

# Selbstbohrende Holzschrauben mit veränderlicher Gewindesteigung

Dipl.-Ing.  
Michael Steilner

Univ.-Prof. Dr.-Ing.  
Hans Joachim Blaß

Holzbau und  
Baukonstruktionen  
Karlsruher Institut für  
Technologie (KIT)

michael.steilner@kit.edu



## Zusammenfassung

Zur Verstärkung von Holzbauteilen bei Querkzugbeanspruchung wird eine Schraube mit veränderlicher Gewindesteigung entwickelt, mit der eine Querdrukvorspannung im Holz erzeugt werden kann. Hierzu müssen die Einflüsse der veränderlichen Gewindesteigung auf die Spannungsverteilung im Holz betrachtet werden, um so die Änderungen der Gewindesteigung an die Eigenschaften des Holzes anpassen zu können. Es wird ein Finite Elemente Modell entwickelt, mit dem Berechnungen über die Vorspannwirkung der Schraube durchgeführt werden. Des Weiteren wird ein Sensor vorgestellt, der sich für die Messung der Flächenpressung zwischen den Brettlagen von Brettschichthölzern eignet. Die Messergebnisse werden zur Validierung des FE-Modells herangezogen.

## 1 Einleitung

Querkzugverstärkungen von Holzbauteilen mit selbstbohrenden Vollgewindeschrauben sind inzwischen stand der Technik. Mit Vollgewindeschrauben werden in Bereichen mit großer Querkzugbeanspruchung, zum Beispiel bei Ausklinkungen und Durchbrüchen, die Querkzugkräfte über den gesamten Holzquerschnitt verteilt. Zur Verbesserung der Wirkung der Querkzugverstärkung wird im Rahmen eines Forschungsvorhabens eine Schraube entwickelt, die aufgrund ihrer veränderlichen Gewindesteigung entlang der Schraubenachse eine Querdrukspannung im Holz erzeugt. Diese Vorspannung des Holzes soll die Tragfähigkeit bei Querkzugbeanspruchung erhöhen und das Auftreten von Rissen minimieren.

## 2 Schrauben mit veränderlicher Gewindesteigung

### 2.1 Versuchsmuster

Abb. 1 zeigt die Schraubengeometrie der ersten Versuchsmuster mit drei Gewindeabschnitten. An der Schraubenspitze im Bereich I weist die Schraube eine konstante Gewindesteigung  $p_0$  auf. Die Gewindesteigung wird im Bereich II funktional verringert bis sie im Bereich III  $p_1$  erreicht hat. Für die ersten Versuche standen drei verschiedene Durchmesser und vier Gewindegeometrien zur Verfügung.

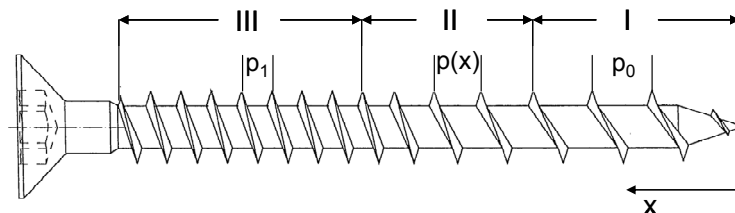


Abb. 1: Schraubengeometrie des Versuchsmusters. Bereich I und III mit konstanter Gewindesteigung  $p_0$  und  $p_1$ . Bereich II mit Übergang von  $p_0$  zu  $p_1$  mit veränderlicher Steigung  $p(x)$

## 2.2 Eindrehen von Schrauben mit veränderlicher Gewindesteigung in Holz

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 Gewindeunterschiede zu groß, so wird die Holzmatrix zerstört und eine Kraftübertragung zwischen Schraube und Holz ist nicht mehr möglich. Abb. 2 zeigt vier Versuchsmuster nach dem Einschrauben. Die Zerstörung der Holzmatrix im oberen Bereich unter dem Schraubenkopf ist deutlich zu erkennen.

