

Entwicklung von Hybridbauteilen aus Stahl und Holz zur Erhöhung der Tragfähigkeit und der Feuerwiderstandsdauer von Stahltragwerken – Kammerholz

IGF-Vorhaben

01IF22428N

Laufzeit

01.06.2022 bis 31.05.2025

Forschungsvereinigung

Internationaler Verein für Technische Holzfragen e. V. (iVTH)
Riedenkamp 3
38108 Braunschweig

Forschungseinrichtungen

Forschungseinrichtung 1:

Technische Universität Braunschweig - Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB)
Fachgebiet Brandschutz
Beethovenstraße 52
38106 Braunschweig

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jochen Zehfuß
Dr.-Ing. Jan Lyzwa
Jan-Gabriel Scheller, M.Sc.

Forschungseinrichtung 2:

Technische Universität Braunschweig - Institut für Stahlbau
Beethovenstraße 51
38106 Braunschweig

Univ.-Prof. Dr. sc. techn. Klaus Thiele
Dr.-Ing. Julian Unglaub
Robby Weiser, M.Sc.

Forschungseinrichtung 3:

Technische Universität Braunschweig - Institut für Baukonstruktion und Holzbau
Schleinitzstraße 21A
38106 Braunschweig

Prof. Dr.-Ing. Mike Sieder
Daniel Dieren, M.Sc.
Moritz Tronnier, M.Sc.

1 Einordnung und Zielsetzung

Im Rahmen des IGF-Vorhabens 01IF22428N wurde ein neuartiger Stahl-Holz-Hybridträger („Kammerholz-Träger“) entwickelt und umfassend untersucht (siehe Abbildung 1). Ausgangspunkt waren der begrenzte Feuerwiderstand ungeschützter schlanker Stahlprofile sowie die begrenzte Tragfähigkeit von Holzquerschnitten bei hochbeanspruchten Tragsystemen. Ziel war es, durch die Kombination beider Baustoffe ein Hybridbauteil zu entwickeln, das sowohl im Kaltzustand als auch unter Brandeinwirkung eine verbessertes Trag- und Stabilitätsverhalten aufweist, ohne eine Querschnittsvergrößerung des Stahlprofils zu erfordern.



Abbildung 1: Untersuchtetes Hybridbauteil als IPE 300 Träger mit Kammerholz bestehend aus Fichte Brettschichtholz

Der entwickelte Kammerholz-Träger basiert auf einem Regelstahlprofil (IPE 300, S235), dessen Kammern mit Holzquerschnitten aus Brettschichtholz (GL24h, Fichte) bzw. Furnierschichtholz aus Buche (BauBuche GL75) ausgefacht werden. Der Schubverbund zwischen Stahl und Holz wird über stiftförmige Verbindungsmittel hergestellt. Ergänzend wurden brandschutztechnische Modifikationen am Unterflansch untersucht, um den Wärmeeintrag gezielt zu reduzieren.

Das Forschungsvorhaben verfolgte die folgenden übergeordneten Ziele:

- experimentelle und numerische Erfassung des mechanischen, thermischen und thermomechanischen Verbundverhaltens,
- Bewertung des Stabilitätsgewinns bei schlanken Regelstahlprofilen,
- Bewertung der Schutzwirkung des Kammerholzes im Brandfall,
- Ableitung eines praxisgerechten Bemessungskonzepts für Kammerholz-Hybridträger.

2 Stand der Forschung und Forschungsbedarf

Der Stand der Technik zeigt, dass hybride Stahl-Holz-Systeme bislang überwiegend als Verstärkung von Holzträgern oder als verkleidete Stahlbauteile untersucht wurden. Regelstahlprofile mit kammerweise eingelegten Holzquerschnitten standen bislang selten im Fokus systematischer Untersuchungen. Insbesondere fehlten:

- belastbare experimentelle Daten zur Stabilitätssteigerung (Biegedrillknicken, Torsion),
- Untersuchungen zum thermischen Verbundverhalten mit unterschiedlichen Holzarten und Verbindungsmitteln,
- Erkenntnisse zur Wirkung zusätzlicher brandschutztechnischer Maßnahmen am Unterflansch,
- ein praxisgerechtes Bemessungskonzept für Stahl-Holz-Hybridträger im Brandfall.

