

Kevin, Hölz (Co-Autor 1), Frank, Bremer (Co-Autor 2), Maximilian, Giebel (Co-Autor 3), Sven, Matthiesen (Co-Autor 4)

Untersuchung der Ausziehtragfähigkeit von gewindeoptimierten Holzschrauben

[Zusammenfassung] Die Ausziehtragfähigkeit ist eine relevante Kenngröße für die Bemessung von Schrauben als Holzverbindungsmittel, sogenannte Holzschrauben. Diese wird, in Wechselwirkung mit den Holzeigenschaften, durch die Gewindegeometrie der Holzschraube beeinflusst. Bisherige Untersuchungen konnten die Einflüsse der Gewindeparameter auf die Ausziehtragfähigkeit noch nicht hinreichend ermitteln, um eine konstruktive Optimierung des Gewindes zu ermöglichen. In Versuchen mit Gewinde-Testobjekten, welche gerade Gewindeflanken besitzen, konnte der Einfluss verschiedener Gewindeparameter auf die Tragfähigkeit ermittelt werden. Allerdings ist die Übertragbarkeit auf Holzschrauben bislang nicht untersucht worden. In diesem Beitrag wird die Untersuchung dieser Übertragbarkeit vorgestellt. Dazu wurden auf Basis der Ergebnisse zu den Gewinde-Testobjekten zwei bezüglich der Ausziehtragfähigkeit optimierte Gewindegeometrien entworfen. Um die Übertragbarkeit der Ergebnisse zu prüfen werden die Ausziehtragfähigkeiten von zwei Holzschraubenvarianten mit optimierten Gewindegeometrien, mit einer Referenzvariante sowie einer kommerziellen Holzschraube verglichen. Die zwei optimierten Holzschraubenvarianten weisen signifikant höhere Ausziehtragfähigkeiten gegenüber der Referenzvariante sowie der kommerziellen Schraubenvariante auf. Damit wird gezeigt, dass die Erkenntnisse der Gewinde-Testobjekte übertragbar sind. Hersteller können diese daher zur Optimierung der Holzschraubengeometrie nutzen.

Stichworte [Holzschrauben; Gewinde; Ausziehtragfähigkeit; Testing]

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.202200044

Submitted: 27-Apr-2022
Revised: 02-Aug-2022
Accepted: 30-Aug-2022

Investigation of the withdrawal capacity of thread-optimized wood screws:

[Abstract] The withdrawal capacity is necessary for the design of screws for application in timber, so called wood screws. The withdrawal capacity is influenced by the thread geometry of the screw which interact with the wood properties. Prior investigations have not been able sufficiently determine the influence of the thread parameters on the withdrawal capacity to enable thread geometry optimization. In investigations with so-called thread-test-objects with straight thread flanks, the influences of thread parameters were determined. However, the transferability of these results to wood screws is still unclear. Aim of this paper is to investigate this transferability. To do so, various thread geometries optimized for withdrawal capacity were designed. To test the transferability of the results, the withdrawal capacity of two screw variants with optimized thread geometries, a reference variant and a commercial wood screw is measured. The two optimized screw variants show significantly higher withdrawal capacities compared to the reference variant and the commercial screw variant. This demonstrates that the findings based on the thread-test-objects are transferable for the design of wood screws. Manufacturers can therefore use these to optimize the wood screw geometry.

Keywords [wood screws; thread; withdrawal capacity; testing]

1 Einleitung

Holzschraubverbindungen sind aus wirtschaftlicher Sicht sehr attraktiv und zeichnen sich durch ein breites Anwendungspotential aus [1]. Die Verwendung von Holzschrauben hat vor allem durch die Entwicklung von selbstbohrenden Holzschrauben in den letzten Jahrzehnten deutlich zugenommen [2]. Belastet werden Holzschraubverbindungen bevorzugt in axialer Richtung [3]. Axial belastete Holzschrauben können nach Ringhofer *et al.* [4] auf unterschiedliche Arten versagen. Das Ausziehversagen des Gewindeteils ist dabei die häufigste Versagensart, welche durch die Gewindegeometrie und die Holzeigenschaften beeinflusst wird [4].

Die Ausziehtragfähigkeit charakterisiert diese Versagensart, ist eine von den Herstellern in der Leistungserklärung zu deklarierende charakteristische Eigenschaft und daher eine Entwicklungszielgröße für die Schraubenoptimierung. Für eine solche Schraubenoptimierung ist das Wissen notwendig, wie die Gewindeparameter der Holzschrauben gewählt werden müssen, um die Ausziehtragfähigkeit zu erhöhen.

Die Ausziehtragfähigkeit von Holzschrauben wird in Prüfungen nach EN 1382:2016-07 ermittelt [5]. Die Ausziehtragfähigkeit wurde bisher vielfach unter den Gesichtspunkten der Holz-

parameter untersucht. Untersuchungen mit Fokus auf die Gewindeparameter sind bislang aber selten [6, 7]. Es sind daher nur wenige Einflüsse bekannt, welche von Herstellern für die Optimierung von Holzschrauben genutzt werden können. Diese Untersuchungen werden im Folgenden vorgestellt.

