

Experimentelle und numerische Untersuchungen von Brettschichtholz aus Buchen-Furnierschichtholz (BauBuche)

Vortragender:

Töpler, Janusch

M.Sc.

Institut für Konstruktion
und Entwurf (KE)

Universität Stuttgart

janusch.toepler@ke.uni-stuttgart.de



- 2009-2015 Studium des Bauingenieurwesens an der Universität Stuttgart
- 2016-2017 Tragwerksplaner bei Breinlinger Ingenieure in Stuttgart
- seit 2018 Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität Stuttgart (KE)

Autoren: Janusch Töpler, M.Sc.; Prof. Dr.-Ing. Ulrike Kuhlmann

Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsprojekts RP7 im Exzellenzcluster Integrative Computational Design in Architecture and Construction (IntCDC) [18] an der Universität Stuttgart wurden Biege- und Druckversuche zur Ermittlung der elastischen Materialeigenschaften von Buchen-Furnierschichtholz GL75 (BauBuche) durchgeführt. Als Messeinrichtung wurde das optische Messsystem ARAMIS Adjustable verwendet. Anhand der Versuchsergebnisse werden die Elastizitätsmoduln, Schubmoduln und Querdehnzahlen sowie die asymmetrische elastische Materialsteifigkeitsmatrix ermittelt. Mit den ermittelten Materialkennwerten werden FE-Modelle der Versuche entwickelt, verifiziert und anhand der Ergebnisse validiert. Außerdem wird der Einfluss der Querschnittsverwölbung infolge Schub auf die Längsrandspannungen bei biegebeanspruchten Holzträgern experimentell und numerisch untersucht.

1. Einleitung

Die Nachfrage nach Brettschichtholz aus Buchen-Furnierschichtholz (Buchen-FSH) GL75 (BauBuche) [13] nimmt aufgrund dessen hoher Festigkeiten und Steifigkeiten und des zunehmenden Marktanteils des Holzbaus bei mehrgeschossigen Gebäuden und weitspannenden Dach- und Deckenkonstruktionen stark zu [15].

Forschungsaktivitäten haben sich bis jetzt auf die Materialeigenschaften von Buchen-FSH konzentriert, die für die Praxis von Bedeutung sind. Dill-Langer & Aicher [4], [5] untersuchten die Biegefestigkeit und den Einfluss des Volumeneffekts bei Trägern bis 2,5 m Höhe. Die Druckfestigkeit und -steifigkeit wurde von Dill-Langer & Aicher [3], [5], Kuck [17], Blaß & Windeck [2] und Ehrhart & Steiger & Frangi [12], die Rollschubfestigkeit und -steifigkeit von Hütter [16] und die Schubfestigkeit und -steifigkeit von Dill-Langer & Aicher [5] untersucht.

Im Dezember 2013 wurde die erste bauaufsichtliche Zulassung für Brettschichtholz aus Buchen-FSH erteilt [23]. 2015 erschien diese als ETA-14/0354 [13] in überarbeiteter Fassung. Aus ETA-14/0354 [13] lassen sich charakteristische und mittlere Werte der Elastizitätsmoduln parallel und senkrecht zur Faser und des Schubmoduls in Faserrichtung entnehmen.

Die Querdehnzahlen von Brettschichtholz aus Buchen-FSH wurden bislang nicht ermittelt. Neuhaus [20] zeigte zudem, dass die Steifigkeitsmatrix von Fichtenholz asymmetrisch ist. Vereinfachend wird für die Modellierung von Holz jedoch in der Regel eine symmetrische Steifigkeitsmatrix angenommen, was bei lokalen Spannungsspitzen zu Ungenauigkeiten führen kann.

Für die Ermittlung der elastischen anisotropen Materialsteifigkeitsmatrix von Buchen-FSH, die für numerische Berechnungen mit Volumenelementen erforderlich ist, fehlen somit insbesondere Versuchsergebnisse für Querdehnraten. Versuchsergebnisse zu E-Moduln senkrecht zur Faser und Schubmoduln sind bis jetzt nicht veröffentlicht. Zudem ist unklar, ob auch bei Buchen-FSH eine asymmetrische Steifigkeitsmatrix vorliegt.

2. Experimentelle Untersuchungen

2.1 Allgemeines

Es wurden experimentelle Untersuchungen zur Bestimmung der elastischen Materialkennwerte von Buchen-FSH in Anlehnung an DIN EN 408 [6] durchgeführt. Ziel der Versuche ist es, alle Einträge der elastischen Materialsteifigkeitsmatrix einschließlich Querdehnraten anhand des optischen Messsystems ARAMIS Adjustable zu ermitteln. Eine detaillierte Beschreibung der Untersuchungen wird in [19] gegeben.

