



*Robert Jockwer
Dipl.-Ing.
ETH Zürich, Institut für Baustatik
und Konstruktion
Zürich, Schweiz
Empa, Abteilung Holz
Dübendorf, Schweiz*

Schraubenverbindungen

Grundlagen, Revision der Bemessungsregeln und Nachweise, Beispiele

Schraubenverbindungen

Grundlagen, Revision der Bemessungsregeln und Nachweise, Beispiele

Holzschrauben lassen sich im Holzbau auf vielfältige Weise einsetzen. Sie sind für die Verbindung von Holzbauteilen untereinander oder mit anderen Bauteilen wie Stahlfertigteilen geeignet. Ihr Vorteil gegenüber anderen metallischen Verbindungsmitteln ist, dass sie einfach einzusetzen sind und planmässig auch grosse Kräfte in axialer Richtung abtragen können. Ihr Einsatz reicht dabei von allgemeinen Anwendungen, wie einschnittigen Verbindungen in Holz-Holz oder Stahl-Holz, bis hin zu speziellen Aufgaben, wie Verbindungen mit Befestigungssystemen oder Verstärkungen auf Querkzug oder auf Querdruk.

Für die Vielzahl von Einsatzmöglichkeiten können verschiedene Versagensmechanismen identifiziert werden. Anhand dieser Versagensmechanismen kann eine Bemessung der Schraube hinsichtlich des Tragwiderstands erfolgen. Einfache, in der Praxis zu verwendende Bemessungsansätze können nur für die einfachen Einsatzgebiete gefunden werden. Für spezielle Anwendungen ist daher gegebenenfalls auf Versuche zur Bestimmung des Tragwiderstands zurückzugreifen.

Die Schweizer Norm für Holzbau SIA 265 [1] wurde 2003 als Nachfolgerin der bis dahin gültigen Norm SIA 164:1992 [2] in Kraft gesetzt. Sie führte das Konzept der Teilsicherheitsbeiwerte und neue Bemessungsansätze, basierend auf dem damaligen Stand des Wissens, ein. Parallel dazu wurde die europäische Holzbaunorm EN 1995-1-1 [3] entwickelt und 2004 veröffentlicht. Die Norm SIA 265:2003 basiert daher auf früheren Kenntnisständen der europäischen Normengemeinschaft und konnte die späteren Erfahrungen mit der Einführung neuerer Bemessungskonzepte nicht vollumfänglich nutzen. Zusammen mit Forschungsergebnissen aus den letzten Jahren ergibt sich daraus ein neuer Wissensstand auch für den Tragwiderstand von Verbindungsmitteln. Unter anderem aus diesem Grund wird zurzeit die Teilrevision der Norm SIA 265:2003 vorgenommen. Dabei sollen die neuesten Erkenntnisse aus Forschung und Praxis berücksichtigt und erkannte Fehler korrigiert werden. Als Ergebnis soll am 1.1.2012 die teilrevidierte Norm erscheinen. Neue Bemessungskonzepte werden darin eingearbeitet und die Normen so aktualisiert.

Schraubentypen und ihre charakteristischen Merkmale

Folgende Merkmale, wie in Abbildung 1 und Abbildung 2 dargestellt, beeinflussen den Tragwiderstand von Schrauben:

- d Gewindeaussendurchmesser (Nenndurchmesser)
- d_1 Gewindekerndurchmesser
- d_s Schaftdurchmesser
- d_h Kopfdurchmesser
- Ausbildung von Schraubenkopf und -spitze
- l Nennlänge
- l_g Gewindelänge
- l_s Schaftlänge
- Stahlqualität

Im Holzbau wird eine Vielzahl unterschiedlicher Holzschrauben eingesetzt. Grundsätzlich werden zwei Typen von Schrauben anhand ihrer Herstellung und daraus folgend ihrer Einsatzmöglichkeiten unterschieden: Schrauben mit einem geschnittenen Gewinde nach DIN 7998 [4] und Schrauben mit einem gewalzten oder geschmiedeten Gewinde.

Häufig werden Schrauben in selbstbohrende oder nicht selbstbohrende Schrauben unterschieden. Diese Unterscheidung kann jedoch irreführend sein, da es nicht im Speziellen vom Schraubentyp sondern vor allem vom Durchmesser der Schraube abhängt, ob eine Vorbohrung notwendig ist.

Schrauben mit geschnittenem Gewinde nach DIN 7998

Traditionell wurden Holzschrauben mit einem geschnittenen Gewinde nach DIN 7998 verwendet. In dieser Norm ist die Ausbildung des Gewindes definiert. Die Form der Schraubenköpfe kann variieren. Es werden vor allem Linsensenk- (DIN 95 [5], DIN 7995 [6]), Halbrund- (DIN 96 [7], DIN 7996 [8]) und Senkköpfe (DIN 97 [9], DIN 7997 [10]) unterschieden. Ausserdem gibt es Schrauben mit 6-Kant Schraubenköpfen (DIN 571 [11]). Die Schrauben besitzen einen Schaft, also einen Bereich ohne Gewinde. In den Normen zu Ausbildung der Schraubenköpfe ist die Mindestlänge des Gewindebereiches zu $l_g \geq 0.6l$ festgelegt, die Schaftlänge darf also nicht mehr als 40% der Schraubenlänge betragen. Je nach Anwendungszweck ist ein langer Schaft notwendig, wie zum Beispiel für die Befestigung von Stahlformteilen, oder aber ein längerer Gewindebereich zweckmässig, wie für die Aufnahme grösserer Kräfte in Richtung der Schraubenachse.

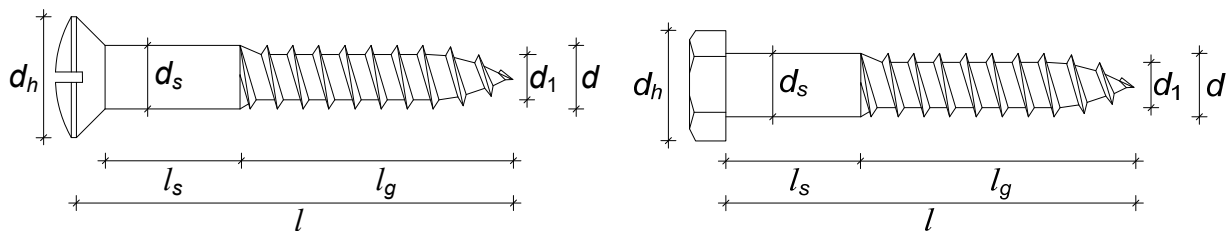


Abbildung 1: Schrauben mit geschnittenem Gewinde nach DIN 7998 mit Linsensenk- (links) und 6-Kant Schraubenkopf (rechts)

Der Durchmesser der Schraube ist einer der wichtigsten Parameter zur Bestimmung des Tragwiderstands. Für Schrauben mit geschnittenem Gewinde nach DIN 7998 ist der Durchmesser am Schaft d_s am grössten und im Gewindekern d_1 am kleinsten. Der Aussendurchmesser des Gewindes entspricht dem des Schaftes und wird als Nenndurchmesser bezeichnet. In der DIN 7998 sind Verhältnisse von Gewindekern- zu Gewindeaussendurchmesser von $d_1/d = 0.7$ für Nenndurchmesser von $d = 1.6-10$ mm und Verhältnisse von $d_1/d = 0.75$ für die grösseren Nenndurchmesser von $d = 12-20$ mm angegeben.

