

Verbindungen mit eingeklebten Gewindestangen in Bauteilen aus Furnierschichtholz aus Buche

MEYER

NICO

Dipl.-Ing.

Wissenschaftlicher Mitarbeiter

Holzbau und Baukonstruktionen

Karlsruher Institut für Technologie

nico.meyer@kit.edu



1987 geboren in Saarlouis

2008 – 2013 Studium

Bauingenieurwesen am Karlsruher
Institut für Technologie (KIT)

Seit 2014 Wissenschaftlicher
Mitarbeiter

Zusammenfassung

Der Holzwerkstoff Furnierschichtholz aus Buche ist ein neuer Werkstoff im Bereich des Ingenieurholzbaus. Im Vergleich zu Brettschichtholz aus Fichte weist dieser eine bis zu dreifache Tragfähigkeit auf. Aus diesem Grund bietet sich die Konstruktion von Fachwerk-Bindern mit großen Spannweiten als Einsatzgebiet für diesen Werkstoff an. Mit großen Spannweiten gehen große zu übertragende Kräfte einher. Eingeklebte Gewindestangen bieten bereits die Möglichkeit, große Kräfte zwischen Holzbauteilen übertragen zu können. Dieser Beitrag stellt die Ergebnisse umfangreicher experimenteller Untersuchungen von faserparallel eingeklebten Gewindestangen in Furnierschichtholz aus Buche vor.

1. Einleitung

Furnierschichtholz aus Buche (Buchen-FSH) ist seit September 2013 mit der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung Z-9.1-838 [1] für die Verwendung als stabförmige und flächige Bauteile in tragenden Konstruktionen verfügbar. Mit der europäisch technischen Bewertung ETA-14/0354 [2] ist seit November 2015 ebenfalls die Verwendung von Trägern aus Buchen-FSH (GL70) auf europäischer Ebene geregelt. Vor- und Nachteile und bemessungsrelevante Besonderheiten dieses Werkstoffs werden bereits von *Enders-Comberg und Frese* [3] näher beleuchtet. An dieser Stelle sollen die Untersuchungen fortgesetzt werden.

Auf Grund einer charakteristischen Zugtragfähigkeit von bis zu 70 N/mm^2 ist der Einsatz dieses Werkstoffs in Konstruktionen mit überwiegender Normalkraftbeanspruchung denkbar. Im Fokus steht insbesondere die Konstruktion von Fachwerkträgern, vgl. [4]. In Anbetracht der hohen Tragfähigkeit erschließen sich für den Ingenieurholzbau neue Möglichkeiten, weitgespannte, schlanke und architektonisch ansprechende Tragwerke zu realisieren. Dabei stehen besonders die Knotenpunkte im Mittelpunkt des Konstruierens. Eine gängige Ausbildung eines solchen Knotenpunktes ist in Abb. 1 dargestellt. Dabei handelt es sich um eine Stahlblech-Holzverbindung, die mit Stabdübeln sowie mit Passbolzen ausgeführt werden kann. Ein Nachteil dieser Verbindungsvariante ist unter anderem die große Querschnittsschwächung, welche das Einbringen der Bleche und der Verbindungsmittel mit sich bringt. Diese muss nach DIN EN 1995-1 [5] für Zuganschlüsse rechnerisch durch die Verwendung des Nettoquerschnittes berücksichtigt werden. Ein deutlicher rechnerischer Tragfähigkeitsverlust des anzuschließenden Bauteils ist damit verbunden. Für eine wirtschaftliche Verbindung zweier Bauteile wird daher angestrebt, eine möglichst große Ausnutzung des Bruttoquerschnitts der Holzbauteile zu erreichen.