Gaunt [8] untersuchte die Ausziehtragfähigkeit von fünf eigens gefertigten Holzschraubenvarianten, welche sich in Gewindesteigung, Profilhöhe und Flankenwinkel unterschieden. Die Gewindeparameter wurden dabei nicht einzeln, sondern als Parametersätze untersucht. Die Versuche wurden in Kiefer, mit faserparallelem Einschrauben durchgeführt. Ein signifikanter Einfluss der gewählten Parametersätze auf die Ausziehtragfähigkeit konnte nicht gezeigt werden [8].

Hübner [9] konnte in einer Auswertung von Ausziehversuchen mit Fichtenholz weder für ein faserparalleles Einschrauben noch senkrecht zur Holzfaser einen signifikanten Einfluss der Gewindesteigung zeigen. In den Ausziehversuchen wurden kommerzielle Holzschrauben verwendet. Diese unterscheiden sich neben der Gewindesteigung auch in Kerndurchmesser, Flankenwinkel und in der Anzahl an Gewindegängen.

Sydor *et al.* [10] konnten für eine tangentiale Einschraubrichtung in Kiefer einen positiven Einfluss einer kleineren Gewindesteigung auf die Ausziehtragfähigkeit beobachten. Bei einer radialen Einschraubrichtung konnte kein starker Zusammenhang zwischen Gewindesteigung und Ausziehtragfähigkeit beobachtet werden. Statistische Tests wurden nicht angewendet.

Dieser von Sydor *et al.* [10] beobachtete Einfluss in tangentialer Einschraubrichtung konnte von Hoelz *et al.* [11] in Fichte statistisch abgesichert nachgewiesen werden. Dazu wurden statt Holzschrauben sogenannte Gewinde-Testobjekte mit geraden Gewindeflanken verwendet. Diese wurden nicht in das Holz eingeschraubt, sondern in den in Bild 1a gezeigten Versuchsaufbau eingepresst. Dieser Aufbau wurde genutzt, da in einer vorhergehenden Untersuchung festgestellt wurde, dass die Ausziehtragfähigkeit von Versagensmechanismen bestimmt wird, welche von der Orientierung der Holzfaser zum Schraubengewinde abhängen [12]. Die Gewinde-Testobjekte ermöglichen die Bestimmung der Gewindeparameter in einer bestimmten Orientierung zur Holzfaser. Bestimmt wurde der Einfluss in den Ebenen radial-tangential (RT) und tangential-longitudinal (TL) zur Holzfaser.

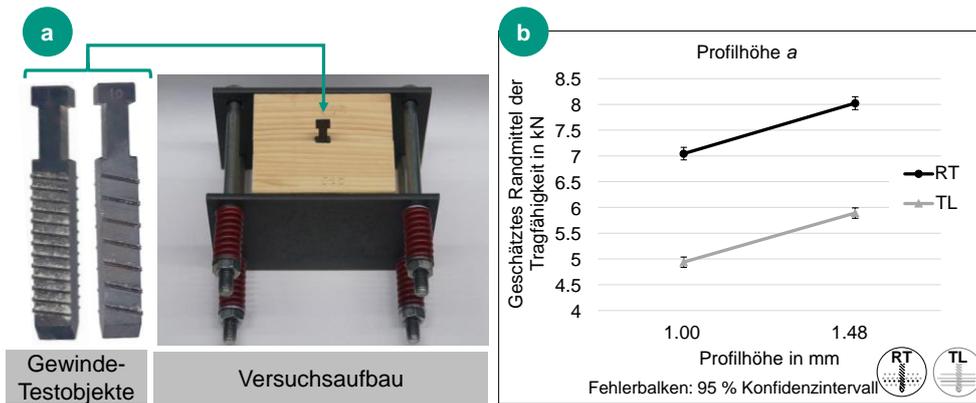


Bild 1 a) Versuchsaufbau und die Gewinde-Testobjekte mit geraden Gewindeflanken. b) Ermittelte Zusammenhänge zwischen Profilhöhe und Ausziehtragfähigkeit. **Quelle:** a) [11] **Quelle b)** [13]

a) Test setup and threaded test objects with straight thread flanks. b) Determined relationships between thread height and withdrawal capacity.

In einer weiteren Untersuchung wurde der Versuchsaufbau genutzt, um den Einfluss der Gewindesteigung, Profilhöhe, Steigungswinkel, Flankenwinkel sowie deren Wechselwirkungen auf die Ausziehtragfähigkeit zu bestimmen und statistisch abzusichern. In Bild 1b ist exemplarisch der Zusammenhang zwischen der Profilhöhe und der Ausziehtragfähigkeit für die beiden Ebenen RT und TL gezeigt. Eine höhere Tragfähigkeit wird neben einer größeren Profilhöhe auch durch eine kleinere Gewindesteigung und einen spitzeren Flankenwinkel erreicht – wobei die Parameter sich gegenseitig beeinflussen. Obwohl diese Einflüsse der Gewindeparameter in theoretischen Modellen erklärt wurden [11, 13, 14], ist durch den verwendeten Versuchsaufbau die Übertragbarkeit auf Holzschrauben bislang unklar.

