

Entwicklung von Hauptträger-Nebenträger-Verbindern aus Kunstharzpressholz: Oberflächenbehandlungen zur Erhöhung der Reibung in der Scherfuge

Vortragender:

Aurand, Simon

M.Sc.

Holzbau und Baukonstruktionen
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
simon.aurand@kit.edu



- 1990 geboren in Heidelberg
- 2010 – 2017 Studium des Bauingenieurwesens am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
- Seit 2017 Wissenschaftlicher Mitarbeiter

Autor: Simon Aurand

Zusammenfassung

In einem laufenden Forschungsvorhaben zur Entwicklung neuartiger Hauptträger-Nebenträger-Verbinder aus Kunstharzpressholz (KPH) wurden im ersten Teil verschiedene Arten der Oberflächenbehandlung der Verbinder untersucht. Diese umfassten Schleifen und Sandstrahlen, Beschichten mit Mineralkörnern und unterschiedlichen Bindemitteln, sowie das Fräsen mit verschiedenen Werkzeugen. Die jeweiligen Reibbeiwerte zwischen behandeltem KPH und Nadelholz wurden in über 300 Versuchen ermittelt. In weiterführenden Versuchen wurde das Verhalten der modifizierten Oberflächen in Verbindungen mit schräg eingedrehten Vollgewindeschrauben untersucht.

1. Einleitung

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. Als Furnier wird bevorzugt Buchenholz verwendet, da dieses leicht zu imprägnieren 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 [1-2].

2. Oberflächenbehandlungen

2.1 Glatt, unbehandelt

Eine erste Versuchsreihe wurde mit glattem, unbehandeltem KPH durchgeführt, um Referenzwerte zu schaffen und die Wirkung der weiteren Oberflächenbehandlungen zu quantifizieren.

2.2 Geschliffen

Die Versuchskörper wurden vollflächig mit einem Bandschleifer und Schleifpapier mit einer Körnung P40 geschliffen. Dabei erfolgte der Schliff quer zur späteren Beanspruchungsrichtung während der Reibungsversuche.

2.3 Sandgestrahlt

Jeder Versuchskörper wurde ungefähr zwei Minuten pro Seite manuell in einer kleinen Sandstrahlkammer sandgestrahlt. Beim Sandstrahlen konnte beobachtet werden, dass das Frühholz der Furniere durch das Strahlgut abgetragen wurde und das Spätholz stehen blieb. Dadurch erfolgte eine Strukturierung entlang der Faserrichtung der Deckfurniere und somit parallel zur späteren Beanspruchungsrichtung.

2.4 Beschichtet

2.4.1 Zweikomponenten-Klebstoff 2K-SE

Beschichtet wurde das KPH in einer Versuchsreihe mit Quarzsand mit einer Korngröße von 0-2 mm und in einer weiteren Reihe mit Kiessplitt mit einer Korngröße von 2-4 mm. Als Klebstoff wurde ein Hybridsystem aus Epoxidharzen und Silan-terminierten Polymeren verwendet, welches eine pastöse, fließfähige Masse war. Die Aushärtung erfolgte bei Raumtemperatur für eine Woche.

2.4.2 Epoxidharz-Klebeband EpoxyTape

Beschichtet wurde das KPH lediglich mit Quarzsand. Als Klebstoff wurden Epoxidharz-Klebebänder mit Klebeschichtdicken von 1,0 mm bzw. 0,1 mm verwendet. Beide Klebebänder wurden bei Raumtemperatur appliziert und härteten dann im Ofen bei einer Temperatur von 130°C für 45 min aus.

2.4.3 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.

2.5 Gefräst

2.5.1 Pyramidenmuster

In die Decklage der Versuchskörper wurden, in Anlehnung an Girardon [3], Längs- und Quernuten gefräst. Die Nuten waren alle gleich tief und hatten denselben Abstand zueinander. Aufgrund der um 90° zueinander gedrehten Anordnung der Nuten blieben kleine Pyramiden stehen. Hergestellt wurden Versuchskörper mit 0,5 mm, 1 mm, 1,5 mm und 2 mm tiefen Nuten. In **Abb. 1a** ist beispielhaft ein Versuchskörper mit 1,5 mm tiefen Pyramiden zu sehen.

