

Abschlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 18266 N

Thema

Bewertung und Modellierung der Leistungsfähigkeit von Verbindungselementen aus Laubhölzern mit eingeklebten Stäben aus Stahl und Verbundwerkstoffen

IFAM: C. Grunwald, T. Vallée, S. Fecht

HSRM: L. Bathon, O. Bletz-Mühldorfer, F. Diehl

WPT: S. Myslicki, R. Scholz, F. Walther

Berichtszeitraum

01.06.2015 – 31.10.2017

Forschungsvereinigung

Internationaler Verein für Technische Holzfragen e.V. - iVTH

Forschungseinrichtungen

1. Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM)
2. Hochschule RheinMain, Institut für Baustoffe und Konstruktion (HSRM)
3. Technische Universität Dortmund, Fachgebiet Werkstoffprüftechnik (WPT)

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

1. Ausgangssituation

Das Forschungsvorhaben wurde in einer engen, interdisziplinären Kooperation gemeinsam von den drei oben genannten Forschungsstellen durchgeführt und beschäftigt sich mit in Laubholz eingeklebten Stäben. In Holz eingeklebte Stäbe sind ein Anschlusstyp, zu dessen Herstellung die drei Werkstoffe Holz, Klebstoff und Stäbe (z.B. aus Stahl oder glasfaserverstärktem Kunststoff) benötigt werden. Eingeklebte Stäbe ermöglichen die Herstellung sehr leistungsfähiger, starrer, duktiler und ästhetisch hochwertiger Anschlüsse. Verglichen mit vergleichbaren mechanischen Anschlüssen weisen sie sowohl eine höhere Tragfähigkeit als auch eine größere Steifigkeit auf. Seit Jahren werden im Ingenieurbau in Nadelholz eingeklebte Stäbe erfolgreich eingesetzt. Sie sind weitgehend in DIN EN 1995-1-1/NA:2013-08 normativ geregelt. Die Norm regelt rechtwinklig und parallel zur Stabachse wirkende sowie kombiniert auftretende Beanspruchungen für eingeklebte Gewindebolzen mit metrischem Gewinde und gerippte Betonstabstähle. Für in Laubholz eingeklebte Stäbe gibt es derzeit noch keine normative Regelung. Des Weiteren wurden in Holz eingeklebte Stäbe bis dato fast ausschließlich unter quasistatischen Lasten untersucht. Die Untersuchungen unter zyklischen Lasten fanden nur vereinzelt und hauptsächlich für Nadelhölzer statt. Auch glasfaserverstärkte (GFK) Stäbe wurden bei bisherigen Versuchen weitgehend vernachlässigt.

Bezogen auf das Thema des Forschungsvorhabens ergeben sich somit folgende offene Fragen:

- a) Welche Klebstoffe eignen sich prinzipiell zum Einkleben von metallischen Stäben in Laubholz, insbesondere Buche BSH, Eiche BSH und Buche FSH?
- b) Wie ist die Leistungsfähigkeit von GFK-Stäben in oben genannten Laubhölzern zu beurteilen?
- c) Wie kann die Tragfähigkeit von in Laubholz eingeklebten Stäben vorab durch ingenieurmäßige Bemessungsverfahren abgeschätzt werden?
- d) Wie wirken sich Ermüdungslasten auf die Tragfähigkeit von in Laubholz eingeklebten Stäben aus?

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde eine hohe Anzahl an experimentellen Versuchen durchgeführt, um empirische Aussagen zu den Eigenschaften der neuen Verbindungstechnologie treffen zu können. Diese dienen u.a. als Datenbasis für eine FE-Modellierung und sollten das konkrete Ziel des Forschungsprojekts unterstützen, ein praxistaugliches Bemessungsmodell zu entwickeln, in das der Einfluss der beteiligten Werkstoffe über die spezifischen mechanischen Kennwerte einfließt. Ergänzend zu den Bemessungsregeln für quasistatische Lasten sollte ein Bemessungsmodell für Ermüdungslasten entwickelt werden.

