

Forschungsergebnisse FH Augsburg, Teil 2

Erhöhung der Querdruckfestigkeit von Holz

Durch das Einschrauben von selbstschneidenden Holzschrauben (ohne Vorbohren) lässt sich die Querdruckfestigkeit von Holz und Brettschichtholz beträchtlich erhöhen. Im zweiten Teil werden Versuche mit verstärkten Balkenauflagen beschrieben, die Ergebnisse diskutiert und ein Rechenverfahren zur Berücksichtigung der Verstärkungseffekte vorgestellt.

Für die Auflagerversuche wurden Brettschichtholzträger $b/h = 140/240$ mm mit einer Länge von 700 mm verwendet. Die BSH-Träger wurden gezielt mit Brettern geringer ($\rho = 400 \pm 20 \text{ kg/m}^3$) und hoher ($\rho = 500 \pm 20 \text{ kg/m}^3$) Rohdichte hergestellt. Diese Bretter wurden übereinander gelegt und miteinander verleimt, sodass keine Keilzinkenverbindungen auftraten. Hierdurch sollten möglichst gleichwertige Materialien für die verschiedenen Versuchsreihen gewährleistet werden.

Abweichend von den Schwellenversuchen wurde keine Zwischenlage aus Holz („Hirnholzscheibe“) angeordnet, sondern die Last wurde über eine Stahlplatte eingeleitet.

Im Hinblick auf die benötigten größeren Verbindungsmittelabstände betrug die Auflagerlänge nicht wie bei den Schwellenversuchen 60 mm, sondern 80 mm.

Der Verstärkungseffekt wurde wie bei den Schwellenversuchen mit vier und mit neun Schrauben untersucht. Es wurden nur Versuche mit ordnungsgemäßer Ausführung durchgeführt. Für die Messung der Schwellenverformungen wurden seitlich Wegaufnehmer angebracht,

mit deren Hilfe die Eindrückungen über eine Messlänge von 60 mm gemessen wurden. Bei der Versuchsauswertung wurden die beiden Messwerte jeweils gemittelt.

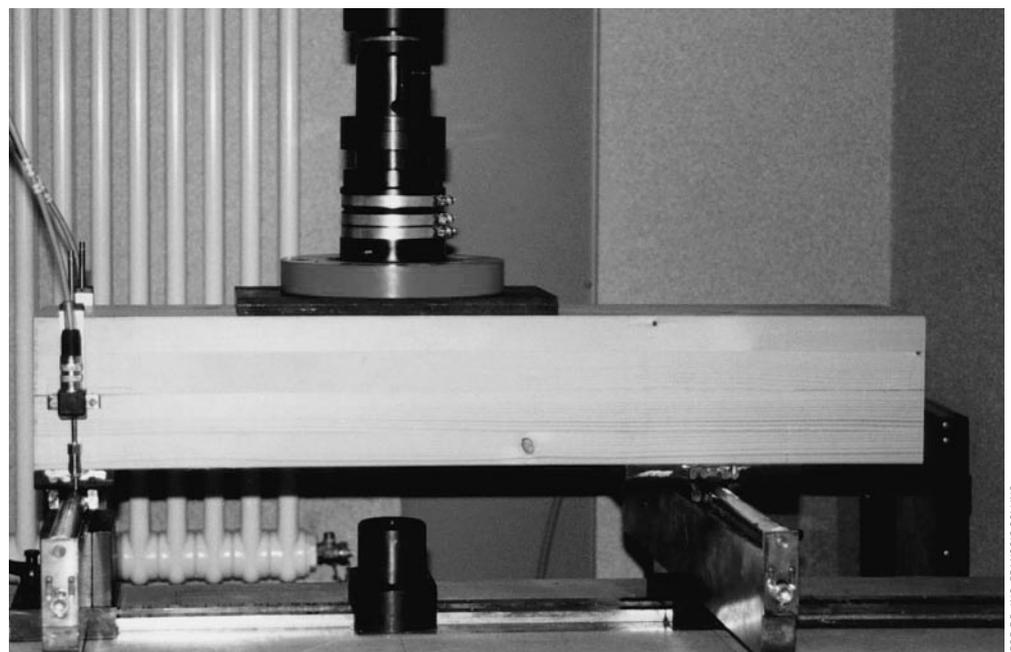
Insgesamt wurden 87 Auflagerversuche durchgeführt. Wie bei den Schwellenversuchen wurden folgende Verstärkungsfaktoren ermittelt:

