

Hybride Holzbauteile aus Laubholz-Furnieren und Brettschichtholz aus Nadelholz – holzbewehrtes Holz

Lechner, Markus

Bauingenieur, M. Sc.
Lehrstuhl für Holzbau und
Baukonstruktion
TUM
markus.lechner@tum.de



Markus Lechner ist Zimmermeister und staatlich geprüfter Bautechniker. Anschließend studierte er Bauingenieurwesen an der TU München. Seit 2016 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion der TU München.

Zusammenfassung

Dieser Beitrag befasst sich mit der Entwicklung eines neuartigen furnierverstärkten Holzbauprodukts für tragende Zwecke – holzbewehrtes Holz. Dazu werden Laubholzurniere als Schub- und Querkzugverstärkungen vertikal in einen Brettschichtholzquerschnitt eingebracht. Durch Anordnung der Furnierlagen zwischen den Brettschichtholzbauteilen unter Winkeln von 0° und 90° sollen die stark anisotropen Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften von Brettschichtholz homogenisiert werden. Es werden Ergebnisse von numerischen und experimentellen Untersuchungen dargestellt.

1. Einleitung

Eine bekannte Schwachstelle von Brettschichtholz (BSH) aus Nadelholz sind die im Vergleich zur Biegefestigkeit sehr geringen Schubfestigkeiten (bei BSH nur ca. 15 % der Biegefestigkeit) und Querkzugfestigkeiten (bei BSH nur ca. 2 % der Biegefestigkeit) dieses Holzbauproduktes [1]. Die geringen Festigkeitseigenschaften führen häufig zu Rissbildungen sowohl in geometriebedingt regulär auf Querkzug und/oder Schub beanspruchten Bereichen (gekrümmte Träger, bei Durchbrüchen, Ausklinkungen, Queranschlüssen, Verbindungsmittelgruppen) als auch bei Austrocknung bzw. wechselnden Klimabeanspruchungen des Brettschichtholzes [2] [3]. Stand der Technik ist, diesen Eigenschaften mit zumeist senkrecht zur Faserrichtung des Holzbauteils eingebrachten lokalen Verstärkungen in Form von Gewindestangen oder Vollgewindeschrauben zu entgegen [4]. Neuere Untersuchungen [5], [6], [7] zeigen eine hohe Leistungsfähigkeit von planmäßig flächigen Verstärkungen über die gesamte Trägerlänge. Aufbauend auf diesen Untersuchungen soll durch die Kombination von BSH aus Nadelholz und gezielt angeordneten Laubholz-Furnieren ein hybrides Holzbauteil mit deutlich verbesserten Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften entstehen, vgl. Abb. 1.

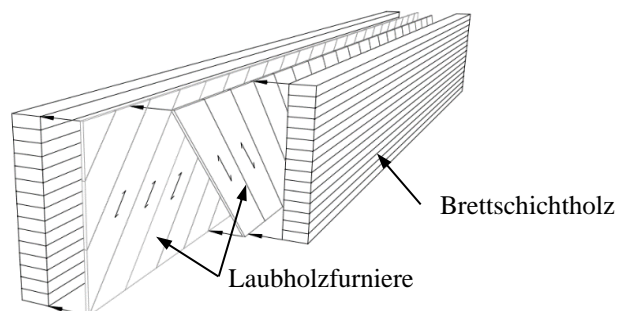


Abb. 1: Prinzipieller Aufbau von holzbewehrtem Holz mit gegenläufiger Furnieranordnung

Die Furnierlagen sollen eine verformungsverträgliche Verstärkung bilden mit welcher vor allem die Schubbeanspruchbarkeit, die Querkzugbeanspruchbarkeit und die Leistungsfähigkeit von Verbindungsmittelgruppen in "holzbewehrtem Holz" wesentlich erhöht werden kann.

2. Numerische Parameterstudie

2.1 Allgemein

Zur Ermittlung leistungsfähiger Querschnittsaufbauten von holzbewehrtem Holz (HBH) wurde eine umfangreiche Parameterstudie zu Furnierdicken und Furnierneigungen mittels mehreren 3-D FEM Volumenmodellen für Querkzug-, Schub- und Feuchtebeanspruchungen durchgeführt. Die Berechnung erfolgte im linear elastischen Bereich mit den Materialparametern für BSH aus [1]. Zur Beschreibung des Furnieranteils im Querschnitt wurde der Bewehrungsgrad

$$\delta = \frac{\Sigma \cdot t}{b} \quad (1)$$

definiert, vgl. Abb. 2.