Für die Herstellung der Schrauben mit einem geschnittenen Gewinde nach DIN 7998 werden verschiedene Materialqualitäten verwendet. Grundsätzlich kann man jedoch davon ausgehen, dass die Schrauben eine Zugfestigkeit von $f_{u,k} = 400$ N/mm² besitzen.

Schrauben mit gewalztem oder geschmiedetem Gewinde

Neben dem Einschneiden des Gewindes in den Schraubendraht lässt sich das Gewinde durch Walzen oder Schmieden des Drahtes herstellen. Dabei lassen sich die verschiedenen Teilbereiche der Schraube speziell ausbilden. So kann die Schraube für verschiedene Einsatzzwecke optimiert werden. Ausserdem werden häufig höhere Materialqualitäten als bei Schrauben mit geschnittenem Gewinde nach DIN 7998 eingesetzt, um den Tragwiderstand der Schraube zu erhöhen.

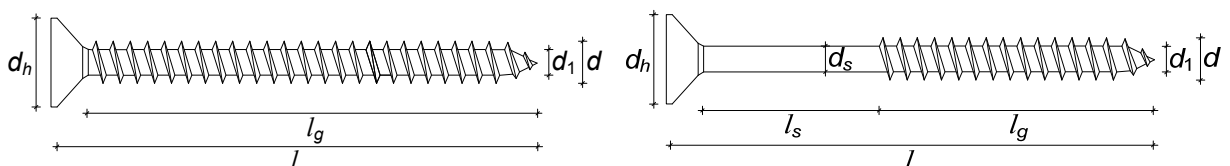


Abbildung 2: Schraube mit gewalztem oder geschmiedetem Gewinde mit Senkkopf

Charakteristisch für die Schrauben mit gewalztem oder geschmiedetem Gewinde ist, dass der Aussendurchmesser des Gewindes (Nenndurchmesser) grösser ist als der Schaftdurchmesser. Der Gewindekerndurchmesser entspricht im Allgemeinen dem Schaftdurchmesser. Häufig werden Verhältnisse von Gewindekern- zu Gewindeaussendurchmesser von $d_1/d = 0.65-0.75$ verwendet. Nach EN 14592 [12] sind Verhältnisse von $d_1/d = 0.6-0.9$ möglich, wodurch auf spezielle Einsatzzwecke reagiert werden kann. Je nach Schraubenhersteller gibt es verschie-

dene Ausbildungsarten des Gewindes. Durch eine besondere Gewindestruktur kann der Widerstand beim Einschrauben herabgesetzt werden. Bei Schrauben mit gewalzttem oder geschmiedetem Gewinde werden zum Teil Fräsbereiche zwischen Gewindebereich und Schaft angeordnet. Durch Einkerbungen oder durch eine besondere Ausbildung der Schraubenspitze kann eine Bohrspitze erzeugt werden, die das Einschrauben vereinfacht.

Tragverhalten

Das Tragverhalten von Schrauben gleicht grundsätzlich demjenigen von stiftförmigen Verbindungsmitteln. Es kann daher eine Tragwirkung senkrecht zur Schafrichtung, das sogenannte Abscheren, und eine solche in Schafrichtung unterschieden werden. Anders als zum Beispiel Stabdübel können Schrauben auch grosse Kräfte in Richtung der Schraubenachse übertragen. Durch die Interaktion der beiden Tragmechanismen kommt es zu einer Erhöhung des Tragwiderstands auf Abscheren.

Abscheren

Das verbreitete Tragmodell für stiftförmige Verbindungen geht zurück auf Untersuchungen von Johansen [13]. Dieser untersuchte das Tragverhalten von Stabdübelverbindungen. Dabei konnten die in Abbildung 3 dargestellten Versagensmodi beobachtet werden.

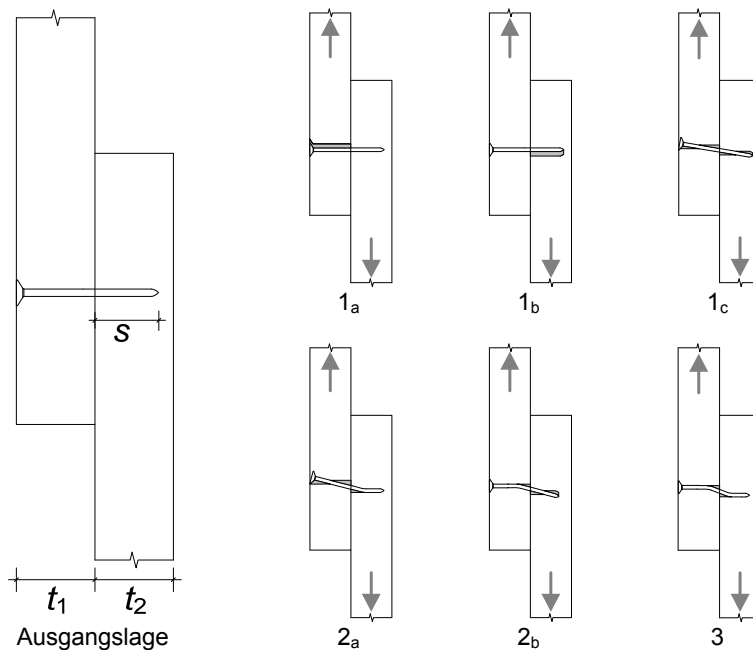



Abbildung 3: Verschiedene Versagensmodi einer einschnittigen Verbindung mit einer Schraube

Die grundlegenden Versagensarten sind eine Überschreitung der Lochleibungsfestigkeit des Holzes und ein plastisches Versagen des Verbindungsmittels. Je nach Dicke des Verbindungsmittels und der Holzteile treten diese einzeln oder in Kombination auf und führen zu einem lokalen und globalen Versagen. Bei den Versagensmodi 1_{a-c} wird die Lochleibungsfestigkeit in einem oder in beiden Holzteilen überschritten. Das Verbindungsmittel verhält sich dabei ausreichend steif und erfährt keine plastische Verformung. Versagensmodus 2_{a,b} ist durch eine Kombination aus einer plastischen Verformung des Verbindungsmittels und einer Überschreitung der Lochleibungsfestigkeit in einem der beiden Holzteile gekennzeichnet. Im Bereich des plastischen Gelenks im Verbindungsmittel kommt es dabei lokal zu Eindrückungen, die ebenfalls durch die Lochleibungsfestigkeit des Holzes bestimmt werden. In Versagensmodus 3 tritt das globale Versagen der Verbindung durch die Ausbildung zweier plastischer Gelenke im Verbindungsmittel ein. In Tabelle 1 sind die Versagensmoden und massgebenden Widerstände sowie Möglichkeiten zur Laststeigerung zusammengestellt.