2. Ermittlung grundlegender Materialkennwerte

Zunächst sollten in enger Abstimmung mit dem pbA vielversprechende Klebstoffsysteme identifiziert werden. Für die Qualität einer Verbindung, die mit in Holz eingeklebten Verbindungsmitteln hergestellt wird, ist die Wahl eines geeigneten Klebstoffs entscheidend. Der Klebstoff muss einerseits gute Adhäsionseigenschaften auf dem Holz zeigen und andererseits muss eine gute innere Festigkeit, also Kohäsion, erreicht werden. Letztendlich wurden neun Klebstoffsysteme ausgewählt, die durch die in Abbildung 1 dargestellten Untersuchungen charakterisiert wurden. Ergänzt wurden diese durch Versuche mittels Rheometrie und DMA-Messungen. Klebstoffspezifische Eigenschaften wie Viskosität, E-Modul, Glasübergangstemperatur T_G und die Adhäsionsfähigkeit der Klebstoffe wurden somit ermittelt und ausgewertet. Diese Versuchsreihe bildet die Basis für die Auswahl der Klebstoffe für weitere Untersuchungen in Bauteilversuchen.

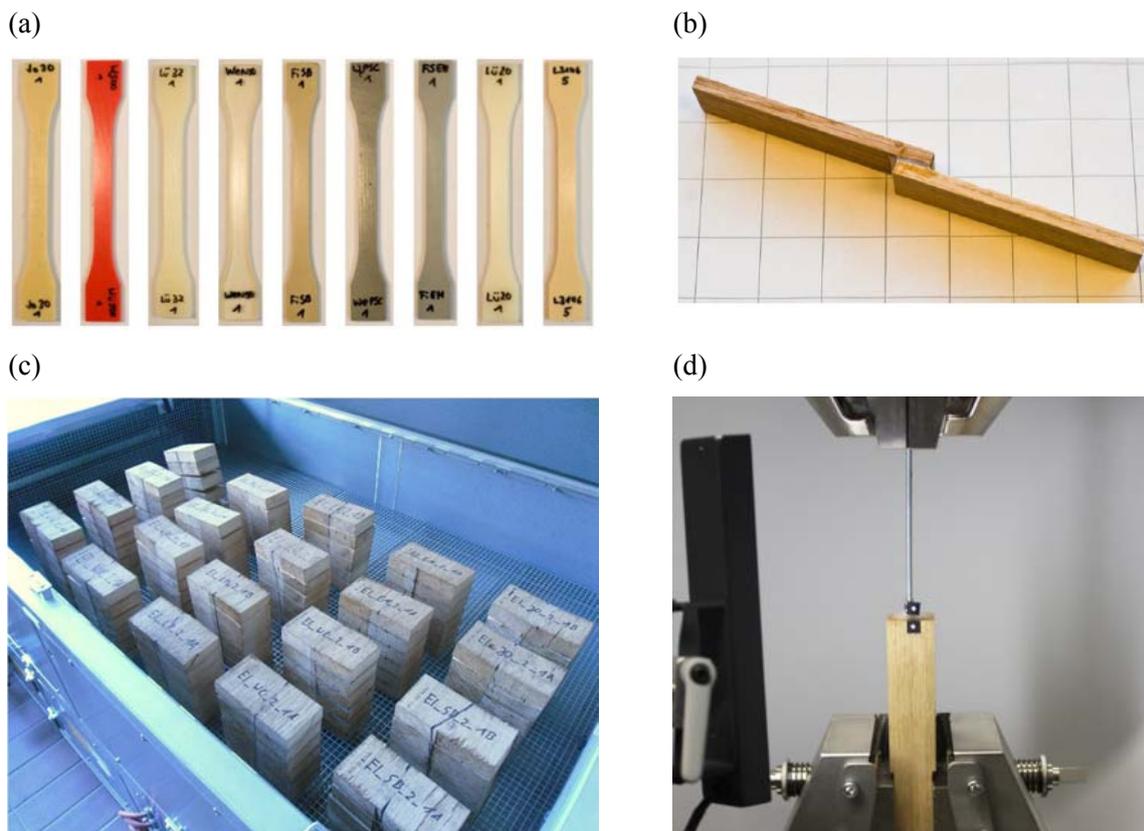


Abbildung 1: Versuche zur Auswahl von Klebstoffsystemen; Zugversuche an Klebstoffsubstanzproben (a), Zugscherversuche mit Zugscherversuchen (b), Delaminierungsversuche (c), Zugversuche an Miniaturanschlussproben mit eingeklebten Stäben (d)

Abgesehen vom Klebstoff wurden auch die beiden anderen Einzelkomponenten der Hybridverbindung Holz und Stab unter quasistatischer und zyklischer Beanspruchung charakterisiert. Für die Holz- und Stabwerkstoffe wurden die Versuchsreihen nach Abbildung 2 und Abbildung 3 durchgeführt, um die ermittelten Materialkennwerte in einem Finite-Element-Modell verwenden zu können.

