

Entwicklung und Tragfähigkeitsbewertung einer CNC-gefertigten, Holz-Holz- Verbindung

Peter Harsányi, Carinthia University of Applied Sciences
Habernig Monika, Carinthia University of Applied Sciences
Richard Woschitz, Carinthia University of Applied Sciences

Abstract: Die Arbeit untersucht eine neu entwickelte, rückbaubare Holz-Holz-Verbindung, deren Geometrie speziell für CNC-Abbundanlagen mit Rundfräsern entworfen wurde. Ziel war eine Verbindung, die künftige kreislauffähige Holzkonstruktionen ermöglicht. Der Entwicklungsprozess zeigte deutliche Fertigungsgrenzen durch Frästiefen, Werkzeugradien und Toleranzen, wodurch mehrere Anpassungsschritte notwendig waren.

Zur Bewertung der Tragfähigkeit erfolgte ein experimenteller Vergleich mit symmetrischen Abscherversuchen an Balken-Stützen-Verbindungen, von klassischen Balkenschuhen, sowie dem industriellen Sherpa-Aluminiumverbinder S10. Die Metallverbinder erreichten die höchsten Traglasten, während die neue Lösung geringere Traglasten bei gleichzeitig reproduzierbarem Versagensverhalten aufzeigte. Insgesamt weist die Untersuchung auf ein technisches Potenzial hin, das durch geometrische Optimierung und weiterführende Versuche verbessert werden kann.

Keywords: Holz-Holz Verbindung, CNC-Abbund, demontierbare Tragwerke, konstruktiver Holzbau, Verbindungstechnik

1. EINLEITUNG

Der Bau- und Gebäudesektor zählt zu den ressourcen- und emissionsintensivsten Wirtschaftsbereichen weltweit und ist maßgeblich an den globalen Treibhausgasemissionen beteiligt. Vor dem Hintergrund internationaler Klimaziele und der angestrebten Klimaneutralität bis 2050 gewinnt die Transformation hin zu ressourceneffizienten und zirkulären Bauweisen zunehmend an Bedeutung (European Commission, 2019). Neben der Reduktion betrieblicher Emissionen rückt dabei insbesondere die Wahl geeigneter Baustoffe in den Fokus.

Holz gilt aufgrund seiner Fähigkeit zur Kohlenstoffspeicherung sowie seines vergleichsweise geringen primären Energieaufwands bei der Herstellung als zentraler Baustoff im Kontext nachhaltiger Bauweisen (Sathre & O'Connor, 2010). Darüber hinaus weist Holz günstige mechanische Eigenschaften in Bezug auf Zug-, Druck- und Biegebeanspruchung bei gleichzeitig geringem Eigengewicht auf, wodurch es sich für tragende Konstruktionen im Ingenieurholzbau eignet (Arriaga et al., 2023).

Trotz dieser Vorteile wird das Potenzial des Holzbaus für eine konsequente Kreislaufwirtschaft bislang nicht vollständig ausgeschöpft. Ein wesentlicher Grund hierfür liegt in der Verbindungstechnik. Im modernen konstruktiven Holzbau dominieren metallische

Verbindungssysteme wie Balkenschuhe, Winkelverbinder oder industrielle Stecksysteme. Diese gewährleisten hohe Tragfähigkeiten und normativ abgesicherte Bemessungsverfahren, führen jedoch zu materialhybriden Konstruktionen, die eine sortenreine Trennung und Wiederverwendung von Bauteilen am Ende des Lebenszyklus erschweren. Die Verbindungstechnik stellt damit einen zentralen Einflussfaktor für die Demontierbarkeit und Wiederverwendbarkeit von Holztragwerken dar. Im Kontext des „Design for Adaptability“ (DfA) und „Design for Disassembly“ (DfD) wird daher die Entwicklung reversibler und materialgerechter Verbindungssysteme zunehmend diskutiert (Ottenhaus et al., 2023). Aktuelle Übersichtsarbeiten zeigen, dass reversible Holzverbindungen eine Schlüsselrolle bei der Umsetzung zirkulärer Bauprinzipien spielen, da sie Montage, Demontage, Anpassung und Wiederverwendung einzelner Bauteile ermöglichen (Cristescu et al., 2020; Webster, 2012). Gleichzeitig weisen diese Studien darauf hin, dass ein Spannungsfeld zwischen mechanischer Leistungsfähigkeit, Fertigungstoleranzen und konstruktiver Demontierbarkeit besteht.

