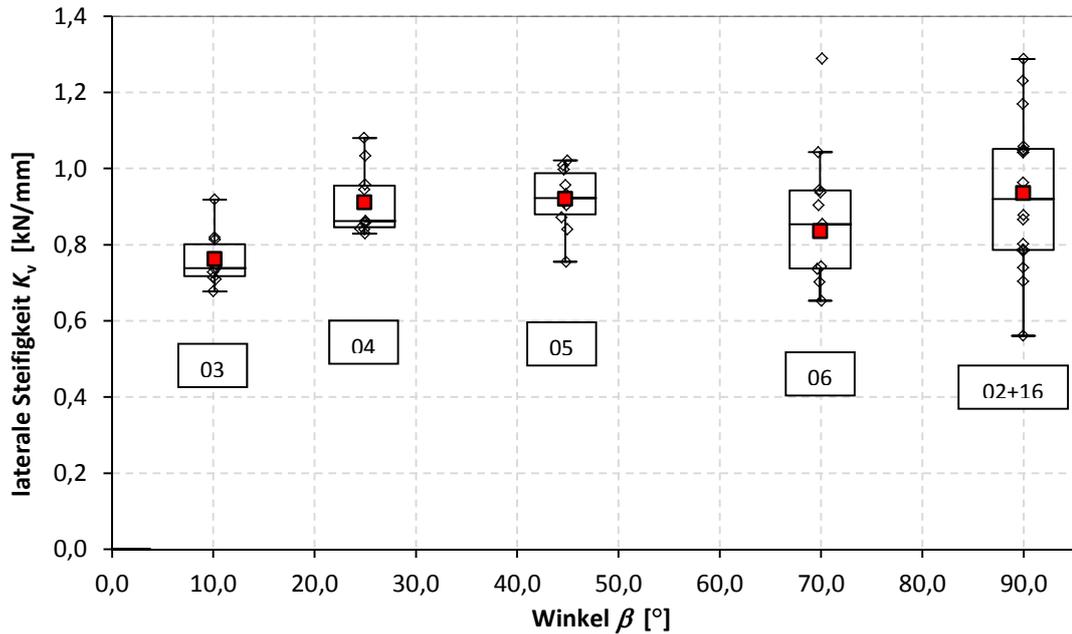


Abbildung 5.15: laterale Steifigkeit in Abhängigkeit des Winkels  $\beta$ - gleichzeitige Belastung

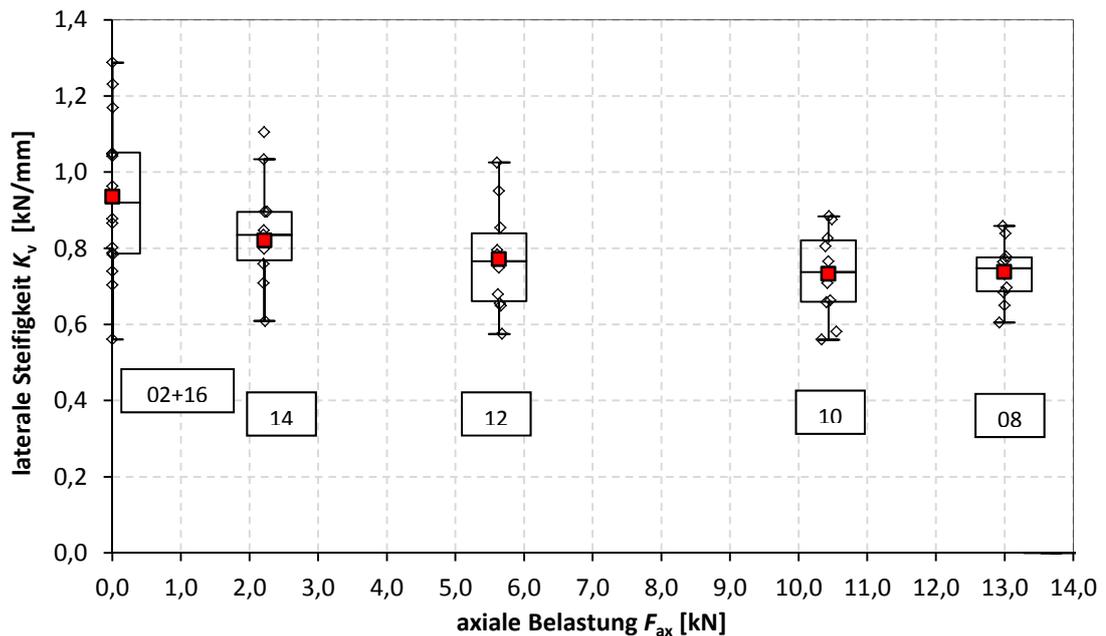


Abbildung 5.16: laterale Steifigkeit unter konstanter axialer Belastung

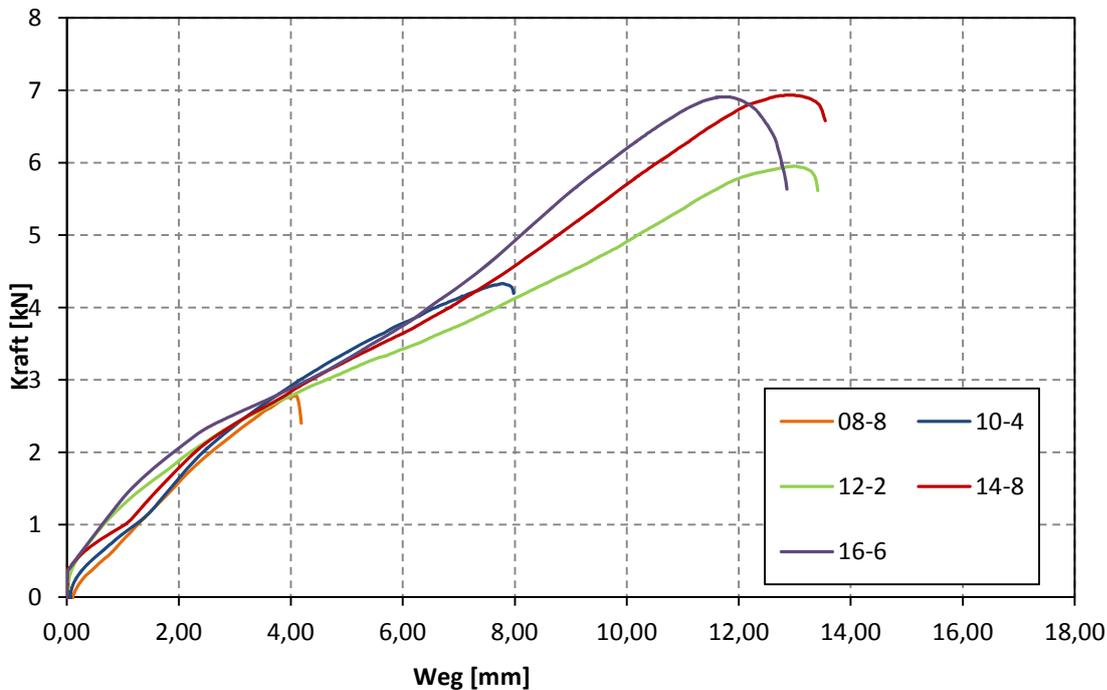
Die Abbildung 5.16 stellt den Zusammenhang zwischen axialer Kraft  $F_{ax}$  und der lateralen Steifigkeit bei hintereinander aufgebrachtter Belastung dar. Wie bei den gleichzeitig belasteten Prüfungen in Abbildung 5.15 tritt auch hier einer Reduktion der lateralen Steifigkeit mit zunehmender axialer Beanspruchung auf.

Bei einer axialen Last von 13 kN ( $\beta \sim 10^\circ$ ) ist eine Abnahme von 21 Prozent der mittleren Steifigkeit in Bezug auf die Serien 02 und 16 zu beobachten. Anders als in Abbildung 5.15 ist in Abbildung 5.16 zu sehen, dass der überwiegende Teil der Reduktion (18 % der lateralen Steifigkeit ohne axiale Last) schon bis zu einer Axiallast von 5,6 kN ( $\beta \sim 47^\circ$ ) auftritt.

Wie bei gleichzeitiger Belastung erkennt man auch bei hintereinander aufgebracht Belastung, dass die Streuung der lateralen Steifigkeit mit Zunahme der axialen Last geringer wird (siehe Abbildung 5.16).

Abbildung 5.17 stellt repräsentative Kraft-Verschiebungs-Diagramme bei konstanter axialer Belastung dar. Aus ihr wird deutlich, dass die Verläufe ähnlich zueinander sind. Im für die Ermittlung der Steifigkeiten definierten Bereich zwischen 1 kN und 2 kN sind die Verläufe eher parallelverlaufend. Die Prüfung 16-6 steht repräsentative für die Verläufe der Prüfserien 02 und 16.

Als Unterschied zwischen den Prüfserien ist anzumerken, dass bei den Prüfserien 08 und 10 die zuerst aufgebrauchte axiale Kraft die sonst zu Beginn in laterale Richtung wirkende Reibungskomponenten verhindert hat. Dies erkennt man, da die beiden Verläufe keinen „Versatz“ an der Ordinate besitzen.



**Abbildung 5.17: Vergleich: laterales Kraft-Verschiebungs-Diagramm bei konstanter axialer Belastung**

In Abbildung 5.18 (laterales Kraft-Verschiebungs-Diagramm bei gleichzeitig steigender axialer Belastung) sieht man eine noch deutlichere Übereinstimmung der Kraft-Weg-Verläufe. Bei allen Prüfungen musste hier eine gewisse Anfangsreibung zwischen Anschlussblech und Holzprüfkörper aufgrund des Festdrehens der Schraube überwunden werden. Durch die zwei eingelegten PTFE-Lagen (= Teflon) konnte diese Reibung jedoch gering gehalten werden.

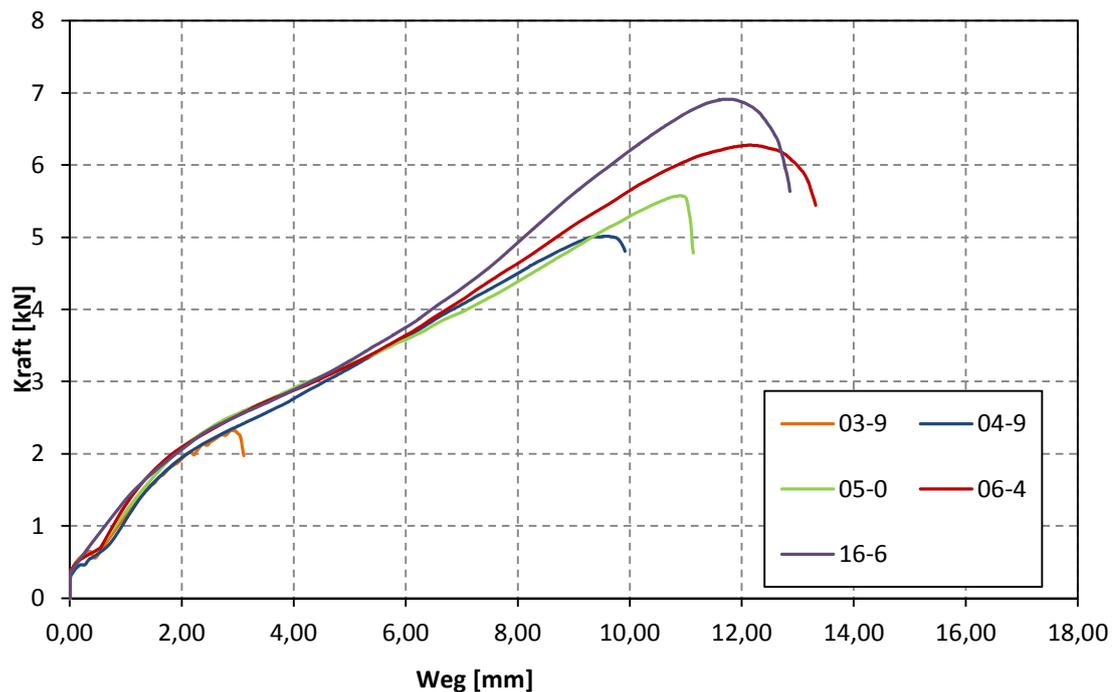


Abbildung 5.18: Vergleich: laterales Kraft-Verschiebungs-Diagramm bei gleichzeitig steigender axialer Last

### Modellierung

Der in Abschnitt 2-1.3.2 dargestellte Interaktionsvorschlag der Steifigkeiten nach DeBonis & Bodig [5] (Formel (2.46)), beschreibt eine Steifigkeit  $K_\beta$  unter dem Kraft-Schraubenachsen-Winkel  $\beta$  in Abhängigkeit des Winkels  $\beta$  selbst. DeBonis & Bodig [5] ermittelten die Steifigkeit  $K_\beta$  aus der Beziehung der Gesamtlast  $F$  zur Gesamtverschiebung  $w$ . Allerdings zeigen bei einer kombinierten Belastung aufgrund der unterschiedlichen Steifigkeiten  $K_{ser,ax}$  und  $K_{ser,v}$  ( $K_{ser,ax} > K_{ser,v}$ ) die Gesamtverschiebung  $w$  und die Gesamtlast  $F$  nicht in dieselbe Richtung, wie in Abbildung 5.19 dargestellt ist.

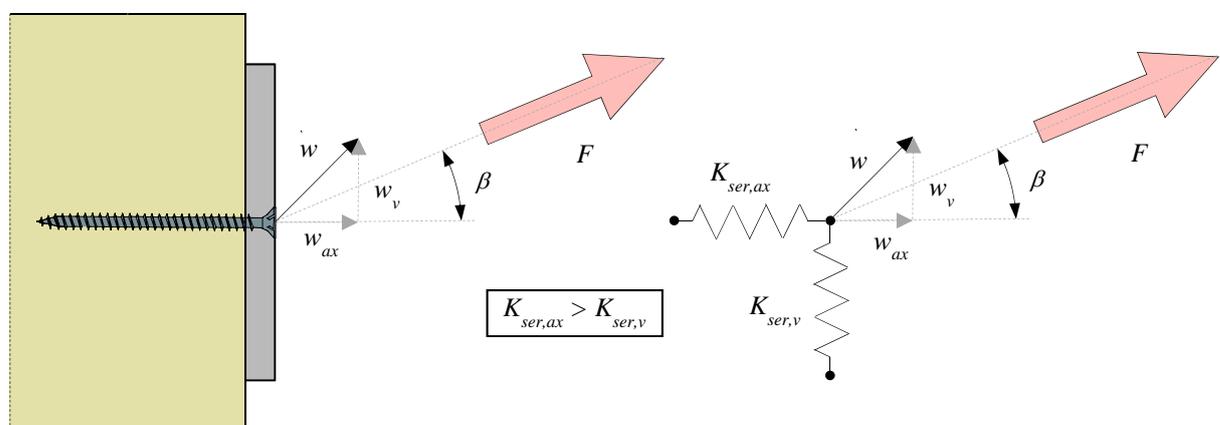


Abbildung 5.19: Unterschiedliche Richtung von Gesamtverformung und Gesamtlast

Deshalb ist eine derartige Ermittlung der Steifigkeit  $K_\beta$  zu hinterfragen. Das folgende Beispiel zeigt den erheblichen Unterschied der Verformung in Krafrichtung  $w_\alpha$  und der Gesamtverformung  $w$ .

Betrachtet man eine Schraube, die axial und lateral jeweils mit 1,0 kN belastet ist ( $\Rightarrow$  Kraft-Schraubenachsen-Winkel  $\beta = 45^\circ$ ) und nimmt man die aus den Prüfungen gemessene mittlere axiale beziehungsweise laterale Steifigkeiten an ( $K_{\text{ser,ax}} = 39 \text{ kN/mm}$  und  $K_{\text{ser,v}} = 0,9 \text{ kN/mm}$ ), so ergibt sich die axiale Verformung zu  $w_{\text{ax}} = 0,9 \text{ mm}$  und die laterale Verformung zu  $w_{\text{v}} = 39 \text{ mm}$ . Die mittels des Satzes von Pythagoras ermittelte Gesamtverformung beträgt  $w = 39,01 \text{ mm}$ . Über die trigonometrische Beziehung kann auch der Anteil der Verformung in Krafrichtung  $w_\alpha$  wie folgt berechnet werden.

$$w_\alpha = w_{\text{ax}} \cdot \frac{1}{\sin(\beta)} = 0,9 \cdot \frac{1}{\sin(45)} = 1,27 \text{ mm} \quad (5.3)$$

Vergleicht man nun den Unterschied zwischen der Gesamtverformung  $w$  und der Verformung in Krafrichtung  $w_\alpha$ , so erkennt man, dass die Gesamtverformung um mehr als das Dreißigfache größer ist und auch einen anderen Vektor beschreibt.

Für eine Modellierung, die das tatsächliche Verhalten bei kombinierter Beanspruchung beschreiben sollte, ist daher die Anordnung von zwei getrennten Federn (eine lateral, eine axial) zu empfehlen. Aufgrund der verhältnismäßig geringen Beeinflussung der Steifigkeit durch unterschiedliche Belastungen, können als Vereinfachung bei der Modellierung die Steifigkeiten ( $K_{\text{ser,ax}}$  und  $K_{\text{ser,v}}$ ) der beiden Federn als konstant angenommen werden.

# KAPITEL 6: ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

## 6-1 ZUSAMMENFASSUNG

---

Selbstbohrende Holzschrauben zählen durch ihre hohe axiale Tragfähigkeit zu den wichtigsten, im modernen Holzbau, eingesetzten Verbindungsmitteln. Prinzipiell werden selbstbohrende Schrauben hauptsächlich axial beansprucht, doch aufgrund von verschiedenen meist geometrischen Randbedingungen entsteht oft eine kombinierte Belastung der Schraube aus Abscheren und Herausziehen.

In dieser Arbeit wurde durch den aktuellen Stand des Wissens und mittels Prüfungen das Tragverhalten von selbstbohrenden Schrauben unter kombinierter Last in einschnittigen Holz-Stahlblech Verbindungen ermittelt und beschrieben. Außerdem erfolgte eine Untersuchung des Einflusses einer sequenziellen Lastaufbringung auf die axialen und lateralen Tragfähigkeiten beziehungsweise Steifigkeiten im Vergleich mit einer gleichzeitigen Lastapplizierung.

In Literaturquellen findet man Untersuchungen von glatten Nägeln, Ringnägeln und Schraubnägeln unter kombinierter Belastung. Bei diesen Prüfungen wurde die kombinierte Beanspruchung über eine Schiefstellung des Prüfkörpers in einer Zugprüfmaschine erzeugt. Über den Neigungswinkel kam es zu einer gleichzeitigen Steigerung der axialen und lateralen Kraft. Mit den damaligen Ergebnissen wurde ein Tragmodell (quadratische Interaktion der Ausnutzungen) in der ÖNORM EN 1995-1-1 [25] festgelegt und auch für selbstbohrende Schrauben übernommen. Das tatsächliche Verhalten bei kombinierter Belastung von modernen selbstbohrenden Holzschrauben wurde jedoch nur geringfügig untersucht.

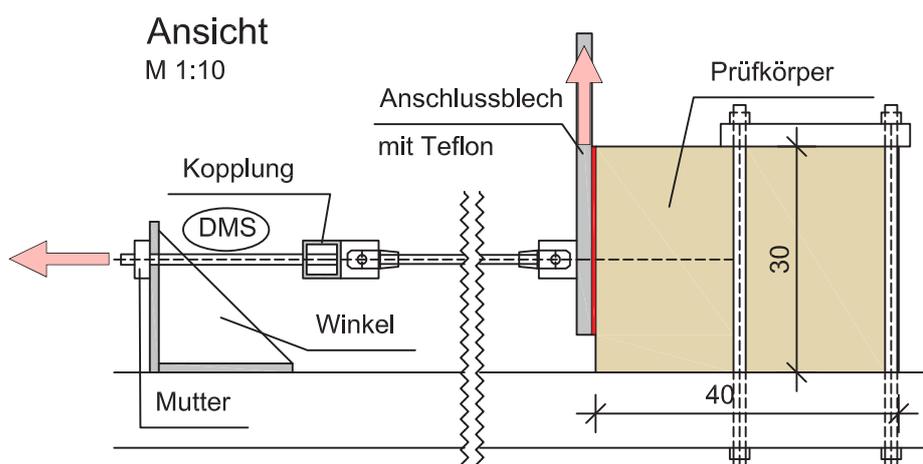
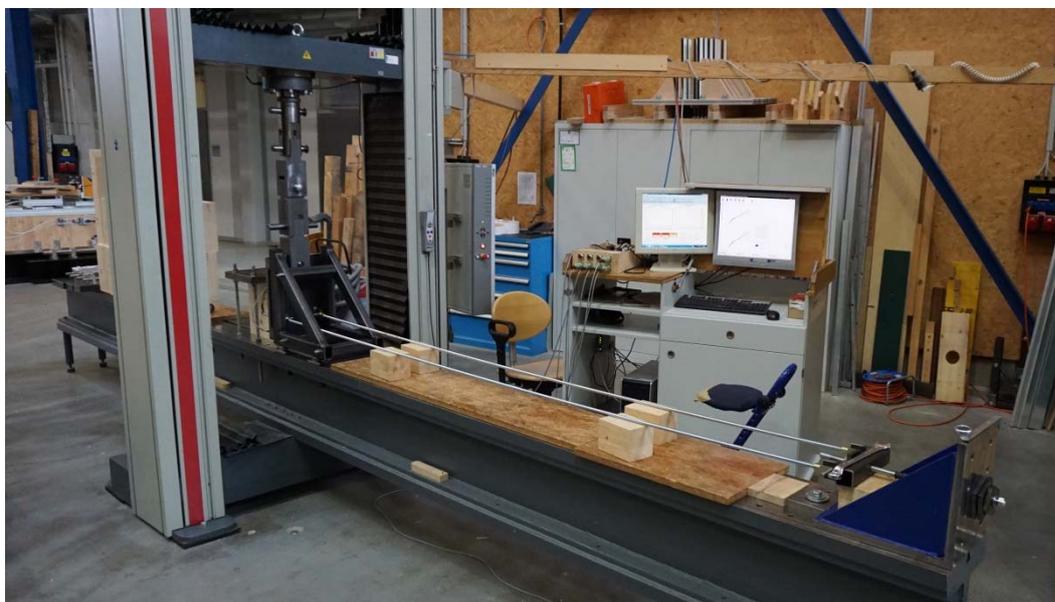
Da es für kombinierte Beanspruchungen von stiftförmigen Verbindungsmitteln keine genormte Prüfanzordnung gibt und keine bisher verwendete Konfiguration alle gewünschten Anforderungen (getrennte Laststeuerung von lateraler und axialer Kraft, möglichst reibungsfreie Lagerung, reale Einbauverhältnisse) erfüllt, musste eine neue Prüfkongfiguration entwickelt werden.

