

Über den Einfluss der Zapfenverbindungsgeometrie auf das Tragverhalten vorgefertigter Bauelemente aus Holzwerkstoffplatten

Julia Böhm-Ubr

Hochschule Campus Wien, julia.ubr@alumni.hcw.ac.at

Abstract. Um den Einfluss der Zapfenverbindungsgeometrie auf das Tragverhalten vorgefertigter Bauelemente aus Furniersperrholzplatten zu untersuchen und eine Optimierungsmöglichkeit bei der Verbindungsanordnung zu finden, wurden Abscherversuche an Einzelzapfenmodellen sowie Biegeversuche an Trägermodellen durchgeführt. Auf Basis der Biegeversuche und der mechanischen Parameter der Zapfenverbindungen, ermittelt in den Abscherversuchen, wurde ein Berechnungsmodell erstellt und ein Berechnungsvorschlag zur Optimierung der Zapfenverbindungsgeometrie bzw. deren Anordnung gegeben. Die Ergebnisse aus den durchgeführten Versuchen und dem Berechnungsmodell zeigten, dass anhand der Zapfenverbindungsgeometrie auf die Nachgiebigkeit der Verbindung und damit auf die Biegesteifigkeit des Biegeträgers geschlossen werden kann.

Keywords: nachgiebiger Verbund, Zapfenverbindung, Holzwerkstoffplatten

Einleitung

Die Ressource Holz erlebt in der Bauindustrie ein neues Hoch. Durch den vermehrten Einsatz von Holz im Hochbau gilt es, Holz gezielt und sinnvoll einzusetzen. Mittels Zapfenverbindungen können Hohlkastenbauelemente (Abbildung 1) aus Furniersperrholzplatten zusammengesteckt und für konstruktive Zwecke eingesetzt werden. Technisch relevante Querschnittsbereiche werden durch erhöhten Materialeinsatz gezielt aufgebaut, während Materialeinsparungen an gering beanspruchten Stellen möglich sind. Anstelle von Klebeverbindungen oder mechanischen Verbindungsmitteln können die Querschnittsteile der Hohlkastenelemente mittels Zapfenverbin-

dungen zusammengesetzt werden. Zu Zapfenverbindungen wurden bereits diverse Forschungen durchgeführt (Gamerro, 2018, 2020). Allerdings bestand noch Potenzial darin, den Zusammenhang zwischen der Zapfenverbindungsgeometrie und dem Tragverhalten des Bauelementes genauer zu untersuchen und den Zusammenhang mittels vereinfachter Berechnungsmethode abzubilden. Hinsichtlich des Tragverhaltens mittels Zapfenverbindungen zusammengesetzter Hohlkastenbauelemente stellte sich die Frage des Einflusses der Zapfenverbindungsgeometrie. Zur Untersuchung dieser Fragestellung wurde das Ziel verfolgt, ein Berechnungsmodell zur Abbildung des Einflusses der Geometrie der Zapfenverbindungen vorgefertigter Bauelemente aus Furniersperrholzplatten auf ihr Tragverhalten zu entwickeln. Dadurch sollten Optimierungsmöglichkeiten bei der Anordnung der Verbindungen bzw. deren Geometrie gefunden werden.



Abbildung 1: Hohlkastenbauelemente (eigene Darstellung)

Versuchsdurchführung

Zur Ermittlung der Nachgiebigkeit der Zapfenverbindungen wurden Abscherversuche an Einzelzapfenmodellen (Abbildung 2) mit unterschiedlichen Zapfengeometrien durchgeführt. Um den Einfluss auf die Nachgiebigkeit zu untersuchen, wurden einzelne Versuchskörper mit doppelter Steg- oder Gurtplattenlage ausgestattet. Weiters wurden zur Ermittlung des Verformungsverhaltens Drei-Punkt-Biegeversuche an Trägermodellen (Abbildung 2) mit unterschiedlichen Zapfenverbindungen durchgeführt. Um den Einfluss auf die Verformung zu untersuchen, wurden einige Versuchskörper mit verzahnten Stoßbereichen der Stegplatten sowie teilweise gestoßenen Untergurtlagen versehen.

