

Elisabet Kuck: Studie zu Normalkräften in auf Abscheren beanspruchten Schrauben

Vortragende:

Kuck, Elisabeth

M.Sc.

Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine
Lehrstuhl Holzbau und Baukonstruktion
Karlsruher Institut für Technologie

elisabet.kuck@kit.edu



- 1993 geboren in Mutlangen
- 2012-2015 B.Sc. Bauingenieurwesen, KIT
- 2015-2016 Techn. Büro, Schaffitzel Holzindustrie GmbH&Co.KG
- 2016-2019 M.Sc. Funktionaler und Konstruktiver Ingenieurbau, KIT
- Seit Nov. 2019 Wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Lehrstuhl Holzbau und Baukonstruktion

Autorin: Elisabeth Kuck

Zusammenfassung

Bei Laubholzverbindungen mit auf Abscheren beanspruchten Verbindungsmitteln kann es zu einem Verbindungsmittelversagen durch Abscheren oder Abreißen kommen. Zur Untersuchung dieses Verbindungsmittelversagens ist die Kenntnis der sich tatsächlich einstellenden Normalkräfte in den Verbindungsmitteln notwendig. Der Beitrag beschreibt die Durchführung von Druck-Scherversuchen an Verbindungen mit ein- und zweischnittig auf Abscheren beanspruchten Schrauben, die jeweils mit einem innenliegenden zylindrischen Dehnmessstreifen versehen sind. Daraus ermittelte Normalkräfte tragen zur Analyse von Schnittgrößeninteraktionen entlang der Verbindungsmittelachse und des Verbindungsmittelversagens durch Beanspruchung auf Abscheren bei.

1. Einleitung

Verbindungen im Holzbau sind Schlüsselpunkte für das Tragverhalten von Konstruktionen. Insbesondere die Verwendung von hochtragfähigen Bauteilen aus Laubhölzern kann jedoch zu Versagensmechanismen führen, die bei Verwendung von Nadelhölzern bisher nicht berücksichtigt wurden [1]. Diese betreffen das Versagen des Verbindungsmittelquerschnitts selbst, z.B. durch Abscheren und/oder Abreißen. Verursacht wird das Versagen durch die erheblich höhere Beanspruchung der Verbindungsmittel in Laubhölzern im Vergleich zu gängigen Nadelhölzern. Problematisch ist diese neue Versagensart, wenn der Verbindungsmittelquerschnitt versagt, bevor die Verbindung die berechnete Tragfähigkeit durch übliche Versagensmechanismen wie Lochleibungsversagen und Ausbildung von Fließgelenken erreicht. Kritisch ist daher ein frühes Versagen bei kleinen Relativverschiebungen, wie bspw. von Meyer [2] beobachtet. Die im Verbindungsmittelquerschnitt wirkenden Schnittgrößen während einer Beanspruchung auf Abscheren, Biegemoment M , Normalkraft N und Querkraft V , überlagern sich und führen zu einer Schnittgrößeninteraktion [1]:

$$\eta = \frac{M}{M_{y,R}} + \left(\frac{N}{F_{\text{tens}}} + \frac{V}{F_{\text{shear}}} \right)^2 \quad (1)$$

Entlang der Verbindungsmittelachse variiert die Interaktionsart (MN , VN , MNV) sowie die Ausnutzung des Verbindungsmittelquerschnitts in Abhängigkeit von Randbedingungen wie Art und Geometrie der Verbindung, Durchmesser, Art und Festigkeit des Verbindungsmittels sowie des

verwendeten Holzes/Holzwerkstoffes. Da die Verläufe von Biegemoment und Querkraft entlang der Verbindungsmittelachse weitestgehend bekannt sind, fehlen für die Anwendbarkeit eines Interaktionskriteriums Kenntnisse über die tatsächlich auftretenden Normalkräfte. Eine Möglichkeit zur Untersuchung der Normalkräfte bietet eine Applikation von Dehnmessstreifen (DMS). Damit sind Normalkräfte aus den aufgenommenen Dehnungen bestimmbar. Eine Dehnungsmessung im Bereich des Verbindungsmittelkerns ermöglicht eine Aufnahme der Längsdehnungen mit geringem Einfluss aus Biegeanteilen. Dazu werden Schrauben mit einer zentralen Bohrung versehen und ein zylindrischer DMS in das Bohrloch eingeklebt. Diese Messschrauben werden in Druck-Scherprüfkörper aus Buchenfurnierschichtholz (Buchen-FSH) eingedreht und ermöglichen damit eine punktuelle Messung der Schraubendehnungen und Berechnung der entstehenden Normalkräfte während der Beanspruchung auf Abscheren. Positioniert sind die DMS in Schraubenabschnitten, die gemäß der sich einstellenden Verformungslinie des Verbindungsmittels annähernd gerade bleiben. Ziel der Untersuchungen ist es einerseits, die Machbarkeit und Anwendbarkeit von in Schrauben eingeklebten DMS zur Ermittlung der Normalkräfte zu beurteilen. Andererseits werden Kenntnisse hinsichtlich der Größenordnung der tatsächlich wirkenden Normalkräfte und der somit auftretenden Schnittgrößeninteraktionen bei Beanspruchung auf Abscheren gewonnen.

