



Kreislauffähiger Hybridträger aus Stahl und Holz

Fachwerkträger aus Holzgurten
und Füllstäben aus rückgebautem
Baustahl

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Graf
Boran Hao
Wenchang Shi

Kreislaufgerechter weit-
spannender Holzhallenbau

Reversibles standardisiertes
Tragwerkskonzept

Kurzfassung

Laut dem Globalen Statusbericht für Gebäude und Konstruktion (UNEP/GlobalABC 2024) erreichen die globalen CO₂-Emissionen des Bausektors im Jahr 2022 rund 13,6 Gigatonnen CO₂, was etwa 37 % der globalen energie- und prozessbezogenen CO₂-Emissionen entspricht. Davon entfallen rund 3,7 Gt CO₂ auf die Materialproduktion von Zement, Stahl, Aluminium, Ziegeln und Glas. Im Gegensatz zu diesen mineralischen Baustoffen weisen Holzwerkstoffe eine Kohlenstoffspeicherwirkung auf. Dadurch können sie nach der Herstellungsphase ein negatives GWP aufweisen, was zur Reduktion der Gesamtbilanz eines Gebäudes beiträgt. Zudem kann die CO₂-Freisetzung und der Energieaufwand bei der Herstellung der mineralischen Materialien durch die Substitution mit nachwachsenden Holzwerkstoffen vermieden werden. Allerdings werden die im Holz gespeicherten Kohlenstoffe am Lebensende in der Linearwirtschaft durch energetische Verwertung beziehungsweise Verbrennung wieder freigesetzt.

Im Kernkonzept des kreislaufgerechten Bauens wird die Tragstruktur sowohl reversibel als auch nutzungsflexibel geplant, wodurch eine Langlebigkeit der Bauelemente durch werterhaltenden Umbau oder Wiederverwendung ermöglicht wird. Auf diese Weise kann die Speicherwirkung der eingesetzten Holzwerkstoffe möglichst lange erhalten bleiben.

Eine Studie der Europäischen Kommission (Sansom/Meijer 2001) zeigt zudem, dass zwar rund 83 % der Stahlkonstruktion am Ende des Lebens stofflich recycelt werden, jedoch nur etwa 14 % wiederverwendet werden. Diese Diskrepanz verdeutlicht das große Potenzial, sowohl Ressourceneinsatz als auch Energieverbrauch durch eine Erhöhung der Wiederverwendungsquote von Stahlbauprodukten signifikant zu reduzieren.

Vor dem Hintergrund steigender Anforderungen an Ressourceneffizienz und Wiederverwendbarkeit im Bauwesen verfolgte die Forschungsarbeit das Ziel, ein demontagefähiges, standardisiertes Tragwerkskonzept zu entwickeln, das sowohl die technischen Anforderungen an die Tragfähigkeit als auch die zirkuläre Bauweise erfüllt. Die vollständige Rückbaubarkeit und die sortenreine Trennung der Bauteile am Lebensende können durch speziell entwickelte Verbindungen sichergestellt werden. Im Fokus des Forschungsvorhabens steht ein Hybridfachwerkträger mit Gurten aus Holz und Füllstäben aus

rückgebautem Baustahl. Durch reversible Verbindungen soll der Träger sowohl als Ganzes als auch in separaten Baukomponenten in einen geschlossenen technischen Materialkreislauf überführt werden können. Die Kombination nachwachsender und wiederverwendbarer Baustoffe leistet dabei einen innovativen Beitrag zu einem ressourcenschonenden und zukunftsfähigen Bauwesen.

Einen Schwerpunkt stellt die reversible Knotenverbindung zur Anbindung der Stahlfüllstäbe an die Holzgurte dar. Hierfür wurde ein Anschlussblech mit Schubnocken entwickelt. Seine Schubtragfähigkeit sowie Nachgiebigkeit in unterschiedlichen Holzwerkstoffen wurden experimentell ermittelt. Zur Lagefixierung der Anschlussbleche an den Holzgurten wurde eine Konusmuffe aus Stahl entwickelt, die eine lösbare Verbindung über Schrauben erlaubt. Deren Durchziehtragfähigkeit wurde in umfangreichen Versuchsreihen untersucht und mit Zylindermuffen verglichen. Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der Ökobilanzierung des Fachwerkträgers, die auf den Prinzipien der Kreislaufwirtschaft basiert. Die Bewertung erfolgt anhand des GWP unter Berücksichtigung unterschiedlicher Einflussfaktoren wie Materialherkunft, Wiederverwendung und Nutzungsflexibilität. Darüber hinaus werden die Umwelteigenschaften der gesamten Hallenkonstruktion mit dem Hybridfachwerkträger analysiert. Unter Einbeziehung statischer Anwendbarkeit werden dabei konstruktive Parameter identifiziert, die sich für eine standardisierte und ökologisch optimierte Bauweise eignen. Zur Sicherstellung der Praxistauglichkeit wurden Fertigungskonzepte entwickelt und anhand eines Mockups im Maßstab 1:1 validiert. Außerdem wurde ein Wiederverwendungskonzept dementsprechend entwickelt.

Ergebnisse

Reversible Konstruktion

Auflagerkonstruktion

Die Nutzungsflexibilität der Hallenkonstruktion mit dem Hybridfachwerkträger wird durch standardisierte Konstruktionsmaße garantiert. Des Weiteren wird die werthaltende Wiederverwendung des Fachwerkträgers als ein Bauelement durch das zerstörungsfrei demontierbare Verbindungskonzept mit den Konusadaptern aus Kunstharzpressholz (KP) ermöglicht.

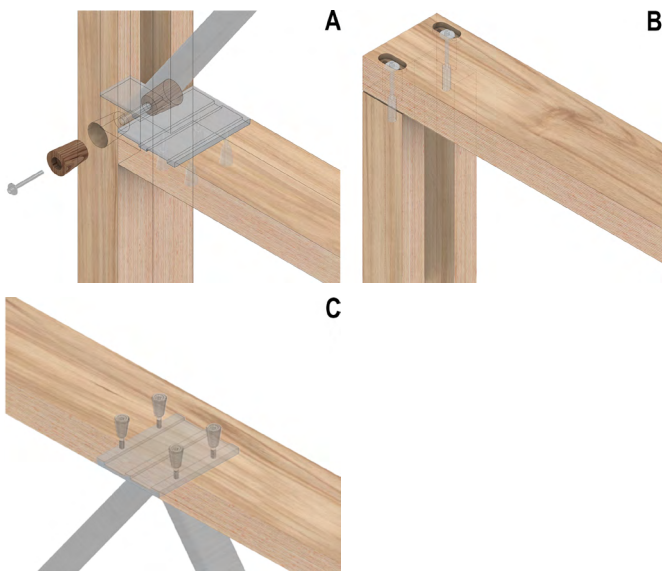


Abb. 1: Anschluss des Fachwerkträgers an die Stütze mittels Konusadapter aus Kunstharzpressholz (KP) und Einschraubmuffe (Rampa Typ SKL) (A und B) sowie Knotenverbindung mit einem Anschlussblech und vier Konusmuffen (C); Quelle: t-lab, RPTU Kaiserslautern-Landau

Am Auflager des Untergurts erfolgt die Lagersicherung mittels zwei Konusadapter, zwei Zylinderkopfschrauben sowie einer 80 mm langen Sondermuffe, die in Anlehnung an die Einschraubmuffe (Rampa-Muffe Typ SKL) mit beidseitigem Gewinde ausgeführt ist (Abbildung 1 A). Zur Vermeidung lokaler Biegespannungen in der Holzstützen im Zangenauflegerbereich infolge relativer Verformungen der zwei Holzgurte wird die Lagersicherung am Obergurt durch eine Verbindungsmittelgruppe aus Rampa-Muffen Typ SKL M12 und Zylinderkopfschrauben mit Langlöchern realisiert (Abbildung 1 B). Die Dimension der Schubnocken befindet sich in Abbildung 2. Die Breite der Stütze wird unter Berücksichtigung der Gurtbreite mit 300 mm standardisiert. Die Stützentiefe wird entsprechend den Spannweiten und Trägerabständen zwischen 100 – 140 mm optimiert. Das Verbindungsmittel

ist als standardisierte Baukomponente vorgesehen. Sein Durchmesser an der Grenzebene zwischen den beiden Baukomponenten aus Holz beträgt 65 mm. Die Einlass-tiefe wird in Anlehnung an den Sonderdübel Typ A nach DIN EN 1995-1-1 mit 15 mm festgelegt.

