

Rotationssteifigkeit von Anschlüssen mit geneigt eingebrachten Vollgewindeschrauben

Vortragender:

Egner, Sebastian

M.Sc.

Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine

Holzbau und Baukonstruktion

Karlsruher Institut für Technologie, KIT

sebastian.egner@kit.edu



- 1992 geboren in Karlsruhe
- 2012 – 2016 B.Sc. Bauingenieurwesen, KIT
- 2016 – 2019 M.Sc. Funktionaler und konstruktiver Ingenieurbau – Engineering Structures, KIT
- Seit März 2019 Wissenschaftlicher Mitarbeiter der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Lehrstuhl Holzbau und Baukonstruktion

Autor: Sebastian Egner, M.Sc.

Zusammenfassung

Geneigt eingebrachte Vollgewindeschrauben bieten eine effiziente Möglichkeit Zuganschlüsse, beispielsweise in Fachwerkträgern, auszuführen. In den hier durchgeführten Untersuchungen sollen der Einfluss des Neigens und der geometrischen Anordnung der Verbindungsmittel auf die Rotationssteifigkeit untersucht und hierfür ein Versuchsaufbau entwickelt werden, der ein unabhängiges Aufbringen von Zugkräften und Biegemomenten ermöglicht.

Es wird gezeigt, dass das geneigte Einbringen der Verbindungsmittel und die daraus resultierende Druckspannung in der Scherfuge großen Einfluss auf die Rotationssteifigkeit hat und die Steifigkeit der Verbindungsmittel selbst dahinter zurücktritt. Deutlich wird auch, dass der Einfluss des Verbindungsmittelabstands wesentlich kleiner als bei bestehenden Berechnungsansätzen ist. Bei großen Verbindungsmittelabständen wird die Rotationssteifigkeit daher überschätzt.

1. Einleitung

Mit geneigt eingebrachten Vollgewindeschrauben lassen sich hoch tragfähige Anschlüsse für Fachwerkträger realisieren. Zur axialen Steifigkeit dieser Schrauben und der Anschlüsse wurden bereits Untersuchungen durchgeführt und es liegen Berechnungsmodelle vor. Die Rotationssteifigkeit hingegen wurde bisher kaum untersucht, obwohl sie für Nebenspannungen in Fachwerkträgern und für die Verteilung der Kräfte innerhalb einer Schraubengruppe relevant ist. Bisher existierende Ansätze vernachlässigen i. d. R. die Richtungsabhängigkeit der Verbindungsmittelsteifigkeiten sowie die Druckspannung in der Scherfuge. Unterschiedliche Kräfte in den einzelnen Verbindungsmitteln werden zudem nur durch pauschale Abminderungen der Tragfähigkeit (n_{ef}) berücksichtigt.

Das Ziel der Arbeit ist das Quantifizieren der Kräfte innerhalb einer Schraubengruppe. Sie beruht auf der experimentellen Untersuchung der richtungsabhängigen Rotationssteifigkeit von Anschlüssen mit geneigt eingebrachten Schrauben. Um diese Steifigkeit zu analysieren, wurden eine neuartige Prüfapparatur und eine Methodik entwickelt. Beides ermöglicht, dass Normal- und Querkräfte sowie Biegemomente unabhängig voneinander auf entsprechende Anschlüsse einwirken können. Seiten- und Mittelhölzer werden dazu in der Prüfapparatur kontrolliert gegeneinander verdreht. Durch eine gezielte Variation der Schraubenanzahl und -position wird der Einfluss der veränderlichen Größe der Kontaktflächen sowie der richtungsabhängigen Steifigkeiten K_{ax} (in Achsrichtung der Schrauben) und K_{ser} (lateral zur Schraubenachse) ermittelt. Sondierende

Versuche, bei denen zunächst eine Zugkraft bis 40 % der Anschluss tragfähigkeit und dann ein Biegemoment aufgebracht wurden, zeigen, dass vor allem Haft- und Gleitreibungskräfte aufgrund des herrschenden Querdrucks in den Scherfugen einen großen Einfluss auf die Rotationssteifigkeit haben.

