

Selbstbohrende Schrauben als Verstärkung in querzugbeanspruchten Bereichen ausgeklinkter Träger

Self-tapping screws as reinforcement in areas of recessed beams under transverse shear loads

Les vis autoforeuses utilisées comme renfort pour juguler les entailles de panneaux soumis à une sollicitation latérale

Robert Jockwer
Empa, Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology
Structural Engineering Research Laboratory
CH-Dübendorf



Selbstbohrende Schrauben als Verstärkung in querzugbeanspruchten Bereichen ausgeklinkter Träger

1. Einleitung

Holz hat aufgrund seiner natürlichen Struktur ein stark anisotropes Materialverhalten. Grundsätzlich kann zwischen hervorragenden Festigkeiten und Steifigkeiten in Faserrichtung des Holzes und nur sehr geringen Festigkeiten und Steifigkeiten rechtwinklig zur Faserrichtung unterschieden werden. Bei Zugbeanspruchungen rechtwinklig zur Faserrichtung tritt ein sprödes Versagen bereits bei geringen Beanspruchungen auf. Des Weiteren liegen große Streuungen der Festigkeiten vor. Für eine wirtschaftliche Bemessung sollte eine planmäßige Beanspruchung auf Querzug daher grundsätzlich vermieden werden. Querzugbeanspruchungen treten an bestimmten Details wie etwa an abrupten Querschnittsänderungen bei Ausklinkungen auf.

Im Bereich der Ausklinkungsecke wird durch die Querschnittsänderung der Verlauf der Spannungen umgeleitet und es kommt zu Konzentrationen der Zugspannungen senkrecht zur Faser und der Schubspannungen. Die Folge ist eine frühzeitige Rissbildung in der Ausklinkungsecke bereits bei geringen Lasten und darauf folgend ein schlagartiges, sprödes Versagen des Trägers.

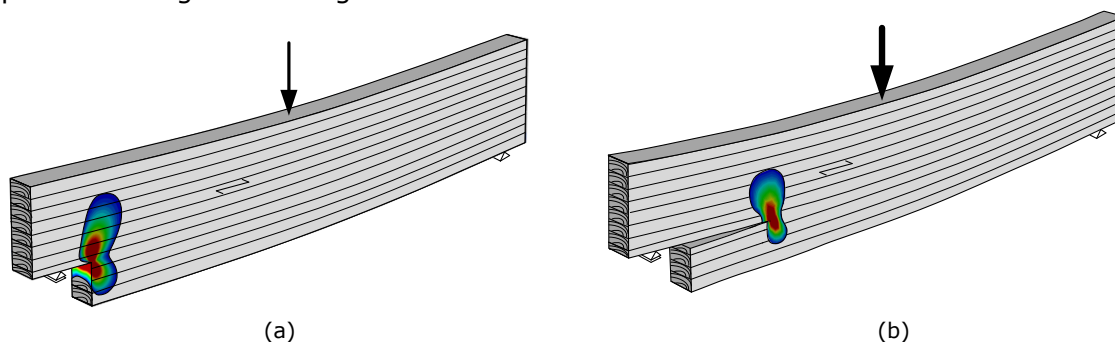


Abbildung 1: Konzentration der Zugspannungen senkrecht zur Faser an der Ausklinkungsecke des ungerissenen Trägers (a) und Spannungskonzentration an der Risspitze während des fortschreitenden Risses (b).

1.1. Bemessungsansätze für unverstärkte Ausklinkungen

Der Tragwiderstand eines Trägers aus Brettschichtholz (BSH) wird durch die Ausklinkung stark reduziert. Der Effekt der Spannungskonzentration und die daraus folgende Reduzierung des Tragwiderstands muss daher durch die Verwendung eines geeigneten Ansatzes bei der Bemessung berücksichtigt werden.

Die herkömmlichen Bemessungsansätze für ausgeklinkte Träger basieren auf einer Verringerung des Schubtragwiderstands des reduzierten Querschnitts bah durch den Reduktionsfaktor k_v :

$$\tau_d = 1.5 \frac{V_d}{\alpha h b} \leq k_v \cdot f_{v,d} \quad (1)$$

Ein sehr einfacher Vorschlag für den Reduktionsfaktor wurde von Scholten (1935) basierend auf einer Versuchsserie entwickelt:

$$k_v = \alpha^2 \quad (2)$$

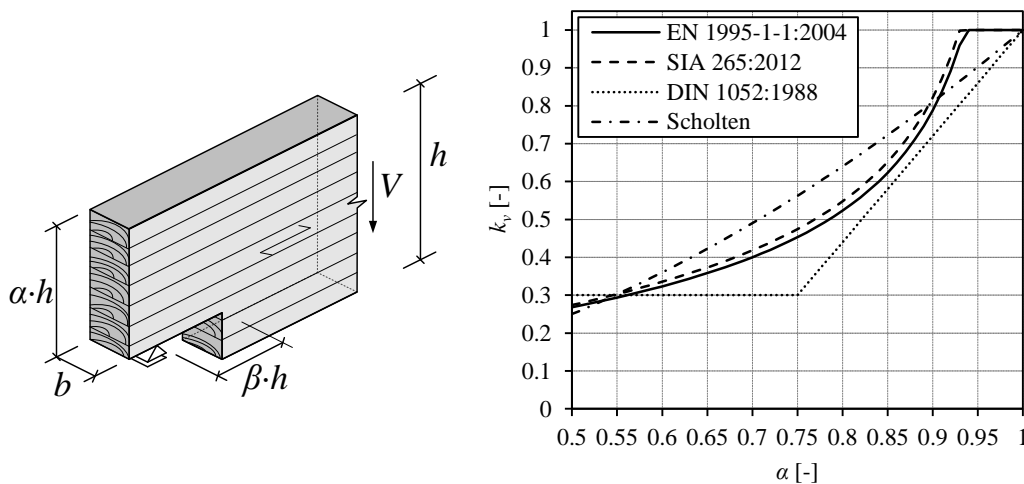


Abbildung 2: Geometrische Parameter des ausgeklinkten Trägers sowie Abminderungsfaktor k_v der Schubfestigkeit am reduzierten Querschnitt bah eines BSH-Trägers mit $h = 600$ mm.

