

[Kevin Hölz] (Hauptautor)  
[Mazen Ayoubi] (Co-Autor 1)  
[Thomas Gwosch] (Co-Autor 2)  
[Sven Matthiesen] (Co-Autor 3)

# Theoretische Modelle zum Verbundtragverhalten von Holzschrauben für die Schraubengestaltung

[Zusammenfassung] Holzschrauben sind wichtige Verbindungselemente für Holz-Holz oder Holz-Stahl-Bauteile und eignen sich zur Querdrukverstärkung. Bei diesen Verbindungen ist die maßgebende Eigenschaft die Tragfähigkeit, welche durch die Verbundwirkung zwischen Schraubengewinde und Holz bestimmt wird. Für die Gestaltung von Holzschrauben fehlen bislang geeignete Modelle, welche den Zusammenhang zwischen der Gewindegestalt und der Funktion Ausziehtragfähigkeit beschreiben. Ziel dieses Beitrags ist die Betrachtung der Modelle zum Verbundtragverhalten von Holzschrauben unter dem Gesichtspunkt der Schraubengestaltung. Als Ergebnis werden vier Anforderungen an Verbundtragmodelle für die Gestaltung aufgezeigt und eine Modellerweiterung vorgestellt. Die Erweiterung zur Spannungsverteilung bezüglich des Rotationswinkels zur Schraubenachse wird anhand von gefärbten Rissbildern experimentell untersucht. Die Nutzung der Modellerweiterung für die Gestaltung wird am Gewindeparameter Flankenwinkel aufgezeigt. Verbesserte Modelle zum Verbundtragverhalten können von Herstellern zur Optimierung der Schraubengeometrie genutzt werden sowie die Bestimmung eines wirtschaftlichen und gleichzeitig sicheren Bemessungsansatzes ermöglichen. Der Holzbau profitiert somit von höheren Tragfähigkeiten und einer höheren Zuverlässigkeit der Schraubenverbindung.

**Keywords:** [Holzschrauben; Verbindungselemente; Verbundtragverhalten; Tragverhalten, Spannungsverteilung; Verankerungslänge]

**Models for the bond behavior of wood screws for design: [Abstract]** Wood screws are important fasteners for timber-to-timber or timber-to-steel-connections as well as for compression reinforcement of beams. For these joints, the decisive property is the load-bearing capacity, which is determined by the bonding mechanisms between the screw thread and the wood. For the design of wood screws, there is a lack of suitable models that describe the relationship between the thread design and the load-bearing capacity. This paper aims to examine the models of the bond behavior of wood screws from the point of view of design. As a result, four requirements on load-bearing models for the design are shown and a model extension is presented. The extension to the stress distribution concerning the rotation angle to the screw

---

This is the author manuscript accepted for publication and has undergone full peer review but has not been through the copyediting, typesetting, pagination and proofreading process, which may lead to differences between this version and the Version of Record. Please cite this article as doi: 10.1002/bate.202100003

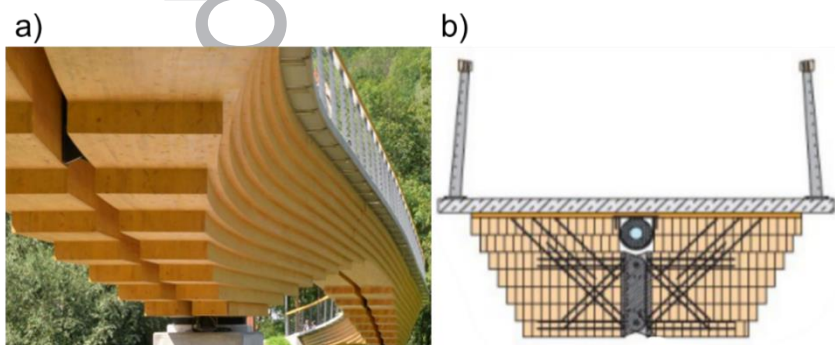
Submitted: 13-Jan-2021  
Revised: 14-Jul-2021  
Accepted: 07-Sep-2021

axis is investigated experimentally using colored crack patterns. The use of the model for design is shown on the parameter flank angle. Improved models of the bond behavior can be used by manufacturers to optimize the screw geometry as well as to enable of a safe and economic design approach. Timber engineering thus benefits from withdrawal capacities as well as higher reliability of the screw joint.

**Keywords** [wood screws; fasteners; bond behavior; load-bearing capacity; stress distribution; anchorage length]

## 1 Einleitung

Holz findet immer häufiger Verwendung im Bauwesen, da gerade Architekten und Planer die natürliche Struktur und die guten raumklimatischen Eigenschaften schätzen. Der Baustoff bietet in Bezug zur Ökologie und zur Nachhaltigkeit eine Vielzahl an Vorteilen. In der Praxis haben sich Holzschrauben zur Fügung und als Bewehrung von Holzbauteilen etabliert. In der Konstruktion von filigranen, schlanken Holzbauteilen haben sich dafür selbstbohrende Vollgewindeschrauben als effektive Methode erwiesen [1]. Ein Beispiel für eine solche Anwendung ist die Geh- und Radwegbrücke in Neckartenzlingen (s. **Bild 1**). Durch die Entwicklung des Schraubengewindes hin zu selbstbohrenden Schrauben, hat die Verwendung von Holzschrauben in den letzten Jahren deutlich zugenommen [2].



**Bild 1** Verwendung von Holzschrauben als Verbindungsmittel und zur Querdruckverstärkung am Beispiel der Geh- und Radwegbrücke in Neckartenzlingen als Ansicht a) und im Querschnitt b). **Quelle:** a) [3], b) [4]

Use of wood screws as fasteners and for lateral pressure reinforcement on the example of the foot and cycle path bridge in Neckartenzlingen as view a) and in cross-section b).

Axial belastete Holzschraubenverbindungen zur Bewehrung und Fügung können auf unterschiedliche Weisen versagen [5]. Von den drei möglichen Versagensarten (Stahlversagen, Durchzugsversagen des Schraubenkopfes und Ausziehversagen des Gewindes) ist das Ausziehversagen nach [6] die häufigste Versagensart, welche durch die Verbundwirkung zwischen Gewindegestalt und Holz beeinflusst wird [5] und die Ausziehtragfähigkeit begrenzt.

Die Ausziehtragfähigkeit (im Folgenden „Tragfähigkeit“ genannt) ist für die Zulassung der Holzschrauben eine wichtige Kenngröße und wird in Normversuchen nach DIN EN 1382:2016-07 [7] bestimmt. Für die Hersteller von Holzschrauben ist daher die Optimierung der Gewindegestalt bezüglich der Tragfähigkeit eine wichtige Entwicklungszielgröße. Das Wissen

darüber, welche Gewindeparameter einen Einfluss auf die Tragfähigkeit haben und wie groß dieser Einfluss ist, ist für die Gestaltung von Holzschrauben notwendig.