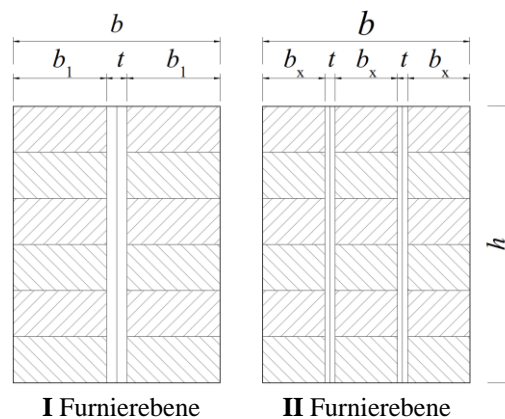
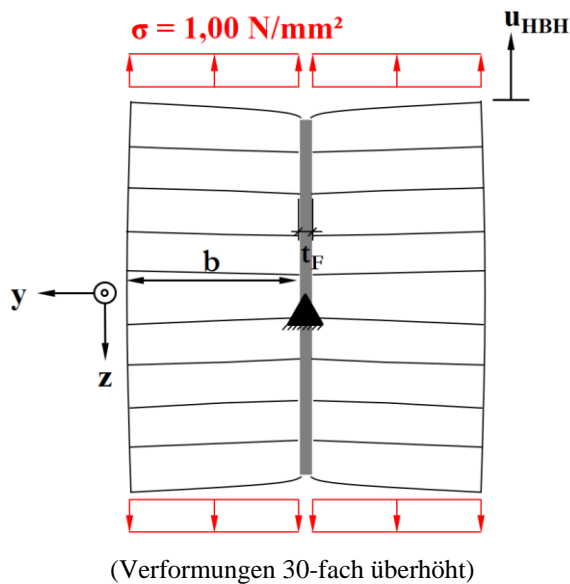


Abb. 2: Querschnittsaufbauten von holzbewehrtem Holz

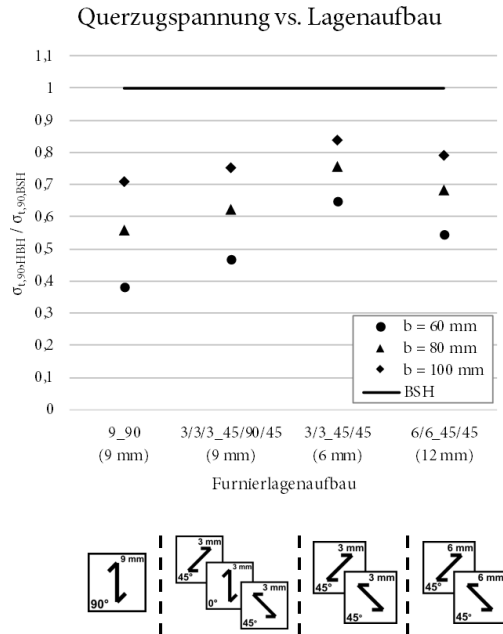
Es wurden Querschnittsaufbauten mit einer Furnierebene (I) und mit zwei Furnierebenen (II) untersucht. In den Modellen wurde das E-Modul der Furniere $E_{0,F}$ zwischen 5.000 – 20.000 N/mm² variiert. Aus den Ergebnissen der Simulationen wird deutlich, dass die Furniere ein Mindeststeifigkeit $E_{0,F}$ von 10.000 N/mm² haben sollten.

2.2 Querkzug

Zur Untersuchung des Einflusses der Furniere auf die Querkzugspannungen im Brettschichtholz wurden kleinformatige Volumenkörper mit einer Länge $l = 100$ mm und einer Höhe $h = 400$ mm und unterschiedlichen Furnierneigungen modelliert. Die Breite b wurde in 10 mm Schritten variiert. Anschließend wurden die Querkzugspannungen im BSH des HBH-Querschnitts ausgegeben und mit unbewehrtem Brettschichtholz verglichen. In Abb. 3 ist der Versuchsaufbau und ein Auszug der Ergebnisse gezeigt. Die Spannungen mit dem Index HBH sind die Spannungen der Brettschichtholzkomponenten im Querschnittsaufbau des HBH.