Vor diesem Hintergrund schließt das vorliegende Vorhaben eine Forschungslücke zwischen klassischen Stahlträgern, kammerbetonierten Verbundträgern und Holz-Stahl-Mischkonstruktionen.

3 Methodisches Vorgehen

Das Verbundforschungsvorhaben wurde von drei Forschungseinrichtungen der TU Braunschweig (Brandschutz, Stahlbau, Holzbau) in sechs Arbeitspaketen bearbeitet. Die Untersuchungen folgten einer mehrstufigen Struktur, um die Forschungsfragen ganzheitlich zu bearbeiten:

1. Kleinskalige Versuche zum mechanischen Verbundverhalten und der Charakterisierung der Verbindungsmittel (Auszug und Abscheren).
2. Mittelskalige Brandversuche zur Untersuchung des thermischen Verbundverhaltens unter Normbrandbeanspruchung.
3. Großversuche zum mechanischen Verbundverhalten im Kaltzustand (Vierpunktbiegung, Torsion) zur Bewertung der Steifigkeits- und Stabilitätssteigerung.
4. Großversuche zum thermomechanischen Verbundverhalten unter kombinierter Last- und Brandbeanspruchung.
5. Numerische Untersuchungen (mechanische und thermische FE-Modelle) zur Interpretation und Verallgemeinerung der Versuchsergebnisse sowie zur Generierung von Eingangsparametern zur Bemessung.
6. Ableitung eines Bemessungsansatzes für Biegebeanspruchungen um die starke Achse für die praktische Anwendung.

4 Materialien und Verbindungsmittel

Untersucht wurden zwei Holzarten mit unterschiedlicher Rohdichte und mechanischer Leistungsfähigkeit:

- Brettschichtholz Fichte GL24h als konventioneller Holzbaustoff,
- Furnierschichtholz BauBuche GL75 als hochfester Laubholzwerkstoff.

Als Verbindungsmittel kamen selbstbohrende Stabdübel (SBD, $\varnothing$ 7,5 mm) sowie Kunstharzpressholzdübel (KHPHD, $\varnothing$ 20 mm) zum Einsatz (siehe Abbildung 2). Die Auswahl erfolgte vor dem Hintergrund der Herstellbarkeit, Recyclingfähigkeit, Wirtschaftlichkeit, Verbundsteifigkeit und des Brandverhaltens.



Abbildung 2: Selbstbohrender Stabdübel (links), Kunstharzpressholzdübel (rechts)

In den kleinskaligen Versuchen konnte ein duktileres Tragverhalten der SBD festgestellt werden, in Kombination mit BauBuche waren die ermittelten maximalen Traglasten vergleichbar. Die KHPHD wiesen in Fichte eine höhere Anfangssteifigkeit auf, als die SBD, das Versagen war spröde.

Aufgrund ihrer Brennbarkeit und des ungünstigen Brandverhaltens erwiesen sich die KHPHD als nicht geeignet für den Einsatz im Kammerholz-Träger.

5 Thermisches Verbundverhalten (mittelskalige Versuche)

Die mittelskaligen Brandversuche belegten eine ausgeprägte Schutzwirkung des Kammerholzes auf den Stahlquerschnitt. Während ein ungeschützter IPE 300-Träger bei dreiseitiger Normbrandbeanspruchung bereits nach etwa 10 min eine kritische Stahltemperatur von 500 °C erreicht, konnte dieser Zeitpunkt durch den Einsatz von Kammerholz auf etwa 60 min am Oberflansch und Steg hinausgezögert werden.