Knotenverbindung

Die konstruktive Ausführung der Knotenverbindung zwischen Holzgurten und Stahlfüllstäben hat entscheidenden Einfluss auf die Tragfähigkeit und das Verformungsverhalten des Fachwerkträgers. In diesem Projekt wird die Knotenverbindung in Abbildung 1 C entwickelt. Diese besteht aus einem Anschlussblech mit drei trapezprofilierten Schubkonten (Abbildung 2), vier Konusmuffen sowie vier Zylinderkopfschrauben M12. Auf den beiden äußeren Schubnocken werden jeweils zwei metrische Gewinde M12 eingefräst, die einen Abstand von 140 mm zueinander haben.

Im Knotenbereich überträgt die Verzahnung die horizontale Kraft, die der Normkraftdifferenz im Obergurt entspricht. Bei dieser Verbindungssituation wird die horizontale Kraft über definierte Kontaktflächen übertragen, ohne dass eine nennenswerte vertikale Abhebekraft auftritt. Dadurch beschränkt sich die Funktion der Schrauben und Sondermuffen auf die Lagesicherung und Positionierung. Dies reduziert die Anzahl der Verbindungsmittel und vereinfacht die Fertigung.

Experimentelle Untersuchungen

Über die Schubnocken wird die resultierende horizontale Kraftkomponente aus den Stabkräften zweier benachbarter Füllstäbe in die Holzgurte eingeleitet. Biegebeanspruchungen infolge von Exzentrizitäten werden durch die Konusmuffen in Kombination mit den Zylinderkopfschrauben aufgenommen (Abbildung 6). Zur Validierung der Konstruktion sind die Schubtragfähigkeit der Knoten sowie die Nachgiebigkeit der Anschlusssituation zu ermitteln. Zudem muss die Ausziehtragfähigkeit der Konusmuffen experimentell ermittelt werden. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen wurden in die Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) und Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG) integriert.

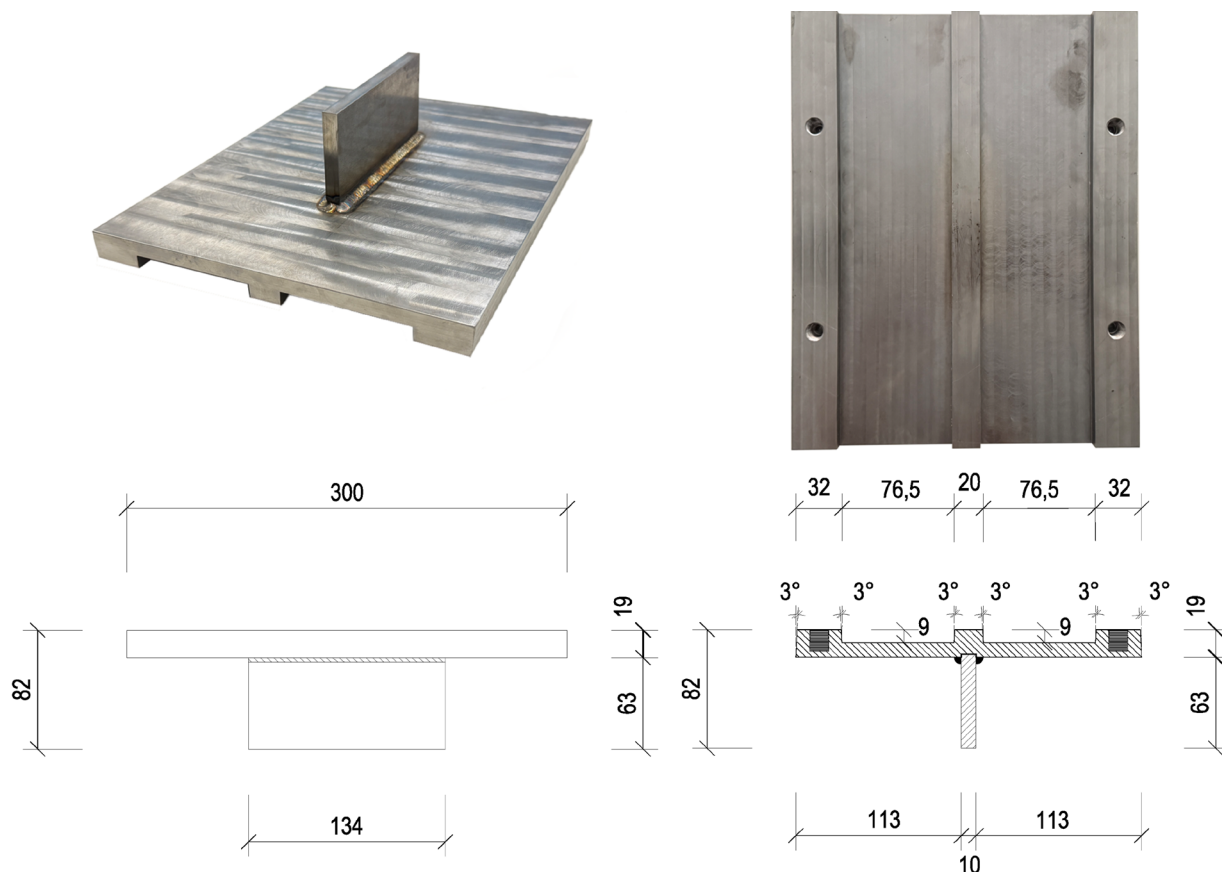


Abb. 2: Anschlussblech mit drei trapezprofilierten Schubnocken aus Baustahl S235; Quelle: t-lab, RPTU Kaiserslautern-Landau

Druckscherversuche

Für die auf große Spannweiten ausgelegten Hybridfachwerkträger ist die Schubtragfähigkeit in den Knotenstellen der entscheidende Parameter für die statischen Nachweise. Daher wurde BauBuche GL 75 wegen seiner hohen Schubtragfähigkeit eingesetzt. Ergänzend wurde BSH GL 28h geprüft, um die Übertragbarkeit des entwickelten Schubnockens auf Nadelholzsysteme zu bewerten und Referenzwerte für gängige Anwendungen zu gewinnen. Die Druckscherversuche wurden gemäß DIN EN 408 im Maßstab 1:1 durchgeführt (Abbildung 3). Die Prüfkörperbreite wurde von 300 mm, entsprechend der Holzgurtbreite, auf 100 mm verringert, um das Versagensverhalten unter Berücksichtigung der Leistungsfähigkeit der Prüfmaschine zu ermitteln. Die Fixierung der Anschlussknoten erfolgte über Einschraubmuffen (Rampa-Muffe, Typ SKL, D = 22 mm, L = 30 mm) sowie zwei metrische Schrauben M12 der Festigkeitsklasse 8.8. Ermittelt wurden sowohl die Schubtragfähigkeit als auch die Nachgiebigkeit des Anschlussknotens.

Die Last-Verformungs-Kurven der beiden Versuchsserien (BauBuche GL 75 und BSH GL 28h) in Abbildung 3 zeigen in beiden Fällen einen nahezu linearen Kraftan-

stieg bis zur Bruchlast. Das Versagen trat schlagartig als Schubbruch im Profilierungsgrund von Holzwerkstoffen auf. Anschließend fiel die aufnehmbare Kraft sofort ab. Der Schubriss erstreckte sich über die gesamte Verbindungsfläche der Holzkomponenten. Im BauBuche-Verbund wurde eine mittlere Bruchkraft von 215,8 kN und ein mittlerer Verschiebungsmodul von 293,07 kN/mm ermittelt. Der GL 28h-Verbund erreichte eine mittlere Bruchkraft von 114,0 kN ($\approx 53\%$ von der Bruchkraft in BauBuche GL 75) bei einem mittleren Verschiebungsmodul von 208,35 kN/mm. Damit weist BauBuche sowohl in der Traglast als auch in der Steifigkeit einen deutlichen Vorteil auf, während in beiden Werkstoffgruppen übereinstimmend das spröde Scherversagen auftrat.