Außerdem schlug Scholten vor, die Ausklinkungsecke auszurunden und so die Spannungskonzentration zu vermindern um Tragwiderstand zu erhöhen.

In den 1970er Jahren wurde von Mistler (1979) auf Grundlage einer sehr umfangreichen Versuchsserie und eines statistischen Modells ein bilinearer Ansatz entwickelt. Dieser wurde im Jahr 1988 in die deutsche Holzbau Norm DIN 1052 aufgenommen.

$$k_v = \begin{cases} 0.3 & \text{für } \alpha \leq 0.75 \\ 1 - 2.8(1 - \alpha) & \text{für } \alpha > 0.75 \end{cases} \quad (3)$$

Einen Bemessungsansatz auf Grundlage der Bruchmechanik wurde Ende der 1980er Jahre von Gustafsson (1988) entwickelt. In diesem Ansatz wird eine Vielzahl an geometrischen Parametern berücksichtigt. Durch weitere umfangreiche Versuchsserien, unter anderem an angeschrägten Ausklinkungen, konnte der Ansatz verifiziert und darüber hinaus erweitert werden. Dieser Bemessungsansatz fand im Jahre 2004 schließlich Einzug in die Europäische Holzbau Norm EN 1995-1-1 (2004):

$$k_v = \frac{k_n \left(1 + \frac{1.1i^{1.5}}{\sqrt{h}} \right)}{\sqrt{h} \left(\sqrt{\alpha - \alpha^2} + 0.8\beta \sqrt{\frac{1}{\alpha} - \alpha^2} \right)} \leq 1 \quad \text{mit} \quad \begin{matrix} k_n = 5 & \text{für VH} \\ k_n = 6.5 & \text{für BSH} \end{matrix} \quad (4)$$

In der Schweizer Holzbau Norm SIA 265 (2012) ist für quadratische Ausklinkungen eine Vereinfachung des Ansatzes aus EN 1995-1-1 angegeben:

$$k_v = \sqrt{\frac{\alpha}{1 - \alpha}} \Delta h_0 \leq 1 \quad \text{mit} \quad \begin{matrix} \Delta h_0 = 25 & \text{für VH} \\ \Delta h_0 = 45 & \text{für BSH} \end{matrix} \quad (5)$$

In Abbildung 2 ist die Reduktion des Schubtragwiderstands am reduzierten Querschnitt anhand der verschiedenen Ansätze für eine quadratische Ausklinkung eines BSH-Trägers der Höhe $h = 600$ mm aufgetragen. Es zeigt sich, dass alle hier aufgeführten Ansätze eine ähnliche, mit größer werdender Ausklinkungshöhe erhebliche, Verringerung des Schubtragwiderstands bewirken.

1.2. Bewertung der Tragwiderstands unverstärkter Ausklinkungen

Im bruchmechanischen Bemessungsansatz in EN 1995-1-1 (2004) wird die Festigkeit des Holzes durch einen Parameter auf Grundlage der Bruchenergie berücksichtigt. Die Bruchenergie wird für den Versagensmodus der Rissöffnung an fehlerfreien Kleinproben bestimmt. Der Vergleich mit Versuchen an ausgeklinkten Trägern größeren Querschnitts zeigt jedoch, dass die Streuung in den Tragwiderständen nicht allein durch die Streuung

der Bruchenergie beschrieben werden kann. So werden der Anriss und das Versagen von Trägersausklinkungen maßgeblich durch Holzcharakteristika wie Faserabweichungen, Schwindrisse oder auch Äste beeinflusst. Weitere Parameter, wie wechselnde Holzfeuchte, Volumeneffekte und auch die Ausführungsdetails der Ausklinkung, haben einen Einfluss im realen Bauteil.

Zur Wahrung der in der Norm angestrebten Sicherheiten müssen für die Bemessung darum konservative Bemessungswerte gewählt werden. Anhand von statistischen Berechnungen können die Bemessungswerte festgelegt werden, bei der die erforderliche Versagenswahrscheinlichkeit nicht überschritten wird. Untersuchungen von Jockwer et al. (2011) zeigen, dass die in EN 1995-1-1 angegebenen Materialkennwerte k_n zusammen mit der effektiven durch k_{crack} reduzierten Schubfestigkeit eher progressiv angesetzt sind. Für eine sichere und zuverlässige Bemessung sollten die nach EN 1995-1-1 berechneten Tragwiderstände für ausgeklinkte Träger daher nicht voll ausgenutzt werden. Dies bestätigt den Grundsatz, dass Ausklinkungen in Holzträgern grundsätzlich vermieden und anderenfalls durch geeignete Maßnahmen verstärkt werden sollten.

2. Querzugverstärkung von Ausklinkungen

Der geringe Tragwiderstand und das spröde Versagensverhalten von Holzträgern mit Ausklinkungen machen eine Verstärkung der Ausklinkung erforderlich. Risse im Holz können auch durch wechselnde Holzfeuchten und Umgebungsbedingungen auftreten. Eine Verstärkung ist daher auch vor dem Hintergrund der Dauerhaftigkeit ratsam. Außerdem kann es notwendig sein, bei Nutzungsänderungen höhere Tragwiderstände zu erreichen. Eine Verstärkung sollte daher bereits bei der Planung von Trägern mit Ausklinkungen berücksichtigt werden.

2.1. Verstärkungsmaßnahmen

Mögliche Verstärkungsmaßnahmen für ausgeklinkte Träger sind in DIN 1052 (2008) und im deutschen nationalen Anhang der EN 1995-1-1 aufgeführt. Es wird grundsätzlich zwischen innenliegenden und außenliegenden Verstärkungen unterschieden (Abbildung 3).

