

High-Tech Timber Beam® – Ein Holz-Hybrid-Verbundträgersystem

High-Tech Timber Beam® –
hybrid system made of composites and timber

High-Tech Timber Beam® –
Un système porteur hybride avec du bois

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Karl Rautenstrauch
Institut für Konstruktiven Ingenieurbau IKI
Professur Holz- und Mauerwerksbau
Bauhaus-Universität Weimar
DE-Weimar



Der Autor bedankt sich bei
Martin Kästner, Markus Jahreis,
Wolfram Hädicke und Mike Opperl
für ihre Beiträge zu diesem Referat.

High-Tech Timber Beam® – Ein Holz-Hybrid-Verbundträgersystem

1. Einleitung

Das in Deutschland nachhaltig verfügbare Nadelholz ist ein sehr leistungsfähiger Baustoff, welcher insbesondere auch für Ingenieurkonstruktionen effektiv eingesetzt werden kann, da er bei geringem Eigengewicht eine hohe Tragfähigkeit sowie Steifigkeit aufweist. Da es sich hierbei um einen natürlichen Werkstoff handelt, welcher oftmals verhältnismäßig wenig veredelt zum Einsatz kommt, können daraus Schwankungen in den Eigenschaften resultieren, welche sich ungünstig auf die stets im modernen Bauwesen zu gewährleistende multiplen Anforderungen auswirken. Aus diesem Grund hat sich die mit dem Einsatz als Brettschichtholz vorgenommene erste wesentliche Vergütungsstufe in der modernen Baupraxis überaus bewährt. Mit dieser Technologie können, bis zu einem gewissen Grad, wuchsbedingte Schwachstellen ausgeglichen werden, sodass dieses bereits seit mehr als 100 Jahren erfolgreich eingesetzte Brettschichtholz relativ konstante Eigenschaften aufweist. Mit dieser zur Brettschichtholzerstellung eingesetzten Technologie und deren in den vergangenen Jahrzehnten weitergeführten Optimierung im Furnierschichtholz, scheint das Potential des Holzes nunmehr weitestgehend ausgeschöpft, sodass weitere signifikante Tragfähigkeitssteigerungen materialstrukturell allein auf der Basis des Baustoffes Holz kaum zu erreichen sein werden.

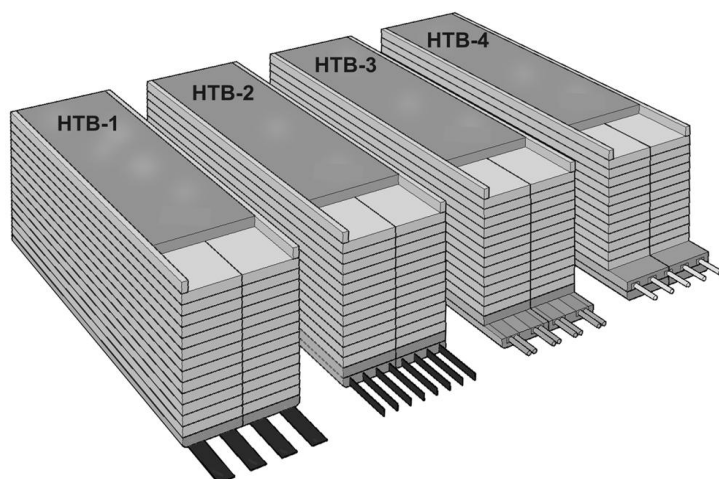


Abbildung 1: Prototypen des High-Tech Timber Beam®

Bei deutlich höheren Anforderungen hinsichtlich der aufnehmbaren Lasten und größeren Spannweiten, ist ein Tuning der Eigenschaften des Brettschichtholzträgers unter Verwendung von Hochleistungswerkstoffen möglich. Zur optimalen Ausnutzung der Eigenschaften aller dabei eingesetzten Baustoffe müssen diese zur Verklebung mit Holz geeignet sein und selbst hohe Steifigkeiten und Festigkeiten aufweisen. Die zu erzielenden synergetischen Vorteile des gemeinsamen Einsatzes von Hochleistungswerkstoffen und polymergebundenen Deckschichten in einem Holzverbundbauteil sind insbesondere das, bei herausragenden Festigkeitseigenschaften, verhältnismäßig geringe Gewicht der hinzugefügten Schichten, nahezu beliebige Einbaulängen und eine verhältnismäßig einfach im Vorfertigungsprozess zu realisierende Zusammenführung der einzelnen Hochleistungs-komponenten mit dem Brettschichtholz.

Das High-Tech Bauteil unterscheidet sich äußerlich kaum von einem herkömmliche Brettschichtholzträger, besitzt somit hohe Akzeptanz auf dem Markt und kann auch mit nahezu allen im Holzbau üblichen Anschlüssen versehen werden. Durch seine höhere Steifigkeit und Festigkeit kann es aber besonders bei weit gespannten Konstruktionen wesentlich schlanker ausgebildet werden und stellt so eine leistungsfähige Alternative beispielsweise zu Trägern aus Stahl, Stahlbeton oder Spannbeton dar. Ein weiterer Pluspunkt solcher hybriden Hochleistungsbauteile auf der Basis des nachwachsenden Rohstoffes Holz ist der

nach Ablauf der Nutzungsphase im Bauwerk sehr effizient gestaltbare weitere Verwertungszyklus der beteiligten Komponenten. Aufgrund des hohen Holzanteils am Trägervolumen ist der High-Tech Timber Beam® somit auch eine insgesamt ökologischere Alternative zu den vorgenannten Stahl- und Massivbauweisen, welche gegenwärtig den Markt dominieren. Als potentielle zukünftige Anwendungsfelder sind neben Speziallösungen für den Hochbau und die Sanierung (Unterzüge, weitgespannte, schlanke Decken-/Dachkonstruktionen) vor allem aber Holz- oder Holz-Beton-Verbundbrücken (Straßen-, Rad- und Fußgänger- oder Wildbrücken) zu nennen.

Die entwickelten Konstruktionsansätze wurden im Zuge eines Forschungsvorhabens [1] exemplarisch an 4 HTB-Prototypen mit praxisnahen Dimensionen $B \times H \times L = 40 \times 60 \times 800$ cm realisiert.

2. Aufbau und Konstruktion

Mit mehr als 90% des Trägervolumens ist Brettschichtholz der Festigkeitsklasse GL24h gemäß DIN EN 1194 der Hauptbaustoff der HTB-Prototypen. Durch Substitution der unteren ein bis zwei Brettschichtholzlamellen durch Lamellen aus Furnierschichtholz (Laminated Veneer Lumber – LVL) wird bereits eine wesentliche Vergleichmäßigung der Holzeigenschaften in der Trägerzugzone erreicht. Mit der hiermit verbundenen Reduzierung der Einflüsse aus material- und herstellungsbedingten Unregelmäßigkeiten, wie Holzfehlern, Astschwächungen und Keilzinkungsstößen, kann das Verhältnis von Druck- und Zugfestigkeit im Trägerquerschnitt und somit das Gesamttragverhalten deutlich optimiert werden, wodurch sich bereits höhere Biegetragfähigkeiten gegenüber Standardbrettschichtholzträgern ergeben. Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen wurde vorrangig aus Fichtenholz hergestelltes Furnierschichtholz mit ausschließlich in Längsrichtung verlaufenden Furnierlagen verwendet (1 bis 2 Lamellen aus STEICO ultralam R™ mit Nenndicke 39 mm). Die wesentliche Optimierung des Tragverhaltens wird jedoch durch Verstärkung der Biegedruck- und der Biegezugzone mittels Hochleistungswerkstoffen erreicht.

