

Eingeklebte Stahlstäbe – state-of-the-art – Einflussparameter, Versuchsergebnisse, Zulassungen, Klebstoffnormung, Bemessungs- und Ausführungsregeln

Simon Aicher
MPA Universität Stuttgart
Stuttgart, Deutschland



Gordian Stapf
MPA Universität Stuttgart
Stuttgart, Deutschland



Eingeklebte Stahlstäbe – state-of-the-art –Einflussparameter, Versuchsergebnisse, Zulassungen, Klebstoffnormung, Bemessungs- und Ausführungsregeln

1. Einleitung – frühe wissenschaftliche Arbeiten und Bauwerke

Eingeklebte Stahlstäbe sind heute in der Regel metrische Gewindestangen nach DIN 976-1 oder Betonstahl nach DIN 488-2. Die Löcher sind wenige Millimeter größer als die Außendurchmesser der Stahlstäbe und der Verbund zwischen Holz und Stahl wird mittels eines Zweikomponenten-Polyadditions-Klebstoffs hergestellt.

Die ersten Versuche zu eingeklebten Stahlstäben in Holzbauteilen wurden im deutschsprachigen Raum von Baumeister et al. (1972) veröffentlicht. Es handelte sich dabei um beim Bau der Messehallen in Nürnberg mittels Phenol-Resorcin-Formaldehyd-(PRF-)Klebstoff eingeklebte Holzschrauben, die die Auflager der Dachkonstruktion aus Brettschichtholz verstärkten. Ebenfalls in den 70er Jahren wurden die ersten Bauwerke mit eingeklebten Stahlstangen in Russland erstellt (Turkovski 1989).

Die ersten wissenschaftlichen Veröffentlichungen aus dem skandinavischen Raum (Edlund 1975; Riberholt 1977) beschäftigten sich mit metrischen Gewindestangen, die in Löcher mit Durchmessern kleiner als der jeweilige Nenndurchmesser eingedreht wurden und bei denen Teile der Gewindgänge zusätzlich mit PRF-Klebstoffen ausgefüllt waren. Bereits Ende der 70er Jahre wurden von Möhler und Lautenschläger (1978) die ersten Gewindestangen mit einer der heutigen Produktionstechnik entsprechenden Vorgehensweise – Zweikomponenten-Polyadditionsklebstoffe und Lochdurchmesser größer dem Nenndurchmesser der Stahlstangen – verklebt und geprüft. Es wurden dabei zwei im Massivbau etablierte Verfahren auf den Holzbau übertragen und erweitert.

In den 80er und 90er Jahren wurden weitere wissenschaftliche Untersuchungen durchgeführt und es erfolgten auch Praxisanwendungen, wobei die Lochdurchmesser kleiner und größer als der Nenndurchmesser der Gewindestangen waren. Die überwiegende Anzahl der eingeklebten Gewindestangen dienten zur Querkraftverstärkung von großformatigen satteldachförmigen und gekrümmten Brettschichtholzträgern. Auch im Ausland (z.B. Neuseeland) wurden gegen Ende der 80er Jahre erste Bauwerke mit Verbindungen aus eingeklebten Gewindestangen gebaut (u.a. Buchanan und Fletcher 1989).

Im Rahmen des europäischen Forschungsvorhabens GIROD (u.a. Bengtsson und Johansson 2002, Aicher 2001), das mit rund 500 geprüften Gewindestangen die bislang umfangreichste Untersuchung zu eingeklebten Stahlstäben darstellt, waren die Bohrl Lochdurchmesser ausschließlich größer als die Gewindestangen und es wurden alle vorgenannten Klebstoffe untersucht. Hierbei wurde u.a. bestätigt, dass PRF-Klebstoffe aufgrund ihrer ausgeprägten Volumenschwindung bei der Aushärtung und bedingt durch den extrem spröden Versagensmechanismus wenig für diesen sehr speziellen Anwendungsfall geeignet sind und stattdessen schrumpffreie und sich insgesamt duktiler verhaltende 2K-Klebstoffe auf Epoxid- oder Polyurethanbasis zu verwenden sind.

2. Anwendbarkeit durch Normen und Zulassungen

2.1. National

Die erste normative Erwähnung von eingeklebten Stangen findet sich in DIN 1052:2004 und später gleichlautend übernommen in DIN 1052:2008, wobei implizit noch beide Produktionsmethoden (Bohrlochdurchmesser größer bzw. kleiner als der Stabdurchmesser) erlaubt waren. Bezüglich des Klebstoffs wurde hier lediglich auf DIN EN 301:2006, die

jedoch ausschließlich PRF-, UF- und MUF-Polykondensationsklebstoffe regelt, verwiesen. Die Bemessung hingegen entsprach bereits weitgehend DIN EN 1995-1-1/NA:2013.

Mit der Ausstellung der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung Z-9.1-705 (2009) für den Zweikomponenten-Epoxid-(2K-EP-) Klebstoff WEVO Spezialharz EP 32 S mit WEVO Härter B 22 TS wurde das Einkleben von Stahlstangen in Holzbauteile erstmals bauaufsichtlich zulässig ausführbar gemacht. Die Zulassung lässt nur das Einkleben von Stahlstäben in Löcher mit einem Durchmesser größer als der Stangendurchmesser zu. Diesem Sachverhalt wurde auch in DIN 1052-10:2010 Rechnung getragen, in der erstmalig die Herstellung von Verbindungen mit Löchern kleiner dem Stabdurchmesser nicht mehr erwähnt wurde.

In der Folge wurden 2010 und 2012 mit dem Zweikomponenten-Polyurethan-(2K-PUR-) Klebstoff LOCTITE CR 421 PUBOND (Z-9.1-707) und dem 2K-EP-Klebstoff GSA Harz mit GSA Härter (Z-9.1-778) zwei weitere Klebstoffe für die gleiche Anwendung zugelassen. Da der Inhaber der GSA-Klebstoff-Zulassung, bei der erstmals ein Rückversatz der Klebefuge am austretenden Stangenende in Verbindung mit erhöhter charakteristischer Festigkeit geregelt ist, eine Holzbau-Firma ist, ist der Klebstoff/die Verbindungstechnologie nicht uneingeschränkt anwendbar.

Des Weiteren wurde seitens der Studiengemeinschaft Holzleimbau im Jahr 2012 (geändert 2016) die abZ 9.1-791 erwirkt, die neben Bemessungsregeln für druckbeanspruchte eingeklebte Gewindestangen eine deutliche Reduzierung der Mindestabstände zwischen einzelnen Stangen bzw. zum unbeanspruchten Rand enthält.

In allen genannten DIBt-Zulassungen, sowie insbesondere in den Technischen Baubestimmungen DIN EN 1995-1-1/NA:2013, sowie DIN 1052-10:2012 wird für die Ausführung von Verbindungen mit eingeklebten Stahlstäben eine Bescheinigung über die Eignung zum Einkleben von Stahlstäben in tragende Holzbauteile gemäß DIN 1052-10:2012-05 11, Abschnitt 5, vorausgesetzt. Die in DIN 1052-10, Abschnitt 4, genannten Ausführungsregeln werden im Rahmen der in die DIN 1052-10, Abschnitt 5, genannten Betriebs- und Personenqualifizierungsmaßnahmen ergänzt.

In jüngster Zeit, wurde der Anwendungsbereich in Holz eingeklebter Stahlstäbe seitens der abZ Z-9.1-705 (im Druck) deutlich erweitert und zwar um die Zulässigkeit von Ermüdungsbeanspruchungen und eine diesbezügliche Bemessung sowie über die Anwendung in Lärchenholz und in Furnierschichtholz aus Buche mit deutlich erhöhten charakteristischen Festigkeitswerten.

2.2. Europa

Trotz Erwähnung in Normentwürfen und Vornormen zwischen 1997 und 2003 wurden eingeklebte Stahlstäbe nicht in den Eurocode 5 (DIN EN 1995-1-1:2010 bzw. DIN EN 1995-2:2010) aufgenommen, siehe hierzu auch Abschnitt 4. Im Hinblick auf die zweite Generation der Eurocodes gibt es zwischenzeitlich eine Untergruppe innerhalb von CEN/TC 250/SC 2/WG 5, die sich mit der Ausarbeitung von Bemessungsregeln für eingeklebte Stahlstäbe für die nächste Version des Eurocode 5 beschäftigt.

Des Weiteren hat die Arbeitsgruppe 6 von CEN/TC 193/SC 1/WG 6 «Glued-in rods in glued laminated timber» bereits einen Norm-Entwurf (2017), der sich mit der Prüfung, Anforderungen und der Klassifizierung von 2K-EP und -PU-Klebstoffen für das Einkleben von Stahlstäben befasst, zur CEN-Umfrage vorgelegt. Ein inhaltlich weitgehend entsprechender Normentwurf wird zurzeit seitens TC 165/WG 6 als ISO-Comitee draft für die Umfrage vorbereitet. In technischer Hinsicht greifen der europäische CEN- und der internationale ISO-Normentwurf im Wesentlichen diejenigen Versuche und Auswertungen auf, die bereits zur Erstellung der in Abschnitt 2.1 erwähnten allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen geführt haben.