1.1 Analytischer Ansatz

Über die linear-elastisch angenommene Steifigkeit der einzelnen Verbindungsmittel und deren Anordnung kann in Abhängigkeit von der Geometrie des Anschlusses die Rotationssteifigkeit der Gesamtverbindung ermittelt werden (1). Grundlage hierfür sind das polare Trägheitsmoment und die Verbindungsmittelsteifigkeiten [1].

$$K_r = K * \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 + \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad [\text{Nmm}] \quad (1)$$

Der Einfluss der Kraft-Faser-Winkel α auf die Verschiebungsmoduln der einzelnen Verbindungsmittel wird i. d. R. vernachlässigt. Bei geneigt eingebrachten Schrauben ist der Richtungseinfluss jedoch wesentlich größer. Ursache davon ist, dass im Vergleich mit rechtwinklig eingebrachten stiftförmigen Verbindungsmitteln nicht nur der Kraft-Faser-Winkel α , sondern auch der Kraft-Achs-Winkel γ und der Achs-Faser-Winkel ε variieren [2]. Insbesondere ist die Steifigkeit in Achsrichtung K_{ax} um ein Vielfaches höher [3] als die laterale Steifigkeit K_{ser} (2). Für die Berechnung der axialen Steifigkeit existieren verschiedene Ansätze [4], [5]. In der hier durchgeführten Berechnung wird die Gl. (3) verwendet [3; S. 71].

$$K_{ser} = \rho_m^{1,5} * \frac{d}{23} \quad [\text{N/mm}] \quad (2)$$

$$K_{ax} = 0,48 * d^{0,4} * l_{ef}^{0,4} * \rho^{0,3} \quad [\text{kN/mm}] \quad (3)$$

Für die Rotationssteifigkeit gilt damit Gl. (4) unter der Annahme, dass die Steifigkeit der Verbindungsmittel bei Be- und Entlastung, solange sich die Lastrichtung nicht umkehrt, gleichbleibt. Die Verbindungsmittelsteifigkeiten nach Gl. (2) und (3) gehen bei diesem Ansatz linear ein.

$$K_r = K_{ser} * \sum_{i=1}^n x_i^2 + K_{ax} * \sum_{i=1}^n y_i^2 \quad [\text{Nmm}] \quad (4)$$

1.2 Einfluss der Reibung

Bei geneigt eingebrachten und auf Zug belasteten Schrauben erfahren die miteinander verbundenen Bauteile eine Querdruckbeanspruchung. Dies führt zu einer Tragfähigkeitssteigerung in Lastrichtung, aber auch dazu, dass die Verbindung, ähnlich einer Kontaktverbindung, eine wesentlich höhere Steifigkeit aufweist als Verbindungen mit stiftförmigen, nur lateral belasteten Verbindungsmitteln. Dieser Anteil an der Gesamtsteifigkeit bleibt im analytischen Ansatz zunächst unberücksichtigt.

2. Experimentelle Untersuchungen

2.1 Material

Die Untersuchung erfolgt an Prüfkörpern mit zwei außenliegenden Zuglaschen (Seitenhölzern) aus Buchenfurnierschichtholz ($t = 40 \text{ mm}$) und einem Mittelholz aus Nadel-BSH. Die Anschlüsse sind mit zwei bzw. vier Vollgewindeschrauben ($8,0 \times 240 \text{ mm}$) je Seite ausgeführt. Neben der Schraubenanzahl werden die Position der Schrauben und damit das polare Trägheitsmoment der

Verbindung mit Schwerpunkt im Drehpunkt des Versuchsaufbaus variiert. Die Steifigkeiten der gewählten Vollgewindeschrauben in beide Belastungsrichtungen sind in **Tab. 1** dargestellt.

Tab. 1: Versuchsprogramm

Belastungsrichtung		Steifigkeit
		[kN/mm]
Lateral	K_{ser}	2,33
Axial	K_{ax}	22,8

Die um Faktor 9,8 höhere axiale Steifigkeit führt rechnerisch zu drei- bis achtfach höheren Rotationssteifigkeiten. Die Unterschiede sind hierbei auf geometrische Festlegungen bei den Prüfkörpern zurückzuführen. Aufgrund des maschinellen Abbunds kommt es in Einzelfällen zu Lageabweichungen der mit 6 mm Durchmesser vorgebohrten Löcher von bis zu 7,0 mm. Der Schwerpunkt der Verbindungsmittel weicht damit bis zu 3,6 mm von der vorgegebenen Position ab. Die Abweichung in Faserrichtung wird im Prüfablauf durch Verschieben des Versuchsaufbaus ausgeglichen. Diejenige quer zur Faserrichtung kann hingegen nicht ausgeglichen werden. Um die Berechnung der Tragfähigkeit der Verbindungsmittel einfach zu halten und einen Einfluss des Schraubenkopfes auszuschließen, werden die Schrauben mit einem Überstand von 15 mm montiert. Somit liegen der Schraubenkopf und der letzte Gewindegang nicht im Holz.

