

# **Geklebte Verbindungen für Knotenpunkte von weitgespannten Hybrid-Fachwerkträgern**

Dr. Jan Wenker  
Brüninghoff Group  
Heiden, Deutschland





# Geklebte Verbindungen für Knotenpunkte von weitgespannten Hybrid-Fachwerkträgern

## 1. Ausgangssituation

Der Bauindustrie stehen als konstruktive Materialien im Wesentlichen die Werkstoffe Beton, Stahlbeton, Stahl und Holz zur Verfügung. Holz als nachwachsender Rohstoff kann sich unter den genannten Baustoffen einer stetig steigenden Beliebtheit erfreuen. Der Bedarf seitens der Kunden nach Bauwerken aus Holz liegt in wachsendem Maße vor. Ingenieure, Architekten und Bauunternehmen sind gefordert, nach schlüssigen und modernen Lösungen in Holzbauweise zu suchen, um den Wünschen der Kunden nach technisch ausgereiften, ästhetisch anspruchsvollen und gleichzeitig kostengünstigen Bauwerken Rechnung zu tragen. Um diese Anforderungen gemeinsam erfüllen zu können, rücken auch Hybridbauweisen bzw. Materialverbünde zunehmend in den Fokus.

Hölzerne Tragstrukturen bestehen derzeit in der Regel entweder aus massiven Bauteilen aus hochkant stehendem Brettschichtholz oder aus aufgelösten bzw. zusammengesetzten Tragstrukturen aus Brettschichtholz, Furnierschichtholz und/oder Konstruktionsvollholz. Massive Träger weisen einen sehr hohen Materialeinsatz auf. Solche Konstruktionen sind in keiner Weise ressourcen- und materialeffizient. Dennoch finden massive Brettschichtholzkonstruktionen im Bereich des Ingenieurholzbaus am häufigsten Anwendung in der Baupraxis. Gründe hierfür liegen in den langjährigen Erfahrungen zu dieser Bauweise, der hohen Standardisierung bei Herstellung und Montage, dem guten Kosten-Nutzen-Verhältnis und der relativ einfachen statischen Berechnung. Aufgelöste Tragstrukturen reduzieren den Materialeinsatz erheblich und kommen daher insbesondere bei Tragwerken mit großen Spannweiten zum Einsatz. In der Baupraxis etabliert sind Systeme in Form von Fachwerkträgern, die in der Regel auf mechanische Verbindungsmittel im Bereich der Knotenpunkte zurückgreifen. Nachteile dieser Tragsysteme sind vor allem der hohe Aufwand zur Herstellung von Verbindungen und die Nachgiebigkeit der Verbindungsmittel, die zu einer erhöhten Durchbiegung führen kann. Der Vorteil von geklebten Verbindungen besteht darin, dass sie für statische, zyklische und langfristige Belastungen als starr angesehen werden können. Dadurch wird die Gebrauchstauglichkeit im Vergleich zu mechanischen Verbindungselementen verbessert.

Die Brüninghoff Gruppe, das Labor für Holzbau der Hochschule RheinMain und die Materialprüfungsanstalt der Universität Stuttgart (Otto Graf Institut) haben gemeinsam eine hybride Leichtbaulösung auf Holzbasis für weitgespannte Hallentragwerke entwickelt. Wie erwähnt, werden im Ingenieurholzbau bisher vorwiegend Holzfachwerkträger mit aufwendigen Knotenpunkten oder sehr materialintensive Brettschichtholzträger eingesetzt. Um die bestehenden Nachteile dieser Tragstrukturen zu eliminieren, sollte ein Träger aus laubholzbasierenden Ober- und Untergurten sowie auf Abstand liegenden, in die Holzgurte eingeklebten Holzstegen entwickelt werden. Für diese Entwicklung waren umfangreiche Untersuchungen zur Verklebung von Fachwerk-Knotenpunkten aus unterschiedlichen Materialien und Klebstoffen notwendig, über die in diesem Referat berichtet wird. Vor diesem Hintergrund stellte die Verbindung der einzelnen Materialien zu einem hybriden Bauteil mit geeigneten Klebetechniken eine Herausforderung dar.