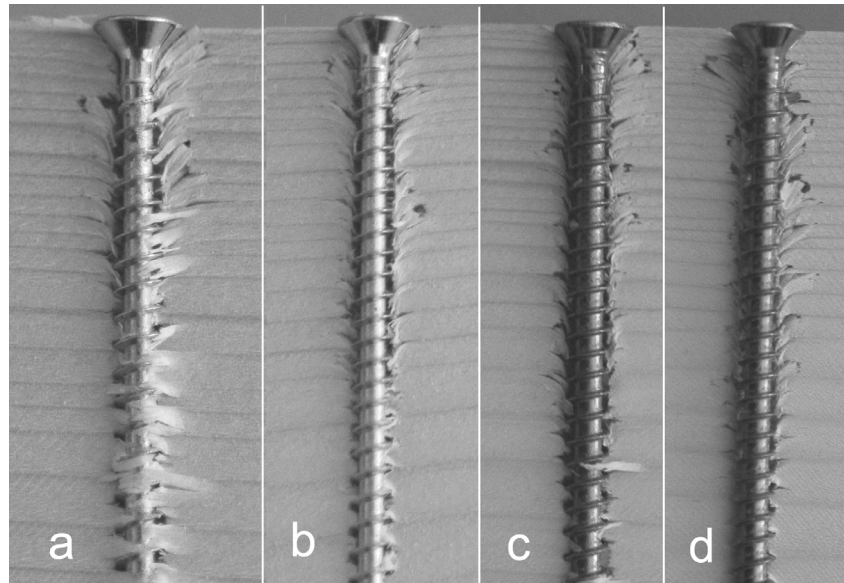


Abb. 2: *Eingedrehte Schrauben mit veränderlicher Gewindesteigung.*  
Schraube a: 4x70; b: 5x120; c: 6x160; d: 6x160V

Die theoretischen Stauchungen, die aus der Gewindeänderung resultieren, lassen sich durch die Gewindeänderungsfunktion berechnen. Das Integral über der Differenz der Gewindesteigung beschreibt die Differenz des Schraubenweges im Bezug auf die Einschraubtiefe

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

mit

$p(x)$  Gewindesteigung am Punkt  $x$   
 $p_0$  Anfangssteigung an der Schraubenspitze

Nach Blaß et. al. [1] ist die maximal aufnehmbare 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, damit die Holzmatrix nicht zerstört wird.

## 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 Abb. 3 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 2 eine geringere Steigungsänderung, die auf einer größeren Länge von 163 mm ausgeführt ist. In Abb. 4 ist zu erkennen, dass die daraus resultierenden Wegdifferenzen für beide Varianten etwa gleich groß sind, und die Wegdifferenzen für beide Varianten unter der Grenzverschiebung  $\delta_{ax}$  liegen.

