

Simon Aurand (Hauptautor)
Hans Joachim Blaß (Co-Autor)

Verbinder aus Kunstharzpressholz mit veränderter Oberfläche zur Erhöhung der Reibung in der Scherfuge

Im Rahmen der Entwicklung neuartiger Hauptträger-Nebenträger-Verbinder aus Kunstharzpressholz (KPH) wurden im ersten Teil eines laufenden Forschungsvorhabens verschiedene Arten der Oberflächenbehandlung der Verbinder untersucht. Diese umfassten Schleifen und Sandstrahlen, Beschichten mit Mineralkörnern und unterschiedlichen Bindemitteln, sowie das Fräsen mit verschiedenen Werkzeugen. In Versuchen wurden die jeweiligen Reibbeiwerte zwischen behandeltem KPH und Nadelholz ermittelt. Dabei konnten mittlere Haftreibungskoeffizienten von über 1,0 und charakteristische Werte bis etwa 0,9 bestimmt werden. Dies bedeutet eine signifikante Steigerung gegenüber dem Wert von 0,25, der im Eurocode 5 zur Berücksichtigung des Seileffekts angegeben ist. Aufbauend auf den Reibversuchen wurde in weiterführenden Versuchen das Verhalten der modifizierten Oberflächen in Verbindungen mit schräg eingedrehten Vollgewindeschrauben untersucht. Hierbei konnten der tragfähigkeitssteigernde Einfluss der modifizierten Oberflächen bestätigt und Steigerungen der Tragfähigkeit von bis zu 40% erzielt werden.

Keywords: Kunstharzpressholz; KPH; Reibbeiwert; Systemverbinder; HT-NT-Verbinder

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.201900101

Submitted: 22-Nov-2019
Revised: 27-Jan-2020
Accepted: 05-Feb-2020

Densified veneer wood connectors with modified surfaces to increase friction in the shear plane:

For the development of innovative connectors made of densified veneer wood (DVW) different surface modifications were examined in a first part of an ongoing research project. The modifications included sanding and sandblasting, coating with mineral particles using different bonding agents, as well as milling with different cutting tools. The coefficient of friction between the modified DVW and softwood was determined in tests. Mean static coefficients of friction of more than 1.0 and characteristic values of up to 0.9 could be determined. This implies a significant increase compared to the value of 0.25 given in Eurocode 5 to take into account the rope effect. Based on the friction tests the behaviour of the modified surfaces in combination with inclined screws was examined. The positive influence of the modified surfaces on the load carrying capacity was confirmed and an increase in load carrying capacity of up to 40% was observed in tests.

Keywords densified veneer wood; DVW; coefficient of friction; system connector; beam to beam connector

1 Allgemeines

Systemverbinder eignen sich aufgrund ihres hohen Vorfertigungsgrades besonders zur Realisierung wirtschaftlicher Haupt-Nebenträger-Verbindungen im Holzbau. Diese Verbinder bestehen oft aus Aluminium. Der eingesetzte Hochleistungsaluminiumwerkstoff bringt jedoch verschiedene Nachteile mit sich, durch die das Einsatzspektrum der HT-NT-Verbinder begrenzt wird. Nachteilig sind u.a. der geringe Feuerwiderstand sowie die sehr energieintensive und teure Herstellung der Aluminiumlegierungen. Daher sollen in einem Forschungsprojekt am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) neue Verbinder erstmals aus Kunstharzpressholz (KPH) realisiert werden. Der Lastabtrag bei HT-NT-Verbindern erfolgt in der Regel über selbstbohrende Holzschrauben, die entweder auf Abscheren rechtwinklig zur Scherfuge oder axial in Richtung der Schraubenachse belastet werden [1]. In beiden Fällen wird durch den, aus der Schrägstellung der Verbindungsmittel resultierenden Anpressdruck, Reibung in der Scherfuge aktiviert, welche die Tragfähigkeit des Anschlusses erhöht. Dieser Seileffekt wird im Eurocode 5 [2] berücksichtigt und der Reibbeiwert wird pauschal für alle miteinander verbundenen Oberflächen mit $\mu = 0,25$ angegeben. Die Schnittgrößen im Verbinder aus KPH

sollen ebenfalls über geneigt angeordnete Schrauben übertragen werden und sind in Bild 1 schematisch dargestellt. Im Rahmen der Entwicklung des Verbinders soll eine Oberflächenbehandlung des KPH erfolgen, um die Reibung zwischen Verbinder und Holzbauteil in den Scherfugen zu erhöhen und somit die Tragfähigkeit der Verbindung deutlich zu steigern. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf gefrästen Oberflächen, da diese in den Herstellungsprozess von Systemverbindern einfach eingearbeitet werden können.

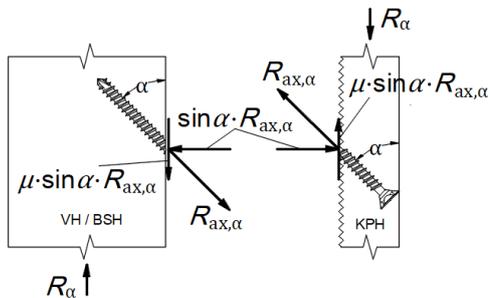


Bild 1 Schnittgrößen in der Scherfuge unter Berücksichtigung der Reibung zwischen der modifizierten Oberfläche und dem Holzbauteil.

Internal forces in the shear plane considering friction between the modified surface and the timber member.

1.1 Kunstharzpressholz

Bei KPH handelt es sich um geschichtete und mit duromeren Kunstharzen imprägnierte Buchenfurniere, die in hydraulischen Pressen unter hoher Temperatur und großem Druck verdichtet werden. Hauptsächlich wird KPH in der Automobil- und Luftfahrtindustrie sowie im Anlagen- und Maschinenbau verwendet, da es sehr hohe mechanische Eigenschaften, elektrische Isolierfähigkeit und chemische Beständigkeit besitzt. Als Furnier wird bevorzugt Buchenholz verwendet, da dieses leicht zu imprägnieren ist, eine hohe Querfestigkeit besitzt sowie in ausreichenden Mengen verfügbar ist. Es kommen überwiegend dünne Furniere mit Dicken von 0,4 – 2,1 mm zum Einsatz, um das Holzgefüge schnell und gleichmäßig mit Kunstharz zu tränken. Nach dem Zusammenlegen der Furniere zu Paketen werden diese bei einem Druck von 100 – 250 bar und einer Temperatur von 135 – 165°C bis zum Erhärten der Harze gepresst. Dadurch entstehen Platten mit einer Rohdichte von bis zu 1400 kg/m³ [3] [4].