2.1. Druckzonenverstärkung mit Polymerbeton

Zur Verstärkung der Druckzone wurden Polymerbetonmischungen (Abkürzung PC, für polymer concrete) mit optimierten Rezepturen entwickelt (vgl. Tabelle 1 PC 3-5 bis PC 5-10). Hierbei handelt es sich um Mineralstoffgemische mit anwendungsspezifisch abgestimmten Kornabstufungen, welche mit kalterhärtenden 2-Komponenten Epoxidharzsystemen gebunden werden. Die Rezepturen zeichnen sich durch hohe Druckfestigkeiten und, aufgrund des hohen Füllungsgrades, durch gleichfalls hohe Steifigkeiten sowie durch geringe Kriech- und Schwindneigung aus. Infolge des sehr guten Klebeverbundes zwischen polymerem Bindemittel und der Holzoberfläche wird in der Verbundfuge eine kontinuierliche, hochfeste und schlupffreie Verbindung erzielt. Aufgrund der günstigen Füllstoffzusammensetzungen sind die PC-Mischungen zudem durch einen verhältnismäßig geringen Anspruch an Reaktionsharz gekennzeichnet.



Abbildung 2: Druckzonenverstärkung mit Polymerbeton

Für die Verstärkung von Holzbauteilen mit Polymerbeton existiert in Deutschland eine Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung [2]. Sie ist das Resultat eines vorangegangenen gemeinsamen Forschungsprojektes der Bauhaus-Universität Weimar und der Bennert GmbH [3]. PC 3-5 (Tabelle 1, Handelsname COMPONO® 100S) mit Größtkorn von 3 mm ist der gemäß dieser Zulassung zu verwendende Polymerbeton.

Für die HTB-Prototypen wurde ein Polymerbeton mit höherem Füllgrad, differenter Sieblinie und einem Größtkorn von 7 mm entwickelt und verwendet. Beide PC-Rezepturen basieren auf dem gleichen Reaktionsharzsystem COMPONO®. Auf Basis anderer alternativer Reaktionsharzsysteme werden gegenwärtig weitere PC-Rezepturen mit noch deutlich höheren Steifigkeiten und Festigkeiten untersucht (vgl. Tabelle 1, PC 3-7.5 und PC 5-10). Gemäß den bislang vorliegenden Untersuchungsergebnissen sind diese Rezepturen prinzipiell ebenfalls zur Druckzonenverstärkung geeignet.

Weitere Rezepturen auf Basis des Reaktionsharzsystems COMPONO® (PC V1, PC V2 und PC 3-4) wurden als Verguss- und Klebemörtel im Zusammenhang mit den Konstruktionsansätzen zur Zugzonen-, Schub- und Auflagerverstärkung (vgl. Abschnitte 2.2 bis 2.4) sowie für zahlreiche weitere Anwendungsgebiete entwickelt. Wesentliche Materialparameter dieser Rezepturen sind ebenfalls in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Ausgewählte Materialeigenschaften der Polymerbetonrezepturen

Material	PC V1	PC V2	PC 3-4	PC 3-5	PC 7-7	PC 3-7.5	PC 5-10
Reaktionsharzsystem ¹	A	A	A	A	A	B	C
Größtkorn [mm]	0,3	0,3	3,5	3,5	7,1	3,0	5,0
Mischungsverhältnis (RH-System : Zuschlag)	~ 1 : 1,8	~ 1 : 2,3	1 : 4	1 : 5	1 : 7	~ 1 : 7,5	~ 1 : 10
Frischmörtelkonsistenz	weich	weich	plast.	plast.	steif	plast.	plast.
Rohdichte [g/cm³]	1,70	1,80	1,90	2,00	2,05	2,55	2,20
Druckfestigkeit [N/mm²]	102	100	97	97	90	142	135
Zugfestigkeit [N/mm²]	28	26	19	19	16	36	17
Schubfestigkeit [N/mm²]	35	34	-	26	25	39	26
E-Modul [N/mm²]	10200	12400	16800	20700	22800	> 42000	32900
Therm. Ausdehnungskoeffizient [$\cdot 10^{-6}$ 1/K]	~ 32	~ 28	~ 23	~ 20	~ 19	< 15	~ 18

¹ Reaktionsharzsystem: A – COMPONO® gemäß [2]; B and C – alternative Systeme

Die werkstoffchemische Entwicklung von biobasierten Harzsystemen ist inzwischen so weit voran geschritten, dass diese in absehbarer Zukunft für die Herstellung des Polymerbetons ebenfalls eingesetzt werden können. Der HTB kann somit künftig zu mehr als 95 % aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt werden.

2.2. Kompensation von Volumeneffekten durch Zugzonenverstärkung mit bewehrtem Furnierschichtholz

Bekanntermaßen sind die Materialeigenschaften von Holz Volumeneffekten unterworfen. Die Biegefestigkeit reduziert sich mit zunehmender Trägerhöhe. Zug- und Biegefestigkeit reduzieren sich mit zunehmender Trägerlänge. Numerische Untersuchungen von Blaß et al. [4] zeigen, dass die Biegefestigkeit von Brettschichtholz bei einer Trägerhöhe von 120 cm ca. 11% und bei einer Trägerhöhe von 180 cm ca. 15% unter dem charakteristischen Wert liegt (Abbildung 3, links). Entsprechende theoretische Betrachtungen zum Einfluss der Trägerlänge sind u.a. in [5] und [6] dokumentiert (Abbildung 3, rechts).