Hoelz [15] nutze die mit den Gewinde-Testobjekten ermittelten Einflüsse der Gewindeparameter zur Optimierung der Gewindegeometrie bezüglich der Ausziehtragfähigkeit. In Bild 2 sind die Gewindeparameter der drei vorgeschlagenen Schraubenvarianten mit veränderten Gewindegeometrien gezeigt. Hoelz schlägt die Untersuchung von zwei Schraubenvarianten (OP1, OP2) mit optimierten Gewindegeometrien, vergleichend zu einer Referenzvariante (REF), vor. Diese Referenz sollte laut Hoelz [15] eine niedrigere Ausziehtragfähigkeit als OP1 und OP2, aber eine ähnliche Ausziehtragfähigkeit wie kommerzielle Holzschrauben aufweisen.

| Gewindeparameter | Optimierung 1 (OP1) | Optimierung 2 (OP2) | Referenz (REF) |
|----------------------------------|----------------------|-------------------------|-------------------------|
| Profilhöhe | 1,48 mm | 1,48 mm | 1,12 mm |
| Flankenabstand | 3,04 mm | 3,04 mm | 6,08 mm |
| Steigungswinkel | 6,8° | 13,6° | 13,6° |
| Anzahl Gänge | 1 | 2 | 1 |
| Gewindesteigung | 3,04 mm | 6,08 mm | 6,08 mm |
| Flankenwinkel | 56° | 54° | 30° |
| Außendurchmesser | 8 mm | 8 mm | 8 mm |
| Anforderungen | | | |
| Materialvolumen (lg1 = 64 mm) | 1747 mm ³ | 1744,06 mm ³ | 1743,14 mm ³ |

Bild 2 Vorgeschlagene Schraubenvarianten mit Gewindegeometrien mit höherer Ausziehtragfähigkeit (OP1, OP2) sowie eine Referenzgeometrie (REF). **Quelle:** [15]

Proposed screw variants with thread geometries with higher withdrawal capacities (OP1, OP2) as well as a reference geometry (REF).

Für die Vergleichbarkeit der Tragfähigkeiten sollen alle Schraubenvarianten aus dem gleichen Drahtrohling fertigbar sein und daher ein ähnliches Materialvolumen aufweisen. Aufgrund der Berechnungen von Hoelz [15] sollte die Variante OP2 die höchste Tragfähigkeit aufweisen. Die Tragfähigkeit der Schraubenvarianten wurden bislang jedoch nicht experimentell untersucht.

Zusammengefasst ist der Einfluss der Gewindeparameter auf die Tragfähigkeit von Holzschrauben weitgehend unbekannt. In Untersuchungen mit Gewinde-Testobjekten mit geraden Gewindeflanken konnte der Einfluss von einzelnen Gewindeparameter zwar ermittelt werden, allerdings wurde die Übertragbarkeit auf Holzschrauben bislang nicht untersucht.

2 Untersuchungsziel

Das Untersuchungsziel ist die Ausziehtragfähigkeiten der von Hoelz [15] vorgeschlagenen Schraubenvarianten mit unterschiedlichen Gewindegeometrien zu ermitteln. Diese sollen auch mit einer kommerziellen Holzschraube verglichen werden. Durch die Prüfung dieser Schraubenvarianten soll die Übertragbarkeit der mit den Gewinde-Testobjekten ermittelten Zusammenhänge von Hoelz *et al.* [13] untersucht werden. Sind die Zusammenhänge auf Holzschrauben übertragbar, können diese zukünftig von Holzschraubenherstellern zur Optimierung der Gewindegeometrie genutzt werden.

3 Versuchsaufbau

3.1 Versuchskörper

Die für die Untersuchung verwendeten Schraubenvarianten Referenz (REF), Optimierung 1 (OP1) und Optimierung 2 (OP2) sind in Bild 3 gezeigt. Diese Schrauben wurden nach den Geometrievorgaben von Hoelz [15] mittels Flachbackenwalzen eigens für diese Untersuchung gefertigt. Als kommerziell genutzte Variante wurde die Power-Fast 8,0×120 (fischerwerke, [16]) (FIS) verwendet.



Bild 3 Für die Untersuchung verwendete Schraubenvarianten.
Screw variants used for this study.

Zur Bestimmung der Gewindep Parameter der gefertigten und der kommerziellen Holzschraube wurden diese mit einem Digitalmikroskop (Keyence Corporation, Modell VHX 6000) vermessen. In Tab. 1 sind Mittelwert und Varianz der gemessenen Gewindep Parameter von jeweils 5 Schrauben gezeigt. Fertigungsbedingt gibt es Abweichungen zu den Vorgaben der Gewindep Parameter von [15] (vgl. Bild 2). Beispielsweise musste für die Variante Referenz ein größerer Drahtdurchmesser für das Walzen gewählt werden, wodurch die Vergleichbarkeit verschlechtert wird, da aufgrund des größeren Materialvolumens höhere Produktkosten für die Referenzvariante zu erwarten sind.

Tab. 1 Gewindeparameter und Vorbohrdurchmesser der verwendeten Schraubenvarianten Referenz (REF), Optimum 1 (OP1), Optimum 2 (OP2) und fischer Power-Fast (FIS). Angegeben sind die Mittelwerte, dahinter die Varianz in Klammern.

