

- Technische Universität Dresden – Institut für Stahl- und Holzbau (ISH) in Kooperation mit dem Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik (ITM), dem Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK), dem Lehrstuhl für Betriebliche Umweltökonomie (BU) und der GWT-TUD GmbH (GWT) • Institut für angewandte Forschung im Bauwesen (laFB) e.V.
- HESS TIMBER GmbH & Co. KG (Hess) •

## **BMBF-Vorhaben 0330722A-C**

Projektträger Jülich (PTJ)

# **„Hochleistungsholztragwerke – HHT – Entwicklung von hochbelastbaren Verbundbauweisen im Holzbau mit faserverstärkten Kunststoffen, techni- schen Textilien und Formpressholz“**

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

## **Abschlussbericht**

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter den Förderkennzeichen 0330722A, 0330722B und 0330722C gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Technische Universität Dresden, Teamleitung: ISH, Förderkennzeichen 0330722A

ISH: Prof. Dr.-Ing. Peer Haller, Dr.-Ing. Andreas Heiduschke, Dipl.-Ing. Robert Putzger

ITM: Prof. Dr.-Ing. habil. Dipl.-Wirt. Ing. Chokri Cherif, Dipl.-Ing. Wolfgang Trümper

ILK: Prof. Dr.-Ing. habil. Werner Hufenbach, Dipl.-Ing. Mike Thieme

BU: Prof. Dr. Edeltraud Günther, Christian Manthey MSc

Institut für angewandte Forschung im Bauwesen (laFB) e.V., Förderkennzeichen 0330722B

Dipl.-Ing. Martin Hamann, Dipl.-Ing. Petra Kubowitz, Dipl.-Ing. (FH) Yvette Lemke,

Dipl.-Ing. Anke Schäcke, Dipl.-Ing. Andrea Untergutsch, Dipl.-Ing. Tilo Birk (ehem.)

HESS TIMBER GmbH & Co. KG, Förderkennzeichen 0330722C

Mathias Hofmann, Dipl.-Ing. Rensteph Thompson, B.Eng. Jan Fandler



## Kurzreferat

Holz empfiehlt sich im Bauwesen insbesondere aufgrund seines geringen Gewichts, seiner hohen ästhetischen Qualität und der zunehmend an Bedeutung gewinnenden Tatsache, ein nachwachsender Rohstoff zu sein. Jedoch ist das Bauen mit Holz bis heute von Merkmalen geprägt, die gegenüber technischen Materialien zu teilweise erheblichen Wettbewerbsnachteilen führen – hier sei beispielsweise die geringe Materialeffizienz bei der Verarbeitung des Rohholzes in tragende Querschnitte genannt. Die Dauerhaftigkeit ist mit der Verwendung chemischer und baulicher Ansätze im Außenbereich oft unbefriedigend und teuer gelöst. Weiterhin stellt die Richtungsabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften des Holzes selbst erfahrene Tragwerksplaner im konstruktiven Umgang mit Holz immer wieder vor schwer lösbare Aufgaben. Diese Grenzen des Holzbaus wurden im Forschungsvorhaben Hochleistungsholztragwerke (HHT) angegangen. Das anspruchsvolle Ziel war, den natürlichen Rohstoff Holz in ein Hochleistungsmaterial zu verwandeln, dessen Eigenschaften wie z.B. Festigkeit, Steifigkeit, Dauerhaftigkeit und Querschnittsform je nach Erfordernis vom planenden Ingenieur festgelegt werden können. Die Änderungen können sich dabei auf den Stoff selbst beziehen, auf neue Technologien und/oder auf Querschnittsbildungen beliebiger Form. Der Begriff Hochleistung ist hier im Sinne einer signifikanten Verbesserung vor allem des Tragverhaltens, der Gebrauchstauglichkeit und der Dauerhaftigkeit zu verstehen.