Die Versuche gemäß Normentwurf CEN/TC 193/SC 1/WG 6 N75 beinhalten neben ergänzten Standard-Klebstoffprüfungen nach DIN EN 302-1 bis -8 und diesbezüglichen Anforderungen gemäß DIN EN 301:2015 für dünne und dicke Holzklebfugen, mit speziellem Bezug auf die besonderen Bedingungen beim Einkleben von Stahlstäben, auch

- Stangen-Auszugsversuche aus (optional) Brettschichtholz (BSH), Brettsperrholz (BSP) und/oder Furnierschichtholz (FSA) mit Einklebelängen l_{ad} von 200 mm, 400 mm und 600 mm und mit Klebfugendicken von $d_{Klebstoff}$ von 1 mm, 2 mm und 3 mm sofern seitens des Antragsstellers kein eingeschränkter Stangenlängen- und Fugendickenbereich avisiert ist; die Ergebnisse werden bezüglich der effektiv geprüften Höchstlasten mit dem Faktor ρ_{ref}/ρ normiert,
- Temperaturversuche mit zwei 30stündigen Temperaturzyklen bei 60°C und einer Last entsprechend 80% der charakteristischen bemessungsrelevanten Kurzzeit-Verbundfestigkeit (Aufbringung bei Raumklima, dann Erwärmung unter Last),
- Zeitstand-Kriechversuche mit extremem Klimazyklus für den Anwendungsbereich der Nutzungsklassen II und III. Der Klimazyklus beinhaltet einen Anstieg der Holzfeuchte des Prüfkörpers von 12% auf 18-20% innerhalb von rd. sechs Monaten und die anschließende Trocknung bei einer Luftfeuchte <40% auf 8±1% Holzfeuchte sowie
- optionale Prüfungen der Gebrauchstauglichkeit, d.h. der Topfzeit, der offenen Wartezeit und der Aushärtezeit sowie die Zeit bis zum Erreichen der Endfestigkeit. Die Anforderung des technisch unabdingbaren Nachweis der Gebrauchseigenschaften obliegt nationalen Baurechtsvorgaben und ist z.B. in Deutschland mandatorisch.

Von technisch grundlegender Bedeutung ist, dass im Rahmen der genannten Eignungsnachweisprüfungen von Klebstoffen für eingeklebten Stahlstäbe grundsätzlich der nachfolgend genannte Verbundmechanismus unterstellt wird: Der Verbund zwischen der profilierten Oberfläche des Stahlstabes (Gewindestange mit metrischem Gewinde oder Betonrippenstahl) erfolgt grundsätzlich ausschließlich als reiner Formschluss des schrumpffreien Klebstoffs mit dem Stahlstab, während der Verbund der Klebstoffschicht mit der Bohrlochwand im Holzteil als reine mechanisch, physikalisch-chemische Klebeverbindung im üblichen Sinne einer (Holz-)Klebeverbindung erfolgt.

Des Weiteren wird im informativen Annex A zu CEN/TC 193/SC 1/WG 6 N75 (2017) ein weitgehend an DIN EN 1995-1-1/NA angelehnter Bemessungsvorschlag für axial und schräg/rechtwinklig beanspruchte Verbindungen unter beliebigen Faserwinkeln unterbreitet.

3. Technische Problemstellungen

3.1. Mechanischer Hintergrund

Die Mechanik eingeklebter, axial beanspruchter Stahlstangen entspricht im Wesentlichen einer einfach überlappenden Klebeverbindung, bei der an den Überlappungsenden in Folge der größten Dehnungsdifferenzen zwischen den gegenüberliegenden Fügeteilen die größten Spannungen in der Klebefuge auftreten. In der grundlegenden Arbeit von Volkersen (1938) wurde dieser Zusammenhang für Nietverbindungen hergeleitet. Bezüglich der vollständigen Herleitung für eine Klebeverbindung und die hierfür erforderlichen Umformungen vergleiche z.B. Aicher (2003).

Die Schubspannungsverteilung $\tau(x)$ längs der Fugen/Stangenlänge l_{ad} beträgt (Abmessungen siehe Abbildung 1)

$$\tau(x) = \tau_m \frac{\rho}{2} \left[\frac{\cosh(\frac{\rho x}{l_{ad}})}{\sinh(\frac{\rho}{2})} - \frac{1-\alpha \sinh(\rho x/l_{ad})}{1+\alpha \cosh(\rho/2)} \right] \quad (1)$$

mit

$$\rho = \sqrt{\frac{l_{ad}^2}{E_{Stahl} \cdot A_{Stahl}} \cdot \frac{G_{Kleb}}{d_{Kleb}} (1 + \alpha)} \quad \text{Volkersen-Term} \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{E_{Stahl} \cdot A_{Stahl}}{E_{Holz} \cdot A_{Holz}} \quad \text{Verhältnis der effektiven Steifigkeiten der Fügeteile} \quad (3)$$

$$\tau_m = \frac{F_{ax}}{l_{ad} \cdot d^2 / 4 \cdot \pi} \quad \text{mittlere Klebfugenspannung} \quad (4)$$

$$\frac{G_{Kleb}}{d_{Kleb}} \quad \text{effektive Schubsteifigkeit der Klebeverbindung}^1 \quad (5)$$

¹ Die Verbindungssteifigkeit setzt sich für zwei Stahl-Fügeteile im Wesentlichen aus dem Schubmodul und der Dicke der Klebschicht zusammen, da der Schubmodul des Klebstoffs um ein Vielfaches kleiner ist als derjenige von Stahl. Bei eingeklebten Gewindestangen ist der Schubmodul des Klebstoffs hingegen in etwa gleich groß wie derjenige des Holzbauteils. Daher verzerrt sich eine an den Klebstoff angrenzende Zone im Holz mit der

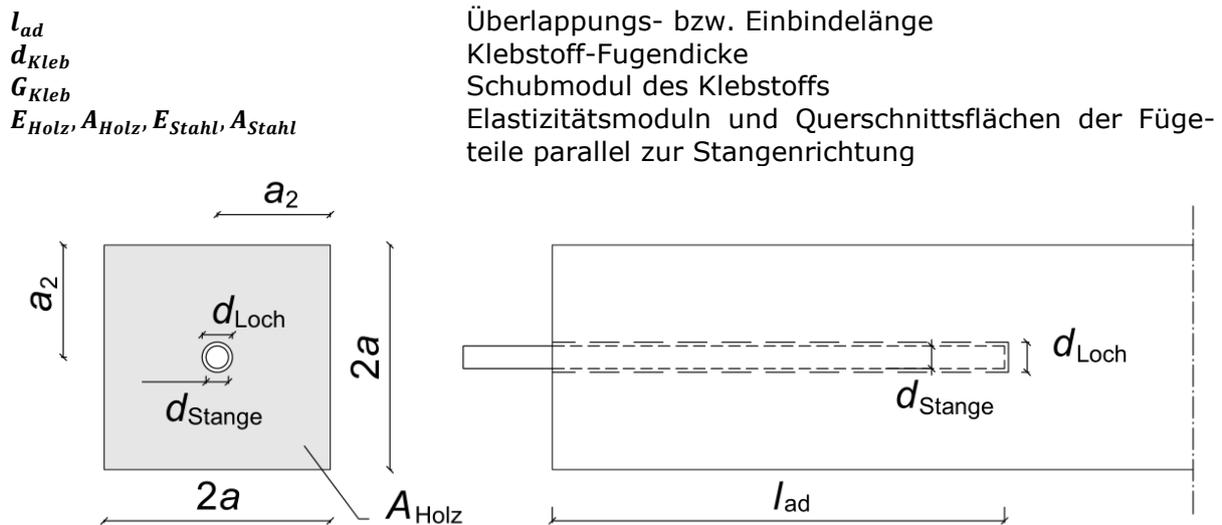


Abbildung 1: Geometrie und Abmessungsbezeichnungen einer typischen Verbindung mit eingeklebten Stahlstangen.

Die Gln. (1)-(5) veranschaulichen, dass die Fugenspannungsverteilung von drei wesentlichen Einflussgrößen abhängt:

1. von der Wurzel des Quotienten aus
 - der quadrierten Einbindelänge der Stange l_{ad}^2 und
 - der effektiven Gesamtsteifigkeit der Verbindung $\frac{E_{Stahl} \cdot A_{Stahl}}{1+\alpha}$,
2. von einem Verbindungsfaktor $\frac{G_{Kleb}}{d_{Kleb}}$, hier effektive Schubsteifigkeit genannt und
3. von dem Unterschied α der effektiven Dehnsteifigkeiten der Füge­teile Stahlstab und Holz.