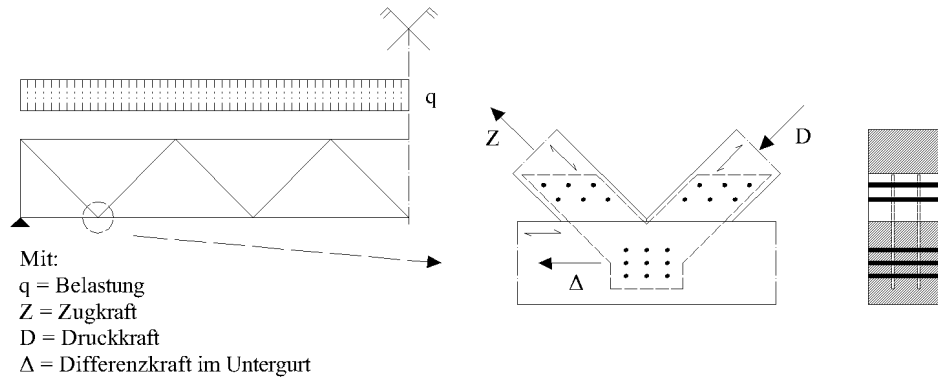


Abb. 1: Detail Fachwerkträgerknoten mit Stahlblech-Holzverbindungen

Eingeklebte Gewindestangen mit metrischem Gewinde bieten die Möglichkeit, große Kräfte bei gleichzeitig geringer Querschnittsschwächung zu übertragen. Im Folgenden soll eine Einführung in das Tragverhalten und die Konstruktionsmerkmale dieser Verbindung gegeben werden. Im Anschluss werden die Einsetzbarkeit dieser Verbindung in Buchen-FSH durch experimentelle Untersuchungen beleuchtet sowie die zur Bemessung benötigten Parameter und konstruktiven Randbedingungen (Mindestabstände, Einklebelänge) bestimmt. Dieser Beitrag beschränkt sich auf faserparallel eingeklebte Gewindestangen.

2. Tragverhalten und Konstruktionsmerkmale

2.1 Tragverhalten

Einen umfangreichen Überblick über das Tragverhalten von eingeklebten Gewindestangen und der beeinflussenden Parameter gibt Steiger [6]. An dieser Stelle sollen der Kraftfluss und die daraus entstehenden Beanspruchungen im Holzquerschnitt betrachtet werden.

Werden eingeklebte Gewindestangen auf Zug belastet, so muss die axial wirkende Kraft über die Klebefuge mittels Schubkräften in das anzuschließende Bauteil übertragen werden, vgl. Abb. 2. Dabei wird in der Regel von einer gleichmäßigen Spannungsverteilung entlang der Einklebelänge l_{ad} ausgegangen. Bei größeren Einklebelängen treten jedoch Spannungsspitzen, wie in Abb. 2 dargestellt, am Beginn und Ende der Verklebung auf. Diese beeinflussen das Tragverhalten ungünstig und müssen durch eine Begrenzung der rechnerisch ansetzbaren Einklebelänge berücksichtigt werden, vgl. [5].