2. Material

2.1 Verbindungen mit Schrauben

Die Prüfkörper bestehen aus Buchen-FSH Typ S mit einer mittleren Rohdichte von 810 kg/m^3 (CoV 1,99 %) und einer mittleren Holzfeuchte von 7,70 % (CoV 3,91 %). Einschnittige und zweischnittige Schraubenverbindungen, vgl. **Abb. 1**, sind Bestandteil der Untersuchungen.

Verwendet werden Vollgewindeschrauben mit einem Nenndurchmesser von 8 mm und einer Länge von 180 mm. Die Schraubenlöcher sind jeweils mit $d_{\text{vorbohr}} = 6 \text{ mm}$ vorgebohrt. Zum Einkleben der DMS in die Schrauben wird ein zentrales Loch mit Innendurchmesser $d_i = 2 \text{ mm}$ gebohrt. Die Löcher sind teilweise durch ein Bohrverfahren mit Verwendung von Hartmetallbohrern bis zu einer Tiefe von 26 mm, gemessen von Kopfoberkante aus, angefertigt. Für größere Tiefen ist eine zentrische Lage durch Bohrung jedoch nicht zu gewährleisten. Deswegen sind Schrauben mit tieferliegenden DMS mittels Drahterodierverfahren mit dem zentralen Loch versehen. **Abb. 2** zeigt die unterschiedlichen Schraubenmodifikationen und einen geöffneten erodierten Schraubenabschnitt. Eine punktuelle Kontrolle der zentralen Lage des Loches ergibt an nur wenigen Stellen minimale Abweichungen.

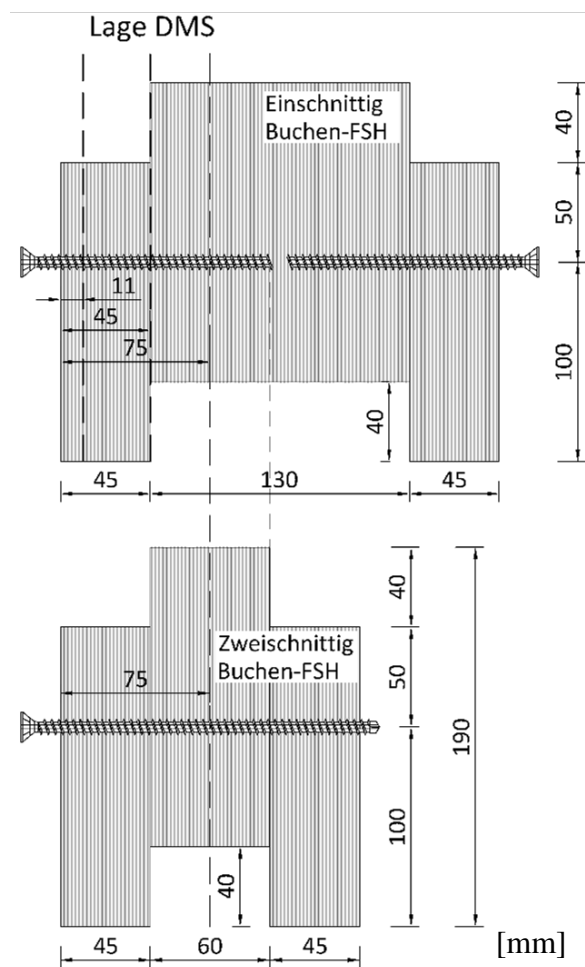


Abb. 1: Druck-Scherprüfkörper.

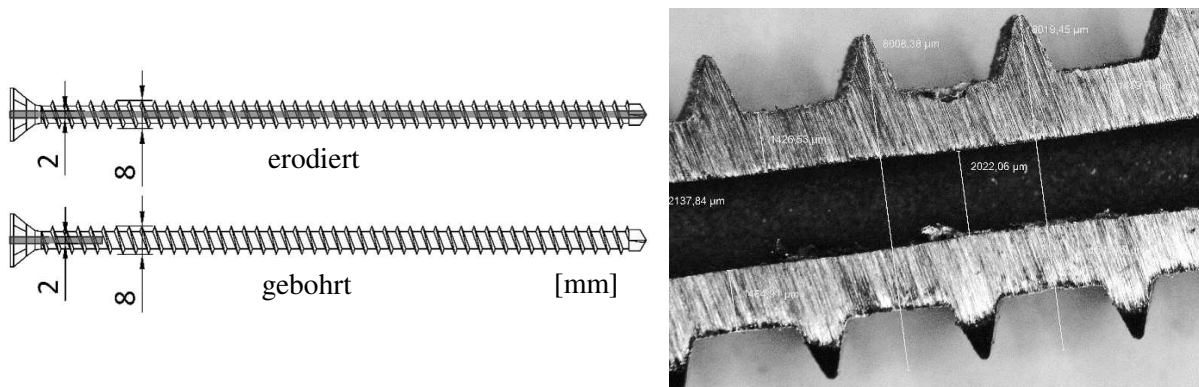


Abb. 2: Schematische Darstellung der Schraubenlöcher links und Detailansicht rechts.

