



*Robert Widmann
Dipl. Bauing. FH
Empa, Abt. Holz
Dübendorf, Schweiz*

Eingeklebte profilierte Stahlstäbe

**Grundlagen, Einflussgrößen,
Bemessungsansätze, Qualitätssicherung**



*René Steiger
Dr. sc. techn. / Dipl. Bauing. ETH/SIA
Empa, Abt. Holz
Dübendorf, Schweiz*

Eingeklebte profilierte Stahlstäbe

Grundlage, Einflussgrössen, Bemessungsansätze, Qualitätssicherung

Einleitung

Mit parallel oder rechtwinklig zur Faserrichtung in Brettschichtholz (BSH) eingeklebten profilierten Stahlstäben können auf kleiner Fläche grosse Kräfte in Holzbauteile eingeleitet werden. Bei Verwendung von Stahlstäben mit metrischem Gewinde ergeben sich besonders einfache, praxisgerechte Anschlüsse an Beton- und Stahlteilen oder effiziente Verstärkungen von hoch beanspruchten Bereichen in Holzbauteilen. Diese Art von Verbindungen wird also sowohl bei neuen als auch bei der Ertüchtigung von bestehenden Holzkonstruktionen eingesetzt. Die Stäbe können dabei axial (Ausziehen), rechtwinklig zur Schaffrichtung (Abscheren) oder in beide Richtungen gleichzeitig (Kombinierte Beanspruchung) beansprucht werden. Dabei weisen derartige Verbindungen hohe Festigkeiten und Steifigkeiten auf.

Seit mittlerweile mehr als 30 Jahren werden Verbindungen mit eingeklebten Stäben beforscht und in der Praxis des Ingenieurholzbau, vorwiegend bei BSH erfolgreich eingesetzt. Einsatzbereiche sind Stützenverankerungen in Fundamenten, biegesteife Verbindungen von Holzbauteilen (Trägerstösse, Rahmenecken) und Anschlüsse an Träger rechtwinklig oder schräg zur Faserrichtung. Weitere gängige Einsatzbereiche sind die Verstärkung von Trägern (Schub, Querzug) in hoch beanspruchten Bereichen wie beispielsweise Aufsattelungen, Durchbrüche und Ausklinkungen sowie die lokale, auf kleine Kontaktflächen begrenzte Einleitung grosser Kräfte rechtwinklig zur Faserrichtung (Querdruck). Ein Vorteil dieser Verbindungsart ist die "unsichtbare" Einbettung des Stahlstabs im Holz, welche neben optischen Vorzügen auch Vorteile beim Brandschutz bietet.

Meistens werden Stahlstangen in Form von Armierungseisen oder Gewindestangen mit metrischem Gewinde verwendet. Es sind aber auch Anwendungen von faserverstärkten Kunststoffstäben bekannt, insbesondere wenn Korrosionsgefahr für den Stahl besteht oder wenn das Konstruktionseigengewicht gering gehalten werden soll. Solche Verbindungen verhalten sich jedoch im Gegensatz zu optimal ausgelegten Verbindungen mit Stahlstäben nicht duktil. Sie werden in diesem Beitrag nicht behandelt.

Die Klebstoffindustrie hat speziell für das Einkleben von Gewindestangen in Holz optimierte Klebstoffe entwickelt (vorwiegend 1- und 2-Komponenten-Epoxydharze sowie PUR-Klebstoffe), welche auf einfache Weise appliziert werden können und eine hohe Leistung bezüglich Festigkeit, Steifigkeit und Dauerhaftigkeit aufweisen.

Einen guten Überblick über den Stand des Wissens und die Entwicklungen auf dem Gebiet der eingeklebten profilierten Stahlstäbe geben die Proceedings der Working Commission W18 „Timber Structures“ des International Council for Research and Innovation in Building and Construction CIB (<http://www.rz.uni-karlsruhe.de/~gc20/IHB/cib.htm>) und die Publikationen [1] und [2].

Einkleben von Stahlstäben

Herstellungsverfahren

Handwerklich gesehen gibt es mehrere Möglichkeiten für die Montage von eingeklebten Stahlstäben [2]. In den meisten Fällen wird ein Bohrloch der erforderlichen Tiefe und mit einem Durchmesser, welcher leicht (1 – 2 mm) über dem Aussendurchmesser des Stabes liegt, gebohrt. Das Bohrloch muss anschliessend zwingend, beispielsweise durch Ausblasen mit Druckluft, von Bohrspänen gereinigt werden.

Sofern die Stäbe senkrecht stehend montiert werden können, besteht eine Variante darin, anschliessend eine genau berechnete und abgemessene Menge Klebstoff in das Bohrloch einzufüllen und die Stangen mit einer drehenden Bewegung in das Bohrloch hineinzudrücken (Abbildung 1a). Je nach Grösse von Bohrloch und Stahlstab sowie der Viskosität des Klebstoffs bedarf es hierzu recht grosser Kräfte. Ein Nachteil dieser Methode ist die unzureichende Möglichkeit der Kontrolle, ob die Verklebung auch wirklich über die ganze erforderliche Länge erfolgt ist.