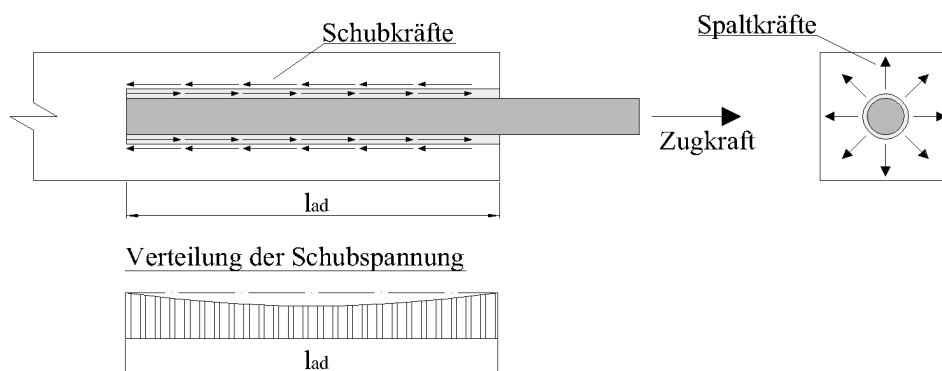


Abb. 2: Kraftkomponenten in einer Verbindung mit eingeklebten Gewindestangen

Neben den Schubkräften werden rechtwinklig zur Faser wirkende Kräfte (Spaltkräfte) in das Holz eingeleitet, vgl. Abb. 2. Diese führen bei Erreichen der Querkzugfestigkeit zu Spaltbrüchen im Verankerungsbereich der Gewindestange, vgl. Abb. 3. Um diesem spröden Versagen zu begegnen, können beispielsweise Querkzugverstärkungen mittels Vollgewindeschrauben, zusätzlich angeordneten Querlagen oder einer zurückversetzten Klebefuge vorgesehen werden, vgl. Z- 9.1-778 [7]. In Abb. 4 ist beispielhaft ein Prüfkörper mit Spaltbewehrung mittels Vollgewindeschrauben dargestellt.



Abb. 3: Spalten eines Prüfkörpers

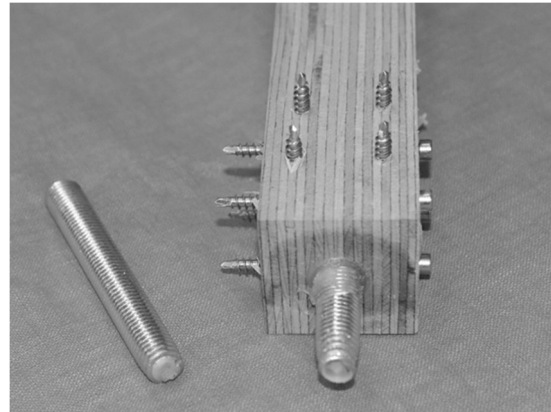


Abb. 4: Mit Schrauben verstärkter Prüfkörper

2.2 Bemessungsansatz

Die zur Bemessung notwendigen Kennwerte und Gleichungen können dem Nationalen Anhang des Eurocodes 5 [5] entnommen werden. Hierbei sind drei Versagensmechanismen zu berücksichtigen:

- Versagen der Gewindestange
- Versagen der Klebefuge und / oder des Holzes entlang der Bohrlochwandung
- Versagen des anzuschließenden Holzbauteils

Da stets ein duktiles Versagen zu bevorzugen ist, sollte ein Versagen der Gewindestange angestrebt werden. Hierzu muss die Einklebelänge so dimensioniert sein, dass ein Versagen der Klebefuge ausgeschlossen werden kann:

$$F_{tens} < \pi \cdot d \cdot l_{ad} \cdot f_{k,1} \quad (1)$$

mit:

F_{tens}	Zugtragfähigkeit der Gewindestange
$f_{k,1}$	Klebfugenfestigkeit
d	Nenn Durchmesser Gewindestange
l_{ad}	Einklebelänge

Die Klebfugenfestigkeit $f_{k,1}$ kann in Abhängigkeit der Einklebelänge l_{ad} nach [5] mit einem charakteristischen Rechenwert von bis zu 4 N/mm^2 angesetzt werden. Der verwendete Klebstoff muss entsprechend des Verwendungszwecks bauaufsichtlich zugelassen sein. Zurzeit ist dessen Einsatz noch auf Holzwerkstoffe aus Nadelholz beschränkt. Neuere Untersuchungen von *Enders-Comberg und Frese* [3] zeigen, dass eingeklebte Gewindestangen für Buchen-FSH verwendet werden können und mit erreichten Klebfugenfestigkeiten von im Mittel bis zu 12 N/mm^2 hohe Tragfähigkeiten aufweisen.

2.3 Randabstände

Die zur Konstruktion von Anschlüssen benötigten Abstände der Gewindestangen zum Rand und untereinander sind im Eurocode 5 [5] angegeben. Kleinere Randabstände für eingeklebte Stahlstangen in Brettschichtholz sind in den Zulassungen Z-9.1-791 [8] und Z-9.1-778 [7] enthalten, vgl. Tab. 1 und Abb. 5.