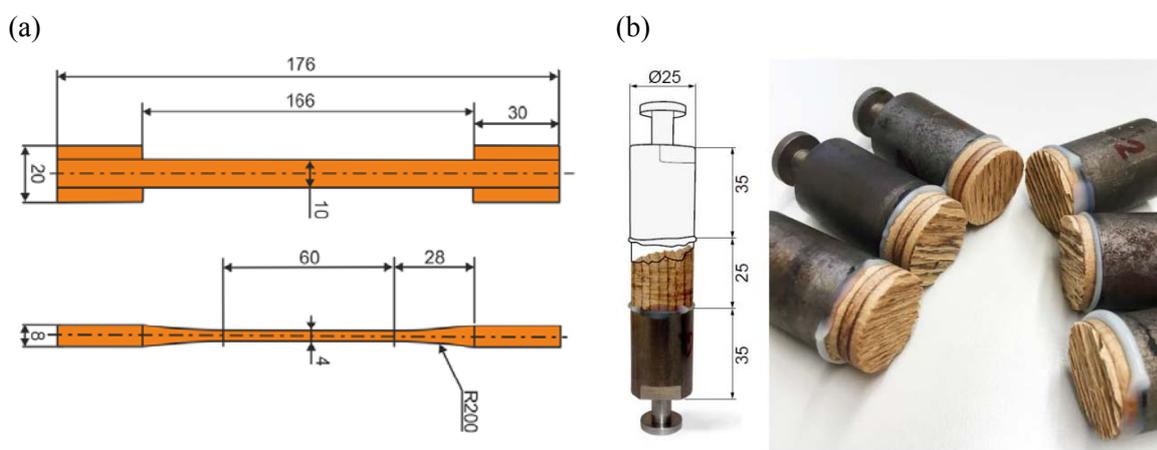


Abbildung 2: Zugversuche an Holzknochen (a), Zugversuche an zylindrischen Holzproben (b)

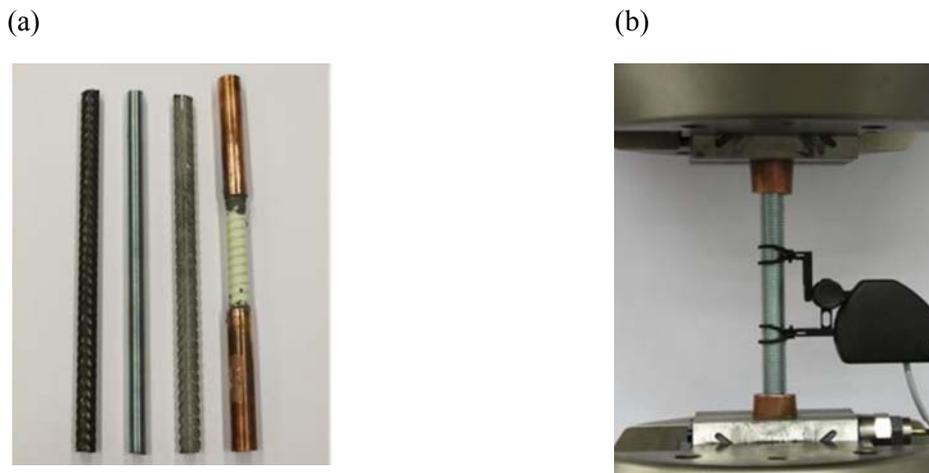


Abbildung 3: Untersuchung verschiedener Stabarten (a), Zugversuch mit Dehnungsmessung an Stäben (b)

3. Quasistatische und zyklische Bauteilversuche

Nachdem die Materialkennwerte der einzelnen Komponenten ermittelt waren, wurden Bauteilversuche unter quasistatischer Last untersucht. Nach Rücksprache mit dem pbA wurden 60 Konstellationen getestet. Es wurden vier Stabarten, bestehend aus Gewindestangen der Festigkeitsklasse 8.8 (Kürzel: Gewi), Betonrippenstahl der Stahlsorte BST 500 S (Kürzel: BST), Edelstahl der Stahlsorte 1.4482 der Fa. Scheibinox (Kürzel: ES) und Stäbe aus glasfaserverstärktem Kunststoff des Typs Schöck ComBAR (Kürzel: GFK) sowie 3 Holzarten (Buche BSH, Buche FSH, Eiche BSH) und 5 Klebstoffsysteme für die Untersuchungen ausgewählt. Tabelle 1 zeigt die gewählten Einzelkomponenten mit entsprechender Abkürzung, die sich in den Ergebnisdarstellungen im weiteren Bericht wiederfinden.