Eine weitere häufig angewendete Variante ist das Einführen des Stabs in das leere Bohrloch und eine Befüllung desselben vom Lochfuss her über eine seitlich anzubringende Bohrung. Hierbei muss die Stange gegen ein Herausdrücken gesichert und fixiert werden. Der Ausfluss des Klebstoffs am Bohrlochrand oder an einer gegebenenfalls zusätzlichen weiteren seitlichen Bohrung ermöglicht eine gewisse Kontrolle über den Befüllungsgrad des Lochs (Abbildung 1b). Die zweitgenannte Möglichkeit ergibt eine Verschiebung der Verankerungszone in das Innere des Holzbauteils. Sofern der Spalt zwischen Bohrloch und Stahlstab effektiv versiegelt wird, kann diese Variante auch bei geneigtem oder liegendem Bohrloch angewendet werden (Abbildung 1c). Denkbar aber aufwändig ist sogar eine Montage über Kopf (Abbildung 1d). Die beiden letztgenannten Varianten verursachen in der Praxis einen erheblichen Aufwand und werden daher eher selten angewendet.

Im Europäischen Ausland wurden auch Varianten mit Stäben, welche über eine konzentrische durchgehende Bohrung zum Einfüllen/-pressen des Klebstoffs verfügen [3], sowie mit Bohrlochern mit einem reduzierten Durchmesser entsprechend dem Schaftquerschnitt der verwendeten Gewindestangen untersucht und realisiert. Beide Lösungen haben sich aber als nicht praxistauglich erwiesen.

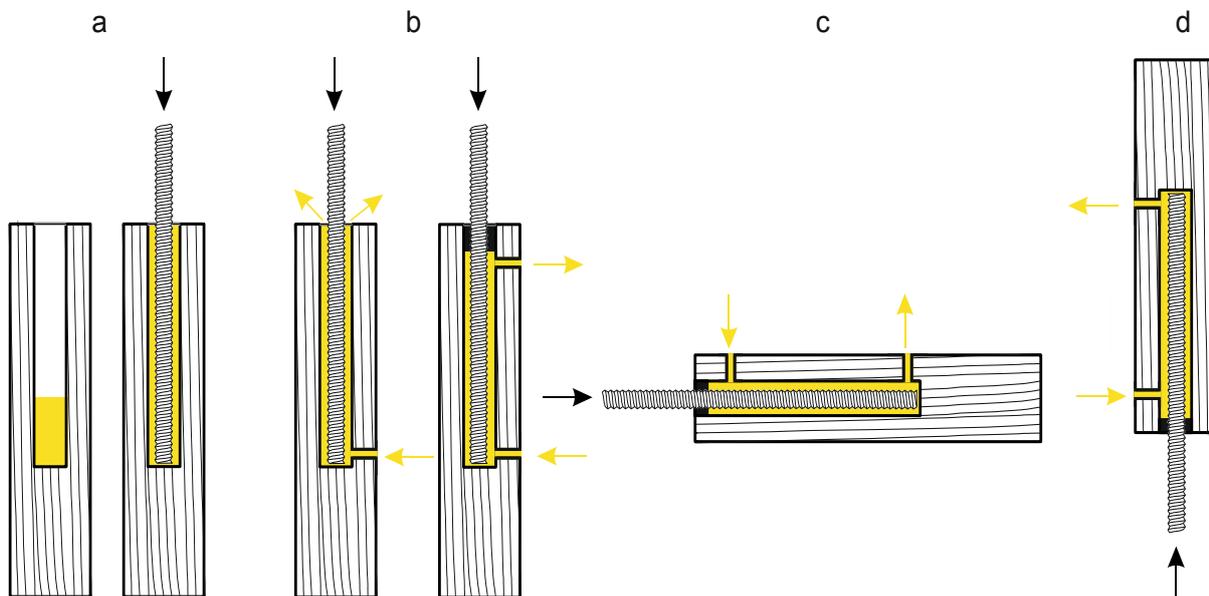


Abbildung 1 Herstellungsvarianten für eingeklebte Stahlstangen

Qualitätssicherung

Wie bei allen tragenden Klebeverbindungen muss bei eingeklebten Stahlstäben dem Herstellungsprozess besondere Beachtung geschenkt werden. Von Wichtigkeit sind die Parameter:

Material:

- Holzqualität: BSH der erforderlichen Festigkeitsklasse, evtl. mit Lamellen aus Laubholz im Lasteinleitungsbereich
- Klebstoff: für die Anwendung nachweislich geeignet
- Stahlstab: korrekte Geometrie, Stahlsorte identisch mit Anforderung bezüglich Statik und Korrosion, Oberflächenbeschaffenheit kompatibel mit Klebstoff

Umgebungsbedingungen

- Temperatur und Feuchte, beides sowohl hinsichtlich Verklebung als auch Nutzung

präzise Fertigung:

- Bohrloch: Durchmesser, Tiefe, Inklination, Geradheit, Sauberkeit
- Einhaltung der Rand- und Zwischenabstände
- zentrierte Positionierung und Fixierung der Stange im Loch
- Klebstoff Füllungs-/Benetzungsgrad, Verarbeitung gemäss Herstellerangaben

Insbesondere bei einer Verklebung auf der Baustelle kann dies schwierig umzusetzen sein und dementsprechend zu Problemen führen. Aber auch für die vorzuziehende Montage unter Fabrikbedingungen gibt es bis heute keine allgemein gültigen Spezifikationen für eine effektive Qualitätssicherung. Dies obliegt somit jedem Hersteller selbst.

