

# Optimierung von Verbindungen durch erhöhte Reibung in der Scherfuge

Simon Aurand, M.Sc.

## Zusammenfassung

Im Zuge eines Forschungsprojektes wurden Verbindungen optimiert, indem durch eine Oberflächenbearbeitung die Reibung in der Scherfuge erhöht wurde. Dazu wurden eingangs viele verschiedene Herstellungsverfahren betrachtet und auf ihre Anwendbarkeit, vor allem auch im industriellen Maßstab, untersucht. Die verschiedenen Oberflächen wurden anhand von Reibungsversuchen quantifiziert und es wurden sowohl statische als auch kinetische Reibungskoeffizienten ermittelt. Es zeigte sich, dass Oberflächen mit gleichmäßiger, ebener Strukturierung, zu bevorzugen sind gegenüber Oberflächen mit starker, punktueller Strukturierung. Anhand von Verbindungsversuchen wurden zunächst zielführende Oberflächenbearbeitungen identifiziert. Mit diesen Oberflächen wurden daraufhin weitere Verbindungsversuche durchgeführt, um das Verhalten von geneigten Schrauben und erhöhter Reibung in der Scherfuge zu erforschen. So konnten zum einen Gruppeneffekte wie Blockscherversagen untersucht und ausgeschlossen werden und neuartige Versagensfälle, wie Querdruckversagen unter den Verbindungsplatten, aufgezeigt werden. Tragfähigkeitssteigerungen von bis zu 43% und Steifigkeitssteigerungen von bis zu 29% konnten aufgrund erhöhter Reibung in der Scherfuge ermittelt werden. Mit einem analytischen Rechenmodell konnte die Tragfähigkeit der Verbindung gut bestimmt werden und die Auswertung der Ergebnisse zeigte, dass der statische Reibbeiwert sowohl die mittlere Tragfähigkeit als auch die charakteristische Tragfähigkeit gut bestimmt. Dauerstandversuche zur Ermittlung des Langzeitverhaltens von Verbindungen mit geneigten Schrauben und erhöhter Reibung in der Scherfuge zeigten, dass die Reibung auch nach längerem Zeitraum noch aktiviert wird und sich beim Lastabtrag beteiligt.

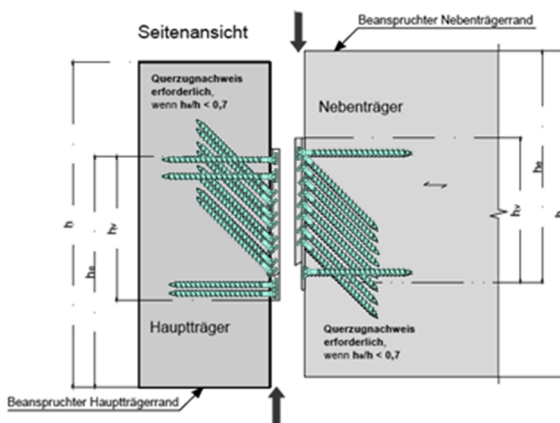
**Stichworte** Reibung, Reibbeiwerte, Oberflächenbearbeitung, geneigte Schrauben, Verbindungen

# 1 Allgemeines

## 1.1 Hintergrund

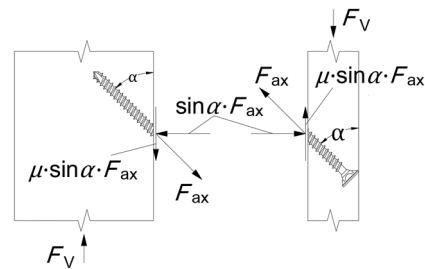
Bauen mit Holz boomt. Dies zeigt sich z.B. anhand der Quote der genehmigten Gebäude (sowohl Wohn- als auch Nichtwohngebäude) in Holzbauweise, welche über die letzten Jahre kontinuierlich von Jahr zu Jahr gestiegen ist [1]. Zunehmend werden die Projekte auch immer größer und komplexer. Somit bedarf es einer Optimierung der aktuell vorhandenen Verbindungen für höhere Tragfähigkeiten, um die größer werdenden Kräfte abzutragen. Zeitgleich wird Bauen teurer. Dies spiegelt sich in steigenden Personal- und Lohnkosten wieder [1] sowie in steigenden Materialkosten [2]. Daher muss es die Baubranche schaffen, ressourceneffizienter zu Bauen. Dies wiederum bedarf einer Optimierung der vorhandenen Verbindungen für einen geringeren Materialbedarf.

Bei den hier beschriebenen Verbindungen handelt es sich um sogenannte Systemverbinder. Systemverbinder stellen eine wirtschaftliche Verbindung aufgrund ihres hohen Vorfertigungsgrades dar. Die Verbinderrplatten (meist gefräst aus Aluminium oder Stahl) werden im Werk an den Holzbauteilen befestigt und müssen dann vor Ort auf der Baustelle nur noch ineinandergesteckt werden. Bei der Befestigung der Verbinderrplatten am Holz unterscheidet man zwischen zwei Fällen der Schraubenanordnung: Zum einen, rechtwinklig zur Scherfuge eingebrachte Vollgewindeschrauben, und zum anderen, Schrauben, welche unter einem Winkel zur Faser geneigt ins Holz eingebracht werden (siehe **Abb. 1**).



**Abb. 1:** Befestigung von Systemverbindern

Dieser zweite Fall, mit den geneigt eingebrachten Schrauben, wird etwas näher betrachtet: Bei einer Beanspruchung parallel zur Scherfuge, werden die Schrauben fast ausschließlich auf Zug beansprucht [3]. Diese Zugbeanspruchung lässt sich in ein Kräftedreieck zerlegen, siehe **Abb. 2**. Aufgrund von Gleichgewichtsbedingungen entsteht ein Kraftanteil rechtwinklig zur Scherfuge. Diese Kraft rechtwinklig zur Scherfuge wiederum erzeugt einen Anpressdruck in der Scherfuge und aktiviert dadurch Reibung. Durch die Reibung wird wiederum ein zusätzlicher Kraftanteil parallel zur Scherfuge erzeugt, welcher beim Lastabtrag beteiligt werden kann. Dies wird als Seileffekt bezeichnet und im Eurocode 5 [4] mit einem einheitlichen Reibungskoeffizienten von  $\mu = 0,25$  berücksichtigt.



**Abb. 2:** Schnittgrößen in der Scherfuge

## 1.2 Zielsetzung

Analytisch zeigt sich, dass Reibung in der Scherfuge auftritt und diese sich beim Lastabtrag beteiligt. Daraus ergibt sich das Potential, durch eine entsprechende Oberflächenbehandlung die Reibung in der Scherfuge zu erhöhen und somit die gesamte Tragfähigkeit der Verbindung zu erhöhen. Darauf aufbauend sollen die erhöhten Reibbeiwerte später auch in der Bemessung solcher Verbindungen übernommen werden können. Diese Herausforderung sollte in zwei Schritten überwunden werden. Zum einen, die Quantifizierung von Oberflächenbehandlungen anhand der Ermittlung von Reibbeiwerten. Darauf aufbauend dann die Ermittlung von Tragfähigkeiten von Verbindungen mit erhöhter Reibung in der Scherfuge. Zum anderen, sollten Berechnungsgleichungen hergeleitet werden, welche auf den analytischen Grundlagen aufbauen und tatsächliche Versagensmechanismen aus experimentellen Versuchen berücksichtigen.

## 2 Oberflächenbearbeitungen

Um die Reibung in der Scherfuge zwischen Verbinder und Nadelholzbauteil zu erhöhen und damit die Tragfähigkeit einer späteren Verbindung durch einen erhöhten Seileffekt zu steigern, wurden verschiedene Arten der Oberflächenbearbeitungen an verschiedenen Materialien untersucht. Die verwendeten Materialien waren zum einen normale Stahlbleche in verschiedenen Dicken und zum anderen wurde ein Großteil der Oberflächenbearbeitungen mit Kunstharzpressholz (KPH) durchgeführt. Eine ausführliche Beschreibung des verwendeten KPH findet sich in [5]. In [5] werden auch ausführlich alle Oberflächenbearbeitungen mit KPH vorgestellt. Daher werden in diesem Beitrag ergänzend die Oberflächenbearbeitungen in Stahl vorgestellt. Alle Oberflächenbearbeitungen wurden systematisch nach DIN 8580 [6] benannt und in drei Hauptgruppen unterteilt (siehe **Abb. 3**). Im Folgenden werden die Bearbeitungsverfahren in den drei Hauptgruppen vorgestellt, die an Versuchskörpern aus Stahl durchgeführt wurden.