Parallel hierzu eröffnen digitale Fertigungstechnologien neue Möglichkeiten für die Entwicklung komplexer, präzise gefertigter Holz-Holz-Verbindungen. CNC-gestützte Abbundverfahren sowie robotische Fräsprozesse ermöglichen die Herstellung geometrisch anspruchsvoller Verbindungselemente mit reproduzierbarer Genauigkeit (Pantscharowitsch & Kromoser, 2025). Untersuchungen zur Bearbeitungspräzision zeigen, dass moderne CNC- und robotische Holzfräsprozesse ausreichend geringe geometrische Abweichungen erreichen können, um strukturell relevante Verbindungen wirtschaftlich herzustellen (Ayari et al., 2020). Fertigungstoleranzen, Werkzeugradialen und Frästiefen stellen maßgebliche Randbedingungen für die konstruktive Auslegung solcher Verbindungen dar. Trotz dieser technologischen Fortschritte existieren bislang nur wenige experimentelle Untersuchungen zur Tragfähigkeit vollständig holzbasierten, CNC-gefertigten Verbindungssysteme im direkten Vergleich mit etablierten metallischen Lösungen (Hansen et al., 2021). Insbesondere fehlt es an vergleichenden Prüfprogrammen, welche Tragfähigkeit, Steifigkeit und Versagensmechanismen unter standardisierten Belastungsbedingungen analysieren.

Die Entwicklung neuer Verbindungssysteme im Holzbau stellt nicht nur eine konstruktive Herausforderung dar, sondern ist zugleich ein Beispiel für technologische Innovation im Kontext nachhaltiger Bauweisen. Insbesondere im Zusammenspiel mit digitalen Fertigungstechnologien eröffnen sich neue Möglichkeiten für materialgerechte, rückbaubare Tragstrukturen. Damit adressiert die vorliegende Untersuchung zentrale Fragestellungen der Circular Economy und nachhaltiger Innovation im Bauwesen, indem sie digitale Fertigung, konstruktive Entwicklung und experimentelle Bewertung miteinander verbindet. Die mechanische Leistungsfähigkeit wird im Rahmen eines symmetrischen Biegeprüfprogramms untersucht und den Ergebnissen zweier etablierter Verbindungssysteme – eines klassischen Balkenschuhs sowie eines industriellen Aluminium-Steckverbinders – gegenübergestellt. Neben der Tragfähigkeit werden fertigungstechnische Randbedingungen sowie konstruktive Optimierungspotenziale analysiert.

2. EXPERIMENTELLES KONZEPT

2.1. Versuchsprogramm

Die Entwicklung der Verbindung erfolgte nicht losgelöst, sondern auf Basis eines vorab definierten experimentellen Prüfkonzpts. Ziel war die Untersuchung eines symmetrischen Balken-Stützen-Systems unter Biegebeanspruchung.

Die Prüfkörper bestanden aus:

- zwei vertikalen Stützen mit einer Länge von jeweils **400 mm**
- einem horizontalen Balken mit einer Länge von **600 mm**
- einem quadratischen Querschnitt von **100 × 100 mm** (3-schichtiges Brettschichtholz in GL24h, Holzfeuchtigkeiten zum Prüfzeitpunkt ~12-14%, Laborlagerung)

Die Abmessung von 100 mm wurde bewusst gewählt, dass sie mit dem verfügbaren handgeführten CNC-System präzise bearbeitbar war und in Bezug auf die zu erwartende Prüfkraft auf eine Universalprüfmaschine mit einer maximalen Druckkraft von 250 kN und einer Prüfgeschwindigkeit von 1 mm/min ausgelegt war. Die Versuchsanordnung entsprach einer symmetrischen 3-Punkt- bzw. 4-Punkt-Biegeprüfung (vgl. Abbildung 1).