2.2 Versuchskörper, Messeinrichtung und Versuchsdurchführung

Das Versuchsprogramm umfasste 6 **Versuchskörper** (V1 bis V6) mit Abmessungen $h \times b \times l = 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 1900 \text{ mm}$ aus Brettschichtholz aus Buchen-FSH GL75 nach ETA-14/0354 [13] für elastische 3-Punkt-Biegeversuche zur Bestimmung des E-Moduls und der Schubmoduln in Faserrichtung. Diese wurden bei je drei unterschiedlichen Spannweiten $l_s = 1800 / 1200 / 600 \text{ mm}$ und je hoch- und flachkant geprüft (Abb. 1 (a)).

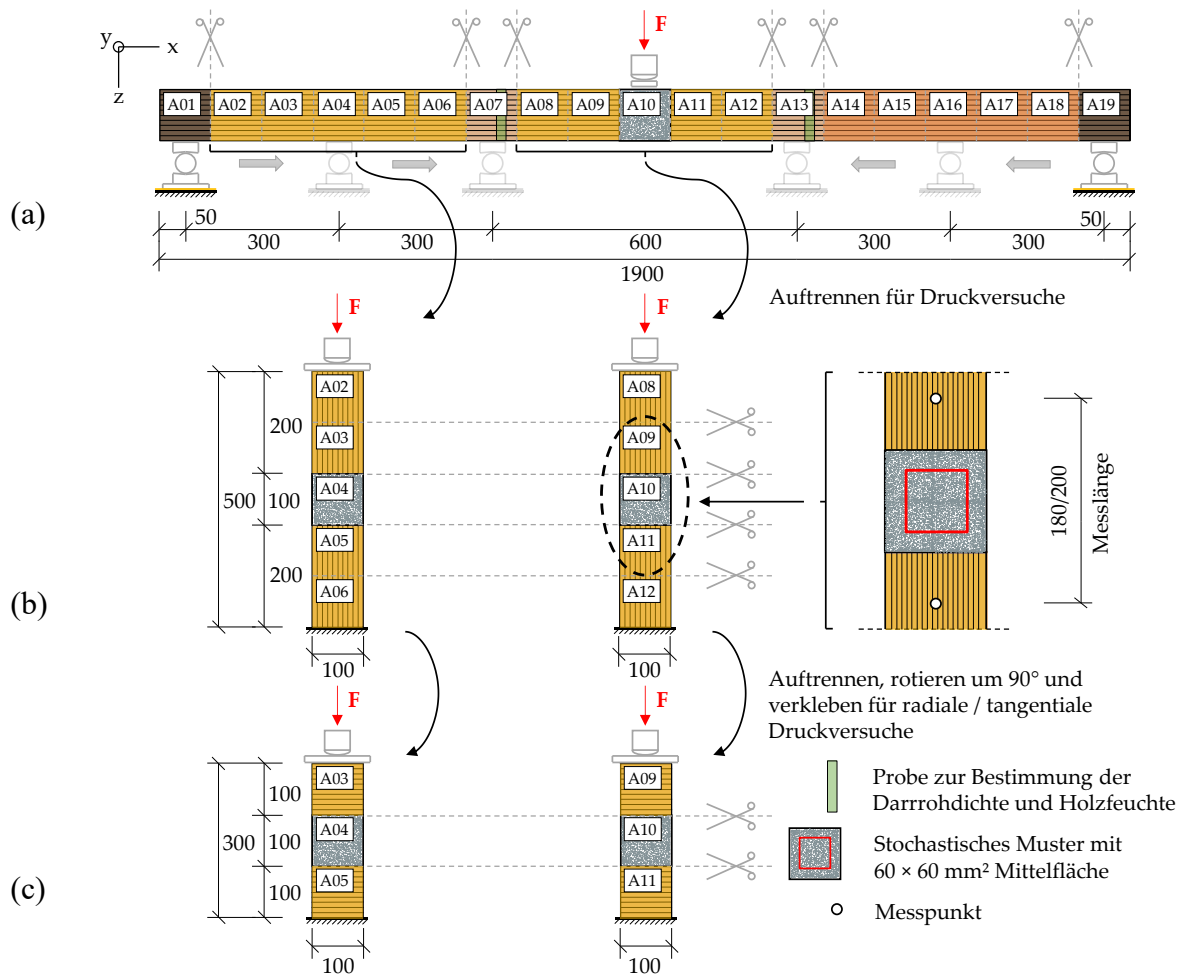


Abb. 1: Versuchsaufbau und Unterteilung der Versuchskörper: (a) Biegeversuche radial / tangential; (b) Druckversuche longitudinal; (c) Druckversuche radial / tangential

