

# **Spaltverhalten und Verstärkungs- maßnahmen von Anschlüssen mit axial beanspruchten Gewindestangen**

Splitting behavior and reinforcement for connections  
using axially loaded threaded rods

Formation d'entailles et renforcement des raccords de  
tiges filetées à sollicitation axiale

Markus Enders-Comberg  
Holzbau und Baukonstruktionen  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
DE-Karlsruhe





# Spaltverhalten und Verstärkungsmaßnahmen von Anschlüssen mit axial beanspruchten Gewindestangen

## 1. Einleitung

Gewindestangen sind im Ingenieurholzbau weit verbreitet. Sowohl in vorgebohrte Bauteile eingedrehte Gewindestangen mit Holzschraubengewinde [1] als auch eingeklebte Stangen mit metrischem Gewinde kommen in stabförmigen Bauteilen zum Einsatz. Insbesondere auf Zug beanspruchte Stäbe in beispielsweise Fachwerkträgern sind prädestiniert für den Einsatz von Gewindestangen. Stabparallel eingebrachte Stangen ermöglichen schlanke Bauteile bei einer geringen Verbindungsmittelanzahl. Die innenliegenden Verbindungen sind vor einem direkten Abbrand geschützt und gleichzeitig ästhetisch ansprechend. Neben einer Vielzahl an positiven Aspekten sind auch Schwierigkeiten zu nennen, welche gegen eine Verwendung von axial beanspruchten Gewindestangen in Holzbauwerken sprechen könnten. Die hohen Zugtragfähigkeiten der Gewindestangen erfordern große Einbindelängen und damit verbunden Tiefenbohrungen von über 500 mm. Diese Tiefenbohrungen parallel zur Stabachse, welche nur geringe Toleranzen aufweisen dürfen, stellen eine große Herausforderung für den Abbund dar. In einem Fachwerk wird zusätzlich zur Einbindelänge des Zugstabes auch eine Verankerung im Gurtbauteil benötigt. Somit muss das Eindrehen der Gewindestange in Gurt und Zugstab in einem Arbeitsschritt erfolgen. Hierbei darf der Eindrehwiderstand und die zum Eindrehen benötigte Zeit nicht unterschätzt werden. Im Gegensatz dazu erfordert ein Verkleben der Gewindestange eine Aushärtezeit und ist nur von zertifizierten Unternehmen auszuführen. Eine Herstellung auf der Baustelle bedarf eines definierten Umgebungsklimas und eines sorgfältigen Verklebungsprozesses.

Die Tragfähigkeit der axial beanspruchten Gewindestangen wird meist durch ein sprödes Aufspalten der Stabenden der Holzbauteile begrenzt. Die Gefahr des Aufspaltens wird bei Verwendung von Brettsperrholz durch Einbringen von Vollgewindeschrauben im Bereich der Stabenden rechtwinklig zur Stablängsachse minimiert. Versuchsergebnisse von Verbindungen mit eingedrehten und eingeklebten Gewindestangen unter Berücksichtigung verschiedener Aufbauten und Querbewehrungen werden im vorliegenden Beitrag vorgestellt. Eine Vorhersage der auftretenden Querkzugkräfte und die Validierung einer Verstärkung wurden ebenfalls innerhalb dieser Forschungsarbeit angestrebt. Aufbauend auf dem vor zwei Jahren vorgestellten Tagungsbeitrag „Axial beanspruchte Gewindestangen in Brettsperrholz“ [2] sollen die Ergebnisse der hier vorgestellten Untersuchungen des Spaltverhaltens den baupraktischen Einsatz solcher Verbindungen begünstigen.

## 2. Experimentelle Untersuchungen

### 2.1. Allgemein

In diesem Kapitel soll die tragfähigkeitsmindernde Wirkung des Spaltens bei einer axial wirkenden Zugkraft anhand experimenteller Untersuchungen von Verbindungen mit eingedrehten und eingeklebten Gewindestangen aufgezeigt werden. Dass der Versagensmechanismus Spalten maßgeblich die Tragfähigkeit beeinflusst, ist bereits vor der Versuchsdurchführung bekannt. Ihm soll mit Hilfe von unterschiedlichen konstruktiven Lösungsansätzen entgegen gewirkt werden. Die Möglichkeiten und deren Effizienz sind im Folgenden dargestellt.

### 2.2. Eindrehte Gewindestangen

Frühere Untersuchungen (vgl. [3] und [4]) haben gezeigt, dass eine Spaltbewehrung am Zugstabende von zur Stabachse parallel eingedrehten Gewindestangen erforderlich ist, um ein frühzeitiges sprödes Spaltversagen zu verhindern. Die für diese Verbindungsmöglichkeit erforderliche Querlage mit einem ausreichend großen Anteil durchgängiger Holzfasern (vgl. [2]) im mittleren Bereich des Zugstabes schließt ein Aufspalten der Längslagen aus. Ein Aufspalten der Querlage auf Grund der Querkzugkräfte kann lediglich parallel

zur Faserrichtung, von der Gewindestange ausgehend, erfolgen. Dieses Versagen wird durch das Einbringen mehrerer Vollgewindeschrauben im Bereich der Zugstabenden erfolgreich behindert (vgl. Abbildung 1).



Abbildung 1: Querzugbewehrung

Experimentelle Untersuchungen zeigten, dass eine Verstärkung über die gesamte Einschraubtiefe der Gewindestange, wie in Abbildung 2 dargestellt, keinen tragfähigkeitssteigernden Effekt zur Folge hatte.

