



Foto: SFS intec GmbH

Dr.-Ing. Joachim Kretz

# Querdruckverstärkte Holz-Bauteile

## Grundlagen zur Querdruckverstärkung durch Vollgewindeschrauben

Der Werkstoff Holz ist gekennzeichnet durch eine Anisotropie seiner Werkstoffeigenschaften. Während Holz in Längsrichtung der Fasern eine hohe Tragfähigkeit und Steifigkeit besitzt, sind die Werte derselben Eigenschaften senkrecht zur Faser vergleichsweise niedrig. Dies führt bei unverstärkten auf Querdruck beanspruchten Holzbauteilen zu großen erforderlichen Lasteinleitungsflächen und damit zu großen und unwirtschaftlichen Querschnittsabmessungen. Eine effiziente Methode querdruckbeanspruchte Holzbauteile planmäßig oder nachträglich zu verstärken und in statischer Hinsicht leistungsfähiger zu machen, besteht in dem systematischen Einbringen von Vollgewindeschrauben.

Auf Querdruck beanspruchte Bauteile wie z. B. querdruckbeanspruchte Trägerauflager stellen im Holzbau wegen der relativ geringen Querdruckfestigkeit und der damit erforderlichen großen Lasteinleitungsflächen kritische Punkte der Konstruktion dar. Aus Versuchen von Möhler und Freiseis, F. Colling [6] und I. Bejtka [5] konnte gezeigt werden, dass bei einer geeigneten Anordnung von selbstbohrenden Schrauben mit durchgehendem Gewinde sowohl die Tragfähigkeit als auch die Steifigkeit deutlich gesteigert werden können. Das in den Versuchen festgestellte Tragverhalten und die daraus abgeleiteten Berechnungsgrundlagen werden im Rahmen dieses Beitrages kurz vorgestellt und erläutert. Eine geeignete Anordnung von selbstbohrenden Vollgewindeschrauben ermöglicht damit

auch im Holzbau filigrane Konstruktionen mit geringen Lasteinleitungsflächen zur Übertragung von hohen Druckkräften rechtwinklig zur Faserrichtung des Holzes.

Im Holzbau stellen neben den querdruckbeanspruchten Bauteilen die Verbindungen und Anschlüsse zwischen den Holzbauteilen weitere kritische Punkte dar. Auch hier führen Verstärkungsmaßnahmen mit selbstbohrenden Holzschrauben im Bereich von Verbindungen zu einer Erhöhung der Tragfähigkeit und zu einem duktilen Last-Verformungsverhalten. Auf die Grundlagen zur Berechnung von Verbindungen mit selbstbohrenden Vollgewindeschrauben wird an dieser Stelle jedoch nicht eingegangen, sondern auf weiterführende Literatur [5, 8] verwiesen.

# 1 Vollgewindeschrauben - Grundlagen

## 1.1 Genormte Holzschrauben (DIN EN 14592)

In DIN EN 14592 sind die Holzschrauben geregelt, auf die sich der Eurocode 5, d. h. DIN EN 1995-1-1 [1] bezieht. Diese Schrauben sind u. a. dadurch gekennzeichnet, dass das Gewinde nur über ca. 60 % der Schraubenlänge vorhanden ist. Weiter entspricht der Durchmesser des Schaftbereiches dem des Außengewindes. Für Schraubendurchmesser > 8 mm ist ein doppeltes Vorbohren erforderlich, so dass sich ein Einsatz für tragende Zwecke als nicht wirtschaftlich erwiesen hat. Wegen des Teilgewindes ist keine kontinuierliche Krafteinleitung über die gesamte Schraubenhöhe möglich.

## 1.2 Vollgewindeschrauben nach Zulassung

Die Verwendung anderer Holzschrauben als nach DIN EN 14592 ist zulässig, wenn deren Eignung durch eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (z. B. ETA) nachgewiesen ist. Neuere Entwicklungen im Bereich der stiftförmigen Verbindungsmittel haben zu Schrauben mit hohen Festigkeiten bezüglich der Längstragfähigkeit und des Abscherens geführt. Diese sind nicht nur als reine Befestigungs- oder Verbindungsmittel, sondern auch gezielt als Verstärkungselemente zu verwenden. Sie können mit Längen bis 600 mm, mit Durchmessern bis zu 12 mm und einem durchgehenden Gewinde zwischen Schraubenkopf und Schraubenspitze hergestellt werden (Bild 1).

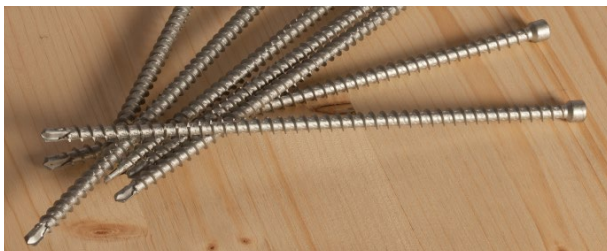
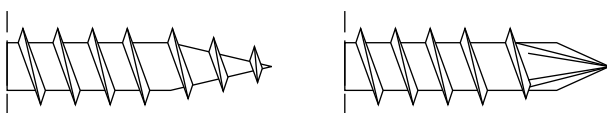


Bild 1. Beispiele von Vollgewindeschrauben

Ein wesentlicher Vorteil von Vollgewindeschrauben besteht darin, dass sie ohne Vorbohren eingeschraubt werden dürfen. Dazu sind sie mit speziell ausgebildeten Schraubenspitzen (Bild 2) und Gewindeformen ausgerüstet.



a) herkömmliche Form      b) selbstbohrende Spitze

Bild 2. Prinzipskizzen von Schraubenspitzen nach [8]

Die Bedeutung einer selbstbohrenden Vollgewindeschraube liegt wegen der profilierten Ausbildung des Gewindebereiches und der hohen Zug- bzw. Drucktragfähigkeit des Materials in der Übertragung von Zug- und Druckkräften in ihrer Achse. Durch die Profilierung des Gewindebereiches entlang der kompletten Schraubenhöhe wird ein kontinuierlicher Verbund und damit eine kontinuierliche Lasteinleitung zwischen Holz und Metall ermöglicht. Hier drängt sich die Analogie der kontinuierlichen Krafteinleitung zwischen einem profilierten Bewehrungsstab und dem umgebenden Beton (im Zustand I) auf.