Innenliegende Verstärkungen:

- Eingeschraubte Vollgewindeschrauben
- Eingeklebte Gewindestangen
- Eingeklebter, gerippter Bewehrungsstahl

Außenliegende Verstärkungen:

- Aufgeklebtes Furnierschicht/Sperrholz
- Aufgeklebte Massivholzplatten
- Aufgeklebte GFK/CFK Verstärkung
- Eingepresste Nagelplatten

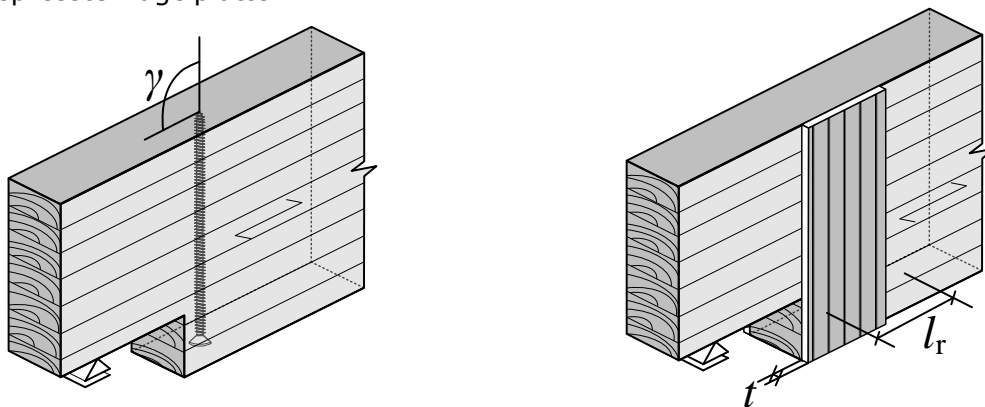


Abbildung 3: Beispiele einer innenliegenden Verstärkung durch eine selbstbohrende Vollgewindeschraube und einer außenliegenden Verstärkung durch aufgeklebte Furnierschichtholzplatten.

Die aufgeführten Verstärkungsmaßnahmen haben verschiedene Vor- und Nachteile: Innenliegende Verstärkungen sind von außen nicht oder kaum sichtbar und eignen sich daher für Bauteile, bei denen die Ästhetik eine besondere Rolle spielt. Insbesondere

selbstbohrende Vollgewindeschrauben sind darüber hinaus auch sehr einfach zu installieren. Eingeklebte Gewindestangen hingegen bedürfen sehr hoher Anforderungen an die Qualität der Ausführung. Außenliegende Verstärkungselemente wie aufgeklebte Furnierschicht- und Sperrholzplatten haben im Allgemeinen ein sehr gutes Tragverhalten. Sie vergrößern jedoch den Trägerquerschnitt und verändern, wie auch aufgeklebte Faserverstärkungen oder eingepresste Nagelplatten, das äußere Erscheinungsbild des Trägers. Außenliegende Verstärkungen sind daher nicht für alle Bauteile geeignet.

2.2. Bemessungsansätze für querzugverstärkte Ausklinkungen

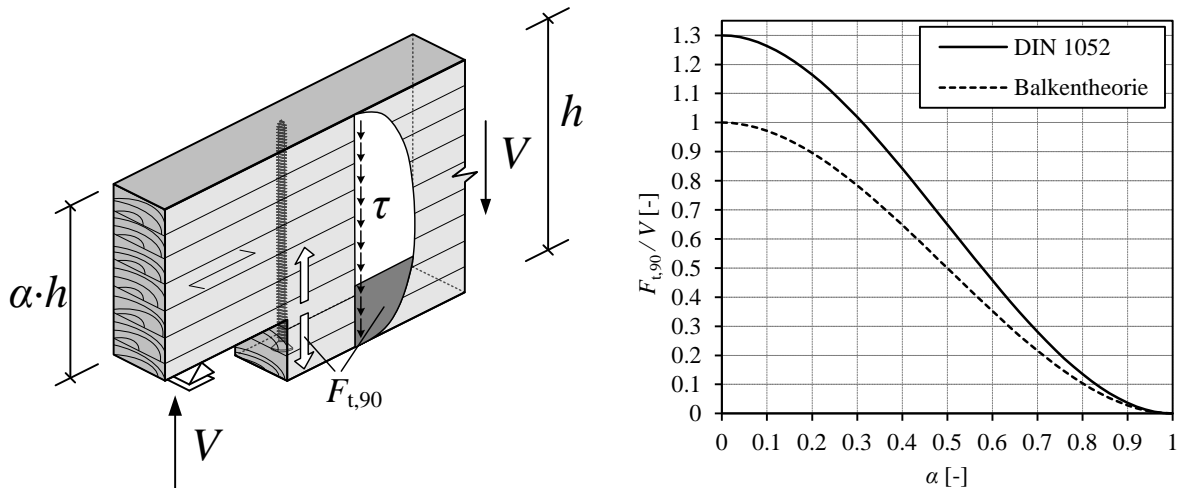


Abbildung 4: Bestimmung der Kräfte senkrecht zur Faser auf Grundlage der Balkentheorie und Vergleich zwischen Balkentheorie und genauem Modell nach Henrici (1990) aus DIN 1052 (2008).

Die vorhandenen Bemessungsansätze basieren auf der Annahme, dass am ausgeklinkten Träger die Kräfte vom unteren Trägerteil in den oberen übertragen werden müssen. Auf Grundlage der Balkentheorie kann die Kraft im unteren Trägerteil aus den Schubspannungen berechnet werden. Bei Annahme einer quadratischen Schubspannungsverteilung ergibt sich die in Abbildung 4 angegebene Abhängigkeit von der Ausklinkungshöhe.

