

# Tragverhalten von Schrauben in Buchenholz

Robert Jockwer  
Chalmers University of Technology  
Göteborg, Schweden





# Tragverhalten von Schrauben in Buchenholz

## 1. Einleitung

Im Rahmen des BAFU-Projektes «Grundlagen zur Bemessung von Anschlüssen für die Marktimplementierung in der Schweiz» (Franke et al. 2019) wurden Versuche an Schraubenverbindungen in Buchenholz durchgeführt, um geeignete Empfehlungen für die Bemessung zu ermitteln. Im Projekt wurden verschiedene Schrauben der Hersteller SFS, Sherpa und Würth untersucht. In Tabelle 1 sind die untersuchten Schraubentypen und Durchmesser aufgeführt. Darüber hinaus wurden auch Schrauben der Hersteller Tenz (6 mm, 8 mm, 10 mm) und Schmid (Rapid Hardwood 8 mm) untersucht.

Tabelle 1: Untersuchte Schrauben in Buchenholz

Hersteller	SFS	SFS	SFS	SFS	Sherpa	Würth
Typ	Power-fast	WT-T	WR-T	WB		Assy VG
$d$ [mm]	6	6.5, 8.2	9, 13	16, 20	8	6, 8, 10, 14

In Abbildung 1 sind Beispiele geometrischer Details verschiedener Schrauben dargestellt. Selbstbohrende Schrauben, d.h. Schrauben mit gewalzttem oder geschmiedetem Gewinde, bieten sich vor allem an, wenn Zugkräfte von den Verbindungsmitteln übertragen werden sollen. Dabei kann grundsätzlich zwischen Anwendungen mit vorwiegend axialer Beanspruchung sowie Anwendungen mit Beanspruchung rechtwinklig zur Schraubenachse (Scherbeanspruchung) unterschieden werden. Aufgrund der guten Verankerung des Schraubengewindes im Holz können dabei gerade im Buchenholz große Kräfte übertragen werden.

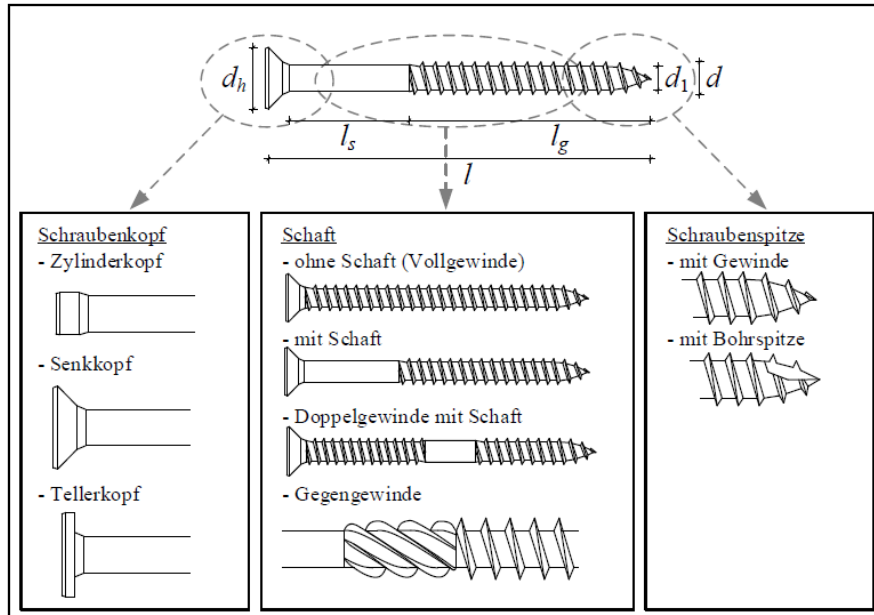


Abbildung 1: Beispiele geometrischer Details und Charakteristika verschiedener selbstbohrender Schrauben.

Für die Bemessung sind vor allem die folgenden Parameter von Interesse: Abstände der Schrauben untereinander und zu den Rändern des Holzes, die minimalen und optimalen Holzdicken, Lochleibungs- sowie die Ausziehfestigkeit. Darüber hinaus ist natürlich zu gewährleisten, dass das Einschrauben der Schraube im Buchenholz problemlos möglich ist, und die Schraube dabei nicht übermäßig beansprucht oder sogar geschädigt wird.

## 2. Einschraubverhalten

### 2.1. Allgemein

Für das Einschrauben von selbstbohrenden Schrauben sind zwei Dinge von großer Bedeutung: die Leichtigkeit des Ansetzens und Einbringens zu Beginn des Einschraubvorgangs und das Torsionsmoment während des Einschraubvorgangs.

Die Leichtigkeit des Ansetzens und Einbringens der Schrauben zu Beginn des Einschraubvorgangs ist vor allem eine subjektive Beurteilung, die stark vom Anwender, den verfügbaren Werkzeugen und der Vorbereitung der Holzoberfläche abhängt. Im Vergleich der großen Vielfalt an verschiedenen Schrauben mit unterschiedlicher Schraubenspitzen können die unterschiedlichen Einschrauberfahren verglichen werden. Um einen einfachen Start des Einschraubvorgangs zu ermöglichen, sollte eine schlanke und spitze Form der Schraubenspitze gegenüber einer stumpfen Form, wie in Abbildung 1 dargestellt, bevorzugt werden. Ein kurzes Vorbohren von Löchern von wenigen Zentimetern Tiefe vereinfacht den Start des Einschraubvorgangs erheblich: Sobald das Gewinde der Schraube ausreichend im Holz verankert ist, zeigten alle untersuchten Schrauben ein gutes Einschraubverhalten.