Thread parameters and pilot hole diameters of the screw variants Reference (REF), Optimum 1 (OP1), Optimum 2 (OP2) and fischer Power-Fast (FIS). Mean values are shown, with the variance in parentheses.

| | REF | OP1 | OP2 | FIS |
|---|---------------|---------------|---------------|-----------------------|
| Außendurchmesser d in mm | 7,78 (0,002) | 7,74 (0,001) | 7,72 (0,004) | 7,71 (0,009) |
| Profilhöhe a in mm | 1,08 (0,002) | 1,35 (0,002) | 1,28 (0,001) | 1,24 (0,001) |
| Gewindesteigung P in mm | 5,93 (0,004) | 3,06 (0,001) | 6,20 (0,001) | 5,64 (0,019) |
| Flankenwinkel α in ° | 36,00 (2,460) | 51,43 (0,192) | 51,98 (0,484) | 45,45 (0,664) |
| Kerndurchmesser d_I in mm | 5,84 (0,001) | 5,06 (0,001) | 5,17 (0,002) | 5,28 (0,003) |
| Schaftdurchmesser d_s (Drahtdurchmesser) in mm | 6,18 | 5,97 | 5,99 | 5,85 |
| Besonderheiten | | | Doppelgängig | Fräsrippen im Gewinde |

Das verwendete Holz war Fichtenholz (*Picea Abies*) mit dem Querschnitt 80 x 100 mm. Das Konstruktionsvollholz wurde bei Normalklima (20 °C, 65 % Luftfeuchte) konditioniert und hatte eine mittlere Rohdichte ρ (13,5 %) von 0,44 g/cm³. Das Holz wurde vorsortiert und es wurde nur geradfaseriges, riss- und astfreies Holz verwendet.

3.2 Versuchsdurchführung der Ausziehversuche

Die Ausziehtragfähigkeit wurde in Ausziehversuchen nach EN 1382:2016-07 [5] gemessen. Die Versuche wurden mit einer Universalprüfmaschine (TesT GmbH, Modell 112, 50 kN, Erkrath, Deutschland) mit einer konstanten Ausziehgeschwindigkeit von 0,065 mm/s durchgeführt. Für die Abstützung der Holzproben gegenüber der Maschine wurde nach EN 1382:2016-07 [5] ein Achsabstand von 62 mm zur Holzschraube eingehalten.

3.3 Studiendesign

Die Holzschrauben wurden mit einem Einschraubwinkel von 90° zur Holzoberfläche tangential zur Holzfaserrichtung eingeschraubt. Die Einschraubtiefe war mit 64 mm der Anforderung nach EN 1382:2016-07 [5] größer als das Achtfache des Gewindeaußendurchmessers. Um gleiche Versuchsbedingungen zu gewährleisten, wurden Holzproben mit einer Länge von 400 mm erzeugt. In jede dieser Holzproben wurden jeweils die vier Schraubenvarianten eingeschraubt. Die Reihenfolge der Schraubenvarianten auf den Holzproben wurde randomisiert und es wurde die Rohdichte jeder Holzprobe anhand eines mittig herausgeschnittenen Probe-

körpers bestimmt. Die Mindestabständen zu den Rändern und zwischen den Schrauben wurden nach EN 1382:2016-07 [5] eingehalten.

Untersuchungsziel ist die Ermittlung der Ausziehtragfähigkeit der Gewindegeometrien der Schraubenvarianten. Um den Einfluss der Schraubenspitze auszuschließen wurde vorgebohrt. Nach Ringhofer [17] hat das Vorbohren mit einem Durchmesser kleiner als $1,1 d_I$ des Kerndurchmessers keinen Einfluss auf die Ausziehtragfähigkeit. Auch in der Zulassung [16] der kommerziellen Schraube FIS ist für Nadelholz ein Vorbohren bis auf Kerndurchmesser erlaubt. Es wurde daher für jede Schraubenvariante individuell kurz unterhalb des Kerndurchmessers vorgebohrt. In Tab. 2 sind die Kerndurchmesser d_I und die individuellen Vorbohrdurchmesser d_b für jede Schraubenvariante aufgeführt. Durch das Vorbohren auf einen geringfügig kleineren Durchmesser als dem Kerndurchmesser kann neben dem Einfluss der Schraubenspitze auch der Einfluss des Schraubenkerns, bspw. durch Komprimieren oder Verdrängen des Holzes, vermieden werden.

In der Praxis ist für Schrauben mit einem Außendurchmesser d von 8 mm ein Vorbohren mit einem Durchmesser von 5,0 mm oftmals üblich, siehe [16]. Daher wurde zusätzlich in Tastversuchen für jede Schraubenvariante mit dem einem konstanten Durchmesser von 5,0 mm vorgebohrt. Insgesamt wurden mit individuellen sowie einheitlichen Vorbohrdurchmessern somit 80 Ausziehversuche durchgeführt. In Tab. 2 ist der Versuchsumfang aufgeführt.

Tab. 2 Kerndurchmesser und Anzahl der Versuchswiederholungen für die Schraubenvarianten Referenz (REF), Optimum 1 (OP1), Optimum 2 (OP2) und fischer Power-Fast (FIS).