2.2 Dehnmessstreifen

Bei den verwendeten DMS von KYOWA handelt es sich um einachsige Dehnmessgitter, deren Trägerfolie eine zylindrische Form hat. Als Klebstoff für das Einkleben der DMS ist ein Epoxidharz Zweikomponentenklebstoff zu verwenden. Der Durchmesser der zylindrischen DMS beträgt 1,9 mm, siehe **Abb. 3**.

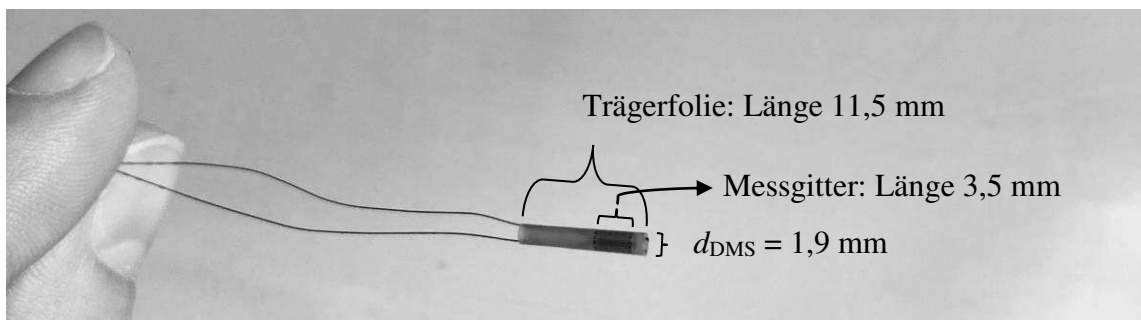


Abb. 3: Verwendete DMS mit Maßangaben.

3. Methode

3.1 Herstellung und Anwendung von Messschrauben

Die Herstellung der Messschrauben umfasst mehrere Schritte und erfordert viel Sorgfalt und Präzision. Die Anfertigung der Schraubenlöcher und deren ausgiebige Säuberung von Schmutz und Öl durch mechanische Reinigung mit Nylondrahtbürsten, Ultraschallbad und Durchspülen mit Aceton stellen die Grundlage für eine funktionierende Verklebung dar. Da die Lage der DMS nur in den gebohrten Schrauben durch Einschieben bis zum Bohrlochgrund vorgegeben ist, werden in die erodierten Schrauben von unten zunächst kurze Kupferdrähte eingelegt. Die DMS werden danach von oben, vom Kopf aus, bis zum Kontakt mit dem Kupferstift eingeschoben, sodass sie in der beabsichtigten Lage positioniert sind. Das Befüllen des Bohrlochs mit Zweikomponentenklebstoff EP-370 erfolgt mittels einer Kanüle, um ein möglichst tiefes Einbringen zu gewährleisten und die Luftbläschenbildung im Klebstoff gering zu halten. Nach Einschieben des DMS folgt die Aushärtung des Klebstoffs. Zur Kontrolle einer funktionierenden und fehlerfreien Verklebung werden alle Messschrauben getestet und kalibriert. Dazu erfolgt eine mehrmalige Belastung der Messschrauben (0,2 kN bis 5 kN Zuglast) mit zwischenzeitlichen Haltezeiten von 30 s. Daraus resultiert für alle hergestellten Messschrauben eine lineare Maschinenlast-Dehnungs-Beziehung, die später zur Berechnung der Normalkräfte aus den Dehnungen zu verwenden ist.