2.2 Versuchsaufbau

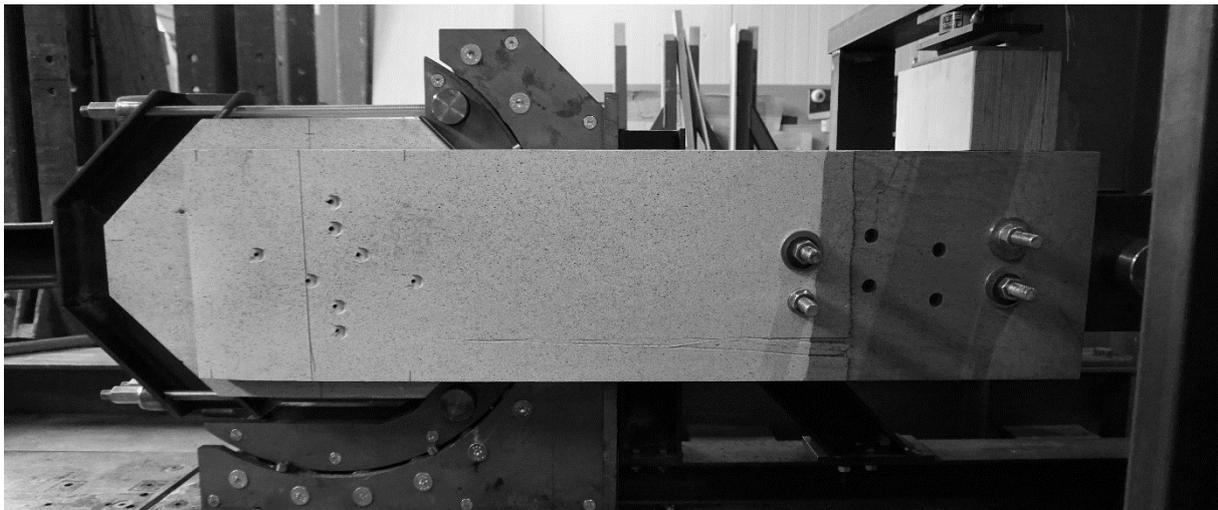


Abb. 1: Versuchsaufbau vor dem Einbringen der Verbindungsmittel

Der Versuchsaufbau ermöglicht das unabhängige Aufbringen von Zugkräften und Biegemomenten bzw. Querkraften auf den Anschluss durch zwei individuell regelbare Hydraulikzylinder. Hierzu ist das Mittelholz, wie in **Abb. 1** dargestellt, in einer frei drehbaren Lagerschale eingespannt. Durch die gewählte Form eines achsensymmetrischen Oktagons lassen sich Verbindungsmittelgruppen von bis zu 400 x 570 mm² bei kompaktem Versuchsaufbau realisieren. Der Drehpunkt der Lagerschale entspricht dabei genau dem Verbindungsmittelschwerpunkt in der Scherfuge (vgl. **Abb. 2**). Dadurch ist sichergestellt, dass es nur zu einer Rotation und nicht zu einer Translation kommt. Die Lagerung der Innenschale erfolgt auf zwei Reihen von Wälzlagern. Ein Verdrehen der seitlichen Zuglaschen wird durch ein horizontales Gleitlager behindert, wodurch sich zwischen Mittelholz und Seitenhölzern eine Relativverdrehung einstellt. Die flächenhafte Messung der Verdrehung erfolgt durch Bildkorrelation.