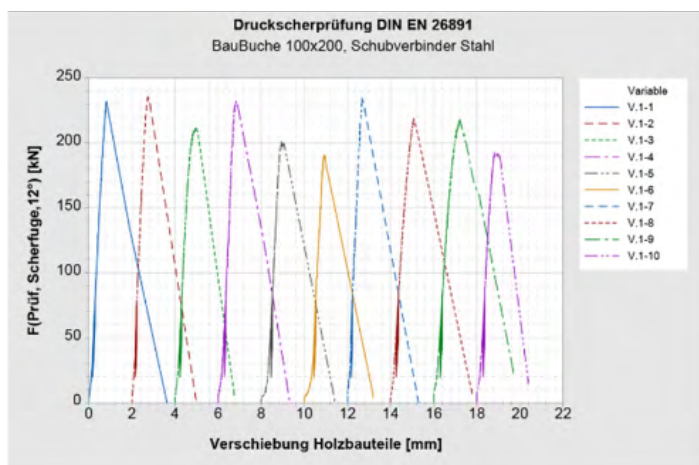
Die Versuche ergaben für den BauBuche-Verbund eine charakteristische Tragfähigkeit von 182,7 kN bezogen auf eine Schubflächenbreite von 100 mm. Durch lineare Umrechnung auf die Schubflächenbreite von 300 mm in den Gurten des Fachwerkträgers ergibt sich eine charakteristische Tragfähigkeit von 548,1 kN. Der Vergleich mit den statisch erforderlichen Tragfähigkeiten zeigt, dass der trapezprofilerte Anschlussknoten die rechnerische Schubtragfähigkeit um etwa den Faktor zwei übertrifft und damit deutliche Sicherheitsreserven bietet.



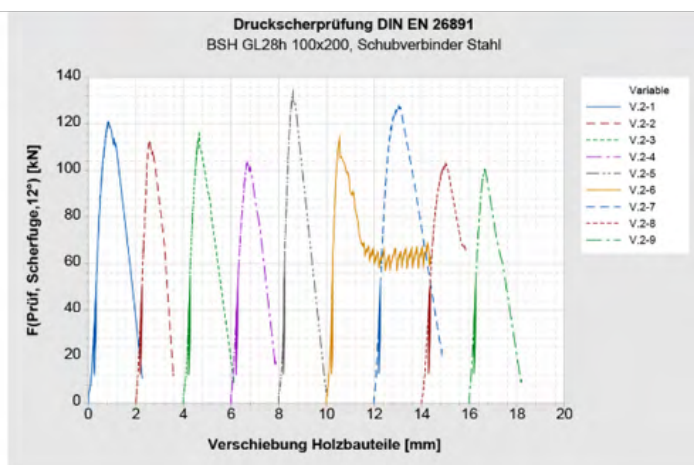
Prüfkörperaufbau in BauBuche-Verbund



Versuchsaufbau des Druckscherversuchs



Last-Verschiebungsverlauf der Druckscherversuche in BauBuche GL 75



Last-Verschiebungsverlauf der Druckscherversuche in BSH GL 28h

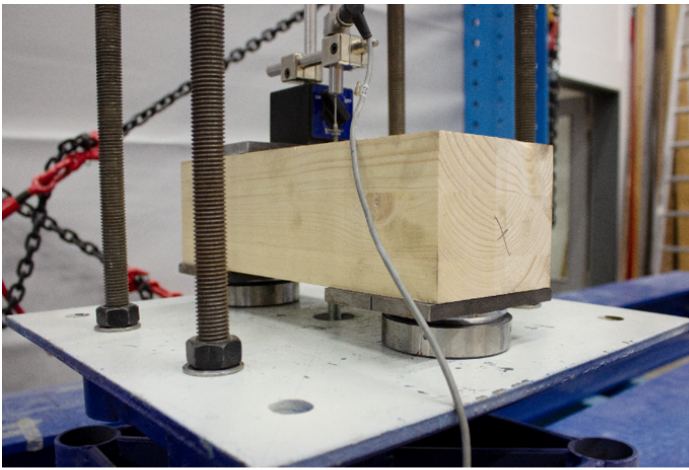
Abb. 3: Beispielhafte Darstellung des Prüfkörperaufbaus im BauBuche-Verbund, Versuchsaufbau des Druckscherversuchs sowie Last-Verschiebungsverlauf der Druckscherversuche in BauBuche GL 75 und GL 28h; Quelle: t-lab, RPTU Kaiserslautern-Landau

Durchziehversuche

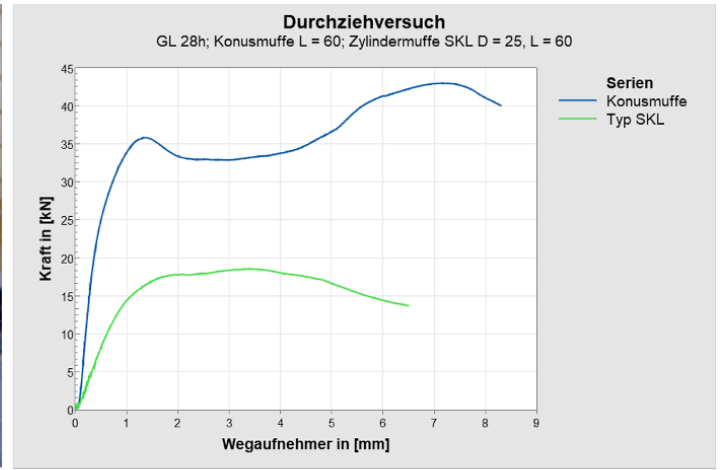
Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde in Zusammenarbeit mit der RAMPA GmbH & Co. KG eine konische Muffe entwickelt. Zur Bestimmung ihrer Tragfähigkeit des Durchziehens in verschiedenen Holzwerkstoffen wurden Versuche gemäß DIN EN 1383 durchgeführt. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 4 dargestellt.

Im Vergleich zur Referenzmuffe Typ SKL (D = 25 mm, Einbindelänge 60 mm) erreicht die Konusmuffe eine um bis zu 46 % höhere charakteristische Tragfähigkeit (Abbildung 4). Bei der Zylindermuffe werden die Durchziehungskräfte primär im Gewindebereich aufgenommen, sodass

