

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

Cordula Grunwald, Till Vallée, Fraunhofer IFAM, Bremen/Deutschland

Oliver Bletz-Mühdorfer, Leander Bathon, HS RheinMain, Wiesbaden/Deutschland

Sebastian Myslicki, Frank Walther, TU Dortmund, Dortmund/Deutschland

Laubhölzer sind Hochleistungsprodukte mit herausragenden Materialeigenschaften, die im Bauwesen einen noch vergleichsweise geringen Marktanteil besitzen. Innerhalb der nächsten Dekaden wird sich infolge der Klimaerwärmung der europaweit vorherrschende Baumbestand ändern. Zusätzlich liegen seit Kurzem qualitativ hochwertige und hochleistungsfähige Baumaterialien aus Laubholz vor, die die ohnehin schon guten Eigenschaften der Laubhölzer zusätzlich verbessern, z.B. Buchen- und Eichenbrettschichtholz sowie Buchenfurnierschichtholz. Mit Hilfe in Holz eingeklebter Stäbe lassen sich standardisierte, stoffschlüssige, starre, duktile und ästhetische Anschlüsse realisieren, die letztlich zu wirtschaftlichen Konstruktionen führen. Der Verbindungsansatz eingeklebter Stahlstäbe in Nadelholz ist normativ geregelt und anerkannt, allerdings nur für ruhende Lasten. Weitestgehend unbekannt ist dagegen das Einkleben von Stäben in Laubholz. Dies betrifft sowohl Stäbe aus Stahl als auch glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK). An dieser Stelle setzt das Forschungsprojekt „Tacitus“ an.

Werkstoff / Anschluss	Experiment	Ermittelte Kennwerte
Buche Eiche Buche Furnierschichtholz (FSH)	Zugversuche in verschiedener Faserrichtung (0°, 10°, 45°, 90°), 5 Probekörper je Holz und Faserrichtung	Zugfestigkeit σ [MPa], Bruchkriterium Holz
Klebstoffe u.a. Fischer FIS EM 585 S, Henkel LOCTITE VN 3146 PURBOND, Weicon Plastik-Stahl C, Wevo EP32, Würth WIT PE 500	Dynamisch-mechanische Analyse (DMA), 2 Probekörper je Klebstoff	E-Modul E [MPa], Glasübergangstemperatur TG [°C]
	Rheologische Untersuchung	Viskosität [Pas]
	Zugversuche, 5 Probekörper je Klebstoff, Geometrie nach DIN 527	E-Modul E [MPa], Zugfestigkeit σ [MPa], Querdehnzahl ϑ
Gewindestab Stahl Betonrippenstab Stahl, Edelstahl GFK-Stab	Zugversuche, 3 Probekörper pro Stab	Zugfestigkeit σ [MPa]
Standard-Zugscherprobe: Buche / Klebstoff; Eiche / Klebstoff	Zugscherversuche, jeweils 5 Zugscherproben pro Versuchsreihe	Zugscherfestigkeit f_v [MPa]
Eingeklebte Stäbe im Kleinformat (b/h/l = 30x30x165 mm)	Zugversuche, jeweils 5 Proben pro Versuchsreihe	Zugscherfestigkeit f_v [MPa]

Tabelle 1: Übersicht über die charakterisierten Werkstoffe und Experimente zur Klebstoffauswahl für die folgenden Großbauteilversuche

Material und Methoden

Im Rahmen des Forschungsprojekts „Tacitus“ wurden mehrere Kombinationen von Holzsorten, Klebstoffen und Stabtypen untersucht. Zur Identifizierung von für Großbauteilversuche geeigneten Klebstoffsystemen wurden Experimente zur Werkstoff- und Anschlusscharakterisierung durchgeführt (Tab. 1).

Die spezifischen Eigenschaften der Klebstoffe wurden durch dynamisch-mechanische Analyse (DMA) und Rheologie ermittelt, die mechanischen Eigenschaften für die Holzstrukturen, Klebstoffe und Stäbe durch Zugversuche. Danach wurden geeignete Klebstoffsysteme anhand von Zugscherversuchen und an eingeklebten Stäben im Kleinmaßstab sowie durch ergänzende Delaminierungsversuche identifiziert.