3.2 Versuchsprogramm

Das Versuchsprogramm umfasst acht Druck-Scherprüfungen. Ein Druck-Scherprüfkörper besteht entweder aus zwei einschnittigen oder einer zweischnittigen Verbindung, vgl. **Abb. 1**. Je ein Prüfkörper ist mit ungeschwächten Schrauben als Referenz geprüft. Gemessen werden die Lasten pro Scherfuge durch Aufstellen der beiden Seitenhölzer auf separate Messdosen unten, die Relativverschiebungen in den Scherfugen an vier Stellen mit Wegaufnehmern und die Dehnungen der Schrauben über die eingeklebten DMS. Der Versuchsaufbau ist in **Abb. 4** oben dargestellt. Die Lage des DMS in der Schraube ist mit einem bestimmten Abstand zu den sich (theoretisch) ausbildenden Fließgelenken gewählt, siehe **Abb. 4** unten links. Das Maß zur Lage x des DMS ist definiert als Tiefe ab Prüfkörperoberfläche, siehe **Abb. 4** unten rechts, und bezieht sich stets auf die Mitte des Messgitters. Dabei entspricht die tiefste Lage der einschnittigen Verbindung der Symmetrieachse der zweischnittigen Verbindung, vgl. **Abb. 1**. Die Belastung der Prüfkörper erfolgt in Anlehnung an DIN EN 26891:1991 mit einer Entlastungsschleife. Eine Übersicht der durchgeführten Versuche gibt **Tab. 1**.

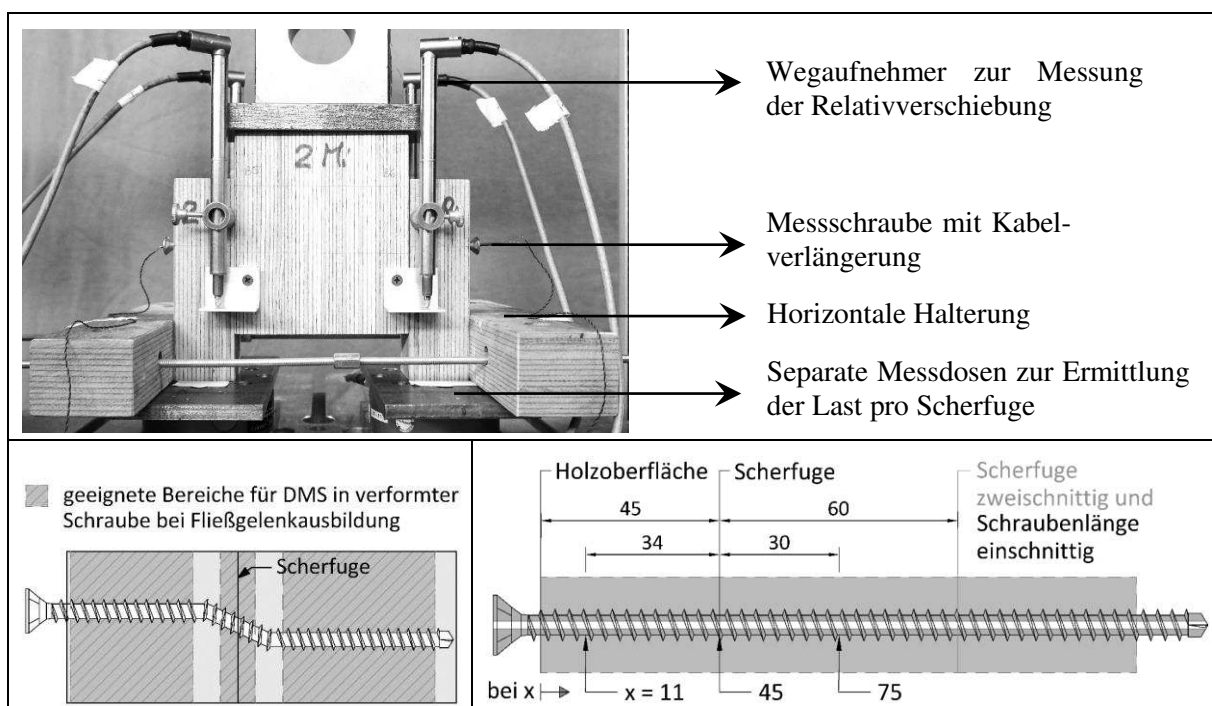


Abb. 4: Oben beispielhafter Versuchsaufbau und unten schematische Darstellung der möglichen Positionierung (links) und gewählten DMS Lagen x (rechts). Maße in mm.

Tab. 1: Versuchsprogramm: Anzahl Schrauben mit einem DMS pro Schraube. Versuchsbezeichnung in Klammer und Bezug Koordinate x in **Abb. 4**.

Verbindungsart*	Lage DMS x			
	Ohne DMS/ Referenz	11 mm	45 mm	75 mm
Einschnittig	2 (E)	4 (E1, E2, E3, E4)	2 (E7, E8)	2 (E5, E6)
Zweischnittig	1 (Z)	-	-	2 (Z1, Z2)

* Ein Prüfkörper beinhaltet entweder eine zweischnittig oder zwei einschnittig beanspruchte Schrauben.

