

Moment-Normalkraft-Querkraft Interaktion in stiftförmigen Verbindungsmitteln von Stahlblech-Holz-Verbindungen

Hans Joachim Blaß

Zusammenfassung

In Stahlblech-Holz-Verbindungen mit Holzbauteilen hoher Rohdichte, z.B. mit Laubhölzern, kann bei Beanspruchung auf Abscheren ein vollständiges Versagen der Verbindungsmittel auftreten. Dieses Versagen wird bisher in den Bemessungsregeln des Eurocode 5 nicht berücksichtigt; dort werden nur die Biegebeanspruchung der Stifte und die Zugbeanspruchung aus dem Seileffekt mit ihren jeweiligen Widerstandswerten nachgewiesen. In diesem Beitrag wird ein analytisches Modell hergeleitet, in dem die gleichzeitige Beanspruchung der stiftförmigen Verbindungsmittel durch Biegemomente, Zugnormalkräfte und Querkräfte und ihr Einfluss auf die Tragfähigkeit der Verbindung berücksichtigt werden. Es zeigt sich, dass die Moment-Normalkraft-Querkraft Interaktion (MNV-Interaktion) insbesondere für größere Verhältnismomente aus Lochleibungsfestigkeit des Holzes und Zugfestigkeit der Verbindungsmittel zu einer Überschätzung der Tragfähigkeit von 5% bis 40% von Verbindungen führen kann, die nach Eurocode 5 bemessen wurden.

1 Einleitung

In vielen Bemessungsnormen bildet das Fließgelenkmodell von Johansen [1] die Grundlage für die Bemessung auf Abscheren beanspruchter Holzverbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln. Johansen betrachtete ausschließlich Holz-Holz-Verbindungen, in denen das Erreichen der Biegetragfähigkeit der Verbindungsmittel deren einzige Versagensform darstellt. Der Seileffekt, der Zugkräfte in den Stiften verursachen kann, wurde von ihm vernachlässigt. Im Gegensatz zu Holz-Holz-Verbindungen können in Scher-Lochleibungs-Verbindungen des Stahlbaus Bolzen auch durch Abscheren der Bolzen selbst versagen (siehe Abb. 1).

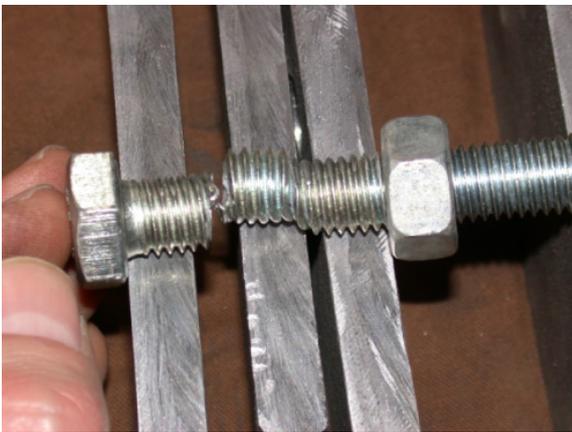


Abb. 1 Scherversagen eines Bolzens in einer Scher-Lochleibungs-Verbindung

Das Erreichen der Biegetragfähigkeit des Stiftes stellt auch im erweiterten Johansen-Modell für Stahlblech-Holz-Verbindungen den Versagensmechanismus des Stiftes selbst dar. Falls der traglasterhöhende Seileffekt berücksichtigt wird, geht auch die Zugtragfähigkeit des Verbindungsmittels in die Bemessung ein. Eine Moment-Normalkraft-Interaktion ist allerdings nicht Teil der Bemessung, beide Tragwiderstände des Verbindungsmittels, das Fließmoment und die Zugtragfähigkeit dürfen unabhängig voneinander ausgenutzt werden. Versuche mit Stahlblech-Holz-Verbindungen ([2], [3] und [4]) insbesondere mit Holzbauteilen höherer Rohdichte zeigen jedoch ein kombiniertes Biege- und Scherversagen der Stifte bis zum vollständigen Querschnittsbruch, siehe Abb. 2.



Abb. 2 Kombiniertes Biege- und Scherversagen eines Stabdübels in einer Verbindung mit innen liegendem Stahlblech und Seitenhölzern aus Buchenbrettschichtholz

Grundsätzlich sollte jede Bemessung einer Verbindung oder eines Bauteils sämtliche auftretenden Versagensmechanismen berücksichtigen, um die Tragfähigkeit wirklichkeitsnah abschätzen zu können. Bisher wird das Verbindungsmittelversagen durch eine kombinierte Einwirkung von Biegemoment, Zugkraft und Querkraft in der Bemessung von Holzverbindungen jedoch außer Acht gelassen. Dieser Beitrag zeigt auf, in welchen Fällen zusätzlich zum Biegemoment eine Zugkraft und eine Querkraft in der Bemessung des Verbindungsmittels maßgeblich werden und damit zu einer geringeren Tragfähigkeit als nach den Bemessungsregeln des Eurocode 5 führen können.