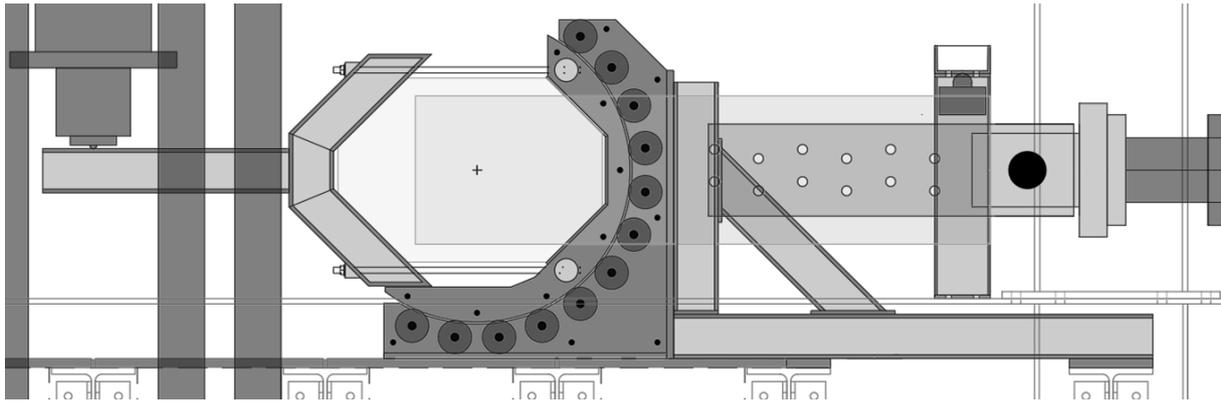


Abb. 2: Schnitt durch den Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau gibt der Verbindung einen festen Drehpunkt vor. Ein Abweichen des Verbindungsmittelschwerpunkts von diesem Drehpunkt würde zu veränderten Beanspruchungen der Verbindungsmittel und zu einer ungewollten Translationsbewegung führen. Dies wird durch die exakte Ausrichtung des Prüfkörpers bestmöglich vermieden. Die Lagerung auf zwei Reihen von Wälzlagern führt nachgewiesen zu vernachlässigbarer Reibung innerhalb des Versuchsaufbaus.

2.3 Versuchsablauf

Zunächst wird eine Zugkraft in Richtung der Zuglaschen kraftgesteuert aufgebracht. Diese Zugkraft entspricht etwa 40 % der in Zugscherversuchen zuvor ermittelten Tragfähigkeit der Verbindungen und stellt somit eine Beanspruchung unter Gebrauchslasten da. Im weiteren Versuchsablauf bleibt diese Zugkraft konstant, während am Hebelarm eine vertikale Druckkraft weggesteuert (20 mm/min) aufgebracht wird. Sie wirkt als Querkraft. Der Anschluss erfährt somit ein Biegemoment und eine entsprechende Verdrehung. Aufgrund der kleinen Winkel von maximal 5° wird zwischen Kolbenweg und Verdrehung vereinfachend ein linearer Zusammenhang angenommen. Es erfolgt die Messung der aufgebrachten Zugkraft sowie der vertikalen Druckkraft am Kolben und zur Kontrolle ebenfalls an der gegenüberliegenden Gleitlagerung der Zuglaschen. Die Verdrehung des Gurtabschnitts und der Laschen wird durch die flächige Bildkorrelation gemessen und an vordefinierten Punkten ausgewertet.

2.4 Versuchsprogramm

Das Versuchsprogramm (s. **Tab. 2**) umfasst 27 Versuche in sechs Reihen mit verschiedenen Anschlussgeometrien. Je Reihe wurden vier bzw. fünf Versuche durchgeführt. Hierbei sind die Schraubenabstände so gewählt, dass die Summe der Abstandsquadrate von zwei Reihen jeweils gleich ist. Die Beanspruchung der Schrauben aus dem aufgebrachten Biegemoment ist überwiegend axial oder lateral zur Stiftachse.

Tab. 2: Versuchsprogramm

Reihe	Anzahl Versuche	Anzahl Schrauben	Schraubenpositionen	Zugkraft	Summe der Abstandsquadrate	Belastungsrichtung
	[-]	[-]		[kN]	[mm ²]	
1	5	4	1+8	35	47952	Lateral
2	5	4	2+7	35	6480	Lateral
3	4	8	1+2+7+8	70	54432	Lateral
4	4	4	3+6	35	47952	Axial
5	4	4	4+5	35	6480	Axial
6	5	8	3+4+5+6	70	54432	Axial

2.5 Beobachtungen

Der Versuchsaufbau ermöglicht sehr gut reproduzierbare Versuchsergebnisse. Dies belegen die Kurven in den Diagrammen in **Abb. 3** bis **5**. Darin ist jeweils das rechnerisch ermittelte Biegemoment im Schwerpunkt der Verbindungsmittelgruppe über der Verdrehung aufgetragen. Ein Versuch der Reihe 1 (**Abb. 3**) weist aufgrund eines Montagefehlers einen deutlich abweichenden Verlauf auf und bleibt daher in der Auswertung unberücksichtigt. Über alle Reihen ist ein linearer Bereich bei Belastungsbeginn bis etwa $0,3^\circ$ bis $0,5^\circ$ Verdrehung erkennbar. Dieser geht in den Reihen 1 bis 3, mit überwiegender lateraler Beanspruchung der Verbindungsmittel, ohne klaren Knickpunkt in einen zweiten, linearen Bereich geringerer Steigung über. Die Last lässt sich hierbei bis zur Beendigung des Versuchs bei 3° bis 5° steigern. Bei den Reihen 4 bis 6 mit überwiegender axial belasteten Schrauben gehen die Kurven hingegen in einen Bereich zunehmender Verformung ohne weitere Laststeigerung über. Dieses Plateau endet im Bereich zwischen 2° und 4° mit einem abrupten Abfall der Last.