Dabei zeigten sich folgende wesentliche Ergebnisse:

- BauBuche wirkte im Vergleich zu Fichte tendenziell günstiger, insbesondere im Bereich der Stegtemperaturen.

- Der Einfluss der Verbindungsmittelanordnung auf die Stahltemperaturen war gering; Wärmeeintrag über die SBD spielte gegenüber den freien Stahlträgeroberflächen eine untergeordnete Rolle.
- Kunstharzpressholzdübel führten infolge ihrer Brennbarkeit zu einem frühzeitigen Verlust des thermischen Verbunds.

Zur Reduktion des Wärmeeintrags am Unterflansch wurden drei Modifikationen untersucht:

- intumeszierendes Fugendichtband,
- Feuerverzinkung des Stahlträgers,
- intumeszierende Beschichtung des Unterflansches.

Während Fugendichtband und Verzinkung keinen relevanten Einfluss auf die Temperaturentwicklung zeigten, erwies sich die intumeszierende Beschichtung des Unterflansches als hochwirksam. Durch ihre Aktivierung konnte die Stahltemperatur auch am Unterflansch deutlich reduziert und der kritische Temperaturbereich verzögert erreicht werden. Die Kombination aus Kammerholz zum Schutz von Oberflansch und Steg sowie reaktivem Brandschutzsystem am Unterflansch stellte sich damit als zielführend heraus.

6 Mechanische Großversuche im Kaltzustand

Die mechanischen Großversuche umfassten Vierpunktbiegeversuche um die starke und schwache Achse sowie Torsionsversuche an stützenartigen Prüfkörpern. Ziel war die experimentelle Bewertung der Steifigkeits- und Stabilitätssteigerung.

Dabei konnte festgestellt werden, dass:

- bei Biegung um die starke Achse, der Steiner-Anteil der Kammerhölzer vollständig aktiviert wird, folglich vollständiger Verbund vorliegt.
- eine teilweise Verbundwirkung festgestellt werden konnte. Dabei war die Verbundtragwirkung der Verbundträger mit BauBuche höher, als unter Verwendung von Fichte BSH. Der Einbau der Kammerhölzer mit einem Verbindungsmittelabstand von 20 cm führte gegenüber 30 cm zu einer leichten Steigerung des Verbundtragverhaltens.
- die Torsionssteifigkeit konnte gegenüber dem reinen Stahlprofil deutlich gesteigert werden.

Die Versuchsergebnisse deuten darauf hin, dass die Kammerholzverstärkung von Regelstahlprofilen eine stabilisierende Wirkung erzielt. Unter Verwendung der experimentell ermittelten Steifigkeitswerte im Nachweis gegen Biegedrillknicken nach DIN EN 1993-1-1 konnte gegenüber dem unverstärkten IPE 300-Träger eine Steigerung des Biegedrillknickwiderstandsmoments um 55 % ermittelt werden.

7 Thermomechanische Großversuche

Die thermomechanischen Großversuche bestätigten die im Kaltzustand und in den mittelskaligen Brandversuchen gewonnenen Erkenntnisse unter realitätsnahen Randbedingungen. Die Kammerholz-Träger zeigten ein verbessertes Stabilitätsverhalten unter Brandbeanspruchung.

Träger mit BauBuche als Kammerholz erreichten Feuerwiderstandsdauern von bis zu 71 min, während vergleichbare Träger mit Fichte bereits nach etwa 37 min versagten und ungeschützte IPE 300 Träger ohne Kammerholz eine rechnerische Feuerwiderstandsdauer von 12 min aufwiesen. Das Versagen war häufig durch ausgeprägte Temperaturgradienten zwischen Ober- und Unterflansch geprägt, die in vereinfachten Bemessungsansätzen bislang nicht berücksichtigt werden.