2 Analytisches Modell

Abb. 3 zeigt als Beispiel den Versagensmechanismus nach Eurocode 5 mit zwei Fließgelenken pro Scherfuge für einschnittig beanspruchte Stifte in Stahlblech-Holz-Verbindungen mit außen liegendem dickem Stahlblech. Im Gegensatz zu Holz-Holz-Verbindungen, in denen an der Stelle des Fließmoments die Querkraft im Stift immer gleich Null ist, erreicht die Querkraft in der Scherfuge zwischen Stahlblech und Holz einen Größtwert, siehe Punkt A in Abb. 3. An der Stelle des Fließgelenks im Holzbauteil – Punkt B in Abb. 3 – gilt dasselbe wie in Holz-Holz-Verbindungen: die Querkraft im Stift ist gleich Null. Da eine Verdrehung des Verbindungsmittels zwischen den Punkten A und B eine Zugkraft verursachen kann, könnte das Fließmoment im Punkt B durch diese gleichzeitig wirkende Zugkraft verringert werden, während das Fließmoment im Punkt A zusätzlich durch die Querkraft reduziert wird (siehe Abb. 4).

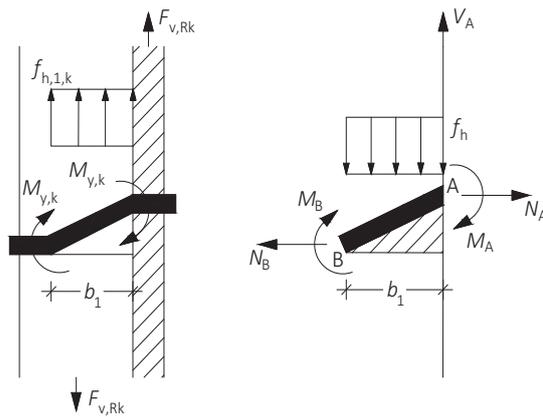


Abb. 3 Zwei Fließgelenke pro Scherfuge in einer Stahlblech-Holz-Verbindung mit außen liegendem dickem Stahlblech

Die Querkraft V_A in Abb. 3 entspricht der Tragfähigkeit nach Johansen und damit dem ersten Teil der Bemessungsgleichung (8.10e) nach Eurocode 5. Der zusätzliche Anteil aus dem Seileffekt wird nicht über die Querkraft des Stiftes, sondern über Reibung zwischen Stahlblech und Holz übertragen. In Anlehnung an das „lower bound theorem“ für die Plastizitätsbemessung im Stahlbau wird die gleichzeitige Wirkung des Biegemoments, der Zugkraft und der Querkraft im Stift durch eine willkürliche Aufteilung des Kreisquerschnitts in drei Anteile A_M , A_N und A_V berücksichtigt, die jeweils die Stiftschnittgrößen M , N und V übertragen und dabei die Gleichgewichts- und Fließbedingungen erfüllen (siehe Abb. 4 rechts oben). Vereinfacht wird für den Stift ein linear elastisch-plastisches Spannungs-Dehnungs-Diagramm ohne Verfestigung angenommen.

Die Querkraft im Punkt B in Abb. 3 ist gleich Null und die Zugkraft N_B ist kleiner als N_A . Aus diesem Grund ist die Biegetragfähigkeit M_B größer als M_A . Die Tragfähigkeit der Verbindung beträgt mit dem Reibbeiwert μ zwischen Stahlblech und Holz:

$$F_{v,R} = \sqrt{2 \cdot (M_{y,A} + M_{y,B}) \cdot f_h \cdot d + \mu \cdot N_A} = V_A + \mu \cdot N_A \quad (1)$$

Da jede die Gleichgewichtsbedingungen erfüllende Unterteilung des Kreisquerschnitts zu einem Wert unterhalb der wirklichen Tragfähigkeit führt, wird diejenige Aufteilung in A_M , A_N und A_V ermittelt, die zum rechnerischen Größtwert der Tragfähigkeit führt. Diese wird als Tragfähigkeit pro Stift und

Scherfuge betrachtet. Dazu werden die Flächenanteile A_M zwischen Null (keine Momententragfähigkeit des Stiftes) und zwei Halbkreisen (volle Momententragfähigkeit) variiert.

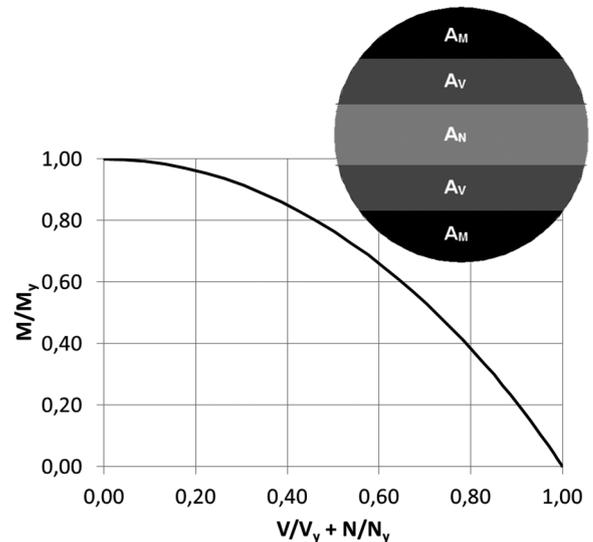


Abb. 4 MNV-Interaktion für Kreisquerschnitte mit linear-elastisch-plastischem Spannungs-Dehnungs-Diagramm und Stiftquerschnitt mit Querschnittsbereichen für M , N und V