Es ist offensichtlich, dass die Einbindelänge der Stange, l_{ad} , den einflussreichsten Parameter darstellt, nicht nur weil sie quadriert in den Volkersen-Term (Gl. 2) eingeht, sondern auch weil sie im Prinzip zwischen 60 mm und 1000 mm frei wählbar ist. Dabei führen längere Einbindelängen zu größeren Spannungsunterschieden in der Klebfuge entlang der eingeklebten Stangen und damit zu einer kleineren effektiven Klebfestigkeit $f_{k1} = \tau_{m,u}$.

Die effektive Gesamtsteifigkeit der Verbindung, die ebenfalls weitgehend frei wählbar ist, hängt in erster Linie vom Durchmesser der verwendeten Stange $d = d_{Stange}$ ab. Der Elastizitätsmodul der Stahlstäbe beträgt i.d.R. $E_{Stahl} = 210$ GPa und derjenige des Holzes liegt bei faserparalleler Einbindung in Nadelholz bei $E_{Holz} = 11,5$ GPa im Falle von GL24h.

Der Querschnitt des Holzes ist mit Bezug auf DIN EN 1995-1-1/NA:2013 in Abhängigkeit des Stangenquerschnitts und des zulässigen Randabstands a_2 nach unten auf $A_{Holz} \geq (2 \cdot a_2 \cdot d_{Stange})^2$ begrenzt, um das Aufspalten des Holzquerschnitts zu verhindern. Dies ergibt mit den reduzierten Randabständen der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung Z-9.1-791 von $a_2 \geq 1,75$ eine Querschnittsfläche von $A_{Holz} \geq (3,5 \cdot d_{Stange})^2$. Bei größeren Holzquerschnitten entziehen sich die Querschnittsränder der Last, was durch den Netto-Querschnittsnachweis nach DIN EN 1995-1-1/NA veranschaulicht wird, der lediglich für eine Fläche von $A_{Holz} \leq (6 \cdot d)^2$ geführt werden darf. Setzt man diesen Bereich für die Querschnittsfläche des Holzquerschnitts an, so ist das Steifigkeitsverhältnis auf rd. $0,4 \leq \alpha \leq 1,2$ begrenzt.

Die effektive Steifigkeit $\frac{E_{Stahl} \cdot A_{Stahl}}{1+\alpha}$ liegt zwischen rd. 3 MN für $d_{Stange} = 6$ mm und rd. 105 MN für $d_{Stange} = 30$ mm. Die Einbindelänge l_{ad} ist mit dem Durchmesser d_{Stange} und damit mit

Klebstoffschicht und führt dadurch zu einer deutlich besseren Verteilung der Spannungen entlang der Stangen als bei zwei Stahlfügeteilen. Für die Berechnungen in Abschnitt 3.1 wurde ein versuchsbasiert aus den in Gustafsson und Serrano (2001) angegebenen Materialparametern ermittelter Wert von $\frac{G_{Kleb}}{d_{Kleb}} = 30 \frac{N}{mm}$ angenommen. Dies entspricht einer mitwirkenden Verbindungszone im Holz von rd. 20 mm.

der effektiven Steifigkeit durch die in Zulassungen und Normen festgelegten Grenzen für die Einbindelänge, $l_{ad,min}$ und $l_{ad,max}$ (siehe Gln. 18, 19), gekoppelt. Dadurch liegt bei einer Einbindelänge $l_{ad} = 200$ mm die maximale Spreizung der Durchmesser von $6 \text{ mm} \leq d_{Stange} \leq 20$ mm (vergleiche hierzu auch Abbildung 4a) vor.

Abbildung 2 zeigt die Auswirkung von verschiedenen Geometrien auf die Spannungsverteilung entlang einer Gewindestange mit $l_{ad} = 200$ mm gemäß Gl. (1), d.h. nach Volkersen. Die Spannungsspitze bei einer Verbindung mit einem quadratischen Holzquerschnitt mit Seitenlänge $a_{Holz} = 10 \cdot d_{Stange}$ ist, wie in Abbildung 2a dargestellt, 17% größer als bei einer Seitenlänge von $a_{Holz} = 3,8 \cdot d_{Stange}$ (entspricht bei den hier angenommenen Elastizitätsmoduln einem Steifigkeitsverhältnis der Fügeteile von $\alpha = 1$). Wie ersichtlich verschiebt sich der Maximalwert der Verbund/Scherspannung vom eingebundenen Stangenende $\xi = 0,5$ mit zunehmender Holzquerschnittsfläche mehr in Richtung des austretenden Stangenendes. In Abbildung 2b ist zu erkennen, dass z.B. für $\alpha = \text{konst.} = 1$ die Stahlstange mit 6 mm Durchmesser eine 34% größere Spannungsspitze als die Stahlstange mit dem Durchmesser $d_{Stange} = 20$ mm aufweist.

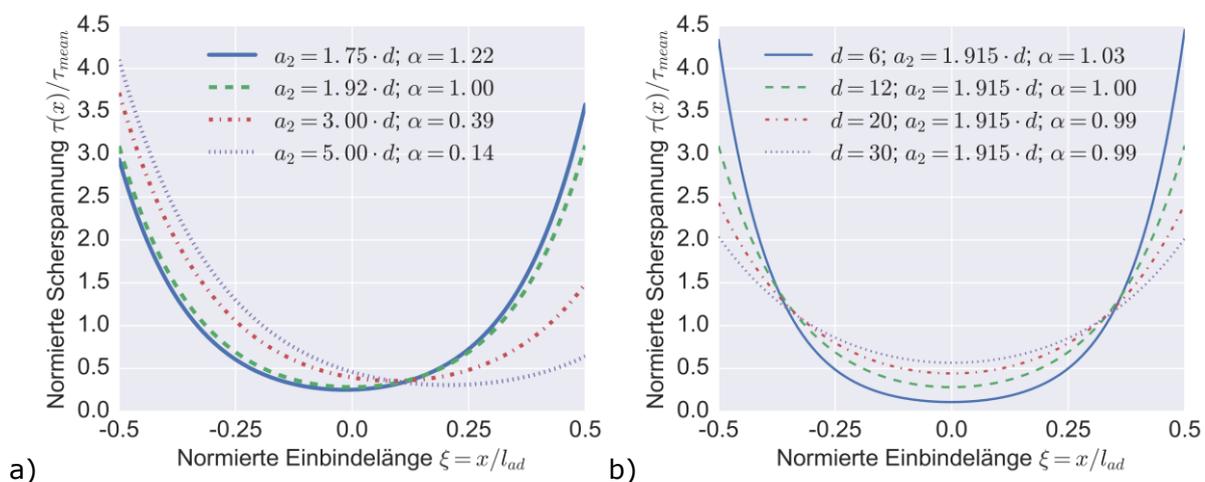


Abbildung 2: Auswirkung von verschiedenen Geometrien auf die Spannungsverteilung entlang einer Gewindestange mit $l_{ad} = 200$ mm und einer Klebfugensteifigkeit $G_{Kleb}/d_{Kleb} = 30$ N/mm gemäß Gln. (1)-(5)
 (a) unterschiedliche Randabstände a_2 und damit Holzquerschnitte A_{Holz} ($d_{Stange} = 12$ mm)
 (b) unterschiedliche Stangendicken d_{Stange} in mm ($a_2 = 2 \cdot d$).

3.1. Temperaturproblematik

Die für das Einkleben von Stahlstangen geeigneten² 2K-EP und PU-Klebstoffe weisen in der Regel eine vergleichsweise niedrige Glasübergangstemperatur von rd. 40°C bis 60°C auf. Bei den genannten Temperaturen beginnt der sogenannte «glasartige», spröde-elastische Zustand der Polymere, der bei Raumtemperatur vorliegt, in einen zähflüssigen, visko-elastischen Zustand überzugehen. Damit geht ein extremer Festigkeitsabfall einher. Da der Anwendungsbereich des Eurocode 5 Temperaturen bis 60°C einschließt, können viele Klebstoffe nicht (unmodifiziert) für den Holzbau verwendet werden. So ist z.B. der bei den GIROD-Versuchen (Bengtsson und Johansson 2002) verwendete 2K-EP Klebstoff zu dem in der abZ Z-9.1-705 zugelassenen Klebstoff weiterentwickelt worden und für den 2K-PUR-Klebstoff gemäß abZ Z-9.1-707 wird der Anwendungsbereich auf maximal 50°C eingeschränkt.

Eine Möglichkeit, die Glasübergangstemperatur nach oben zu verschieben, bietet die Temperaturbehandlung des Klebstoffs bei der Aushärtung. So wurde die Glasübergangstemperatur des bei den GIROD-Versuchen eingesetzten, ohne Temperaturbehandlung ausschließlich bis 50°C geeigneten Klebstoffs für das Bauvorhaben Metropol Parasol

² Der Begriff Eignung resultiert u.a. wesentlich aus Beschränkungen gemäß Gefahrenstoffverordnung (GefStoffV, 2010;2017) und hieraus resultierender Härterformulierungen. Bei möglichen gekapselten Applikationen und aminhaltigen Härtern können 2K-EPs Glasübergangstemperaturen von mehreren 100°C aufweisen.