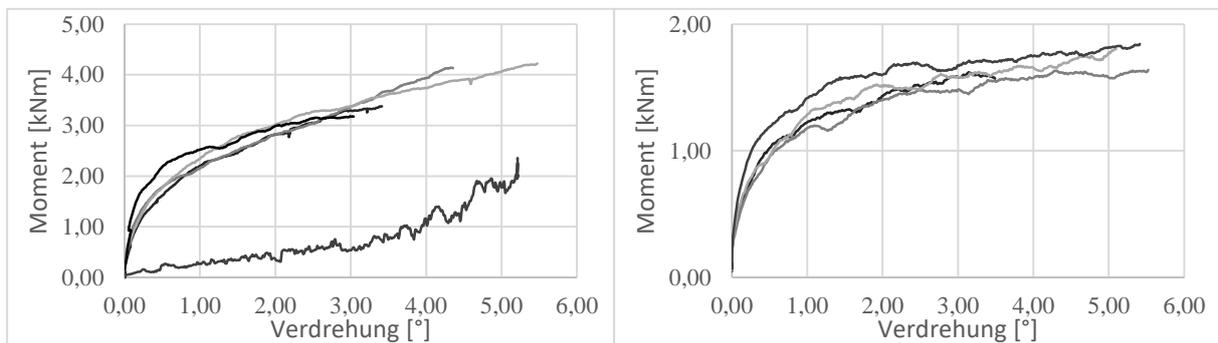


Abb. 3: Momenten-Drehwinkel-Diagramme, Reihe 1 (links) und Reihe 2 (rechts)

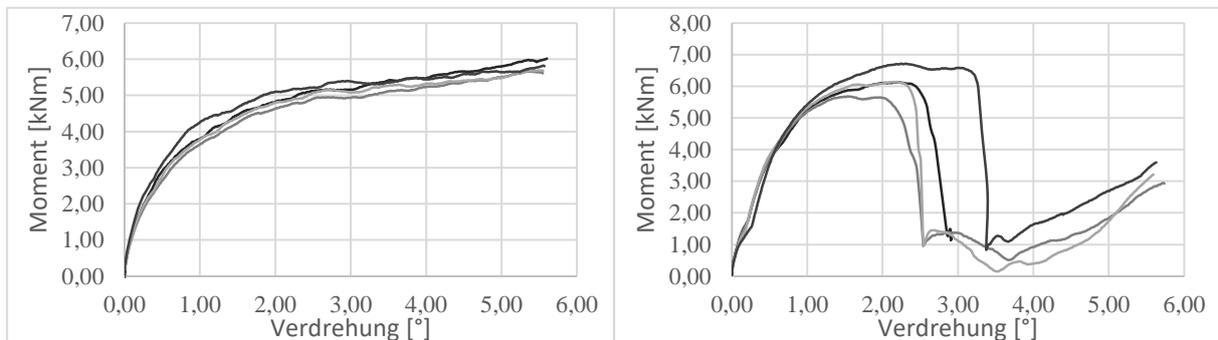


Abb. 5: Momenten-Drehwinkel-Diagramme, Reihe 3 (links) und Reihe 4 (rechts)

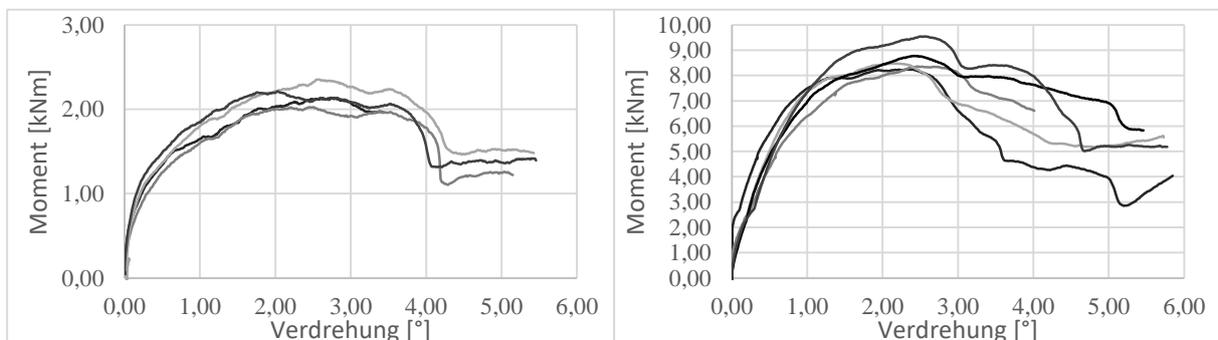


Abb. 5: Momenten-Drehwinkel-Diagramme, Reihe 5 (links) und Reihe 6 (rechts)

2.6 Auswertung

Die Auswertung der Rotationssteifigkeit erfolgt jeweils im Bereich bis 40 % des ermittelten maximalen Moments M_{\max} . Es wird in Anlehnung an DIN EN 26891 ein Verdrehungsmodul $K_{r,s}$ zwischen 10 % und 40 % sowie ein Anfangsverdrehungsmodul $K_{r,i}$ bis 40 % ermittelt. In **Tab. 3** sind jeweils Mittelwerte und Variationskoeffizienten dargestellt.