Tabelle 1: Versagensarten, Widerstände und Verbesserungen von Schraubenverbindungen

Versagensfall	1	2	3
Versagensort	Holz	Holz und Schraube	Schraube
Massgebender Widerstand	Lochleibung	Lochleibung und Biege­widerstand	Biege­widerstand
Verbesserung	grössere Holz­dicken	grössere Holz­dicken und Schraubendicke	Schraubendicke ver­grössern
Tragwiderstand			

Den grössten Tragwiderstand ergibt ein plastisches Versagen des Verbindungsmittels. Die gleichen Versagensbilder, wie bei den von Johansen untersuchten Stabdübeln, können prinzipiell auch für Schraubenverbindungen identifiziert werden. Darüber hinaus kommt es zu einer Interaktion der Tragwirkung in axialer Richtung der Schraube und senkrecht dazu: durch die Verkürzung der Schraube aufgrund der Verkrümmung kommt es dabei zu einer Verspannung der Bauteile. Dies führt zu einer Erhöhung des Tragwiderstands. Dieser Effekt wird als Seilwirkung bezeichnet.

Tragwiderstand auf Abscheren

Bei Einhaltung bestimmter Mindestholzdicken kann ein globales Überschreiten der Lochleibungsfestigkeit in den Holzteilen vermieden werden. Es wird daher zu einem Versagensmodus mit Plastifizierung des Verbindungsmittels kommen.

In der Norm SIA 265:2011 Teilrevisionsfassung V9 [14] in Anhang A 2 wird dieser Versagensmodus bei der Berechnung des Tragwiderstands von einschnittigen Schraubenverbindungen bei Beanspruchung rechtwinklig zur Schafrichtung bei Einhaltung der Mindestabmessungen angesetzt.

Der Tragwiderstand der gesamten Verbindung $R_{d,Verb}$ setzt sich aus den Anteilen infolge Abscherens des Verbindungsmittels $R_{d,Absch}$ und der Seilwirkung $\Delta R_{d,Seilw}$, die sich bei der Verformung der Schraube einstellt, zusammen.

Entsprechend den Angaben in der EN 14592 dürfen Schrauben mit einem Nenndurchmesser von $d = 2.4-24$ mm für tragende Zwecke eingesetzt werden. Mit den Beschränkungen zur Lochleibungsfestigkeit und zum Biege­widerstand in Ziffern 6.1.4.3 bzw. 6.1.4.4 der Norm SIA 265:2011 Teilrevisionsfassung ist Formel (1) daher gültig für Schrauben mit einem Nenndurchmesser von $d = 4-24$ mm.

$$R_{d,Verb} = R_{d,Absch} + \Delta R_{d,Seilw} = k_{\alpha} k_{red} n_{tot} k_{\beta} \sqrt{M_{u,k} f_{h,k} d_{ef}} + \Delta R_{d,Seilw} \quad (1)$$

$R_{d,Absch}$ Tragwiderstand auf Abscheren der Schraubenverbindung

$\Delta R_{d,Seilw}$ Anteil aus dem Effekt der Seilwirkung der Schraube, um den der Tragwiderstand der Verbindung auf Abscheren erhöht werden darf. Der Anteil darf mit maximal 25% des Tragwiderstands in axialer Richtung berücksichtigt werden, darf jedoch den Anteil des Abscherens nicht überschreiten.

$$\Delta R_{d,Seilw} = \min[0.25R_{ax,d}; 1.0R_{d,Absch}] \quad (2)$$

k_{α} Beiwert zur Berechnung des Bemessungswertes des Tragwiderstands der Schraubenverbindung aus den charakteristischen Eingangswerten. Dieser ist der Quotient aus dem Beiwert η_{mod} zur Berücksichtigung des Einflusses der Dauer der Einwirkung und des Feuchtegehalts sowie dem Widerstandsbeiwert des Materials γ_M . Für ein Abscheren der Verbindung wird der Tragwiderstand der Verbindung nicht im Holz sondern durch ein plastisches Biegeversagen der Schraube erreicht. Für diesen Versagensmechanismus ist in den Normen DIN 1052:2008-12 [15] und EN 1995-1-1 [3] ein Widerstandsbeiwert für Stahl von $\gamma_M = 1.1$ angegeben. Für eine mittlere Lasteinwirkungsdauer und Feuchteklasse 1 mit $\eta_{mod} = 0.8$ ergibt sich damit ein Beiwert $k_{\alpha} = 0.73$.

Genau genommen müsste für das in Formel (1) angegebene Versagen der Schraube sowohl der Widerstandsbeiwert für den Stahl und als auch der für das Holz berücksichtigt werden. Dabei sind die Widerstände des jeweiligen Materials mit dem zugehörigen Widerstandsbeiwert abzumindern, d.h. der Biege­widerstand der Schraube mit $\gamma_M = 1.1$ und die Lochleibungs­festigkeit des Holzes mit $\gamma_M = 1.3$. Da beide Beiwerte unter der Wurzel stehen, ergibt sich dazu im Vergleich zum konstanten Widerstandsbeiwert von $\gamma_M = 1.1$ eine um 8% geringere Abminderung.

k_{red} Reduktionsbeiwert zur Berücksichtigung mehrerer in Faserrichtung hintereinander angeordneter Schrauben. Der Beiwert wird nach Norm SIA 265:2011 Teilrevisionsfassung Ziffer 6.1.4.6 für alle stiftförmigen Verbindungsmittel einheitlich bestimmt. Soll ein Vergleich der Tragwiderstände verschiedener Normen durchgeführt werden, so ist zu beachten, dass der Reduktionsbeiwert in der Norm SIA 265:2011 Teilrevisionsfassung auf einen Abstand von $10d$ normiert wurde.

n_{tot} Gesamtanzahl der in der Schraubenverbindung vorhandenen Schrauben.

k_β Die Ausbildungsform der Verbindung bestimmt den Hilfwert k_β . Für Verbindungen zwischen Holz und Holz berechnet sich der Hilfwert aus dem Verhältnis β_f der Lochleibungs­festigkeit $f_{h,2,k}$ des Seitenholzes 2 zu der des Seitenholzes 1 $f_{h,1,k}$.

$$k_\beta = \sqrt{\frac{4\beta_f}{1+\beta_f}} \quad (3)$$

Für Verbindungen zwischen Stahl und Holz ist allein der Lochleibungswiderstand im Holz massgebend. Die Schraube kann sich bei dünnen Blechen, in denen sie nicht eingespannt ist, frei verformen. Der Hilfwert kann daher allein für die Lochleibungs­festigkeit des Holzes ermittelt werden und ersatzweise kann ein Verhältniswert $\beta_f = 1$ angesetzt werden.