Der neuartige Träger wurde unter Berücksichtigung der folgenden Fragestellungen entwickelt: Wie kann im Vergleich zu konventionellen Trägern aus Brettschichtholz, die im Bereich des Holzbaus die bevorzugte Bauweise darstellen, mit weniger Material das gleiche oder sogar ein technisch besseres Ergebnis erzielt werden? Wie können gleichzeitig im Vergleich zu den konkurrierenden Tragstrukturen wirtschaftlich attraktive Konzepte aussehen?

## 2. Trägerdesign

Das Design des Trägers wurde unter Berücksichtigung der folgenden konstruktiven Anforderungen entwickelt:

- Spannweite 20 m bis 35 m (größere Spannweiten sollten konzeptionell möglich sein)
- Trägerhöhe möglichst niedrig, Satteldachträger dabei auf Gesamthöhe optimiert
- Feuerwiderstandsklasse R 30
- Standard-Installationen bis ca. 80 cm Rohrdurchmesser müssen einfach durch das Bauteil geführt werden können
- Option für biegesteife Kopplung von Trägerabschnitten über Baustellenstoß bei großen Spannweiten zur Vermeidung von kostenintensiven Sondertransporten

Dem im Folgenden vorgestellten Trägerdesign ging eine umfangreiche Variantenuntersuchung voraus. Aufgrund des hohen Zeitaufwands zur Einbringung einer Vielzahl von mechanischen Verbindungsmitteln, z. B. Stabdübel bzw. eingeklebte Stahlteile, wurde eine direktverklebte Variante mit zweiteiligen Gurten aus Laubholz favorisiert. Für diese wurden detaillierte Berechnungen erstellt, die als Grundlage für weitere Versuche dienten.

Um die konstruktiven Anforderungen zu erfüllen, wurde das Trägerdesign im Vergleich zu bekannten Fachwerkträgern im Holzbau entsprechend angepasst. So wurden vergleichsweise breite Querschnitte für die Diagonalen gewählt, um möglichst große Klebeflächen zu erhalten. Um die Feuerwiderstandsklasse R 30 erreichen zu können, wurde für alle Querschnitte eine minimale Dicke von 120 mm vorgesehen. Da der Träger für eine industrielle Serienfertigung ausgelegt werden sollte, wurde eine Konstruktion mit parallelen Gurten und einer gleichmäßigen Anordnung der Diagonalen gewählt. Der Winkel zwischen den Diagonalen und den Gurten beträgt  $63,5^\circ$ . Die Öffnungen im Träger lassen Rohrdurchführungen von 80 cm zu. Bei einer Spannweite von 30 m wurde eine Gesamthöhe von 2,14 m festgelegt. Für die zweiteiligen Gurte wurde Furnierschichtholz aus Buche gewählt, für die Diagonalen Brettschichtholz aus Fichte. Um den Transport der Träger zu erleichtern, wurde ein Kopplungsstoß entwickelt (Sieverdingbeck, 2019), der in diesem Referat allerdings nicht näher beschrieben wird. Die Ansicht sowie eine perspektivische Darstellung des entwickelten Trägers zeigen Abbildungen 1 und 2.

Eine besondere Rahmenbedingung im Vergleich zu herkömmlichen Fachwerkträgern ist die Verklebung von einerseits Brettschichtholz aus Fichte und andererseits Buche-Furnierschichtholz unter einem Winkel von  $63,5^\circ$ . Dabei wurde angenommen, dass sich die höhere Rollschubfestigkeit des Buche-FSH positiv auf die Tragfähigkeit der Verklebung auswirkt.