Die Vielzahl der oben genannten Einflussparameter und die Streuung derselben sowie das in den meisten Fällen hohe Beanspruchungsniveau lässt es daher mit Blick auf die Qualitätssicherung als ratsam erscheinen, dass zur Abklärung des Tragverhaltens von Verbindungen mit eingeklebten profilierten Stäben Vorversuche durchgeführt werden. Dabei ist abzuklären, ob das Verhalten des Klebstoffs und seines Verbundes mit dem profilierten Stab und mit dem Holz während der geplanten Nutzungsdauer des Bauwerks innerhalb der angenommenen Temperatur- und Feuchtebereiche dauerhaft zuverlässig ist. Was die Umgebungsfeuchte betrifft, so beschränken sich die meisten aktuellen Bemessungsnormen auf den Einsatz von eingeklebten profilierten Stäben bei Bauteilen, welche den Nutzungs- bzw. Feuchteklassen 1 und 2 zugeordnet sind.

Zur Gewährleistung einer ausreichenden Qualität einer Verbindung oder eines Anschlusses mit eingeklebten Stäben sollte daher der Systemgedanke in den Vordergrund gestellt werden. Bei erfolgreichen Systemen (mit hohen spezifischen Tragwiderständen) werden anhand von umfangreichen Versuchsserien und theoretischen Überlegungen die oben genannten Einflussparameter derart optimiert, dass mit diesen Systemen Verbindungen und Anschlüsse hoher Leistung hergestellt werden können. In solchen Fällen erfolgt beispielsweise auch eine Abstimmung der Querschnittsflächen der Stahl- und Holzquerschnitte A_{Stahl} bzw. A_{Holz} bei Anschlüssen parallel zur Faser. Deren Verhältnis wird idealerweise so gewählt, dass es umgekehrt proportional zu den zugehörigen Elastizitätsmoduln E_{Holz} bzw. E_{Stahl} verläuft [4, 5] und sich somit identische Zugsteifigkeiten im Holz und Stahl ergeben:

$$E_{Holz} A_{Holz} = E_{Stahl} A_{Stahl}$$

Tragverhalten

Das Tragverhalten von Verbindungen mit eingeklebten profilierten Stahlstäben wird durch eine Vielzahl von Parametern beeinflusst. Umso schwieriger ist es, allgemein gültige Bemessungsansätze anzugeben, welche den einzelnen, z. T. stark unterschiedlichen Systemen gerecht werden.

Einflussparameter

Der Tragwiderstand von parallel oder rechtwinklig zur Faserrichtung eingeklebten Stäben ist von den folgenden Parametern abhängig:

Anschlussgeometrie

- Flächenverhältnis Holz / Klebfuge / Stahlstabquerschnitt
- Verhältnis von Verankerungslänge ℓ zu Bohrlochdurchmesser d_h , repräsentiert durch die Schlankheit $\lambda = \ell / d_h$
- Rand- und Zwischenabstände der Stahlstäbe
- Anzahl der Stahlstäbe
- Kraft- zu Faserwinkel (inkl. unplanmässige Imperfektionen!)

Steifigkeit der eingesetzten Materialien

- Verhältnis der Elastizitäts- und Schubmoduln von Stahlstab, Holz und Klebstoff
- Verhältnis von E-Modul zu Schubmodul der einzelnen Materialien

Festigkeit der eingesetzten Materialien

- Schub-, Querkzug- und Querdrukfestigkeit des Holzes
- adhäsive und kohäsive Klebstofffestigkeit
- Festigkeit der Stahlstäbe (Flie遥annung und Zugfestigkeit)

Bruchmechanische Eigenschaften von Holz und Klebstoff

Art der Kraffteinleitung

- bezüglich des Stahlstabs axiale oder rechtwinklig zur Achse wirkende Kraft
- Lage der Verankerungszone (vertieft oder bis an die Oberfläche reichend)
- Zug – Zug, Zug – Druck, Zug – Balken, Zug – Schubfeld (Abbildung 2)
- Einwirkungsdauer (statisch, dynamisch)
- Konstante Last oder Wechsellast

Weitere Parameter

- Holzart und Rohdichte des Holzes
- Art der Herstellung der Verbindung (Aushärtezeit des Klebstoffs, Oberflächeneigenschaften, etc.).

Die Art der Kraffteinleitung beeinflusst wesentlich den Tragwiderstand. In Versuchen können daher aussagekräftige Resultate nur erhalten werden, wenn die Versuchsanordnung der Situation in der Baupraxis entspricht. Beispielsweise unterscheiden sich Versuchsergebnisse aus Zug – Druck – Versuchen mit direkter Kraffteinleitung in das Holz (Abbildung 2c) auf Grund des auftretenden Querdrukversagens deutlich von Resultaten aus Versuchen mit kontinuierlicher Einleitung der Reaktionskraft auf Schub im gesamten Holzquerschnitt nach dem Vorbild der Pfahlfundation im Grundbau (Abbildung 2d). Auch sind Zug – Druck-Versuche gemäss Abbil-

dung 2c nicht geeignet, das Verhalten der Verbindung im Fall Zug – Balken vorherzusagen. Hier liefert die Versuchsanordnung gemäss Abbildung 2d aussagekräftigere Resultate.

