• 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 (IaFB) 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, technischen 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 (IaFB) 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

Februar 2011 **Dresden, Berlin, Kleinheubach**

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 Holzveredlung durch Furniertränkung in Kunstharz (KHP) 78
3.2.3.2 Holzveredlung 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 Umweltleistungsmessung	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	510
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.

Abkürzungsverzeichnis

Begriff	Abkürzung	Erläuterung
Brettschichtholz	BSH	Stabförmige Bauteile (auch gekrümmt), Bretter in liegender oder stehender Anordnung; spezielle Anforderungen an Sortierung
Balkenschichtholz *alternative Bezeichnungen/Handelsnamen:* *Duo- / Trio-Balken®*	BASH	Nadelholzprodukt aus zwei oder drei faserparallel miteinander verklebten Einzelhölzern gleicher Querschnittsmaße
Brettstapel		flächige Bauteile, Bretter in stehender Anordnung; Elemente als Scheiben und/oder Platten einsetzbar, vernagelt, verschraubt oder verklebt
Holz-Beton-Verbund	HBV	Schubsteif verbundene (Biege-) Bauteile aus Holz (Zugzone), Beton (Druckzone) und Verbindungselementen mit guten mechanischen und bauphysikalischen Eigenschaften
Thermally Modified Timber *alternative Bezeichnungen:* *Thermisch modifiziertes Holz, Thermoholz, Wärmebehandeltes Holz*	TMT	Durch Wärmebehandlung modifiziertes Vollholz aus Nadel- oder Laubholzarten (Fichte, Kiefer, Buche, Esche)
Glasfaserverstärkte Kunststoffe	GFK	
Kohlefaserverstärkte Kunststoffe	CFK	(Carbonfaser = Kohlefaser)
Faserverstärkte Kunststoffe	FVK	
Fibre Reinforced Plastics	FRP	
Wood Plastic Composites *alternative Bezeichnungen:* *Holz-Kunststoff-Verbundwerkstoff, Thermoplastischer Faserstoff, High-Tech-Holz, Holzkunststoff* *Handelsnamen:* *MegaWood, Flüssigholz*	WPC *HKV* *TPF*	Holz-Kunststoffverbundwerkstoff mit bis zu 90 % Holzanteil, synthetischen Kunststoffen und Additiven, hergestellt im Spritzgussverfahren aus ca. 60-70 % Holzmehl, Kunststoffen (Polyethylen oder Polypropylen) und Additiven (Haftvermittler, UV-Schutz-Zusätze, Farbpigmente)
Kunstharzpressholz *alternative Bezeichnungen/Handelsnamen:* *Pressvollholz, Tränkvollholz, Polymerholz, dehonit, Lignostone*	KHP	Pressschichtholz oder –sperrholz aus thermisch verdichteten Furnieren, mit kalt- oder heißhärtenden duroplastischen Polymeren konsolidiert

Acetyliertes Holz *alternative Bezeichnungen/Handelsnamen:* *TITAN-Wood*		
Nutzungsklasse	NKL	erfasst die Einbausituation des Bauteils
Konstruktionsvollholz	KVH	Festigkeitssortiertes, technisch getrocknetes und kalibriertes Vollholz mit definierter Maßhaltigkeit
Epoxidharz	EP	
Polyurethanharz	PU	
Resorcinharz	Res	
Mehrlagengestrick	MLG	
Verbindungsmittel	VBM	
Induktiver Wegaufnehmer	IWA	
Klimaschrank	KS	Einwirkung von: UV-Licht, Beregnung, Temperatur und rel. LF
Trockenschrank	TS	Einwirkung von: Temperatur
relative Luftfeuchte	rel. LF	
Deutsches Institut für Bautechnik	DIBt	
Hochleistungsholztragwerke	HHT	
Windkraftanlage	WKA	
Kreuzungsknoten	KK	
Zwischenknoten	ZK	
Festigkeit	f	
Elastizitätsmodul (E-Modul)	E	
Schubmodul (G-Modul)	G	

1 Aufgabenstellung und Zielsetzung des Vorhabens

Autor: Petra Kubowitz (IaFB) mit allen Partnern

1.1 Allgemeines

Das Verbundvorhaben „Hochleistungsholztragwerke – HHT – Entwicklung von hochbelastbaren Verbundbauweisen im Holzbau mit faserverstärkten Kunststoffen, technischen Textilien und Formpressholz“ (im Folgenden mit dem Kurztitel Hochleistungsholztragwerke (HHT) bezeichnet) wurde von den Partnern der drei Teams „Wissenschaft“, „Tragwerke und Architektur“ sowie „Wirtschaft“ in der Zeit vom 01.08.2006 bis zum 31.08.2010 bearbeitet. Das Forschungsvorhaben wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unter dem Schwerpunkt Forschung für Nachhaltigkeit (fona) gefördert und vom Projektträger Jülich (PTJ) begleitet. Die Verbundpartner bedanken sich beim Fördermittelgeber ganz herzlich für die gewährte Unterstützung.

1.2 Intention

Holz ist ein klassischer nachwachsender Rohstoff mit einem ausgezeichneten ökologischen Profil, für den in seiner Vielgestaltigkeit noch längst nicht alle Anwendungsbereiche erschlossen sind. Die Holzbranche stand und steht zugleich für Tradition wie Innovation. Gegenüber den beiden traditionellen Engineering-Baustoffen Stahl und Beton besitzt Holz wesentliche Vorteile und 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 den technischen Materialien zu teilweise erheblichen Wettbewerbsnachteilen führen. Hierbei ist beispielsweise die gegenüber Stahl und Kunststoff geringe Materialeffizienz bei der Verarbeitung des Rohholzes in tragende Querschnitte zu nennen. 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. Die geringen Festigkeiten quer zur Holzfaser führen insbesondere bei Bauteilanschlüssen oft zu aufwändigen oder ästhetisch unbefriedigenden Ergebnissen.

Die bisherigen Grenzen und Schwächen von traditionellen Holzkonstruktionen behinderten ihre verbreitete Anwendung im Brückenbau, Hochbau und Industriebau. Die Beseitigung oder signifikante Verbesserung dieser Schwächen des Holzbaus wurden im Forschungsvorhaben Hochleistungsholztragwerke angegangen. Das anspruchsvolle Ziel war, den natürlichen Rohstoff Holz in ein Hochleistungsmaterial zu verwandeln, dessen Eigenschaften wie Festigkeit, Steifigkeit, Dauerhaftigkeit und Form je nach Erfordernis vom planenden Ingenieur festgelegt werden können. So soll Holz durch zielgenaue Eigenschaftsänderungen in seiner Leistungsfähigkeit gesteigert und somit zu Hochleistungsholz werden. Die Änderungen beziehen sich dabei erstens auf den Stoff selbst, zweitens auf neue Technologien und drittens auf Querschnittsbildungen beliebiger Form. Mit der durch Kombination von zwei oder drei dieser Grundänderungen entstehenden Schnittmenge (vgl. Abb. 1.1) kann ein Hochleistungsbauprodukt mit je nach Anforderungen gewünschten Eigenschaften hergestellt werden. Der Begriff Hochleistung ist dabei im Sinne einer signifikanten Verbesserung des Tragverhaltens, der Gebrauchstauglichkeit, der Wirtschaftlichkeit und des ästhetischen Erscheinungsbildes der Konstruktion zu verstehen, die durch die Wahl der neuen Technologien und der Kombination der Eigenschaftsänderungen zustande kommt.

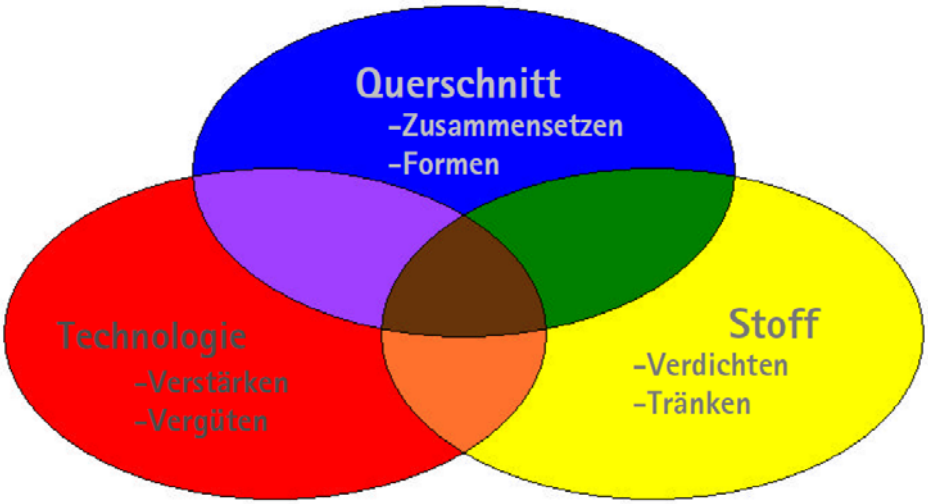


Abb. 1.1: In den Schnittmengen wird Holz zu Hochleistungsholz

Mit Hilfe der neuen Technologien Holzverdichtung, Querschnittsformung und Faserverstärkung sowie ihrer Kombination wird aus dem traditionellen Material Holz ein Engineering-Baustoff, der im Tragwerk variabel und beanspruchungsgerecht gemäß den lokalen Erfordernissen eingesetzt werden kann. Die sich aus der Richtungsabhängigkeit des Baustoffs ergebenden tragwerksplanerischen Schwierigkeiten, z. B. im Umgang mit auftretendem Querzug, können vermindert werden. In der Verbindungsmitteltechnik lassen sich mit lokalen Holzverstärkungen die Stahlanteile in den Verbindungen verringern, der Arbeitsaufwand erheblich reduzieren und ästhetisch ansprechende Knotenpunkte schaffen. Faserverstärkungen werden zudem auf dem Gebiet der Sanierung historisch wertvoller Bauten neue preiswerte, aber auch gestalterisch überzeugende Lösungen bieten. Formhölzer wie Holzröhren können in vielen Fällen nicht nur statisch sinnvoller als Vollholzquerschnitte eingesetzt werden, sondern schaffen außerdem zusätzliche Gestaltungsspielräume in der Architektur.

Tabelle 1.1: Mögliche Eigenschaftsänderungen von Holz zu Hochleistungsholz

Eigenschaft	Mögliche Veränderung
Tragfähigkeit	lässt sich z.B. durch Verdichtung, Verstärkung und Querschnittswahl steigern
Dauerhaftigkeit	kann u.a. mittels Vergütung und Tränkung erhöht werden
Formstabilität	ist beispielsweise beeinflussbar durch Vergüten und Zusammensetzen
bemessungsmaßgebende Anschlüsse	können u.a. mit Verbindungsverstärkung verhindert werden
Anisotropie	kann z.B. durch Verstärken in der gewünschten Richtung vermindert werden
Materialeffizienz	lässt sich u.a. durch Querschnittsformung verbessern

Ziel des Projektes war es, dem Holzbau durch innovative Hochleistungsholztragwerke neue Marktsegmente zu erschließen und damit einen erhöhten Absatz zu verschaffen. Dies ist insbesondere aufgrund der nachhaltigen Verfügbarkeit des Baustoffes Holz von zentraler Bedeutung.

Holz als nachwachsende Rohstoff- und Energiequelle ist in idealer Weise geeignet, sich den Herausforderungen der nachhaltigen Entwicklung zu stellen und entscheidend zu deren Zielerreichung beizutragen. Dennoch muss sich Holz auch dem Wettbewerbsparadigma der Marktwirtschaft stellen, woraus sich Fragen der ökologischen Effektivität und der Effizienz im Vergleich zu potentiellen Substituten ergeben. Ein wesentlicher Bestandteil des Projektes war da-

rum die ökologische Bewertung mit Hilfe der Umweltleitungsmessung mit entscheidungsorientierten Ausrichtung. Die Ökobilanzierung betrachtet durch die systematische Analyse die ökologischen Auswirkungen der mit der Herstellung und Anwendung verbundenen Verfahren des neuen Engineering-Materials. Ein tragender Gedanke war deshalb die Lebenszyklusorientierung. Die Ergebnisse des Verbundprojektes werden so mittels der Umweltleistungsmessung zur Nachhaltigkeitsstrategie entlang der Wertschöpfungskette der Forst-, Holz- und Bauwirtschaft beitragen.

Die im Rahmen des Projektes entwickelten Arbeitshilfen wie Anwendungsrichtlinien und praxisorientierte Bemessungsvorschriften sowie die Pilotanwendungen sollen die Akzeptanz der Tragwerksplaner und Architekten für den neuartigen Engineering-Baustoff unterstützen.

Wesentliche wirtschaftliche Effekte werden sich aus der Verbesserung der Materialeffizienz, effizienteren Konstruktionsprinzipien sowie der Reduktion bzw. Eliminierung des Stahlanteils in Holzverbindungen ergeben. Dem Holz wird sich somit zukünftig eine Vielzahl von neuen Anwendungsgebieten in fast allen Bereichen des Bauwesens erschließen. Neben technischen und wirtschaftlichen Verbesserungen entstehen neue architektonische Spielräume. Der Baustoff Holz gewinnt so in seiner Gesamtheit an Wettbewerbsfähigkeit und fördert damit maßgeblich die Nachhaltigkeit.

1.3 Projektpartner

1.3.1 Allgemeines

Aufgrund der Komplexität der zu realisierenden Aufgabenstellungen wurde das Verbundprojekt in drei Teams gegliedert, welche jeweils spezielle Ausrichtungen und Partner mit dem erforderlichen Knowhow beinhalten (vgl. Abb. 1.2).

Das Team Wissenschaft war im Sinne universitärer Forschung schwerpunktmäßig für die theoretische Herleitung sowie die zugehörigen Versuche der einzelnen Teilaufgaben und somit der Erzielung von (theoretischen) Forschungsergebnissen und deren Verbreitung zuständig. Zudem übernahm die GWT die organisatorische Koordination des Verbundprojektes.

Für das Team Tragwerke und Architektur ergab sich die Funktion, die Forschungsergebnisse in praktikable Tragwerkskonstruktionen und baupraktische Bemessungsvorschriften zu überführen sowie Pilotprojekte zu planen und auszuführen. Weiterhin sollte das Team Wissenschaft bei der Ökobilanzierung sowie der Unterrichtung der Fachwelt über die Forschungsergebnisse unterstützt werden. Zudem übernahm das IaFB die fachliche Koordination aller Beteiligten.

Aufgabe des Teams Wirtschaft war es einerseits, die vorgeschlagenen Bauteil- oder Verbindungslösungen auf praktische Ausführbarkeit zu untersuchen und gegebenenfalls in Absprache mit den Partnern zu optimieren, andererseits aber auch, die Bauteile, Probekörper für Versuche und Verbindungen herzustellen und Kennwerte aus dem Herstellprozess für die Ökobilanzierung bereitzustellen.

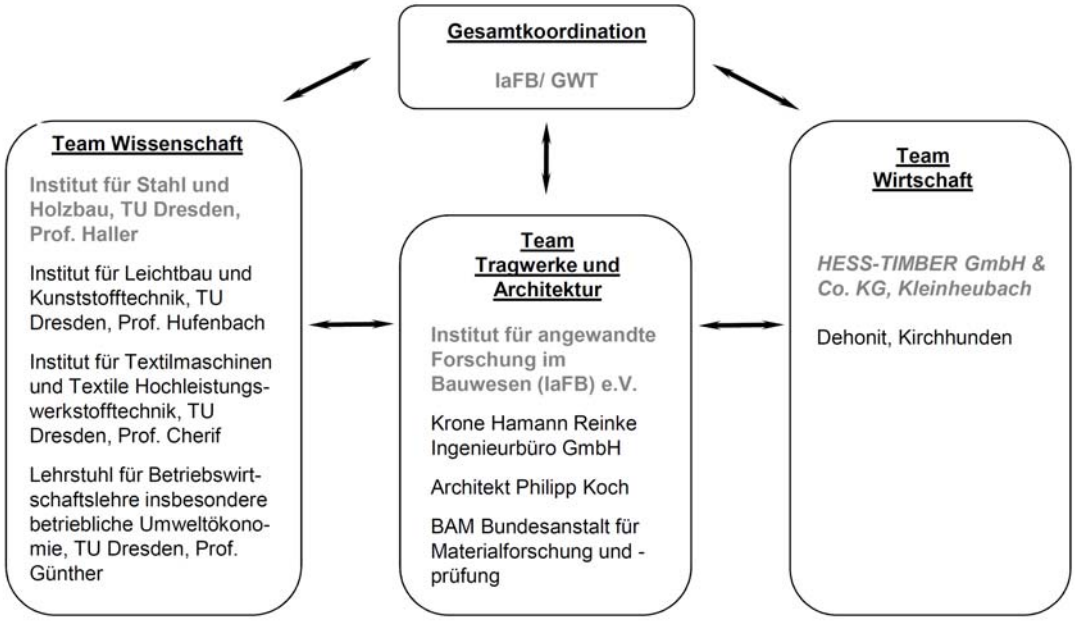


Abb. 1.2: Partner im Verbundprojekt

Im Folgenden werden die Teams mit ihren zugehörigen Partnern und deren jeweiligen Wissens- und Forschungsschwerpunkten vorgestellt.

1.3.2 Team Wissenschaft

1.3.2.1 Professor Haller, Institut für Stahl- und Holzbau, TU Dresden (ISH)

Teamleitung des Teams „Wissenschaft“

Verantwortlicher: Prof. Dr.-Ing. Peer Haller

Mitarbeiter: Dr.-Ing. Andreas Heiduschke, Dipl.-Ing. Robert Putzger

Ansprechpartner: Dr.-Ing. Andreas Heiduschke
Eisenstuckstraße 33, 01069 Dresden
Telefon: +49 351 463 35784
Email: andreas.heiduschke@mailbox.tu-dresden.de

Sekretariat: +49 351 463 35575
Email: holzbau@mailbox-tu-dresden.de

Professor Haller arbeitet seit Beginn der neunziger Jahre auf dem Gebiet der faserverstärkten Konstruktionen im Rahmen von europäischen Programmen und industriellen Forschungsprojekten. Er war Gründungsmitglied des Sonderforschungsbereiches 528 und Projektleiter des Teilprojektes C3 „Textilverstärkte Holzkonstruktionen“.

Ein AIF Projekt Nr. 1164 B „Hochleistungsverbindungen aus GF-verstärktem Pressholz“ wurde erfolgreich zum Abschluss gebracht. Dabei wurde zum ersten Mal schichtverleimtes Pressholz in Kombination mit preiswerten, handelsüblichen Glasfasergeweben für Holzverbindungen untersucht. Dieser Verbund hat sich als sehr leistungsfähig erwiesen, so dass in weiteren Schritten im SFB 528 grundlegende Untersuchungen zur Verstärkung stabförmiger Verbindungsmittel durchgeführt wurden, die zum Abschluss der ersten Projektphase zur textiltechnischen Herstellung spezieller Verstärkungstextilien geführt haben.

In einem weiteren AiF-Projekt Z 111 wurden multiaxiale Gelege für verschiedene Entwurfsparameter getestet wie Faserwinkel, Verstärkungsgrad, textiles Flächengewicht, Verbindungsmit-

telanzahl und Abstände etc. In diesem Zusammenhang wurden auch seismische Untersuchungen an zweigeschossigen Rahmentragwerken mit textilbewehrten Pressholzverbindungen durchgeführt. Dabei wurden sehr gute Ergebnisse erreicht. In Hinblick auf die Dauerhaftigkeit des Verbundes, welche besonders bei Außenanwendungen von Bedeutung ist, wurden Untersuchungen des Haftverbundes nach unterschiedlichen Beanspruchungen durchgeführt. Diese wurden in Klimakammern, künstlichen Bewitterungsschränken und in der Freibewitterung für verschiedene Leime, Holzarten und Textilien realisiert. Zu Beginn des HHT-Projektes lagen Erfahrungen über einen Zeitraum von etwa drei Jahren vor. Vieles deutete auf den Außeneinsatz der Verbunde hin, es zeigte sich jedoch auch, dass nicht alle gleichermaßen geeignet sind.