Stabarten	Holzarten	Klebstoffsysteme
Gewindestange 8.8 (Gewi)	Buche Brettschichtholz (Buche BSH)	Plastik-Stahl C, WEICON (WePSC)
Betonrippenstahl BST 500 S (BST)	Buche Furnierschichtholz (Buche FSH)	FIS EM 585 S, Fischer (FIS EM)
Betonrippenstahl BST 500 B NR (ES)	Eiche Brettschichtholz (Eiche BSH)	LOCTITE VN 3146, Henkel (He3146)
GFK-Stab Schöck Combar (GFK)		Wevo EP 32, Wevo (Wevo 32) WIT PE 500, Würth (Wü500)

Tabelle 1: Gewählte Einzelkomponenten der Anschlüsse

Die Großbauteile bestanden aus Stäben mit einem Durchmesser $d = 16$ mm, die in Probekörper aus den drei genannten Holzsorten mit einem Querschnitt von 120×120 mm eingeklebt wurden. Das Kraft-Verformungsverhalten wurde für jeden einzelnen Probekörper anhand von quasistatischen Zugversuchen bestimmt und ausgewertet.

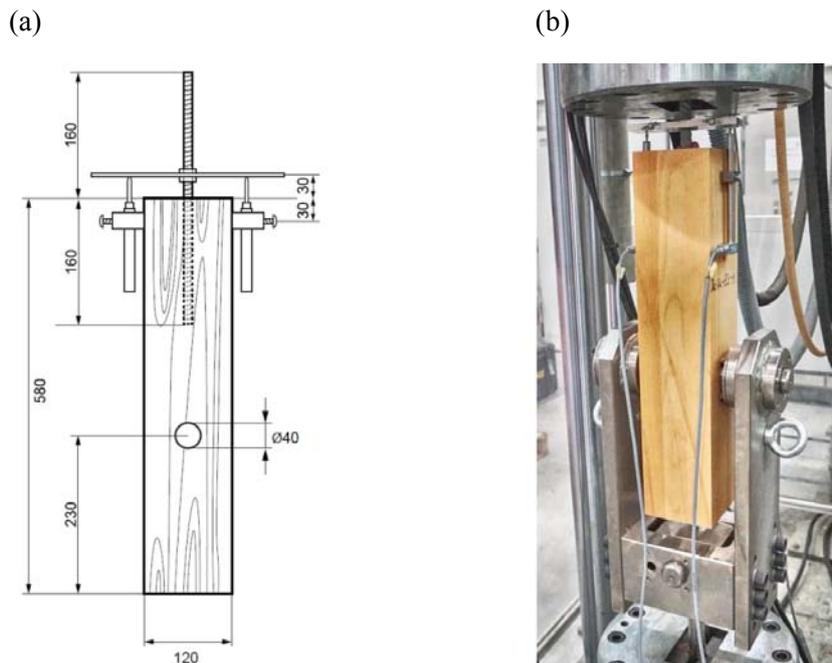


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Proben für Großbauteilversuche (a), Prüfkörper während der Versuchsdurchführung (b)

Es konnten drei verschiedene Bruchbilder beobachtet werden. In den meisten Fällen versagte der Anschluss im Holz, und zwar als am Stab haftender hölzerner Pfropfen. Außerdem versagte das Holz durch Aufspalten. In keinem Fall konnte ein Klebstoffversagen beobachtet werden. Die Steifigkeit der Anschlüsse wurde experimentell ermittelt. Mit $k_{\text{ser}} > 200 \text{ kN/mm}$ für metallische Stäbe und $k_{\text{ser}} > 100 \text{ kN/mm}$ für Stäbe aus GFK ist der Anschlussstyp als sehr steif einzustufen. Die höchsten Festigkeiten wurden mit in Buche BSH eingeklebten Stäben erreicht. Die ermittelten Tragfähigkeiten für Buche FSH sind ähnlich. Bei Eiche BSH war die Tragfähigkeit etwa 14% niedriger als bei Buche BSH. Insgesamt erzielen eingeklebte Gewindestangen die höchsten Werte, während die GFK-Stäbe die niedrigsten Tragfähigkeiten erreichen.