Es konnte gezeigt werden, dass gerade Hybridbauteile aus üblichen Holzprodukten und technischen Textilien oder vergüteten Holzprodukten hochleistungsfähig sind. Beispielsweise ließen sich mit glas- oder kohlefaserbewehrten Formholzrohren (runde Hohlquerschnitte aus verdichtetem und geformtem Nadelholz) hohe Traglasten bei geringem Materialeinsatz und guter Dauerhaftigkeit erzielen. Hybridträger aus Brettschichtholz und Kunstharzpressholz erreichten hohe Festigkeiten und Steifigkeiten sowie ebenfalls eine hohe Dauerhaftigkeit. Anschlussbereiche, die mit Faserkunststoffverbunden verstärkt wurden, wiesen hohe Tragfähigkeiten und geringe Nachgiebigkeiten auf. Zudem zeigte die ökologische Bewertung, dass Bauweisen dieser Art in jedem Fall das Potential besitzen, als umweltfreundlichere, im Sinne der Nachhaltigkeit vorzuziehende, Alternativen zu Vergleichsbauweisen aus beispielsweise Stahl oder Beton dienen zu können, gerade dort, wo herkömmliche Holzbauweisen an ihre Grenzen stoßen.

Der vorliegende Abschlussbericht gliedert sich in vier Hauptkapitel. Im ersten Kapitel werden Aufgabenstellung und Zielsetzung des Projektes erläutert, die beteiligten Partner vorgestellt und der wissenschaftliche und technische Stand im Ingenieurholzbau zu Beginn des Projektes betrachtet. Das zweite Kapitel beinhaltet Planung und Ablauf des Projektes und gibt einen inhaltlichen und zeitlichen Überblick über die bearbeiteten Arbeitspakete (AP). Das dritte Kapitel beschreibt die durchgeführten Arbeiten und erzielten Ergebnisse und stellt damit das Kernkapitel des Berichtes dar. Nach den Versuchen zur Bestimmung von Materialeigenschaften unterschiedlichster Art (AP 1) werden zuerst Anschlussbereiche (AP 2) und anschließend textile Verstärkungen für Bauteile und Verbindungen (AP 3) behandelt. Es schließt sich die Beschreibung vor allem von Knickversuchen an Formholzprofilen und Biegeversuchen an Hybridträgern (AP 4) an, wobei zusätzlich untersucht wurde, inwieweit sich Verstärkungsfasern auch als Sensorfasern nutzen lassen. Im Folgenden werden Berechnungs- und Simulationsmodelle für Holz-Textil-Verbunde vorgestellt (AP 5) und Konstruktionsentwicklungen von Hochleistungsholztragwerken gezeigt sowie praxisorientierte Bemessungsverfahren und Anwendungsrichtlinien erläutert (AP 6). Schließlich folgt die Beschreibung der drei bearbeiteten Pilotprojekte – einer Fußgängerbrücke, einer Windkraftanlage und einer Überdachung (AP 7) sowie die Ökobilanzierung der neuartigen Hochleistungsholzbauteile bzw. -tragwerke (AP 8). Im vierten Kapitel wird die Verwertung und Verbreitung der Ergebnisse (AP 9) diskutiert, die Veröffentlichungen, Vorträge und Internetauftritte der Projektpartner werden angegeben, Firmenkontakte beschrieben und von den einzelnen Partnern Einschätzungen der erzielten Ergebnisse und deren Verwertbarkeit getroffen.

## abstract

In structural engineering timber is appreciated due to its low weight, its high aesthetic quality and because it is a renewable resource, which is becoming more and more important. However, building with timber is marked by characteristics, which lead to significant disadvantages in competition with technical materials. An example is the low efficiency in converting trees to load-bearing timber sections. In outdoor areas, chemical and structural approaches lead to unsatisfactory and expensive solutions with respect to durability. Furthermore, even experienced structural engineers find it difficult to deal with the anisotropic material properties of timber. The research project "Hochleistungsholztragwerke" (high performance timber structures) tackled these limits of timber constructions. The ambitious aim was to change the natural lumber to a high-performance material, which can be designed to meet the engineers demands concerning strength, stiffness, durability and shape etc. The changes can affect the material itself, new technologies and/or the formation of any shape. The term "high performance" means a substantial improvement of the load-carrying capacity, the serviceability and durability.