Die Herstellung von Pressholz und die dabei auftretenden großen Verformungen waren der Ausgangspunkt für die Patentierung und Herstellung erster Formholzrohre. Bei letzteren stehen nicht wie beim Pressholz die mechanischen Eigenschaften im Vordergrund, sondern das Flächenmoment, das in höherer Ordnung in die Bemessung des Querschnittes eingeht. Das Patent für diese Profile aus Holz und das Verfahren zur Herstellung wurde 2002 angemeldet und in den Jahren 2003 bis 2006 in verschiedenen europäischen und außereuropäischen Ländern erteilt.

Im Mittelpunkt eines anderen vom Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit im Rahmen der Initiative Netzwerkmanagement Ost (NEMO) geförderten Projektes stand die Entwicklung des prinzipiellen Verfahrens zur quasi- kontinuierlichen Produktion von technischen Querschnitten aus Formvollholzprofilen auf der Basis eines Hochschulverfahrenspatentes. Das NEMO- Projekt unterstützte ausschließlich die Managementleistung und damit die Koordination eines Netzwerkes. Finanzielle Mittel zur Forschung standen diesem Förderinstrument nicht zur Verfügung.

1.3.2.2 Professor Cherif, Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik, TU Dresden (ITM)

Verantwortlicher: Prof. Dr.-Ing. Chokri Cherif

Mitarbeiter: Dipl.-Ing. Wolfgang Trümper

Ansprechpartner: Dipl.-Ing. Wolfgang Trümper
George-Bähr-Straße 3c, 01069 Dresden
Telefon: +49 351 463 36217
Email: wolfgang.truemper@mailbox.tu-dresden.de
Sekretariat: +49 351 463 39300

Das Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik, TU Dresden (ITM) (vormals Institut für Textil- und Bekleidungstechnik (ITB)) der TU Dresden zeichnet sich neben seinen Lehraufgaben für die eigene Studienrichtung im Maschinenbau durch eine intensive Forschungstätigkeit auf dem Gebiet der textilen Flächenbildung und der Konfektion aus. Ein Schwerpunkt der Forschung und Entwicklung besteht seit rund 20 Jahren in wissenschaftlichen Untersuchungen zur Entwicklung textiler Flächenstrukturen für die beanspruchungsgerechte Verstärkung von Kunststoffverbunden und deren technologische und konstruktionstechnische Umsetzung in Textilmaschinen. In diesem Zusammenhang konnten Erfindungen zum Patent angemeldet werden, die eine variable Fadenlegung in Kettengewirken beinhalten. Damit lassen sich Krafteinleitungsstellen, die spannungsgerechte, lineare Fadenlegung im x-y-Flächennetz, Durchbrüche in der Fläche und der späteren Bauteilkontur realisieren. Die patentierte Fadenmanipulation ist an zwei Versuchs-Nähwirkmaschinen des Institutes möglich. Damit lassen sich prinzipiell CAD- gestützt auch Strukturen für die 2D-Abwicklung von 3D-Bauteilverstärkungen herstellen, wie sie im Bereich des Holzbaues zu erwarten sind und in gemeinsamen Projekten mit dem Institut für Stahl- und Holzbau der TU Dresden erfolgreich umgesetzt wurden.

Neben diesen konstruktiven Gestaltungsmöglichkeiten garantieren modernste Flächenbildungstechnologien (Multiaxialwirktechnik, Flachstricktechnik) robotergestützte Nähtechnik zur Vorfertigung integraler textiler Preforms und modernste Prüftechnik sowie Materialanalysesysteme eine Forschung auf höchstem Niveau. Das Institut initiierte maßgeblich die Forschergruppe FOR 278 und den Sonderforschungsbereich SFB 528 an der TU Dresden.

Im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 528 „Textile Bewehrungen zur bautechnischen Instandhaltung und Verstärkung“ (SFB 528) wurden seit 1999 Grundlagen zur textilen Verstärkung von Holzverbindungen sowie mechanische und physikalische Betrachtungen an Holz-Textilverbindungen erarbeitet. Diese Arbeiten haben in der internationalen Fachwelt großes Interesse ausgelöst. Erst durch die enge interdisziplinäre Zusammenarbeit an der TU Dresden zwischen dem ITM und dem ISH ist das Wissen über maßgeschneiderte Entwicklungen und die Herstellung textiler Strukturen sowie über deren Tragverhalten für das Projekt verfügbar. Die im SFB 528 entwickelten Grundlagen konnten somit als Basis für einen Aspekt des HHT-Projektes herangezogen werden.

Die zu entwickelnden Spezialverstärkungen können in der Textilmaschinenhalle des Institutes eigens für die entsprechenden Tragwerkselemente und -konstruktionen hergestellt und den notwendigen technologischen und statischen Untersuchungen unterzogen werden. Dieser Schritt ist für die Überführung der Erkenntnisse aus dem SFB 528 in die konkrete Baupraxis des Ingenieurbaus von großer Bedeutung. Die Zusammenarbeit spart im Projekt zugleich wesentliche Investitionskosten für eigene Versuchs- und Messeinrichtungen, da sie hier bereits vorhanden sind. Die Entwicklung einer umfassenden textilen Verstärkungstechnologie erfordert auch in Zukunft große Anstrengungen in der Grundlagen- und angewandten Forschung. Die TU Dresden besitzt u.a. auf diesem Gebiet ein Alleinstellungsmerkmal.

1.3.2.3 Professor Hufenbach, Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik, TU Dresden (ILK)

Verantwortlicher:	Prof. Dr.-Ing. Werner Hufenbach
Mitarbeiter:	Dipl.-Ing. Mike Thieme
Ansprechpartner:	Dipl.-Ing. Mike Thieme Holbeinstraße 3, 01307 Dresden Telefon: +49 351 463 38080 Email: m.thieme@ilk.mw.tu-dresden.de Sekretariat: +49 351 463 38142 Email: ilk@ilk.mw.tu-dresden.de

Am Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK) liegen langjährige Erfahrungen auf dem Gebiet der Auslegung komplexer Strukturen aus anisotropen Verbundwerkstoffen und Werkstoffverbunden vor. Die Forschungsaktivitäten reichen dabei von der hygro-thermo-mechanischen Werkstoffcharakterisierung über die rechnerische Struktur- und Bauteilsimulation bis hin zur Fertigung von Prototypen und experimentellen Prüfung von anisotropen Bauteilstrukturen bei überlagerter komplexer Belastung.

Einen wesentlichen Forschungsschwerpunkt bildet die Dimensionierung von Verbundbauteilen aus anisotropen Werkstoffen mit Hilfe eigens entwickelter analytischer Berechnungsmethoden. Für ein angepasstes Dimensionierungskonzept ist die Anwendung derartiger mathematischer Modelle, die insbesondere auch die Anisotropie von Einzelschichten sowie die Inhomogenität bei Mehrschichtstrukturen erfassen, unerlässlich.

Die bisher erarbeiteten Simulationsmodelle auf Grundlage analytischer Verfahren für scheiben-, platten- und rohrförmige sowie profilförmige Verbunde als elementare Teilstrukturen wurden in entsprechenden Rechnerprogrammen implementiert (Softwareprogrammreihe CLA). Mit Hilfe dieser modulartig aufgebauten Programmsysteme lassen sich für einfache Bauteile umfassende Parameterstudien durchführen, die eine physikalische Deutung wesentlicher Konstruktionsvariablen bei hoher Genauigkeit zulassen und bereits in der Auslegungsphase eine Abschätzung der Veränderung maßgeblicher Verbundparameter wie Materialkennwerte, Schichtaufbau und Geometriedaten am Rechner ermöglichen.

Als Mitglied der Interessengemeinschaft Holz an der Technischen Universität Dresden ist das ILK in verschiedenen grundlagen- und anwendungsorientierten Vorhaben im Bereich der Holzforschung eingebunden. Zu erwähnen ist hierbei etwa die werkstoffmechanische Charakterisie-

rung verschiedener Voll- und Verbundhölzer mittels eigens entwickelter Versuchstechnik. Im Rahmen des DFG-Sonderforschungsbereiches 528 wurden darüber hinaus in enger Zusammenarbeit mit dem Institut für Stahl- und Holzbau (Prof. Haller) theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Kerbspannungsverhalten textilbewehrter Holzkonstruktionen durchgeführt.

Im Bereich der Prototypenfertigung von faserverstärkten Verbundstrukturen verfügt das ILK neben einem Kunststofftechnikum mit Laminier- und Presseinrichtungen insbesondere über drei Hochleistungsautoklaven (max. Beschickungsraum ∅1500 mm × 3500 mm, T_{max} 1200 °C, p_{max} 100 bar) sowie über eine 5-Achsen-Wickelmaschine. Eine Flechtmaschine zur Herstellung von Flechtschläuchen und zum Umflechten von Hybridstrukturen ist inzwischen ebenfalls vorhanden.

1.3.2.4 Professor Günther, Lehrstuhl für Betriebswirtschaftslehre, insb. Betriebliche Umweltökonomie, TU Dresden (BU)

Verantwortliche: Prof. Dr. Edeltraut Günther

Mitarbeiter: Christian Manthey, MSc.

Ansprechpartner: Sekretariat BU
Münchner Platz 1/3 3, 01187 Dresden
Telefon: +49 351 463 34313
Email: bu@mailbox.tu-dresden.de

Prof. Dr. Edeltraud Günther leitet seit 1996 die Professur für Betriebliche Umweltökonomie an der TU Dresden. Der Schwerpunkt der studentischen Ausbildung liegt dabei auf dem Umweltmanagement und den ökologieorientierten Informations- und Entscheidungsinstrumenten. In der Forschung spezialisierte sie sich auf die Bereiche Umweltleistungsmessung (auf Produkt- und Prozessebene), umweltfreundliche Beschaffung in öffentlichen Einrichtungen und privaten Unternehmen, Wertrelevanz des Umweltmanagements von Unternehmen sowie Entschleunigung von Konsum- und Produktionsprozessen. Unter der Leitung von Frau Prof. Dr. Edeltraud Günther führte die TU Dresden ein Umweltmanagement nach EG-Öko-Audit-Verordnung ein, das mittlerweile seit 2002 regelmäßig validiert wird. Sie ist darüber hinaus beim Normenausschuss Grundlagen des Umweltschutzes (NAGUS) des Deutschen Instituts für Normung e.V. tätig.

An der Professur wurde der Dresdner Ansatz zur ökonomisch-ökologischen Optimierung (O^3) in Organisationen und somit zur Steuerung der Umweltleistung entwickelt. Aufbauend auf der Erarbeitung theoretischer Grundlagen wurden Prinzipien für die Steuerung der Umweltleistung aufgestellt und daraus Umsetzungsregeln abgeleitet. Das Konzept wurde und wird bisher in drei BMBF-Förderprojekten und weiteren Vorhaben umgesetzt. Hierzu zählen u.a. für den Bereich Produktionsprozesssteuerung der EPM-KOMPAS (FKZ 01 RU 0032), für den Bereich Transportprozesssteuerung das Forschungsprojekt ETIENNE (FKZ 19 G 1033 A), für die Steuerung der Produktentwicklung eine Methode, die für die Degussa entwickelt wurde, sowie für Beschaffungsentscheidungen die Anwendung bei der Bewertung von OP-Textilien (FKZ 0330446A).

1.3.2.5 Gesellschaft für Wissens- und Technologietransfer der TU Dresden mbH (GWT); (Unterauftragnehmer Verbundprojektmanagement)

Verantwortlicher: Claus-Peter Held

Mitarbeiter: wechselnd; zuletzt: Grit Herrmann, Thomas Holstein

Ansprechpartner: Grit Herrmann
Chemnitzer Straße 48b, 01187 Dresden
Telefon: +49 351 8734 1110
Email: grit.herrmann@gwtonline.de
Sekretariat: +49 351 8734 1720
Email: contact@gwtonline.de

Die GWT ist als wissenschaftliches Dienstleistungsunternehmen seit 1996 am Markt. Die Gesellschaft agiert an der Schnittstelle zwischen Wissenschaft und Wirtschaft. Sie bündelt akademische Ressourcen der Technischen Universität Dresden und anderer Forschungseinrichtungen für den freien Markt.

Die GWT ist eine von der TU Dresden gesellschaftsrechtlich unabhängige GmbH. Sie ist ein Mitglied der Firmengruppe der Gesellschaft von Freunden und Förderern der TU Dresden e.V. (GFF). Die Kompetenzen sind weit gefächert und reichen in alle wissenschaftlichen Schlüsseldisziplinen von den Grundlagenwissenschaften bis hin zur Medizin.

Die Geschäftsfelder der GWT lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Auftragsforschung und Technologietransfer: Mit dem Bereich Auftragsforschung stellt die GWT Unternehmen Forschungsressourcen zur Verfügung. Das können hoch spezialisierte Wissenschaftler aber auch interdisziplinäre Teams unter Nutzung der dafür erforderlichen Labore und Apparaturen sein.

Wissenschaftliche Dienstleistungen: Das Spektrum reicht von der Patentverwertung über interdisziplinäres Projektmanagement, Beratung in fachlichen Fragen zu EU-Förderprogrammen bis hin zu wissenschaftlich-technischen und medizinischen Dienstleistungen.

Forschungsnahe Produkte und Technologien: In diesem Geschäftsfeld werden universitäre Forschungsergebnisse und Patente innerhalb der GWT wirtschaftlich umgesetzt, weiter entwickelt, Produkte bzw. Technologien realisiert und am Markt angeboten.

1.3.3 Team Tragwerke und Architektur

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

Teamleitung des Teams „Tragwerke und Architektur“; fachliche Gesamtkoordination

Verantwortlicher:	Dipl.-Ing. Martin Hamann
Mitarbeiter:	Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Petra Kubowitz, Dipl.-Ing. (FH) Yvette Lemke, Dipl.-Ing. Anke Schäcke, Dipl.-Ing. Andrea Untergutsch, Dipl.-Ing. Tilo Birk (ehem.)
Ansprechpartner:	Dipl.-Ing. Petra Kubowitz Sophienstraße 33A, 10178 Berlin Telefon: +49 30 283928 56 Email: kubowitz@iafb.de Sekretariat: +49 30 283928 0 Email: mail@iafb.de

Das IaFB hat sich aus dem Ingenieurbüro Martin Krone, Berlin, heraus gegründet. Im Laufe der letzten Jahre hat sich im Büro ein stets wachsender Bedarf an Forschung und Entwicklung herauskristallisiert, der jetzt im Rahmen des Institutes bearbeitet und organisiert wird. Neben vielen kleineren Projekten werden inzwischen verstärkt auch große Verbundprojekte bearbeitet. Die Institutsmitglieder setzen sich aus promovierten und diplomierten Bauingenieuren mit umfangreicher Berufserfahrung zusammen. Diese Berufserfahrung stützt sich auf die langjährigen Tätigkeiten der Mitglieder in verschiedenen Ingenieurbüros, technischen Universitäten sowie ehemaligen Mitarbeitern der BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung in Berlin. Das IaFB hat mit der BAM eine Kooperationsvereinbarung bezüglich der gegenseitigen Unterstützung bei Projekt- und Forschungstätigkeiten abgeschlossen.

Die Hauptziele des IaFB definieren sich wie folgt:

- Förderung von Wissenschaft und Forschung im Bereich Bauingenieurwesen
- Unterstützung, Organisation, und Durchführung von Forschungsvorhaben
- Einführung von Forschungsergebnissen in die praktische Anwendung

Für das Team Tragwerke ergab sich aufgrund seiner Spezialisierung die Funktion, die Forschungsergebnisse in praktikable Tragwerkskonstruktionen und baupraktische Bemessungsvorschriften zu überführen sowie Pilotprojekte zu planen und auszuführen. Zudem übernahm das IaFB die gesamte fachliche Koordination der Vielzahl der fachlich Beteiligten und zunehmend auch die organisatorische Gesamtkoordination.

1.3.3.2 Krone Hamann Reinke Ingenieurbüro GmbH, vormals KRONE Ingenieurbüro GmbH, Berlin (KRONE)

Verantwortlicher: Dipl.-Ing. Martin Hamann
Sophienstraße 33A, 10178 Berlin
Telefon: +49 30 283928 25
Email: hamann@ibkrone.de

Sekretariat: +49 30 283928 0
Email: mail@ibkrone.de

Das Büro für Tragwerksplanung, mit derzeit ca. 30 festangestellten Mitarbeitern, ist tätig auf dem gesamten Gebiet des Ingenieurbaus wie Hoch- und Industriebau, Brückenbau und Tiefbau sowie auch im Bereich der Sanierung.

Durch die langjährige Erfahrung in der Planung und Prüfung von anspruchsvollen Bauvorhaben und durch zahlreiche Verbindungen zu akademischen Einrichtungen ergeben sich in diesem Büro eine Vielzahl von Projekten, welche auf dem Gebiet des Bauwesens für die Bauforschung von sehr großem Interesse sind und sich hervorragend in das Themengebiet des vorliegenden Projektes einfügen.

Weiterhin verfügt das Büro Krone Hamann Reinke über die gesamte im Bereich der Planung von Tragwerken erforderliche technische und auch personelle Infrastruktur. Hierzu gehören insbesondere qualifizierte Bauingenieure, Hard- und Softwaretechnik, moderne CAD-Arbeitsplätze, sowie alle Möglichkeiten der modernen Datenkommunikation.

1.3.3.3 Architekt Atelier pk

In Abhängigkeit von der Bau- und Konstruktionsart der Pilotprojekte, wurde im Projekt ein Architekt zur Beratung hinzugezogen.

Architektur, Freiraumplanung und Städtebau sind die Kerndisziplinen, in denen sich atelier pk bewegt. Nicht getrennt sondern gemeinsam und übergreifend werden sie betrachtet, analysiert und bearbeitet. Gestalterisch spricht atelier pk eine reduzierte Sprache und versucht in seinen Entwürfen die Anzahl der Elemente auf ein Minimum zu reduzieren.

In vielfältiger Zusammenarbeit zwischen atelier pk und Krone Hamann Reinke wurden zahlreiche gute Erfahrungen gesammelt.

Verantwortlicher: Dipl.-Ing. Architekt Philipp Koch
Schönhauser Allee 8, 10119 Berlin
Telefon: +49 30 4050 439 20
Email: info@atelier-pk.de

1.3.4 Team Wirtschaft

1.3.4.1 HESS TIMBER GmbH & Co.KG, vormals Hess-Wohnwerk GmbH & Co.KG, Kleinheubach

Teamleitung des Teams „Wirtschaft“

Verantwortlicher: Mathias Hofmann

Mitarbeiter: B.Eng. Jan Fandler, Dipl.-Ing. Rensteph Thompson

Ansprechpartner: Dipl.-Ing. Rensteph Thompson
Am Hundsrück 2, 63924 Kleinheubach
Telefon: +49 9371 4003 11
Email: rensteph.thomspon@hess-timber.com
Sekretariat: +49 9371 4003 0
Email: info@hess-timber.com

Das Unternehmen entstand aus der Hess Holzleimbau Technologie GmbH & Co. KG und der Wohnwerk GmbH. Mit Wirkung vom 01. April 2005 wurde die Gesellschaft HESS WOHNWERK gegründet und firmiert seit dem 01. Juni 2010 unter dem Namen HESS TIMBER GmbH & Co. KG, in der gegenwärtig etwa 50 Mitarbeiter beschäftigt sind. Gegenstand des Unternehmens ist die Herstellung von Brettschichtholz, Holzleimbindern bis 40 m Länge, Möbeln und Säulen aus Holz, der Ingenieurholzbau sowie der Projektbau mit hierzu notwendigen Ingenieurleistungen, die Holzbe- und -verarbeitung sowie der Vertrieb von bearbeiteten Holzerzeugnissen jeder Art.