Tab. 3: Mittelwerte und Variationskoeffizient von Biegemoment und Verdrehungsmodul

Reihe	M_{\max} [kNm]	v [%]	$K_{r,s}$ [kNm/rad]	v [%]	$K_{r,i}$ [kNm/rad]	v [%]
1	3,92	11,8	188	3,51	238	3,34
2	1,73	6,58	189	28,1	249	27,8
3	5,80	2,76	332	15,4	406	16,5
4	6,17	6,87	402	10,9	479	11,0
5	2,18	6,27	264	23,8	326	24,6
6	8,68	6,00	585	34,7	742	38,4

$K_{r,i}$ ist in allen Reihen größer als $K_{r,s}$. Das ist erwartungsgemäß, da zunächst das Haften zu überwinden ist, ehe die betragsmäßig geringere Gleitreibung wirkt. Weiter zeigt sich, dass überwiegend lateral beanspruchte Schrauben ein duktileres Versagen aufweisen. Grund hierfür ist die größere Verformung dieser Schrauben. Bei den axial belasteten Schrauben hingegen wird bereits bei kleinen Verdrehwinkeln die Ausziehtragfähigkeit erreicht. Nach dem dann eingetretenen Lastabfall zeigt sich mit zunehmender Verformung eine erneute Zunahme der Belastung, da die Schraubenköpfe (s. **Abb. 6**) nun direkt an den Seitenhölzern anliegen.

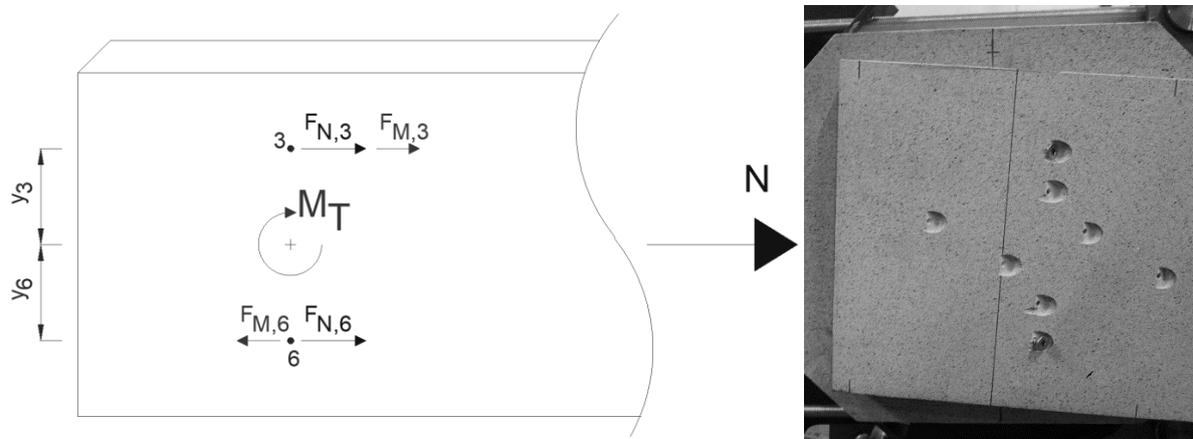


Abb. 6: Aufteilung der Schraubenkräfte (links) – Ausziehen Schraube 3 (rechts)

Die linear-elastische Aufteilung der Schraubenkräfte (vgl. **Abb. 6**) deckt sich mit den Beobachtungen. Ein lineares Verformungsverhalten liegt bis zum rechnerischen Überdrücken der ersten Zugschraube aufgrund der Biegemomente vor. Zur Verdeutlichung ist in **Abb. 7**, beispielhaft an einem Versuch der Reihe 4, der Bereich, in dem die Schraube rechnerisch eine Druckbeanspruchung erfährt, in Dunkelgrau hervorgehoben. Die rechnerische Zugtragfähigkeit der Schraube 3 wird deutlich überschritten. Erst beim Überschreiten der rechnerischen Tragfähigkeit in beiden Schrauben kommt es zu einem Lastabfall.