4. Ergebnisse

Übersichten der aufgenommenen und ausgewerteten Ergebnisse sind in **Abb. 5** und **Abb. 6** für einschnittig sowie in **Abb. 7** und **Abb. 8** für zweischnittig beanspruchte Schrauben gezeigt. Für die einschnittige Beanspruchung sind Last-Verschiebungskurven pro Scherfuge (Mittelwert von zwei Wegaufnehmern) und die zugehörige berechnete Normalkraft, die sich an der entsprechenden markierten Stelle (x) einstellt, dargestellt. Für die zweischnittige Beanspruchung ist die Last als Mittelwert beider Scherfugen dargestellt und der DMS stets in der Symmetrieachse angeordnet. Eine Messung der Dehnungen ist für alle Schrauben bis zum Versagen der Verbindung erfolgt.

Die Normalkraft steigt i.d.R. in den Schrauben mit zunehmender Last an und erreicht den maximalen Wert bei der Höchstlast. Ausnahmen davon sind vereinzelt zu Versuchsbeginn der Versuche E2 und E8 in **Abb. 5** zu erkennen. Es treten kurzzeitig Druckkräfte in den Schrauben auf. Das Versagen ist für die gebohrten Schrauben durch das Erreichen der Ausziehtragfähigkeit im Seitenholz gekennzeichnet, vgl. Hineinziehen des Schraubenkopfes in **Abb. 6** links, wohingegen die erodierten Schrauben ein Querschnittsversagen im Bereich der Fließgelenke bei geringeren Relativverschiebungen aufweisen. Anzumerken ist, dass die Anfangssteifigkeiten der Verbindungen vergleichbar sind. Für alle Verbindungen stellt sich der berechnete Versagensmodus mit zwei Fließgelenken pro Scherfuge ein, bevor die Ausziehtragfähigkeit erreicht ist oder ein Schraubenquerschnittsversagen auftritt, siehe **Abb. 6** rechts. Das Schraubenversagen geht mit einem Abreißen der DMS-Anschlussdrähte oder einem Überschreiten der maximal messbaren Dehnungen der DMS einher, wodurch die Messung an diesem Punkt endet.

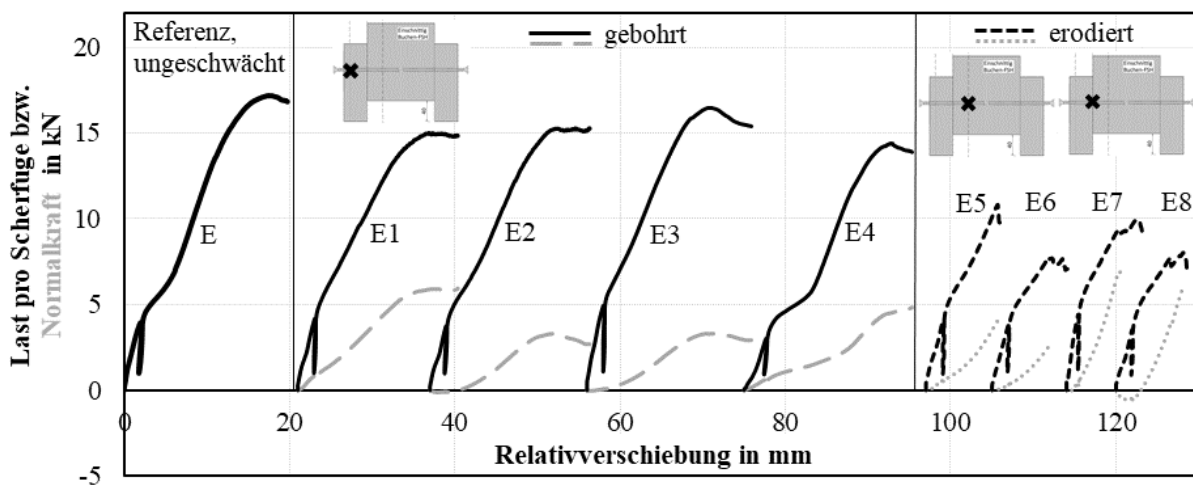


Abb. 5: Ergebnisse einschnittig beanspruchte Schrauben. Last pro Scherfuge in Schwarz, Normalkraft in Grau.

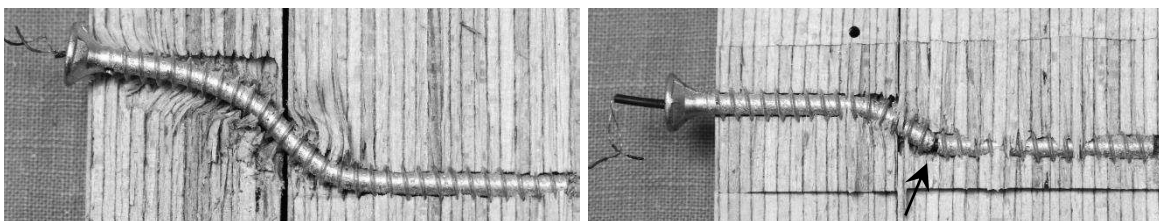


Abb. 6: Geöffnete Prüfkörper mit einschnittig beanspruchten Schrauben. Links gebohrte Schraube, rechts erodierte Schraube mit Riss im Fließgelenk.