Abbildung 1: Ansicht des geklebten Fachwerkträgers mit 30 m Spannweite (Bildquelle: Brüninghoff)

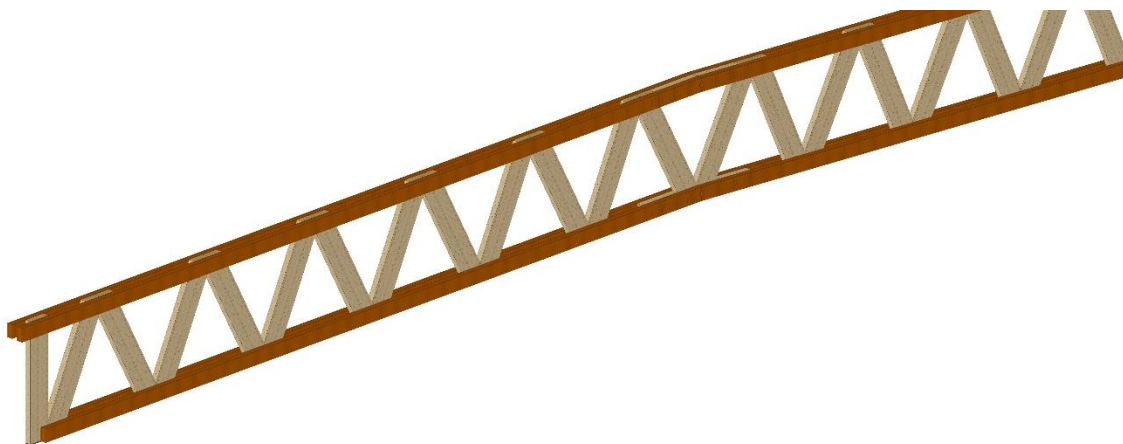


Abbildung 2: Perspektive des geklebten Fachwerkträgers mit 30 m Spannweite (Bildquelle: Brüninghoff)

### 3. Praktische Verklebungsversuche

Um die Verklebung von Fichte-BSH mit Buche-FSH – auch unter einem Kraft-Faser-Winkel von ca.  $63^\circ$  – praktisch zu untersuchen, wurden Versuche unter der Verwendung des PRF-Klebstoffs Dynea Prefere 4040 durchgeführt.

#### 3.1. Versuche im Labormaßstab

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen zur Ermittlung der Tragfähigkeit der Knotenverbindung wurden zunächst Scherversuche im Labormaßstab durchgeführt. Um die mögliche Einwirkung eines Größeneffekts bei Klebeflächen mit verschiedenen Größen abzuschätzen, wurden Druckscherversuche in Anlehnung an DIN EN 14080: 2013 (DIN, 2013) in verschiedenen Maßstäben durchgeführt. Dazu wurden Prüfkörper im Format 50 mm x 50 mm, 45 mm x 45 mm sowie 100 mm x 248 mm aus Trägerabschnitten herausgeschnitten. Es wurde ein entsprechender Versuchsaufbau entwickelt, der es ermöglichte, die Scherfestigkeit möglichst frei von Querzugeffekten zu untersuchen. Dieser Versuchsaufbau orientierte sich an den Scherprüfungen von Brettsperholz nach DIN EN 16351 (DIN, 2015).

#### 3.2. Versuche im Bauteilmaßstab

Anschließend wurden die Klebefugen im Maßstab 1:1 untersucht. Um den Aufwand, der mit der Prüfung eines 30 m langen, und ca. 2,2 m hohen Trägers verbunden wäre, zu reduzieren, wurde ein Versuchsaufbau in Anlehnung an die Veröffentlichung von Meyer und Blaß (2018) herangezogen.

Nach Meyer und Blaß (2018) weisen Fachwerkknoten aufgrund der kombinierten Einleitung von Zug- und Druckkräften ein komplexes Tragverhalten auf, welches durch Versuche an vollständigen Fachwerkträgern verifiziert werden kann. Jedoch ist der material- und versuchstechnische Aufwand hierbei sehr hoch. Mit der vorgestellten Prüfmethode ist es möglich, das Trag- und Verformungsverhalten von Fachwerkträgern praxisnah zu ermitteln, ohne einen kompletten Fachwerkträger prüfen zu müssen. Der Material- und Prüfaufwand reduziert sich dadurch signifikant. Den Versuchsaufbau in Anlehnung an Meyer und Blaß (2018) zeigt Abbildung 3.