Holzart	Stabart	Tragfähigkeit je Stabart [kN]		Tragfähigkeit je Holzart [kN]	
		Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung
Buche BSH	Gewi	128,0	8,0	108,1	16,1
	BST 500	108,2	10,6		
	ES	102,5	12,0		
	GFK	93,7	10,9		
Eiche BSH	Gewi	99,9	9,4	92,6	10,2
	BST 500	96,5	6,3		
	ES	93,1	8,6		
	GFK	80,8	5,9		
Buche FSH	Gewi	125,7	5,0	103,8	14,6
	BST 500	102,1	7,2		
	ES	93,0	3,5		
	GFK	94,5	8,0		

Tabelle 2: Tragfähigkeiten von in Laubholz eingeklebten Stäben

Weiterhin sind die Festigkeiten bei in Laubholz eingeklebten Stäben höher als vergleichbare unter Verwendung von Nadelholz. Die mittlere Scherspannung an der Holz-Klebstoff-Fuge liegt zwischen 7,26 MPa und 13,58 MPa, was einem zwei- bis dreimal höheren Wert entspricht als der für Nadelholz normativ festgelegte charakteristische Wert von 4 MPa. Die Tragfähigkeiten in Abhängigkeit der verschiedenen Klebstoffe sind im Schlussbericht dieses Forschungsprojekts dargestellt.

Im Anschluss an die quasistatischen Untersuchungen wurden zyklische Versuche an vielversprechenden Parameterkombinationen durchgeführt (vgl. Tabelle 3) und anschließend Wöhlerdiagramme erstellt. Dabei wurde der gleiche Versuchsaufbau wie zuvor genutzt. Die GFK-Stäbe wurden aufgrund der geringeren wirtschaftlichen Relevanz für die zyklischen Versuche nicht weiter berücksichtigt. Die Probekörper wurden bei einem Spannungsverhältnis von $R = 0,1$ und einer Frequenz von $f = 5$ Hz unter einer sinusförmigen zyklischen Last bis zum Bruch beansprucht. Die Ermüdungsfestigkeit wurde für eine Lastspielzahl von $N = 2 \cdot 10^6$ definiert.

Stab/Stange	Buche BSH	Eiche BSH	Buche FSH
Gewi	Wevo 32, He 3146	Wevo 32	He 3164, Wü 500
BST	Wevo 32, He 3146	He 3146	
ES		Wevo 32, FIS EM, We PSC	

Tabelle 3: Versuchskonstellationen für zyklische Bauteilversuche bei $R = 0,1$

Die beobachteten Versagensarten lassen sich auf Versagen des Stabs und Versagen des Übergangs zwischen Holz und Klebstoff zusammenfassen. Dabei kam es vermehrt zum Aufspalten des Holzes bzw. der Furnierlagen. Durch die Analyse aller Wöhlerdiagramme lässt sich allgemein festhalten, dass es bei niedrigen Lastspielzahlen bzw. hohen Lasten zum Holz bzw. Holz-/Klebstoffversagen kam. Bei einer hohen Anzahl von Lastspielen bzw. geringeren Lasten kam es hingegen zum Versagen der Stäbe. Lediglich bei ES-Stäben wurde ausschließlich Holz bzw. Holz-/Klebstoffversagen beobachtet.

Durch die Analyse der experimentellen Daten wurde ersichtlich, dass die Datenpunkte für Holz bzw. Holz-/Klebstoffversagen für alle Materialkombinationen durch Geraden der Form $F_{\max} = a - b \cdot \log(N_B)$ in einem Wöhlerdiagramm mit linear-logarithmischen-Skalierung angenähert werden können. Bei Versagen von Gewinde- und BST-Stäben kann in Annäherung die Basquin-Gleichung $F_{\max} = a \cdot (N_B)^b$ verwendet werden. Somit ergeben sich im Wöhlerdiagramm zwei Kurvenverläufe, die sich jeweils nach den zwei beschriebenen Versagensarten richten.

Eine weitere Erkenntnis der Versuchsreihen mit Gewinde- und BST-Stäben ist, dass der Stab häufig den für die Ermüdungsfestigkeit limitierenden Faktor darstellt. Dieser liegt für Gewindestäbe (M16) bei ca. 20 kN und für BST-Stäbe ($\varnothing 16$ mm) bei ca. 40 kN. In den Versuchsreihen mit Edelstahl-Stäben kam es bei der definierten Dauerfestigkeit von $2 \cdot 10^6$ Lastwechseln dagegen wie beschrieben ausschließlich zum Holz bzw. Holz-/Klebstoffversagen.