In Versuchen wurden die Materialeigenschaften von KPH mit kreuzweise geschichteten Furnieren bestimmt [5]. Untersucht wurden dabei drei verschiedene Plattendicken $d = 6$ mm, 10 mm und 15 mm. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 dargestellt. Die Biege- und Zugfestigkeit in Plattenebene sind unabhängig von der Plattendicke weitgehend konstant, ebenso die Scher-

festigkeit und der Schubmodul. Die Druckfestigkeit und der E-Modul in Plattenebene hingegen nehmen beide mit zunehmender Plattendicke ab.

Tab. 1 Materialeigenschaften von Kunstharzpressholz in Abhängigkeit der Plattendicke (Mittelwerte)

Material properties of densified veneer wood depending on its thickness (mean values)

Materialeigenschaft	Plattendicke		
	6 mm	10 mm	15 mm
Biegefestigkeit ($f_{m,0,flat}$) in N/mm ²	113 (COV = 8%)	103 (COV = 7%)	110 (COV = 8%)
Zugfestigkeit ($f_{t,0,edge}$) in N/mm ²	99,4 (25%)	108 (13%)	102 (12%)
Druckfestigkeit ($f_{c,0,edge}$) in N/mm ²	97,2 (9%)	96,9 (3%)	80,5 (10%)
Scherfestigkeit ($f_{v,0,flat}$) in N/mm ²	10,1 (11%)	9,83 (7%)	9,86 (8%)
Elastizitätsmodul ($E_{m,0,flat}$) in N/mm ²	20300 (8%)	19500 (9%)	17600 (8%)
Schubmodul ($G_{0,flat}$) in N/mm ²	1200 (8%)	1400 (12%)	1400 (9%)
Rohdichte in kg/m ³	1363 (2%)	1376 (1%)	1381 (1%)
Holzfeuchte in %	7,1 (13%)	7,2 (16%)	6,7 (25%)

2 Oberflächenbehandlung

Um die Reibung in den Scherfugen zwischen Verbinder und Holzbauteil zu erhöhen und damit die Tragfähigkeit einer späteren Verbindung aufgrund eines höheren Seileffektes zu steigern, wurden verschiedene Arten der Oberflächenmodifizierung des KPH untersucht.

2.1 Glatt, unbehandelt

Nach dem Pressen besitzt Kunstharzpressholz eine pressblanke Schicht, welche sehr glatt ist und einer lackierten Holz- oder Metalloberfläche ähnelt, siehe Bild 2a. Um Referenzwerte zu schaffen und die Wirkung der weiteren Oberflächenbehandlungen zu quantifizieren, wurde eine erste Versuchsreihe mit glattem, unbehandeltem KPH durchgeführt.

2.2 Geschliffen

Mit einem Bandschleifer und Schleifpapier mit einer Körnung P40 wurde die pressblanke Schicht der Versuchskörper vollflächig abgeschliffen. Der Schliff erfolgte dabei quer zur Faserichtung der Decklage und somit auch quer zur späteren Beanspruchungsrichtung während der Reibungsversuche. Durch das Schleifen konnte eine deutlich spürbare Strukturierung erreicht werden, wie in Bild 2b zu sehen ist.

2.3 Sandgestrahlt

In einer kleinen Sandstrahlkammer wurde jeder Versuchskörper ungefähr zwei Minuten pro Seite manuell sandgestrahlt. Dies hatte zur Folge, dass sich auf jeder Seite und jedem Versuchskörper leicht unterschiedliche Oberflächen einstellten. Beim Sandstrahlen konnte beobachtet werden, dass das Frühholz der Furniere durch das Strahlgut abgetragen wurde und das Spätholz stehen blieb, siehe Bild 2c. Dadurch erfolgte eine Strukturierung entlang der Faserichtung der Deckfurniere und somit parallel zur späteren Beanspruchungsrichtung.

2.4 Gebürstet

Mit einer Topfbürste mit gezopftem Stahldraht wurde die glatte Oberfläche der Versuchskörper beidseitig gebürstet. Eine deutliche Strukturierung der Oberfläche ist in Bild 2d zu erkennen, jedoch war die Rauigkeit kaum spürbar. In Vorversuchen wurde auch nur ein sehr geringer Reibbeiwert ermittelt, weswegen diese Art der Oberflächenbehandlung nicht weiterverfolgt wurde. Das Prinzip des sich drehenden Werkzeugs wurde jedoch bei einem kreisförmig gefrästen Muster wieder aufgegriffen.

2.5 Beschichtet

Für die Beschichtung wurden zwei unterschiedliche Bindemittel verwendet: zum einen kam ein fließfähiger, Zweikomponenten-Klebstoff zum Einsatz, zum anderen wurde Epoxidharz-Klebeband verwendet. Beschichtet wurden die Versuchskörper entweder mit Quarzsand mit einer Korngröße von 0-2 mm oder mit Kiessplitt mit einer Korngröße von 2-4 mm. Außerdem wurden die Versuchskörper einer Versuchsreihe mit Skateboard-Griptape beschichtet.

2.5.1 Zweikomponenten-Klebstoff

Verwendet wurde ein Hybridsystem aus Epoxidharzen und Silan-terminierten Polymeren. Vor dem Klebstoffauftrag wurden die Oberflächen der Versuchskörper sandgestrahlt. Die Verarbeitung des Klebstoffes erfolgte aus einer Zweikomponenten-Kartusche mit einem statischen Mischer, welcher für eine homogene Durchmischung der beiden Komponenten sorgte. Mit einer Aufbringlehre wurde sichergestellt, dass auf jeder Seite eine Klebeschicht mit konstanter Dicke aufgebracht wurde. Für die Beschichtung mit Quarzsand wurde eine 0,5 mm dicke Klebeschicht gewählt, für die Beschichtung mit Kiessplitt eine 1,0 mm dicke Klebeschicht, siehe

Bild 2e. Anschließend wurden die Versuchskörper manuell in die jeweilige Gesteinskörnung gedrückt. Gemäß den Herstellerangaben erfolgte eine Aushärtung bei Raumtemperatur für eine Woche.

2.5.2 Epoxidharz-Klebeband

Verwendet wurden Epoxidharz-Klebebänder mit Klebeschichtdicken von 1,0 mm bzw. 0,1 mm, siehe Bild 2f. Beide Klebebänder, welche auf Epoxidharz basieren und speziell für die Verklebung von unterschiedlichen Substraten entwickelt wurden, wurden bei Raumtemperatur appliziert und härteten dann im Ofen bei einer Temperatur von 130°C für 45 min aus. Nach der Wärmebehandlung konnten bei einigen Probekörpern Risse entlang der Furnierlagen festgestellt werden. Die Auswirkung auf die mechanischen Eigenschaften wurde jedoch nicht weiter untersucht. Als Mineralkörner wurde bei beiden Klebebandvarianten lediglich der Quarzsand gewählt. Außerdem wurde der Quarzsand mit einem konstanten Anpressdruck von 2 N/mm² für zwei Minuten angepresst.