Anschließend wurden aus den 6 Prüfkörpern 12 Versuchskörper für Druckversuche parallel zur Faser mit Abmessung $h \times b \times l = 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ herausgearbeitet und geprüft (Abb. 1 (b)). Im Anschluss wurden die 12 Versuchskörper in je 100 mm lange Würfel aufgetrennt und die drei mittleren Würfel entsprechend der gewünschten Belastungsrichtung radial/tangential gedreht, miteinander verleimt und geprüft (Abb. 1 (c)). Durch diese Vorgehensweise war es möglich, alle Materialeigenschaften am selben Material zu bestimmen.

Im Anschluss an die Druckversuche wurden die Darrrohichte und Holzfeuchte an je zwei 2 cm dicken Scheiben, die den 6 Prüfkörpern der Biegeversuche in den Abschnitten A07 und A13 entnommen wurden, mit dem Darrverfahren nach DIN EN 13183-1 [8] ermittelt.

Die **Messeinrichtung** und **Versuchsdurchführung** erfolgten angelehnt an DIN EN 408 [6]. Die Belastung wurde in mindestens zwei Belastungszyklen aufgebracht [10]. Die aufgebrachte Maximallast entspricht 40 % der geschätzten mittleren Biege- bzw. Drucktragfähigkeit.

Es wurden ausschließlich die zwei optischen Messsysteme ARAMIS Adjustable 4M und 12M der Firma GOM GmbH verwendet, die mittels digitaler Bildkorrelation präzise die Lage definierter Punkte im Raum in festgelegten Zeitschritten ermitteln können. So konnten bei den Biegeversuchen beide Trägerseiten und bei den Druckversuchen alle 4 Trägerseiten gleichzeitig gemessen und die Messdaten durch die Kopplung über einen Referenzkörper zusammengeführt werden. In Versuchskörpermitte wurde dafür ein stochastisches Muster aufgesprüht (Abb. 1). Ergänzt wurde dieses durch an bestimmten Stellen geklebte Messpunkte (Abb. 1), die die Wegaufnehmer zur Ermittlung des Druck - E-Moduls nach DIN EN 408 [6] ersetzen. Abweichend zu DIN EN 408 [6] wurde bei Druckbelastung in Faserrichtung eine Messlänge von 200 mm (statt 400 mm) zur Ermittlung des E-Moduls gewählt (Abb. 1 (b)), da sich in vorangehenden FE-Untersuchungen auch bei dieser Messlänge ein annähernd konstanter Spannungsverlauf über den Querschnitt eingestellt hat. Dies wird durch die Versuchsergebnisse bestätigt [19].

2.3 Versuchsauswertung und Ergebnisse

Für die **Versuchsauswertung** sind in Abb. 2 die Last-Verformungs-Kurven der Biegeversuche bei flachkant/radial Belastung für die drei untersuchten Spannweiten l_s dargestellt. Anhand dieser kann ein effektiver Biege - E-Modul $E_{L,m,R/T,eff}$ ermittelt werden, der Einflüsse aus Schub und Biegung beinhaltet (Abb. 3). Die Biege - E-Moduln $E_{L,m,R/T}$ und die Schubmoduln $G_{LR/LT}$ werden nach Albers [1] anhand $l_s = 1800$ und 600 mm mit Gl. (1) ermittelt (Biegeverformung w bei 3-Punkt-Biegebelastung nach Timošenko [22]; $A, F, I, l_s = 1800$ bzw. 600 mm und w eingesetzt und Gleichungssystem nach $E_{L,m,R/T}$ und $G_{LR/LT}$ aufgelöst).

$$w = \frac{F \cdot l_s^3}{48 \cdot E_{L,m,R/T,eff} I} = \frac{F \cdot l_s^3}{48 \cdot E_{L,m,R/T} I} + \frac{3 \cdot F \cdot l_s}{10 \cdot G_{LR/LT} A} \quad (1)$$

mit	F	Einzellast in Feldmitte in [N]
	l_s	Spannweite [mm]
	I	Flächenträgheitsmoment [mm ⁴]
	A	Querschnittsfläche [mm ²]

Indizes: L = longitudinal, R = radial, T = tangential, m = Biegung, 3. Index bei E-Modul $E_{L,m,R/T}$ gibt Belastungsrichtung an, eff = effektiv.