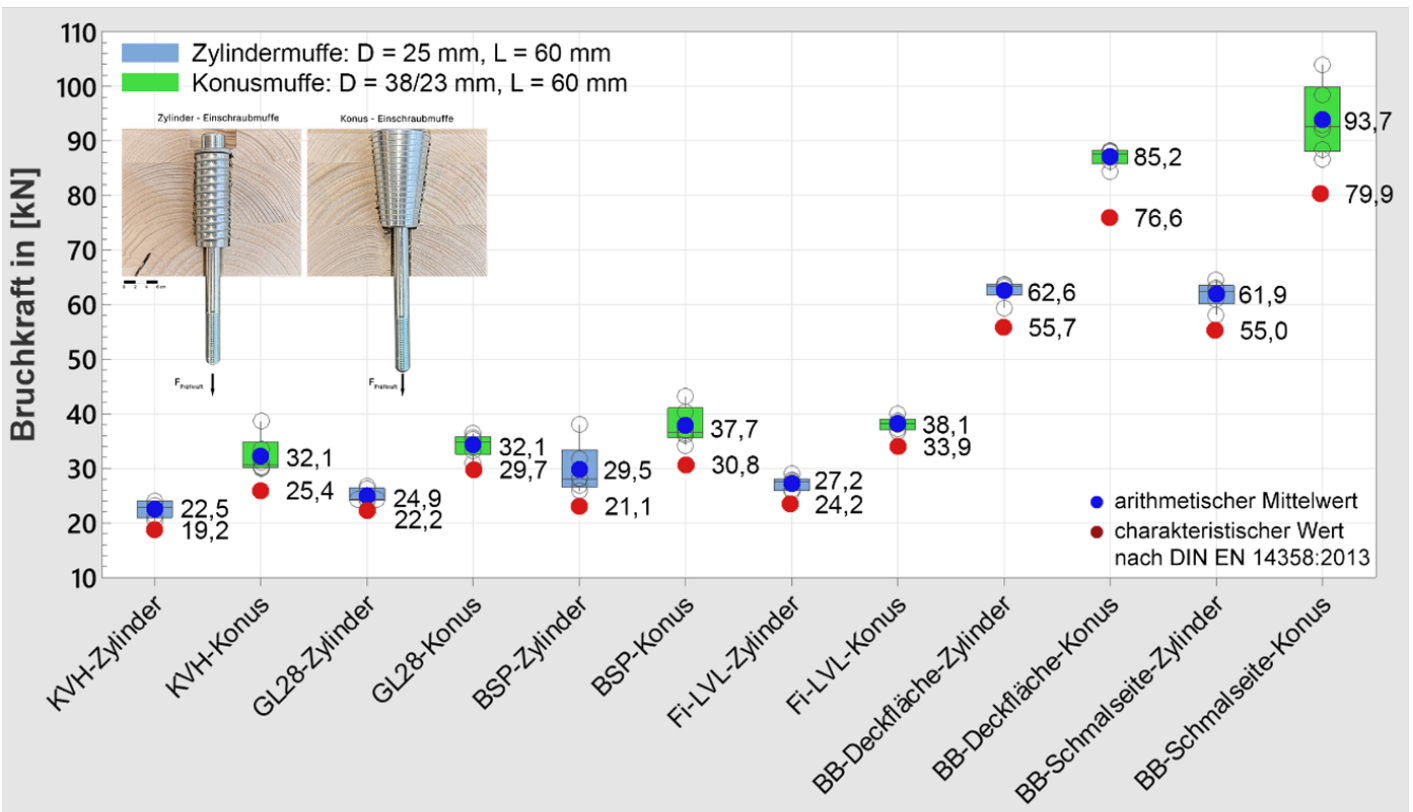
das Holz dort ausschließlich über seine Schertragfähigkeit zur Gesamttragleistung beiträgt. Reißt das Holz im Gewindebereich aus, verliert die Muffe ihre Tragfähigkeit. Im Gegensatz dazu erzeugt die konische Geometrie der Konusmuffe beim Durchziehen eine radiale Druckzone im umgebenden Holz. In dieser Zone kann das Holz zusätzlich Druckkräfte aufnehmen, wodurch ein vorzeitiges Versagen verzögert wird. Selbst wenn das Holz im Gewindebereich ausreißt, bleibt die Konusmuffe weiterhin tragfähig. Deshalb weist die Konusmuffe ein steiferes Tragverhalten auf als die Zylindermuffe (Abbildung 4).



Versuchsaufbau des Durchziehversuchs



Kraft-Weg-Kurve der Durchziehversuche



Durchziehtragfähigkeit der Zylindermuffe und Konusmuffe in verschiedenen Holzwerkstoffen

Abb. 4: Beispielhafte Darstellung des Versuchsaufbaus und der Kraft-Weg-Kurve für die Durchziehversuche sowie Grafik der Durchziehtragfähigkeit der Zylindermuffe und Konusmuffe in verschiedenen Holzwerkstoffen; Quelle: t-lab, RPTU Kaiserslautern-Landau

Ökobilanzierung

Bei der Ökobilanzierung in diesem Forschungsprojekt wird die Summe der Lebenszyklusphasen von A1 bis C4 als „Gesamtbilanz“ definiert. Auf Grundlage der Angaben aus BMWSB 2024 und IBU 2024 wird die GWP-Gesamtbilanz in diesem Kapitel gemäß DIN EN 15978 ermittelt.

Referenzträger

Abbildung 5 zeigt die Verteilung des GWP zweier Referenzträger (Spannweite 25 m und Trägerabstand 2,5 m) mit Füllstäben unterschiedlicher Herkünfte. Durch den Einsatz wiederverwendbare Stahlkomponenten (Anschlussbleche, Stahlfüllstäbe und Verbindungsmittel) kann im Vergleich zur Verwendung neuer Stahlkomponenten eine Reduktion des GWP um 35,0 % (396 kg CO₂-Äq.) erzielt werden.

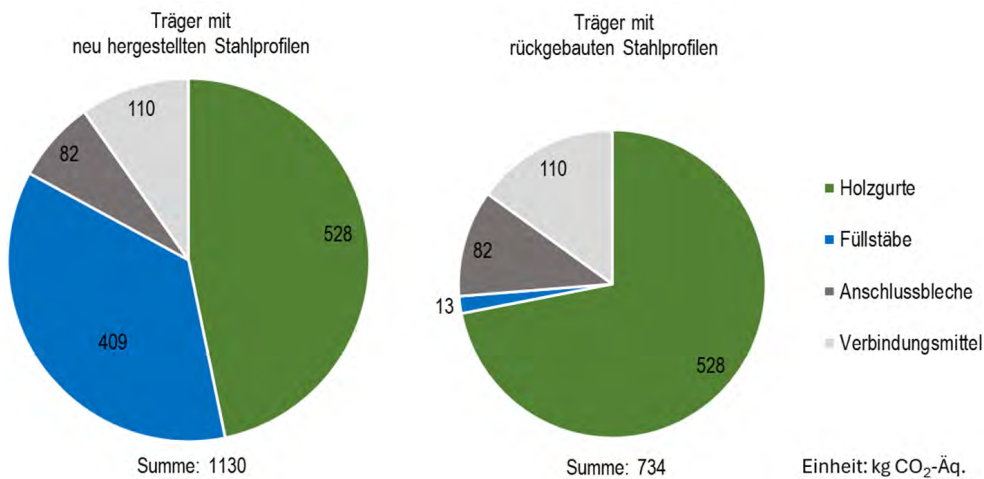


Abb. 5: GWP-Verteilung (Gesamtbilanz) der Baukomponenten des Hybridfachwerkträgers mit neu hergestelltem (links) und rückgebautem Stahlprofil (rechts); Quelle: t-lab, RPTU Kaiserslautern-Landau

Gebäudeebene

Nach der statischen und ökologischen Optimierung der Hallenkonstruktion mit dem Fachwerkträger wurden die ökologisch günstigsten Kombinationen von Spannweiten und Trägerabständen unter Berücksichtigung der statischen Anwendbarkeit ermittelt. In Tabelle 1 ist die GWP-Gesamtbilanz in Bezug auf die Lasteinzugsfläche für die Trägerabstände 1,5 - 6,0 m dargestellt. Dabei werden der Dachaufbau (Dachbegrünungssystem, Holzfaserdämmschicht, Holzlatten und BSP-Platte) sowie der Wandaufbau (Holzverkleidung, Holzfaserdämmschicht,

te, Holzlatten und BSP-Platte) berücksichtigt. Aufgrund der variierenden Spannweiten und Trägerabstände der Hybridfachwerkträger ergeben sich unterschiedliche Anforderungen an die tragenden Schichten der Dachkonstruktion. Für die Ökobilanzierung wurden daher die erforderlichen Deckenhöhe (zwischen 80 mm und 200 mm) der BSP-Platten in Abhängigkeit von den Trägerabständen berücksichtigt. Für eine zukünftige Umbaubarkeit und Wiederverwendbarkeit der Bauelemente ist ein hoher Standardisierungsgrad erforderlich. Vor diesem Hintergrund wurden zwei Trägerabstände von 2,5 m und 5,0 m definiert. Die daraus resultierende GWP-Gesamtbilanz der Fachwerkträger mit standardisierten Trägerabständen 2,5 m und 5,0 m in Bezug auf ihre Lasteinzugsfläche liegt zwischen 119 und 140 kg CO₂-Äq./m².