### 6-1.1 PRÜFKONFIGURATION

Grundsätzlich wurden zwei möglichen Varianten als Konfiguration näher untersucht, nämlich das fixierte Anschlussblech (Variante 1; siehe Abschnitt 3-2) und das bewegliche Anschlussblech (Variante 2; siehe Abschnitt 3-3). Bei der Variante 1 konnte jedoch eine Verdrehung des Prüfkörpers nicht ausreichend verhindert werden und des Weiteren war für die Aufbringung der axialen Last kein geeigneter Druckzylinder samt Steuerungseinheit mit überschaubaren finanziellen Mitteln verfügbar.

Daher wurde die Variante 2 so weiterentwickelt, dass alle Anforderungen erfüllt wurden (siehe Abbildung 6.1). Die laterale Kraftaufbringung erfolgte bei Variante 2 ident wie bei Variante 1 über eine Universalprüfmaschine. Die axiale Kraft steuerte man händisch über das Festziehen einer Mutter auf einer Feingewindestange. Die axiale Kraft wurde mittels zwei auf die Feingewindestange aufgeklebte und im Voraus kalibrierte Dehnmessstreifen gemessen.

Wie in Abbildung 6.1 ersichtlich, ordnete man in vertikaler und horizontaler Richtung je eine möglichst lange Gelenkkette an, um nur vernachlässigbar kleine Abtriebskräfte durch die Schiefstellung der Ketten aufgrund der zu erwartenden Anschlussblechverschiebung zu erhalten. Damit die Verdrehung des Anschlussbleches gesperrt war, wurde eine Führung eingesetzt, die ausschließlich translatorische Bewegungen des Anschlussbleches mittels reibungsarmer Linearlager zulässt.



**Abbildung 6.1: Neu entwickelte Prüfkfiguration (oben: umgesetzter Aufbau; unten: schematischer Plan)**

Insgesamt wurden 156 Prüfungen und 21 Vorversuche durchgeführt, wobei die Vollgewindeschrauben jeweils einen Durchmesser von 6 mm und eine Gesamtlänge von 160 mm besaßen. Der Einschraubwinkel zwischen Holzfaserrichtung und Schraubenachse war bei allen Vorversuchen und Prüfungen mit 90° fixiert.

Mit Hilfe der Vorversuche konnte die neue Prüfkonfiguration getestet und verbessert werden. Des Weiteren wurde auch gezeigt, dass die Konfiguration alle gestellten Anforderungen erfüllt. Mittels Prüferien mit sechs verschiedenen Kraftwinkeln wurde die Tragfähigkeits- und Steifigkeitsinteraktion zwischen axialer und lateraler Richtung untersucht, wobei bei den Serien auch die Reihenfolge der Lastaufbringung variiert wurde.

## 6-1.2 TRAGFÄHIGKEIT

Abbildung 6.2 zeigt die Messergebnisse aus den einzelnen Prüfungen, wobei meist bei den sequenziellen Lastaufbringungen (orange und hellblaue Punkte) höhere Tragfähigkeiten als bei der gleichzeitigen Applizierung (violette Punkte) erreicht wurden. Vor allem beim Aufbringen einer konstanten lateralen Belastung von 5,5 bis 6,0 kN und anschließender axialen Beanspruchung bis zum Versagen ist eine deutlich erhöhte axiale Tragfähigkeit zu beobachten.

Aus den rein axialen Prüfungen und aus zusätzlichen Schraubenzugfestigkeitsprüfungen wurde ersichtlich, dass die axiale Tragfähigkeit dieses Schraubentyps (Durchmesser 6 mm) konservativ in der Zulassung ETA-11/0190 [8] angesetzt wurde. Dies sieht man auch deutlich in Abbildung 6.2, die den Vergleich der Messergebnisse mit dem Berechnungsmodell nach ETA-11/0190 [8] zeigt.

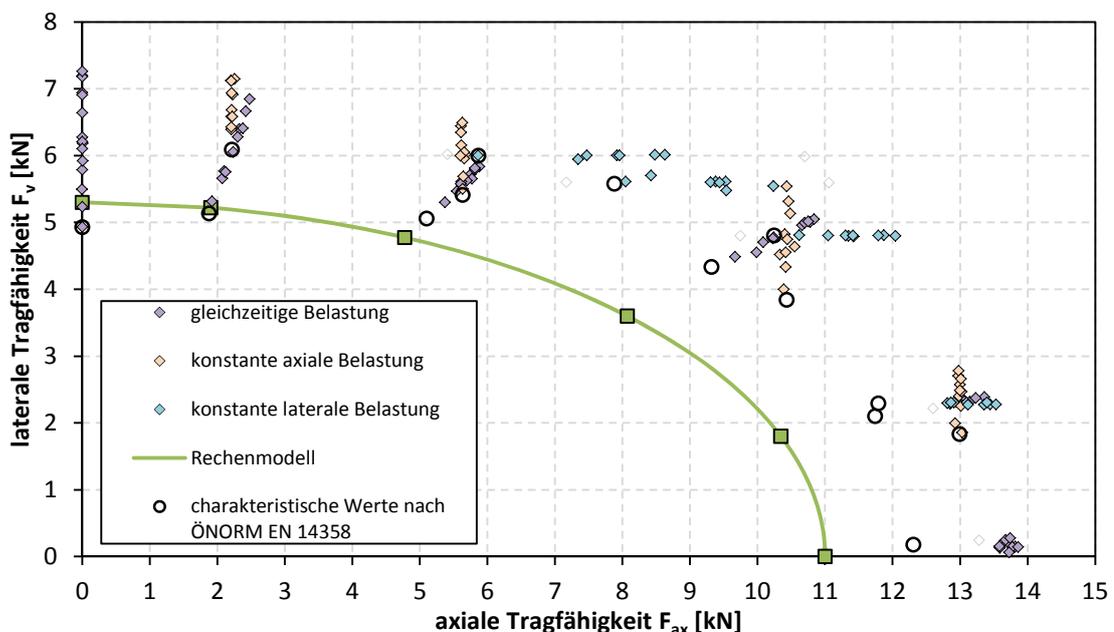


Abbildung 6.2: Vergleich Rechenmodell ETA-11/0190 [8] und Messergebnisse

Zur Untersuchung der Gültigkeit der Interaktionsvorschrift wurden, wie in Abbildung 6.3 gezeigt, die Mittelwerte und die empirischen 5 %-Quantile der rein axial beziehungsweise rein lateral beanspruchten Prüfungen als Fixpunkte definiert und das quadratische Berechnungsmodell angewendet. Die blaue strichlierte Linie stellte die quadratische Interaktion auf Basis der Mittelwerte dar und die rote durchgezogene Linie jene zufolge der empirischen 5 %-Quantile. Man erkennt aus Abbildung 6.3, dass die quadratische Interaktion geringere Tragfähigkeiten liefert als vorhanden sind.

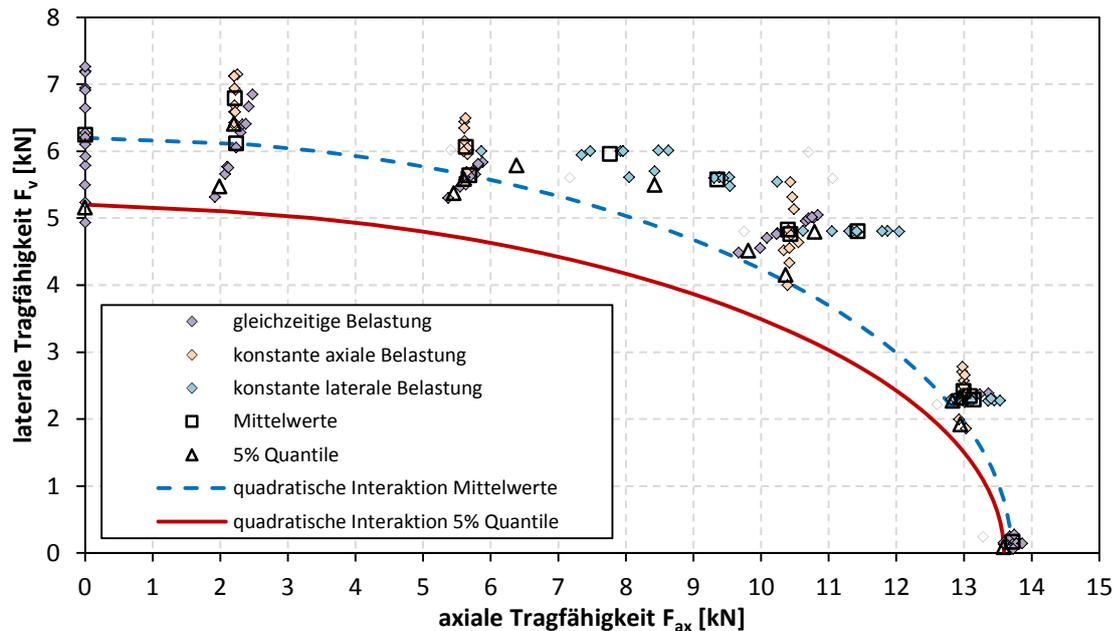


Abbildung 6.3: Überprüfung quadratische Interaktion

Bei der daraufhin durchgeführten nichtlinearen Regressionsanalyse, nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate, wurde nach besser passenden Hochzahlen für den Interaktionsnachweis gesucht. Die Hochzahlen aus dieser Analyse liegen im Bereich von 2,4 bis 3,6 in Abhängigkeit der verwendeten Prüfserien. Für die Interaktion von Mittelwerten ist eine Hochzahl von 2,4 und bei 5 %-Quantilen eine von 3,1 zu empfehlen. Diese Hochzahlen wurden mit den Tragfähigkeiten bei gleichzeitiger Laststeigerung ermittelt und beinhalten nicht die erhöhten Tragfähigkeiten zufolge sequentieller Lastaufbringung.

### 6-1.3 STEIFIGKEIT

Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, wurden bei der Auswertung aller Prüfungen Bereiche definiert in denen die Steifigkeitsermittlung stattfindet. Der axiale Bereich liegt zwischen 1,0 und 5,0 kN und der laterale zwischen 1,0 kN und 2,0 kN. Dies stellt jeweils circa 10 bis 40 Prozent der axialen beziehungsweise lateralen Gesamttragfähigkeit dar. Bei den Prüfserien 05, 06, 14 konnte die 5,0 kN Grenze der axialen Last nicht innerhalb des nahezu linearen Verformungsverhaltens erreicht werden und deshalb wurde eine Bereichsverkleinerung auf 2,0 kN durchgeführt.

Beim Vergleich der berechneten mit den prüftechnisch ermittelten Steifigkeiten erkennt man durchaus deutliche Abweichungen. Die berechnete axiale Steifigkeit nach ETA-11/0190 [8] ( $K_{ser,ax} = 7,9 \text{ kN/mm}$ ) ist viel geringer, als die gemessene Steifigkeit (Bereich zwischen 25 und 48 kN/mm; Mittelwert 39 kN/mm). Auch die Modelle nach Ringhofer et al. [33] ( $K_{ser,ax} = 18,2 \text{ kN/mm}$ ) und nach ETA-12/0063 [36] ( $K_{ser,ax} = 20,3 \text{ kN/mm}$ ) liefern zu geringe Werte.

Die nach ÖNORM EN 1995-1-1 [25] und DIN 1052 [9] berechneten lateralen Steifigkeiten ( $K_{ser,v,ÖNORM} = 4,3 \text{ kN/mm}$  und  $K_{ser,v,DIN} = 4,3 \text{ kN/mm}$ ) sind deutlich größer als die prüftechnisch ermittelten Steifigkeiten (Mittelwert  $K_{ser,v} = 0,9 \text{ kN/mm}$ ). Im Gegensatz dazu stimmt das Berechnungsergebnis nach SIA 265 [35] ( $K_{ser,v,SIA} = 0,7 \text{ kN/mm}$ ) sehr gut mit den Prüfergebnis überein.

Bei der Untersuchung der mittleren lateralen Steifigkeiten konnte festgestellt werden, dass es unabhängig von der Reihenfolge der Lastaufbringung zu einer Reduktion der Steifigkeit bei steigender axialer Last kommt (maximal beobachtete Reduktion von 21 %). Die Lastaufbringung beeinflusst aber anscheinend den Verlauf der Abnahme (bei gleichzeitiger Lastaufbringung Reduktion erst bei höheren Axiallasten).

Die mittleren axialen Steifigkeiten zeigen eine größere Abhängigkeit zur Reihenfolge der Lastaufbringung. Bei gleichzeitiger Belastung kommt es zu einer Reduktion der Steifigkeit. Im Gegensatz dazu tritt bei hintereinander aufgebracht Belastung zuerst eine geringe Abnahme der Steifigkeit auf, doch bei weiter steigender lateraler Last gibt es eine deutliche Erhöhung der axialen Steifigkeit (bis zu 75 % der mittleren Steifigkeit der ausschließlich axial belasteten Prüfungen).

Für die Modellierung einer Schraube unter einer kombinierten Beanspruchung sollten zwei getrennte Federn (eine lateral, eine axial) angesetzt werden. Die Veränderung der Steifigkeiten ( $K_{ser,ax}$  und  $K_{ser,v}$ ) kann als Vereinfachung vernachlässigt werden. Eine ermittelte Steifigkeit für einen definierten Winkel  $K_{\beta}$ , so wie sie von DeBonis & Bodig [5] definierte wurde, ist zu hinterfragen, da die Gesamtverformung und die Gesamtlast in zwei unterschiedliche Richtungen weisen (siehe Abbildung 6.4).

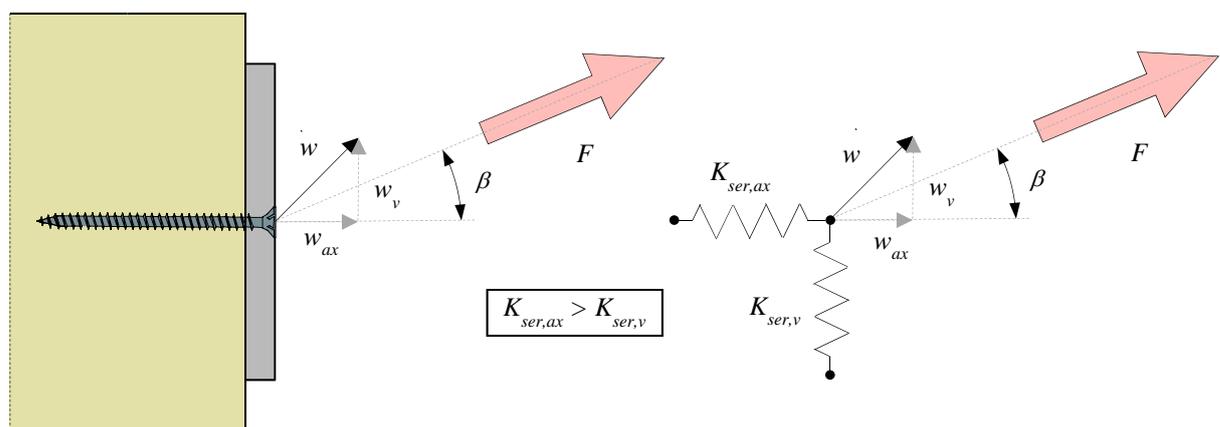


Abbildung 6.4: Unterschiedliche Richtung von Gesamtverformung und Gesamtlast

## 6-2 AUSBLICK

---

Die neu entwickelte Prüfanordnung ermöglicht die prüftechnische Untersuchung stiftförmiger Verbindungsmittel (Schrauben, Nägel, Klammern, ...) unter kombinierter Beanspruchung aus Abscheren und Herausziehen mit beliebiger Lastaufbringungsreihenfolge. Zusätzlich liefert die Prüfkongfiguration mit wenigen Adaptierungen auch die Möglichkeit, andere Verbindungsmittel, Verbindungen oder Verbindungssysteme, wie zum Beispiel Winkel, in zwei Richtungen mit getrennt gesteuerten Kräften zu belasten.

Als weiterführende Forschungsfrage wirft sich die generelle Gültigkeit der ermittelten Ergebnisse auf und damit auch der Einfluss von unterschiedlichen Versagensmodi auf die Interaktion der Tragfähigkeiten sowie der axialen und lateralen Steifigkeiten. Die Variation der Versagensmodi könnte mittels Veränderung der Eindrehtiefe der Schraube im Holz und der Dicke des Anschlussbleches durchgeführt werden.

Da in dieser Arbeit der Einschraubwinkel zwischen Holzfaser und Schraubenachse mit  $90^\circ$  fixiert wurde, sollte man auch den Einfluss dieses Parameters in weiteren Prüfserien genauer beleuchten.

Die laut ÖNORM EN 1995-1-1 [25] gültige quadratische Interaktion beinhaltet keinen Einfluss des Schraubendurchmessers. Um diese Festlegung der Norm zu überprüfen und gegebenenfalls zu bestätigen, sollten weitere Prüfungen mit größeren Durchmessern durchgeführt werden.

Bei allen weiterführenden Untersuchungen wäre im Weiteren zu beobachten, in wie weit die Steifigkeits- und Tragfähigkeitserhöhungen bei sequenzieller Lastaufbringung gültig sind.

Als wünschenswertes Ergebnis aller weiterführenden Untersuchungen sollte eine realitätsnahe Hochzahl für die Interaktion der Tragfähigkeiten stehen.

Eine interessante Weiterentwicklung aus dieser Arbeit wäre ein Bemessungsmodell für Laschenstöße, welches die Schertragfähigkeit der Schraube mitberücksichtigt und somit auch für größere Kraft-Schraubenachsen-Winkel  $\beta$  eingesetzt werden könnte.

---

## ANHANG A VERZEICHNISSE

### A-1 Literaturverzeichnis

- [1] Adolf Würth GmbH & Co. KG (2015a), ‘Würth Schraube ASSY 3.0 - Teilgewinde’, Internet. <https://eshop.wuerth-ag.ch/Gesamtkatalog/ASSY-3.0-HB-Stahl-verzinkt-Teilgewinde-AW/31263508070706.cyid/3126.cgid/de/DE/CHF/>
- [2] Adolf Würth GmbH & Co. KG (2015b), ‘Würth Transportanker’, Internet. [http://media.wuerth.com/stmedia/shop/masterpages0000/LANG\\_de/07997.pdf](http://media.wuerth.com/stmedia/shop/masterpages0000/LANG_de/07997.pdf) und [http://katalog.wuerth.at/zulassungen/Hinweis\\_zur\\_Verwendung\\_des\\_Transportankers.pdf](http://katalog.wuerth.at/zulassungen/Hinweis_zur_Verwendung_des_Transportankers.pdf)
- [3] Blaß, H. J. (2007), Selbstbohrende Schrauben als hochwirksames Verbindungsmittel, in ‘6. Grazer Holzbau-Fachtagung’, holz.bau forschungs gmbh and TU Graz - Institut für Holzbau und Holztechnologie, Graz, Österreich, pp. D – 1 bis D – 20.
- [4] Blaß, H. J., Bejtka, I. & Uibel, T. (2006), Tragfähigkeit von Verbindungen mit selbstbohrenden Holzschrauben mit Vollgewinde, Technical Report 4, Universität Karlsruhe (TH) - Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktion, Karlsruhe, Deutschland.
- [5] DeBonis, A. L. & Bodig, J. (1975), ‘Nailed wood joints under combined loading’, *Wood Science and Technology* **9** (2), 129 – 144.
- [6] Deutsches Institut für Bautechnik (2012a), ETA-12/0132, Europäisch Technische Zulassung, HECO Schrauben - HECO-TOPIX-T und HECO-TOPIX-CC Schrauben als Holzverbindungsmitel, Technical Report.
- [7] Deutsches Institut für Bautechnik (2012b), Z-9.1-656, Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung, Schmid Schrauben - Holzschrauben Star Drive Vollgewinde und Star Drive 2 Gewinde als Holzverbindungsmitel, Technical Report.
- [8] Deutsches Institut für Bautechnik (2013), ETA-11/0190, Europäisch Technische Zulassung, Würth Schrauben - Selbstbohrende Schrauben als Holzverbindungsmitel, Technical Report.
- [9] DIN 1052 (2008), ‘DIN 1052: Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken – Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau’.
- [10] Ehlbeck, J. & Siebert, W. (1984), Tragverhalten von Nagelverbindungen bei gleichzeitiger Beanspruchung auf Abscheren und Ausziehen, Technical Report, Univ. Karlsruhe, Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine (Herausgeber, Ausführende Stelle); Bundesministerium für Raumordnung und Städtebau, Bonn (Förderer), Karlsruhe, Deutschland.
- [11] Flatscher, G., Bratulic, K. & Schickhofer, G. (2014), Screwed joints in cross laminated timber structures, in ‘13th World Conference on Timber Engineering 2014’, Quebec City, Canada.
- [12] Gehri, E. (2010), Schraubenverbindungen für Laubholzkonstruktionen, in ‘16. Internationales Holzbau-Forum 2010’, Garmisch, Deutschland.