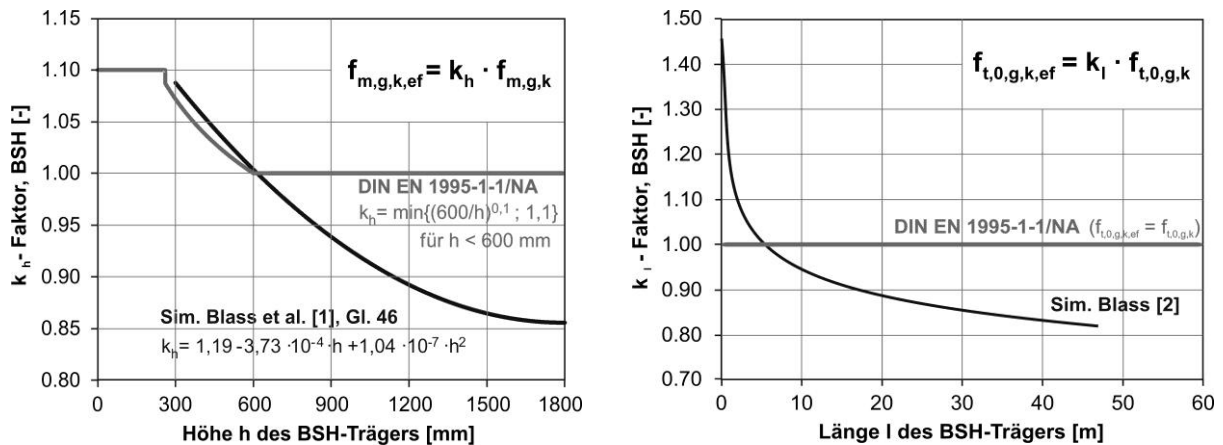


Abbildung 3: Einfluss der Bauteilhöhe auf die Biegefestigkeit (links) und Einfluss der Bauteillänge auf die Zugfestigkeit (rechts) von Brettschichtholz, nach [4], [5] und DIN EN 1995-1-1/NA

Gemäß [4] ist die Festigkeitsreduktion infolge dieser Volumeneffekte bei der Bemessung nicht gesondert zu berücksichtigen und somit vom Teilsicherheitsbeiwert γ_M aufzunehmen. Somit ist letztlich das Sicherheitsniveau bei der Bemessung biegebeanspruchter Holz- resp. BSH-Bauteile in nicht unerheblichem Maße vom Bauteilvolumen abhängig. Insbesondere bei weitgespannten Konstruktionen, wie bspw. im HBV-Straßenbrückenbau mit erforderlichen BSH-Trägerhöhen zwischen 70 und 150 cm im Stützweitenbereich 15 bis 30 m (vgl. [7][8][9]) sollte diesem Aspekt, auch im Hinblick auf die zu berücksichtigenden Ermüdungslastsituationen, zukünftig größere Beachtung geschenkt werden.

Mittels der Substitution der unteren Lamellen der BSH-Träger durch über die gesamte Trägerlänge durchgängige und im Auflagerbereich entsprechend endverankerte armierte Lamellen aus Furnierschichtholz kann dem Volumeneffekt wirkungsvoll begegnet und die Tragfähigkeit am stark beanspruchten unteren Trägerrand sogar deutlich erhöht werden. Zur Zugzonenverstärkung wurden vier Varianten bewehrter Furnierschichtholzlamellen entwickelt und im Rahmen von Bauteilversuchen an den HTB-Prototypen experimentell untersucht (vgl. Abbildung 1). Als Verstärkungselemente kamen sowohl kohle- (CFK) und glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) als auch Stahl zum Einsatz (vgl. Tabelle 2). Die CFK-Lamellen wurden auf der Trägerunterseite entweder flach auf- oder stehend in Sägenuten verklebt (vgl. Abbildung 4). Die Bewehrungsstäbe aus konventionellem Betonstahl oder GFK wurden in Längsfräsungen innerhalb der Furnierschichtholzlamellen angeordnet, wobei ein starrer Verbund zwischen Bewehrungsstäben und Holz durch die mineralisch gefüllte Vergussmasse PC 3-4 (vgl. Tabelle 1) auf Basis des Reaktionsharzsystems COMONO® realisiert wurde (Abbildung 5).



Abbildung 4: Zugzonenverstärkung mit CFK-Lamellen; Links: HTB-1, Rechts: HTB-2



Abbildung 5: Zugzonenverstärkung mit Bewehrungsstäben; Links HTB-3 mit Betonstahlbewehrung, Rechts: HTB-4 mit GFK-Bewehrung

Tabelle 2: Zugzonenverstärkung der HTB-Prototypen

HTB	Verstärkungselemente	Zugfestigkeit N/mm ²	E-Modul N/mm ²
1	4x CFK-Lamelle 1,4 × 50 mm, Typ S&P 200/2000, flach aufgeklebt auf der Unterseite einer Lage LVL	≥ 2500 ¹⁾	≥ 210000 ¹⁾
2	8x CFK-Lamelle 1,4 × 25 mm, Typ S&P 200/2000, aufrecht verklebt in Sägenuten innerhalb der unteren von 2 Lagen LVL	≥ 2500 ¹⁾	≥ 210000 ¹⁾
3	8x Bewehrungsstab Ø16 mm B500B, DIN 488-2, in Längsfräsungen innerhalb der unteren von 2 Lagen LVL vergossen	≥ 500 ²⁾	210000 ²⁾
4	5x GFK-Bewehrungsstab Ø16 mm, Typ Schoeck ComBAR®, in Längsfräsungen innerhalb der oberen von 2 Lagen LVL vergossen	≥ 580 ³⁾	60000 ³⁾

¹⁾ Materialeigenschaften gemäß [10]

²⁾ Materialeigenschaften gemäß DIN 488-1;

³⁾ Materialeigenschaften gemäß [11]

Gegenüber konventionellen Klebeverbindungen bietet diese neuartige Methode des Vergussklebens den Vorteil, dass herstellungsbedingte Maßtoleranzen problemlos ausgeglichen werden können. Zudem wird zur Sicherstellung einer vollflächigen und starren Verbindung kein zusätzlicher Pressdruck benötigt. Durch die entwickelte Fügechnik kann somit ein äußerst effizienter Fertigungsprozess im Werk und gegebenenfalls auch unter Baustellenbedingungen gewährleistet werden. Beispielsweise ist die Vorfertigung derart bewehrte Furnierschichtholzlamellen denkbar, welche anschließend wie konventionelle Brettlamellen in den Produktionsablauf der Brettschichtholzherstellung integriert werden können.

2.3. Schubverstärkung mit vergossenen Gewindestäben

Infolge der zuvor beschriebenen Optimierung des Biegetragverhaltens können, gegenüber Holzkonstruktionen mit gleichen Bauteildimensionen, deutlich höhere Traglasten erreicht werden. Um die angestrebte hohe Biegeauslastung der Hochleistungsverbundträger zu ermöglichen, muss jedoch ein vorzeitiges sprödes Schubversagen wirkungsvoll unterbunden werden. Zu diesem Zweck wurden in den Endbereichen der HTB-Prototypen (das sind die Bereiche mit maximaler Schubbeanspruchung) Schubverstärkungen bestehend aus Stahl-Gewindestangen M10 angeordnet.