2.5.3 Griptape

Verwendet wurde ein handelsübliches Griptape, welches für die Oberseite von Skateboards für eine bessere Haftung benutzt wird. Die Körnung des Griptape war deutlich feiner als die des Quarzsandes und ähnelte einem Schleifpapier, siehe Bild 2g. Die Verarbeitung des Griptapes war deutlich einfacher als die der beiden Epoxidharz-Klebstoffe.

2.6 Gefräst

Untersucht wurden verschiedene Fräsmuster, die sich durch Verwendung unterschiedlicher Fräswerkzeuge an einer CNC-Fräse ergaben. Verwendet wurden u.a. ein Fasenfräser für längs und querangeordnete Nuten sowie ein Kassettenfräser für kreisförmige Nuten.

2.6.1 Pyramidenmuster

In Anlehnung an GIRARDON [6], welcher mit gefrästen Oberflächen formschlüssige, biegesteife Verbindungen entwickelt hat, wurden mit einem Fasenfräser Nuten in die Decklage der Versuchskörper gefräst. Die Nuten waren alle gleich tief und hatten denselben Abstand zueinander. Daraufhin wurde der Versuchskörper um 90° gedreht und wieder parallele Nuten in die Decklage gefräst, sodass kleine Pyramiden stehen blieben. Hergestellt wurden Versuchs-

körper mit 0,5 mm, 1 mm, 1,5 mm und 2 mm tiefen Nuten. In Bild 2h ist beispielhaft ein Versuchskörper mit 1,5 mm tiefen Pyramiden zu sehen.

2.6.2 Kreisförmiges Muster

Mit einem Kassettenfräser wurden 1,0 mm tiefe, kreisförmige Nuten in die Decklage des KPH gefräst, welche sich immer wieder schneiden, siehe dazu Bild 2i. Dies hatte zur Folge, dass zum Rand der Versuchskörper hin Pyramiden-ähnliche Formen stehen blieben, während es in der Mitte der Versuchskörper längliche Nuten mit einem Abstand von etwa 1,5 mm waren.

2.6.3 Schuppenmuster

Mit einem einfachen Fingerfräser, welcher um 5° geneigt war, wurden ähnlich zum Pyramidenmuster Längs- und Quernuten 1 mm tief in die Oberfläche gefräst. Dadurch entstand ein Schuppenmuster, wie in Bild 2j zu sehen ist.

2.7 Geprägt

Mit einem Gewindezirkularfräser wurde das Pyramidenmuster in eine Stahlplatte gefräst und diese dann in die Oberfläche des KPH gepresst. Die Pyramidenspitzen drangen dabei etwa 1,0 mm in die Oberfläche ein und es entstand eine Oberfläche, geprägt mit dem Negativabdruck des Pyramidenmusters, wie in Bild 2k zu sehen ist.



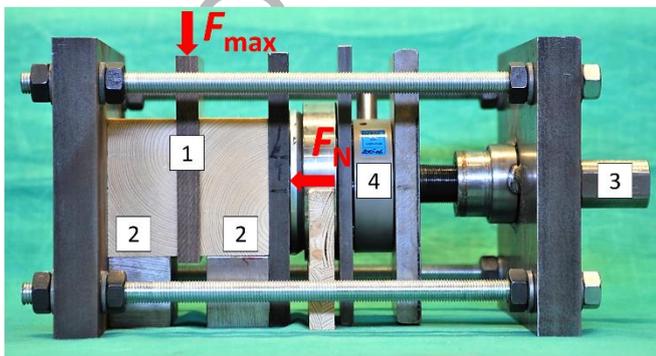
Bild 2 Untersuchte Oberflächen: a) glatt, b) geschliffen, c) sandgestrahlt, d) gebürstet, e) Kiessplitt, f) Quarzsand, g) Griptape, h) Pyramidenmuster, i) kreisförmiges Muster, j) Schuppenmuster und k) geprägte Oberfläche.

Examined surfaces: a) smooth, b) sanded, c) sandblasted, d) brushed, e) grit, f) quartz sand, g) griptape h) pyramid-like pattern, i) circular pattern, j) imbrication and k) stamped surface.

3 Versuche zur Bestimmung des Reibungskoeffizienten

3.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Für die Versuche zur Ermittlung des Haftreibungskoeffizienten wurde der Versuchsaufbau von SCHMIDT [7] übernommen, siehe Bild 3. Durch eine Spindel wird eine Gewindestange mit Feingewinde gedreht und dadurch die Kraft F_N rechtwinklig zur Reibfläche aufgebracht. Während der Versuche wurde mit einer Kraftmessdose die Kraft F_N kontinuierlich gemessen. Um F_N gleichmäßig auf die Reibfläche zu verteilen wurde eine Kalotte zwischen Kraftmessdose und Reibfläche angeordnet. Außerdem wurden die Nadelholzstücke auf Metallklötze gestellt, damit die Kraft F_N in der Schwerachse der Gewindestange mittig auf die Reibfläche wirkte. Für das Nadelholz wurde Fichte/Tanne verwendet, welches bei Normklima 20/65 gelagert wurde und eine mittlere Holzfeuchte von $u = 12\%$ hatte. Die Oberflächen waren frei von Ästen > 5 mm und ohne Klebefugen. Die Kraft F_{max} , parallel zur Reibfläche, wurde über eine Universalprüfmaschine auf die Versuchskörper aus KPH aufgebracht. Der gesamte Versuchsablauf erfolgte weggesteuert bis zu einer Verschiebung von 15 mm.



- 1 Versuchskörper aus KPH mit behandelter Oberfläche
- 2 Seitenhölzer aus Nadelholz
- 3 Spindel mit Gewindestange zur Aufbringung von F_N
- 4 Kraftmessdose zur Messung von F_N

Bild 3 Versuchsaufbau für Reibungsversuche.

Test setup for friction tests.

Bei den Versuchen wurde unterschieden zwischen Seitenholz und Hirnholz des Nadelholzes, um die verschiedenen Einbausituationen der Verbinder nachzustellen. Der Kontakt mit Seitenholz tritt am Hauptträger auf, der Kontakt mit dem Hirnholz hingegen am Nebenträger. Des Weiteren wurde bei einigen Versuchen unterschieden zwischen Faserrichtung der Seitenhölzer parallel oder rechtwinklig zur Faserrichtung der Decklage des KPH bzw. der Beanspruchungsrichtung. Die unterschiedlichen Versuchskonfigurationen sind in Bild 4 zu sehen. Das Nadel-

holz rechts und links im Prüfkörper hatte eine ähnliche Rohdichte.