- 
- [13] Holic, Z. (2016), Einflussfaktoren auf das Tragverhalten einer Stabdübelverbindung - Bestimmung des Reibungsbeiwertes zwischen Stabdübel und umgebendem Holz, Master's Thesis, Technische Universität Graz, Graz, Österreich.
- [14] Johansen, K. W. (1949), 'Theory of timber connections', *IABSE Journal (International Association for Bridge and Structural Engineering)* **9**, 249 – 262.
- [15] Krenn, H. (2007), Traglast von auf Zug beanspruchten Schraubenverbindungen mit Stahlblechen, in '6. Grazer Holzbau-Fachtagung 2007', holz.bau forschungs gmbh and TU Graz - Institut für Holzbau und Holztechnologie, Graz, Österreich, pp. G – 1 bis G – 18.
- [16] Mahlknecht, U. (2011), Untersuchung von rechtwinklig zur Faser eingebrachten, axial beanspruchten Schraubengruppen im Vollholz und Brettsperrholz, Master's Thesis, Technische Universität Graz, Graz, Österreich.
- [17] McLain, T. E. & Carroll, J. D. (1990), 'combined load capacity of threaded fastener - wood connections', *Journal of Structural Engineering* **116** (9), 2419 – 2432.
- [18] Munse, W. H. & Cox, H. L. (1956), The static strength of rivets subjected to combined tension and shear, Technical report, University of Illinois - the engineering experiment station, Urbana, Illinois.
- [19] ÖNORM EN 12512 (2005), 'Holzbauwerke - Prüfverfahren - Zyklische Prüfungen von Anschlüssen mit mechanischen Verbindungsmitteln (konsolidierte Fassung)'.
- [20] ÖNORM EN 13183-1 (2004), 'Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz - Teil 1: Bestimmung durch Darrverfahren'.
- [21] ÖNORM EN 1382 (1999), 'Holzbauwerke - Prüfverfahren - Ausziehtragfähigkeit von Holzverbindungsmitteln'.
- [22] ÖNORM EN 1383 (1999), 'Holzbauwerke - Prüfverfahren - Prüfung von Holzverbindungsmitteln auf Kopfdurchziehen'.
- [23] ÖNORM EN 14358 (2007), 'Holzbauwerke — Berechnung der 5%-Quantile für charakteristische Werte und Annahmekriterien für Proben'.
- [24] ÖNORM EN 14592 (2012), 'Holzbauwerke — Stiftförmige Verbindungsmittel — Anforderungen'.
- [25] ÖNORM EN 1995-1-1 (2014), 'Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil1-1: Allgemeines- Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau (konsolidierte Fassung)'.
- [26] ÖNORM EN 26891 (1991), 'Holzbauwerke - Verbindungen mit mechanischen Verbindungsmitteln - Allgemeine Grundsätze für die Ermittlung der Tragfähigkeit und des Verformungsverhaltens'.
- [27] ÖNORM EN 409 (2009), 'Holzbauwerke - Prüfverfahren - Bestimmung des Fließmoments von stiftförmigen Verbindungsmitteln'.
- [28] ÖNORM ISO 554 (1994), 'Normklimate für Konditionierung und/oder Prüfung Zahlenangabe'.
-

- 
- [29] Pirnbacher, G. (2007), Schrauben im Vergleich - eine empirische Betrachtung, in '6. Grazer Holzbau-Fachtagung 2007', holz.bau forschungs gmbh und TU Graz - Institut für Holzbau und Holztechnologie, Graz, Österreich, pp. F – 1 bis F – 22.
- [30] Reyer, E. & Linzner, P. (1993), Tragfähigkeit von Hirnholznägeln und Hirnholzschrauben unter Ausziehbelastung, Abscherbelastung und kombinierter Belastung zur Herstellung rationeller Holzverbindungen, Technical Report, Lehrstuhl für Baukonstruktionen, Ingenieurholzbau und Bauphysik der Ruhr-Universität Bochum, Bochum, Deutschland.
- [31] Ringhofer, A., Brandner, R., Grabner, M. & Schickhofer, G. (2014), Die Ausziehfestigkeit selbstbohrender Holzschrauben in geschichteten Holzprodukten, in 'Forschungskolloquium Holzbau "Forschung und Praxis" 2014', Kuhlmann, Ulrike und Stephan, Katrin, Stuttgart, Deutschland, pp. 49 – 60.
- [32] Ringhofer, A., Brandner, R. & Schickhofer, G. (2014), 'Entwicklung einer optimierten Schraubengeometrie für hochbeanspruchte Stahl-Holz-Verbindungen', *Bautechnik* **91**, 31 – 37.
- [33] Ringhofer, A., Brandner, R. & Schickhofer, G. (2015), A universal approach for withdrawal properties of self-tapping screws in solid timber and laminated timber products, in 'International Network on Timber Engineering Research - INTER / 48 - 7 - 1', Sibenik, Kroatien.
- [34] Schickhofer, G. (2009), *Holzbau – Nachweisführungen für Konstruktionen aus Holz*, TU Graz, Graz, Österreich.
- [35] SIA 265 (2012), 'Holzbau'.
- [36] Österreichisches Institut für Bautechnik (2013), ETA-12/0063, Europäisch Technische Zulassung, SFS selbstbohrende Schrauben WT - Selbstbohrende Schrauben zur Verwendung im Holzbau, Technical Report.

## A-2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Einfluss Schrauben-Kraft-Winkel auf Last-Verformungsverhalten bei Laschenstoß [12] .....	2
Abbildung 2.1: Aufbau - Selbstbohrende Holzschraube [1] .....	4
Abbildung 2.2: Laschenstoß mit geneigten Schrauben .....	5
Abbildung 2.3: Transportanker [2].....	5
Abbildung 2.4: Mindestabstände geneigter Schrauben in Anlehnung an [25].....	6
Abbildung 2.5: Knickversagen bei Druckbelasteten Schrauben [34].....	9
Abbildung 2.6: Blockscherversagen von axial beanspruchten Schrauben [16] .....	12
Abbildung 2.7: Mindestabstände Schrauben in Anlehnung an [25].....	14
Abbildung 2.8: Seileffekt .....	18
Abbildung 2.9: Versagensmodi [34] .....	20
Abbildung 2.10: Möller-Diagramm für einschnittige Holz-Stahlblech-Verbindungen in Anlehnung an [34] (Grenzen geändert auf charakteristisches Lastniveau) .....	21
Abbildung 2.11: Blockscherversagen von lateral beanspruchten Schrauben [25] .....	24
Abbildung 2.12: Prüfkfiguration nach DeBonis & Bodig [5] .....	28
Abbildung 2.13: Prüfung von Nieten unter kombinierter Belastung nach Munse & Cox [18].....	29
Abbildung 2.14: Weiterentwicklung der Anordnung nach DeBonis & Bodig durch Reyer & Linzner [30] .....	30
Abbildung 2.15: Konfigurationen nach McLain & Carroll [17] .....	30
Abbildung 2.16: Konfigurationen nach Reyer & Linzner [30] (links: Abscheren / rechts: Herausziehen).....	31
Abbildung 2.17: Aufteilung der Kräfte .....	32
Abbildung 2.18: Versuchskonfiguration nach Blaß et al. [4].....	33
Abbildung 2.19: Versuchskonfiguration nach Blaß et al. [4].....	33
Abbildung 3.1: Versuchskörperherstellung.....	36
Abbildung 3.2: Grundidee Versuchskonfiguration 1 .....	38
Abbildung 3.3: Versuchsaufbau - Vorversuch V01 - Abscheren .....	38
Abbildung 3.4: Kraft –Verschiebungs-Diagramm (Vorversuch V01 – reines Abscheren).....	39
Abbildung 3.5: Versuchsaufbau - Vorversuch V02 - Abscheren .....	40
Abbildung 3.6: Kraft–Verschiebungs-Diagramm (Vorversuch V02 – reines Abscheren).....	40

---

Abbildung 3.7: Versuchsaufbau - Vorversuch V03 - Abscheren .....	41
Abbildung 3.8: Kraft–Verschiebungs-Diagramm (Vorversuch V03 – reines Abscheren).....	42
Abbildung 3.9: Grundidee Versuchskonfiguration 2 .....	43
Abbildung 3.10: Versuchsaufbau - Vorversuch V10, V11, V13 - Abscheren .....	44
Abbildung 3.11: Kraft–Verschiebungs-Diagramm (Vorversuch V10, V11, V13 – reines Abscheren)	44
Abbildung 3.12: Versuchsaufbau - Vorversuch V12 - Herausziehen .....	45
Abbildung 3.13: Dehnmessstreifen auf Gewindestange (links: aufgeklebt; rechts: verkabelt).....	46
Abbildung 3.14: Kalibrierung der Gewindestange mit DMS (links: Anordnung; rechts: Messergebnis) .....	47
Abbildung 3.15: links: eingebaute Gewindestange mit DMS; rechts: Mutter mit PTFE Schichten .....	47
Abbildung 3.16: Kraft –Verschiebungs-Diagramm (Vorversuch V14 – reine axiale Belastung).....	48
Abbildung 3.17: Führung des Anschlussbleches.....	49
Abbildung 3.18: Kraft–Verschiebungs-Diagramm (Vorversuch V15 – reine axiale Belastung).....	50
Abbildung 3.19: Prüfaufbau inklusive Messanordnung für Vorversuch V16.....	50
Abbildung 3.20: Kraft–Verschiebungs-Diagramm (Vorversuch V16, V17, V18, V19 – reines Abscheren) .....	51
Abbildung 3.21: Vergleich: laterales Kraft–Verschiebungs-Diagramm (Vorversuch V17, V18, V19, V20, V25).....	52
Abbildung 3.22: Vergleich: axiales Kraft–Verschiebungs-Diagramm (Vorversuch V14, V15, V21, V22, V27).....	53
Abbildung 3.23: axiales Kraft–Verschiebungs-Diagramm (Vorversuch V14, V15, V23, V24, V26)..	54
Abbildung 3.24: laterales Kraft–Verschiebungs-Diagramm (Vorversuch V17, V18, V19, V23, V24, V26).....	55
Abbildung 3.25: Prüfkongfiguration (oben: umgesetzter Aufbau; unten: schematischer Plan).....	56
Abbildung 3.26 links: eingebauter Prüfkörper; rechts: Holzschablone zur Befestigung der Wegaufnehmer .....	57
Abbildung 3.27 Optimierung der axialen Lastaufbringung .....	57
Abbildung 4.1: Auftragung von Klebstoff .....	59
Abbildung 4.2: Prüfkörper in der hydraulischen Presse.....	60
Abbildung 4.3 Prüfaufbau der Serien 07A und 07B (ohne Führung des Anschlussbleches).....	65
Abbildung 5.1: Punktwolke - Interaktion laterale und axiale Tragfähigkeit .....	72
Abbildung 5.2: Boxplots Serien 01, 02+16, 03, 04, 05, 06 – gleichzeitige Belastung.....	73
Abbildung 5.3: Boxplots Serien 01, 02+16, 08, 10, 12, 14 – konstante axiale Belastung .....	73
Abbildung 5.4: Boxplots Serien 01, 02+16, 09, 11, 13, 15 – konstante laterale Belastung .....	74

---

Abbildung 5.5: Vergleich Rechenmodell und Messergebnisse.....	75
Abbildung 5.6: Überprüfung quadratische Interaktion .....	76
Abbildung 5.7: ermittelte Hochzahlen für Interaktion (Mittelwerte).....	77
Abbildung 5.8: ermittelte Hochzahlen für Interaktion (empirisches 5 % Quantil) .....	78
Abbildung 5.9: Punktwolke - Interaktion laterale und axiale Steifigkeit.....	80
Abbildung 5.10: axiale Steifigkeit in Abhängigkeit des Winkels $\beta$ - gleichzeitige Belastung .....	81
Abbildung 5.11: axiale Steifigkeit unter konstanter lateraler Belastung.....	82
Abbildung 5.12: Vergleich: axiales Kraft-Verschiebungs-Diagramm bei konstanter lateraler Belastung .....	82
Abbildung 5.13: Vergleich: axiales Kraft-Verschiebungs-Diagramm bei gleichzeitig steigender lateraler Last.....	83
Abbildung 5.14: Anpressung des Anschlussbleches durch Verbiegung der Schraube .....	84
Abbildung 5.15: laterale Steifigkeit in Abhängigkeit des Winkels $\beta$ - gleichzeitige Belastung .....	85
Abbildung 5.16: laterale Steifigkeit unter konstanter axialer Belastung.....	85
Abbildung 5.17: Vergleich: laterales Kraft-Verschiebungs-Diagramm bei konstanter axialer Belastung .....	86
Abbildung 5.18: Vergleich: laterales Kraft-Verschiebungs-Diagramm bei gleichzeitig steigender axialer Last .....	87
Abbildung 5.19: Unterschiedliche Richtung von Gesamtverformung und Gesamtlast .....	87
Abbildung 6.1: Neu entwickelte Prüfkfiguration (oben: umgesetzter Aufbau; unten: schematischer Plan) .....	90
Abbildung 6.2: Vergleich Rechenmodell ETA-11/0190 [8] und Messergebnisse .....	91
Abbildung 6.3: Überprüfung quadratische Interaktion .....	92
Abbildung 6.4: Unterschiedliche Richtung von Gesamtverformung und Gesamtlast .....	93

---

## A-3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Mindestabstände für axial beanspruchte Schrauben.....	7
Tabelle 2.2: Mindestabstände: rechtwinklig zur Achse beanspruchte Schrauben lt. EC5 [25].....	15
Tabelle 2.3: Werte für $k_{ef}$ nach ÖNORM EN 1995-1-1 [25].....	17
Tabelle 2.4: Berechnung der Steifigkeit für den Gebrauchszustand laut SIA 265 [35] .....	25
Tabelle 3.1: Technische Daten der Schrauben [8].....	37
Tabelle 3.2: ermittelte laterale Tragfähigkeit und Steifigkeit der Vorversuche V10, V11 und V13.....	45
Tabelle 3.3: ermittelte axiale Tragfähigkeit und Steifigkeit der Vorversuche V14 und V15.....	49
Tabelle 3.4: ermittelte laterale Tragfähigkeit und Steifigkeit der Vorversuche V16, V17, V18 und V19 .....	51
Tabelle 4.1: ermittelte Mittelwerte, Mediane und Variationskoeffizienten der Rohdichten und Holzfeuchten .....	61
Tabelle 4.2: Technische Daten der Schrauben [8].....	62
Tabelle 4.3: Prüfplan .....	63
Tabelle 5.1: rechnerische charakteristische axiale Tragfähigkeit der Schraube.....	69
Tabelle 5.2: rechnerische charakteristische laterale Tragfähigkeit der Schraube.....	69
Tabelle 5.3: rechnerische charakteristische Tragfähigkeiten der Schraube bei kombinierter Belastung .....	70
Tabelle 5.4: ermittelte Hochzahlen für Interaktion .....	77
Tabelle 5.5: rechnerische axiale Steifigkeit $K_{ser}$ der Schraube.....	79
Tabelle 5.6: rechnerische laterale Steifigkeit $K_{ser}$ der Schraube.....	79



## ANHANG B ROHDICHTEN UND HOLZFEUCHTEN

lfd.Nr	Probekörper	Datum Eingang	Masse Eingang	Länge Eingang	Länge Eingang	Breite Eingang	Breite Eingang	Dicke Eingang	Dicke Eingang	Datum Ausgang	Masse Ausgang	Holzfeuchte	Rohdichte feucht
[-]	[-]	[-]	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[g]	[%]	[kg/m <sup>3</sup> ]
1	01-1	16.09.2015	135,15	160,06	160,00	40,62	40,60	40,47	40,48	18.09.2015	119,48	13,1%	513,80
2	01-2	16.09.2015	135,84	160,18	160,14	40,60	40,61	40,53	40,43	18.09.2015	119,55	13,6%	516,00
3	01-3	16.09.2015	132,37	160,58	160,56	40,64	40,48	40,52	40,59	18.09.2015	116,85	13,3%	501,17
4	01-4	16.09.2015	138,28	160,05	160,01	40,58	40,59	40,52	40,46	18.09.2015	121,99	13,4%	525,83
5	01-5	16.09.2015	142,89	160,77	160,75	40,53	40,47	40,55	40,44	18.09.2015	126,26	13,2%	541,96
6	01-6	16.09.2015	137,27	160,44	160,40	40,60	40,50	40,40	40,65	18.09.2015	121,83	12,7%	520,72
7	01-7	16.09.2015	146,00	160,29	160,33	40,56	40,60	40,49	40,51	18.09.2015	129,26	13,0%	554,15
8	01-8	16.09.2015	145,63	160,35	160,38	40,63	40,64	40,60	40,58	18.09.2015	128,56	13,3%	550,58
9	01-9	16.09.2015	149,12	160,10	160,11	40,61	40,59	40,49	40,48	18.09.2015	131,57	13,3%	566,64
10	01-0	16.09.2015	146,16	159,95	159,99	40,63	40,53	40,57	40,55	18.09.2015	128,72	13,5%	555,11
11	02-1	16.09.2015	140,57	160,21	160,26	40,52	40,60	40,55	40,46	18.09.2015	124,69	12,7%	533,98
12	02-2	16.09.2015	133,63	159,98	160,01	40,56	40,66	40,48	40,52	18.09.2015	117,70	13,5%	507,82
13	02-3	16.09.2015	130,19	160,08	160,12	40,51	40,59	40,39	40,55	18.09.2015	114,80	13,4%	495,52
14	02-4	16.09.2015	138,28	160,07	160,06	40,60	40,61	40,47	40,40	18.09.2015	122,04	13,3%	526,17

lfd.Nr	Probekörper	Datum Eingang	Masse Eingang	Länge Eingang	Länge Eingang	Breite Eingang	Breite Eingang	Dicke Eingang	Dicke Eingang	Datum Ausgang	Masse Ausgang	Holzfeuchte	Rohdichte feucht
[-]	[-]	[-]	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[g]	[%]	[kg/m <sup>3</sup> ]
15	02-5	16.09.2015	135,03	160,65	160,59	40,52	40,39	40,48	40,44	18.09.2015	119,17	13,3%	513,61
16	02-6	16.09.2015	141,16	160,25	160,24	40,62	40,58	40,39	40,45	18.09.2015	124,71	13,2%	536,79
17	02-7	16.09.2015	142,52	160,14	160,19	40,51	40,59	40,38	40,35	18.09.2015	125,40	13,7%	543,64
18	02-8	16.09.2015	145,72	160,08	160,08	40,63	40,61	40,42	40,56	18.09.2015	128,47	13,4%	553,47
19	02-9	16.09.2015	150,39	160,82	160,85	40,60	40,61	40,48	40,54	18.09.2015	132,77	13,3%	568,46
20	-0	16.09.2015	143,98	160,03	160,05	40,59	40,50	40,58	40,48	18.09.2015	126,13	14,2%	547,47
21	03-1	16.09.2015	133,63	160,27	160,25	40,46	40,50	40,38	40,39	18.09.2015	118,71	12,6%	510,06
22	03-2	16.09.2015	132,09	160,18	160,22	40,57	40,52	40,45	40,50	18.09.2015	116,46	13,4%	502,44
23	03-3	16.09.2015	135,68	160,57	160,54	40,64	40,50	40,56	40,48	18.09.2015	119,83	13,2%	514,06
24	03-4	16.09.2015	144,08	160,66	160,63	40,63	40,67	40,50	40,51	18.09.2015	127,23	13,2%	544,71
25	03-5	16.09.2015	133,46	160,62	160,65	40,62	40,52	40,50	40,58	18.09.2015	117,96	13,1%	505,15
26	03-6	16.09.2015	140,56	160,62	160,58	40,54	40,61	40,54	40,52	18.09.2015	124,06	13,3%	532,21
27	03-7	16.09.2015	140,31	160,22	160,27	40,48	40,64	40,48	40,46	18.09.2015	123,52	13,6%	533,42
28	03-8	16.09.2015	150,46	160,08	160,06	40,60	40,60	40,48	40,54	18.09.2015	132,76	13,3%	571,51
29	03-9	16.09.2015	145,73	160,27	160,34	40,60	40,58	40,33	40,42	18.09.2015	128,58	13,3%	554,72
30	03-0	16.09.2015	143,66	160,12	160,08	40,63	40,43	40,38	40,47	18.09.2015	126,67	13,4%	547,67
31	04-1	16.09.2015	135,58	160,32	160,33	40,62	40,58	40,58	40,42	18.09.2015	120,27	12,7%	514,30

lfd.Nr	Probekörper	Datum Eingang	Masse Eingang	Länge Eingang	Länge Eingang	Breite Eingang	Breite Eingang	Dicke Eingang	Dicke Eingang	Datum Ausgang	Masse Ausgang	Holzfeuchte	Rohdichte feucht
[-]	[-]	[-]	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[g]	[%]	[kg/m <sup>3</sup> ]
32	04-2	16.09.2015	140,72	159,83	159,81	40,59	40,58	40,58	40,56	18.09.2015	123,77	13,7%	534,75
33	04-3	16.09.2015	142,56	160,22	160,20	40,59	40,63	40,47	40,55	18.09.2015	125,93	13,2%	540,89
34	04-4	16.09.2015	145,06	159,15	159,20	40,53	40,62	40,46	40,45	18.09.2015	127,26	14,0%	555,19
35	04-5	16.09.2015	153,83	159,91	159,93	40,64	40,58	40,66	40,53	18.09.2015	135,02	13,9%	583,49
36	04-6	16.09.2015	152,71	160,60	160,58	40,48	40,57	40,45	40,48	18.09.2015	134,99	13,1%	579,89
37	04-7	16.09.2015	146,49	160,28	160,31	40,51	40,58	40,55	40,54	18.09.2015	129,32	13,3%	555,92
38	04-8	16.09.2015	139,65	160,49	160,55	40,63	40,47	40,52	40,48	18.09.2015	123,25	13,3%	529,74
39	04-9	16.09.2015	149,48	159,79	159,77	40,69	40,54	40,42	40,30	18.09.2015	132,47	12,8%	570,72
40	04-0	16.09.2015	136,35	160,20	160,16	40,55	40,57	40,52	40,47	18.09.2015	118,37	15,2%	518,26
41	05-1	16.09.2015	136,73	160,14	160,17	40,52	40,62	40,65	40,42	18.09.2015	121,74	12,3%	519,14
42	05-2	16.09.2015	141,49	160,55	160,53	40,61	40,52	40,52	40,50	18.09.2015	124,62	13,5%	536,33
43	05-3	16.09.2015	142,98	160,37	160,33	40,55	40,58	40,47	40,49	18.09.2015	126,31	13,2%	543,02
44	05-4	16.09.2015	138,03	160,03	160,03	40,58	40,52	40,53	40,42	18.09.2015	121,37	13,7%	525,53
45	05-5	16.09.2015	145,85	160,02	160,00	40,52	40,64	40,44	40,47	18.09.2015	128,89	13,2%	555,23
46	05-6	16.09.2015	141,51	159,31	159,34	40,62	40,64	40,54	40,47	18.09.2015	124,85	13,3%	539,69
47	05-7	16.09.2015	143,03	159,99	159,96	40,50	40,56	40,48	40,46	18.09.2015	126,28	13,3%	545,09
48	05-8	16.09.2015	143,58	160,32	160,34	40,65	40,54	40,52	40,54	18.09.2015	126,42	13,6%	544,29