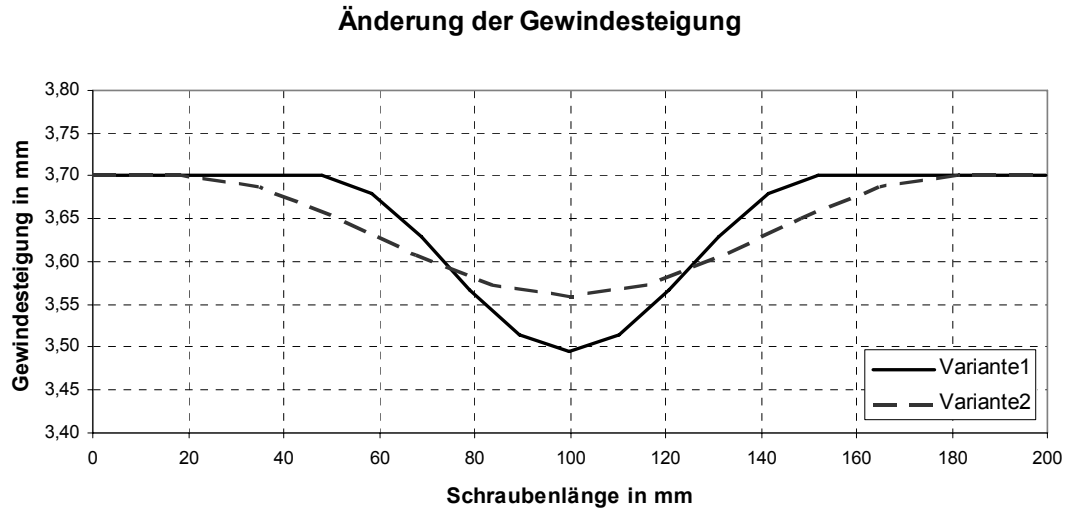


Abb. 3: Änderung der Gewindesteigung für die Spannschrauben für Variante 1 und Variante 2. Schraubenspitze bei 0 mm; Schraubenkopf bei 200 mm

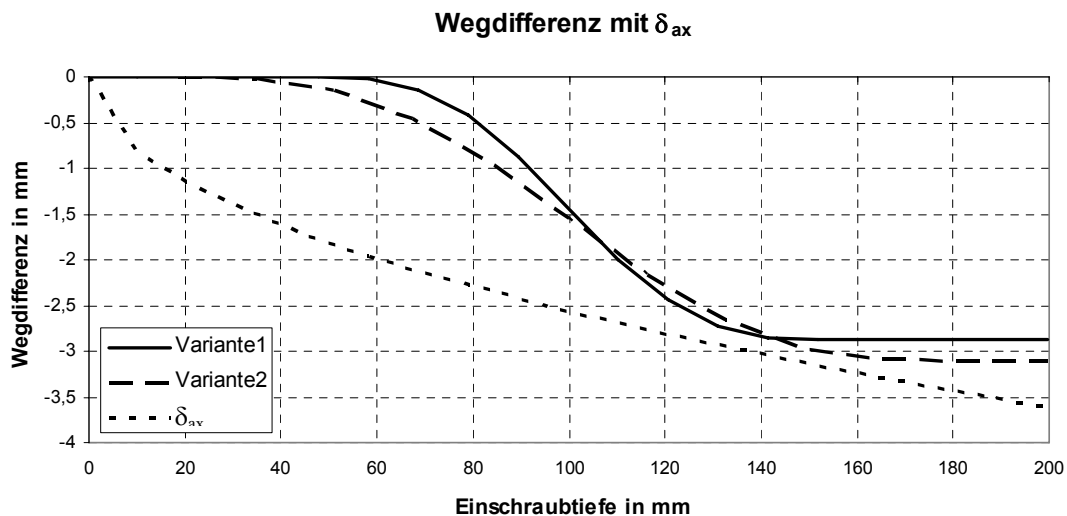


Abb. 4: Wegdifferenz und  $\delta_{ax}$  in Abhängigkeit der Einschraubtiefen für Variante 1 und 2

### 3 Numerische Betrachtung der Vorspannwirkung

#### 3.1 Konzept

Mit dem Finite Elemente Programm ANSYS wurde für die Schraube mit veränderlicher Gewindesteigung ein Modell entwickelt, in dem das Holz mit Volumenelementen (SOLID45) abgebildet wird, 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 (BEAM23) abgebildet und mittels nichtlinearer Federn (COMBIN39) mit den Volumenelementen verbunden.

### 3.2 Modellierung der Verbindung Schraube-Holz

Bejtka [3] beschreibt ein typisches Kraft-Verschiebungs-Diagramm bei Herausziehversuchen mit selbstbohrenden Holzschrauben, das in Abb. 5 abgebildet ist. Der Auszieh Widerstand kann mit der Gleichung (3) berechnet werden.

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

Für die Modellierung der nichtlinearen Feder wird ein Federgesetz angenommen, dessen Kraft-Verschiebungs-Diagramm (Abb. 5) das Herausziehverhalten idealisiert darstellt. Nach einem elastischen Bereich folgen ein kurzer plastischer Bereich und anschließend das Versagen der Feder.