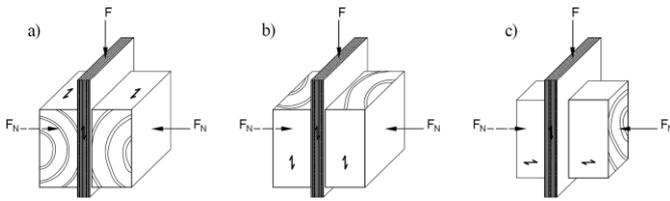


Bild 4 Reibungsversuche mit a) Seitenholz rechtwinklig und b) parallel zur Belastungsrichtung sowie mit c) Hirnholz.

Friction tests with a) face grain perpendicular and b) parallel to the direction of the load as well as c) end grain.

Zu Beginn wurden die Parameter Versuchsgeschwindigkeit und Normalspannung in der Reibfläche variiert, um den Einfluss dieser beiden Parameter zu bestimmen. Die Versuchsgeschwindigkeit wurde zwischen 1 mm/min, 5 mm/min und 10 mm/min variiert, die Querdruckspannung zwischen 1 N/mm², 2,5 N/mm² und 6 N/mm².

Der Reibungskoeffizient berechnet sich nach Gleichung 1. Dabei wird die Kraft F_{\max} , parallel zur Kontaktfläche, gleichmäßig auf die beiden Reibflächen aufgeteilt.

$$\mu = \frac{F_{\max}}{2 \cdot F_N} \quad (1)$$

3.2 Ergebnisse

3.2.1 Auswertung der Parameter Anpressdruck, Prüfgeschwindigkeit und Rohdichte

Die Auswertung der Versuche mit den nicht modifizierten Versuchskörpern, bei denen die Parameter Anpressdruck und Prüfgeschwindigkeit geändert wurden, zeigen eine geringe Abhängigkeit des Reibbeiwertes von der Querdruckspannung in der Reibfläche als auch von der Prüfgeschwindigkeit. Wie in Bild 5 zu sehen ist, bleibt der Reibbeiwert mit zunehmenden Anpressdruck und Prüfgeschwindigkeit nahezu konstant. Auf Grundlage dieser Ergebnisse wurde für die darauffolgenden Versuche mit allen weiteren Oberflächen eine Querdruckspannung zu Versuchsbeginn von 2,5 N/mm² gewählt, welche der charakteristischen Querdruckfestigkeit von Nadelholz entspricht, und die Prüfgeschwindigkeit von 5 mm/min gewählt, um eine kurze Versuchsdauer von 3 min zu erreichen.

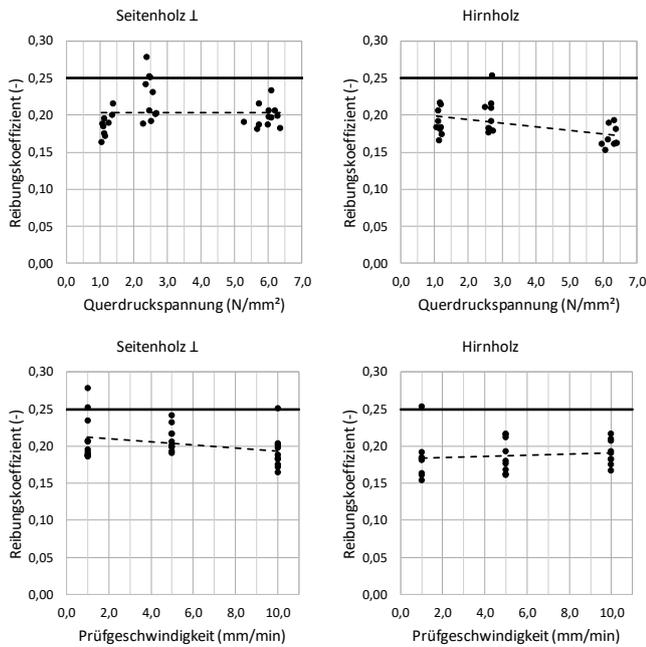


Bild 5 Einfluss der Querdruckspannung in der Reibfläche sowie der Prüfgeschwindigkeit auf den Reibungskoeffizienten.

Impact of the stress perpendicular to the contact area as well as the testing speed on the coefficient of friction.

Zusätzlich zu den oben genannten Parametern wurde auch der Einfluss der Rohdichte der Nadelhölzer untersucht. In Bild 6 sind die Ergebnisse beispielhaft für die gefräste Oberfläche mit Pyramidenmuster und geprägter Oberfläche dargestellt. Sowohl bei den Versuchen mit Pyramidenmuster als auch mit dem geprägten KPH ist kein signifikanter Einfluss der Rohdichte auf den Reibbeiwert zu erkennen.

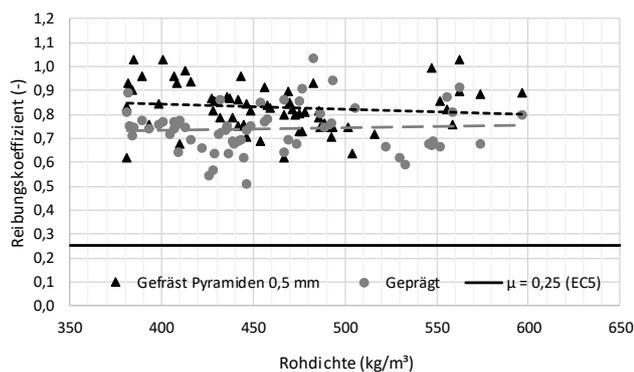


Bild 6 Einfluss der Rohdichte des Nadelholzes auf den Reibungskoeffizienten.

Influence of the softwood density on the coefficient of friction.

3.2.2 Nicht modifizierte, geschliffene und sandgestrahlte Oberflächen

Bei den Versuchen mit nicht modifizierter Oberfläche wurde besonders bei Versuchen mit Seitenholz und geringer Prüfgeschwindigkeit ($v = 1$ mm/min) ein deutlich ausgeprägtes Stick-

Slip-Verhalten festgestellt, siehe Bild 7a. Dieses schlagartige Wechseln der Ruhephase (Stick) und Gleitphase (Slip) kann zum einen auf die stark unterschiedlichen Steifigkeiten des Nadelholzes und KPH in Kombination mit einer geringen Prüfgeschwindigkeit zurückgeführt werden und deutet zum anderen auf eine deutliche Differenz zwischen Haftreibung und Gleitreibung hin [8]. Hierzu im Vergleich in Bild 7b der Verlauf für einen Versuch mit Hirnholz und einer Prüfgeschwindigkeit von $v = 10 \text{ mm/min}$. Im Mittel konnte ein Reibbeiwert für die unbehandelte Oberfläche von $\mu = 0,20 \pm 0,03$ bestimmt werden. Für die geschliffene und sandgestrahlte Oberfläche wurden mehr als doppelt so große Werte mit $\mu = 0,56 \pm 0,08$ bzw. $\mu = 0,49 \pm 0,07$ ermittelt.