Pilot hole diameters and test repeats of the screw variants Reference (REF), Optimum 1 (OP1), Optimum 2 (OP2) and fischer Power-Fast (FIS).

| | REF | OP1 | OP2 | FIS |
|--|---------|---------|---------|---------|
| Kerndurchmesser d_I | 5,84 mm | 5,06 mm | 5,17 mm | 5,28 mm |
| Individueller Vorbohrdurchmesser d_b | 5,8 mm | 5,0 mm | 5,1 mm | 5,1 mm |
| Anzahl Versuche N: Individuell vorgebohrt | 14 | 15 | 14 | 15 |
| Konstanter Vorbohrdurchmesser | 5,0 | 5,0 mm | 5,0 mm | 5,0 mm |
| Anzahl Versuche N: Konstant vorgebohrt | 5 | 6 | 6 | 5 |

3.4 Versuchsauswertung

Die Versuche mit individuellen Vorbohrdurchmesser wurden statistisch mit dem Programm SPSS Statistics Version 28.0.0.0 ausgewertet. Dazu wurde eine mehrfaktorielle Varianzanaly-

se (ANOVA) durchgeführt, um Unterschiede zwischen den Tragfähigkeiten der Schraubenvarianten zu zeigen. Für die Anwendung einer ANOVA, muss die Anforderung erfüllt sein, dass die abhängigen Variablen normalverteilt sind. Die Normalverteilung der Schraubenvarianten ($\alpha = 0,05$) wurde mittels Kolmogorov-Smirnov- sowie Shapiro-Wilk-Test geprüft. Die Varianzhomogenität konnte mit dem Levene-Test ($F(25.32) = 0,688$; $p = 0,831$) gezeigt werden. Um mögliche Dichteunterschieden zwischen den Holzproben zu berücksichtigen, beinhaltet das Modell der ANOVA neben dem Faktor Schraubenvariante auch den Faktor Rohdichte der Holzproben. Die Versuche mit einheitlichem Vorbohrdurchmesser entsprechen Tastversuchen und wurden nicht statistisch untersucht.

4 Ergebnisse

Das Ergebnis der Ausziehtragfähigkeiten für die vier Schraubenvarianten ist in Bild 4 gezeigt. In Bild 4a sind die Tragfähigkeiten für die individuellen Vorbohrdurchmesser nach Tab. 1 und in b) die Tastversuche für einen einheitlichen Vorbohrdurchmesser von 5,0 mm gezeigt.

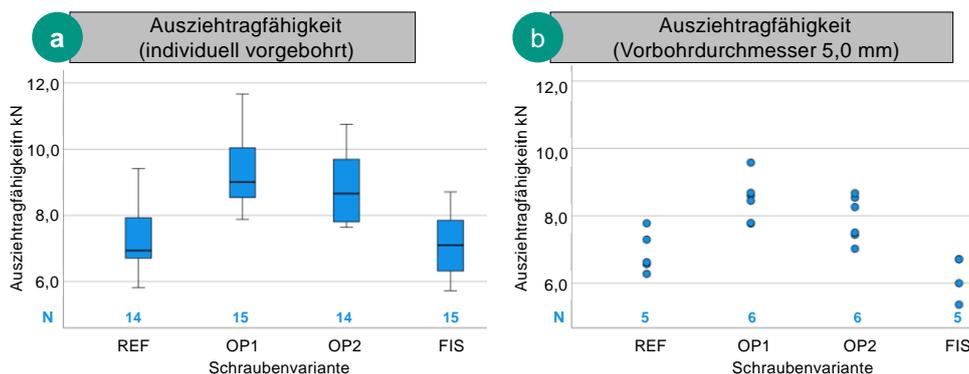


Bild 4 Ausziehtragfähigkeit der Schraubenvarianten mit a) individuellen Vorbohrdurchmesser und b) mit einem einheitlichen Vorbohrdurchmesser von 5,0 mm. Ein Versuch des Schraubentyps FIS mit Vorbohrdurchmesser 5,0 mm mit einer Ausziehtragfähigkeit von 1,2 kN ist aufgrund der Skalierung nicht dargestellt.
Withdrawal capacity of screw variants with a) individual pilot hole diameters and b) a uniform pilot hole diameter of 5.0 mm. One test with screw type FIS with pilot hole diameter of 5.0 mm with a withdrawal capacity of 1,2 kN is not shown due to the chosen scaling.

In Bild 4a ist zu sehen, dass die optimierten Schraubenvarianten OP1 und OP2 höhere Ausziehtragfähigkeiten als die Referenz sowie die kommerzielle Holzschraube FIS erreichen. Wobei OP1 die höchste Tragfähigkeit erreicht. Es ist zu beobachten, dass die Referenz und die kommerzielle Schraube eine ähnliche Ausziehtragfähigkeiten haben.

In Bild 4b sind die Ausziehtragfähigkeiten der Schrauben mit einem einheitlichen Vorbohr-

durchmesser von 5,0 mm gezeigt. Die relativen Unterschiede zwischen den Schraubenvarianten in Bild 4b sind, wie erwartet, ähnlich zu denen in Bild 4a. FIS weist einen Ausreißer mit sehr geringer Tragfähigkeit auf, eine mögliche Ursache dafür ist ein Holzdefekt.

Tab. 3 zeigt die Tragfähigkeiten aus Bild 4a für die vier Schraubenvarianten für das Vorbohren mit individuellen Durchmessern. Die prozentuale Veränderung der Tragfähigkeiten ist in Bezug zur REF angegeben. OP1 weist eine um ca. 30 % höhere Tragfähigkeit auf.