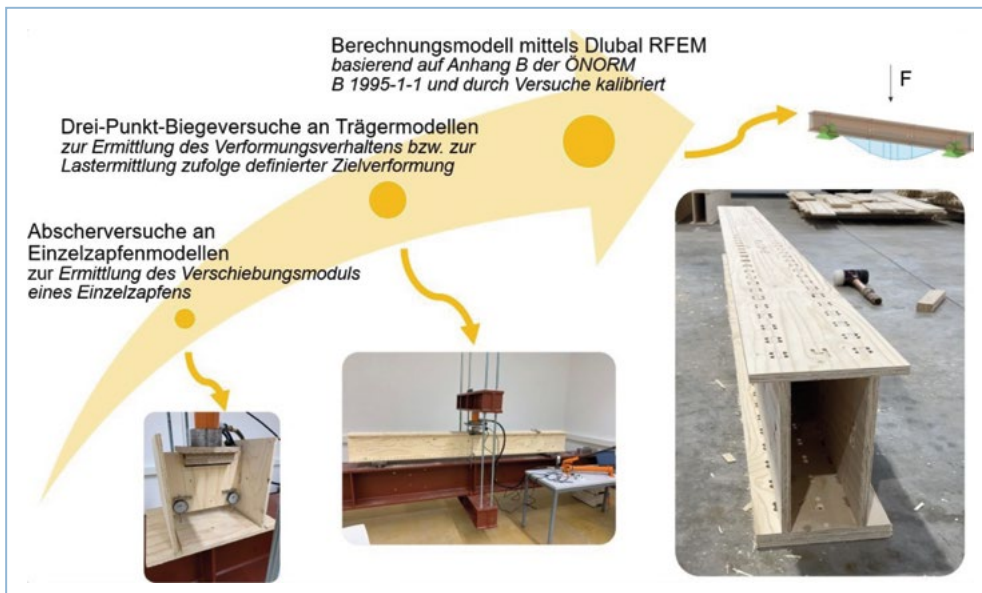


Abbildung 2: Abscher- und Drei-Punkt-Biegeversuch sowie Berechnungsmodell des zusammengesetzten Hohlkastenquerschnittes (eigene Darstellung)

Ergebnisse und Diskussion

Anhand der Last-Verformungsergebnisse der Abscherversuche (Abbildung 3) konnte je Zapfenverbindungsgeometrie ein mittlerer Verschiebungsmodul $k_{s,m}$ (Abbildung 4) ermittelt werden.

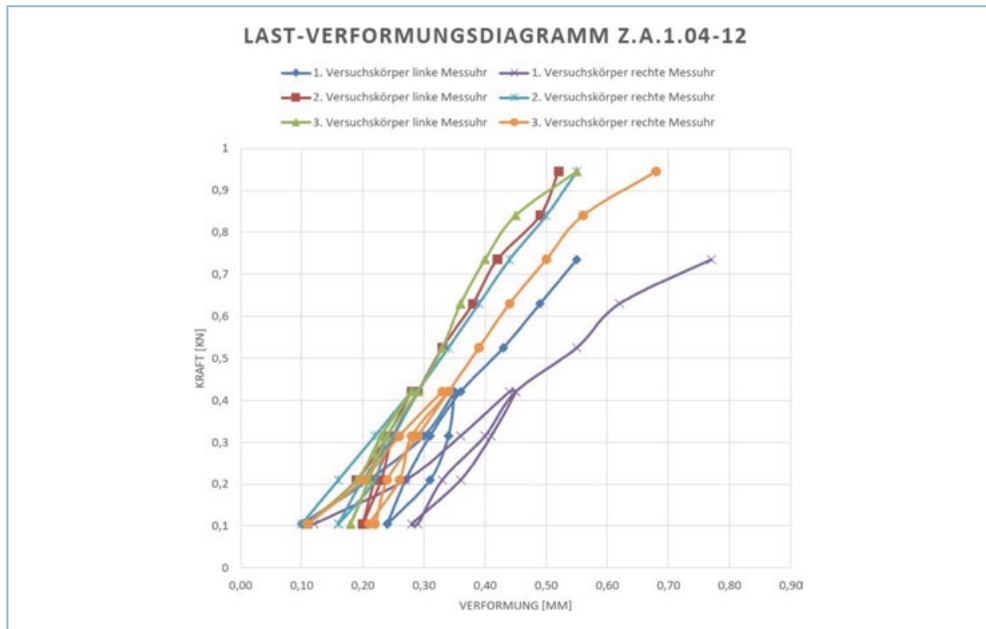


Abbildung 3: Last-Verformungsergebnisse Prüfsreihe Z.A.1.04-12 (eigene Darstellung; Ubr, 2024)

	$k_{s,m}$ [kN/mm]
Z.A.1.04-18	2,34
Z.A.1.04-12	1,52
Z.A.3.04-12	1,29
Z.A.2.04-12	2,51
Z.A.4.04-18	3,17
Z.B.1.04-12	0,70
Z.C.1.04-12	2,94

Abbildung 4: Mittlerer Verschiebungsmodul $k_{s,m}$ je Prüfsreihe (eigene Darstellung; Ubr, 2024)