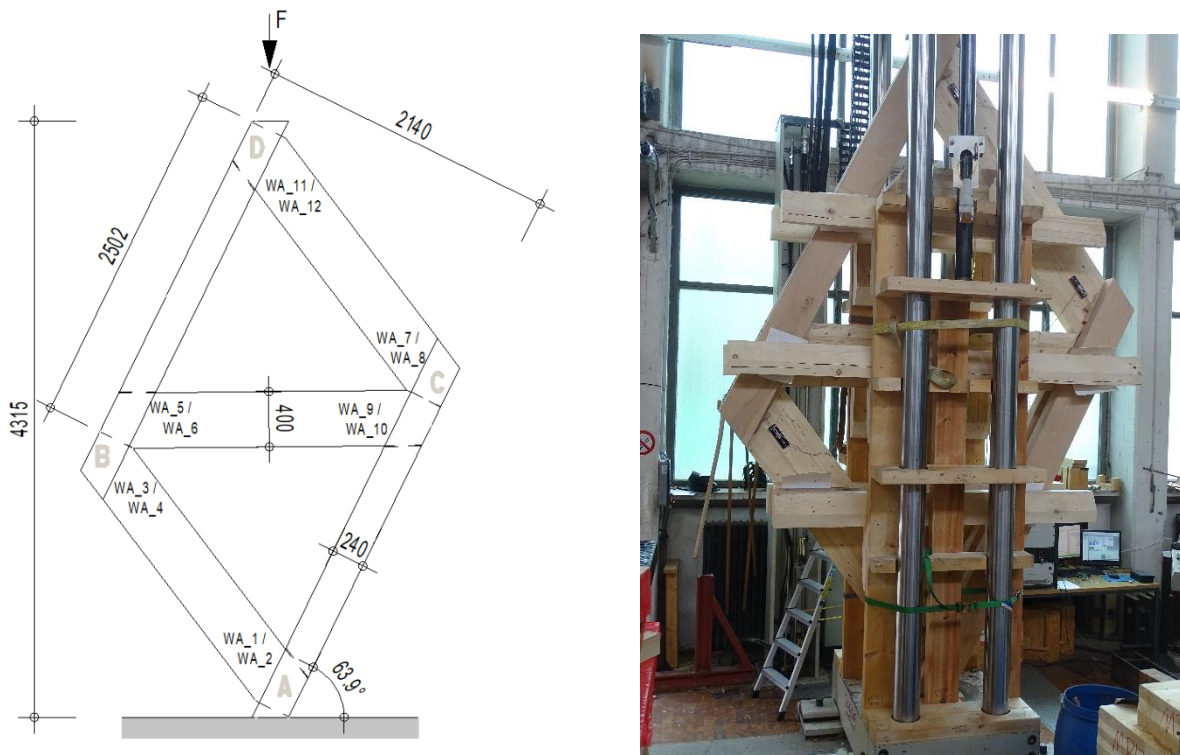


Abbildung 3: Prüfaufbau in Anlehnung an Meyer und Blaß (2018) (Bildquelle: MPA Stuttgart)

## 4. Ergebnisse

Nachfolgend finden sich die Ergebnisse der verschiedenen Versuchsreihen, einerseits im Labormaßstab und andererseits im Bauteilmaßstab.

### 4.1. Ergebnisse der Versuche im Labormaßstab

In einer ersten Versuchsreihe wurden Prüfkörper mit quadratischer Scherfläche hergestellt. An diesen Prüfkörpern mit Scherflächen von etwa 50 mm x 50 mm wurden Druckscherversuche in Anlehnung an DIN EN 14080 (DIN, 2013) durchgeführt. In dieser Versuchsreihe lag eine parallele Anordnung der Furnierlagen des Buche-FSH zur Klebefuge, eine Klebefugendicke von unter 0,3 mm und ein Kraft-Faser-Winkel von 90° vor. Der Mittelwert der Scherfestigkeit betrug 4,96 N/mm<sup>2</sup>. Die ermittelte charakteristische Scherfestigkeit aus den 27 geprüften Proben lag bei 3,39 N/mm<sup>2</sup>.