It was shown, that especially hybrids made of common timber products and technical textiles or enhanced timber products are high-capacitive. Glass or carbon fibre reinforced formed wooden tubes e.g. reached high bearing strengths with low material input and good durability. Hybrid beams of gluelam and densified veneer wood obtained high strength and stiffness as well as high durability. Connections, reinforced by fibre-plastic composites, offered high load-bearing capacity and stiffness. Furthermore, the environmental life cycle assessment indicated that these constructions can be more ecological and more sustainable compared to reinforced concrete constructions or steel constructions, particularly if traditional timber constructions reach their limits.

This final report is divided into four chapters. The first chapter defines the project assignment and goals, presents the partners and focuses on the scientific and technical level in timber engineering at the beginning of the project. The second chapter describes planning and workflow of the project and outlines the work packages (WP) with regard to content and time. The third chapter is the main chapter; it describes the conducted research and results. First, attention is given to the determination of different material parameters (WP 1), then to joints (WP 2) and textile reinforcements for building elements and joints (WP 3). Afterwards mainly buckling tests of fibre reinforced wooden tubes and bending tests of hybrid beams are described as well as the examination of fibres used simultaneously for reinforcement and deformation measurement (WP 4). Subsequently, simulation and computational models for timber-textile composites are presented (WP 5) as well as the design and development of high performance timber structures combined with practical design-methods and guidelines for using the new components (WP 6). Finally, the three pilot projects – a pedestrian bridge, a tubular timber pole for a wind turbine and a roofing – are illustrated (WP 7) and the environmental life cycle assessment of the new building elements and high performance structures is shown (WP 8). In the fourth chapter, the application and dissemination of the results is discussed (WP 9), the partners' publications, papers, presentations and websites as well as contacts to firms are listed. Moreover, each partner gives a subjective evaluation of the results and their usefulness.

## Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung und Zielsetzung des Vorhabens	16
1.1	Allgemeines	16
1.2	Intention	16
1.3	Projektpartner	18
1.3.1	Allgemeines	18
1.3.2	Team Wissenschaft	19
1.3.2.1	Professor Haller, Institut für Stahl- und Holzbau, TU Dresden (ISH)	19
1.3.2.2	Professor Cherif, Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik, TU Dresden (ITM)	20
1.3.2.3	Professor Hufenbach, Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik, TU Dresden (ILK)	21
1.3.2.4	Professor Günther, Lehrstuhl für Betriebswirtschaftslehre, insb. Betriebliche Umweltökonomie, TU Dresden (BU)	22
1.3.2.5	Gesellschaft für Wissens- und Technologietransfer der TU Dresden mbH (GWT); (Unterauftragnehmer Verbundprojektmanagement)	22
1.3.3	Team Tragwerke und Architektur	23
1.3.3.1	Institut für angewandte Forschung im Bauwesen (IaFB) e.V., Berlin	23
1.3.3.2	Krone Hamann Reinke Ingenieurbüro GmbH, vormals KRONE Ingenieurbüro GmbH, Berlin (KRONE)	24
1.3.3.3	Architekt Atelier pk	24
1.3.4	Team Wirtschaft	25
1.3.4.1	HESS TIMBER GmbH & Co.KG, vormals Hess-Wohnwerk GmbH & Co.KG, Kleinheubach	25
1.3.4.2	Deutsche Holzveredelung Schmeing oHG (deho group), Kirchhundem (Dehonit)	25
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand	26
1.4.1	Allgemeines	26
1.4.2	State of the art – Ingenieurholzbau	26
1.4.2.1	Holzvergütung	26
1.4.2.2	Querschnittsbildung und Modifikation von Querschnittsgeometrien im Holzbau	34
1.4.2.3	Technologische Möglichkeiten im modernen Holzbau	36
2	Planung und Ablauf des Vorhabens	49
2.1	Allgemeines	49
2.2	Zusammenarbeit	50
2.3	Arbeitspakete	50
2.4	Projektmanagement (AP 0)	51
2.4.1	Verantwortliche und Beteiligte	51
2.4.2	Inhalte	51
2.5	Formholzprofile (AP 1)	53