Vollgewindeschrauben in querdruckbeanspruchten Bauteilen verstärken einerseits das Holz und erhöhen damit die Tragfähigkeit, andererseits wird die Steifigkeit des Holzes örtlich verbessert.

# 2 Versuche zur Bestimmung des Trag- und Steifigkeitsverhaltens querdruckverstärkter Bauteile mit Vollgewindeschrauben

## 2.1 Versuche von Bejtka zur Herleitung von Bemessungsgrößen

Unter Berücksichtigung der Erkenntnisse aus den Versuchen von Colling [6] führte Bejtka weitere Versuche durch, um den Einfluss von selbstbohrenden Holzschrauben mit Längen bis zu 600 mm und Durchmessern bis zu 12 mm als Verstärkung in querdruckbeanspruchten Bauteilen zu untersuchen. Dabei wurden sowohl verstärkte als auch unverstärkte querdruckbeanspruchte Bauteile mit „direkter“ (Schwellenpressung) und „indirekter“ sowie mit einer „harten“ Lasteinleitung geprüft. Bei einer „harten“ bzw. starren Lasteinleitung wird die Last über eine Stahlplatte eingeleitet. Mittels einer starren Stahlplatte („harte“ Lasteinleitung) wird die aufgebrachte Last gleichmäßig über die Oberfläche des Holzes und die Oberfläche der Schraubenköpfe eingeleitet. Bei einer „weichen“ Lasteinleitung (Lastübertragung direkt über das Hirnholz in das querdruckbeanspruchte, mit Holzschrauben verstärkte Bauteil) besteht die Gefahr, dass sich die Schrauben in das lasteinleitende Bauteil eindrücken und damit der Verstärkungseffekt ausbleibt. Eine Zusammenstellung einschließlich der Versuchsergebnisse der durchgeführten Querdruckversuche ist in [5] dokumentiert.

## 2.2 Versagensmechanismen

Unter Berücksichtigung der Versuchsergebnisse von Möhler / Freiseis, von Colling [6] und Bejtka [5] konnten von Bejtka für mit selbstbohrenden Vollgewindeschrauben verstärkte querdruckbeanspruchte Bauteile drei Versagensmechanismen unterschieden werden. Die festgestellten Versagensmechanismen werden nachfolgend nach Bejtka [5] zitiert:

- I. Unter der Annahme eines Zusammenwirkens des Holzes auf Querdruck und der Schrauben auf Hineindrücken werden die Schrauben ins Holz hineingedrückt. Die Tragfähigkeit von auf Hineindrücken beanspruchten Schrauben entspricht hier der Tragfähigkeit der Schrauben auf Herausziehen. Dieser Versagensmechanismus tritt vorwiegend bei kurzen Schrauben auf.
- II. Unter der Annahme des Zusammenwirkens des Holzes auf Querdruck und der Schrauben auf Hineindrücken knicken die Schrauben im Holz aus. Das Ausknicken der Schrauben findet in der Regel direkt unterhalb des Schraubenkopfes statt. Hierbei knicken die Schrauben vorwiegend rechtwinklig zur Faserrichtung des Holzes aus. Ein Ausknicken in Faserrichtung konnte nur in wenigen Fällen beobachtet werden. Darüber hinaus kann dieser Versagensmechanismus nur bei sehr großen Schlankheiten bzw. großen Schraubenlängen auftreten. Mit zunehmender Schraubenlänge ist bei diesem Versagensmechanismus (Bild 3) eine Traglaststeigerung nicht mehr möglich.



Bild 3. Versagensmechanismus: Ausknicken der Schrauben im Holz nach [5]

III. Unter der Annahme, dass an der Stelle der Schraubenspitze die gesamte Last aus dem Holz und der Schrauben rechtwinklig zur Faserrichtung des Holzes wirkt, wird die Querdruckfestigkeit des Holzes erreicht. Dieser Versagensmechanismus tritt auf, wenn bei kleinen Lasteinleitungsflächen querdruckbeanspruchte Bauteile mit zu vielen sowie im Verhältnis zur Trägerhöhe mit zu kurzen Vollgewindeschrauben verstärkt werden. Dieser Versagensmechanismus ist durch die seitliche Ausbildung von Rissen an der Stelle der Schraubenspitze gekennzeichnet (Bild 4).

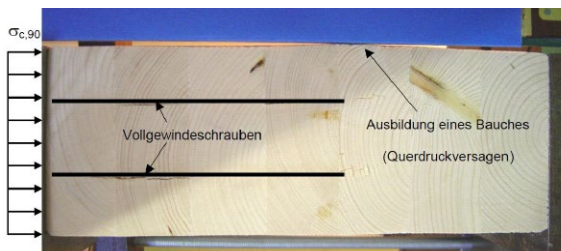


Bild 4. Versagensmechanismus: Querdruckversagen an der Stelle der Schraubenspitze nach [5]

Zur Ermittlung der Tragfähigkeit und der Steifigkeit von querdruckbeanspruchten Bauteilen, die mit Vollgewindeschrauben verstärkt werden, werden nachfolgend mechanische Modelle zur Beschreibung der Versagensmechanismen vorgestellt.