Sevilla durch eine mehrstündige Erhitzung in einer Klimakammer auf über 70°C auf ca. 70°C angehoben (Schmid und Fischer 2010).

Da die Nachbehandlungs-Methode einer Erhitzung der gesamten Verbindung äußerst umständlich und kostenintensiv ist und auch nicht in jedem Fall durchführbar ist, sind in letzter Zeit verschiedene Ansätze betreffend einer Erhitzung des Klebstoffs im noch flüssigen Zustand untersucht worden. So wird z.B. für die Verarbeitung und die zulassungsgemäße Anwendbarkeit des 2K-Epoxyd-Klebstoffs gemäß abZ Z-9.1-778 auf eine Temperatur von 40°C vorgeheizt, bevor er in das Bohrloch eingefüllt wird.

Um die gemäß abZ Z-9.1-705 bei Raumtemperatur deutlich erhöhten Festigkeiten für eingeklebte Stahlstäbe in Furnierschichtholz aus Buche auch bei einer Temperatur von 60°C dauerhaft erreichen zu können, ist der Klebstoff zulassungsgemäß nach dem Einfüllen in das Bohrloch mit einem Heizdraht auf eine Temperatur von rd. 90°C zu erwärmen, siehe Abbildung 3.

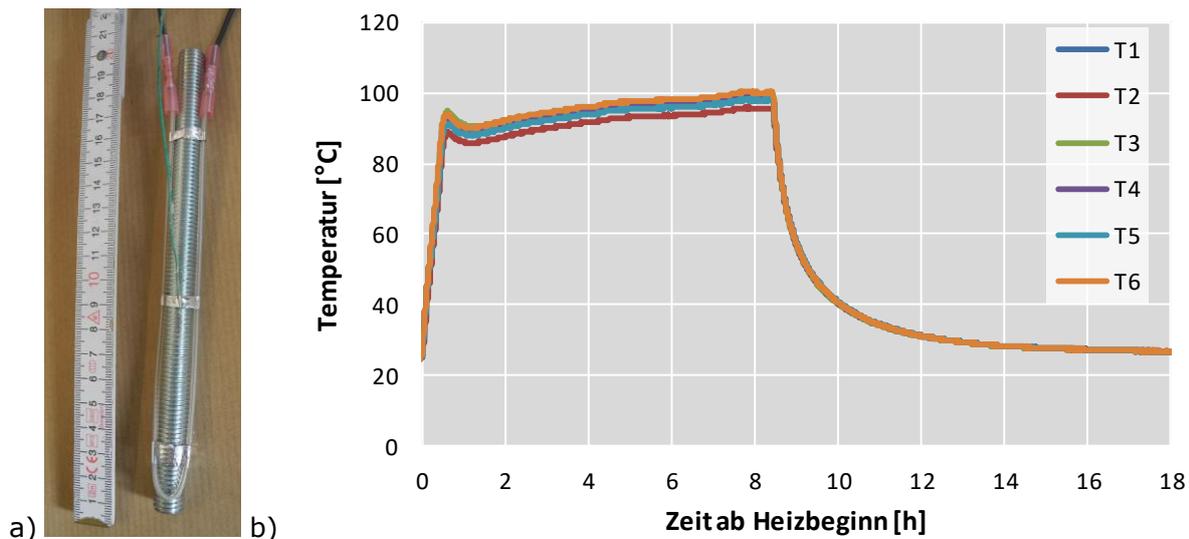


Abbildung 3: (a) An der Gewindestange fixierter Teflon-Heizdraht mit Temperaturfühler
(b) Temperaturverlauf während der Erwärmung durch den Heizdraht.

Eine weitere Möglichkeit der verbesserten und beschleunigten Aushärtung des Klebstoffs besteht in der induktiven Erwärmung der Stangen, wobei sogar eine Selbstregelung durch sogenannten Curie-Partikel möglich ist, die nur bis zu einer bestimmten Temperatur induktiv erwärmbar sind und dadurch eine Überhitzung ausschließen (Vallée 2016).

4. Bemessungs- und Ausführungsregeln

4.1. Beanspruchung in Richtung der Stabachse

Die ersten Bemessungsvorschläge (Möhler und Lautenschläger 1978), beschränkten sich auf den einfachst möglichen Ansatz zur Berechnung des Widerstands R_{ax} als Produkt aus der Mantelfläche des Bohrlochs mit einer konstanten Scherfestigkeit über die Einbindelänge

$$R_{ax} = f_v \cdot d_{Loch} \cdot \pi \cdot l_{ad} \quad (6)$$

mit

d_{Loch} Durchmesser des Lochs

l_{ad} Einbindelänge der Stahlstange

f_v Verbundsteifigkeit (bei Möhler und Lautenschläger mit 6 N/mm² angesetzt)

In der sowjetischen Holzbau-Bemessungsnorm SNIP II-25-80 war seit 1982 ein Bemessungsansatz enthalten, der die Stabschlankheit sowie die ungleichförmige Spannungsverteilung über die Stablänge sodann getrennt für Anschlüsse mit einer und mehreren Stangen berücksichtigt

$$R_{ax} = f_v \cdot \pi \cdot (d + 5) \cdot l_{ad} \cdot k_1 \cdot k_2 \quad (7)$$

mit

d	nomineller Stabdurchmesser (in mm)
$f_v = 4,0 \text{ N/mm}^2$	Basis-Verbundscherfestigkeit
$k_1 = 1 - 0,01 \cdot \lambda$	Faktor zur Berücksichtigung der ungleichen Spannungsverteilung entlang der Stabachse
$k_2 < 1$	Faktor zur Berücksichtigung der ungleichen Spannungsverteilung bei Anschlüssen mit mehr als einer Stange
$\lambda = l_{ad}/d$	Stabschlankheit

Riberholt (1988) schlug ein stablängenabhängiges Bemessungsmodell vor. Dieses sieht im Bereich sehr kurzer Einbindelängen einen klassischen Festigkeitsansatz (konstante Festigkeit \times Lochmantelfläche) vor und repräsentiert bei größeren Stablängen einen exponentiellen Abfall der Tragfähigkeit in Abhängigkeit von der Stablänge. Der Exponent $a = 0,5$ der Stablänge stellt in mechanischer Hinsicht die Annahme einer linear bruchmechanischen Größengesetzmäßigkeit dar. Des Weiteren sind die Basis-Festigkeitswerte, die auf Anpassungen an Versuchswerte basieren (Riberholt 1988), rohdichtenormiert, womit der effektiven Rohdichte des verwendeten Holzes Rechnung getragen wird:

$$R_{ax} = \begin{cases} f_{v,WL} \cdot \rho \cdot d_{Loch} \cdot l_{ad} & \text{für } l_{ad} < 200 \text{ mm} \\ f_{v,WS} \cdot \rho \cdot d_{Loch} \cdot l_{ad}^{0,5} & \text{für } l_{ad} \geq 200 \text{ mm} \end{cases} \quad (8)$$

mit

$$f_{v,WL} = 0,037 \text{ bzw. } 0,046 \text{ N/mm}^2 \quad \text{für spröde bzw. nicht-spröde Klebstoffe und}$$

$$f_{v,WS} = 0,52 \text{ bzw. } 0,65 \text{ N/mm}^{1,5} \quad \text{für spröde bzw. nicht-spröde Klebstoffe.}$$

Der Ansatz gemäß Gl. (8) wurde von Johansson 1995 als erster Vorschlag für den Eurocode 5 veröffentlicht. Im Rahmen des GIROD-Forschungsvorhabens wurde in der Folge von Gustafsson und Serrano 2001 der nachstehende auf nichtlinearer Bruchmechanik basierende Bemessungsvorschlag hergeleitet:

$$R_{ax,Rk} = \pi \cdot d_{equ} \cdot l_{ad} \cdot \tau_f \cdot \frac{\tanh \bar{\omega}}{\bar{\omega}} \quad (9)$$

mit

$$\bar{\omega} = \sqrt{\frac{l_{geo}}{l_m}} \quad (10)$$

$$l_{geo} = \frac{\pi \cdot d_{equ} \cdot l^2}{2} \left(\frac{1}{A_{Stahl}} + \frac{E_{Stahl}}{E_{0,Holz} \cdot A_{Holz}} \right) \quad (11)$$

$$l_m = \frac{E_{Stahl} \cdot G_f}{\tau_f^2} \quad \text{Längenparameter} \quad (12)$$

τ_f lokale Scherfestigkeit

G_f Bruchenergie der Holz-Klebstoffschicht

A_{Stahl}, A_{Holz} Querschnittsflächen des Stahlstabs und des Holzquerschnitts

$E_{Stahl}, E_{0,Holz}$ Elastizitätsmodul des Stahlstabs und des Holzquerschnitts