2.5.1	Verantwortliche und Beteiligte	53
2.5.2	Inhalte	53
2.5.2.1	Verdichten des Rohmaterials (AP 1.1)	54
2.5.2.2	Test Keilzinkenverbindung und Schäftung (AP 1.2)	54
2.5.2.3	Untersuchungen zur Verbundqualität und zur Holzveredelung (AP 1.3)	54
2.5.2.4	Herstellung der Pressholzplatten (AP 1.4)	54
2.5.2.5	Formen der Platten zum Rohr (AP 1.5)	54
2.5.2.6	Formungstechnologie, Bearbeitung und Abbund der Formholzprofile (AP 1.6)	55
2.5.2.7	Untersuchung der Maß- und Formhaltigkeit (AP 1.7)	55
2.5.2.8	Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit (AP 1.8)	55
2.5.2.9	Ermittlung von Materialparametern (AP 1.9)	55
2.6	Verbindung von Pressholz und technischen Textilien (AP 2)	56
2.6.1	Verantwortliche und Beteiligte	56
2.6.2	Inhalte	56
2.6.2.1	Herstellung von Bohlen mit lokaler Verdichtung (AP 2.1)	56
2.6.2.2	Entwicklung von Gelenkverbindungen mit lokaler Verdichtung und textiler Verstärkung (AP 2.2)	56
2.6.2.3	Erarbeitung von Fachwerkknoten in gelenkiger und starrer Ausbildung (AP 2.3)	56
2.6.2.4	Erarbeitung ebener und räumlicher Knotenelemente zur Aufnahme der Formholzprofile (AP 2.4)	57
2.7	Entwicklung von textilen Bewehrungen für Bauteile und Verbindungen (AP 3)	57
2.7.1	Verantwortliche und Beteiligte	57
2.7.2	Inhalte	57
2.7.2.1	Entwicklung und Anpassung von ringförmigen Gestricken (AP 3.1)	57
2.7.2.2	Entwicklung maßgeschneiderter, textiler Schläuche im Flachstrickverfahren (AP 3.2)	57
2.7.2.3	Anpassung handelsüblicher Textilien (AP 3.3)	58
2.7.2.4	Wickelverbünde (AP 3.4)	58
2.7.2.5	Laminierung der Profile und Anschlussbereiche (AP 3.5)	58
2.7.2.6	Bewehrung der Profile im Autoklaven (AP 3.6)	58
2.7.2.7	Imprägnierung der Gestricke (AP 3.7)	59
2.8	Technologiesynthese – Verdichten, Formen, Bewehren (AP 4)	59
2.8.1	Verantwortliche und Beteiligte	59
2.8.2	Inhalte	59
2.8.2.1	Knick- und Biegeversuche an unverstärkten und verstärkten Formholzrohren (AP 4.1)	59
2.8.2.2	Untersuchung textiler Bewehrungen von Verbindungspunkten im Pressholz (AP 4.2)	60
2.8.2.3	Untersuchungen zur Tragfähigkeit von Rohrverbindungen und Anschlüssen (AP 4.3)	60
2.8.2.4	Verbindungen von Rohren mit massiven Knoten zu Tragwerksteilen (AP 4.4)	60