Spannweite [m]	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Trägerabstand 1,5 m	158	154	151	148	146	144	142	140	138	138	136	135	134	132	132
Trägerabstand 2,5 m	144	140	137	135	133	131	129	127	125	124	123	121	120	119	119
Trägerabstand 3,0 m	140	137	134	132	130	128	126	125	124	123	121	120	119	118	117
Trägerabstand 4,5 m	139	136	133	131	129	127	126	124	123	statisch nicht anwendbar					
Trägerabstand 5,0 m	140	138	135	133	131	statisch nicht anwendbar									
Trägerabstand 6,0 m	143	141	138	136	statisch nicht anwendbar										

Tab. 1: GWP-Gesamtbilanz (A1-C4) der Hallenkonstruktion mit dem Hybridfachwerkträger bezogen auf Lasteinzugsfläche eines Trägers (Einheit: kg CO₂-Äq./m²); Quelle: t-lab, RPTU Kaiserslautern-Landau

Nutzen für die Praxis

Bemessungskonzept

Die vorgesehenen Anwendungsbereiche ermöglichen eine Einstufung in die Nutzungsklassen NKL 1 und 2 nach DIN EN 1995-1-1. Das Bemessungskonzept wird auf Grundlage von DIN EN 1995-1-1, DIN EN 1993-1-1 sowie DIN EN 1993-1-8 entwickelt. Für die Lastannahmen entwickelten Hybridfachwerkträger wurde ein Dachaufbau mit BSP-Platte, extensiver Dachbegrünung sowie Photovoltaikanlage zugrunde gelegt und die Schneelast (Zone 2, 1,0 kN/m²) und Windlast (Zone 2, 0,65 kN/m²) angenommen.

Bei Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit (GZG) sind jeweils die Nachweise der Anfangsdurchbiegung, Enddurchbiegung sowie Netto - Enddurchbiegung durchzuführen. Bei Grenzzustände der Tragfähigkeit (GZT) sind für die Ober- und Untergurt umfassend die Druck-, Zug-, Stabilitätsnachweise sowie den Querdrucknachweis des Auflagerbereichs durchzuführen. Zusätzlich sind die Druck- und Schubtragfähigkeit der Knotenstellen nachzuweisen. Ebenfalls muss die durch die Ausmittigkeit zwischen Schubkraft der Schubnocken und Normalkraft des Gurts entstehende lokale Biegung überprüft werden.

Schub- und Drucktragfähigkeit der Schubnocken

In Abbildung 6 wird die Kraftübertragung im Knotenbereich dargestellt. In Bezug auf die Kraftübertragung der Schubnocken wurde sowohl das Druckversagen als auch das Schubversagen entlang der Faserrichtung des Holzes berücksichtigt. Der Abstand zwischen jedem Schubnocken wird mit 80 mm konstruiert. Für die Bemessung der Schubtragfähigkeit wurde eine Vorholzlänge von $8 \times t_v = 152 \text{ mm}$ für die äußere Nocke ($K_{(n+1),1}$ in Abbildung 6) und 72 mm für die anderen zwei Nocken ($K_{(n+1),2}$ und $K_{(n+1),3}$ in Abbildung 6) nach DIN EN 1995-1-1/NA:2013-08 NCI NA.12.1 angenommen.

Lokale Biegung der Knotenverbindung

Die Ausmittigkeit ist zwischen der Wirkungslinie der Schubkraft des Knotenanschlusses und der Wirkungslinie der Normalkraft im Obergurt ersichtlich (Abbildung 6). Aufgrund des Versatzes im Bereich des Schlusskno-

tens ist der verbleibende Querschnitt des Holzgurts in die Betrachtung einzubeziehen. Der Nachweis der lokalen Biegespannung erfolgte somit unter Einbeziehung der Zug- und Druckspannungen. Darüber hinaus wurde die Durchziehtragfähigkeit der Konusmuffe unter der durch eine lokale Exzentrizität von 9,5 mm in Abbildung 6 zwischen den Schwerachsen des Anschlussblechs und der Schubnocken verursachten Zugbeanspruchung experimentell überprüft und auf Grundlage der Ergebnisse der Durchziehversuche (Abbildung 4) nachgewiesen.

Steifigkeit des Fachwerkträgers

Die Anfangsdurchbiegung ergibt sich aus der elastischen Verformung der Fachwerkstäbe (Obergurt, Untergurt, Füllstäbe) und der Nachgiebigkeit der Schubnockenverbindungen. Die Nachgiebigkeit der Verbindung wurde im RFEM 6 modelltechnisch erfasst, indem im Bereich des Anschlussknotens der Gurtelemente mit einem verringerten E-Modul eingesetzt wurden (Abbildung 6). Zur Simulation der Schubknoten wurde ein Stab mit verringertem E-Modul und einer Länge von 388 mm angesetzt. Die Länge setzt sich aus der Länge des Anschlussblechs von 236 mm sowie einer Vorholzlänge von 152 mm zusammen.

Aus den Druckscherversuchen wurde der Verschiebungsmodul (293,07 kN/mm, vgl. Kapitel Druckscherversuche) mit einer Schubflächenbreite von 100 mm errechnet, woraus ein rechnerisches Verschiebungsmodul von 879,21 kN/mm für die Holzgurtbreite von 300 mm ermittelt werden kann. Die Knotenverbindung wird im Modell über einen Starrstab gelenkig angeschlossen. Die Schlupfverschiebung wurde zusätzlich gemäß (Neuhaus 2017) durch die Definition einer Gelenkverschiebung von 1,5 mm berücksichtigt.

Der E-Modul dieses Stabs (E_{stab}) wurde unter der Annahme einer Stabverformung $\Delta l = 1 \text{ mm}$ beziehungsweise einer Dehnung $\varepsilon_{\text{stab}} = 1/388$ folgendermaßen ermittelt:

$$E_{\text{stab}} = \frac{K_{\text{ser}} \cdot 1 \text{ mm}}{A_{\text{Gurt}} \cdot \varepsilon_{\text{stab}}} = \frac{879,21}{36000 \cdot 1/388} = 9475,9 \text{ N/mm}^2$$

Dabei ist:

σ_{stab} : Druckspannung des Stabs zur Simulation der Schubnocken

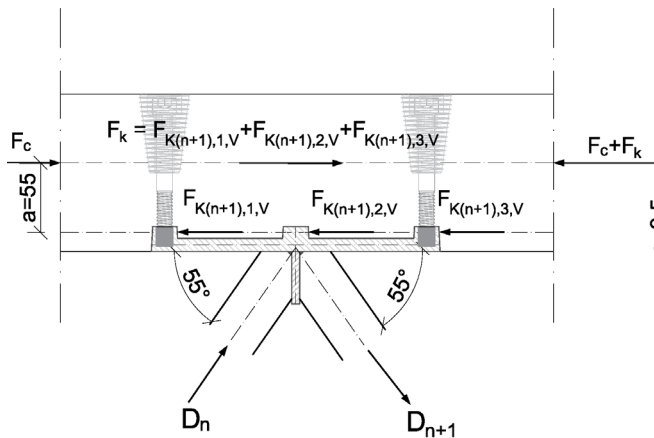
ε_{Stab} : Dehnung des Stabs zur Simulation der Schubnocken

A_{Gurt} : Gurtquerschnittsfläche ($B \times H = 300 \times 120 \text{ mm}$)

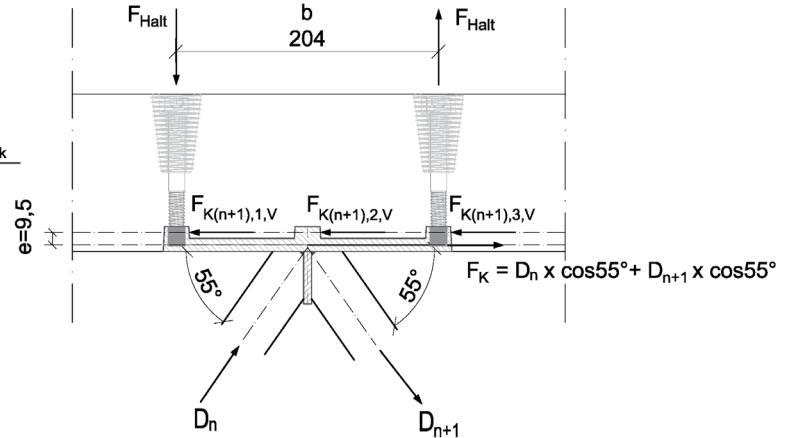
E_{stab} : Rechnerisches Elastizitätsmodul des Stabs zur Simulation der Schubnocken