(a) Versuchsaufbau Querzug



(b) Ergebnisse der FEM Studie

Abb. 3: Einfluss der Furnierneigung und Dicke auf die Querzugspannungen in der BSH Komponente von HBH

Querzugspannungen im Brettschichtholz lassen sich durch Furniere um 20 – 60 % reduzieren. Dabei ist ein Mindestbewehrungsgrad von 10 – 15 % notwendig. Bei einer seitlichen Brettschichtholzbreite b_1 von 60 mm können die Querzugspannungen um bis zu 50 % reduziert werden. Mit steigender Breite b_1 nimmt der Einfluss der Furniere ab. Bei einer Breite b_1 von 100 mm sind nur noch Reduktionen von 20 % möglich.

2.3 Schub

Der Einfluss der Furniere auf die Schubspannungen in den BSH-Komponenten von HBH wurde mittels eines 3-Punkte Biegeversuchs im FEM Volumenmodell nach dem gleichen Prinzip wie für Querzug untersucht. Die Schubspannungen lassen sich durch die Furniere um 20 – 50 % reduzieren. Eine gegenläufige Anordnung der Furniere im 45° Winkel (+45°/-45°) zeigt das größte Potential. Die Biegespannungen in den BSH-Komponenten erhöhen sich bei einem Winkel der Furniere von 0° bis 22,5° (+22,5°/-22,5°) nicht wesentlich.

2.4 Feuchte

Zur Abschätzung des Einflusses von Holzfeuchteänderungen auf die Querzugspannungen im Brettschichtholz wurde eine Holzfeuchteänderung von 5 % (stationäre Analyse) auf den Verbundquerschnitt aufgebracht. Dabei zeigt sich, dass geneigte Furnieranordnungen (+45°/-45°) um ca. 30 % geringere Querzugspannungen verursachen als 90° orientierte Furniere.

3. Experimentelle Untersuchungen

3.1 Versuchsprogramm

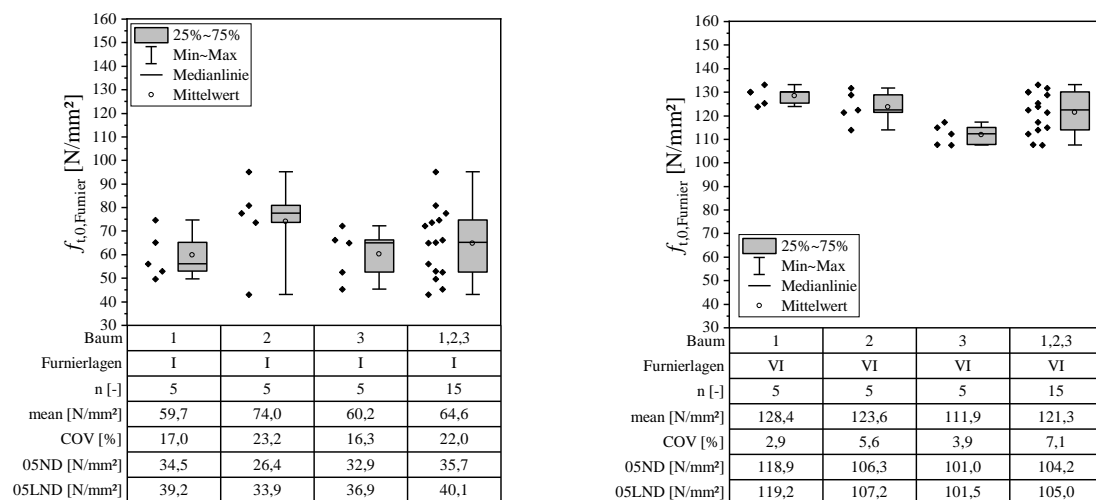
Das Versuchsprogramm ist mehrstufig aufgebaut. Jeder Prüfkörper wird zuerst mit nicht zerstörenden Verfahren (Schwingungsmessungen) untersucht und anschließend zerstörend geprüft. Tab. 1 zeigt den aktuellen Stand der Untersuchungen.