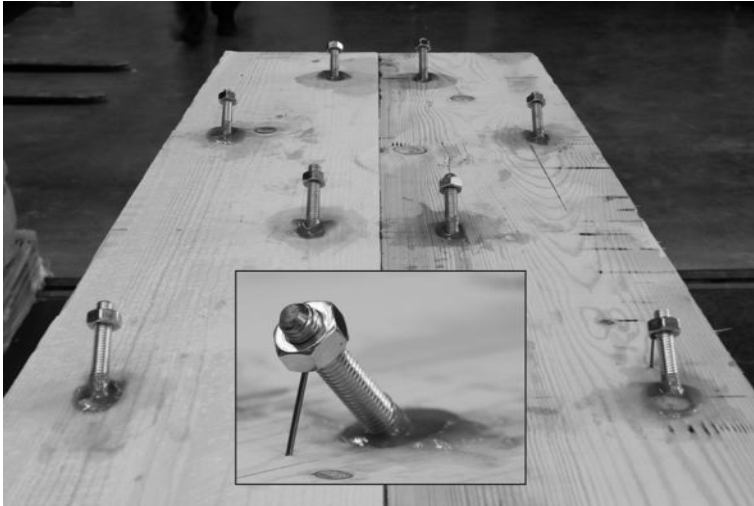


Abbildung 6: Schubverstärkung

Je Trägerende wurden 8 Bohrlöcher mit Durchmesser 22 mm diagonal unter 45° in das Brettschichtholz eingebracht und zu ca. 80% mit dem mineralisch gefüllten Vergusskleber PC V1 (vgl. Tabelle 1) gefüllt. Anschließend wurden die Gewindestangen unter Verdrängung des überschüssigen Vergussmaterials in die Bohrungen eingebracht. Auf diese Weise konnte eine vollständige Bettung der Gewindestangen in der Vergussmasse und eine schlupffreie Verbindung mit dem umgebenden Holz realisiert werden. In der Polymerbetondeckschicht wurden die Gewindestangen zusätzlich mittels aufgeschraubter Muttern endverankert. Die Anordnung der Gewindestangen ist in den Abbildungen 6, 9 und 14 ersichtlich. Um eine Analyse der Verstärkungswirkung zu ermöglichen, wurde in drei der vier HTB Biegeversuche die Entwicklung der Dehnungen an der Oberfläche jeweils eines schubverstärkten Trägerendes unter Verwendung eines 3D-photo-grammetrischen Messsystems erfasst. Auf die Ergebnisse wird im Abschnitt 3.3 eingegangen.

2.4. Verstärkung und konstruktive Ausbildung der Auflager

Neben den Bereichen mit maximaler Schubbeanspruchung gehören die Auflagerbereiche zu den Detailpunkten, in denen besonders hohe Spannungskonzentrationen resp. Spannungsauslastungen auftreten können. Bei den HTB-Prototypen wurden die Auflagerflächen mit 40x20 cm bewusst verhältnismäßig klein gewählt, um eine neuartige Methode der Querdruckverstärkung an Bauteilen mit realitätsnahen Dimensionen erproben zu können. Zusätzlich sollte innerhalb dieser Detailpunkte die Endverankerung der Zugzonenverstärkungsglieder erfolgen. Im Idealfall kann durch eine wirkungsvolle Endverankerung der Verstärkungsglieder im Falle eines Biegezugsversagens im Brettschichtholz ein vollständiger Kollaps des Trägers verhindert werden, sofern die Tragreserven der Zugzonenverstärkung ausreichen um als Unterspannung zu wirken. Zudem ist bei unterseitig aufgeklebten Verstärkungsgliedern (z.B. CFK-Lamellen) i.d.R. eine effektive Endverankerung erforderlich, um ein frühzeitiges Delaminationsversagen zu verhindern, welches insbesondere dann aufgrund lokaler Schubspannungsspitzen auftreten kann, wenn die Verstärkungsglieder nicht bis ins Auflager geführt werden sondern mit Abstand oder unmittelbar vor diesen enden. Werden die Verstärkungselemente jedoch bis ins Auflager geführt, so müssen insbesondere querdruckempfindliche Materialien, wie die hier verwendeten kohle- oder glasfaserverstärkten Kunststoffe, gegen zu hohe Querdruckbeanspruchung geschützt werden, um eine Zerstörung des Faserverbundes zu verhindern.

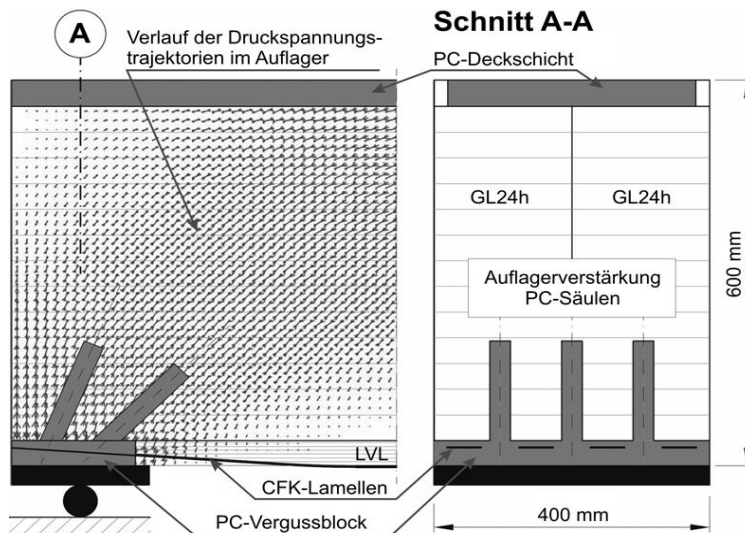


Abbildung 7: Auflagerausbildung am Beispiel des Prototyp HTB-1; Endverankerung der CFK-Lamellen und Auflagerverstärkung durch Vergussblock aus Polymerbeton

Eine völlig neue und sehr effektive Querdruckverstärkung kann mittels Polymerbetongefüllter Bohrungen – sogenannter Polymerbetonsäulen – realisiert werden [12]. Den Herstellungsprozess der Auflagerbereiche am Beispiel des HTB-1 dokumentiert die Abbildung 8. Im Falle der HTB-Prototypen wurden diese PC-Säulen entsprechend der Orientierung der Hauptdruckspannungstrajektorien ausgerichtet, um eine weitere Effektivitätssteigerung zu erreichen (Abbildung 7). Die Lastübertragung aus der stählernen Auflagerplatte in die PC-Säulen wird mittels eines ca. 40 mm dicken Vergussblockes aus Polymerbeton sichergestellt. In diesem Vergussblock erfolgt gleichzeitig die Endverankerung der Zugzonenverstärkungsglieder. Als Verstärkungsmaterial wurde PC 3-5 (vgl. Tabelle 1) verwendet. Aufgrund der hervorragenden Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften des Polymerbetons wird allen zuvor genannten Anforderungen optimal begegnet.