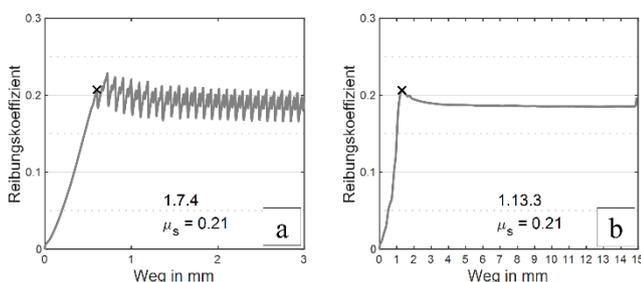


Bild 7 Typische Versuchskurve für KPH mit unbehauelter Oberfläche und a) Seitenholz und b) Hirnholz.

Exemplary plot for DVW with untreated surface and a) face grain and b) end grain.

3.2.3 Beschichtete Oberflächen

Ein adhäsives Versagen der Beschichtung konnte vor allem bei den Versuchskörpern mit dem Zweikomponenten-Klebstoff beobachtet werden. Der Kleber samt Mineralkörnern löste sich nahezu vollständig vom KPH ab. Diese Beobachtung war unabhängig von der Korngröße der Beschichtung. Auf Grund des Versagens des Klebstoffes lässt sich nur ein unterer Wert des Haftreibungskoeffizienten bestimmen. Dieser liegt bei $\mu = 0,64 \pm 0,08$ für die Beschichtung mit Quarzsand bzw. bei $\mu = 0,61 \pm 0,05$ für die Beschichtung mit Kiessplitt.

Ebenfalls zu adhäsivem Versagen kam es bei der Beschichtung mit Epoxidharz-Klebeband mit einer Klebeschichtdicke von 0,1 mm. Hier lösten sich jedoch nur vereinzelte Stellen des Klebebandes vom KPH. Bei den Versuchen mit dem Klebeband mit einer Schichtdicke von 1,0 mm kam es zu kohäsivem Versagen und die Mineralkörner blieben im Nadelholz haften. Insgesamt zeigen die Ergebnisse deutlich größere Reibbeiwerte als mit dem pastösen Epoxidharz und liegen im Mittel bei $\mu = 0,82 \pm 0,10$ für das dünne und $\mu = 0,74 \pm 0,03$ für das dicke Klebeband.

Aufgrund der mangelnden Haftung des Klebstoffes am KPH konnte bei den Versuchen mit Griptape kein genauer Reibbeiwert ermittelt werden. Der mittlere Reibbeiwert war mit $\mu = 0,24 \pm 0,02$ nur unbedeutend höher als für unbehandeltes KPH.

3.2.4 Gefräste Oberflächen

Für alle vier untersuchten Pyramidenmuster sind die Ergebnisse für die Reibbeiwerte mit $\mu = 0,82 \pm 0,11$ (0,5 mm), $\mu = 0,89 \pm 0,10$ (1,0 mm), $\mu = 1,06 \pm 0,11$ (1,5 mm) und $\mu = 1,15 \pm 0,15$ (2,0 mm) deutlich höher als für die bisher gezeigten Oberflächenbehandlungen. Vor allem bei den kleinen Pyramiden mit 0,5 mm Tiefe kam es zu einem Abscheren der Pyramiden parallel zur Belastungsrichtung. Eine solche beschädigte Oberfläche ist in Bild 8a zu sehen. Außerdem war bei allen Versuchen eine starke Schädigung der Nadelholz-Oberflächen zu beobachten, wie in Bild 8b zu sehen ist. Das Frühholz, in welches die Pyramiden eingepresst wurden, löste sich entlang der Jahrringe vom darunterliegenden Spätholz. Dies war je nach Jahrringlage unterschiedlich stark ausgeprägt, wurde jedoch nicht weiter systematisch untersucht. Die Mittelwerte der Haftreibungskoeffizienten sind in Tabelle 2 angegeben. Je größer die Pyramiden waren, desto tiefer konnten diese sich in das Nadelholz eindrücken und desto höher waren dementsprechend die ermittelten Reibbeiwerte.

Bei den Versuchen mit dem kreisförmigen Fräsmuster sowie dem Schuppenmuster berechneten sich die Mittelwerte zu $\mu = 0,92 \pm 0,12$ bzw. $\mu = 0,66 \pm 0,06$. Die Versuche mit dem geprägten KPH ergaben Reibbeiwerte von $\mu = 0,79 \pm 0,10$.

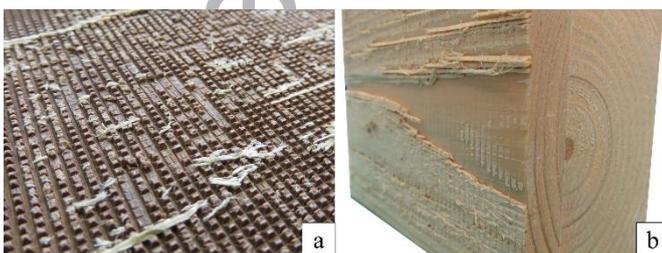


Bild 8 Schädigung a) des Pyramidenmusters und b) Rollschubversagen des Nadelholzes bei Reibversuchen rechtwinklig zur Faserrichtung.

Damage of a) the pyramid-shaped pattern and b) rolling-shear failure of the softwood during friction tests perpendicular to the grain.

3.2.5 Mittelwerte und charakteristische Werte

Die Berechnung der charakteristischen Werte erfolgte in Anlehnung an DIN EN 14358 [9] und DIN EN 14545 [10]. Für das 5%-Quantil wurde ein globaler Variationskoeffizient COV_g auf

Grundlage aller Reibungsversuche berechnet. Insgesamt wurden $n = 398$ Reibungsversuche durchgeführt und der globale Variationskoeffizient COV_g berechnete sich zu 0,10.