Der nichtlinear bruchmechanische Ansatz (9) lässt sich formelidentisch in die Volkersen-Gleichung (Gl. 1) überführen (Aicher 2003). In leicht vereinfachter Form, u.a. unter Verschmierung der Bruchenergie fand Gl. (9) im Jahr 2003 Eingang in eine Entwurfsfassung des Teils 2 des Eurocode 5 (DIN EN 1995-2):

$$R_{ax,Rk} = \pi \cdot d_{equ} \cdot l_{ad} \cdot f_{k1,k} \cdot \frac{\tanh \omega}{\omega} \quad (13)$$

mit

$$\omega = \frac{0,016 \cdot l_{ad}}{\sqrt{d_{equ}}} \quad (14)$$

$$d_{equ} = \min \left\{ d_{Loch}, d_{Stab} \cdot 1,15 \right\} \quad (15)$$

$$f_{k1,k} = 5,5 \text{ N/mm}^2.$$

Abschließend bleibt festzustellen, dass sich für keinen der vorstehend skizzierten Ansätze Mehrheiten in den Normungsgremien fanden, womit in der Folge eingeklebte Stangen überhaupt nicht in den Eurocode 5 aufgenommen wurden. Im Gegensatz dazu wurden in

den deutschen Nationalen Anhang zum Eurocode 5 (DIN EN 1995-1-1/NA:2013) die Bemessungsregeln der DIN 1052:2008 übernommen. Der in DIN 1052:2008 geregelte Ansatz basiert auf einer angenommenen trilinearen Abhängigkeit des charakteristischen Wertes der Verbundfestigkeit $f_{k1,k}$ von der Einbindelänge l_{ad} :

$$F_{ax} = f_{k1,k} \cdot d \cdot \pi \cdot l_{ad} \quad (16)$$

mit

$$d \quad \text{Nenn Durchmesser des Stahlstabs}$$

$$f_{k1,k} = \begin{cases} 4,0 \text{ N/mm}^2 & \text{für } l_{ad} \leq 250 \text{ mm} \\ 5,25 - 0,005 \cdot l_{ad} & \text{für } 250 < l_{ad} \leq 500 \text{ mm} \\ 3,5 - 0,0015 \cdot l_{ad} & \text{für } 500 < l_{ad} \leq 1000 \text{ mm} \end{cases} \quad (17)$$

und

$$l_{ad,min} = \max \left\{ \begin{array}{l} 0,5 \cdot d^2 \\ 10 \cdot d \end{array} \right. \quad \text{minimale Einbindelänge.} \quad (18)$$

Die allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen Z-9.1-705, Z-9.1-707 und Z-9.1-778 beziehen sich auf diesen Ansatz, wobei in Abhängigkeit vom jeweiligen Klebstoff teilweise für die Nutzungsklasse 1 erhöhte charakteristische Festigkeitswerte angesetzt werden dürfen. Außerdem wird die maximale Einbindelänge auf

$$l_{ad,max} = \min \left\{ \begin{array}{l} 40 \cdot d \\ 1000 \text{ mm} \end{array} \right. \quad (19)$$

begrenzt.

4.2. Beanspruchung Rechtwinklig und schräg zur Stabsachse

Für die Beanspruchungen rechtwinklig und schräg zur Stabsachse, gelten nach DIN EN 1995-1-1/NA die Bestimmungen für mechanische Verbindungen mit Bolzen und Gewindestangen gemäß EC5 unter Berücksichtigung diesbezüglicher Ergänzungen im nationalen Anwendungsdokument. Ergänzend können erhöhte Lochleibungsfestigkeitswerte angesetzt werden. Die genannten Regelungen sind durch Praxiserfahrungen und Versuche überwiegend abgedeckt und mechanisch plausibel. Von einer weiteren Diskussion wird an der Stelle aus Umfangsgründen abgesehen.

5. Versuchsergebnisse und Einflussparameter

5.1. Offene Fragen

In nahezu allen Bemessungsansätzen spiegelt sich der große Einfluss der Einbindelänge l_{ad} auf die Festigkeit der Klebfuge f_{k1} wider. Dass der Stangendurchmesser d_{Stange} bzw. der Lochdurchmesser d_{Loch} einen großen Einfluss auf die effektive Steifigkeit der Verbindung hat, ist mechanisch zweifelsfrei belegbar. Wie groß der Einfluss von d_{Stange} auf die Tragfähigkeit von Verbindungen mit eingeklebten Stangen, deren Geometrie sich im üblichen bzw. bislang geprüften Rahmen befindet, ist, repräsentiert eine bislang uneinheitlich diskutierte Fragestellung.

Der Einfluss der Rohdichte auf die Festigkeit f_{k1} wird des Weiteren ebenfalls uneinheitlich diskutiert. Zuzufolge der Untersuchungen bzw. Auswertungen von Riberholt (1988) ist die Tragfähigkeit linear von der Rohdichte beeinflusst (Gl. 8). Der Entwurf für die Europäische (Klebstoff-) Prüfnorm (vergleiche Abschnitt 4) unterstellt implizit ebenfalls einen Exponenten von 1 für die Rohdichtekorrektur der Stangen-Auszugsversuche. Steiger et al. (2006) fanden hingegen mit ihrem Ansatz

$$f_{k1,mean} = 7,8 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot \left(\frac{\lambda}{10} \right)^{-\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{\rho_{Holz}}{480} \right)^{0,6} \quad (20)$$

mit

$$\lambda = \frac{l_{ad}}{d_{Stange}} \quad \text{Stabschlankheit}$$

$$\rho_{Holz} \quad \text{Rohdichte des verwendeten Holzes in kg/m}^3$$

einen Exponenten von 0,6 und damit einen etwas moderateren, jedoch nicht vernachlässigbaren Rohdichteinfluss. Seitens Gleichung (20) wird, wie z.B. auch in Gl. (7) zudem die Frage aufgeworfen, ob nicht die Stabschlankheit λ eine passendere Regressionsvariable ist, als die Einbindelänge l_{ad} .

5.2. Datenbasis

Die meisten publizierten europäischen Versuche wurden im Rahmen des GIROD-Projekts durchgeführt. Darüber hinaus sind jedoch auch viele Ergebnisse aus Zulassungsversuchen, aus Versuchen im Rahmen der Erteilung der Bescheinigung über die Eignung zum Einkleben von Stahlstäben nach DIN 1052-10 und aus Veröffentlichungen (Riberholt 1988, Aicher und Herr 1997) sowie bislang unveröffentlichte Daten verfügbar. In der vorliegenden Arbeit wurde ein Datensatz mit 654 Stangen-Auszugsversuchen parallel zur Faser, davon 580 in Fichtenholz, 27 in Eichenholz und 47 in Furnierschichtholz aus Buche, vergleiche Abbildung 4a, zusammengestellt. Die meisten Versuche wurden mit Stangendurchmessern zwischen 8 mm und 20 mm durchgeführt. Die Einbindelängen lagen stets im Bereich $l_{ad,max} \leq 40 \cdot d_{Stange}$. Die Abbildung 4b zeigt die Festigkeit der Klebfugen über der Einbindelänge für die Holzarten Fichte, Buche und Eiche zusammen mit charakteristischen Klebfestigkeitswerten aus DIN EN 1995-1-1/NA für Nadelhölzer und sowie gemäß abZ Z-9.1-705 für Furnierschichtholz aus Buche. Wie zu erwarten, liegen die Festigkeiten für Buchenholz wesentlich höher als diejenigen für Fichte; die Ergebnisse für Eiche liegen dazwischen.