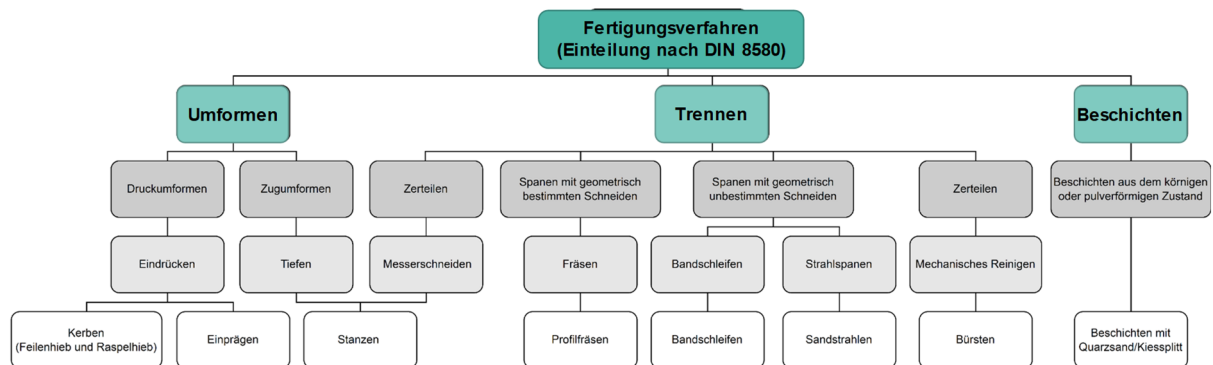
Aluminium möglich. Das Verfahren ist derzeit auf schmale Werkstücke beschränkt. Die Komplexität des Herstellungsverfahrens und die Tatsache, dass es derzeit nur für bestimmte Werkstoffe und schmale Werkstücke anwendbar ist, machen deutlich, dass es sich bei dieser Oberflächenbearbeitung um ein sehr vielschichtiges Verfahren handelt.

### Einprägen

Beim Prägen wird mit einem Prägestempel ein definiertes Muster in die Oberfläche des Werkstückes eingeprägt. In den Versuchen wurde ein herkömmliches Tränenblech untersucht (**Abb. 4c**), wie es für den Einsatz von rutschbeständigen Bodenbelägen verwendet wird. Ist der Prägestempel erst einmal hergestellt (z.B. durch Fräsen), ist der Prägeprozess einfach, was ihn zu einer relativ einfachen Art der Oberflächenbearbeitung von verschiedenen Materialien macht.

### Stanzen

Das Stanzen vereint die zwei Fertigungsverfahren Umformen und Trennen. Beim Stanzen wird mit ei-



**Abb. 3:** Einteilung und Benennung der untersuchten Oberflächenbearbeitungen

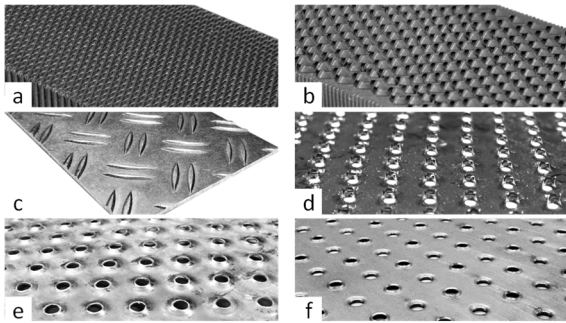
### 2.1 Umformen

#### Kerben

Beim Kerben wird das Material mit einem Stanzwerkzeug kalt verformt. Bei den Versuchen wurden Werkstücke mit Feilen- (**Abb. 4a**) und Raspelhieb (**Abb. 4b**) untersucht. Diese Oberflächenbearbeitungen sind nur bei kaltverformbaren Materialien wie Stahl oder

nem Stanzwerkzeug das Werkstück gleichzeitig verformt, als auch Material entfernt. Daher ist das Verfahren des Stanzens nur auf (dünne) Bleche anwendbar. Gestanzte Bleche können in großen Mengen hergestellt werden, sobald das Stanzwerkzeug mit den erforderlichen Eigenschaften hergestellt ist. Insgesamt wurden drei verschiedene Geometrien untersucht. Geometrie 1, einseitig gestanzt, mit einem

sehr scharfkantigen Kragen (**Abb. 4d**). Geometrie 2, ebenfalls einseitig gestanzt, mit einem eher flachen, runden Kragen (**Abb. 4e**) und Geometrie 3, beidseitig gestanzt mit einem ebenfalls runden, aber deutlich scharfkantigerem Kragen (**Abb. 4f**).



**Abb. 4:** Oberflächen in Hauptgruppe „Umformen“: (a) Feilenhieb, (b) Raspelhieb, (c) Tränenblech, (d) einseitig gestanzt Geometrie 1, (e) einseitig gestanzt Geometrie 2, (f) beidseitig gestanzt Geometrie 3

## 2.2 Trennen

### Profilfräsen

Durch den Einsatz verschiedener Fräswerkzeuge konnten unterschiedliche Oberflächenmuster erzielt werden.

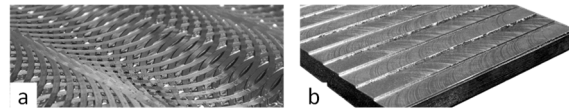
#### Kreisförmiges Muster

Durch Planfräsen können sehr glatte Oberflächen erzeugt werden. Das Ergebnis zeigt jedoch immer sichtbare trochoidale Spuren, die der Bewegung der Schneide des Fräasers folgen. Werden die Wendeschneidplatten aus dem Fräswerkzeug entfernt und die Geschwindigkeit erhöht, bleiben sichtbare und spürbare trochoidale Spuren zurück. Dieses Konzept wurde für das kreisförmige Muster verwendet, bei dem nur zwei gegenüberliegende Wendeschneidplatten am Fräswerkzeug eingesetzt wurden. Die restlichen Einsätze wurden vor dem Fräsen entfernt. Das Fräswerkzeug rotierte mit einer konstant hohen Geschwindigkeit und wurde mit hohem Vorschub über die Oberfläche der Prüfkörper geführt. So wurden kreisförmige Nuten in die oberste Schicht der Probekörper gefräst, die sich wiederholt überschneiden. Das Ergebnis waren pyramidenartige Formen am Rand der Probekörper, während sich in der Mitte der Probekörper längliche Nuten befanden (siehe **Abb. 5a**). Die Drehgeschwindigkeit und der Vorschub

hatten einen wesentlichen Einfluss auf die Oberflächenqualität. Der Herstellungsprozess war einfach und die Herstellungszeit kurz.

#### Mikrokerven

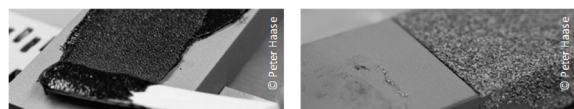
Mit einem Fingerfräser wurden parallele Kerven in die Oberfläche gefräst. Der Fräser war um 5° geneigt, so dass eine scharfe Kante entstand. Der Abstand zwischen den Nuten betrug 10 mm und war damit deutlich größer als bei dem in [5] vorgestellten Pyramidenmuster. Aufgrund des großen Abstands zwischen den Nuten war der Herstellungsprozess schnell. **Abb. 5b** zeigt die Oberfläche einer bearbeiteten Stahlplatte.



**Abb. 5:** Oberflächen in Hauptgruppe „Trennen“: (a) kreisförmiges Muster, (b) Mikrokerven

## 2.3 Beschichten

Für die Beschichtung wurde ein fließfähiger Zweikomponenten-Epoxidharz verwendet, der bei Raumtemperatur aushärtete. Die Probekörper wurden mit Quarzsand mit Korngröße 0,5–1,0 mm beschichtet. Die Oberflächen der Stahlprobekörper wurde vor dem Auftragen des Klebstoffs sandgestrahlt und entfettet. Für die Beschichtung wurde eine 0,5 mm dicke Klebstoffschicht gewählt (**Abb. 6**). Die Probekörper wurden von Hand in das jeweilige Granulat eingedrückt. Die Probekörper härteten eine Woche lang bei Raumtemperatur gemäß den Anweisungen des Herstellers aus.

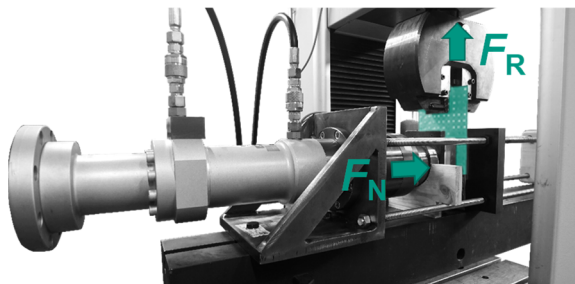


**Abb. 6:** Oberflächen in Hauptgruppe „Beschichten“: (a) zähflüssiger 2K-Epoxidharz-Klebstoff, (b) Beschichtung mit Quarzsand 0,5–1,0 mm

### 3 Versuche zur Bestimmung des Reibungskoeffizienten

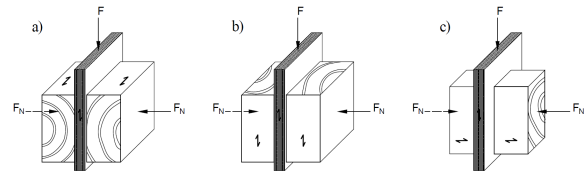
#### 3.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Zur Bestimmung des Reibungskoeffizienten wurde der Versuchsaufbau in **Abb. 7** verwendet (in Anlehnung an [7]). Die Kraft  $F_N$  rechtwinklig zur Reibfläche wurde kraftgesteuert mit einem Hydraulikzylinder aufgebracht. Für den Anpressdruck wurde eine Druckspannung von  $2,5 \text{ N/mm}^2$  gewählt, welche der charakteristischen Druckfestigkeit rechtwinklig zur Faserrichtung von Nadelholz entspricht. Als Nadelholz wurde Fichte/Tanne verwendet, das im Normklima bei  $20^\circ\text{C}$  und  $65\% \text{ r.F.}$  gelagert wurde und eine durchschnittliche Holzfeuchte von  $u = 12\%$  aufwies. Die Oberflächen waren frei von Ästen  $>5 \text{ mm}$  und ohne Klebefugen. Die Kraft  $F_R$  parallel zur Reibfläche wurde mit einer Universalprüfmaschine aufgebracht. Der gesamte Prüfablauf erfolgte mit einer Prüfungsgeschwindigkeit von  $5 \text{ mm/min}$  und bis zu einer Verschiebung von  $15 \text{ mm}$  (Maschinenweg).