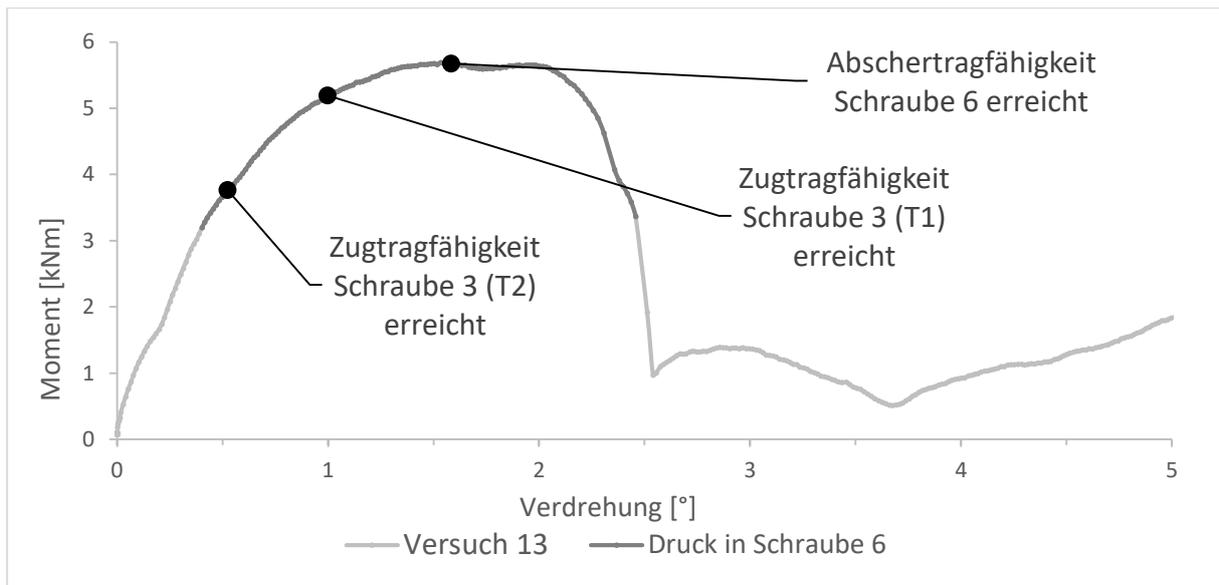


Abb. 7: Momenten-Verdrehungs-Diagramm Versuch 13 (Reihe 4)

3. Vergleich mit analytischem Ansatz

Der Vergleich mit dem bestehenden analytischen Berechnungsansatz in **Abb. 8** und **Tab. 4** zeigt, dass die Reibung zwischen den Bauteilen einen signifikanten Einfluss auf die Rotationssteifigkeit hat. Das polare Trägheitsmoment hat hingegen weniger Einfluss. Die Gegenüberstellung der Mittelwerte der Versuchsergebnisse ($K_{r,s}$ und $K_{r,i}$) und der analytischen Ergebnissen K_r nach den Gl. in Abschnitt 1.1 belegt, dass der Berechnungsansatz bei sehr kleinen Verbindungsmittelabständen die Rotationssteifigkeit unterschätzt. Bei großen Abständen hingegen wird sie deutlich überschätzt. Der Einfluss der Verbindungsmittelsteifigkeit auf die Rotationssteifigkeit fällt auch wesentlich geringer aus, als es bei rechnerischer Berücksichtigung der Fall wäre. Deutlich wird dies insbesondere beim Vergleich zwischen den Reihen 1 und 4, 2 und 5 sowie 3 und 6 mit gleichen Verbindungsmittelabständen aber unterschiedlichen Belastungsrichtungen.