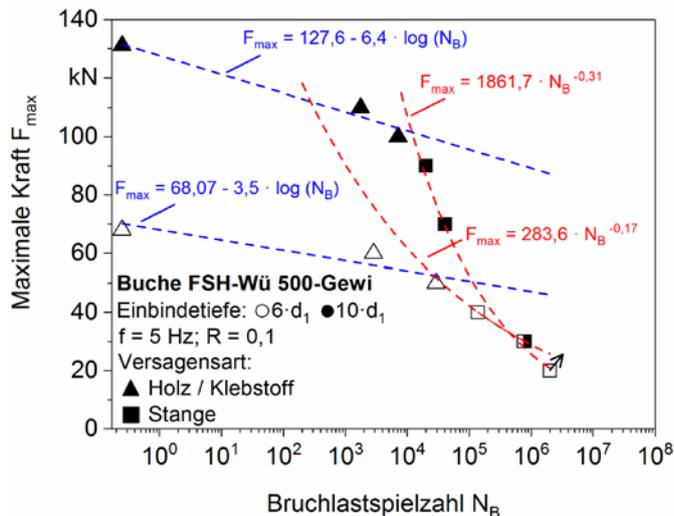


Abbildung 5: Wöhlerkurve für die Parameterkombination Buche FSH-Wü 500-Gewi unter Variation der Einbindetiefe

Zusätzlich zu den oben beschriebenen Versuchen wurden für ausgewählte Parameterkombinationen die Einbindetiefe sowie die Spannungsdifferenz variiert. Die Reduktion der Einbindetiefe von $l_{ad} = 160$ mm auf $l_{ad} = 96$ mm führte dabei zu einer annähernden Parallelverschiebung der Ausgleichsgeraden für das Holz bzw. Holz-/Klebstoffversagen (in Abbildung 5 blau gefärbt) auf ein niedrigeres Lastniveau. Eine Verringerung der Spannungsdifferenz (siehe Werte für $R = 0,5$ in Abbildung 6) führt hingegen zu einem erhöhten Lastniveau bzw. höheren Lastspielzahlen auf gleichem Niveau. Mit Hilfe der Wöhlerlinien beider Spannungsverhältnisse R für eine Parameterkombination konnten auch die Ermüdungskennwerte a und b in Anlehnung an DIN EN 1995-2:2010-12, Anhang A ermittelt werden, um einen leicht umzusetzenden Bemessungsansatz zu liefern.

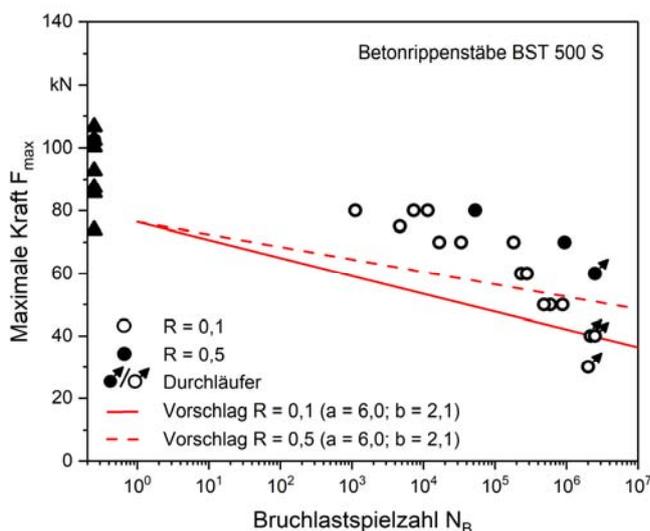


Abbildung 6: Vereinfachte Wöhlerkurven für eingeklebte Betonrippenstäbe unter Variation von R ; Vorschlag für Ermüdungskennwerte a und b in Anlehnung an EN 1995-2

4. Numerische Modellierung

Auf Basis der experimentellen Großbauteilversuche wurde ein numerisches Modell zur Berechnung und Darstellung des im Anschluss vorhandenen komplexen Spannungszustands mit Hilfe der Finiten-Element-Methode entwickelt. Die Ergebnisse der Modellierung wurden mit den experimentellen

Ergebnissen validiert und sind darüber hinaus ein wichtiger Bestandteil für die Berechnung der Tragfähigkeit.

Durch die komplexe Geometrie von eingeklebten Stäben und den Einsatz von verschiedenen Materialien ist die Berechnung noch immer eine Herausforderung. Holz weist ein orthotropes Materialverhalten und starke Streuungen auf, wodurch die Komplexität zunimmt.