Tab. 1: Zusammenfassung und aktueller Stand der experimentellen Untersuchungen

Versuch	Bearbeitungsstand
Zugfestigkeit von Einzelfurnieren und Furnierpaketen aus Buche	abgeschlossen
Biegetragverhalten	abgeschlossen
Schubtragverhalten	in Bearbeitung
Ausklinkungen	in Auswertung
Durchbrüche	in Auswertung
Queranschlüsse	in Bearbeitung
Querzug	in Bearbeitung
Querdruck	in Bearbeitung
Feuchte	laufend
Delaminierung	in Vorbereitung

3.2 Zugfestigkeit der Buchenfurniere

Zur Ermittlung der Zugfestigkeit $f_{t,0,\text{Furnier}}$ und des E-Moduls $E_{0,F}$ wurden Zugversuche gemäß DIN EN 408 (2012-10) an Schälurnieren $t_F = 1,5$ mm aus Buchenholz durchgeführt. Die Furniere der Prüfkörper wurden aus drei unterschiedlichen Baumstämmen entnommen. Es wurden Prüfkörper mit I, II, IV und VI Furnierlagen erstellt. Die Ergebnisse zeigen einen starken Homogenisierungseffekt und deutliche Steigerungen der Zugfestigkeiten bei mehreren faserparallelen Furnierlagen im Vergleich zu Einzelfurnieren, vgl. Abb. 4.



(a) Eine 1,5 mm Furnierlage

(b) Sechs 1,5 mm Furnierlagen

Abb. 4: Zugfestigkeiten der Buchenfurniere

Bei den VI-lagigen Prüfkörpern wurden durchgehend Zugfestigkeiten $f_{t,0,\text{Furnier},k}$ von mindestens 100 N/mm² erreicht.

3.3 Biegeversuche

Zur Ermittlung des Biegetragverhaltens von holzbewehrtem Holz wurden drei Querschnittsaufbauten mit jeweils drei Prüfkörpern gemäß DIN EN 408 (2012-10) geprüft, vgl. Abb. 5. Die Prüfkörper wurden aus aufgetrennten Brettschichtholz GL28h und 1,50 mm Buchenfurnieren hergestellt. Für die Blockverklebung wurde ein PRF Klebstoff (Dynea P4094/5827) verwendet. Alle Prüfkörper hatten einen Bewehrungsgrad δ von 10 %. Ebenso wurde je Serie ein Biegeträger aus BSH ohne Furniere geprüft.

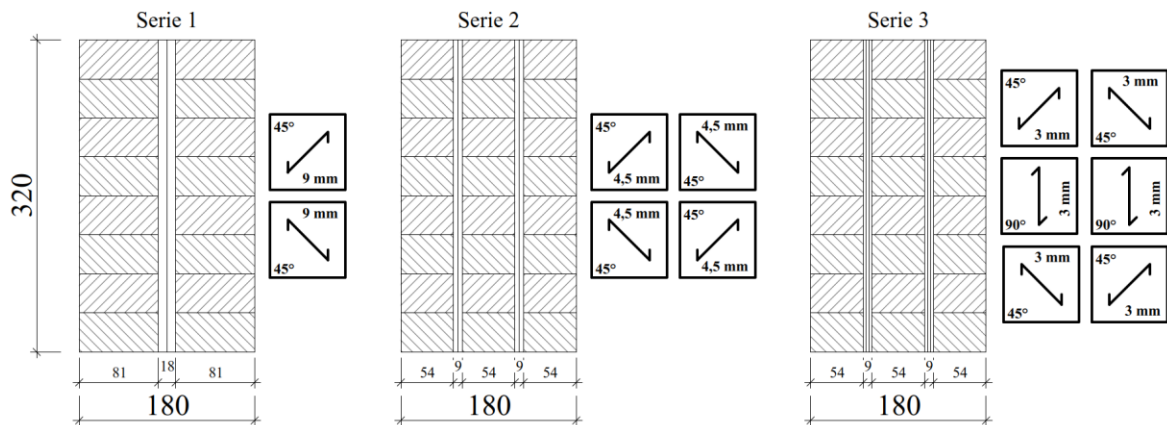


Abb. 5: HBH Querschnittsaufbauten der Biegeversuche

Die HBH Prüfkörper tendieren zu einem lokaleren Biegebruchverhalten im Vergleich zu den BSH Referenzprüfkörpern, vgl. Abb. 6.