Die plastische Biegetragfähigkeit beträgt abhängig von A_M :

$$M_{y,A} = 2 \cdot A_M \cdot x_s \cdot f_y \quad (2)$$

mit

$M_{y,A}$ Fließmoment der beiden Teilflächen A_M

A_M Teilfläche zur Übertragung des Biegemoments in Abb. 4 oben rechts

x_s Abstand des Schwerpunkts der Teilfläche A_M vom Kreismittelpunkt

M_y Fließgrenze des Stiftes

Wird der Einfluss der Zugkraft N_B auf die plastische Biegetragfähigkeit im Punkt B vernachlässigt, beträgt das Fließmoment des Stiftes im Punkt B:

$$M_{y,B} = f_y \cdot \frac{d^3}{6} \quad (3)$$

Der nach dem Modell von Johansen ermittelte Anteil der Tragfähigkeit V_A folgt dann für beliebige Werte von $M_{y,A}$:

$$V_A = \sqrt{2 \cdot (M_{y,A} + M_{y,B}) \cdot f_h \cdot d} \quad (4)$$

Die Tragfähigkeit V_A nach Gleichung (4) entspricht der von $M_{y,A}$ abhängigen Querkraft im Stift im Punkt A. Mit der plastischen Scherfestigkeit des Stahls trägt die erforderliche Teilquerschnittsfläche A_V zur Übertragung der Scherkraft:

$$A_{V,req} = \frac{V_A \cdot \sqrt{3}}{2 \cdot f_y} \quad (5)$$

Der verbleibende Teilquerschnitt A_N steht zur Übertragung der Zugkraft N_A zur Verfügung:

$$A_N = \frac{\pi \cdot d^2}{4} - 2 \cdot (A_M + A_V) \quad (6)$$

Die Zugtragfähigkeit des Stiftes ist der kleinere Wert aus Ausziehtragfähigkeit und plastischer Zugtragfähigkeit des Teilquerschnitts A_N :

$$F_{ax,R} = \min\{f_{ax} \cdot d \cdot \ell_{ef}; A_N \cdot f_y\} \quad (7)$$

mit

f_{ax} Ausziehparameter

d Stiftdurchmesser

ℓ_{ef} Gewindelänge oder profilierte Länge

A_N Teilfläche zur Übertragung der Zugkraft in Abb. 4 oben rechts

Da die MNV-Interaktion nicht nur den Anteil der Tragfähigkeit nach dem Modell von Johansen, sondern auch die Zugtragfähigkeit des Stiftes reduziert, kann auch der Beitrag des Seileffekts verringert sein. Die Interaktionsbeziehung nach Abb. 4 lässt sich sehr gut durch folgende Näherung darstellen:

$$\frac{M}{M_y} + \left(\frac{N}{f_{tens}} + \frac{V}{f_{shear}} \right)^2 = 1 \quad (8)$$

Gleichung (8) muss an jeder Stelle entlang der Stiftachse erfüllt sein. Daher können die Bemessungsgleichungen des Eurocode 5 einschließlich des Seileffekts solange verwendet werden, wie die Stifteigenschaften $M_{y,k}$, $f_{tens,k}$ und $f_{shear,k}$ Gleichung (8) erfüllen. Erfüllen die einzelnen Höchstwerte des Stiftes für $M_{y,k}$, $f_{tens,k}$ und $f_{shear,k}$ nicht die Bedingung der Gleichung (8), müssen sie entsprechend verringert werden. Diese Verringerung darf für die jeweilige Eigenschaft unterschiedlich groß sein und so gewählt werden, dass ein Größtwert der Tragfähigkeit $F_{v,R}$ resultiert.

3 Parameterstudie

Um den Einfluss der MNV-Interaktion auf die Tragfähigkeit von Verbindungen mit auf Abscheren beanspruchten Stiften abzuschätzen, werden folgende Parameter variiert:

- Art des Stiftes: Nagel, Schraube, Stabdübel, Bolzen;
- Stahlgüte für Stabdübel und Bolzen;
- Stiftdurchmesser;
- Eindringtiefe des Stiftes im Holz;
- Holzrohddichte;
- Versagensmechanismus nach Johansen.

Die nominelle Streckgrenze und Zugfestigkeit der Stabdübel und Bolzen sind aus der Leistungserklärung des Herstellers oder direkt aus Zugversuchen bekannt. Die Leistungserklärungen für Nägel oder Schrauben enthalten dagegen anstelle der nominellen Streckgrenze f_y [N/mm²] und Zugfestigkeit f_u [N/mm²] die Zugtragfähigkeit f_{tens} [N] und das Fließmoment M_y [Nmm]. Um diese Werte im analytischen Modell verwenden zu können, wird eine wirksame Streckgrenze f_y aus den Tragfähigkeiten f_{tens} [N] und M_y [Nmm] berechnet. Dazu wird ein Kreisquerschnitt mit dem Nenndurchmesser angenommen.