Accepted Article

Tab. 2 Übersicht über Haftreibungskoeffizienten: Mittelwerte und charakteristische Werte

Summary of determined static coefficients of friction: Mean and characteristic values

Oberfläche	Reibbeiwert μ		
	Mittelwert / charakteristischer Wert		
	Seitenholz I	Seitenholz II	Hirnholz
Glatt	0,20 / 0,17 n = 31	-	0,19 / 0,16 n = 27
Geschliffen	0,56 / 0,47 n = 6	-	0,47 / 0,40 n = 6
Sandgestrahlt	0,49 / 0,41 n = 6	-	0,47 / 0,40 n = 6
Beschichtet mit Zweikomponenten-Klebstoff und Quarzsand (0-2 mm)	0,64 / 0,54 n = 3	-	0,54 / 0,46 n = 3
Beschichtet mit Zweikomponenten-Klebstoff und Kiessplitt (2-4 mm)	0,61 / 0,51 n = 3	-	0,69 / 0,58 n = 3
Beschichtet mit Epoxidharz-Klebeband (0,1 mm) und Quarzsand	0,82 / 0,69 n = 3	-	0,97 / 0,82 n = 3
Beschichtet mit Epoxidharz-Klebeband (1,0 mm) und Quarzsand	0,74 / 0,62 n = 3	-	0,82 / 0,69 n = 3
Beschichtet mit Griptape	0,24 / 0,20 n = 3	-	0,32 / 0,27 n = 4
Gefräst Pyramiden 0,5 mm	0,82 / 0,69 n = 30	0,82 / 0,69 n = 10	0,84 / 0,71 n = 20
Gefräst Pyramiden 1,0 mm	0,94 / 0,79 n = 15	0,88 / 0,74 n = 20	0,80 / 0,67 n = 10
Gefräst Pyramiden 1,5 mm	1,06 / 0,89 n = 20	1,03 / 0,87 n = 19	1,06 / 0,89 n = 18
Gefräst Pyramiden 2,0 mm	1,15 / 0,97 n = 12	-	-
Gefräst Kreisförmig	0,92 / 0,78 n = 4	-	0,78 / 0,66 n = 3
Gefräst Schuppenmuster	0,66 / 0,56 n = 7	-	-
Geprägt mit Pyramidenmuster	0,79 / 0,67	0,67 / 0,56	0,71 / 0,60

n = 30

n = 10

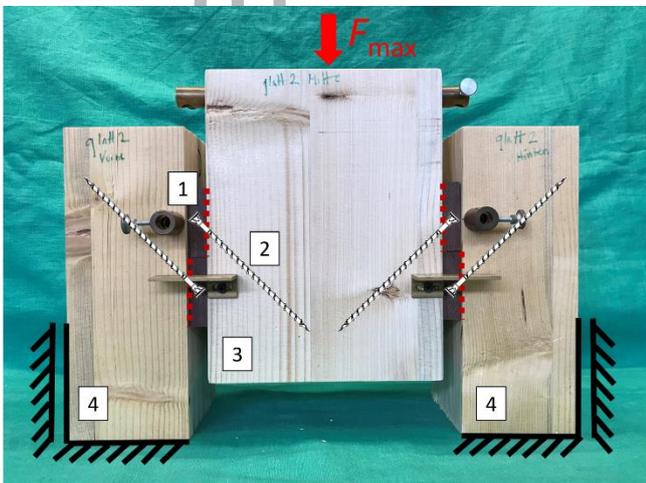
n = 21

4 Druck-Scher-Versuche mit geneigten Schrauben

Aufbauend auf den Reibungsversuchen wurden Versuche mit einfachen KPH-Verbindern mit modifizierter Oberfläche durchgeführt, bei denen die Kraft zwischen den beiden Verbinderteilen lediglich über Druckkontakt übertragen wurde. Hierbei ging es primär darum zu untersuchen, ob mit geneigt eingedrehten Schrauben in einer späteren Einbausituation ein ausreichend hoher Anpressdruck in der Kontaktfläche erzeugt werden kann und somit die zuvor ermittelten Haftreibungsbeiwerte auftreten.

4.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Der Versuchsaufbau ist in Bild 9 zu sehen. Die KPH-Verbinder wurden jeweils nur auf einer Seite modifiziert und mit geneigt eingedrehten Schrauben an Seiten- bzw. Mittelhölzern befestigt. Als Schrauben wurden Vollgewindeschrauben mit einem Durchmesser von $d = 5$ mm und einer Länge von $l = 100$ mm gewählt. Insgesamt wurden pro Verbinder jeweils fünf Schrauben ins Seitenholz und ins Mittelholz eingedreht.



- 1 Verbinder aus KPH mit behandelter Oberfläche
- 2 VGS 5x100 mm um 45° geneigt
- 3 Mittelholz aus Nadelholz
- 4 Seitenholz aus Nadelholz

Bild 9 Versuchsaufbau für die Druck-Scher-Versuche mit geneigt eingedrehten Schrauben.

Test setup for the push-out tests with inclined screws.

Belastet wurden die Versuchskörper mit einer Universalprüfmaschine. Während des Versuchsablaufs wurden sowohl die Maschinenkraft als auch die Relativverschiebung zwischen

Mittel- und Seitenholz gemessen. Gemessen wurde die Relativverschiebung an jeder Verbindung an der Vorder- und Rückseite der Versuchskörper. Der Versuchsablauf und die Auswertung erfolgten in Anlehnung an DIN EN 26891 [11]. Es wurden sowohl die Höchstlast $F_{V,\text{test}}$ als auch die Steifigkeiten k_s je Verbinder ermittelt. Die Steifigkeiten wurden im Bereich zwischen 10% und 40% der Höchstlast im linear-elastischen Bereich ermittelt. Geprüft wurden jeweils drei Versuchskörper pro Oberflächenart.

4.2 Ergebnisse

Die aufgetretenen Versagensarten waren entweder ein Zugversagen einer oder mehrerer Schrauben in der Scherfuge oder ein Herausziehen der Schrauben aus dem Nadelholz. Die Versuche mit Verbindern mit glatter und geschliffener Oberfläche sowie beschichtet mit dickem Epoxidharz-Klebeband und Quarzsand versagten alle aufgrund des Erreichens der Tragfähigkeit der Schrauben, siehe Bild 10a. Die Versuche mit den Verbindern mit kreisförmigen Fräsmuster und beschichtet mit Griptape hingegen versagten ausschließlich durch ein Herausziehen der Schrauben aus dem Nadelholz. Die Ergebnisse lassen eine deutliche Steigerung in der Tragfähigkeit der Verbindung für jegliche Art der Oberflächenmodifizierung erkennen. Einzige Ausnahme bilden hierbei die Versuche mit Griptape. Wie schon bei den Reibversuchen kam es zu einem Versagen in der Klebefuge. Zu Beginn wurden wieder Versuche mit glatter Oberfläche durchgeführt, um Vergleichswerte zu ermitteln. Der Mittelwert der Höchstlast dieser Versuche lag bei $F_{V,\text{test}} = 40,5 \text{ kN} \pm 0,8$ (pro Verbinder). Für die verschiedenen Pyramidenmuster konnten Höchstlasten von etwa $53 \text{ kN} \pm 4,0$ ermittelt werden, was eine Tragfähigkeitssteigerung von über 30 % bedeutet. In Tabelle 3 sind die erreichten Höchstlasten und die daraus berechneten Steifigkeiten pro Verbinder für alle untersuchten Oberflächen dargestellt.