Tab. 3 Ausziehtragfähigkeiten der vier Schraubenvarianten für individuelle Vorbohrdurchmesser. Angegeben sind Versuchszahl (N), Median, Maximum (Max), Minimum (Min) und Standardabweichung (SD) in Kilonewton.

Withdrawal capacities of the four screw variants for individual pilot hole diameters. The number of tests (N), median, maximum (Max), minimum (Min) and standard deviation (SD) are given in kilonewtons.

| | REF | OP1 | OP2 | FIS |
|-----------------------------|------|-------|-------|------|
| Anzahl N | 15 | 15 | 14 | 14 |
| Median in kN | 6,94 | 9,01 | 8,66 | 7,10 |
| Max in kN | 9,42 | 11,66 | 10,76 | 8,71 |
| Min in kN | 5,82 | 7,88 | 7,64 | 5,73 |
| SD in kN | 1,06 | 1,00 | 1,04 | 0,94 |
| Median in Bezug zu REF in % | 100 | 130 | 125 | 102 |

Um den Unterschied zwischen den Schraubenvarianten statistisch zu zeigen, wurde für die Versuche mit individuellen Vorbohrdurchmessern eine mehrfaktorielle Varianzanalyse angewandt. In der statistischen Auswertung in Tab. 4 zeigt sich, dass das Gesamtmodell signifikant ist ($F(9,48) = 61,03$; $p < 0,01$; korrigiertes $R^2 = 0,91$; $N = 58$).

Tab. 4 Ergebnis der mehrfaktoriellen Varianzanalyse für die Versuche mit individuellem Vorbohrdurchmesser. Signifikante Effekte sind die Schraubenvariante und die Rohdichte.

Result of the multifactorial analysis of variance for individual pilot hole diameters. Significant effects are the screw variant and the wood density.

Abhängige Variable: Ausziehtragfähigkeit

| | F | p-Wert | Partielles Eta ² |
|---------------------|-------|--------|-----------------------------|
| Korrigiertes Modell | 61,03 | <0,01 | 0,92 |
| Schraubenvariante | 94,74 | <0,01 | 0,86 |
| Rohdichte der Probe | 43,02 | <0,01 | 0,84 |

$R^2 = 0,92$ (korrigiertes $R^2 = 0,91$)

Es kann für den Faktor Schraubenvariante ($F(3,48) = 94,74$; $p < 0,01$) und Rohdichte ($F(6,48) = 43,02$; $p < 0,01$) jeweils ein signifikanter Einfluss auf die Tragfähigkeit gezeigt werden. Mit einer Effektstärke von $f = 2,43$ ist der Effekt der Schraubenvariante auf die abhängige Variable nach Cohen [18] als stark einzustufen. Um den Unterschied zwischen den

Schraubenvarianten zu prüfen, wurden Bonferroni-korrigierte Post-hoc-Tests angewandt. Die Tests zeigen, dass sich die Schraubenvarianten OP1 und OP2 untereinander ($p = 0,01$) sowie jeweils von FIS ($p < 0,01$) und REF ($p < 0,01$) signifikant unterscheiden. Zwischen FIS und REF kann kein signifikanter Unterschied ($p = 1,00$) gezeigt werden. Damit bestätigt die statistische Auswertung die Ergebnisse aus den Diagrammen in Bild 4 und zeigt, dass die Variante OP1 die Schraube mit der höchsten Ausziehtragfähigkeit ist.

5 Diskussion

Die von Hoelz [15] vorgeschlagenen Gewindegeometrien der Schraubenvarianten OP1 und OP2 weisen höhere Ausziehtragfähigkeiten auf als die Referenz sowie die kommerzielle Variante. Aufgrund des Versuchsaufbaus können die Unterschiede in der Tragfähigkeit auf die Unterschiede in der Gewindegeometrie zurückgeführt werden. Es besteht ein Unterschied von 30 % zwischen OP1 und REF sowie von 25 % zwischen OP2 und REF. Dieses Ergebnis zeigt, entgegen der Untersuchungen von Gaunt [8], dass durch die Variation von Gewindesteigung, Profilhöhe und Flankenwinkel die Ausziehtragfähigkeit von Holzschrauben signifikant gesteigert werden kann. Pirnbacher and Schickhofer [7] untersuchten ebenfalls den Einfluss der Gewindegeometrie auf die Tragfähigkeit. Allerdings konnte zwischen den sieben untersuchten kommerziellen Holzschraubenvarianten nur einen Unterschied von knapp ± 10 % in der Tragfähigkeit gezeigt werden. Die erzielte Steigerung der Tragfähigkeit mit den gewindeoptimierten Varianten übertrifft diese Untersuchungsergebnisse. Besonders praxisrelevant ist, dass die Variante OP2 zwar eine etwas niedrigere Tragfähigkeit aufweist als Variante OP1, allerdings – aufgrund des doppelgängigen Gewindes eine doppelt so große Gewindesteigung wie OP1 – eine deutlich kürzere Einschraubzeit aufweist.