2.5.2 Kreisförmiges Muster

In die Decklage des KPH wurden kreisförmige Nuten gefräst, welche sich immer wieder schneiden, siehe dazu **Abb. 1b**. Dies hatte zur Folge, dass zum Rand der Versuchskörper hin Pyramiden-ähnliche Formen stehen blieben, während es in der Mitte der Versuchskörper längliche Nuten waren.

2.5.3 Schuppenmuster

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

2.6 Geprägt

In eine Stahlplatte wurde das Pyramidenmuster mit 0,5 mm tiefen Nuten gefräst, und diese dann in die Oberfläche des KPH gepresst. Dabei entstand eine Oberfläche mit einem Negativabdruck des Pyramidenmusters.

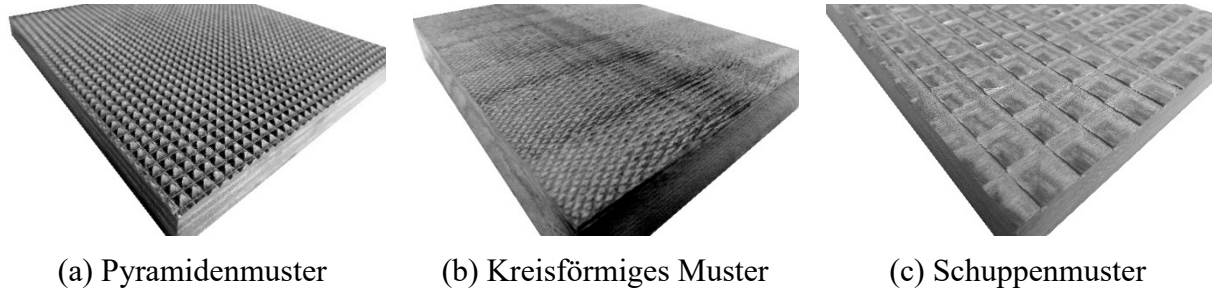
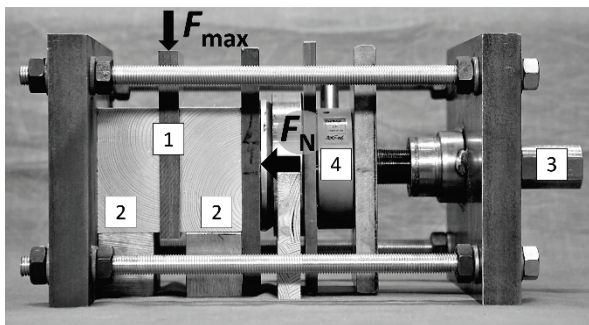


Abb. 1: Gefräste Oberflächen

3. Versuche zur Bestimmung des Reibungskoeffizienten

3.1 Versuchsaufbau und –durchführung

Der Versuchsaufbau für die Reibungsversuche wurde von Schmidt [4] übernommen und ist in Abb. 2 zu sehen. Mit einer Gewindestange wird die Kraft F_N rechtwinklig zur Reibfläche aufgebracht und kontinuierlich während der Versuche mit einer Kraftmessdose gemessen. Die Kraft F_{max} , parallel zur Reibfläche, wird mit einer Universalprüfmaschine auf die Versuchskörper 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

Abb. 2: Versuchsaufbau für Reibungsversuche

Bei den Versuchen wurde unterschieden zwischen Hirnholz und Seitenholz des Nadelholzes, sowie zusätzlich zwischen der Faserrichtung der Seitenhölzer parallel oder rechtwinklig zur Faserrichtung der Decklage des KPH.

Um den Einfluss der Parameter Versuchsgeschwindigkeit und Normalspannung in der Reibfläche zu bestimmen, wurden zu Beginn diese beiden Parameter variiert. 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. Für die darauffolgenden Versuche wurde auf Grundlage der Ergebnisse eine Prüfgeschwindigkeit von 5 mm/min und eine Querdruckspannung zu Versuchsbeginn von 2,5 N/mm² gewählt.

Der Reibungskoeffizient berechnet sich nach Gleichung 1.

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

3.2 Ergebnisse

Die Versuche zeigen eine geringe Abhängigkeit des Reibbeiwertes von der Querdruckspannung in der Reibfläche als auch von der Prüfgeschwindigkeit. Wie in **Abb. 3** zu sehen ist, nimmt der Reibbeiwert mit zunehmenden Anpressdruck und Prüfgeschwindigkeit tendenziell ab.