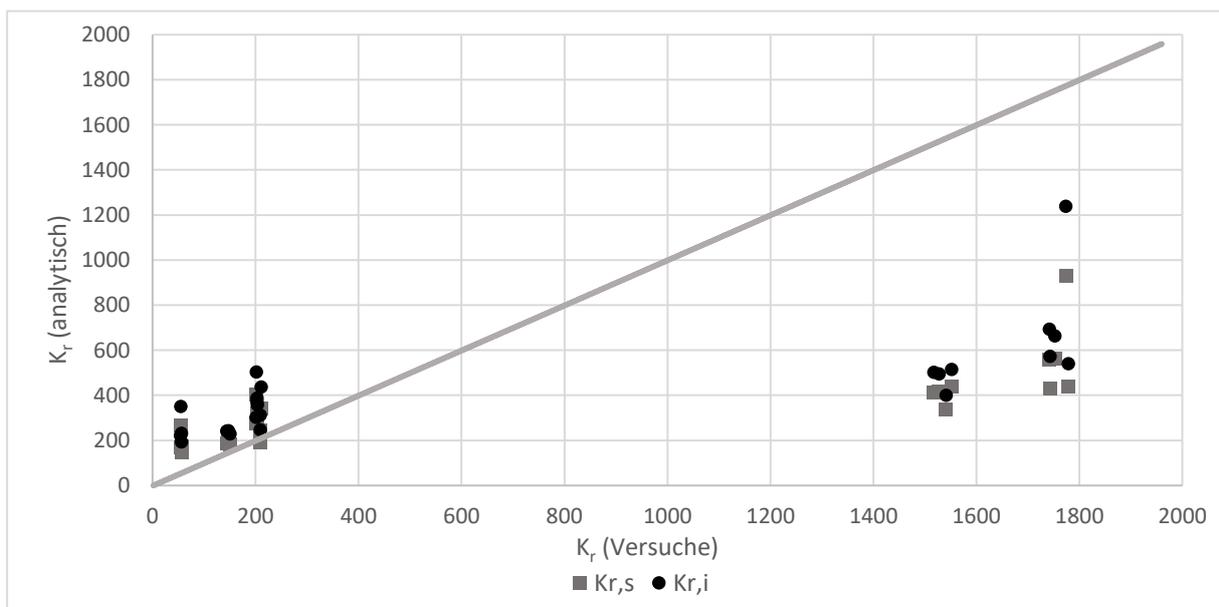


Abb. 8: Vergleich Rotationssteifigkeiten [kNm/rad]: Analytische Werte - Versuchsergebnisse

Tab. 4: Vergleich zwischen analytischer Berechnung und experimenteller Untersuchung

Reihe	K_r	$K_{r,s}$	$K_r/K_{r,s}$	$K_{r,i}$	$K_r/K_{r,i}$
	[kNm/rad]	[kNm/rad]	[-]	[kNm/rad]	[-]
1	136	188	1,38	238	1,74
2	42,0	189	4,48	249	5,91
3	178	332	1,86	406	2,27
4	1085	402	0,37	479	0,44
5	147	264	1,80	326	2,22
6	1243	585	0,47	742	0,60

4. Fazit

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen wird allgemein gezeigt, dass mit dem entwickelten Versuchsaufbau reproduzierbare Ergebnisse erzielt werden. Weiter wird deutlich, dass bei rotatorisch beanspruchten Anschlüssen in Fachwerkstrukturen für praxisrelevante Verdrehwinkel ($\ll 1^\circ$) ein linear-elastisches Verhalten vorliegt.

Die Versuchsergebnisse zeigen im Einzelnen, dass eine Ermittlung der Rotationssteifigkeit nicht allein über Verbindungsmittelsteifigkeiten und polare Trägheitsmomente erfolgen darf. Einen wesentlich signifikanteren Einfluss besitzt die Reibung zwischen den verbundenen Bauteilen. Ob dieser Einfluss mit einem Pauschalwert, über die beanspruchte Fläche oder über die Druckkraft berücksichtigt werden kann, werden weitere Untersuchungen zeigen. Hierzu werden Vergleichsversuche mit lateral belasteten Verbindungsmitteln sowie angepassten Prüfkörpergeometrien für sinnvoll erachtet. Auch eine Untersuchung mit zeitgleichem Aufbringen von Zugkraft und Biegemomenten ist noch erforderlich, um eine Belastungssituation abzubilden, die der Beanspruchung in realen Fachwerkträgern entspricht.

5. Literatur

- [1] NOGUCHI, M.; KOMATSU, K.: *A new method for estimating stiffness and strength in bolted timber-to-timber joints and its verification by experiments (II): bolted cross-lapped beam to column joints*. In: The Japan Wood Research Society 50 (2004), S. 391-399, 2004.
- [2] RINGHOFER, A.; BURTSCHER, M.; SIEDER, R.; GSTETTER, M.: *Self-tapping Timber Screws Subjected to Combined Axial and Lateral Loading*. In: INTER 54 (2021), S. 95-111, 2021.
- [3] BLAß, H.J.; STEIGE, Y.: *Steifigkeit axial beanspruchter Vollgewindeschrauben*. Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau, Band 34, 2018.
- [4] DE SANTIS, Y.; FRAGIACOMO, M.: *Slip modulus formulas for timber-to-timber inclined screw connections – Comparison with other simplified models*. In: INTER 54 (2021), S. 131-145, 2021.
- [5] STEIGE, Y.; FRESE, M.: *Study on a newly developed diagonal connection for hybrid timber trusses made of spruce glulam and beech laminated veneer lumber*. In: Wood Material Science & Engineering 14 (2019), S. 280-290, 2019.

6. Förderhinweis

Der Autor bedankt sich für die Förderung des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) als Projektträger (Kennzeichen 22010017) und dankt dem Projektpartner Holzbau Bruno Kaiser GmbH, Bernau, für die Zusammenarbeit und die Fertigung der Prüfkörper.