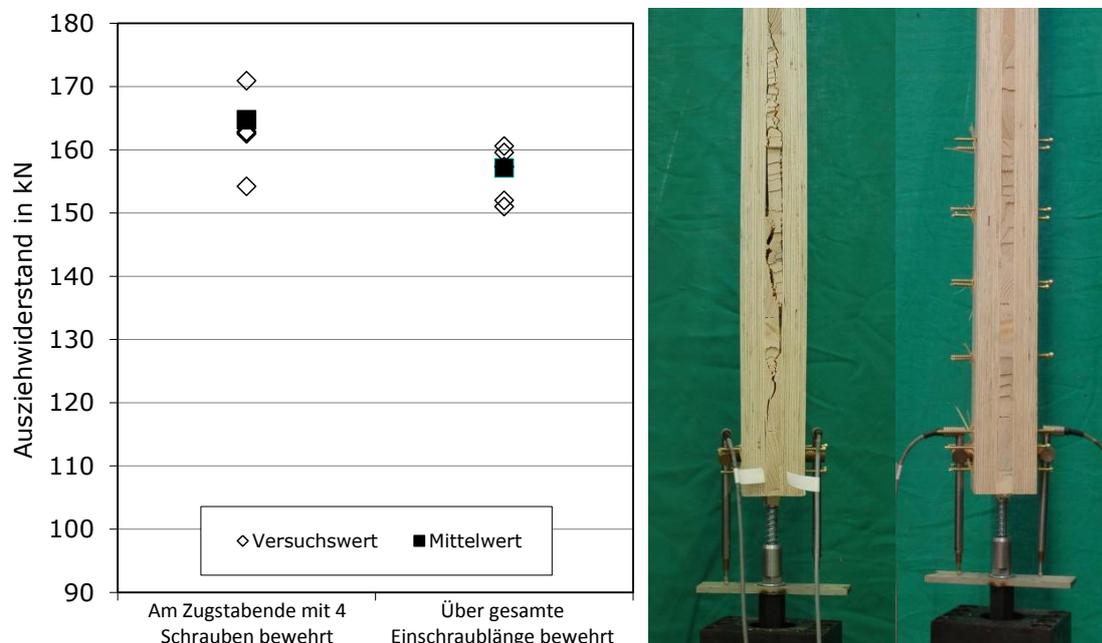


Abbildung 2: Auszieh Widerstand einer eingedrehten Gewindestange  $\varnothing 20$  mm [5] mit einer Verankerungslänge  $L = 600$  mm (links); Versagen eines mit 4 Schrauben am Zugstabende versehenen Prüfkörpers (Mitte); Versagen eines mit 14 Schrauben über die gesamte Einschraublänge der Gewindestange versehenen Prüfkörpers (rechts)

Der Holzwerkstoff Buchenfurnierschichtholz ermöglicht weitere Betrachtungen von Querschnitten mit einem aufgelösten oder kompakten Querlagenteil mit einer damit einhergehenden Optimierung des Längslagenanteils des Zugstabquerschnitts, vgl. Abbildung 3. Es wurden insgesamt 10 Prüfkörper aus Querschnitten mit kompakten Querlagen (Reihe 1 und 2) und 5 Prüfkörper aus Querschnitten mit aufgelöstem Querlagenbereich (Reihe 3), aus vier einzelnen Furnierlagen bestehend, geprüft. Als Verbindungsmittel wurden Gewindestangen SFS WB  $\varnothing 16$  mm [5] mit Holzschraubengewinde verwendet. Diese wurden an beiden Enden der symmetrischen Prüfkörper ( $L/B/H = \sim 1300/64/60$  mm) in ein vorgebohrtes Loch ( $\varnothing 13$  mm) im Bereich der Querlage eingeschraubt ( $L_{ef} = 200$  mm bei Reihe 1 und 3 bzw. 300 mm bei Reihe 2). Ihr Randabstand in Faserrichtung der Querlage beträgt  $2 \cdot d$ ; die Breite des Prüfkörpers ergibt sich somit zu  $4 \cdot d = 64$  mm. Als Querzugverstärkung wurden an den Prüfkörperenden jeweils vier Vollgewindeschrauben  $\varnothing 6$  mm in vorgebohrte Löcher  $\varnothing 4$  mm eingebracht.

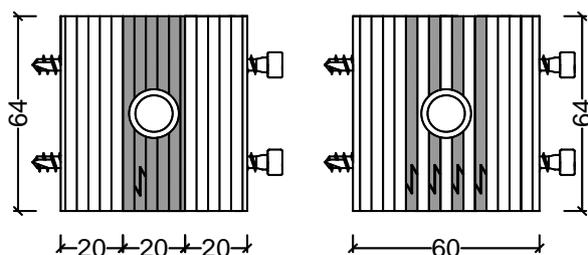


Abbildung 3: Prüfkörperquerschnitte mit eingedrehten Gewindestangen  $\varnothing 16$  mm: Reihen 1 und 2 mit kompakten (links) und Querschnitte der Reihe 3 mit aufgelösten Querlagen (rechts); Maße in mm

Tabelle 1 enthält die Ergebnisse der Versuche mit Buchenfurnierschichtholz. Es sind die mittlere Höchstlast  $F_{max}$ , der Ausziehparameter mit  $f_{ax} = F_{max}/(d \cdot L_{ef})$  und die Versagensursache angegeben. Der Ausziehparameter bei Anschlüssen mit einer Einschraubtiefe von 200 mm beträgt  $f_{ax} \approx 29$  N/mm<sup>2</sup>. Bei Prüfkörpern mit reinem Stahlversagen der Gewindestangen – Einschraubtiefe 300 mm – erfolgt keine Berechnung des Ausziehparameters. Ähnliche Versuche mit Prüfkörpern aus Nadelholz sind der Literatur [4] zu entnehmen. Die hier verwendeten Verstärkungsmaßnahmen waren ausreichend, um ein Versagen hervorzurufen, welches nicht durch ein Aufspalten der Zugstabenden initiiert wurde.

Tabelle 1: Ergebnisse der faserparallel eingedrehten Gewindestangen  $\varnothing 16$  mm in Buchenfurnierschichtholz – Mittelwerte (Variationskoeffizient)

Reihe	N	$L_{ad}$ in mm	Einzelne Querlagen	$F_{max}$ in kN	$f_{ax}$ in N/mm <sup>2</sup>	Versagen
1	5	200	Nein	95 (5,3 %)	29,6	R & S
2	5	300	Nein	99 (3,3 %)	–	S
3	5	200	Ja	92 (2,2 %)	28,8	H

R .. Rollschubversagen im Übergang von Querlage zu Längslagen

S .. Zugversagen Stahl

H .. Herausziehen der Gewindestange und Holzversagen in der Mantelfläche und zusätzliches Aufspalten

### 2.3. Eingeklebte Gewindestangen

Anschlüsse mit faserparallel eingeklebten Gewindestäben sind in Deutschland normativ geregelt. Dabei sind Randbedingungen vorgegeben, welche gewisse Mindestabstände der Stäbe untereinander sowie zum Bauteilrand fordern. Die Wirtschaftlichkeit solcher Anschlüsse kann durch eine Verringerung der Abstände der Gewindestäbe optimiert werden, was allerdings die Gefahr des Spaltens erhöht. Um ein frühzeitiges Aufspalten der Zugstabenden hinauszuzögern, wurden Maßnahmen (Zurückversetzen der Klebefuge, Anordnen von Querlagen und Vollgewindeschrauben) getroffen und experimentell untersucht.

### 2.4. Brettschichtholz aus Fichte

Die Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine hat für die Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V. Prüfungen von Verbindungen mit faserparallel eingeklebten Gewindestäben in Brettschichtholz (GL 24h) durchgeführt und. Dabei wurde neben einer Verringerung der Verbindungsmittelabstände auch der Einfluss eines vom Hirnholz zurückversetzten Endes der Klebefuge auf die Tragfähigkeit einer Verbindung untersucht. Die wichtigsten Erkenntnisse und Ergebnisse des Prüfberichts[6] sind nachfolgend aufgeführt. Stabförmige Prüfkörper aus Brettschichtholz der Festigkeitsklasse GL 24h wurden verwendet. Als Verbindungsmittel wurden Gewindestäbe M16 der Festigkeit 8.8 eingesetzt. Für die Verklebung wurde der Klebstoff „WEVO Spezialharz EP20/VP1 mit WEVO Härter B20/1“ [7] verwendet. Geprüft wurden zugbeanspruchte Verbindungen mit einem faserparallel eingeklebten Gewindestab. Der Aufbau der Prüfkörper ist in Abbildung 4 dargestellt. Variiert wurden die Einklebelänge der Gewindestäbe  $L_{ad}$  ( $10 \cdot d$  und  $15 \cdot d$ ) sowie die Stabbreite  $a$  ( $5 \cdot d$  und  $3,5 \cdot d$ ). Des Weiteren wurden Verbindungen mit einem zurückversetzten Ende der Klebefuge zum Hirnholz untersucht. Die Länge des zurückversetzten Klebefugenendes betrug  $L_V = 4 \cdot d = 64$  mm. Die Holzfeuchte der Prüfkörper lag bei etwa 10 %.