Ifd.Nr	Probekörper	Datum Eingang	Masse Eingang	Länge Eingang	Länge Eingang	Breite Eingang	Breite Eingang	Dicke Eingang	Dicke Eingang	Datum Ausgang	Masse Ausgang	Holzfeuchte	Rohdichte feucht
[-]	[-]	[-]	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[g]	[%]	[kg/m <sup>3</sup> ]
49	05-9	16.09.2015	140,79	160,41	160,42	40,64	40,58	40,54	40,55	18.09.2015	124,11	13,4%	533,04
50	05-0	16.09.2015	134,42	160,14	160,12	40,57	40,56	40,39	40,50	18.09.2015	118,48	13,5%	511,65
51	06-1	16.09.2015	136,52	160,48	160,45	40,56	40,43	40,61	40,45	18.09.2015	120,67	13,1%	518,37
52	06-2	16.09.2015	139,38	160,13	160,09	40,57	40,60	40,44	40,56	18.09.2015	123,00	13,3%	529,62
53	06-3	16.09.2015	144,05	160,00	160,02	40,52	40,59	40,59	40,54	18.09.2015	127,49	13,0%	547,23
54	06-4	16.09.2015	151,23	160,37	160,34	40,63	40,62	40,55	40,56	18.09.2015	133,36	13,4%	572,42
55	06-5	16.09.2015	146,01	160,28	160,24	40,63	40,59	40,59	40,59	18.09.2015	129,15	13,1%	552,72
56	06-6	16.09.2015	141,67	160,25	160,23	40,55	40,66	40,58	40,53	18.09.2015	125,40	13,0%	536,89
57	06-7	16.09.2015	146,35	160,35	160,32	40,62	40,62	40,60	40,53	18.09.2015	129,34	13,2%	553,95
58	06-8	16.09.2015	142,86	160,16	160,21	40,67	40,55	40,49	40,52	18.09.2015	125,88	13,5%	542,18
59	06-9	16.09.2015	144,37	160,06	160,12	40,61	40,65	40,59	40,49	18.09.2015	128,22	12,6%	547,50
60	06-0	16.09.2015	130,81	159,84	159,83	40,58	40,59	40,45	40,47	18.09.2015	115,74	13,0%	498,40
61	07A-1	16.09.2015	139,03	160,55	160,54	40,61	40,47	40,49	40,34	18.09.2015	122,87	13,2%	528,55
62	07B-2	16.09.2015	143,19	160,16	160,21	40,65	40,63	40,57	40,36	18.09.2015	126,99	12,8%	543,57
63	07A-3	16.09.2015	131,18	160,09	160,06	40,55	40,54	40,37	40,51	18.09.2015	115,65	13,4%	499,80
64	07B-4	16.09.2015	147,77	160,58	160,57	40,60	40,61	40,50	40,57	18.09.2015	129,96	13,7%	559,11
65	07A-5	16.09.2015	142,51	159,98	159,97	40,59	40,63	40,35	40,50	18.09.2015	125,85	13,2%	542,64

ROHDICHTEN UND HOLZFEUCHTEN

lfd.Nr	Probekörper	Datum Eingang	Masse Eingang	Länge Eingang	Länge Eingang	Breite Eingang	Breite Eingang	Dicke Eingang	Dicke Eingang	Datum Ausgang	Masse Ausgang	Holzfeuchte	Rohdichte feucht
[-]	[-]	[-]	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[g]	[%]	[kg/m <sup>3</sup> ]
66	07B-6	16.09.2015	141,16	160,03	159,97	40,62	40,55	40,45	40,43	18.09.2015	124,41	13,5%	537,55
67	07A-7	16.09.2015	143,98	160,52	160,56	40,66	40,56	40,51	40,50	18.09.2015	127,04	13,3%	545,23
68	07B-8	16.09.2015	148,03	160,26	160,22	40,66	40,52	40,46	40,47	18.09.2015	129,80	14,0%	562,45
69	07A-9	16.09.2015	142,47	160,14	160,19	40,61	40,52	40,48	40,49	18.09.2015	125,80	13,3%	541,64
70	07B-0	16.09.2015	144,92	160,28	160,29	40,60	40,54	40,41	40,51	18.09.2015	127,59	13,6%	550,81
71	08-1	16.09.2015	132,41	160,32	160,26	40,37	40,56	40,43	40,35	18.09.2015	117,16	13,0%	505,43
72	08-2	16.09.2015	144,87	160,30	160,34	40,55	40,64	40,53	40,38	18.09.2015	127,60	13,5%	550,23
73	08-3	16.09.2015	134,09	160,00	159,96	40,46	40,55	40,45	40,51	18.09.2015	118,37	13,3%	511,19
74	08-4	16.09.2015	149,49	160,14	160,10	40,57	40,64	40,57	40,55	18.09.2015	130,06	14,9%	566,88
75	08-5	16.09.2015	144,61	160,69	160,72	40,61	40,53	40,50	40,50	18.09.2015	127,82	13,1%	547,66
76	08-6	16.09.2015	137,73	160,46	160,51	40,65	40,52	40,56	40,42	18.09.2015	121,51	13,3%	522,25
77	08-7	16.09.2015	142,44	160,40	160,37	40,61	40,56	40,51	40,55	18.09.2015	125,72	13,3%	539,92
78	08-8	16.09.2015	148,98	159,89	159,91	40,63	40,54	40,53	40,51	18.09.2015	131,29	13,5%	566,56
79	08-9	16.09.2015	143,44	160,22	160,24	40,63	40,47	40,40	40,38	18.09.2015	126,62	13,3%	546,59
80	08-0	16.09.2015	149,37	160,30	160,32	40,50	40,55	40,35	40,45	18.09.2015	131,57	13,5%	569,11
81	09-1	16.09.2015	129,86	160,03	160,01	40,59	40,51	40,58	40,45	18.09.2015	115,21	12,7%	493,96
82	09-2	16.09.2015	139,29	160,27	160,24	40,62	40,57	40,55	40,38	18.09.2015	122,37	13,8%	529,12

lfd.Nr	Probekörper	Datum Eingang	Masse Eingang	Länge Eingang	Länge Eingang	Breite Eingang	Breite Eingang	Dicke Eingang	Dicke Eingang	Datum Ausgang	Masse Ausgang	Holzfeuchte	Rohdichte feucht
[-]	[-]	[-]	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[g]	[%]	[kg/m <sup>3</sup> ]
83	09-3	16.09.2015	137,88	160,00	160,04	40,63	40,63	40,36	40,43	18.09.2015	121,82	13,2%	524,99
84	09-4	16.09.2015	150,72	160,35	160,39	40,62	40,63	40,40	40,51	18.09.2015	132,94	13,4%	571,85
85	09-5	16.09.2015	145,29	160,32	160,23	40,56	40,59	40,41	40,38	18.09.2015	128,42	13,1%	553,07
86	09-6	16.09.2015	140,76	160,60	160,57	40,56	40,62	40,57	40,44	18.09.2015	123,76	13,7%	533,15
87	09-7	16.09.2015	139,61	160,42	160,37	40,60	40,55	40,50	40,45	18.09.2015	123,16	13,4%	530,01
88	09-8	16.09.2015	149,76	160,08	160,06	40,50	40,55	40,60	40,50	18.09.2015	132,42	13,1%	569,34
89	09-9	16.09.2015	144,77	160,50	160,48	40,57	40,58	40,35	40,37	18.09.2015	127,58	13,5%	550,83
90	09-0	16.09.2015	140,93	159,95	159,92	40,62	40,48	40,38	40,51	18.09.2015	124,05	13,6%	537,28
91	10-1	16.09.2015	137,40	160,49	160,51	40,60	40,49	40,53	40,58	18.09.2015	120,88	13,7%	520,63
92	10-2	16.09.2015	133,85	160,40	160,30	40,61	40,50	40,38	40,46	18.09.2015	118,38	13,1%	509,22
93	10-3	16.09.2015	148,89	160,37	160,34	40,91	40,80	40,50	40,49	18.09.2015	131,53	13,2%	561,22
94	10-4	16.09.2015	144,12	160,29	160,34	40,70	40,57	40,50	40,40	18.09.2015	127,04	13,4%	546,93
95	10-5	16.09.2015	149,75	160,14	160,15	40,52	40,59	40,53	40,45	18.09.2015	131,91	13,5%	569,46
96	10-6	16.09.2015	155,44	160,45	160,44	40,62	40,69	40,57	40,44	18.09.2015	136,96	13,5%	588,32
97	10-7	16.09.2015	161,29	160,26	160,29	40,61	40,64	40,49	40,47	18.09.2015	142,83	12,9%	611,94
98	10-8	16.09.2015	141,38	160,50	160,54	40,58	40,57	40,49	40,40	18.09.2015	125,20	12,9%	536,70
99	10-9	16.09.2015	139,38	160,00	160,06	40,63	40,52	40,40	40,39	18.09.2015	122,82	13,5%	531,39

ROHDICHTEN UND HOLZFEUCHTEN

lfd.Nr	Probekörper	Datum Eingang	Masse Eingang	Länge Eingang	Länge Eingang	Breite Eingang	Breite Eingang	Dicke Eingang	Dicke Eingang	Datum Ausgang	Masse Ausgang	Holzfeuchte	Rohdichte feucht
[-]	[-]	[-]	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[g]	[%]	[kg/m <sup>3</sup> ]
100	10-0	16.09.2015	147,72	160,15	160,10	40,48	40,35	40,46	40,48	18.09.2015	129,83	13,8%	564,03
101	11-1	16.09.2015	132,07	160,17	160,20	40,35	40,58	40,38	40,49	18.09.2015	116,89	13,0%	503,90
102	11-2	16.09.2015	133,70	160,45	160,42	40,64	40,51	40,46	40,37	18.09.2015	118,33	13,0%	508,20
103	11-3	16.09.2015	139,90	160,16	160,15	40,66	40,64	40,40	40,48	18.09.2015	123,52	13,3%	531,38
104	11-4	16.09.2015	138,96	160,50	160,47	40,63	40,56	40,42	40,35	18.09.2015	122,57	13,4%	528,16
105	11-5	16.09.2015	139,36	160,53	160,51	40,52	40,56	40,52	40,44	18.09.2015	122,61	13,7%	529,04
106	11-6	16.09.2015	144,20	160,09	160,07	40,57	40,49	40,53	40,49	18.09.2015	127,14	13,4%	548,64
107	11-7	16.09.2015	148,68	160,01	160,04	40,60	40,58	40,52	40,42	18.09.2015	131,21	13,3%	565,60
108	11-8	16.09.2015	142,74	160,41	160,37	40,55	40,59	40,51	40,52	18.09.2015	126,59	12,8%	541,44
109	11-9	16.09.2015	142,92	160,08	160,06	40,71	40,59	40,47	40,49	18.09.2015	125,98	13,4%	542,60
110	11-0	16.09.2015	158,84	160,24	160,23	40,40	40,52	40,38	40,49	18.09.2015	140,23	13,3%	605,93
111	12-1	16.09.2015	135,67	160,40	160,42	40,58	40,54	40,44	40,46	18.09.2015	119,95	13,1%	515,51
112	12-2	16.09.2015	135,82	160,34	160,36	40,60	40,50	40,55	40,45	18.09.2015	120,25	12,9%	515,76
113	12-3	16.09.2015	141,37	160,55	160,54	40,39	40,51	40,50	40,42	18.09.2015	125,20	12,9%	538,04
114	12-4	16.09.2015	141,17	160,07	160,13	40,61	40,42	40,40	40,52	18.09.2015	124,66	13,2%	537,91
115	12-5	16.09.2015	143,41	160,16	160,19	40,58	40,47	40,67	40,56	18.09.2015	126,18	13,7%	543,97
116	12-6	16.09.2015	146,12	160,86	160,79	40,61	40,64	40,55	40,42	18.09.2015	128,83	13,4%	552,42

Ifd.Nr	Probekörper	Datum Eingang	Masse Eingang	Länge Eingang	Länge Eingang	Breite Eingang	Breite Eingang	Dicke Eingang	Dicke Eingang	Datum Ausgang	Masse Ausgang	Holzfeuchte	Rohdichte feucht
[-]	[-]	[-]	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[g]	[%]	[kg/m <sup>3</sup> ]
117	12-7	16.09.2015	150,51	160,52	160,45	40,63	40,53	40,56	40,49	18.09.2015	132,73	13,4%	570,29
118	12-8	16.09.2015	145,35	160,66	160,60	40,56	40,63	40,40	40,43	18.09.2015	128,50	13,1%	551,54
119	12-9	16.09.2015	147,57	160,15	160,14	40,66	40,65	40,53	40,50	18.09.2015	129,95	13,6%	559,44
120	12-0	16.09.2015	150,76	160,12	160,17	40,64	40,53	40,45	40,25	18.09.2015	133,10	13,3%	574,86
121	13-1	16.09.2015	134,06	160,07	160,11	40,57	40,49	40,58	40,53	18.09.2015	116,44	15,1%	509,46
122	13-2	16.09.2015	140,45	160,10	160,08	40,61	40,56	40,52	40,42	18.09.2015	124,12	13,2%	534,14
123	13-3	16.09.2015	133,02	160,46	160,57	40,36	40,45	40,44	40,45	18.09.2015	117,44	13,3%	507,11
124	13-4	16.09.2015	139,79	160,72	160,71	40,48	40,59	40,47	40,51	18.09.2015	123,28	13,4%	529,96
125	13-5	16.09.2015	138,82	160,65	160,61	40,51	40,48	40,48	40,49	18.09.2015	122,83	13,0%	527,14
126	13-6	16.09.2015	139,95	160,10	160,17	40,57	40,53	40,45	40,49	18.09.2015	123,47	13,3%	532,55
127	13-7	16.09.2015	143,25	160,23	160,27	40,54	40,59	40,49	40,37	18.09.2015	126,33	13,4%	545,06
128	13-8	16.09.2015	149,87	160,40	160,38	40,57	40,44	40,49	40,48	18.09.2015	132,45	13,2%	569,82
129	13-9	16.09.2015	143,42	160,63	160,65	40,46	40,49	40,48	40,52	18.09.2015	126,68	13,2%	544,65
130	13-0	16.09.2015	149,34	160,52	160,58	40,53	40,44	40,60	40,46	18.09.2015	131,33	13,7%	566,89
131	14-1	16.09.2015	138,88	160,09	160,07	40,54	40,46	40,55	40,46	18.09.2015	122,58	13,3%	528,86
132	14-2	16.09.2015	147,27	160,39	160,35	40,60	40,55	40,57	40,51	18.09.2015	130,31	13,0%	558,28
133	14-3	16.09.2015	136,18	160,06	160,04	40,63	40,54	40,41	40,48	18.09.2015	120,32	13,2%	518,35

lfd.Nr	Probekörper	Datum Eingang	Masse Eingang	Länge Eingang	Länge Eingang	Breite Eingang	Breite Eingang	Dicke Eingang	Dicke Eingang	Datum Ausgang	Masse Ausgang	Holzfeuchte	Rohdichte feucht
[-]	[-]	[-]	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[g]	[%]	[kg/m <sup>3</sup> ]
134	14-4	16.09.2015	136,11	159,77	159,78	40,67	40,53	40,54	40,44	18.09.2015	119,99	13,4%	518,21
135	14-5	16.09.2015	143,82	160,31	160,40	40,46	40,59	40,50	40,42	18.09.2015	126,99	13,3%	547,00
136	14-6	16.09.2015	137,11	160,49	160,44	40,43	40,38	40,45	40,39	18.09.2015	121,07	13,2%	523,19
137	14-7	16.09.2015	141,39	160,26	160,36	40,64	40,51	40,50	40,53	18.09.2015	124,60	13,5%	536,52
138	14-8	16.09.2015	143,38	160,33	160,33	40,45	40,47	40,59	40,42	18.09.2015	126,67	13,2%	545,68
139	14-9	16.09.2015	144,78	160,33	160,25	40,51	40,60	40,55	40,54	18.09.2015	127,55	13,5%	549,31
140	14-0	16.09.2015	146,48	160,53	160,37	40,60	40,57	40,52	40,53	18.09.2015	127,72	14,7%	555,07
141	15-1	16.09.2015	132,30	160,00	160,15	40,58	40,35	40,76	40,62	18.09.2015	117,00	13,1%	501,96
142	15-2	16.09.2015	138,65	160,41	160,32	40,59	40,55	40,54	40,45	18.09.2015	122,52	13,2%	526,26
143	15-3	16.09.2015	135,37	160,52	160,63	40,56	40,59	40,62	40,40	18.09.2015	120,41	12,4%	512,89
144	15-4	16.09.2015	138,29	160,50	160,55	40,63	40,55	40,51	40,47	18.09.2015	122,10	13,3%	524,18
145	15-5	16.09.2015	150,17	161,50	161,45	40,52	40,43	40,51	40,43	18.09.2015	132,87	13,0%	567,75
146	15-6	16.09.2015	140,34	160,64	160,70	40,56	40,40	40,46	40,48	18.09.2015	124,01	13,2%	533,18
147	15-7	16.09.2015	141,16	160,55	160,52	40,45	40,52	40,50	40,40	18.09.2015	124,45	13,4%	536,94
148	15-8	16.09.2015	143,46	160,46	160,43	40,62	40,49	40,47	40,48	18.09.2015	126,48	13,4%	544,72
149	15-9	16.09.2015	146,54	160,52	160,64	40,61	40,49	40,59	40,52	18.09.2015	129,17	13,4%	554,92
150	15-0	16.09.2015	149,62	160,58	160,62	40,59	40,62	40,50	40,41	18.09.2015	131,16	14,1%	567,14

lfd.Nr	Probekörper	Datum Eingang	Masse Eingang	Länge Eingang	Länge Eingang	Breite Eingang	Breite Eingang	Dicke Eingang	Dicke Eingang	Datum Ausgang	Masse Ausgang	Holzfeuchte	Rohdichte feucht
[-]	[-]	[-]	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[g]	[%]	[kg/m <sup>3</sup> ]
151	16-1	16.09.2015	132,23	160,32	160,33	40,62	40,45	40,46	40,22	18.09.2015	117,31	12,7%	504,39
152	16-2	16.09.2015	128,29	160,29	160,32	40,48	40,53	40,45	40,44	18.09.2015	113,61	12,9%	488,51
153	16-3	16.09.2015	128,40	160,85	160,73	40,57	40,47	40,44	40,39	18.09.2015	113,64	13,0%	487,63
154	16-4	16.09.2015	146,20	160,71	160,69	40,70	40,49	40,43	40,58	18.09.2015	128,90	13,4%	553,29
155	16-5	16.09.2015	148,29	160,77	160,75	40,60	40,39	40,51	40,52	18.09.2015	130,60	13,5%	562,23
156	16-6	16.09.2015	145,63	160,14	160,20	40,60	40,56	40,63	40,57	18.09.2015	128,24	13,6%	551,86