Durch Analyse der Ergebnisse mittels Regressionskurven konnte der in (1) dargestellte Zusammenhang zwischen Zapfenverbindungsgeometrie und mittlerem Verschiebungsmodul anhand der Zapfenscherfläche (Zapfenlänge $l_Z \times$ Zapfenbreite t_Z) und einem Verhältniswert aus Zapfenbreite t_Z und Nutdicke t_N hergestellt werden (Abbildung 5). Dadurch kann anhand der Verbindungsgeometrie auf den Verschiebungsmodul geschlossen werden. Anhand der Last-Verformungsergebnisse der Biegeversuche zeigte sich ein unterschiedlich steifes Trägerverhalten abhängig von der Zapfenverbindungsgeometrie sowie dem Vorhandensein des Stoßbereiches.

$$k_{s,m} = 1,0577 \times \ln \left(l_z \times t_z \times \frac{t_z}{t_N} \right) - 4,3983 \quad (1)$$

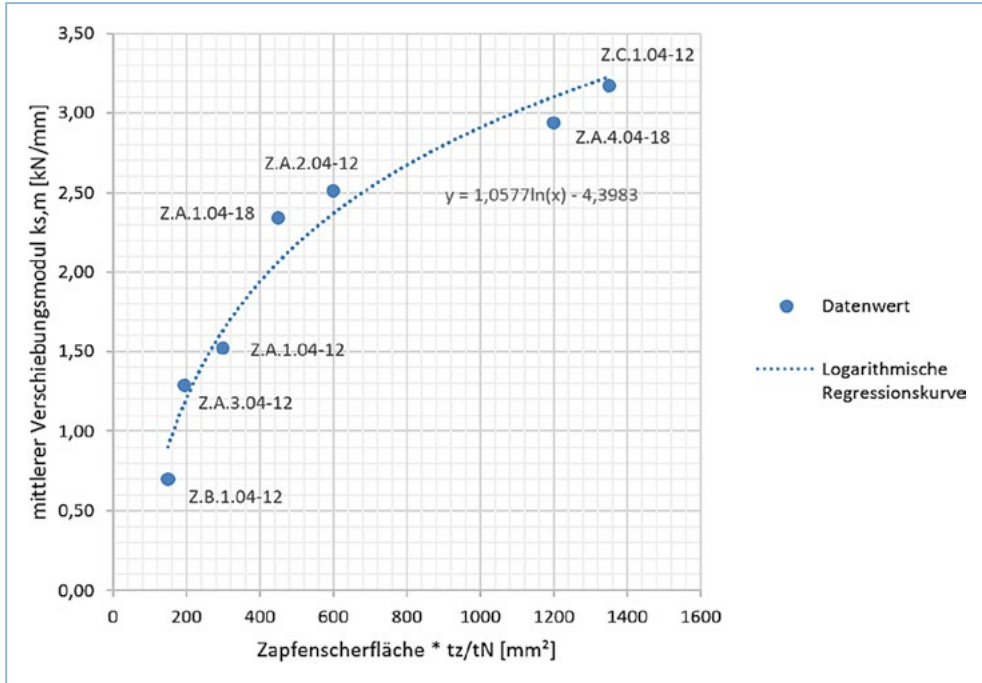


Abbildung 5: Zusammenhang zwischen Zapfenverbindungsgeometrie und mittlerem Verschiebungsmodul $k_{s,m}$ (eigene Darstellung; Ubr, 2024)

Berechnungsmodell

Mittels Dlubal RFEM wurde ein Berechnungsmodell auf Basis der ÖNORM B 1995-1-1 Anhang B für Träger mit sowie ohne Stoßbereich erstellt. Die Trägermodelle aus den Biegeversuchen wurden als nachgiebig verbundene Einfeldträger mit zusammengesetztem Hohlkastenquerschnitt und isotropem, linear elastischem Materialmodell nachmodelliert. Die Steifigkeit der Verbindung zwischen Ober- und Untergurt des Querschnittes wurde über den Beiwert γ_i gemäß ÖNORM B 1995-1-1 Anhang B abgemindert. Dabei wurde die Zapfenverbindung mit einem mechanischen Verbindungsmittel gleichgestellt. Der Stoßbereich wurde durch ein Stabendgelenk mit einstellbarer Drehfederkonstante modelliert. Die in den Biegeversuchen angesetzten Einzellasten wurden im Berechnungsmodell auf die Einfeldträger angesetzt und die Verformungen ermittelt. Vergleichend zu den linearen Berechnungen mittels RFEM wurden Handberechnungen gemäß ÖNORM B 1995-1-1 Anhang B durchgeführt.

Ergebnisse und Diskussion – Berechnungsmodell

Die mittels RFEM ermittelten Verformungen sowie jene der vergleichenden Handrechnung zeigten gute Übereinstimmung mit den Verformungen aus den Biegeversuchen. Die Verformungen des Berechnungsmodells ohne Stoßbereich mittels RFEM zeigten jedoch tendenziell größere Verformungen im Vergleich zu jenen der Biegeversuche. Hingegen ergaben die Verformungen des Berechnungsmodells mit Stoßbereich mittels RFEM geringere bzw. geringfügig höhere Werte im Vergleich zu jenen der Biegeversuche.