Die Ergebnisse der Prüfungen sind in Tabelle 2 dargestellt. Es ist das arithmetische Mittel und der Variationskoeffizient der jeweiligen Versuchsreihe aus fünf symmetrisch aufgebauten Einzelversuchen angegeben. Neben dem Ausziehwiderstand  $F_{max}$  ist auch der Wert der Klebefugenfestigkeit  $f_{k1} = F_{max}/(\pi \cdot d \cdot L_{ef})$  angegeben.

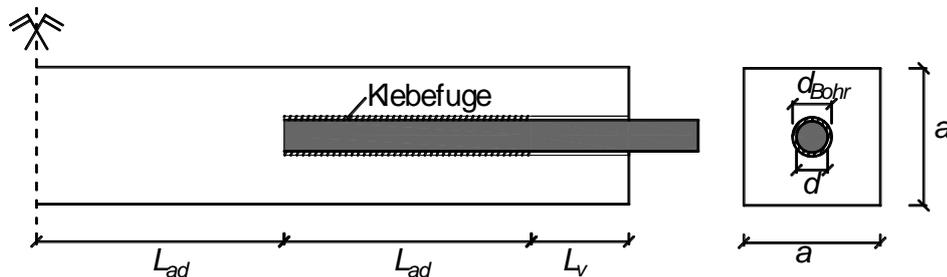


Abbildung 4: Aufbau Prüfkörper mit eingeklebter Gewindestange in Brettschichtholz aus Fichte

Tabelle 2: Ergebnisse der faserparallel eingeklebten Gewindestangen (M16;  $d = 16$  mm und  $d_{Bohr} = 20$  mm) in BSH (GL 24h) – Mittelwerte (Variationskoeffizient)

N	$a$ in mm	$L_{ad}$ in mm	$L_v$ in mm	$F_{max}$ in kN	$f_{k1}$ in N/mm <sup>2</sup>	Versagen
5	$5 \cdot d$	$10 \cdot d$	-	52 (4,5 %)	6,47	Sp
5	$5 \cdot d$	$15 \cdot d$	-	68 (12,2 %)	5,63	Sp
5	$3,5 \cdot d$	$10 \cdot d$	-	52 (5,9 %)	6,44	Sp
5	$3,5 \cdot d$	$15 \cdot d$	-	61 (6,3 %)	5,06	Sp&Zn
5	$3,5 \cdot d$	$10 \cdot d$	$4 \cdot d$	65 (7,8 %)	8,11	Sp&Zn
5	$3,5 \cdot d$	$15 \cdot d$	$4 \cdot d$	74 (10,2 %)	6,16	Sp&Zn

Sp .. Aufspalten am Zugstabende

Zn .. Zugversagen des Holzes im Nettoquerschnitt

In Tabelle 2 ist außerdem für jede Prüfreihe die Ursache des Versagens angegeben. Es wird deutlich, dass für Zugstäbe mit einer Breite  $a = 5 \cdot d$  immer ein Aufspalten der Enden maßgebend ist und das schlagartige Versagen einleitet. Bei den kleineren Holzstabquerschnitten wurde insbesondere bei den Prüfkörpern mit zurückversetzter Klebefuge ein Zugversagen des Holzes im Nettoquerschnitt festgestellt. Das Zurücksetzen der Klebefuge reduziert somit die Gefahr des Aufspaltens und erhöht geringfügig die Tragfähigkeit. Die Länge  $L_v$  könnte jedoch ebenfalls durch Verklebung zur Kraftübertragung zur Verfügung stehen und einen größeren Vorteil als das Zurücksetzen der Klebefuge bewirken.

## 2.5. Furnierschichtholz aus Buche

Versuche von Verbindungen mit faserparallel eingeklebten Gewindestäben in Buchenfurnierschichtholz wurden in einer früheren Versuchsreihe am Karlsruher Institut für Technologie durchgeführt und ausgewertet [8]. Neben Furnierschichtholz ohne Querlagen wurden auch Versuche mit eingeklebten Gewindestangen in Buchenfurnierschichtholz mit vier Querlagen und zusätzlicher Quersugbewehrung im Verbindungsmittelbereich mittels Vollgewindeschrauben durchgeführt. Die zwei betrachteten Querschnitte sind in Abbildung 5 dargestellt.

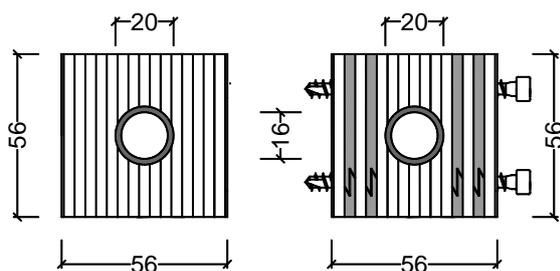


Abbildung 5: Prüfkörperquerschnitte mit eingeklebten Gewindestangen: ohne (links) und mit Bewehrung (rechts); Maße in mm

Als Verbindungsmittel wurden ebenfalls Gewindestäbe M16 (Außendurchmesser  $d = 16$  mm) der Festigkeit 8.8 und für die Verklebung wurde der Klebstoff nach [7] verwendet. Als Querbewehrung der Versuchskörperenden der Versuchsreihe mit Querlagen wurden zusätzlich je Verbindung vier Vollgewindeschrauben  $\varnothing 6$  mm zur Querkzugverstärkung in  $\varnothing 4$  mm vorgebohrte Löcher eingebracht. Die Ergebnisse der zehn Versuche – durch den symmetrischen Aufbau insgesamt 20 Verbindungen – sind in der nachfolgenden Tabelle 3 angegeben.

Tabelle 3: Ergebnisse der faserparallel eingeklebten Gewindestangen (M16;  $d = 16$  mm und  $d_{Bohr} = 20$  mm) in Buchenfurnierschichtholz – Mittelwerte (Variationskoeffizient)

N	$a$ in mm	$L_{ad}$ in mm	Verstärkung	$F_{max}$ in kN	$f_{k1}$ in N/mm <sup>2</sup>	Versagen
5	3,5·d	10·d	Nein	71 (8,9 %)	8,85	Sp
5	3,5·d	10·d	Ja	98 (2,5 %)	12,2	Sp&S

Sp .. Aufspalten am Zugstabende

S .. Scherversagen im Bereich der Verklebung entlang des Stabes

Die Versagensformen sind in Abbildung 6 dargestellt: unverstärkte Querschnitte zeigen ein ausgeprägtes Spalten, bei verstärkten verlagert sich bei einer zugleich um etwa 40 % höheren mittleren Tragfähigkeit das Versagen in die Klebefuge zwischen Stange und Bohrlochwandung. Dass die Querlagen zu einer um 20 % geringeren Stabtragfähigkeit im Vergleich mit dem unverstärkten Querschnitt führen, ist angesichts der für die Bemessung relevanten Anschlüsse statisch nicht von Nachteil.