Das Unternehmen gehört zu den europäischen Marktführern bei der Herstellung von Holzsäulen, es hat sich die Anerkennung im Fassadenbau und bei Holzbau-Sonderprojekten erworben. Erfahrene und kreative Ingenieure und Techniker am Standort Kleinheubach bei Miltenberg setzen auch kühne Entwürfe und Vorstellungen in verlässliche Konstruktionen um. Auch eigene Gestaltungen werden in Zusammenarbeit mit Architekten, Statikern und Bauherren entworfen. Ein kreatives Team mit Knowhow und der erforderlichen technischen Ausstattung zur Umsetzung und Verwirklichung von Objekten in Brettschichtholz ist offen für neue innovative Ideen. Zum umfangreichen Leistungsangebot zählen: die Erarbeitung von Vorentwürfen und kostengünstigen Sondervorschlägen; prüffähige statische Nachweise und Konstruktionszeichnungen; Bearbeitung aller Planungsphasen mit EDV-Unterstützung auf dem neusten Stand der Technik: 3-dimensionale CAD-Technik, Statik-Software, selbstverständlich auch für 3-dimensionale Aufgabenstellungen und Online-Datentransfer der Konstruktionspläne im Dialog mit Architektur- und Ingenieurbüros. Umfangreiche Arbeitsvorbereitung, auch für alle notwendigen Stahlteile und Verbindungsmittel, maßgenauer Abbund, erforderliche Spezialtransporte und termingerechte Montage runden die Leistungen ab.

1.3.4.2 Deutsche Holzveredelung Schmeing oHG (deho group), Kirchhundem (Dehonit)

Die Deutsche Holzveredelung wurde vor ca. 65 Jahren von den Brüdern Alfons & Ewald Schmeing in Kirchhundem im Sauerland gegründet. Vor ca. 35 Jahren wurde von den Eigentümern der Trend der Zeit erkannt und zunächst mit Holzmaschinen eine Produktion von Halbzeugen aus Polypropylen und Polyethylen begonnen. Mit modernsten Produktionsanlagen zur Herstellung von technischen Kunststoffen hat sich diese Abteilung, die unter dem Namen dehoplast® bekannt ist, zum umsatzstärksten Geschäftsbereich der Deutschen Holzveredelung mit Vertretern in der ganzen Welt entwickelt. Eine große Fertigteilbearbeitung und eine Extrusionsabteilung komplettieren den Produktbereich.

Begonnen wurde mit der Produktion von Kunstharzpressholz, bei der hochwertige Rotbuchenfurniere geschichtet, mit Phenolharzen verklebt und unter hoher Temperatur und großem Druck zu Halbzeugen mit spezifischen Gewichten bis zu 1,4 g/cm³ gepresst werden. Der Produktname dehonit® steht heute für ein umfangreiches Programm an Kunstharzpressholz, das weltweit erhältlich ist.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

1.4.1 Allgemeines

Um die Partner mit ihrem jeweiligen wissenschaftlichen und technischen Stand (vgl. auch Kap. 1.3) sowie projektrelevante Erkenntnisse Dritter zu Projektbeginn für das Konsortium bekannt zu machen, wurde neben einem Einführungsworkshop der Kenntnisstand im Ingenieurholzbau recherchiert und vom IaFB als „State oft he Art“ –Bericht erstellt. Diese Berichtserstellung war Teil des HHT-Projektes und wurde in einem eigenen Arbeitspaket (AP 6.1) bearbeitet. Da die Inhalte jedoch den Wissenschaftlichen und technischen Stand zu Projektbeginn abbilden, werden die wichtigsten Auszüge im Folgenden dargestellt. Sie dienten als Grundlage für die Entwicklung neuer leistungsfähiger Konstruktionen. Etwa 1,5 Jahre nach Projektbeginn wurde im AP 6.1 ein Sachstandbericht zu Verbindungsmitteln erstellt. Dieser enthält nicht nur den Kenntnisstand zu Projektbeginn sondern auch die bis dahin erreichten Erkenntnisse (vgl. Kap.3.7.2).

1.4.2 State of the art – Ingenieurholzbau

Autor: Tilo Birk (ehem. IaFB), Auszüge zusammengestellt: Yvette Lemke (IaFB)

1.4.2.1 Holzvergütung

Veränderungen von Holzeigenschaften werden mit dem Ziel vorgenommen, das mechanisch-physikalische bzw. chemisch-biologische Verhalten von Holz zu verbessern. Insbesondere die Dimensionsstabilität (Schwinden und Kriechen), die Dauerhaftigkeit und Fotostabilität, die mechanischen Eigenschaften, die thermische Verformbarkeit und die Verleimbarkeit können maßgeblich durch nachfolgend beschriebene Maßnahmen verbessert werden.

1.4.2.1.1 Behandlung mit Wärme

Die Wärmebehandlung von Holz wirkt sich im Allgemeinen positiv auf die Dauerhaftigkeit des behandelten Materials aus. Dieser Effekt beruht im Wesentlichen auf der verringerten Wasseraufnahmefähigkeit des Holzes durch die Umwandlung hydrophiler OH-Gruppen zwischen Hemizellulose und Lignin infolge der Temperatureinwirkung. Dieser Effekt lässt sich aber auch durch das Verfahren der Acetylierung erreichen. Nachteilige Nebenwirkungen thermischer Behandlung sind die Versprödung des Materials und die thermische Zersetzung unter Abgabe von Aromaten im Temperaturbereich oberhalb 104°C. Aus diesem Grund sind bei der spanenden Verarbeitung auch besondere Maßnahmen gegen die Aufnahme der Stäube in die Atemwege zu ergreifen.

<u>Öl-Hitze-behandeltes Holz</u>

Prozessbedingungen:

- Temperatur
- Wärmezufuhr durch Ölbad

Anwendungen:

Thermo-Flooring (Boden- und Terrassenbeläge), Spielplätze, Fassadenelemente und Verschalungen, Lärmschutzwände etc. mit Anforderungen an hohe Dauerhaftigkeit der Konstruktion. Thermohölzer aus einheimischen Holzarten können eine sinnvolle Alternative zu chemisch behandelten Hölzern oder Tropenhölzern sein. Eine Zertifizierung des Herstellers macht den Einsatz der Produkte in Gebrauchsklasse GK 4 nach DIN EN 335 möglich. Eine solche Einstufung kann z. B. durch das Institut für Holztechnologie Dresden erfolgen.

Vorteile:

- verbesserte Dimensionsstabilität
- edle, dunkle Farbtöne

Probleme:

- Verleimungs- und Beschichtungsprobleme
- Ölaustritt während der Nutzungsphase möglich
- evtl. Farbänderung
- keine Zulassung für tragende Anwendungen

TMT (Thermally Modified Timber) – Thermoholz

Prozessbedingungen:

- Temperatur 150…260°C
- kontrollierte Umgebungsbedingungen: Luft mit Sauerstoffgehalt < 2%, Stickstoff, Öl, Dampf oder Vakuum
- durch Abspaltung der OH-Gruppen wird die Wasseraufnahmefähigkeit des Holzes und damit sein Quell- und Schwindverhalten positiv beeinflusst

Anwendungen:

Thermoflooring (Bodenbeläge), Möbel, Spielplätze, Fassaden und Verschalungen, Lärmschutzwände etc. mit Anforderungen an hohe Dauerhaftigkeit der Konstruktion. Einheimische Thermohölzer können eine sinnvolle Alternative zu chemisch behandelten Hölzern oder Tropenhölzern sein. Zertifizierung macht Einsatz in Gebrauchsklasse GK 3 nach DIN EN 335 möglich

Vorteile:

- verbesserte Dimensionsstabilität (geringere Quell- und Schwindverformungen (40% Rapp, Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, Hamburg; 50-70%, Fa. Mitteramskogler, Österreich)
- erhöhte Dauerhaftigkeit (GK 3, kein Erdkontakt), Prüfung der Eignung für Außeneinsatz, ggf. Erdkontakt und nichttragende Anwendung für Spielplatzgeräte nach [24], [38], [39] und [50].
- edle, dunkle Farbtöne

Probleme:

- Versprödung und Festigkeitsabnahme (20-40 %) durch Temperatureinwirkung (Verstärkung von Materialfehlern -> deshalb Sortierung des Ausgangsmaterial wichtig)
- Verringerung der Dichte durch thermische Abbauprozesse im Holz, darin dürfte auch ein Großteil des Festigkeitsverlustes begründet liegen
- evtl. Farbänderung
- gesundheitsschädlicher Schleifstaub
- keine Zulassung für tragende Anwendungen

Verkleben: Schwierigkeiten beim Verkleben von Thermoholz sind nicht bekannt. Ursprünglich ist man auf Grund der veränderten Zellstruktur und Wasseraufnahmefähigkeit von Schwierigkeiten bei der Benetzbarkeit mit wasserbasierenden Klebstoffsystemen ausgegangen. Herkömmliche Klebesysteme können aber ohne nennenswerte Veränderungen der Klebstoffrezepturen eingesetzt werden. Bei Furnierverleimungen ist auf die geringere Absorptionsfähigkeit des Thermoholzes zu achten. Hier müssen gut benetzende Leime eingesetzt, unter Umständen Presszeiten verlängert und Pressdrücke reduziert werden.

Verwendbarkeit thermisch modifizierter Hölzer für tragende und aussteifende Bauteile: Die Modifikation von Holz durch Wärmezufuhr kann als eine der bedeutendsten Innovationen der letzten Jahre in der Holzforschung und Holzwirtschaft angesehen werden. Thermisch modifiziertes Holz, im deutschen Sprachraum auch als Thermoholz bezeichnet, ist auf dem deutschen Holzmarkt immer noch eine neue, z. T. unbekannte Produktgruppe. TMT ist als Gruppe

neuer Holzarten anzusehen, die sich jeweils nach Holzart, Modifizierungsverfahren und Behandlungsstufe unterscheiden.

Dem Anstieg deutscher Produktionskapazitäten und dem damit einhergehenden wachsenden Bedürfnis nach Regeln bzw. einer Normung für diese neuartigen Hölzer, wurde durch das Europäische Komitee für Normung Rechnung getragen und 2004 die Arbeitsgruppe CEN/TC175/WG3/TG6 "Thermally Modified Timber" gegründet. Ziel ist die Erarbeitung einer Europäischen Technischen Spezifikation für TMT, die ggf. später in eine europäische Produktnorm weitergeführt werden soll. Durch das spezifische Eigenschaftsprofil thermisch modifizierter Hölzer im Unterschied zum naturbelassenen Holz (Festigkeit, Gleichgewichtsfeuchten) sind viele bestehende oder derzeit entwickelte Normen nicht bzw. nur teilweise auf TMT anwendbar, andererseits bestehen formale Anwendungsbeschränkungen für TMT, obwohl dieses in der Praxis bereits für diese Zwecke eingesetzt wird. Probleme sind insbesondere hinsichtlich der erforderlichen CE-Kennzeichnung zu erwarten. Um Schäden zu vermeiden, sollte auch in verschiedene Normen aufgenommen werden, ob und wie TMT einsetzbar ist.

Ziel ist es außerdem, die aktuelle bzw. in Erarbeitung befindliche Normen aus dem Bereich des Normenausschuss Holz und Möbel (NHM) auf die Besonderheiten von TMT abzustimmen, die Anwendbarkeit auf TMT herzustellen bzw. vorzubereiten sowie unnötige Anwendungsbeschränkungen abzubauen. Ein weiteres Ziel ist die Überprüfung aktueller Prüfnormen und -methoden, die zur Beschreibung und Ermittlung der Eigenschaften von TMT, aber auch anderer modifizierter Hölzer, geeignet sind.

Das Normungsvorhaben soll seinen Ausgangspunkt bei der thermischen Modifizierung bzw. den danach hergestellten Hölzern haben. Es soll jedoch auch für andere innovative Verfahren der Holzmodifizierung offen sein, die sich derzeit noch in der Entwicklungs- bzw. Einführungsphase befinden. Beispiel hierfür ist insbesondere die Vernetzung mittels Polymeren, aber auch die Acetylierung. Damit soll der universelle Ansatz des Normungsverfahrens unterstrichen werden.

Nach wie vor bestehen aber aus baupraktischer Sicht Unklarheiten, ob thermisch modifizierte Hölzer (z. B. TMT oder Öl-Hitze-behandeltes Holz) für tragende Zwecke eingesetzt werden dürfen. Dazu ist derzeit für Deutschland festzustellen: Die Verwendung dieses Materials für tragende und aussteifende Bauteile ist nur zulässig, wenn die Verwendbarkeit für diese Zwecke auf geeignete Weise nachgewiesen wird. Die Gründe hierfür sind insbesondere

- die in der Regel verringerte Tragfähigkeit und das veränderte Bruchverhalten von TMT gegenüber unbehandeltem Holz
- das Fehlen statistisch abgesicherter Werte für Berechnungen
- Forderungen aus dem Baurecht: thermisch modifiziertes Holz ist als eigene Holzart zu betrachten und nicht in der Bauregelliste A (für das Bauwesen verwendbare Holzarten) enthalten

Beispielhaft für die Empfehlungen beim Einbau sollen die Angaben der TMT-Hersteller den Abstand der Unterstützungen beim Einsatz für Terrassenbeläge genannt werden. Sie belaufen sich aufgrund der erfolgten Versprödung und Verringerung der Festigkeit auf etwa 40...50 cm.

Ein Verwendbarkeitsnachweis kann z. B. erbracht werden durch

- Belastungsprüfungen an Bauteilen von Spielplatzgeräten gemäß DIN EN 1176,
- Prüfungen und Nachweise im Rahmen einer Zustimmung im Einzelfall oder einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung durch die Baubehörden bzw. das DIBt.

Bis dato existiert für Thermoholz noch keine eigene Normung. Momentan wird eine Europäische Technische Spezifikation (TS) erarbeitet, die einer vorläufigen Norm entspricht. Unter Work-Item WI 9 175-008 "Thermally Modified Timber" werden derzeit die genauen Vorgaben dafür erarbeitet. Ein erster Entwurf grenzt dabei das Produkt von hitzebehandeltem Verpackungsholz ab. TMT ist demnach in einer Weise modifiziert, dass durch Behandlung mit Temperaturen über 160°C grundlegende Holzeigenschaften dauerhaft verändert sind.

Festigkeitswerte, die z. B. an kleinen, fehlerfreien Proben ermittelt wurden, dürfen für den Einsatz im Bauwesen nicht unmittelbar zur Bemessung von tragenden und aussteifenden Bauteilen herangezogen werden. Diese Einschränkung gilt auch für untergeordnete Baukonstruktionen aus Holz, z. B. Carports, sowie für Treppen und Balkone. Bei Treppen liegt explizit eine tragende Anwendung mit dynamischen Beanspruchungen (z. B. Springen/Stürzen von Personen) und hohen statischen Lasten (z. B. Möbeltransport) vor. Dies gilt auch für Treppenstufen, die auf Platten aufgeschraubt werden und nur teilweise auf diesen aufliegen. Auch freitragende Balkone bzw. solche mit tragenden Bauteilen aus TMT ohne Verwendbarkeitsnachweis sind nicht zulässig. Soweit es sich lediglich um Treppen- oder Balkonbeläge (vollflächig unterstützt) handelt, bestehen dagegen keine Einschränkungen zur Verwendung von TMT [78].

In Finnland wird TMT seit etwa 10 Jahren erfolgreich in tragenden Anwendungen eingesetzt. Spezielle Erfahrungen bestehen im Bau von Steganlagen zur Löschwasserentnahme mit planmäßiger Befahrung durch Feuerwehrfahrzeuge. Unterlagen zu den entsprechenden mechanischen Kennwerten wurden durch die Fa. Firstwood (Importeur des finnischen TMTs) zur Verfügung gestellt. Quelle der Daten ist der finnische Lieferant.

Das Normenpaket DIN EN 1176 regelt aktuell die Prüfung und Zulassung von Holz- und Holzwerkstoffen und damit auch von TMT für den Einsatz auf Spielplätzen und für Spielgeräte. Eine Neufassung des Normenpakets ist in Arbeit [24]. Die ursprüngliche Einspruchsfrist endete zum I. Quartal 2006.

1.4.2.1.2 Verdichten

Die Tragfähigkeit und Steifigkeit von Holz kann durch thermomechanische Verdichtung deutlich erhöht werden. Diese Idee reicht bis in die 80er Jahre des 19. Jahrhunderts zurück. Doch durch die Entwicklung neuer und leistungsfähigerer Baustoffe ebbte das Interesse an verdichtetem Holz bald ab. Erst in neuerer Zeit wird die Verdichtung von Holz und damit die Optimierung von Holzkonstruktionen weiter vorangetrieben.

Die wichtigsten Prozessparameter für das Verdichten von Holz sind Temperatur und Pressdruck (Höhe und zeitlicher Verlauf, Rückkühlbedingungen etc.) sowie die Holzfeuchte bei der Verdichtung. Sie sind deshalb auch Gegenstand aktueller Forschungstätigkeit und haben insbesondere auf die Eigenschaften des verdichteten Holzes (Dauerhaftigkeit, Festigkeit, Dimensionsstabilität) einen entscheidenden Einfluss. Vorarbeiten an der TU Dresden und das Quellenstudium lassen Temperaturen von 100...200 °C und Pressdrücke von 5...30 MPa für den Pressvorgang generell als geeignet erscheinen. Die Holzfeuchte sollte trotz ihrer positiven Auswirkungen auf den Verdichtungs- und Formprozess auf Werte unter 30 % begrenzt bleiben. Bei höherer Holzfeuchte besteht das Risiko der Zerstörung des Holzes durch Dampfexplosionen in der Zellstruktur. Durch eine optimierte Prozessführung oder nachträgliche Behandlungsmaßnahmen (Polymertränkung, Acetylierung, Dampfbehandlung) lässt sich das Rückerinnerungsvermögen des Holzes – der sogenannte „Shape-Memory“-Effekt – verringern oder ganz zurückdrängen.

<u>Verdichtetes Holz / Verfahren der TU Dresden</u>

Prozessbedingungen:

- Temperatur 100…140 °C,
- Wärmezufuhr durch Heizpresse oder Dampf, evtl. Vorwärmen im Heißluftofen,
- Abspaltung der OH-Gruppen erfolgt analog zum TMT auch schon bei den niedrigen Temperaturen des TU-Verfahrens

Anwendungen:

- Einsatz für tragende Anwendungen angestrebt

Probleme:

- Dimensionsstabilität, Untersuchungen zum gezielten Rückkühlen bzw. Temperieren oder Bedampfen in der Presse wünschenswert,
- gesundheitsschädlicher Schleifstaub durch die Wärmebehandlung

Wichtigster Unterschied zum Thermoholz: zusätzlich zur Wärmebehandlung erfolgt eine Verdichtung und damit eine Vergütung im Hinblick auf die Tragfähigkeit. Negative Effekte der Dichteverringerung wie etwa beim Thermoholz werden damit aufgehoben. Neben Fichte und Buche wurden am Institut für Stahl- und Holzbau der TU Dresden auch Birke, Pappel, Ahorn, Tulpenholz und Balsa erfolgreich verdichtet. Mögliche Verdichtungsgrade können bis zu 50 % liegen. Der Verdichtungsgrad ν ist dabei definiert als der Quotient aus Querschnittsverringerung bezogen auf die Ausgangsdicke des Materials. Ein Verdichtungsgrad von 50 % bedeutet also, dass das Holz auf die Hälfte seiner ursprünglichen Dicke verdichtet wurde.

$$\nu = \frac{t_0 - t_1}{t_0} \cdot 100\,\% \qquad \begin{array}{l} t_0 \ldots \textit{Holzdicke vor der Verdichtung} \\ t_1 \ldots \textit{Holzdicke nach der Verdichtung} \end{array}$$

Im Hinblick auf den unter 1.4.2.2.2 beschriebenen Vorgang des Formens zu Formholzprofilen, bei dem das verdichtete Holz das Ausgangsprodukt darstellt, empfehlen sich aber deutlich geringere Verdichtungsgrade von 25...30 % in Abhängigkeit von der maximalen Krümmung beim Formen und der Wandungsstärke des Formholzprofils. Außerdem ist eine genau Prozesssteuerung vor allem hinsichtlich der Temperatur beim Verdichten von Bedeutung. Zu hohe Temperaturen führen zum Verkleben der gefalteten Zellstruktur durch das erweichte Lignin und damit zu Problemen beim planmäßigen Rückverformen durch das Biegen.