**Abb. 7:** Versuchsaufbau für Reibungsversuche

Für diesen Beitrag wurden Versuche zur Bestimmung des Reibbeiwertes zwischen Nadelholz und Stahl/Aluminium durchgeführt. Bei den Versuchen wurde zwischen Seitenholz und Hirnholz des Nadelholzes unterschieden, um die unterschiedlichen Einbausituationen der Verbinder abzudecken. Weiterhin wurde unterschieden, ob die Faserrichtung der Seitenhölzer parallel oder rechtwinklig zur Beanspruchungsrichtung von  $F_R$  verlief. Die verschiedenen Versuchskonfigurationen sind in **Abb. 8** zu sehen. Für die Versuche wurden Seitenhölzer mit einer ähnlichen Rohdichte gewählt.



**Abb. 8:** Reibungsversuche mit a) Seitenholz rechtwinklig und b) parallel zur Belastungsrichtung sowie mit c) Hirnholz.

Der Reibungskoeffizient wurde nach Gleichung (1) berechnet. Die Kraft  $F_R$  wurde gleichmäßig auf die beiden Reibungsflächen parallel zur Kontaktfläche aufgeteilt. Ausgewertet wurden der statische Reibkoeffizient  $\mu_s$  und der kinetische Reibkoeffizient  $\mu_k$ .

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

#### 3.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse aller hier vorgestellten Oberflächenbearbeitungen sind übersichtlich in **Abb. 9** dargestellt und in **Tab. 2** angegeben. Ebenfalls sind zu Vergleichszwecken die Ergebnisse der Versuche aus [5] aufgeführt.

##### Eloxiertes Aluminium

Zu Beginn wurden Tests mit eloxiertem Aluminium durchgeführt, um die Ergebnisse der weiteren Oberflächenbearbeitungen quantifizieren zu können. Die Tests wurden mit tatsächlichen Verbinderplatten durchgeführt. Die Ergebnisse betrugen im Durchschnitt  $\mu_s = 0,34$  für die Versuche mit Seitenholz rechtwinklig und  $\mu_s = 0,39$  für die Versuche mit Hirnholz. Variationskoeffizienten (COV) von  $13\text{--}20\%$  zeigen eine hohe Streuung der Reibbeiwerte.

##### Gekerbte Oberflächen

Mit den Stahlplatten mit Feilenhieb und Raspelhieb wurden die höchsten Reibungskoeffizienten in der Hauptgruppe Umformen erreicht. Die Versuche mit Seitenholz rechtwinklig erreichten im Mittel  $\mu_s = 1,06$  und  $\mu_s = 1,33$  für Feilen- bzw. Raspelhieb. Die Streuung der Versuchsergebnisse war jedoch mit COV von  $11\text{--}30\%$  sehr hoch. Mit beiden Oberflächen konnte eine sehr gute Verzahnung mit dem Nadelholz während der Versuche beobachtet werden.

An der Stahloberfläche wurden sowohl beim Feilen- als auch beim Raspelhieb keine Schädigung beobachtet und es konnte das große Potenzial von gekerbten Oberflächen aufgezeigt werden.

### Geprägte Oberflächen

Auch die geprägte Oberfläche des Tränenblechs zeigt eine deutliche Steigerung des Reibbeiwertes für Versuche mit Seitenholz rechtwinklig mit einem Mittelwert von  $\mu_s = 0,59$ . Trotz einer starken Eindrückung der Oberfläche in das Nadelholz zeigt sich, dass hervorstehende Oberflächenmerkmale in ihrer Größe begrenzt sein müssen, um eine Erhöhung des Reibbeiwertes zu bewirken, da es tendenziell zu einem „Abrollen“ des Nadelholzes über die hervorstehende Strukturierung kommt.

### Gestanzte Oberflächen

Die drei untersuchten Loch-Geometrien zeigten sehr unterschiedliche Werte für Versuche mit Seitenholz rechtwinklig mit Mittelwerten von  $\mu_s = 0,82$ ,  $\mu_s = 0,48$  bzw.  $\mu_s = 0,67$  für Geometrie 1, 2 bzw. 3. Bei den Blechen mit Geometrie 1 (Dicke = 0,25 mm) kam es zu Zugversagen des Bleches, daher stellen die Ergebnisse nur untere Grenzwerte da. Bei den Versuchen mit Geometrie 2 kam es zu einem Entlanggleiten der Oberfläche auf dem Nadelholz, was die geringen Werte erklärt. Mit den Blechen der Geometrie 3 kam es zu einer starken Verzahnung mit dem Nadelholz

und dessen Schädigung. Die Bleche selbst hingegen zeigten keine Schädigung nach den Versuchen.

### Gefräste Oberflächen

Das kreisförmig gefräste Muster zeigte eine deutliche Steigerung des Reibbeiwertes mit  $\mu_s = 0,64$  für Seitenholz rechtwinklig, im Vergleich zum Aluminium. Die Mikrokerven zeigten besonders bei den Versuchen mit Hirnholz eine sehr starke Erhöhung des Reibbeiwertes mit  $\mu_s = 1,29$ . Im direkten Vergleich mit den gefrästen Pyramidenmuster im KPH konnte gezeigt werden, dass mit größer werdender Struktur (zunehmender Frästiefe der Pyramiden) auch größer werdende Reibbeiwerte ermittelt werden konnten. Im Mittel konnten in diesen Versuchen mit Seitenholz rechtwinklig, Werte von  $\mu_s = 0,84$  (0,5 mm),  $\mu_s = 0,94$  (1,0 mm),  $\mu_s = 1,06$  (1,5 mm) und  $\mu_s = 1,15$  (2,0 mm) bestimmt werden.

### Beschichtete Oberflächen

Bei den Versuchen mit den beschichteten Prüfkörpern konnten ebenfalls höhere Reibbeiwerte ermittelt werden, mit  $\mu_s = 0,68$  für Seitenholz rechtwinklig, verglichen zu Aluminium. Interessanterweise waren die Ergebnisse mit dem Quarzsand höher als mit dem Splitt. Dies bestätigt die Erkenntnis der Versuche mit den Tränenblechen, dass die Größe der Oberflächenmerkmale begrenzt werden muss, da es sonst zu einem „Abrollen“ des Nadelholzes über die Oberfläche

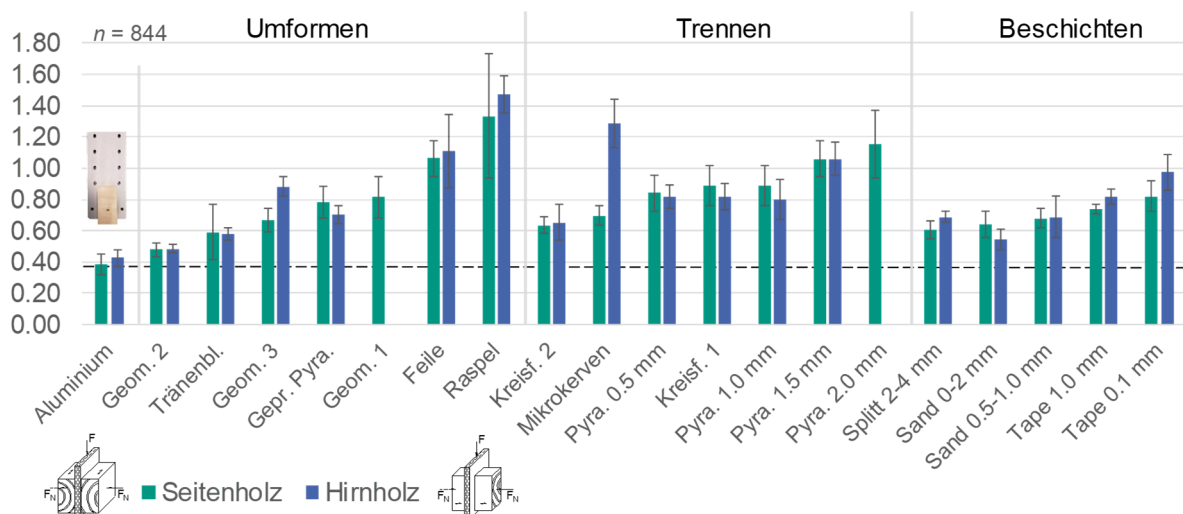


Abb. 9: Übersicht Versuchsergebnisse Reibversuche



kommt. Die Versuche zeigten zudem, dass ein hoher Aufwand bei der Herstellung der Versuchskörper nötig ist und die Oberflächenqualität mit hohen Unsicherheiten verbunden ist.