Der positive Einfluss eines größeren Gewindeaußendurchmessers auf die Tragfähigkeit wurde von Pirnbacher et al. [6] festgestellt. Für Hersteller von Holzschrauben ist der Außendurchmesser jedoch keine Optimierungsgröße, da dieser oft durch die Anwendung und die Bemessung vorgegeben ist. Somit bleibt eine Variation der Gewindeform als mögliche Optimierungsgröße, deren Einfluss auf die Tragfähigkeit bei unterschiedlicher Schraubentypen jedoch erst in wenigen Forschungsvorhaben, z.B. von Gaunt [8], Pirnbacher und Schickhofer [9] und Hübner [10] untersucht wurde. Parallel zur Faser konnten sowohl Gaunt [8] für Kiefernholz als auch Pirnbacher und Schickhofer [9] für Fichte keinen Einfluss der Gewindeform zeigen. Dagegen beobachtete Pirnbacher und Schickhofer [9] quer zur Faser, sowie unter  $45^\circ$  Winkel einen Einfluss der Schraubentypen auf die Tragfähigkeit. Welche Gewindeparameter diesen Effekt verursachen, konnte jedoch nicht gezeigt werden. Hübner [10] untersuchte den Einfluss der Gewindesteigung in Buche und in Fichte. Es konnte gezeigt werden, dass sich die Medianwerte der Tragfähigkeit für die Gewindesteigung sowohl parallel als auch quer zur Faser unterscheiden. Statistisch konnten diese Einflüsse mittels Welch-Test jedoch nur begrenzt nachgewiesen werden.

Auch bei Untersuchungen von Hoelz et al. [11] wurde der Einfluss der Gewindesteigung auf die Ausziehtragfähigkeit für einen rechtwinkligen Einschraubwinkel zur Faser in Fichte untersucht. Anstatt Holzschrauben wurden rechteckige Gewindemodelle verwendet. Es konnte mittels einer mehrfaktoriellen Varianzanalyse signifikant ermittelt werden, dass für einen Schraubendurchmesser von 8 mm eine kleinere Gewindesteigungen zu einer höheren Tragfähigkeit führt. Für Hersteller von Holzschrauben liefern diese Untersuchungen erste Anhaltspunkte, wie die Gewindegestalt gewählt werden sollte, um hohe Tragfähigkeiten zu erreichen.

Bislang wird die Tragfähigkeit jedoch meist unter den Gesichtspunkten der sich ändernden konstruktiven Eigenschaften von Holzwerkstoffen und der Bemessung analysiert, seltener jedoch unter dem Gesichtspunkt der Schraubenparameter [12]. So haben Berechnungsmodelle, beispielsweise von Frese et al. [13], Zarnani und Quenneville [14] oder Ringhofer et al. [15], nicht das Ziel, die Einflüsse zwischen Schraubenparametern und Tragfähigkeit zur Optimierung der Schraube zu ermitteln, sondern die Bemessung herstellerunabhängig zu unterstützen. Durch dieses Ziel bildet das Regressionsmodell von Frese et al. [13] keine Parameter des Gewindes ab, sondern verwendet zur Berechnung der Tragfähigkeit die Parameter Einschraubtiefe, Außendurchmesser und Holzdicke. Da keine Zusammenhänge zwischen der Gewindeform und der Tragfähigkeit abgebildet werden, sind diese für die Gestaltung von Gewinden nicht nutzbar. Für die Gestaltung ist neben dem Wissen der Zusammenhänge auch das Verständnis zu den zugrundeliegenden Mechanismen und den Ursache-Wirkungs-Beziehungen wichtig. Mit diesem Verständnis kann erklärt werden, weshalb beispielsweise der Einfluss der Gewindeparameter von dem Einschraubwinkel zur Faser abhängt. Dieses Verständnis wird in Verbundtragmodellen beschrieben. Bislang können die Unterschiede der

Tragfähigkeit bei verschiedenen Gewindeformen nicht erklärt werden, da Verbundtragmodelle für Holzschraubenverbindungen unter dem Gesichtspunkt Gestaltung kaum untersucht wurden.

## 2 Untersuchungsziel

Ziel dieses Beitrags ist die Ableitung von Anforderungen an Modelle zum Verbundtragverhalten sowie die Erweiterung eines bestehenden Modells zur Unterstützung der Schraubengestaltung.

Diese Modelle zum Verbundtragverhalten ermöglichen eine gezielte Optimierung von Holzschrauben mit höherer Ausziehtagfähigkeit. Aufgrund von Beschreibungen der wirkenden Mechanismen können auch Aussagen zur Systemzuverlässigkeit der Schraubenverbindung getroffen und die Bemessung verbessert werden. Neben Schraubenherstellern profitieren somit auch die Anwender von den Verbundtragmodellen.

## 3 Modelle zum Verbundtragverhalten

In **empirischen Modellen** wird der Einfluss der Gewindep Parameter auf die Tragfähigkeit experimentell ermittelt und beschrieben. Obwohl Untersuchungen zeigen, dass unterschiedliche Schraubengeometrien die Tragfähigkeit beeinflussen, werden diese in Berechnungsmodell beispielsweise von Frese et al. [13] nicht abgebildet. Dies liegt vor allem am Fokus der Modelle für die Bemessung.

**Theoretische Modelle** zum Verbundtragverhalten unterscheiden sich insofern von empirischen Modellen, als dass diese nicht nur die Abhängigkeiten der unabhängigen und abhängigen Variablen beschreiben, sondern ebendiese zusätzlich durch zugrundeliegenden Verbundmechanismen erklären [16,17]. Von theoretischen Modellen beschriebene Beziehungen sind in empirischen Untersuchungen beobachtbar, wenn das Modell die Beziehungen korrekt erfasst hat [16].

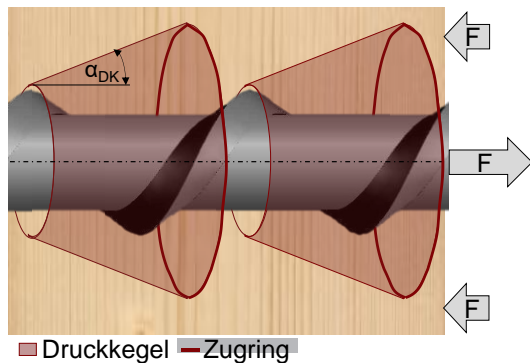
In numerischen **Simulationen** wie in [18,19] liegt der Fokus auf der Nachbildung des Holz- oder Verbundtragverhaltens und der Ermittlung von Einflüssen auf dieses. Allerdings können in Simulationen keine neuen Versagensmechanismen entdeckt, sondern nur Materialgesetze und Bruchmechanismen berücksichtigt werden, welche zuvor in experimentellen Untersuchungen ermittelten wurden [20].

Daher wird im Folgenden der Fokus auf theoretische Modelle sowie auf die Beobachtung dieser Effekte in empirischen Modellen gelegt.

### 3.1 Modelle zum Verbundtragverhalten für die Gestaltung von Holzschrauben

Ein theoretisches Modell zum Verbundtragverhalten ist das Druckkegel-Zugring-Modell. Das Ziel des Modells, eine wirklichkeitsnahe Darstellung der Beanspruchung der Schraubenverbindung abzubilden, bietet eine Unterstützung für die Gestaltung.