Die Ergebnisse der Ausziehtragfähigkeit der Schraubenvarianten bestätigen die mit den Gewinde-Testobjekten ermittelten Zusammenhänge von Hoelz *et al.* [13]. Diese Zusammenhänge wurden von Hoelz [15] zur Optimierung der Gewinde der Schraubenvarianten genutzt. Durch die Prüfung der Schraubenvarianten wurde somit die Übertragbarkeit auf Holzschrauben gezeigt.

Aufgrund verfahrensbedingter Fehler beim Flachbackenwalzen [19] gab es Abweichungen zwischen den vorgeschlagenen und den gemessenen Gewindeparametern der Schraubenvarianten. Besonders die Profilhöhe der Schrauben liegt unterhalb des geforderten Werts. Diese

geometrische Abweichungen bedingen, dass – entgegen der Vorhersage von Hoelz [15] – nicht OP2, sondern OP1 die höchste Tragfähigkeit zeigt. Wird allerdings die Berechnung von Hoelz [15] um die gemessenen Gewindeparameter der Varianten OP1 und OP2 korrigiert, ergibt sich ebenfalls dass OP1 eine höhere Ausziehtragfähigkeit als OP2 hat. Dies bestätigt die Übertragbarkeit der Erkenntnisse der Gewinde-Testobjekte auf Holzschrauben.

REF wurde so entworfen, dass sie ähnliche Tragfähigkeiten wie die kommerzielle Holzschraube erreicht. Da zwischen REF und FIS kein signifikanter Unterschied nachgewiesen werden kann bestätigt dies ebenfalls die Übertragbarkeit der Erkenntnisse der Gewinde-Testobjekte auf Holzschrauben. Die Zusammenhänge können daher zukünftig auch von Hersteller für die Entwicklung von Holzschraubengewinden mit hohen Tragfähigkeiten genutzt werden. Weiterhin können diese zur Erhöhung der Genauigkeit von bestehenden Bemessungsansätzen für Holzschraubverbindungen verwendet werden.

Es ist zu erwarten, dass Schraubenvarianten, welche näher an den vorgeschlagenen Werten aus Bild 2 sind, höhere Tragfähigkeiten erzielen. OP1, OP2 und REF wurden so entworfen, dass diese mit dem gleichen Drahtdurchmesser gefertigt werden können. Dadurch wird ein vergleichbares Materialvolumen im Gewinde benötigt wodurch eine bessere Vergleichbarkeit zwischen den Varianten erzielt wird. Bemerkenswert ist, dass trotz des größeren Drahtdurchmessers von REF – wodurch höhere Produktkosten zu erwarten sind – diese eine niedrigere Tragfähigkeit aufweist als OP1 und OP2. Nach Hoelz [15] wurde durch die Randbedingungen des gleichen Materialvolumens zwischen den Varianten Kompromisse in der Gewindeoptimierung von OP1 und OP2 eingegangen. Dies bedeutet, dass ohne diese Randbedingungen Gewinde mit noch höherer Tragfähigkeit entwickelt werden können.

6 Fazit und Ausblick

Ziel des Beitrags ist die Prüfung der Übertragbarkeit von in Versuchen mit Gewinde-Testobjekten ermittelten Zusammenhängen zwischen den Gewindeparametern und der Ausziehtragfähigkeit. Dazu wurde die Ausziehtragfähigkeit von Schraubenvarianten mit auf Basis dieser Zusammenhänge optimierten Gewindegeometrien untersucht und mit einer kommerziellen Schraubenvariante sowie einer Referenzvariante verglichen. Die Versuche wurden in tangentialer Einschraubrichtung in Fichte durchgeführt. Das Ergebnis ist, dass die zwei gewindeoptimierten Varianten eine signifikant höhere Tragfähigkeit als die Referenz, aber auch als die

kommerzielle Variante aufweisen. Dadurch ist bestätigt, dass die für die Optimierung genutzten Einflüsse der Gewindeparameter, auf Basis der Gewinde-Testobjekte mit geraden Gewindeflanken, auf Holzschrauben übertragbar sind. Eine höhere Ausziehtragfähigkeit wird erreicht durch:

- eine größere Profilhöhe
- eine kleinere Gewindesteigung
- einen spitzeren Flankenwinkel

Hersteller von Holzschrauben können diese Zusammenhänge zur Optimierung der Gewindegeometrie nutzen, wodurch der Holzbau von einer höheren Ausziehtragfähigkeit profitiert. Weiterhin können diese Zusammenhänge zur Verbesserung der Genauigkeit der Bemessungsmodelle von Holzschraubverbindungen genutzt werden. In weiteren Untersuchungen sollten die Gewinde-Testobjekte genutzt werden, um die Einflüsse von Gewindeparameter auf die Tragfähigkeit für weitere Einschraubtiefen sowie die Einschraubrichtungen radial und axial zur Holzfaser ermittelt werden.

Danksagung

Vielen Dank an die fischerwerke GmbH & Co. KG für die freundliche Unterstützung durch die Fertigung der verwendeten Schraubvarianten.