#### Mittelwerte und charakteristische Werte

Die charakteristischen Werte wurden in Anlehnung an DIN EN 14358 [8] und DIN EN 14545 [9] berechnet. Für das 5%-Quantil wurde ein globaler Variationskoeffizient  $COV_g$  auf Basis aller Reibversuche berechnet. Insgesamt wurden  $n = 844$  Reibversuche durchgeführt und der globale Variationskoeffizient  $COV_g$  wurde mit 0,16 berechnet. Der Beiwert  $k_s(n)$  berechnete sich zu 1,76. Die Ergebnisse (statischer Reibbeiwert  $\mu_s$  und kinetischer Reibbeiwert  $\mu_k$ ) aller vorgestellten Oberflächen und die dazugehörigen charakteristischen Werte sind in **Tab. 2** angegeben.

## 4 Druck-Scher-Versuche mit geneigten Schrauben

Ausgehend von den Reibversuchen wurden Versuche mit Verbindern aus KPH durchgeführt. Zu Beginn wurde eine Vielzahl an verschiedenen Oberflächenbearbeitungen in Verbindungen mit geneigten Schrauben untersucht. Ziel war es, zu untersuchen, ob durch geneigte Schrauben ein ausreichend hoher Anpressdruck in der Scherfuge erzeugt werden kann, damit die zuvor ermittelten Haftreibungskoeffizienten auftreten. Anhand der Ergebnisse wurden gezielt Oberflächenbearbeitungen identifiziert, mit denen weitere Verbindungsversuche durchgeführt wurden. Zunächst wurden Verbindungen mit längeren Schrauben durchgeführt, um die Verbindung maximal auszunutzen indem die Schrauben maximal ausgenutzt wurden (Erreichen der Zugtragfähigkeit). Daraufhin wurden Gruppeneffekte wie ein Blockscherversagen untersucht, indem die Anzahl der Schrauben deutlich erhöht wurde. Die Kraftübertragung zwischen den beiden Verbinderteilen erfolgte in allen Versuchen ausschließlich über Druckkontakt. Abschließend wurden zwei erste Verbinderprototypen für Lasten bis 180 kN und ein Schwerlastprototyp für Lasten bis 500 kN getestet. Eine Übersicht über die durchgeführten Versuche ist in **Tab. 1** gegeben.

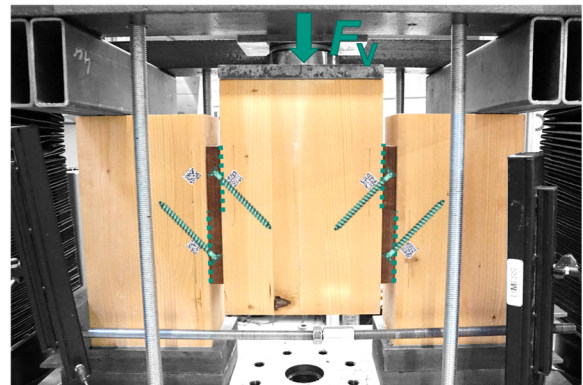
**Tab. 1:** Übersicht über durchgeführte Druck-Scherversuche

Reihe	Versuche $n$	Schrauben $n$	Schrauben $d \times L$ (mm)	Verbinder $B \times H \times L$ (mm)
1	3	5	5x100	15x58x110
2	5	5	5x100	25x58x110
3	5	5	6x180	25x58x110
4	5	15	6x100	25x150x110
5	3	15	6x200	25x150x110
6a	8	10	6x200	25x100x110
6b	7	12	6x200	25x100x110
7	5	20	8x300	50x140x254

### 4.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Der Versuchsaufbau ist in **Abb. 10** dargestellt. Die KPH-Verbinder wurden nur auf einer Seite bearbeitet und mit geneigten Schrauben an den Seiten- und Mittelholzern befestigt. Für alle Reihen wurden Vollgewindeschrauben gewählt.

Die Probekörper wurden mit einer Universalprüfmaschine belastet. Während der Versuche wurden sowohl die Maschinenkraft als auch die relative Verschiebung zwischen dem Mittel- und dem Seitenholz gemessen. Die Relativverschiebung der einzelnen Verbindungen wurde an der Vorder- und Rückseite der Probekörper gemessen. Die Versuchsdurchführung und Auswertung erfolgte in Anlehnung an DIN EN 26891 [10]. Es wurden sowohl die Höchstlast  $F_{V, \text{test}}$  als auch die Steifigkeit  $k_s$  pro Verbinder ermittelt. Die Steifigkeit wurde im Bereich zwischen 10% und 40% der Höchstlast im linear-elastischen Bereich ermittelt.



**Abb. 10:** Versuchsaufbau für die Druck-Scher-Versuche mit geneigt eingedrehten Schrauben

**Tab. 2:** Übersicht über Reibungskoeffizienten: Mittelwerte und charakteristische Werte

Oberfläche	Statischer Reibbeiwert $\mu_s$			Kinetischer Reibbeiwert $\mu_k$		
	Mittelwert / charakteristischer Wert			Mittelwert / charakteristischer Wert		
	SH II	SH I	HH	SH II	SH I	HH
Eloxiertes Aluminium	0,25 / 0,19 <i>n</i> = 12	0,38 / 0,28 <i>n</i> = 12	0,43 / 0,32 <i>n</i> = 12	0,24 / 0,18 <i>n</i> = 12	0,41 / 0,30 <i>n</i> = 12	0,45 / 0,34 <i>n</i> = 12
Feilenhieb	1,83 / 1,35 <i>n</i> = 8	1,06 / 0,79 <i>n</i> = 8	1,11 / 0,81 <i>n</i> = 8	0,60 / 0,46 <i>n</i> = 8	0,61 / 0,46 <i>n</i> = 8	0,86 / 0,64 <i>n</i> = 8
Raspelhieb	2,60 / 1,72 <i>n</i> = 11	1,33 / 0,84 <i>n</i> = 11	1,47 / 1,10 <i>n</i> = 8	0,69 / 0,48 <i>n</i> = 11	0,74 / 0,55 <i>n</i> = 11	1,37 / 1,03 <i>n</i> = 8
Negativ Pyramidenmuster	0,67 / 0,50 <i>n</i> = 10	0,79 / 0,59 <i>n</i> = 30	0,71 / 0,53 <i>n</i> = 21	0,50 / 0,38 <i>n</i> = 10	0,52 / 0,38 <i>n</i> = 30	0,52 / 0,39 <i>n</i> = 21
Tränenblech	0,66 / 0,47 <i>n</i> = 13	0,59 / 0,42 <i>n</i> = 13	0,58 / 0,44 <i>n</i> = 14	0,65 / 0,48 <i>n</i> = 13	0,61 / 0,45 <i>n</i> = 13	0,64 / 0,48 <i>n</i> = 14
Gestanzte Geometrie 1	-	0,82 / 0,60 <i>n</i> = 3	-	-	0,49 / 0,37 <i>n</i> = 3	-
Gestanzte Geometrie 2	0,51 / 0,38 <i>n</i> = 5	0,48 / 0,36 <i>n</i> = 5	0,49 / 0,36 <i>n</i> = 5	0,42 / 0,32 <i>n</i> = 5	0,43 / 0,33 <i>n</i> = 5	0,42 / 0,32 <i>n</i> = 5
Gestanzte Geometrie 3	0,80 / 0,59 <i>n</i> = 10	0,67 / 0,50 <i>n</i> = 10	0,88 / 0,66 <i>n</i> = 10	0,61 / 0,46 <i>n</i> = 10	0,62 / 0,46 <i>n</i> = 10	0,74 / 0,67 <i>n</i> = 10
Gefräst Kreisförmig (Stahl)	0,59 / 0,43 <i>n</i> = 12	0,64 / 0,47 <i>n</i> = 12	0,47 / 0,65 <i>n</i> = 24	0,41 / 0,31 <i>n</i> = 12	0,46 / 0,35 <i>n</i> = 12	0,51 / 0,38 <i>n</i> = 24
Mikrokerven	1,12 / 0,84 <i>n</i> = 5	0,70 / 0,52 <i>n</i> = 5	1,29 / 0,96 <i>n</i> = 5	0,69 / 0,53 <i>n</i> = 5	0,55 / 0,42 <i>n</i> = 5	0,96 / 0,72 <i>n</i> = 5
Gefräst Pyramiden 0,5 mm	0,82 / 0,62 <i>n</i> = 10	0,84 / 0,64 <i>n</i> = 40	0,82 / 0,62 <i>n</i> = 30	0,56 / 0,42 <i>n</i> = 10	0,56 / 0,42 <i>n</i> = 40	0,65 / 0,49 <i>n</i> = 30
Gefräst Pyramiden 1,0 mm	0,88 / 0,66 <i>n</i> = 20	0,89 / 0,71 <i>n</i> = 15	0,80 / 0,59 <i>n</i> = 10	0,54 / 0,41 <i>n</i> = 20	0,66 / 0,50 <i>n</i> = 15	0,66 / 0,50 <i>n</i> = 10
Gefräst Pyramiden 1,5 mm	1,03 / 0,77 <i>n</i> = 19	1,06 / 0,79 <i>n</i> = 20	1,06 / 0,79 <i>n</i> = 18	0,48 / 0,36 <i>n</i> = 19	0,56 / 0,42 <i>n</i> = 20	0,44 / 0,33 <i>n</i> = 18
Gefräst Pyramiden 2,0 mm	-	1,15 / 0,87 <i>n</i> = 12	-	-	0,83 / 0,63 <i>n</i> = 12	-
Beschichtet mit Zweikomponenten-Klebstoff und Quarzsand (0,5–1,0 mm)	0,75 / 0,56 <i>n</i> = 4	0,68 / 0,51 <i>n</i> = 3	0,69 / 0,51 <i>n</i> = 3	0,66 / 0,50 <i>n</i> = 4	0,61 / 0,46 <i>n</i> = 3	0,65 / 0,50 <i>n</i> = 3
Beschichtet mit Zweikomponenten-Klebstoff und Quarzsand (0–2 mm)	-	0,64 / 0,48 <i>n</i> = 3	0,54 / 0,40 <i>n</i> = 3	-	0,41 / 0,31 <i>n</i> = 3	0,35 / 0,27 <i>n</i> = 3
Beschichtet mit Zweikomponenten-Klebstoff und Kiessplitt (2–4 mm)	-	0,61 / 0,46 <i>n</i> = 3	0,69 / 0,52 <i>n</i> = 3	-	0,38 / 0,28 <i>n</i> = 3	0,51 / 0,39 <i>n</i> = 3
Beschichtet mit Epoxidharz-Klebeband (0,1 mm) und Quarzsand (0–2 mm)	-	0,82 / 0,61 <i>n</i> = 3	0,97 / 0,72 <i>n</i> = 3	-	0,62 / 0,47 <i>n</i> = 3	0,68 / 0,52 <i>n</i> = 3
Beschichtet mit Epoxidharz-Klebeband (1,0 mm) und Quarzsand (0–2 mm)	-	0,74 / 0,55 <i>n</i> = 3	0,82 / 0,61 <i>n</i> = 3	-	0,50 / 0,37 <i>n</i> = 3	0,61 / 0,46 <i>n</i> = 3