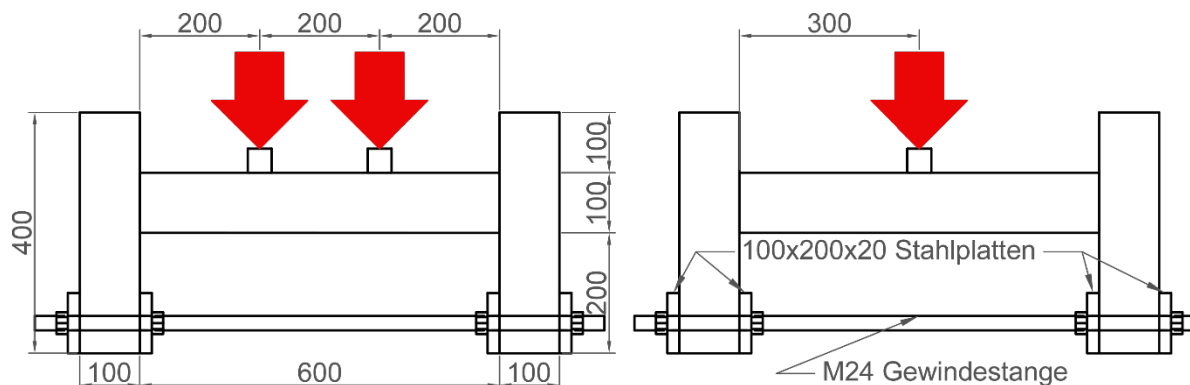


Abbildung 1 Versuchsaufbau der 3-Punkt-Biegeprüfung mit symmetrischem Balken-Stützen-System

Die symmetrische Ausbildung der Versuchskörper war notwendig, um exzentrische Lastabträge zu vermeiden und die damit einhergehende Komplexität des Versuchsaufbaus zu vermeiden. Darüber hinaus ermöglicht der symmetrische Versuchsaufbau eine bessere Vergleichbarkeit zwischen zu prüfenden Verbindungssystemen und erlaubt es auf Grund der geometrischen Einfachheit zwei Verbindungselemente mit einem Versuchskörper bis zur Versagenslast zu prüfen. Zwei symmetrisch angeordnete Gewindestangen verhindern das horizontale Ausweichen im Bereich der Auflager. Die prinzipielle Anordnung der Brettschichtholz-Stützen/-Balken ist in Abbildung 2 dargestellt.



Abbildung 2 Stützen und Balkendetail

2.2. Geometrie und konstruktive Konzeption des Prototyps

Die entwickelte Verbindung stellte einen prototypischen Balken-Stützen-Knoten dar, der als technischer Demonstrator für CNC-gefertigte Holz-Holz-Verbindungen konzipiert wurde. Ziel war nicht die unmittelbare Maximierung der Tragfähigkeit, sondern der Nachweis, dass geometrisch komplexe, formschlüssige Verbindungssysteme reproduzierbar herstellbar sind, sofern ihre Geometrie konsequent an die Parameter des CNC-Abbindprozesses angepasst wird. Die Verbindung wurde beidseitig über separate Verbindungselemente aus Buchenholz hergestellt, die in korrespondierende Ausfräsungen in Balken und Stützen eingesetzt wurden. Die Verbindungselemente wurden aus Buchenholz gefertigt, um die Tragfähigkeit des Verbindungselementes zu erhöhen und Versagensmodi in den Balken selbst zu verlagern. Die Faserrichtung der Buchen-Elemente wurde parallel zur Hauptbelastungsrichtung orientiert, um die Längsfestigkeiten auszunutzen und querzugkritische Spannungszustände zu minimieren. Die Geometrie der Verbindung basiert auf einer V-förmigen Grundstruktur mit integrierten kreisförmigen Elementen. Die maximale Einbindetiefe betrug 36,5 mm. Die Ausnehmung wurde in zwei Frässtufen hergestellt: zunächst eine V-förmige Tasche mit einer Tiefe von 18,5 mm, anschließend eine zusätzliche Vertiefung zur Erreichung der Gesamteinbindetiefe. Die vollständige Geometrie mit den maßgeblichen Abmessungen ist in Abbildung 3 dargestellt.