K_{ser} : Verschiebungsmodul des Anschlussblechs mit Schubnocken nach dem Untersuchungsergebnis vgl. Kapitel Druckscherversuche

Kraftübertragung und Ausmittigkeit ($a = 55 \text{ mm}$)



Exzentrizität ($e = 9,5 \text{ mm}$) des Anschlussblechs



Simulation der Knotenverbindung und ihrer Steifigkeit in FE-Modell

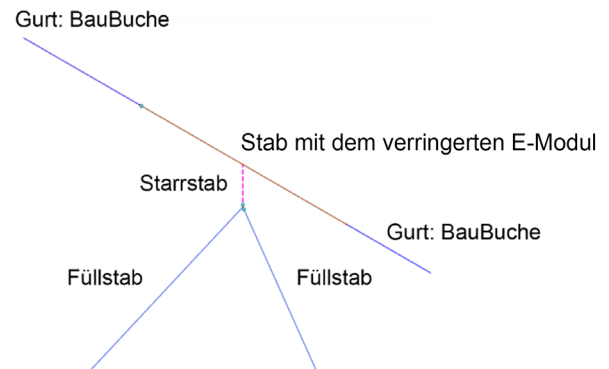
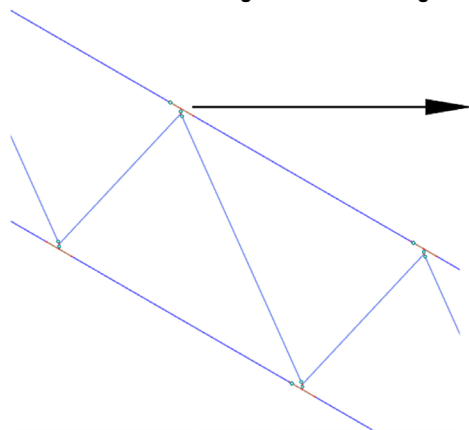


Abb. 6: Kraftübertragung und Ausmittigkeit ($a = 55 \text{ mm}$) im Knotenbereich und Exzentrizität ($e = 9,5 \text{ mm}$) des Anschlussblechs sowie Simulation der Knotenverbindung und ihrer Steifigkeit in FE-Modell; Quelle: t-lab, RPTU Kaiserslautern-Landau

Fertigungskonzept

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde ein Fertigungskonzept für den Fachwerkträger entwickelt, das eine vollständige Vorfertigung mit hoher Passgenauigkeit der Knotenverbindung mit Schubnocken ermöglicht. Zur Validierung des Konzepts wurde ein Abschnitt ($L = 5,97 \text{ m}$, $H = 1,66 \text{ m}$) eines 16 m langen Hybridfachwerkträgers im Maßstab 1:1 mit dem folgenden Fertigungskonzept gefertigt.

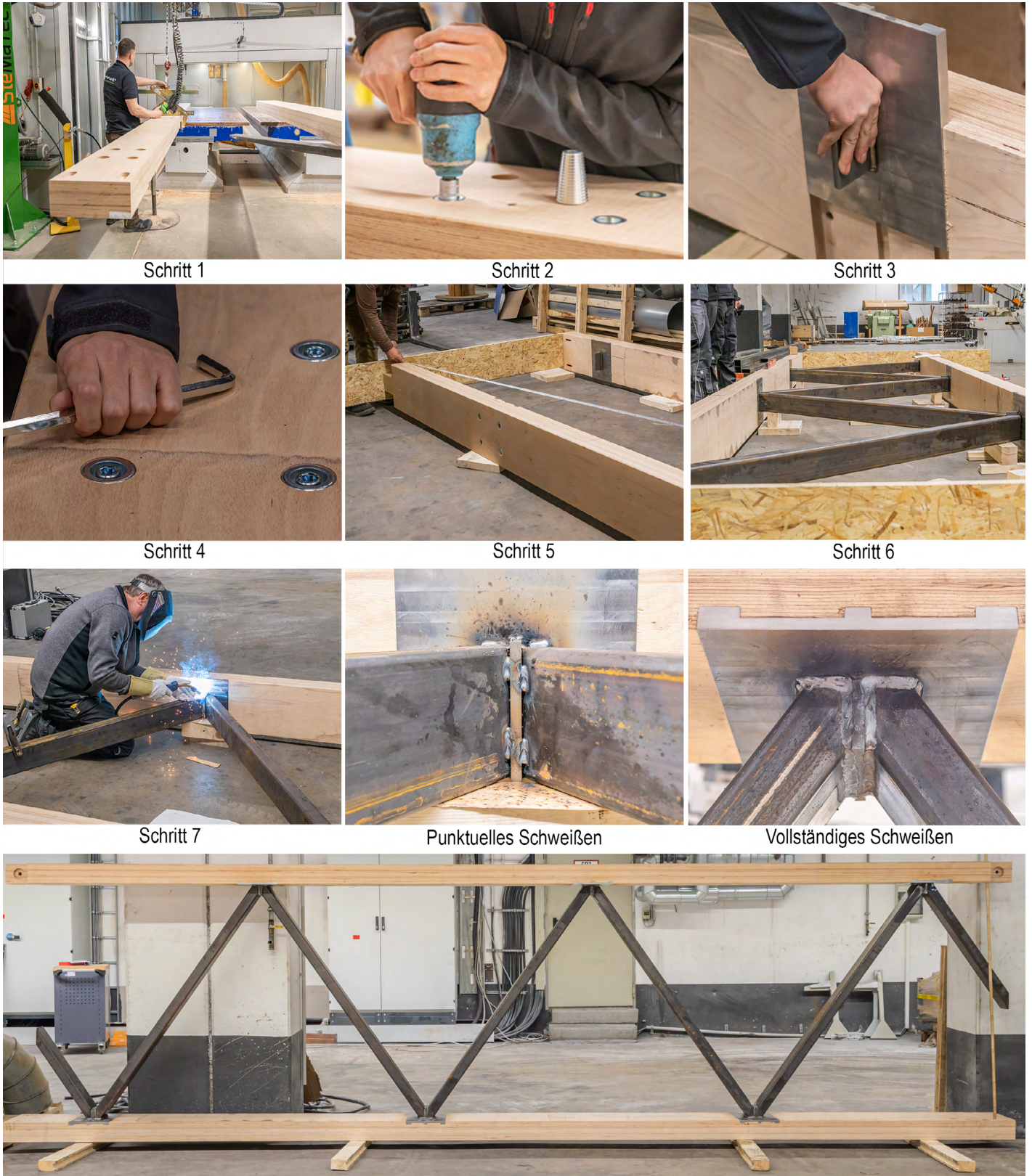


Abb. 7: Fertigungsprozesse des Mock-up-Modells in M 1:1, Abschnitt eines Referenzträgers (Spannweite $L = 16$ m, Trägerabstand $B = 5$ m, Trägerhöhe $H = 1,66$ m, Füllstabwinkel $= 55^\circ$, Füllstabquerschnitt: $60 \times 120 \times 6,3$ mm, Holzgurtquerschnitt: 120×300 mm); Quelle: t-lab, RPTU Kaiserslautern-Landau

1. Bearbeitung der Holzgurte mittels CNC-Maschine
2. Einschrauben der Konusmuffen in die Holzgurte
3. Positionieren der Anschlussbleche in den gefrästen Taschen der Holzgurten
4. Fixieren der Anschlussbleche mit Zylinderkopfschrauben
5. Positionieren der Holzgurte mit Hilfe von zwei OSB-Platten
6. Positionieren der Stahlfüllstäbe zwischen den Holzgurten
7. Punktueller Heftschweißen der Stahlfüllstäbe an die Anschlussbleche
8. Demontage der Holzgurte nach dem punktuellen Schweißen
9. Vollständiges Verschweißen der Stahlfüllstäbe mit den Anschlussblechen
10. Endmontage der Holzgurte mit der vollständig geschweißten Stahlkomponente

Die Fertigungsprozesse sind in Abbildung 7 dargestellt. Bei der ersten Mock-up-Fertigung wurde nach Schritt 6 unmittelbar die vollständige Schweißung der Knotenverbindung durchgeführt. Die dabei kontinuierlich hohe Wärmeentwicklung führte jedoch zu einer sichtbaren Verkohlung der Holzguroberfläche. Deshalb wurde das Fertigungskonzept um die Schritte 7–10 erweitert: Zunächst erfolgt ein punktueller Heftschweißen zur Fixierung der Füllstäbe. Anschließend werden die Holzgurte demontiert, sodass das vollständige Verschweißen der Stahlkomponente außerhalb des Holzes erfolgen kann. Abschließend werden die Holzgurte wieder mit der vollständig verschweißten Stahlkomponente montiert.