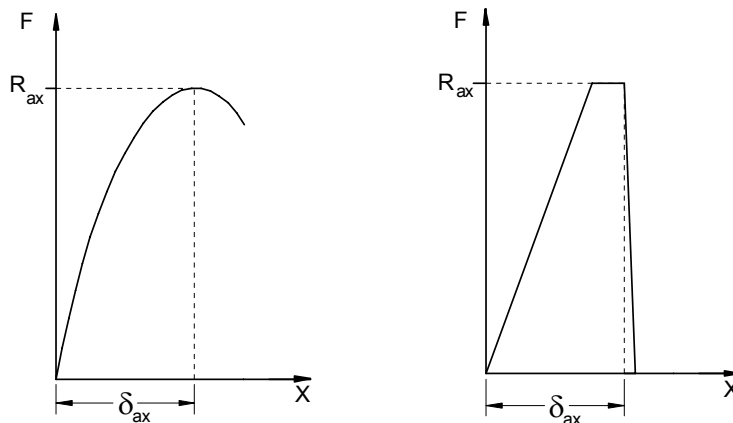


Abb. 5: Typisches Kraft-Verschiebungs-Diagramm eines Herausziehversuches mit selbstbohrenden Holzschrauben (links). Kraft-Verschiebungs-Diagramm für eine modellierte nichtlineare Feder mit COMBIN39 Element (rechts)

### 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 Gewindegängen 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 Temperaturverlauf der Balkenelemente wird der Differenz des Gewindevlaufes angepasst. So ergibt sich für den Temperaturexpansionskoeffizienten  $\alpha_T = 1/p_0$ . Damit wird die Gewindeänderung  $\Delta p = p_0 - p(x)$  durch eine Temperaturänderung  $\Delta T = T_0 - \Delta p$  des Elementes simuliert.

Die Simulation des Einschraubvorganges wird in Schritten vollzogen. Bei jedem Schritt wird die Schraube um eine Elementhöhe weiter „eingedreht“. Dadurch wird bei jedem Schritt eine Feder mehr im Modell benötigt. Abb. 6 zeigt schematisch das schrittweise „Eindrehen“ der Schraube im Modell.

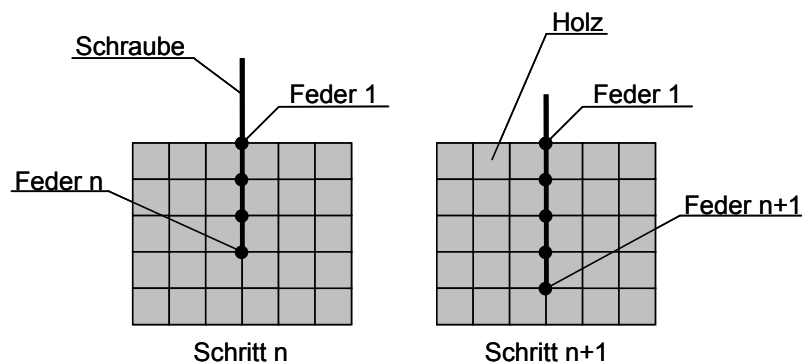


Abb. 6: Schrittweises Eindrehen der Schraube im Modell

Die Verschiebungen eines Berechnungsschrittes werden gespeichert und beim nächsten Schritt wieder auf das System aufgebracht. Zusätzlich werden die Federeigenschaften abhängig vom letzten Berechnungsschritt angepasst. Abb. 7 zeigt, wie das Kraft-Verschiebungs-Diagramm der jeweiligen Feder für die folgende Berechnung in Abhängigkeit der Federverschiebung verändert wird. Somit überträgt die Schraube erst dann Kräfte auf das System, wenn sie die Position der vorherigen Berechnung eingenommen hat. Wird die größtmögliche Federverschiebung  $\delta_{ax}$  erreicht, wird die Federsteifigkeit auf einen sehr kleinen Wert gesetzt. Die Feder kann keine Kräfte mehr übertragen, auch wenn die Verschiebungen wieder geringer werden. Anschließend wird die Temperaturänderung auf die Schraube aufgeprägt und das System berechnet.