Henrici (1990) führte zur Spannungsverteilung an der Ausklinkungsecke umfangreiche Studien durch, wobei er diese analytisch beschrieb. Dabei berücksichtigte er die Anisotropie des Holzes mit unterschiedlichen Steifigkeiten längs und quer zur Faserrichtung. Für die Steifigkeiten des gewöhnlich verwendeten Nadelholzes können die Einflüsse der Anisotropie auf die Spannungskonzentration durch einen einfachen Vorfaktor berücksichtigt werden. Dies führt zu dem folgenden in DIN 1052 (2008) und im Nationalen Anhang der DIN EN 1995-1-1/NA (2010) enthaltenen Bemessungsansatz für die Berechnung der Kraft senkrecht zur Faser:

$$F_{t,90,d} = 1.3 \left[3(1-\alpha)^2 - 2(1-\alpha)^3 \right] V_d \quad (6)$$

Neben der durch die Verstärkung aufzunehmenden Kraft macht Henrici außerdem Angaben zur Länge des querzugbeanspruchten Bereichs. In DIN EN 1995-1-1/NA ist dies als die minimale und maximale Länge der außenliegenden Verstärkung eingegangen.

An der Ausklinkung liegt jedoch beim Erreichen des Tragwiderstands kein ungestörter Spannungszustand vor, wie in Gleichung 6 angenommen, sondern eine kombinierte Spannungskonzentration aus Querzug und Schub. Diese Interaktion der Spannungen sowie eine Anfangsrisssbildung sollten bei der Bemessung berücksichtigt werden.

2.3. Versagensverhalten verstärkter Ausklinkungen

In Versuchen an querzugverstärkten Ausklinkungen zeigt sich, dass es auf dem Lastniveau des Tragwiderstands der unverstärkten Ausklinkung trotz der Verstärkung zu einem Anriss der Ausklinkungsecke kommt. Eine weitere Rissöffnung kann jedoch durch die Verstärkung verhindert werden. Im weiteren Belastungsverlauf kommt es bei den Ausklinkungen mit einer Verstärkung mit nur geringer Steifigkeit parallel zur Faserrichtung

zu einem Rissfortschritt infolge Schub, in dessen Folge schließlich das schlagartige Versagen des Trägers eintritt. Dieses Versagen der Ausklinkung auf Schub kann mit dem bruchmechanischen Ansatz nach Gustafsson (1988) unter Verwendung der Bruchenergie für Schubversagen (Bruchmodus 2) berechnet werden. Der Mittelwert dieser Bruchenergie kann in Kleinversuchen zu $G_{c,II,mean} \approx 1,15$ N/mm bestimmt werden. Damit ergibt sich für den Schubtragwiderstand der Ausklinkung ein etwa doppelt so großer Wert wie für den Querzugwiderstand.

Wird die Ausklinkung daher nur gemäß Gleichung 6 auf Querzug verstärkt und keine weitere Schubverstärkung angeordnet, so muss der Tragwiderstand der verstärkten Ausklinkung auf den doppelten Wert des Tragwiderstands der unverstärkten Ausklinkung gemäß Gleichung 4 beschränkt werden.

3. Verbessertes Modell für die verstärkte Ausklinkung

Ziel des von Jockwer (2014b) entwickelten, verbesserten Modells des Tragverhaltens verstärkter Ausklinkungen ist es, nicht nur den Spannungszustand am ungestörten System zu betrachten, sondern auch das Versagensverhalten beim Überschreiten des Grenzzustandes der Tragsicherheit abzubilden. Es wurde daher ein bruchmechanisches Modell gewählt, wie es auch schon für die unverstärkten Ausklinkungen von Gustafsson (1988) verwendet wurde.

3.1. Bruchmechanisches Modell

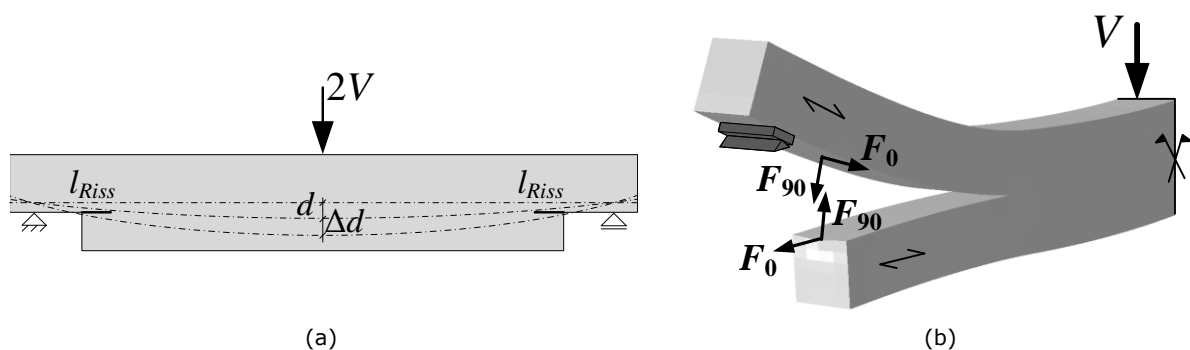


Abbildung 5: Änderung der Träger durch Biegung Δd mit Rissfortschritt l_{Riss} als Grundlage des bruchmechanischen Modells (a) und Aufteilung der Kräfte aus der Verstärkung in parallel (F_0) und rechtwinklig (F_{90}) zur Faser wirkende Anteile (b).

Der bruchmechanische Bemessungsansatz, den Gustafsson im Jahre 1988 vorstellte, basiert auf dem Energiegleichgewicht während eines inkrementellen Risswachstums. Die Energie, die durch die größere Durchbiegung Δd des Trägers nach einer Verlängerung des Risses um l_{Riss} frei wird, ist gleich derjenigen, die für die Trennung des Materials an der Risspitze benötigt wird (Abbildung 5). Aus dem Gleichgewicht der Energien bildete Gustafsson den Reduktionsfaktor k_v für den Schubtragwiderstand am reduzierten Trägerquerschnitt.

