

# Querdruckvorspannung von Holz

**MICHAEL STEILNER**

Wissenschaftlicher Mitarbeiter  
Holzbau und Baukonstruktionen  
Karlsruher Institut für Technologie  
Reinhard-Baumeister-Platz 1  
76131 Karlsruhe  
Michael.Steilner@kit.edu



1975 geboren in Tübingen  
2009 Abschluss des Studiums  
Bauingenieurwesen an der  
Universität Karlsruhe (TH)  
Seit 2009 Wissenschaftlicher  
Mitarbeiter am Lehrstuhl für  
Holzbau und Baukonstruktionen,  
Karlsruher Institut für Technologie

## Zusammenfassung

Selbstbohrende Holzschrauben werden zur Querkzugverstärkung von Holzbauteilen eingesetzt. In Bereichen mit Querkzugbeanspruchung, zum Beispiel bei Ausklinkungen und Durchbrüchen, werden die Querkzugkräfte durch die Schrauben aufgenommen. Die volle Verstärkungswirkung kann erst durch Ausbildung kleiner Risse erreicht werden. Werden diese Bereiche durch eine Querdruckvorspannung überdrückt, können Risse minimiert oder sogar vermieden werden.

Es wurden Schrauben mit veränderlicher Gewindesteigung entwickelt, mit denen Querdruckspannungen im Holz erzeugt werden können. Mit der Methode der finiten Elemente wurden Querdruckvorspannungen berechnet und mit Versuchsergebnissen verglichen. Die Ergebnisse stimmen so weit überein, dass Vorhersagen über die zu erwartende Querdruckspannung getroffen werden können. Somit kann das FE-Modell zur weiteren Optimierung von Gewindegeometrien verwendet werden.

Das Relaxationsverhalten und die Einflüsse durch Schwinden und Quellen auf die Vorspannwirkung sollen untersucht werden, um zuverlässige Aussagen über die Langzeitwirkung der Spannschrauben zu ermöglichen. Weiterhin sollen weitere Anwendungen, wie zum Beispiel die Schraubenpressklebung, für die Spannschraube überprüft werden.

## 1. Einleitung

Seit einigen Jahren werden zur Querkzugverstärkung von Holzbauteilen Vollgewindeschrauben als Verstärkungsmittel verwendet. 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. [1]. Des Weiteren treten in hohen Querschnitten aus Brettschichtholz bei Änderung der Holzfeuchte große Verformungen durch Quellen oder Schwinden auf. Diese führen 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 Tragwirkung der Schraube verbessern sowie die Entstehung von Rissen verhindern, bzw. die Rissentstehung minimieren. Die durch das Schwinden auftretenden Querkzugspannungen werden im Bereich der Schraube durch die Vorspannung reduziert oder sogar überdrückt. Somit wird auch das Risiko der Rissbildung bei klimatischen Beanspruchungen verringert.

## 2. Vorspannen mit Schrauben

### 2.1 Allgemeines

Die Querdruckfestigkeit von Holz ist gering. Daher ist die potentielle Presskraft begrenzt, die zur Vorspannung des Querschnittes von außen aufgebracht werden kann. Des Weiteren breitet sich bei Teilflächenbelastungen die Spannung unter der Lasteinleitungsstelle aus und führt somit in der Mitte des Querschnittes zu wesentlich geringeren Spannungen als unter der Lasteinleitungsstelle.

Auf Grund dessen werden inzwischen zur Verbindung von zwei Holzbauteilen häufig Doppelgewindeschrauben anstelle von Teilgewindeschrauben verwendet. Sie besitzen an der Schraubenspitze und am Schraubenkopf zwei unterschiedliche Gewinde. An der Schraubenspitze hat das Gewinde eine größere Steigung als am Schraubenkopf (Abb. 1). Durch die unterschiedlichen Gewindesteigungen können zwei Bauteile miteinander verbunden und gegeneinander gepresst werden.



Abb. 1: Beispiel einer Doppelgewindeschraube mit  $p_0 > p_1$ .

Nachteil dieser Schraube ist, dass das Gewinde am Schraubenkopf ein zweites Gewinde ins Holz schneidet. Somit wird die Verbundwirkung zwischen Schraube und Holz in diesem Bereich beeinträchtigt. Dies kann vermieden werden, indem die Gewindeänderung 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

Abb. 2 zeigt schematisch die Schraubengeometrie der Spannschraube. In Bereich I und III weist die Schraube eine konstante Gewindesteigung  $p_0$  auf. Im Bereich II wird die Gewindesteigung funktional verändert. Das Gewinde hat im gesamten Bereich II eine geringere Steigung als im Bereich I und III.