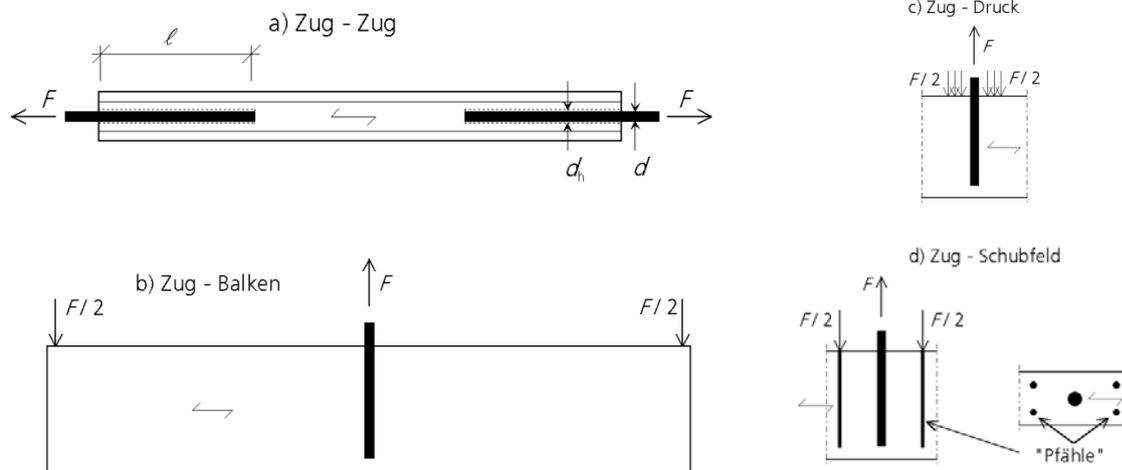


Abbildung 2: Verschiedene Arten der Beanspruchung eingeklebter Gewindestangen (d_h = Bohrlochdurchmesser, d = Aussendurchmesser des Stabs)

Zur korrekten statistischen Auswertung von Datensätzen aus Versuchen an symmetrischen Prüfkörpern (Abbildung 2a) oder von Versuchsserien mit unterschiedlichen Brucharten (siehe unten), sind spezielle statistische Methoden erforderlich [6]. Sämtliche Einflussparameter sind streuungsbehaftet. Diese Variationen, aber auch sonstige mögliche Imperfektionen müssen durch die Bemessungsansätze in adäquater Form erfasst werden.

Obwohl zwischen dem Klebstoff und dem Stahlstab eine gewisse Haftung besteht, ist eine sichere Kraftübertragung nur mittels mechanischer Verzahnung zwischen Klebstoff und Stahlstab möglich. Die eingesetzten Stahlstäbe müssen daher eine Profilierung aufweisen, wie z.B. Rippen (Armierungsstähle) oder aufgerollte bzw. eingeschnittene Gewinde.

Brucharten

Bei den möglichen Versagensarten von eingeklebten Stäben muss unterschieden werden zwischen einzelnen Stäben und Verbindungen bestehend aus Stabgruppen. Einzelstabanschlüsse können versagen durch:

Bruch / Versagen des Stahlstabs infolge:

- Überschreiten der Fließgrenze bzw. der Zugfestigkeit bei axialer Zugbelastung (Abbildung 3)
- Knicken ausserhalb der Verankerung bei axialer Druckbeanspruchung

Ausreissen des Stabs aus der Verankerung wegen:

- Klebstoffversagen (Kohäsionsbruch)
- Klebfugenversagen im Übergang zum Holz (Adhäsionsbruch 1) (Abbildung 4)
- Klebfugenversagen im Übergang zum Stab (Adhäsionsbruch 2) (Abbildung 5)
- Holzbruch in der Nähe der Klebfuge (Abbildung 6)

Ausreissen des Stabs inklusive einem Teil des umgebenden Holzes (Abbildung 7)

Überschreitung der Schubfestigkeit des Holzes

Aufspalten des Holzes wegen:

- zu geringen Randabständen (Abbildung 7) bei parallel zur Faserrichtung eingeklebten Stäben
- Überschreitung der Querkzugfestigkeit bei rechtwinklig zur Faserrichtung eingeklebten Stäben

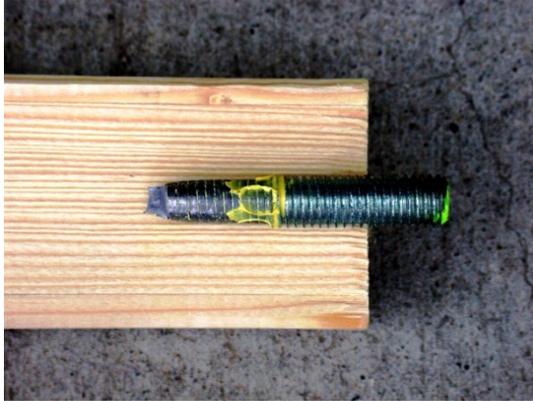


Abbildung 3: Zugbruch im Stahlstab



Abbildung 4: Adhäsionsbruch Klebstoff – Holz



Abbildung 5: Adhäsionsbruch Klebstoff – Stahl



Abbildung 6: Klebfugennaher Holzbruch



Abbildung 8: Ausreißen des Stabs inklusive eines Teils des umgebenden Holzes

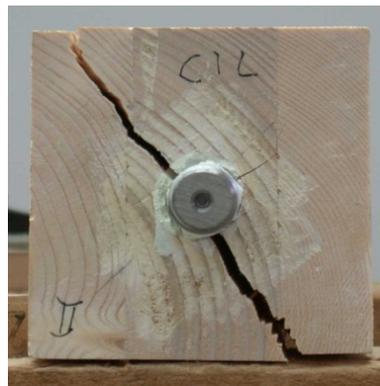


Abbildung 7: Aufspalten des Holzes



Abbildung 9: Zugbruch des Holzes

Zugbruch des Holzbauteils (Abbildung 9).