Abb. 5 zeigt beispielhaft den Einfluss der Festigkeitsklasse des Holzes und damit der Rohddichte auf die charakteristische Tragfähigkeit von Verbindungen mit einschnittig beanspruchten Rillennägeln nach ETA-13/0523 in Stahlblech-Holz-Verbindungen. Der angenommene Versagensmechanismus ist

durch zwei Fließgelenke pro Scherfuge gekennzeichnet, die charakteristischen Werte der Tragfähigkeit wurden einmal mit dem vorgestellten MNV-Modell (schwarze Rauten in Abb. 5) und zusätzlich mit dem erweiterten Johansen-Modell (Kreise in Abb. 5) berechnet.

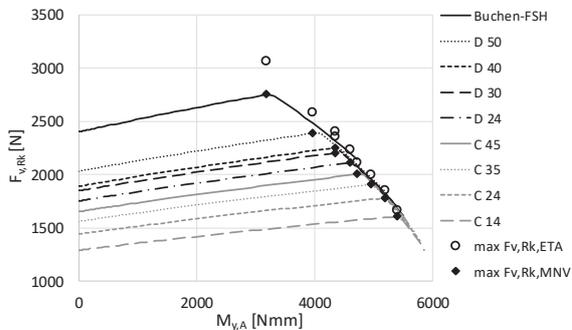


Abb. 5 Einfluss der Holzrohddichte auf die Tragfähigkeit einschnittig beanspruchter Rillennägel ($d = 4 \text{ mm}$, $\ell_{ef} = 30 \text{ mm}$, dickes Stahlblech) in Stahlblech-Holz-Verbindungen [5]

Sämtliche Kurven in Abb. 5 zeigen einen ähnlichen Verlauf: Für $M_{y,A} = 0$ entsprechen die charakteristischen Werte der Tragfähigkeit denjenigen einer Stahlblech-Holz-Verbindung mit dünnem Blech und einem Fließgelenk pro Scherfuge. Wird $M_{y,A}$ größer, steigen auch die Tragfähigkeiten $F_{v,Rk}$ bis zu einem Größtwert. Vor dem Erreichen des Größtwertes wird der kreisförmige Querschnitt des Nagels durch ein Moment $M_{y,A}$, eine Querkraft V_A und eine Zugkraft N_A beansprucht, ohne dass Fließen im gesamten Kreisquerschnitt auftritt.

Mit dem Erreichen des Größtwertes plastiziert der Querschnitt vollständig (siehe Abb. 4 rechts oben). Eine weitere Erhöhung von $M_{y,A}$ führt dann zu einer größeren Querkraft V_A (siehe Gleichung (4)) und die für N_A zur Verfügung stehende Querschnittsfläche nimmt ab. Diese Abnahme hat dann eine Verringerung des Seileffekts mit der dadurch bedingten Verringerung der berechneten Tragfähigkeit $F_{v,Rk}$ zur Folge. Da jede beliebige Kombination von A_M , A_V und A_N zu einer Untergrenze der plastischen Tragfähigkeit führt, wird das Maximum jeder Kurve in Abb. 5 als Tragfähigkeit $F_{v,Rk}$ pro Nagel angenommen (schwarze Rauten). Die Kreise in Abb. 5 zeigen zum Vergleich die charakteristischen Werte der Tragfähigkeit nach ETA-13/0523 ohne Begrenzung des

Seileffekts und ohne Berücksichtigung der MNV-Interaktion. Für das gezeigte Beispiel der Rillennägel wird die Tragfähigkeit nach ETA-13/0523 um 3% für Bauteile des Festigkeitsklasse C14 und um 11% für Bauteile aus Buchenurnierschichtholz überschätzt.

Die berechneten Tragfähigkeiten in Abb. 5 gelten für den Versagensmechanismus mit zwei Fließgelenken pro Scherfuge. Da der zutreffende Versagensmechanismus a priori nicht bekannt ist, sind sämtliche Versagensmechanismen zu überprüfen. Abb. 6 zeigt das Ergebnis: lediglich für geringe charakteristische Rohdichten unterhalb 320 kg/m^3 wird der Versagensmechanismus mit einem Fließgelenk pro Scherfuge maßgebend. Die gestrichelte Linie in Abb. 6 repräsentiert den Verlauf der Tragfähigkeit mit Berücksichtigung der MNV-Interaktion.