2.8.2.5	Herstellung von Profilquerschnitten mittels alternativer Verfahren (AP 4.5)	61
2.8.2.6	Verstärkung von Brettschichtholzträgern (AP 4.6)	61
2.8.2.7	Sensorische Verstärkungsfasern (AP 4.7)	61
2.9	Entwicklung und Anwendung werkstoffmechanischer Berechnungs- und Simulationsmethoden (AP 5)	62
2.9.1	Verantwortliche und Beteiligte	62
2.9.2	Inhalte	62
2.9.2.1	Entwicklung eines werkstoffgerechten Modells für Holz-Textil-Verbunde (AP 5.1)	62
2.9.2.2	Simulation des Strukturverhaltens von Holz-Textil-Verbundkomponenten, verifizierende Untersuchungen (AP 5.2)	63
2.9.2.3	Auslegung von Holz-Textil-Tragstrukturen mit Verbindungselementen (AP 5.3)	63
2.9.2.4	Zusammenführung der Ergebnisse zu baupraktischen Richtlinien und Bemessungsvorschriften (AP 5.4)	64
2.10	Konstruktionsentwicklung (AP 6)	64
2.10.1	Verantwortliche und Beteiligte	64
2.10.2	Inhalte	64
2.10.2.1	Zusammenstellen des „state of the art“ im Ingenieurholzbau (AP 6.1)	64
2.10.2.2	Ausarbeitung von Tragwerkslösungen (AP 6.2)	64
2.10.2.3	Zusammenstellung praxisorientierter Bemessungsverfahren und Anwendungsrichtlinien (AP 6.3)	65
2.11	Pilotprojekte (AP 7)	65
2.11.1	Verantwortliche und Beteiligte	65
2.11.2	Inhalte	65
2.11.2.1	Akquise, Planung der Pilotprojekte, Klärung von Genehmigungsfragen (AP 7.1)	65
2.11.2.2	Versuchskörper für Pilotprojekte (AP 7.2)	66
2.11.2.3	Begleitung und Bauüberwachung von Pilotprojekten (AP 7.3)	67
2.12	Entscheidungsorientierte Umweltleistungsmessung – Ökobilanzierung (AP 8)	67
2.12.1	Verantwortliche und Beteiligte	67
2.12.2	Inhalte	67
2.13	Verwertung und Verbreitung der Ergebnisse (AP 9)	68
2.13.1	Verantwortliche und Beteiligte	68
2.13.2	Inhalte	68
2.14	Faseroptische Sensorik (AP 10)	69
2.14.1	Verantwortliche und Beteiligte	69
2.14.2	Inhalte	69
3	Durchführung der Forschungsarbeiten und erzielte Ergebnisse	70
3.1	Allgemeines	70
3.2	Materialien und Querschnittsbildung	70
3.2.1	Verdichten von Schnittholz und Herstellen von Pressholzplatten	71

3.2.2	Keilzinkenverbindungen und Schäftungen verschiedener Materialien	72
3.2.2.1	Test Keilzinkenverbindung und Schäftung (AP 1.2)	72
3.2.2.2	Die Rohrschäftung	75
3.2.2.3	Die Rohrzinkung	77
3.2.3	Untersuchungen zur Verbundqualität und Holzveredelung (AP 1.3)	78
3.2.3.1	Holzveredelung durch Furniertränkung in Kunstharz (KHP)	78
3.2.3.2	Holzveredelung durch thermische Modifikation von Holz (TMT)	80
3.2.3.3	Commingling-Garne	80
3.2.3.4	Verbundqualität der Leimfugen von Hybridträgern (BSH-Lärche mit KHP-Decklamelle)	82
3.2.3.5	TMT-Lärche-Querschnitte im Klimaschrank – Verbundfuge	84
3.2.4	Formen von Pressholzplatten zu Hohlprofilen	87
3.2.5	Bearbeitung und Abbund (verschiedener Bauteile)	88
3.2.6	Untersuchungen zur Maß- und Formhaltigkeit (verschiedener Bauteile)	88
3.2.6.1	Probekörper aus KHP und Fichte in Klimaschrank und Wasserlagerung	88
3.2.6.2	Bestimmung der Feuchteaufnahme von KHP	89
3.2.6.3	Bestimmung des Quell- und Schwindverhaltens von Verbundquerschnitten	91
3.2.6.4	Formholzrohre in der Freibewitterung	93
3.2.7	Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit	98
3.2.7.1	Delaminationsprüfungen	98
3.2.7.2	Dauerhaftigkeit alpiner Lärche	101
3.2.7.3	Freibewitterung von Hybridträgern (KHP-Decklamellen und BSH-Fichte)	106
3.2.7.4	Freibewitterung von Verbundbohlen aus TMT- und Fichtenholz	110
3.2.7.5	Freibewitterung von Verbundquerschnitten aus TMT und Lärchenholz	111
3.2.8	Ermittlung von Materialparametern	113
3.2.8.1	Allgemeines	113
3.2.8.2	Quellungsdrücke von Fichten- und Fichtenpressholz in Wasser	113
3.2.8.3	Druckversuche an Massivholz parallel und quer zur Faser	116
3.2.8.4	Biege- und Druckfestigkeiten von KHP, TMT, Fichte und Lärche	116
3.2.8.5	Kriechen von Kunstharzpressholz	120
3.2.8.6	Brandverhalten von Pressholz und Formholzrohren	136
3.2.8.7	Bestimmung der Holzfeuchte von TMT	145
3.3	Verbindungen mit Pressholz und technischen Textilien	147
3.3.1	Gelenkverbindungen	147
3.3.1.1	Zugprüfungen an GFK-verstärkten Bolzenverbindungen	147
3.3.2	Untersuchungen an nachgiebig verbundenen Bauteilen mit verstärkten Knotenpunkten	154
3.3.2.1	Ausgangspunkt der Untersuchung	154