Ursprünglich wurde dieses Modell von Tefers [21] für gerippte Bewehrungsstäbe entwickelt und von Ayoubi [1] auf Holzschrauben, wie in **Bild 2** dargestellt, übertragen.



**Bild 2** Druckkegel-Zugring-Modell an einer Holzschraubenverbindung nach Ayoubi [1]. Es sind die resultierenden Druckkegel unter dem Winkel  $\alpha_{DK}$  sowie die Zugringe dargestellt.

Compression cone-tension ring model on a wood screw connection according to Ayoubi [1]. Shown are the resulting compression cones under the angle  $\alpha_{DK}$  as well as the tension rings.

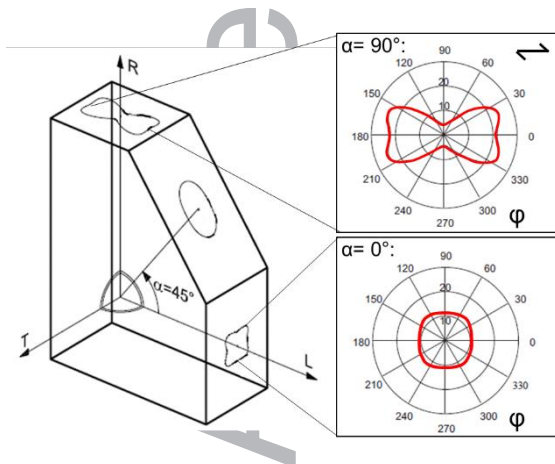
Unter axialer Belastung stützt sich die Holzschraube über die Gewindeflanken gegen das Holz ab. Diese Kraftabstützung erfolgt in einem Winkel  $\alpha_{DK}$  zu den Flanken, wodurch sogenannte Druckkegel entstehen. Durch den resultierenden Spannungszustand entstehen zur Gewährleistung des Kräftegleichgewichts auch Ringspannungen, Zugringe genannt. Diese Spannungen begründen bei Überschreitung der Holzfestigkeit die Initiierung und Erweiterung von Rissen. [1]

Die kreisförmigen sowie Ansätze zu ellipsenförmigen Druckkegel und Zugringe, welche von Ayoubi [1] beschrieben werden, sind vom Einschraubwinkel  $\alpha$  zur Holzfaser abhängig. Hierbei wurden die Formen dem Modell von Bewehrungsstäben mit umlaufenden Rippen entnommen. Bei Holzschrauben sind die Flanken nicht umlaufend, sondern helixförmig, sodass bei einer konsequenten Abbildung des Schraubengewindes Druckspannungen entlang der Helix der Schraubenflanken entstehen. Es bilden sich demnach helixförmige Druckkegel und helixförmige Zugringe. Diese spezielle Spannungsverteilung wird durch das aktuelle Modell nicht abgebildet. Es ergibt sich eine erste Anforderung an Modelle zum Verbundtragverhalten: Die Darstellung der Spannungsverteilung ist aufgrund der geometrischen Ausprägung des Schraubengewindes nicht kreisförmig, sondern helixförmig.

Das Verbundtragverhalten wird neben dem Schraubengewinde und dem Einschraubwinkel auch durch die Materialeigenschaften des Holzes bestimmt. Die Schubfestigkeit der Holzart Esche wurde von Hübner [10] für Holzschrauben mit einem Durchmesser von 10 mm und geringer Einbindtiefe untersucht. Es konnte dabei Formel 1 zur Berechnung der Schubfestigkeitsverteilung  $f_{ax}$  abhängig vom Einschraubwinkel  $\alpha$  zur Holzfaser sowie vom polaren Rotationswinkel um die Schraubenachse  $\varphi$  und dem Schraubenaußendurchmesser  $d$  ermittelt werden [10].

$$f_{ax}(\alpha, \varphi, d) = \frac{1}{\left[ \frac{\cos^2 \alpha}{f_{v,\varphi=0^\circ}(\alpha, d)} - \frac{\sin^2 \alpha}{f_{v,\varphi=90^\circ}(\alpha, d)} \right] \cos 2\alpha + \frac{\sin^2 \alpha}{f_{v,\varphi=45^\circ}(\alpha, d)}} \quad (1)$$

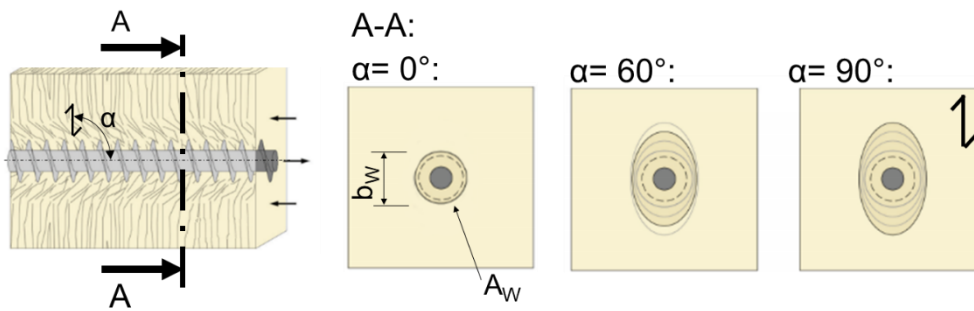
Die daraus resultierende Schubfestigkeitsverteilung ist in **Bild 3** dargestellt. Für einen Einschraubwinkel parallel zur Holzfaser wurde eine rechteckige Form mit abgerundeten Ecken berechnet. Für einen Einschraubwinkel rechtwinklig zur Holzfaser ist eine schmetterlingsartige Form der Schubspannung erkennbar. Diese Schmetterlingsform weist parallel zur Faserrichtung etwa sechsmal höhere Werte auf als quer zur Faserrichtung [10].



**Bild 3** Abhängigkeit der Schubfestigkeitsverteilung  $f_{ax}$  der Holzart Esche von dem Einschraubwinkel  $\alpha$  sowie vom Rotationswinkel  $\varphi$  um die Schraubenachse. Parallel zur Faser entspricht einem Einschraubwinkel von  $\alpha = 0^\circ$ . Schmetterlingsform bei einem Einschraubwinkel von  $\alpha = 90^\circ$ . Quelle: [10]

Dependency of the shear strength of the wood species ash on the screw-in angle  $\alpha$  as well as on the rotation angle  $\Phi$  around the screw axis. Parallel to the grain corresponds to a screw-in angle of  $\alpha = 0^\circ$ . Butterfly shape with a screw-in angle of  $\alpha = 90^\circ$ .