Die Ergebnisse der zweischnittig beanspruchten Schrauben sind generell mit den einschnittig beanspruchten vergleichbar, siehe **Abb. 7**. Normalkräfte steigen auf bis zu 7,2 kN in der Symmetrieachse (Versuch Z2), wobei die Tragfähigkeit der Verbindung pro Scherfuge bei 8,1 kN liegt. Auch für diese Lage des DMS sind zu Beginn Stauchungen, also Druckkräfte in der Schraube messbar (Z1). Geöffnete Versagensbilder sind in **Abb. 8** gezeigt..

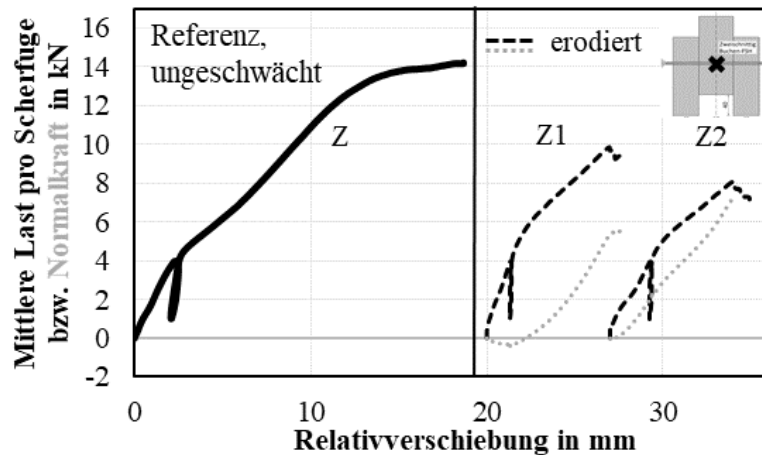


Abb. 7: Ergebnisse zweischnittig beanspruchte Schrauben. Last pro Scherfuge in Schwarz, Normalkraft in Grau.

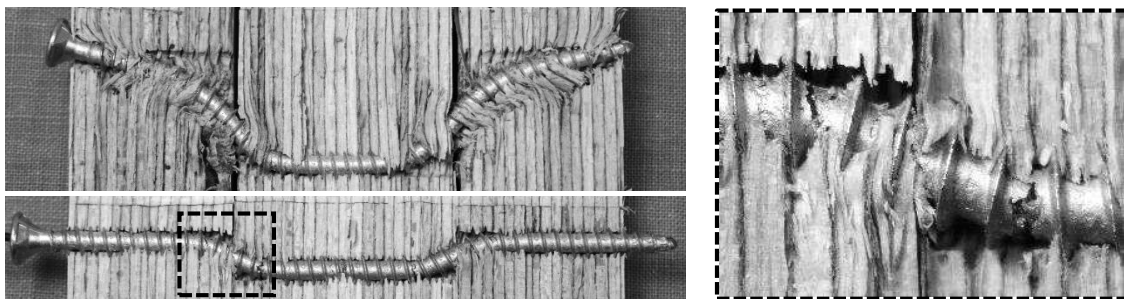


Abb. 8: Geöffnete Prüfkörper mit zweischnittig beanspruchten Schrauben. Links oben: Ungeschwächte Referenzschraube. Links unten und rechts: Versagen des Schraubenquerschnitts einer erodierten Schraube im Fließgelenk.

Die grundsätzlich höchsten Normalkräfte treten für die Positionierung des DMS in der Scherfuge auf, vgl. Versuche E7 und E8 in **Abb. 5**. Im Mittel betragen die maximal ermittelten Normalkräfte dort 7,3 kN zum Versagenszeitpunkt. Die Kurvenverläufe verdeutlichen, dass der zeitliche Verlauf der Normalkraft stark mit der Lage des DMS entlang der Schraube variiert und die stärkste Zunahme der Normalkräfte im Bereich der Scherfuge zu beobachten ist. Die Verläufe und Größenordnung der Normalkräfte sind zwischen ein- und zweischnittiger Beanspruchung nicht vergleichbar. Durch die veränderte Beanspruchungssituation werden für die zweischnittig beanspruchte Schraube für die Lage $x = 75$ mm beim Erreichen der Höchstlast Normalkräfte von im Mittel 6,4 kN statt 3,3 kN (einschnittig) gemessen.