3.3.2.2	Biegeversuche an nachgiebig verbundenen Trägern	158
3.3.2.3	Druck-Scherversuche an Verbindungen	174
3.4	Textile Bewehrungen für Bauteile und Verbindungen	182
3.4.1	Ringförmige Gestricke	182
3.4.2	Textile Schläuche im Flachstrickverfahren	187
3.4.3	Textile Verstärkung von Formholzprofilen	196
3.4.3.1	Herstellung der textilen Verstärkung im Wickelverfahren	197
3.4.3.2	Herstellung der textilen Verstärkung im Flechtverfahren	200
3.4.3.3	Herstellung der textilen Verstärkung mit vorkonfektionierten Schlauchgestricken	203
3.4.3.4	Technologische Bewertung der Verstärkungsvarianten	205
3.4.4	Imprägnierung der Gestricke	206
3.5	Technologiesynthese	210
3.5.1	Allgemeines	210
3.5.2	Knick- und Biegeversuche an verstärkten und unverstärkten Holzbauteilen	212
3.5.2.1	Knickversuche an Formholzprofilen	212
3.5.2.2	Druckversuche an Hohlkastenprofilen	234
3.5.2.3	Biegeversuche an Hohlprofilen	235
3.5.2.4	Torsionsversuche an Profilquerschnitten	240
3.5.2.5	Formholzprofile im Vergleich zu etablierten Materialien und Querschnitten	249
3.5.3	Tragfähigkeit von Rohrverbindungen und Anschlüssen	251
3.5.3.1	Druckversuche an Rohr-Knoten-Verbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln	251
3.5.3.2	Geleimte Rohr-Rohr- und Rohr-Knoten-Verbindungen	253
3.5.4	Verbindungen von Rohren mit massiven Knoten zu Tragwerksteilen	255
3.5.4.1	Allgemeines	255
3.5.4.2	Detaillösungen für den Anschluss der Spreizen an die Stütze	256
3.5.5	Alternative Verfahren zur Herstellung von Profilquerschnitten	261
3.5.6	Verstärkungen von Brettschichtholzträgern	261
3.5.6.1	Einleitung	261
3.5.6.2	Materialeigenschaften – Holz und Kunstharzpressholz	262
3.5.6.3	Versuchsaufbau	263
3.5.6.4	Ergebnisse und Diskussion	264
3.5.7	Sensorische Verstärkungsfasern	267
3.5.8	Lochleibungsuntersuchungen mit integrierten Messfasern	279
3.6	Entwicklung und Anwendung werkstoffmechanischer Berechnungs- und Simulationsmodelle	288
3.6.1	Werkstoffgerechtes Modell für Holz-Textil-Verbunde	288
3.6.1.1	Werkstoffangepasstes anisotropes Strukturgesetz	289
3.6.1.2	Bruchmodebezogenes Versagenskriterium	294