$$k_\beta = \sqrt{2} \quad (4)$$

$M_{u,k}$ Der Biege­widerstand der Schraube hängt von der Art der Schraube und der verwendeten Stahlqualität ab. Massgebend sind daher die Angaben des Herstellers. Ersatzweise kann der Biege­widerstand nach Norm SIA 265:2011 Teilrevisionsfassung Ziffer 6.1.4.4 aus dem charakteristischen Wert der Zugfestigkeit $f_{u,k}$ der Schraube entsprechend Formel (5) bestimmt werden. Dabei wird der rechnerisch wirksame Schraubendurchmesser d_{ef} verwendet.

$$M_{u,k} = 0.3f_{u,k}d_{ef}^{2.6} \quad (5)$$

$f_{h,k}$ Die Lochleibungs­festigkeit des Holzes entspricht dem Widerstand gegen ein seitliches Eindringen der Schraube in das Holz. Die genaue Bestimmung der Lochleibungs­festigkeiten $f_{h,i,k}$ der einzelnen Bauteile ist in Ziffer 6.1.4.3 der Norm SIA 265:2011 Teilrevisionsfassung in Abhängigkeit der Holzart und des Kraft-Faser Winkels angegeben. In Nadelholz können Schrauben mit Vorbohrung und ohne Vorbohrung eingedreht werden. Es ist jedoch zu beachten, dass Schrauben mit geschnittenem Gewinde nach DIN 7998 grundsätzlich vorgebohrt werden müssen. In Laubholz sind die Schraubenlöcher generell vorzubohren. Bei der Berechnung der Lochleibungs­festigkeit wird wiederum der rechnerisch wirksame Schraubendurchmesser d_{ef} verwendet. In Formel (1) ist für Holz-Holz Verbindungen die Lochleibungs­festigkeit des Holzes auf der Seite des Schraubenkopfes anzusetzen.

d_{ef} Bei der Bestimmung des Tragwiderstands senkrecht zur Schraubenachse gemäss Formel (1) ist der rechnerisch wirksame Schraubendurchmesser zu verwenden. Dieser ist notwendig, um Schraubendurchmesser am Ort des plastischen Gelenks zu berücksichtigen, und ist abhängig davon, ob sich die Scherfuge im Schaft- oder im Ge-

windebereich der Schraube befindet. Liegt die Scherfuge im Gewindebereich wird der effektiv wirksame Schraubendurchmesser zum 1.1-fachen des Gewindekerndurchmessers angenommen. Liegt die Scherfuge mehr als $4d$ vom Gewindebereich entfernt im Schaft, so ist der Schaftdurchmesser d_s als effektiv wirksamer Durchmesser anzunehmen.

Holzdecken, Einschraubtiefen und Mindestabstände

Damit ein plastisches Versagen der Schraube möglich ist, müssen bestimmte Holzdecken und Einschraubtiefen, wie in Abbildung 3 gezeigt, eingehalten werden. Diese erforderlichen Holzdecken $t_{1,erf}$ bzw. Einschraubtiefen s_{erf} lassen sich für die einschnittigen Verbindungen gleich wie für Stabdübel ermitteln, wobei die Einschraubtiefe s_{erf} der Schraubenspitze in Holz 2 der erforderlichen Holzdicke $t_{2,erf}$ entspricht. Bei Stahl-Holz Verbindungen ist für das Verhältnis der Lochleibungsfestigkeiten ersatzweise $\beta_f = 1$ anzusetzen.

$$t_{1,erf} = 1.15 \left(2 \sqrt{\frac{\beta_f}{1 + \beta_f}} + 2 \right) \sqrt{\frac{M_{u,k}}{f_{h,1,k} d}} \quad (6)$$

$$s_{erf} = 1.15 \left(2 \sqrt{\frac{1}{1 + \beta_f}} + 2 \right) \sqrt{\frac{M_{u,k}}{f_{h,2,k} d}} \quad (7)$$

Werden die erforderliche Holzdicke bzw. Einschraubtiefe unterschritten, so ist der Tragwiderstand auf Abscheren mit dem kleineren der beiden Verhältniswerte proportional abzumindern. Dabei müssen jedoch die Mindestholzdecken eingehalten werden.

Für die Schrauben mit geschnittenem Gewinde nach DIN 7998 und für Schrauben mit gewaltem oder geschmiedetem Gewinde können die für die vereinfachten Bemessungsansätze verwendeten Annahmen bezüglich des Biege- und Lochleibungswiderstandes, der Lochleibungsfestigkeiten sowie der rechnerisch wirksamen Schraubendurchmesser übernommen werden. Damit ergeben sich auf der sicheren Seite die in Tabelle 2 angegebenen Werte.

Tabelle 2: Holzdecken und Einschraubtiefen für Vollholz und Brettchichtholz

	Erforderliche Holzdicke t_{erf}	Erforderliche Einschraubtiefe s_{erf}	Mindestholzdicke t	Mindesteinschraubtiefe s
vorgebohrt	$9d$	$9d$	$7d$	$6d$
nicht vorgebohrt	$9d$	$9d$	max [$4d; 24 \text{ mm}$]	$6d$

Um ein Aufspalten des Holzes zu vermeiden, müssen minimale Abstände zwischen den Schrauben in einer Verbindung und zu den Rändern des Bauteils eingehalten werden. Für grosse Verhältnisse von Gewindekern- zu Gewindeaussendurchmesser $d_1/d > 0.75$ können diese Abstände äquivalent zu denen von Nagelverbindungen angenommen werden. Die Werte sind in Tabelle 24 bzw. Tabelle 29 der Norm SIA 265:2011 Teilrevisionsfassung zu finden. Für kleinere Verhältnisse von Gewindekern- zu Gewindeaussendurchmesser von $d_1/d \leq 0.75$ können die Abstände um etwa 20% reduziert werden.

Bei einer axialen Belastung muss das Gewinde der Schraube ausreichend weit in das entsprechende Holzteil eingreifen, um die notwendige Kraft übertragen zu können. Die wirksame Gewindelänge l_{ef} muss daher mindestens $6d$ betragen. Dies gilt auch für die Belastung auf Abscheren, wenn die Seilwirkung angesetzt werden soll.

Axiale Belastung

Bei einer Belastung in axialer Richtung sind verschiedene Versagensarten möglich. Es kann zu einem Versagen im Holz, im Stahl, in der Scherfuge zwischen den beiden Materialien oder einem Stabilitätsversagen kommen. Ein globales Versagen des Holzes, z.B. ein Abscheren oder Ausziehen eines gesamten Blockes, kann allein mit den Festigkeiten des Holzes bemessen werden. Es kann durch die Wahl ausreichend grosser Abstände der Verbindungsmittel untereinander sowie zu den Rändern des Holzes ausgeschlossen werden. Ebenso wird ein Versagen des Stahls, z.B. ein Überschreiten der Zugfestigkeit in axialer Richtung oder einem Abreißen des Schraubenkopfes, allein durch die Stahleigenschaften bestimmt.