Das Eindrehen der Konusmuffen in den Holzkomponenten aus Laubholz (Schritt 2) ist aufgrund der hohen Rohdichte erschwert. Deshalb werden die konischen Vorbohrungen vergrößert. Zusätzlich wird die Gewindetiefe der Konusmuffe reduziert, um den Widerstand beim Eindrehen zu verringern. Die vergrößerte Bohrung kann dazu führen, dass die Muffe axial versetzt eingebaut wird, was zu Bauungenauigkeiten führt. Jedoch sorgt die konische Geometrie der Konusmuffe für eine Führung, die eine präzise Positionierung der Muffen in den Holzkomponenten sicherstellt und derartige Ungenauigkeiten verhindert. Durch die Optimierung der Fräsparameter und die Verwendung des entwickelten Fräasers beträgt die Fräszeit für eine Bohrung lediglich 10 Sekunden, sodass der Fertigungsprozess der Holzgurte durch den Bohrvorgang nicht wesentlich beeinträchtigt wird.

Wiederverwendungskonzept

Da der Großraumtransport großer Trägerlängen logistisch anspruchsvoll ist, soll die Tragwerkskonstruktion vor allem mit dem Ziel einer hohen Nutzungsflexibilität entwickelt werden. Standardisierte Konstruktionsmaße sowie aufeinander abgestimmte Wand- und Deckenelemente ermöglichen Umbauten, ohne Eingriffe in das Tragwerk vorzunehmen. Zudem können die Hybridfachwerkträger mithilfe reversibler Auflager- und Knotenverbindungen zerstörungsfrei demontiert, als Ganzes wiederverwendet oder in ihre Holz- und Stahlkomponenten zerlegt werden.

Nach der Demontage der Fachwerkträger beginnt die Übergangsphase, in der sichergestellt wird, dass alle Bauelemente in einem qualitätsgesicherten Zustand für die Wiederverwendung bereitstehen. In einer Bewertungsstrategie in (Janjua et al. 2025) der Wiederverwendbarkeit von Holzbaukomponenten wird beschrieben, dass in der ersten Bewertungsstufe externe Einflussfaktoren wie Feuchtigkeit, Belastungshistorie sowie biologische und thermische Degradation dokumentiert werden und anschließend die Leistungsüberprüfung erfolgt, sodass je nach Ergebnis die Baukomponenten für die Wiederverwendung freigegeben werden oder einem Downcycling-Prozess zugeführt werden sollen. Nach dem Rückbau erfolgt die Koordination zwischen Organisations- und Logistikteam, um die Bauelemente in ein witterungsgeschütztes Zwischenlager zu transportieren (John/Stark 2021). Dort finden die Qualitäts- und Funktionsprüfungen nach (Dietsch et al. 2025) statt, bevor die geprüften Elemente für die Wiederverwendung freigegeben werden. Die in den Literaturen beschriebenen Verfahren sowie die im Forschungsprojekt entwickelten Ansätze sind im Folgenden zusammengefasst:

Identifikation und Dokumentation der Bauelemente:

Jeder Fachwerkträger wird eindeutig gekennzeichnet und mit allen relevanten Daten dokumentiert, einschließlich Konstruktionsdetails, Materialkosten, statische Anwendbarkeit sowie Belastungshistorie und so weiter. Die Dokumentation stellt eine spätere Rückverfolgbarkeit und Wiederverwendbarkeit sicher.

Zwischenlagerung und Logistik:

Lagerung erfolgt unter Bedingungen, die Feuchtigkeitsschutz, Stabilität und Zugang für eventuelle Nachbearbeitungen gewährleisten (John/Stark 2021). Die Logistikplanung umfasst die Transportwege innerhalb der Baustelle oder zum Zwischenlager, Ladungssicherung

und gegebenenfalls Zerlegung der Bauelemente für den Transport.

Qualitäts- und Funktionsprüfung:

Vor dem Wiedereinsatz sind die Fachwerkträger umfassend zu prüfen: mechanische Schäden, Risse, plastische Verformungen, Korrosion und sonstige Tragfähigkeitsbeeinträchtigungen (Dietsch et al. 2025). Besonderes Augenmerk gilt den Holzgurten: Feuchteintrag, Überlastungshistorie und Verformungen (Janjua et al. 2025). Zusätzlich wird der Schlupfzustand der Schubnocken visuell und messtechnisch kontrolliert, um Lockerungen frühzeitig zu erkennen.

Nachbearbeitung beziehungsweise Austausch von Baukomponenten:

Auf Grundlage der Qualitäts- und Funktionsprüfung wird bestimmt, welche Baukomponenten des Hybridfachwerkträgers für eine weitere Nutzung geeignet sind. Dies ermöglicht eine gezielte Nachbearbeitung oder den Austausch von Baukomponenten, während intakte Baukomponenten unverändert wiederverwendet werden können.

Freigabe für den Wiedereinbau:

Nach erfolgter Prüfung und eventueller Nachbearbeitung der Bauelemente erfolgt eine formale Freigabe zum Wiedereinbau. Sie dokumentiert die Prüfergebnisse und Bemessung jeder Komponente und gewährleistet die Sicherheit, Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit der wiederverwendeten Bauelemente (Dietsch et al. 2025).

Produktdefinition der Re-Use-Bauelemente:

Jedes Bauelement erhält eine eindeutige Produktdefinition mit Angaben zu Eigenschaften, Tragfähigkeit, Ökobilanz, Nutzungsdauer und so weiter. Diese Dokumentation ermöglicht eine präzise Identifikation und Wiederverwendung geprüfter Bauelemente und Baukomponenten, reduziert Neubeschaffungskosten und Aufwand und stärkt die ökologische Effizienz des Bauens.

Methodik und Projektverlauf

Methodik

(1) Konstruktive Entwicklung und Systemdefinition

Im ersten Schritt wurde ein standardisiertes und rückbaubares Konstruktionskonzept für Hybridfachwerkträger entwickelt. Die Entwicklung erfolgte auf Basis der Anforderungen kreislauffähiger und nutzungsflexibler Hallenbauten sowie der relevanten Nutzungs- und Gebrauchsklassen. Rastermaße, Geometrien der Baukomponenten sowie reversible Auflager- und Knotenverbindungen wurden definiert.

(2) Experimentelle Untersuchungen und Bemessungskonzept

Zur Validierung der neu entwickelten Knotenverbindung erfolgten experimentelle Untersuchungen. Die Versuchsdaten wurden anschließend in numerische Berechnungsmodelle integriert. Auf der Grundlage der Untersuchungsergebnisse und der definierten Bereiche der Konstruktionsmaße wurde ein Bemessungskonzept erstellt.

(3) Ökobilanzielle Analyse

Parallel dazu wurde eine ökologische Analyse des Fachwerkträgers und der gesamten Hallenkonstruktion durchgeführt, die auf GWP-Gesamtbilanz aller Lebenswegmodule basiert. Die ökologische Analyse ermöglichte die Optimierung der Geometrien der Baukomponenten und Bauelemente. Die Verknüpfung der Ökobilanz mit den normativen und statischen Anforderungen führte zur Ableitung geeigneter standardisierter Konstruktionsmaße.

(4) Fertigungs- und Wiederverwendungskonzept

Herstellung eines realmaßstäblichen Mock-ups zur Validierung der konstruktiven und fertigungstechnischen Annahmen. Zudem wurde ein Wiederverwendungskonzept entwickelt, welches die Demontage, Logistik, Qualitätsprüfung sowie Wiedereinbau und Dokumentation umfasst.

Projektverlauf

Zu Beginn des Projekts wurde das Anwendungspotenzial des Hybridfachwerkträgers untersucht. Dazu gehörten die Festlegung der Nutzungsklasse und Gebrauchsklasse sowie die Definition der maßgebenden Lastannahmen für Dachaufbau, Schnee- und Windlast.