8 Numerische Untersuchungen

Die entwickelten mechanischen und thermischen FE-Modelle erlaubten eine detaillierte Abbildung der Temperaturverteilungen (siehe Abbildung 3). Die numerischen Ergebnisse zeigten eine gute Übereinstimmung mit den experimentellen Daten und ermöglichten Parameterstudien zur Verallgemeinerung der Erkenntnisse. Aus den thermischen Simulationen konnte der Restquerschnitt des Kammerholzes sowie die thermisch reduzierten Stahleigenschaften ermittelt werden, woraus sich für den anschließenden Bemessungsansatz Reduktionsbeiwerte als Eingangsgrößen ableiten ließen (siehe Schritte 1-3 und 5 in Abbildung 4).

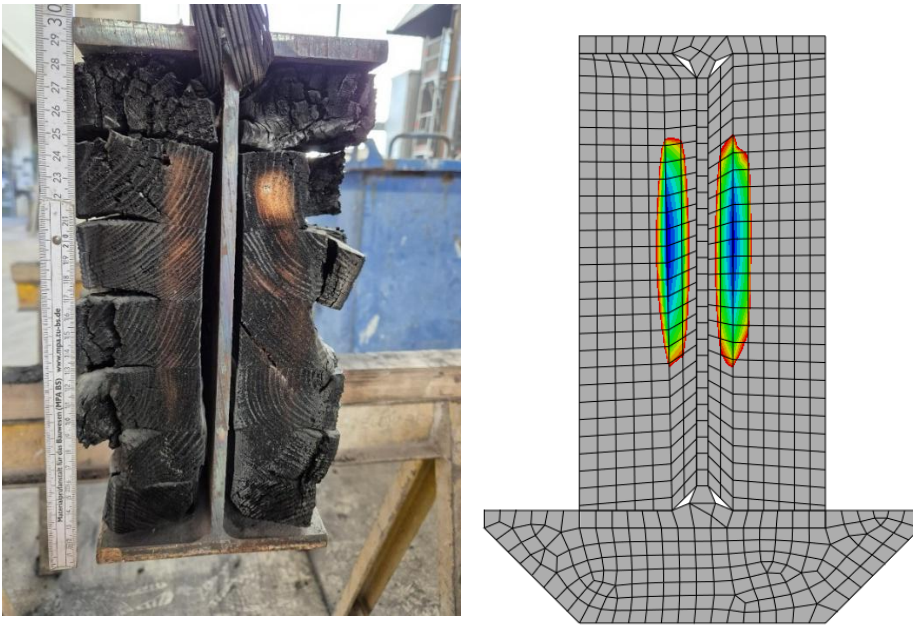


Abbildung 3: Vergleich abgeleschter Querschnitt nach mittelskaligem Versuch (links) und 300 °C-Isotherme aus Simulation (rechts) nach jeweils 60 min

9 Bemessungsansatz

Auf Grundlage der gewonnen Erkenntnisse wurden Möglichkeiten für ein vereinfachtes, praxisnahes Bemessungsmodell untersucht – idealerweise unter Einbeziehung bestehender, etablierter Bemessungsregeln. Da das Tragverhalten im Kaltzustand lediglich ein hybrides und kein vollwertiges Verbundtragverhalten darstellt, das durch die Kenntnis der Biegesteifigkeiten im Anfangs- und Endzustand beschrieben werden kann, konzentriert sich die Entwicklung des Bemessungsmodells in erster Linie auf die Heißbemessung. Durch den Abbrand der Holzquerschnitte sowie den Steifigkeitsverlust des Stahlquerschnitts verschieben sich die neutralen Achsen, wodurch eine Verbundtragwirkung entsteht, die im Modell berücksichtigt werden muss. Ziel ist es, die Tragfähigkeit und Steifigkeit des Trägers für verschiedene Brandeinwirkungsdauern sowie in Abhängigkeit unterschiedlicher geometrischer Parameter und konstruktiver Randbedingungen zu bestimmen. Hierbei werden Brandeinwirkungsdauern von 30 min und 60 min gemäß der baurechtlichen Klassifizierung F30 (bzw. R30) und F60 (bzw. R60) sowie zusätzlich ein Zwischenwert von 45 min unterschieden.