Diese unterschiedlichen Schubfestigkeiten resultieren auch in einer ungleichen Verteilung der Kraftübertragung [10]. So beschreibt Ayoubi [1], aufgrund der geringeren Steifigkeit des Holzes, einen kleineren Radius der Zugringe bei einem faserparallelen Einschraubwinkel. Weiterhin wird, wie in **Bild 4** dargestellt, eine veränderte Form der Zugringe beschrieben. Bei faserparallelem Einschraubwinkel ( $\alpha = 0^\circ$ ) ergibt sich ein kreisförmiger, bei rechtwinkligem Einschraubwinkel ein elliptischer Zugring. Die längere Halbachse der Ellipse wird parallel zur Holzfaser gebildet [1]. Dies wurde anhand von experimentellen Untersuchungen an Schnittbildern von Brett-schichtholzbauteilen mit ausgezogener Vollgewindeschraube, mit einem Durchmesser von 12 mm und großer Einbindelänge aufgestellt [1]. Mittels eines Lösungsalgorithmus in Abhängigkeit vom Einschraubwinkel  $\alpha$  wurde durch die Parameter Flächenanteil  $A_w$  (zwischen  $16\pi d^2$  und  $60\pi d^2$ ) und die Breite  $b_w$  (zwischen  $4d$  und  $10d$ ) die Mantelfläche der Schraube abgebildet [22]. Dabei wurde für die Einschraubwinkel  $\alpha$  dazwischen vereinfachend ein lineares Verhältnis angenommen (s. **Bild 4**) [22].



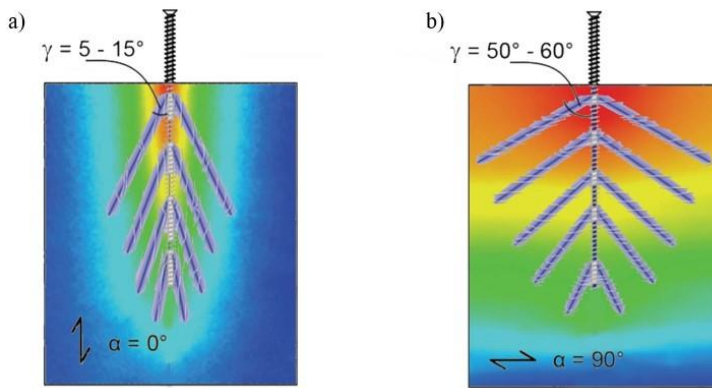
**Bild 4** Zugring für faserparallelen Einschraubwinkel ( $\alpha = 0^\circ$ ), rechtwinkligen Einschraubwinkel ( $\alpha = 90^\circ$ ) sowie für den Zwischenzustand  $\alpha = 60^\circ$  zur Faserrichtung. Die längere Halbachse der Ellipse verläuft parallel zur Holzfaser. **Quelle:** [1,22]

Tension ring for screw-in direction parallel to the grain ( $\alpha = 0^\circ$ ), screw-in direction perpendicular to the grain ( $\alpha = 90^\circ$ ) as well as for the intermediate state  $\alpha = 60^\circ$ .  
The longer half axis of the ellipse is parallel to the grain.

Die Abhängigkeit der Lastausbreitung vom Rotationswinkel um die Schraubenachse bildet sich ebenfalls im Versagenverhalten ab. So konnte von Hoelz et al. [20] in Untersuchungen mit rechtwinkligem Einschraubwinkel in Fichte bei geringer Einbindetiefe ein variierendes Versagenverhalten für unterschiedliche Rotationswinkel beobachtet werden. In weiteren experimentellen Untersuchungen von Hoelz et al. [11] konnte auch eine Abhängigkeit auf die Ausziehtragfähigkeit ermittelt werden. Hierbei wurden Gewindemodelle, bei denen das Gewinde abgewickelt auf einem rechteckigen Grundkörper aufgebracht ist, bei rechtwinkligem Einschraubwinkel mit unterschiedlichen Rotationswinkeln ausgezogen. Das Gewinde parallel zur Holzfaser erzielte im Mittelwert eine Ausziehtragfähigkeit von 5,45 kN (Standardabweichung 1,12 kN). Wohingegen senkrecht zur Faser eine Ausziehtragfähigkeit von 7,95 kN (Standardabweichung 1,37 kN) erreicht wurde. Das Gewinde parallel zur Faser erzielte daher eine kleinere Tragfähigkeit als quer zur Faser.

Übereinstimmend beschreiben somit die Schubfestigkeiten von Hübner [10], die Lastausbreitung von Ayoubi [1] als auch die gemessenen Tragfähigkeiten von Hoelz et al. [11], dass eine Abhängigkeit der Spannungsverteilung zum Rotationswinkel um die Schraubenachse besteht. Bei einem Rotationswinkel von  $\varphi = 0^\circ$  im Vergleich zu  $\varphi = 90^\circ$  werden höhere Werte für die Schubfestigkeiten, eine größere Lastausbreitung sowie eine höhere Tragfähigkeit erzielt. Allerdings ist die Form dieser Abhängigkeit zum Rotationswinkel für eine rechtwinklige Einschraubrichtung unklar. Ayoubi [1] gibt eine elliptische Form, während Hübner [10] eine schmetterlingsartige Form angibt. Damit ergibt sich die weitere Anforderung an Modelle zum Verbundtragverhalten: Die Abbildung der Spannungsverteilung in Abhängigkeit vom Rotationswinkel um die Schraubenachse.

Einen Einfluss auf das Verbundtragverhalten hat auch die Verankerungslänge. In Untersuchungen an Nadelholz wurden sowohl lineare Zusammenhänge [6] als auch exponentielle Zusammenhänge [23] zur Verankerungslänge ermittelt. Ayoubi und Trautz [24] haben den Einfluss der Verankerungslänge an Brettschichtholz experimentell über eine fotooptische Flächenmessung zur Darstellung der Dehnungsverteilung an der Holzoberfläche aufgezeigt. Diese Dehnungen der Holzoberfläche sowie die daraus ermittelte Lastausbreitung  $\gamma$  für die Einschraubwinkel von  $0^\circ$  sowie  $90^\circ$  sind in **Bild 5** dargestellt.



**Bild 5** Dehnungen der Holzoberfläche mit Darstellung der Lastausbreitung  $\gamma$  abhängig von der Verankerungslänge für die Einschraubrichtung  $\alpha = 0^\circ$  (a) und  $\alpha = 90^\circ$  (b).

Quelle: [24]

Strains of the wood surface with representation of the load propagation  $\gamma$  depending on the anchorage length for the screw-in direction  $\alpha = 0^\circ$  (a) and  $\alpha = 90^\circ$  (b).

Es konnte ein Zusammenhang der Verbundspannungen über die Einbindetiefe ermittelt werden. Weiterhin konnte festgestellt werden, dass der Lastausbreitungswinkel  $\gamma$  zwischen  $5^\circ$  bei parallelem und  $60^\circ$  bei rechtwinkligem Einschraubwinkel beträgt.

Diese Abhängigkeit der Verbundspannung über die Verankerungslänge wird im Druckkegel-Zugring-Modell von Ayoubi [1] nicht beschrieben. Zudem ist sowohl die Abhängigkeit des Lastausbreitungswinkels vom Rotationswinkel um die Schraubennachse als auch der Zusammenhang des Lastausbreitungswinkels zum Kraftabstützungswinkel  $\alpha_{DK}$  der einzelnen Druckkegel unklar. Eine weitere Anforderung an Modelle zum Verbundtragverhalten ergibt sich daraus: Die Abbildung der Spannungsverteilung in Abhängigkeit der Verankerungslänge.