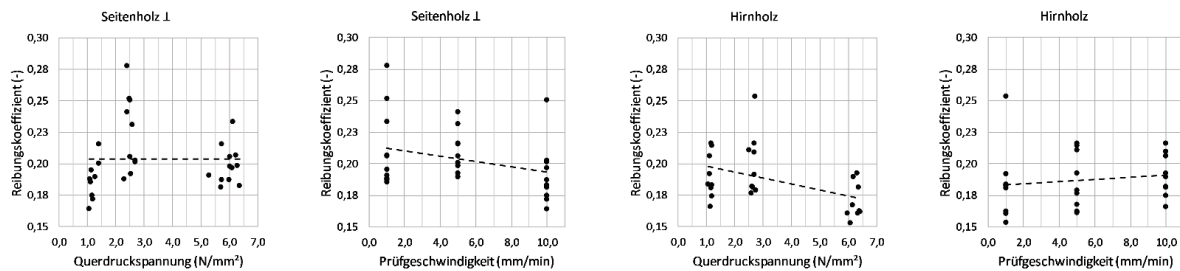


Abb. 3: Einfluss der Querdruckspannung in der Reibfläche sowie der Prüfgeschwindigkeit auf den Reibungskoeffizienten

Für die unbehandelte Oberfläche konnte im Mittel ein Reibbeiwert von $\mu = 0,21$ bestimmt werden. Mehr als doppelt so große Werte wurden für die geschliffene und sandgestrahlte Oberfläche mit $\mu = 0,56$ bzw. $\mu = 0,50$ ermittelt.

Bei den Versuchskörpern mit dem Zweikomponenten-Klebstoff konnte vor allem ein adhäsives Versagen der Beschichtung beobachtet werden. Nahezu vollständig löste sich der Kleber samt Mineralkörnern vom KPH ab, siehe **Abb. 4a**. Diese Beobachtung war unabhängig von der Korngröße der Beschichtung. Daher lässt sich nur ein unterer Wert des Haftreibungskoeffizienten bestimmen. Für die Beschichtung mit Quarzsand liegt dieser bei $\mu = 0,64$, für die Beschichtung mit Kiessplitt bei $\mu = 0,61$.

Bei der Beschichtung mit Epoxidharz-Klebeband mit einer Klebeschichtdicke von 0,1 mm kam es ebenfalls zu adhäsivem Versagen. Jedoch lösten sich hier nur vereinzelte Stellen des Klebebandes vom KPH. Zu kohäsivem Versagen kam es bei den Versuchen mit dem Klebeband mit einer Schichtdicke von 1,0 mm. Die Ergebnisse zeigen insgesamt deutlich größere Reibbeiwerte und liegen im Mittel bei $\mu = 0,82$ für das dünne und $\mu = 0,74$ für das dicke Klebeband.

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

Die Ergebnisse für die Reibbeiwerte für alle vier untersuchten Pyramidenmuster sind deutlich höher. Bei den kleinen Pyramiden mit 0,5 mm Tiefe kam es vor allem zu einem Abscheren der Pyramiden parallel zur Belastungsrichtung. Eine solche beschädigte Oberfläche ist in **Abb. 4b** zu sehen. Außerdem war eine starke Schädigung der Nadelholz-Oberflächen bei allen Versuchen zu beobachten, wie in **Abb. 4c** zu sehen ist. Die Pyramiden pressten sich in das Frühholz, welches sich entlang der Jahrringe vom darunterliegenden Spätholz löste. Je nach Jahrringlage war dies unterschiedlich stark ausgeprägt, wurde jedoch nicht weiter systematisch untersucht.

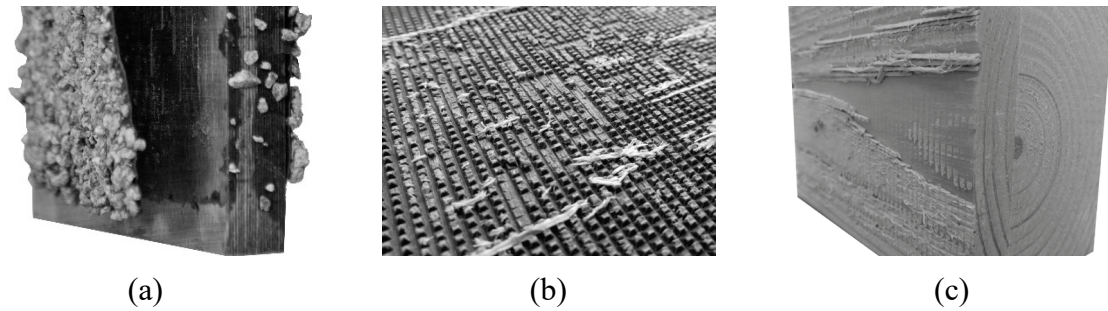


Abb. 4: a) Adhäsives Versagen der Beschichtung, b) Schädigung des Pyramidenmusters und c) Rollschubversagen des Nadelholzes bei Reibversuchen senkrecht zur Faserrichtung