Tab. 1: Randabstände für faserparallel eingeklebte Gewindestangen.

Regelwerk	a_2	$a_{2,c}$
DIN EN 1995-1-1/NA	5d	2,5d
Z-9.1-791	3,5d	1,75d
Z-9.1-778	3,75d	1,875d

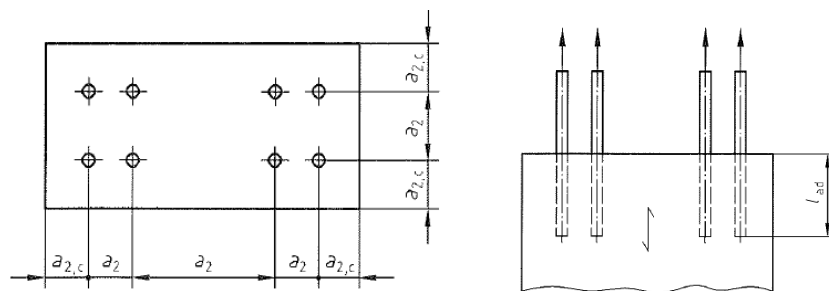


Abb. 5: Definition der Randabstände faserparallel eingeklebter Stahlstangen nach [5]

3. Experimentelle Untersuchungen

3.1 Material und Methoden

Zur Bestimmung der für die Bemessung und Konstruktion von Anschlüssen mit faserparallel eingeklebten Gewindestangen in Buchen-FSH notwendigen Parameter wurden insgesamt 75 Versuche in 15 Versuchsreihen durchgeführt. Ziel war die Ermittlung der Klebfugenfestigkeit $f_{k,1}$ und der benötigten Randabstände a_2 sowie $a_{2,c}$ für verschiedene FSH-Aufbauten, Durchmesser der Gewindestangen und Einklebelängen.

Die Versuchskörper waren symmetrisch aufgebaut, sodass je Versuch zwei Anschlüsse geprüft wurden. Die Länge der Prüfkörper betrug jeweils $3,5 \cdot l_{ad}$. Die stabförmigen Querschnitte wiesen dabei im Mittel eine Rohdichte von $\rho = 806 \text{ kg/m}^3$ und eine Holzfeuchte u von 6% bis 8% bei einer mittleren Furnierlagendicke von 3 mm auf. Untersucht wurden FSH-Aufbauten mit Querlagen (Typ Q) und ohne Querlagen (Typ S). Die Querlagen, deren Anteil im Mittel 16% betrug, waren jeweils unmittelbar neben den Gewindestangen angeordnet, vgl. Abb. 6.

Untersucht wurden Gewindestangen M12, M16 und M20 der Festigkeitsklasse 8.8 mit einem Randabstand von $a_{2,c} = 1,5 \cdot d - 1,75 \cdot d$. Die Verklebung erfolgte mit dem Klebstoff WEVO-Spezialharz EP 32 S mit dem Härter B22 TS nach Z-9.1-705 [9]. Die Klebefuge zwischen Bohrlochwandung und Gewindestange war stets 2 mm dick.

Zur Vermeidung eines vorzeitigen Aufspaltens waren mit Ausnahme der Reihen E1 und E3 Querszugverstärkungsmaßnahmen vorgesehen. Diese Reihen dienen als Referenz zur Bestimmung der Tragfähigkeit unverstärkter Anschlüsse. Alle anderen Prüfkörper wurden mit Querlage (Q) und / oder Vollgewindeschrauben (VG) gegen Spalten verstärkt. Das vollständige Versuchsprogramm kann Tab. 2 entnommen werden. In Abb. 6 sind die geprüften FSH-Aufbauten und die jeweils gewählte Verstärkungsmaßnahme dargestellt.