Literatur

- [1] M. Ballerini, "Experimental investigation on parallel-to-grain wood-to-wood joints with self-tapping screws," in *WCTE - World Conference on Timber Engineering*, Auckland, New Zealand, 2012, pp. 173–182.
- [2] M. Frese and H. J. Blaß, "Models for the calculation of the withdrawal capacity of self-tapping screws," in *Proceedings of CIB-W18 Meeting, 24.-27.08.2009, Dübendorf, Switzerland*, 2009, 42-7-3.
- [3] A. Ringhofer, R. Brandner, G. Flatscher, and G. Schickhofer, "Axial beanspruchte Holzschrauben in Vollholz, Brettschichtholz und Brettsperrholz," *Bautechnik*, vol. 92, no. 11, pp. 770–782, 2015, doi: 10.1002/bate.201500075.

- [4] A. Ringhofer, R. Brandner, and G. Schickhofer, "A universal approach for withdrawal properties of self-tapping screws in solid timber and laminated timber products," in *International Network on Timber Engineering Research*, Sibenik, Croatia, 2015, 48-7-01.
- [5] *Holzbauberke Prüfverfahren - Ausziehtragfähigkeit von Holzverbindungsmitteln*, 1382, DIN Deutsches Institut für Normung e.V, Berlin, Jul. 2016.
- [6] M. Sydor, "Geometry of wood screws: a patent review," *Eur. J. Wood Prod.*, vol. 77, no. 1, pp. 93–103, 2019, doi: 10.1007/s00107-018-1362-4.
- [7] G. Pirnbacher and G. Schickhofer, "Schrauben im Vergleich - eine empirische Betrachtung," in *6. Grazer Holzbau-Fachtagung: Verbindungstechnik im Ingenieurholzbau*, 2007, F-1 - F-22.
- [8] D. Gaunt, "THE EFFECT OF THREAD GEOMETRY ON SCREW WITHDRAWAL STRENGTH," *NZ TIMBER DESIGN JOURNAL*, vol. 6, no. 3, pp. 12–20, 1997.
- [9] U. Hübner, "Mechanische Kenngrößen von Buchen-, Eschen- und Robinienholz für lastabtragende Bauteile," in *Monographic Series TU Graz / Timber Engineering & Technology*, G. Schickhofer and R. Brandner, Eds., Graz: Verlag der Technischen Universität Graz, 2014.
- [10] M. Sydor, G. Zmyslony, G. Pinkowski, and W. Szymański, "The influence of pitch on the holding power of screws in scots pine wood," *Annals of WULS – SGGW, Forestry and Wood Technology*, vol. 96, pp. 151–156, 2016.
- [11] K. Hoelz, L. Kleinhans, and S. Matthiesen, "Wood screw design: influence of thread parameters on the withdrawal capacity," *Eur. J. Wood Prod.*, 2021a, doi: 10.1007/s00107-021-01668-4.
- [12] K. Hölz, P. Grauberger, and S. Matthiesen, "Investigation of failure behavior in the thread contact of wood screws during the pull-out process," *J. Struct. Eng.*, vol. 146, no. 10, p. 4020211, 2020, doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002784.
- [13] K. Hoelz, P.-T. Dörner, J. Hohlweg, and S. Matthiesen, "Influence of Thread Parameters on the Withdrawal Capacity – Investigation of Flank Distance, Lead Angle, Flank Angle, and Thread Height," *Eur. J. Wood Prod.*, 2022b, doi: 10.1007/s00107-022-01792-9.
- [14] K. Hoelz, M. Ayoubi, T. Gwosch, and S. Matthiesen, "Theoretische Modelle zum Verbundtragverhalten Theoretische Modelle zum Verbundtragverhalten von Holzschrauben für die Schraubengestaltung," *Bautechnik*, 2021, doi: 10.1002/bate.202100003.

- [15] K. Hoelz, "Analyse und Modellierung der Zusammenhänge zwischen der Tragfähigkeit und den Gewindeparametern von Holzschrauben durch die Entwicklung von Analysetechniken," Dissertation, IPEK, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, 2021.
- [16] *Europäische Technische Bewertung ETA-11/0027 vom 2019-01-02, 11/0027*, EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG.
- [17] A. Ringhofer, "Axially loaded self-tapping screws in solid timber and laminated timber products," Institute of Timber Engineering and Wood Technology, Graz University of Technology, Graz, 2017.
- [18] J. Cohen, *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*, 2nd ed. Hillsdale, NJ: Erlbaum., 1988.
- [19] J. Dietrich, *Praxis der Umformtechnik: Umform- und Zerteilverfahren, Werkzeuge, Maschinen*, 12th ed. Wiesbaden, Heidelberg: Springer Vieweg, 2018. Accessed: Apr. 7 2022.

Autoren

Dr.-Ing. Kevin Hölz

kevin.hoelz@kit.edu

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

IPEK – Institut für Produktentwicklung

Kaiserstraße 10

76131 Karlsruhe

Frank Bremer M. Sc. (Korrespondenzautor)

frank.bremer@kit.edu

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

IPEK – Institut für Produktentwicklung

Kaiserstraße 10

76131 Karlsruhe

Maximilian Giebel B. Sc.

utscv@student.kit.edu

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

IPEK – Institut für Produktentwicklung

Kaiserstraße 10

76131 Karlsruhe

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sven Matthiesen

sven.matthiesen@kit.edu

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

IPEK – Institut für Produktentwicklung

Kaiserstraße 10

76131 Karlsruhe

Accepted Article