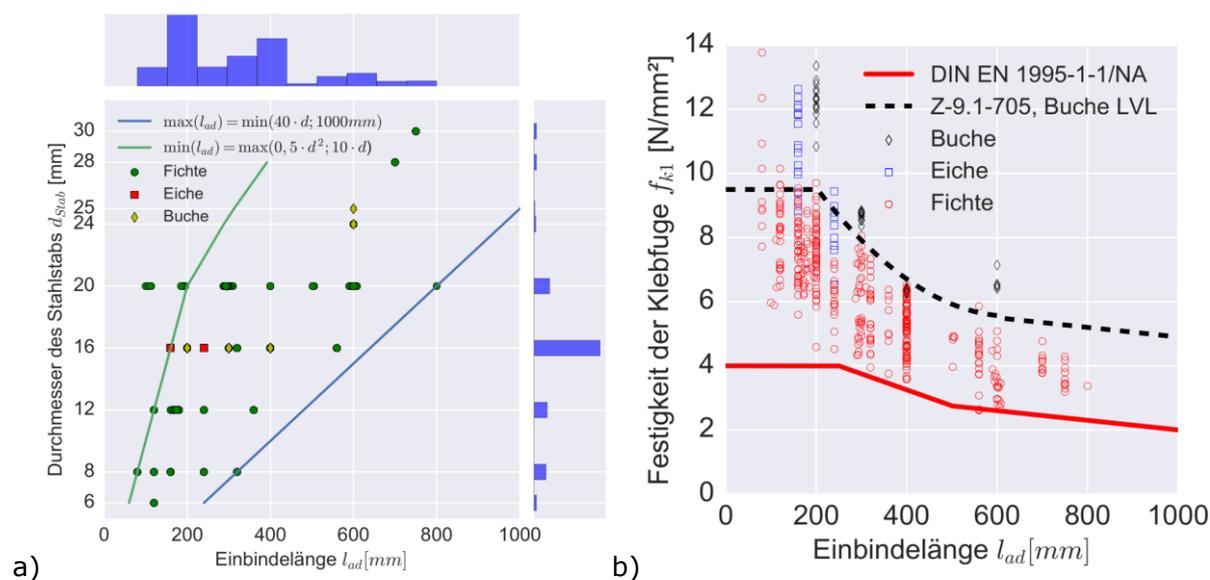


Abbildung 4: (a) Verteilung der Datenbasis in Bezug auf Einbindelänge, Stangendurchmesser und Holzart
(b) Festigkeit der Klebfuge längs der Einbindelänge für die Holzarten Fichte, Buche und Eiche

5.3. Durchführung der Datenanpassungen

Die meisten Bemessungsregeln und Anpassungen an Daten von Versuchsergebnissen wählten bislang keinen linearen Ansatz, sondern eine Funktion in der Form

$$f_{k1}(l_{ad}, d_{Stange}, \rho_{Holz}) = a \cdot l_{ad}^b \cdot d_{Stange}^c \cdot \rho_{Holz}^d \quad (21)$$

Die vorliegenden Versuchsergebnisse wurden in einem ersten Schritt mit der Methode der kleinsten Quadrate an Gl. (21) angepasst, wobei teilweise die Eingangsvariablen d_{Stange} und ρ_{Holz} vernachlässigt wurden, um deren Einfluss auf das statistische Modell zu untersuchen. Die Eingangsvariablen wurden im Blick auf eine verbesserte Anschaulichkeit der Einflüsse auf $l_{ad} = 250 \text{ mm}$, $d_{Stange} = 16 \text{ mm}$ und $\rho_{Holz} = 420 \text{ kg/m}^3$ normiert.

Für die Anpassungen wurden Versuchsergebnisse vernachlässigt, bei denen ein Bruch im Stahlquerschnitt der Gewindestangen stattfand. Für die Berechnung einer Anpassung für den charakteristischen Wert $f_{k1,k}$ wurde die untere Grenze des Konfidenzintervalls mit einem (beidseitigen) Konfidenzniveau von 0,9 verwendet. Damit liegt die Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein Wert unterhalb des Konfidenzintervalls liegt, bei dem im Bauwesen üblichen Wert von 5 %.

5.4. Ergebnisse

Eine Anpassung der Daten für (Brettschicht)Holz aus Fichte/Tanne, die lediglich die Einbindelänge l_{ad} als Eingangsparameter berücksichtigt, ist in Abbildung 5 gezeigt. Der Exponent der Einbindelänge entspricht auf dem Mittelwertniveau mit $b = -0,5$ mechanisch exakt dem Größeneffekt der linearen Bruchmechanik und weicht hiervon auf dem charakteristischen Festigkeitsniveau nur unwesentlich ab. Es ist zu erkennen, dass der charakteristische Wert der Klebfestigkeit nach DIN EN 1995-1-1/NA gemäß Gl. (17) eine sichere jedoch sehr konservative Abschätzung der Festigkeit darstellt. Die Form dieser trilinearen Gleichung für $l_{ad} \geq 250$ mm passt sich gut dem unteren Konfidenzband des Produkt-Ansatzes an. Die Funktionsanpassung auf dem Mittelwertsniveau ergibt

$$f_{k1,mean}(l_{ad}) = 5,96 \text{ N/mm}^2 \cdot \left(\frac{l_{ad}}{250\text{mm}}\right)^{-0,50} \quad (22)$$

und auf dem charakteristischen Niveau

$$f_{k1,k}(l_{ad}) = 4,60 \text{ N/mm}^2 \cdot \left(\frac{l_{ad}}{250\text{mm}}\right)^{-0,48} \quad (23)$$

Der Korrelationskoeffizient der Mittelwertsanpassung von $R^2 = 0,73$ repräsentiert eine für die bei Vollholzprodukten üblichen Streuungen gute Anpassung.

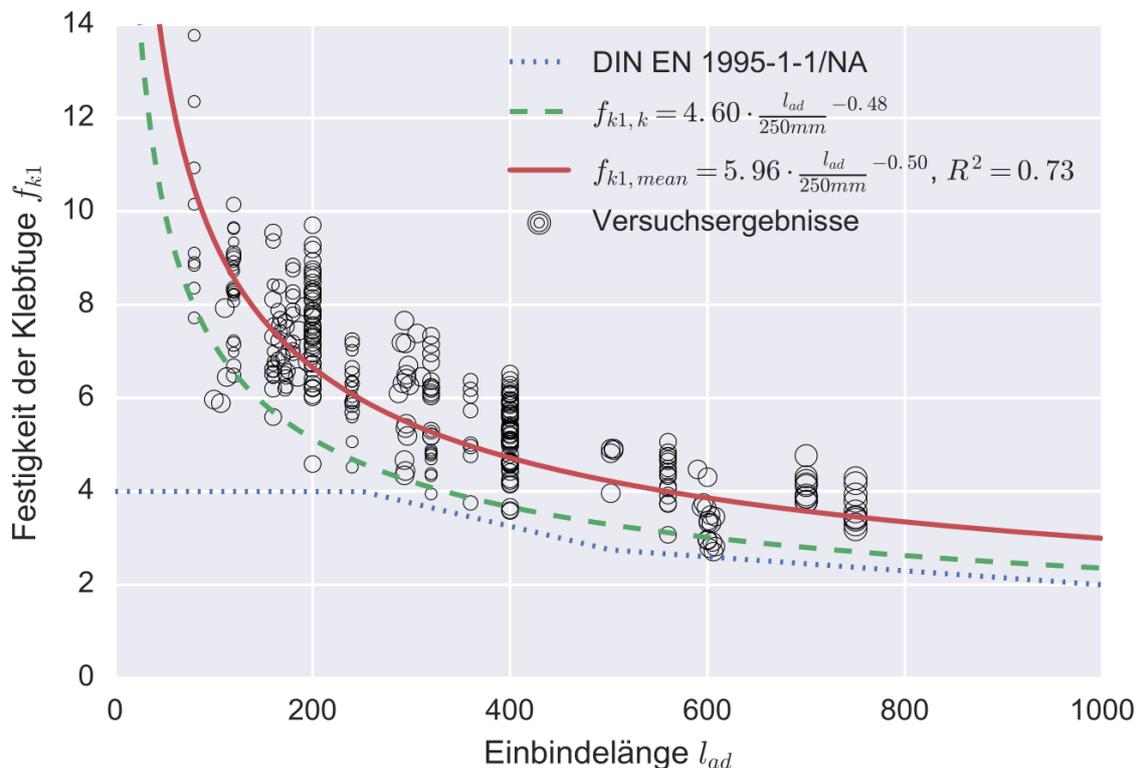


Abbildung 5: Festigkeit der Klebfuge f_{k1} über der Einbindelänge für Fichtenholz. Die Durchmesser der Datenpunkte entsprechen dem jeweiligen Stangendurchmesser.

Eine zusätzliche Berücksichtigung des Stangendurchmessers d_{Stange} liefert die Beziehung

$$f_{k1,mean}(l_{ad}, d_{Stange}) = 6,25 \text{ N/mm}^2 \cdot \left(\frac{l_{ad}}{250\text{mm}}\right)^{-0,49} \cdot \left(\frac{d_{Stange}}{16\text{mm}}\right)^{0,08} \quad (24)$$

Der Korrelationskoeffizient liegt hierbei ebenfalls bei $R^2 = 0,73$. Das bedeutet, dass gegenüber dem einfacheren Ansatz ohne Berücksichtigung des Stangendurchmessers (Gl. 22) keine bessere Anpassung der Gesamtheit der Daten erfolgte. Dies lässt insbesondere keine genauere Berechnung des unteren Konfidenzniveaus und damit des charakteristischen Werts der Daten-Gesamtheit zu. Dennoch lässt Gl. (25), gerade auf dem Mittelwertsniveau, eine Abschätzung des Stangendurchmessers auf die Klebfugenfestigkeit zu. Bei einer Auswertung für eine Einbindelänge $l_{ad} = 250$ mm und Stangendurchmesser d_{Stange} von 6 mm, 16 mm und 30 mm ergeben sich charakteristische Festigkeitskennwerte $f_{k1,mean}(l_{ad} = 250\text{mm}, d_{Stange})$ von 5,76 N/mm², 6,25 N/mm² und 6,58 N/mm², d.h. wesentliche Verbundfestigkeitszunahmen mit größeren Stabdurchmessern.