1. auf dem Niveau der Linearitätsgrenze: $k_{V_{lin}}$ (siehe Teil 1)
2. auf dem Niveau der Querdruck-

festigkeit: $k_{V_{c,90}}$ (siehe Teil 1)

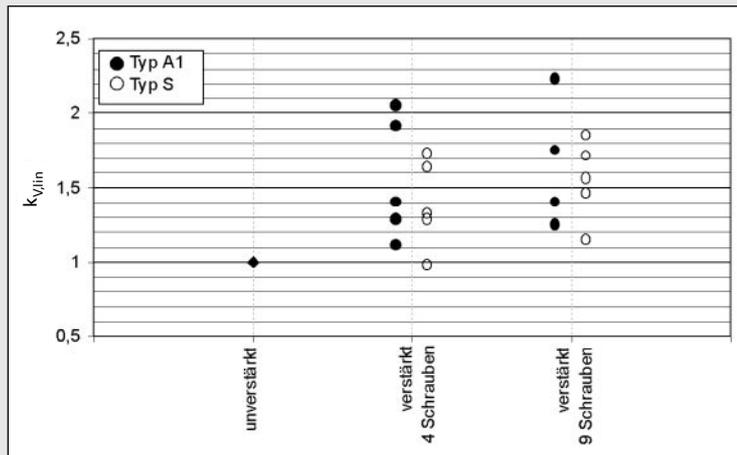
Bei den Versuchen mit BSH einer Rohdichte von 500 kg/m^3 ergaben sich ähnliche Tendenzen, jedoch bei geringeren Verstärkungsfaktoren (wie bei den Schwellenversuchen auch). Dies kann wiederum mit der höheren Steifigkeit und Festigkeit der Proben mit höherer Rohdichte erklärt werden, sodass der Verstärkungseffekt durch die Schrauben geringer ausfällt.

Versuchsanordnung mit eingebautem Prüfkörper (indirekte Lasteinleitung, Balkenauflager)

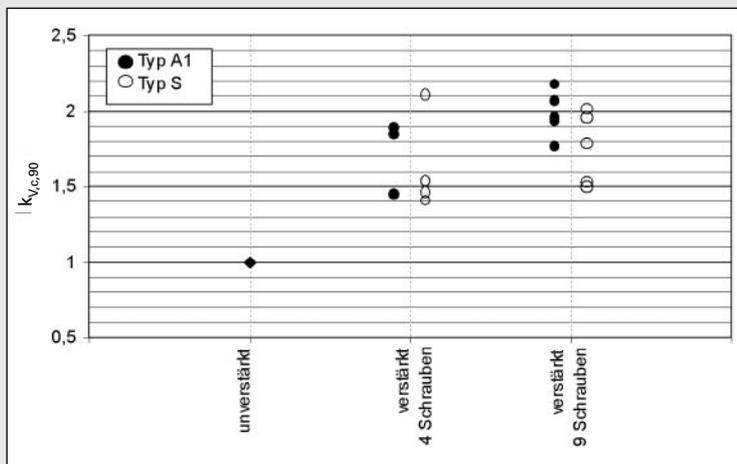


Verstärkungsfaktoren für BSH mit einer Rohdichte von 400 kg/m³

Verstärkungsfaktoren auf dem Niveau der Linearitätsgrenze



Verstärkungsfaktoren auf dem Niveau der Querdruckfestigkeiten



Aus diesen Bildern sind folgende Tendenzen zu erkennen:

- Auch im Falle einer Auflagerbeanspruchung erweist sich das Eindrehen von Holzschrauben als sehr effektiv.
- Die Streuung der Werte ist in Anbetracht des doch gleichwertigen Probenmaterials vergleichsweise groß. Sie ist deutlich größer als bei den Schwellenversuchen.
- Im Gegensatz zu den Schwellenversuchen ist der Faktor $k_{V,c,90}$ nicht kleiner als der Faktor $k_{V,lin}$. Dies kann mit der „harten“ Lasteinleitung über eine Stahlplatte erklärt werden, die sicherstellt, dass im Bereich nicht linearen Tragverhaltens die Schraubenköpfe sich nicht eindrücken und der Verstärkungseffekt somit erhalten bleibt bzw. sogar noch leicht gesteigert werden kann.
- Bei Anordnung von neun Schrauben ist eine geringfügige Steigerung des Verstärkungseffektes zu erkennen, die jedoch in keinem Verhältnis zur Anzahl der verwendeten Schrauben steht.