In Abb. 3 sind die anhand der Last-Verformungs-Kurven ermittelten effektiven Biege - E-Moduln $E_{L,m,R,eff}$, die Regressionsgleichungen und die ermittelten Biege - E-Moduln $E_{L,m,R}$ in Abhängigkeit der Spannweite l_s für den 1. und 2. Belastungszyklus für den Versuchskörper V2 bei radialer Belastung dargestellt.

Die Querdehnzahlen $\mu_{LR}, \mu_{RL}, \mu_{LT}$ und μ_{TL} werden anhand des Mittelwertes der Oberflächendehnungen in einem $60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ großen Bereich (Abb. 1 (b)) ermittelt. μ_{RT} und μ_{TR}

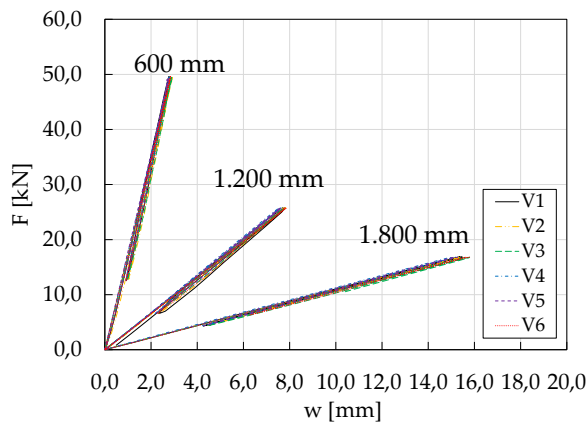


Abb. 2: Last-Verformungs-Kurven der flachkant/radialen Biegeversuche mit Spannweiten $l_s = 1.800 / 1.200 / 600$ mm

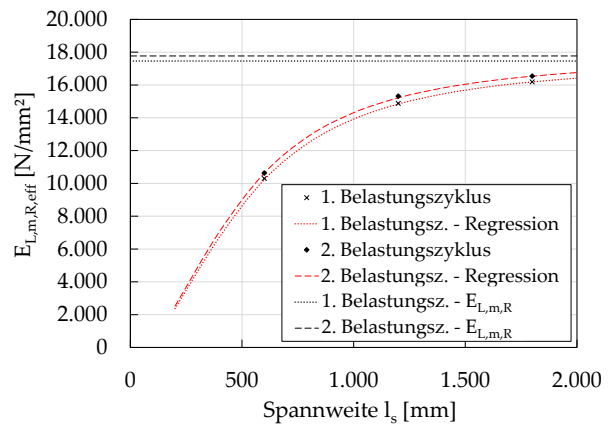


Abb. 3: Auswertung des flachkant/radialen Biegeversuchs BR_V2; Regressionskurven des effektiven E-Moduls $E_{L,m,R,eff}$ und E-Moduls $E_{L,m,R}$ für beide Lastzyklen

werden anhand des Abstands der gegenüberliegenden Versuchskörperseiten ermittelt [18].

Die **Versuchsergebnisse** in Form von Mittelwerten und Variationskoeffizienten (COV) der Materialkennwerte für beide Belastungszyklen sind in Tab. 1 aufgelistet. Der Elastizitätsmodul längs zur Faser unterscheidet sich je nach Belastungsart (Biege- oder Druckversuch). Die Biege - E-Moduln $E_{L,m,R/T}$ übersteigen den E-Modul aus Druckversuchen E_L um 1,8 % bis 2,3 %. Nach Egner [11] gilt für Holz meist: $E_{Zug} > E_{Biegung} > E_{Druck}$, was durch die Versuchsergebnisse bestätigt wird. Die Streuung der experimentellen Ergebnisse der Elastizitäts- und der Schubmoduln fällt mit $COV \leq 7\%$ (6 Biege- bzw. 12 Druckversuche) gering aus. Die Versuchskörper entstammen einer Produktionscharge.

Die Annahme einer asymmetrischen Steifigkeitsmatrix wie für Nadelholz nach Neuhaus [20] kann durch die Versuchsergebnisse für Buchen-FSH bestätigt werden, da unter Berücksichtigung der Streuungen $\mu_{LT} \neq \mu_{TL}$, $\mu_{LR} \neq \mu_{RL}$ und $\mu_{RT} \neq \mu_{TR}$ gilt (Tab. 1).