### 3 Mechanische Modelle / Tragfähigkeiten für querdruckbeanspruchte Bauteile

#### 3.1 Tragfähigkeit auf Hineindrücken rechtwinklig zur Faser

Der in 2.2 beschriebene Versagensmechanismus I stellt die Tragfähigkeit eines mit selbstbohrenden Vollgewindeschrauben verstärkten querdruckbeanspruchten Holzbauteils dar. Diese Tragfähigkeit ist von der Tragfähigkeit des Holzes rechtwinklig zur Faser und von der Tragfähigkeit der Vollgewindeschrauben auf Hineindrücken abhängig. Dabei wird vorausgesetzt, dass die Vollgewindeschrauben unter axialer Beanspruchung auf Hineindrücken nicht ausknicken.

Weiterhin entspricht die Tragfähigkeit der Vollgewindeschrauben auf Hineindrücken der Tragfähigkeit auf Herausziehen. Dies wurde an zahlreichen Versuchen an der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine der Universität Karlsruhe festgestellt.

Die Ausziehtragfähigkeit ist wiederum von folgenden Parametern abhängig:

$d$	Gewindedurchmesser der Schraube
$l_{ef}$	Gewindelänge im Holzteil (Verankerungslänge)
$f_{ax,90,d}$	Bemessungswert des Ausziehparameters für $\alpha = 90^\circ$
$F_{ax,90,Rd}$	Bemessungswert der Tragfähigkeit auf Herausziehen bei einem Einschraubwinkel von $\alpha = 90^\circ$

Auf Druck ergibt sich der Bemessungswert der Tragfähigkeit einer Schraube zu:

$$F_{ax,90,Rd} = \min \left\{ f_{ax,90,d} \cdot d \cdot l_{ef} \right. \quad (1)$$

mit

$$R_{ki,d} \quad \text{Bemessungswert der Tragfähigkeit der Schraube auf Ausknicken (siehe Abs. 3.2)}$$

Der Vollständigkeit halber wird nachfolgend auch der Bemessungswert der Tragfähigkeit einer Schraube, die unter einem Winkel von  $90^\circ$  zur Faserrichtung auf Herausziehen (Gl. 2) beansprucht wird, angegeben.

$$F_{ax,90,Rd} = \min \left\{ f_{ax,90,d} \cdot d \cdot l_{ef} \right. \quad (2)$$

mit

$$R_{u,d} \quad \text{Bemessungswert der Zugtragfähigkeit der Schraube (siehe Zulassung der Schraube)}$$

#### 3.2 Grenztragfähigkeit der Schrauben beim Ausknicken im Holz

Beim Versagensmechanismus II nach Abschnitt 2.2 ist die Tragfähigkeit eines mit selbstbohrenden Vollgewindeschrauben verstärkten querdruckbeanspruchten Bauteils abhängig von der Tragfähigkeit des Holzes rechtwinklig zur Faser und von der Grenztragfähigkeit der Vollgewindeschrauben infolge Stabilitätsversagen infolge des Ausknickens. Das Ausknicken einer druckbeanspruchten Schraube erfolgt beim Erreichen der Verzweigungslast.

Bei einer axialen Druckbeanspruchung der Schraube wird die Druckkraft zunächst über den Schraubenkopf in die Vollgewindeschraube und dann über den Verbund zwischen Schraube und Holz kontinuierlich in das Holz eingeleitet. Im Holz wird die Vollgewindeschraube sowohl rechtwinklig zu ihrer Achse als auch in Richtung ihrer Achse abgestützt. Sie ist im Holz elastisch gebettet. Die Verzweigungslast steigt mit der Größe der elastischen Bettung.

Die Verteilung der Normalkraft entlang der Schraubenachse wird durch die vertikale, elastische Abstützung  $c_v$  beeinflusst. Wie Untersuchungen von Bejtka bestätigen, ergibt sich entlang der Schraubenachse ein näherungsweise linearer dreieckförmiger Verlauf der Normalkraftverteilung, wenn das Verhältnis der vertikalen elastischen Stützung  $c_v$  zur Dehnsteifigkeit  $E \cdot A_s$  der Vollgewindeschraube klein ist. Im Gegensatz dazu ergibt sich für große Verhältnismerte  $c_v / E \cdot A_s$  ein nichtlinearer parabelförmiger Verlauf der Normalkraft (Bild 5).

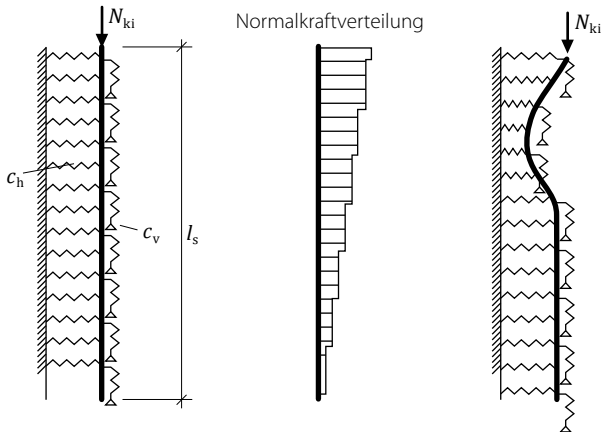


Bild 5. System einer knickgefährdeten schlanken Schraube mit elastischer Bettung nach [5]

Die Werte der vertikalen und horizontalen elastischen Bettung  $c_v$  und  $c_h$  wurden von Bejtka experimentell bestimmt. Mit den so gewonnenen elastischen Bettungswerten wurden die Verzweigungslasten nach der Elastizitätstheorie bestimmt. Nähere Angaben zur Ermittlung der elastischen Bettungswerte sind der Literatur [5] zu entnehmen.