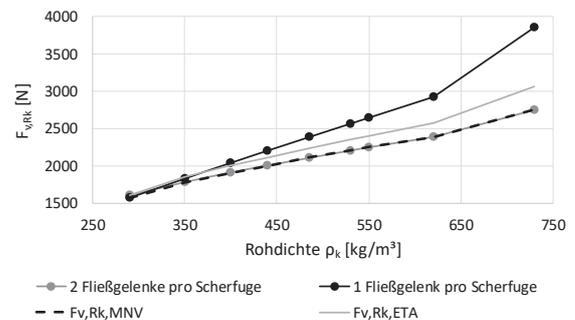


Abb. 6 Einfluss der Holzrohddichte auf die Tragfähigkeit einschnittig beanspruchter Rillennägel ($d = 4 \text{ mm}$, $\ell_{ef} = 30 \text{ mm}$, dickes Stahlblech) in Stahlblech-Holz-Verbindungen für unterschiedliche Versagensmechanismen [5]

Der Verhältniswert zwischen Tragfähigkeit nach ETA-13/0523 und nach dem MNV-Modell steigt mit größerer Nagellänge und höherer Holzrohddichte. Für Rillennägel mit einem Durchmesser von 4 mm beträgt die Überschätzung der Tragfähigkeit bis zu 20%, für den Durchmesser 6 mm bis zu 27% (siehe Tab. 1). Tab. 1 zeigt beispielhaft die Verhältniswerte der Tragfähigkeit nach Eurocode 5 ohne Begrenzung des Seileffekts und der Tragfähigkeit des vorgestellten Modells unter Berücksichtigung der MNV-Interaktion im Stift.

Tab. 1 Ausgewählte Verhältniswerte der charakteristischen Tragfähigkeiten von Stahlblech-Holz-Verbindungen nach Eurocode 5 und den entsprechenden Werten unter Berücksichtigung der MNV-Interaktion

Verbindungsmittel, Durchmesser und Eindringtiefe/ Holzdicke	Charakteristische Rohdichte [kg/m ³]		
	350	440	730
Rillennagel 4x80 mm	107 %	108 %	120 %
Rillennagel 6x80 mm	108 %	110 %	127 %
VG Schraube 5x70 mm	107 %	110 %	125 %
VG Schraube 8x130 mm	110 %	114 %	142 %
VG Schraube 10x180 mm	108 %	112 %	143 %
VG Schraube 12x200 mm	108 %	111 %	138 %
Stabdübel S355 10 mm, t = 90 mm	104 %	105 %	108 %
Stabdübel S355 12 mm, t = 90 mm	104 %	105 %	108 %
Stabdübel S355 16 mm, t = 90 mm	103 %	103 %	108 %
Bolzen 5.8 12 mm, t = 90 mm	108 %	110 %	131 %
Bolzen 5.8 16 mm, t = 90 mm	106 %	107 %	132 %
Bolzen 5.8 20 mm, t = 90 mm	106 %	107 %	123 %

Die folgenden Parameter haben einen signifikanten Einfluss auf die Tragfähigkeit der Verbindung unter Berücksichtigung der MNV-Interaktion im Stift:

- Art des Stiftes: Verbindungsmittel mit ausgeprägtem Seileffekt wie Rillennägel, Schrauben oder Bolzen zeigen einen größeren Einfluss der MNV-Interaktion als Stabdübel ohne Seileffekt;
- Stahlgüte: Der Einfluss der MNV-Interaktion steigt mit abnehmender Stahlgüte;
- Eindringtiefe: Der Einfluss der MNV-Interaktion steigt mit zunehmender Länge der Nägel oder Schrauben;
- Holzrohichte: Der Einfluss der MNV-Interaktion steigt mit zunehmender charakteristischer Rohichte.

4 Versuchsergebnisse

4.1 Versuche mit Verbindungsmitteln

Das Fließmoment M_y und die Zugtragfähigkeit f_{tens} sind die maßgebenden Stifteigenschaften im Bemessungsmodell des Eurocode 5 für Verbindungen mit auf Abscheren beanspruchten Verbindungsmitteln. Wird die MNV-Interaktion berücksichtigt, ist zusätzlich die Schertragfähigkeit des Stiftes erforderlich. Für Bolzen und Stabdübel kann diese aus EN 1993-1-8 entnommen werden, für Nägel oder Schrauben ist die Schertragfähigkeit bisher nicht bekannt.

Zur Bestimmung der Schertragfähigkeit f_{shear} wurde eine Prüfanordnung mit zwei Stahlplatten verwendet, bei der Zugkräfte und Biegemomente im Stift soweit möglich vermieden wurden (siehe Abb. 7).

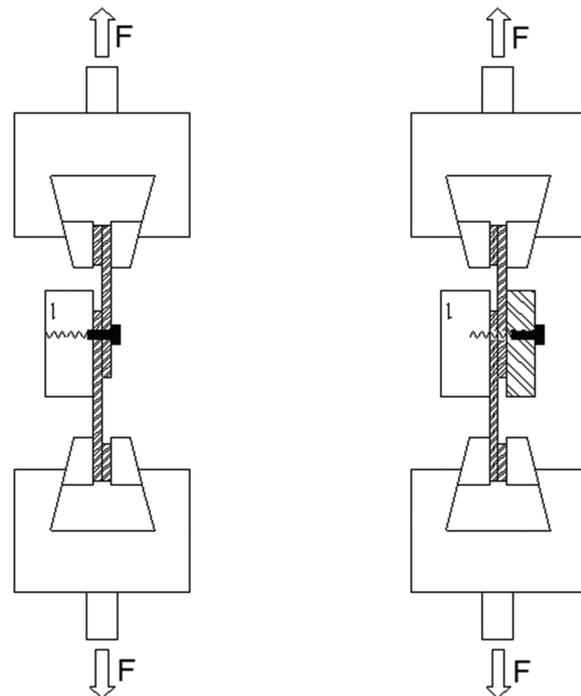


Abb. 7 Versuchsanordnung zur Bestimmung der Schertragfähigkeit von Schrauben im glatten Schaft (links) und im Gewinde (rechts) [5]