3.6.1.3	Anisotropes Schädigungsevolutionsgesetz	296
3.6.2	Simulation des Verbundverhaltens und verifizierende Untersuchungen	299
3.6.2.1	Modellverifikation am Beispiel der KHP-verstärkten Biegeträger	299
3.6.2.2	Modellverifikation am Beispiel der Formholzröhren	305
3.6.3	Auslegung von Holz-Textil-Tragstrukturen mit Verbindungselementen	307
3.6.3.1	Allgemeines	307
3.6.3.2	Analytisches Modell zur Strukturanalyse von anisotropen Verbundstrukturen mit elastischen Einschlüssen bzw. Bolzenbelastung	308
3.6.3.3	Auslegung von Gelenkbolzenverbindungen	312
3.6.3.4	Auslegung von bewehrten Formholzrohren	317
3.6.4	Zusammenführung der Ergebnisse zu baupraktischen Richtlinien und Bemessungsvorschriften	321
3.6.4.1	Holz-Textil-Verbunde allgemein	321
3.6.4.2	KHP verstärkte Brettschichtholz-Biegeträger	321
3.6.4.3	Faser- und Textilbewehrte Formholzrohre	328
3.7	Konstruktionsentwicklung	331
3.7.1	State of the art – Ingenieurholzbau	331
3.7.2	State of the art – Verbindungsmittel	331
3.7.2.1	Einteilung nach DIN	331
3.7.2.2	Übersicht möglicher Verstärkungen und Verbesserungen von Verbindungen	332
3.7.2.3	Holzvergütungen	332
3.7.2.4	Verstärkung mit technischen Textilien	333
3.7.3	Ausarbeitung von Tragwerkslösungen	336
3.7.3.1	Allgemeine Ziele	336
3.7.3.2	Verstärkte Bauteile	337
3.7.3.3	Hybridbauteile	339
3.7.3.4	Formholzprofile	362
3.7.3.5	Verbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln und Verstärkungen mit FKV	364
3.7.3.6	Punktgestützter Holzstapelrost	369
3.7.3.7	Knoten im Holzstapelrost mit einem Passbolzen als Verbindungsmittel	370
3.7.3.8	Anschlüsse von Voll- und Hohlprofilen	386
3.7.4	Praxisorientierte Bemessungsverfahren und Anwendungsrichtlinien	393
3.7.4.1	Allgemeines	393
3.7.4.2	Hybridträger	394
3.7.4.3	Verbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln	395
3.7.4.4	Knoten im Holzstapelrost mit einem Passbolzen als Verbindungsmittel	395
3.8	Pilotprojekte	397
3.8.1	Akquise	397

3.8.2	Pilotprojekt Fußgängerbrücken	398
3.8.2.1	Allgemeines	398
3.8.2.2	Klärung von Genehmigungsfragen	402
3.8.2.3	Konstruktionsentwicklung	403
3.8.2.4	Alternativentwürfe	406
3.8.2.5	Versuche am Brückenträger	408
3.8.2.6	Begleitung und Bauüberwachung	414
3.8.2.7	Monitoring	415
3.8.3	Pilotprojekt Vertikalachswindkraftanlage	415
3.8.3.1	Allgemeines	415
3.8.3.2	Klärung von Genehmigungsfragen	417
3.8.3.3	Konstruktionsentwicklung	418
3.8.3.4	Herstellung des Mastes	420
3.8.3.5	Versuche	422
3.8.3.6	Zusammenfassung	425
3.8.3.7	Begleitung und Bauüberwachung	427
3.8.4	Pilotprojekt Hess-Innenhofüberdachung	430
3.8.4.1	Allgemeines	430
3.8.4.2	Klärung von Genehmigungsfragen	431
3.8.4.3	Konstruktionsentwicklung	431
3.8.4.4	Material- und konstruktionsspezifische Modellierung	437
3.8.4.5	Versuche	450
3.9	Entscheidungsorientierte Umweltleistungsmessung – Ökobilanzierung	455
3.9.1	Allgemeines	455
3.9.1.1	Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmens	457
3.9.1.2	Sachbilanz	458
3.9.1.3	Wirkungsabschätzung	459
3.9.1.4	Auswertung	461
3.9.2	Ökobilanz Brücken	463
3.9.2.1	Ziel und Untersuchungsrahmen	463
3.9.2.2	Erstellung einer Sachbilanz (Input-Output-Bilanz)	464
3.9.2.3	Wirkungsabschätzung und Identifizierung von Leistungstreibern	466
3.9.2.4	Entscheidungsorientierter Alternativenvergleich	484
3.9.3	Ökobilanz Formholzprofile	485
3.9.3.1	Ziel und Untersuchungsrahmen	485
3.9.3.2	Erstellung einer Sachbilanz (Input-Output-Bilanz)	485
3.9.3.3	Wirkungsabschätzung und Identifizierung von Leistungstreibern	488