Die zusätzliche Berücksichtigung der Rohdichte des Holzes liefert die Regressionsbeziehung

$$f_{k1,mean}(l_{ad}, d_{Stange}, \rho_{Holz}) = 5,93 \text{ N/mm}^2 \cdot \left(\frac{l_{ad}}{250\text{mm}}\right)^{-0,52} \cdot \left(\frac{d_{Stange}}{16\text{mm}}\right)^{0,09} \cdot \left(\frac{\rho_{Holz}}{420\text{kg/m}^3}\right)^{0,32} \quad (25)$$

mit einem geringfügig höheren Korrelationskoeffizienten von $R^2 = 0,75$. Gl. (26) liefert somit für GL32h mit einer mittleren Rohdichte von $\rho_{mean} = 490$ kg/m³ eine Festigkeitserhöhung um 5 % gegenüber GL24h oder C24 ($\rho_{mean} = 420$ kg/m³).

Die 95%-Konfidenzintervalle für die drei Exponenten der Gl. (26), vgl. auch Gl. (21) lauten:

$$\begin{aligned} a &= -0,58 \dots - 0,52 \dots - 0,46, \\ b &= -0,01 \dots + 0,09 \dots + 0,18, \\ c &= +0,02 \dots + 0,32 \dots + 0,56. \end{aligned}$$

Die überwiegende Anzahl der untersuchten Verbindungen wurden mit drei verschiedenen Klebstofffabrikaten verklebt. In Abbildung 6 ist das Ergebnis einer Mittelwerts-Anpassung für die drei Klebstoffe gemäß

$$f_{k1,mean}(l_{ad}, \text{Klebstoff}) = f(\text{Klebstoff}) \cdot \left(\frac{l_{ad}}{250\text{mm}}\right)^{-0,49} \quad (26)$$

mit

$$\begin{aligned} f(EP 1) &= 6,54 \text{ N/mm}^2; \\ f(EP 2) &= 5,86 \text{ N/mm}^2; \\ f(PU) &= 6,56 \text{ N/mm}^2; \end{aligned}$$

dargestellt. Der bauaufsichtlich infolge einer geringeren Temperaturbeständigkeit im Bereich von 50°C bis 60°C nicht verwendbare Klebstoff «EP 2» fällt dabei deutlich gegenüber den beiden anderen (zugelassenen) Klebstoffen ab, deren Anpassungsfunktionen und Konfidenzbänder nahezu identisch sind.

Abbildung 7 zeigt basierend auf den Ergebnisse der Gl. (26) bzw. von Abbildung 6 drei Klebstofffabrikat-abhängige 5%-Quantilkurven der Verbundfestigkeit über die Einbindelänge. Wie aus der Darstellung ersichtlich, bilden die 5%-Quantilkurven den unteren Rand der Versuchsergebnisse für die zugelassenen Klebstoffen EP1 und PU sehr zutreffend ab und stimmen hierbei auch sehr gut mit den in der abZ Z-9.1-705 geregelten Festigkeitswerten überein.

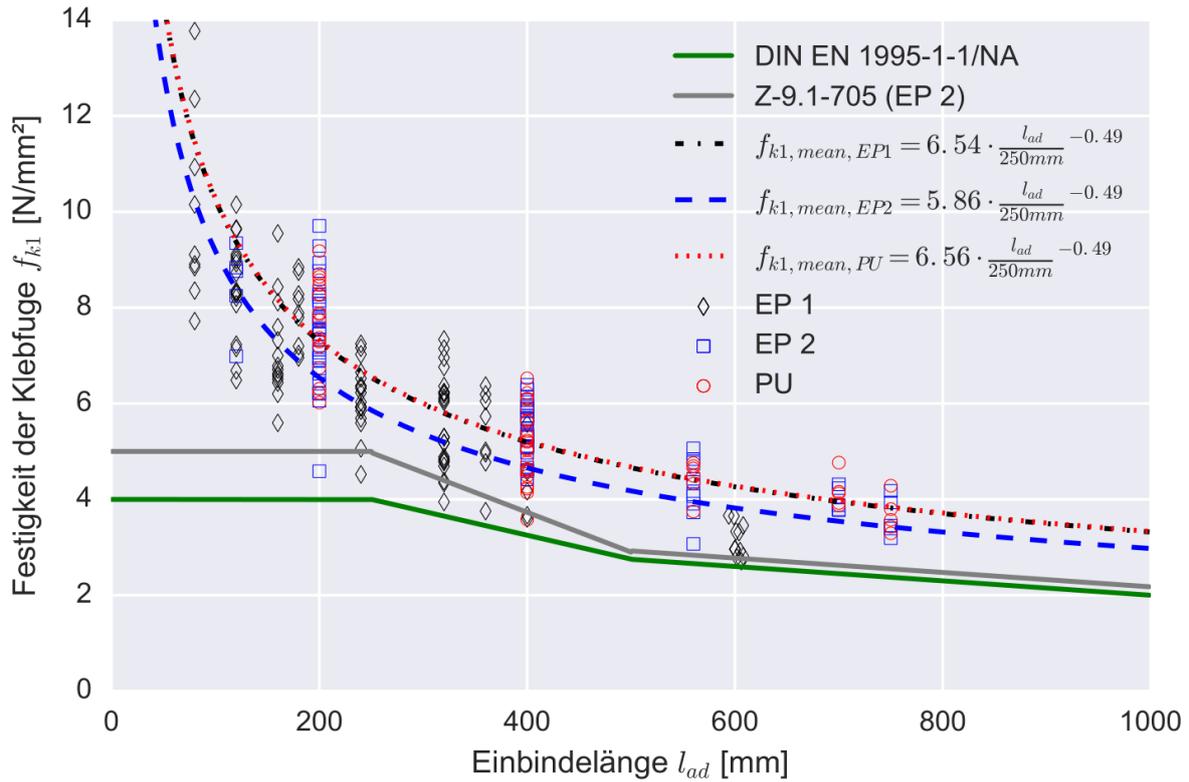


Abbildung 6: Festigkeit der Klebfuge $f_{k1,mean}$ über der Einbindelänge für Fichtenholz in Abhängigkeit von unterschiedlichen Klebstofffabrikaten.

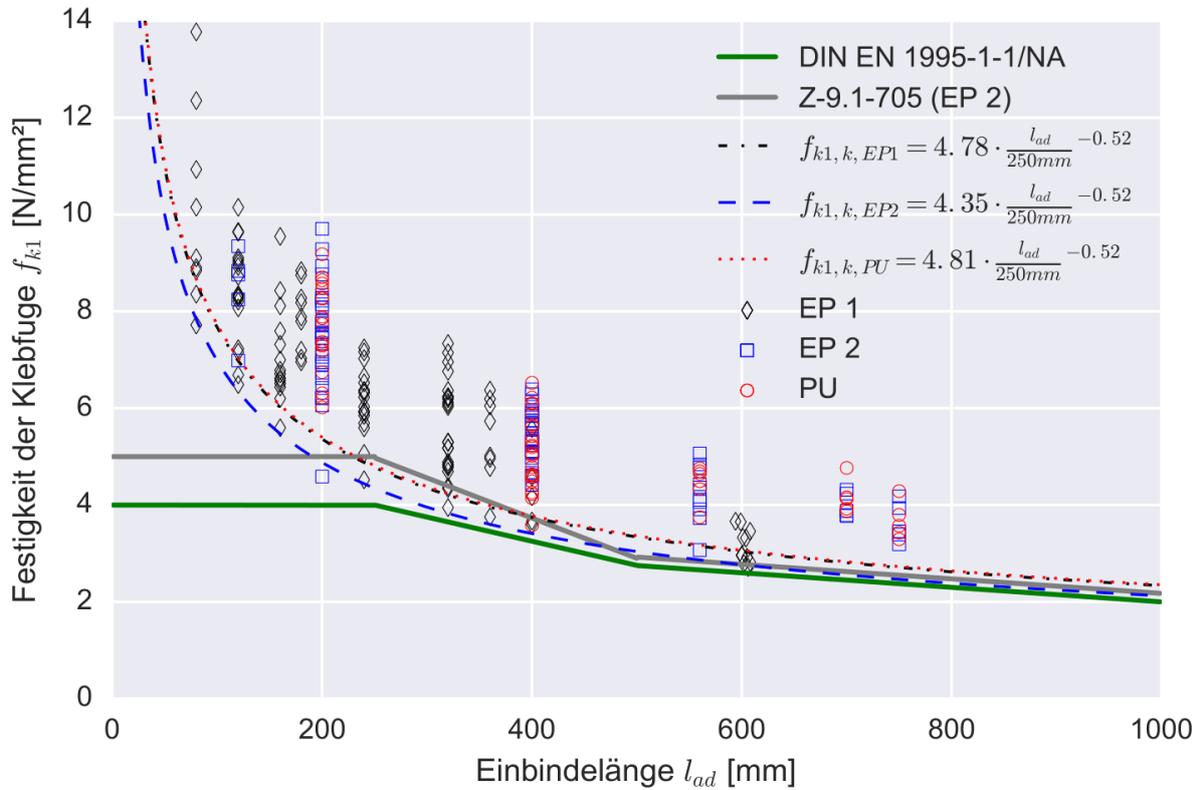


Abbildung 7: Festigkeit der Klebfuge $f_{k1,k}$ über der Einbindelänge für Fichtenholz und drei Klebstoffe.