Für Teilgewindeschrauben wurde die Schertragfähigkeit sowohl im glatten Schaft als auch im Gewindebereich bestimmt. Ein Holzblock auf der Seite der Schraubenspitze und ein Stahlteil auf der Kopfseite

erlauben das einfache Positionieren des zu prüfenden Querschnitts in der Scherfuge und verhindern das Verdrehen der Verbindungsmittel.

Tab. 2 und 3 zeigen die ermittelten Schertragfähigkeiten für unterschiedliche Verbindungsmittel zusammen mit dem Fließmoment M_y und der Zugtragfähigkeit f_{tens} . 5%-Quantile (Tab. 3) wurden nach EN 14358 bestimmt. Pro Versuchsreihe wurden meist 10 Verbindungsmittel geprüft.

Tab. 2 Mittelwerte des Fließmoments, der Zugtragfähigkeit und der Schertragfähigkeit von Rillennägeln und Schrauben

Verbindungsmittel und Durchmesser	M_y Nm	f_{tens} kN	f_{shear} kN	f_{shear}/f_{tens}
Nagel 4 mm, Profil	7,68	9,09	5,88	0,65
Schraube 5 mm, Gewinde	9,48	12,1	7,15	0,59
Schraube 8 mm, Gewinde	32,4	24,8	16,7	0,67
Schraube 8 mm, Schaft	37,6	27,6	19,8	0,72
Schraube 10 mm, Gewinde	56,8	34,7	27,2	0,78
Schraube 10 mm, Schaft	81,1	47,8	33,7	0,71
Schraube 12 mm, Gewinde	88,5	47,6	31,9	0,67
Schraube 12 mm, Schaft	127	63,6	42,2	0,66

Tab. 3 Charakteristische Werte des Fließmoments, der Zugtragfähigkeit und der Schertragfähigkeit von Rillennägeln und Schrauben

Verbindungsmittel und Durchmesser	M_y Nm	f_{tens} kN	f_{shear} kN	f_{shear}/f_{tens}
Nagel 4 mm, Profil	6,79	8,18	5,30	0,65
Schraube 5 mm, Gewinde	8,55	10,9	6,22	0,57
Schraube 8 mm, Gewinde	29,2	22,4	15,1	0,67
Schraube 8 mm, Schaft	33,8	24,1	17,9	0,74
Schraube 10 mm, Gewinde	51,2	31,2	24,4	0,78
Schraube 10 mm, Schaft	73,0	43,1	30,4	0,71
Schraube 12 mm, Gewinde	79,6	42,8	26,9	0,63
Schraube 12 mm, Schaft	114	57,2	38,0	0,66

Das Verhältnis zwischen Scher- und Zugtragfähigkeit liegt zwischen 0,59 und 0,78 auf dem Niveau der Mittelwerte und zwischen 0,57 und 0,78 auf dem Niveau der charakteristischen Werte. Das entsprechende Verhältnis für den Schaft von Bolzen nach Tabelle 3.4 der EN 1993-1-8 beträgt 0,6 und für den

Gewindebereich entweder 0,6 (Stahlgüten 4.6, 5.6 oder 8.8) oder 0,5 (Stahlgüten 4.8, 5.8, 6.8 oder 10.9) und ist damit den ermittelten Werten für Schrauben und Rillennägel sehr ähnlich.

4.2 Versuche mit Verbindungen

10 Stahlblech-Holz-Verbindungen mit auf Abscheren beanspruchten Rillennägeln 4,0x35 wurden in Buchenfurnierschichtholz bis zum Versagen geprüft. Außer den Eigenschaften der Verbindungen wurden unabhängig davon die Nageleigenschaften M_y , f_{tens} und f_{shear} (siehe Tab. 2 und 3) der Ausziehparameter f_{ax} und die Lochleibungsfestigkeit des Furnierschichtholzes f_h bestimmt. Die Verbindungen können durch folgende Parameter charakterisiert werden:

- Rillennägel 4,0x35 ohne Vorbohren in Buchenfurnierschichtholz nach ETA-14/0354
 $F_{ax,Rmean} = 3,99$ kN – Nägel in der Deckfläche
 $F_{ax,Rmean} = 3,84$ kN – Nägel in der Schmalfläche
 $f_{h,mean} = 112$ N/mm² – Nägel in der Deckfläche
 $f_{h,mean} = 98,6$ N/mm² – Nägel in der Schmalfläche;
- Stahlblechdicke: 2 mm;
- Winkel zwischen Kraft und Faserrichtung: 0°;
- Winkel zwischen Nagelachse und Faserrichtung: 90°.