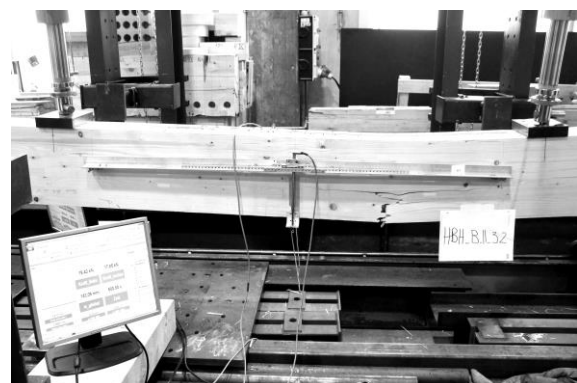
(a) BSH_R_2



(b) HBH_1.1



(c) HBH_2.3



(d) HBH_3.2

Abb. 6: Bruchverhalten der Biegeversuche

Die Auswertung der Versuche zeigt, dass die Furniere den reduzierten Nettoquerschnitt des BSH teilweise kompensieren können, vgl. Tab. 2.

Tab. 2: Biegefestigkeit und Rohdichte der Biegeversuche von BSH und HBH

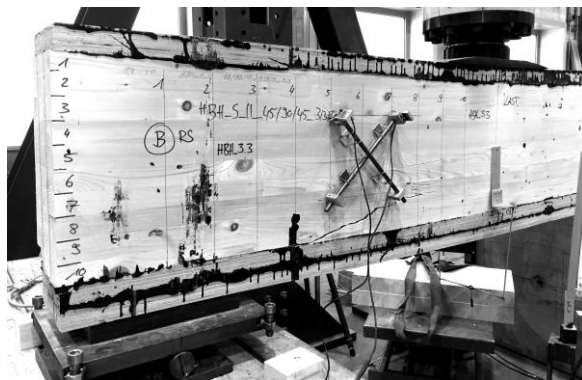
Prüfkörper	f_m	$f_{m,MW}$	ρ	ρ_{MW}
	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[kg/m ³]	[kg/m ³]
BSH_B_R_1	43,3		459,7	
BSH_B_R_2	40,1	40,1	458,0	462,2
BSH_B_R_3	37,0		468,8	
HBH_B_I_45-45_9-9_1.1	42,3		494,3	
HBH_B_I_45-45_9-9_1.2	31,1	35,3	487,0	492,3
HBH_B_I_45-45_9-9_1.3	32,4		495,6	
HBH_B_II_45-45_4,5-4,5_2.1	44,3		524,1	
HBH_B_II_45-45_4,5-4,5_2.2	45,3	40,4	530,3	520,6
HBH_B_II_45-45_4,5-4,5_2.3	31,7		507,5	
HBH_B_II_45-90-45_3-3-3_3.1	36,2		518,9	
HBH_B_II_45-90-45_3-3-3_3.2	34,7	36,1	516,9	520,6
HBH_B_II_45-90-45_3-3-3_3.3	37,3		525,9	

Aufgrund der geringen Prüfkörperanzahl je Serie wird auf eine detaillierte statistische Auswertung verzichtet.

3.4 Schubversuche

Zur Untersuchung der Schubtragfähigkeit werden aktuell 3-Punkt Biegeversuche ($l = 2800$ mm) durchgeführt. Der Aufbau und die Querschnittsabmessungen der Schubprüfkörper sind bis auf die Höhe ($h = 400$ mm) gleich den Biegeversuchen (Abb. 5). Als Biegezug- und Biegedruckverstärkung wurden 80 mm Baubuche S (Platten) aufgeklebt. Im Laufe der Versuche wurde die Dicke der Baubuchenverstärkung angepasst.