Abbildung 6: Aufspalten eines Querschnitts ohne Querbewehrung (links) und behindertes Aufspalten eines Querschnitts mit Querbewehrung beim Scherversagen der Klebefuge (rechts)

### 3. Spaltkraft bei eingedrehten Gewindestangen

#### 3.1. Allgemein

Die in Kapitel 2 dargestellten Versuche haben gezeigt, dass das Spaltbild von Prüfkörpern ohne Querlage(n) und ohne Spaltbewehrung unregelmäßig ist und die Risse nicht geordnet verlaufen. Bei Holzwerkstoffen mit mindestens einer Querlage hingegen wird das Spalten in einer Richtung behindert. Es kann davon ausgegangen werden, dass das Abstützen des Gewindes auf der Holzmatrix der Querlage sowie der Kraftübergang von Gewindestange ins Holz eine Spaltkraftverursacht, die rechtwinklig zur Faserrichtung der Querlage ein Aufspalten hervorrufen kann. Eine quantitative Abschätzung dieser Spaltkraft im Verhältnis zur axialen Kraft der Gewindestange erfolgt mit Hilfe eines mechanischen Modells, welches im folgenden Kapitel 3.2 dargestellt ist. Mit Messschrauben soll zusätzlich die zu erwartende Kraft experimentell abgesichert werden. Auf eine Abschätzung der Spaltkraft von eingeklebten Gewindestangen wird in diesem Beitrag verzichtet, da eine Validierung mittels Spaltkraftversuchen, wie es in Kapitel 3.3 gezeigt wird, nicht möglich ist.

Die durch Quellverformungen der Längslagen hervorgerufenen Spaltkräfte sollen in dem vorliegenden Beitrag nicht näher betrachtet werden (siehe hierzu [2]). Es wird davon ausgegangen, dass die in der Querlage verbleibenden durchgängigen Holzfasern mögliche Spannungen, die aus Holzfeuchteänderungen resultieren, aufnehmen und diese durch Relaxation reduziert werden.

Die nachfolgenden Betrachtungen berücksichtigen ausschließlich die durch die axiale Beanspruchung einer eingedrehten Gewindestange resultierenden Querspannungen im Bereich der Querlage.

### 3.2. Mechanisches Modell zur Bestimmung der Spaltkraft

Um quantitativ abschätzen zu können, wie groß die resultierende Spaltkraft im Vergleich zur aufgetragenen axialen Kraft der Gewindestange ist, soll zuerst ein zweidimensionales Modell betrachtet werden. Hierbei wird nur eine Gewindeflanke betrachtet und die horizontale Kraft bestimmt, welche benötigt wird, um ein „Herausrutschen des Keils“ zu verhindern. Diese Kraft entspricht dem Spaltanteil einer axialen Beanspruchung einer eingedrehten Gewindestange. Für das 2D-Modell sind bestimmte Annahmen zu treffen, vgl. Abbildung 7:

- Das zweidimensionale Modell geht von einer idealisierten Gewindeflanke, die in das angrenzende Holz hineinragt, aus.
- Das Holz „drückt“ sich rechtwinklig zur Ausrichtung der Kontaktfläche mit der Kraft  $N$ .
- Die Reibungskraft  $H$  wirkt einem Abrutschen in der Kontaktfuge entgegen.
- Die Spaltkraft  $X$  wird horizontal wirkend angenommen.

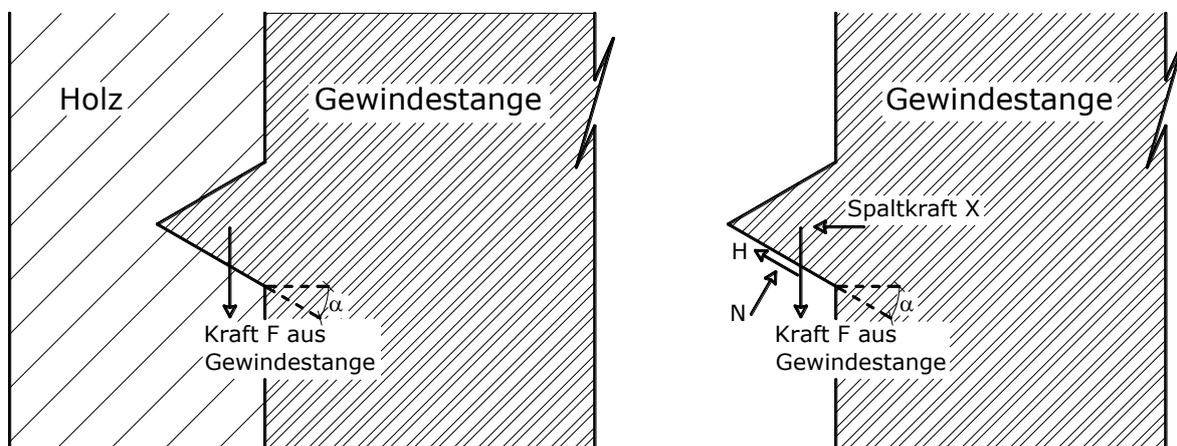


Abbildung 7: Modellannahme 2D mit den auf die Gewindeflanke wirkenden Kräften

Aus den Gleichgewichtsbedingungen in Richtung der Kontaktfuge

$$\cos\alpha \cdot X - \sin\alpha \cdot F + H = 0 \quad \rightarrow \quad H = \sin\alpha \cdot F - \cos\alpha \cdot X$$

und rechtwinklig zur Kontaktfuge

$$N - \cos\alpha \cdot F - \sin\alpha \cdot X = 0 \quad \rightarrow \quad N = \cos\alpha \cdot F + \sin\alpha \cdot X$$

und der Haftbedingung  $H = \mu_0 \cdot N$  folgt

$$\sin\alpha \cdot F - \cos\alpha \cdot X = \mu_0 \cdot (\cos\alpha \cdot F + \sin\alpha \cdot X) \quad \rightarrow \quad X = F \cdot \frac{(\sin\alpha - \mu_0 \cdot \cos\alpha)}{(\cos\alpha + \mu_0 \cdot \sin\alpha)}$$

Für die hier gewählte Gewindestange SFS WB Ø 16 mm [5] mit einem Flankenwinkel von  $\alpha = 30^\circ$  und einem frei gewählten Reibbeiwert von  $\mu_0 = 0,3$  gilt:

$$\rightarrow \text{Spaltkraft } X = F \cdot 0,24$$

Unter den hier getroffenen Annahmen für ein zweidimensionales Modell Abbildung 7, welches eine Gewindeflanke mit einem Flankenwinkel  $\alpha = 30^\circ$  darstellt, treten rund 24 % der axialen Kraft in der Gewindestange als Spaltkraft auf.