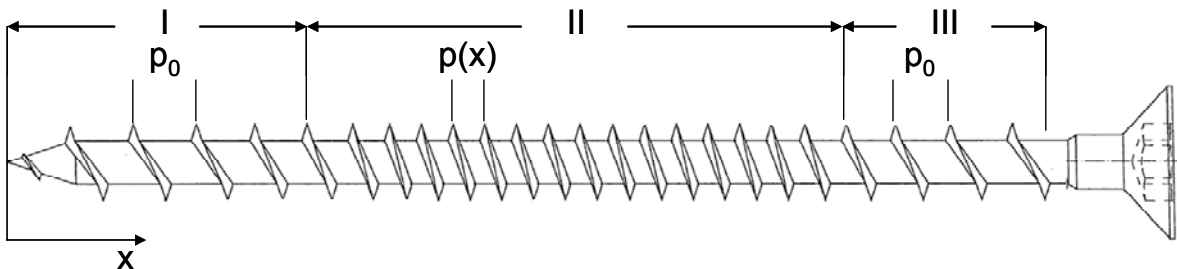


Abb. 2: Schematische Darstellung einer Spannschraube mit veränderlicher Gewindesteigung. Bereich I und Bereich III mit konstanter Gewindesteigung  $p_0$ . Bereich II mit veränderlicher Steigung  $p(x)$ .

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 [2].

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  $x$

$p_0$  Anfangs- und Endgewindesteigung an Schraubenspitze und Schraubenkopf

Nach Blaß et. al. [3] ist die maximal aufnehmbare axiale Verschiebung einer selbstbohrenden Holzschraube  $\delta_{ax}$  abhängig von der eingeschraubten Gewindelänge, dem Nenndurchmesser und der Rohdichte des Holzes:

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

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

In Abb. 3 sind die Gewindesteigungen zweier Varianten der Spannschraube über die gesamte Schraubenlänge 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. Die maximale Änderung der Gewindesteigung beträgt 0,25 mm. In Abb. 4 ist zu erkennen, dass die daraus resultierenden Wegdifferenzen für beide Varianten unter der Grenzverschiebung  $\delta_{ax}$  liegen.

### Variationen der Gewindegeometrien

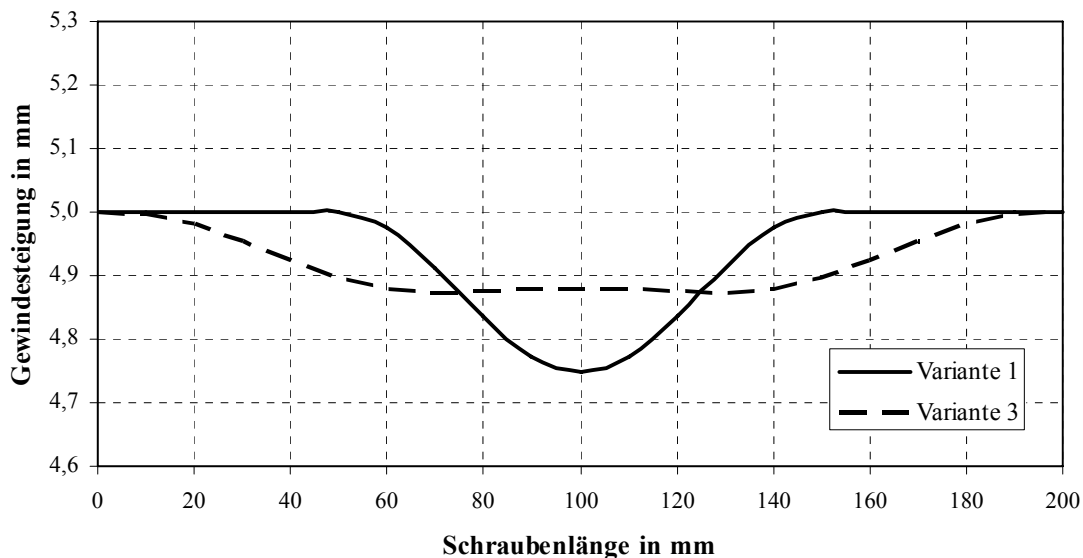


Abb. 3: Änderung der Gewindesteigung für Variante 1 und 3. Schraubenspitze bei 0 mm; Schraubenkopf bei 200 mm