Auffällig zu beobachten war eine Verdrehung der Verbinder und ein Endrücken der unteren Verbinderkante in das Nadelholz. Bild 10b zeigt das Eindringen des Verbinders ins Seitenholz am unteren Ende sowie das Klaffen der Scherfuge am oberen Ende.



Bild 10 a) Zugversagen aller fünf Schrauben bei Beschichtung mit dünnem EpoxyTape und Quarzsand und b) Eindrücken der unteren Verbinderkante in das Nadelholz

a) Tensile failure of all five screws for coating with thin EpoxyTape and quartz sand and b) impressing of the lower connector edge into the softwood.

Tab. 3 Mittlere Höchstlast sowie mittlere Steifigkeit für einen Verbinder und maßgebende Versagensart
Mean maximal load per connector and governing failure mode

Oberfläche	Höchstlast in kN	Steifigkeit in kN/mm	Versagensart
Glatt	40,5 (COV = 2%)	16,7 (COV = 5%)	Zugversagen
Geschliffen	50,3 (3%)	16,3 (18%)	Zugversagen
Sandgestraht	50,6 (3%)	17,9 (14%)	Ausziehversagen ¹⁾
Beschichtet mit EpoxyTape (0,1 mm)	57,8 (2%)	13,6 (5%)	Ausziehversagen ¹⁾
Beschichtet mit EpoxyTape (1,0 mm)	52,3 (4%)	11,4 (6%)	Zugversagen
Beschichtet mit Griptape	39,0 (5%)	11,4 (8%)	Ausziehversagen
Gefräst Pyramiden 1,0 mm	52,9 (8%)	15,6 (5%)	Ausziehversagen ¹⁾
Gefräst Pyramiden 1,5 mm	53,4 (2%)	12,2 (6%)	Ausziehversagen ¹⁾
Gefräst Pyramiden 2,0 mm	52,8 (4%)	11,0 (9%)	Ausziehversagen ¹⁾
Gefräst Kreisförmig	49,9 (0%)	14,7 (10%)	Ausziehversagen

¹⁾ Versagensart bei zwei von drei Versuchen

4.3 Rechnerische Tragfähigkeit

Die Tragfähigkeit einer Verbindung kann nach Gleichung 2 berechnet werden. Die wirksame Verbindungsmittellanzahl wird dabei entgegen dem Eurocode 5 zu $n_{ef} = n$ berechnet.

$$F_{V,exp} = n_{ef} \cdot F_{ax} \cdot (\cos \alpha + \mu \sin \alpha) \quad (2)$$

Für die axiale Tragfähigkeit der Schrauben auf Herausziehen werden zwei verschiedenen Formeln betrachtet. Gleichung 3 von Blaß et al. [12] ermittelt den Ausziehwiderstand in Abhän-

gigkeit vom Einschraubwinkel. Die Gleichung beruht auf über 700 Versuchen und kann auch auf selbstbohrende Holzschrauben anderer Hersteller übertragen werden, sofern die geometrischen Eigenschaften mit denjenigen der untersuchten Schrauben vergleichbar sind.

$$F_{ax} = \frac{0,6 \cdot \sqrt{d} \cdot \ell_{ef}^{0,9} \cdot \rho^{0,8}}{1,2 \cdot \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha} \quad (3)$$

Gleichung 4 von Frese et al. [13] berechnet ebenfalls den Auszieh Widerstand von selbstbohrenden Holzschrauben und wurde mittels Regressionsrechnungen auf Grundlage von 1850 Ausziehversuchen ermittelt. Sofern auch hier die geometrischen Eigenschaften der Schrauben vergleichbar sind, schätzt Gleichung 4 den Auszieh Widerstand genauer als bisher rechnerisch ab.

$$\ln(F_{ax}) = 6,739 + 0,03257 \cdot \ell_{ef} + 2,148 \cdot 10^{-4} \cdot d \cdot \rho - 1,171 \cdot 10^{-4} \cdot \ell_{ef}^2 \quad (4)$$

Die Rohdichte wurde nach den Versuchen an jedem Seiten- und Mittelholz bestimmt. Für die Haftreibungskoeffizienten wurden die Mittelwerte der jeweiligen Oberfläche aus den vorangegangenen Versuchen übernommen. In Tabelle 4 sind die berechneten Tragfähigkeiten auf Herausziehen sowie die Zugtragfähigkeit der Schrauben gezeigt. Außerdem wurde zum Vergleich das Verhältnis der maßgebenden berechneten Werte, $F_{V,exp}$, mit den Höchstlasten aus den Versuchen, $F_{V,test}$, berechnet. Der Vergleich liefert einen kleinsten Verhältniswert von 0,86 und einen mittleren Verhältniswert von 1,01 bei der Verwendung von Gleichung 3 bzw. einen kleinsten Verhältniswert von 0,82 und einen mittleren Verhältniswert von 0,98 bei der Verwendung von Gleichung 4. Die mittleren Verhältniswerte bestätigen eine hervorragende Übereinstimmung des Rechenmodells mit den Höchstwerten aus den Versuchen auch für signifikant höhere Reibbeiwerte.