Die Mittelwerte aller ermittelten Haftreibungskoeffizienten sind in **Tab. 1** angegeben. Die charakteristischen Werte berechneten sich in Anlehnung an DIN EN 14545 [5] mit einem globalen Variationskoeffizienten $COV_g = 0,09$.

Tab. 1: Übersicht über Haftreibungskoeffizienten: Mittelwerte und charakteristische Werte

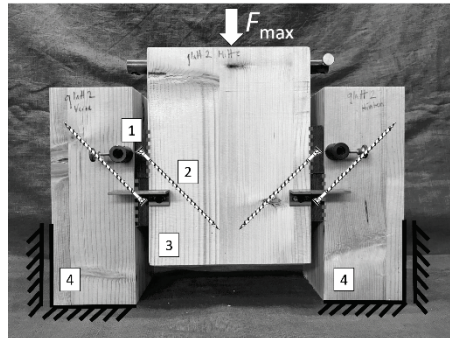
Oberfläche	Reibbeiwert μ		
	Mittelwert / charakteristischer Wert		
	Seitenholz I	Seitenholz II	Hirnholz
Glatt	0,21 / 0,18	-	0,19 / 0,16
Geschliffen	0,56 / 0,47	-	0,47 / 0,40
Sandgestrahlt	0,50 / 0,43	-	0,49 / 0,42
Beschichtet mit 2K-SE und Quarzsand	0,64 / 0,54	-	0,54 / 0,46
Beschichtet mit 2K-SE und Kiessplitt	0,61 / 0,54	-	0,70 / 0,59
Beschichtet mit EpoxyTape (0,1 mm) und Quarzsand	0,82 / 0,70	-	0,98 / 0,83
Beschichtet mit EpoxyTape (1,0 mm) und Quarzsand	0,74 / 0,63	-	0,83 / 0,70
Beschichtet mit Griptape	0,24 / 0,20	-	0,24 / 0,20
Gefräst Pyramiden 0,5 mm	0,82 / 0,70	0,82 / 0,70	0,84 / 0,71
Gefräst Pyramiden 1,0 mm	0,94 / 0,80	0,88 / 0,75	0,80 / 0,68
Gefräst Pyramiden 1,5 mm	1,06 / 0,90	1,03 / 0,87	1,06 / 0,90
Gefräst Pyramiden 2,0 mm	1,15 / 0,97	-	-
Gefräst Kreisförmig	0,95 / 0,81	-	0,78 / 0,66
Gefräst Schuppenmuster	0,66 / 0,56	-	-
Geprägt mit Pyramiden 0,5 mm	0,80 / 0,68	0,67 / 0,57	0,71 / 0,60

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.

4.1 Versuchsaufbau und –durchführung

Der Versuchsaufbau ist in **Abb. 5** 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

Abb. 5: Versuchsaufbau für die Druck-Scher-Versuche mit geneigt eingedrehten Schrauben.

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 Zugtragfähigkeit der Schrauben. 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 $F_{\max} = 40,5$ kN (pro Verbinder). Für die verschiedenen Pyramidenmuster konnten Höchstlasten von etwa 53 kN ermittelt werden, was eine Tragfähigkeitssteigerung von über 30 % bedeutet. In **Tab. 2** sind die erreichten Höchstlasten pro Verbinder für alle untersuchten Oberflächen dargestellt.

Auffällig zu beobachten war eine Verdrehung der Verbinder und ein Endrücken der unteren Verbinderkante in das Nadelholz sowie das Klaffen der Scherfuge am oberen Ende.

4.3 Rechnerische Tragfähigkeit

Die Tragfähigkeit einer Verbindung kann nach Gleichung 2 berechnet werden. Die wirksame Verbindungsmittellanzahl wird dabei entgegen dem Eurocode 5 [6] zu $n_{ef} = n$ berechnet.

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

Für die axiale Tragfähigkeit der Schrauben auf Herausziehen wird Gleichung 3 von Blaß et al. [7] verwendet.