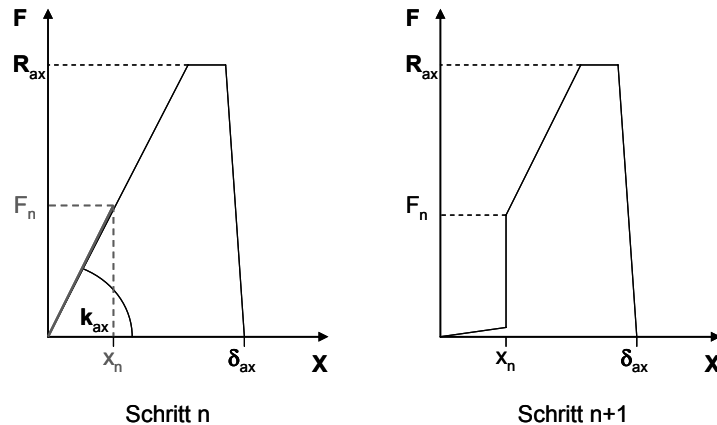


Abb. 7: Veränderung des Kraft-Verschiebungs-Diagramms der Federverbindung in Schritt n+1 in Abhängigkeit der Verschiebung in Schritt n

### 3.4 Berechnungsergebnisse

Für die beiden Varianten aus Abschnitt 2.3 sind Berechnungen mit dem FE-Modell durchgeführt worden. In Abb. 8 sind die Druckspannungen  $\sigma_y$  im Holz über die Höhe des Prüfkörpers in Abhängigkeit vom Abstand zur Schraube in Faserrichtung dargestellt. Die Schrauben nach Variante I erzeugen eine stärkere Druckspannung in der Mitte des Prüfkörpers, an den Rändern wird sie aber schnell schwächer. Die Variante II erreicht eine geringere Vorspannung in der Mitte, kann aber dafür über einen größeren Bereich eine höhere Vorspannung aufbringen.

Die beiden Varianten können für unterschiedliche Zwecke eingesetzt werden. Variante I bietet sich an, wenn bekannt ist, in welchem Bereich die Vorspannung wirken soll, z. B. bei Ausklinkungen. Variante II ist für eine generelle Vorspannung möglichst des ganzen Querschnitts geeignet.

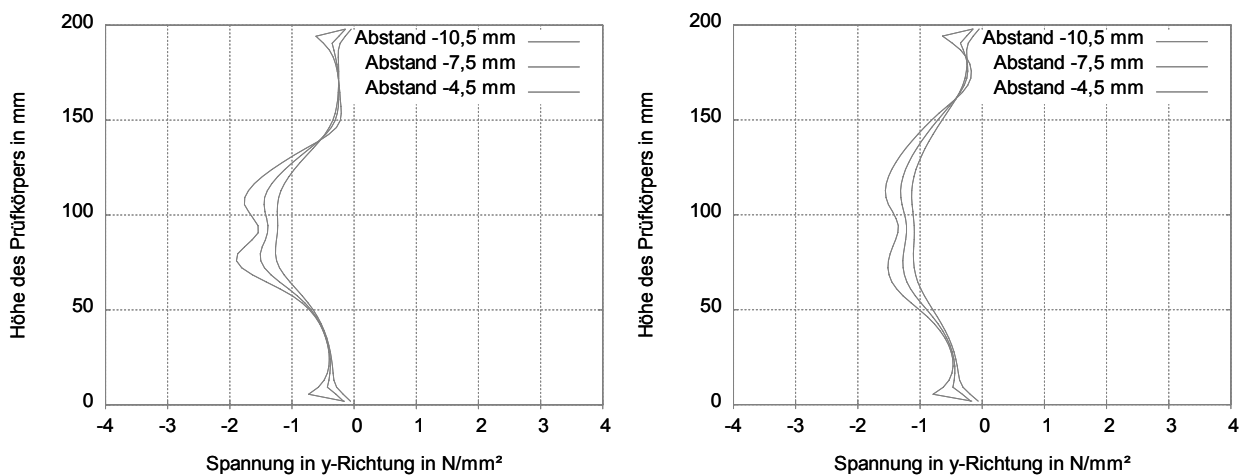


Abb. 8: Berechnete Druckspannungen über die Prüfkörperdicke in Abhängigkeit des Abstandes zur Schraube in Faserrichtung für Variante I (links) und Variante II (rechts)