## 4.2 Ergebnisse

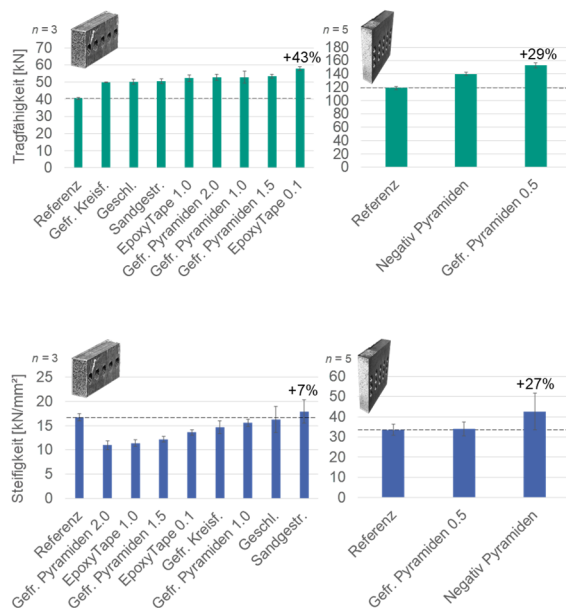
Die beobachteten Versagensarten in den ersten vier Versuchsreihen waren entweder ein Zugversagen einer oder mehrerer Schrauben in der Scherfuge oder ein Herausziehen der Schrauben aus den Holzbauteilen. Im Folgenden werden beispielhaft die Ergebnisse

der Versuchsreihe 1 sowie Versuchsreihe 4 vorgestellt und Unterschiede der Oberflächen herausgearbeitet. Die Ergebnisse aller Versuchsreihen für die Höchstlast  $F_{V, \text{test}}$  (unabhängig von der Verformung) und der Steifigkeit  $k_s$  (im Bereich von 10–40% der Höchstlast) sind in **Tab. 3** gegeben. Die Ergebnisse



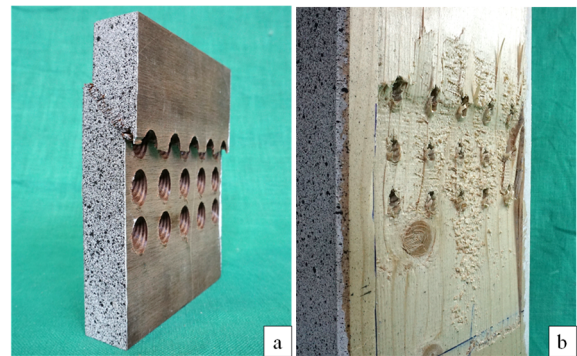
der Reihe 1 mit jew. 5 Schrauben sind in **Abb. 11** links zu sehen. Deutlich zu erkennen ist die Steigerung der Tragfähigkeit für jegliche Oberflächenbearbeitung (im Vergleich zu Versuchen mit Verbindern ohne bearbeitete Oberfläche), bis zu 43% für die beschichtete Oberfläche mit Quarzsand. Ebenfalls deutlich in **Abb. 11** zu sehen, dass hohe Tragfähigkeiten mit Oberflächen mit starker Strukturierung erreicht werden (analog zu den Reibversuchen). **Abb. 11** rechts zeigt die Ergebnisse für die Versuche der Reihe 4 mit 15 Schrauben. Auch hier kann die Tragfähigkeit im Vergleich zur Referenzverbindung bis zu 30% gesteigert werden. Auch hier führte eine stark strukturierte Oberfläche zu der hohen Tragfähigkeitssteigerung.

In **Abb. 11** sind ebenfalls die Ergebnisse der Steifigkeiten gezeigt. Hier fällt die Steigerung nicht so hoch aus, lediglich 7% für die Versuchsreihe 1 mit deutlich größerer Streuung. Die Steifigkeit nimmt zu, mit Oberflächen die eine gleichmäßige, ebene Strukturierung aufweisen. Dies lässt sich damit erklären, dass bei den Oberflächen mit starker Strukturierung, diese zunächst ins Nadelholz gedrückt wird und Verformung aufnimmt. Bei den gleichmäßigen, ebenen Oberflächen, liegt diese bereits vollflächig an und kann sich bei Belastung nicht noch weiter ins Nadelholz drücken.



**Abb. 11:** Last-Verschiebungs-Diagramme für Reihe 1 (links) und Reihe 7 (rechts)

Nach den Versuchen mit 5 bzw. 15 Schrauben mit einer Länge von 100 mm, wurden Verbinder mit Schrauben mit einer Länge von 180–200 mm getestet. Hierbei konnte zum ersten Mal ein Versagen des KPH-Verbinders selbst beobachtet werden. Der Verbinder versagte aufgrund des Ausknickens der Fourniere bei Erreichen der Druckfestigkeit im Nettoquerschnitt (**Abb. 12a**). Ebenfalls konnte zum ersten Mal bei Haupt-Nebenträger-Verbindern ein Querdruckversagen im Nadelholz unterhalb der Verbinderplatte beobachtet werden (**Abb. 12b**)



**Abb. 12:** a) Druckversagen eines Verbinders b) Querdruckversagen unterhalb der Verbinderplatte

Für die Reihe 6 wurde in Zusammenarbeit mit der Firma Pitzl Metallbau GmbH in Altheim ein erster Prototyp v1 für einen Verbinder aus 25 mm dickem KPH entwickelt. Der Fokus lag dabei u.a. auf einer gefrästen Oberfläche für höhere Reibung in der Scherfuge. Für die Oberflächenbearbeitung wurde das Pyramidenmuster mit 0,5 mm tiefen Pyramiden gewählt. Aufbauend auf den Ergebnissen wurde ein zweiter Prototyp v2 hergestellt. Für die Oberfläche wurde diesmal das Pyramidenmuster mit 1,0 mm tiefen Pyramiden gewählt. Bei beiden Prototypen und allen Versuchen wurden Vollgewindeschrauben Würth ASSY 4 plus 6x200 mm verwendet, welche um 45° zur Scherfuge geneigt waren. Bei den Versuchen mit dem Prototyp v1 und jew. 10 Schrauben pro Verbinderplatte wurde eine mittlere Höchstlast von  $F_{V,test} = 151 \text{ kN}$  und eine mittlere Steifigkeit von  $k_s = 25,0 \text{ kN/mm}$  erreicht. Der Prototyp v2 mit jew. 12 Schrauben pro Verbinderplatte kam in den Versuchen auf eine mittlere Höchstlast von  $F_{V,test} = 173 \text{ kN}$  und eine mittlere Steifigkeit von  $k_s = 33,3 \text{ kN/mm}$ .

In Reihe 7 wurde ein Prototyp für einen Schwerlastverbinder für Traglasten bis zu 500 kN hergestellt und geprüft. Die Verbinderteile wurden aus 50 mm dickem, kreuzweise geschichtetem KPH gefräst. In die Oberfläche wurde das Pyramidenmuster mit 1,0 mm tiefen Pyramiden gefräst. Die Vollgewindeschrauben waren Würth ASSY 4 plus 8x300 mm, ebenfalls um 45° gegenüber der Scherfuge geneigt. Insgesamt waren 20 Schrauben pro Verbinderplatte in fünf Reihen angeordnet. Beim ersten Versuch konnte die Schätzlast nicht erreicht werden, da die beiden Seitenhölzer unterhalb der Verbinderplatten auf Querdruck versagten. Daraufhin wurden die Prüfkörper mit Vollgewindeschrauben 8x160 mm rechtwinklig zur Faser verstärkt. Bei den folgenden Versuchen kam es zweimal zu einem Druckversagen der Verbinderteile aus KPH sowie einmal zum Erreichen der Zugtragfähigkeit der Schrauben. Die mittlere Höchstlast betrug  $F_{V, \text{test}, \text{BSH}} = 496 \text{ kN}$  pro Verbinder und die dazugehörige Steifigkeit  $k_{s, \text{BSH}} = 81 \text{ kN/mm}$ . Ein letzter Prüfkörper wurde aus 5-lagigem Brettsperrholz hergestellt. Im Versuch konnte nur eine geringfügig höhere Höchstlast erreicht werden mit  $F_{V, \text{test}, \text{BSP}} = 503 \text{ kN}$ . Die Steifigkeit der Verbindung konnte jedoch um fast 30% auf  $k_{s, \text{BSP}} = 105 \text{ kN/mm}$  gesteigert werden. Bei den Versuchen wurden große Verformungen beobachtet. Nach dem Auftrennen der Versuchskörper war eine plastische Verformung der Schrägschrauben gut sichtbar, siehe **Abb. 13**. Dies erklärt u.a. die Abweichung der Schätzlast nach Modell von der tatsächlichen Höchstlast.