Besondere Bedeutung kommt beim Verdichten darüber hinaus der Ausgangsfeuchte des Holzes zu, da die Anwesenheit von Wasser ein wichtiger Faktor für den Wärmetransport in das Holz darstellt. Insbesondere die Eignung von nicht technisch getrockneter Ware zum Verdichten sollte gegebenenfalls in weiteren Untersuchungen verifiziert werden. (vgl. z.B. [79], [80])

Kunstharzpressholz (KHP)

Kunstharzpressholz ist ein mit Polymer getränktes Produkt aus unter Temperatureinwirkung verdichteten, kreuzweise verleimten Furnierschichtlagen. Interessant für den Einsatz im Bauwesen sind neben seinen guten mechanischen Eigenschaften (hohe Festigkeit und Steifigkeit, gute Abriebfestigkeit und hohe Kerbschlagzähigkeit) auch seine Widerstandsfähigkeit gegenüber den Umwelteinflüssen, die auf ein Bauwerk einwirken. Insbesondere die Kombination von konventionellen BSH-Bauteilen mit Kunstharzpressholz in den Decklagen ist eine Möglichkeit für eine wirksame Verbesserung des Tragverhaltens und der Dauerhaftigkeit von Holzkonstruktionen und kann dieser Bauweise neue Einsatzmöglichkeiten mit erhöhten Anforderungen erschließen. Geeignete Holzarten für die Verarbeitung zu Kunstharzpressholz sind Buche, Hainbuche, Ahorn, Birke, Esche und andere harte Laubhölzer. Stellvertretend für die Vielzahl an Herstellern sollen hier die Produkte Lignostone, dehonit und Pagholz genannt werden.

Eigenschaften:

Dichte:	1,1...1,4 g/cm³
E_L-Modul:	12.000…26.500 N/mm²
Zugfestigkeit:	85...210 N/mm²
Biegefestigkeit:	115...280 N/mm²

Untersuchungen an der TU Dresden haben gezeigt, dass textile Verstärkungen in den Zwischenlagen von phenolharzgetränkten Furnierschichtholzplatten zu Steigerungen der Biege- und Zugfestigkeiten einerseits und E-Modul sowie weiteren z. B. elektrischen Eigenschaften andererseits um 15...30 % führen können. Lediglich die Druckfestigkeit quer zur Faser nimmt erwartungsgemäß geringfügig ab [77].

1.4.2.1.3 Wood-Plastic Composites (WPC)

WPC sind im weitesten Sinne kunstharzgebundene Holzwerkstoffe mit einem Holzmehl- oder Holzfaseranteil von 50...90 % und einer zumeist thermoplastischen Matrix. Ihr Einsatzgebiet ist momentan ähnlich dem des TMT auf dem Gebiet der Abdeckungen, Beläge und Beplankungen zu sehen. Von Interesse ist dieses Material vor allem aufgrund seiner hohen Dauerhaftigkeit und Verwandtschaft zu anderen modifizierten Holzprodukten hinsichtlich der Bestrebungen, sie in neue Produktnormen zu integrieren.

Aktuelle Entwicklungen der Normung von Wood Plastic Composites (WPC)

Wie bei allen neuen Werkstoffen fehlt es zu Beginn einer Materialentwicklung an verbindlichen Prüfvorschriften, Qualitätskriterien und Normen. Die Normungsaktivitäten zu WPC sind in den USA weiter fortgeschritten als in Europa. In Europa werden im CEN/TC 249 "Plastics" unter der WG 13 "Plastics - Wood Plastic Composites" seit 2004 Normentwürfe als technische Spezifikationen erarbeitet. Das Normungsverfahren wird aufgeteilt in die drei Teilbereiche: Prüfverfahren, allgemeine Spezifikationen und produktspezifische Eigenschaften. Die Normungsaktivitäten unter Holzaspekten werden derzeit aktiv durch das Österreichische Normungsinstitut - ON-FNA087 - AG Holz-Kunststoff-Verbundwerkstoffe (WPC) vorangebracht. Die ÖNORM B 3030 Holz-Kunststoff-Verbundwerkstoffe - Terminologie und Klassifizierung ist am 01.12.2005 als reines Terminologiedokument erschienen. Mit der ÖNORM B 3031 und ÖNORM B 3032 sind Normvorschläge für allgemeine Prüfverfahren zur Eigenschaftsprüfung von WPC und zur Ermittlung von Produkteigenschaften in Bearbeitung [78].

1.4.2.1.4 Melaminharztränkung von Holz

Bei der Tränkung von Holz mit Melaminharz werden wasserlösliche Melamin-Formaldehydharze in den Zellwänden bei Temperaturen zwischen 100 und 140 °C ausgehärtet. In der Folge entsteht eine erhöhte Resistenz gegenüber holzzerstörenden Pilzen und eine Verzögerung des Angriffs von Bläue- und Schimmelpizen. Im Außenbereich bleibt ein Schutzanstrich weiterhin erforderlich. Problematisch kann eine verstärkte Rissneigung sein.

1.4.2.1.5 Acetylierung

Die Acetylierung von Holz mit Essigsäureanhydrid kann als sehr gut erforschtes Verfahren zur Modifikation der Holzeigenschaften angesehen werden. Dieses Verfahren zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit und der Dimensionsstabilität von Holz beruht auf einer Veränderung der Molekularstruktur im Holz auf chemischem Weg. Die Hydroxylgruppen im Holz, die für das Quell- und Schwindverhalten verantwortlich sind sowie durch Bakterien und Pilze besonders leicht angegriffen werden können, sollen durch diese Modifikation blockiert werden, um den Abbau des Holzes durch Mikroorganismen zu verhindern oder zu erschweren. Dabei werden die Hydroxylgruppen in der Zellwand in Acytylgruppen umgewandelt. Im Ergebnis wird die Dauerhaftigkeit gegenüber Pilzen (Braun-, Weiß- und Moderfäule) deutlich erhöht.

$$\textit{WOOD}\text{-OH} + CH_3\text{-CO-O-CO-}CH_3 \rightarrow \textit{WOOD}\text{-O-CO-}CH_3 + CH_3\text{-CO-OH}$$

Die Reaktion erfolgt dabei in einem autoklavähnlichen Behälter, der zu Beginn mit Holz und Essigsäureanhydrid gefüllt wird. Mit dem Anlegen eines Vakuums und anschließender Erhöhung des Drucks auf Atmosphärenniveau oder einen Überdruck wird die Penetration unterstützt. Im Anschluss erfolgt ein Aufheizen des Reaktors auf Temperaturen um 120°C für einen Zeitraum von 3 bis 16 Stunden mit anschließender Vakuumlagerung im Reaktor. Das Verfahren wird durch eine Reinigungs- und Trocknungsstufe abgeschlossen.

Die chemische Modifikation von Holz durch Acetylierung mit Essigsäureanhydrid wird weltweit als eine der vielversprechendsten Methoden angesehen, um sowohl technische als auch ökonomische Holzeigenschaften zu verbessern. Die Methode ist bekannt dafür, dass sie die Feuchtigkeitsaufnahme reduziert und damit das Schwinden und Quellen des Holzes um 70-80 % vermindern kann. Zudem wird die Dauerhaftigkeit erhöht. Häufig eingesetzte Holzarten sind Buche, Kiefer und Pappel. Eine Erhöhung der Härte um 30 % kann erreicht werden und die UV-

Stabilität des Holzes wird verbessert, wodurch die Verwitterung der Oberflächen bei Außenanwendung acetylierter Holzprodukte vermindert wird. Bei richtiger Prozessführung hat das Verfahren keinen nachteiligen Einfluss auf Festigkeitseigenschaften und das Erscheinungsbild des Holzes. Es wird lediglich eine größere Varianz der Festigkeitswerte beobachtet, die bei der Berechnung berücksichtigt werden muss.

Die Eigenschaftsverbesserung durch Acetylierung von Holz hängt wesentlich von der Methode der Acetylierung ab. Die Aufnahme des Essigsäureanhydrids, die Reaktionszeit, Reaktionstemperatur, Ausgangsfeuchte und die Menge der verbleibenden Essigsäure im Holz beeinflussen die chemischen, physikalischen und mechanischen Eigenschaften des acetylierten Holzes. Der Wassergehalt des Holzes zum Zeitpunkt der Reaktion ist sehr wichtig, da eine unerwünschte Reaktion von Essigsäureanhydrid in nicht-reaktive Essigsäure stattfinden kann [83]-[92].

Verklebungsversuche mit Hölzern unterschiedlicher Acetylierungsgrade lassen erkennen, dass die Umwandlung der OH-Gruppen Auswirkungen auf das Anbindeverhalten von Klebstoffen hat. Insbesondere wasserlösliche bzw. wasserbasierende Systeme zeigen bei steigendem Acetylierungsgrad nachlassende Klebewirkung. Polymere Matrixsysteme zeigen hingegen auf acetyliertem Holz ein gegenüber Vollholz verbessertes Haftvermögen [93].

Vorteile:

- gesteigerte Dimensionsstabilität und Abriebfestigkeit
- verbesserte Dauerhaftigkeit verbessert
- erhöhte UV-Stabilität
- verringerte Wärmeleitfähigkeit

Probleme:

- Umweltbelastung bei der Herstellung und Geruchsbelastung bei der Nutzung
- Kostenaspekte; in Abhängigkeit vom Verfahrensmaßstab kommt es zu Mehrkosten

Die Acetylierung kann für die Umsetzung der geplanten Pilotprojekte ein Mittel sein, Hölzer, die nach dem unter 1.4.2.1.1 beschriebenen Verfahren hergestellt wurden, in ihrer Dauerhaftigkeit und vor allem Dimensionsstabilität zu verbessern. Zu untersuchen wären dabei die beiden grundsätzlichen Möglichkeiten, acetylierte Hölzer zu verdichten bzw. verdichtete Hölzer zu acetylieren. Die Ergebnisse der unter 1.4.2.1.1 „Behandlung mit Wärme“ beschriebenen Aktivitäten des Normenausschusses Holz und Möbel sollten auch auf andere innovative Verfahren der Holzmodifikation an anwendbar sein. Explizit genannt wird dabei auch das Verfahren der Acetylierung.

1.4.2.1.6 Hydrophobierung von Holz

Ziel des Einpressens von warmen pflanzlichen Ölen in Holz im Ölbad bei Drücken um 0,8 MPa ist eine Hydrophobierung, das heißt wasserabstoßende Wirkung des Materials durch das Vernetzten des Öls in den Zellwänden zu erzielen. Dabei erfolgt zugleich ein Trocknungsprozess des Holzes. Während des Schlussvakuums wird ein Teil des Öls wieder entzogen. Das verbleibende Öl garantiert eine langfristig wetterfeste Oberfläche.

Vorteile:

- wasserabweisend
- geringe Ausgleichsfeuchte
- erhöhte Dimensionsstabilität

Probleme:

- Verleimungs- und Beschichtungsprobleme
- Verfärbungen

1.4.2.1.7 Dampfbehandlung

Seit etwa 20 Jahren wird mit dieser Methode versucht, die Dimensionsstabilität von verdichteten Hölzern zu verbessern. Untersucht wurden sowohl die Dampfbehandlung vor dem Verdichten als auch eine Nachbehandlung von verdichteten Hölzern. Im Ergebnis kann durch die kombinierte Einwirkung von Wärme und Feuchtigkeit eine Verringerung des „Shape-Memory"-Effekts erreicht werden. Gleichzeitig treten Versprödungseffekte und die Abnahme von Festigkeit und Steifigkeit weniger stark auf, als bei Verfahren mit einem Wärmeeintrag über Öl, Heißluft oder Heizpressen.

Die Prozessbedingungen werden in der Literatur mit 200°C bei einer Minute Einwirkungszeit bzw. 180°C bei acht Minuten Einwirkungszeit beschrieben. Positiv auf die Eigenschaften des Endprodukts wirkt sich dabei auch eine schrittweise Druckreduktion im Autoklaven etwa eine Minute vor Ende des Prozesses aus. Eine technische Bedeutung hat das Verfahren bisher noch nicht. Erste Versuche einer großindustriellen Anwendung wurden bei der Herstellung von Holzwerkstoffplatten unternommen [95]-[100].

Vorteile:

- ökologisch unbedenkliches Verfahren

Nachteile:

- Material muss während und nach der Dampfeinwirkung unter Druck verbleiben und langsam abkühlen; das erhöht die Prozesskosten bei einer technischen Umsetzung

1.4.2.1.8 Unterschiedliche kommerzielle Verfahren zur Modifikation der Holzeigenschaften

Die vier wichtigsten kommerziellen Hitzebehandlungsverfahren in Europa sind:

- Plato Wood – Niederlande,
- Thermo Wood – Finnland
- Retifikation – Frankreich
- Öl-Hitze-Verfahren – Deutschland

Allen vier Modifikationen ist gemeinsam, dass Holz in großen Dimensionen für mehrere Stunden Temperaturen ausgesetzt wird, die nahe bei oder über 200 °C in einer Atmosphäre mit geringem Sauerstoffgehalt liegen. Das Ausmaß der Veränderung von Holzeigenschaften während einer Hitzebehandlung hängt maßgeblich von folgenden Punkten ab

- Dauer des gesamten Verfahrens,
- Höchsttemperatur und der Dauer der eigentlichen Hitzebehandlung
- Temperaturgradient
- Menge an eingesetztem Wasserdampf
- Menge an eingesetztem Wasserdampf
- Verfahren im Trocknungsofen vor der eigentlichen Hitzebehandlung
- Holzarten und ihre charakteristischen Eigenschaften

1.4.2.1.9 Normung und momentane Normungsbestrebungen auf dem Gebiet der Holzwerkstoffe

DIN V 20000-1 3.7 Abschnitt 5.13 Festigkeit und Steifigkeit für tragende Verwendung

Nach DIN EN 13986, 5.13 (s. u.) besteht die Möglichkeit, dass der Hersteller charakteristische Festigkeits- und Steifigkeitskennwerte selbst bestimmt. Diese vom Hersteller selbst bestimmten und deklarierten charakteristischen Festigkeits- und Steifigkeitskennwerte sind bei der Bemessung der Beanspruchbarkeit von Bauteilen mit einem Korrekturbeiwert von 0,8 zu reduzieren. Für Furnierschichtholz nach DIN EN 14279 und DIN EN 14374 sowie Massivholzplatten nach DIN EN 13353 gibt es derzeit keine normativen Festlegungen für charakteristische Werte. Für

beide Werkstoffe besteht, ergänzend zu den Festlegungen in DIN 1052 [1], die Möglichkeit der Bemessung mit deklarierten Werten.

DIN EN 13986 5.13 Festigkeit und Steifigkeit für tragende Verwendung

Die Biegefestigkeit und -steifigkeit sind nach DIN EN 789 zu bestimmen und als charakteristischer Wert nach EN 1058 anzugeben (für Sperrholz siehe EN 636: 2003, 5.2.2). Die charakteristischen Werte für die Berechnung und Bemessung dürfen auch dem entsprechenden Teil von EN 12369 entnommen werden, sofern sie dort angegeben sind.

Bei Bedarf sind die Druck-, Zug- und Scherfestigkeiten sowie -steifigkeiten nach prEN 789 zu bestimmen und als charakteristischer Wert nach EN 1058 anzugeben. Die charakteristischen Werte für die Berechnung und Bemessung dürfen auch, sofern dort angegeben, dem entsprechenden Teil von EN 12369 entnommen werden [26].

1.4.2.2 Querschnittsbildung und Modifikation von Querschnittsgeometrien im Holzbau

1.4.2.2.1 Konventionelle Querschnittsbildung aus Vollholzquerschnitten

Keilgezinktes Vollholz wie z. B. Konstruktionsvollholz (KVH) oder Balkenschichtholz (Duo-/Trio-Balken®) und Brettschichtholz BSH sind industriell hergestellte Holzbalken, die sich durch Maßhaltigkeit und geringe Rissanfälligkeit auszeichnen. Ihr Einsatz richtet sich nach den Vorgaben für konventionelles Vollholz. Eine wichtige Ausnahme ist allerdings, dass keilgezinktes Vollholz (Brettschichtholz, Konstruktionsvollholz oder Balkenschichtholz) ohne besondere Schutzmaßnahmen nur in den Nutzungsklassen 1 und 2 eingesetzt werden darf. Das heißt, ein ungeschützter Einsatz im Freien darf demnach nicht erfolgen [1], [101]-[103].

Wird Vollholz als tragendes Material eingesetzt, müssen die Tragglieder einen Mindestquerschnitt von 14 cm^2 bzw. eine Mindestdicke von 24 mm aufweisen. Eine Festigkeitssortierung erfolgt nach DIN 4074. Mittels kraftschlüssiger Keilzinkenverbindungen für die Verklebung der Bretter in Längsrichtung und der Flächenverklebung der Einzellamellen können Einzelquerschnitte mit Höhen bis 3 m und Längen bis zu 65 m hergestellt werden. Die maximal zum Keilzinken zugelassenen Querschnitte sind dabei auf Dimensionen bis 120x300 mm^2 begrenzt.

1.4.2.2.2 Formen von Holz zu Formholz – Eigenschaften von Formholzprofilen

Beim Formen von Holz werden die über das beschriebene Verdichtungsverfahren in das Vollholz eingebrachte Verformungsreserven genutzt. Unter Dampfbeaufschlagung können die aus verdichtetem Holz gefertigten Platten in einem Formwerkzeug zu Formholzprofilen gebogen werden.

Die wichtigsten Prozessschritte auf dem Weg von der sägerauen Brettware zum Formholzprofil können wie folgt zusammengefasst werden:

1. Abrichten bzw. Hobeln der Bretter
2. Verdichtung nach 1.4.2.1.1 (Verdichtungsgrad 25...30 %)
3. Abrichten / Hobeln, um Ausdünstungen und Ablagerungen vom Verdichten zu entfernen
4. Auftrennen zu Leisten
5. Verkleben der Leisten zu Platten
6. Abrichten der Platte
7. Formen
8. Nachbearbeitung (Abdrehen, Ablängen, etc.)

Die Materialeffizienz des Prozesses vom Brett zum Formholz kann bei derzeitigem Vorgehen mit etwa 60 % beziffert werden. Der Verlust von 40 % resultiert im Wesentlichen aus den mehrfach notwendigen Abrichtvorgängen und den Sägeschnitten. Der Übergang zum Verdichten von Rundholz in einer späteren Phase bzw. die Verbesserung des oben beschriebenen Verfahrens kann dieses Problem lösen helfen.

Abb. 1.3 stellt die Schritte 2, 5 und 7 zur Herstellung der Formholzprofile schematisch dar. Durch das gezielte Einbringen von verdichteten und unverdichteten Hölzern lassen sich auch Profile mit veränderlichen Krümmungsradien im Querschnitt herstellen [79]-[82], [104]-[116].

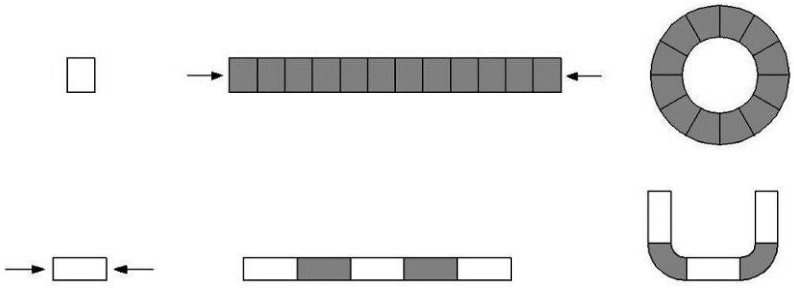


Abb. 1.3: Schematische Darstellung der Herstellungsschritte von Formholzprofilen

Besonderes Augenmerk muss beim Formen auf die maximal möglichen Biegeradien gelegt werden. Sie geben den funktionalen Zusammenhang zwischen möglichem Biegeradius, dem zuvor in das Holz eingetragenen Verdichtungsgrad und der vorliegenden Wandstärke des Ausgangsmaterials wider und ermöglichen so das schädigungsarme Rückverformen des verdichteten Holzes zu Profilquerschnitten. Weitere Parameter des Formens sind Temperatur, Feuchte, Verformungsgeschwindigkeit und -kraft.