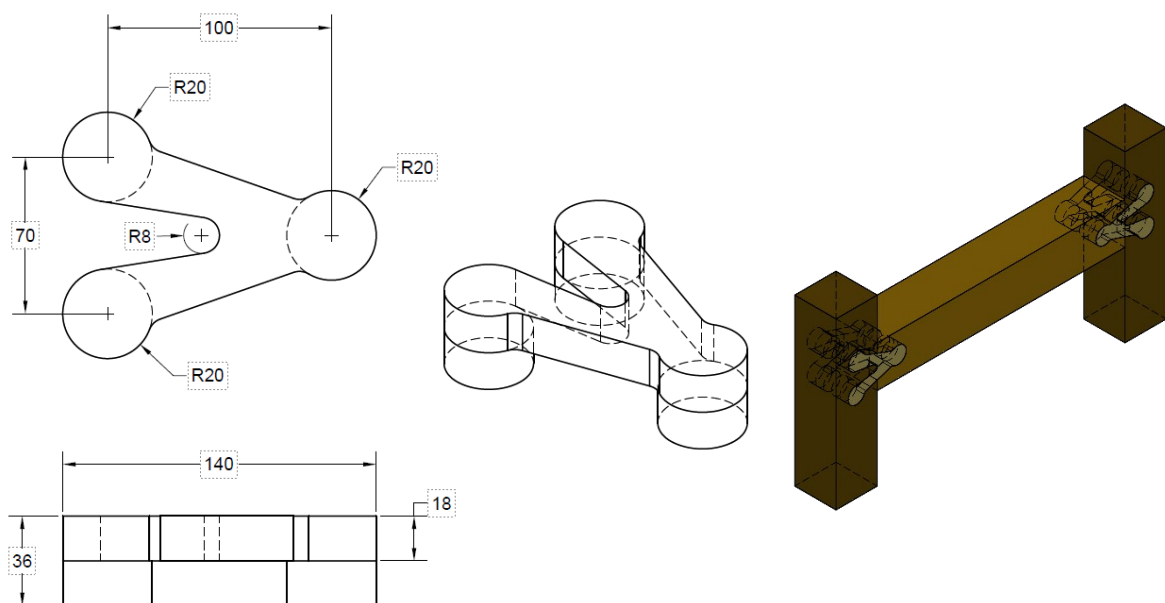


Abbildung 3 Prototypen Abmessungen und Positionierung

Die Verbindung wurde als formschlüssiges Stecksystem ausgebildet. Die Lastübertragung erfolgte über flächige Kontaktpressung zwischen dem Buchen-Verbindungselement und dem Fichten-Brettschichtholz sowie über Schubspannungen entlang der vertikalen Kontaktflächen.

Die konstruktive Entwicklung der Verbindung erfolgte unter klar definierten fertigungstechnischen Randbedingungen. Als Bearbeitungssystem wurde eine handgeführte CNC-Fräse des Typs Shaper Origin eingesetzt. Die geometrische Auslegung der Verbindung wurde daher so konzipiert, dass sie innerhalb der limitierten Bearbeitungsparameter dieses Systems realisierbar war. Damit war gleichzeitig gewährleistet, dass eine Umsetzung auf leistungsfähigeren CNC-Abbundmaschinen grundsätzlich möglich ist. Die gewählten Bauteilgrößen erlaubten eine sichere Fixierung der Werkstücke auf der Arbeitsfläche zur Bearbeitung mit der verfügbaren handgeführten CNC-Fräse. Die konstruktive Auslegung der Verbindung war insbesondere durch die maximal erreichbare Frästiefe, den Werkzeugdurchmesser sowie die sich daraus ergebenden minimalen Innenradien limitiert.

Im ersten Schritt der Entwicklungsarbeit stand die Optimierung der Verbindung hinsichtlich Fräsbarkeit, Maßhaltigkeit und Reproduzierbarkeit im Vordergrund. Aspekte der Tragfähigkeitssteigerung wurden bewusst zurückgestellt und sollten auf Basis der experimentellen Ergebnisse sowie im Vergleich mit konventionellen Verbindungsmitteln in nachfolgenden Untersuchungen erfolgen. Die vorliegende Studie versteht sich daher als grundlegende Machbarkeits- und Systemuntersuchung. Die resultierende Geometrie stellt somit einen ersten funktionsfähigen Prototyp dar, dessen konstruktive Parameter primär durch CNC-Fertigbarkeit definiert sind und dessen mechanische Leistungsfähigkeit im Rahmen des experimentellen Programms bewertet wird.