Die E- und Schubmoduln des 2. Belastungszyklus sind um bis zu 14 Prozent größer als die des 1. Zyklus. Weitere Lastzyklen in einem Tastversuch bringen keine nennenswerten Änderungen mehr. Der Schubmodul G_{RT} kann anhand der durchgeführten Versuche nicht bestimmt werden und wird zu 50 N/mm^2 angenommen.

3. Numerische Vergleichsrechnungen

3.1 Allgemeines

Es wurden FE-Modelle zur Nachrechnung der Biege- und Druckversuche mit den ermittelten Materialkennwerten als Eingangsparameter mit Abaqus CAE 2018 erstellt, verifiziert und anhand der Versuchsergebnisse validiert. Es werden hier nur die Modelle der Biegeversuche diskutiert. Das allgemein gültige Koordinatensystem ist in Abb. 1 (a) gegeben.

3.2 Modellbildung

Die **Geometrie** wurde entsprechend den Messungen mit einem digitalen Messschieber und Maßband vor Versuchsdurchführung bestimmt. Als **Randbedingungen** wurden alle Knoten der Auflagerflächen in x-, y-, z-Richtung auf einen Referenzpunkt RP1 gekoppelt, der wiederum biegesteif mit einem im Drehpunkt der Auflager platzierten Referenzpunkt RP2 gekoppelt ist. Dem Referenzpunkt RP2 wurden die Eigenschaften eines idealen Gabelagers zugewiesen. Die starre Lasteinleitungsplatte wurde mittels einer Kopplung der Knoten der Lasteinleitungs-

Tab. 1: Mittelwerte der ermittelten Materialkennwerte aus Biege- und Druckversuchen an Brettschichtholz aus Buchen-Furnierschichtholz GL75 nach ETA-14/0354 [17]

Matereialeigenschaft	Wert (COV)	
Holzfeuchte	5,54 % (1,94 %)	
(Darr-) Rohdichte		
ρ	803 kg/m ³ (2,10 %)	
ρ_0	780 kg/m ³ (2,29 %)	
	1. Lastzyklus (COV)	2. Lastzyklus (COV)
Elastizitätsmoduln		
E_L	17.055 N/mm ² (3,76 %)	17.259 N/mm ² (3,55 %)
$E_{L,m,R}$	17.436 N/mm ² (1,68 %)	17.667 N/mm ² (1,87 %)
$E_{L,m,T}$	17.491 N/mm ² (1,75 %)	17.576 N/mm ² (1,12%)
E_R	740 N/mm ² (4,88 %)	840 N/mm ² (4,32 %)
E_T	862 N/mm ² (7,09 %)	966 N/mm ² (5,47 %)
Schubmoduln		
G_{LR}	817 N/mm ² (1,68 %)	909 N/mm ² (1,87 %)
G_{LT}	883 N/mm ² (4,59 %)	1.006 N/mm ² (6,53 %)
Querdehnzahlen		
μ_{LR}	0,3200 (15,66 %)	0,3127 (23,65 %)
μ_{LT}	0,5004 (11,77 %)	0,5167 (13,48 %)
μ_{RT}	0,1992 (13,06 %)	0,1978 (15,08 %)
μ_{RL}	0,0143 (14,34 %)	0,0145 (17,07 %)
μ_{TR}	0,2428 (11,94 %)	0,2506 (13,62 %)
μ_{TL}	0,0246 (14,33 %)	0,0270 (11,23 %)

fläche auf den Referenzpunkt RP3 in z-Richtung modelliert. RP3 wurde durch eine Einzellast belastet. Das Eigengewicht wurde vernachlässigt, da es kleiner als 0,5 % der Maximallast ist. Es wurde ein ideal elastisches **Materialverhalten** angenommen, wobei die anisotrope Materialsteifigkeitsmatrix anhand der Versuchsergebnisse je Versuchskörper bestimmt wurde. So kann z.B. anhand der Mittelwerte der Materialkennwerte nach Tab. 1 die Materialsteifigkeitsmatrix **D** bestimmt werden (Gl. (2)).

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 17.669 & 369 & 570 & 0 & 0 & 0 \\ 401 & 892 & 235 & 0 & 0 & 0 \\ 603 & 214 & 1.036 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 50 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.006 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 909 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Die **Vernetzung** erfolgte mit 20-knotigen reduziert integrierten Volumenelementen (C3D20R) und 76 Elementen in der Länge, 4 in der Breite und 20 in der Höhe. Als Berechnungsverfahren wurde *Static, general* mit dem *direct sparse solver, full newton* und einem Lastschritt entsprechend 100 % der Maximallast gewählt (rein elastisches Verhalten).