Tab. 2: Versuchsprogramm zur Bestimmung der Klebfugenfestigkeit $f_{k,1}$

Reihe	d	l_{ad}	$a_{2,c}$	Verstärkung	Anzahl
	[mm]	[-]	[-]	[-]	[-]
E1	16	10d	1,5d	unverstärkt	5
E2	16	10d	1,5d	VG-Kreuz	5
E3	16	15d	1,75d	unverstärkt	5
E4	16	15d	1,75d	VG-Kreuz	5
E5.1	12	10d	1,5d	VG-Kreuz	5
E5.2	12	10d	1,75d	VG-Kreuz	5
E5.3	12	10d	1,5d	VG & Q	5
E5.4	12	10d	1,75d	VG & Q	5
E6.1	20	10d	1,5d	VG-Kreuz	5
E6.2	20	10d	1,75d	VG-Kreuz	5
E6.3	20	10d	1,5d	VG & Q	5
E6.4	20	10d	1,75d	VG & Q	5

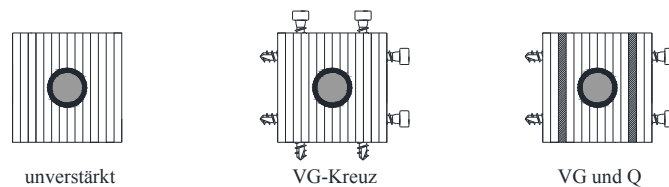
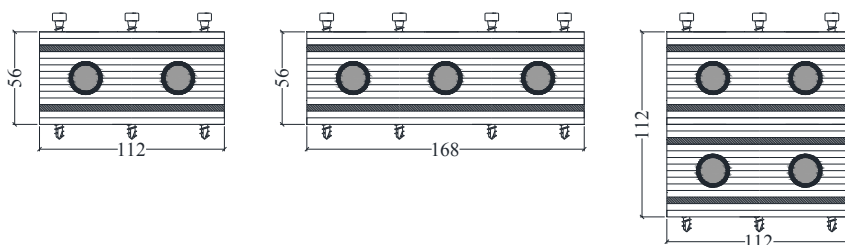


Abb. 6: Aufbau der Prüfkörper

Zur Untersuchung eines Gruppeneffektes wurden drei Versuchsreihen mit mehreren eingeklebten Gewindestangen ($n_{VM} > 1$) durchgeführt. Für die Versuche wurden Gewindestangen M16 der Festigkeitsklasse 8.8 verwendet. Um ein vorzeitiges Spalten der Prüfkörper zu verhindern, wurde für die Prüfkörper ein FSH-Aufbau mit Querlagen gewählt und zusätzlich waren Vollgewindeschrauben vorgesehen. Der Randabstand $a_{2,c}$, der Abstand der Verbindungsmittel untereinander a_2 sowie die Einklebelänge wurden nicht variiert. In Tab. 3 wird das Versuchsprogramm zum Einfluss des Gruppeneffekts zusammengefasst.

Tab. 3: Versuchsprogramm zur Untersuchung des Gruppeneffekts

Reihe	n_{VM}	d	l_{ad}	$a_{2,c}$	a_2	Anzahl
	[-]	[mm]	[-]	[-]	[-]	[-]
E7	2	16	10d	1,75d	3,5d	5
E8	3	16	10d	1,75d	3,5d	5
E9	4	16	10d	1,75d	3,5d	5



(a) Reihe E7

(b) Reihe E8

(c) Reihe E9

Abb. 7: Abmessungen der Prüfkörper

3.2 Versuchsergebnisse

Alle Prüfkörper wurden mit einer gleichmäßigen Prüfgeschwindigkeit bis zum Bruch belastet. In Tab. 4 sind die gemittelten Werte der Bruchlast F_{max} , der Klebfugenfestigkeit $f_{k,1}$ und der dazugehörige Variationskoeffizient jeder Versuchsreihe angegeben. Die Klebfugenfestigkeit berechnet sich mit Hilfe der Bruchlast F_{max} durch die Gleichung:

$$f_{k,1} = \frac{F_{max}}{\pi \cdot d \cdot l_{ad}} \quad (2)$$

Weiterhin ist die ermittelte mittlere Steifigkeit K_{mean} der Verbindungen in den Versuchsreihen E1 bis E6.4 angegeben. Diese wird mit der Relativverschiebung zwischen 10% und 40% der Bruchlast ausgewertet. Die dazu notwendige Wegmessung erfolgte durch zwei induktive Wegaufnehmer je Verbindung.