Auf den dreidimensionalen Fall übertragen bedeutet dies, dass die Summe aller in radialer Richtung verlaufender Spaltkräfte 0,24-mal der axialen Gewindestangenkraft ist. Durch die Verwendung eines Brettsperrholzprodukts verursacht nicht die gesamte Summe der Quer-

zugkräfte ein Spalten, sondern lediglich der Teil, der rechtwinklig zur Faserrichtung der Querlage wirkt. Somit kann unter der folgenden Annahme das Modell auf den 3D-Fall erweitert werden.

- Die Hälfte aller rechtwinklig zur Stablängsachse wirkenden Spannungskomponenten ( $\equiv$  Radialkräfte) ist für das Spalten in der Querlage verantwortlich. Die andere Hälfte wird von den vorhandenen Fasern in  $||$ -Richtung (vgl. Abbildung 8) aufgenommen.

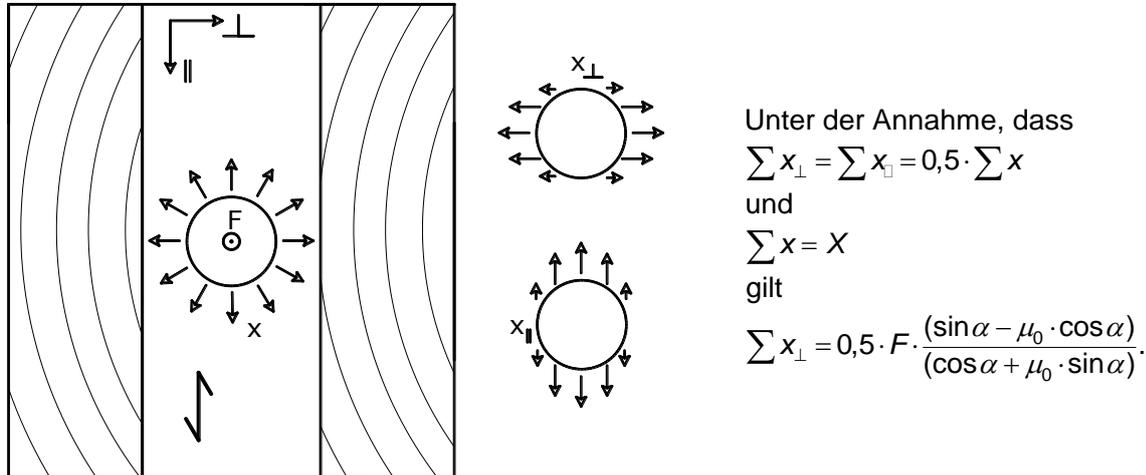


Abbildung 8: Modellannahme 3D

Für die hier gewählte Gewindestange SFS WB  $\varnothing$  16 mm [5] und einem Reibbeiwert von  $\mu_0 = 0,3$  gilt für die Spaltkraft  $F_{\text{Spalten},\perp,V}$  rechtwinklig zur Faserrichtung der Querlage:

$$\rightarrow \sum x_{\perp} = F_{\text{Spalten},\perp,V} = 0,12 \cdot F$$

Ein zusätzlicher Spaltkraftanteil, der bisher noch nicht berücksichtigt wurde, lässt sich möglicherweise mit dem Moment in Folge der Anschluss exzentrizität erklären. Nach aktueller Bemessungsnorm darf diese Exzentrizität beim Nachweis der Tragfähigkeit der einseitig beanspruchte Bauteile in symmetrisch ausgeführten Zugverbindungen vereinfacht durch die Verminderung des Bemessungswertes der Zugtragfähigkeit um ein Drittel berücksichtigt werden (vgl. [9]). Weiterführende Untersuchungen dieser Zusatzbeanspruchung hat Steck [10] für gängige Zuganschlussmöglichkeiten veröffentlicht und diese dienen hier als Grundlage für eine Erweiterung des mechanischen Modells.

Abbildung 9 verdeutlicht die im Folgenden getroffenen Annahmen. Dem Moment  $M_{\text{actio}}$  in Folge der Anschluss exzentrizität  $e$  wirkt ein Moment  $M_{\text{reactio}}$  entgegen, welches sich aus den wirkenden Kräften rechtwinklig zur Stabachse ergibt. Hierfür wird vereinfacht angenommen, dass nur im äußeren Bereich die Zugkraft ( $\equiv$  Spaltkraft  $F_{\text{Spalten},\perp,M}$ ) aufgenommen wird und die Verteilung der Kontaktdruckkraft dreiecksförmig über die Länge  $L/2$  wirkt.

$$M_{\text{actio}} = \frac{F}{4} \cdot e \quad \text{und} \quad M_{\text{reactio}} = F_{\text{Spalten},\perp,M} \cdot b$$

Gilt sowohl für die obere als auch für die untere Längslage.

$$\rightarrow F_{\text{Spalten},\perp,M} = 2 \cdot \frac{F}{4} \cdot \frac{e}{b}$$

$$\text{mit } e = 0,5 \cdot (h_L + h_Q - d) \quad \text{und} \quad b = \frac{5}{6} \cdot L - a$$

Hierbei ist die Variable  $a$  der Abstand der Spaltbewehrung zum Zugstabende.

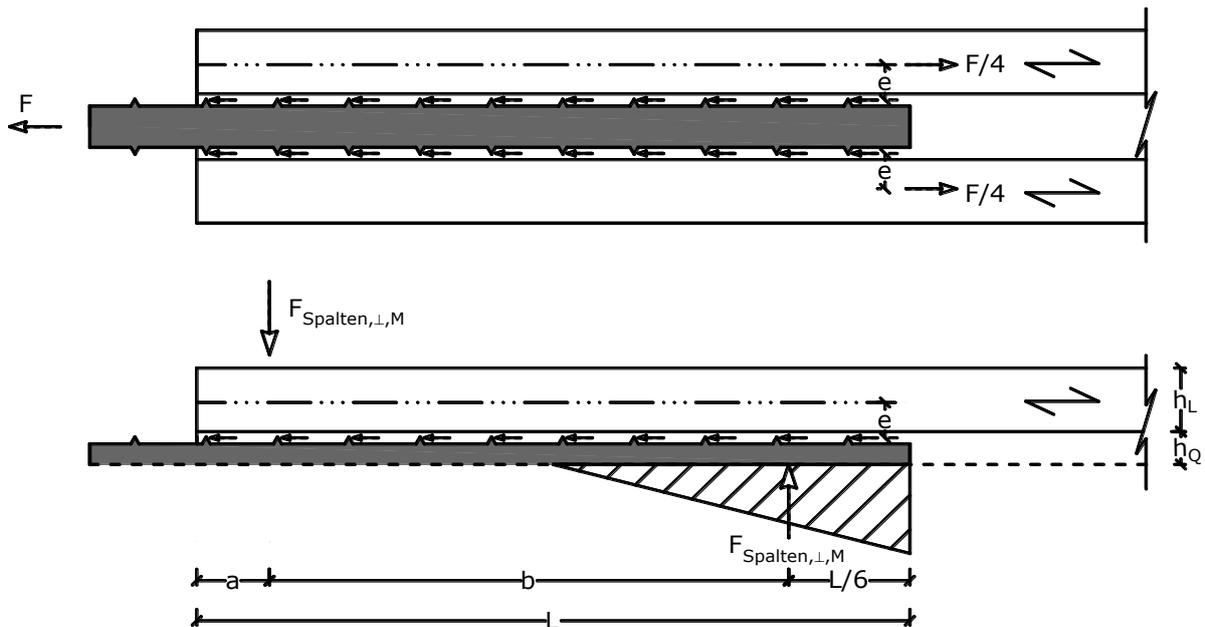


Abbildung 9: Anschlussexzentrizität

Die aus den obigen Überlegungen resultierenden idealisierten Spannungsverläufe sind in Abbildung 10 dargestellt.

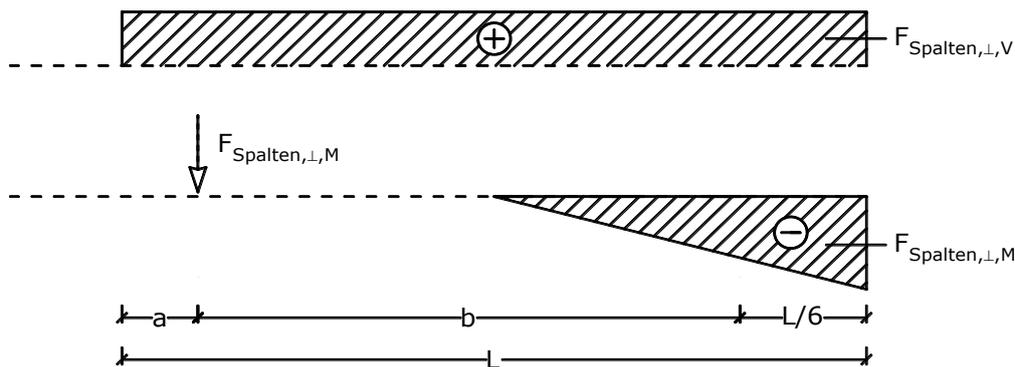


Abbildung 10: Idealisierte Spannungen rechtwinklig zur Faser in der Querlage

### 3.3. Bestimmung der Spaltkraft mittels Messschrauben

Um qualitativ und quantitativ das Spaltverhalten von auf Zug beanspruchten Gewindestangen zu ermitteln, wurde eine Versuchsvorrichtung entwickelt. Für die Prüfmethode wird die Gewindestange in einen längs aufgetrennten Zugstab eingebracht, der mittels Messschrauben zusammengehalten wird. Die Messschrauben, welche schon von Uibel [11] für die Ermittlung von Kräften beim Eindrehen von Schrauben verwendet wurden, werden mit jeweils ca. 250 N vorgespannt. Die Messkonfiguration ist in Abbildung 11 und Abbildung 12 dargestellt. Innerhalb einer Längsbohrung der Messschraube wurde im Bereich des reduzierten Querschnitts (vgl. Abbildung 11, rechts) ein Dehnmessstreifen (DMS) appliziert, sodass die auftretende Stahldehnung jeder einzelnen Schraube gemessen werden konnte. Die resultierende Dehnung kann mit der durch eine Kalibrierung ermittelten Dehnsteifigkeit jeder einzelnen Messschraube in eine Kraft umgerechnet werden.

Die Ergebnisse der durchgeführten Versuche sollen hier anhand eines repräsentativen Versuchs veranschaulicht werden. Der Prüfkörper aus Buchenfurnierschichtholz mit einer Einschraubtiefe von 200 mm (analog zu Reihe 1 in Tabelle 1) wurde bis 60 kN in 10 kN-Schritten mit zwischenzeitlichen Halteintervallen belastet. Die Spaltkräfte dieses Versuchs sind der Gewindestangenkraft in Abbildung 12 gegenübergestellt. Position 1 ist das Messschraubenpaar am Zugstabende, Position 5 ist zur Bauteilmitte hin gerichtet. Die graue Kurve bildet die Summe aller Spaltkräfte ab. Das Diagramm zeigt, dass die größten Spaltkräfte am Zugstabende auftreten und ca. die Hälfte der Gesamtspaltkraft ausmachen.

Der Spaltkraftanteil bei einer Belastung von 60 kN beträgt ca. 7 % (4,2 kN), der Anstieg ist jedoch nicht linear. Mit zunehmender Axialkraft ist der Spaltkraftanstieg progressiv, sodass im Traglastbereich (hier ca. 90 kN) der prozentuale Anteil etwas über 7 % liegen würde. Um die Messtechnik vor einem spröden Versagen und der damit einhergehenden Gefahr der Schädigung der Messschrauben zu schützen, wurde der Versuchskörper bis 60 kN belastet.

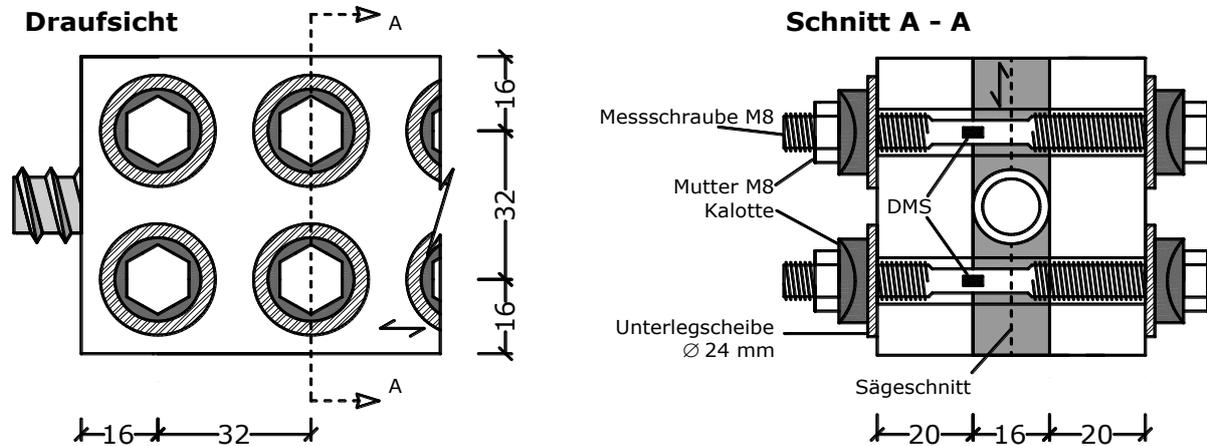


Abbildung 11: Prüfkörpergeometrie mit Draufsicht und Querschnitt A im Bereich der Messschrauben; Maße in mm

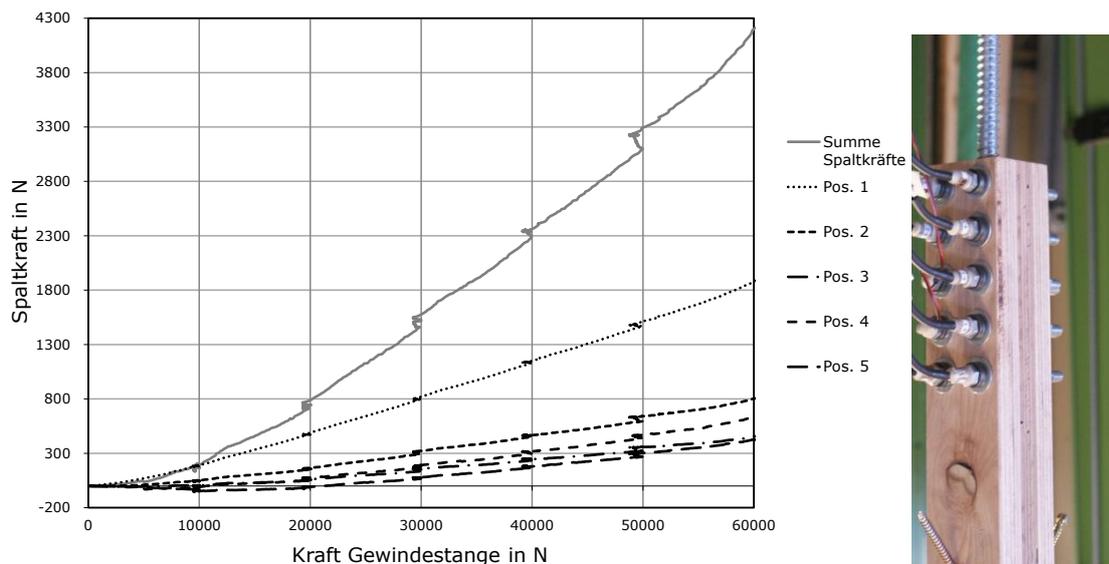


Abbildung 12: Ergebnis eines Spaltkraftversuches mit eingedrehter Gewindestange in Buchenfurnierschichtholz ( $\varnothing$  16 mm und  $L_{ef} = 200$  mm)

#### 4. Anwendungsbeispiel

In Abbildung 13 ist ein Zugstab dargestellt, dessen charakteristische Tragfähigkeit bestimmt und zusätzlich eine Spaltbewehrung dimensioniert werden soll. Das Bauteil besteht aus Brettsperrholz der Gesamtdicke von 71 mm und der Breite von insgesamt 96 mm ( $\equiv 6 \cdot d$ ). Eine Gewindestange  $\varnothing$  16 mm ist über eine Länge von 500 mm in ein vorgebohrtes Loch ( $\varnothing$  13 mm) eingedreht worden.

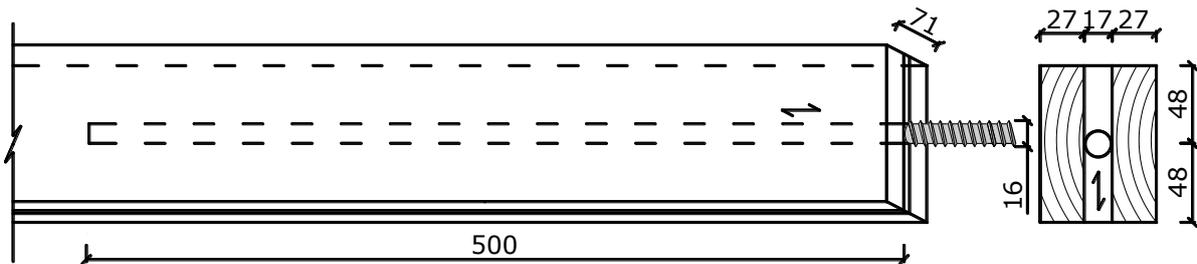


Abbildung 13: Beispiel eines Zugstabes mit eingedrehter Gewindestange in BSP; Maße in mm

Analog der Bemessungsregeln des Auszieh Widerstandes von Holzschrauben [12] kann die charakteristische Tragfähigkeit  $R_{ax,k}$  wie folgt berechnet werden:

$$f_{t,k} = 70 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_k^2 = 10,4 \text{ N/mm}^2$$

mit  $\rho_k = 385 \text{ kg/m}^3$  für GL 24h.

$$R_{ax,k} = f_{t,k} \cdot d \cdot \ell_{ef} \text{ für } \alpha = 90^\circ \text{ und } d = 16 \text{ mm}$$

$$R_{ax,k} = 10,4 \cdot 16 \cdot 500 = 83 \text{ kN}$$

Es ist zu beachten, dass diese Kraft auch von den Längslagen aufgenommen werden muss. Somit ergibt sich eine zusätzliche Betrachtung zur Ermittlung der Zugtragfähigkeit des Holzparallel zur Faser:

$$R_{t,k} = A_{Längslagen} \cdot f_{t,k} = (2 \cdot 96 \cdot 27) \cdot 18 = 93 \text{ kN}$$

Hier wird die charakteristische Zugfestigkeit der Festigkeitsklasse C30 zugrunde gelegt.

Des Weiteren muss die Rollschubtragfähigkeit in den Fugen nachgewiesen werden. Im Hinblick auf die gleichmäßig verteilt angenommene Rollschubbeanspruchung zwischen Längslagen und Querlage kann die charakteristische Rollschubfestigkeit  $f_{R,k} = 1,0 \text{ N/mm}^2$  zugrunde gelegt und die Rollschubtragfähigkeit des Zugstabes wie folgt ermittelt werden:

$$R_{R,k} = A_{Fugen} \cdot f_{R,k} = (2 \cdot 96 \cdot 500) \cdot 1,0 = 96 \text{ kN}$$

Die Stahlzugtragfähigkeit ( $R_{t,u,k} = 91,5 \text{ kN}$ ) der Gewindestangen ist der Zulassung [5] zu entnehmen.

Unter Berücksichtigung unterschiedlicher  $\gamma_m$ - und  $k_{mod}$ -Werte können die Bemessungswerte  $R_{ax,d}$ ,  $R_{t,d}$ ,  $R_{R,d}$  und  $R_{t,u,d}$  bestimmt und der maßgebende Widerstand der Verbindung ermittelt werden.

In dem hier gewählten Beispiel ist rechnerisch die Ausziehtragfähigkeit der maßgebende Versagensfall:

$$R_{maßgebend,d} = \min\{R_{ax,d}, R_{t,d}, R_{R,d}, R_{t,u,d}\} = 83 \text{ kN} \cdot \frac{k_{mod}}{\gamma_M}$$

Um ein frühzeitiges Aufspalten des Stabes zu verhindern und somit ein Versagen der Verbindungen hinauszuzögern ist eine Quersugbewehrung im Bereich des Zugstabes erforderlich. Die zu verankernde Spaltkraft setzt sich nach Kapitel 3.2 aus den Kraftkomponenten  $F_{Spalten,\perp,V}$  und  $F_{Spalten,\perp,M}$  zusammen. Da der Anteil  $F_{Spalten,\perp,V}$  im inneren Bereich der Gewindestange durch die dreiecksförmig angenommene Querdruckbeanspruchung  $F_{Spalten,\perp,M}$  überdrückt wird (vgl. Abbildung 10), soll für die zu bewehrende charakteristische Spaltkraft unter Berücksichtigung der hier getroffenen Annahmen gelten:

$$F_{Spalten,\perp,k} = 0,5 \cdot F_{Spalten,\perp,V} + F_{Spalten,\perp,M} = 0,5 \cdot 0,12 \cdot 83 + 2 \cdot \frac{83}{4} \cdot \frac{0,5 \cdot (27 + 17 - 16)}{5/6 \cdot 500 - 45} = 5,0 + 1,6 = 6,6 \text{ kN}$$