Alternativ zu dem beschriebenen Verfahren ist auch das Zusammenfügen der verdichteten Leistenquerschnitte ohne formgebendes Verfahren im eigentlichen Sinne nur durch Fügeprozesse möglich. Vorteile dieses Vorgehens sind gegebenenfalls ein höherer im Material verbleibender Verdichtungsanteil und eine Vereinfachung des Verfahrens. Allerdings ist dieses Vorgehen nicht so universell wie das Umformen, denn es bedarf für jeden Querschnitt mehr oder weniger aufwändiger Abrichtvorgänge am Leistensegment, um die gewünschten Geometrien zu erzielen.

Wenn im Einzelfall auf die Verdichtung als Vergütungsmerkmal verzichtet werden kann und sie auch als Grundlage für das Formen nicht benötigt wird, ist das Produkt dieses Prozesses aber auch frei vom sogenannten „Memory-Effekt“, der alle verdichteten Materialien begleitet und dessen Beherrschung Voraussetzung für den Einsatz von Formhölzern im Bauwesen ist.

1.4.2.2.3 Experimentelle Untersuchungen zum Tragverhalten von Formvollholzröhren

Erste Tastversuche an unbewehrten und bewehrten Formholzstützen haben gezeigt, dass die Profile sehr gut zum Abtrag von Druckkräften geeignet sind. Allerdings ist das Bruchverhalten der Röhren sehr spröde.

Diesem Problem kann man durch das Aufbringen von textiler Bewehrung begegnen. Für den Versuch wurde ein Glasseidengewebe mit einer Flächenmasse von 160 g/m^2 dreilagig mit einer Epoxid-Matrix appliziert und damit eine vergleichsweise dünne GFK-Verstärkungsschicht aufgebracht. Trotzdem ändert sich das Tragverhalten signifikant. Zum einen kommt es zu einem Anstieg der Bruchlasten und Bruchspannungen von etwa 40 % zum anderen kommt es zu einem deutlich veränderten Nachbruchverhalten.

1.4.2.2.4 Holz-Beton-Verbund (HBV)

Die Holz-Beton-Verbund-Bauweise hat in den vergangenen Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen. Gründe hierfür liegen vor allem in ihren technischen und technologischen Vorteilen gegenüber konventionellen Holzbauweisen. Insbesondere die Kombination von Beton in der Druckzone von Biegeträgern in Verbindung mit Holz in der Zugzone lassen wirtschaftliche Lösungen in Neubau und Sanierung zu. Dabei werden in Altbauten vor allem vorhandene Holzbalkendecken mit Ortbeton zu Plattenbalkendecken verbunden. In Neubauten kommt am häufigs-

ten die Konstruktion Brettstapeldecke mit Ortbeton zum Einsatz. Beiden Lösungen gemein sind die guten Trageigenschaften mit sehr gutem bauphysikalischem Verhalten. So weisen HBV-Konstruktionen sehr gute Schall- und Brandschutzeigenschaften auf (Feuerwiderstand, Rauch- und Löschwasserdichtigkeit) und ermöglichen gleichzeitig das Überspannen großer Spannweiten. Weitere Vorteile sind die geringe Bauteilhöhe der Konstruktionen, die gute Aussteifungswirkung sowie der geringe Transport- und Montageaufwand bei einem vergleichsweise hohen Vorfertigungsgrad [117] -[123].

Wirtschaftlich interessant wird diese Bauweise in Neubauten für Decken ab Spannweiten um 6 m. Insbesondere Büros, Krankenhäuser, Kaufhäuser, Hotels, Schulen und Geschossbauten mit leichtem bis mittelschwerem Produktionsbetrieb können in HBV-Bauweise wirtschaftlich errichtet werden. In der Sanierung hängen die Kennzahlen noch mehr vom konkreten Einzelfall ab. Meistens geben dort jedoch technologische Gründe den Ausschlag für den Einsatz von Holz-Beton-Verbund-Konstruktionen. So stellt die Möglichkeit, eine vorhandene konventionelle Holzbalkendecke ohne nennenswerte zusätzliche Maßnahmen mit einem Aufbeton zu versehen und damit fast alle wesentlichen Eigenschaften des Bauteils maßgeblich zu verbessern, einen entscheidenden Wettbewerbsvorteil gegenüber dem Einbau anderer Baustoffe mit einem entsprechenden höheren Umbauaufwand dar. Die empfohlenen Betonfestigkeiten liegen im Bereich von C 25/30, wobei Versuche gezeigt haben, dass eine Änderung der Betoneigenschaften kaum Auswirkungen auf das Tragverhalten hat. Zumeist wird ein Zugversagen des Holzes maßgebend, wenn man die empfohlenen Geometrieverhältnisse von h Beton ~ 1/3 h Holz bei einer Betondicke von mindestens 6 cm beachtet.

Deutschlandweit existieren im Augenblick weniger als 10 Schubverbindersysteme für HBV-Konstruktionen mit bauaufsichtlicher Zulassung durch das DIBt. Im Wesentlichen basieren sie auf einer Schubübertragung zwischen Holz und Beton durch Stahlteile (Schrauben bzw. eingeklebte Bleche) oder Formschluss (Verbundanker oder Nocken mit senkrechten Betonstählen). Wobei die geklebten bzw. auf Formschluss basierenden Systeme eine sehr hohe Steifigkeit aufweisen – die Verbinder mit Schrauben jedoch erheblich einfacher zu fertigen sind und deshalb auch Firmen ohne besondere Berechtigungen (Leimnachweis etc.) zur Ausführung berechtigt sind.

Analytische und numerische Verfahren zur Berechnung von HBV-Konstruktionen sind in [124] und [125] zusammenfassend dargestellt. Dabei erfolgt neben einem Vergleich der unterschiedlichen Berechnungsansätze auch eine Bewertung und Überprüfung der Eignung für Vorbemessungen, Ein- und Mehrfeldträger sowie hinsichtlich der Möglichkeit, veränderliche Schubsteifigkeiten der Verbundfuge zu erfassen. Die Berechnungsbeispiele lassen darüber hinaus erkennen, dass bei Mehrfeldträgern bereits die einzulegende Mindestbewehrung unter normalen Umständen zur Aufnahme der Stützmomente ausreichen sollte. Auf Aspekte der Verstärkung von HBV-Konstruktionen wird im Abschnitt 1.4.2.3.3 eingegangen.

1.4.2.3 Technologische Möglichkeiten im modernen Holzbau

1.4.2.3.1 Faserverstärkte Kunststoffe

Faserverstärkte Kunststoffe sind Verbundwerkstoffe, die aus Verstärkungsfasern und einem Matrixsystem gebildet werden. Die Fasern bilden dabei die Tragstruktur, während die Kunststoffmatrix hauptsächlich für die Konsolidierung, Formgebung und die Herstellung des Verbundes zwischen den Fasern von Bedeutung ist. Das Haupteinsatzgebiet sind derzeit Anwendungen im Leichtbau, speziell in der Verteidigungstechnik und der Luft- und Raumfahrt, aber auch in vielen Bereichen des zivilen Alltags wie Automobilbau, Hochbau und Transportwesen. Im Folgenden werden die Eigenschaften einiger Faser- und Matrixmaterialien möglicher Kombinationen beschrieben.

Fasermaterialien

Die wichtigsten Faserarten für den Einsatz in faserverstärkten Kunststoffen sind:

- Kohlenstofffasern
- Glasfasern
- Synthesefasern
- Keramikfasern
- hochgeordnete Polymerfasern
- Naturfasern

Ausschlaggebend für die Auswahl des geeigneten Fasermaterials sind neben wirtschaftlichen Überlegungen vor allem die mechanischen oder physikalischen Eigenschaften des herzustellenden Composits wie z. B. Festigkeit, E-Modul, Bruchdehnung, Wärmeleitfähigkeit und Dauerhaftigkeit.

Am häufigsten kommen im Bauwesen Kohlenstoff-, Glas- und Aramidfasern als Verstärkungsmaterialien zum Einsatz. Dabei werden bei den meisten Anwendungen Aramid- und Kohlefasern bevorzugt, da sie eine höhere Festigkeit und bessere Dauerhaftigkeit besitzen. Bei hohem Fasereinsatz oder aus Gründen der textilen Flächenbildung (z. B. kleine Krümmungsradien beim Stricken oder Nähwirken) können die weniger leistungsfähigen Glasfasern aber durchaus technische oder wirtschaftliche Vorteile besitzen.

Kohlenstofffasern, kurz Kohle- oder Karbonfasern genannt, werden heutzutage überwiegend aus Polyacrylnitrilfasern, also aus polymerem Ausgangsmaterial (Prekursor) hergestellt. Man unterscheidet vier Gruppen

- die hochfeste Kohlenstofffaser (HT = High Tensile)
- die hochsteife Kohlenstofffaser (HM = High Modulus)
- Fasern mit erhöhtem E-Modul (IM = Intermediate Modul)
- Hochmodul/Hochfestigkeitsfasern (HMS = High Modulus/High Strengt)

Eigenschaften:

Dichte der Filamente:	1,79 g/cm³
E_L-Modul der Filamente:	230.000…390.000 N/mm²
Zugfestigkeit:	2.200...3.900 N/mm²
Bruchdehnung:	1,5 %

Diesen guten mechanischen Eigenschaften stehen hohe Kosten gegenüber (in etwa zehnmal teurer als Glasfasermaterial). Außerdem zu beachten ist die ausgeprägte Anisotropie der Kohlefaser, sowohl bei den mechanischen als auch bei den physikalischen Eigenschaften.

Glasfasern sind im Gegensatz zu Kohle- und Synthesefasern isotrop. Begründet liegt dies in der dreidimensionalen Vernetzung der Glasbildner. Man unterscheidet im Wesentlichen 6 Glasarten, deren Eigenschaften durch die Netzwerkbildner (Kieselsäure, Bor-, Phosphorent- und Aluminiumoxide) bestimmt werden:

- E-Glas (elektrisch, ursprünglich für den elektrischen Einsatz entwickelt)
- R/S-Glas (resistance, strength; hohe Festigkeit)
- M-Glas (hoher E-Modul)
- C-Glas (Glassorte mit guten chemischen Eigenschaften)
- D-Glas (Glassorte mit dielektrischen Eigenschaften)
- Q-Glas (Quarzglas aus 100% SiO_2)
- AR-Glas (Alkaline Resistant; alkaliresitent, für Anwendungen im Betonbau entwickelt)

Für den Einsatz in Holzkonstruktionen kommen aus Kostengründen und Gründen der Matrixkompatibilität zwischen Harz, Faser und Beschichtung in erster Linie E-Glasfasern zum Einsatz. Sie haben zwar einen geringeren E-Modul als Kohlefasern, die Zugfestigkeit liegt aber in etwa im Bereich der von Aramidfasern.

Als besonderes Merkmal der Glasfasern sind die deutlich niedrigeren Kosten im Vergleich zur Kohlefaser zu nennen.

Eigenschaften:

Dichte der Filamente:	2,55 g/cm³
E_L-Modul der Filamente:	72.000…77.000 N/mm²
Zugfestigkeit:	3.500 N/mm²
Bruchdehnung:	4,5 %
Weitere Merkmale:	preiswert

Aramidfasern gehören zur Gruppe der Synthesefasern. Der heute gebräuchliche Aramidfasertyp auf PPTA- (Poly-Phenylene-Terephthalamide-) Basis ist allgemein unter den Handelsbezeichnungen Kevlar oder Twaron bekannt. Wie Kohlefasern sind die Aramidfasern anisotrop. Besonderes Merkmal ist die große Duktilität und Zähigkeit, die in der polymeren Molekularstruktur begründet liegt. Problematisch ist häufig ein Versagen ohne Vorankündigung. Bei Zugbelastung wird dabei eine Rissfortpflanzung durch die Mikroporen induziert. Die Ursache dafür liegt in der von mechanischer und hygroskopischer Belastung abhängigen Morphologie.

Eigenschaften:

Dichte der Filamente:	1,44 g/cm³
E_L-Modul der Filamente:	12.500 N/mm²
Zugfestigkeit:	2800...3500 N/mm²
Bruchdehnung:	3,7 %
Weitere Merkmale:	große Duktilität

Allgemein ist unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten grundsätzlich zu beachten, dass die Glasfaser das mit Abstand preiswerteste Material ist. Die Kohlefaser hat einen etwa zehnfach höheren und Aramid einen etwa zwanzigfach höheren Preis gegenüber der Glasfaser. Generell unterliegen aber alle Preise starken Schwankungen. Deshalb sind wirtschaftliche Überlegungen vor der Auslegung von Verstärkungsstrukturen immer vor dem Hintergrund der aktuellen Marktsituation anzustellen.

Eine weitere Besonderheit des Fasermaterials gegenüber konventionellen Baustoffen, ist die Abhängigkeit seiner mechanischen Eigenschaften von der Feinheit des Rovingmaterials. Die Feinheit [in tex = g/km] gibt als längenbezogene Masse des Faserstranges Aufschluss über seine Querschnittsfläche. In Verbindung mit der Anzahl der Elementarfäden im Roving und dem zugehörigen Elementarfadendurchmesser ist diese Kenngröße für das mechanische Verhalten des zum Roving gesponnenen Fasermaterials mitverantwortlich. Dabei lassen sich mechanische Eigenschaften nicht von Rovingstärken geringerer Feinheit auf Rovings größerer Feinheit unmittelbar extrapolieren. Die Ursache dafür liegt vor allem darin begründet, dass bei stärkeren Rovings nicht alle Elementarfäden gleichzeitig am Lastabtrag beteiligt sind. Zudem lassen sich massivere Rovingtypen zumeist nicht direkt erspinnen (Direktroving), sondern müssen aus mehreren Rovings geringerer Feinheit gefacht (durch Umspulen zusammengefasst) werden. Dieser Umspulvorgang ist aber mit mehr oder weniger starken Faserschädigungen verbunden.

Textile Flächenbildung

Als weiteres wesentliches Unterscheidungskriterium für faserverstärkte Kunststoffe muss neben dem verarbeiteten Fasertyp und der Matrix zur Konsolidierung vor allem die Art der Flächenbildung des textilen Halbzeugs genannt werden. Grundsätzlich kann zwischen der Flächenbildung aus Fäden und der Flächenbildung aus Fasern unterschieden werden (Abb. 1.4). Die Flächengebilde aus Fasern haben eine deutlich niedrigere Festigkeit und Steifigkeit beim Einsatz in Hochleistungsverbunden und sind daher für tragende Eigenschaften nur von untergeordneter Bedeutung. Flächengebilde aus Fäden bzw. Rovings hingegen eignen sich hervorragend zur Herstellung von textilen Halbzeugen für Hochleistungsverbunde.

Aus parallel angeordneten Rovings können z. B. durch Vernähen oder Verkleben untereinander oder mit einer Trägerstruktur unidirektionale Gelege mit hoher Steifigkeit entstehen. Werden diese Rovings jedoch miteinander verwoben oder verflochten, führen die in mehr oder weniger großen Abständen eingefügten Schussfäden zu Verlusten bei Steifigkeit und Festigkeit der Gewebe.

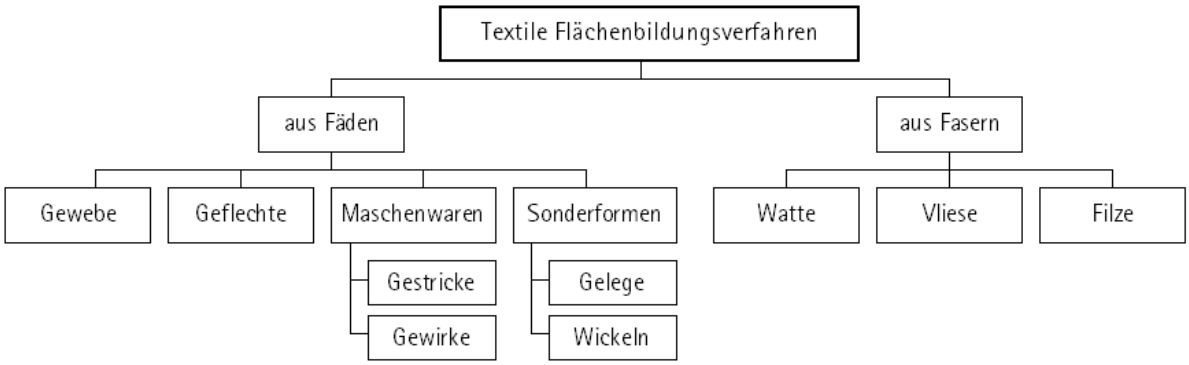


Abb. 1.4: Systematisierung der Verfahren zur textilen Flächenbildung

Die geringste Steifigkeit erzielen Gestricke, die sich jedoch durch eine besonders hohe Duktilität und weitgehend freie Formgebung auszeichnen. So wird beispielsweise durch Verarbeitung von duktilen Aramidfasern mittels Stricktechnik ein hochduktiler FVK entstehen – im Gegenzug werden hochmodulige Karbonfasern zu UD- (unidirektionalen) Gelegen verarbeitet sehr steife Verbundmaterialien liefern [162], [163].

Weben. Konventionelle Gewebe bestehen aus mindestens zwei sich rechtwinklig kreuzenden Fadensystemen. Durch unterschiedliches Anheben der Kettfäden beim Schusseintrag ergeben sich verschiedene Arten der Fadenverkreuzungen (Bindungen). Bei technischen Textilien kommen heute meist einfache Bindungen wie Leinwand-, Köper- und Atlasbindung zum Einsatz.

Kennzeichnend für Gewebe sind die meist geschlossene Oberfläche und der Kraft-Dehnungsverlauf, der dem des Fadens ähnlich ist. Die Drapierbarkeit ist stark von der Schuss- und Kettfadendichte abhängig. Sie wird als gut eingestuft, ist aber schlechter als die von Maschenware. Beim Weben werden die Fäden bindungsbedingt an den Kreuzungspunkten gekrümmt. Dadurch reduziert sich die Zug- und Biegefestigkeit daraus gefertigter Verbunde.

Dieser Effekt kann gering gehalten werden, indem günstige Bindungen oder beispielsweise Kettfäden mit geringer Fadenfeinheit eingesetzt (Bindekette) werden. Es besteht dabei auch die Möglichkeit, Mehrlagengewebe herzustellen indem mehrere Verstärkungsfadenlagen mit einer Bindekette verbunden werden.

Da Gewebe aus mindestens zwei sich rechtwinklig kreuzenden Fadensystemen bestehen, liegen sie mindestens mit biaxialer Verstärkung vor. Es können aber auch Gewebe mit mehreren Fadensystemen produziert werden. Triaxialgewebe weisen dann drei Fadensysteme auf, die sich normalerweise in einem Winkel von 60° zu einander kreuzen. Sie zeigen eine geringere Anisotropie und lassen sich im Vergleich zu den herkömmlichen Geweben besser umformen.

Dabei muss aber beachtet werden, dass die Fadendichten in den jeweiligen Verstärkungsrichtungen geringer sind, als bei herkömmlichen Geweben mit biaxialer Verstärkung.

Flechten. Bei den Geflechten verkreuzen sich die Flecht- bzw. Klöppelfäden schräg zur Warenbahn. Sie weisen im Allgemeinen einen Winkel von 20° bis 160° zwischen den Fäden auf. Geflechte haben als Flächen oder Körper eine regelmäßige Fadendichte und weisen beim Einsatz in Composites meist ein geschlossenes Warenbild auf. Beim Flechten sind die Fäden bindungsbedingt an den Kreuzungspunkten leicht gekrümmt. Dadurch reduziert sich die Zug- und Biegefestigkeit daraus gefertigter Verbunde.