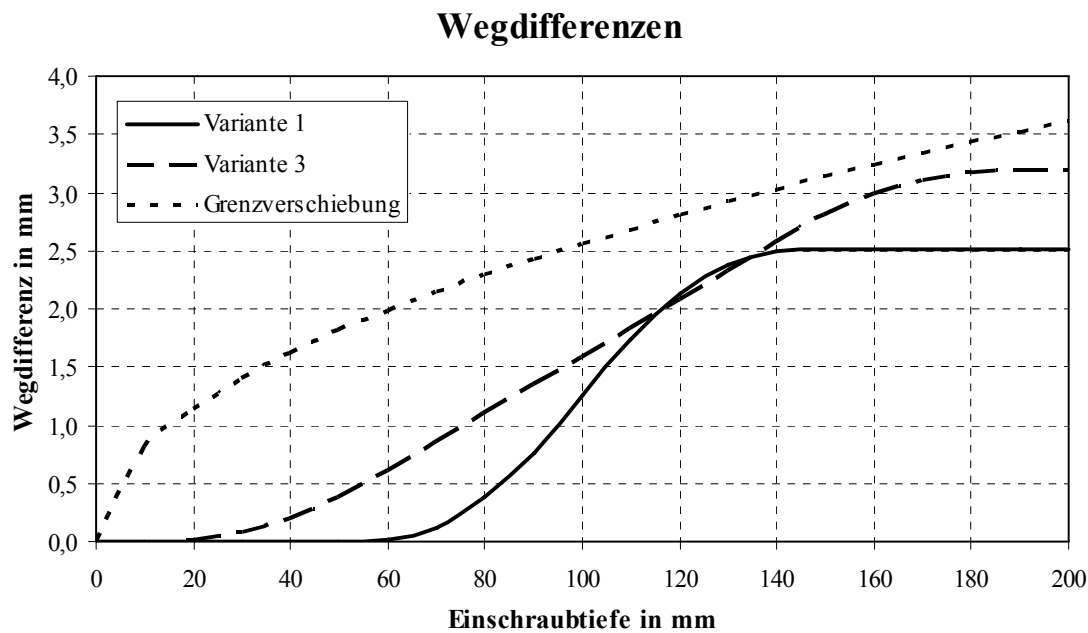


Abb. 4: Wegdifferenz und Grenzverschiebung  $\delta_{ax}$  in Abhängigkeit der Einschraubtiefe für Variante 1 und 3

### 3. Numerische Untersuchung 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 Gewindegometrie und auch die Anordnung der Schrauben untereinander optimiert werden.

Das Modell besteht aus Volumenelementen, denen die orthotropen Materialeigenschaften des Holzes zugewiesen werden. Die Elastizitätsmoduln und Schubmoduln sind in Anlehnung an Neuhaus [4] berechnet worden.

Die Schraube wird mit Balkenelementen modelliert und mittels nichtlinearer Federn mit den Volumenelementen verbunden, die Kraft-Verschiebungs-Beziehung der Federn stellt das Herausziehverhalten der Schraube idealisiert dar. Den Balkenelementen wird ein definierter Temperatureausdehnungskoeffizient 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 realitätsnah berechnet werden.

Der Einschraubvorgang wird schrittweise simuliert. Bei jedem Schritt wird die Schraube um eine Elementhöhe weiter „eingedreht“. Die Verschiebungen eines Berechnungsschrittes werden gespeichert und beim nächsten Schritt wieder auf das System aufgebracht. Zusätzlich werden die Federeigenschaften abhängig vom letzten Berechnungsschritt angepasst.

Das Modell wurde im Rahmen des Doktorandenkolloquiums Holzbau Forschung + Praxis 2010 bereits detailliert vorgestellt (siehe [2]).

### 3.2 Berechnungsergebnisse

Für die beiden Varianten aus Abschnitt 2.2 sind Berechnungen mit dem FE-Modell durchgeführt worden. In Abb. 5 und Abb. 6 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 deutlich 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 über eine größere Querschnittshöhe geeignet.