Gemäß EN 14592 (CEN 2008) darf das Torsionsmoment beim Einschrauben  $R_{tor,m}$  (Eindrehmoment)  $2/3$  des charakteristischen Wertes der Torsionsfestigkeit  $f_{tor,k}$  der Schraube nicht überschreiten, damit die Schraube während des Einschraubvorgangs nicht bricht oder überbeansprucht wird (auch in Bezug auf die spätere, regulären Beanspruchungen). Die Bestimmung des Einschraubdrehmoments kann z.B. gemäß EN 15737 (CEN 2009) erfolgen. Dabei wird eine Drehmoment-Messdose zwischen Schraube und Elektroschrauber geschaltet. Sollte der Grenzwert des Einschraubdrehmoments für die selbstbohrenden Schrauben überschritten werden, muss durch Vorbohren des Holzes das Eindrehmoment reduziert werden.

### 2.2. Einflüsse auf das Einschraubverhalten

Typische Verläufe des Einschraubdrehmomentes sind in Abbildung 2 dargestellt und wurden u.a. in (Jockwer and Ehrhart 2018; Jockwer 2019) diskutiert. Grundsätzlich steigt das Einschraubdrehmoment mit zunehmender Einschraublänge an. Die verschiedenen Wellenbewegungen der Verläufe entstehen vor allem durch zwei Faktoren: Die feinen Wellen entstehen durch den Widerstand der Schraubenspitze, die bei jeder Umdrehung durch die Holzfasern schneidet. Die großen Wellen, wie in Abbildung 2 links für den Einschraubwinkel  $90^\circ$  zu sehen, entstehen durch das Einschrauben durch die verschiedenen Lamellen des Buchen-Brettschichtholzes. Jede dieser Lamellen hat unterschiedliche Dichten und Eigenschaften und führt daher zu unterschiedlichen Drehmomenten.

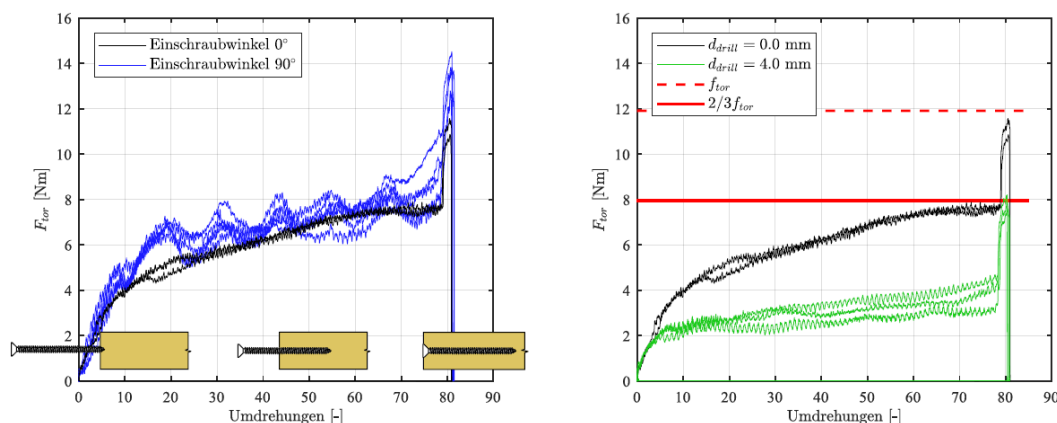


Abbildung 2: Einschraubdrehmoment von Schrauben Würth Assy VG 6mm in Abhängigkeit des Einschraubwinkels (links, ohne Vorbohrung) und Vorbohrdurchmessers (rechts, Einschraubwinkel  $0^\circ$ ).

Beim Auftreffen des Schraubenkopfes auf die Holzoberfläche steigt das Drehmoment stark an und kann den Wert des Bruchdrehmoments der Schraube sogar übertreffen. Da das Drehmoment sehr lokal von der Schraube auf das Holz übertragen wird, bedeutet dies jedoch nicht zwangsläufig, dass die Schraube bricht. Es sollte aber auf ein sorgfältiges Anziehen der Schrauben geachtet werden, um die Schrauben nicht zu überdrehen. Bei

Schrauben mit kleinem, zylindrischem Schraubenkopf ist der Anstieg des Drehmoments geringer als bei Senkkopf- oder Tellerkopfschrauben. Die Schrauben mit kleinem, zylindrischem Schraubenkopf sollten daher für den Einsatz in Hartholz bevorzugt werden.

Schrauben ohne Vorbohrung weisen ein deutlich höheres Einschraubdrehmoment auf als die vorgebohrten Schrauben, wie in Abbildung 2 rechts zu erkennen ist. In Versuchen an der ETH Zürich wurde der Durchmesser der vorgebohrten Löcher zwischen  $d_{\text{Drill}} = 0 \text{ mm}$  (kein Vorbohren) und  $d_{\text{Drill}} \approx 0,9 d_1$  bis  $d_{\text{Drill}} \approx 1,15 d_1$  variiert. Bei den Fällen ohne und mit Vorbohren ist ein erheblicher Unterschied im Torsionsmoment zu erkennen. Wenn die Schrauben nicht vorbohrt werden, wird die Grenze von  $2/3$  der Torsionsfestigkeit der Schrauben bei größerer Einschraublänge überschritten. Beim Vorbohren liegt das Drehmoment meist weit unter dieser Grenze und ist dabei kaum vom Vorbohrdurchmesser abhängig. Daraus lässt sich schließen, dass ein Vorbohren mit einem Durchmesser im Bereich des Kerndurchmessers ausreichend ist (abgerundet  $d_1$ ).