Neben der entwickelten Holz-Holz-Verbindung wurden zwei im konstruktiven Holzbau etablierte Verbindungssysteme als Referenzlösungen untersucht. Zum einen kam ein handelsüblicher Balkenschuh aus verzinktem Stahlblech zum Einsatz (BSIN 100/100). Balkenschuhe werden üblicherweise für den Anschluss von Nebenträgern an Hauptträger verwendet und ermöglichen eine kraftschlüssige Verbindung über stiftförmige Verbindungsmittel wie Nägel oder Schrauben. Die geometrischen Abmessungen sowie die Anzahl und Anordnung der Verbindungsmittel wurden entsprechend den Herstellerangaben gewählt. Für die im Rahmen dieser Untersuchung geprüfte symmetrische Versuchsanordnung lag nach Kenntnisstand der Autoren keine gesonderte technische Zulassung oder spezifische Bemessungsempfehlung des Herstellers vor. Die Prüfung erfolgte daher als experimenteller Vergleich unter identischen Randbedingungen. Die technischen Kennwerte können dem entsprechenden Produktdatenblatt des Herstellers entnommen (*Balkenschuhe* - BSIN | Simpson Strong-Tie, 2018).

Zum anderen wurde der industrielle Aluminium-Steckverbinder Sherpa S10 untersucht. Das System besteht aus zwei komplementären Aluminiumprofilen, die kraft- und formschlüssig ineinandergreifen und über Schrauben mit den Holzbauteilen verbunden werden. Der Sherpa S10 ist für tragende Anschlüsse im Ingenieurholzbau vorgesehen und verfügt über herstellerspezifische Tragfähigkeitsangaben im technischen Datenblatt. Für die vorliegende Untersuchung wurde die Verbindung entsprechend den Herstellerangaben montiert. Die

maßgeblichen geometrischen und mechanischen Kennwerte wurden dem technischen Datenblatt des Herstellers entnommen (SHERPA Connection Systems GmbH, 2026).

3. ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Die in Tabelle 1 dargestellten Prüflasten zeigen deutliche Unterschiede zwischen den untersuchten Verbindungssystemen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die 3-Punkt-Versuche primär biegedominiert waren, während bei den 4-Punkt-Versuchen ein erhöhter Schubanteil auf die jeweilige Verbindung einwirkte. Eine direkte Vermischung der Ergebnisse ist daher nicht zulässig; die Systeme werden innerhalb gleicher Prüfkfigurationen verglichen.

Tabelle 1 Übersicht der Versuchskampagne

Verbindungstyp	Bezeichnung	Prüfung	Maximale Prüflast [kN]
Balkenschuh BSIN 100/100	H-BS 1-3	3-Punkt	38,9
	H-BS 2-3	4-Punkt	43,7
	H-BS 3-3	4-Punkt	47,2
Sherpa S-10	H-SH 1-3	3-Punkt	35,8
	H-SH 2-3	4-Punkt	36,0
	H-SH 3-3	4-Punkt	41,5
Holz-Holz Prototyp	H-H 1-3	3-Punkt	22,0
	H-H 2-3	4-Punkt	26,1
	H-H 3-3	4-Punkt	21,6

Im 3-Punkt-Versuch wurden für die Balkenschuhverbindungen maximale Prüflasten von 38,9 kN erreicht. Die Sherpa-Verbindung erreichte 35,8 kN, während die Holz-Holz-Verbindung mit 22,0 kN die geringsten Werte aufwies. Im 4-Punkt-Versuch lagen die erreichten Prüflasten der Balkenschuhverbindungen im Bereich von 43,7 kN bis 47,2 kN. Die Sherpa-Verbindungen erreichten Werte zwischen 36,0 kN und 41,5 kN. Die Holz-Holz-Verbindung erzielte im selben Prüfregime maximale Lasten zwischen 21,6 kN und 26,1 kN. Die Streuungen innerhalb der Versuchsreihen sind relativ gering. Die Kraft-Weg-Diagramme zeigen systematische Unterschiede im Verformungs- und Versagensverhalten der Verbindungstypen.

Die Balkenschuhverbindungen weisen einen ausgeprägten annähernd linearen Anfangsbereich mit anschließender progressiver Steifigkeitsabnahme auf. Das Versagen erfolgt nicht abrupt, sondern nach einer Phase erhöhter plastischer Umlagerung. Dieses Verhalten ist charakteristisch für stiftförmige Verbindungsmittel in Kombination mit duktilen Stahlblechkomponenten, bei denen lokale plastische Deformationen eine Spannungsumlagerung ermöglichen. Wie in Abbildung 4 dargestellt zeigte sich ein ausgeprägtes vertikales Spaltversagen im Bereich der Schraubenverbindung zur vertikalen Stütze.