Auf Basis der Ergebnisse der umfassenden Versuchsreihen zur Charakterisierung der Werkstoffe und zur Klebstoffauswahl wurden Großbauteilversuche in insgesamt 60 Varianten (3 Holzarten, 4 Stabtypen, 5 Klebstoffsysteme) durchgeführt. Für jede Kombination der Werkstoffe wurden mind. 3 Probekörper, insgesamt mehr als 180 entsprechend der Geometrie nach Abb. 1 hergestellt und geprüft. Für die Zugprüfung der Großbauteilversuche wurde eine Prüfvorrichtung entwickelt, die die Einspannung der Bauteile in die Prüfmaschine optimiert. Die resultierenden Bruchlasten geben nicht nur Auskunft über die Belastbarkeit der Anschlüsse, sondern dienen gleichzeitig zur Validierung der numerischen Analyse der Anschlüsse sowie des Modells zur Vorhersage der Tragfähigkeit.



Abbildung 1: (links) Geometrie der Großbauteilversuche; (mittig) eingespannter Probekörper in der für die Zugprüfung entwickelten Prüfvorrichtung; (rechts) FE-Modell

Die numerische Modellierung erfolgte mit Hilfe der Software Ansys 16.2. Der Geometrie der Großbauteile entsprechend wurde ein Modell für „eingeklebte Stäbe“ entwickelt. Unter Ausnutzung der Symmetrieeigenschaften wurde $\frac{1}{4}$ Stab modelliert. Als Eingangsgrößen für die Modellierung dienten die experimentell ermittelten Materialkennwerte. Die Materialien Holz und GFK wurden im Modell als orthotrop definiert, während Stahl und Klebstoff als isotrope Werkstoffe in die Modellierung einfließen. Die numerisch ermittelten Spannungszustände bildeten die Grundlage für die probabilistische Formulierung der Tragfähigkeit.

Ergebnisse

Anhand der experimentellen Großbauteilversuche zeigte sich, dass die erreichten Bruchlasten der einzelnen Konfigurationen zwischen 70 und 140 kN lagen und damit deutlich ($> 20\%$) über den aus der Literatur bekannten Werten für Nadelholz. Die

experimentell bestimmten Traglasten streuten dabei gering, im Mittel lag die Standardabweichung unter 10% der Mittelwerte (Tabelle 3).

Holzart	Stabart	WEVO 32	He 3146	Fis EM	Wü 500	We PSC	
Buche105,55	Gewi	136,50	129,43	134,66	120,35	119,21	
	BST 500 S	102,76	96,10	124,42	106,95	110,94	
	BSH	BST 500 B NR	101,64	96,99	123,16	98,25	92,60
		GFK	110,87	92,20	84,69	96,46	84,31
Eiche	Gewi	115,82	93,03	93,76	96,35	100,54	
	BST 500 S	99,12	87,31	93,47	98,36	104,02	
	BSH	BST 500 B NR	101,81	80,73	100,60	91,63	90,67
		GFK	82,74	73,01	89,14	80,84	78,21
Buche	Gewi	118,75	124,90	123,79	131,02	129,94	
	FSH	BST 500 S	97,64	96,05	114,33	100,86	101,45
		BST 500 B NR	92,41	90,02	97,33	95,94	89,44
		GFK	92,05	99,87	89,19	86,07	

Tabelle 2: Mittelwerte der experimentell ermittelten Bruchlasten [kN]

Das numerische Modell konnte die experimentell bestimmten Traglasten gut abschätzen, Abweichungen lagen in den meisten Fällen unter 10%. Die Vorhersagequalität war dabei für Buche BSH und Eiche BSH in Kombination mit isotropen Stäben am besten. Buche FSH sowie die orthotropen GFK-Stäbe wiesen ein deutlich komplexeres Materialverhalten auf, weshalb sich größere Abweichungen in der Vorhersage ergaben. Um die numerische Modellierung dahingehend zu optimieren, werden aktuell weiterführende Materialcharakterisierungen durchgeführt.

Holzart	Stabart	Wevo 32	He3146	Fis EM	Wü 500	We PSC
Buche-BSH	Gewindestange	-10%	-5%	-14%	-5%	-6%
	BST 500 S	9%	17%	-13%	0%	-5%
	BST 500 B NR	10%	16%	-12%	9%	14%
	GFK	-22%	-6%	-12%	-13%	-4%
Eiche-BSH	Gewindestange	-6%	18%	10%	5%	-1%
	BST 500 S	-1%	13%	1%	-5%	-11%
	BST 500 B NR	-3%	22%	-6%	-1%	8%
	GFK	-8%	-18%	-23%	-24%	-9%
Buche-FSH	Gewindestange	5%	0%	-8%	-15%	9%
	BST 500 S	13%	15%	-9%	2%	-1%
	BST 500 B NR	20%	23%	7%	7%	11%
	GFK	-10%	-17%	-13%	-28%	-13%

Tabelle 3 : prozentuale Abweichung der experimentell ermittelten Bruchlasten von den numerisch berechneten Bruchlasten