Zusammenfassung der ermittelten Verstärkungsfaktoren für die Auflagerbeanspruchung (Mittelwerte)

Rohdichte		$k_{V,lin}$	$k_{V,c,90}$
400 kg/m ³	4 Schrauben	1,47	1,64
	9 Schrauben	1,61	1,87

Aus dieser Tabelle lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Auf dem Niveau der Linearitätsgrenze kann bei vier Schrauben ein Verstärkungsfaktor von etwa 1,5 angesetzt werden (bei den Schwellenversuchen: 1,6).
- Auf dem Niveau der Querdruckfestigkeiten kann bei vier Schrauben ein Verstärkungsfaktor von etwa 1,6 zugrunde gelegt werden (bei den Schwellenversuchen: 1,4).

Einflussfaktoren

Die Versuche zeigten, dass das Eindrehen von selbstschneidenden Holzschrauben ohne Vorbohren eine wirksame Maßnahme zur Erhöhung der Querdruckfestigkeit darstellt. Folgende Faktoren beeinflussen dabei die Querdruckfestigkeiten und die zugehörigen Verstärkungseffekte:

- **Die Art der Beanspruchung:** Bei Auflagerbeanspruchung („indirekte“ Lasteinleitung) wurden höhere Querdruckfestigkeiten ermittelt als bei Schwellenbeanspruchung („direkte“ Lasteinleitung). Dies kann mit der Möglichkeit einer größeren Lastausbreitung bei Balkenauflagern erklärt werden.
- **Die Art der Lasteinleitung:** Bei einer „weichen“ Lasteinleitung, z.B. über das Hirnholz einer Stütze, geht ein Teil des Verstärkungseffektes verloren, weil sich die Schraubenköpfe in das Hirnholz eindrücken. Bei einer „harten“ Lasteinleitung, z.B. über eine Stahlplatte, kann ein größerer Teil der Last über die Schrauben übertragen werden.
- **Die Anzahl der Schrauben:** Die aufnehmbare Last nimmt nicht proportional zur Anzahl der Schrauben zu. Dies kann mit einer

Überlagerung der Druckspannungskegel bei zu enger Anordnung der Schrauben erklärt werden (siehe Teil 1). Hieraus ergibt sich die Erkenntnis, dass pro Schraube eine gewisse „Einzugsfläche“ einzuhalten ist, damit sich die volle Verstärkungswirkung einstellen kann.

Statistische Aussagekraft

Die Versuche wurden bewusst mit ausgesuchtem Holz durchgeführt, um eine größere Streuung der Versuchsergebnisse, z. B. infolge stark streuender Rohdichten, zu vermeiden. Die hier ermittelten Versuchsergebnisse können somit nicht unmittelbar auf die Grundgesamtheit einer bestimmten Sortierklasse übertragen werden.

Geht man aber von der groben, jedoch nicht unrealistischen Annahme aus, dass die *mittleren* Festigkeitswerte von Holz mit einer Rohdichte von 400 kg/m³ in etwa in der Größenordnung der *charakteristischen* Festigkeit (5 %-Fraktile) der Grundgesamtheit liegen, so könnten die Versuchsergebnisse doch immerhin als Anhaltswerte für die bei der Bemessung benötigten charakteristischen Kenngrößen herangezogen werden.

Wie die Ausführungen im nächsten Abschnitt jedoch zeigen, stehen die Versuchsergebnisse in z.T. deutlichem Widerspruch zu den Regelungen des Normentwurfes E DIN 1052 (Mai 2000).