In Bild 6 sind exemplarisch einige von Bejtka ermittelte Knickfiguren in Abhängigkeit der Schlankheit der Vollgewindeschrauben und der Lagerung (drehfrei bzw. drehsteif) dargestellt.

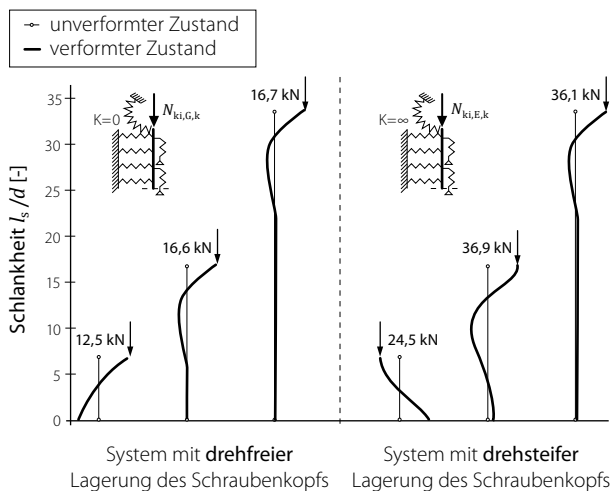


Bild 6. Knickfiguren in Abhängigkeit von der Schlankheit  $l_{ef}/d$  und der Lagerung des Schraubenkopfes nach [5]

Die Knicktragfähigkeiten  $R_{ki,d}$  der im Holz gebetteten Schrauben werden in einigen Zulassungen direkt als Werte angegeben, in anderen Zulassungen als Berechnungsformel.

Die in Tabelle 1 angegebenen Werte der Knicktragfähigkeiten können als Anhaltswerte verwendet werden. Die genauen Werte sind jeweils der Zulassung zu entnehmen. Die Werte der Knicktragfähigkeiten nach Tabelle 1 sind unter der Annahme einer charakteristischen Fließgrenze der Schrauben von  $f_{y,k} = 1000 \text{ N/mm}^2$  und einem Kerndurchmesser von  $d_k = 0.6 \cdot d$  ermittelt.

$d$ [mm]	$f_{ax,90,k}$ <sup>a</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{ax,45,k}$ <sup>a</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	$R_{ki,d}$ <sup>b</sup> [kN]	$R_{ki,d}$ <sup>a,c</sup> [kN]
6	9,8	8,4	8,1	5,5
6,5			9,5	6,5
7			11,0	7,6
8			14,4	10,0
9			18,3	12,8
10			22,6	16,0
11			27,3	19,5
12			32,5	23,4
13			38,2	27,7

Die Festigkeitswerte  $f_{ax,k}$  sind in Abhängigkeit von der KLED und der NKL wie folgt zu modifizieren: ( $\chi \kappa_{mod} / \gamma_M$ )

KLED =	ständig	lang	mittel	kurz	k./sehr k.
NKL = 1 u. 2	0,462	0,538	0,615	0,692	0,769
NKL = 3	0,385	0,423	0,500	0,538	0,615

<sup>a</sup> Für  $\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3$   
<sup>b</sup> Berechnet mit  $\gamma_{M2} = 1,25$   
<sup>c</sup> Berechnet mit  $\gamma_{M1} = 1,1$

Tabelle 1. Ausziehparameter, Zugtragfähigkeit und Knicktragfähigkeiten nach [8]

### 3.3 Querdrucktragfähigkeit des unverstärkten Holzes rechtwinklig zur Faser

Die Druckfestigkeit des Holzes rechtwinklig zur Faser wird anhand von Versuchen bestimmt. Bei überstehenden Holzfasern ergeben sich im Gegensatz zur Lasteinleitung ohne Überstand unter der Lasteinleitungsfläche geringere Eindrückungen ins Holz. Ursache hierfür ist der sogenannte „Einhängeeffekt“, der in Bild 7 prinzipiell dargestellt ist.

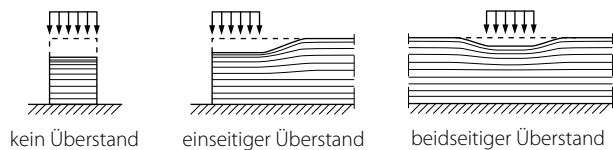


Bild 7. Verformungsverhalten von Holz unter Querdruckbeanspruchung nach [8]

Rechnerisch kann diese Traglaststeigerung näherungsweise über eine vergrößerte Auflagerfläche  $A_{ef}$  entsprechend Bild 8 berücksichtigt werden.

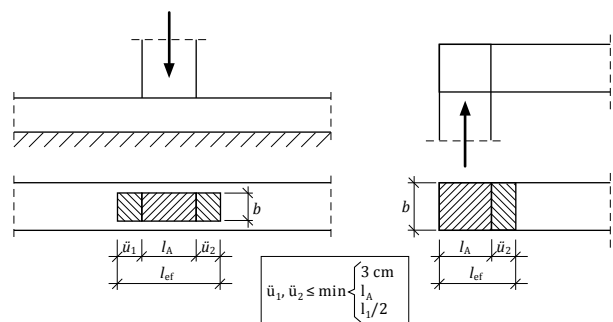


Bild 8. Effektive Auflagerfläche  $A_{ef} = b \cdot l_{ef}$

$$A_{ef} = b \cdot l_{ef} = b \cdot (l_A + \ddot{u}_1 + \ddot{u}_2) \quad (3)$$

mit

- $A_{ef}$  effektiv wirksame Auflagerfläche
- $b$  Breite der Auflagerfläche
- $l_{ef}$  effektiv wirksame Auflagerlänge in Faserrichtung
- $l_A$  Auflagerlänge
- $\ddot{u}_1, \ddot{u}_2$  Überstände in Faserrichtung  $\leq (30 \text{ mm}, l_A; l_1/2)$
- $l_1$  Abstand zwischen zwei benachbarten Druckflächen (siehe Tabelle 2)