Die Durchbiegung des verstärkten, ausgeklinkten Trägers wird dabei durch die Steifigkeit des Holzträgers sowie die in der Verstärkung wirkenden Kräfte bestimmt. Die Kraft in der Verstärkung hängt dabei neben der Ausklinkungsgeometrie unter anderem auch von der Länge des Risses sowie der Steifigkeit der Verstärkung ab. Die Kraft in der Verstärkung parallel zur Faserrichtung (F_0) kann anhand eines Federmodells, wie in Abbildung 6 dargestellt, wie folgt berechnet werden:

$$F_{90} = \frac{6Vl_{Riss} \left(\beta h + \frac{1}{2} l_{Riss} \right)}{3l_{Riss} h + \left(1 + \frac{(1-\alpha)^3}{\alpha^3} \right) \left(\frac{E_0 b \alpha^3 h^2}{K_{90}} + \frac{l_{Riss} \alpha^2 h}{(1-\alpha)} \right)} \quad (7)$$

Ebenso ergibt sich die Kraft in der Verstärkung rechtwinklig zur Faserrichtung (F_{90}) wie folgt:

$$F_{90} = \frac{Vl_{Riss} \left(\frac{12 \left(\frac{1}{2} \beta h l_{Riss} + \frac{1}{3} l_{Riss}^2 \right)}{E_0 b \alpha^3 h^2} + \frac{6}{5 G_v b \alpha h} \right)}{\left(\frac{1}{\alpha^3} + \frac{1}{(1-\alpha)^3} \right) \left(\frac{4 l_{Riss}^3}{b h^3 E_0} \right) + \left(\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{1-\alpha} \right) \left(\frac{6 l_{Riss}}{5 b h G_v} \right) + \frac{1}{K_{90}}} \quad (8)$$

In Abbildung 6 sind die Entwicklung von Gleichung 7 und 8 in einem Diagramm für einen Träger aus BSH GL24h und mit den Abmessungen $h = 600\text{mm}$, $b = 140\text{mm}$, $\alpha = 0.66$, $\beta = 0.25$ dargestellt. Grundsätzlich entlasten steife Verstärkungsmittel das Holz und ziehen die Kräfte an. Die Querzugkraft rechtwinklig zur Faser in der Verstärkung ist bei kleinen Risslängen am größten und fällt mit zunehmender Risslänge ab. Im Gegensatz dazu steigt die Scherkraft parallel zur Faserrichtung in der Verstärkung mit zunehmender Risslänge an. Zu beachten ist, dass die Verstärkung mindestens eine Steifigkeit von ca. K_0 bzw. $K_{90} = 10'000\text{--}100'000\text{ N/mm}$ haben muss, um einen entsprechenden Beitrag zum Lastabtrag zu geben.

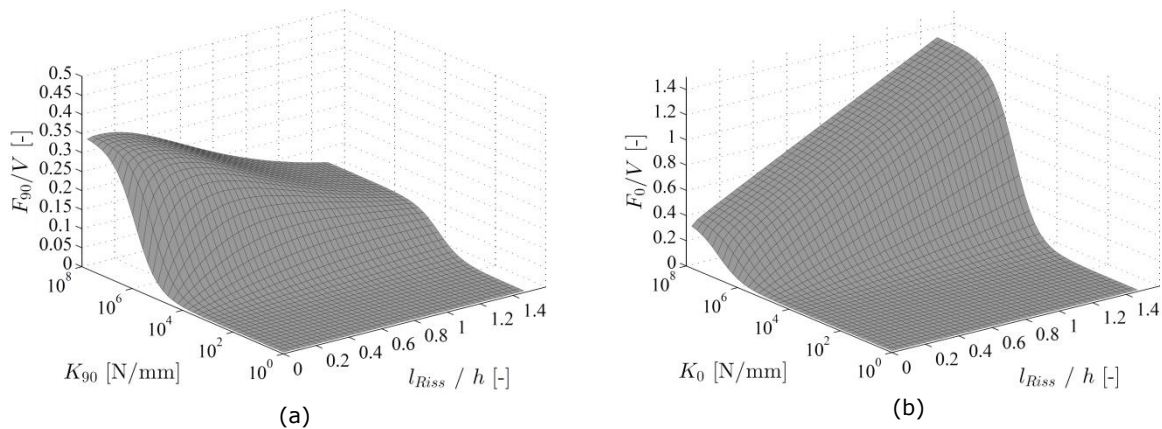


Abbildung 6: Entwicklung der relativen Kräfte rechtwinklig (F_{90}/V) (a) und parallel (F_0/V) (b) zur Faserrichtung bei fortschreitender relativer Risslänge l_{Riss}/h in Abhängigkeit der Steifigkeit der Verstärkung K_{90} bzw. K_0 .

Unter Verwendung der in der Verstärkung wirkenden Kräfte kann die bei einem Rissfortschritt freiwerdende Energiefreisetzungsrates berechnet werden. Dafür muss die Veränderung der Steifigkeit des ausgeklinkten Trägers in Abhängigkeit der Risslänge bestimmt werden. Bei Holz hängt die für die Trennung der Rissoberflächen notwendige Bruchenergie stark vom Bruchmodus ab, das heißt davon, ob ein Querzugriss mit Rissöffnung (Bruchmodus 1) oder ein Schubriss mit einer Verschiebung der Rissufer (Bruchmodus 2) vorliegt. So ist die Bruchenergie im Modus 2 $G_{f,II}$ etwa 3-fach höher als die Bruchenergie im Modus 1 $G_{f,I}$. Es ist daher notwendig, die Energiefreisetzungsrates für den gemischten Querzug- und Schubbruch an der verstärkten Ausklinkung je nach Bruchmodus aufzuspalten.