Geflechte werden klassisch in Körpergeflechte (Rund-, Quadrat-, Trapezgeflechte), Flachgeflechte (Litzen), Kombinationsgeflechte (Kordellitzen/Paspeln) und Spezialgeflechte (Radiumkordeln, Rotationsgeflechte, Schlinggeflechte) eingeteilt. Dabei werden meist nur kleine Querschnitte hergestellt, da zum einen der maschinentechnische Aufwand mit der Anzahl der Fadenspulen enorm steigt und zum anderen der Faden mit der Fadenspule bewegt werden muss. Warenbahnen mit Breiten größer 15 cm werden industriell nicht hergestellt.

Da Geflechte aus mindestens zwei sich kreuzenden Fadensystemen bestehen, liegen die Fäden in mindestens zwei Verstärkungsrichtungen im Geflecht vor. Der Winkel zwischen den Fadensystemen lässt sich variieren. Somit kann eine Vorzugsrichtung der Verstärkung in bestimmten Grenzen eingestellt werden. Ein Geflecht mit den Verstärkungsrichtungen von 0°/90° kann auf handelsüblichen Flechtmaschinen nicht hergestellt werden. Durch Einarbeitung von Stehfäden kann aus der meist vorliegenden biaxialen Verstärkung eine triaxiale Verstärkung erreicht werden.

Bei den meisten Flechtverfahren ist die Möglichkeit gegeben, Produkte mit unterschiedlicher Geometrie herzustellen. Die maximalen Halbzeugabmessungen werden durch die höchstmögliche Spulenanzahl der Flechtmaschine begrenzt. Geflechte eignen sich hervorragend zum Umflechten von Kernen sowie zur Herstellung von Profilen. Die Formgebung bei Geflechten wird meist durch Variation des Flechtwinkels erreicht. Dadurch entstehen unterschiedliche Bauteileigenschaften, wie z. B. unterschiedliche Zug- und Biegefestigkeit oder Torsionssteifigkeit. Zur Herstellung von größeren Halbzeugen mit beliebiger dreidimensionaler Geometrie und ggf. höheren Wandstärken ist das Flechten ungeeignet.

Stricken. Gestricke zeichnen sich oft durch eine offene Oberfläche aus. Bei Krafteinwirkung weisen sie eine Dehnung auf, die deutlich über der Dehnung des Fadens liegt. Aufgrund dieser hohen Dehnung bei gleichzeitig geringer Zugfestigkeit eignen sie sich ohne besondere Maßnahmen nur bedingt zur Verstärkung von hochbelasteten Faserverbundbauteilen. Gestricke besitzen im Allgemeinen die höchste Drapierbarkeit aller Flächengebilde. Aufgrund der zahlreichen Möglichkeiten zur Formgebung können beim Flachstricken endkonturnahe Halbzeuge bzw. Halbzeuge mit exakter Bauteilgeometrie in einem Arbeitsgang gefertigt werden. Im Laufe der Zeit entstanden modifizierte Strickverfahren, bei denen der Eintrag von Verstärkungsfasern möglich ist. Für viele Anwendungen ist es ausreichend, einen Schussfaden in das Gestrick einbringen zu können. Außer den monoaxial verstärkten Gestricken können Gestricke noch bi- und multiaxial verstärkt werden.

Für das Herstellen von Gestricken mit zweidimensionaler Geometrie gibt es die Möglichkeit, die Gestrickform durch Zunehmen oder Mindern der Maschenanzahl oder durch strukturelle Variation zu erreichen. Mit diesen Formgebungstechniken ist es möglich, nahezu jede Geometrie auch mit Aussparungen in der Ebene herzustellen. Aufgrund der Möglichkeit, alle Nadeln einzeln anzusteuern, ergeben sich insbesondere beim Flachstricken zahlreiche Möglichkeiten zur Formgebung. Es gibt dabei die Möglichkeit, eine zwei- oder dreidimensionale Form durch unterschiedliche Techniken wie durch die Variation von Bindung oder Maschenlänge zu erreichen. Durch den Einsatz der Formgebungstechniken können theoretisch alle Grundkörper wie Quader, Würfel, Zylinder, Kegel, Pyramiden, Kugeln in einem Arbeitsgang direkt auf der Maschine gefertigt werden. Durch das Zusammensetzen der Grundkörper kann nahezu jede Geometrie realisiert werden. Der Vorteil der Formgebung durch Variation der Maschenanzahl ist, dass die Maschendichten weitestgehend konstant bleiben und somit gleichmäßige Bauteileigenschaften

im Bauteil gewährleistet werden können. Durch die schonende Verarbeitung beim biaxialverstärkten Mehrlagenstrick können Glas-, Kohle- und Aramidfasern als Maschenfaden eingesetzt werden. Dadurch entsteht eine Verstärkung in Gestrickdickenrichtung.

Die Flachstricktechnik ist eine der am weitesten entwickelten Flächenbildungstechnologien in der Textiltechnik. Durch mechatronische Lösungen wie die vollelektronische Nadelauswahl können mit der Flachstricktechnik formgerechte zwei- und dreidimensionale Halbzeuge mit konstanter Fadendichte hergestellt werden. Die Formgebungsmöglichkeiten lassen eine nahezu freie Halbzeuggestaltung zu. Zusätzlich ist es möglich, durch die strukturelle Variation gezielt Bereiche unterschiedlicher Fadendichte im Gestrickhalbzeug zu erreichen. Die Flexibilität hinsichtlich unterschiedlicher Produkte und Produktabfolgen ist hoch und die dafür erforderlichen Umrüstzeiten sind gering. Es ist möglich biaxial verstärkte Halbzeuge mit dreidimensionaler Struktur und momentan bis zu 9 Verstärkungslagen herzustellen.

Kettenwirken. Das (Näh)Wirken ist ein sehr produktives Verfahren, das gut zur Herstellung von textilen Halbzeugen mit unterschiedlichen Verstärkungsfadenrichtungen und Verstärkungslagenanzahlen geeignet ist. Kettengewirke ohne gestreckte Verstärkungsfäden zeichnen sich durch eine offene Oberfläche und bei Krafteinwirkung durch eine wesentlich höhere Strukturdehnung gegenüber der Fadendehnung aus. Dadurch weisen sie sehr gute Drapiereigenschaften auf. Aufgrund ihrer hohen Dehnung und der geringen Zugfestigkeit eignen sie sich aber nicht zur Verstärkung von hochbelasteten Faserverbundbauteilen.

Neben den konventionellen Wirkverfahren entstanden im Laufe der Zeit modifizierte Wirkverfahren, bei denen der Eintrag von Verstärkungsfasern (von monoaxial bis multiaxial) möglich ist. Auf diesen handelsüblichen Multiaxialnähwirkmaschinen ist eine weitgehend freie Gestaltung hinsichtlich der Anzahl und Richtung der Verstärkungsfadenlagen möglich. Dabei dient die Maschenstruktur vorwiegend zur mechanischen Fixierung der Verstärkungsfadenlagen und trägt nur in geringem Maße zur Verstärkung in Z-Richtung (Dickenrichtung) bei. Während der Einsatz von Hochleistungsfäden aus Glas-, Aramid oder Carbonfasern als Verstärkungsfaden zu sehr guten mechanischen Eigenschaften des Gewirkes führt, ist eine Verwendung als Maschenfaden nur im Ausnahmefall möglich. Bei den Herstellungsverfahren für verstärkte Gewirke wird zwischen dem Kettenwirken ohne Durchstechen (z. B. biaxial verstärktes Kettenwirken) und mit Durchstechen (z. B. Nähwirken) der Ware unterschieden. Beim ersteren Verfahren werden die Verstärkungsfäden maschengerecht eingetragen, beim letzteren durchstechen die Nadeln die Verstärkungsfäden, was zu einer Fadendegradation mit Verlust von Festigkeit und Steifigkeit führt [149].

Wickelverfahren. Ein weiteres sehr leistungsfähiges Verfahren zur Herstellung von FRP-Beschichtungen für Bauteile ist das Roving-Wickeln. Dabei erfolgt die textile Flächenbildung direkt auf dem Formwerkzeug oder dem Werkstück ohne Zwischenschritt über ein textiles Halbzeug. Gleichzeitig findet eine Tränkung des Rovings vor der Zuführung zum Bauteil mit dem Matrixsystem und damit eine sofortige Verbundformung bzw. Konsolidierung statt. Vorteilhaft ist hierbei, dass kein Transport und damit keine Zwischenfixierung der textilen Fläche erfolgen muss und sofort eine UD-gelegeähnliche Struktur mit hohem Faservolumenanteil auf dem Bauteil oder dem Formenwerkzeug entsteht. Insbesondere für die rotationssymmetrischen Formholzprofile des HHT-Projekts sollte diese Technik der textilen Flächenbildung zur Beschichtung verstärkt genutzt werden.

Matrixmaterial

Das Matrixsystem bestimmt maßgeblich die Verbundqualität von faserverstärkten Kunststoffen. Im Folgenden soll ein Überblick über die gebräuchlichen Matrixsysteme gegeben werden. Grundsätzlich erscheint für den Einsatz im Bauwesen eine Unterscheidung in polymere und sonstige Matrixsysteme sinnvoll. Die polymeren Matrices unterscheidet man darüber hinaus weiter in duroplastische und thermoplastische Matrixsysteme (Abb. 1.5). Im Weiteren wird dann nur noch auf kalt- oder heißhärtende duromere Matrixsystem mit technischer Bedeutung im Bauwesen eingegangen.

Epoxidharze. Ein Matrixsystem mit hervorragenden mechanischen Eigenschaften des Endprodukts bei geringem Schwund ist das Epoxidharz. Der Begriff Epoxidharz bezeichnet sowohl die in Epoxidgruppen enthaltenden Grundkomponenten als auch die ausgehärteten Systeme. Epoxidharze härten ohne Abspaltung flüchtiger Nebenprodukte aus. Durch Auswahl geeigneter Harz-Härter-Systeme aus dem breiten Angebot lässt sich eine den Anforderungen gut angepasste Matrix auswählen. Weitere Vorteile sind gute Dauerhaftigkeit, sowie gute Verbund- und Festigkeitseigenschaften.

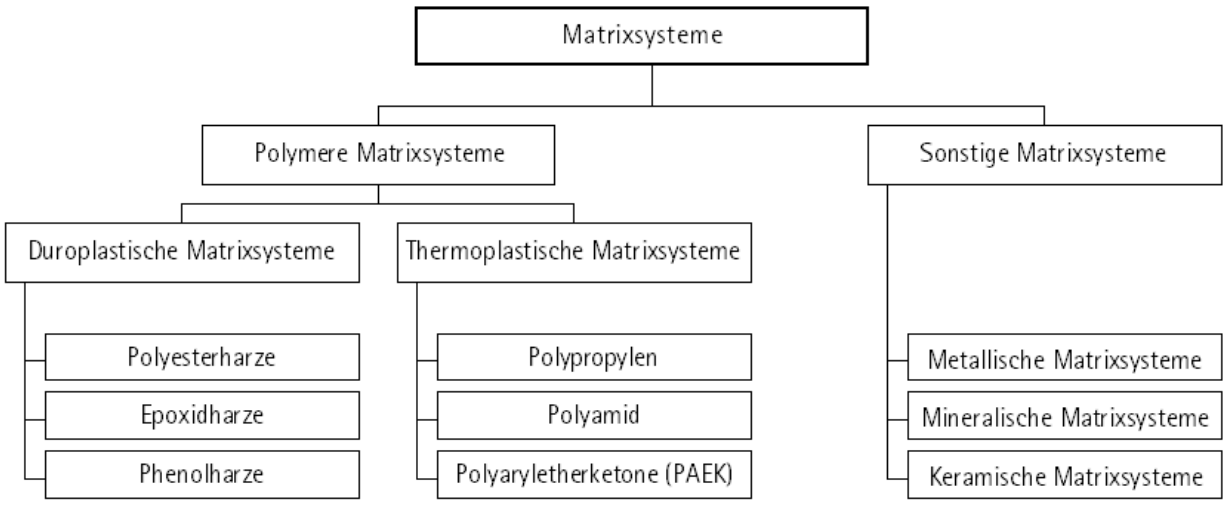


Abb. 1.5: Systematisierung der Matrixsysteme

Tränk- und Infiltrierharze. Das Epoxidharz HAT 2 der Fa. R & G Faserverbundwerkstoffe GmbH Waldenbuch ist ein hochtransparentes, weitgehend UV-stabiles Laminierharz mit besonderer Eignung für Injektions- bzw. Infiltrationstechniken auf Bisphenol A/F-Basis, welches an der der Luft zugewandten Seite klebefrei aushärtet. Durch seine geringe Viskosität (ca. 400 MPa s) ist es besonders für Vakuum- bzw. RTM-Verfahren geeignet. Die Verarbeitungszeit beträgt in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis zwischen 20 und 300 Minuten bei einer Aushärtzeit von 24 Stunden.

Dichte:	1,1 g/cm³
E-Modul:	3.000 N/mm²
Zugfestigkeit:	71 N/mm²
Biegefestigkeit:	100 N/mm²
Bruchdehnung:	2,3 %

Laminierharze: Beispielhaft für Laminierharze, die sich durch besonders robuste Eigenschaften (lange Topfzeiten, gute Verarbeitbarkeit auch im Handlaminierverfahren, breites Anwendungsgebiet) auszeichnen, soll das Epoxidharz LN-1 der Fa. Vosschemie GmbH Uetersen genannt werden. Das EP LN-1 ist ein phenolfreies Laminierharz mit sehr guten mechanischen Eigenschaften und hoher Chemikalienbeständigkeit. Die Aushärtung erfolgt ohne Tempern an der der Luft zugewandten Seite nicht klebefrei. Die Viskosität liegt mit ca. 1000 MPa s höher als beim EP HT 2 Trotzdem besitzt es noch sehr gute Tränkeigenschaften, die einen guten Verbund sicherstellen. Gleichzeitig ist es gut für das Tränken und Verleimen von Hölzern und Furnieren geeignet. Die Verarbeitungszeit beträgt ca. 45 Minuten bei einer Aushärtungszeit von 12 Stunden.

Dichte:	1,1g/cm³
E-Modul:	3.500 N/mm²
Zugfestigkeit:	19 N/mm²
Biegefestigkeit:	130 N/mm²
Bruchdehnung:	2,4 %

Neben den oben genannten „klassischen“ Harzsystemen des Leichtbaus kommen für den Einsatz im Holzbau noch weitere kalt- und heißhärtende Ein- und Mehrkomponentenharze in Betracht.

Von besonderem Interesse sind dabei die Phenolharze. Der Grund hierfür ist die Tatsache, dass Phenolharze sowohl sehr gute Klebeeigenschaften mit fast allen Holzarten aufweisen und dabei gleichzeitig mit den meisten für E-Glas eingesetzten Schlichten und Haftvermittlern harmonieren. Somit werden also Verklebungen von Holzbauteilen untereinander bei gleichzeitiger Verstärkungsmöglichkeit mit Glasfasermaterial möglich. Kalt- und heißhärtende Bekelite® Phenol-Resorcinharz-Systeme der Fa. Hexion mit bauaufsichtlicher Zulassung können u. a. zum Verleimen von BSH-Trägern mit Kunstharzpressholz nach 1.4.2.1.1 eingesetzt werden. In der Liste zugelassener Leime für tragende Anwendungen im Bauwesen sind weitere Leime dieser Produktgruppe aufgeführt [74].

1.4.2.3.2 Verstärkung von Holzbauteilen unter Biege- und Längsbeanspruchung

Die Biege- oder Längskraftverstärkung von Holzbauteilen wird in zunehmendem Maße für den Einsatz im Neubau oder in der Sanierung interessant. Einschließlich speziellen Anwendungen im Umfeld von historischen bzw. denkmalgeschützten Gebäuden, wie dem Einsatz von vorkonsolidierten CFK-Lamellen in der Sanierung ([134]), ist die Motivation dazu im Allgemeinen die Verbesserung von Tragfähigkeit und Steifigkeit oder die Erhöhung des vorhandenen Sicherheitsniveaus in der Konstruktion. Häufig kann auch eine aus ästhetischen Gründen geforderte Verschlankung der Bauteile zu einer solchen Lösung führen.

Neben bekannten Verstärkungen mit Holzlamellen höherer Sortierklassen, die in der DIN 1052 bereits als kombiniertes Brettschichtholz genormt sind, existiert eine Vielzahl von Möglichkeiten, Holzbauteile in Druck- oder Zugzone mit Holzwerkstoffen, faserbewehrten Kunststoffen oder Stahl zu ertüchtigen.

Die Bewehrung von Holz mit Holzwerkstoffen, wie Sperrholz, OSB oder Kunstharzpresshölzern, geschieht entweder um eventuell im Bauteil auftretende Querzugspannungen aufzunehmen – also der Anisotropie entgegenzuwirken – oder um die Biegezug- oder Normalkrafttragfähigkeit zu erhöhen. Dabei kommen prinzipiell nur Materialien mit besseren mechanischen Eigenschaften in Frage. Der Vorteil diese Methode liegt darin begründet, dass die Ausgangmaterialen entweder bereits im Umfeld des Holzbaus in der Normung des Bauwesens erfasst sind, oder aber zumindest dem Holz in seinen Eigenschaften ähneln. Das hat zum Beispiel bei der Auswahl geeigneter Klebesysteme mit bauaufsichtlicher Zulassung oder den zu verwendenden Berechnungsansätzen eine große Bedeutung. Die Verstärkung mit KHP wird aus diesem Grund auch Gegenstand der Arbeit im Projekt sein.

Bereits ausgeführt wurden Konstruktionen mit vorkonsolidierten Glasfaserstangen oder Bewehrungsstählen, die mittels Epoxidharz in seitlich oder in der unteren Decklamelle eingefrästen Nuten vergossen wurden (z.B. System RENONATIK). Dies führt in Abhängigkeit vom eingesetzten Material und dem erzielten Bewehrungsgrad (~0,5 %) zu einem Anstieg von Festigkeit und Steifigkeit der Leimbinder zwischen 20...55 % [131], [132], [133].

Neben dem „schlaffen“ Einkleben der GFK-Tragglieder kann auch eine Vorspannung von Holzkonstruktionen mit GFK-Spannstäben erfolgen. Dies wurde zum Beispiel für die Sanierung von Holzbrücken-Konstruktionen in den USA erprobt. Langzeitversuche haben dabei gezeigt, dass der Verlust der Vorspannung durch Kriechen bis zu 65 % betragen kann. An gebauten Konstruktionen wurden Werte von 45...50 % gemessen. Dem kann beispielsweise dadurch begeg-

net werden, dass man gezielt definierte Quelleffekte ausnutzt, indem man eine Einbaufeuchte unterhalb der Ausgleichsfeuchte wählt. Dies führt zu einer teilweisen Kompensation der Kriechverluste durch definierte Quellbeanspruchung. Außerdem kann man eine Möglichkeit zum Nachspannen der Spannglieder vorsehen [135], [137], [138].

Neben dem beschriebenen Einsatz von stabförmigen Verstärkungselementen kann auch ein planmäßiges Auf- oder Einkleben von vorkonsolidierten oder textilen band- oder lamellenartigen Faserverbundkunststoffen wirksam sein. Dabei können kommerzielle Systeme wie CarboDur der Fa. Sika oder FiRP (Fibre Reinforced Plastics) als Patent der Fa. WSTI Corvallis, Oregon, USA zum Einsatz kommen. Die Firmen Bucharer in Österreich und Zöllig AG in der Schweiz setzen als Lizenznehmer dieses Produkts das Einleimen von UD-Aramidfasersträngen in die äußere Leimfuge des BSH-Trägers mittels Resorcinharz erfolgreich ein. Neben Tragfähigkeitssteigerungen können Querschnittsreduktionen von 25 bis 40 % erzielt werden. Der Anteil der Aramidfasern am Gesamtquerschnitt bzw. Bewehrungsgrad beträgt dabei zwischen 0,15 und 5,0 %. Weltweit wurden bisher etwa 300 Bauten mit FiRP-Technologie errichtet. Die Bemessung kann nach US-Norm ER 5100 (Uniform Building Code) erfolgen. Eine deutsche Norm existiert zu diesem Themenkreis noch nicht [136], [164].