Tab. 4 Rechnerische Tragfähigkeiten und Vergleich der berechneten Werte mit den Höchstlasten aus den Versuchen
 Calculated load-carrying capacities and comparison of the calculated values to the ultimate loads in the tests

Oberfläche	Tragfähigkeit auf Herausziehen				Zugtragfähigkeit F_{tens} in kN
	mit F_{ax} nach Gl. 3	Vergleich	mit F_{ax} nach Gl. 4	Vergleich	
	$F_{V,exp}$ in kN	$F_{V,test} / F_{V,exp}$	$F_{V,exp}$ in kN	$F_{V,test} / F_{V,exp}$	
Glatt	36,4±1,1	1,11	37,6±0,70	1,08	38,3
Geschliffen	47,3±1,8	1,07	48,7±1,2	1,03	49,4
Sandgestrahlt	45,7±1,6,	1,11	47,0±1,0	1,07	47,5
Beschichtet mit EpoxyTape (0,1 mm)	54,4±1,7	1,06	56,3±1,1	1,03	57,7
Beschichtet mit EpoxyTape (1,0 mm)	53,3±1,9	0,98	54,7±1,3	0,96	55,1
Beschichtet mit Griptape	38,4±0,9	1,01	39,4±0,6	0,99	39,3
Gefräst Pyramiden 1,0 mm	53,8±1,7	0,98	56,7±1,1	0,93	59,6
Gefräst Pyramiden 1,5 mm	58,6±1,7	0,91	61,6±1,1	0,87	64,3
Gefräst Pyramiden 2,0 mm	61,2±2,6	0,86	64,7±1,6	0,82	68,1
Gefräst Kreisförmig	49,7±1,8	1,00	48,9±1,1	1,02	61,8

4.4 Vergleich mit dem Eurocode 5

Die Tragfähigkeit von Verbindungen mit unter 45° geneigten Schrauben und einem Reibbeiwert von $\mu = 0,25$ berechnet sich nach Gleichung 2 zu $F_V = 1,25 \cdot F_{ax} / \sqrt{2}$. Wird nun beispielsweise für eine gefräste Oberfläche mit Pyramidenmuster ein charakteristischer Reibbeiwert von $\mu = 0,80$ in Gleichung 2 eingesetzt, ergibt sich eine über 40% höhere Tragfähigkeit. Weitere Vergleiche der Reibungskoeffizienten und Tragfähigkeiten mit dem Wert aus dem Eurocode 5 sind in Tabelle 5 aufgeführt.

Tab. 5 Vielfaches des Reibbeiwertes und Erhöhung der Tragfähigkeit im Vergleich zum Wert von $\mu = 0,25$ aus dem Eurocode 5
Multiple of the friction coefficient and increase of load carrying capacity compared to the Eurocode 5 value of $\mu = 0,25$

Oberfläche	Erhöhung des Reibbeiwertes		Steigerung der Tragfähigkeit ¹⁾	
	Seitenholz I	Hirnholz	Seitenholz I	Hirnholz
Gefräst Pyramiden 0,5 mm	2,8	2,8	36%	37%
Gefräst Pyramiden 1,0 mm	3,2	2,7	44%	34%
Gefräst Pyramiden 1,5 mm	3,6	3,6	52%	52%
Gefräst Pyramiden 2,0 mm	3,9	-	58%	-
Gefräst Kreisförmig	3,2	2,6	45%	33%
Geprägt	2,7	2,4	34%	28%

¹⁾ für geneigte Schrauben mit $\alpha = 45^\circ$

5 Fazit

Die Reibungsversuche zeigen, dass schon mit einfachen Methoden der Oberflächenmodifizierung erhöhte Reibbeiwerte zwischen Verbinder und Holzbauteil erzielt und damit auch größere Tragfähigkeiten erreicht werden können. Das Hauptaugenmerk lag dabei auf den aufwändiger herzustellenden gefrästen Oberflächen, die jedoch im Produktionsprozess aktuell verwendeter HT-NT-Verbinder problemlos integriert werden können. Die in Tabelle 2 vorgestellten charakteristischen Reibbeiwerte bedeuten eine Vergrößerung des Reibungskoeffizienten auf das 2,5- bis zu 4-fache im Vergleich zum aktuell im Eurocode 5 angegebenen Wert von $\mu = 0,25$.

Literatur

- [1] BLASS, H.J. (2017) *Selbstbohrende Schrauben und Systemverbinder – Stand der Technik und Herausforderungen*. 23. Internationales Holzbau-Forum, Garmisch-Partenkirchen.
- [2] DIN EN 1995-1-1:2010-12 (2010) *Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau*, Beuth, Berlin.
- [3] PAULITSCH, M.; BARBU, M.C. (2015) *Holzwerkstoffe der Moderne*, DRW-Verlag, Leinfelden-Echterdingen.
- [4] WAGENFÜHRER, A.; SCHOLZ, F. [Hrsg.] (2018) *Taschenbuch der Holztechnik*, 3. Aufl., Carl Hanser Verlag, München.
- [5] VERSUCHSANSTALT FÜR STAHL, HOLZ UND STEINE (2019) *Prüfbericht Nr. 186147* [unveröffentlicht], Holzbau und Baukonstruktionen - Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- [6] GIRARDON, S. (2014) *Amélioration des performances mécaniques des assemblages bois sur bois vissés par préparation des interfaces - Application à la réalisation d'éléments de structure* [Dissertation]. Université de Lorraine - École Doctorale RP2E.
- [7] SCHMIDT, T. (2018) *Kontaktverbindungen für aussteifende Scheiben aus Brettsperrholz*. Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau, Bd. 33, KIT Scientific Publishing
- [8] HESLOT, F.; BAUMBERGER, T.; PERRIN, B.; CAROLI, B.; CAROLI, C. (1994) *Creep, stick-slip, and dry-friction dynamics: Experiments and a heuristic model* in: *Physical Review E* **49** H. 6, S. 4973–4988.
- [9] DIN EN 14358:2016-11 (2016) *Holzbauwerke - Berechnung und Kontrolle charakteristischer Werte*, Beuth, Berlin.
- [10] DIN EN 14545:2009-02 (2009) *Holzbauwerke - Nicht stiftförmige Verbindungselemente - Anforderungen*, Beuth, Berlin.
- [11] DIN EN 26891:1991-07 (1991) *Holzbauwerke; Verbindungen mit mechanischen Verbindungsmitteln; Allgemeine Grundsätze für die Ermittlung der Tragfähigkeit und des Verformungsverhaltens (ISO 6891:1983)*, Beuth, Berlin.

- [12] BLASS, H.J.; BEJTKA, I.; UIBEL, T. (2006) *Tragfähigkeit von Verbindungen mit selbstbohrenden Holzschrauben mit Vollgewinde*. Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau, Bd. 4, Universitätsverlag Karlsruhe
- [13] FRESE, M.; FELLMOSE, P.; BLASS, H.J. (2010) *Modelle für die Berechnung der Ausziehtragfähigkeit von selbstbohrenden Holzschrauben* in: European Journal of Wood and Wood Products **68** H. 4, S. 373–384.

Autoren

Simon Aurand, M.Sc.
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Holzbau und Baukonstruktionen
R.-Baumeister-Platz 1
76131 Karlsruhe
simon.aurand@kit.edu

Prof. Dr.-Ing. Hans Joachim Blaß
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Holzbau und Baukonstruktionen
R.-Baumeister-Platz 1
76131 Karlsruhe
hans.blass@kit.edu

Accepted Article