Die Verbundmechanismen und die über den Verbund übertragbaren Kräfte werden neben dem Einschraubwinkel  $\alpha$  zur Holzfasern, den mechanischen Eigenschaften des Holzes auch von der Gewindegestalt beeinflusst [1]. Um für die Gestaltung von Holzschrauben einen Mehrwert zu liefern, ist die Beschreibung dieser Zusammenhänge mit den Modellen zum Verbundtragverhalten notwendig. In einer Untersuchung von Hoelz et al. [11] wurde das Druckkegel-Zugring-Modell genutzt, um den Einfluss der Gewindesteigung auf die Spannungsverteilung und somit auf die Tragfähigkeit zu erklären [11]. Für die Einflüsse weiterer Gewindep Parameter sind diese Erklärungen ausstehend. Eine vierte Anforderung an Modelle zum Verbundtragverhalten ist: Die Beschreibung der Auswirkung von Gewindep Parametern auf die Spannungsverteilung und die Verbundmechanismen.

### 3.2 Anforderungen an Verbundtragmodelle für eine Unterstützung in der Gestaltung

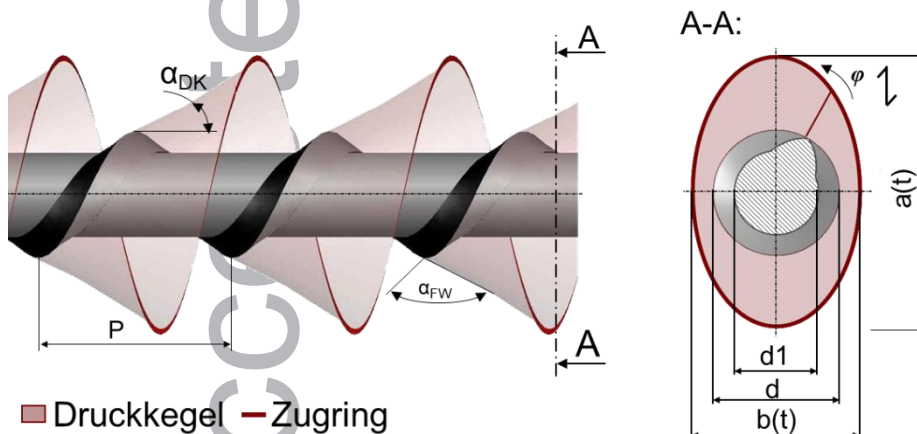
Zusammenfassend kann aus den bestehenden theoretischen Modellen sowie den Beobachtungen dieser Effekte für empirische Modelle abgeleitet werden, dass diese nicht alle notwendigen Aspekte für eine Nutzung in der Schraubengestaltung enthalten. Es konnten die folgenden Anforderungen an Modelle zum Verbundtragverhalten identifiziert werden, welche aktuell nur unzureichend abgebildet werden:



- Helixförmige Spannungsverteilung
- Spannungsverteilung abhängig zum Rotationswinkel um die Schraubenachse
- Spannungsverteilung abhängig von der Verankerungslänge
- Auswirkung der Gewindeparameter auf die Spannungsverteilung und die Verbundmechanismen

#### 4 Modellerweiterungen

Für eine Unterstützung in der Gestaltung müssen Modelle zum Verbundtragverhalten die aufgeführten Anforderungen berücksichtigen. Im Folgenden wird ein Vorschlag für eine Modellerweiterung für das Druckkegel-Zugring-Modell entsprechend dieser Anforderungen vorgestellt. Um die Spannungsverteilung abhängig vom Rotationswinkel um die Schraubenachse darzustellen, sind die Druckkegel nicht kreiskegelförmig bzw. die Zugringe nicht kreisförmig, sondern für Einschraubwinkel größer  $0^\circ$  durch eine elliptische Helixform dargestellt. Die Halbachsen  $a$  und  $b$  der Lastausbreitung sind daher unterschiedlich lang. Für eine Anpassung an ein faserparalleles Einschrauben können die Halbachsen gleichgroß gewählt werden, um eine kreisförmige Lastausbreitung darzustellen. Die Halbachsen sind dabei abhängig von der Laufvariable  $t$  für die Verankerungslänge, wodurch nichtlineare Zusammenhänge abgebildet werden können. Die Druckkegel und Zugringe können somit entsprechend der Spannungsverteilung abhängig von der Verankerungslänge abgebildet werden. Diese Modellerweiterung mit entsprechender Spannungsverteilung ist in **Bild 6** dargestellt.



**Bild 6** Modellerweiterung des Druckkegel-Zugring-Modells mit einem Druckkegelwinkel  $\alpha_{DK}$  und ellipsenförmiger Helix ( $a \neq b$ ) in Abhängigkeit von der Einschraubtiefe ( $a(t)$  und  $b(t)$ ). Es sind die Schraubenparameter Außendurchmesser  $d$ , Innendurchmesser  $d1$ , Flankenwinkel  $\alpha_{FW}$  und Gewindesteigung  $P$  dargestellt.

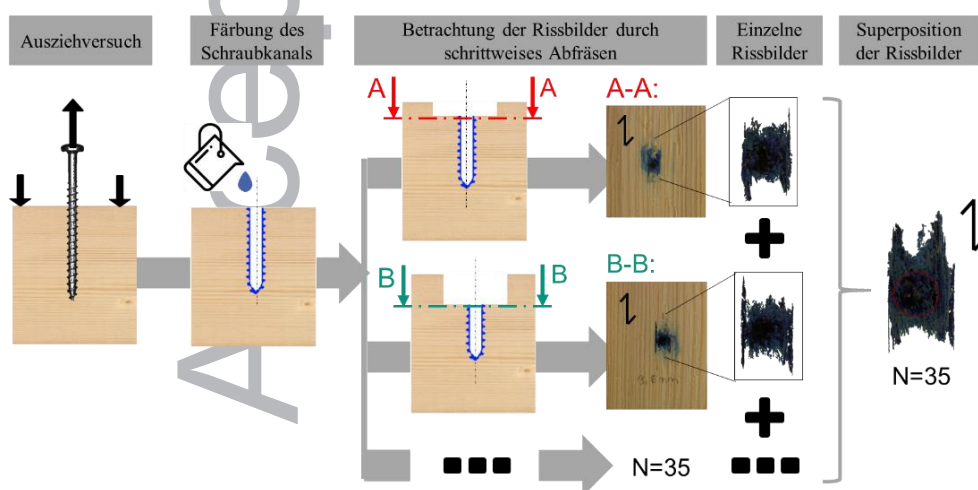
Extension of the compression cone-tension ring model with an angle  $\alpha_{DK}$  and elliptical helix ( $a \neq b$ ) as a function of screw-in depth ( $a(t)$  and  $b(t)$ ). compression cones under the angle  $\alpha_{DK}$ . Shown are the screw parameters outer diameter  $d$ , inner diameter  $d1$ , flank angle  $\alpha_{FW}$  and pitch  $P$ .