Im nächsten Schritt erfolgte die Entwicklung der reversiblen Auflagerkonstruktion an den Stützen und der reversiblen Knotenverbindung zwischen den Stahlfüllstäben und den Holzgurten. Es zeigte sich, dass die Tragfähigkeit des Anschlussknotens zwischen Stahl und Holz maßgebend für die Bemessungen im GZT ist. Daher wurden gezielt experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Der Versuchsaufbau und die Ergebnisse sind in den Kapiteln Druckscherversuche und Durchziehversuche dargestellt. Auf Basis der experimentellen Resultate wurde ein vollständiges Bemessungskonzept entwickelt und mögliche Konstruktionsmaße ermittelt.

Gleichzeitig wurde die Ökobilanzierung des Fachwerkträgers und der gesamten Hallenkonstruktion durchgeführt. Die ökologische Bewertung bestätigte die ökologische Günstigkeit des Fachwerkträgers durch Kombination von BauBuche GL 75 und Recyclingstahl hinsichtlich Ressourcen- und CO₂-Einsparungen. Die Ökobilanzierung identifizierte zugleich die ökologisch günstigsten Kombinationen aus Spannweite und Trägerabstand. Die Trägerabstände wurden schließlich auf 2,5 m und 5 m standardisiert.

Abschließend wurde das praxistaugliche Fertigungskonzept von der Bereitstellung der einzelnen Baukomponenten bis hin zur Montage des Fachwerkträgers entwickelt. Zur Validierung wurde ein Mock-up im Maßstab 1:1 hergestellt. Zudem wurde ein Wiederverwendungskonzept ausgearbeitet, das den Prozess vom Rückbau über die Zwischenlagerung bis hin zum erneuten Einbau systematisch beschreibt.

Literatur

BMWSB – Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, 2024: ÖKOBAUDAT: Informationsportal Nachhaltiges Bauen, Version 2024 I. Zugriff: <https://www.oekobaudat.de> [abgerufen am 01.02.2025].

Dietsch, P.; Ummenhofer, T.; Frese, M.; Müller, M.; Winter, S.; Mensing, M.; Ehrenlechner, C., 2025: Leitfaden zur Wiederverwendung tragender Bauteile – Stahl- und Holzbau. Herausgeber: Ministerium für Landesentwicklung und Wohnen Baden-Württemberg. 1. Auflage. Zugriff: https://mlw.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-mlw/intern/Dateien/06_Service/Publikationen/Bauen_und_Wohnen/2025-04-30-MLW_Broschuere_TragendeBauteile-BF_LNF.pdf [abgerufen am 20.06.2025].

IBU – Institut Bauen und Umwelt e. V., 2024: IBU.data. Zugriff: <https://ibu-epd.com/ibu-data-start/> [abgerufen am 01.02.2025].

Janjua, H. S.; Al-Shorayer, A. H.; Grimsom, E. L.; Kraniotis, D.; Tadayon, A., 2025: Framework for Quality Documentation for Reusing Structural Timber Components. In: Kioumarsis, M.; Shafiei, B. (Hrsg.): The 1st International Conference on Net-Zero Built Environment. Cham: 1301-1311. https://doi.org/10.1007/978-3-031-69626-8_109

John, V.; Stark, T., 2021: Wieder- und Weiterverwendung von Baukomponenten (RE-USE). Herausgeber: BBSR – Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung. BBSR-Online-Publikation 27/2021. Bonn. Zugriff: <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/bbsr-online/2021/bbsr-online-27-2021.html> [abgerufen am 15.04.2025].

Neuhaus, H., 2017: Ingenieurholzbau: Grundlagen-Bemessung-Nachweise-Beispiele. 4. Auflage. Wiesbaden.

Sansom, M.; Meijer, J., 2002: Life-cycle assessment (LCA) for steel construction. Herausgeber: Office for Official Publications of the European Communities. Luxemburg.

UNEP; Global ABC, 2024: Global Status Report for Buildings and Construction. Nairobi. Zugriff: <https://globalabc.org/resources/publications/global-status-report-buildings-and-construction-20242025-not-just-another> [abgerufen am 01.06.2025].

Projektbeteiligte

t-lab
Rheinland-Pfälzische Technische Universität
Kaiserslautern-Landau
Pfaffenbergstraße 95, Gebäude 1
67663 Kaiserslautern

t-lab Holzarchitektur
und Holzwerkstoffe

Impressum

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

ZUKUNFT BAU
FORSCHUNGSFÖRDERUNG



Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.

Aktenzeichen: 10.08.18.7-22.11
Projektlaufzeit: 01.23 bis 03.25
Bundesmittel in €: 219.155,24

Zuwendungsempfängende:
Rheinland-Pfälzische Technische Universität
Kaiserslautern-Landau

Über Zukunft Bau

Mit dem Innovationsprogramm Zukunft Bau stärkt das BMWSB gemeinsam mit dem BBSR die Zukunfts- und Innovationsfähigkeit des Bausektors. Die Zukunft Bau Forschungsförderung schafft Vorbilder, die die Machbarkeit von neuen Ideen ausloten und die Baupraxis weiterentwickeln. Gefördert werden Forschungs- und Entwicklungsvorhaben, die einen Gebäudebezug als Schwerpunkt haben und einen substantiellen Beitrag zur Bewältigung aktueller und künftiger Herausforderungen im Baubereich erwarten lassen.

zukunftbau.de


Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und
Raumforschung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und
Raumordnung (BBR)
Deichmanns Aue 31–37
53179 Bonn

Wissenschaftliche Begleitung

Dr.-Ing. Michael Brüggemann,
Brüggemann Kisseler Ingenieure
im Auftrag des BBSR, Referat WB 3
„Forschung und Innovation im Bauwesen“
zb@bbr.bund.de

Autorinnen und Autoren

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Graf 
RPTU Kaiserslautern-Landau, Kaiserslautern
juergen.graf@rptu.de

Boran Hao 
RPTU Kaiserslautern-Landau, Kaiserslautern

Wenchang Shi 
RPTU Kaiserslautern-Landau, Kaiserslautern

Redaktion

RPTU Kaiserslautern-Landau, Fachbereich
Architektur, t-lab Holzarchitektur und Holzwerkstoffe

Stand

Januar 2026

Grafisches Konzept

www.sans-serif.de

Satz und Barrierefreiheit

www.sans-serif.de
www.satzweiss.com

Bildnachweis

Titelbild: t-lab, RPTU Kaiserslautern-Landau

Vervielfältigung



Dieses Werk ist lizenziert unter der Creative Commons-Lizenz Attribution – Share Alike 4.0 (CC BY-SA 4.0). Diese Lizenz erlaubt unter Voraussetzung der Namensnennung des Urhebers und der Weitergabe unter gleichen Bedingungen die Bearbeitung, Vervielfältigung und Verbreitung des Materials in jedem Format oder Medium für beliebige Zwecke, auch kommerziell. Nähere Informationen zu dieser Lizenz finden sich unter: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.de/>.

Die Bedingungen der Creative Commons-Lizenz gelten nur für Originalmaterial. Die Wiederverwendung von Material aus anderen Quellen erfordert ggf. weitere Nutzungsgenehmigungen durch den jeweiligen Rechteinhaber.

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

Zitierweise

Graf, J.; Hao, B.; Shi, W., 2026: Kreislauffähiger Hybridträger aus Stahl und Holz: Fachwerkträger aus Holzgurten und Füllstäben aus rückgebautem Baustahl. Herausgeber: BBSR – Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung. Zukunft Bau – Forschung KOMPAKT 01/2026. Bonn. <https://doi.org/10.58007/fbz4-sm11>

Bonn 2026
ISSN 2944-067X

Dieses Werk ging aus folgendem Forschungsbericht hervor:

Graf, J.; Hao, B.; Shi, W., 2026: Standardisierter, kreislaueffizienter Hochleistungsträger aus Recyclingstahl und Holz. Kaiserslautern-Landau.

Hier geht es zum kostenfreien Forschungsbericht:

<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.17571.72484>