5. Diskussion

Die Beobachtungen und Messungen lassen verschiedene Schlüsse zu. Die Querschnittsschwächung durch das innenliegende Loch von $d_{\text{innen}} = 2$ mm bei einer Schraube mit Nenndurchmesser von 8 mm bedingt erwartungsgemäß ein vorzeitiges Versagen. Die Verbindungen verhalten sich bis zum Erreichen des Querschnittsversagens der geschwächten Schrauben ähnlich und bilden durchweg zwei Fließgelenke pro Scherfuge aus. Unter der Annahme, dass bei einer Biegebeanspruchung zunächst die äußeren Querschnittsbereiche Beanspruchung erfahren, wirkt sich die Schwächung im Bereich der neutralen Faser nur im vollplastischen Zustand aus. Die Querschnittsschwächung kann vereinfacht unter Verwendung eines Kreisprofils rechnerisch berücksichtigt werden. Vergleichsversuche zur Bestimmung des Fließmoments von erodierten Schraubenabschnitten wurden zur Kontrolle herangezogen. Ungeschwächt erreichen die

Schrauben ein M_y gemäß [3] und EN 409:2009 von 25,3 Nm bei einem Biegewinkel von $\alpha = 45/d^{0,7}$ und liegen damit ca. 8% höher als die der geschwächten Schrauben (23,4 Nm), vgl. Materialkennwerte in **Abb. 9** rechts. Zudem versagen die geschwächten Schrauben im Biegeversuch bei Biegewinkeln von 26 – 48°, was überschlägig mit den im Versuch erreichten Biegewinkeln der geöffneten Prüfkörper übereinstimmt.

Leicht geringere Tragfähigkeiten der zweischnittig beanspruchten Schraubenverbindungen sind durch die höheren vorherrschenden Normalkräfte im Bereich des Mittelholzes erklärbar, jedoch sind auch die natürliche Streuung der Holzeigenschaften oder die geringe Versuchsanzahl zu berücksichtigen. Aufgrund der gleichen Geometrie wird angenommen, dass sich für ein- und zweischnittig beanspruchte Schrauben vergleichbare Normalkräfte im Seitenholz einstellen. Im Gegensatz zu einer einschnittigen Beanspruchung, bei der die Normalkraft ihren Höchstwert in der Scherfuge erreicht, nimmt die Normalkraft bei einer zweischnittigen Beanspruchung bis zur Symmetrieachse der Verbindung zu. Somit gilt für eine mögliche Interaktion der Schnittgrößen, dass der Bereich der Schraube im Mittelholz tendenziell gefährdeter ist, frühzeitig, oder zumindest vor dem Schraubenabschnitt im Seitenholz, zu versagen. In den geöffneten Prüfkörpern zeigen alle Schrauben Risse in den Fließgelenken. Diese Hypothese sollte demnach weiter überprüft werden.

Ein qualitativer Verlauf der Schnittgrößen ist in **Abb. 9** gezeigt. Die Stellen basierend auf vereinfachten Annahmen, Moment M im Fließgelenk entspricht Fließmoment M_y und Querkraft V in der Scherfuge entspricht der Tragfähigkeit F_v , sind mit einem Kreuz gekennzeichnet. Untersuchte und gemessene Stellen des Normalkraftverlaufes sind mit Kreisen markiert.