Widersprüche zur E DIN 1052

Die im Gelbdruck zur neuen DIN 1052 (Mai 2000) vorgeschlagenen Rechenwerte für die Querdrukfestigkeit legen eine Prüfung nach DIN EN 1193 zugrunde, nach der die Querdrukfestigkeit anhand von würfelförmigen Proben ohne jeglichen Überstand ermittelt wird. Diese Werte gelten dann auch als Basiswerte für Schwellen und Auflagerungen ohne Überstand.

Bei Teilflächenpressungen mit

kleinen Auflagerlängen ($l_A \leq 150$ mm) wird in E DIN 1052 ein Beiwert $k_{c,90}$ zur Erhöhung der Querdrukfestigkeit angegeben, der bei fehlendem Überstand bereits 1,7 beträgt und bei gegebenem Überstand sogar noch weiter ansteigt. Schwellen und Balkenaullager werden dabei gleich behandelt. In unten stehender Tabelle sind die so modifizierten Rechenwerte den ermittelten Versuchswerten (Mittelwerte) gegenübergestellt.

Rechenwerte der E DIN 1052 die hier untersuchten Fälle überhaupt korrekt erfassen.

Bewertung

Die Frage nach den „richtigen“ Rechenwerten für die Querdrukfestigkeit lässt sich dadurch entschärfen, dass der Verstärkungseffekt nicht in Form einer prozentualen Erhöhung der Querdrukfestigkeit ausge-

Querdrukfestigkeiten in [N/mm²] nach E DIN 1052 (Mai 2000) und ermittelte Versuchswerte

	E DIN 1052 $f_{c,90,k}$ [N/mm ²]	Versuche: $f_{c,90,m}$ für = 400 kg/m ³ [N/mm ²]	
		unverstärkt	verstärkt, 4 Schrauben
Schwelle: S 10	4,25 ¹⁾	3,00	4,20
Auflager: BS 14	5,10 ¹⁾	4,11	6,74

¹⁾ Erhöht um den Faktor 1,7 wegen Teilflächenpressung

Aus dieser Tabelle wird deutlich, dass die Rechenwerte nach E DIN 1052 deutlich höher sind als die in Versuchen ermittelten mittleren Querdrukfestigkeiten für unverstärktes Holz mit einer Rohdichte von 400 kg/m³.

Für Vollholz S 10 unter Schwellenbeanspruchung liegt der Rechenwert nach E DIN 1052 sogar in der Größenordnung der mittleren Querdrukfestigkeit der verstärkten Prüfkörper (vier Schrauben), sodass gar kein weiterer Verstärkungseffekt mehr angesetzt werden dürfte!

Bei der Bewertung dieser Widersprüche ist zu beachten, dass die charakteristischen Querdrukfestigkeiten nach E DIN 1052 vereinbarte Rechenwerte darstellen, denen nach Kenntnis des Autors keine systematischen Versuche zugrunde liegen. Die Faktoren $k_{c,90}$ zur Erhöhung der Querdrukfestigkeit bei Teilflächenpressung basieren auf Untersuchungen, die allerdings auf Schwellen beschränkt waren. Somit ist es fraglich, ob die

drückt wird, sondern als zusätzliche Tragreserve, die den Schrauben zugeordnet wird. Die aufnehmbare Gesamtlast wird somit aufgeteilt in einen Anteil, der vom Holz aufzunehmen ist, und einen Anteil, der von Schrauben geleistet wird. Diese Schraubenanteile sind dann unabhängig vom Bezugswert der Querdrukfestigkeit. Dieser Ansatz wird auch in dem nachfolgend beschriebenen Rechenverfahren verfolgt.

Aus der Tabelle Seite 65 unten ist zu erkennen, dass das Rechenverfahren die in den Versuchen ermittelten Höchstlasten (Mittelwerte) meist auf der sicheren Seite liegt auch, wenn anstelle der Schraubewerte $F_{D,S}$ die zugehörigen Werte $F_{Z,S}$ für Herausziehen eingesetzt werden (Schwelle: $F_{Z,S} \approx 3200$ N, Auflager: $F_{Z,S} \approx 6900$ N). Hierbei ist zu beachten, dass es sich bei den angegebenen Werten um mittlere Tragfähigkeitswerte handelt und nicht um Werte, die bei einer Bemessung herangezogen werden könnten.