In der zweiten Versuchsreihe wurden 40 weitere Druckscherversuche in Anlehnung an DIN EN 14080 (DIN, 2013) mit Scherflächen von etwa 45 mm x 45 mm durchgeführt. Das Fichte-BSH wurde in diesen Versuchen längs zur Faser belastet, also im Kraft-Faser-Winkel von 0°, um Eindrückungen zu vermeiden. Im Buche-FSH lag ein Kraft-Faserwinkel von etwa 63,5° vor. Der Mittelwert der Scherfestigkeit und der 5 %-Quantilwert lagen mit 6,21 N/mm<sup>2</sup> bzw. 4,77 N/mm<sup>2</sup> etwas höher als beim Kraft-Faser-Winkel von 90°.

Bei den größeren Proben mit einer Scherfläche von 100 mm x 248 mm und einem Kraft-Faser-Winkel von 90° entsprachen sowohl die mittlere Scherfestigkeit von 4,80 N/mm<sup>2</sup> als auch die charakteristische Scherfestigkeit von 3,18 N/mm<sup>2</sup> ungefähr den Werten, die an den kleinen Proben mit Scherflächen von 50 mm x 50 mm und einem Kraft-Faser-Winkel von 90° ermittelt wurden.

### 4.2. Ergebnisse der Versuche im Bauteilmaßstab

Die Druckprüfungen wurden in Wegsteuerung mit einer Prüfgeschwindigkeit von 1.5 mm/min durchgeführt. Im Rahmen der Versuchsdurchführung wurde, neben der Last und der vertikalen Lastpunkt-/ Kolbenverschiebung an jedem Knoten die Relativverschiebung der Klebeverbindung mit zwei ohmschen Wegaufnehmern (einer je Klebefuge) gemessen. Die Anordnung der Wegaufnehmer ist beispielhaft in Abbildung 3 gezeigt.

Das globale Last-Verschiebungsverhalten in vertikaler Richtung war bis zum Bruch nahezu linear. Die Bruchlasten der vier Prüfkörper lagen minimal bei 311 kN und maximal bei 381 kN. Der Mittelwert ( $\pm$  Standardabweichung) betrug  $350 \pm 29$  kN, und der Variationskoeffizient  $V = 8.3$  %. Das Versagen trat bei allen Prüfkörpern in einem der beiden mittleren Knoten (Knoten B und C), vorrangig in einer Klebefläche der mittleren, horizontal angeordneten Diagonale auf. Bei einigen Prüfkörpern versagte zusätzlich eine mit der äußeren Diagonale verbundenen Klebefuge.

## 5. Diskussion & Fazit

Die aus den Versuchen im Labormaßstab gewonnenen positiven Erkenntnisse konnten durch die Versuche im Bauteilmaßstab nur teilweise bestätigt werden. Aufgrund von in den Klebefugen der Fachwerkknoten auftretenden lokalen Spannungsspitzen ist für Prüfkörper im Bauteilmaßstab und zu einem späteren Zeitpunkt für den gesamten Träger eine Angabe der mittleren Scherfestigkeit bezogen auf die Klebefläche nicht sinnvoll. Daher können die Ergebnisse aus den Bauteilversuchen in Anlehnung an die Methode von Meyer und Blaß (2018) nicht mit den ermittelten Scherfestigkeiten der Versuche im Labormaßstab verglichen werden. Hinzu kommt ein wirkendes Moment im Bauteil, das durch das nicht ideale Fachwerk erzeugt wird – die Schwerelinien der Diagonalen schneiden sich nicht im Kreuzungspunkt des Fachwerkknotens. Aus diesen Gründen kann von der Scherfestigkeit der Prüfkörper im Labormaßstab nicht unmittelbar auf die Tragfähigkeit des neu entwickelten geklebten Fachwerkknotens geschlossen werden.



Mit dem entwickelten Träger wurde im Rahmen eines Verbund-Forschungsvorhabens (Diehl et al., 2021) ein material- und ressourceneffizienterer Ansatz für den Bau von weitgespannten Hallentragwerken untersucht. Im Vergleich zu herkömmlichen Fachwerkträgern wurden breitere Querschnitte für die Diagonalen gewählt, welche mit Gurten aus Buche-FSH tragend verklebt wurden.