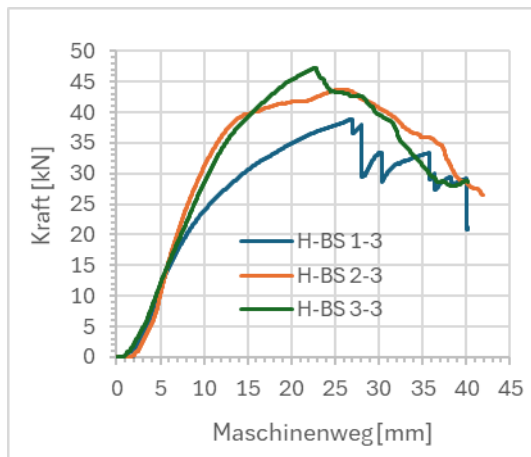


Abbildung 4 Kraft-Maschinenweg Balkenschuhe (links); Versagensbild (rechts)

Die Sherpa-Verbindungen zeigen ebenfalls ein zunächst lineares Verhalten, jedoch mit einer steileren initialen Steifigkeit im Vergleich zum Balkenschuh. Kurz vor Erreichen der Maximallast ist eine reduzierte Steifigkeit erkennbar, was auf lokale Press- und Scherbeanspruchungen im Kontaktbereich zwischen Aluminiumprofil und Holz hinweist. Das Versagen erfolgt kontrollierter als bei der Holz-Holz-Verbindung, jedoch weniger duktil als beim Balkenschuh. Beim Versagen wurde der Verbinder durch den oberen Teil des Querträgers gedrückt, wobei dieses Versagen zu einem Querspalten in Richtung Lasteinleitung führte (Abbildung 5).

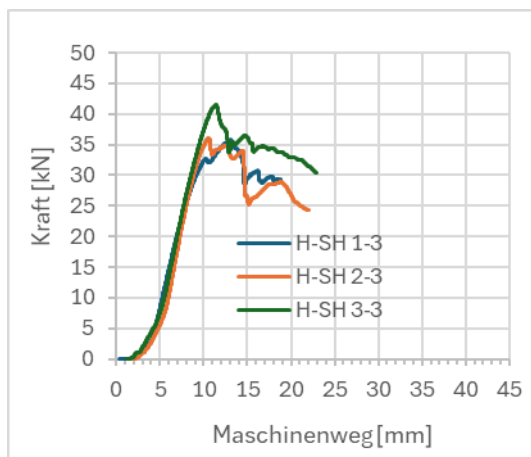


Abbildung 5 Kraft-Maschinenweg Sherpa S-10 (links); Versagensbild (rechts)

Die Holz-Holz-Verbindung zeigt im Vergleich eine geringere Anfangssteifigkeit und ein deutlicheres Abknicken der Kurve vor Erreichen der Maximallast. Das Versagen tritt vergleichsweise spröder auf. Es zeigte sich im Bereich der vorderen runden Verbindung im Querträger ein Spaltriss, welcher sich in Richtung Lasteinleitung ausbreitete. Eine Umlagerung konnte nach dem plastischen Versagen des Querträgers nicht mehr erfolgen und die Spaltrisse führten zu sukzessivem Versagen (Abbildung 6).

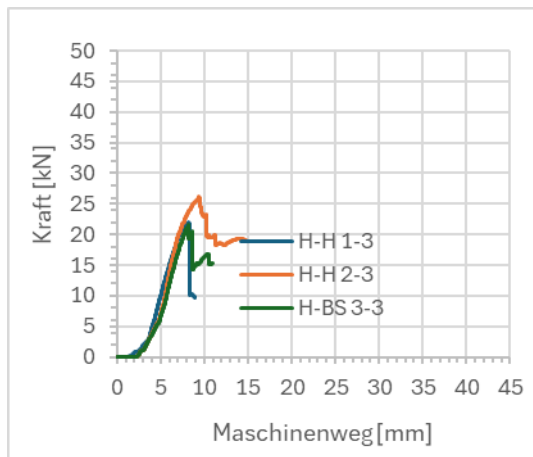


Abbildung 6 Kraft-Maschinenweg Holz-Holz Prototyp (links); Versagensbild (rechts)

FAZIT

Die experimentellen Untersuchungen zeigen, dass konventionelle metallische Verbindungssysteme weiterhin die höchsten Tragfähigkeiten erreichen. Die Balkenschuhverbindungen erzielten mit maximal 47,2 kN die größten Prüflasten, gefolgt vom industriellen Sherpa-Steckverbinder mit bis zu 41,5 kN. Die entwickelte CNC-gefertigte Holz-Holz-Verbindung erreichte geringere Traglasten im Bereich von 21,6 kN bis 26,1 kN, zeigte jedoch ein reproduzierbares Tragverhalten und ein klar identifizierbares Versagensmuster.