**Abb. 13:** Plastische Verformung der Schrauben 8x300 mm

**Tab. 3:** Höchstlasten aus Versuchen und dazugehörige Steifigkeiten (jew. Mittelwerte mit COV in %)

Reihe	Oberfläche	$F_{V, \text{test}}$ [kN]	$k_s$ [kN/mm]
1	KPH unbehandelt	40,5 (2%)	16,7 (5%)
	Geschliffen	50,3 (3%)	16,3 (18%)
	EpoxyTape 0,1mm	57,8 (2%)	13,6 (5%)
	EpoxyTape 1,0mm	52,3 (4%)	11,4 (6%)
	Pyramiden 1,0 mm	52,9 (8%)	15,6 (5%)
	Pyramiden 1,5 mm	53,4 (2%)	12,2 (6%)
	Pyramiden 2,0 mm	52,8 (4%)	11,0 (9%)
2	Kreisf. Muster	49,9 (0%)	14,7 (10%)
	Pyramiden 1,0 mm	49,1 (8%)	14,1 (18%)
3	Pyramiden 1,5 mm	47,8 (2%)	15,0 (21%)
	Pyramiden 0,5 mm	84,5 (6%)	17,8 (7%)
4	Kreisf. Muster	80,0 (3%)	17,7 (10%)
	KPH unbehandelt	119 (2%)	33,5 (8%)
5	Pyramiden 0,5 mm	153 (3%)	34,0 (10%)
	Geprägtes Muster	140 (2%)	42,6 (21%)
6a	Geprägtes Muster	185 (6%)	37,4 (10%)
6b	Pyramiden 0,5 mm	151 (3%)	25,0 (16%)
7	Pyramiden 1,0 mm	173 (5%)	33,3 (7%)
	Pyramiden 1,0 mm	496 (1%)	81,0 (5%)

## 5 Rechenmodell und Vergleich mit Versuchsergebnissen

In [5] wurde ein Modell zu Berechnung der Tragfähigkeit in Einschubrichtung  $F_{V, \text{exp}}$  einer Verbindung mit, um den Winkel 45° geneigten Schrauben vorgestellt, siehe Gleichung (2). Eingangswerte bei dem Modell waren u.a. das Minimum aus der Herausziehtragfähigkeit und der Zugtragfähigkeit der Schrauben sowie der maximale Reibbeiwert in der Scherfuge. Auf Grundlage der Ergebnisse der Verbindungsversuche, muss bei der Bemessung von Verbindungen mit geneigten Schrauben und erhöhter Reibung in der Scherfuge auch die Querdrucktragfähigkeit unterhalb der Verbinderplatten überprüft werden. Aufgrund der großen Anzahl an Schrauben auf kleiner Fläche, entstanden lokal unter den Verbinderplatten sehr große Spannungen rechtwinklig zur Faser. Ebenfalls muss die Tragfähigkeit der Verbinderplatten selbst berücksichtigt werden, um ein Versagen im Nettoquerschnitt zu vermeiden. Somit ergibt sich die Gesamttragfähigkeit der Verbindung mit geneigten Schrauben aus dem Minimum aus Gleichung (2). Die

ersten beiden Zeilen berücksichtigen zum einen die Herausziehtragfähigkeit und zum anderen die Zugtragfähigkeit der verwendeten Schrauben. Zeile drei berücksichtigt das Versagen des Hauptträgers auf Querdruk und Zeile vier berücksichtigt das Versagen des Verbinders auf Längsdruck.

$$F_V = \min \begin{cases} n_{ef} \cdot F_{ax} \cdot (\mu \cdot \sin \alpha + \cos \alpha) \\ n_{ef} \cdot F_{tens} \cdot (\mu \cdot \sin \alpha + \cos \alpha) \\ A_{c,90,HT} \cdot f_{c,90,HT} \cdot k_{c,90,HT} \cdot \left( \mu + \frac{1}{\tan \alpha} \right) \\ A_{netto,Verbinder} \cdot f_{c,0,Verbinder} \end{cases} \quad (2)$$

mit	$n_{ef}$	Effektive Anzahl Verbindungsmittel
	$F_{ax}$	Herausziehtragfähigkeit der Schraube
	$F_{tens}$	Zugtragfähigkeit der Schraube
	$\mu$	Reibbeiwert
	$\alpha$	Einschraubwinkel der Schrauben
	$A_{c,90,HT}$	Querdrukbeanspruchte Fläche am HT
	$f_{c,90,HT}$	Querdrukfestigkeit HT
	$k_{c,90,HT}$	Querdrukbeiwert
	$A_{netto}$	Nettoquerschnittsfläche Verbinder
	$f_{c,0}$	Längsdruckfestigkeit Verbinder

**Tab. 4** zeigt die analytischen Tragfähigkeiten nach Gleichung (2). Zum Vergleich wurde das Verhältnis des analytischen (erwarteten) Wertes,  $F_{V,exp}$ , zur Höchstlast aus den Versuchen,  $F_{V,test}$ , berechnet. Der Vergleich ergab einen kleinsten Verhältniswert von 0,75 und einen mittleren Verhältniswert von 1,10. Die mittleren Verhältnisse bestätigen eine gute Übereinstimmung des analytischen Modells mit den experimentellen Werten für die Versuche, auch für deutlich höhere Reibungskoeffizienten.

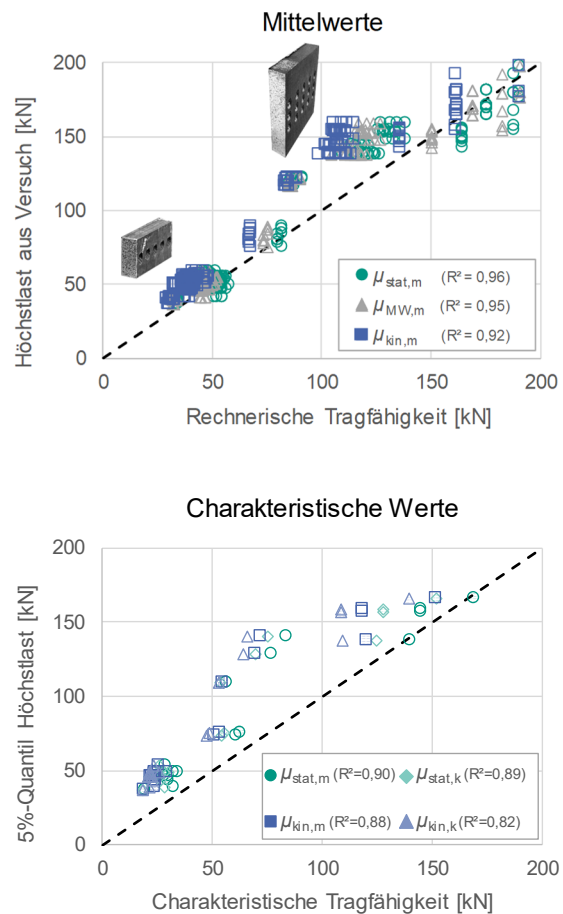
Nun stellt sich die Frage, welcher Reibbeiwert für die Berechnung der Schätzlasten verwendet werden soll? Die Auswertung der Versuchsergebnisse zeigte, dass die Verformungen bei Erreichen der Höchstlast der Verbindungen deutlich höher waren, als die Verformungen bei denen die maximalen Reibungskoeffizienten ausgewertet wurden. Dieser Unterschied führte zu der Annahme, dass der statische Reibungskoeffizient möglicherweise nicht für das analytische Modell geeignet ist. Daraufhin wurden die Tragfähigkeiten nach Gleichung (2) mit dem kinetischen Reibungskoeffizienten neu berechnet. Hier jedoch zeigte die Auswertung der Ergebnisse, dass die

**Tab. 4:** Vergleich Versuchslasten  $F_{V,test}$  mit berechneten Schätzlasten  $F_{V,exp}$

Reihe	Oberfläche	Schraubentyp und Anzahl		$F_{V,exp}$	$F_{V,test} / F_{V,exp}$
1	Unbehandeltes KPH	5x100	5	33,0	1,23
	Pyramiden 1,0 mm	5x100	5	48,6	1,09
	Pyramiden 1,5 mm	5x100	5	52,8	1,01
	Pyramiden 2,0 mm	5x100	5	54,3	0,97
	Kreisförmiges Muster	5x100	5	40,8	1,22
	Geschliffen	5x100	5	42,5	1,18
	Gestrahlt	5x100	5	40,9	1,24
	EpoxyTape 0,1 mm	5x100	5	48,9	1,18
	EpoxyTape 1,0 mm	5x100	5	48,0	1,09
2	Pyramiden 1,0 mm (verschoben)	5x100	5	50,0	0,97
	Pyramiden 1,5 mm (verschoben)	5x100	5	54,1	0,84
3	Kreisförmiges Muster	6x180	5	80,4	0,99
	Pyramiden 0,5 mm	6x180	5	82,2	1,03
4	Glatt	6x100	15	87,8	1,36
	Pyramiden 0,5 mm	6x100	15	119	1,18
	Geprägtes Muster	6x100	15	132	1,16
5	Geprägtes Muster	6x200	15	191	0,97
6	Pyramiden 0,5 mm (v1)	6x200	10	164	0,91