Die Querdrucktragfähigkeit  $R_{c,90,d}$  ermittelt sich zu:

$$R_{c,90,d} = k_{c,90} \cdot A_{ef} \cdot f_{c,90,d} \quad (4)$$

mit

$k_{c,90}$  Beiwert zur Berücksichtigung einer Teilflächenpressung nach Tabelle 2

$f_{c,90,d}$  Bemessungswert der Querdruckfestigkeit

	Schwellendruck		Auflagerdruck	
	$l_1 < 2 \cdot h$	$l_1 \geq 2 \cdot h$	$l_1 < 2 \cdot h$	$l_1 \geq 2 \cdot h$
Laubholz	1,0	1,0	1,0	1,0
Nadelvollholz C XX	1,0	1,25	1,0	1,50
Brettschichtholz GL XX	1,0	1,5	1,0	1,75 <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Dieser Wert gilt bei BSH auch für  $l_A > 400$  mm (NA: 6.1.5 (NA5))

Tabelle 2. Beiwert  $k_{c,90}$  für Querdruck nach [8]

Sofern die einwirkende Kraft von der unverstärkten Auflagerung nicht aufgenommen werden kann, kann die Auflagerung mittels rechtwinklig zur Faserrichtung eingedrehter Vollgewindeschrauben verstärkt werden. Die Bilder 9 und 10 zeigen schematisch Beispiele von durch Vollgewindeschrauben verstärkte Kräfteinleitungen mit starrer Lasteinleitung (Stahlplatte).

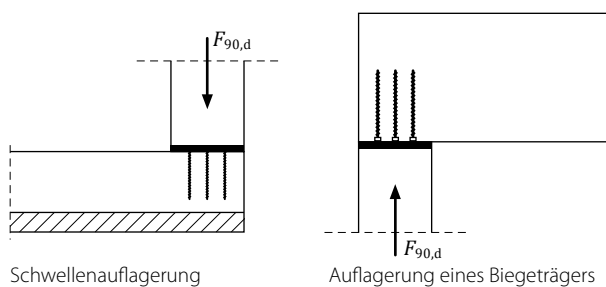


Bild 9. Beispiele von verstärkten Auflagerungen nach [8]

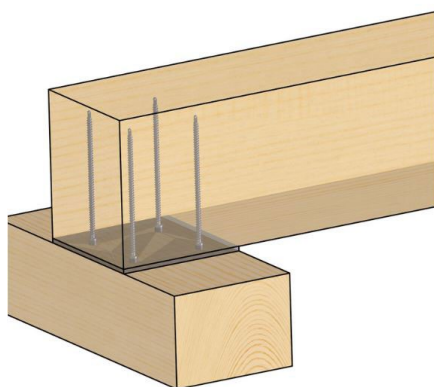


Bild 10. Beispiel einer verstärkten Auflagerung eines Biegeträgers

Die bisherigen Betrachtungen hatten das Einzeltragverhalten des Holzes auf Querdruck sowie die Tragfähigkeit der Vollgewindeschraube zum Inhalt. Nachfolgend wird das gemeinsame Tragverhalten der beteiligten Komponenten des mit Vollgewindeschrauben verstärkten Holzes auf Querdruck untersucht.

### 3.4 Gemeinsame Wirkung des Holzes auf Querdruck und Vollgewindeschrauben auf Hineindrücken

Bei einer durch selbstbohrende Vollgewindeschrauben verstärkten Kräfteinleitung besteht die Aufgabe zunächst darin, die resultierende Kraft bzw. die resultierende vorhandene Spannung im Holzquerschnitt zu bestimmen.

Die Annahme, dass die resultierende Kraftkomponente rechtwinklig zur Faser gleichmäßig über die Vollgewindeschrauben und über die Oberfläche des Holzes eingeleitet wird, würde nur dann zutreffen, wenn entweder das Holz bei Beanspruchung rechtwinklig zur Faser oder die Vollgewindeschraube auf Hineindrücken ein ideal-plastisches Last-Verformungsverhalten aufweisen würden. In diesem „Idealfall“ würde bei der geringsten Verformung des verstärkten Kräfteinleitungsbereiches entweder die Querdruckfestigkeit des Holzes oder die Tragfähigkeit der Vollgewindeschraube auf Hineindrücken erreicht werden. Dann könnte die Tragfähigkeit eines mit Vollgewindeschrauben verstärkten querdruckbeanspruchten Bauteils als Summe der beiden Tragfähigkeiten bestimmt werden.

Betrachtet man jedoch die tatsächliche Last-Verformungscharakteristik der Komponenten Holz bei Querdruckbeanspruchung rechtwinklig zur Faser und der Vollgewindeschrauben auf Hineindrücken, so lässt sich die oben genannte Annahme nicht bestätigen. Bei einer Druckbeanspruchung rechtwinklig zur Faser weist der Werkstoff Holz ein näherungsweise linear-elastisches – ideal-plastisches Last-Verformungsverhalten auf, während eine auf Hineindrücken beanspruchte Vollgewindeschraube ein eher linear-elastisches Last-Verformungsverhalten bis zur Traglast aufweist. Nach dem Erreichen der Traglast auf Hineindrücken ist das Last-Verformungsverhalten durch ein quasi-sprödes Versagen mit deutlichem Lastabfall gekennzeichnet. Bild 11 zeigt qualitativ das Last-Verformungsverhalten der Komponenten Holz und Vollgewindeschraube.