A	
Altenloh, Ennepetal	82
Auwärter, Waldershof	79
B	
Bocad, Bochum	37
Branchenführer	60/61
Bruckamp, Lübecke	81
D	
Deutsche Heraklith, Simbach	U4
Deutsche Rockwool, Gladbeck	67
Dickel-Holz, Schmallebenberg	57
Dieckmann, Melle	80
E	
Egger, Brilon	71
F	
Frammelsberger, Oberkirch	31
Frick, Türkheim	77
Fuchs, Lollar	80
G	
Geiger, Westhausen	81
GFG-Tatsek, Aalen	80
Glunz, Göttingen	7
H	
Haas, Falkenberg	59
Handwerksbildungszentrum, Bielefeld	82
Hapfo, Kiefersfelden	38
Haug, Ludwigsburg	82
Holzboerse, Hallbergmoos	89
Holzlamellenbau, Kirchlinteln	80
Hundegger, Hawangen	31
Huss Medien, Berlin	29
I	
Internetportal	45
Inserentenverzeichnis	65
J	
Joinex, Bad Oeynhausen	80
K	
Kaulbach, Dernbach	81
Kempen, Oelde	59
Klöber, Ennepetal	21
Krämer, Bopfingen	59
Kronoply, Heiligengrabe	73
L	
Ladenburger, Bopfingen	11
M	
Mannes, Oberkochen	88
Martin, Ottobeuren	93
Merkle, Nersingen	89
Messe, Essen	55
<i>mikado</i> , Kissing	U2/U3
<i>mikado</i> , Kissing	Beilage
N	
Novum, Motabauer	31
O	
Öko-Zentrum, Hamm	88
Opitz, Mechernich	79
Osmo, Münster	35
Ott, Airing	38
P	
Petz, Vils	82
Pongratz, Bogen	88
Poppensieker+Derix,	
Westernkappeln-Velpel	54
R	
Raico, Erkheim	9
Römer, Emskirchen	85
Roto, Bad Mergentheim-Edelfingen	19
S	
S&S, Wermelskirchen	86
Schiller, Regen	38
Schneider, Eberhardzell	8
Schnoor, Burg	55
Schwenkedel, Laichingen	81
Service & Dienstleistung, Allensbach	81
Siga, Schachen	38/39
smeets, Dortmund	89
Storkair, Ahaus	53
T	
Technologie- und Ausbildungszentrum,	
Paderborn	82
Trurnit, Altena	87
V	
Variotec, Neumarkt	56
W	
Wache, Mechernich	81
Wallner, Reichertshofen	81
WEKA MEDIA, Kissing	69/79
Wichmann, Oeyenhausen	58
Winkler, Arnstorf	85
Z	
Zeidler, A-Vösendorf	85

Rechenverfahren

Auf der Grundlage der im vorigen Abschnitt geführten Diskussion wurde ein Rechenverfahren erarbeitet, nach dem sich die Traglast rechtwinklig zur Faserrichtung aus folgender Beziehung ergibt:

$$\text{Gesamt-Traglast} = \text{Traglast Holz} + \text{Traglast Schrauben}$$

Zur Bestimmung der effektiv wirksamen Anzahl von Schrauben wird folgende Gleichung vorgeschlagen, wobei eine Beschränkung auf höchstens sechs Schrauben vorgenommen wird:

$$n_{ef} = \min \left\{ \begin{array}{l} 6 \\ \frac{b \cdot l_A}{450 \cdot d_S} \end{array} \right. \quad (1)$$

mit

- n_{ef} = effektiv wirksame Anzahl von Schrauben (ganze Zahl)
- $b \cdot l_A$ = Druckfläche (Breite x Aufstandsänge) in [mm²]
- d_S = Schraubendurchmesser in [mm]

Die Schrauben müssen dabei einen Abstand von $7 \cdot d_S$ zum Hirnholz einhalten. Die maximale Druckkraft rechtwinklig zur Faserrichtung kann dann wie folgt berechnet werden:

$$F_{c,90} = F_{c,90,H} + \Delta F_S \quad (2)$$

mit

- $F_{c,90}$ = Traglast rechtwinklig zur Faserrichtung (Gesamtlast) in [N]
- $F_{c,90,H}$ = Traglast der unverstärkten Kontaktfläche (Holzanteil) in [N]
- $= f_{c,90} \cdot A$ (3)