Ein Stabilitätsversagen mit einem Ausknicken der Schraube kann auftreten, wenn die Schraube in axialer Richtung durch eine Druckkraft belastet wird und die Schlankheit der Schraube zu gross ist bzw. die seitliche Bettung der Schraube im Holz zu gering ist.

Ein Versagen der Scherfuge zwischen Holz und Schraube kann durch ein Ausziehen bzw. Eindringen der Schraube in Schaftrichtung auftreten, auch in Kombination mit einem Durchziehen des Schraubenkopfes.

Auszieh widerstand

Der Auszieh widerstand wird durch den Verbund zwischen Gewinde und Holz bestimmt. Mit einem sinkenden Verhältnis von Gewindekern- zu Gewindeaussendurchmesser kommt es zu einer steigenden Verzahnung der Schraube mit dem Holz. Daraus ergibt sich die Ausziehfestigkeit der Schraube. Für die Schrauben mit einem Verhältnis von Gewindekern- zu Gewindeaussendurchmesser $d_1/d = 0.6-0.75$ und einem Nenndurchmesser $d = 6-12$ mm wurde eine empirische Formel für die charakteristische Ausziehfestigkeit gefunden.

$$f_{ax,k} = 0.52 d^{-0.5} l_{ef}^{-0.1} \rho_k^{0.8} \quad (8)$$

Für abweichende Schraubenarten ist die charakteristische Ausziehfestigkeit über den charakteristischen Ausziehparameter nach EN 14592 bzw. EN 1382 [16] zu ermitteln. In Versuchen, wie in EN 1382 beschrieben, wird der Parameter aus der maximalen Ausziehlast, dividiert durch die wirksame Gewindelänge und den Nenndurchmesser bestimmt. Werden in der Verbindung andere Holzarten als in den Versuchen verwendet, so ist dieser Parameter gegebenenfalls durch einen Faktor aus dem Verhältnis aus Holzart in der Verbindung und geprüfter Holzart zu korrigieren.

Aus dem charakteristischen Auszieh widerstand $f_{ax,k}$ kann der Bemessungswert der Scherfestigkeit auf Ausziehen $f_{v,\alpha,d}$ bestimmt werden. Dieser berücksichtigt vor allem den Winkel zwischen der Kraft- und Faserrichtung α . Es ist zu beachten, dass die Formel nur für Kraft-Faser Winkel $\alpha \geq 30^\circ$ gültig ist. Kleinere Kraft-Faser Winkel sind nicht zulässig, da die Robustheit der Verbindung aufgrund möglicher Risse längs zur Faserrichtung nicht gewährleistet werden kann. Das Versagen bei einem Ausziehen der Schraube findet im Holz statt. Daher muss für die Ermittlung der Bemessungswerte der Widerstandbeiwert des Holzes $\gamma_M = 1.3$ angesetzt werden. Es ergibt sich damit für eine mittlere Lasteinwirkungsdauer und Feuchteklasse 1 ein Beiwert $k_\alpha = \eta_{mod}/\gamma_M = 0.62$.

$$f_{v,\alpha,d} = \frac{k_\alpha k_d f_{ax,k}}{\pi (\sin^2 \alpha + 1.2 \cos^2 \alpha)} \quad (9)$$

Der charakteristische Auszieh widerstand wird für einen Nenndurchmesser von $d = 8$ mm ermittelt. Für geringere Schraubendurchmesser ist der Bemessungswert der Scherfestigkeit mit einem Abminderungsfaktor k_d proportional abzumindern.

Der Tragwiderstand der Schraube wird aus der Scherfestigkeit und der wirksamen Übertragungsfläche im Gewindebereich bestimmt. Diese ergibt sich aus der Hüllfläche um den Gewindeteil mit dem Nenndurchmesser d der Schraube und der Gewindelänge l_{ef} im entsprechenden Bauteil. Für eine Schraubengruppe wird eine Abminderung der effektiven Anzahl n_{tot} durch den Exponenten 0.9 vorgenommen. Es ist eine wirksame Gewindelänge von mindestens $l_{ef} = 6d$ einzuhalten.

$$R_{ax,d} = n_{tot}^{0.9} (\pi d l_{ef}) f_{v,\alpha,d} \quad (10)$$

Bei Anwendung von Formel (10) ist zu beachten, dass bei Holz-Holz Verbindungen der Tragwiderstand durch ein Ausziehen der Schraube aus dem Holz an der Schraubenspitze oder aber durch ein Durchziehen der Schraube durch das Holz an der Schraubenkopfseite erreicht werden kann. Beide Versagensfälle sind auf den massgebenden Fall hin zu untersuchen. Je nach Ausbildung des Schraubenkopfes kann jedoch bei einem Durchziehen der Schraube durch das Holz auf der Schraubenkopfseite neben dem Auszieh widerstand des Gewindeteils auch noch der Kopfdurchzieh widerstand des Schraubenkopfes angesetzt werden.

Kopfdurchzieh Widerstand

Der Widerstand gegen ein Durchziehen des Schraubenkopfes durch das Holz hängt massgeblich von der Form des Schraubenkopfes ab. Neben dem Durchmesser des Schraubenkopfes ist auch dessen Form entscheidend. Als günstig erweisen sich hier grosse Kopfdurchmesser mit einem abgeflachten Kopf. Angeschrägte Schraubenköpfe, wie Senkköpfe, haben den Vorteil, dass sie versenkt werden können und so eine ebene Holzoberfläche ergeben. Daraus ergibt sich jedoch ein niedrigerer Kopfdurchzieh Widerstand.

Da die Form des Schraubenkopfes stark variieren kann, ist der Kopfdurchziehparameter den Herstellerangaben zu entnehmen. Dieser wird nach EN 14592 bzw. EN 1383 [17] aus der maximalen Durchziehlast dividiert durch das Quadrat des Kopfdurchmessers berechnet. Für die Schrauben mit einem geschnittenen Gewinde nach DIN 7998 ist der Kopfdurchziehparameter in DIN 1052:2008-12 auf der sicheren Seite liegend in Formel (11) angegeben.

$$f_{head,k} = 60 \cdot 10^{-6} \rho_k^2 \quad (11)$$

Der Bemessungswert des Kopfdurchzieh Widerstands ergibt sich aus dem Kopfdurchziehparameter unter Berücksichtigung einer Abminderung für mehrere in einer Verbindung wirkender Schrauben. Unterschiedliche Rohdichten im Versuch ρ_a und in der Ausführung ρ_k müssen dabei berücksichtigt werden.

$$R_{ax,d} = k_\alpha n_{tot}^{0,9} f_{head,k} d_h^2 \left(\frac{\rho_k}{\rho_a} \right)^{0,8} \quad (12)$$

Ist ein hoher Kopfdurchzieh Widerstand gefordert, so kann dieser auch durch die Verwendung von geeigneten Unterlegscheiben erhöht werden.