Die Ergebnisse bestätigen, dass vollständig holzbasierte, formschlüssige Verbindungssysteme grundsätzlich tragfähig hergestellt werden können, wenn deren Geometrie konsequent an die Randbedingungen digitaler Fertigungsprozesse angepasst wird. Gleichzeitig verdeutlichen die beobachteten Spaltversagen im Bereich der Lasteinleitung die konstruktiven Grenzen der aktuellen Prototypgeometrie.

Die Untersuchung stellt damit einen ersten experimentellen Beitrag zur Bewertung CNC-gefertigter Holz-Holz-Verbindungen im direkten Vergleich mit etablierten metallischen Verbindungssystemen dar. Weitere Optimierungen sind insbesondere hinsichtlich der Spannungsumlagerung im Querträger, der Kerbwirkung der Fräsgeometrie sowie der Einbindetiefe der Verbindungselemente zu erwarten. Zukünftige Untersuchungen sollten daher geometrische Varianten systematisch analysieren und durch numerische Modellierungen sowie erweiterte Versuchsreihen ergänzen.

Darüber hinaus verdeutlichen die Ergebnisse das Potenzial digitaler Fertigungstechnologien, innovative Verbindungssysteme im Holzbau zu ermöglichen, die einen Beitrag zur Entwicklung kreislauffähiger und ressourcenschonender Tragstrukturen leisten können.

LITERATURVERZEICHNIS

- Arriaga, F., Wang, X., Íñiguez-González, G., Llana, D. F., Esteban, M., & Niemz, P. (2023). Mechanical Properties of Wood: A Review. *Forests*, 14(6), 1202. <https://doi.org/10.3390/f14061202>
- Ayari, O., Bouali, A., & Méausoone, P.-J. (2020). Cutting forces and accuracy characterization during wood machining with serial robots. *European Journal of Wood and Wood Products*, 78(4), 767–775. <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01539-4>
- Balkenschuhe—BSIN | Simpson Strong-Tie. (2018, Februar 16). <https://www.strongtie.de/de-DE/produkte/balkenschuhe-bsin>
- Cristescu, C., Honfi, D., Sandberg, K., Sandin, Y., Shotton, E., Walsh, S. J., Cramer, M., Ridley, D., Risse, M., Ivanica, R., Harte, A., Uí, C., Arana-Fernández, M. D., Llana, D. F., Barbero, M. G., & Nasiri, B. (2020). *Design for deconstruction and reuse of timber structures – state of the art review*. <https://doi.org/10.23699/bh1w-zn97>
- European Commission. (2019). *COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE EUROPEAN COUNCIL, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS The European Green Deal*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52019DC0640>
- Hansen, S. G., Kunic, A., & Naboni, R. (2021). A reversible connection for robotic assembly of timber structures. *Engineering Structures*, 245, 112795. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112795>
- Ottenhaus, L.-M., Yan, Z., Brandner, R., Leardini, P., Fink, G., & Jockwer, R. (2023). Design for adaptability, disassembly and reuse – A review of reversible timber connection systems. *Construction and Building Materials*, 400, 132823. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132823>

- Pantscharowitsch, M., & Kromoser, B. (2025). Robotic timber milling: Accuracy assessment for construction applications and comparison to a CNC-machine. *Wood Material Science & Engineering*, 20(3), 580–596. <https://doi.org/10.1080/17480272.2024.2366487>
- Sathre, R., & O'Connor, J. (2010). Meta-analysis of greenhouse gas displacement factors of wood product substitution. *Environmental Science & Policy*, 13(2), 104–114. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2009.12.005>
- SHERPA Connection Systems GmbH. (2026, März 6). *SHERPA S 10*. https://www.sherpa-connector.com/de/produkte/holzverbinder/sherpa-xs-m/3388_242_shop_SHERPA-S-10.aspx?LNG=de
- Webster, M. D. (2012). *Structural Design for Adaptability and Deconstruction: A Strategy for Closing the Materials Loop and Increasing Building Value*. 1–6. [https://doi.org/10.1061/40946\(248\)27](https://doi.org/10.1061/40946(248)27)