Die Klebeverbindungen zwischen den Gurten aus Buche-FSH und den Diagonalen aus Fichte-BSH hielten in Versuchen hohen Belastungen stand. Dennoch konnten die durch umfangreiche Berechnungen ermittelten statischen Anforderungen für den Einsatz des Trägers in Bauwerken nicht vollständig erfüllt werden. Ursächlich für das Versagen der Klebeverbindungen sind Spannungsspitzen in den verklebten Bereichen.

Obwohl der entwickelte Träger die Anforderungen eines Einsatzes in Bauwerken aufgrund der Überschreitungen der rechnerisch ermittelten Bemessung noch nicht umfassend erfüllt, können Teilergebnisse des gemeinsamen Forschungsvorhabens in Kombination mit weiterer Optimierung weiterverwendet werden. Die entwickelte Geometrie, die in Abbildung 4 zu sehen ist, soll nun durch weitere Optimierung zum technischen Erfolg geführt werden.

Als Abschluss des gemeinsamen Forschungsprojektes wurde ein 16 m langer Demonstrator mit zwei Trägerhälften zu je 8 m hergestellt. Dieser dient als proof-of-concept der praktischen Herstellung des entwickelten Trägers und des zugehörigen Kopplungsstoßes sowie für Bewitterungstests, um eine mehrwöchige Bauphase zu simulieren (Abbildung 4).



Abbildung 4: Demonstrator des entwickelten Trägers mit 16 m Länge (Bildquelle: Brüninghoff)

## 6. Danksagung

Die hier vorgestellten Forschungsarbeiten wurden aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMEL für das Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe unterstützt. Das Förderkennzeichen ist 22007818.

Die Arbeiten wurden zusammen mit der Hochschule RheinMain, Labor für Holzbau, durchgeführt, Förderkennzeichen 22023017. Ausgewählte Großversuche wurden an der Materialprüfungsanstalt der Universität Stuttgart (Otto Graf Institut), Abteilung Holzkonstruktionen, durchgeführt.

## 7. Über Brüninghoff

Die Brüninghoff Group gehört seit über 45 Jahren zu den führenden Projektbau-Spezialisten in Deutschland. Der Hauptsitz des Unternehmens ist im münsterländischen Heiden. Weitere Niederlassungen sind an den Standorten Hamburg, Niemberg, Villingen-Schwenningen und Münster beheimatet. Über 600 Mitarbeiter realisieren europaweit bis zu 160 Bauprojekte im Jahr. Das Kerngeschäft des Familienunternehmens ist die Produktion von vorgefertigten Bauelementen aus Beton, Stahl, Holz, Aluminium sowie die ganzheitliche Konzeption, Planung und schlüsselfertige Ausführung von Bauprojekten.

## 8. Weiterführende Literatur

- [1] Diehl, F., Wenker, J. L., Bletz-Mühdorfer, O., Bathon, L., Schuff, M., Sieverdingbeck, K., Schneermann, J.: «Hybrid-Leichtbauträger für weitgespannte Hallentragwerke». Schlussbericht, FNR Verbundforschungsvorhaben Förderkennzeichen 22023017/22007818, 2021
- [2] DIN EN 14080:2013-09: «Holzbauwerke – Brettschichtholz und Balkenschichtholz – Anforderungen», Deutsches Institut für Normung, September 2013
- [3] DIN EN 16351:2015-12: «Holzbauwerke – Brettsperrholz – Anforderungen», Deutsches Institut für Normung, Dezember 2015
- [4] Meyer, N.; Blaß, H. J.: Eine neue Prüfmethode für Fachwerkknoten aus Holz. Bautechnik, 95: 793-800, 2018, <https://doi.org/10.1002/bate.201800061>
- [5] Sieverdingbeck, K.: «Kopplungsstöße von aufgelösten Trägern», Bachelorthesis, Fachhochschule Aachen, Fachbereich Bauingenieurwesen, 2019
- [6] Stimpfle, L.; Tapia, C.; Wenker, J.L.; Aicher, S.: «Experimental and numerical investigations on glued joints for wide-span timber trusses», Otto-Graf-Journal Vol. 20, 2021