Tab. 4: Mittelwerte der einzelnen Versuchsreihen

Reihe	F_{max} [kN]	$f_{k,1}$ [N/mm ²]	COV [%]	K_{mean} [kN/mm]	Versagen [-]
E1	92,3	11,5	5,42	244	SP
E2	102	12,7	5,43	246	SP & SC
E3	107	8,84	5,68	247	SP
E4	123	10,2	1,33	242	G
E5.1	61,9	13,7	5,86	119	G & SP & SC
E5.2	63,2	14,0	9,76	131	G & SC
E5.3	62,5	13,8	4,62	117	SC
E5.4	68,4	15,1	4,62	129	SC
E6.1	148	11,8	2,08	347	SP & SC
E6.2	159	12,7	5,57	332	SC
E6.3	134	10,7	4,99	342	SC
E6.4	139	11,1	9,10	349	SC
E7	193	12,0	5,02	-	SC
E8	301	12,5	4,09	-	SC
E9	388	12,1	3,28	-	SC

SP: Spalten des Prüfkörpers
 SC: Scherversagen im Bereich der Verklebung
 G: Versagen der Gewindestange

In Tab. 4 sind die jeweiligen Versagensarten jeder Versuchsreihe angegeben. Zumeist konnte ein Herausziehen der Gewindestange (SC) beobachtet werden, was auf ein Erreichen der Schubtragfähigkeit entlang der Mantelfläche des Bohrlochs oder im umgebenden Holzquerschnitt zurückzuführen ist. Bei unbewehrten Prüfkörpern und Prüfkörpern mit Randabständen von $1,5 \cdot d$ trat das in Abschnitt 2.1 beschriebene Spalten ein, vgl. Abb. 3. Ausnahme bilden die Prüfkörper mit Querlagen (Typ Q). Hier konnte kein Spalten beobachtet werden. Bei Randabständen von $1,75 \cdot d$ war ein ausgeprägtes Spaltversagen der Prüfkörper ebenfalls nicht festzustellen.

In Reihe E4 trat bei allen Prüfkörpern ein duktiler Versagen der Gewindestange ein, vgl. Abb. 4. Das Erreichen der Streckgrenze bzw. das Versagen von Gewindestangen konnte ebenfalls bei insgesamt vier Prüfkörpern der Reihen E5.1 und E5.2 beobachtet werden. Die zu erwartende Zugtragfähigkeit für Gewindestangen M12 der Festigkeitsklasse 8.8 wurde hier nicht erreicht. Es ist zu beachten, dass in Tab. 4 die Ergebnisse aus diesen Versuchen in den Mittelwerten enthalten sind.

In den Versuchsreihen E7 und E8 konnte zum Teil ein gleichzeitiges Herausziehen mehrerer Gewindestangen beobachtet werden.

4. Diskussion und Schlussfolgerungen

Hauptziel der Untersuchungen ist die Bestimmung der Klebfugenfestigkeit faserparallel eingeklebter Gewindestangen in Buchen-FSH. Da in den meisten Versuchen das Scherversagen des Holzes im Bereich der Bohrlochwandung bzw. in der Klebefuge stattfand, kann dieser Parameter eindeutig bestimmt werden. In Abb. 8 sind die ermittelten Festigkeiten über den Nenndurchmesser d der Gewindestange und der Einklebelänge l_{ad} aufgetragen. Versuche, in denen Stahlversagen oder vorzeitiges Spalten eintrat, werden hier nicht berücksichtigt. Wie in Abschnitt 2.1 beschrieben kann eine Abhängigkeit der Klebfugenfestigkeit vom Nenndurchmesser bzw. von der Einklebelänge festgestellt werden. Allerdings betrug mit Ausnahme der Reihe E4 die Einklebelänge für alle Durchmesser $10 \cdot d$. Da in dieser Reihe Stahlversagen eintrat, kann jedoch nicht auf die Klebfugenfestigkeit zurückgerechnet werden. Um den genauen Einfluss jedes Parameters feststellen zu können, sind weitere Untersuchungen notwendig.