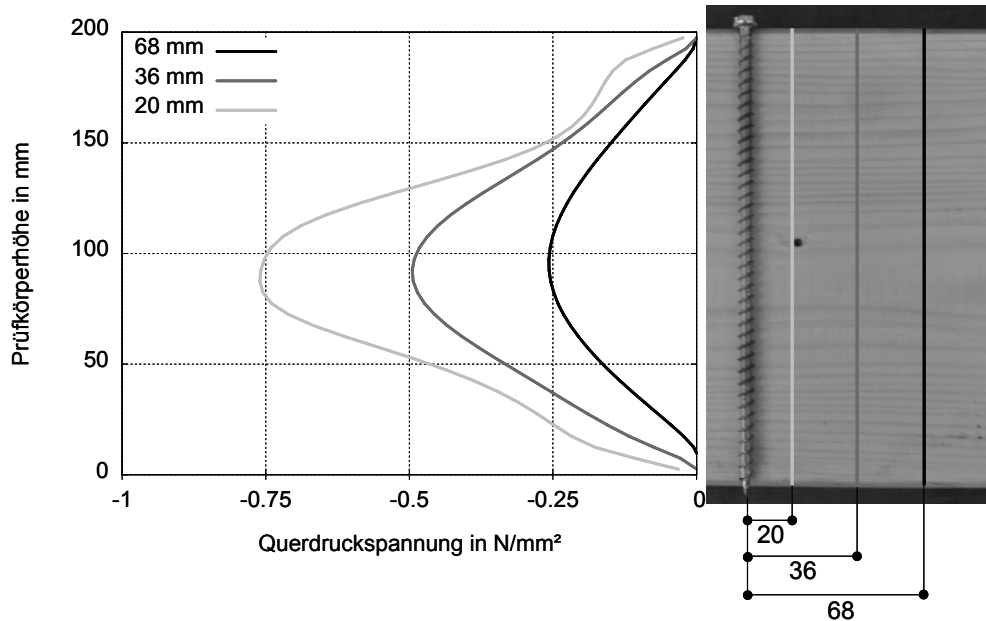


Abb. 5: Berechnete Druckspannungen über die Prüfkörperhöhe in Abhängigkeit des Abstandes zur Schraube in Faserrichtung für Variante 1.

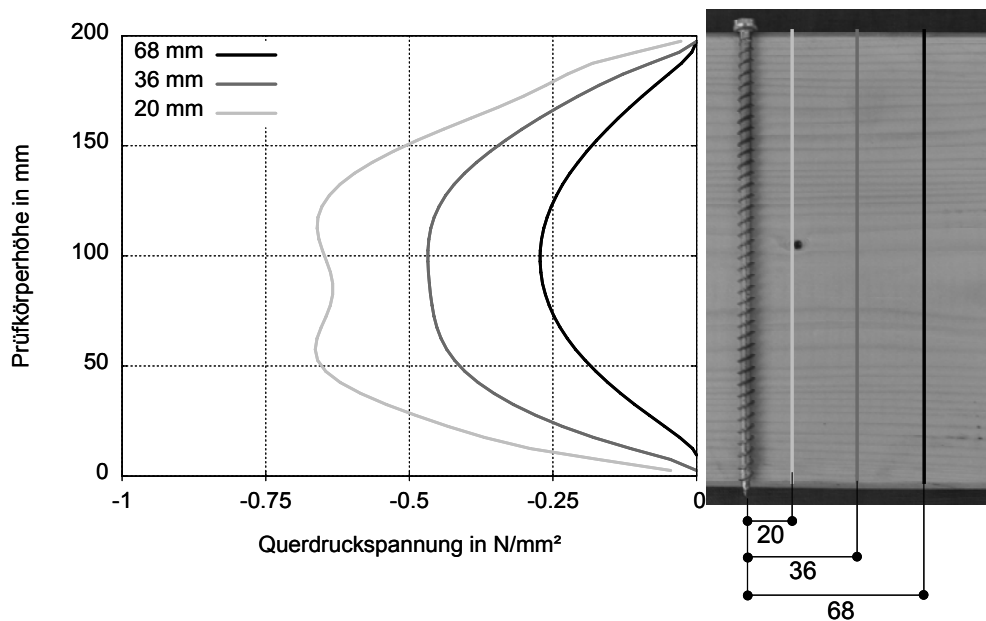


Abb. 6: Berechnete Druckspannungen über die Prüfkörperhöhe in Abhängigkeit der Abstandes zur Schraube in Faserrichtung für Variante 3.

#### 4. Validierung des Modells durch Einschraubversuche

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 Prüfkorpereigenschaften 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. Zur Messung der Querdruckkräfte wurden FSR-Sensoren verwendet (siehe [2]). Abb. 7 zeigt drei Prüfkörper mit Messhöhen von 50 mm, 100 mm und 150 mm.