## 4 Druckmessung mit Force-Sensing Resistor (FSR)

Der Force-Sensing Resistor (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. Abb. 9 zeigt eine fotografische Aufnahme und den schematischen Aufbau des Sensors.

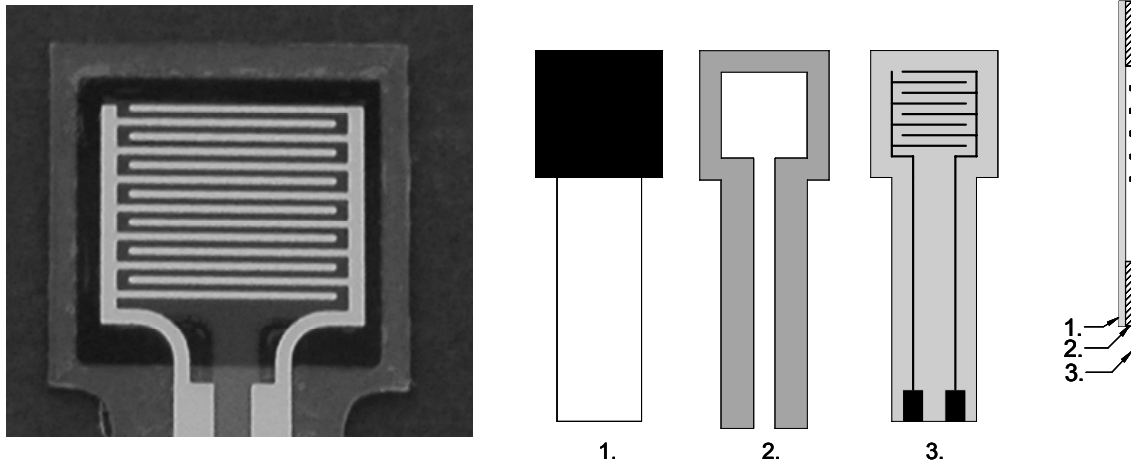


Abb. 9: Nahaufnahme eines Force-Sensing Resistors (FSR) und Aufbau eines FSR:  
1. Trägerfolie mit Beschichtung; 2. Klebeschicht; 3. Trägerfolie mit Elektrode

Um die Einflüsse der Spannschraube auf die Spannungsverteilung im Holz messen zu können, sind möglichst dünne Messelemente notwendig, die zwischen zwei Hölzern eingebaut werden. Der FSR ist mit 0,4 mm sehr dünn, allerdings ist zur Messung in größeren Flächen eine Lasteinleitungsschicht auf den Leiterbahnen notwendig. Hierfür werden 0,4 mm dicke Teflonplättchen verwendet, die die Dicke des Sensors auf 0,8 mm erhöhen. Die Verteilung der Druckspannungen in der Fläche wird über mehrere FSR Sensoren erfasst.

## 5 Weiteres Vorgehen

Zur Validierung des FE-Modells sollen Einschraubversuche mit beiden Varianten der Schrauben mit veränderlicher Gewindesteigung durchgeführt werden. Hierbei sollen die Kräfte zwischen mehreren Brettlagen gemessen und mit den berechneten Ergebnissen verglichen werden.

Mit Hilfe des Modells soll weiterhin eine Parameterstudie zur Optimierung der Gewindeänderung durchgeführt werden. Das FE-Modell soll so weiter entwickelt werden, dass damit mehrere Schrauben berechnet werden können, um eine für die Vorspannung optimale Positionierung der Schrauben zu ermitteln.

## 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