In der Literatur finden sich unterschiedliche Ansätze zur Berechnung von eingeklebten Stäben, die den Autoren jedoch zu ungenau oder zu aufwendig erscheinen. Die im Rahmen des Projekts angewandte Methode zur Berechnung des Anschlusses basiert auf einer probabilistischen Vorhersage der Überlebenswahrscheinlichkeit des eingeklebten Stabs. Basierend auf einer umfangreichen experimentellen Vorversuchsreihe, in der Materialkennwerte wie E-Module und Materialfestigkeiten bestimmt wurden, wird die Kapazität des geklebten Anschlusses berechnet. Hierzu wird ein numerisch ermittelter, komplexer Spannungszustand für die Berechnung einer bestimmten Überlebenswahrscheinlichkeit unter Einbeziehung des Größeneffekts berücksichtigt. Die dargestellte probabilistische Berechnungsmethode bezieht dabei nicht nur lokale Spannungsspitzen ein, sondern zusätzlich auch die Bereiche mit niedrigeren Spannungen.

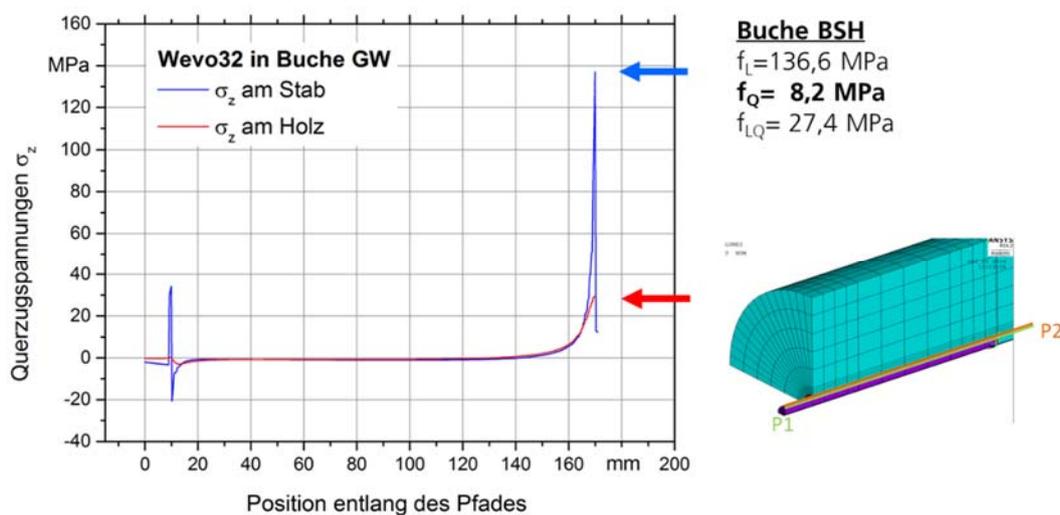


Abbildung 7: Darstellung eines FE-Modells mit Auswertung entlang von Pfaden

Es zeigte sich, dass der Spannungszustand in eingeklebten Stäben komplex ist und nicht auf reine Scherspannungen reduziert werden darf. Signifikante, transversale Spannungen interferieren mit Scherspannungen und heben die Vorhersage und Berechnung von Festigkeiten auf eine komplexere Ebene als die Betrachtung der mechanischen Eigenschaften der verwendeten Materialien. Daher ist auch durch den Vergleich der Großbauteilversuche mit Ergebnissen der Vorversuchsreihe hinsichtlich der Zug- und Scherfestigkeit von Holz, der Zugfestigkeit der Klebstoffe und der Zugscherfestigkeit des Holz-Klebstoffverbundes keine klare Korrelation der Materialkennwerte mit der Kapazität der Großbauteile herzustellen. Ein Grund dafür ist u.a. die Festigkeit der gewählten Klebstoffe, welche größer als die Festigkeit des verwendeten Holzes ist. Dadurch ist nicht länger die Klebstofffestigkeit der limitierende Faktor. Wie aus der Modellierung ersichtlich ist, ist es teils durch den signifikanten Größenunterschied zwischen Zugscherproben und den Großbauteilversuchen schwierig, die Verbundfestigkeit allein auf Basis von Zugscherproben zu kalkulieren.