Abb. 7: Prüfkörper für Einschraubversuche mit Spannschrauben. Druckmessung jeweils in den Einschraubtiefen 50 mm; 100 mm und 150 mm.

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 vermieden.

Versuche zur Messung der Vorspannwirkung wurden mit Schrauben der Varianten 1 und 3 durchgeführt. In Abb. 8 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  $0,5 \text{ N/mm}^2$  erreicht werden. Im Vergleich hierzu beträgt die charakteristische Querkzugfestigkeit von Holz  $0,5 \text{ N/mm}^2$ . Hieraus resultiert eine deutliche Vergrößerung der rechnerisch aufnehmbaren Querkzugspannungen.

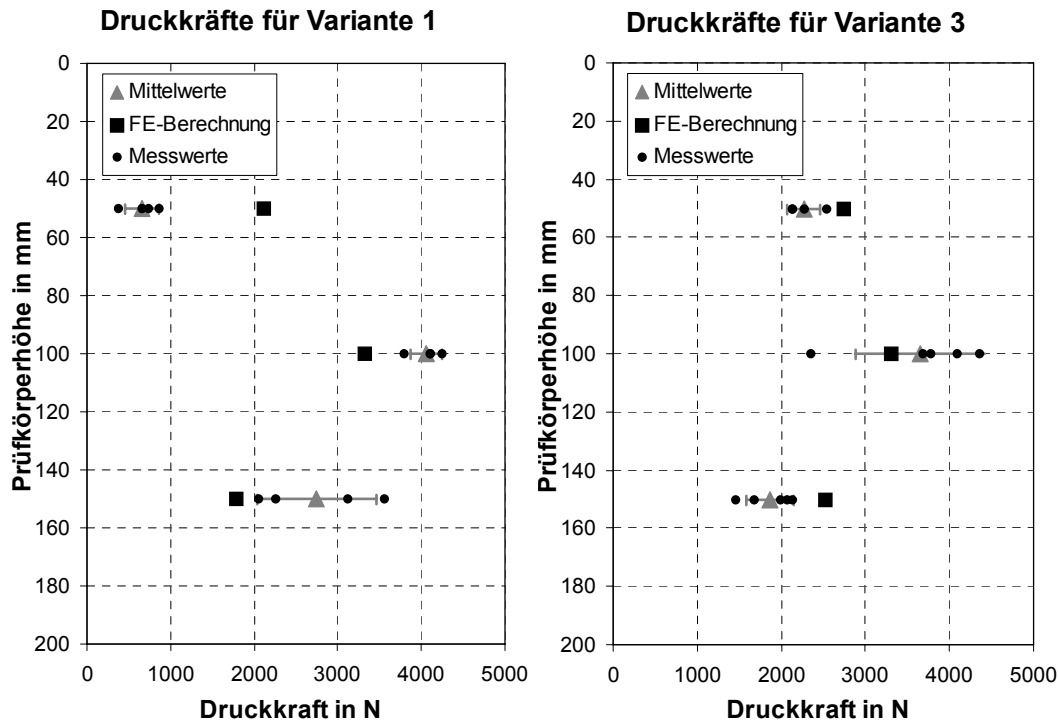


Abb. 8: Ergebnisse zweier Versuchsreihen für Schrauben der Variante 1 und Variante 3.

## 5. Schlussfolgerung und Ausblick

Die Ergebnisse der Einschraubversuche haben gezeigt, dass mit den Spanschrauben nicht unerhebliche Querdruckvorspannungen aufgebracht werden können. Mit dem entwickelten Finite-Elemente-Modell können Aussagen über die zu erwartende Querdruckspannung gemacht werden und die Gewindevariation für unterschiedliche Anwendungen optimiert werden.

Des Weiteren muss das Langzeitverhalten der Spanschraube in Bezug auf Relaxation, Schwinden und Quellen untersucht werden. Dazu sind Versuche mit unterschiedlichen klimatischen Bedingungen geplant, bzw. in der Durchführung.

Darüber hinaus sollen die Schrauben als Verstärkungselemente für Ausklinkungen und Durchbrüchen untersucht werden. Ein weiteres Anwendungsgebiet kann die Schraubenpressklebung sein. Die Presskraft, die durch die Spanschrauben aufgebracht werden kann, ist wesentlich höher als bei Teilgewindeschrauben, die derzeit für die Schraubenpressklebung verwendet werden.

## 6. Literatur

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