- ΔF_S = Zusätzliche Last, die von den Schrauben aufgenommen wird in [N]
- $= k_A \cdot n_{ef} \cdot F_{D,S}$ (4)

- $A = b \cdot l_A$ = Druckfläche in [mm²]
- $F_{D,S}$ = Traglast einer Schraube auf Eindrücken ohne Mitwirkung des Schraubenkopfes in [N]; vereinfachend kann hier auch die Traglast auf Herausziehen angesetzt werden.

- n_{ef} = effektiv wirksame Anzahl von Schrauben nach Gl.(1)
- k_A = Beiwert zur Berücksichtigung der Lasteinleitung
- = 1,0 bei „harter“ Lasteinleitung, z.B. über Stahl oder Beton
- = 0,75 bei „weicher“ Lasteinleitung, z.B. über Holz

Die Übereinstimmung dieses Rechenverfahrens mit den Versuchswerten

	Rechenverfahren					Versuche		
	$F_{c,90} = F_{c,90,h} + \Delta F_S = f_{c,90} \cdot A + k_A \cdot n_{ef} \cdot F_{D,S}$					4 Schrauben	9 Schrauben	
	$f_{c,90}$ ¹⁾ [N/mm ²]	A [mm ²]	k_A	n_{ef} ²⁾	$F_{D,S}$ ³⁾ [N]	$F_{c,90}$ [N]	$F_{c,90}$ [N]	$F_{c,90}$ [N]
Schwelle	3,00	60 · 140 = 8400	0,75	4	3500	35 700	35 300 38 000 ⁴⁾	35 800
Auflager	4,11	80 · 140 = 11 200	1,0	4	6900	73 630	75 500 78 100 ⁴⁾	85 900 84 100

1) $f_{c,90}$: Mittelwert aus Versuchen, $\rho = 400 \text{ kg/m}^3$
 2) n_{ef} nach Gl. (1)
 3) Mittelwerte aus den Versuchen, $\rho = 400 \text{ kg/m}^3$
 4) Versuchsergebnisse mit Hölzern höherer Rohdichte ($\rho \approx 500 \text{ kg/m}^3$)

Bemessungsvorschlag

Die Festlegung von Bemessungsverfahren ist Aufgabe der Bauaufsicht und kann nicht im Rahmen von Forschungsprojekten erfolgen. An dieser Stelle kann somit lediglich ein Bemessungsvorschlag gemacht werden.

Die bei den einzelnen Versuchsreihen ermittelten charakteristischen Eindrückparameter $B_{D,k}$ (5%-Fraktile) ohne Mitwirkung des Kopfes lagen bei Holz mit einer Rohdichte von 400 kg/m^3 zwischen $14,0$ und $17,5 \text{ N/mm}^2$, wobei die Einzelwerte in allen Fällen über $15,0 \text{ N/mm}^2$ lagen. Nachfolgend wird daher von folgendem charakteristischen Wert ausgegangen:

$$B_{D,k} = 14,0 \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (5a)$$

Legt man eine globale Sicherheit gegenüber der 5%-Fraktile von $Y_{\text{global}} = 2,5$ zugrunde, so ergibt sich der „zulässige“ Eindrückparameter zu:

$$B_{D,zul} = \frac{14}{2,5} \approx 5,5 \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (5b)$$

Die charakteristischen bzw. „zulässige“ Tragfähigkeit einer Schraube auf Eindrücken kann dann wie folgt berechnet werden (siehe Teil 1):

$$F_{D,S,k} = 14 \cdot d_s \cdot l_g \quad (6a)$$

bzw.