Abbildung 8: Herstellung des Endauflagers am Beispiel des Prototyps HTB-1

3. Bauteilversuche

3.1. Versuchsaufbau

Nur im Rahmen experimenteller Versuche an Verbundträgern mit praxisnahen Abmessungen lässt sich abschließend das synergetische Zusammenwirken aller Komponenten verifizieren und somit belegen, dass durch gezielte Verstärkung hochbeanspruchter Trägerbereiche das Tragverhalten konventioneller (blockverleimter) Brettschichtholzträger mit geringem zusätzlichem bzw. substituierendem Materialaufwand signifikant verbessert und homogenisiert werden kann. In Großversuchen wurden schließlich die vier entwickelten HTB-Prototypen Biegetests unterzogen, um das Trag-, Verformungs- und Bruchverhalten zu analysieren und so die Gültigkeit des Bemessungsansatzes und der Simulationsergebnisse zu überprüfen. Die Hauptabmessungen der Hybridträger betragen $B \times H \times L = 40 \times 60 \times 800$ cm. Die Versuche wurden als 6-Punkt-Biegeversuche durchgeführt, wobei annähernd eine Verteilung der Schubkräfte und Biegemomente wie unter einer Gleichstreckenlast approximiert wurde. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 9 dargestellt.

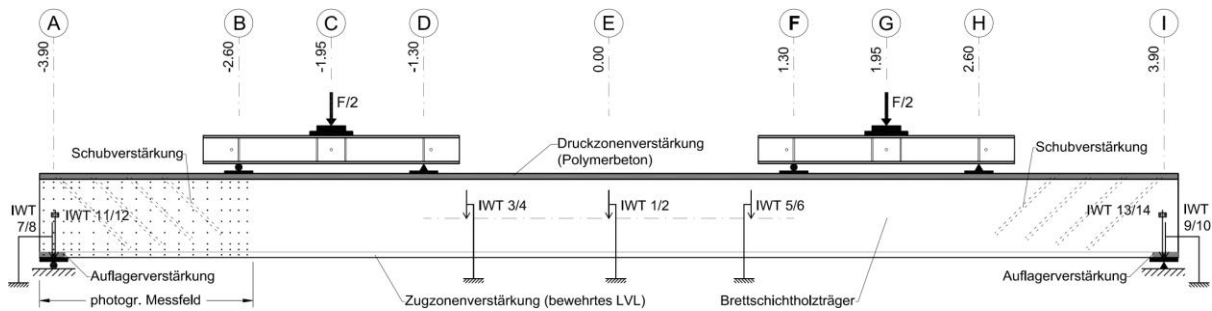


Abbildung 9: Versuchsaufbau und wesentliche Messstellen der 6-Punkt-Biegeversuche

Die Stützweite betrug 7,80 m (vgl. Abbildung 9). Mittels zweier servo-hydraulisch gesteuerter Prüfzylinder wurden die Prüfkörper bis zum Bruch belastet. Während der Versuchsdurchführung wurden Prüflasten, globale und lokale Durchbiegungen in Anlehnung an DIN EN 408 sowie die Verformungen und Dehnungen in bestimmten Trägerbereichen mittels Induktiver Wegaufnehmer und Dehnungsmessstreifen aufgezeichnet. Versuchsbegleitend wurde zusätzlich ein 3D-photogrammetrisches Messsystem, vorwiegend zur Analyse des Tragverhaltens in den hoch beanspruchten und verstärkten Auflagerbereichen, eingesetzt.

3.2. Gesamttragverhalten und Tragfähigkeit

Auf Basis der gemessenen Mittendurchbiegung (abzüglich Auflagereindrückungen/-setzungen) und der Kraftmessdaten wurden für die Prototypen die globalen Biegesteifigkeiten (inkl. Schubeinfluss) ermittelt. Ebenfalls in 6-Punkt-Biegeprüfungen wurden vorab für die unverstärkten, blockverleimten GL24h-Träger die Biege-E-Moduln in Anlehnung an DIN EN 408 bestimmt (im Mittel: $E_{m,l} = 12000 \text{ N/mm}^2$; $E_{m,g} = 10800 \text{ N/mm}^2$ mit $G = \infty$). Hieraus wurden die globalen Biegesteifigkeiten (inkl. Schubeinfluss) unverstärkter Vergleichsträger aus Brettschichtholz mit den Querschnittsmaßen $b/h = 40/60 \text{ cm}$ berechnet. In Abbildung 10 sind die Biegesteifigkeiten der HTB-Träger den Biegesteifigkeiten der BSH-Vergleichsträger gegenübergestellt. Durch die in Abschnitt 2 beschriebenen Verstärkungsmaßnahmen wurde eine Steifigkeitserhöhung auf 122% bis 144% der Steifigkeit eines BSH-Vergleichsträgers erreicht. Wie in Abschnitt 2.1 erläutert, bestand die 40 mm starke Deckschicht der HTB-Prototypen aus Polymermörtel PC 7-7, gemäß Tabelle 1. Bei Verwendung des Polymermörtels PC 3-7.5 (vgl. Tabelle 1) ergäbe sich rechnerisch eine Steifigkeitssteigerung auf 147% bis 161% (Abbildung 10).

Die getesteten HTB-Prototypen wiesen bis zum Erreichen der Maximallast ein annähernd lineares Kraft-Durchbiegungsverhalten auf. Die bis zum Versagen gemessenen Kraft-Durchbiegungsverläufe sind in Abbildung 11 dargestellt. In dieser Abbildung ebenfalls eingetragen ist der theoretische Kraft-Durchbiegungsverlauf für einen unverstärkten Vergleichsträger aus Brettschichtholz GL24h (E-Modul $E_{m,l} = 12000 \text{ N/mm}^2$; Schubmodul $G = 650 \text{ N/mm}^2$) bei Annahme der charakteristischen Biegezugfestigkeit ($f_{m,k} = 24 \text{ N/mm}^2$), verlängert (gestrichelt) bis zu einen realistischen Wert von $f_m = 32 \text{ N/mm}^2$ für das verwendete Brettschichtholzmaterial. Verglichen mit der theoretischen Tragfähigkeit des unverstärkten Brettschichtholzträgers von 788 kN (100%) lagen die Steigerungen der Maximallasten der HTB-Prototypen im Bezug auf den BSH-Vergleichsträger zwischen 137% und 174% (vgl. Abbildung 11).