Die so berechneten Energiefreisetzungsrates können dazu verwendet werden, um in Abhängigkeit der Geometrie und der Steifigkeitseigenschaften der Verstärkung die relevanten Bruchmechanismen zu untersuchen. In Abbildung 7 sind die Veränderungen der Energiefreisetzungsrates für den Querzugriss im Modus 1 und für den Schubriss im Modus 2 dargestellt. Es zeigt sich, dass ab einem bestimmten Schwellenwert der Steifigkeit der Verstärkung rechtwinklig und parallel zur Faserrichtung die Energiefreisetzungsrates deutlich beeinflusst wird und abfällt bzw. nur noch gering ansteigt. Dieser Schwellenwert liegt im dargestellten Beispiel für die Verstärkung senkrecht zur Faserrichtung bei ca. $K_{90} > 10'000\text{ N/mm}$. Gegen einen Schubriss des ausgeklinkten Trägers ist dagegen eine deutlich steifere Verstärkung mit ca. $K_0 > 100'000\text{ N/mm}$ notwendig. Der Tragwiderstand und das Bruchverhalten lassen sich also durch eine geschickte Wahl des Verstärkungselementes spezifisch anpassen. Es ist daher eine genaue Kenntnis des Tragverhaltens des Verstärkungselementes notwendig, um den Tragwiderstand des ausgeklinkten Trägers zu optimieren.

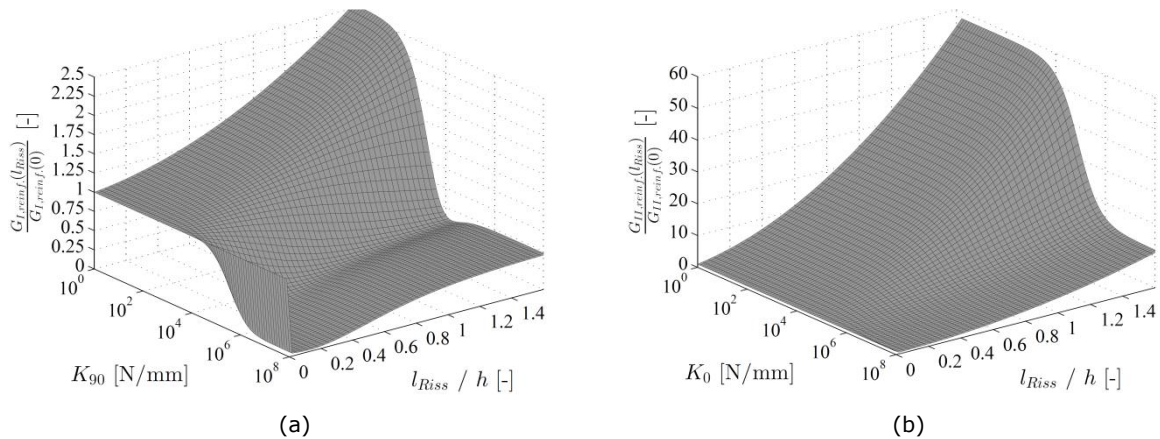


Abbildung 7: Entwicklung der Energiefreisetzungsrates des (Querzug-)Modus 1 (a) bzw. des (Schub-)Modus 2 (b) bei fortschreitender relativer Risslänge in Abhängigkeit der Steifigkeit der Verstärkung bezogen auf die Energiefreisetzungsrates des Modus 1 bei Rissinitiation.

3.2. Vollgewindeschrauben als Verstärkungsmittel

Wie in Abschnitt 2.1 beschrieben, können unterschiedlichste Verstärkungsarten für ausgeklinkte Träger eingesetzt werden. Selbstbohrende Vollgewindeschrauben eignen sich hervorragend als innenliegendes Verstärkungselement, da sie sehr gute Trageigenschaften entlang ihrer Schaftachse besitzen und sehr einfach eingeschraubt werden können. Sie lassen sich entweder bereits in der Planung von Bauteilen berücksichtigen als auch als nachträgliche Verstärkungselemente zur Sanierung einsetzen.

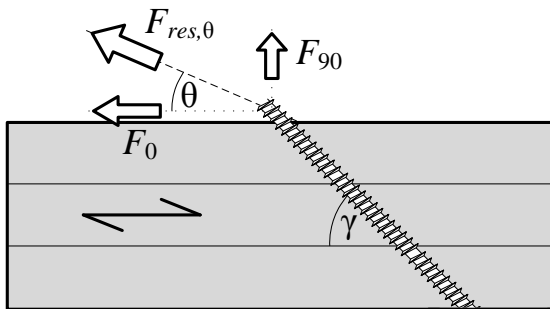


Abbildung 8: Aufteilung der auf die Vollgewindeschraube wirkenden Kräfte in Anteile parallel und rechtwinklig zur Faserrichtung.

Um das Tragverhalten der selbstbohrenden Vollgewindeschraube bei verschiedenen Schaft-Faserwinkeln γ und unter verschiedenen Kraft-Faserwinkeln θ besser beurteilen zu können, wurde von Jockwer et al. (2014a) eine Versuchsserie durchgeführt. Es wurden die Kraft-Faserwinkel $\theta = 0^\circ$ und 90° sowie die Schaft-Faserwinkel $\gamma = 90^\circ$, 60° und 45° untersucht. Die Kraft-Verschiebungsdiagramme für eine Belastung rechtwinklig zur Faser F_{90} und eine Belastung parallel zur Faser F_0 sind in Abbildung 9 angegeben. Es zeigt sich, dass bei einer Belastung parallel zur Faserrichtung die Steifigkeit der Schraubenverbindung mit kleiner werdendem Winkel γ stark zunimmt. Darüber hinaus steigt auch der Tragwiderstand stark an. Im Gegensatz dazu reagieren Schrauben mit Winkeln $\gamma = 90^\circ$ bei einer Belastung rechtwinklig zur Faser deutlich steifer als Schrauben mit kleineren Winkeln γ . Auf den Tragwiderstand hat bei dieser Belastung der Schrauben-Faserwinkel nur geringen Einfluss.