Ebenfalls gute Übereinstimmung zeigten die Verformungen der vergleichenden Handberechnungen mit jenen mittels RFEM ermittelten für das Berechnungsmodell ohne Stoßbereich. Bei Betrachtung des Berechnungsmodells mit Stoßbereich konnten Abweichungen von 10–20 % ausgemacht werden.

Die tendenziell größeren Verformungen bei dem Berechnungsmodell ohne Stoßbereich im Vergleich zu jenen der Biegeversuche ließen auf eine höhere tatsächliche Biegesteifigkeit der Versuchskörper der Biegeversuche als jene wirksame Biegesteifigkeit, welche im Berechnungsmodell angewandt wurde, schließen. Hingegen ließ die grundsätzliche Tendenz der geringeren bzw. nur geringfügig höheren Verformungen des Berechnungsmodells mit Stoßbereich mittels RFEM im Vergleich zu jenen der Biegeversuche auf eine ähnlich hohe Biegesteifigkeit schließen.

Kalibrierung

Anhand ermittelter Abweichungen der im Berechnungsmodell angewandten wirksamen Biegesteifigkeiten zu den tatsächlich vorhandenen Biegesteifigkeiten aus den Biegeversuchen sowie anhand der Verformungsabweichungen wurde eine Kalibrierung des Berechnungsmodells durchgeführt. Die Kalibrierung des Berechnungsmodells ohne Stoßbereich erfolgte durch Kalibrierung des Abminderungsbeiwertes γ_i mit einem Faktor von 1,15. Der Abminderungsbeiwert γ_i hat maßgeblichen Einfluss auf die Verbundfugensteifigkeit des Querschnittes und damit auf die wirksame Biegesteifigkeit des Trägers, welche dadurch erhöht wird. Von einer Kalibrierung des Berechnungsmodells mit Stoßbereich wurde aufgrund der geringen Abweichungswerte abgesehen, da diese nicht notwendig erscheint.

Berechnungsvorschlag zur Zapfengeometrieoptimierung

Anhand eines Beispielträgers wurde eine Optimierungsmöglichkeit der Anordnung der Zapfenverbindung bzw. der Zapfengeometrie vorgestellt. Durch Iteration des kalibrierten Abminderungsbeiwertes $\gamma_{i, \text{kalibr.}}$ konnte ein erforderlicher Verschiebungs-

modul und damit eine erforderliche Zapfengeometrie bzw. Zapfenabstand zufolge einer abzutragenden Belastung ermittelt bzw. optimiert werden.

Fazit

Anhand der Ergebnisse des Berechnungsmodells sowie der durchgeführten Kalibrierung konnte der Zusammenhang zwischen dem Verschiebungsmodul, welcher aus der Zapfenverbindungsgeometrie resultierte, und der davon abhängigen Biegesteifigkeit des Trägers veranschaulicht werden. Durch unterschiedliche Zapfenverbindungsgeometrien konnten unterschiedliche Verbindungssteifigkeiten erzielt werden. Anhand der durchgeführten Versuche und der begleitend erstellten numerischen Analysen konnte gezeigt werden, dass die unterschiedlichen Verbindungssteifigkeiten maßgeblich das Verformungs- und damit das Tragverhalten beeinflussen.

Referenzen

- Gamerro, J., Bocquet, J., & Weinand, Y. (2020a). A calculation method for inter-connected timber elements using wood-wood connections. *Buildings*, 10(3), 61. <https://doi.org/10.3390/buildings10030061>
- Gamerro, J., Bocquet, J. F., & Weinand, Y. (2020b). Experimental investigations on the load-carrying capacity of digitally produced wood-wood connections. *Engineering Structures*, 213, 110576. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110576>
- Gamerro, J., Lemaître, I., & Weinand, Y. (2018). Mechanical characterization of timber structural elements using integral mechanical attachments. In *WCTE 2018: Proceedings*. Seoul. <https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/337055> (abgerufen am 01.12.2025)
- Pfleger, M.-P., Radl, E., Pejic, D., & Polzer, C. (2023). Increasing efficiency of timber structures using digital fabrication methods for demand-specific cross-section prefabrication. In F. G. Galizia, & M. Bortolini (ed.), *Lecture notes in mechanical engineering. Production processes and product evolution in the age of disruption: Proceedings of the 9th changeable, agile, reconfigurable and virtual production conference (CARV2023) and the 11th World Mass Customization & Personalization Conference (MCPC2023), Bologna, Italy, June 2023* (pp.652–660). Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-34821-1_71