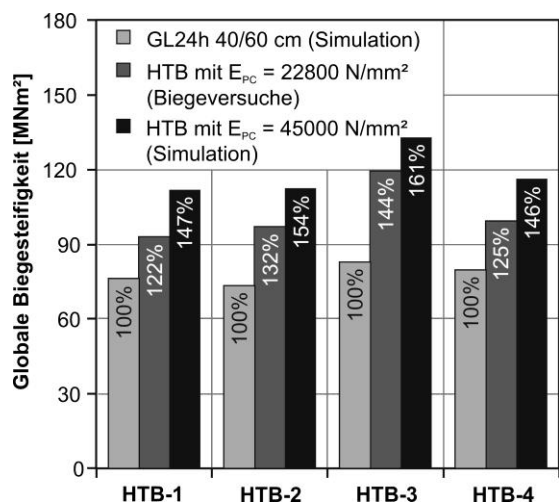


Abbildung 10: Vergleich Globale Biegesteifigkeiten

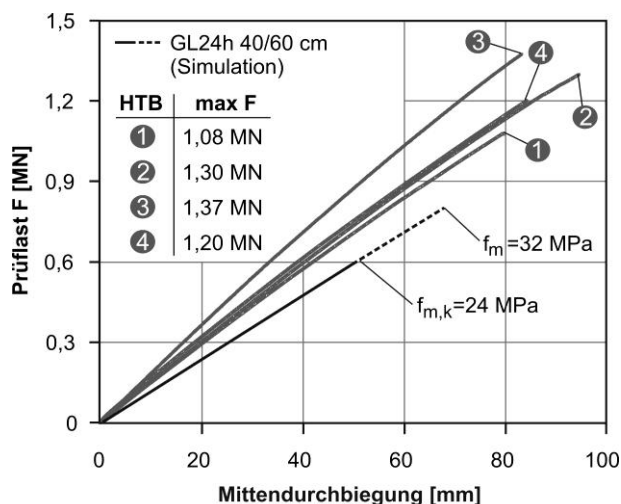


Abbildung 11: Kraft-Durchbiegungsverhalten und Traglasten der HTB-Prototypen (Versuchsergebnisse) sowie Tragverhalten des unverstärkten GL24h-Vergleichsträgers (Simulation)

Die Maximallasten wurden im Versuch ohne Versagensvorkündigung erreicht. Die Träger HTB-1, HTB-2 und HTB-4 versagten infolge des Erreichens der Biegezugfestigkeit im Furnier- bzw. Brettschichtholz (vgl. Abbildung 12), wobei hiermit noch kein vollständiger Kollaps der Prüfkörper verbunden war. Da die in der Zugzone angeordneten Verstärkungsglieder, deren Endverankerungspunkte sowie die verstärkten Schubbereiche im Anschluss an das Initialversagen in Takt blieben, ähnelte das postkritische Tragverhalten vielmehr dem eines unterspannten Trägers, wobei eine Resttragfähigkeit von bis zu 73% (HTB-4) der zuvor erreichten Maximallast erhalten blieb.

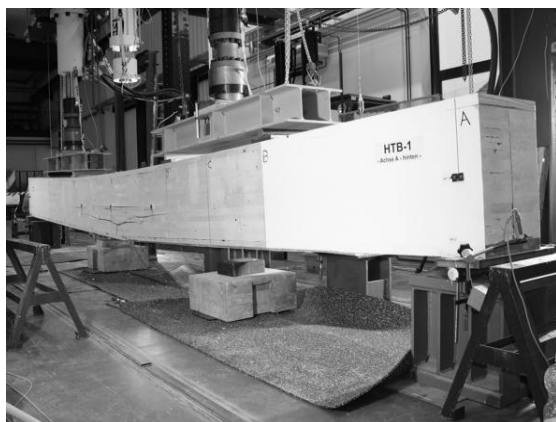


Abbildung 12: Biegezugversagen im Brettschichtholz und Furnierschichtholz, hier: HTB-1



Abbildung 13: Schubversagen im Brettschichtholz und Furnierschichtholz, hier: HTB-3

HTB-3 versagte bei einer Maximallast von 1370 kN. Der Träger mit der größten Biegesteifigkeit wies somit auch die höchste Traglast auf. Aufgrund der höheren Steifigkeit der Zugzonenverstärkung sowie des höheren Lastniveaus, traten jedoch auch höhere Schubspannungen auf, die letztlich zu einem longitudinalen Schubversagen im Holz führten (vgl. Abbildung 13). Die Bruchfläche lag dabei unterhalb der Schubverstärkungsstäbe, welche maximal bis zur Klebefuge zwischen Brettschichtholz und Furnierschichtholz reichten, um eine Schwächung der Zugzone auszuschließen. Durch den schlagartigen Schubbruch verlor die Zugzonenverstärkung ihre Wirkung, sodass sich ebenfalls Biegezugrisse im Brettschichtholz einstellten.

3.3. Verstärkungseffekt der Schubverstärkungen

Die auf Basis der photogrammetrischen Messdaten visualisierte Verteilung der Schubdehnungen an der Oberfläche des Endauflagers des verstärkten Biegeträgers im Versuch kurz vor dem finalen Trägerversagen bei $F = 1370 \text{ kN}$ zeigt Abbildung 14 am Beispiel des Prototyps HTB-3. Ebenso ist die anhand eines FE-Modells numerisch ermittelte Deh-

nungsverteilung bei gleichem Lastniveau, jedoch für einen Träger ohne Schub- und Auflagerverstärkungen dargestellt. Für die numerische Simulation wurde ein Schubmodul von 650 N/mm^2 angenommen. Mit den im Versuch eingebrachten Verstärkungen sind die maximalen Schubdehnungen bei gleicher Laststufe um ca. 15% geringer als in der Simulation ohne Schubverstärkungen. Trotz vorhandener Schubverstärkung versagte der Träger im Versuch jedoch auf Schub, wobei die Schubfuge unterhalb der Stabenden der Schubverstärkung verlief. Somit besteht hinsichtlich einer effektiven Endverankerung der Schubverstärkungsstäbe im Bereich der Trägerzugzone und einer vollen Ausschöpfung aller vorhandenen Tragreserven des HTB noch weiterer Optimierungsbedarf.

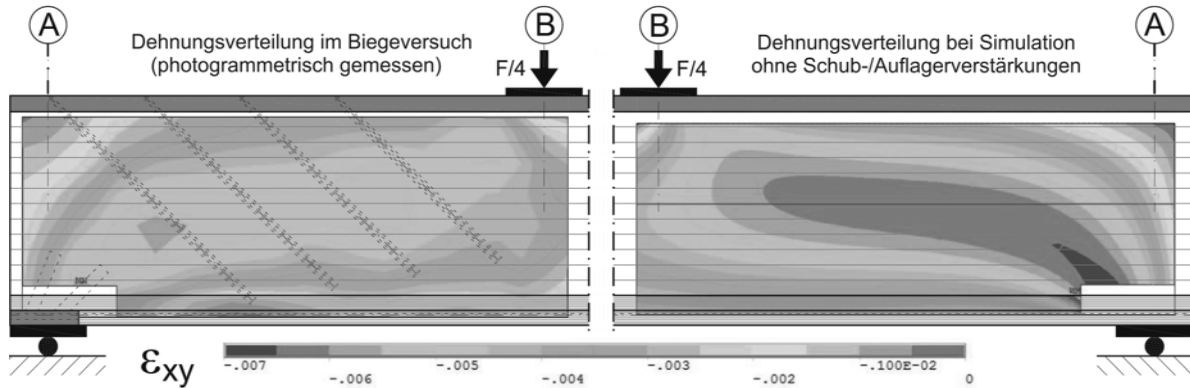


Abbildung 14: Gegenüberstellung von Photogrammetriemessdaten und Ergebnissen der FE-Simulation, hier am Beispiel des Prototyps HTB-3 bei $F = 1370 \text{ kN}$; Links: Gemessene Dehnungsverteilung an der Oberfläche (Prüfkörper mit Auflager- und Schubverstärkungen); Rechts: Dehnungsverteilung im FE-Modell (ohne Auflager- und Schubverstärkungen)

3.4. Verstärkungseffekt der Auflagerverstärkungen

Im Rahmen eines aktuellen Forschungsprojektes konnte gezeigt werden, dass mittels Polymerbetonverguss äußerst effektive Querdruckverstärkungen realisierbar sind. Gegenüber der baupraktisch etablierten Verstärkungsmethode unter Verwendung selbstbohrender Schrauben ist durch den starren Verbund zwischen Holz und Polymerbeton sowie durch die geometrische Adaptierbarkeit an den Spannungsverlauf einerseits eine effizientere Lastverteilung realisierbar, andererseits eine deutliche Steigerung der Traglasten und Querdrucksteifigkeiten in lokalen Lasteinleitungsbereichen erreichbar [12][13].