- Wirkungsgrad des Anschlusses $\eta > 1$ (in der Praxis möglich: $\eta = 0.8 \dots 1$) [7]

Bei aus mehreren Stäben bestehenden Verbindungen und Anschlüssen treten zusätzlich die folgenden Versagensarten auf:

- Aufspalten des Holzes wegen zu geringen Abständen zwischen den einzelnen Stäben
- Ausreißen von ganzen Gruppen von Stäben (Blockschubversagen).

Einfluss der Schlankheit / Oberfläche

Bei der Auswertung von Versuchen an Gewindestangen mit Durchmesser M12, M16 und M20, welche nach dem GSA[®]-System [8] mit Epoxydharz-Klebstoff parallel und rechtwinklig zur Faserrichtung in BSH eingeklebt wurden, liess sich der Einfluss von Verankerungslänge ℓ und Bohrlochdurchmesser d_h am einfachsten mit einem Schlankheitsparameter $\lambda = \ell / d_h$ beschreiben. Im geprüften Schlankheitsbereich von $7.5 \leq \lambda \leq 15$ kann der Einfluss der Schlankheit auf den Mittelwert der Schubfestigkeit für parallel zur Faserrichtung eingeklebte Stahlstäbe mit einem Ansatz $\lambda^{-1/3}$ erfasst werden (Abbildung 10).

Der Auszieh Widerstand von rechtwinklig zur Faserrichtung eingeklebten Stäben war etwa 20 bis 40% grösser als derjenige von parallel zur Faserrichtung eingeklebten Stäben und ist abhängig von der Mantelfläche der Verankerungszone (Abbildung 10).

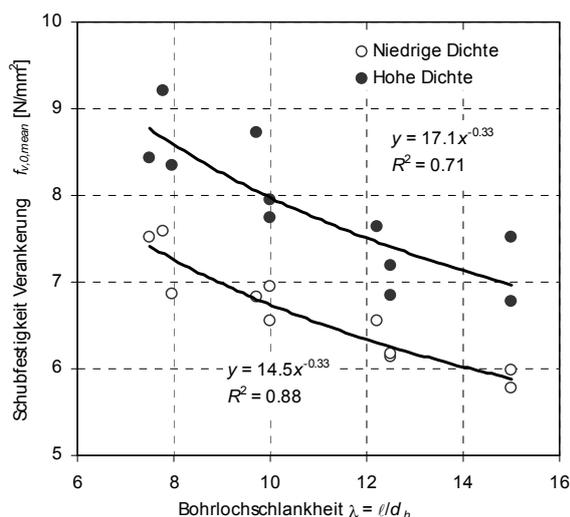


Abbildung 10: Schubfestigkeit (Mittelwert) in der Verankerungszone von parallel zur Faserrichtung in BSH aus Fichte eingeklebten Gewindestangen aus Stahl mit metrischem Gewinde (GSA[®]-System) in Funktion der Schlankheit des Bohrlochs.

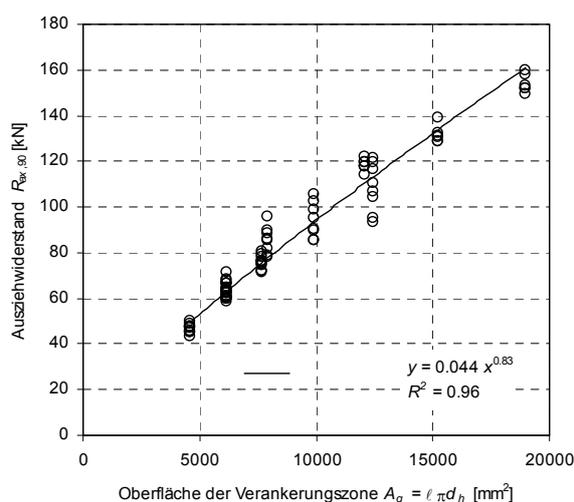


Abbildung 11: Auszieh Widerstand (Mittelwert) von rechtwinklig zur Faserrichtung in BSH aus Fichte eingeklebten Gewindestangen aus Stahl mit metrischem Gewinde (GSA[®]-System) in Funktion der Oberfläche der Verankerungszone.

Einfluss der Dichte des Holzes

Der Einfluss der Dichte auf den Tragwiderstand von eingeklebten Stahlstäben bei Beanspruchung auf Ausziehen wird in der Literatur kontrovers diskutiert. Während im europäischen Forschungsprojekt GIROD [9] kein Einfluss der Dichte gefunden wurde, zeigen Schweizer Versuche [5], [10] an Gewindestangenanschlüssen nach dem GSA[®]-System [8], dass der Tragwiderstand von auf Ausziehen beanspruchten eingeklebten Stahlstangen mit metrischem Gewinde, sofern Holzbruch massgebend ist, sehr wohl von der Dichte des Holzes abhängig ist. Die Autoren quantifizieren den Einfluss der Dichte bei parallel zur Faserrichtung in BSH eingeklebten Stäben mit einem Exponenten von 0.5 bis 0.6. Bei rechtwinklig zur Faserrichtung eingeklebten Stäben ist der Einfluss geringer. Er kann vernachlässigt oder mit einem Exponenten von 0.25 erfasst werden.