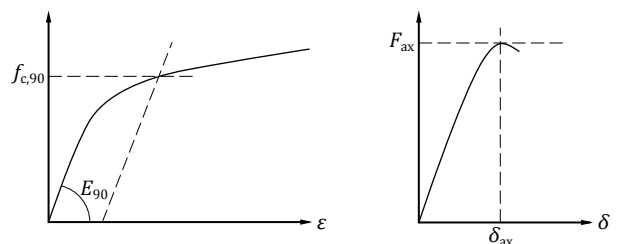


Bild 11. Last-Verformungsverhalten nach [5]  
links: des Holzes bei Querdruckbeanspruchung rechtwinklig zur Faser  
rechts: der Vollgewindeschraube auf Hineindrücken

Über die Profilierung der Vollgewindeschrauben sind die Komponenten Holz und Schraube miteinander verzahnt. Mit Hilfe der Theorie des elastischen Verbundes und unter Annahme eines linear-elastischen Last-Verformungsverhaltens können die Anteile der auf das Holz wirkenden Spannungen sowie der auf die Vollgewindeschraube wirkenden Kraft berechnet werden. Zur weiteren Vertiefung der Berechnungsgrundlagen des elastischen Verbundes wird auf die Literatur [5] verwiesen. In Bild 12 ist das Prinzip des elastischen Verbundes zwischen Holzbauteil und Vollgewindeschraube dargestellt.

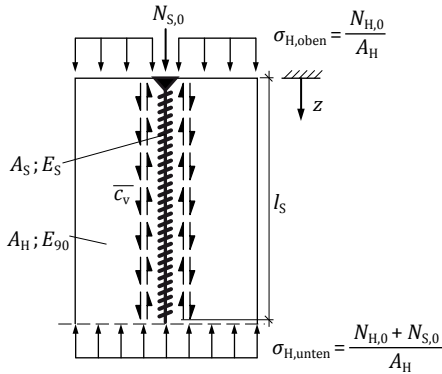


Bild 12. Elastischer Verbund zwischen Holzbauteil und Vollgewindeschraube nach [5]

Neben der lokalen Lastübertragung zwischen Vollgewindeschraube und dem Holzbauteil rechtwinklig zur Faser ist die Lastausbreitung in das Holzbauteil wegen der Größe der querdruckbeanspruchten Querschnittsfläche zur Lastübertragung von großer Bedeutung.

Anhand von Messungen und Versuchsauswertungen [5] können prinzipiell nachfolgende Verläufe angenommen werden:

- Bei direkter Lasteinleitung kann eine lineare Lastausbreitung unter 45° zur Faserrichtung des Holzes angenommen werden. Bild 13 zeigt prinzipiell die Lastausbreitung bei direkter Lasteinleitung.

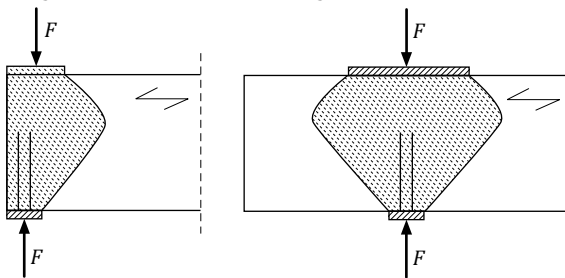


Bild 13. Lastausbreitung bei direkter Lagerung nach [5]

- Bei indirekter Lasteinleitung ist die Lastausbreitung sowohl bei unverstärkten als auch bei verstärkten querdruckbeanspruchten Bauteilen von vielen Parametern abhängig und deshalb sehr komplex. Der prinzipielle nichtlineare Verlauf der Lastausbreitung kann auf der Grundlage von Untersuchungen von Bejtka [5] nach Bild 14 angenommen werden.

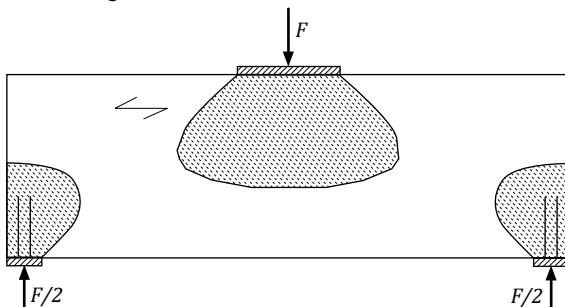


Bild 14. Lastausbreitung bei indirekter Lasteinleitung nach [5]

Mit Hilfe von Berechnungen auf der Grundlage der Finite-Elemente-Methode konnte Bejtka den Verlauf der Größe der Querdruckspannungen sowie deren Lastausbreitung über die Querschnittshöhe bestimmen (Bild 15).

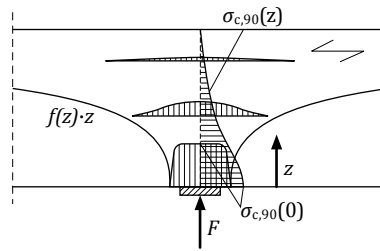


Bild 15. Qualitativer Verlauf der Querdruckspannung sowie der Lastausbreitung bei indirekter Lasteinleitung nach [5]

Bei indirekter Lasteinleitung breitet sich die Last nicht-linear über die Querschnittshöhe aus. Der qualitative Verlauf der Querdruckspannung  $\sigma_{c,90}(z)$  entlang der z-Achse ist Bild 15 zu entnehmen. Die Querdruckspannung  $\sigma_{c,90}(z)$  klingt bei Trägern mit indirekter Lasteinleitung mit steigendem Abstand z von der Stelle der Lasteinleitung relativ schnell ab. Aus dem Verhältnis der Querdruckspannung  $\kappa_{c,90} = \sigma_{c,90}(0) / \sigma_{c,90}(z)$  kann eine wirksame Querdruckfläche  $A_{eff(z)}$  ermittelt werden. Mit dieser wirksamen Querschnittsfläche kann nun der Nachweis für den Versagensmechanismus III nach Abschnitt 2.2 geführt werden.