Die Parameter der Halbachsen  $a(t)$  und  $b(t)$  sowie der Winkel  $\alpha_{DK}$  des Verbundtragmodells müssen in weiterführenden Untersuchungen experimentell ermittelt werden, um das Modell an die Randbedingungen der Holzschraubenverbindung anzupassen.

## 5 Experimentelle Untersuchung der Modellerweiterung zur Spannungsverteilung in Abhängigkeit zum Rotationswinkel um die Schraubenachse

Kapitel 3.1 zeigt auf, dass die Form für die Abhängigkeit zum Rotationswinkel um die Schraubenachse noch unklar ist. In der Modellerweiterung wird daher eine elliptische Spannungsverteilung angenommen. Die Form der Spannungsverteilung, abhängig vom Rotationswinkel um die Schraubenachse, wurde nachfolgend untersucht.

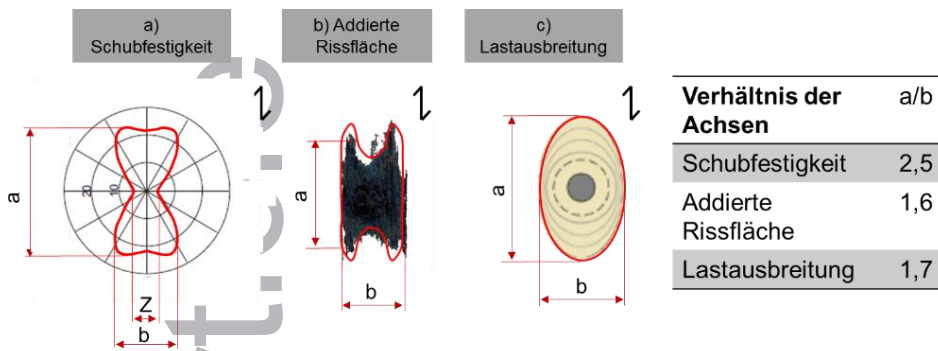
Die Untersuchung wurde exemplarisch mit einer selbstbohrenden Holzschraube HECO-TOPIX 6.0 x120 [25] in Konstruktionsvollholz der Holzart Fichte (Festigkeitsklasse C24) mit einem Querschnitt von 100 x 100 mm durchgeführt. Es wurde ein Einschraubwinkel senkrecht zur Holzfaser, mit einer Einschraubtiefe von  $8d$  gewählt. Der Ausziehversuch wurde in Anlehnung an EN 1382:2016-07 [7] durchgeführt, in welchem das Holz im Gewindekontakt der Holzschraubenverbindung versagt. Das Versagen tritt dabei an Stellen der höchsten Spannung in Abhängigkeit von den Materialkennwerten des Holzes auf. Um das Versagen untersuchen zu können, wurde der Schraubkanal in Farbeindringversuchen ähnlich zu Uibel [26] mit Holzbeize gefärbt. Abweichend von Uibel [26] wird der gefärbte Schraubkanal jedoch nicht längs der Schraubenachse, sondern senkrecht zur Schraubenachse betrachtet. Dazu wurde die Holzoberfläche senkrecht zur Schraubenachse, schrittweise mit einer Fräsmaschine abgefräst und das gefärbte Rissbild dokumentiert. Die Rissbilder wurden ab einer Verankerungslänge von 10 mm, alle 0,3 mm bis zu einer Verankerungslänge von 20,2 mm fotooptisch aufgenommen. Für die gewählte Holzschraube konnten somit 35 Rissbilder über eine Verankerungslänge von zwei vollständigen Gewindesteigungen  $P$  erzeugt werden. Mittels Superpositionsprinzip wurden die Flächen der Rissbilder achszentriert übereinandergelegt. Diese Vorgehensweise ist in **Bild 7** dargestellt.



**Bild 7** Vorgehensweise für das gefärbte Rissbild für den Rotationswinkel um die Schraubenachse. Mittels Superposition wurden 35 einzelne Rissbilder über die Verankerungslänge von zwei Gewindesteigungen achszentriert addiert.

Process for the colored crack pattern for the rotation angle around the screw axis. Using superposition, 35 separate crack images were added axis-centered over the anchorage length of two thread turns.

Das Ergebnis der addierten Rissbilder ist in **Bild 7** rechts zu sehen. Es ist ersichtlich, dass die Rissfläche nicht rund ist, sondern parallele Kanten zur Faserrichtung sowie quer zur Faser eine Bogenform mit einem Tiefpunkt auf Höhe der Schraubenachse aufweist. Parallel zur Faser ist die Rissfläche länger und die Streuung deutlich größer als quer zur Faser. Das Verhältnis der Achsen wird in **Bild 8** gezeigt und kann mit  $a/b = 1,6$  ermittelt werden, wobei für die faserparallele Achse der Mittelwert der Risslänge angenommen wird.



**Bild 8** Untersuchungsergebnis: b) addierte Rissfläche in Abhängigkeit zum Rotationswinkel um die Schraubenachse im Vergleich zur a) Schubfestigkeit von Hübner [10] und der c) Lastausbreitung von Ayoubi [1]. Gemein ist die ungleichmäßige Verteilung zum Rotationswinkel und der längeren Achse parallel zur Faser.  
Result of the investigation: b) summed crack pattern depending on the rotation angle around the screw axis compared to the a) shear strength of Hübner [10] and the c) load propagation of Ayoubi [1]. Common is the non-uniform distribution to the rotation angle and the larger axis parallel to the fiber.

Anhand der Analyse der Rissbilder kann festgestellt werden, dass sich die Rissfläche der parallelen Kanten entlang des Übergangs zwischen Früh- und Spätholz bildet. Hübner [10] beschreibt, dass die sich aufgrund von Früh- und Spätholz ändernden Eigenschaften in seinem Modell (**Bild 8a**) nicht berücksichtigt wurden und dies insbesondere für Nadelholz und kleine Schraubendurchmesser kritisch zu betrachten ist. Wird die Senke der Form quer zur Faser nicht berücksichtigt, so weist die addierte Rissfläche Ähnlichkeiten zur Schubfestigkeit nach Hübner [10] auf. Bei der Schubfestigkeit wird daher für das Verhältnis der Achsen quer zur Faser nicht zur Senke  $a/Z$ , sondern zur breitesten Stelle  $a/b$  verwendet. In **Bild 8** ist der Vergleich des Verhältnisses der Achsen für die Schubfestigkeit, die addierte Rissfläche und die elliptische Lastausbreitung dargestellt. Für die Schubfestigkeit kann ein Verhältnis der Achsen von 2,5 und für die Lastausbreitung von 1,7 ermittelt werden. Trotz der Betrachtung unterschiedlicher Holzarten liegt das Verhältnis für alle drei Formen in der gleichen Größenordnung. Für die Holzart Fichte ist für die Rissfläche das Verhältnis der Achsen mit 1,6 mit dem Verhältnis der Tragfähigkeiten dieser Achsen von Hoelz et al. [11] mit 1,5 vergleichbar.