Das Einschraubdrehmoment von Schrauben in Richtung parallel oder rechtwinklig zur Faserrichtung zeigt keine größeren Unterschiede in den Werten. Der einzige klare Unterschied im Verlauf besteht darin, dass beim Einschrauben rechtwinklig zur Faserrichtung wellenartige Variationen des Einschraubdrehmoments auftreten, wenn die Schraubenspitze durch verschiedene Lamellen und evtl. Frühholz/Spätholz läuft. Beim Einschrauben parallel zur Faser treten nur sehr geringe Variationen des Drehmoments auf, da sich die Schrauben stets in einer einzigen Lamelle befindet. Jedoch gibt es in diesem Fall zum Teil größere Unterschiede zwischen den Einschraubdrehmomenten verschiedener Schrauben. Die Art und Form des Gewindes der Schraube und ein möglicher Schaftbereich haben einen Einfluss auf den Verlauf des Einschraubdrehmomentes. Bei Vollgewindeschrauben steigt nach einem ersten starken Anstieg das Drehmoment im weiteren Verlauf nur langsam an. Bei Teilwindeschrauben mit Schaft ist mit größeren Einschraublänge kaum ein Anstieg des Drehmoments zu erkennen. Bei Doppelgewindeschrauben zeigt sich bei Eintritt des zweiten Gewindeteils in das Holz ein zweiter deutlicher Anstieg des Drehmoments. Dieser Anstieg kann zu einer deutlichen Überschreitung des Limits von  $2/3$  des Bruchdrehmoments selbst bei Vorbohrung führen. Eine Optimierung der Doppelgewindeschrauben für den Einsatz im Laubholz scheint daher empfehlenswert.

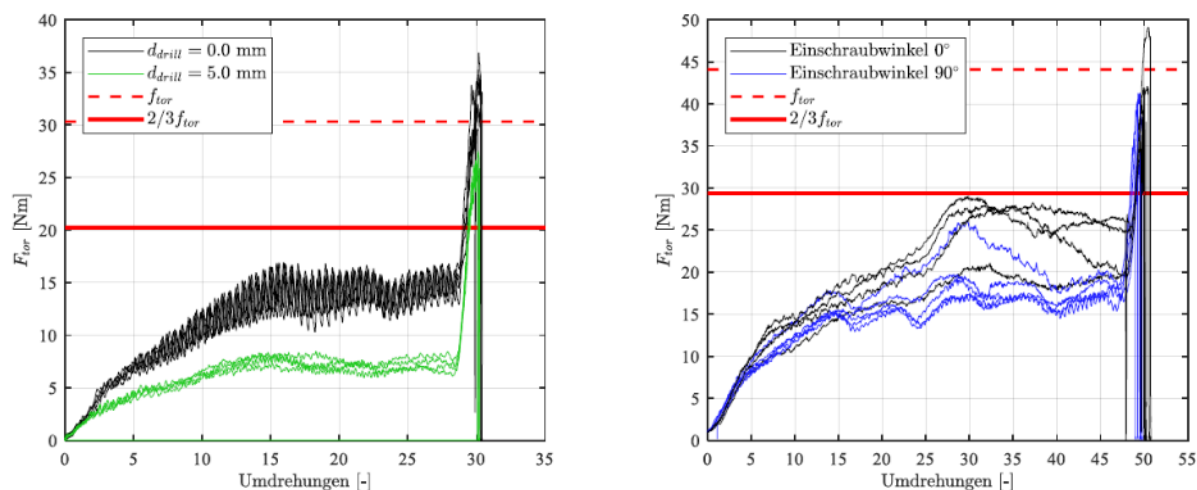


Abbildung 3: Einschraubdrehmoment von Schrauben Tenz 8mm in Abhängigkeit des Vorbohrdurchmessers (links, Einschraubwinkel  $90^\circ$ ) und von Schrauben Schmid Rapid Hardwood 8mm in Abhängigkeit des Einschraubwinkels (rechts, ohne Vorbohrung).

Das Einschraubverhalten der Schrauben kann optimiert werden z.B. durch eine Reduzierung der Reibung und des Widerstands des Gewindes im Holz wie in Abbildung 3 links bei Schrauben Tenz 8mm, oder durch eine Erhöhung des Bruchdrehmoments der Schraubennachse wie in Abbildung 3 rechts bei Schrauben Schmid Rapid Hardwood 8mm.

### 2.3. Empfehlung

Das Einschraubverhalten und der Einschraubwiderstand hängen stark von der Geometrie der Schraube und insbesondere des Gewindes ab. Das jeweilige Einschraubverhalten muss daher für jede Schraube individuell betrachtet werden. Aus der Bedingung des maximalen

Drehmoments von 2/3 des Bruchdrehmoments können aus den Versuchen die maximalen Einschraubtiefen der Schrauben ohne Vorbohren abgeleitet werden. Insbesondere beim Einschrauben parallel zur Faser hängt das Drehmoment sehr stark von der Rohdichte der jeweiligen Lamelle ab. Typischerweise können Einschraubtiefen der effektiven Gewindelänge von  $10-15d$  erreicht werden.