Höchstlast in den Versuchen deutlich vor einer Verformung von 15 mm erreicht wurde und somit deutlich vor Erreichen des kinetischen Reibbeiwertes in den Reibungsversuchen. Es liegt daher nahe, einen Mittelwert aus statischem und kinetischem Reibbeiwert für die Berechnung zu verwenden. Um den Einfluss des Reibbeiwertes zu verdeutlichen sind in **Abb. 14** (oben) die Höchstlasten auf der Ordinate und die Schätzlasten auf der Abszisse aufgetragen. Bei Verwendung des statischen Reibungskoeffizienten für das analytische Modell (grüne Punkte in **Abb. 14**) liegt der niedrigste Wert bei 0,75 und das durchschnittliche Verhältnis bei 1,10. Bei der Verwendung des dynamischen Reibungskoeffizienten für das Modell (blaue Punkte in **Abb. 14**) liegt der niedrigste Wert bei 0,92 und der durchschnittliche Wert bei 1,28. Bei Verwendung des Mittelwerts aus statischem und kinetischem Reibungskoeffizienten (graue Punkte in **Abb. 14**) beträgt der niedrigste Wert 0,85 und der durchschnittliche Wert 1,18. Die Auswertung des Bestimmtheitsmaßes  $R^2$  zeigt die geringste Übereinstimmung des Modells mit den Versuchsergebnissen bei der Verwendung des kinetischen Reibbeiwertes und kaum Unterschied bei der Verwendung des statischen oder des mittleren Reibbeiwertes (Mittelwert aus  $\mu_s$  und  $\mu_k$ ).

Werden die Schätzlasten auf charakteristischem Niveau berechnet und wird wieder unterschieden zwischen statischem und kinetischem Reibbeiwert, ergibt sich eine Verteilung nach **Abb. 14** (unten). In Grün die Ergebnisse mit statischem Reibbeiwert, in Blau die Ergebnisse mit kinetischem Reibbeiwert. Hier wurde unterschieden zwischen dem 5%-Quantil des Reibbeiwertes und dem Mittelwert des Reibbeiwertes (einer Versuchsreihe). Die Ergebnisse zeigen (Auswertung des Bestimmtheitsmaßes  $R^2$ ), dass mit dem statischen Reibbeiwert eine deutlich bessere Übereinstimmung zwischen Modell und Versuchen vorliegt. Des Weiteren zeigt sich, dass es kaum einen Unterschied macht, ob der Mittelwert oder der charakteristische Wert des Reibbeiwertes einer bestimmten Oberfläche für die Berechnung der Schätzlast verwendet wird.



**Abb. 14:** Vergleich des Rechenmodells mit den Versuchsergebnissen

## 6 Langzeit-Verhalten

Die Erhöhung der Tragfähigkeit von Verbindungen mit bearbeiteten Oberflächen beruht auf einer erhöhten Reibung in der Scherfuge aufgrund der Oberflächenbearbeitung. Daher ist es wichtig, dass während der gesamten Lebensdauer der Verbindung ein ausreichender Anpressdruck in der Scherfuge vorhanden ist. Hier stellt sich die Frage, ob der Anpressdruck auch nach längerer Zeit noch vorhanden ist und somit die Reibung noch aktiviert wird. Dieses Verhalten sollte der Fall sein, da die Schrauben unter einem Winkel zur Faser eingedreht werden. Dieser Winkel sorgt dafür, dass die Schrauben immer auf Zug beansprucht werden und somit eine Druckkraft rechtwinklig zur Scherfuge entsteht (siehe **Abb. 2**). Was passiert jedoch, wenn das Holz unter klimatischen Bedingungen schwindet und quillt? Diese Frage wurde durch Langzeitversuche untersucht. Die Verbindungen wurden verschiedenen klimatischen



Bedingungen (NKL 1 und 2) bei konstanter Belastung ausgesetzt. Nach einer Auslagerungsdauer von über einem Jahr wurden die Versuchskörper entlastet und die Resttragfähigkeit und -steifigkeit ermittelt.

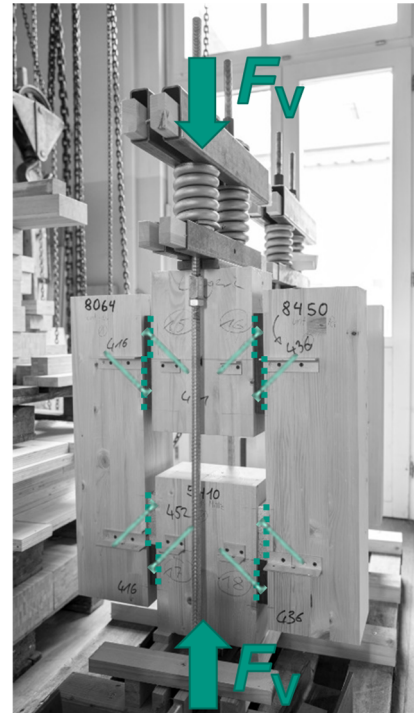
NKL 1 bezeichnet beheizte Innenräume mit einer durchschnittlichen Temperatur von 20°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit, die nur während einiger Wochen im Jahr 65% übersteigt. Diese Bedingung führt zu einer durchschnittlichen Holzfeuchte von <12%. NKL 2 bezeichnet überdachte, aber offene Konstruktionen mit einer relativen Luftfeuchtigkeit, die nur während einiger Wochen im Jahr 85% übersteigt. Diese Bedingung führt zu einer durchschnittlichen Holzfeuchte von <20 %.

### 6.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Die Probekörper wurden ähnlich wie bei den Kurzzeitversuchen hergestellt und sind in **Abb. 15** zu sehen. Als Verbinder wurden die zuvor vorgestellten Prototypen v1 und v2 verwendet. Die Verbinderplatten wurden mit um 45° geneigten Schrauben (Würth ASSY 4 plus 6x200 mm) an den Seiten- und Mittelhölzern aus GL 24h befestigt. Das Brettschichtholz wurde vor den Versuchen bei einem Normalklima von 20°C und 65% r.F. gelagert. Die Seitenhölzer waren deutlich länger als bei den Kurzzeitversuchen, so dass sich an jedem Seitenholz zwei Verbinderplatten befanden, eine oben und eine unten. Insgesamt wurden mit jedem Probekörper vier Verbindungen geprüft. Ausgelagert wurden jew. zwei Versuchskörper in NKL 1 bzw. NKL 2. Ein Probekörper in jeder Nutzungsklasse enthielt ausschließlich vier Verbinder v2, und der andere Probekörper in jeder Nutzungsklasse enthielt zwei Verbinder v2 oben und zwei Verbinder v1 unten.

Die Belastung wurde über große Druckfedern und Gewindestangen aufgebracht. Die beiden Mittelhölzer wurden gleichzeitig und möglichst gleichmäßig mit Federn über Stahlhohlprofile und große Unterslegscheiben belastet. Auf diese Weise konnten zwei Druck-Scherversuche mit vier Verbindern in einem Versuchsaufbau geprüft werden. Die Druckfedern hatten jeweils eine Federkraft von 50 kN. Die konstante Dauerlast wurde mit ca. 30% der in den Kurzzeitversuchen ermittelten Höchstlasten gewählt (50 kN entspricht 33% für Verbinder v2 und 28% für

Verbinder v1). Die Last von 50 kN pro Verbinder entspricht einem charakteristischen Lastniveau der Verbinder von 37% für Verbinder v2 und 33% für Verbinder v1. Das Belastungsniveau wurde auf etwa 30% begrenzt, da Druckfedern nur mit einer Federkraft von maximal 50 kN zur Verfügung standen.



**Abb. 15:** Versuchsaufbau Langzeit-Versuche

Die Probekörper wurden mit einer Universalprüfmaschine bis zu 100 kN belastet (d. h. 50 kN in jeder Feder), woraufhin die Muttern der Gewindestangen angezogen wurden um die Federn bei 50 kN komprimiert zu lassen. Die Prüfkörper wurden nach ca. 330 Tagen ins Labor zurückgebracht, um die Belastung der Federn zu überprüfen und sie gegebenenfalls neu zu belasten. Die aufgezeichneten Belastungen lagen zwischen 90 und 95% der Zielbelastung. Mit einer Universalprüfmaschine wurde jeder Versuchskörper wieder auf 100 kN belastet. Nach ca. 570 Tagen wurden die Proben entlastet, wiederum mit einer Universalprüfmaschine. Die Federkräfte betrugen nicht weniger als 93% der Ziellast. Nach der Entlastung und dem Ausbau der Federn wurden die Probekörper an ihren Lagerort zurückgebracht, um sich in ihrer jeweiligen klimatischen Umgebung zu erholen.