## ANHANG C TRAGFÄHIGKEITEN UND STEIFIGKEITEN

Nummer	F <sub>ax</sub>	F <sub>v</sub>	β	F <sub>ges</sub>	K <sub>ser,ax</sub>	K <sub>ser,v</sub>	Anmerkungen
-	[kN]	[kN]	[°]	[kN]	[kN/mm]	[kN/mm]	
01-1	13,82	0,14	0,6	13,82	33,8	-	
01-2	13,59	0,13	0,5	13,59	46,3	-	
01-3	13,59	0,15	0,6	13,59	36,2	-	
01-4	13,71	0,21	0,9	13,71	35,8	-	
01-5	13,77	0,14	0,6	13,77	38,2	-	
01-6	13,68	0,24	1,0	13,68	48,2	-	
01-7	13,73	0,06	0,2	13,73	39,6	-	
01-8	13,28	0,24	1,1	13,28	40,0	-	Ausreißer F <sub>ax</sub> und F <sub>ges</sub>
01-9	13,86	0,14	0,6	13,86	26,2	-	
01-0	13,74	0,28	1,2	13,75	45,5	-	
02-1	0,00	4,93	90,0	4,93	-	1,04	
02-2	0,00	5,49	90,0	5,49	-	0,88	
02-3	0,00	5,66	90,0	5,66	-	1,06	
02-4	0,00	6,28	90,0	6,28	-	0,87	
02-5	0,00	5,23	90,0	5,23	-	1,05	
02-6	0,01	5,79	90,0	5,79	-	0,96	
02-7	0,01	5,92	89,9	5,92	-	1,23	
02-8	0,01	6,18	89,9	6,18	-	1,17	
02-9	0,00	6,21	90,0	6,21	-	1,29	
02-0	0,00	6,10	90,0	6,10	-	1,05	
03-1	12,97	2,35	10,3	13,18	32,6	0,71	
03-2	13,08	2,31	10,0	13,29	32,1	0,68	
03-3	13,03	2,37	10,3	13,24	35,6	0,74	
03-4	12,94	2,31	10,1	13,15	44,7	0,74	
03-5	13,15	2,32	10,0	13,35	41,6	0,71	
03-6	13,36	2,38	10,1	13,57	32,1	0,76	
03-7	12,60	2,22	10,0	12,79	30,1	0,73	Ausreißer F <sub>ges</sub>
03-8	13,05	2,33	10,1	13,26	33,3	0,82	
03-9	12,96	2,33	10,2	13,17	41,5	0,81	
03-0	13,23	2,37	10,1	13,44	29,8	0,92	
04-1	9,98	4,55	24,5	10,97	41,8	0,84	Ausreißer K <sub>ser,ax</sub>
04-2	10,78	5,00	24,9	11,88	30,3	0,84	
04-3	9,67	4,48	24,9	10,66	27,1	1,08	
04-4	10,84	5,05	25,0	11,96	34,4	0,83	

Nummer	$F_{ax}$	$F_v$	$\beta$	$F_{ges}$	$K_{ser,ax}$	$K_{ser,v}$	Anmerkungen
-	[kN]	[kN]	[°]	[kN]	[kN/mm]	[kN/mm]	
04-5	10,66	4,95	24,9	11,76	30,5	0,94	
04-6	10,70	4,99	25,0	11,81	28,9	0,86	
04-7	10,24	4,78	25,0	11,30	34,0	0,86	
04-8	10,09	4,70	25,0	11,13	18,6	1,03	Ausreißer $K_{ser,ax}$
04-9	10,76	5,01	25,0	11,87	27,7	0,86	
04-0	10,23	4,76	25,0	11,28	28,8	0,96	
05-1	5,75	5,72	44,8	8,11	28,8	0,75	
05-2	5,55	5,47	44,6	7,79	31,1	1,01	
05-3	5,88	5,84	44,8	8,29	22,8	0,96	
05-4	5,81	5,79	44,9	8,20	27,2	0,90	
05-5	5,37	5,30	44,6	7,55	36,8	1,00	
05-6	5,77	5,65	44,4	8,08	38,7	0,87	
05-7	5,70	5,63	44,6	8,01	27,3	0,91	
05-8	5,62	5,61	45,0	7,94	22,1	1,02	
05-9	5,82	5,81	45,0	8,22	35,2	0,84	
05-0	5,61	5,57	44,8	7,91	21,3	0,93	
06-1	2,33	6,40	70,0	6,81	-	0,74	Ermittlung von $K_{ax}$ aufgrund des Anpressens des Stahlbleches nicht sinnvoll
06-2	2,08	5,66	69,9	6,03	-	0,70	
06-3	2,42	6,67	70,0	7,09	-	0,65	
06-4	2,31	6,28	69,8	6,69	-	0,94	
06-5	2,38	6,41	69,6	6,83	-	0,74	
06-6	2,24	6,05	69,7	6,46	-	1,04	
06-7	2,10	5,77	70,0	6,14	-	0,94	
06-8	2,12	5,75	69,8	6,13	-	0,90	
06-9	2,48	6,84	70,1	7,28	-	1,29	
06-0	1,92	5,32	70,1	5,65	-	0,85	
07A-1	13,40	0,08	0,3	13,40	31,3	-	
07A-3	13,11	0,09	0,4	13,11	83,7	-	
07A-5	13,05	0,08	0,3	13,05	31,5	-	
07A-7	13,37	0,19	0,8	13,37	93,2	-	
07A-9	13,84	0,26	1,1	13,84	98,7	-	
07B-2	0,00	6,46	90,0	6,46	-	0,95	
07B-4	0,00	6,59	90,0	6,59	-	0,78	
07B-6	0,00	6,83	90,0	6,83	-	0,80	
07B-8	0,00	6,15	90,0	6,15	-	0,67	
07B-0	0,00	6,72	90,0	6,72	-	0,87	
08-1	12,93	2,00	8,8	13,08	30,3	0,61	
08-2	13,03	1,86	8,1	13,17	35,0	0,70	
08-3	12,98	2,40	10,5	13,20	29,5	0,68	
08-4	13,00	2,57	11,2	13,25	29,7	0,73	

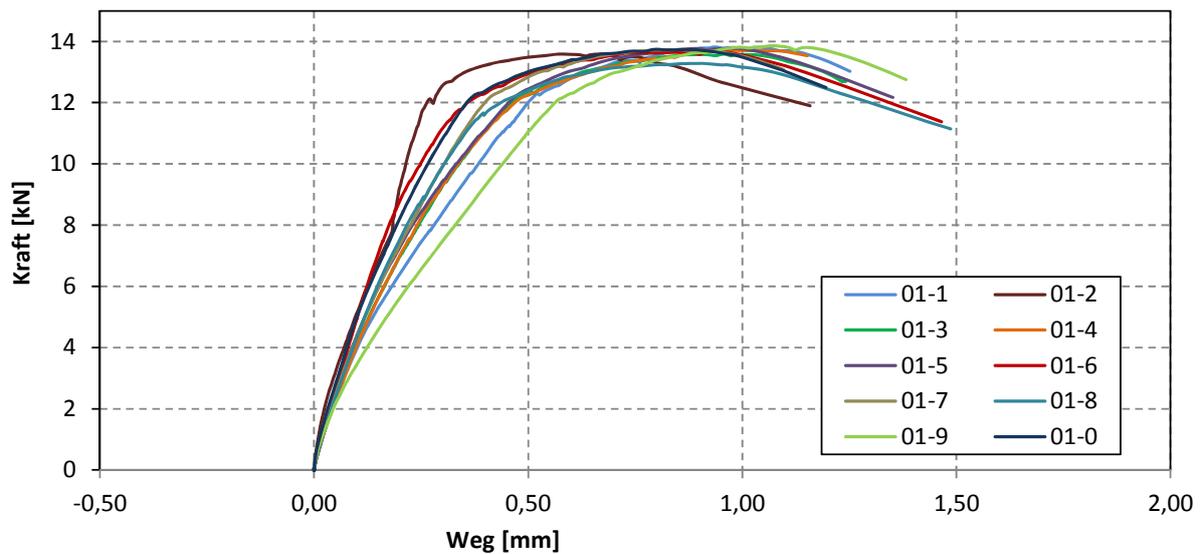
Nummer	F <sub>ax</sub>	F <sub>v</sub>	β	F <sub>ges</sub>	K <sub>ser,ax</sub>	K <sub>ser,v</sub>	Anmerkungen
-	[kN]	[kN]	[°]	[kN]	[kN/mm]	[kN/mm]	
08-5	13,02	2,47	10,7	13,25	26,1	0,78	
08-6	12,98	2,71	11,8	13,25	40,7	0,86	
08-7	13,02	2,25	9,8	13,21	39,6	0,77	
08-8	12,98	2,78	12,1	13,28	35,9	0,76	
08-9	13,00	2,49	10,8	13,24	45,3	0,65	
08-0	13,02	2,65	11,5	13,28	41,5	0,84	
09-1	13,10	2,30	10,0	13,30	31,4	0,65	
09-2	13,36	2,27	9,6	13,55	37,0	1,10	
09-3	13,45	2,28	9,6	13,64	35,1	0,77	
09-4	13,12	2,27	9,8	13,32	27,9	0,76	
09-5	13,53	2,28	9,5	13,72	30,5	0,95	
09-6	12,86	2,28	10,1	13,06	33,4	0,99	
09-7	12,82	2,29	10,1	13,02	34,3	1,10	
09-8	12,91	2,30	10,1	13,11	47,3	0,86	Ausreißer K <sub>ser,ax</sub>
09-9	12,87	2,30	10,1	13,07	38,3	0,70	
09-0	13,40	2,30	9,7	13,59	35,4	1,21	
10-1	10,40	4,82	24,9	11,47	40,9	0,66	
10-2	10,34	4,52	23,6	11,28	46,0	0,56	
10-3	10,39	4,00	21,0	11,14	50,7	0,81	
10-4	10,42	4,33	22,6	11,29	39,6	0,83	
10-5	10,46	5,31	26,9	11,73	31,6	0,66	
10-6	10,55	4,64	23,7	11,53	33,3	0,58	
10-7	10,49	5,14	26,1	11,67	32,9	0,88	
10-8	10,44	4,75	24,4	11,47	34,4	0,88	
10-9	10,42	4,55	23,6	11,37	44,3	0,71	
10-0	10,43	5,54	28,0	11,81	43,2	0,77	
11-1	9,75	4,80	26,2	10,86	35,8	0,86	Ausreißer F <sub>ax</sub>
11-2	11,87	4,81	22,0	12,81	68,6	0,65	
11-3	11,79	4,81	22,2	12,73	61,5	0,85	
11-4	12,05	4,80	21,7	12,97	61,6	0,79	
11-5	10,62	4,81	24,4	11,66	72,9	0,86	
11-6	11,43	4,79	22,7	12,39	76,1	0,77	
11-7	11,35	4,80	22,9	12,32	39,5	0,82	
11-8	11,30	4,80	23,0	12,28	54,1	0,89	
11-9	11,42	4,81	22,8	12,39	57,6	0,97	
11-0	11,05	4,80	23,5	12,05	53,0	0,95	
12-1	5,68	6,01	46,6	8,27	35,8	0,57	
12-2	5,66	5,95	46,5	8,22	35,5	0,65	
12-3	5,62	6,15	47,6	8,33	37,7	0,68	
12-4	5,61	6,44	48,9	8,54	38,1	0,78	

Nummer	$F_{ax}$	$F_v$	$\beta$	$F_{ges}$	$K_{ser,ax}$	$K_{ser,v}$	Anmerkungen
-	[kN]	[kN]	[°]	[kN]	[kN/mm]	[kN/mm]	
12-5	5,63	5,50	44,3	7,87	41,3	0,75	
12-6	5,65	5,68	45,2	8,01	43,8	0,66	
12-7	5,66	6,05	46,9	8,28	37,5	0,85	
12-8	5,61	6,34	48,5	8,47	58,8	0,80	
12-9	5,60	6,00	46,9	8,21	43,5	1,03	
12-0	5,63	6,49	49,0	8,59	45,7	0,95	
13-1	7,17	5,60	38,0	9,10	52,2	0,68	Ausreißer $F_{ax}$
13-4	9,54	5,47	29,9	11,00	103,5	1,07	
13-5	9,38	5,61	30,9	10,93	91,9	0,92	
13-6	8,05	5,61	34,9	9,81	39,9	0,72	
13-7	10,24	5,54	28,4	11,64	76,3	1,06	
13-8	11,06	5,60	26,8	12,39	55,0	1,00	Ausreißer $F_{ax}$
13-9	9,30	5,60	31,1	10,86	50,0	0,85	
13-0	9,44	5,59	30,7	10,97	75,5	0,87	
14-1	2,21	6,58	71,5	6,94	31,0	0,71	
14-2	2,20	7,12	72,8	7,45	75,5	0,84	
14-3	2,23	6,91	72,1	7,26	41,0	0,61	
14-4	2,21	6,68	71,7	7,04	68,2	1,10	Ausreißer $K_{ser,v}$
14-5	2,22	6,58	71,3	6,95	47,9	0,90	
14-6	2,21	6,39	70,9	6,76	46,4	0,85	
14-7	2,25	7,14	72,5	7,49	71,7	0,90	
14-8	2,21	6,94	72,3	7,28	51,7	0,80	
14-9	2,21	7,12	72,8	7,45	40,1	1,03	
14-0	2,21	6,42	71,0	6,79	49,0	0,76	
15-1	5,41	6,02	48,1	8,09	58,0	0,65	Ausreißer $F_{ax}$
15-2	7,34	5,94	39,0	9,45	65,9	0,90	
15-4	7,47	6,00	38,8	9,59	55,0	0,82	
15-5	7,92	6,00	37,2	9,94	71,9	0,87	
15-6	5,87	6,00	45,7	8,39	66,8	0,76	
15-7	10,70	5,99	29,2	12,26	86,2	0,96	Ausreißer $F_{ax}$
15-8	7,96	6,00	37,0	9,97	58,3	0,88	
15-9	8,63	6,01	34,9	10,52	47,5	0,72	
15-0	8,48	6,01	35,3	10,40	79,4	0,86	
16-1	0,00	7,20	90,0	7,20	-	0,80	
16-2	0,00	6,64	90,0	6,64	-	0,70	
16-3	0,00	7,18	90,0	7,18	-	0,56	
16-4	0,01	6,94	89,9	6,94	-	0,78	
16-5	0,01	7,26	90,0	7,26	-	0,74	
16-6	0,01	6,91	90,0	6,91	-	0,79	

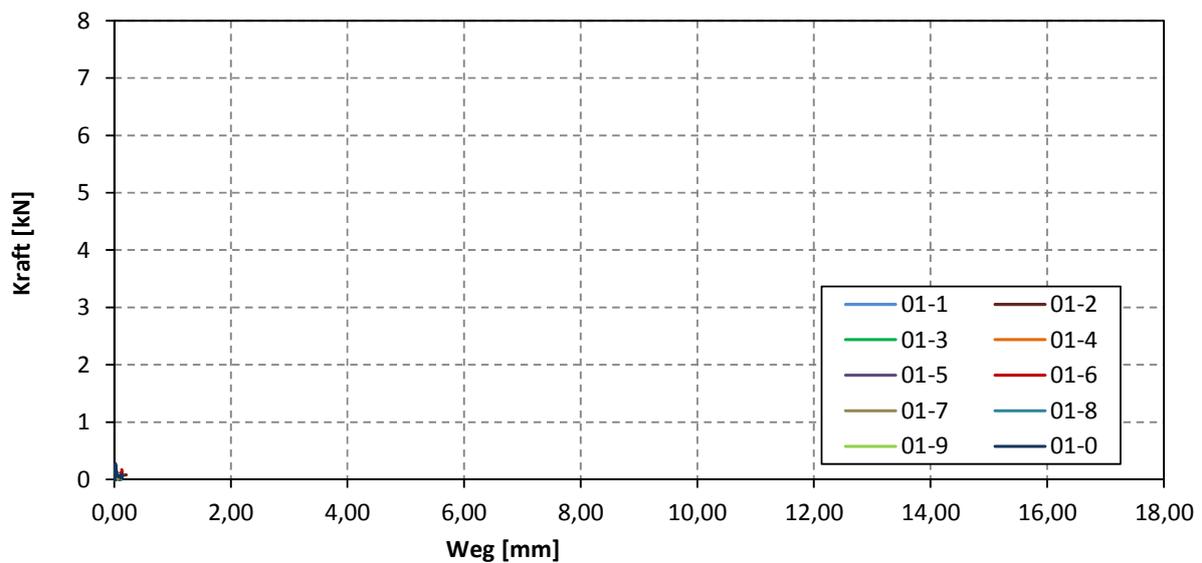
# ANHANG D KRAFT-VERSCHIEBUNGS-DIAGRAMME DER PRÜFSERIEN