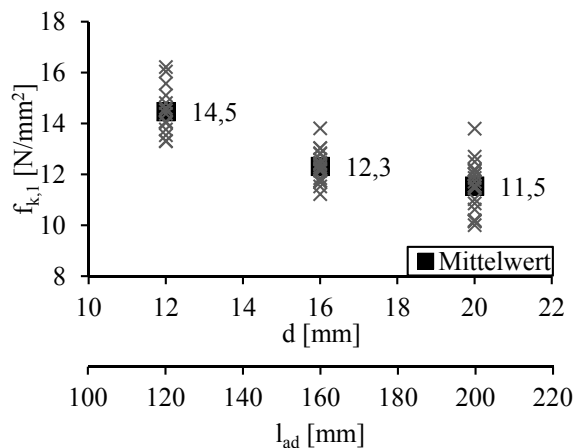


Abb. 8: Mittlere Klebfugenfestigkeit in Abhängigkeit von d bzw. l_{ad}

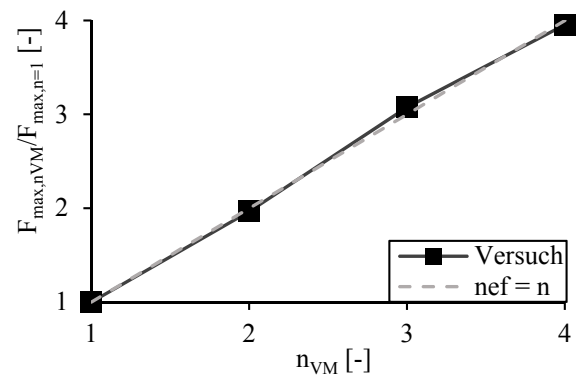


Abb. 9: Untersuchung des Gruppeneffektes

Ein Gruppeneffekt ist aus den Versuchen mit mehreren Gewindestangen nicht abzuleiten. Vergleicht man die ermittelten Bruchlasten der Reihe E7, E8 und E9 so entsprechen diese etwa dem entsprechenden Vielfachen der Tragfähigkeit einer Gewindestange bei identischem FSH-Aufbau und Verbindungsgeometrie ($F_{max,n=1} = 98$ kN, vgl. [3]). Es ist anzumerken, dass bei den Versuchen eine gleichmäßige Lasteinleitung gewährleistet werden konnte. In der Baupraxis kann davon nicht unbedingt ausgegangen werden. Ein Stahlversagen der Verbindung sollte daher im Hinblick auf Robustheit und duktiles Versagen angestrebt werden. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass dies mit einer Einklebelänge $l_{ad} \geq 15 \cdot d$ für Gewindestangen M16 der Festigkeitsklasse 8.8 erreicht werden kann.

Für die Robustheit spielen ebenfalls die Randabstände eine entscheidende Rolle. Bei kleinen Randabständen steigt die Gefahr des Spaltens und damit eines sprödes Versagens. Die durchgeführten Versuche lassen erkennen, dass Randabstände von $a_{2,c} = 1,75 \cdot d$ und $a_2 = 3,5 \cdot d$ (vgl. Tab. 1) ebenfalls für Buchen-FSH zur Anwendung kommen können. Bei Randabständen von $a_{2,c} = 1,5 \cdot d$ und $a_2 = 3 \cdot d$ ist dies nicht ohne weiteres möglich. Trotz Verstärkung konnte bei Prüfkörpern des Typs S ein Spalten beobachtet werden. Bei Prüfkörpern des Typs Q war dies jedoch nicht der Fall. Die Verwendung dieses Randabstandes scheint daher für diesen Typ und damit eine erhöhte Ausnutzung der Bauteiltragfähigkeit denkbar. Zudem wirkt sich die verminderte Zugtragfähigkeit, bedingt durch die Querlagen, günstiger auf das Verhältnis von Bauteil- zu Anschlusstragfähigkeit aus.