Bemessungsphilosophie

Zur Gewährleistung eines ausreichenden Tragwiderstandes von eingeklebten profilierten Stahlstäben (Einzelstangen oder Gruppen) müssen sämtliche der oben erwähnten Versagensformen untersucht bzw. nachgewiesen werden. In der Baupraxis werden Bauteile, Verbindungen und Anschlüsse bevorzugt, welche Überbeanspruchung durch möglichst grosse Deformationen vor dem Versagen „anzeigen“, d.h. sich duktil verhalten. Da im Falle von eingeklebten Stäben sowohl das Holz als auch der Klebstoff ein sprödes Bruchverhalten aufweisen, sollten Verbindungen und Anschlüsse mit eingeklebten Stäben vorzugsweise unter Verwendungen von Stahlstangen (Gewindestäbe oder Armierungsstähle) ausgeführt werden. Die Verbindung kann dann so bemessen werden, dass die Stahlstange das schwächste Glied der Kette darstellt und bei Erreichen der Traglast der Verbindung zu fließen beginnt, bevor sprödes Holz- oder Klebstoffversagen eintritt. Diese Bemessungsphilosophie hat noch nicht in alle Normen Eingang gefunden.

Da die mechanischen Eigenschaften von Stahl weniger streuen, als diejenigen von Klebstoff und Holz, kann bei einer Auslegung der Verbindung auf Stahlversagen die Traglast präziser vorausgesagt werden. Bei Zugverbindungen mit mehreren gleichzeitig wirkenden Stäben ist eine gleichmässige Kraftverteilung in den einzelnen Stäben nur bei ausreichender Duktilität des Einzelstabanschlusses und bei optimierten Steifigkeitsverhältnissen Stab / Holz erreichbar [4].

Beispiele von Bemessungsansätzen

Sämtliche nachfolgend angegebenen Bemessungsansätze sind nur bei Einhaltung bestimmter Rand- und Zwischenabstände der Stäbe gültig. Ausserdem ist der Tragwiderstand von Stabgruppen in der Regel geringer als das n-Fache des Tragwiderstands eines Einzelstabs [4]. Eine Auflistung der geometrischen Randbedingungen hätte den Rahmen der vorliegenden Publikation gesprengt. Bei Verwendung der Formeln im Rahmen von Bemessungsaufgaben sind diese geometrischen Randbedingungen jedoch zu beachten und in den erwähnten Literaturstellen und Dokumenten nachzuschlagen.

Ansatz aus der ENV 1995-2:1997

In der Vornorm des Eurocode 5, Teil 2 Brücken (ENV 1995-2:1997) ist folgender Ansatz zur Berechnung des charakteristischen Werts des Ausziehwidestands eines einzelnen Stahlstabs für den Fall von Schubbruch im Holz aufgeführt:

$$R_{ax,k} = \pi \cdot d_{equ} \cdot \ell \cdot f_{v,k} \quad \text{mit}$$

$$d_{equ} = \text{Min}(d_h, 1.25 \cdot d)$$

ℓ = Verankerungslänge des Stabs

$$f_{v,k} = 1.2 \cdot 10^{-3} \cdot d_{equ}^{-0.2} \cdot \rho_k^{1.5}$$

$f_{v,k}$ und ρ_k sind die charakteristischen Werte der Schubfestigkeit und der Dichte.

Dieser Ansatz wurde in den Sitzungen des für die Erarbeitung des Eurocode 5 zuständigen CEN/TC250/SC5 kontrovers diskutiert. U. a. wurde der starke Einfluss der Dichte (Exponent von 1.5) angezweifelt. In der Schlussversion des EC5-2 (EN 1995-2) fand sich schliesslich ein Bemessungsansatz auf Basis der unten beschriebenen GIROD-Forschungsarbeit. Um die Gültigkeit des Ansatzes für möglichst viele unterschiedliche Randbedingungen (Verankerungslänge, Klebstoffart, Versagensart, Rand- und Zwischenabstände) zu gewährleisten, wurde der GIROD-Ansatz modifiziert. Die daraus entstandene Bemessungsformel war zwar polyvalent anwendbar, ergab jedoch Bemessungswerte, welche deutlich unter dem in Versuchen festgestellten Tragwiderständen für optimierte System (z. B. GSA[®]-System) lagen. Diese führte dazu, dass die Norm EN 1995-2 bei der Schlussabstimmung nur ohne den Bemessungsansatz für eingeklebte Stäbe mehrheitsfähig wurde.

GIROD-Bemessungsansatz

Im Rahmen des umfangreichen europäischen Forschungsprojektes GIROD wurde ein Bemessungsansatz basierend auf quasi-nichtlinearer Bruchmechanik entwickelt [5]:

$$\bar{\tau} = \tau_f \cdot \frac{\tanh \omega}{\omega} \quad \text{mit}$$

$\bar{\tau}$ = mittlere Schubspannung entlang des Stabs

τ_f = lokale Schubspannung in der Klebefuge

ω = Parameter in Funktion von Anschlussgeometrie, Steifigkeit von Holz / Klebstoff / Stab und Bruchenergie der Klebfuge.