### 3. Axial beanspruchte Schrauben

#### 3.1. Hintergrund

Umfangreiche Untersuchungen zur Auszugsfestigkeit von Schrauben in Laubholz wurden von Hübner (2013) durchgeführt. Die Versuche von Hübner wurden an vorgebohrten Schrauben in verschiedenen BSH aus Esche und Robinie sowie in Massivholz aus Buche durchgeführt. Das Holz war gegen Aufspalten verstärkt worden. Die Dichte betrug durchschnittlich  $752 \text{ kg/m}^3$  mit einer Holzfeuchte von 11 %. Für die Berücksichtigung des Einflusses des Winkels zwischen Schraubenachse und Faserrichtung verwendete Hübner das Modell von Hankinson für die Mittelwerte und schlägt die folgende Gleichung für die Auszugsfestigkeit für vorgebohrte Schrauben in Eschen, Robinien und Buchenholz vor:

$$R_{ax,mean} = \frac{2.59 \cdot 10^{-3} l_{ef}^{0.965} \rho_{12}^{1.61} d^{0.675}}{\sin^2 \alpha + 1.20 \cos^2 \alpha}$$

Die Auszugsfestigkeit kann dementsprechend wie folgt definiert werden:

$$f_{ax,mean} = \frac{0.824 \cdot 10^{-3} l_{ef}^{-0.035} \rho_{12}^{1.61} d^{-0.325}}{\sin^2 \alpha + 1.20 \cos^2 \alpha}$$

Dabei bezieht sich die Auszugsfestigkeit auf die Mantelfläche der Schraube und ist im Gegensatz zur Definition des sogenannten Ausziehparameters nach EN 1382 (CEN 1999) um den Faktor  $\pi$  geringer.

Aufgrund der größeren Streuung bei Schrauben parallel zur Faser, sowie der Ungewissheit des Aufspaltens in diesen Fällen schlägt Hübner einen bilinearen Ansatz für das charakteristische Niveau vor, der konstant ist für Winkel zwischen  $30^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$  und eine lineare Abminderung für Winkel  $0^\circ \leq \alpha < 30^\circ$  vornimmt.

Ziel der Versuche an der ETH Zürich war es die von Hübner vorgeschlagenen Gleichungen für die Schrauben in BSH aus Buche zu validieren und die Auswirkungen verschiedener Parameter zu untersuchen, u.a. größere Durchmesser von Schrauben und Gewindestangen, Winkel zwischen Schraubenachse und Faserrichtung, die effektive Gewindelänge sowie der Durchmesser der vorgebohrten Löcher. In (Franke et al. 2019) sind die Ergebnisse ausführlich beschrieben.

#### 3.2. Einflüsse auf die Auszugsfestigkeit

Die Kräfte der Schraube werden über Scherspannungen in das Holz übertragen. Typischerweise ist der Verlauf der Scherspannungen entlang der Einschraublänge nicht konstant. Dieser Effekt wurde bereits von Volkersen (1938) beschrieben. Blaß et al. (2006) bestimmten in Auszugsversuchen an Schrauben in Nadelholz einen Exponenten  $-0.1$  für die effektive Einschraublänge zur Berechnung der Auszugsfestigkeit. Gemäß Hübner ist dieser Effekt für Laubholz geringer. In Abbildung 4 ist der im Projekt beobachtete Einfluss der effektiven Einschraublänge auf die Auszugsfestigkeit dargestellt. Es konnte dabei kein ausgeprägter Einfluss beobachtet werden. Da die Auszugsfestigkeit der Schrauben in Laubholz wesentlich höher als in Nadelholz ist, sollte vor dem Hintergrund der Robustheit eine minimale effektive Einschraublänge sichergestellt sein. Sehr große Einschraubängen wie in Nadelholz sind dagegen nicht notwendig und aufgrund der Einbringproblematik zu empfehlen. Die Kalibrierung der Auszugsfestigkeit kann daher im Bereich  $l_{ef}/d \approx 5-10$  optimiert werden.

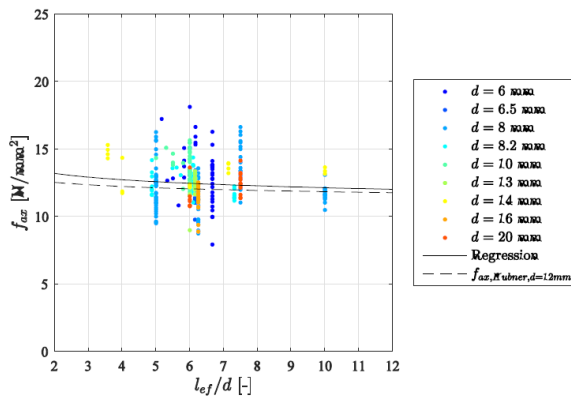


Abbildung 4: Einfluss der Einschraublänge auf die Auszugsfestigkeit, Werte normiert für  $d = 12\text{mm}$  und  $\alpha = 0^\circ$ .

Die Auszugsfestigkeit sinkt mit größer werdendem Vorbohrdurchmesser leicht ab. In den einzelnen Tests ist die Auszugsfestigkeit der vorgebohrten Schrauben etwa 10-20% geringer im Vergleich zu den nicht vorgebohrten Schrauben. Diese Reduzierung ist mit einem deutlich geringeren Einschraubdrehmoment für vorgebohrte Schrauben und dem Mehraufwand für das Vorbohren in Beziehung zu setzen. Darüber hinaus ist insbesondere für größere Schraubendurchmesser und geringe Einschraubwinkel bei Erreichen des Tragwiderstands eine deutliche Spaltneigung des Holzes festzustellen. Die Gefahr des Aufspaltens wird dabei mit größer werdendem Vorbohrdurchmesser leicht verringert. Für vorgebohrte Schrauben ist die Auszugsfestigkeit weitgehend unabhängig vom Vorbohrdurchmesser im Bereich des Bohrers  $d_{\text{Drill}} = 0.9 \sim 1.2 d_1$ , wie in Abbildung 5. Auch im Vergleich zur ohne Vorbohrung eingedrehten Schraube ist der Abfall der Auszugsfestigkeiten eher gering, sodass die Entscheidung auf ein Vorbohren zu verzichten nicht mit Hinblick auf den Tragwiderstand getroffen werden sollte.