Druckbelastung

Schrauben können in axialer Richtung auf Druck belastet werden. Dies wird genutzt um die Schrauben als Verstärkung für die geringe Druckfestigkeit des Holzes zu verwenden. Damit können zum Beispiel kleine Auflagerflächen erreicht oder punktuell grosse Lasten eingebracht werden. Bei Erreichen des Tragwiderstands können dabei verschiedene Versagensmechanismen ausgemacht werden.

- Werden kurze Schrauben benutzt, können diese bei Überschreitung der Scherfestigkeit eingedrückt werden. Dabei kann dieselbe Scherfestigkeit auf Druck wie auf Zug angesetzt werden.
- Längere Schrauben, bei denen die Scherfestigkeit ausreichend gross ist, können unter Druckbelastung knicken. Dabei ist die elastische Bettung der Schrauben im Holz zu berücksichtigen. Experimentelle Untersuchungen und numerische Berechnungen sind unter anderem in [18] und [19] beschrieben.
- Schliesslich kann es noch zu einem globalen Versagen infolge Überschreitung der Druckfestigkeit senkrecht zur Faser im Holz kommen. Dabei wird der gesamte verstärkte Bereich in das Holz eingedrückt.

Vereinfachte Bemessungsverfahren

Mit den oben beschriebenen Formeln aus dem Anhang A 2 der Norm SIA 265:2011 Teilrevisionsfassung kann der Tragwiderstand verschiedenster Schraubenarten bestimmt werden. Den Erfordernissen der Praxis mit ihrer Vielzahl an Schraubenarten für zum Teil spezielle Aufgaben wird damit Rechnung getragen. Um die Anwenderfreundlichkeit zu steigern, lassen sich die umfangreichen Formeln für die häufig vorkommenden Schraubenarten vereinfachen. In Ziffer 6.5.2 der Norm SIA 265:2011 Teilrevisionsfassung sind daher vereinfachte Berechnungsverfahren für den Tragwiderstand rechtwinklig zur Schaftrichtung angegeben. Deren Herleitung soll an dieser Stelle erläutert werden.

Die einflussnehmenden Parameter auf den Tragwiderstand rechtwinklig zur Schaftrichtung können durch Umformen von Formel (1) aus dem Tragwiderstand pro Schraube und Schnitt ermittelt werden.

$$R_{d,Verb} = R_{d,Absch} + \Delta R_{d,Seilw} = k_{\alpha} k_{\beta} \sqrt{0.3 f_{u,k} f_{h,k}} d_{ef}^{1.8} + \Delta R_{d,Seilw} \quad (13)$$

Die Beiwerte k_{α} und k_{β} sind für die Bemessungswerte bei Annahme gleicher Lochleibungsfestigkeiten der zu verbindenden Hölzer bzw. für Stahl-Holz Verbindungen konstant. Entscheidenden Einfluss auf den Tragwiderstand auf Abscheren hat die Zugfestigkeit der Schraube $f_{u,k}$, die Lochleibungsfestigkeit des Holzes $f_{h,k}$ und der rechnerisch wirksame Schraubendurchmesser d_{ef} . Die Lochleibungsfestigkeit des Holzes ist ihrerseits wiederum anhängig von der Rohdichte des Holzes ρ_k und dem rechnerisch wirksamen Schraubendurchmesser d_{ef} . Darüber hinaus nimmt sie für vorgebohrte und nicht vorgebohrte Schrauben und je nach Kraft- zu Faserrichtung unterschiedliche Werte an. Das vereinfachte Bemessungsverfahren wird daher auf Verbindungen in Nadelholz und gleiche charakteristische Rohdichten bei Holz-Holz Verbindungen beschränkt. Der Anteil der Seilwirkung hängt bei Einhaltung der wirksamen Gewindelänge vom Nenndurchmesser der Schraube d , vom charakteristischen Wert der Rohdichte des Holzes ρ_k sowie von der Ausbildung des Schraubenkopfes und dem Kopfdurchziehparameter ab.

Für Schrauben bei denen die Stahlqualitäten, Schraubendurchmesser d_{ef} bzw. d sowie die Ausbildung des Schraubenkopfes ähnlich sind, können daher Vereinfachungen an Formel (13) vorgenommen werden.

Die Schrauben mit einem geschnittenen Gewinde nach DIN 7998 sind umfassend genormt und besitzen weitgehend identische Eigenschaften. Für Schrauben mit einem gewalzt oder geschmiedetem Gewinde müssen bestimmte Einschränkungen gemacht werden, damit auch für sie vereinfachte Bemessungsansätze gebildet werden können.

Schrauben mit geschnittenem Gewinde nach DIN 7998

Das Gewinde und die Durchmesser der Schrauben mit geschnittenem Gewinde sind in der DIN 7998 genau spezifiziert. Die Schrauben haben ein Verhältnis von Gewindekern- zu Gewindeaussendurchmesser von $d_1/d = 0.7$ bzw. 0.75 . Auf der sicheren Seite liegend wird für diese Schrauben bei den weiteren Betrachtungen ein Verhältnis von 0.7 angenommen. Der effektive Durchmesser ergibt sich damit abhängig von der Lage der Scherfuge zu $d_{ef} = d$ im Schaft und $d_{ef} = 0.77d$ im Gewindebereich.

Da die Schrauben stets vorzubohren sind, kann die Lochleibungsfestigkeit abhängig von der Lage der Scherfuge bestimmt werden. Es ergeben sich als Mittelwert zwischen Schraubendurchmessern von $d = 4$ mm und $d = 16$ mm die in Tabelle 3 angegebenen Lochleibungsfestigkeiten.

Tabelle 3: Lochleibungsfestigkeit $f_{h,k}$ für Schrauben mit geschnittenem Gewinde nach DIN 7998 ($f_{h,k}$ in N/mm^2 , ρ_k in kg/m^3 , d_{ef} in mm)

Lage der Scherfuge	Kraftrichtung parallel zur Faser	Kraftrichtung senkrecht zur Faser
	$f_{h,0,k} = 0.082(1 - 0.01d_{ef})\rho_k$	$f_{h,90,k} = \frac{f_{h,0,k}}{1.35 + 0.015d_{ef}}$
Schaft	$f_{h,0,k} = 0.0738\rho_k$	$f_{h,90,k} = 0.0496\rho_k$
Gewindebereich	$f_{h,0,k} = 0.0753\rho_k$	$f_{h,90,k} = 0.0514\rho_k$

Gemäss den Angaben in der DIN 1052:2008-12 kann für Schrauben mit geschnittenem Gewinde nach DIN 7998 ein charakteristischer Wert der Ausziehfestigkeit von $f_{ax,k} = 70 \cdot 10^{-6} \rho_k^2 \text{ N/mm}^2$ mit ρ_k in kg/m^3 angesetzt werden. Für Holz-Holz Verbindungen beträgt für diese Schrauben der charakteristische Kopfdurchziehparameter $f_{head,k} = 60 \cdot 10^{-6} \rho_k^2 \text{ N/mm}^2$. Die wirksame Gewindelänge von $l_{ef} = 6d$ muss dabei eingehalten werden. Damit lassen sich in Vergleichsrechnungen die Verhältnisse zwischen den Tragwiderständen auf Abscheren und in axialer Richtung bestimmen. Es ist dabei zwischen Holz-Holz und Stahl-Holz Verbindungen zu unterscheiden. Bei Stahl-Holz Verbindungen befindet sich der Schraubenkopf im Stahlteil, sodass der Kopfdurchziehparameter als ausreichend gross angenommen werden kann. In Richtung der Schraubenachse ist daher nur der Ausziehparameter zu berücksichtigen. Im Gegensatz dazu sind für die Holz-Holz Verbindungen

bei Einhaltung der wirksamen Gewindelänge die Kopfdurchziehkräfte massgebend. Es kann daher für die Holz-Holz Verbindung nur eine geringere Seilwirkung angesetzt werden. Im Mittel kann der Tragwiderstand auf Abscheren durch die Seilwirkung um die in Tabelle 4 angegebenen Anteile erhöht werden.