3.9.3.4	Entscheidungsorientierter Alternativenvergleich (Auswertung)	500
3.9.4	Andere Arbeiten zur Umwelleistungsmessung	501
4	Verwertung und Verbreitung der Ergebnisse	504
4.1	Allgemeines	504
4.2	Team Wissenschaft	504
4.2.1	ISH	504
4.2.2	ITM	509
4.2.3	ILK	510
4.2.4	BU	510
4.2.4.1	Gehaltene Vorträge:	510
4.2.4.2	Publikationen	511
4.2.4.3	Geplante Publikationen	511
4.2.4.4	Zur Verwertung der Ergebnisse	511
4.2.5	GWT	511
4.3	Team Tragwerke und Architektur	519
4.4	Team Wirtschaft	519

Der vorliegende Abschlussbericht zum BMBF–Forschungsvorhaben „Hochleistungsholztragwerke – HHT – Entwicklung von hochbelastbaren Verbundbauweisen im Holzbau mit faserverstärkten Kunststoffen, technischen Textilien und Formpressholz“ wurde von den Projektpartnern des Teams Wissenschaft (0330722A): Teamleitung TU Dresden, Institut für Stahl- und Holzbau, des Teams Tragwerke und Architektur (0330722B): Teamleitung Institut für angewandte Forschung im Bauwesen (IaFB) e.V. sowie des Teams Wirtschaft (0330722C): Teamleitung HESS TIMBER GmbH & Co. KG, erstellt. Das Forschungsvorhaben wurde in der Zeit vom 01.08.2006 bis zum 31.08.2010 durchgeführt, vom Bundesministerium für Bildung und Forschung unter dem Schwerpunkt Forschung für Nachhaltigkeit (fona) gefördert und vom Projektträger Jülich (PTJ) begleitet. Die Projektpartner bedanken sich bei allen Beteiligten für die erfolgreiche Zusammenarbeit.

Für das als Arbeitspaket 10 geführte Aufstockungsprojekt „Faseroptische Sensorik“ wird wegen der gegenüber dem Basisprojekt verschobenen Laufzeit nach Beendigung der Arbeiten ein separater Abschlussbericht erstellt.

Folgende Einrichtungen waren beteiligt:

Mittelgeber

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Forschung für Nachhaltigkeit (fona)  
Projektträger Jülich (PTJ)

Projektpartner:

Team Wissenschaft:

Technische Universität Dresden:

Institut für Stahl- und Holzbau, Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und baukonstruktives Entwerfen (ISH)

Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik (ITM)

Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK)

Lehrstuhl für Betriebswirtschaftslehre, insbesondere Betriebliche Umweltökonomie (BU)

Gesellschaft für Wissens- und Technologietransfer der TU Dresden mbH (GWT)

Team Tragwerke und Architektur:

Institut für angewandte Forschung im Bauwesen (IaFB) e.V., Berlin (IaFB)

Team Wirtschaft:

HESS TIMBER GmbH & Co. KG (Hess)

Weitere Beteiligte:

Krone Hamann Reinke Ingenieurbüro GmbH (KRONE) - für das Team Tragwerke & Architektur

atelier pk (pk) - für das Team Tragwerke & Architektur

BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) - für das Team Tragwerke & Architektur

Die jeweils verantwortlichen Autoren sind den einzelnen Kapiteln zu entnehmen. Ist kein Autor angegeben, zeichnen sich alle Autoren gemeinsam verantwortlich.