Anhand einer Vielzahl von Versuchen wurde daraus der folgende Bemessungsansatz zur Berechnung des Ausziehwidestands entwickelt:

$$R_{ax,k} = f_{ax,k} \cdot \pi \cdot d_{equ} \cdot \ell \cdot \frac{\tanh \omega}{\omega} \quad \text{mit}$$

$$\omega = 0.017 \cdot \ell / \sqrt{d_{equ}}$$

ℓ = Verankerungslänge (Klebefuge)

$$d_{equ} = \text{Min}(d_h, 1.25 \cdot d)$$

$$f_{ax,k} = 5.8 \text{ N/mm}^2.$$

Ansatz Riberholt

Riberholt schlägt einen Bemessungsansatz (auf Mittelwertsniveau) für den Ausziehwidestand vor, welcher zwischen Stäben mit kurzen und langen Verankerungen ℓ unterscheidet [11]:

$$R_{ax} = f_{ws} \cdot \rho \cdot d \cdot \sqrt{\ell} \quad \text{für } \ell \geq 200 \text{ mm}$$

$$R_{ax} = f_{wl} \cdot \rho \cdot d \cdot \ell \quad \text{für } \ell < 200 \text{ mm}$$

ρ ist dabei ein Holzdichtewert, welcher aus der Darmmasse und dem Volumen im Feuchtzustand zu ermitteln ist. Die Festigkeitsparameter f_{ws} und f_{wl} betragen 520 bzw. 650 N/mm^{1.5} und 37 bzw. 46 N/mm² für spröde bzw. nicht-spröde versagende Klebstoffe.

Gemäss Riberholt waren die Resorcinharze und einige Epoxyharze der Gruppe der spröden Klebstoffe zuzuweisen, während 2-K-PUR-Klebstoffe als nicht-spröde galten. Heutzutage ist bekannt, dass die rheologischen Eigenschaften der verschiedenen Klebstoffe unabhängig vom Klebstofftyp in einem weiten Mass „eingestellt“ werden können.

Ansatz aus der DIN 1052:2008

Gemäss der aktuellen deutschen Norm DIN 1052:2008 kann der charakteristische Ausziehwidestand von eingeklebten profilierten Stahlstäben für einen Durchmesserbereich von $6 \text{ mm} \leq d \leq 30 \text{ mm}$ im Fall von Versagen in der Klebfuge berechnet werden mit:

$$R_{ax,k} = \pi \cdot d \cdot \ell \cdot f_{k1,k}$$

Der charakteristische Wert der Klebfugenfestigkeit $f_{k1,k}$ beträgt in Abhängigkeit der Verankerungslänge:

$$f_{k1,k} = 3.5 - 0.0015 \cdot \ell \quad \text{für } 500 < \ell \leq 1000 \text{ mm}$$

$$f_{k1,k} = 5.25 - 0.005 \cdot \ell \quad \text{für } 250 < \ell \leq 500 \text{ mm}$$

$$f_{k1,k} = 4.0 \quad \text{für } \ell \leq 250 \text{ mm}$$

Der Durchmesser d entspricht sowohl bei Gewindestangen als auch bei Betonrippenstählen dem Nenndurchmesser. Die Einklebelänge ℓ_{min} muss mindestens betragen:

$$\ell_{min} = \text{Max}(0.5 \cdot d^2; 10 \cdot d)$$

Bei parallel zur Faserrichtung eingeklebten zugbeanspruchten Stahlstäben ist die Zugbeanspruchung am Ende des Stahlstabes nachzuweisen. Als wirksame Querschnittsfläche des Holzes darf dabei je Stahlstab höchstens eine Fläche von $36 \cdot d^2$ angesetzt werden.

Das Modell basiert auf Versuchen von Blass [12] und lehnt sich eng an das Modell von Riberholt [11] an (siehe oben).

Bemessung nach Norm SIA 265:2003

Verbindungen mit eingeklebten profilierten Stäben sind auf gemäss Norm SIA 265:2003 auf Bauteile, die den Feuchteklassen 1 und 2 zugeordnet sind, zu beschränken. Es ist nachzuweisen, dass das Verhalten des Leims (Kunstharz-Leim bzw. -Mörtel) und seines Verbunds mit dem profilierten Stab und mit dem Holz während der geplanten Nutzungsdauer des Bauwerks innerhalb der angenommenen Temperatur- und Feuchtebereiche gleichbleibend zuverlässig ist. Der Einfluss von Holzfeuchteänderungen und der daraus resultierenden Zwängungen bzw. Risse ist zu beachten.

Beanspruchung in Schaftrichtung

Der Tragsicherheitsnachweis von Verbindungen mit eingeklebten, axial belasteten Stäben ist in der Regel durchzuführen bezüglich:

- Versagen des profilierten Stabs
- Versagen des Leims und seines Verbunds mit dem profilierten Stab und dem Holz
- Versagen des Holzes entlang der Klebefuge
- Versagen eines Holzteils im Bereich der Verbindung.

Die Kraftübertragung zwischen Leim und profiliertem Stab hat mechanisch zu erfolgen; eventuelle Haftung ist nicht mit in Rechnung zu stellen.

Bei Zugverbindungen mit mehreren gleichzeitig wirkenden Stäben ist eine gleichmässige Kraftverteilung nur bei ausreichender Duktilität des Einzelstabanschlusses erreichbar. Andernfalls ist von einer ungleichmässigen Kraftverteilung auszugehen. Duktilen Verhalten von Verbindungen mit eingeklebten profilierten Stäben wird in der Regel erreicht, wenn das mit grösseren Verformungen eintretende Zugversagen des Stabs mit Sicherheit vor den anderen Versagensmöglichkeiten erfolgt.