## 6 Diskussion

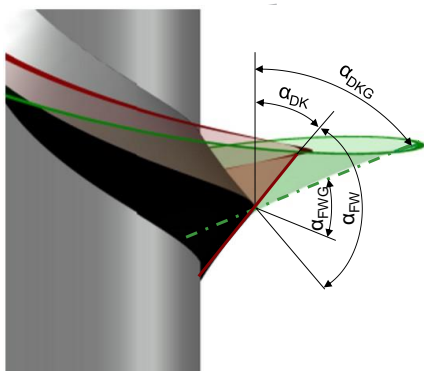
In diesem Beitrag wird eine Modellerweiterung vorgeschlagen, welche eine wirklichkeitsnahe Darstellung der Beanspruchung ermöglicht. In Kapitel 5 wird die Modellerweiterung zur Spannungsverteilung in Abhängigkeit zum Rotationwinkel untersucht. Es kann mit dieser Untersuchung exemplarisch gezeigt werden, dass die gefärbten Rissflächen und somit auch die Spannungsverteilung nicht rotationssymmetrisch um die Schraubenachse sind. Einen Nachweis zur elliptischen Lastausbreitung

kann mit dieser Untersuchung nicht erbracht werden. Die Rissfläche ähnelt der schmetterlingsförmigen Schubfestigkeit. Die Untersuchung zeigt, dass mit diesem experimentellen Aufbau die Spannungsverteilung untersucht werden kann. Gleichzeitig wird der Forschungsbedarf für weiterführende Untersuchungen mit einer größeren Versuchsanzahl aufgezeigt.

Die vorgeschlagene Modellerweiterung kann genutzt werden, um die Auswirkung von Änderungen von Geometrieparameter auf die Spannungsverteilung darzustellen. Als Beispiel dazu ist in **Bild 9** die Auswirkung der Änderung des Gewindeparameters Flankenwinkel dargestellt. Der Druckkegel wird in einem Winkel der Kraftabstützung durch die Verlängerung der Schraubenflanken gebildet. Damit ergibt sich bei symmetrischen Gewindeflanken eine Abhängigkeit des Druckkegelwinkels  $\alpha_{DK}$  vom Flankenwinkel  $\alpha_{FW}$  nach Formel 2.

$$\alpha_{DK} = 90^\circ - \frac{\alpha_{FW}}{2} \quad (2)$$

Durch eine Verkleinerung des Flankenwinkels  $\alpha_{FWG}$ , vergrößert sich der Druckkegelwinkel und damit das Volumen des Druckkegels (grün). Bei gleicher Belastung ist die Spannung im Druckkegel somit bei einem kleineren Flankenwinkel kleiner. Daher kann bei einem kleineren Flankenwinkel eine höhere Tragfähigkeit erreicht werden, bevor das Holz unter der Spannung versagt. Für die Optimierung von Holzschrauben sollte nach dieser Modellvorstellung ein kleinerer Flankenwinkel gewählt werden. Durch die Beschreibung der wirkenden Mechanismen kann neben der Erhöhung der Tragfähigkeit auch die Zuverlässigkeit der Verbindung verbessert werden. Der Anwender profitiert somit später von höheren Haltekräften, kürzere Verankerungslänge und verbesserter Zuverlässigkeit.



Einfluss des Flankenwinkels:

$\alpha_{FW}$ : ■ Druckkegel — Zugring  
 $\alpha_{FWG} < \alpha_{FW}$ : ■ Druckkegel — Zugring

**Bild 9** Darstellung der Auswirkung der Änderung des Gewindeparameters Flankenwinkel zur Nutzung des Verbundtragmodells in der Gestaltung. Dargestellt in Grün die Verkleinerung des Flankenwinkels  $\alpha_{FWG}$  im Vergleich zum größeren Flankenwinkel  $\alpha_{FW}$  in Rot und die damit einhergehende Vergrößerung des Druckkegelwinkels  $\alpha_{DKG}$ .

Showing the effect of changing the thread parameter flank angle to use the model in the design. In green, the reduction of the flank angle  $\alpha_{FWG}$  compared to the larger flank angle  $\alpha_{FW}$  in red and the associated increase of the angle of the compression cone  $\alpha_{DKG}$ .

Dies ist ein erster Vorschlag für ein Verbundtragmodell zur Unterstützung in der Gestaltung. Es ist weiterer Forschungsbedarf notwendig, um die Verbundtragmodelle weiterzuentwickeln. Beispielsweise beschreibt ein theoretisches Modell von Hübner [10] sogenannte Kragsscheiben, welche die Verformung der Holzfasern abbilden. Das Versagen von Faserbündel kann mit dem aktuellen Modell nicht dargestellt werden und auch die Gültigkeitsbereiche dieser Modelle sind noch unbekannt. Die beschriebenen Beziehungen des Verbundtragmodells müssen in empirischen Untersuchungen beobachtet und das Modell validiert werden. Weiterhin sollten die Anforderungen der Unternehmen für die Nutzung solcher Modelle für die Optimierung von Holzschrauben erhoben werden, um Modelle daran anpassen zu können.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurden bekannte Modelle zum Verbundtragverhalten unter dem Gesichtspunkt der Gestaltung von Holzschrauben untersucht, Anforderungen an die Modelle abgeleitet und eine Modellerweiterung vorgeschlagen. Es wurde gezeigt, dass die Spannungsverteilung im Druckkegel-Zugring-Modell erweitert werden muss. Zunächst wurden vier Anforderungen an Verbundtragmodelle abgeleitet. Die Spannungsverteilung sollte helixförmig, abhängig vom Rotationswinkel um die Schraubennachse und abhängig von der Verankerungslänge dargestellt werden. Weiterhin sollten die Auswirkungen der Gewindeparameter auf die Spannungsverteilung und die Verbundmechanismen beschrieben werden. Eine Modellerweiterung zur Berücksichtigung dieser Anforderungen wurde vorgeschlagen. Die Modellerweiterung zur Spannungsverteilung bezüglich des Rotationswinkels wurde dabei exemplarisch mittels gefärbten Rissbildern untersucht. Die Nutzung des Modells in der Gestaltung zur Optimierung von Holzschrauben wurde abschließend anhand dem Gestaltparameter Flankenwinkel gezeigt. Durch verbesserte Verbundtragmodell profitieren nicht nur Hersteller von Holzschrauben zur Erhöhung der Tragfähigkeit und der Zuverlässigkeit der Schraubenverbinder, sondern damit auch die Anwender der Holzschrauben und der Holzbau durch Erweiterung der Einsatzgebiete.

Dieses Modell soll ein Vorschlag für ein Verbundtragmodell für die Gestaltung darstellen und muss in weiteren Forschungsarbeiten anhand von experimentellen Daten geprüft und weiterentwickelt werden.