## Prüfserie 01

**axiales Kraft-Verschiebungs-Diagramm**

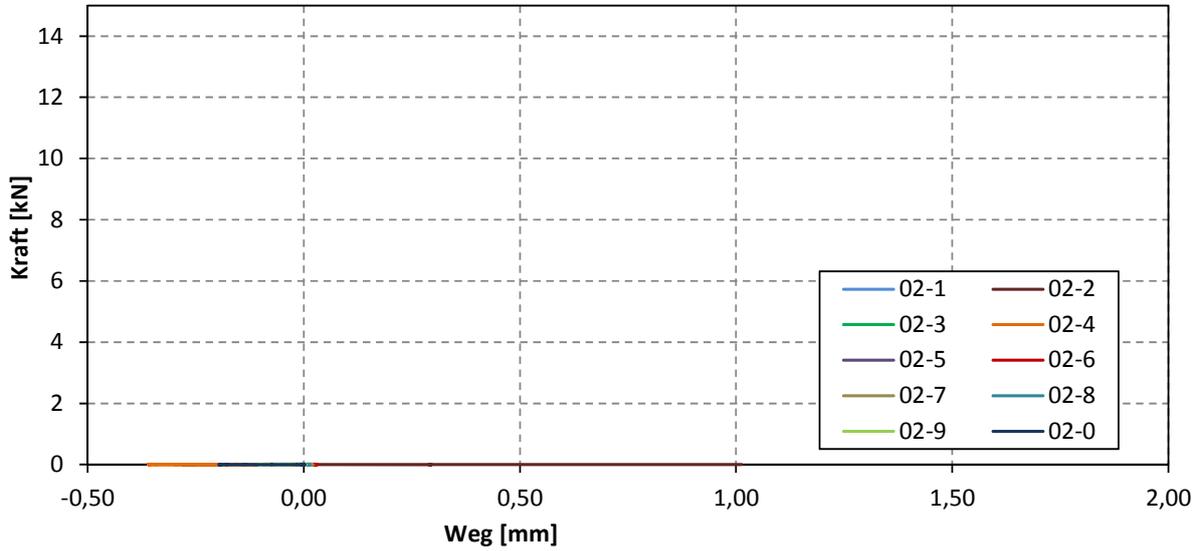


**laterales Kraft-Verschiebungs-Diagramm**

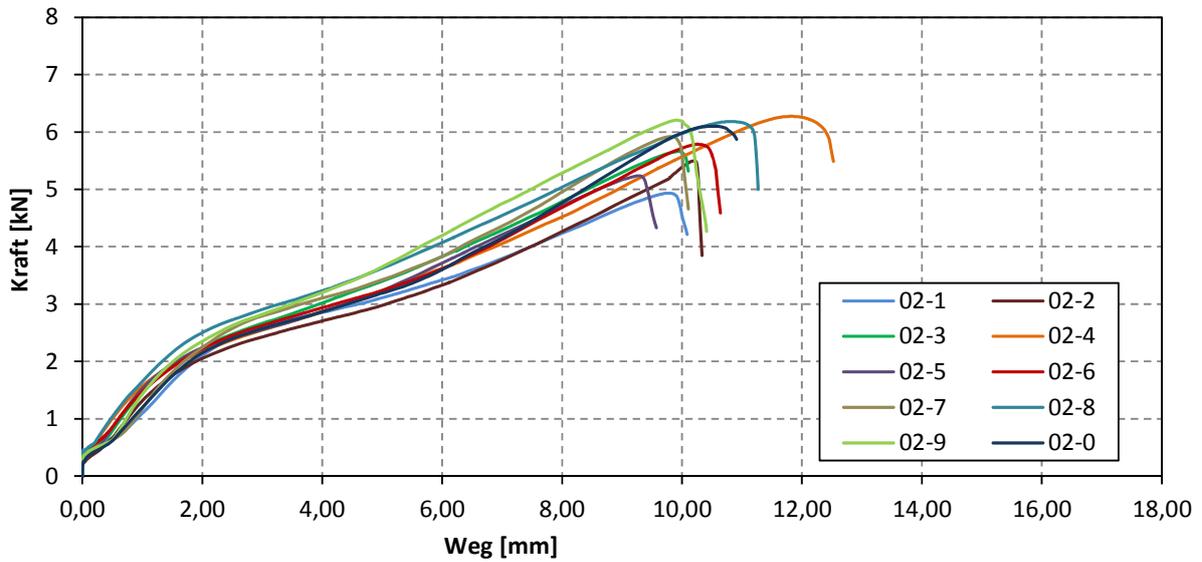


**Prüfserie 02**

**axiales Kraft-Verschiebungs-Diagramm**

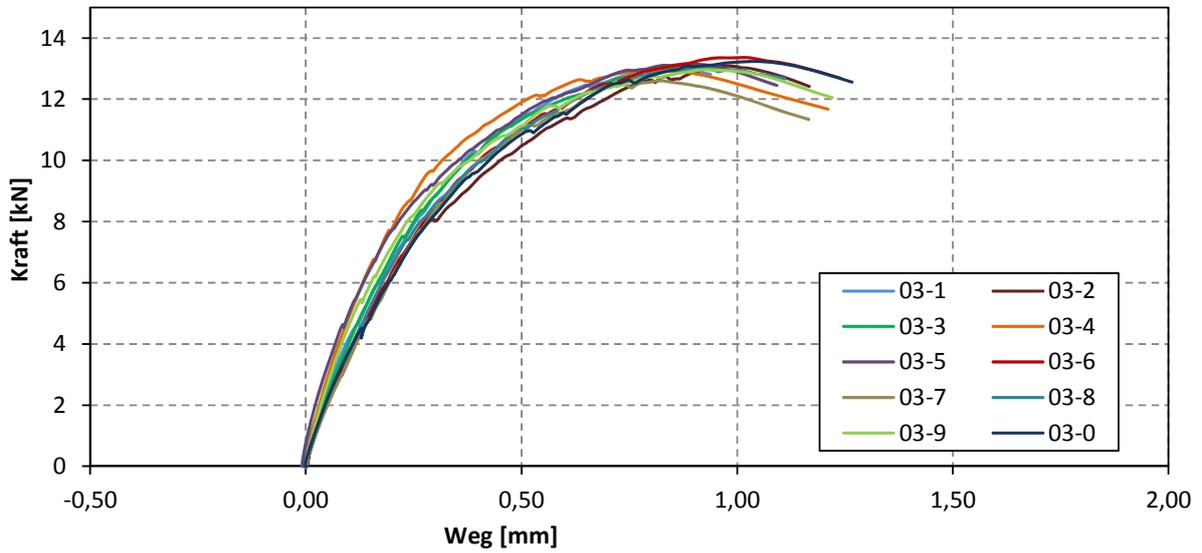


**laterales Kraft-Verschiebungs-Diagramm**

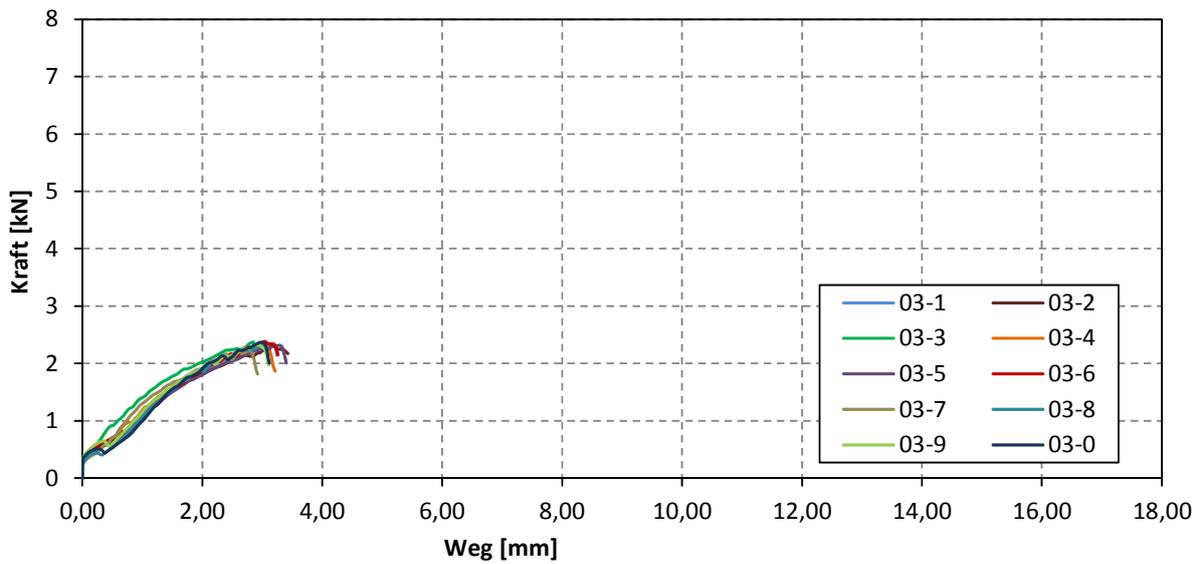


**Prüfserie 03**

**axiales Kraft-Verschiebungs-Diagramm**

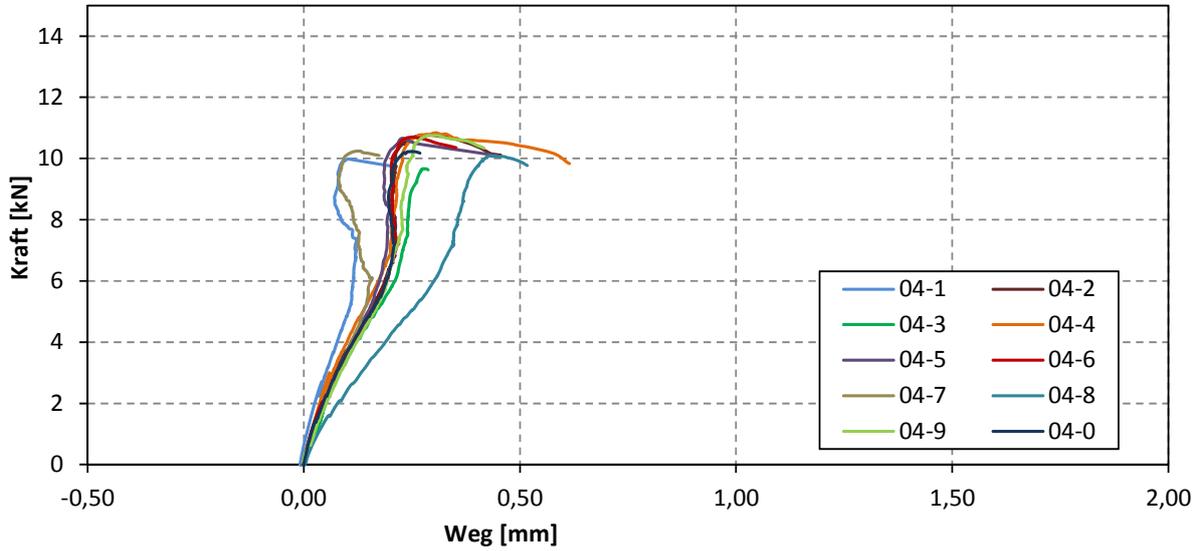


**laterales Kraft-Verschiebungs-Diagramm**

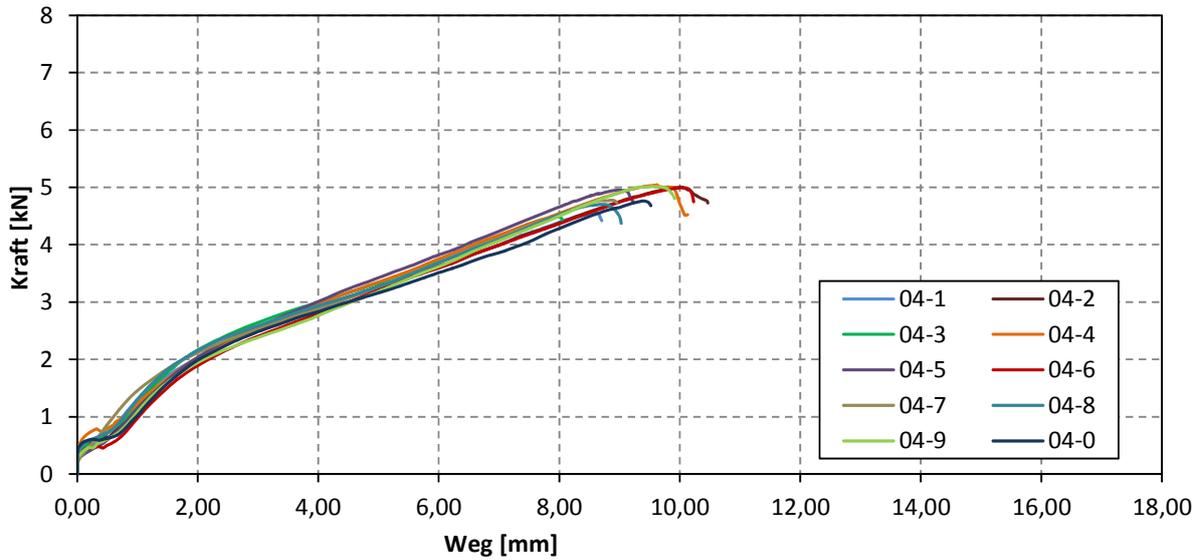


**Prüfserie 04**

**axiales Kraft-Verschiebungs-Diagramm**

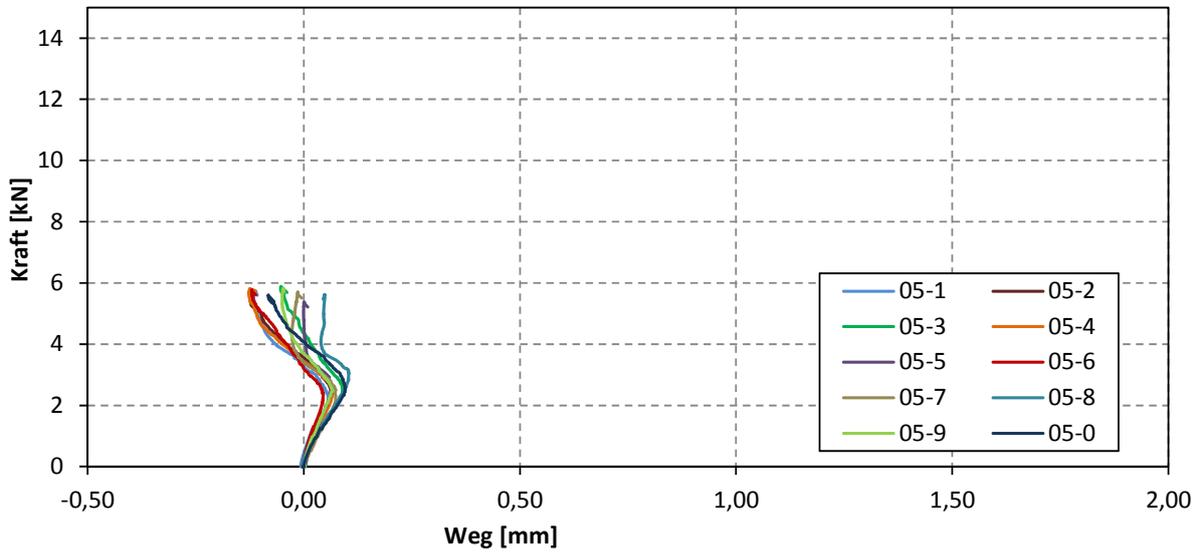


**laterales Kraft-Verschiebungs-Diagramm**

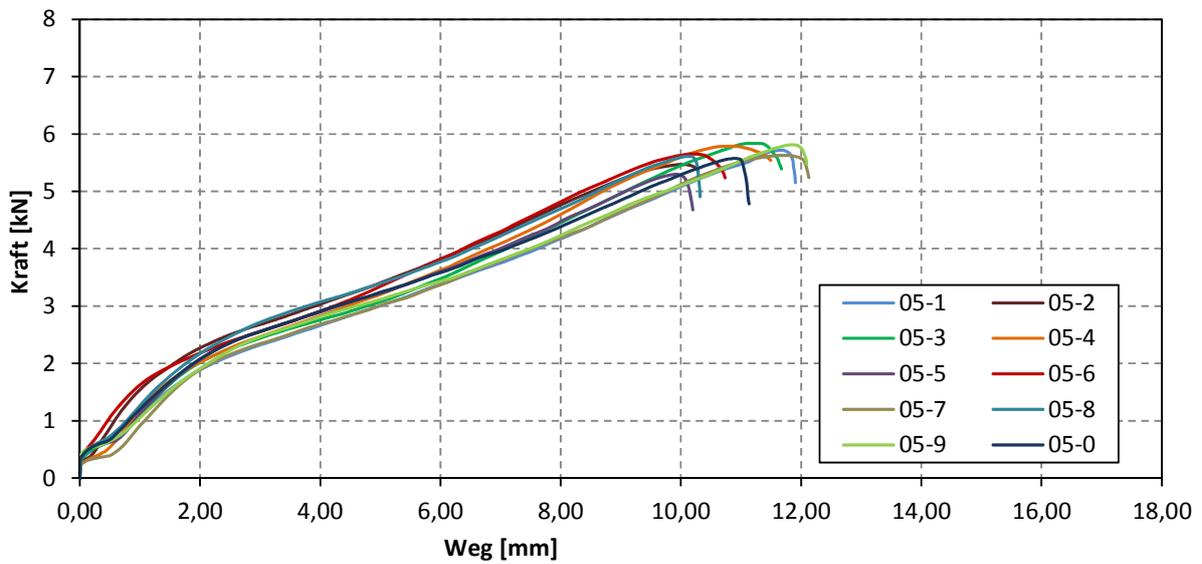


**Prüfserie 05**

**axiales Kraft-Verschiebungs-Diagramm**

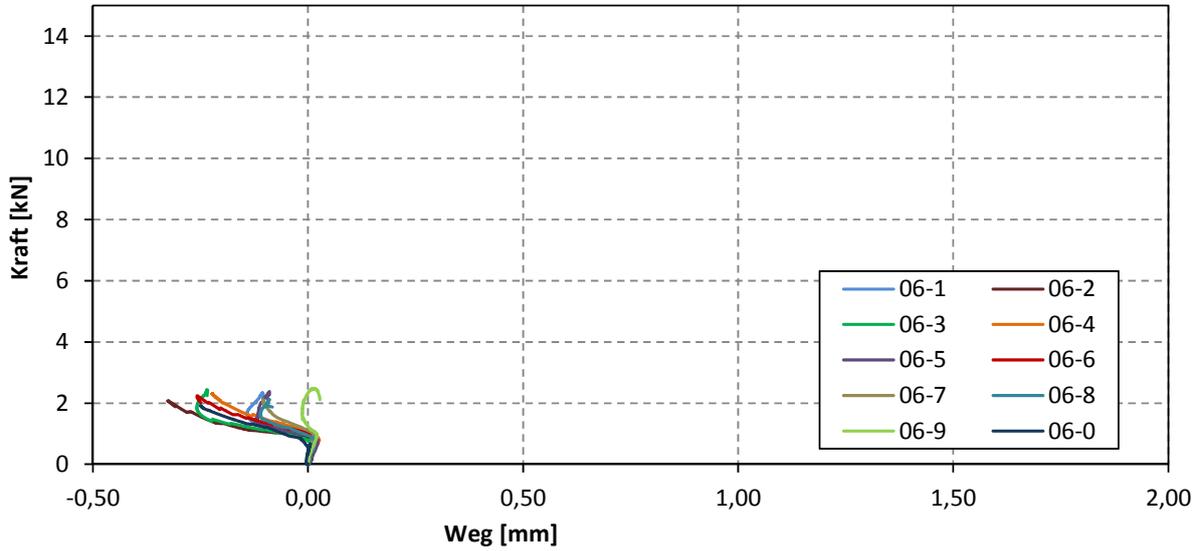


**laterales Kraft-Verschiebungs-Diagramm**

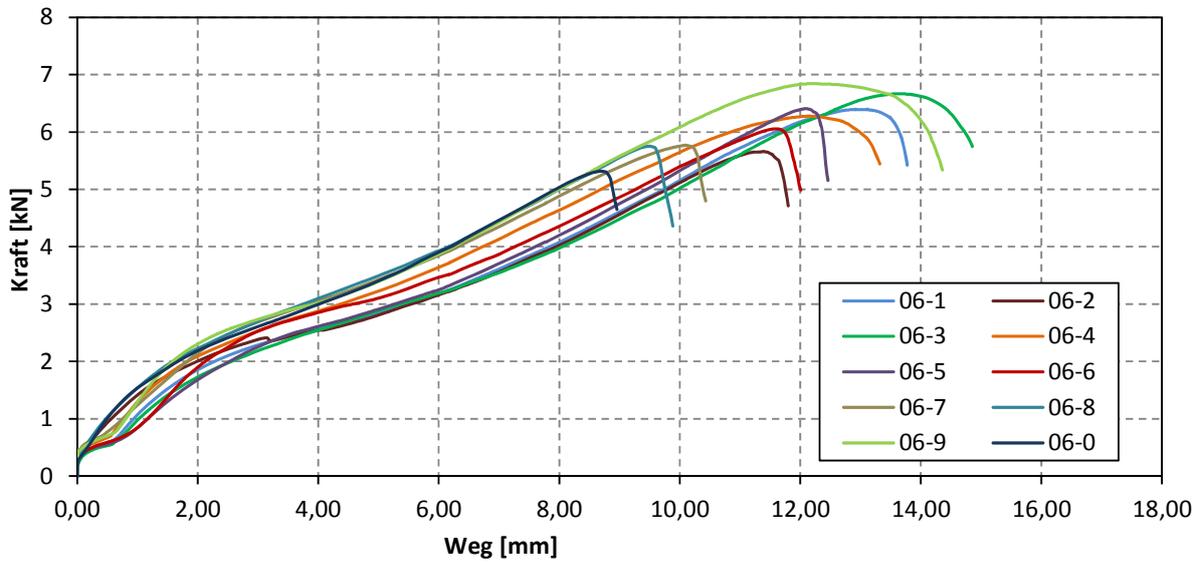


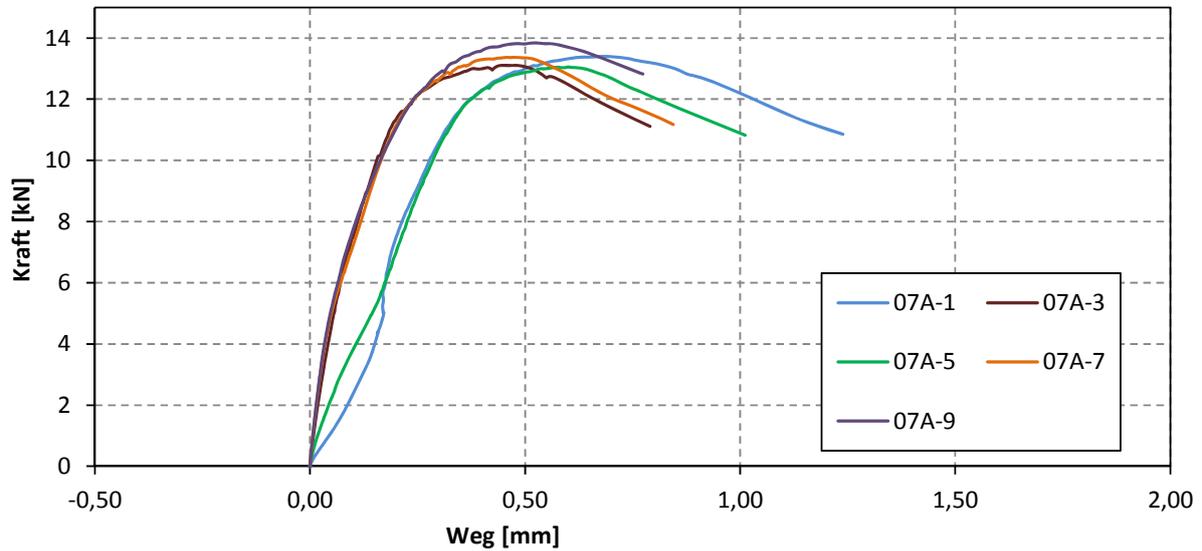
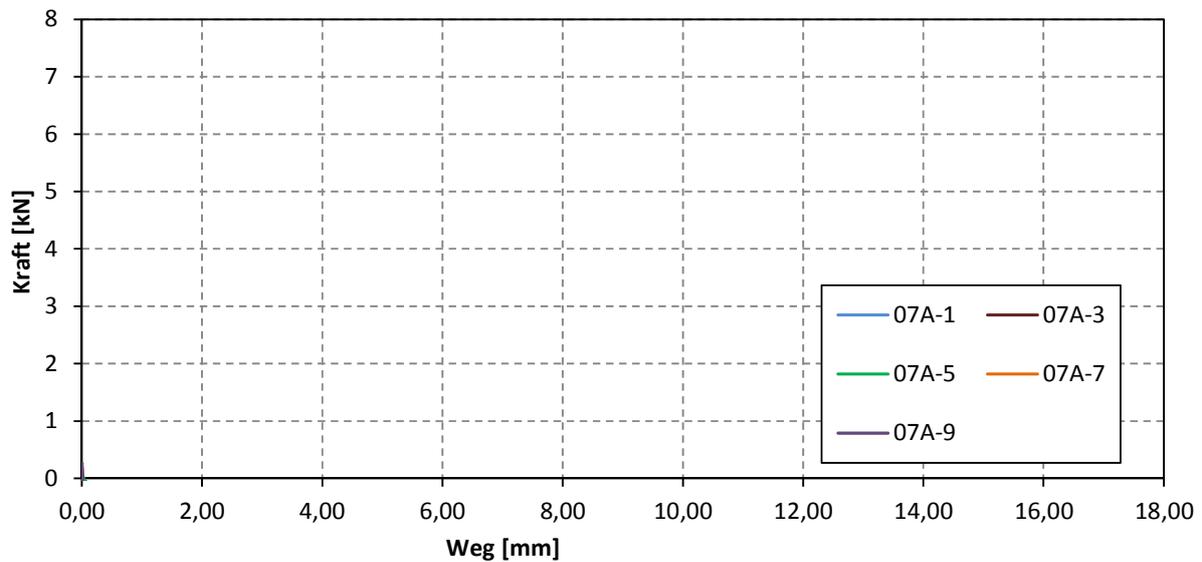
**Prüfserie 06**

**axiales Kraft-Verschiebungs-Diagramm**



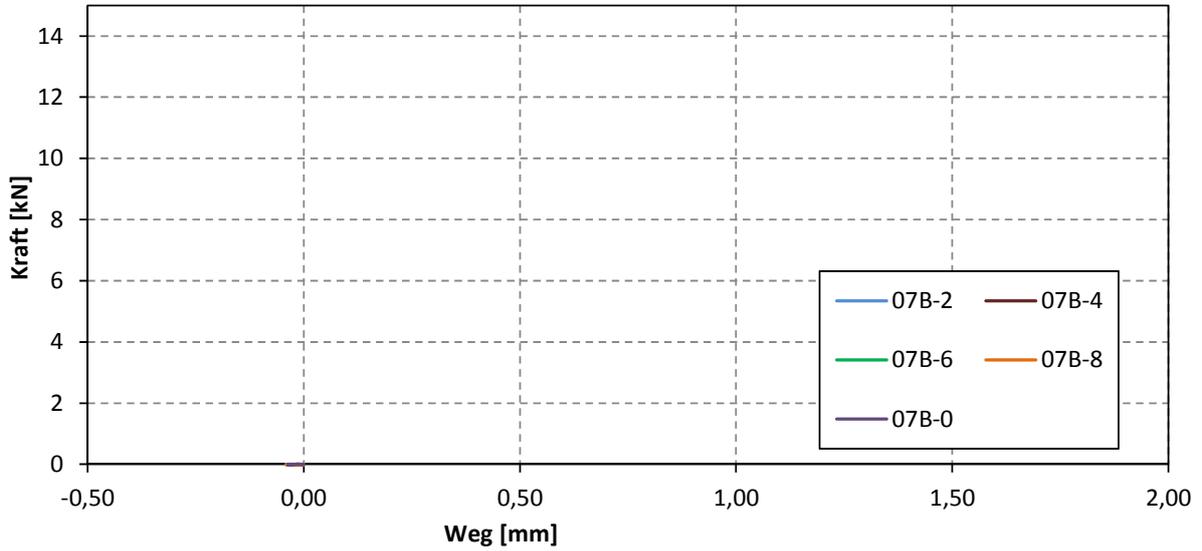
**laterales Kraft-Verschiebungs-Diagramm**