Tabelle 4: Erhöhung des Tragwiderstands auf Abscheren infolge des Effektes der Seilwirkung

	Kraftrichtung parallel zur Faser	Kraftrichtung senkrecht zur Faser
Holz-Holz Verbindung		
Scherfuge im Schaft	9%	11%
Scherfuge im Gewinde	14%	17%
Stahl-Holz Verbindung		
Scherfuge im Schaft	30%	37%
Scherfuge im Gewinde	45%	54%

Mit der Mindestzugfestigkeit $f_{u,k} = 400 \text{ N/mm}^2$ können daraus die Tragwiderstände für Schrauben mit geschnittenem Gewinde nach DIN 7998 in Abhängigkeit des Nenndurchmessers d und dem charakteristischen Wert der Holzdichte ρ_k bestimmt werden.

Tabelle 5: Bemessungswerte des Tragwiderstands rechtwinklig zur Schaftrichtung R_d von Schrauben mit geschnittenem Gewinde nach DIN 7998 (R_d in N, ρ_k in kg/m^3 , d in mm)

	Kraftrichtung parallel zur Faser	Kraftrichtung senkrecht zur Faser
Holz-Holz Verbindung		
Scherfuge im Schaft	$R_d = 3.3\rho_k^{0.5}d^{1.8}$	$R_d = 2.8\rho_k^{0.5}d^{1.8}$
Scherfuge im Gewinde	$R_d = 2.2\rho_k^{0.5}d^{1.8}$	$R_d = 1.9\rho_k^{0.5}d^{1.8}$
Stahl-Holz Verbindung		
Scherfuge im Schaft	$R_d = 4.0\rho_k^{0.5}d^{1.8}$	$R_d = 3.4\rho_k^{0.5}d^{1.8}$
Scherfuge im Gewinde	$R_d = 2.8\rho_k^{0.5}d^{1.8}$	$R_d = 2.5\rho_k^{0.5}d^{1.8}$

Schrauben mit gewalztem oder geschmiedetem Gewinde

Die Schrauben mit einem gewalzten oder geschmiedeten Gewinde sind hinsichtlich der Ausbildung des Gewindes, des Schraubenkopfes, der Schraubenspitze etc. nicht genau spezifiziert. Wenn die Parameter auf die massgebenden häufig vorkommenden Werte beschränkt werden, können dennoch vereinfachte Bemessungsregeln erstellt werden.

Die Durchmesserhältnisse von Gewindekern- zu Gewindeaussendurchmesser wurden auf der sicheren Seite mit $d_1/d \geq 0.65$ angenommen. Da das Gewinde nicht in den Walzdraht eingeschnitten ist, ist der Durchmesser des Schaftes der Schraube etwa gleich gross wie der Gewindekerndurchmesser. Eine Unterscheidung hinsichtlich der Lage der Scherfuge ist daher nicht notwendig.

Werden die Schrauben mit geschnittenem Gewinde vorgebohrt, so ergibt sich nur eine sehr geringe Abhängigkeit der Lochleibungsfestigkeit vom Nenndurchmesser. Es kann daher vereinfacht eine mittlere Lochleibungsfestigkeit angesetzt werden. Werden die Schrauben dagegen vorgebohrt, geht der Nenndurchmesser direkt als Faktor in die Lochleibungsfestigkeit ein. In der weiteren Berechnung kann er daher direkt berücksichtigt werden.

Tabelle 6: Lochleibungsfestigkeit $f_{h,k}$ von Schrauben mit gewalztem oder geschmiedetem Gewinde ($f_{h,k}$ in N/mm^2 , ρ_k in kg/m^3 , d in mm)

	Kraftrichtung parallel zur Faser	Kraftrichtung senkrecht zur Faser
vorgebohrt	$f_{h,0,k} = 0.0769\rho_k$	$f_{h,90,k} = 0.0534\rho_k$
nicht vorgebohrt	$f_{h,k} = 0.091d^{-0.3}\rho_k$	

Durch die Unterscheidung in vorgebohrte und nicht vorgebohrte Schrauben ergeben sich für den Tragwiderstand auf Abscheren ohne Einfluss der Seilwirkung für den Nenndurchmesser unterschiedliche Exponenten von 1.8 bzw. 1.65. Da die Schrauben mit einem gewalzten oder geschmiedeten Gewinde aus hohen Stahlqualitäten hergestellt werden, kann für sie eine Stahlzugfestigkeit von $f_{u,k} = 800 \text{ N/mm}^2$ vorausgesetzt werden.

Tabelle 7: Bemessungswerte des Tragwiderstands auf Abscheren $R_{d,Absch}$ von Schrauben mit gewalzttem oder geschmiedetem Gewinde ($R_{d,Absch}$ in N, ρ_k in kg/m^3 , d in mm)

	Krafrichtung parallel zur Faser	Krafrichtung senkrecht zur Faser
vorgebohrt	$R_{d,Absch} = 2.41\rho_k^{0.5}d^{1.8}$	$R_{d,Absch} = 2.01\rho_k^{0.5}d^{1.8}$
nicht vorgebohrt	$R_{d,Absch} = 2.62\rho_k^{0.5}d^{1.65}$	

Der absolute Wert der Seilwirkung wird nicht durch eine Vorbohrung der Schraube beeinflusst. Bei Einhaltung der minimalen wirksamen Gewindelänge haben der Nenndurchmesser und die Ausbildung des Schraubenkopfes den entscheidenden Einfluss auf die Anteil der Seilwirkung. Für die Schrauben mit einem gewalzten oder geschmiedeten Gewinde wird ein Kopfdurchziehparameter von $f_{head,k} = 80 \cdot 10^{-6} \rho_k^2 \text{ N/mm}^2$ angesetzt. Bei der Bestimmung des Effektes der Seilwirkung für die nicht vorgebohrten Schrauben ist der geringere Exponent von 1.65 des Nenndurchmessers zu beachten. Die in Tabelle 8 angegebenen mittleren Werte des Tragwiderstands auf Abscheren ergeben sich daher für einen mittleren Nenndurchmesser von $d = 8 \text{ mm}$.