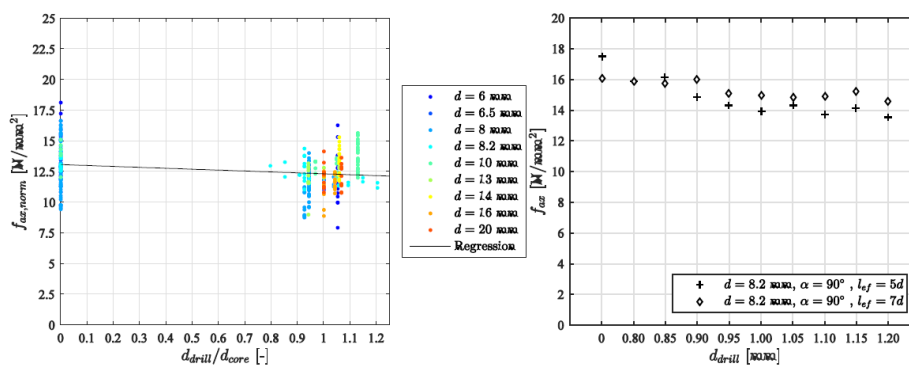


Abbildung 5: Einfluss des Vorbohrdurchmessers auf die relative Ausziehfestigkeit

### 3.3. Empfehlung

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die von Hübner angegebenen Formeln zur Bestimmung der Auszugsfestigkeit in Eschen, Buchen und Robinienholz gute und sichere Abschätzungen der Versuchsergebnisse liefern. Fragen der Handhabung beim Einbringen der Schrauben, konservative Annahmen bezüglich der Gefahr des Auspalten etc. sind in diesem Fall zum Teil höher zu gewichten als eine genauere und präzisere Darstellung der Auszugsfestigkeiten. Auf Grundlage der bestehenden Untersuchungen sollten Verbindungen mit selbstbohrenden Schrauben im Hirnholz im Allgemeinen nur in Feuchteklasse 1 sowie mit Winkeln zwischen Kraft- und Faserrichtung  $\alpha \geq 30^\circ$  ausgeführt werden.

Der Tragwiderstand einer Schraubenverbindung bzw. einer Schraubengruppe bei Beanspruchung in Schaftrichtung ist für folgende Versagensarten zu überprüfen: Ausziehen des Gewindeteils der Schraube, Abreißen des Schraubenkopfs, Durchziehen des Schraubenkopfs, Zugversagen der Schraube, Knicken der Schraube bei Druckbeanspruchung, Ausscheren eines Holzteils. Aufgrund der sehr hohen Auszugsfestigkeiten wird für selbstbohrende Schrauben in Buchenholz bereits bei vergleichsweise kurzen Einschraubtiefen die Zugfestigkeit der Schraube maßgebend für den Tragwiderstand, wie in Abbildung 6 dargestellt.



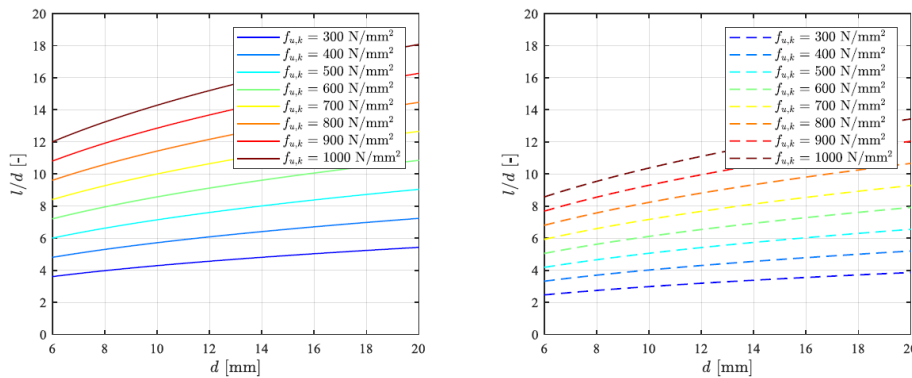


Abbildung 6: Maximal erforderliche effektive Einschraublänge zum Erreichen des vollen Tragwiderstands einer Schraube mit  $d_1/d = 0.7$  bezogen auf Niveau der Bemessungswerte (links) und erwartetes Versagen auf Mittelwertsniveau.