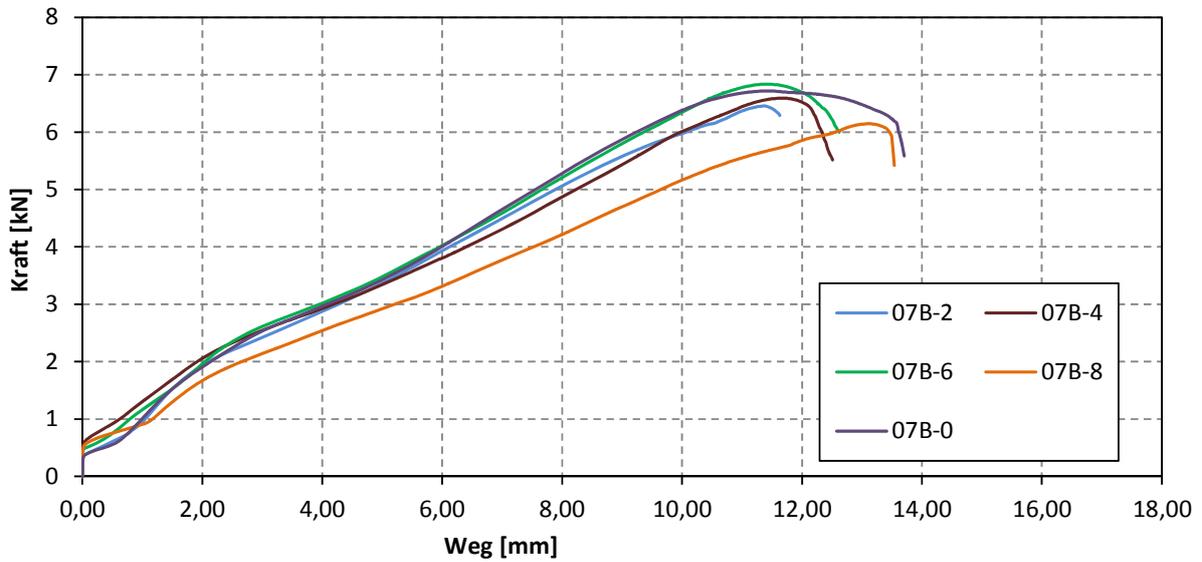
**Prüfserie 07A****axiales Kraft-Verschiebungs-Diagramm****laterales Kraft-Verschiebungs-Diagramm**