Die charakteristische Ausziehungskraft in Schaftrichtung ist versuchsmässig an repräsentativen Verbindungen (Gruppe von eingeklebten Stäben) zu bestimmen. Dabei sind u.a. folgende Einflussgrössen zu berücksichtigen: Lochdurchmesser, Stabdurchmesser, Länge der Klebefuge; Holzart, Festigkeitsklasse, Rohdichte, Holzfeuchte; Stahlgüte, Profilierung; Eigenschaften des Klebstoffs; Winkel zwischen Stab- und Faserrichtung; Rand- und Zwischenabstände.

Für Druckkrafteinleitung dürfen die gleichen Werte wie für Zugkrafteinleitung eingesetzt werden.

Beanspruchung rechtwinklig zur Schaftrichtung

Es gelten die Bestimmungen für rechtwinklig zur Schaftrichtung beanspruchte Stabdübel gemäss Norm SIA 265, wobei infolge der Profilierung ein reduzierter plastischer Biege­widerstand einzuführen ist.

Teilrevision der Norm SIA 265:2003

Im Rahmen der laufenden Teilrevision der Norm wurden bei der Bemessung von eingeklebten profilierten Stäben keine Änderungen vorgenommen. Es wurde einzig der Begriff „eingeleimt“ durch „eingeklebt“ ersetzt. Leime sind Klebstoffe auf Wasserbasis und stellen nur eine Teilmenge der gesamten Palette der heute erhältlichen Klebstoffe dar.

Kombinierte Beanspruchung

Bei gleichzeitiger Beanspruchung von eingeklebten Stahlstäben auf Abscheren (F_d) und auf Herausziehen ($F_{ax,d}$) ist der folgende sowohl in der DIN 1052:2008 als auch in der SIA-Norm 265:2003 angegebene quadratische Bemessungsansatz zu verwenden:

$$\left(\frac{F_{ax,d}}{R_{ax,d}}\right)^2 + \left(\frac{F_d}{R_d}\right)^2 \leq 1$$

$R_{ax,d}$ und R_d sind die Bemessungswerte des Tragwiderstands der Verbindung im Falle der alleinigen Beanspruchung auf Ausziehen bzw. auf Abscheren.

Fazit

Verbindungen mit eingeklebten profilierten Stahlstäben zählen zu den leistungsfähigsten Verbindungsarten. Um die volle Leistungsfähigkeit zu erreichen muss sowohl bei der Bemessung, der Wahl der Komponenten als auch bei der Herstellung mit besonderer Sorgfalt vorgegangen werden und eine Qualitätssicherung ist unerlässlich. Es gibt teilweise widersprüchliche Bemessungsansätze für diese Art Verbindungen welche zudem auf unterschiedlichen Annahmen beruhen. In der Summe ist daher der Schwierigkeitsgrad einer solchen Verbindung als hoch einzustufen, weshalb empfohlen wird, auf bewährte und durch Versuche gut abgesicherte Systemlösungen zurückzugreifen.

Literatur

- [1] *Joints in Timber Structures. Proceedings PRO 22. in Proceedings of the International RILEM-Symposium on "Joints in Timber Structures"*. 2001. Stuttgart, Germany: RILEM Publication S.A.R.L.
- [2] Tlustochowicz, G., E. Serrano, and R. Steiger, *State-of-the-art review on timber connections with glued-in steel rods*. Materials and Structures, 2010. Online first, 11. 11. 2010(DOI 10.1617/s11527-010-9682-9).
- [3] Bainbridge, R.J. and C.J. Mettem, *A review of moment resistant structural timber connections*. Structural Building Engineering, 1998. 128(4): p. 323-331.
- [4] Gehri, E. *Ductile behaviour and group effect of glued-in steel rods*. in *International RILEM Symposium on Joints in Timber Structures*. 2001. Stuttgart, Germany: RILEM Publications s.a.r.l.
- [5] Steiger, R., E. Gehri, and R. Widmann, *Pull-out strength of axially loaded steel rods bonded in glulam parallel to the grain*. Materials and Structures, 2007. 40(1): p. 57-68.
- [6] Steiger, R. and J. Köhler. *CIB-W18/38-17-1: Analysis of censored data - Examples in timber engineering research*. in *Meeting Thirty-Eight*. 2005. Karlsruhe, Germany.
- [7] Strahm, T. *Verbindungen mit grosser Leistung*. in *SAH Fortbildungskurs*. 2009. Weinfelden.
- [8] Neue Holzbau, L. www.neueholzbau.ch.
- [9] Gustafsson, P.-J., et al. *A strength design equation for glued-in rods*. in *International RILEM Symposium on Joints in Timber Structures*. 2001. Stuttgart, Germany: RILEM Publications s.a.r.l.
- [10] Widmann, R., R. Steiger, and E. Gehri, *Pull-out strength of axially loaded steel rods bonded in glulam perpendicular to the grain*. Materials and Structures, 2007. 40(8): p. 827-839.
- [11] Riberholt, H. *CIB-W18/21-7-2: Glued bolts in glulam - Proposal for CIB code*. in *Meeting Twenty-One*. 1988. Parksville, Vancouver Island, Canada.
- [12] Blass, H.J., et al., *Wirkungsweise von eingeleimten Gewindestangen bei der Aufnahme von Querkraften in gekrümmten Biegeträgern und Entwicklung von Bemessungsgrundlagen, Teil 3*, S. Fraunhofer IRB Verlag, Editor. 1996, Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine. Universität Karlsruhe: Karlsruhe.