Verbindungen mit 2 mm Stahlblechen und 4 mm Rillennägeln in Nadelholz zeigen einen Versagensmechanismus mit zwei Fließgelenken pro Scherfuge, da der Nagel mit seinem kegelförmigen Schaft unterhalb des Kopfes in das Stahlblech eingespannt wird [6]. Je 5 Prüfkörper mit 8 Nägeln in der Deckfläche und in der Schmalfläche wurden geprüft. Die mittlere Höchstlast pro Nagel betrug $F_{max,test} = 4,70$ kN für die Prüfkörper mit den Nägeln in der Deckfläche und $F_{max,test} = 4,63$ kN für die Prüfkörper mit den Nägeln in der Schmalfläche. Das Versagen der Verbindungen war durch Nagelversagen in der Scherfläche zwischen Stahlblech und Furnierschichtholz gekennzeichnet (siehe Abb. 8). Die zugehörigen berechneten Tragfähigkeiten unter Berücksichtigung der MNV-Interaktion und eines Reibungsbeiwerts von $\mu = 0,5$ in der Scherfuge betragen $F_{max,cal} = 4,81$ kN für die Prüfkörper mit den Nägeln in der Deckfläche und $F_{max,cal} = 4,64$ kN für die Prüfkörper mit den Nägeln in der Schmalfläche. Die Rechenwerte

der Tragfähigkeit nach dem Modell des Eurocode 5 und denselben Eingangsparametern betragen $F_{\max,cal} = 5,70$ kN für die Prüfkörper mit den Nägeln in der Deckfläche und $F_{\max,cal} = 5,40$ kN für die Prüfkörper mit den Nägeln in der Schmalfläche. Die Berücksichtigung der MNV-Interaktion in Stahlblech-Holz-Verbindungen mit Rillennägeln in Furnierschichtholz aus Buche führt offensichtlich zu realistischeren Werten der Tragfähigkeit.



Abb. 8 Nagelscherversagen in Stahlblech-Holz-Verbindungen mit Rillennägeln in Furnierschichtholz aus Buche (oben) und abgescherte Nagelköpfe (unten)

Ein weiterer Vergleich basiert auf Versuchsergebnissen von Sandhaas [7]. Sandhaas prüfte Stahlblech-Holz-Verbindungen mit innen liegenden Stahlblechen und Seitenhölzern aus Brettschichtholz aus Buche (siehe Abb. 2) und variierte die Anzahl der Stabdübel parallel zur Kraft- und Faserrichtung. Für den Vergleich werden die Versuchsergebnisse mit einem Stabdübel und zwei Fließgelenken pro Scherfuge herangezogen. Es werden wiederum die Versuchsergebnisse von je 5 Prüfkörpern in zwei Prüfereihen mit den Rechenergebnissen des Modells unter Berücksichtigung der MNV-Interaktion verglichen.

Die Verbindungen können durch folgende Parameter charakterisiert werden:

- Stabdübel $d = 12$ mm und $d = 24$ mm in Buchenbrettschichtholz
 $M_y = 177$ Nm – 12 mm $M_y = 177$ Nm – 24 mm
 $f_{tens} = 72,2$ kN – 12 mm $f_{tens} = 245$ kN – 24 mm
 $f_h = 45,8$ MPa – 12 mm $f_h = 49,9$ MPa – 24 mm
- Seitenholzdicke: $t_1 = 6 \cdot d$;
- Winkel zwischen Kraft und Faserrichtung: 0° .

Die Schertragfähigkeit der Stabdübel wurde zu 60 % ihrer Zugtragfähigkeit angenommen.

Die mittlere Höchstlast betrug $F_{\max,test} = 59,4$ kN für den Durchmesser 12 mm und $F_{\max,test} = 208$ kN für den Durchmesser 24 mm. Ohne Berücksichtigung des Seileffekts wurden die Tragfähigkeiten nach dem Modell mit MNV-Interaktion zu $F_{\max,cal} = 37,4$ kN für den Durchmesser 12 mm und $F_{\max,cal} = 157$ kN für den Durchmesser 24 mm berechnet. Die entsprechenden Tragfähigkeiten nach dem Modell des Eurocode 5 und mit denselben Eingangsparametern betragen $F_{\max,cal} = 39,5$ kN für den Durchmesser 12 mm und $F_{\max,cal} = 169$ kN für den Durchmesser 24 mm. Damit wird die Tragfähigkeit von Stahlblech-Holz-Stabdübelverbindungen mit zwei Fließgelenken pro Scherfuge in Buchenbrettschichtholz sowohl mit dem MNV-Modell als auch mit dem Modell nach Eurocode 5 unterschätzt. Dies wird durch die Ergebnisse einer Studie zur Tragfähigkeit von Stabdübelverbindungen [8] bestätigt, in der für Versagensmechanismen mit zwei Fließgelenken pro Scherfuge in den Versuchen ebenfalls signifikant höhere Tragfähigkeiten als nach dem Modell des Eurocode 5 festgestellt wurden.