## 4. Rechtwinklig zur Achse beanspruchte Schrauben

### 4.1. Hintergrund

Der Tragwiderstand einer Verbindung mit rechtwinklig zur Achse beanspruchten Schrauben kann durch den Anteil aus Scherbeanspruchung der Verbindungsmittel und den Anteil aus Seilwirkung der Schrauben und aus Reibung zwischen den Holzelementen beschrieben werden.

$$R_{\text{Verbindung}} = R_{\text{Abscheren}} + \Delta R_{\text{Seileffekt}}$$

Bei ausreichender Holzstärke kann dabei der Versagensmodus mit zwei Fließgelenken in der Schraube im Bereich der Holzelementen erreicht werden. Der Anteil des Tragwiderstands aus der Scherbeanspruchung des Verbindungsmittels nach dem sogenannten European Yield Model beträgt damit:

$$R_{\text{Abscheren}} = \sqrt{2\beta} \cdot 1 + \beta \cdot \sqrt{2M_y f_{h,1} d_{\text{ef}}}$$

Darin ist  $f_h$  die Lochleibungsfestigkeit der Holzelemente,  $M_y$  das Fließmoment des Verbindungsmittels,  $d_{\text{ef}}$  der effektive Durchmesser der Schraube ( $d_{\text{ef}} = 1,1 d_1$  für Vollgewindeschrauben), und das Verhältnis  $\beta = f_{h,2} / f_{h,1}$  der Lochleibungsfestigkeiten in den beiden Holzteilen 1 und 2.

Der Anteil der Seilwirkung ergibt sich aus der relativen Kontraktion der Schraube bei Beanspruchung rechtwinklig zur Schraubenachse, die zu Druckkräften und damit Reibung zwischen den Holzelementen führt. Der Anteil des Seileffektes wird nach EN 1995-1-1:2004 wie folgt festgelegt:

$$\Delta R_{\text{Seileffekt}} = \min(\mu R_{\text{ax}}; 1,0 \cdot R_{\text{Abscheren}})$$

Das heißt, dass der Seileffekt auf maximal den Anteil aus der Scherbeanspruchung des Verbindungsmittels beschränkt bleibt. Gerade für Schrauben mit geringem Kerndurchmesser und daher einem eher geringen Scherwiderstand kann diese Beschränkung den Tragwiderstand praktisch sehr stark limitieren. Der Parameter  $\mu$  ist in Eurocode 5 (CEN 2004) mit 0.25 angegeben und kann als Reibbeiwert bzw. Mitwirkung des Axialen Tragwiderstands des verformten Verbindungsmittels interpretiert werden. Je nach Materialien und Oberflächenbeschaffenheit können auch höhere Werte von  $\mu$  in Versuchen beobachtet werden.

In Eurocode 5 ist keine spezifische Lochleibungsfestigkeit für Schrauben angegeben. Es wird auf die Angaben für nicht vorgebohrte Nägel (im Falle von  $d \leq 6$  mm) oder auf die Angaben von Bolzen (Stabdübel) (im Falle von  $d > 6$  mm) verwiesen. Die in Eurocode 5 angegebene Gleichung der Lochleibungsfestigkeit wurde von Whale und Smith (1986) für Nägel und Bolzen in Nadelholz und tropischen Hartholz für das Mittelwerts- als auch charakteristische Niveau ermittelt.

$$f_h = 0.082(1 - 0.01d)\rho$$



Eine detailliertere Auswertung der Testdaten für Laubholz durch Leijten et al. (2004) ergibt folgende Regressionsfunktion:

$$f_{h,mean} = 0.0871 \rho_{mean} 1.091 d^{-0.253}$$

Von Hübner wurde die folgende Lochleibungsfestigkeit für Stabdübel mit einem Durchmesser zwischen 6 und 20 mm auf Grundlage des Versagenskriteriums von 5 mm Eindrückung:

$$f_{h,mean} = 3.20 \cdot 10^{-3} d^{-0.24} \rho_{mean}$$

In Norm SIA 265 (2003) war der folgende Wert für die Lochleibungsfestigkeit in Hartholz (vorgebohrt) z.B. für Stabdübel angegeben, der auf Untersuchungen von Ehlbeck und Werner (1992) basiert:

$$f_{h,k} = 0.19 \rho \cdot d^{-0.3}$$

Es zeigt sich, dass in Versuchen an Scherverbindungen in Buchenholz hohe Tragwiderstände erreicht werden können, die sich u.a. auf eine relativ hohe Lochleibungsfestigkeit zurückführen lassen. Darüber hinaus ist bei Schraubenverbindungen aber auch ein deutlicher Einfluss des Anteils der Seilwirkung durch den axialen Tragwiderstand der Schrauben erkennbar.

## 4.2. Tragverhalten

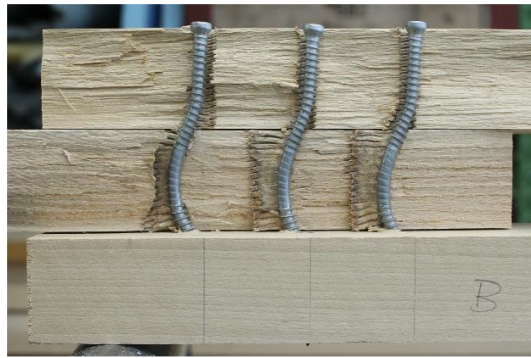
Nach Erreichen der Maximallast konnten verschiedene Versagensmechanismen, in den Schrauben und/oder im Holz, beobachtet werden. In Abbildung 7 sind die typischen Versagensbilder aufgeführt:

- a) Mit steigender Beanspruchung kommt es zur Verformung der Schrauben. Sofern die erforderlichen Holzdicken, Rand-, End-, und Zwischenabstände eingehalten werden, kommt es zur Ausbildung der Fließgelenke in den Schrauben.
- b) Aufgrund der in a) beschriebenen Verformung der Schrauben tritt die Seilwirkung der Schrauben ein, d.h. die axiale Tragwirkung der Schrauben wird aktiviert. Sofern die Schrauben ausreichend stark im Vergleich zur Holzdicke dimensioniert sind, kann ein Einziehen der Schraubenköpfe beobachtet werden.
- c) Ist der axiale Tragwiderstand der Schrauben durch den Zugtragwiderstand der Schrauben begrenzt, können die Schrauben in der Scherfuge abreißen. Dieses Versagen tritt daher insbesondere bei schlanken Schrauben mit großer Einschraublänge auf.