Der entwickelte Bemessungsansatz schlägt vor, in Analogie zur klassischen Heißbemessung im Stahl- und Holzbau, die Biegebemessung des Kammerholz-Hybridträgers auf Basis effektiver bzw. ideeller Querschnittswerte durchzuführen. Die Biegebemessung des Hybrid- bzw. Verbundträgers erfolgt dabei mithilfe eines Stabwerksmodells unter Ansatz der unter Brandeinwirkung reduzierten mechanischen Eigenschaften (Biege- und Dehnsteifigkeiten). Die Ermittlung erfolgt am Stabwerksmodell unter Verwendung der effektiven Teilquerschnitte zu den Zeitpunkten $t = 30, 45, 60$ min usw. sowie unter Berücksichtigung von Koppelstäben mit Ersatzbiegesteifigkeiten zur Abbildung der

Verbindungsmittelsteifigkeit. Die im Stabwerksmodell ermittelten Schnittgrößen können anschließend für den Nachweis mit den unter Brandeinwirkung reduzierten elastischen bzw. plastischen Momenten verglichen werden.

Für praxisübliche Querschnitte und Materialkombinationen wurden Abminderungsfaktoren der mechanischen Eigenschaften (Biegesteifigkeit, Dehnsteifigkeit, Tragfähigkeit, etc.) im Brandfall jeweils getrennt für den Stahl- und den Holzquerschnitt für gängige Profile anhand tabellarischer Übersichten exemplarisch ermittelt. Auf Basis numerischer Analysen werden – in Abhängigkeit von der Schutzwirkung des Holzquerschnitts und gegebenenfalls zusätzlicher Modifikationen (Beschichtung am Unterflansch) – Temperaturzonen im Stahlquerschnitt ermittelt. Den Querschnittsteilen mit definierter Temperatur zum Zeitpunkt t wurden anschließend temperaturabhängige Abminderungsfaktoren der mechanischen Eigenschaften zugewiesen. Damit lassen sich für den Brandfall reduzierte Biege- und Dehnsteifigkeiten sowie plastische Momente der untersuchten Verbundträger ermitteln.

Der vorgeschlagene Bemessungsansatz ist zusammenfassend im folgenden Prozessdiagramm dargestellt:

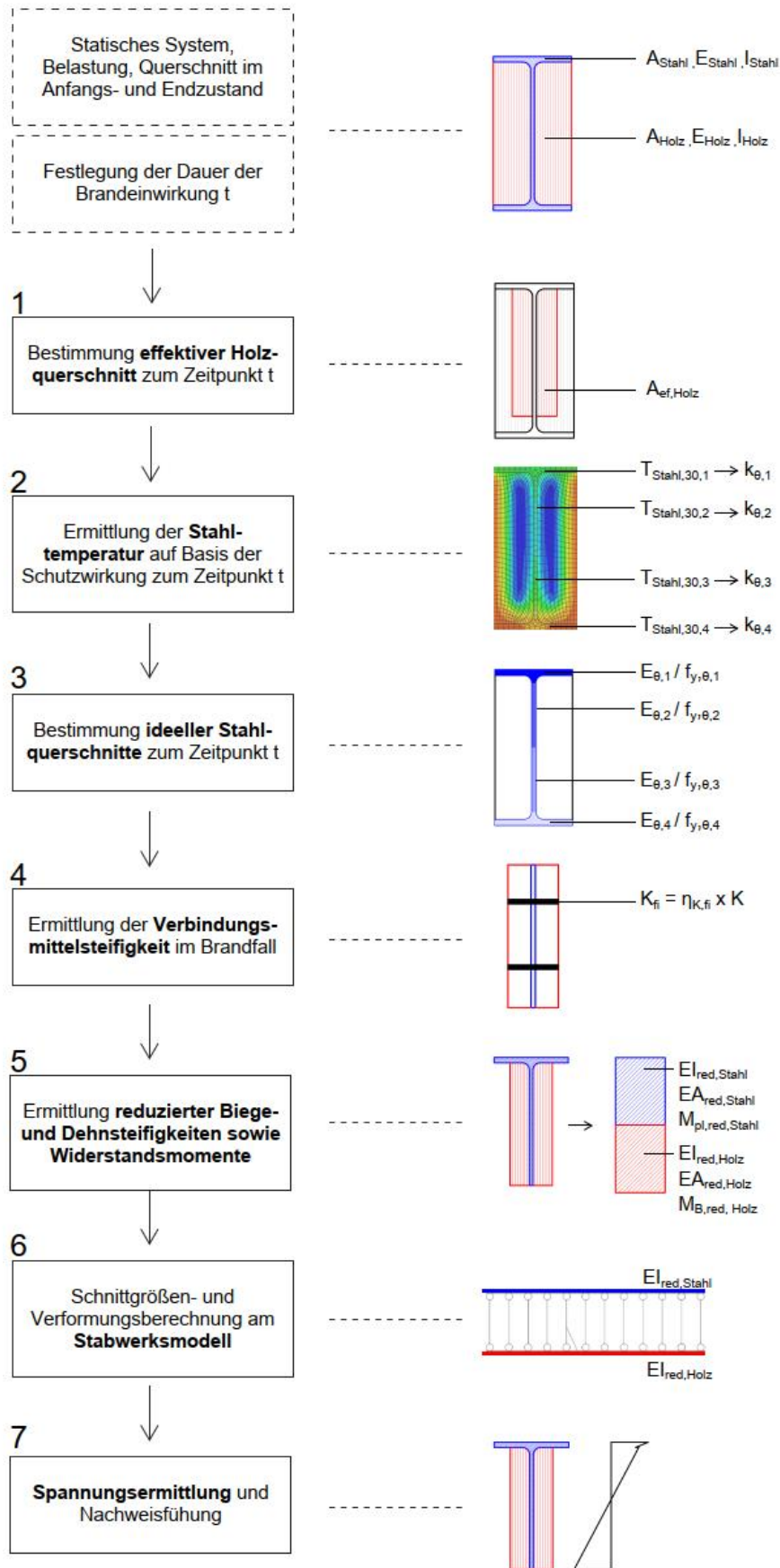


Abbildung 3: Ablauf der Heißbemessung von Kammerholz-Hybridträgern

10 Zusammenfassung und Ausblick

Das Forschungsvorhaben belegt das hohe Potenzial von Kammerholz-Hybridträgern zur Erhöhung der Stabilität und Feuerwiderstandsdauer von Stahltragwerken. Insbesondere die Kombination aus selbstbohrenden Stabdübeln und Furnierschichtholz aus Buche stellt eine leistungsfähige, nachhaltige und praxistaugliche Lösung dar.

Die Ergebnisse bilden eine Grundlage für weiterführende Forschung und für die zukünftige normative Einordnung hybrider Stahl-Holz-Systeme. Offene Fragestellungen bestehen insbesondere hinsichtlich der temperaturabhängigen Materialeigenschaften des Furnierschichtholzes aus Buche sowie der Übertragung der Erkenntnisse auf weitere Profiltypen und Systemvarianten.

Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben 01IF22428N "Entwicklung von Hybridbauteilen aus Stahl und Holz zur Erhöhung der Tragfähigkeit und der Feuerwiderstandsdauer von Stahltragwerken" des iVTH – Internationaler Verein für Technische Holzfragen e. V., Braunschweig und FOSTA – Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V. wurde über den DLR Projektträger im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Der vollständige Bericht kann bestellt werden bei: Internationaler Verein für Technische Holzfragen e.V. (iVTH e.V.) Riedenkamp 3, 38108 Braunschweig.