Unter Anwendung des Modells wurden alle 60 verschiedenen Konfigurationen der quasistatischen Bauteilversuche berechnet. Der Vergleich der berechneten Werte mit den experimentell bestimmten Mittelwerten der Bruchlast zeigt eine gute Übereinstimmung von $-1 \pm 9 \%$ (über alle Materialkombinationen gemittelt). Es konnte gezeigt werden, dass durch vergleichsweise einfache und

kostengünstige Experimente die benötigten Materialkennwerte ermittelt werden konnten, um ein praxistaugliches FE-Modell aufzubauen, das den komplexen Spannungszustand darstellen kann. Die maßgebenden Spannungen konzentrieren sich dabei auf einen eingegrenzten Bereich um den eingeklebten Stab herum. Der Einfluss der Klebstoffsteifigkeit ($3 \text{ GPa} < E_a < 8 \text{ GPa}$) ist gering, während der verwendete Stangentyp einen signifikanten Einfluss auf die Festigkeit des geklebten Anschlusses hat. Hervorzuheben ist, dass abweichend von bisher angewendeten Berechnungsansätzen das Versagen nicht primär mit den Scherspannungen zusammenhängt, sondern insbesondere mit den Querkzugspannungen im Anschluss.

Über die Modellierung von eingeklebten Stäben unter quasistatischen Lasten hinaus sollte ebenso der Einfluss von zyklische Lasten modelliert werden. Die Ergebnisse der numerischen Modellierung und des unter zyklischer Last entstehenden Spannungszustands wurden anschließend mit den experimentellen Ergebnissen validiert.

Die Modellierung des Ermüdungsverhaltens eingeklebter Stäbe erfolgte durch die Erfassung der Schadensakkumulation. Die Schadensakkumulation wurde durch einen Ansatz modelliert, nach dem jeder Lastzyklus die Festigkeit eines jeden Holzelements um ein Maß Δf degradiert. Die Degradation Δf wird pro Lastwechsel über einen Grundwert der Schädigungsrate (κ) definiert. Zusätzliche Exponenten (β , γ , δ) beeinflussen zusätzlich den Einfluss der Magnitude der jeweils wirkenden Spannungskomponente.

Es ist damit möglich, eine zyklische Belastung sukzessive nachzurechnen und den Einfluss der Festigkeitsdegradation auf die Festigkeit nach jedem Zyklus als Restfestigkeit zu bestimmen. Es wurde gezeigt, dass ein solches Vorgehen, bei dem jeder Lastschritt nachgerechnet wird, mit 14 Tagen reiner Rechenzeit sehr langwierig ist. Es konnte aber auch gezeigt werden, dass die erforderlichen Rechenzeiten durch dekadenweise Zusammenfassung von Lastzyklen auf knapp 30 - 60 Minuten reduziert werden konnten. Anhand der experimentellen Ermüdungsversuche wurden die für die numerische Modellierung erforderlichen Parameter ermittelt. Mit Hilfe letzterer konnte für eine Einklebelänge $l_{ad} = 10 \cdot d$ eine vereinfachte Approximation abgeleitet werden, welche für die in Buche eingeklebten Stäbe eine gute Übereinstimmung liefert.

5. Fazit

Basierend auf verschiedenen Kleinversuchen wurden 5 Klebstoffe für das Einkleben von Stäben in Laubholz ausgewählt. Im Rahmen einer umfassenden Parameterstudie mit 60 Versuchsvarianten wurden die Tragfähigkeiten und Steifigkeiten von in Laubholz eingeklebten Stäben ermittelt. Mit Hilfe einer großen Anzahl von zyklischen Versuchen wurden weiterhin Wöhlerlinien für verschiedene Materialkombinationen erstellt. Diese lassen sich mit einer zweiteiligen Kurve für die zwei verschiedenen Versagensmechanismen darstellen. Für die Bemessung in Anlehnung an DIN EN 1995-2:2010-12 konnten Ermüdungsbeiwerte für die unterschiedlichen Stabarten gefunden werden. Das entwickelte FE-Modell ist in der Lage, sowohl die Kurzzeittragfähigkeit einer Verbindung mit eingeklebtem Stab als auch eine ertragbare Anzahl an Lastwechseln bei definierter Oberlast und einem Spannungsverhältnis von $R = 0,1$ vorherzusagen. Auch die Steifigkeit der Verbindung kann sich mit dem Modell gut abbilden lassen, wenn alle nötigen Materialkennwerte bekannt sind.

Fördergeber

Das IGF-Vorhaben 18266 N der Forschungsvereinigung Internationaler Verein für Technische Holzfragen e. V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Der vollständige Bericht kann bestellt werden bei:
Internationaler Verein für Technische Holzfragen e.V. (iVTH e.V.)
Bienroder Weg 54E
38108 Braunschweig