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

Für die Haftreibungskoeffizienten wurden die Mittelwerte der jeweiligen Oberfläche aus den vorangegangenen Versuchen übernommen. In **Tab. 2** sind die berechneten Tragfähigkeiten auf Herausziehen sowie die Zugtragfähigkeit der Schrauben gezeigt. Außerdem wurde zum Vergleich das Verhältnis der maßgebenden berechneten Werte mit den Höchstlasten aus den Versuchen berechnet. Der Vergleich liefert einen kleinsten Verhältniswert von 0,86 und einen mittleren Verhältniswert von 1,01. Die mittleren Verhältniswerte zeigen eine hervorragende Übereinstimmung der rechnerischen Tragfähigkeiten nach Gleichung 2 mit den Höchstwerten aus den Versuchen auch für signifikant höhere Reibbeiwerte.

Tab. 2: Mittlere Höchstlast pro Verbinder aus den Versuchen und berechnete Tragfähigkeit

Oberfläche	Höchstlast [kN]	Versagen	Herausziehtragfähigkeit [kN]	Zugtragfähigkeit [kN]	Vergleich $F_{V,\text{test}}/F_{V,\text{exp}}$ [-]
Glatt	40,5	Zugversagen	36,4	38,3	1,11
Geschliffen	50,3	Zugversagen	47,3	49,4	1,07
Sandgestrahlt	50,6	<i>Herausziehen*</i>	45,7	47,5	1,11
Beschichtet mit EpoxyTape (dünn)	57,8	<i>Herausziehen*</i>	54,4	57,7	1,06
Beschichtet mit EpoxyTape (dick)	52,3	Zugversagen	53,3	55,1	0,98
Beschichtet mit Griptape	39,0	Herausziehen	38,4	39,3	1,01
Gefräst Pyramiden 1,0 mm	52,9	<i>Herausziehen*</i>	53,8	59,6	0,98
Gefräst Pyramiden 1,5 mm	53,4	<i>Herausziehen*</i>	58,6	64,3	0,91
Gefräst Pyramiden 2,0 mm	52,8	<i>Herausziehen*</i>	61,2	68,1	0,86
Gefräst Kreisförmig	49,9	Herausziehen	49,7	61,8	1,00

**Versagensart bei zwei von drei Versuchen*

5. Fazit und Ausblick

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. Die in **Tab. 1** 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 $\mu = 0,25$.

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. In **Tab. 3** sind weitere Vergleiche der Reibungskoeffizienten und Tragfähigkeiten für die gefrästen Oberflächen mit dem Wert aus dem Eurocode 5 aufgeführt.

Tab. 3: Erhöhung des Reibbeiwertes und der Tragfähigkeit im Vergleich zum Wert von $\mu = 0,25$ aus dem Eurocode 5

Oberfläche	Erhöhung des Reibbeiwertes		Steigerung der Tragfähigkeit*	
	Seitenholz \perp	Hirnholz	Seitenholz \perp	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%

*für geneigte Schrauben mit $\alpha = 45^\circ$

Literatur

- [1] PAULITSCH, M.; BARBU, M.C.: *Holzwerkstoffe der Moderne*, DRW-Verlag, Leinfelden-Echterdingen, 2015.
- [2] WAGENFÜHRER, A.; SCHOLZ, F. (Hrsg.): *Taschenbuch der Holztechnik*, 3. Aufl., Carl Hanser Verlag, München, 2018.
- [3] GIRARDON, S.: *Amélioration des performances mécaniques des assemblages bois sur bois vissés par préparation des interfaces - Application à la réalisation d'éléments de structure*. Université de Lorraine - École Doctorale RP2E, Diss., 2014.
- [4] SCHMIDT, T.: *Kontaktverbindungen für aussteifende Scheiben aus Brettsperrholz*. Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau, Bd. 33, KIT Scientific Publishing, 2018.
- [5] DIN EN 14545: *Holzbauwerke – Nicht stiftförmige Verbindungselemente – Anforderungen*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung, 2009-02.
- [6] DIN EN 1995-1-1: *Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung, 2010-12.
- [7] BLASS, H.J.; BEJTKA, I.; UIBEL, T.: *Tragfähigkeit von Verbindungen mit selbstbohrenden Holzschrauben mit Vollgewinde*. Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau, Bd. 4, Universitätsverlag Karlsruhe, 2006.