Die **Verifizierung und Validierung** des numerischen Modells wurde entsprechend [21] durchgeführt. Die numerisch und experimentell ermittelten effektiven Biege - E-Moduln $E_{L,m,R/T,eff}$ der 36 Biegeversuche weichen um maximal 2 % voneinander ab. Der Modellfaktor zur Berücksichtigung numerischer Modellunsicherheiten ergibt sich zu $\gamma_{FE} = 1,01$. Das FE-Modell ist somit für Untersuchungen nicht imperfektionsempfindlicher Holzträger unter Biegebeanspruchung im Bereich elastischer Verformungen sehr gut geeignet.

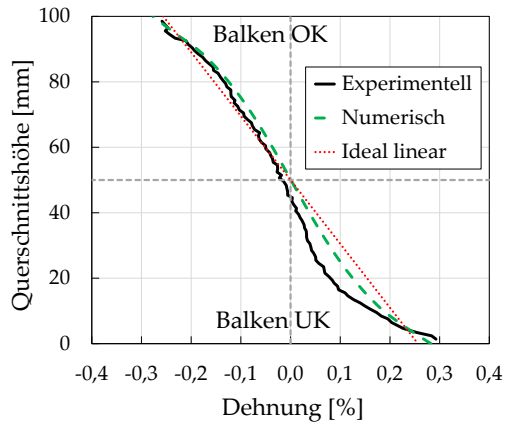


Abb. 4: Experimentelle und numerische Längsdehnungen ε_x eines Biegeträgers mit $l_s = 600$ mm in Feldmitte über die Höhe

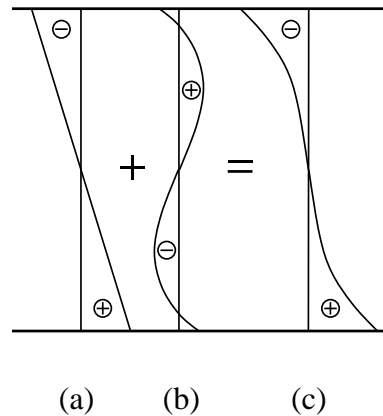


Abb. 5: Längsspannungen σ_x eines Biegeträgers in Feldmitte über die Querschnittshöhe nach [14]

3.3 Einfluss der Querschnittsverwölbung infolge Schub auf Längsspannungen σ_x

Bei der Auswertung der experimentellen und numerischen Ergebnisse der Biegeversuche mit Spannweite $l_s = 600$ mm fällt in Abb. 4 auf, dass die Annahme des Ebenbleibens des Querschnitts in Feldmitte nicht erfüllt ist. Experimentell ermittelte Längsdehnung an der Trägerunterkante sind ca. 14 %, numerisch ca. 10 % größer als die Längsdehnung bei ideal-linearem Verlauf. Infolge der Schubbeanspruchung tritt eine Verwölbung des Querschnitts auf. Die Behinderung der Querschnittsverwölbung infolge primärer Biegespannungen (Abb. 5 (a)) führt zu einer zusätzlichen Spannungskomponente in Längsrichtung (Sekundärspannungen, Abb. 5 (b)), die sich mit den Primärspannungen überlagert (Abb. 5 (c)). Dadurch kommt es an der Balkenober- und unterkante zu einer Erhöhung der Längsspannungen [14].

Zur Untersuchung des Einflusses der Querschnittsverwölbung wurde eine kleine numerische Parameterstudie durchgeführt, in der Biegeträger mit $h = 600$ mm mit variierendem Material, Spannweite und Belastungsart bei elastischem Materialverhalten mit charakteristischen Materialkennwerten nach [8], [13] untersucht wurden. Ausgangssystem ist ein Referenzbiegeträger mit $l_s = 10.800$ mm (DIN EN 14080 [8]), bei dem der numerisch ermittelte Spannungsverlauf ideal linear ist. In Tab. 2 sind die numerisch ermittelten Steigerungsfaktoren der Längsrandspannung σ_x und die analytische Lösung nach Hofmann [14] für isotrope Materialien angegeben. Es zeigt sich, dass das große Verhältnis von E / G bei Holz zu deutlichen Unterschieden

Tab. 2: Steigerungsfaktoren der Längsrandspannung σ_x infolge Querschnittsverwölbung in Abhängigkeit der Spannweite l_s , des Materials und der Belastung bei $h = 600$ mm nach FE-Berechnungen im Vergleich mit analytischen Lösungen für isotrope Materialien [14]