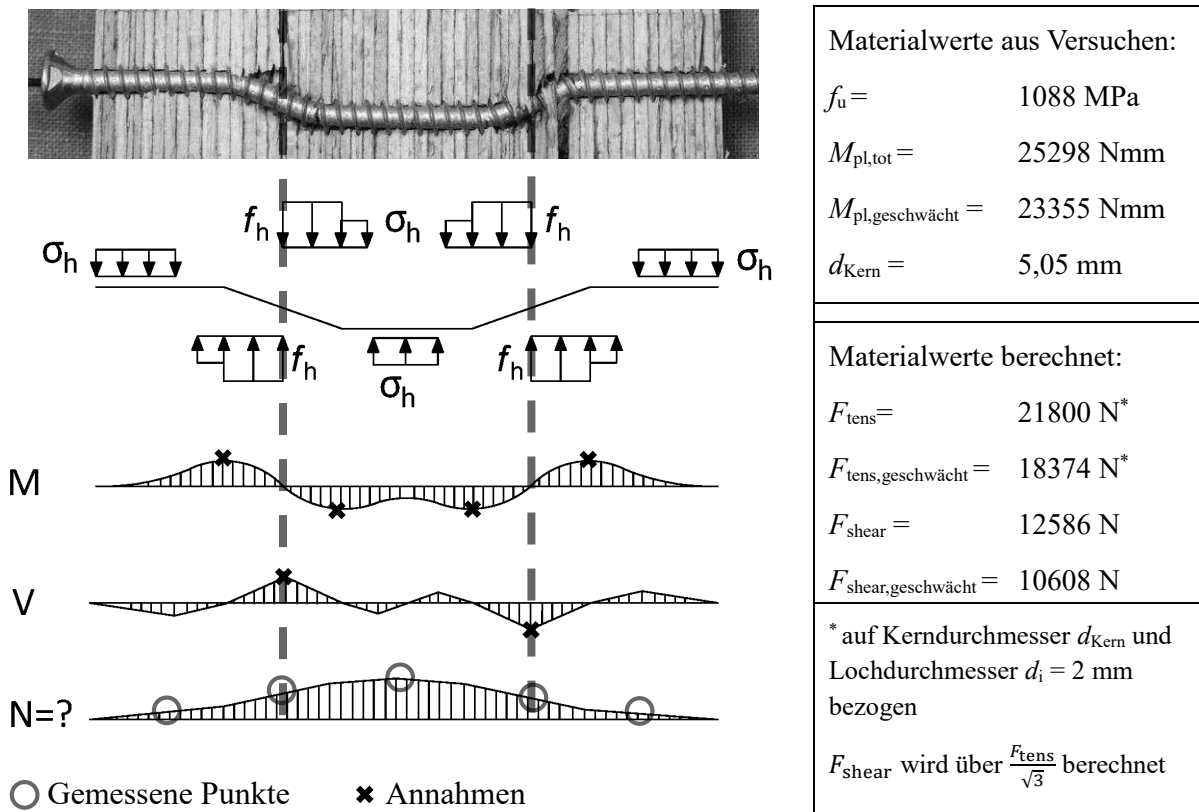


Abb. 9: Qualitative Schnittgrößenverläufe entlang Verbindungsmittelachse bei zweischnittig beanspruchter Schraube und verwendete Materialkennwerte.

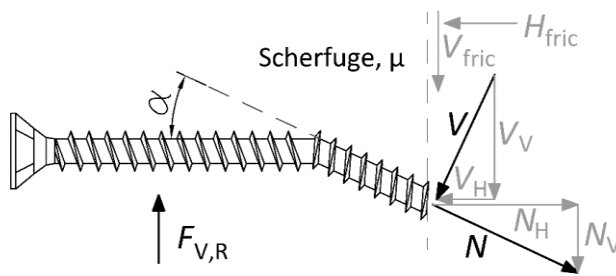


Abb. 10: Schematischer Freischnitt der Schraube in der Scherfuge.

chen und trägt mit dem vertikalen Anteil direkt zur Traglast bei. Auch die Querkraft ist entsprechend ihrer Komponenten aufzuteilen. Im Freischnitt besteht eine Differenz der Horizontalkräfte von V_H und N_H , welche der Anpresskraft der Scherflächen H_{fric} entspricht. Durch Gleichgewichtsbedingungen können die Unbekannten bestimmt werden. Für den Versagenszeitpunkt der Schraube E7 lautet die Interaktionsbedingung in der Scherfuge unter Anwendung von Gleichung (1) und unter der Annahme, dass das Moment M in der Scherfuge Null ist, wie folgt:

$$\eta = \left(\frac{N}{F_{tens}} + \frac{V}{F_{shear}} \right)^2 = \left(\frac{7,1}{18,3} + \frac{5,4}{10,6} \right)^2 = 0,81 \quad (2)$$

Für Schraube E8 ergibt sich entsprechend eine Ausnutzung von $\eta = 0,62$ in der Scherfuge. Eine Ausnutzung $\eta < 1,0$ erscheint plausibel, da beide Schraubenquerschnitte in den Scherfugen intakt bleiben.

6. Fazit

Die Studie bestätigt die Machbarkeit und Anwendbarkeit von in Schrauben eingeklebten DMS bei Beanspruchung auf Abscheren unter gewissen Voraussetzungen. Die Verbindungsmittelart und/oder die in dieser Studie verwendeten Schraubenabmessungen sind zu modifizieren, um die vorliegenden starken Querschnittsschwächungen geringer zu halten und eine Übertragung der Ergebnisse auf andere Verbindungen zu ermöglichen. Kenntnisse zu den lokal auftretenden Normalkräften in Schrauben und zum Einfluss der Normalkraft auf ein Verbindungsmittelversagen wurden gesammelt. Die Größenordnung der in dieser Studie gemessenen Normalkräfte erscheint plausibel, muss jedoch überprüft und validiert werden. Unklar bleibt, wie groß die Einflüsse der auftretenden Schubspannungen und einer leicht exzentrischen Lage des DMS im Verbindungsmittel sind. Eine Überprüfung von auftretender Exzentrizität ist empfohlen und sollte ggf. berücksichtigt werden.

Literatur

- [1] BLAß, H. J.: *Moment-Normalkraft-Querkraft Interaktion in stiftförmigen Verbindungsmitteln von Stahlblech-Holz-Verbindungen*. Karlsruher Tage - HOLZBAU - Forschung für die Praxis, Tagungsband 2018.
- [2] MEYER, N.: *Tragfähigkeit mechanischer und geklebter Verbindungsmittel in Buchenfurnierschichtholz*. Dissertation, KIT, 2020.
- [3] EAD 130118-01-0603: *Screws and threaded rods for use in timber constructions*. EOTA, February 2019.