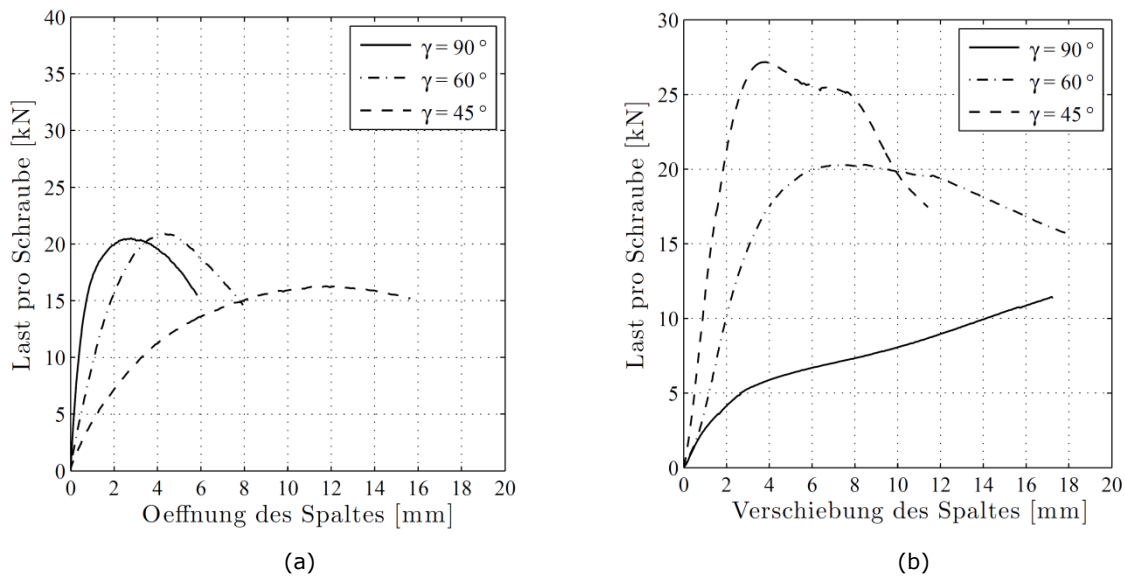


Abbildung 9: Last-Öffnungs- bzw. -Verschiebungsverhalten von Prüfkörpern unter Belastung rechtwinklig (a) bzw. parallel (b) zur Faser in Abhängigkeit des Winkels γ zwischen Schraube und Faserrichtung des Holzes.

Die veränderten Steifigkeiten der Prüfkörper lassen sich für die Versuche mit einer Belastung parallel zur Faser durch das Zusammenwirken von lateraler und axialer Schraubensteifigkeit beschreiben. Bei einer Belastung senkrecht zur Faser ist dagegen eine reduzierte Einbettungslänge bei Schrauben mit kleiner werdendem Winkel γ zu beobachten. Dabei können unter dieser Belastung die Interaktion von axialer und lateraler Steifigkeit durch eine serielle Schaltung von Feder beschrieben werden. In Abbildung 10 ist das resultierende Steifigkeitsmodell für Schrauben unter einer Belastung parallel und rechtwinklig zur Faserrichtung für verschiedene Kraft-Faserwinkel dargestellt. Mit diesem Modell ist es möglich das Tragverhalten von ausgeklinkten BSH-Trägern mit selbstbohrenden Vollgewindeschrauben als Verstärkung zu optimieren.

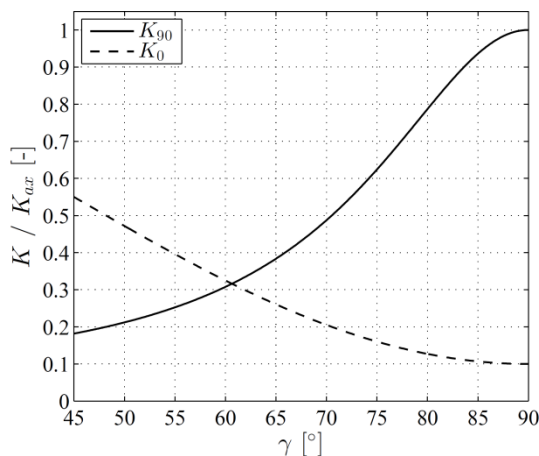


Abbildung 10: Anteile der Steifigkeiten rechtwinklig (K_{90}) und parallel (K_0) zur Faserrichtung in Bezug zur axialen Steifigkeit (K_{ax}) in Abhängigkeit des Winkel γ zwischen Schraubenschaft und Faserrichtung des Holzes.

3.3. Vorschläge für die Bemessung

Die Untersuchungen zum Tragverhalten von selbstbohrenden Vollgewindeschrauben zeigt deutlich das Potential der Schrauben bei einer Beanspruchung in Schafrichtung. Um die hohen Steifigkeiten und Tragwiderstände in Schafrichtung auszunutzen, kann der Einschraubwinkel der Schrauben je nach Ausklinkungsgeometrie angepasst werden. Es zeigt sich dabei jedoch grundsätzlich, dass eine wirksame Schubverstärkung notwendig ist, um den Schubtragwiderstand des reduzierten Querschnitts wiederherzustellen. In einem Optimierungsprozess wurde mit dem bruchmechanischen Modell daher die erforderliche Steifigkeit einer kombinierten Schub- und Querzugverstärkung berechnet. In Abbildung 11 sind die Steifigkeiten in Abhängigkeit des Ausklinkungshöhenverhältnisses α und

des Ausklingungsängenverhältnisses β dargestellt. Mit größer werdender Ausklinkung ist ein deutlicher Anstieg der erforderlichen Steifigkeit zu erkennen. Die derzeit erhältlichen selbstbohrenden Schrauben und eingeklebten Gewindestangen sind dabei nicht fähig, diese hohen Steifigkeiten zu liefern. Große Ausklinkungen können daher mit internen Verstärkungsmaßnahmen nicht wirkungsvoll verstärkt werden und die Reduzierung des Tragwiderstands ist bei der Bemessung zwingend zu berücksichtigen. Ausklinkungen kleinerer Höhe und Länge können dagegen mit selbstbohrenden Vollgewindeschrauben ausgezeichnet verstärkt werden. Die in der Verstärkung wirkenden Kräfte können dabei entsprechend Gleichungen 7 und 8 berechnet werden.