## 8 Literatur

- [1] AYOUBI, M. (2014) *Zum Verbundverhalten von Vollgewindeschrauben mit großen Einbindelängen beim Einsatz als Bewehrung in Brettschichtholzbauteilen* [Dissertation]. Technische Hochschule Aachen. Aachen.
- [2] FRESE, M.; BLAB, H.-J. (2009) *Models for the calculation of the withdrawal capacity of self-tapping screws* in: CIB-W18, GÖRLACHER, R. [Hrsg.] Dübendorf, Schweiz, Beitrag 42-7-3.
- [3] IB-MIEBACH (2020) *Blockträgerbrücke Neckartenzlingen* [online]. Lohmar: IB-MIE-BACH [Zugriff: 26.11.2020]. <https://www.ib-mie-bach.de/de/projekte/holz-bruecken/holzdeckbruecke/blocktraegerbruecke-neckartenzlingen.html>

- [4] MIEBACH, F. (2019) *Mit Holz zu neuen Ufern. Brücke über den Neckar in Neckartenzlingen lotet Grenzen aus* in: *dach+holzbau* 2019, **1**, S.40-45 5.
- [5] RINGHOFER, A.; BRANDNER R.; SCHICKHOFER, G. (2015) *A Universal Approach for Withdrawal Properties of Self-Tapping Screws in Solid Timber and Laminated Timber Products* in: INTER. GÖRLACHER, R. [Hrsg.], Sibenik, Croatia, 08/2015. Karlsruhe. S. 79–96.
- [6] PIRNBACHER, G.; BRANDNER, R.; SCHICKHOFER, G. (2009) *Base Parameters of self-tapping Screws* in: CIB-W18. GÖRLACHER, R. [Hrsg.], Dübendorf, Schweiz, Beitrag 42-7-1.
- [7] DIN EN 1382:2016-07 (2016) *Holzbauwerke - Prüfverfahren - Ausziehtragfähigkeit von Holzverbindungsmitteln*. Beuth, Berlin.
- [8] GAUNT, D. (1997) *The Effect of Thread Geometry on Screw Withdrawal Strength* in: NZ TIMBER DESIGN JOURNAL **6**, 3. S.12–20.
- [9] PIRNBACHER, G.; SCHICKHOFER, G. (2007) *Schrauben im Vergleich - eine empirische Betrachtung* in: *Verbindungstechnik im Ingenieurholzbau*. PIRNBACHER, G. [Hrsg.] Graz: Verl. der Techn. Univ, F-1 - F-22.
- [10] HÜBNER, U. (2013) *Mechanische Kenngrößen von Buchen-, Eschen- und Robinienholz für lastabtragende Bauteile* [Dissertation]. TU Graz. Graz.
- [11] HOELZ, K; KLEINHANS, L.; MATTHIESEN, S. (2020) *Wood Screw Design: Influence of Thread Parameters on the Withdrawal Capacity* in: *Eur. J. Wood Prod.* **79**, 4, S.773–784.  
<https://doi.org/10.1007/s00107-021-01668-4>.
- [12] SYDOR, M. (2019) *Geometry of wood screws: a patent review* in: *Eur. J. Wood Prod.* **77**, 1 S.93–103. doi 10.1007/s00107-018-1362-4
- [13] FRESE, M.; FELLMOSE, P.; BLAB, H.J. (2010) *Models for the calculation of the withdrawal capacity of self-tapping screws* in: *Eur. J. Wood Prod.* **68**, 4, S.373–384. doi 10.1007/s00107-009-0378-1
- [14] ZARNANI, P.; QUENNEVILLE, P. (2014) *Strength of timber connections under potential failure modes: An improved design procedure* in: *Construction and Building Materials* **60**, S.81–90. doi 10.1016/j.conbuildmat.2014.02.049
- [15] RINGHOFER, A.; BRANDNER, R.; FLATSCHER, G.; SCHICKHOFER, G. (2015) *Axial beanspruchte Holzschrauben in Vollholz, Brettschichtholz und Brettspertholz* in: *Bautechnik* **92**, 11, S.770–782. doi 10.1002/bate.201500075.
- [16] GÜNTHER, M.; VELTEN, K. (2014) *Mathematische Modellbildung und Simulation: Eine Einführung für Wissenschaftler, Ingenieure und Ökonomen*. Wiley-VCH, Berlin.
- [17] ISERMANN, R. (1999) *Mechatronische Systeme: Grundlagen*, 2nd ed., Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- [18] SANDHAAS, C.; VAN DE KUILEN, J. (2013) *Material model for wood* in: *Heron* **53**, 2/3, S.179–200.
- [19] FRANKE, B.; QUENNEVILLE P. (2011) *Numerical Modeling of the Failure Behavior of Dowel Connections in Wood* in: *Journal of Engineering Mechanics* **137**, 3, S.186–195. doi 10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000217.

- [20] HOELZ, K.; GRAUBERGER, P.; MATTHIESEN, S. (2020) *Investigation of Failure Behavior in the Thread Contact of Wood Screws during the Pull-out Process* in: Journal of Structural Engineering **146**, 10. doi 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002784
- [21] TEPFERS, R. (1973) *A Theory of Bond Applied to Overlapped Tensile Reinforcement Splices for Deformed Bars* [Dissertation]. Chalmers Tekniska Högskola Göteborg.
- [22] AYOUBI, M. (2016) *Verbundverhalten von Vollgewindeschrauben in Brettschichtholzbau-teilen - Teil 2* in: Bautechnik **93**, 11, S.817–827. doi 10.1002/bate.201500086
- [23] BEJTKA, I. (2005) *Verstärkungen von Bauteilen aus Holz mit Vollgewindeschrauben* [Dissertation]. Universität Karlsruhe.
- [24] AYOUBI, M.; TRAUTZ, M. (2015) *Verbundverhalten von Vollgewindeschrauben in Brett-schichtholzbauteilen - Teil 1* in: Bautechnik **92**, 11, S.790-799. doi 10.1002/bate.201400098
- [25] Deutsches Institut für Bautechnik (2019) *Europäische Technische Bewertung ETA-11/0284 HECO-FIX-plus, HECO-TOPIX, HECO-TOPIX-T und HECO-TOPIX-CC Schrauben* (März 2019). Berlin, Deutschland.
- [26] UIBEL, T. (2012) *Spaltverhalten von Holz beim Eindrehen von selbstbohrenden Holz-schrauben* [Dissertation]. KIT. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing

## Autoren

M.Sc. Kevin Hölz  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
IPEK – Institut für Produktentwicklung  
Kaiserstraße 10  
76131 Karlsruhe  
[kevin.hoelz@kit.edu](mailto:kevin.hoelz@kit.edu)

Prof. Dr.-Ing. Mazen Ayoubi  
Frankfurt University of Applied Sciences  
Nibelungenplatz 1  
60318 Frankfurt am Main  
[mazen.ayoubi@fb1.fra-uas.de](mailto:mazen.ayoubi@fb1.fra-uas.de)

Dr.-Ing. Thomas Gwosch  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
IPEK – Institut für Produktentwicklung  
Kaiserstraße 10  
76131 Karlsruhe  
[thomas.gwosch@kit.edu](mailto:thomas.gwosch@kit.edu)

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sven Matthiesen  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
IPEK – Institut für Produktentwicklung  
Kaiserstraße 10  
76131 Karlsruhe  
[sven.matthiesen@kit.edu](mailto:sven.matthiesen@kit.edu)

Accepted Article