Material	E / G	Belastung	Spannweite l_s [mm]						
			1.200	1.800	2.400	3.000	3.600	4.800	10.800
GL 24c ¹	16,9	4-P.-B. ³	2,81	1,59	1,26	1,14	1,10	1,04	1,00
GL 32h ¹	21,9	4-P.-B. ³	3,22	1,76	1,34	1,19	1,12	1,05	1,00
GL75 ¹	20,1	4-P.-B. ³	2,93	1,67	1,30	1,17	1,11	1,04	1,00
GL 24c ¹	16,9	konstant ⁴	3,73	1,81	1,28	1,11	1,05	1,01	1,00
GL 32h ¹	21,9	konstant ⁴	4,29	2,05	1,39	1,17	1,08	1,02	1,00
Stahl ¹	2,6	konstant ⁴	1,14	1,07	1,06	1,05	1,05	1,03	1,00
Hofmann [14] ²	2,0	konstant ⁴	1,07	1,03	1,02	1,01	1,01	1,00	1,00

¹ FE-Berechnung, ² Analytische Berechnung, ³ 4-Punkt-Biegung nach DIN EN 408 [6]; ⁴ Gleichstreckenlast

zum Verhalten von Stahl und isotropen Materialien [14] führt. Für Holz erhält man bei $l_s / h = 6$ einen Steigerungsfaktor von ca. 1,10 (vergleichbar mit experimentell ermittelten 14 % = 1,14).

Aufbauend auf den vorgestellten numerischen Berechnungsergebnissen wird bei der Berechnung der Längsrandspannung σ_x von biegebelasteten Holzbauteilen daher empfohlen:

für	$l_s/h \geq 6$	Bernoulli-Balkentheorie	
		Bernoulli-Balkentheorie mit Laststeigerungsfaktor k_{woelb}	
	$6 > l_s/h \geq 4$	nach Gl. (4), oder Berechnung mit anspruchsvolleren Verfahren unter Berücksichtigung der Scheibentheorie	(3)
	$l_s/h < 4$	Berechnung mit anspruchsvolleren Verfahren unter Berücksichtigung der Scheibentheorie	

Für $6 > l_s / h \geq 4$ kann der Steigerungsfaktor k_{woelb} für Holz vereinfacht berechnet werden zu:

$$k_{woelb} = 1,91 - 0,13 \frac{l_s}{h} \quad (4)$$

4. Zusammenfassung und Ausblick

Es werden experimentelle Untersuchungen und numerische Vergleichsberechnungen zum elastischen Materialverhalten von Buchen-FSH GL75 einschließlich der Querdehnzahlen und Schubmoduln vorgestellt. Die ermittelten Materialkennwerte sind in Tab. 1 angegeben. Die Annahme einer asymmetrischen Materialsteifigkeitsmatrix für Holz (Gl. (2)) bestätigt sich [20].

Bei Auswertung der experimentellen Untersuchungen der Biegeträger mit $l_s / h = 6$ zeigt sich, dass die Querschnittsverwölbung zu einer Erhöhung der Längsrandspannungen σ_x in Feldmitte von ca. 10 % führt und die Annahme des Ebenbleibens des Querschnitts nicht mehr erfüllt ist. Anhand einer numerischen Parameterstudie wurden die Steigerungsfaktoren k_{woelb} der Längsrandspannungen ermittelt und Empfehlungen zur Berücksichtigung des Einflusses erarbeitet (Gl. (3)). Weitere experimentelle Untersuchungen zur Validierung sind wünschenswert.

5. Danksagung

Das Forschungsvorhaben wird durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen der Exzellenzstrategie des Bundes und der Länder – EXC 2120/1 – 390831618 gefördert. Außerdem danken wir Pollmeier Massivholz GmbH & Co. KG für die Bereitstellung der Versuchskörper, der MPA Stuttgart Abteilung Holzkonstruktionen für die Bearbeitung der Versuchskörper und der MPA Stuttgart Abteilung Baukonstruktionen und Bauteilprüfung für die Versuchsdurchführung und Beratung.