Werden die erforderlichen Holzdicken, Rand-, End-, und Zwischenabstände nicht eingehalten oder sind die Verformungen der Versagensmechanismen a) -c) sehr groß, so können die folgenden Versagensbilder beobachtet werden:

- d) Aufspalten des Holzes,
- e) Scherversagen entlang der Verbindungsmittelreihen,
- f) Blockscheren des Holzteils der gesamten Schraubengruppe.

Darüber hinaus können auch diverse kombinierte Versagensbilder beobachtet werden.



a)

Vor-Versuch



Nach-Versuch



b)



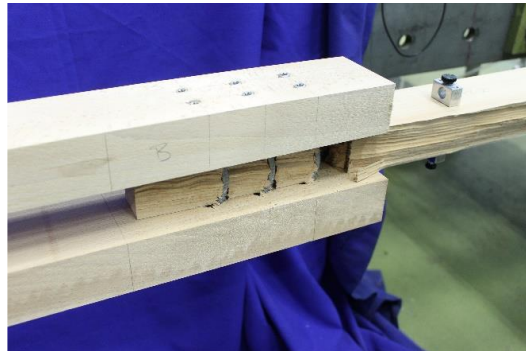
c)



d)



e)



f)

Abbildung 7: Beispiele verschiedener Versagensmechanismen in einer Scherverbindung

Die (spröden) Versagensmechanismen im Holz traten bei verschiedenen großen Lastniveaus und Verformungen auf. Ziel eines optimalen Entwurfs und Bemessung ist es, dass die spröden Versagensmechanismen erst nach einer ausreichend großen duktilen Verformung der Verbindungsmittel auftreten, um eine ausreichende Lastverteilung innerhalb der Verbindung und zwischen verschiedenen Verbindungen zu ermöglichen. Gemäß EAD 130118-00-0603 soll die Verformung pro Verbindung mindestens 10 mm betragen, innerhalb der die Last nicht unter 80%  $F_{\max}$  abfällt. Gemäß EN 26891 (CEN 1991) wird als Tragwiderstand im Versuch die maximale Last bei einer Verformung bis 15 mm definiert. Jedoch sind keine Angaben zur erforderlichen Duktilität bzw. zum Verformungsvermögen gemacht.

Aus den Last-Verformungskurven sowie dem Tragwiderstand  $F_{\max}$  kann der Anteil des Tragwiderstands infolge Scherwiderstand der Schrauben  $F_{\text{Scher}}$  sowie der Anteil infolge Seilwirkung  $F_{\text{Seil}}$  ermittelt werden. In Tabelle 2 sind die Ergebnisse der Versuche aufgeführt. Die Werte sind für eine Dichte  $\rho = 700 \text{ kg/m}^3$  korrigiert. Es zeigt sich, dass der Anteil der Seilwirkung einen deutlich höheren Anteil am Tragwiderstand hat verglichen mit dem Scherwiderstand. Die Limitierung des Anteils der Seilwirkung auf 100% des Scherwiderstandes gemäß Norm führt zu einer deutlichen Unterschätzung des Tragwiderstands.

Type	$d$ [mm]	$F_{\max, \text{mean}}$ [kN]	$F_{\text{scher, mean}}$ [kN]	$F_{\text{seil, mean}}$ [kN]	$F_{\text{seil}} / F_{\text{scher}}$ [kN]
SFS WT-T	8.2	13.5	5.5	8.5	1.6
Würth ASSY Plus VG	6	11.6	2.6	8.9	3.4
Würth ASSY Plus VG	8	14.7	2.8	12	4.3
Würth ASSY Plus VG	10	18.4	4.6	13.8	3

Tabelle 2: Korrigierte Tragwiderstände  $F_{\max}$  sowie Anteile aus Scherwiderstand und Seilwirkung aus Versuchen

### 4.3. Empfehlung

Das größte Potential für die Steigerung des Tragwiderstands von Schrauben in Buchenholz liegt vor allem in der Anpassung der Bemessungsregeln um den vollen Anteil der Seilwirkung mit zu berücksichtigen. Im Idealfall kann für den Anteil  $\Delta R_{d, \text{Seilw}}$ , der die Seilwirkung berücksichtigt, für Schraubenverbindungen daher die volle Seilwirkung der Schraube angesetzt werden.

$$\Delta R_{d, \text{Seilw}} = \mu R_{ax, d}$$

Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die allenfalls großen Verformungen in den Verbindungen mit dem Tragwerk kompatibel sein müssen.

Der Reibbeiwert beträgt  $\mu = 0,25$ . Wird der Anteil der Seilwirkung berücksichtigt, sollte die wirksame Gewindelänge  $l_{ef}$  mindestens  $6d$  betragen.

Um einen ausreichenden Tragwiderstand von Schraubenverbindungen mit Selbstbohrenden Schrauben zu gewährleisten, muss ein frühzeitiges Versagen im Holz infolge Aufspalten oder Blockscheren vermeiden werden.