$$F_{D,S,zul} = 5,5 \cdot d_s \cdot l_g \quad (6b)$$

mit

$B_{D,k}, B_{D,zul}$ = charakteristischer

bzw. „zulässiger“ Eindrückparameter ohne Mitwirkung des Schraubenkopfes in $[\text{N/mm}^2]$

d_s = Schrauben- Nenndurchmesser in $[\text{mm}]$

l_g = Gewindelänge der Schraube in $[\text{mm}]$

Zusammenfassung

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens wurde die Möglichkeit einer Erhöhung der Querdrukfestigkeit von Holz durch Einschrauben

selbstschneidender Holzschrauben ohne Vorbohren untersucht. Sowohl bei Schwellenbeanspruchung mit einer Druckfläche von $60/140 \text{ mm}$ als auch bei Auflagerbeanspruchung mit einer Druckfläche von $80/140 \text{ mm}$ erhöhte sich die Traglast rechtwinklig zur Faserrichtung um mindestens 40 Prozent, bei Anordnung von nur vier Schrauben. Der Verstärkungseffekt ist dabei abhängig von der Art der Lasteinleitung. So ist eine „weiche“ Lasteinleitung, z.B. über das Hirnholz einer Stütze, weniger effektiv als eine „harte“ Auflagerung, z.B. auf einer Stahlplatte. Der Verstärkungseffekt ist nicht proportional zur Anzahl der eingedrehten Schrauben. So kann sich der Verstärkungseffekt bei zu enger Anordnung der Schrauben sogar umkehren.

Die an unverstärkten Proben ermittelten Querdrukfestigkeiten weichen z.T. erheblich von den Rechenwerten der E DIN 1052 ab.

Auf der Grundlage der Versuche wurde ein Rechenverfahren zur

Berücksichtigung des Verstärkungseffektes vorgeschlagen. Bei diesem Rechenverfahren wird der Verstärkungseffekt nicht pauschal über eine prozentuale Erhöhung der Querdrukfestigkeit berücksichtigt, sondern über einen zusätzlichen Lastanteil, der von den Schrauben erbracht wird.

Dieses Rechenverfahren ist auf die hier untersuchten Varianten beschränkt. Bei Einsatz anderer Verstärkungsmaßnahmen (z.B. Gewindestangen) und anderer Geometrien sind durchaus unterschiedliche Verstärkungseffekte möglich. Diese können jedoch nur über Versuche ermittelt werden.

Den Firmen abc Verbindungstechnik, Ennepetal, Adolf Würth GmbH, Künzelsau, Anton Heggenstaller AG, Unterbernbach und Jakob Maier GmbH, Türkheim, sei sehr herzlich für die Unterstützung dieses Vorhabens gedankt.

Prof. Dr.-Ing. François Colling, FH Augsburg

Beispiel

Gegeben sei eine Schwelle eines Wandelementes, an dessen Ende ein Holzstiel ($b/h = 60/140 \text{ mm}$) aufgeständert ist. Der querdrukbeanspruchte Bereich der Schwelle soll mit vier Schrauben $4 \times 55 \text{ mm}$ ($l_g = 50 \text{ mm}$) verstärkt werden.

Gesucht ist die zusätzliche Last ΔF_S , die durch die vier Schrauben aufgenommen werden kann.

1. Charakteristische bzw. zulässige Schraubenkraft nach Gl.(6):

$$F_{D,S,k} = 14 \cdot d_s \cdot l_g = 14 \cdot 4 \cdot 50 = 2800 \text{ N}$$

$$F_{D,S,zul} = 5,5 \cdot d_s \cdot l_g = 5,5 \cdot 4 \cdot 50 = 1100 \text{ N}$$

2. Effektive Schraubenanzahl nach Gl.(1):

$$n_{\text{ef}} = \min \left\{ \begin{array}{l} 6 \\ \frac{60 \cdot 140}{450 \cdot 4} \end{array} \right\} = 4,67 \text{ d.h. alle vier Schrauben sind voll wirksam}$$

3. „Weiche“ Lasteinleitung wegen Holzpfosten: $k_A = 0,75$

4. Zusätzliche Last $\Delta F_{S,k}$ bzw. $\Delta F_{S,zul}$ nach Gl.(4):

$$\Delta F_{S,k} = 0,75 \cdot 4 \cdot 2800 = 8400 \text{ N}$$

$$\Delta F_{S,zul} = 0,75 \cdot 4 \cdot 1100 = 3300 \text{ N}$$

5. Anordnung der Schrauben (siehe Abbildung rechts):