Untersuchungen in Deutschland haben gezeigt, dass eine Applikation von Aramid- und Kohlefaserlamellen sowohl im konventionellen BSH-Herstellungsprozess als auch als nachträgliche Ertüchtigung wirtschaftlich möglich ist. Die Verstärkungswirkung beträgt dabei in Abhängigkeit von Art und Menge des eingebrachten Materials zwischen 25 und 50 %. Für die nachträgliche Verstärkung empfehlen sich Kleber aus der Gruppe der Epoxide, da sie auch ohne Aufbringen von äußerem Druck wirksam werden. Die in der Leimholzherstellung üblichen Resorcinharz- und Polyurethankleber können auch bei zu verstärkenden Bauteilen eingesetzt werden [126]-[130].

1.4.2.3.3 Verstärkung von Holz-Beton-Verbundkonstruktionen

Streng genommen kann beim Einsatz von HBV-Konstruktionen in der Sanierung schon von Verstärkung einer Holzkonstruktion im eigentlichen Sinne gesprochen werden, da mit ihrer Hilfe neben einer Erhöhung der Tragfähigkeit oft auch eine bessere Gebrauchstauglichkeit (Begrenzung von Durchbiegungen, Verringerung von Schwingungen) erreicht werden kann. Darüber hinaus ist aber die zusätzliche Verstärkung von HBV-Bauteilen mit modernen Methoden (z. B. textile Verstärkungen) möglich. Insbesondere der Einsatz von hochfesten und -steifen Laminaten zur zusätzlichen Verstärkung der Zugzone kann die Leistungsfähigkeit von HBV-Konstruktionen weiter erhöhen. Eine mögliche Verstärkung durch die Kombination von Holz-Beton-Verbund mit Brettschichtholz und Zugzonenverstärkung durch eine Aramid-Lamelle (HBV-BSH-AFK/FRP) ist in [139] dargestellt. Dabei sind Tragfähigkeitssteigerungen auf 255 % zu beobachten.

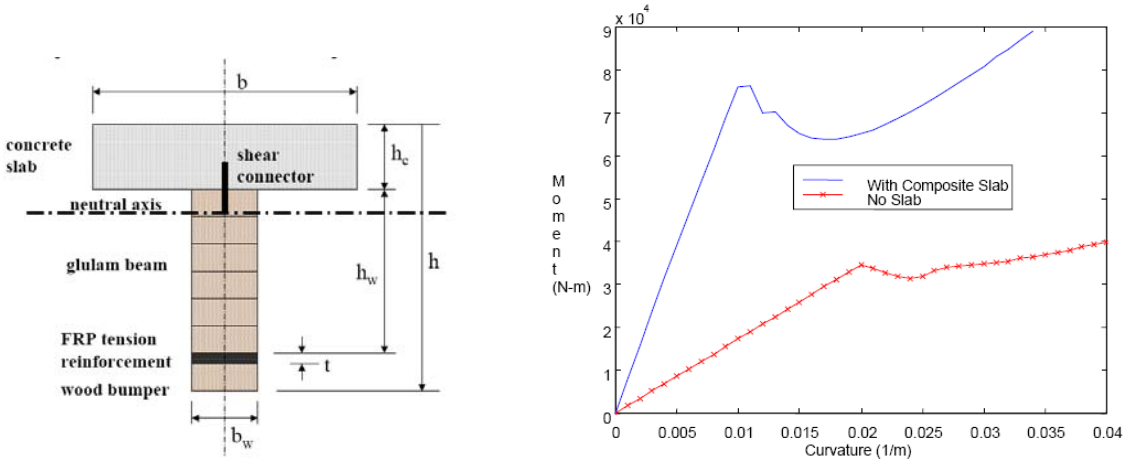


Abb. 1.6: Mögliche Durchbildung für einen FRP-verstärkten Holz-Beton-Verbund-Plattenbalkenquerschnitt und Auswirkungen auf das Tragverhalten nach [139]

1.4.2.3.4 Verstärkung im Bereich von Anschlüssen, Krafteinleitungsbereichen und Querschnittsunstetigkeiten

Textile Verstärkungen von Anschlüssen und Krafteinleitungsbereichen stellen neben der Zug-, Biegezug- und Schubverstärkung von kompletten Bauteilen eine der wichtigsten Einsatzmöglichkeiten für technische Textilien im Holzbau dar. Gemeinsamkeit fast aller Anwendungen ist dabei, dass sie das Holz im Allgemeinen in Richtung seiner schwächeren Achse quer zur Faser bzw. zwischen den Fasern, also auf Zug oder Schub ertüchtigen. Außerdem kann Querzug, der aus der Krafteinleitung über stabförmige Verbindungsmittel in das Holz resultiert, sehr gut mit gezielt aufgebrachten gerichteten textilen Strukturen aufgenommen werden.

Für Verbindungen mit Dübeln oder Bolzen können in Abhängigkeit von Dübelanzahl und -durchmesser, Verstärkungsart und -grad sowie Richtung der Beanspruchung Erhöhungen der Tragfähigkeit um 200 % nachgewiesen werden. Dies gilt sowohl hinsichtlich der Festigkeit als auch im Hinblick auf die Steifigkeit. Andere Verstärkungsmaßnahmen wie das Verdichten des Holzes mit einem Potential von ebenfalls etwa 100...150 % Traglastzuwachs können mit textilen Bewehrungen kombiniert werden, so dass in Summe Verstärkungswirkungen von über 300 % zu erzielen sind (vgl. [140]).

Im Sonderforschungsbereich 528 „Textile Bewehrungen zur bautechnischen Verstärkung und Instandsetzung“ wurden im Projektbereich Holzbau textile Gewebe, Gelege und Gestricke auf ihre Verstärkungswirkung hin untersucht. Dabei war insbesondere die Ertüchtigung von Anschlussbereichen von Interesse. In Tabelle 1.2 sind einige Ergebnisse dargestellt, die die Verstärkungswirkung von kommerziellen Geweben, Nähgelegen und biaxial verstärkten Gestricken im Bereich eines Einzeldübels mit großem Durchmesser zusammenfassen. Als Vergleichswert dienen dabei die rechnerisch unter Wegfall von Sicherheitsbeiwerten bestimmte Tragfähigkeiten einer konventionellen Dübelgruppe mit gleicher Anschlussgeometrie (1.1.) und die experimentell bestimmten Werte eines unverstärkten Einzeldübels mit einem Durchmesser von 50 mm (2.1.). Der Anschluss wurde als zweischnittige Verbindung mit außenliegenden Stahllaschen geprüft. Der Zugstab besteht aus 8 Einzellamellen, die zum Gesamtstab verleimt wurden. Für die Gestrickverstärkung wurden in 7 der 8 Lamellen aus Holz oder verdichtetem Holz kreisrunde Taschen mit einer CNC-Maschine eingefräst, die das Gestrick beim Verkleben der Lamellen mit einem kalthärtenden Epoxidharz aufgenommen haben(2.2.-2.3) [141]-[150].

Tabelle 1.2: Tragverhalten unterschiedlicher Stabdübelanschlüsse mit und ohne textile Verstärkung

Beschreibung	**Tragverhalten**			
zweischnittig, **Blechstärke t=6 mm** **Holzgeometrie: 200x80 mm**	**Querschnitt rechnerisch**	**Verbindung**		
	F_u [kN]	**F_u** [kN]	**$f_{h,u}$** [N/mm^2]	**K_s** [N/mm^2]
1. Dübelgruppe konventionell, **18 Dübel, d= 8 mm,** 1.1. Vollholz, unverstärkt	250	209 (Traglast, rechnerisch)	18,2	17,2
2. Einzeldübel,1 Dübel, d=50 mm, 2.1. Vollholz, unverstärkt	246	75	18,6	33,6
2.2 Vollholz, textile Verstärkung, Gestrick 3020 g/m^2	246	221	55,3	64,3
2.3 verdichtetes Holz (dehonit, 30 %), textile Verstärkung, Gestrick 3020 g/m^2	260	233	54,3	79,5
2.4. verdichtetes Holz („IHD-online“ 50 %), textile Verstärkung, Gestrick 3020 g/m^2	265	126	31,5	61,7
2.5. Vollholz, textile Verstärkung: Gelege1050 g/m^2 (30°)	246	232	58,2	71,8
2.6. Vollholz, textile Verstärkung: Gelege 1300 g/m^2 (35°)	246	188	47,1	72,2
2.7. Vollholz, textile Verstärkung: Gewebe 580 g/m^2 (45°)	246	129	32,5	55,6

Trägeraufbau:

8 Lamellen 10x200 mm, Verstärkung: 7 Zwischenlagen mit textiler Verstärkung (s. linke Spalte**)**

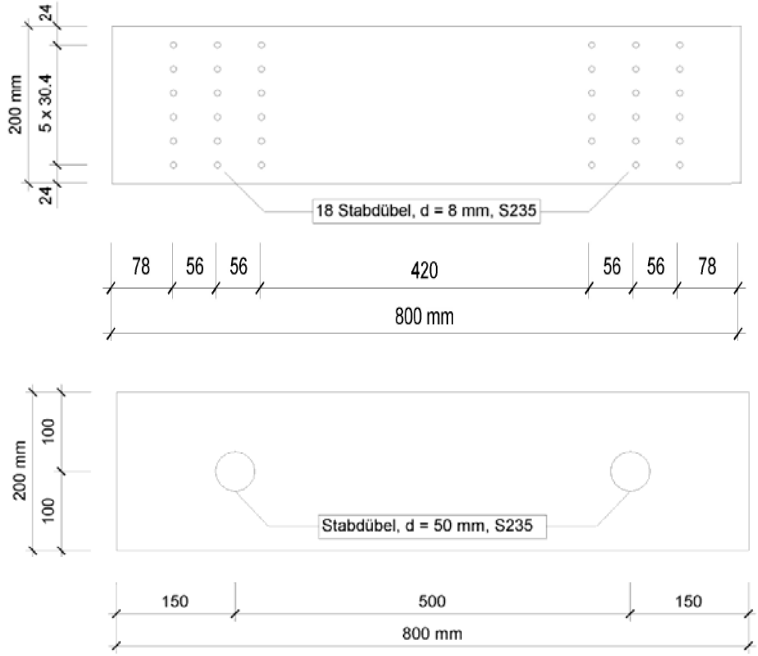


Abb. 1.7: Trägeraufbau zu Tabelle 1.2; Dübelgruppe konventionell und Einzeldübel

Ausnahme: Beim mit „IHD-Online“ umschriebenen Verfahren wurde die Applikation der Maschenware mit einem heißhärtenden Phenolharz der Fa. BAKELITE gleichzeitig mit dem thermomechanischen Verdichtungsprozess vorgenommen. Ein Vorwärmen der Lamellen auf ca. 130°C in einem Trockenschrank ging dem eigentlichen Verdichtungs- und Verklebungsprozess voraus. Das Verdichten und Verkleben erfolgte dann in einer Heizpresse am Institut für Holztechnologie Dresden.

Gegebenenfalls könnte durch die eingebrachte Bewehrung auf eine Abminderung der wirksamen Dübelanzahl, wie sie die DIN 1052 (2004) in Kapitel 12.3 (9) vorsieht, verzichtet werden. Dazu ist aber der rechnerische Nachweis zu erbringen, dass die auftretenden Spaltzugkräfte vor den Dübeln durch die dann als Querzugbewehrung wirkenden textilen Strukturen aufgenommen werden können [1].

Neben dem Einsatz von technischen Textilien bestehen aber auch andere Möglichkeiten, eine solche Querzug- bzw. Querdruckverstärkung auszuführen. Denkbar sind hierfür auch das Einleimen von Gewindestangen nach DIN 975 / 976, Stangen mit Gewinde nach DIN 571 (Schlossschrauben), Betonrippenstählen [GEWI-Stähle]) oder das Eindrehen von Schrauben. Die empfohlene Einleim- oder Einschraublänge sollte dabei etwa 20...40*d betragen [159], [35], [36].

Neben der Verstärkung von hochbeanspruchten Anschlussbereichen können technische Textilien aber auch zur planmäßigen Verstärkung oder nachträglichen Ertüchtigung von Querschnittsunstetigkeiten (Ausklinkungen, Ausnehmungen oder Durchbrüche) eingesetzt werden und unterstreichen damit die Universalität dieser.

Dabei wirken die dem Beanspruchungsverlauf entsprechend orientierten Fasern der Textilien ebenso wie bei den Anschlussbereichen vor allem (Quer-) Zug- und Schubbeanspruchen in Bereichen entgegen, in denen das Holz diese Einwirkungen nicht selbst abtragen kann. Die dazu gesichtete Literatur zeigt, dass bereits konventionelle Gewebe und Gelege aus dem kommerziellen Bereich die Tragfähigkeit der durch die oben beschriebenen Querschnittsschwächungen in ihren Tragvermögen beeinträchtigten Holzbauteile signifikant erhöhen kann.

Der Zuwachs an Tragvermögen kann dabei bis zu 160 % betragen, wobei die Größe der gemessenen Verstärkungswirkung maßgeblich von der Ausbildung des Durchbruches abhängt. Dies zeigt, dass die Verstärkung von Holzbauteilen mit technischen Textilien sich auch immer mit holzgerechtem Konstruieren kombinieren lassen muss und den Ingenieur nicht vom fachgerechten Umgang mit dem Material befreit [160], [161].

Neben der Verstärkungswirkung in statischer Hinsicht haben Faserbewehrungen auch für dynamische Beanspruchungen große Vorteile. Aus Erdbebenbeanspruchungen oder anderen dynamischen Einwirkungen resultierende Belastungen erfordern von Traggliedern und Anschlüssen im Holzbau eine erhöhte Duktilität. Diese kann bei Verbindungen fast ausschließlich von Stahlteilen und stiftförmigen Verbindungsmitteln aufgebracht werden. Aus der Verformung dieser Dübel resultiert letztendlich das Arbeitsvermögen von Anschlüssen unter dynamischer Beanspruchung im Holzbau. Zusätzlich erhöhen lässt sich diese Duktilität durch das Aufbringen von textilen Bewehrungen im Bereich der Anschlussmittel. Außerdem verbessert sich das Nachbruchverhalten maßgeblich. Das trägt zusätzlich zu einer Erhöhung des Sicherheitsniveaus bei, weil unter Umständen der Kollaps des Gesamttragwerks vermieden werden kann [151]-[155].

Eine weitere Möglichkeit, eine hohe Duktilität in Verbindungen zu erzeugen, ist der Einsatz von rohrförmigen Dübeln nach [156]. Bei diesem Anschluss wird ein Stahlrohrabschnitt nachträglich durch Hindurchziehen eines Konusses im Bohrloch aufgeweitet und gleichzeitig durch „Aufbörteln“ der Endabschnitte nach Beilegen von Scheiben eine Quervorspannung auf die Verbindung ausgeübt. Das hat eine Verbindung mit sehr kleinem Schlupf bei hoher Anfangssteifigkeit und großer Duktilität im Verlauf der Belastung zur Folge.

Die Verstärkung von Stabdübelverbindungen im Bereich der stiftförmigen Verbindungsmittel mit Nagelplatten stellt ebenfalls eine effiziente Möglichkeit zur Verstärkung von Anschlüssen dar. Diese Beilagen erhöhen die Lochleibungsfestigkeit des Abschlusses und nehmen gleichzeitig

auftretende sekundäre Querzugkräfte vor dem Dübel auf. Hinsichtlich der Duktilität gilt infolge der Beteiligung von Stahlblechen am Lastabtrag ebenso, dass eine erhöhte Zähigkeit mit verbessertem Nachbruchverhalten zu beobachten ist [157], [158].

Diese Verstärkungsidee könnte auch auf Dübel besonderer Bauart Anwendung finden. Bei den einseitigen Einlass- und Einpressvarianten ist mit einer sehr guten Verstärkungswirkung zu rechnen, wenn das gegenüberliegende Holzbauteil auf diese Art ertüchtigt wird [35].

2 Planung und Ablauf des Vorhabens

2.1 Allgemeines

Autor: Yvette Lemke (IaFB)

Um die Fülle der Forschungsaufgaben strukturiert bearbeiten zu können, erfolgte die Umsetzung der Projektziele in verschiedenen Arbeitsrichtungen, in denen die einzelnen Verbundpartner je nach ihrer Spezialisierung mitgewirkt haben. Aus diesen Arbeitsrichtungen wurden neun Arbeitspakete abgeleitet, die jeweils von einem Projektpartner verantwortlich geleitet wurden, an denen aber mehrere Partner interdisziplinär zusammen arbeiteten. Ein zehntes Arbeitspaket wurde im Jahr 2009 im Rahmen einer Aufstockung hinzugefügt. Die weiterführenden Angaben zu den einzelnen Arbeitspaketen folgen in Kap. 2.3. Die eigentliche Durchführung der Arbeiten wird in Kap. 3 beschrieben. Die Arbeitsrichtungen waren folgende:

- Fachliche und organisatorische Koordination (AP 0)
- Technologische Untersuchungen zum Verdichten und Verstärken sowie Formen von Bauteilen und Verbindungen für den Einsatzzweck (AP 1, 2, 3)
- Experimentelle und rechnergestützte Untersuchungen an Bauteilen und Verbindungen (AP 1, 2, 3, 4, 5)
- Entwurfs- und Konstruktionsstudien sowie Analysen neuer Tragwerke in Pilotprojekten (AP 4, 6, 7)
- Praxisgerechte Berechnungs- und Bemessungsverfahren sowie Anwendungsrichtlinien für Hochleistungsholztragwerke (AP 5, 6)
- Nachhaltigkeitsbilanz für die neuartigen Baustoffe, Bauteile und Tragwerke (AP 8)
- Verbreitung der Forschungsergebnisse (AP 9)
- Faseroptische Sensorik (Aufstockung; AP 10)

Zu Projektbeginn wurde eine erweiterte Literaturrecherche bzgl. aller Themenschwerpunkte als Zuarbeiten für den state-of-the-art-Bericht des IaFBs durchgeführt.

Entgegen dem Arbeits- und Zeitplan der Antragsphase kam es nach Anlauf des Projektes aus verschiedenen Gründen zu zeitlichen Verschiebungen. Auf Grund des 1. Pilotprojektes „Fußgängerbrücken“ wurden zusätzliche Untersuchungen, die für die Genehmigungsfähigkeit der Elemente und somit zur Realisierung des Tragwerks notwendig waren, erforderlich. Dies erforderte die Aufnahme neuer Arbeitspakete und eine Überarbeitung des Arbeits- und Zeitplans. Aus den Gesprächen mit den Projektpartnern und der intensiven Studie der Einsatzmöglichkeiten haben sich zudem weitere Anwendungsgebiete für vergütete Holzer ergeben. Die neu ins Projekt aufgenommen Konstruktionsformen vergrößerten das Anwendungsspektrum der Verstärkungstechnologien und somit auch die Chancen für eine erfolgreiche Überführung dieser in die Praxis. Weiterhin ergab sich im Zuge der Bearbeitung des Pilotprojektes „Fußgängerbrücken“ und verschiedenen Workshops mit dem Kooperationspartner des IaFB, der BAM Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, der Bedarf eines zerstörungsfreien Tragwerkmonitorings. Deshalb wurde im Oktober 2008 ein Antrag zur Aufstockung der Fördermittel für den Ersteinsatz von optischen Messfasern in Holzbauteilen im Rahmen eines neuen Arbeitspaktes (AP 10 Faseroptische Sensorik) gestellt. Diesem Antrag wurde stattgegeben. Dieses Arbeitspaket läuft zwar unter dem Projekt HHT, aber da die Laufzeit (01.01.2009 bis 30.06.2012) abweichend ist Inhalte keinen Einfluss auf die Basisarbeitspakete haben, wird diesbezüglich ein getrennter Abschlussbericht erstellt. Bei einigen Instituten war der Personalstand zeitweise problematisch, da qualifizierte Mitarbeiter ihr Tätigkeitsfeld veränderten und die Akquise entsprechender Mitarbeiter größeren Zeitumfang in Anspruch nahm, so dass nicht alle Arbeiten zum geplanten Zeitpunkt in voller Intensität begonnen werden konnten. Aufgrund größerer Umbauarbeiten im Otto-Mohr-Laboratorium der TU Dresden im Zeitraum von April bis August 2009 konnten zudem in diesem Zeitraum nur begrenzt Versuche an Probekörpern mit bauteilnahen Abmessungen durchgeführt werden. Es verzögerten sich dadurch zahlreiche Prüfungen sowie die

sich daran anschließende Auswertung der großen Datenmengen und die Erstellung der Berichte entsprechend.