Für die ingenieurmäßige Anwendung in der Praxis wurden die Erkenntnisse in vereinfachte handhabbare Nachweise überführt. In der Literatur sind diese Nachweise ausführlich in [8] beschrieben. Diese vereinfachten Nachweise werden in enger Anlehnung an [8] im nachfolgenden Abschnitt zusammengestellt.

## 4 Nachweise querdruckverstärkter Auflagerungen und Lasteinleitungen

### 4.1 Schwellenauflagerungen

Unter der Annahme des Holzes auf Querdruck und der Vollgewindeschrauben auf Hineindrücken kann die Tragfähigkeit  $R_{90,d}$  berechnet werden zu:

$$R_{90,d} = R_{c,90,d} + n_s \cdot F_{ax,90,Rd} \tag{5}$$

mit

$R_{90,d}$	Tragfähigkeit der verstärkten Auflagerung
$R_{c,90,d}$	Tragfähigkeit der unverstärkten Auflagerung nach Gl. (4)
$n_s$	Anzahl der Verstärkungsschrauben
$F_{ax,90,Rd}$	Tragfähigkeit einer Schraube auf Hineindrücken nach Gl. (1)

Als Nachweis ist zu führen:

$$F_{c,90,d} \leq R_{c,90,d} + n_s \cdot F_{ax,90,Rd} \tag{6}$$

mit

$F_{c,90,d}$	einwirkende Kraft
$R_{c,90,d}$	Tragfähigkeit der unverstärkten Auflagerung nach Gl. (4)
$n_s$	Anzahl der Verstärkungsschrauben
$F_{ax,90,Rd}$	Tragfähigkeit einer Schraube auf Hineindrücken nach Gl. (1)

Die erforderliche Anzahl der Vollgewindeschrauben ergibt sich nach dem Umstellen zu:

$$\text{erf } n_s = \frac{F_{c,90,d} - R_{c,90,d}}{F_{ax,90,Rd}} \quad (7)$$

Dabei sind nachfolgende Bedingungen einzuhalten, um das Zusammenwirken von Holz und Vollgewindeschrauben zu gewährleisten:

- Die Druckkraft muss gleichmäßig auf alle Schrauben verteilt sein und die sich aus den Schraubenköpfen ergebende Pressung muss vom Auflagermaterial aufgenommen werden können. Diese beiden Forderungen sind nur mit Hilfe einer „starrten“ Auflagerung (Stahlplatte) zu erfüllen.
- Die Schrauben sind so einzudrehen, dass die Oberkante der Schrauben bündig mit der Holzoberfläche ist.

Zusätzlich zum Nachweis nach Gl. (6) ist im Bereich der Schraubenspitzen (d.h. am Übergang verstärkt – unverstärkt) die Querdrucktragfähigkeit des unverstärkten Holzes zu überprüfen. Am Beispiel einer verstärkten Schwelle ist in Bild 16 dargestellt, dass zur Ermittlung der wirksamen Auflagerlänge  $l_{A,ef,45}$  ein Lastausbreitungswinkel von 45° angenommen werden darf. Auf der sicheren Seite wird in den Zulassungen angegeben, dass die Lastausbreitung von den Schrauben ausgehend anzusetzen ist.

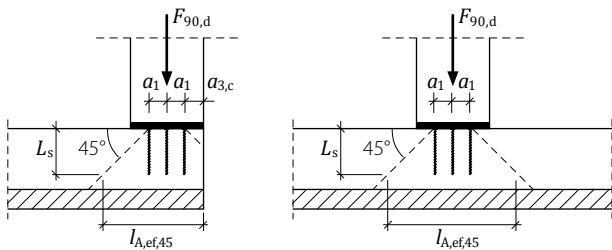


Bild 16. Wirksame Auflagerlängen  $l_{A,ef,45}$  bei Schwellenauflagern nach [8]

Die rechnerische Auflagerlänge in der Ebene der Schraubenspitze kann bestimmt werden zu:

Bei Endauflagern

$$l_{A,ef,45} = L_s + (n_h - 1) \cdot a_1 + \min \left\{ a_{3,c}, L_s \right\} \quad (8)$$

Bei Zwischenauflagerungen

$$l_{A,ef,45} = 2 \cdot L_s + (n_h - 1) \cdot a_1 \quad (9)$$

- mit
- $n_h$  Anzahl der in Faserrichtung der Schwelle hintereinander angeordneten Schraubenreihen
  - $a_1$  Abstand der Schrauben in Faserrichtung der Schwelle
  - $a_{3,c}$  Abstand der Schrauben in Faserrichtung zum Hirnholz der Schwelle
  - $L_s$  Länge der Vollgewindeschraube

Beim Nachweis der Querdruckspannungen darf im Bereich der Schraubenspitzen im Gegensatz zum Nachweis an der unmittelbaren Auflagerung kein Beiwert  $k_{c,90}$  zur Berücksichtigung einer Teilflächenpressung angesetzt werden. Damit ergibt sich die Tragfähigkeit in der Ebene der Schraubenspitzen zu:

$$R_{c,90,d} = b \cdot l_{A,ef,45} \cdot f_{c,90,d} \quad (10)$$

mit

$R_{c,90,d}$	Tragfähigkeit der unverstärkten Auflagerung nach Gl. (4)
$b$	Breite der Auflagerfläche
$l_{A,ef,45}$	wirksame Auflagerlänge in der Ebene der Schraubenspitzen
$f_{c,90,d}$	Bemessungswert der Querdruckfestigkeit

### 4.2 Auflagerungen von Biegeträgern

Die Tragfähigkeit der unverstärkten und der verstärkten Auflagerung darf bei Auflagerungen von Biegeträgern wie bei Schwellenauflagerungen entsprechend den Gleichungen (1), (4) und (6) berechnet werden.