Literatur

- [1] Albers, K.: *Querdehnungs- und Gleitzahlen sowie Schub- und Scherfestigkeiten von Holzwerkstoffen*. Diss., Universität Hamburg, 1970.
- [2] Blaß, H., Windeck, L.: *Prüfbericht Nr. 176121 - Versuche an Brettschichtholz aus Buchen- und Nadel-Furnierschichtholz zur Ermittlung des Querdruckbeiwertes $k_{c,90}$* . Holzbau und Baukonstruktionen, Karlsruher Institut für Technologie, 2017.
- [3] Dill-Langer, G.; Aicher, S.: *Glulam composed of glued laminated veneer lumber made of beech wood – superior performance in compression loading*. RILEM book series Vol. 9, Editor: Aicher, S.; Reinhardt H.-W.; Garrecht, H.; Herausgeber: Springer, 2013.
- [4] Dill-Langer, G.; Aicher, S.: *BauBuche im XXL-Format – Versuche und Europäische technische Zulassung*. MPA, Universität Stuttgart, 2015.

- [5] Dill-Langer, G.; Aicher, S.: *Tragfähigkeit und Baupotenziale von Buchen-Furnierschichtholz*. In: Internationales Holzbau-Forum, Garmisch-Partenkirchen, 2014.
- [6] DIN EN 408: *Holzbauwerke – Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz – Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung, 10-2012.
- [7] DIN EN 1995-1-1: *Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Hochbauten - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung, 12-2010.
- [8] DIN EN 13183-1: *Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz – Teil 1: Bestimmung durch Darrverfahren*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung, 07-2002.
- [9] DIN EN 14080: *Holzbauwerke – Brettschichtholz und Balkenschichtholz – Anforderungen*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung, 09-2013.
- [10] DIN EN 26891: *Holzbauwerke – Verbindungen mit mechanischen Verbindungsmitteln – Allgemeine Grundsätze für die Ermittlung der Tragfähigkeit und des Verformungsverhaltens*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung, 07-1991.
- [11] Egner, K.: *Bestimmung der Elastizität der Hölzer*. In: Handbuch der Werkstoffprüfung, 3. Bd. 2. Aufl., Herausgeber: Springer, Berlin, 1957.
- [12] Ehrhart, T.; Steiger, R.; Frangi, A.: *Influence of the moisture content on the compressive strength and modulus of elasticity parallel to the grain of engineered hardwood products (EHP)*. In: International Network on Timber Engineering, INTER, 54-12-2, online, 2021.
- [13] ETA-14/0354: *Träger BauBuche GL75*. Österreichisches Institut für Bautechnik (OIB), Wien, 2018.
- [14] Hofmann, T.J.: *Beitrag zur verfeinerten Balkentheorie*. Diss., Universität Stuttgart, 1992.
- [15] Holzbau Deutschland – Bund Deutscher Zimmermeister (Hg.): *Lagebericht Zimmerer / Holzbau 2021*. Berlin, 2021.
- [16] Hütter, V.: *Bestimmung der Rollschubfestigkeiten und -steifigkeiten von Furnierschicht-hölzern aus Laubholz*. Bachelorarbeit, Holzbau und Baukonstruktionen, Karlsruher Institut für Technologie, 2017.
- [17] Kuck, E.: *Untersuchungen von Querschnittsschwächungen durch Verbindungsmittel in druckbeanspruchten Bauteilen aus Buchen-Furnierschichtholz*. Bachelorarbeit, Holzbau und Baukonstruktionen, Karlsruher Institut für Technologie, 2015.
- [18] Kuhlmann, U., Töpler, J., Gauß, J., Buchholz, L.: *Integrated approach of testing and numerical verifications (IATN)*. Forschungsprojekt RP 7, DFG Exzellenzcluster “Integrative Computational Design and Construction for Architecture” (IntCDC), EXC 2120/1 – 390831618, Institut für Konstruktion und Entwurf, Universität Stuttgart, laufend.
- [19] Lukas, J.: *Experimentelle und numerische Untersuchung des elastischen Materialverhaltens von Buche LVL*. Bachelorarbeit, Institut für Konstruktion und Entwurf, Universität Stuttgart, 2021.
- [20] Neuhaus, F.-H.: *Elastizitätszahlen von Fichtenholz in Abhängigkeit von der Holzfeuchtigkeit*. Diss., Ruhr-Universität Bochum, 1981.
- [21] prEN 1993-1-14: *Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-14; Design assisted by finite element analysis*. CEN/TC 250/SC 3/WG 22 N 55, 01-2022.
- [22] Timošenko, S. P.; Gere, J. M.: *Mechanics of materials*. Herausgeber: Van Nostrand Reinhold, New York, 1972.
- [23] Z-9.1-837: *Brettschichtholz aus Buchenfurnierschichtholz*. Deutsches Institut für Bautechnik, (DIBt), Berlin, 2013.