## 6.2 Ergebnisse

Die Versuchskörper wurden nach 566 Tagen entlastet und konnten sich 30 Tage lang in der jew. NKL erholen. Diese Erholungsphase war hauptsächlich auf logistische Gründe im Labor zurückzuführen. Die bleibenden Verformungen betrugen zwischen 2,0 und 2,5 mm für den Verbinder v1 und etwa 1,5 mm für den Verbinder v2. Unmittelbar vor den Versuchen wurden die Versuchskörper getrennt, um die identischen Druck-Scherversuchskörper wie für die Kurzzeitversuche zu erhalten. Die Versuche zur Bestimmung der Resttragfähigkeit wurden analog zu **Abschnitt 4** und DIN EN 26891 mit Entlastungsschleife durchgeführt.

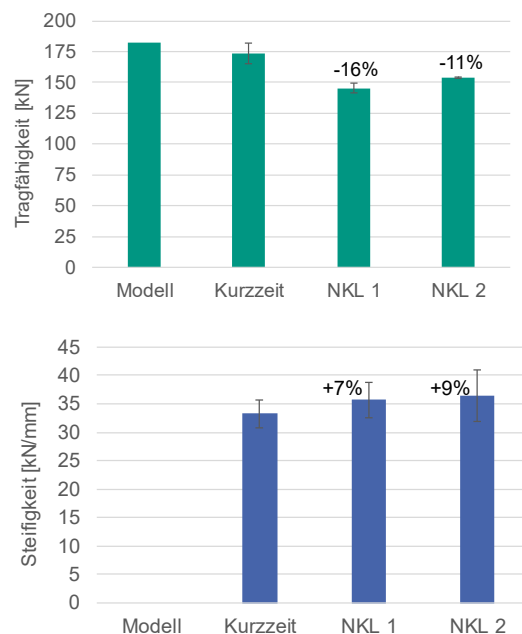
Die tatsächliche Holzfeuchte der Probekörper wurde während der Auslagerung nicht gemessen. Nach den Versuchen wurde die Holzfeuchte und die Rohdichte bestimmt. Die ermittelte Holzfeuchte der Versuchskörper in NKL 1 betrug im Durchschnitt 10,9%, während die Holzfeuchte der Versuchskörper in NKL 2 im Durchschnitt 15,4% betrug.

### Tragfähigkeit

Die Verbindungen mit Verbinder v2 erreichten in NKL 1 eine mittlere Höchstlast von  $F_{\max} = 145$  kN und in NKL 2 eine mittlere Höchstlast von 154 kN, was 84% bzw. 89% der mittleren Höchstlast der Kurzzeitversuche entspricht. In **Abb. 16** (oben) sind sowohl die Ergebnisse der Kurzzeit- als auch der Langzeitversuche dargestellt. Die Abnahme der Tragfähigkeit gegenüber der Kurzzeitversuche lässt sich zum einen mit veränderten bzw. verringerten Holzeigenschaften aufgrund der klimatischen Bedingungen erklären. Zum anderen kam es zu Schwinden im Holz im Bereich der Scherfuge und es mussten erst wieder größere Verformungen aufgebracht werden, bis die Oberflächenstruktur sich komplett im Nadelholz verzahnte. Dass es zu keinem Verlust der Reibung kam, zeigen die Ergebnisse in NKL 2 und die geringere Abnahme der Tragfähigkeit. Hier kam es aufgrund von Quellen des Holzes zu einer stärkeren Verzahnung der Oberflächen und somit auch zu einem größeren Anteil aus Reibung.

### Steifigkeit

Die mittlere Steifigkeit der Verbinder v2 in NKL 1 betrug  $K_s = 28,2$  kN/mm und lag somit um 7% höher als die Steifigkeit der Kurzzeitversuche. Die Steifigkeit der Verbinder in NKL 2 lag mit 36,4 kN/mm sogar 9% über den Kurzzeitversuchen. In **Abb. 16** (unten) sind sowohl die Ergebnisse der Kurzzeit- als auch der Langzeitversuche dargestellt. Die Zunahme der Steifigkeit in NKL 1 bestätigt die Annahme, dass es zu keinem Verlust der Reibung kam. Aufgrund der konstanten Dauerlast wurde die Oberflächenstruktur während des Versuchszeitraums vollständig in das Nadelholz gepresst und es kam zu keinen weiteren Eindrückungen der Verbinderplatten (was wiederum die Annahme bestätigt, dass eine gleichmäßige Oberflächenstruktur von Vorteil ist, welche sich bei Belastung nicht noch ins Nadelholz eindrückt) bis zu einem Erreichen von mindestens dem Lastniveau der Dauerstandsversuche. Dies wird bestätigt mit den Versuchen in NKL 2, bei denen es aufgrund von Quellen des Holzes zu einer stärkeren Verzahnung der Oberflächen und somit auch höheren Steifigkeit kam.



**Abb. 16:** Ergebnisse Resttragfähigkeit



## 7 Fazit

### *Oberflächenbearbeitung*

Insgesamt wurden acht verschiedene Herstellungsverfahren für verschiedene Oberflächen untersucht. Es zeigte sich, dass zum einen, einfache Herstellungsverfahren zu großen Streuungen in der Oberflächenqualität führen, und zum anderen, dass Beschichtungen mit hohem Aufwand aber dennoch sehr unterschiedlichen Ergebnissen der Oberflächenqualität verbunden sind. Herstellungsverfahren wie Fräsen oder Prägen sind daher zu empfehlen. Die Verfahren sind zwar komplexer und aufwendiger, aber es kann eine gleichbleibend hohe Qualität der Oberfläche garantiert werden.

### *Reibversuche*

Es wurden insgesamt 26 verschiedene Oberflächen untersucht. Alle untersuchten Oberflächenbearbeitungen führten zu teilweise deutlich höheren Reibbeiwerten. Die wichtigsten Erkenntnisse sind, dass starke Strukturierungen nicht zwingend notwendig sind um einen hohen Reibbeiwert zu erzielen. Vielmehr ist die Gleichmäßigkeit einer Oberfläche von höherer Bedeutung.

### *Verbindungsversuche*

Mit den untersuchten Oberflächen und in Verbindung mit geneigten Vollgewindeschrauben konnte sowohl die Tragfähigkeit um bis zu 43% und die Steifigkeit um bis zu 27% gesteigert werden. Die Ergebnisse zeigten, dass Oberflächen mit starker Strukturierung eine gute Verzahnung im Nadelholz mit sich bringen und somit die Tragfähigkeit steigern. Hingegen Oberflächen mit flacher, gleichmäßiger Strukturierung von Beginn an einen gleichmäßigen Kontakt in der Scherfuge haben und somit die Steifigkeit steigern.

### *Modellierung*

Das vorgestellte analytische Rechenmodell bildet Mittelwerte der Tragfähigkeit gut ab. Unter Verwendung des statischen Reibbeiwertes wird die Tragfähigkeit tendenziell überschätzt, unter Verwendung des kinetischen Reibbeiwertes tendenziell unterschätzt. Auch die charakteristische Tragfähigkeit lässt sich mit dem Rechenmodell gut abbilden. Hier eignet sich der Mittelwert des statischen Reibbeiwertes für die Bemessung. Wird das 5%-Quantil des statischen

Reibbeiwertes verwendet, liegen die Ergebnisse alle auf der sicheren Seite.

### *Dauerstandsversuche*

Die Auslagerung der Versuchskörper in zwei unterschiedliche Nutzungsklassen 1 und 2 zeigte, dass die klimatischen Bedingungen vor allem einen Einfluss auf die mechanischen Holzeigenschaften haben und weniger auf den Reibbeiwert. Für beide Nutzungsklassen konnte gezeigt werden, dass auch nach längerer Belastung Reibung aktiviert werden kann.

## 8 Literaturverzeichnis

- [1] Lagebericht Holzbau. Berlin: Holzbau Deutschland – Bund Deutscher Zimmermeister im Zentralverband des Deutschen Baugewerbes e.V.; 2024.
- [2] Brancheninfo Bau. Berlin: Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e.V.; 2024.
- [3] Bejtka I, Blaß HJ. Joints with Inclined Screws. Paper 35-7-4. In: Proceedings of CIB W18 - Meeting 35. Kyoto, Japan; 2002.
- [4] DIN EN 1995-1-1:2012-10. Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau.
- [5] Aurand S, Blaß HJ. Verbinder aus Kunstharzpressholz mit erhöhter Reibung in der Scherfuge. Band 38. Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing; 2023.
- [6] DIN 8580:2022-12. Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung.
- [7] Schmidt T. Kontaktverbindungen für aussteifende Scheiben aus Brettsperrholz. Band 33. Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing; 2018.
- [8] DIN EN 14358:2016-11. Holzbauwerke – Berechnung und Kontrolle charakteristischer Werte.
- [9] DIN EN 14545:2009-02. Holzbauwerke – Nicht stiftförmige Verbindungselemente – Anforderungen.
- [10] DIN EN 26891:1991-07. Holzbauwerke; Verbindungen mit mechanischen Verbindungsmitteln; Allgemeine Grundsätze für die Ermittlung der Tragfähigkeit und der Verformungsverhalten (ISO 6891:1983).

## Autor

Simon Aurand

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Holzbau und Baukonstruktion  
R.-Baumeister-Platz 1  
76131 Karlsruhe

Kontakt:  
simon.aurand@kit.edu