Unabhängig von den Randabständen zeigen die Reihen E1 und E3 die Spaltneigung dieser Verbindung. Bereits von *Enders-Comberg und Frese* [3] beschriebene Versuche zeigen das Potential einer wirksamen Bewehrung gegenüber Spalten. Vergleicht man die Versuche der Reihen E3 und E4, sind eine Steigerung der Traglast um bis zu 19% und ein duktileres Verhalten der Verbindung ein Hinweis auf die Notwendigkeit einer Sicherung gegenüber Spalten durch konstruktive Maßnahmen.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Mit Hilfe der experimentellen Untersuchungen konnte die Einsetzbarkeit eingeklebter Gewindestangen in Buchen-FSH gezeigt und die Klebfugenfestigkeit für Einklebelängen bis 10-d ermittelt werden. Die Bestimmung eines charakteristischen Rechenwertes steht dabei noch aus. Die geringen Streuungen lassen vermuten, dass dieser deutlich oberhalb der zurzeit verwendeten Werte liegen wird. Die nach Z-9.1-791 [8] empfohlenen Randabstände konnten auch für Buchen-FSH bestätigt werden. Kleinere Randabstände erscheinen nur in Bauteilen mit vorhandenen Querlagen möglich. Für eine optimale Ausbildung der Spaltbewehrung sind noch weitere Untersuchungen zur Bestimmung der Spaltkräfte notwendig.

Literatur

- [1] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Nr. Z-9.1-838 vom 21. September 2013: *Furnierschichtholz aus Buche zur Ausbildung stabförmiger und flächiger Tragwerke*. Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin
- [2] Europäische Technische Bewertung ETA-14/0354 vom 20.02.2015: *Brettschichtholz aus Laubholz- Buchenfurnierschichtholz für tragende Zwecke*. Österreichisches Institut für Bautechnik, Wien
- [3] Enders-Comberg M., Frese M.: “Buchenfurnierschichtholz – Leistungsmerkmale, Anwendung und Entwicklungsmöglichkeit”, *Karlsruher Tage 2014 – Holzbau : Forschung für die Praxis*, 09. Oktober – 10. Oktober, 2014, 49 - 65.
- [4] Enders-Comberg M., Frese M., Blaß H. J.: “Buchenfurnierschichtholz für Fachwerkträger und verstärktes Brettschichtholz”, *Bautechnik*, 92 (1), 2015, 9 - 17.
- [5] DIN EN 1995-1-1: *Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1 mit NA (2013): Allgemeines – Allgemeine Regeln für den Hochbau*. DIN-Deutsches Institut für Normung e.V., 2010.
- [6] Steiger R.: “In Brettschichtholz eingeklebte Gewindestangen – Stand des Wissens zu einer leistungsfähigen Verbindungstechnik”, *18. Internationales Holzbau-Forum, Tagungsband*, 2012.
- [7] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Nr. Z-9.1-778 vom 31. Oktober 2012: *2K-EP-Klebstoff GSA-Harz und GSA-Härter für das Einkleben von Stahlstäben in Holzbaustoffe*. Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin
- [8] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Nr. Z-9.1-791 vom 17. Januar 2012: *Verbindungen mit faserparallel in Brettschichtholz eingeklebten Stahlstäben*. Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin
- [9] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Nr. Z-9.1-705 vom 31. April 2014: *2K-EP-Klebstoff WEVO-Spezialharz EP 32 S mit WEVO-Härter B 22 TS zum Einkleben von Stahlstäben in Holzbaustoffe*. Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin