

Vorspannen von Holz mit Vollgewindeschrauben

Michael Steilner
Holzbau und Baukonstruktionen
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Karlsruhe, Deutschland



Vorspannen von Holz mit Vollgewindeschrauben

1. Einleitung

Seit einigen Jahren werden zur Querkzugverstärkung von Holzbauteilen Vollgewindeschrauben als Verstärkungsmittel verwendet. Durch den Verbund der Schraube mit dem Holz werden in Bereichen mit großer Querkzugbeanspruchung, zum Beispiel bei Ausklinkungen und Durchbrüchen, die Querkzugkräfte über den gesamten Holzquerschnitt verteilt. Die Wirkung der Schraube kann wie die schlaffe Bewehrung im Beton betrachtet werden. Erst wenn ein Riss entsteht, kann die Schraube die volle Tragwirkung entfalten, vgl. [3]. Des Weiteren treten in hohen Querschnitten aus Brettschichtholz bei Änderung der Holzfeuchte große Verformungen durch Quellen oder Schwinden auf. Dieses führt auf Grund der hohen Steifigkeit der Schrauben zu Zwängungen. Problematisch ist hier vor allem das Schwinden des Holzes, das in beheizten Hallen oder Räumen zwangsläufig stattfindet. Hierbei entstehen entlang der Schraubenachse Querkzugspannungen, die zu Rissen führen können.

Eine Querdruckvorspannung soll die Entstehung von Rissen verhindern, bzw. die Risse minimieren. Die durch das Schwinden auftretenden Querkzugspannungen werden im Bereich der Schraube durch die Vorspannung reduziert oder sogar überdrückt. Somit wird auch das Rissrisiko bei klimatischen Beanspruchungen verringert.

Die Querdruckfestigkeit von Holz ist gering. Daher kann eine Presskraft zur Vorspannung des Querschnittes von außen nicht aufgebracht werden. In einem Forschungsvorhaben wurden Schrauben entwickelt, die zu einer kontinuierlichen Querdruckvorspannung im Holz entlang der Schraubenachse führen.

2. Vorspannen mit Schrauben

2.1. Allgemeines

Zur Verbindung von zwei Holzbauteilen werden inzwischen häufig Doppelgewindeschrauben verwendet. Sie besitzen an der Schraubenspitze und am Schraubenkopf zwei unterschiedliche Gewinde. An der Schraubenspitze hat das Gewinde eine größere Gewindesteigung als das Gewinde am Schraubenkopf (Abbildung 1). Durch die unterschiedlichen Gewinde können zwei Bauteile miteinander verbunden und gegeneinander verpresst werden. Beim vollständigen Eindrehen dieser Schraube in ein Bauteil wird das Holz durch die unterschiedlichen Gewinde zusammengedrückt und es entstehen Querdruckvorspannungen.



Abbildung 1: Beispiel einer Doppelgewindeschraube mit Gewindesteigung $p_0 > p_1$

Nachteil dieser Schraube ist, dass das Gewinde am Schraubenkopf ein zweites Gewinde in das Holz schneidet. Somit wird die Verbundwirkung zwischen Schraube und Holz in diesem Bereich beeinträchtigt. Dies kann vermieden werden, indem die Änderung der Gewindesteigung nicht un stetig, sondern kontinuierlich erfolgt. Somit wird das Holz nicht durch ein erneutes Einschneiden des zweiten

Gewindes geschädigt. Die Schraube bleibt im vorgeschrittenen Bereich und drückt das Holz durch die geringere Gewindesteigung zusammen.

2.2. Schrauben mit veränderlicher Gewindesteigung

Abbildung 2 zeigt schematisch die Schraubengeometrie der ersten Versuchsmuster mit drei Gewindeabschnitten. An der Schraubenspitze (Bereich I) weist die Schraube eine konstante Gewindesteigung p_0 auf. Die Gewindesteigung wird im Bereich II funktional verringert, bis sie im Bereich III die geringere Steigung p_1 erreicht hat. Für die ersten Versuche standen drei verschiedene Durchmesser und Längen und vier Gewindegeometrien zur Verfügung.

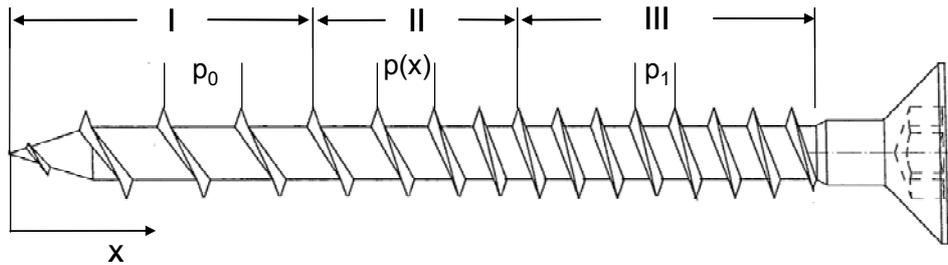


Abbildung 2: Schraubengeometrie des Versuchsmusters. Bereich I und III mit konstanter Gewindesteigung p_0 und p_1 . Bereich II mit Übergang von p_0 zu p_1 mit veränderlicher Steigung $p(x)$.

Die Gewindesteigung entspricht der Strecke, die die Schraube bei einer Umdrehung in Achsrichtung zurücklegt. Wird eine Schraube mit konstanter Gewindesteigung eingedreht, legt jeder Bereich der Schraube bei einer Umdrehung denselben Weg zurück. Die Gewindesteigung bestimmt somit die Eindringgeschwindigkeit der Schraube. Wird eine Schraube mit unterschiedlichen Gewindesteigungen eingeschraubt, so erhält man unterschiedliche Eindringgeschwindigkeiten entlang der Schraubenachse. Dadurch entstehen Zwängungen im Holz und Relativverschiebungen zwischen Holz und Schraube.

Sind die Zwängungen im Holz aufgrund der Gewindesteigungsunterschiede zu groß, so wird die Holzmatrix zerstört und eine Kraftübertragung zwischen Schraube und Holz ist nicht mehr möglich. Abbildung 3 zeigt vier Versuchsmuster nach dem Einschrauben. Die Zerstörung der Holzmatrix im oberen Bereich unter dem Schraubenkopf ist deutlich zu erkennen.

Die Änderung der Gewindesteigung lässt sich durch einen funktionalen Zusammenhang beschreiben. Mit der entsprechenden Funktion lässt sich die theoretische Stauchung berechnen, die aus der Änderung der Gewindesteigung resultiert. Das Integral über der Differenz der Gewindesteigungen beschreibt die Differenz des Schraubenweges im Bezug auf die Einschraubtiefe:

$$\int (p(x) - p_0) \cdot dx \quad (1)$$

mit

$p(x)$ Gewindesteigung an der Stelle x

p_0 Anfangssteigung an der Schraubenspitze

Nach Blaß et. al. [1] ist die maximal aufnehmbare Verschiebung einer selbstbohrenden Holzschraube δ_{ax} abhängig von der eingeschraubten Gewindelänge, dem Nenndurchmesser und der Rohdichte des Holzes:

$$\delta_{ax} = 0,0016 \cdot d \cdot \sqrt{\rho \cdot \ell_s} \quad (2)$$

Die durch die Gewindeänderung entstehenden Stauchungen im Holz müssen demzufolge unterhalb des Wertes δ_{ax} liegen, um eine Zerstörung der Holzmatrix zu vermeiden.

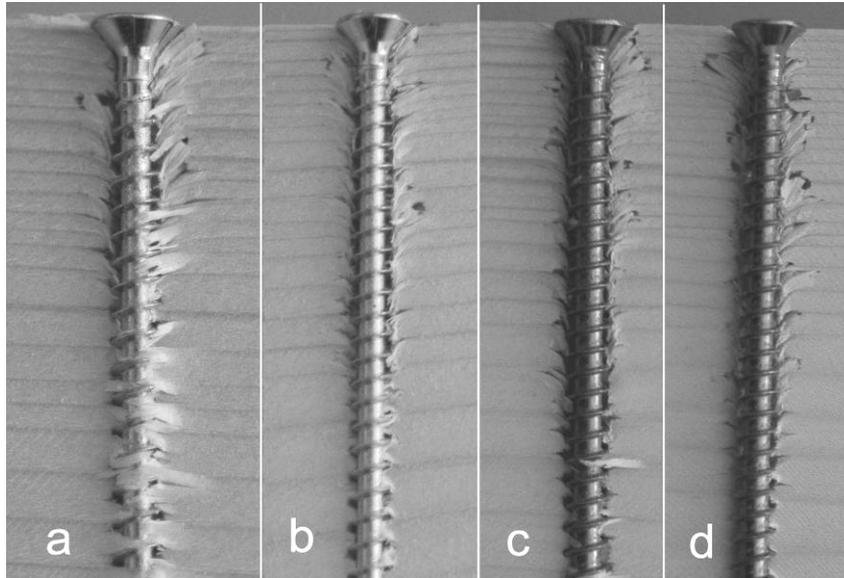


Abbildung 3: Eingedrehte Schrauben mit veränderlicher Gewindesteigung.
Schraube a: 4 x 70 mm; b: 5 x 120 mm; c: 6 x 160 mm (Typ 1); d: 6 x 160 mm (Typ 2)

2.3. Modifizierung des Gewindes

Ist die Anfangs- und Endsteigung p_0 und p_1 des Gewindes gleich groß, so ist die Stauchung des Holzes nur noch vom Bereich II der Schraube abhängig. Dafür muss die Gewindeänderungsfunktion $p(x)$ so angepasst werden, dass sie die gleiche Anfangs- und Endsteigung aufweist. In Abbildung 4 sind die Gewindesteigungen der beiden Varianten über die gesamte Länge der Schraube dargestellt. Die Variante 1 hat eine größere Gewindesteigungsänderung, die über eine Länge von 104 mm ausgeführt ist. Im Gegensatz dazu hat Variante 3 eine geringere Steigungsänderung, die auf einer Länge von 163 mm ausgeführt ist. In Abbildung 5 ist zu erkennen, dass die daraus resultierenden Wegdifferenzen für beide Varianten unter der Grenzverschiebung δ_{ax} liegen.

Variationen der Gewindegeometrien

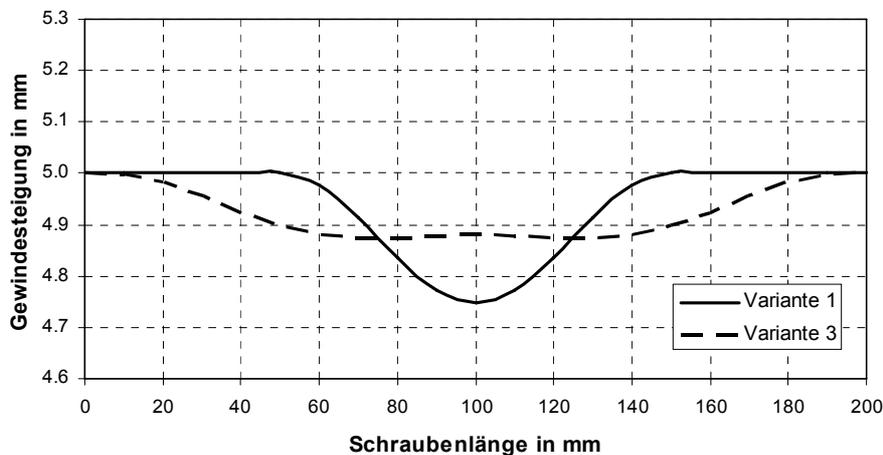


Abbildung 4: Änderung der Gewindesteigung für Variante 1 und Variante 3. Schraubenspitze bei 0 mm; Schraubenkopf bei 200 mm

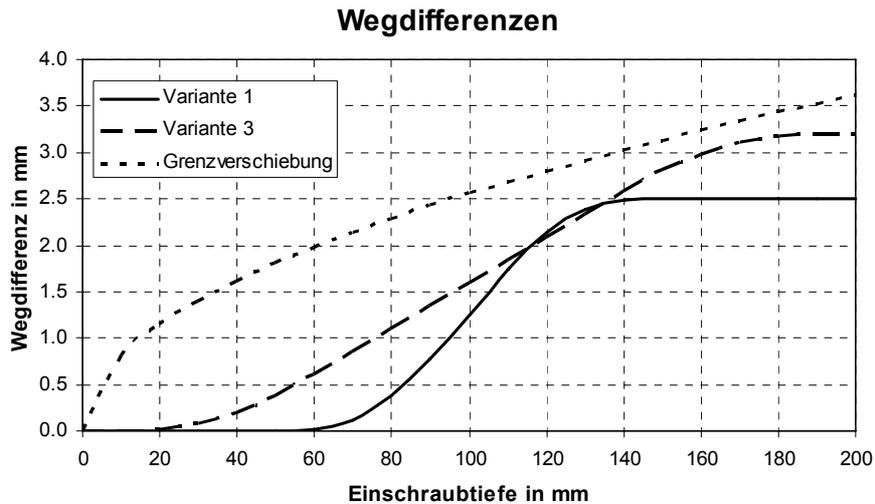


Abbildung 5: Wegdifferenzen und Grenzverschiebung δ_{ax} in Abhängigkeit der Einschraubtiefen für Variante 1 und 3

3. Numerische Betrachtung der Vorspannwirkung

3.1. Konzept

Zur Berechnung der Vorspannwirkung der Schraube wurde mit dem Finite-Elemente Programm ANSYS ein Modell erstellt. Hiermit können Parameterstudien durchgeführt und so die Gewindegeometrie und auch die Anordnung der Schrauben untereinander optimiert werden.

Das Modell besteht aus 3D Volumenelementen, denen die orthotropen Materialeigenschaften des Holzes zugewiesen werden. Die Elastizitätsmoduln und Schubmoduln sind in Anlehnung an Neuhaus [2] berechnet worden.

Die Schraube wird mit Balkenelementen modelliert und mittels nichtlinearer Federn mit den Volumenelementen verbunden. Den Balkenelementen wird ein definierter Temperaturexpansionskoeffizient zugewiesen. Durch Aufbringen einer Temperaturänderung werden die Balkenelemente gestaucht. Durch dieses Vorgehen werden die Einflüsse aus der Gewindesteigungsänderung so abgebildet, dass die Dehnungen des Holzes im Modell realitätsgetreu berechnet werden.

3.2. Modellierung der Verbindung Schraube-Holz

Bejtka [3] beschreibt ein typisches Kraft-Verschiebungs-Diagramm bei Herausziehversuchen mit selbstbohrenden Holzschrauben, das in Abbildung 6 dargestellt ist. Der Auszieh Widerstand kann mit der Gleichung (3) berechnet werden.

$$R_{ax} = 0,6 \cdot \sqrt{d} \cdot \ell_s^{0,9} \cdot \rho^{0,8} \quad (3)$$

Für die Modellierung der nichtlinearen Feder wird ein Federgesetz angenommen, dessen Kraft-Verschiebungs-Diagramm (Abbildung 6) das Herausziehverhalten idealisiert darstellt. Nach einem elastischen Bereich folgen ein kurzer plastischer Bereich und anschließend das Versagen der Feder.

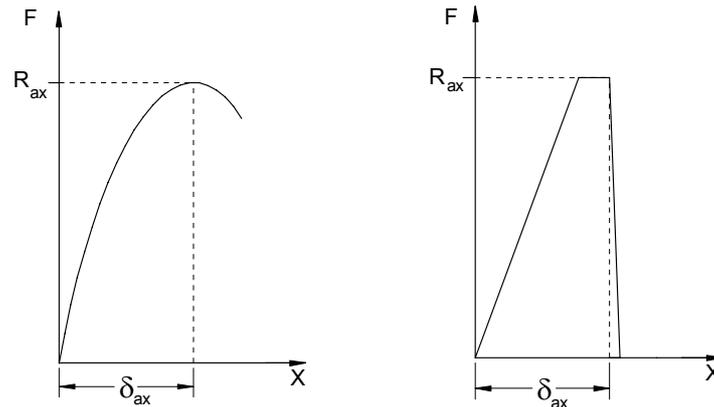


Abbildung 6: Typisches Kraft-Verschiebungsdiagramm eines Herausziehversuches mit selbstbohrenden Holzschrauben (links). Kraft-Verschiebungs-Diagramm für eine modellierte nichtlineare Feder (rechts).

3.3. Simulieren des Eindrehens von Schrauben mit veränderlicher Gewindesteigung

In Abschnitt 2.2 ist der Einfluss auf das Holz beim Eindrehen von Schrauben mit unterschiedlichen Gewindesteigungen beschrieben. Die Wegdifferenzen, die durch die Gewindeänderung beim Einschrauben entstehen, werden im FE-Modell durch eine Temperaturänderung der Balkenelemente erreicht. Mit den Federverbindungen werden die entstehenden Kräfte aufgrund der Stauchungen auf die Volumenelemente übertragen.

Der Einschraubvorgang wird schrittweise simuliert. Bei jedem Schritt wird die Schraube um eine Elementhöhe weiter „eingedreht“. Dadurch wird bei jedem Schritt eine weitere Feder im Modell benötigt. Abbildung 7 zeigt schematisch das schrittweise „Eindrehen“ der Schraube im Modell.

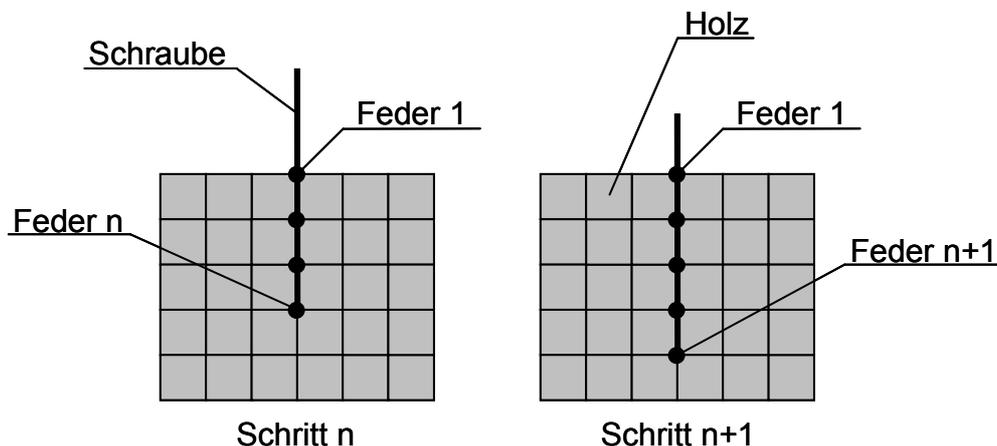


Abbildung 7: Schrittweises Eindrehen der Schraube im Modell.

Die Verschiebungen eines Berechnungsschrittes werden gespeichert und beim nächsten Schritt wieder auf das System aufgebracht. Zusätzlich werden die Federeigenschaften abhängig vom letzten Berechnungsschritt angepasst. Abbildung 8 zeigt, wie das Kraft-Verschiebungs-Diagramm der jeweiligen Feder für die folgende Berechnung in Abhängigkeit der Federverschiebung verändert wird. Somit wird das kontinuierliche Eindrehen der Schraube im Modell umgesetzt. Wird die größtmögliche Federverschiebung δ_{ax} erreicht, wird die Federsteifigkeit auf einen

sehr kleinen Wert gesetzt. Die Feder kann keine Kräfte mehr übertragen, auch wenn die Verschiebungen wieder geringer werden.

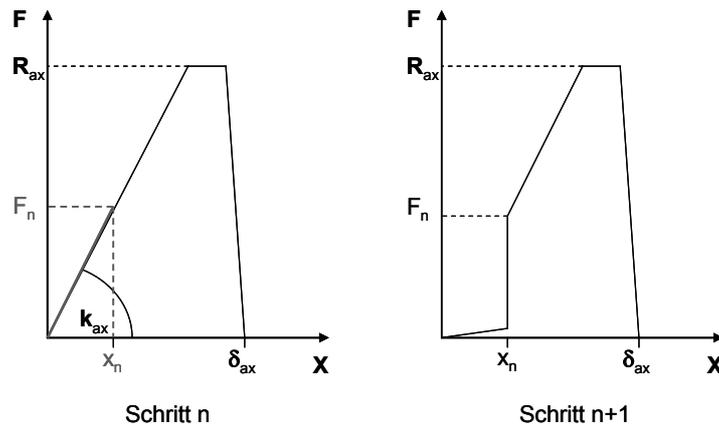


Abbildung 8: Veränderung des Kraft-Verschiebungs-Diagramms der Federverbindung in Schritt n+1 in Abhängigkeit der Verschiebung in Schritt n.

3.4. Berechnungsergebnisse

Für die beiden Varianten aus Abschnitt 2.3 sind Berechnungen mit dem FE-Modell durchgeführt worden. In Abbildung 9 und Abbildung 10 sind die berechneten Druckspannungen im Holz über die Höhe des Prüfkörpers in Abhängigkeit vom Abstand zur Schraube in Faserrichtung dargestellt. Die Variante 1 erzeugt eine stärkere Druckspannung in der Mitte des Prüfkörpers, an den Rändern klingt diese stark ab. Die Variante 3 erreicht eine geringere Vorspannung in der Mitte, kann aber über einen größeren Bereich höhere Vorspannungen aufbringen.

Die Varianten 1 und 3 können für unterschiedliche Zwecke eingesetzt werden. Für Anwendungen bei denen lokal Vorspannungen aufgebracht werden sollen, z.B. Ausklinkungen, kann die Variante 1 eingesetzt werden. Variante 3 ist für eine Vorspannung des gesamten Querschnitts geeignet.

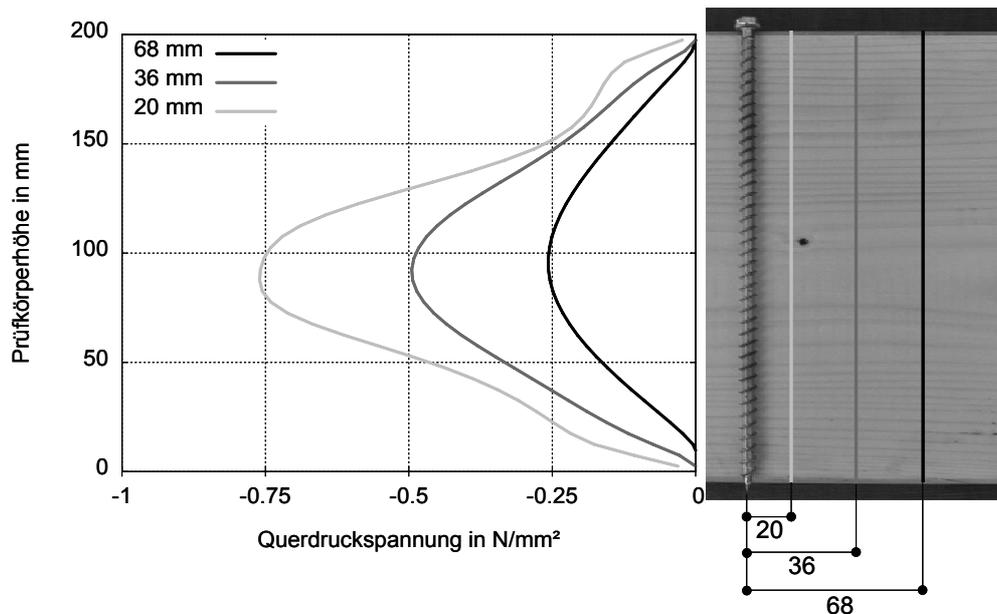


Abbildung 9: Berechnete Druckspannungen über die Prüfkörperdicke in Abhängigkeit des Abstandes zur Schraube in Faserrichtung für Variante 1.

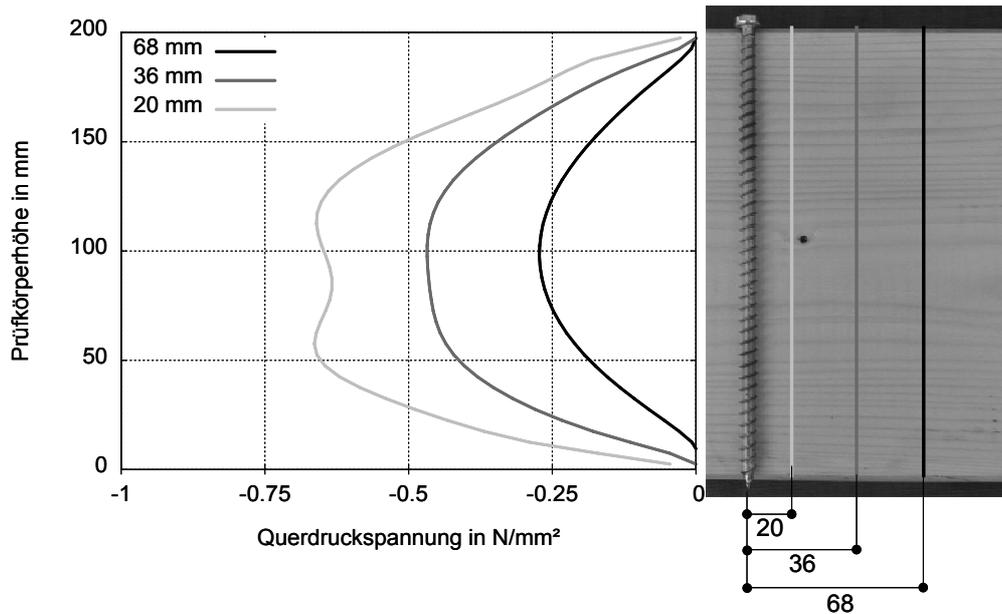


Abbildung 10: Berechnete Druckspannungen über die Prüfkörperdicke in Abhängigkeit des Abstandes zur Schraube in Faserrichtung für und Variante 3.

4. Experimentelle Überprüfung des Modells

4.1. Druckmessung mit Force-Sensing-Resistor (FSR)

Um die Einflüsse der Spannschraube auf die Spannungsverteilung im Holz messen zu können, sind möglichst dünne Messelemente notwendig, die zwischen zwei Hölzern eingebaut werden. Hierzu eignet sich der Force-Sensing Resistor (FSR). Der FSR ist ein Messelement, das unter Kraft- bzw. Druckeinwirkung seinen elektrischen Widerstand ändert. Der Sensor besteht aus zwei Kunststofffolien, die mit einem Abstandhalter aufeinander geklebt sind. Auf einer Folie ist eine halbleitende Schicht aufgebracht, die andere enthält zwei Leiterbahnen, die kammförmig ineinander greifen, jedoch elektrisch voneinander isoliert sind. Werden die beiden Folien aufeinander gedrückt, ändert sich in Abhängigkeit der Druckkraft der elektrische Widerstand zwischen den Leiterbahnen. Abbildung 11 zeigt eine fotografische Aufnahme und den schematischen Aufbau des Sensors.

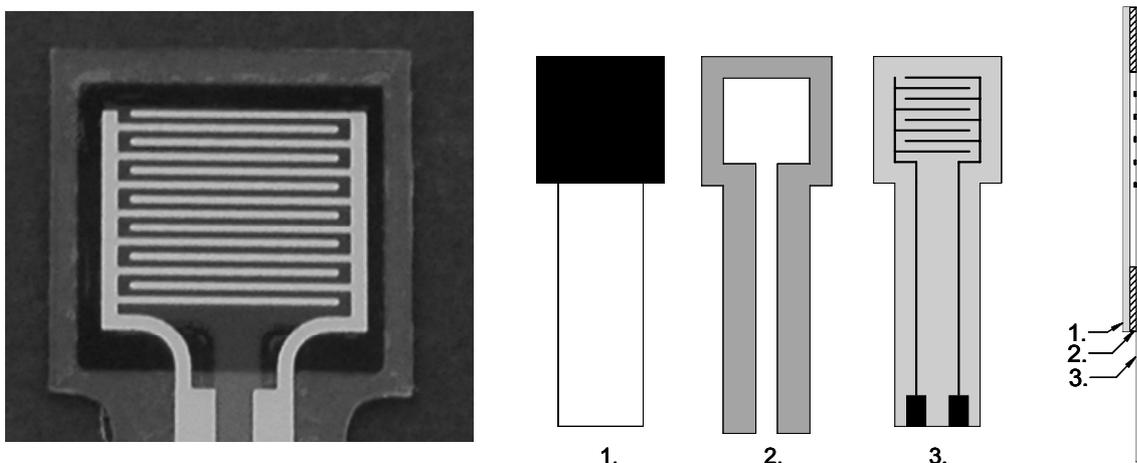


Abbildung 11: Nahaufnahme eines Force-Sensing-Resistors (FSR) und Aufbau eines FSR:
1. Trägerfolie und Beschichtung; 2. Klebeschicht; 3. Trägerfolie mit Elektroden.

4.2. Prüfkörper

Die Prüfkörper für die Einschraubversuche bestehen aus Brettschichtholz. Für die Herstellung der Prüfkörper wurde jeweils ein Brett in Abschnitte aufgeteilt, die anschließend aufeinander geklebt wurden. Somit sind die Prüfkörper über ihre Querschnittshöhe annähernd homogen. Die Prüfkörpereigenschaften dynamischer E-Modul in Faserrichtung und Rohdichte wurden am Ausgangsmaterial bestimmt.

Die Prüfkörper haben eine Höhe von 200 mm und eine Grundfläche von ca. 160 x 160 mm. Zur Messung der Querdruckkräfte wurden die Prüfkörper in den entsprechenden Messhöhen aufgetrennt. Die Abbildung 12 zeigt drei Prüfkörper mit Messhöhen von 50 mm, 100 mm und 150 mm.



Abbildung 12: Prüfkörper für Einschraubversuche mit Spannschrauben. Druckmessung jeweils in den Einschraubtiefen 50 mm; 100 mm und 150 mm.

4.3. Einschraubversuche

Zum Eindrehen der Schrauben in den Prüfkörper wurde ein Drehmoment-Analysesystem verwendet. Der Vorteil dieses Systems ist die konstante Eindrehgeschwindigkeit, eine definierbare Einschraubtiefe und eine konstante Auflast während des Einschraubvorgangs. Somit werden für alle Versuche die gleichen Randbedingungen eingehalten und unerwünschte Einflüsse durch diese vermieden.

Versuche zur Messung der Vorspannwirkung wurden mit Schrauben der Varianten 1 und 3 durchgeführt. In Abbildung 13 sind die Ergebnisse für eine Versuchsreihe dargestellt. Bis auf die Einschraubtiefe 50 mm der Variante 1 stimmen die gemessenen Werte sehr gut mit den berechneten überein. Somit können mit dem Modell aussagen über die Vorspannwirkung der Schrauben getroffen werden.

Mit den gewählten Gewindegeometrien können Querdruckvorspannungen von über 0,5 N/mm² erreicht werden. Hierzu beträgt im Vergleich die charakteristische Querkzugfestigkeit von Holz 0,5 N/mm². Hieraus resultiert eine deutliche Vergrößerung der theoretisch aufnehmbaren Querkzugspannungen.

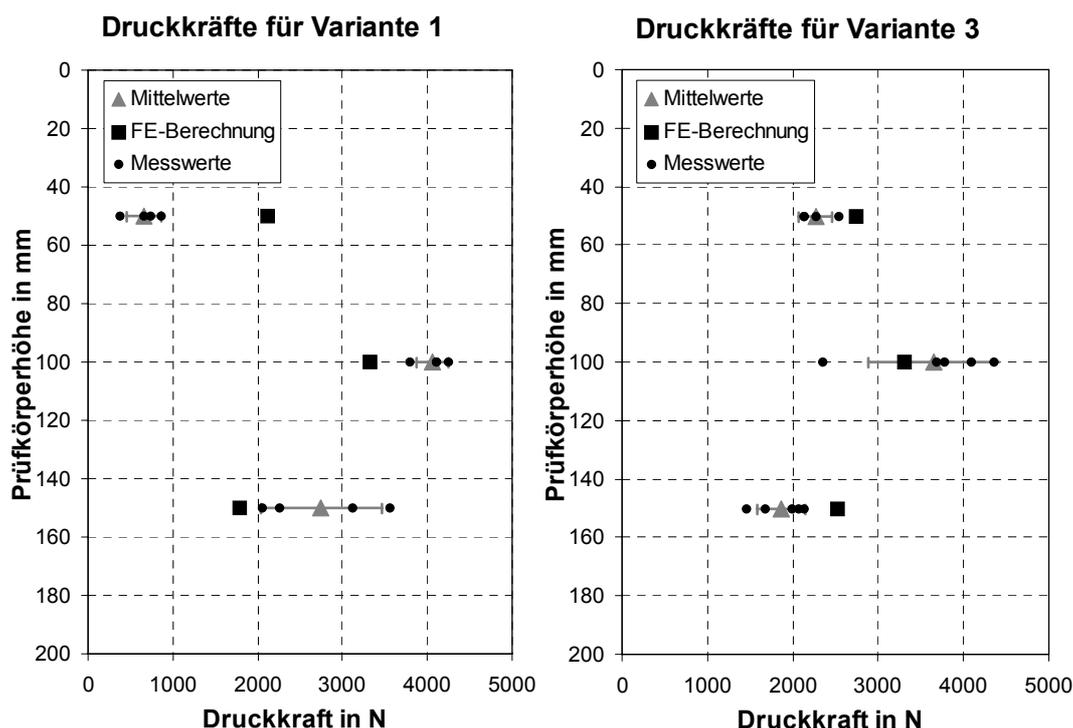


Abbildung 13: Ergebnisse zweier Versuchsreihen für Schrauben der Variante 1 und Variante 3.

5. Zusammenfassung

Selbstbohrende Holzschrauben werden zur Querzugverstärkung in Holzbauteilen eingesetzt. In Bereichen mit Querzugbeanspruchung werden diese durch die Schrauben über den gesamten Querschnitt verteilt. Die volle Verstärkungswirkung kann erst durch Ausbildung kleiner Risse erreicht werden. Zusätzlich können beim Schwinden von hohen Brettschichtholzträgern entlang der Schrauben hohe Querzugspannungen entstehen. Werden diese Bereiche durch eine Querdruckvorspannung überdrückt, können Risse minimiert oder vermieden werden.

Mit den entwickelten Schrauben mit veränderlicher Gewindesteigung können Querdruckspannungen im Holz erzeugt werden. Das erstellte FE-Modell ist für die Vorhersage der auftretenden Querdruckspannungen für verschiedene Gewindegeometrien geeignet. Die berechneten Querdruckspannungen sind mit Versuchsergebnissen verglichen worden. Die Ergebnisse stimmen so weit überein, dass Vorhersagen über die zu erwartende Querdruckspannung getroffen werden können. Somit kann das Modell zur weiteren Optimierung von Gewindegeometrien verwendet werden.

Weiterhin sollen das Relaxationsverhalten und die Einflüsse durch Schwinden und Quellen auf die Vorspannwirkung untersucht werden, um zuverlässige Aussagen über die Langzeitwirkung der Spannschrauben zu ermöglichen.

6. Literatur

- [1] Blaß, H.J.; Bejtka, I.; Uibel, T.: Tragfähigkeit von Verbindungen mit selbstbohrenden Holzschrauben mit Vollgewinde, *Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau*, Band 4, Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen (Hrsg.), Universitätsverlag Karlsruhe, 2006

- [2] Neuhaus H: Über das elastische Verhalten von Fichtenholz in Abhängigkeit von der Holzfeuchtigkeit, *Holz als Roh- und Werkstoff*, Band 42, 1983, S 21-25
- [3] Bejtka, I.: Verstärkungen von Bauteilen aus Holz mit Vollgewindeschrauben. *Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau*, Band 2, Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen (Hrsg.), Universitätsverlag Karlsruhe, 2005
- [4] Steilner, M.; Blaß, H.J.: Selbstbohrende Holzschrauben mit veränderlicher Gewindesteigung. Doktorandenkolloquium, Holzbau Forschung und Praxis. Universität, Stuttgart, 2010, S 107-112