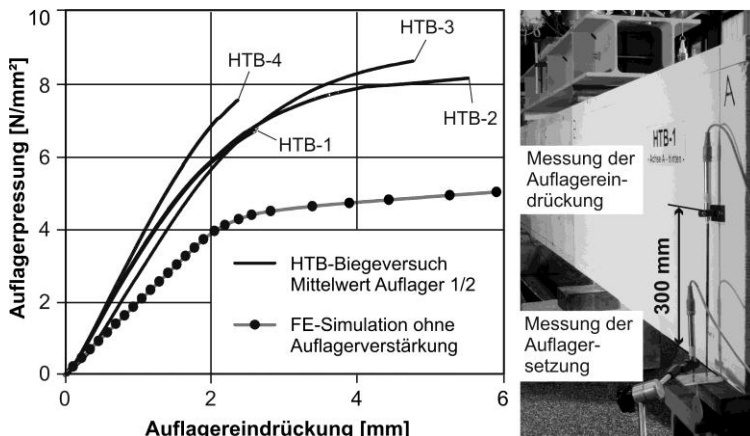


Abbildung 15: Steigerung der Querdrucktragfähigkeit – Vergleich von Versuchs- und Simulationsergebnissen

Der Verstärkungseffekt im Falle der HTB-Prototypen lässt sich anhand eines Vergleiches der Versuchsergebnisse mit den Ergebnissen numerischer Simulationen unter Verwendung von FE-Modellen ohne Auflagerverstärkungen verdeutlichen und liegt bei ca. 50%. Aufgrund des nichtlinearen Tragverhaltens ist der Verstärkungseffekt allerdings abhängig von der als zulässig definierten maximalen Auflagereindrückung, welche für diesen Vergleich mit 2 mm in Ansatz gebracht wurde. Für die Simulation des Tragverhaltens eines vergleichbaren, unverstärkten Trägerauflagers wurden die in Tabelle 3 angegebenen Materialparameter in Ansatz gebracht.

Tabelle 3: Materialparameter Simulation unverstärktes Trägersauflager

Parameter	Brettschichtholz	Furnierschichtholz
Materialmodell	orthotrop, ideal elastisch-plastisch	orthotrop, ideal elastisch-plastisch
E-Modul [N/mm ²]	12000 () 400 (⊥)	14000 () 400 (⊥)
Schubmodul [N/mm ²]	650	500
Druckfestigkeit [N/mm ²]	4.0 (⊥)	4.5 (⊥)

4. Bemessungskonzept

Die Ergebnisse, der im Forschungsprojekt durchgeführten Untersuchungen, rechtfertigen die Annahme eines starren Verbundes zwischen den einzelnen zu einem Verbundträger zusammengefügten Komponenten, insbesondere im praxisrelevanten Gebrauchslastbereich. Die effektive Biegesteifigkeit $(E \cdot I)_{\text{eff}}$ des Verbundträgers kann somit nach Gleichung 1 unter Annahme einer linearen Dehnungsverteilung über die Querschnittshöhe berechnet werden. Materialspezifische Parameter sowie Sicherheits-, Verformungs- und Modifikationsbeiwerte sind entsprechend den geltenden Normen und Vorschriften zu berücksichtigen. Für die Bemessung der Druckzonenverstärkung existiert in Deutschland eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung [2]. Die weiteren hier vorgestellten Verstärkungslösungen sind für den Holzbau bislang weder normativ noch durch Zulassungen geregelt, sodass für eine baupraktische Umsetzung die Zustimmung im Einzelfall zu beantragen ist.

$$(E \cdot I)_{\text{eff}} = \sum \left[E_i \cdot \left(I_i + A_i \cdot e_{S,i}^2 \right) \right] \quad (1)$$

mit

- $(E \cdot I)_{\text{eff}}$ effektive Biegesteifigkeit des Verbundträgers
- E_i Elastizitätsmodul des i-ten Teilquerschnittes
- I_i Flächenträgheitsmoment des i-ten Teilquerschnittes
- $A_i \cdot e_{S,i}^2$ Steiner-Anteil des i-ten Teilquerschnittes mit Abstand $e_{S,i}$ bezogen auf den Schwerpunkt des Gesamtquerschnittes

5. Anwendung/Ausblick

Ein unter ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten sehr interessantes Anwendungsgebiet für den Hochleistungsverbundträger sind insbesondere Holz-Beton-Verbundstraßenbrücken. Dabei schützt die gleichzeitig als Fahrbahn sowie Obergurt der hybriden Hauptträger dienende Stahlbetonplatte die Holzträger vor Witterungseinflüssen (Regen, Schnee, Sonne etc.). Darüber hinaus kann der hybride Hochleistungsträger für alle Arten von Leichtbaustrukturen mit hohen Belastungen und/oder großen Spannweiten als Ersatz für Baustoffe mit deutlich ungünstigerer Energie- und CO₂-Bilanz eingesetzt werden. Aufgrund des hohen Vorfertigungsgrades sowie des einfachen Transportes und der Montage können Industrienationen, mit hoch entwickelter Holzindustrie, diese für sehr hohe Lastenwirkungen geeigneten Hochleistungsträger aus nachwachsenden Rohstoffen, beispielsweise im Rahmen des Neubaus oder der Ertüchtigung / des Ersatzes konventioneller Straßenbrücken, nutzen. In etwas modifizierter Form ist aber auch der Einsatz in Schwellenländern, im Zuge des Ausbaus ihrer Infrastruktur, wirtschaftlich, sodass sich hieraus gegebenenfalls eine Exportoption für die technologische Begleitung sowie die Lieferung von vor Ort zu ergänzenden Halbfertigteilprodukten sowie Sondermaterialien ergibt.