6. Zusammenfassung

Holzverbindungen mit eingeklebten Stahlstäben werden seit mehr als 40 Jahren erforscht und verwendet. In diesem Zusammenhang wurde eine sehr große Anzahl an Prüfergebnissen generiert, die zumindest für die Holzart Fichte eine ausreichende Datenbasis für die Beantwortung von offenen Fragestellungen im Rahmen der europäischen Normung darstellt. Dass die Einbindelänge den wesentlichen Einfluss auf die Festigkeit der Klebfuge darstellt, ist theoretisch und experimentell belegbar und Konsens. Das Klebstofffabrikat kann bereits bei Raumtemperaturen einen signifikanten Einfluss auf das Festigkeitsniveau haben. Des Weiteren liegt ein gewisser Einfluss des Stangendurchmessers und der Rohdichte vor. Im Rahmen einer vertieften Sensitivitätsanalyse ist noch zu entscheiden, ob diese Einflüsse in einem sowohl robusten wie auch ausreichend differenzierten Bemessungsvorschlag abgebildet werden sollten. Der Einfluss von Einbindelänge, Stabdurchmesser und Rohdichte kann mit der Produkt-Potenzansatz $\left(\frac{l_{ad}}{l_{ref}}\right)^b \cdot \left(\frac{d}{d_{ref}}\right)^c \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_{ref}}\right)^d$ sehr zutreffend für alle betrachteten Klebstoffe erfasst werden, und wird mit Blick auf einen ingenieurmäßig transparent und einfache Handhabbares für ein europäischen Normenentwurf vorgeschlagen. In sehr guter Näherung können für die in Deutschland bauaufsichtlich zugelassenen Klebstoffe für die Koeffizienten b , c und d die Werte $b = -0,5$, $c = 0,09$ und $d = 0,3$ vorgeschlagen werden. Bei der versuchsmäßigen Ableitung der charakteristischen Verbundfestigkeiten ist der Einfluss der Klebfugendicken und damit der Unterschied von Loch- und Stabdurchmesser zu berücksichtigen.

7. Schrifttum

- Aicher S, Herr J (1997) Geklebte Brettschichtholz-Stahlstangenverbindungen mit großen Verankerungslängen. In: Otto-Graf-Journal, Vol. 8, 232-254.
- Aicher S (2001) Characteristic axial resistance of threaded rods glued-in spruce dependant on adhesive type – a complementary database for the GIROD project. Otto-Graf-Institut, Universität Stuttgart.
- Aicher S (2003) Structural Adhesive Joints Including Glued-in Bolts. In: Thelandersson S, Larsen H. Timber Engineering, Wiley, 333-363.
- Baumeister A, Blumer H, Brüninghoff H, Ehlbeck J, Koehlen B, Köster P, Maier G, Meyer K-H, Steinmetz D, Wenz J (1972) Neuere Karlsruher Forschungsarbeiten und Versuche im Ingenieurholzbau. Bauen mit Holz. 74(6):298-317.
- Bengtsson C, Johansson CJ (2002) GIROD – Glued in Rods for Timber structures. SP Swedish National Testing and Research Institute. SP Report 2002:26.
- Buchanan AH, Fletcher MR (1989) Glulam portal frame swimming pool construction. In: Proceedings of The Second Pacific Timber Engineering Conference - Volume 1. 245-249.
- Edlund, G (1975) I limträ inlimmad skruv. Meddelande Serie B Nr. 333. STFI Svenska Träforskningsinst.
- Gustafsson PJ, Serrano E (2001) Glued-in rods for timber structures: development of a calculation model. KFS, Lund
- Johansson CJ (1995) Step C14 – Eingeleimte Stäbe. In: Blaß J. Holzbauwerke nach Eurocode 5 – STEP 1. Bemessung und Baustoffe, Fachverlag Holz der Arbeitsgemeinschaft Holz, Düsseldorf, 1995, C14/1-C14/7.
- Möhler K, Lautenschläger, R (1978) Großflächige Queranschlüsse bei Brettschichtholz. Untersuchungen im Auftrag der EGH in der DGfH, Karlsruhe, Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen, Universität Karlsruhe (TH)
- Möhler K, Hemmer K (1981) Versuche mit eingeleiteten Gewindestangen. Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen, Universität Karlsruhe
- Riberholt H (1977) Bolte Indlimet I Limtrae. Technical University of Denmark, Structural Research Laboratory, Rapport Nr. R 83
- Riberholt H (1988) Glued bolts in glulam – proposals for CIB code. Proceedings of International Council for Building Research and Innovation in Building and Construction, Working commission W18-Timber Structures, Meeting 21, Parksville, Vancouver Island, Canada, 1988, 21-7-2.

- Schmid V, Fischer M (2010) Metropal Parasol Sevilla – ein neues Wahrzeichen für den Ingenieurholzbau., 16. Internationales Holzbau-Forum (IHF) 2010, Tagungsband.
- Steiger R, Gehri E, Widmann R (2006) Pull-out strength of axially loaded steel rods bonded in glulam parallel to the grain. *Materials and Structures*. 40(1):69-78.
- Turkovsky SB (1989) Bemessung von Leimholzkonstruktions-Verbindungen aus eingeleimten Stäben. In: 22. Jahrestag der Arbeitsgruppe "Timber Structures" des Internationalen Rates für Bauforschung; Berlin, 25. - 28. September 1989. 27-30.
- Vallée T (2016) Schnellaushärtung im Holzbau: die 5-Minuten-Verbindung. In: 22. Internationales Holzbau-Forum (IHF) 2016, Tagungsband II, S. 113-120.
- Volkersen O (1938) Die Nietkraftverteilung in zugbeanspruchten Nietverbindungen mit konstanten Laschenquerschnitten. *Luftfahrtforschung*, 15, 41-47
- CEN/TC 193/SC 1/WG 6 N75 (2017). 8th draft Glued-in rods in glued structural timber products – Testing, requirements and bond shear strength classification (draft standard)
- DIN EN 301 (2006; 2017): Klebstoffe für tragende Holzbauteile, Phenoplaste und Aminoplaste – Klassifizierung und Leistungsanforderungen.
- DIN EN 302-1 bis -8:2013-2017 Klebstoffe für tragende Holzbauteile – Prüfverfahren.
- DIN 488-2:2009 Betonstahl – Betonstabstahl.
- DIN 976-1:2016 Mechanische Verbindungselemente – Gewindebolzen – Teil 1: Metrisches Gewinde.
- DIN EN 1995-1-1/NA:2013 Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau.
- Z-9.1-705 (2009) 2K-EP-Klebstoff WEVO-Spezialharz EP 32 S mit WEVO-Härter B 22 TS zum Einkleben von Stahlstäben in Holzbaustoffe. Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung vom 31.01.2014. Zulassungsinhaber: WEVO-CHEMIE GmbH, Schönbergstraße 14, 73760 Ostfildern-Kemnat.
- Z-9.1-707 (2010) 2K-PUR-Klebstoff LOCTITE CR 421 PURBOND zum Einkleben von Stahlstäben in Holzbaustoffe. Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung vom 01.06.2015. Zulassungsinhaber: Purbond AG, Industriestraße 17a, 6203 Sempach Station, Schweiz.
- Z-9.1-778 (2012) 2K-EP-Klebstoff GSA-Harz und GSA-Härter für das Einkleben von Stahlstäben in Holzbaustoffe. Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung vom 31.10.2012. Zulassungsinhaber: neue Holzbau AG, Oberseestrasse 11, 6078 Lungern, Schweiz.
- Z-9.1-791 (2012) Verbindungen mit faserparallel in Brettschichtholz eingeklebten Stahlstäben. Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung vom 2016. Zulassungsinhaber: Studiengemeinschaft Holzleimbau e. V., Elfriede-Stremmel-Straße 69, 42369 Wuppertal.
- Gefahrstoffverordnung (2010;2017), Verordnung zum Schutz vor Gefahrstoffen (Gefahrstoffverordnung – GefStoffV), 26. November 2010 (BGBl. I S. 1s644-1644) mit Änderung durch Artikel 1468 des Gesetzes von 29.03.2017 (BGBl. I S.626)
- SNiP II 25-80 (1980): Wooden Structures, State Committee of the USSR for Construction Affairs