## 5. Zusammenfassung

Die Verwendung von Schrauben in Verbindungen in Buchenholz erfordert spezielle Sorgfalt bei der Herstellung, ermöglicht aber auch das Erreichen von hohen Tragwiderständen. So muss darauf geachtet werden, dass in Abhängigkeit der Schraubenart und -form das maximale Eindrehmoment während des Einschraubens nicht überschritten wird. Gegebenenfalls müssen die Schrauben in vorgebohrte Löcher eingeschraubt oder die Einschraublänge begrenzt werden. Typischerweise können selbstbohrende Schrauben bis zu einer effektiven Einschraublänge von etwa  $12d$  ohne vorbohren eingesetzt werden. Bereits bei geringeren effektiven Gewindelängen kann ein hoher axialer Tragwiderstand erreicht werden, so dass die Schraube ihren maximalen Tragwiderstand erreicht. Durch den hohen axiale Tragwiderstand können Schraube auch in Scherverbindungen sehr hohe Tragwiderstände erreicht werden, da die Schraube bei entsprechender Verformung die Last durch den so-genannten Seil- oder Einhängeeffekt abträgt. Sofern die erforderlichen Abstände eingehalten werden und die Verformungen vom Tragwerk aufgenommen werden können, ist eine Begrenzung des Seileffektes auf den Wert des Scherwiderstandes nicht notwendig.

## 6. Danksagung

Der Großteil der vorgestellten Ergebnisse entstand im Forschungsprojekt «Grundlagen zur Bemessung von Anschlüssen für die Marktimplementierung in der Schweiz» Nr. 09.0063PJ/O405-33997, das vom Bundesamt für Umwelt im Rahmen des Aktionsplans Holz und Partnern aus der Forschung, Wirtschaft, Gemeinde und Verband unterstützt wird. Die Prüfserien und -ergebnisse entstanden in Zusammenarbeit mit der BFH Biel. Es wird herzlich Stephan Schilling (2017), Marco Rust (2017) und Lukas Zeiter (2018) für die Durchführung und Auswertung der Versuche im Rahmen ihrer Masterarbeiten an der ETH Zürich gedankt.

## 7. Referenzen

- Blaß H-J, Bejtka I, Uibel T (2006) Tragfähigkeit von Verbindungen mit selbstbohrenden Holzschrauben mit Vollgewinde. Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen, Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe, Germany
- CEN (2008) EN 14592: Timber structures - Dowel-type fasteners - Requirements. Euro-pean Committee for Standardization CEN, Bruxelles, Belgium
- CEN (2009) EN 15737: Timber structures - Test methods - Torsional resistance of driving in screws. European Committee for Standardization CEN, Bruxelles, Belgium
- CEN (1999) EN 1382: Timber structures - Test methods - Withdrawal capacity of timber fasteners. European Committee for Standardization CEN, Bruxelles, Belgium
- CEN (2004) EN 1995-1-1: Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings. European Committee for Standardization CEN, Bruxelles, Belgium
- CEN (1991) EN 26891: Timber structures - Joints made with mechanical fasteners - Gen-eral principles for the determination of strength and deformation characteristics (ISO 6891:1983). European Committee for Standardization CEN, Bruxelles, Belgium
- Ehlbeck J, Werner H (1992) Tragfähigkeit von Laubholzverbindungen mit stabförmigen Verbindungsmitteln. Versuchsanst. f. Stahl, Holz u. Steine, Abt. Ingenieurholzbau
- Franke S, Franke B, Heubuch S, et al (2019) Grundlagen für hochleistungsfähige Anschlüsse in Laubholz. Biel, Switzerland
- Hübner U (2013) Mechanische Kenngrößen von Buchen-, Eschen- und Robinienholz für lastabtragende Bauteile. Ph.D. thesis, Technischen Universität Graz
- Jockwer R (2019) Schraubenverbindungen in BuchenBSH. In: Proc. of the 51. Fortbildungskurs "Hochleistungswerkstoffe im Holzbau." Weinfelden, Switzerland
- Jockwer R, Ehrhart T (2018) Beech glulam - experimental studies on the mechanical prop-erties and on the performance of screw connections. In: Proc. of the 1st Easter Europe Conference on Timber Construction EECTC. Easter Europe Conference on Timber Construction EECTC, Kharkiv, Ukraine
- Leijten A, Köhler J, Jorissen A (2004) Review of probability data for timber connections with dowel-type fasteners. In: Proc. of CIB-W18 Meeting 37. p CIB-W18/37-7
- Rust M (2017) Anschlüsse in Buchen-Brettschichtholz - Leistungsfähige Verbindungen für einen hochwertigen Baustoff - Scherverbindungen. Master Thesis, ETHZ - Institut für Baustatik und Konstruktion
- Schilling S (2017) Anschlüsse in Buchen-Brettschichtholz - Leistungsfähige Verbindun-gen für einen hochwertigen Baustoff - Zugverbindungen. Master Thesis, ETHZ - Institut für Baustatik und Konstruktion
- SIA (2003) Norm SIA 265:2003 - Holzbau. SIA - Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein: Zürich, Schweiz
- Volkersen O (1938) Die Nietkraftverteilung in zugbeanspruchten Nietverbindungen mit konstanten Laschenquerschnitten. Luftfahrtforschung 15:41-47
- Whale LRJ, Smith I (1986) The derivation of design clauses for nailed and bolted joints in Eurocode 5. In: Proc. of CIB-W18 Meeting 19. Dublin, Ireland, p CIB-W18/19-7-6
- Zeiter L (2018) Leistungsfähige Verbindungen in Buchen Brettschichtholz. Master Thesis, ETHZ - Institut für Baustatik und Konstruktion