Tab. 3: Maximale Querkräfte bei Bruchlast



Prüfkörper	V_{max}
	[kN]
BSH_S_R_1	315
BSH_S_R_2	328
BSH_S_R_3	392
HBH_1.1	360
HBH_1.2	330
HBH_2.1	341
HBH_2.2	429
HBH_3.3	457

Abb. 7: Schubversuche von HBH

Bei den BSH-Referenzprüfkörpern konnte ein Schubversagen durch den gewählten Prüfaufbau im Brettschichtholz erreicht werden. Im Gegensatz dazu versagten zwei der HBH Prüfkörper (HBH_1.1, HBH_1.2) auf Schub im Übergangsbereich zwischen BSH und Baubuche und die restlichen drei der HBH Prüfkörper (HBH_2.1, HBH_2.2, HBH_3.3) auf Biegezug in der BSH-Komponente.

3.5 Ausklinkungen und Durchbrüche

Aus den unversehrten Teilen der bereits geprüften Biegeprüfkörper wurden Prüfkörper für Versuche an Ausklinkungen und Durchbrüchen geschnitten, vgl. Abb. 8.

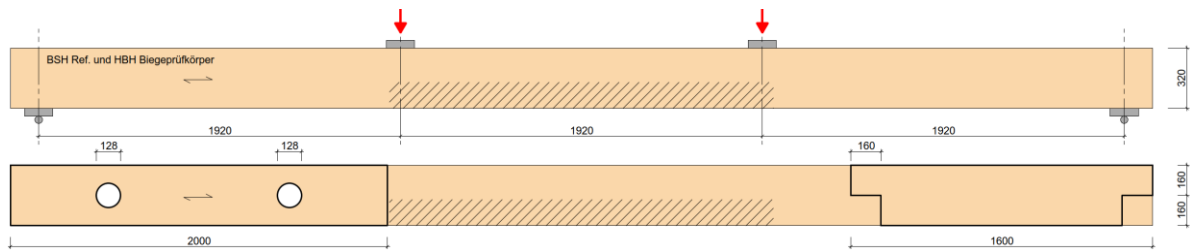


Abb. 8: Prüfkörper für Ausklinkungen und Durchbrüche

Die Ergebnisse der ausgeklinkten HBH Prüfkörper zeigen einen Laststeigerungsfaktor von bis zu fünf im Vergleich zu den BSH Referenzprüfkörpern [8]. Bei den Versuchen von Durchbrüchen konnte im Vergleich zu den BSH Referenzprüfkörpern die Last verdoppelt werden [9]. Die Auswertung der Versuche ist aktuell noch in Bearbeitung.

3.6 Feuchte

Im Oktober 2019 wurden 18 Prüfkörper ($l = 500$ mm, $b = 180$ mm, $h = 400$ mm) in eine Klimakammer gestellt, vgl. Abb. 9 [10], je Serie (Abb. 5) ein BSH und drei HBH Prüfkörper. Zusätzlich wurden noch zwei weitere Serien (F_I_90 und F_II_90) mit je drei Prüfkörpern und einer Furnierneigung von 90° zur Faserrichtung der BSH Komponenten gefertigt.