Tabelle 8: Erhöhung des Tragwiderstands auf Abscheren infolge des Effektes der Seilwirkung

	Krafrichtung parallel zur Faser	Krafrichtung senkrecht zur Faser
Holz-Holz Verbindung		
vorgebohrt	15%	18%
nicht vorbohrt	19%	
Stahl-Holz Verbindung		
vorgebohrt	44%	53%
nicht vorgebohrt	54%	

Damit ergibt sich für Schrauben mit gewalzttem oder geschmiedetem Gewinde der in Tabelle 9 angegebene Tragwiderstand rechtwinklig zur Schafrichtung.

Tabelle 9: Bemessungswerte des Tragwiderstands rechtwinklig zur Schafrichtung R_d von Schrauben mit gewalzttem oder geschmiedetem Gewinde (R_d in N, ρ_k in kg/m^3 , d in mm)

	Krafrichtung parallel zur Faser	Krafrichtung senkrecht zur Faser
Holz-Holz Verbindung		
vorgebohrt	$R_d = 2.8\rho_k^{0.5}d^{1.8}$	$R_d = 2.4\rho_k^{0.5}d^{1.8}$
nicht vorgebohrt	$R_d = 3.1\rho_k^{0.5}d^{1.65}$	
Stahl-Holz Verbindung		
vorgebohrt	$R_d = 3.5\rho_k^{0.5}d^{1.8}$	$R_d = 3.1\rho_k^{0.5}d^{1.8}$
nicht vorgebohrt	$R_d = 4.0\rho_k^{0.5}d^{1.65}$	

Mit den in Tabelle 5 und in Tabelle 9 angegebenen Bemessungswerten des Tragwiderstands rechtwinklig zur Schafrichtung R_d einer einzelnen Schraube kann unter Berücksichtigung der Abminderung des Tragwiderstands für mehrere in Faserrichtung hintereinanderliegender Schrauben der Tragwiderstand einer gesamten Schraubengruppe bestimmt werden.

$$R_{d,Verb} = k_{red} n_{tot} R_d \quad (14)$$

Der Reduktionsbeiwert k_{red} ist in Ziffer 6.1.4.6 der Norm SIA 265:2011 Teilrevisionsfassung angegeben, n_{tot} ist die Gesamtanzahl der in der Verbindung wirkenden Schrauben.

Hinweise

In der Planung und Ausführung von Schraubenverbindungen sind für alle Schraubentypen einige Dinge zu beachten:

- Wird eine Schraube in das Holz eingedreht, kommt es zu Querspannungen im Holz. Da die Zugfestigkeit senkrecht zur Faser sehr gering ist, kann das Holz im Bereich der Schraube aufreißen. Um dies zu vermeiden muss die Schraube gegebenenfalls vorgebohrt werden.

- Für Schrauben nach DIN 7998 ist mit dem Schaftdurchmesser bzw. dem Gewindekern-durchmesser vorzubohren. Bei Schrauben mit einem gewalzten oder geschmiedeten Ge-winde ist gegebenenfalls mit dem Gewindekerndurchmesser vorzubohren.
- Im Hirnholz kann es infolge von Feuchtewechseln schnell zu Rissbildung kommen. Die Tragsicherheit von Schrauben im Hirnholz kann langfristig nicht gewährleistet werden. Schrauben im Hirnholz sollten daher vermieden werden. Es ist jedoch möglich die Schrau-ben unter einem Winkel zur Faserrichtung des Holzes einzuschrauben. Für Verbindungen in Feuchtekategorie 1 mit Schrauben mit gewalztem oder geschmiedetem Gewinde kann bei Einhaltung eines Kraft-Faserwinkels von mindestens $\alpha = 30^\circ$ und einer Einschraubtiefe von mehr als 100 mm der Tragfähigwiderstand der Schrauben auf Ausziehen voll angesetzt werden.

Literatur:

- [1] SIA- Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, *Norm SIA 265:2003 - Holzbau*. 2003, SIA: Zürich, Schweiz.
- [2] SIA- Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, *Norm SIA 164:1992 - Holzbau*. 1992, SIA: Zürich, Schweiz.
- [3] CEN- European Committee for Standardization, *EN 1995-1-1: Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings*. 2004, CEN: Bruxelles, Belgium.
- [4] DIN- Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN 7998: Gewinde und Schraubenenden für Holzschrauben*. 1975, Beuth Verlag GmbH: Berlin, Deutschland.
- [5] DIN- Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN 95: Linsensenk-Holzschrauben mit Schlitz*. 2010, Beuth Verlag GmbH: Berlin, Deutschland.
- [6] DIN- Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN 7995: Linsensenk-Holzschrauben mit Kreuzschlitz*. 2010, Beuth Verlag GmbH: Berlin, Deutschland.
- [7] DIN- Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN 96: Halbrund-Holzschrauben mit Schlitz*. 2010, Beuth Verlag GmbH: Berlin, Deutschland.
- [8] DIN- Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN 7996: Halbrund-Holzschrauben mit Kreuzschlitz*. 2010, Beuth Verlag GmbH: Berlin, Deutschland.
- [9] DIN- Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN 97: Senk-Holzschrauben mit Schlitz*. 2010, Beuth Verlag GmbH: Berlin, Deutschland.
- [10] DIN- Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN 7997: Senk-Holzschrauben mit Kreuzschlitz*. 2010, Beuth Verlag GmbH: Berlin, Deutschland.
- [11] DIN- Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN 571: Sechskant-Holzschrauben*. 2010, Beuth Verlag GmbH: Berlin, Deutschland.
- [12] CEN- European Committee for Standardization, *EN 14592: Holzbauwerke -Stiftförmige Verbindungsmittel - Anforderungen*. 2008, CEN: Bruxelles, Belgium.
- [13] Johansen, K.W., *Theory of Timber Connections*. IABSE publications, 1949. **9**: p. 249-262.
- [14] SIA- Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, *Norm SIA 265:2011 - Holzbau, Teilrevision Entwurf 9.0 (15.01.2011)*. 2011, SIA: Zürich, Schweiz.
- [15] DIN- Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN 1052: Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken - Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau*. 2008, Beuth Verlag GmbH: Berlin, Deutschland.
- [16] CEN- European Committee for Standardization, *EN 1382: Holzbauwerke - Prüfverfahren - Ausziehbarkeit von Holzverbindungsmittein*. 1999, CEN: Bruxelles, Belgium.
- [17] CEN- European Committee for Standardization, *EN 1383: Holzbauwerke - Prüfverfahren - Prüfung von Holzverbindungsmittein auf Kopfdurchziehen*. 1999, CEN: Bruxelles, Belgium.
- [18] Bejtka, I. and H.J. Blaß. *Self-tapping screws as reinforcements in beam supports*. in *CIB-W18 Meeting 39*. 2006. Florence, Italy.
- [19] Bejtka, I., *Verstärkung von Bauteilen aus Holz mit Vollgewindeschrauben*. 2005, Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften, Universität Karlsruhe.