In der Ebene der Schraubenspitzen ist die Querdrucktragfähigkeit entsprechend den Regelungen in den Zulassungen nach Gleichung (10) zu berechnen. Die wirksamen Auflagerlängen bei Auflagerungen von Biegeträgern sind Bild 17 zu entnehmen.

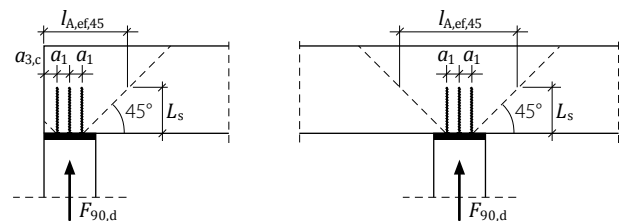


Bild 17. Wirksame Auflagerlängen  $l_{A,ef,45}$  bei Auflagerungen von Biegeträgern entsprechend den Regelungen der Zulassungen nach [8]

Auf der Grundlage der Auswertungen von Bejtka und Blaß [9] mittels Finite-Elemente-Berechnungen ergeben sich die in Bild 18 dargestellten Lastausbreitungen bei Auflagerungen von Biegeträgern.

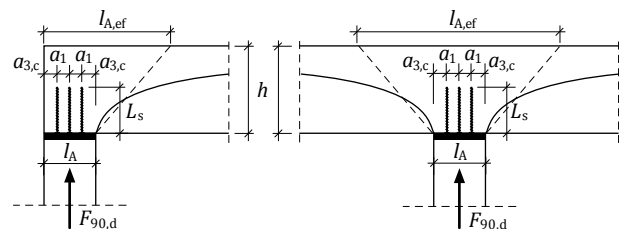


Bild 18. Wirksame Auflagerlängen  $l_{A,ef,45}$  bei Auflagerungen von Biegeträgern entsprechend den Berechnungen [9]

Die rechnerischen Auflagerlängen  $l_{A,ef}$  in der Ebene der Schraubenspitzen können nach [9] wie in den Gleichungen (11) und (12) angegeben, berechnet werden. Im Unterschied zu den Regelungen der Zulassungen kann der Beginn der Lastausbreitung von der Auflagerkante ausgehend angesetzt werden.

**Bei Endauflagern**

$$l_{A,ef} = l_A + 0.25 \cdot L_s \cdot e^{3.3 \cdot \frac{L_s}{h}} \quad (11)$$

**Bei Zwischenauflagerungen**

$$l_{A,ef} = l_A + 0.58 \cdot L_s \cdot e^{3.6 \cdot \frac{L_s}{h}} \quad (12)$$

mit

$l_A$	Länge der Auflagerung
$L_s$	Länge der Vollgewindeschraube
$h$	Trägerhöhe

## 5 Zusammenfassung

Um die gemeinsame Tragwirkung der Komponenten Holz auf Querdruck rechtwinklig zur Faser und Vollgewindeschraube auf Hineindrücken zu erfassen, wurden im ersten Teil des Beitrags das Tragverhalten und die Tragfähigkeiten der einzelnen Komponenten untersucht. Aufbauend auf den Versuchsergebnissen von Bejtka wurden anschließend die aufgetretenen Versagensmechanismen vorgestellt. Anhand von mechanischen Modellen wurde dann das Tragverhalten analysiert. Abschließend wurden vereinfachte Nachweisgleichungen zu unverstärkten und verstärkten Auflagerungen und Lasteinleitungen für die Ingenieurpraxis zusammengestellt.

Dr.-Ing. Joachim Kretz  
mb AEC Software GmbH  
mb-news@mbaec.de

## Literatur

- [1] DIN EN 1995-1-1:2010-12, Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau.
- [2] DIN EN 1995-1-1/NA:2013-08, Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau
- [3] DIN EN 1995-1-1/A2:2014-07: Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau
- [4] DIN EN 14592:20112-07, Holzbauwerke – Stifförmige Verbindungsmittel - Anforderungen
- [5] Bejtka, I.: Verstärkung von Bauteilen aus Holz mit Vollgewindeschrauben. Band 2 der Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau. Dissertation. Universität Karlsruhe 2005
- [6] Colling, F.: Erhöhung der Querdruckfestigkeit von Holz mittels selbstschneidender Holzschrauben (G-99/19). Forschungsbericht der Fachhochschule Augsburg 2000.
- [7] Blaß, H.-J.; Bejtka, I.: Selbstbohrende Holzschrauben und ihre Anwendungsmöglichkeiten. In Holzbau Kalender 2004, 3. Jahrgang, Bruderverlag Karlsruhe. 2003.
- [8] Colling, F.: Holzbau – Grundlagen und Bemessung nach EC 5. 3. Auflage, Springer Vieweg. 2012
- [9] Bejtka, I.; Blaß, H.-J.: Self-tapping screws as reinforcements in Beam supports. CIB-W18/39-7-2, Florence. 2006.
- [10] Trautz, M.; Koj, C.: Mit Schrauben bewehrtes Holz. In Ingenieurholzbau Karlsruher Tage 2008.