**Prüfserie 07B**

**axiales Kraft-Verschiebungs-Diagramm**

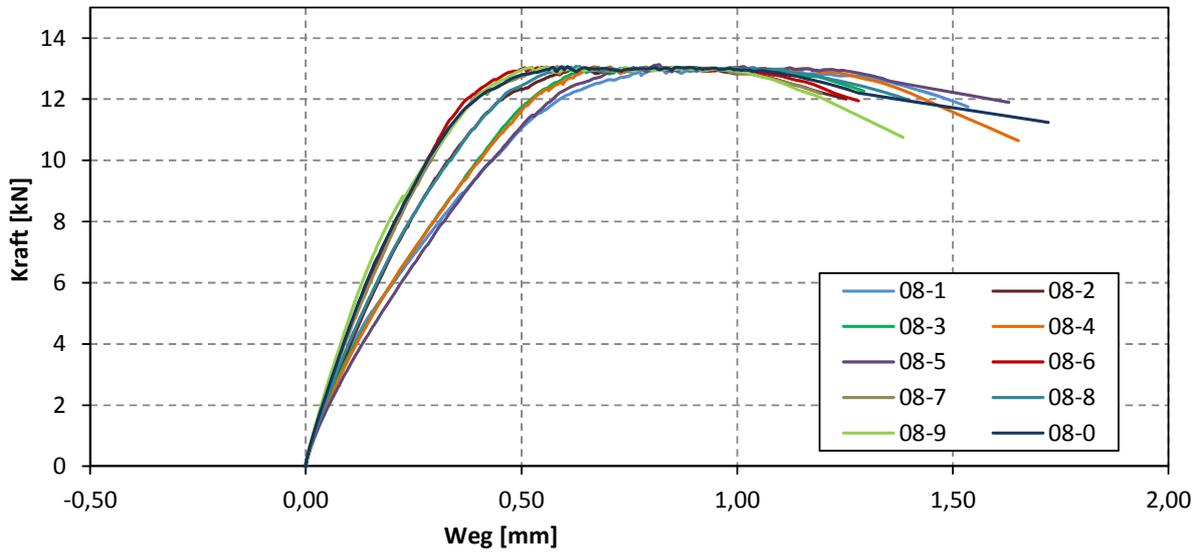


**laterales Kraft-Verschiebungs-Diagramm**

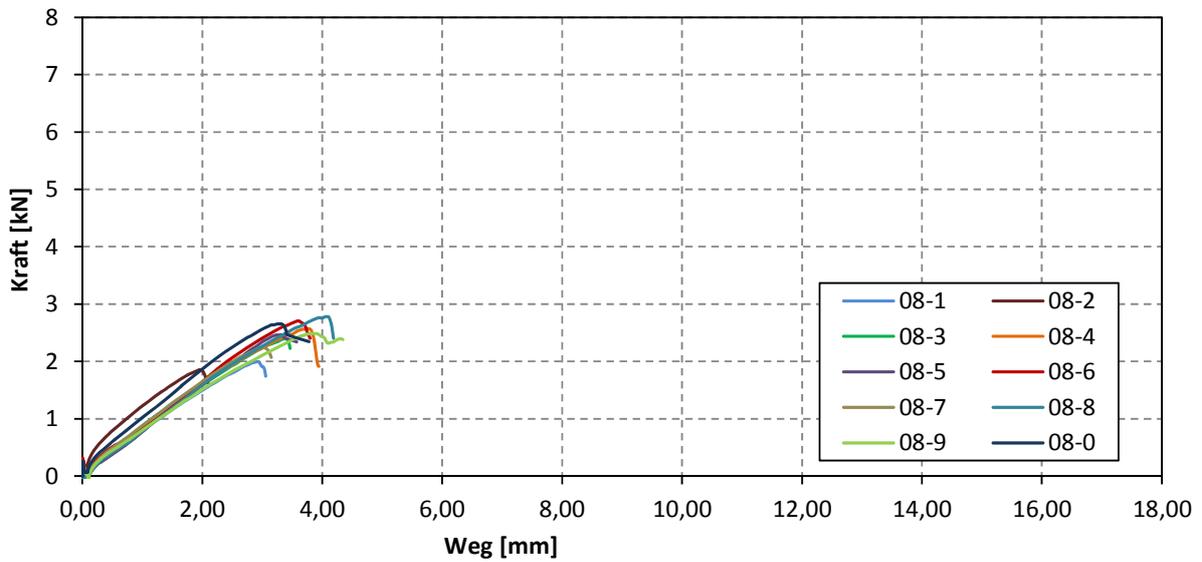


**Prüfserie 08**

**axiales Kraft-Verschiebungs-Diagramm**

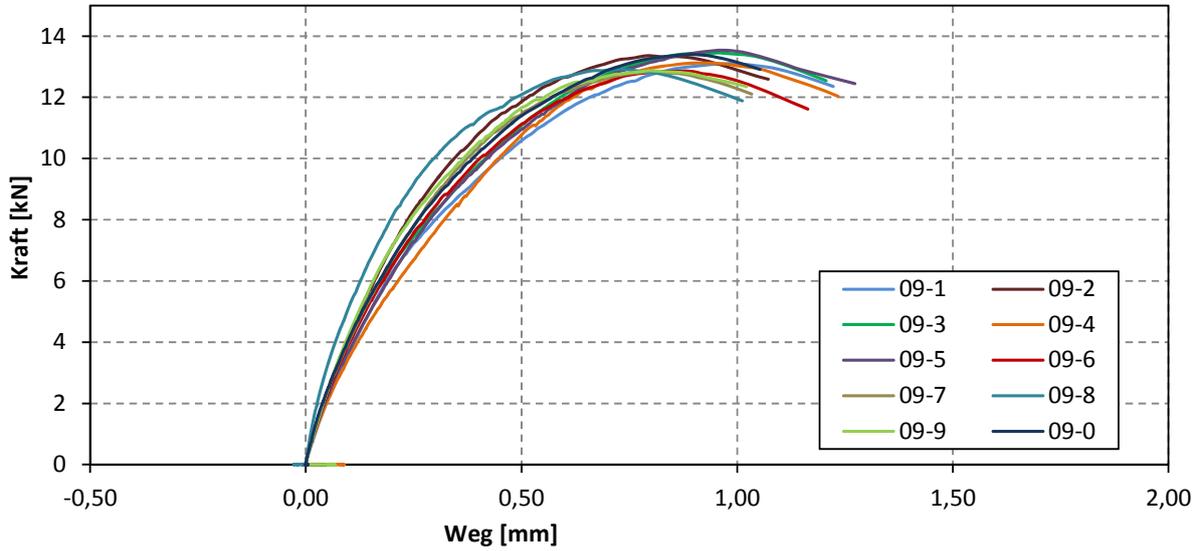


**laterales Kraft-Verschiebungs-Diagramm**

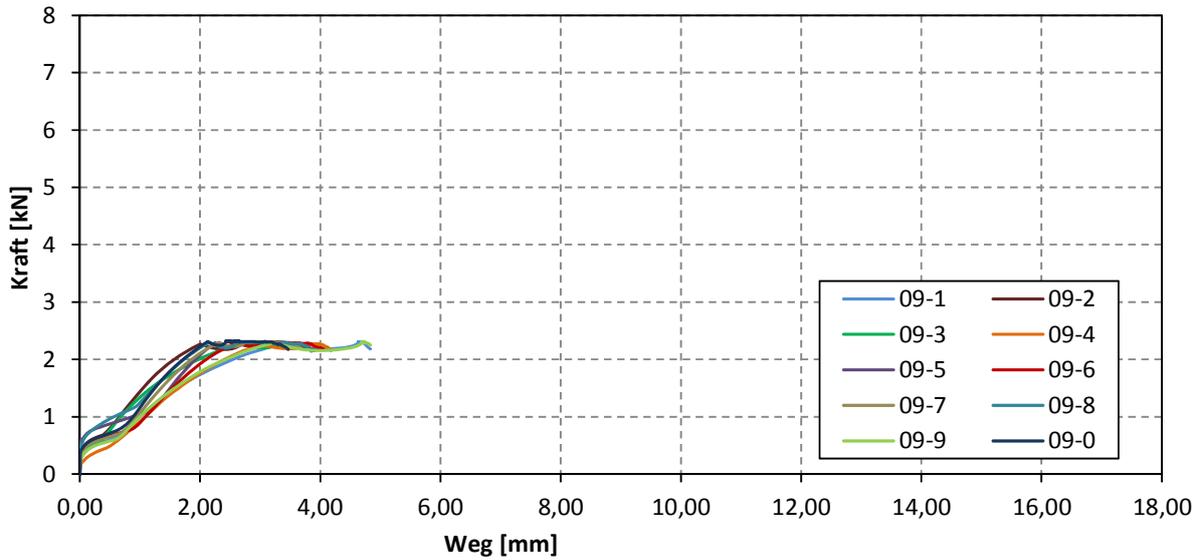


**Prüfserie 09**

**axiales Kraft-Verschiebungs-Diagramm**

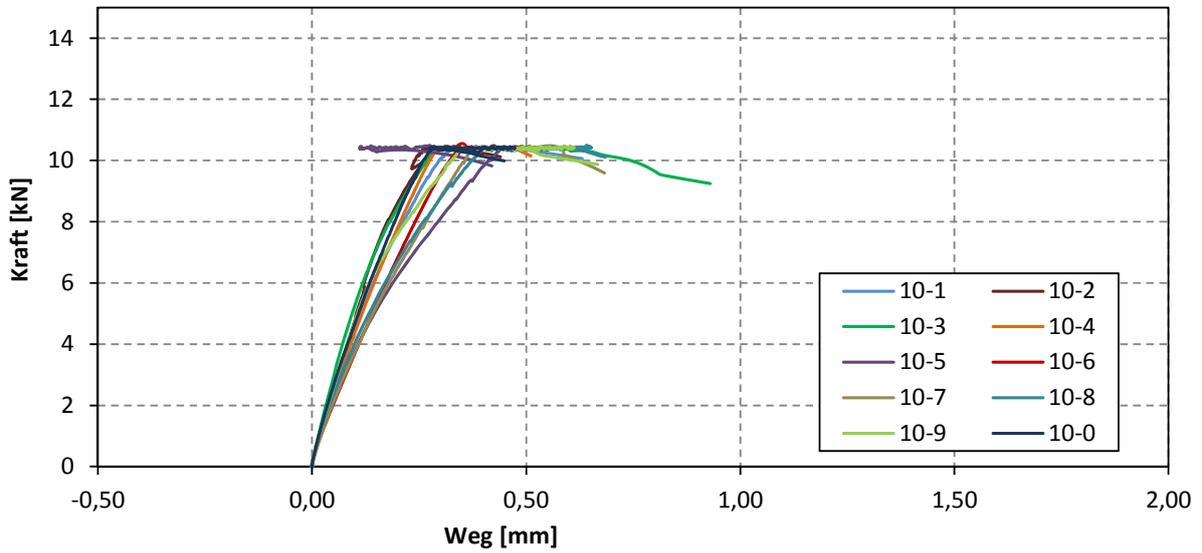


**laterales Kraft-Verschiebungs-Diagramm**

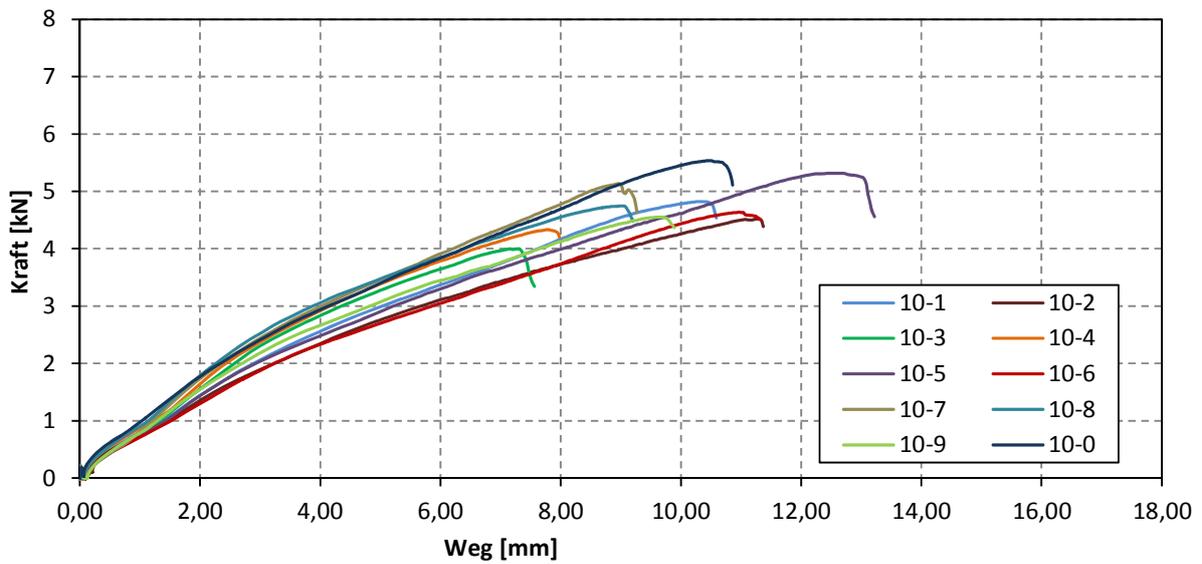


**Prüfserie 10**

**axiales Kraft-Verschiebungs-Diagramm**

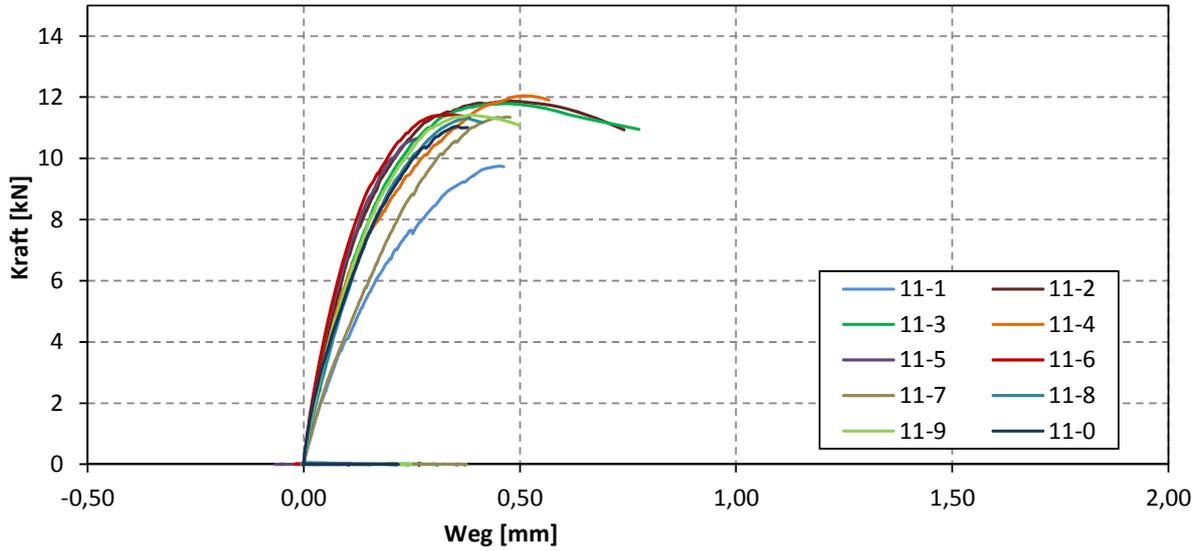


**laterales Kraft-Verschiebungs-Diagramm**

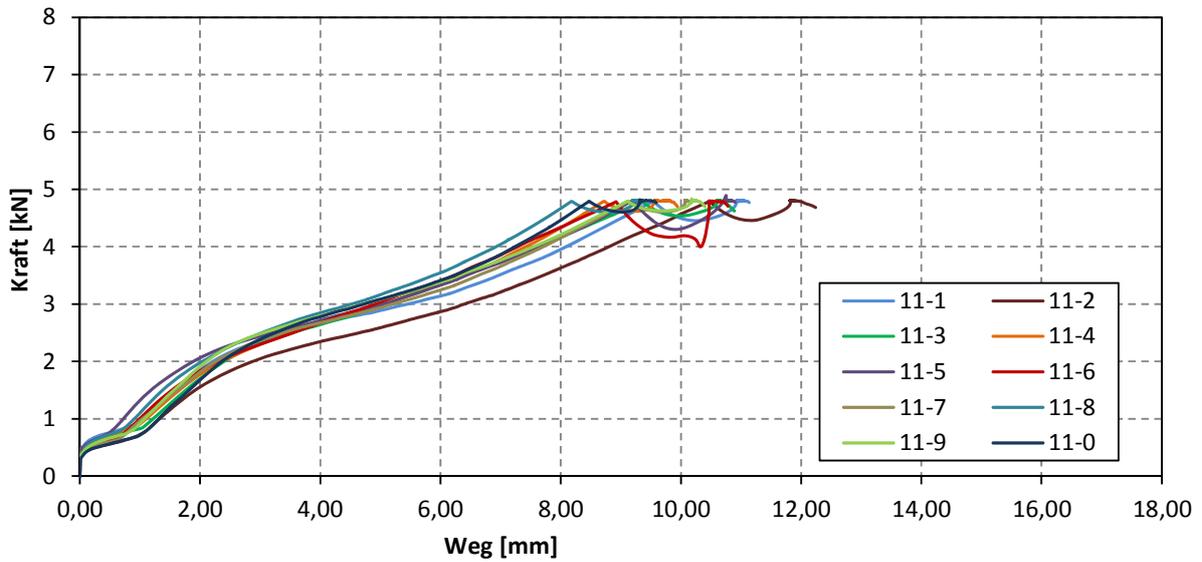


**Prüfserie 11**

**axiales Kraft-Verschiebungs-Diagramm**

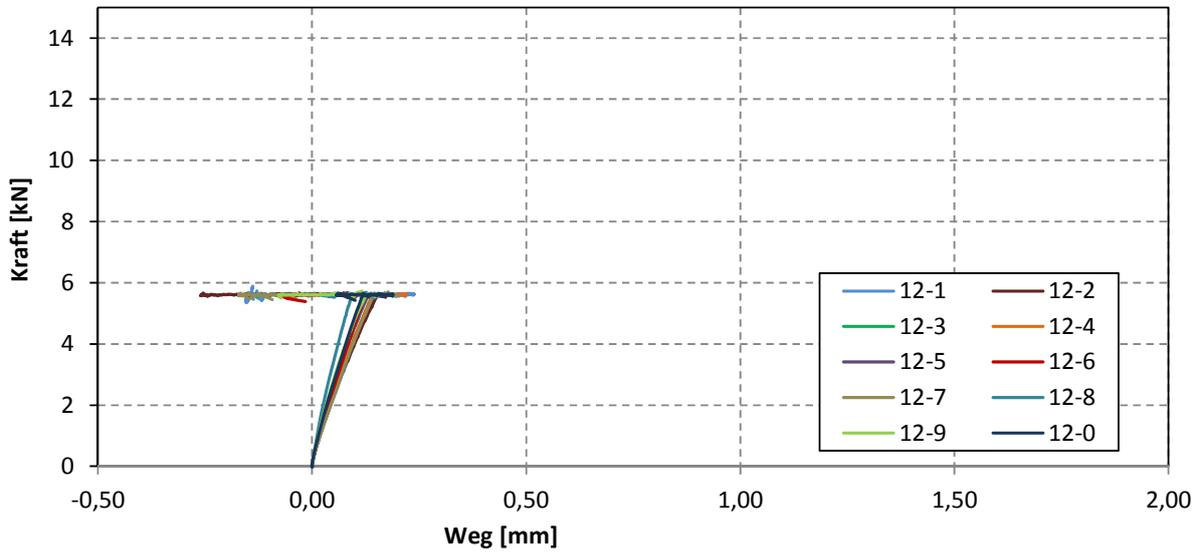


**laterales Kraft-Verschiebungs-Diagramm**

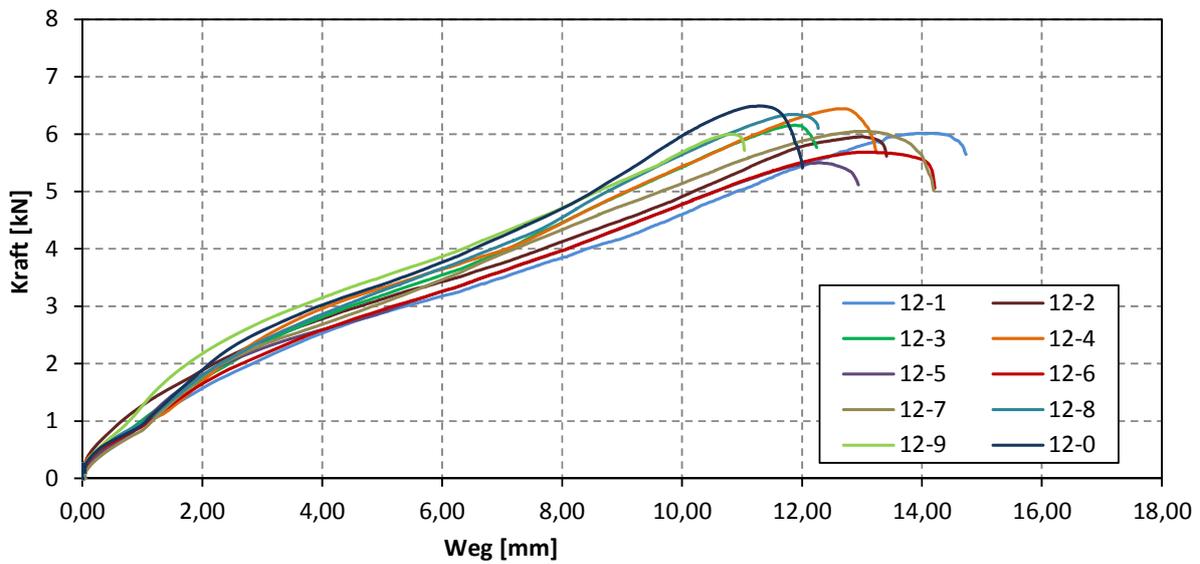


**Prüfserie 12**

**axiales Kraft-Verschiebungs-Diagramm**

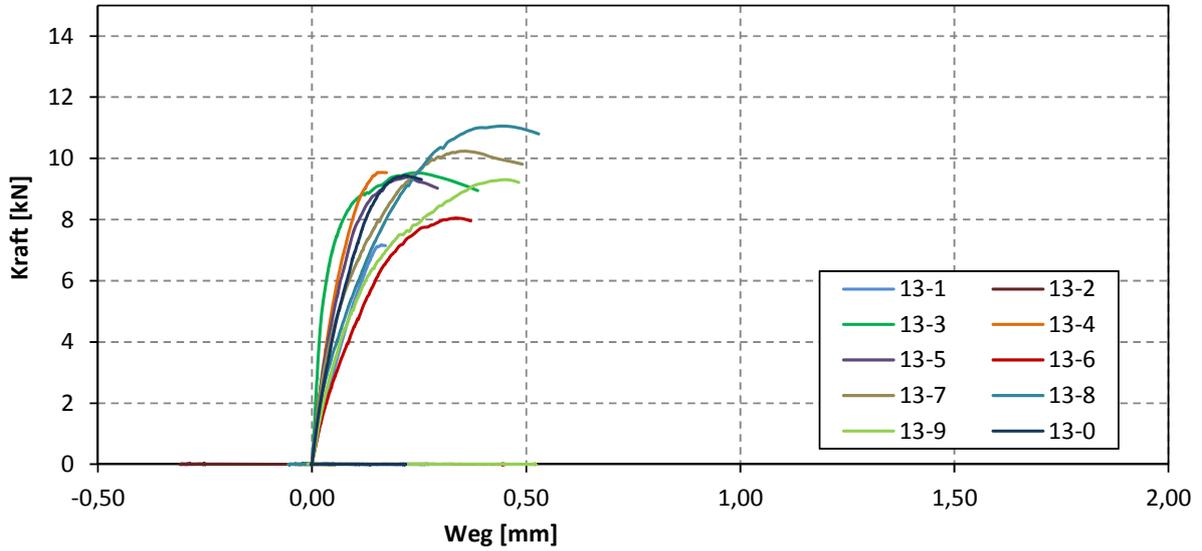


**laterales Kraft-Verschiebungs-Diagramm**

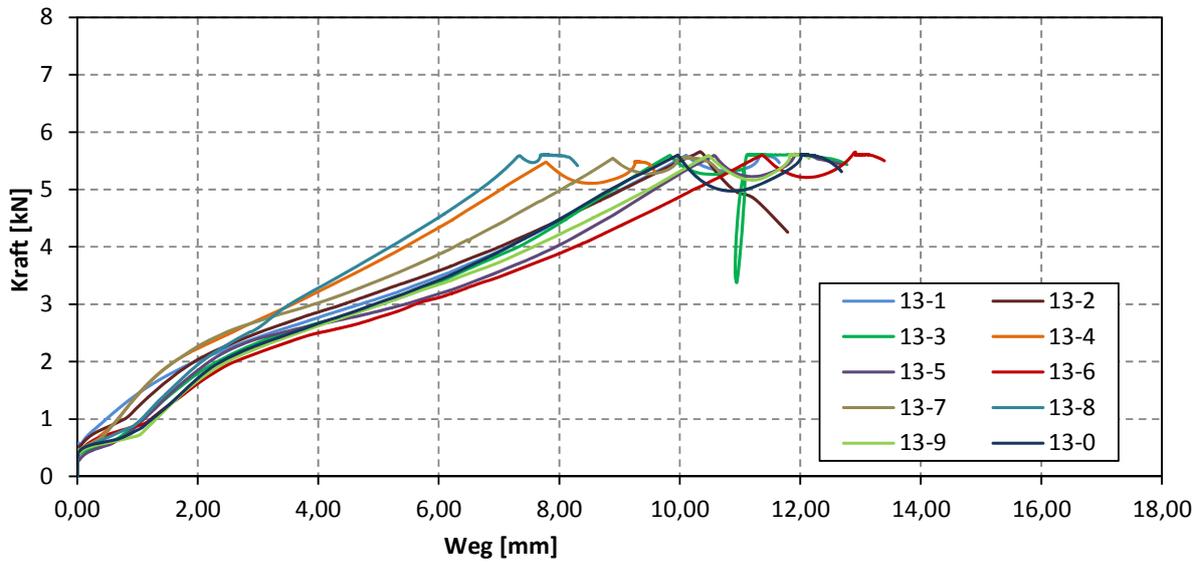


**Prüfserie 13**

**axiales Kraft-Verschiebungs-Diagramm**

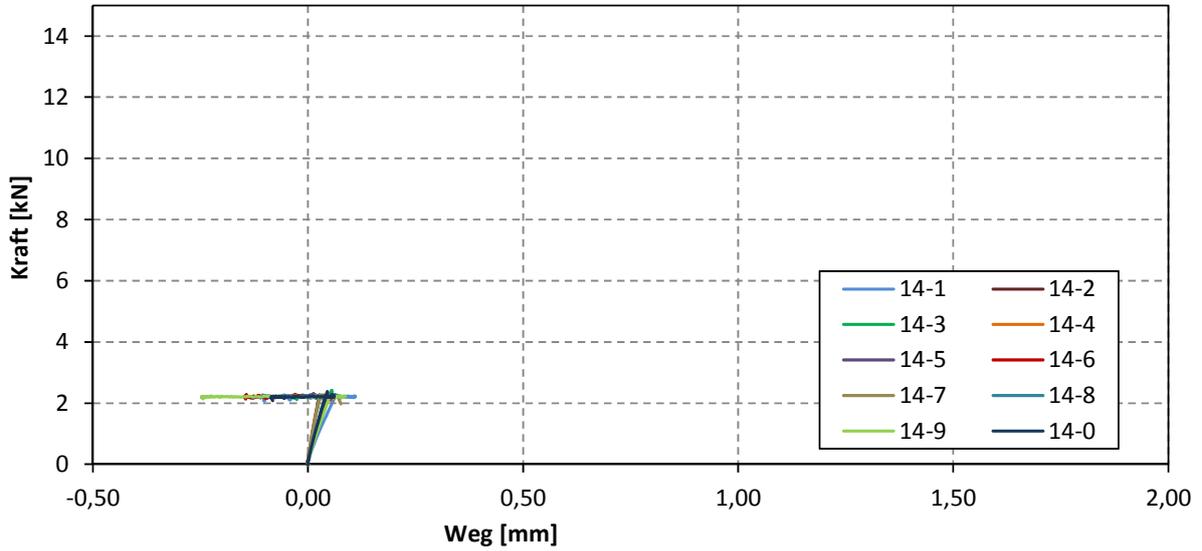


**laterales Kraft-Verschiebungs-Diagramm**

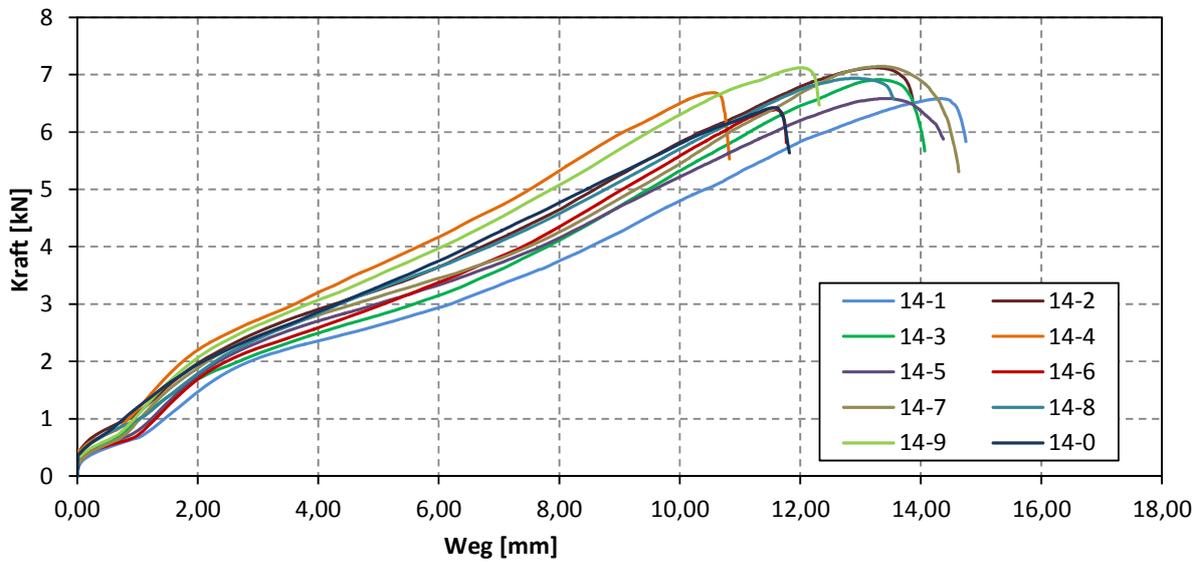


**Prüfserie 14**

**axiales Kraft-Verschiebungs-Diagramm**

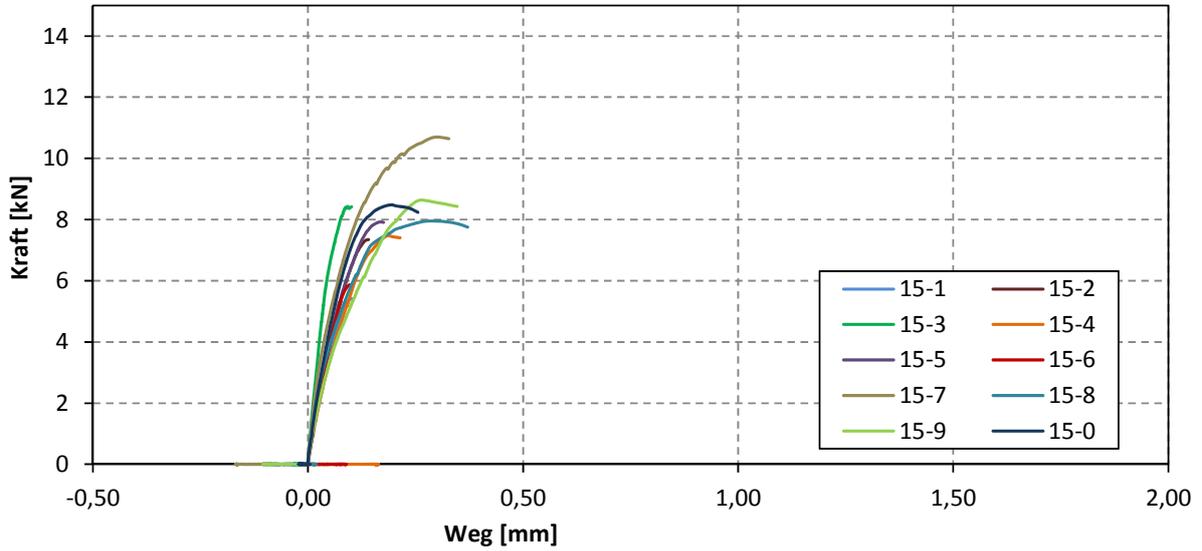


**laterales Kraft-Verschiebungs-Diagramm**

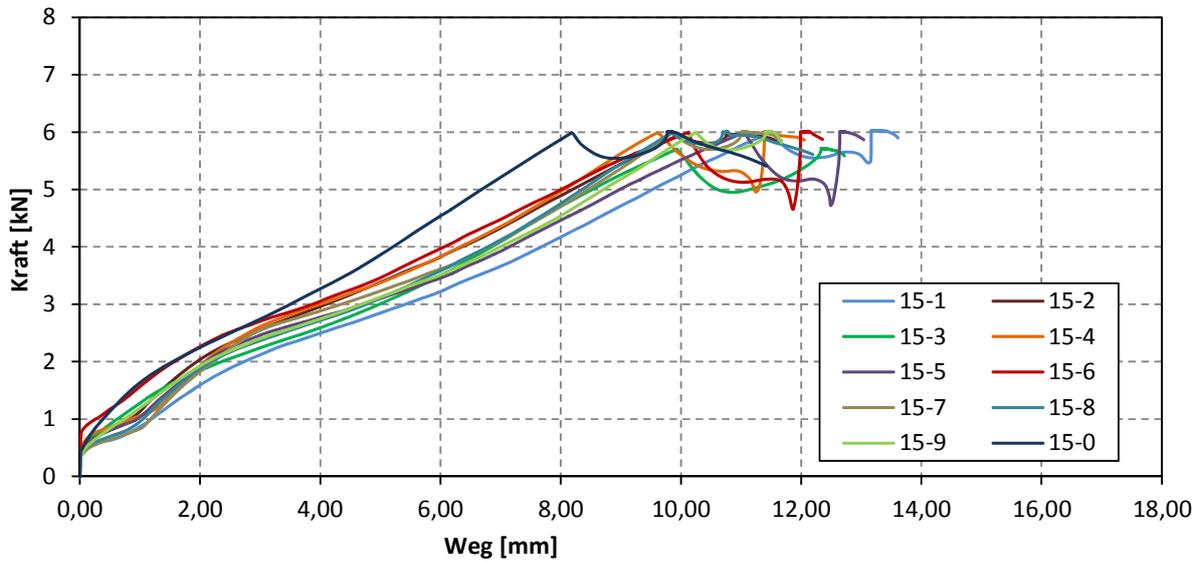


**Prüfserie 15**

**axiales Kraft-Verschiebungs-Diagramm**

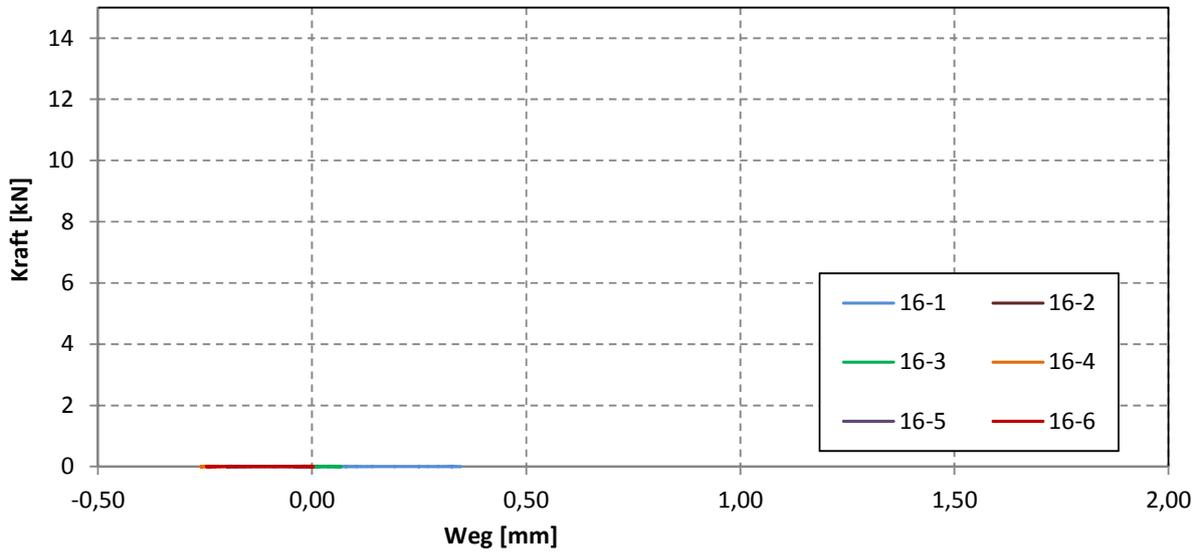


**laterales Kraft-Verschiebungs-Diagramm**

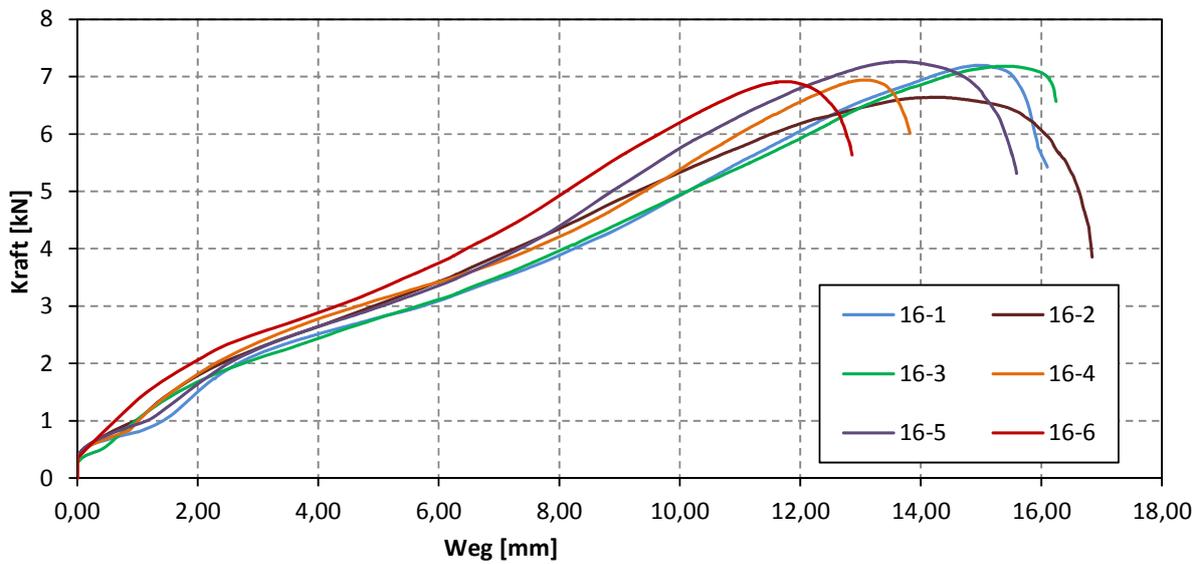


**Prüfserie 16**

**axiales Kraft-Verschiebungs-Diagramm**



**laterales Kraft-Verschiebungs-Diagramm**







Dies ist eine Veröffentlichung des

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

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

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

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

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

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

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

Nummerierungssystematik der Schriftenreihe

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

Institutskenzahl:

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

Fortlaufende Nummer pro Reihe und Institut / Jahreszahl