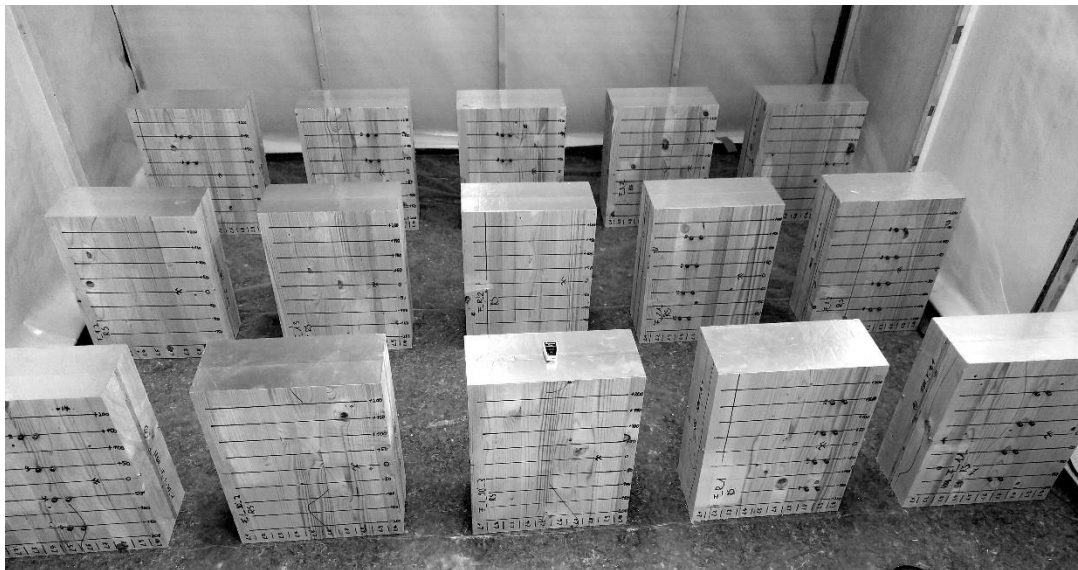


Abb. 9: HBH Feuchteprüfkörper in der Klimakammer

Die relative Luftfeuchtigkeit (rLF) wird bei gleichbleibender Raumtemperatur monatlich um 5 % gesenkt, bis ein Niveau von 30 % rLF erreicht ist. Jede Woche werden die Holzfeuchten der Prüfkörper über das Widerstandsverfahren bestimmt, die Volumenänderungen gemessen und entstehende Risse aufgenommen. Aktuell ist noch keine Rissbildung festzustellen (Versuchsdauer 3 Monate, aktuelle rLF = 55%, Holzfeuchte $u_{\text{mean},15 \text{ mm}} = 12,2$ %, $u_{\text{mean},70 \text{ mm}} = 15,0$ %, Januar 2020).

4. Zusammenfassung

Die numerischen und experimentellen Ergebnisse belegen, dass holzbewehrtes Holz eine effektive Alternative für die Verstärkung von Holzkonstruktionen mit speziellen Geometrien (Durchbrüchen, Ausklinkungen) darstellt, bei denen hohe Schubspannungen oder Spannungen quer zur Faserrichtung auftreten.

Danksagung

Dieses Projekt wird finanziert von der Forschungsinitiative ZukunftBAU (SWD-10.08.7-18.21) und den Projektpartnern Schaffitzel Holzindustrie GmbH + Co. KG, OWI GmbH, Dynea AS, Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V., Ing.Punkt Ingenieurgesellschaft mbH, BBI INGENIEURE GMBH, Ulrich Lübbert Warenhandel GmbH und Co. KG.

Literatur

- [1] DIN EN 14080:2013: *Holzbauwerke – Brettschichtholz und Balkenschichtholz - Anforderungen*, DIN, Berlin.
- [2] BLASS, H.-J., FRESE, M., *Schadensanalyse von Hallentragwerken aus Holz*, Band 16 der Reihe Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, 2010
- [3] DIETSCH, P., WINTER, S., *Structural failure in large-span timber structures: A comprehensive analysis of 230 cases*, Structural Safety, 71: 41-46, 2018
- [4] DIN EN 1995-1-1/NA:2013-08, *Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau*, DIN, Berlin, 2013.
- [5] BEJTKA, I., *Cross (CLT) and diagonal (DLT) laminated timber as innovative material for beam elements*, Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau Nr. 17, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, 2011.
- [6] FLAIG, M.: *Biegeträger aus Brettspertholz bei Beanspruchung in Plattenebene*, Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau Nr. 26, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, 2013.
- [7] AICHER, S., & TAPIA, C.: (2018) *Novel internally LVL-reinforced glued laminated timber beams with large holes*. Construction and Building Materials, 169, 662–677.
- [8] KAPS, C.: *Tragfähigkeitsuntersuchungen an holzbewehrtem Holz mit Ausklinkungen*, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, TU München, Masterarbeit 2019.
- [9] RÖSCH, M.: *Tragfähigkeitsuntersuchungen an holzbewehrtem Holz mit Durchbrüchen*, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, TU München, Masterarbeit 2019.
- [10] RIEDER, G.: *Verhalten von holzbewehrtem Holz bei Feuchteänderung*, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, TU München, Masterarbeit 2019.