Obwohl für Stabdübel eine Ausziehtragfähigkeit nicht in Rechnung gestellt werden darf, könnte das Vorhandensein eines Seileffekts eine Erklärung für die hohen Tragfähigkeiten im Versuch gegenüber den berechneten Tragfähigkeiten sein. Wird ein Reibbeiwert $\mu = 0,5$ zwischen Stahlblech und Buchenholz unterstellt, würde eine Zugkraft im Stabdübel von 26 kN für den Durchmesser 12 mm und von 60 kN für den Durchmesser 24 mm zu einer Übereinstimmung zwischen Höchstlast im Versuch und berechneter Tragfähigkeit führen. Hier sind

weitere Untersuchungen erforderlich, um den möglichen Seileffekt in Stahlblech-Holz-Stabdübelverbindungen aufzuklären.

5 Zusammenfassung

Laubholz und Laubholzprodukte werden zunehmend in Bauteilen des Ingenieurholzbau eingesetzt. Wegen der höheren Rohdichte im Vergleich zu Nadelhölzern und der damit verbundenen höheren Lochleibungsfestigkeit und Ausziehtragfähigkeit steigt auch die Tragfähigkeit von Verbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln. In den Scherfugen von Stahlblech-Holz-Verbindungen wird das Verbindungsmittel gleichzeitig durch Biegemomente und Scherkräfte beansprucht, bei ausziehfesten Verbindungsmitteln zusätzlich durch Zugkräfte. Die kombinierte Einwirkung aus Moment, Normalkraft und Scherkraft kann zu einem Verbindungsmittelversagen führen, das bereits bei Beanspruchungen unterhalb der Rechenwerte der Traglast nach Eurocode 5 auftreten kann.

Es wurde ein analytisches Modell hergeleitet, das den Einfluss der MNV-Interaktion auf die Tragfähigkeit auf Abscheren beanspruchter Verbindungsmittel berücksichtigt. Die Ergebnisse des Rechenmodells zeigen einen signifikanten Einfluss der MNV-Interaktion insbesondere für Verbindungsmittel in Holz höherer Rohdichte. Der Einfluss nimmt mit höherer Ausziehtragfähigkeit und niedrigerer Stahlgüte des Verbindungsmittels zu.

Um das Rechenmodell zu überprüfen, wurden die Ergebnisse von Versuchen mit genagelten Stahlblech-Holzverbindungen mit Buchenfurnierschichtholz mit den Ergebnissen des Modells verglichen. Dabei zeigte sich eine ausgezeichnete Übereinstimmung. Für den Vergleich wurden die wichtigsten Eingangsparameter Lochleibungsfestigkeit, Ausziehtragfähigkeit und die Zug-, Scher- und Biegetragfähigkeit der Nägel unabhängig durch Versuche bestimmt.

Versuchsergebnisse mit Stahlblech-Holz-Stabdübelverbindungen in Buchenbrettschichtholz zeigten deutlich höhere Tragfähigkeiten im Vergleich mit dem Rechenmodell mit MNV-Interaktion wie auch mit dem Bemessungsmodell nach Eurocode 5. Diese

Diskrepanz könnte durch einen Seileffekt in Stahlblech-Holz-Stabdübelverbindungen mit zwei Fließgelenken pro Scherfuge verursacht werden.

6 Literatur

- [1] Johansen, K.W. (1949): Theory of timber connections. Publications of the International Association of Bridge and Structural Engineering Nr. 9, S. 249-262. Bern, Switzerland.
- [2] Choquette, J. (2016): Évaluation d'une nouvelle méthode de calcul des assemblages de bois à l'aide de connecteurs de petits diamètres. Maîtrise en sciences du bois. Université Laval, Québec.
www.theses.ulaval.ca/2016/32759/32759.pdf.
- [3] Kobel, P.; Steiger, R. und Frangi, A. (2014): Experimental analysis on the structural behaviour of connections with LVL made of beech wood. Materials and Joints in Timber Structures, Springer, S. 211-220.
- [4] Misconel, A.; Ballerini, M. und van de Kuilen J.W. (2016): Steel-to-timber joints of beech-LVL with very high strength steel dowels. Proceedings of the 14th World Conference of Timber Engineering WCTE, Vienna, Austria.
- [5] Goossens, K. (2017): M-N-V Interaktion in stiftförmigen Verbindungsmitteln für Stahlblech-Holzverbindungen. Master Thesis, Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Germany.
- [6] Görlacher, R. (1995): Load-carrying capacity of steel-to-timber joints with annular ring shanked nails. Proceedings of the CIB-W18 Meeting 28, Copenhagen, Denmark. Paper 28-7-3.
- [7] Sandhaas, C. (2012): Mechanical behaviour of timber joints with slotted-in steel plates. Dissertation, Delft University of Technology.
- [8] Blass, H.J. und Colling F. (2015): Load-carrying capacity of dowelled connections. Proceedings of the INTER Meeting 48, Sibenik, Croatia. Paper 48-7-3.
- [9] EN 1995-1-1:2010, Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings. CEN Brussels, Belgium.

7 Autor

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hans Joachim Blaß

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Holzbau und Baukonstruktionen

R.-Baumeister-Platz 1

76131 Karlsruhe

Kontakt:

Blass@kit.edu