6. Zusammenfassung

Nachwachsende Rohstoffe haben im Bauwesen traditionell große Bedeutung. Für anspruchsvolle Anwendungen im modernen Ingenieurholzbau wird seit Jahrzehnten Brettschichtholz eingesetzt. Für gesteigerte Anforderungen, hinsichtlich aufnehmbarer Lasten

und größeren Spannweiten, wurde an der Bauhaus-Universität Weimar im Rahmen eines Verbundprojektes, mit einem thüringer Bauunternehmen, ein neuartiger hybrider Verbundträger aus Brettschichtholz und Hochleistungswerkstoffen entwickelt. Die dabei vorgenommenen Ergänzungen bestehen im Wesentlichen aus einer Polymerbetondeckschicht in der Biegedruckzone sowie mittels Kohlefaserlamellen resp. Glasfaser- oder Stahlbewehrungsstäben verstärkten Furnierschichtholzlamellen in der Biegezugzone. Zusätzliche Verstärkungselemente steigern die Schubtragfähigkeit oder verbessern die Aufnahme der Querpressungen an den Auflagern. Bei geringem Eigengewicht kann dieser, damit zu über 90% aus Nadelholz bestehende, hybride Hochleistungsträger sehr hohe Lastwirkungen aufnehmen. Damit ist der sogenannte High-Tech Timber Beam® (HTB) neben vielfältigen Anwendungen im Hoch- und Industriebau sowie auch bei Holz-Beton-Verbundbauweisen (HBV) hervorragend geeignet. Insbesondere für den Bau von Holz-Beton-Verbundstraßenbrücken bietet der Einsatz des HTB als Hauptträger eines Brückenüberbaues hinsichtlich der Lagerausbildung, des Ermüdungsverhaltens der Biegezugzone, der Erhöhung der Schubtragfähigkeit und der effektiven Ausbildung einer leistungsfähigen Verbundfuge zur Stahlbetonbrückenplatte vielfältige synergetisch nutzbare Vorteile. Somit verdeutlicht das entwickelte Hochleistungsverbundträgersystem, dass bei richtiger Abstimmung der Eigenschaften sowie des Zusammenspiels von nachhaltig verfügbaren nachwachsenden Rohstoffen, wie Holz und ergänzenden modernen Hochleistungswerkstoffen, bisher bestehende Einschränkungen für die Holzbauweisen überwunden werden können. Abschließend wird die Hoffnung zum Ausdruck gebracht, dass auch durch die hier vorgestellte Herstellung nachhaltiger, hocheffizienter hybrider Holzbauteile sowohl die Konkurrenzfähigkeit als auch das Volumen des Holzeinsatzes im Bauwesen insgesamt weiter gesteigert werden kann.

7. Danksagung

Die wesentlichen Ergebnisse der hier vorgestellten Untersuchungen wurden im Rahmen eines vom Freistaat Thüringen aus Mitteln des europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) geförderten Verbundforschungsprojektes der Bauhaus-Universität Weimar und der BENNERT GmbH erzielt. Im Namen aller Projektpartner bedankt sich der Autor herzlich für die gewährte finanzielle Unterstützung.

8. Quellen

- [1] Rautenstrauch, K.; Frobel, J.; Jahreis, M.; Kästner, M.; Hädicke, W.; Oppel, M.; Schmidt, H.: Entwicklung eines Hochleistungsverbundsystems aus Kunststoffen und Holz. Sachbericht zum Kooperationsprojekt 2008-VF-0035, Weimar, 2012
- [2] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Nr. Z-10.7-282: Bauart zur Verstärkung von Holzbauteilen durch Reaktionsharzbeton. BENNERT GmbH Hopfgarten, Deutsches Institut für Bautechnik
- [3] Rautenstrauch, K. ; Schober, K.-U.; Frobel, J.: Innovative Verstärkung von Holztragwerken mit polymergebundenen Deckschichten im Verbund. Abschlussbericht zum Forschungsprojekt KF0037501PK4 (PRO Inno II), Bauhaus-Universität Weimar, 2007
- [4] Blaß, H. J.; Frese, M.; Glos, P.; Denzler, J. K.; Linsenmann, P.; Ranta-Maunus, A.: Zuverlässigkeit von Fichten-Brettschichtholz mit modifiziertem Aufbau. Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau - Band 11, Universitätsverlag Karlsruhe, 2008
- [5] Blaß, H. J.: Facts you should know about Timber Engineering. In: Keynote-Präsentation World Conference on Timber Engineering WCTE 2010, Riva del Garda, Italien, 2010
- [6] Colling, F.; Ehlbeck, J.; Görlacher, R.: Glued laminated timber – contribution to the determination of the bending strength of glulam beams. CIB-W18 meeting 24, Oxford, UK, 1991, paper 24-12-1
- [7] Simon, A.: Analyse zum Trag- und Verformungsverhalten von Straßenbrücken in Holz-Beton-Verbundbauweise. Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar, 2008

- [8] Rautenstrauch, K.; Müller J.: Tragverhalten spezieller Verbundelemente für Holz-Beton-Verbundstraßenbrücken unter zyklischer Beanspruchung. Bautechnik 90 (2013), Heft 01, S. 9-17
- [9] Müller, J.: Trag- und Verformungsverhalten spezieller Verbundelemente für Holz-Beton-Verbundstraßenbrücken unter Kurzzeit-, Ermüdungs- und Langzeitbeanspruchung. Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar, 2014
- [10] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Nr. Z-36.12-70: Verstärkung von Stahlbetonbauteilen durch mit dem Baukleber "StoPox SK 41" schubfest aufgeklebte Kohlenfaserlamellen "Sto S&P CFK Lamellen" nach DIN 1045-1:2008-08. StoCretec GmbH Kriftel, Deutsches Institut für Bautechnik.
- [11] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Nr. Z-1.6-238: Bewehrungsstab Schoeck ComBAR aus glasfaserverstärktem Kunststoff, Nenndurchmesser: 16mm. Schoeck Bauteile GmbH Baden-Baden (Steinbach), Deutsches Institut für Bautechnik.
- [12] Hädicke, W.; Kästner, M.; Rautenstrauch, K.: Highly efficient strengthening of local load introduction areas of engineering wood structures using polymer concrete grouting. In Proceedings of the World Conference on Timber Engineering WCTE 2014, Quebec City, Kanada, 2014
- [13] Rautenstrauch, K. et al.: Hocheffiziente Verstärkung lokaler Lasteinleitungsbereiche von Ingenieurholzkonstruktionen mittels Polymerbeton-Verguss. Forschungsbericht zum DFG-Vorhaben Nr. RA 887/14-1 (in Bearbeitung)
- [14] Simon, A.; Barthl, J.; Rautenstrauch, K.: Die Birkbergbrücke Wippra – Deutschlands erste Straßenbrücke in Holz-Beton-Verbundbauweise. Tagungsband Dresdner Brückenbausymposium 2009, S. 287–296
- [15] Rautenstrauch, K.: Holz-Beton-Verbund-Bauweise bei Schwerlastbrücken – Zum Tragverhalten und dem gebauten Pilotprojekt. Ingenieurholzbau Karlsruher Tage 2009, Bruderverlag, Universität Karlsruhe (TH), S. 32–44
- [16] Rautenstrauch, K.; Kästner M.; Jahreis, M.; Hädicke, W.: Entwicklung eines Hochleistungsverbundträgersystems für den Ingenieurholzbau. Bautechnik 90 (2013), Heft 01, S. 18-25