Das Zugstabende soll mittels Vollgewindeschrauben [13] verstärkt werden, so dass ein mögliches Spaltversagen verzögert eintritt und somit die Tragfähigkeit gegenüber unbewehrter Zugstäbe deutlich gesteigert werden kann. Die Anordnung der hier verwendeten Schrauben  $\varnothing 6$  mm ist in Abbildung 14 dargestellt. Der Widerstand gegenüber dem Spalten lässt sich nach Eurocode 5 [12] bestimmen:

$$F_{ax,\alpha,Rk} = \frac{n_{ef} \cdot f_{ax,k} \cdot d \cdot \ell_{ef}}{1,2 \cdot \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha} \cdot k_d = \frac{4^{0,9} \cdot 17,87 \cdot 6 \cdot 27}{1} \cdot 0,75 = 7,56 \text{ kN}$$

$$\text{mit } n_{ef} = n^{0,9}$$

$$f_{ax,k} = 0,52 \cdot d^{-0,5} \cdot \ell_{ef}^{-0,1} \cdot \rho_k^{0,8} = 0,52 \cdot 6^{-0,5} \cdot 27^{-0,1} \cdot 385^{0,8} = 17,87 \text{ N/mm}^2$$

$$k_d = \min\left\{\frac{d}{8}; 1\right\} = 0,75$$

Zusätzlich sollte die charakteristische Zugfestigkeit  $F_{t,Rk}$  der Spaltbewehrung nach Eurocode 5 [12] angenommen werden zu:

$$F_{t,Rk} = n_{ef} \cdot f_{tens,k}$$

Der Zugwiderstand der Schrauben  $F_{t,Rk}$  soll hier nicht maßgebend sein und wird nicht näher betrachtet. In dem hier gewählten Beispiel ist der Widerstand der Spaltbewehrung ( $F_{ax,\alpha,Rk} = 7,56$  kN) größer als die auftretende rechnerische Spaltkraft ( $F_{Spalten,\perp,k} = 6,6$  kN) – der Zugstab ist somit ausreichend gegenüber einem Aufspalten rechtwinklig zur Faserrichtung der Querlage bewehrt.

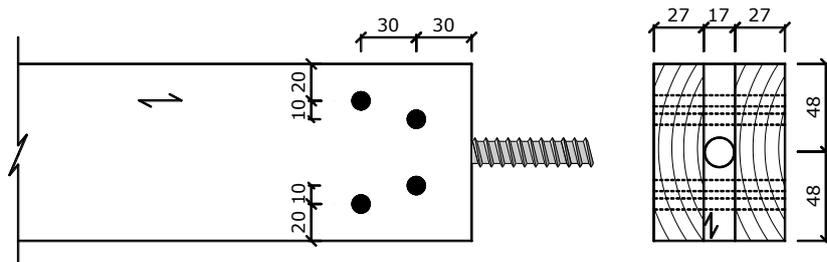


Abbildung 14: Spaltbewehrung am Zugstabende mittels Vollgewindeschrauben ( $\varnothing 6$  mm); Maße in mm

## 5. Schlussfolgerung

Zur Stabachse parallel eingebrachte Gewindestangen stellen sowohl als eingedrehte als auch als eingeklebte Variante eine sehr tragfähige und steife Verbindungsmöglichkeit dar. Zahlreiche Versuche haben gezeigt, dass die tragfähigkeitsmindernde Wirkung des Aufspaltens der Zugstabenden zu behindern ist, damit ein frühzeitiges sprödes Versagen nicht maßgebend wird. Verschiedene Verstärkungsmaßnahmen mit Hilfe von Vollgewindeschrauben und Querlagen wurden experimentell berücksichtigt und belegen die verstärkende Wirkung am Bauteilende bei einer Zugbeanspruchung der Gewindestange. Neben den experimentellen Betrachtungen wurde auch mit Hilfe eines mechanischen Modells die Spaltkraft bei eingedrehten Gewindestangen quantitativ bestimmt. Auch die mittels Messschrauben gewonnenen Ergebnisse weisen darauf hin, dass in etwa 10 % der Axialkraft als Spaltkraft rechtwinklig zur Faserrichtung der Querlage wirken und über eine Querbewehrung aufgenommen werden muss.

Dementsprechend wurde im letzten Kapitel ein Anwendungsbeispiel vorgestellt und unter Berücksichtigung der vorher gewonnenen Erkenntnisse eine Spaltbewehrung unter Verwendung von Vollgewindeschrauben dimensioniert. In dem vorliegenden Beitrag sind ein nicht planmäßiges Einbringen der eingedrehten Gewindestange und eine damit einhergehende zusätzliche Spaltkraftkomponente nicht berücksichtigt. Weiterführende wissenschaftliche Untersuchungen könnten diesen Sachverhalt berücksichtigen und die hier vorgestellten Ergebnisse absichern und ergänzen.

## 6. Literatur

- [1] DIN 7998:1975 Gewinde und Schraubenenden für Holzschrauben
- [2] Enders-Comberg, M. (2012): Axial beanspruchte Gewindestangen in Brettsperrholz, Internationales Holzbauforum 2012. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart
- [3] Blaß, H.J. (2008): Fachwerkträger – Neue Ansätze bei Material und Verbindungen. Ingenieurholzbau, Karlsruher Tage 2008. Bruderverlag, Universität Karlsruhe
- [4] Blaß, H.J.; Enders-Comberg, M. (2012): Fachwerkträger für den industriellen Holzbau. Bd. 22, Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe
- [5] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Nr. Z-9.1-777 vom 30.11.2010. Gewindestange mit Holzgewinde als Holzverbindungsmittel. Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin
- [6] Krüger, O.; Blaß, H.J. (2011): Verbindungen mit faserparallel eingeklebten Gewindestäben in Brett-schichtholz. Prüfbericht Nr. 106145. Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine. Karlsruher Institut für Technologie
- [7] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Nr. Z-9.1-705 vom 26.01.2009. 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
- [8] Enders-Comberg, M.; Blaß, H.J. (2013): Verbindungen mit faserparallel eingeklebten Gewindestäben in Furnierschichtholz. Prüfbericht Nr. 136142. Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine. Karlsruher Institut für Technologie
- [9] DIN EN 1995-1-1/NA:2013-08 Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau
- [10] Steck, G. (2002): Einseitige Beanspruchung in Zugverbindungen. Bauen mit Holz, Heft 3, S. 33 – 42
- [11] Uibel, T. (2012): Spaltverhalten von Holz beim Eindrehen von selbstbohrenden Holzschrauben. Bd. 20, Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe
- [12] DIN EN 1995-1-1:2010-12 Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau
- [13] DIN EN 14592:2008+A1:2012 Holzbauwerke – Stiftförmige Verbindungsmittel – Anforderungen