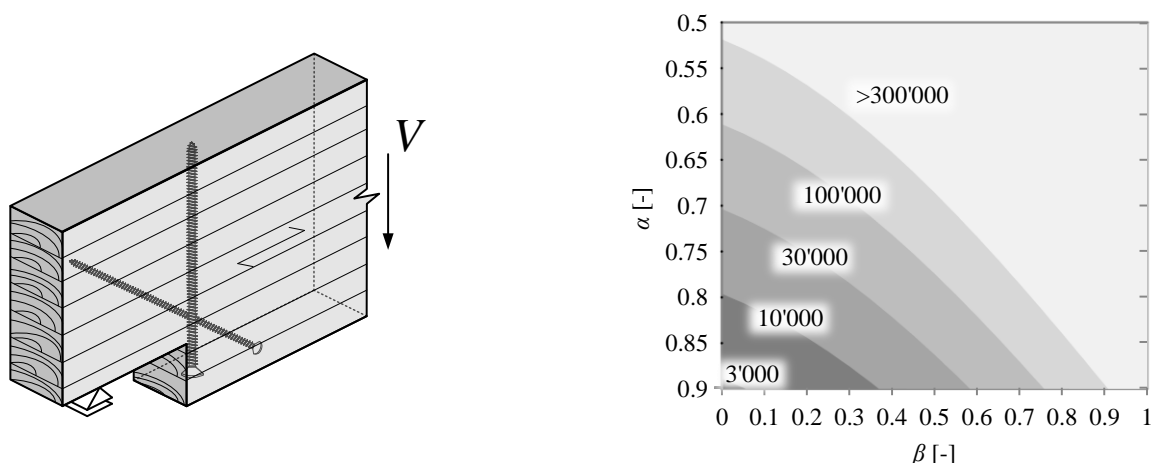


Abbildung 11: Kombinierte Querzug- und Schubverstärkung in der Ausklinkung und erforderliche Steifigkeiten der Verstärkungselemente zur Erreichung des Schubtragwiderstands des reduzierten Trägerquerschnitts in Abhängigkeit der Ausklingungsgeometrie.

Das bruchmechanische Modell zeigt deutlich, dass bei der Verstärkung von Ausklinkungen nicht nur Kräfte rechtwinklig zur Faserrichtung sondern auch solche parallel zur Faser aufgenommen werden müssen. Dafür ist eine möglichst steife Verstärkung notwendig, um bereits bei kleinen Verformungen wirksam zu sein und eine Rissbildung an der Ausklingungsecke zu vermeiden. Ist dagegen nur eine Verstärkung rechtwinklig zur Faser vorhanden oder ist die Verstärkung parallel zur Faser nicht ausreichend steif, so wird der Tragwiderstand der verstärkten Ausklinkung durch den Tragwiderstand bei einem Schubbruch der Ausklingungsecke begrenzt. Mit dem Verhältnis der Bruchenergien in Modus 2 (Schubbruch) und Modus 1 (Querzugbruch) kann vereinfacht auf Grundlage des Modells von Gustafsson (1988) angenommen werden, dass der Tragwiderstand maximal das Doppelte der unverstärkten Ausklinkung gemäß Gleichung 4 erreichen kann.

4. Zusammenfassung

Der Tragwiderstand von Holzträgern wird durch Ausklinkungen entscheidend reduziert. Ausklinkungen sollten daher grundsätzlich vermieden werden. Wenn sie dennoch notwendig sind, müssen sie durch geeignete Maßnahmen verstärkt werden, um den Tragwiderstand des Trägers zu erhalten und die Anforderungen an die Dauerhaftigkeit zu genügen. Selbstbohrende Vollgewindeschrauben eignen sich als solche Verstärkungsmaßnahmen, wenn ihre spezifischen Trageigenschaften und die Beanspruchungen an der Ausklinkung berücksichtigt werden. Ein bruchmechanisches Modell für die verstärkte Ausklinkung zeigt die Notwendigkeit einer guten Schubverstärkung neben der Querzugverstärkung. Mit den marktüblichen Vollgewindeschrauben können daher Ausklinkungen kleiner Höhe und Länge hervorragend verstärkt werden. Für größere Ausklinkungen liegen jedoch bisher keine geeigneten Verstärkungsmaßnahmen vor. Daher sollten diese Ausklinkungen unbedingt vermieden werden.

5. Literatur

- [1] DIN 1052 (2008): Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken – Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Deutschland
- [2] EN 1995-1-1 (2004): Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines –Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1995-1-1:2004 + AC:2006 + A1:2008, European Committee for Standardization CEN, Brüssel, Belgien
- [3] Gustafsson, P. J. (1988): A study of strength of notched beams, In: Proc. of the CIBW18 Meeting 21, Parksville, Kanada, Paper No. CIB-W18/21-10-1
- [4] Henrici, D., Beitrag zur Bemessung ausgeklinkter Brettschichtholzträger. Bauen mit Holz, 1990. 11: p. 806-811
- [5] Jockwer R., Steiger R., Frangi A., Köhler J. (2011): Impact of material properties on the fracture mechanics design approach for notched beams in Eurocode 5. In: Proc. of the CIBW18 Meeting 44, Alghero, Italien, Paper No. CIB-W18/44-6-1
- [6] Jockwer R., Steiger R., Frangi A. (2014a): Fully threaded self-tapping screws subjected to combined axial and lateral loading with different load to grain angles. In: Aicher S., Reinhardt H. W., Garrecht H. (eds) Materials and Joints in Timber Structures, RILEM Bookseries, vol 9, Springer, Niederlande
- [7] Jockwer R. (2014b): Structural behaviour of glued laminated timber beams with unreinforced and reinforced notches. Doktorarbeit, Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, Schweiz
- [8] Mistler H. L. (1979): Die Tragfähigkeit des am Endauflager unten rechtwinklig ausgeklinkten Brettschichtträgers. Doktorarbeit, Technischen Hochschule Karlsruhe, Karlsruhe, Deutschland
- [9] Scholten (1935): Rounding notches makes stronger joists. American Lumberman
- [10] SIA 265 (2012): Holzbau, SIA- Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich, Schweiz