In Folge der vorgenannten Gründe wurde ein Antrag auf kostenneutrale Laufzeitverlängerung des Basisprojektes (bestehend aus den Arbeitspaketen AP 0 bis AP 9) gestellt. Dieser Antrag wurde - mit unterschiedlichen Ausscheideterminen der einzelnen Projektpartner - bewilligt.

Technische Universität Dresden, Teamleitung: ISH,

ISH, Ausscheidetermin: 31.08.2010
BU, Ausscheidetermin: 30.06.2010
ITM, Ausscheidetermin: 31.03.2010
ILK, Ausscheidetermin: 28.02.2010

Institut für angewandte Forschung im Bauwesen (IaFB) e.V., Ausscheidetermin: 31.08.2010

HESS TIMBER GmbH & Co. KG, Ausscheidetermin: 31.08.2010

2.2 Zusammenarbeit

Autor: Yvette Lemke (IaFB)

Während der gesamten Projektlaufzeit wurde die Zusammenarbeit mit externen Kontakten (vor allem auf den Gebieten der Holzvergütung, der thermischen Behandlung, des Quell- und Schwindverhaltens sowie der Bauwerksüberwachung) betrieben. Da es sich bei den meisten dieser Kontakte um Einrichtungen aus dem Forschungsumfeld handelt, wurde das Aufgreifen der Inhalte mit dem Ziel der baupraktischen Umsetzung ausnahmslos unterstützt. Eine Überschneidung mit anderen Vorhaben entstand dabei nicht. Die Zusammenarbeit wurde von allen Beteiligten als gut und erforderlich eingeschätzt. Sie erfolgte vorwiegend mit folgenden Einrichtungen:

- Institut für Holztechnologie Dresden (ihd)
- BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)
- Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETH)
- Thermoholz Spreewald GmbH (THS)

Zwischen der BAM und dem IaFB besteht ein Kooperationsvertrag. Im Rahmen dieser Zusammenarbeit wurden mehrere Workshops zum Themengebiet „Dauerhaftigkeit von Holz- und Holzwerkstoffen und zerstörungsfreie Prüfung / Monitoringverfahren“ durchgeführt.

Um sich auf dem Gebiet der Holzvergütung weiterzubilden und externe Kontakte zu knüpfen bzw. zu pflegen, haben die Mitarbeiter des IaFB im Januar 2009 am Holzanatomischen Kolloquium am ihd teilgenommen.

Für eine effektive interne Zusammenarbeit wurde bei allen drei Verbundpartnern ein Videokonferenzzugang eingerichtet, um den Zeit- und Kostenaufwand der zweiwöchig stattfindenden Projektbesprechungen so gering wie möglich zu halten. Um die Kommunikation mehrerer Videokonferenzteilnehmer zu ermöglichen, wurde das Knowhow und die Technik des Videokonferenzzentrums der TU Dresden in Anspruch genommen.

2.3 Arbeitspakete

Autor: Yvette Lemke (IaFB)

Die Arbeiten wurden in Arbeitspakete aufgeteilt und in der Regel unter verantwortlicher Leitung eines Partners interdisziplinär bearbeitet. Der zum Zeitpunkt der Antragstellung vorliegende Arbeitsplan wurde wie beschrieben innerhalb der ersten Monate nochmal geändert und um einige Unterarbeitspakete ergänzt.

Nachfolgend werden die Inhalte der Arbeitspakete (AP) nach dem aktualisierten Arbeitsplan zusammenfassend angegeben. Die Durchführung der Arbeiten sowie die erzielten Ergebnisse werden detailliert im Kapitel 3 beschrieben.

2.4 Projektmanagement (AP 0)

2.4.1 Verantwortliche und Beteiligte

Verantwortlich: fachlich: IaFB, organisatorisch: GWT

Beteiligt: IaFB, GWT

Laufzeit: 02.08.2006 bis 31.08.2010

2.4.2 Inhalte

Allgemein:

Um der Komplexität des Projektes und dem signifikanten Koordinationsaufwand der unterschiedlichen ineinandergreifenden Teilprojekte gerecht zu werden, wurde ein gesondertes Arbeitspaket „Projektmanagement“ ausgewiesen. Getrennt nach fachlicher und organisatorischer Leitung wurden die diesbezüglichen Aufgaben von den Projektpartnern IaFB und GWT übernommen. Das Projektmanagement umfasste alle Einzelprozesse des HHT – Projektes, sowohl das administrative Projektcontrolling (Termin, Qualität, Abrechnung) als auch die fachliche Koordination. Beide Koordinationsaufgaben waren aufgrund der hohen Komplexität des Projektes verschiedenen Partnern unterstellt. Die fachliche Koordination übernahm das IaFB, die administrative Koordination war Aufgabe der GWT. Eine Trennung der beiden Koordinationsaufgaben war sinnvoll, da die Tätigkeitsschwerpunkte beider Kompetenzpartner einen arbeitsteiligen Prozess beschreiben, erwies sich jedoch als nicht immer ganz leicht. Dieses Arbeitspaket wurde kontinuierlich während der gesamten Laufzeit bearbeitet.

IaFB:

Zur Koordination inhaltlicher und organisatorischer Fragen fanden während der Projektlaufzeit regelmäßige Projekttreffen aller Partner im Rahmen von Videokonferenzen und persönlichen Treffen statt, organisiert durch die GWT, fachlich geleitet durch das IaFB. Neben diesen regelmäßigen Terminen zur Koordination aller Projektpartner oblag dem IaFB e.V. auch die kontinuierliche inhaltliche Leitung des Projektes. Effektiv geschah dies durch bilaterale Abstimmungen mit den jeweiligen Projektpartnern und externen Beteiligten auf Mitarbeiterebene. Darüber hinaus wurden mehrere Sondertreffen durchgeführt. Zudem nahm das IaFB auch organisatorische Aufgaben wahr. So wurden beispielsweise Formatvorlagen erstellt, Terminschienen erarbeitet und fachliche sowie organisatorische Abstimmungen mit Partnern und PTJ durchgeführt.

Zu Projektbeginn 2006 wurde im Zusammenhang mit der Erstellung des Sachstandsberichts und der Diskussion im Forscherkonsortium die herausragende Bedeutung der Dauerhaftigkeitsaspekte von Holz für seinen Einsatz im Bauwesen deutlich. Da diese Fragen maßgeblich von Holzbiologen und Verfahrenstechnikern bearbeitet werden, wurde – um diese Wissenschaftler in das Projekt einzubinden und aktuelle Forschungsergebnisse für die Projektarbeit nutzen zu können – im Februar 2007 durch das IaFB ein Workshop mit den Schwerpunkten

(1) Zerstörungsfreie Prüfungs- und Monitoringverfahren

(2) Dauerhaftigkeit von Holz

durchgeführt. Neben dem fachlichen Austausch war auch die Herstellung des persönlichen Kontakts als Grundlage für die weitere Zusammenarbeit mit den beteiligten Wissenschaftlern ein wichtiges Ergebnis.

Die Projektpartner hatten sich im Zusammenhang mit der Berichtslegung über den Zeitraum 2007 vorgenommen, ein Kolloquium zur Vorstellung der Arbeitsergebnisse beim Projektträger durchzuführen. Im April 2008 fand dieser Termin statt. Alle Beteiligten haben in etwa 20 minütigen Vorträgen den aktuellen Stand der Arbeiten vorgestellt und gemeinsam mit den Projektingenieuren des Projektträgers Jülich (PTJ) diskutiert.

Aufbauend auf dem Workshop im Februar 2007 und im Zusammenhang mit den Anforderungen durch die Genehmigungsbehörde an die HHT-Brücke im Pilotprojekt „Fußgängerbrücken“ wurde

ein effektives Monitoring für diese beschlossen (AP 10). Um den Projektbeteiligten den Stand der Forschung und Technik zu vermitteln, eventuellen Forschungsbedarf zu ermessen und Arbeitsaufgaben abzuleiten, wurde deshalb im August 2008 ein Workshop mit folgenden Themen organisiert.

(1) Ermittlung des aktuellen Stands der Messsensorik für in-situ-Monitoringverfahren

(2) Diagnose des Bauwerksverhalten mittels faseroptischer Sensorik unter dem besonderen Gesichtspunkt des Einsatzes für Holztragwerke

(3) Überblick über den Stand der Forschung zur Dehnungsmessung mittels CFK-Halbbrücken am ITM der TU Dresden

(4) Übersicht über die geplanten Anwendungen optischer Messfasern im HHT-Projekt und zu klärende Fragestellungen

(5) Diskussion und Erarbeitung eines Fahrplans zur weiteren Zusammenarbeit; Entscheidung über die mögliche Einbindung externer Partner

Im November 2008 wurde eine interne Projektrevision mit dem Ziel durchgeführt, den Stand der Arbeiten für alle Beteiligten zusammenzufassen und den Arbeitsplan für die Restlaufzeit zu konkretisieren. Im Nachgang fand dazu im März 2009 ein HHT-Workshop zur Vorstellung der Zwischenergebnisse statt. Die erzielten Ergebnisse und offene Fragestellungen wurden hinsichtlich des weiteren Vorgehens intensiv diskutiert. Als Ergebnis wurde beschlossen eine kostenneutrale Projektverlängerung zu beantragen. Im Zusammenhang mit dem Antrag der kostenneutralen Verlängerung wurde im September 2009 nochmals eine interne Projektrevision durchgeführt, so dass das IaFB auf Grundlage des Arbeitsstands aller Projektpartner den gemeinsamen Arbeitsplan für die Restlaufzeit aktualisieren konnte. Die kostenneutrale Laufzeitverlängerung des Basisprojektes – bestehend aus den Arbeitspaketen AP 0 bis AP 9 – wurde gemeinsam mit allen Partnern abgestimmt und vom IaFB mit dem PTJ besprochen. Dazu fand im September 2009 ein Treffen beim PTJ unter Beteiligung von IaFB, GWT und PTJ statt. Seitens IaFB und GWT wurden die Gründe für den Antrag auf kostenneutrale Verlängerung erläutert, seitens des PTJ die einzureichenden Unterlagen genannt. Im Ergebnis wurden die Anträge der Projektpartner abgestimmt und der angepasste Arbeitsplan im Oktober 2009 beim PTJ eingereicht. Ende November 2009 wurde die Verlängerung des Basisprojektes bis zum 31.08.2010 genehmigt.

GWT:

Das Verbundprojektmanagement hatte folgende Ziele:

- Gewährleitung von Termin und Qualität der Projektergebnisse
- Erzielen der vorhandenen Leistungsparameter
- Erreichen technologisch und wirtschaftlich optimaler Projektergebnisse
- Gewährleistung der Verbindung von Wissenschaft und Wirtschaft
- Umsetzung einer zielgerichteten medialen Kommunikation

Entsprechend der Zielstellung für das Verbundprojektmanagement waren die Moderations- und Kommunikationsfunktion zwischen den Teilprojekten als auch die Controllingfunktion für das Erreichen der jeweiligen Zwischenergebnisse und deren Übereinstimmung als Aufgaben zu bewältigen.

Innerhalb des Teams Wissenschaft, fachlich geleitet durch das Institut für Stahl- und Holzbau, wurde der GWT-TUD GmbH aufgrund der Fülle der zu erwartenden Forschungsergebnisse und fehlender Ressourcen sowie Kompetenzen die administrative Koordination des Projektes übertragen.

Im Ergebnis des arbeitsteiligen Verbundprojektmanagements konnte den Teams die Konzentration auf ihre jeweiligen wissenschaftlichen und technischen Arbeitsziele gewährleistet und die Ziele des Projektmanagements umgesetzt werden.

Verbundprojektmanagement (organisatorisch):

Moderations- und Kommunikationsfunktion zwischen interdisziplinär zusammenarbeitenden Ingenieurdisziplinen: Zur Gewährleistung der interdisziplinären Kommunikation zwischen den Wissenschaftlern und Ingenieuren der Teilprojekte wurden während der Projektlaufzeit regelmäßige Statusseminare durch die GWT geplant, organisiert, moderiert und unter der fachlichen Leitung des IaFB durchgeführt. Im Projektverlauf haben 42 Projekttreffen stattgefunden, womit die stetige Basis für einen Austausch von Erfahrungen, Ergebnissen und Arbeitsständen sowie die Planung der folgenden, notwendigen Schritte sichergestellt wurde. Die Projekttreffen wurden in Zusammenarbeit mit allen Partnern vorbereitet und mit der Aufbereitung des Konferenzverlaufs und Inhalts nachbereitet und zu jedem Zeitpunkt dokumentiert. Zwischen den Partnern fanden, Einzelberatungen und Workshops auf unmittelbarer Arbeitsebene statt, mit dem Ziel die Aufgaben des Versuchsplanes zu realisieren und Referenzprojekte vorzubereiten.

Controlling-Funktion für die Erreichung der jeweiligen Zwischenergebnisse, ihrer gegenseitigen Passfähigkeit sowie des Gesamterfolges: Mit dem Ziel, ein effizientes Projektcontrolling im Projekt zu verankern, wurden entsprechend der Grundlagen des Projektmanagements, Arbeitsprozesse innerhalb der zu leistenden Forschungs- und Entwicklungsschritte definiert und in einen detaillierten Projektplan umgesetzt. Aufbauend auf diese Planung erfolgte die Ablauforganisation sowie die Planung und Überwachung des Mitteleinsatzes. Die Überwachung der Arbeitsergebnisse und Zwischenergebnisse wurde u.a. auf der Grundlage des Versuchsplans durchgeführt. Die Planung und Überwachung des Mitteleinsatzes innerhalb des Teams Wissenschaft war aufgrund der Spezifik der Mitteleinsatzplanung, welche über vier Institute zu koordinieren war, eine sehr komplexe Controlling-Aufgabe, die durch die GWT-TUD GmbH zur Entlastung der wissenschaftlich inhaltlichen Arbeiten vollumfänglich getragen wurde. Im Ergebnis des gezielten Projektcontrollings konnte die transparente Darstellung des Mitteleinsatzes über den gesamten Projektverlauf gewährleistet werden sowie eine dem Arbeitsablauf entsprechende Verwendung der Mittel.

2009 wurde aufgrund des aktuellen Ergebnisstandes des Projektes eine kostenneutrale Projektverlängerung beantragt. Die Projektverlängerung wurde innerhalb des Teams Wissenschaft durch die GWT planerisch umgesetzt.

2.5 Formholzprofile (AP 1)

2.5.1 Verantwortliche und Beteiligte

Verantwortlich: ISH

Beteiligt: ISH, Hess

Laufzeit: 05.10.2006 bis 30.06.2010

2.5.2 Inhalte

Die Genehmigungsfähigkeit der Elemente im 1. Pilotprojekt (Fußgängerbrücken - Berlin) erforderte die Aufnahme neuer Arbeitspakete (AP 1.2, 1.3 und 1.9).

Dieses Arbeitspaket bestand in seinem Schwerpunkt aus Untersuchungen zum Formholz, welche durch Versuche zum Materialverhalten von behandeltem und unbehandeltem Holz, welches u. a. für Bauteile in den Pilotprojekten Verwendung fand, ergänzt wurden. Aus diesem Grund erfolgt die Darstellung der Versuchsergebnisse im Abschn. 3 unter dem weiter gefassten Titel „Materialien und Querschnitt“ (siehe Kap.3.2).

2.5.2.1 Verdichten des Rohmaterials (AP 1.1)

Beteiligt: Hess

Laufzeit: 01.11.2006 bis 31.01.2007

Zur Verdichtung wurde in der Regel Fichtenholz als Ausgangsmaterial verwendet, welches von Hess zur Verfügung gestellt wurde. Das Verdichten des Holzes erfolgte bei der Firma Deutsche Holzveredelung Schmeing oHG (KHP-Markenname dehonit®) in Kirchhundem.

2.5.2.2 Test Keilzinkenverbindung und Schäftung (AP 1.2)

Beteiligt: Hess

Laufzeit: 01.11.2006 bis 11.04.2007

Da Formholzprofile nur bis zu einer bestimmten Länge produziert werden können, wurden Längsverbindungen hergestellt. Die Untersuchungen bzgl. der Festigkeiten von Keilzinkenverbindungen und Schäftungen wurden von Hess nach einem standardisierten Prüfprotokoll durchgeführt.

2.5.2.3 Untersuchungen zur Verbundqualität und zur Holzveredelung (AP 1.3)

Beteiligt: Hess, ISH

Laufzeit: 23.03.2007 bis 31.05.2007

Hess:

Hierbei wurden die Klebfugen von verschiedenen schichtverklebten Holzarten aus Schnittholz unter Verwendung verschiedener Klebstoffsysteme geprüft (Resorcinol, Polyurethan). Hierzu zählten z.B. auch die Delaminierungsprüfungen von verdichteten Holzplatten.

ISH:

Die Verbundqualität der Leimfuge zwischen den veredelten Holzprodukten und dem unbehandelten Lärchenholz wurde nach zyklisch wechselnder Be- und Entfeuchtung untersucht. Die Probekörper wurden sowohl einer künstlichen Bewitterung ausgesetzt als auch auf einem Versuchsfeld im Freien durch eine natürliche Bewitterung beansprucht.

2.5.2.4 Herstellung der Pressholzplatten (AP 1.4)

Beteiligt: Hess

Laufzeit: 01.02.2007 bis 30.03.2007

Hergestellt wurden stabverleimte Pressholzplatten aus Fichten- und Lindenholz unter Verwendung von Resorcinharzklebstoff. Die Herstellung der Pressholzplatten erfolgte bei Hess. Dazu wurden die bei dehonit verdichteten Brettlamellen gehobelt, zu Leisten aufgetrennt und zu Platten verleimt. Im Anschluss wurden Platten beidseitig gehobelt und zum Formen bereitgestellt.

2.5.2.5 Formen der Platten zum Rohr (AP 1.5)

Beteiligt: ISH, Hess

Laufzeit: 02.04.2007 bis 26.10.2007

Die Formung der bei Hess stabverleimten Pressholzplatten zu Rohren erfolgte bei der Firma Sindelfinger Holzringe e. K. Das dabei eingesetzte Formungsverfahren wurde vom ISH entwickelt und patentiert (Patent Nr.: DE 10224721A1).

2.5.2.6 Formungstechnologie, Bearbeitung und Abbund der Formholzprofile (AP 1.6)

Beteiligt: Hess, ISH

Laufzeit: 02.05.2007 bis 28.05.2010

ISH:

Die Verdichtung des Rohholzes für die Fertigung der Formholzprofile wurde 2007 abgeschlossen. Die benötigten Prozessparameter zum Verdichten des Holzes wurden vom ISH festgelegt und an die Deutsche Holzveredelung übermittelt. Der Verdichtungsprozess wurde von einem Mitarbeiter des ISH begleitet. Der Verdichtungsgrad der Brettlamellen für die Profilfertigung liegt bei 25% bis 30%.

Hess:

Der Abbund der Formholzprofile wurde mit Hilfe von verschiedenen Bearbeitungsmethoden für die Versuchskörperanfertigung durchgeführt. Aufgrund der komplexen Bauteilgeometrie mussten u.a. neue Aufspannsysteme entwickelt werden.

2.5.2.7 Untersuchung der Maß- und Formhaltigkeit (AP 1.7)

Beteiligt: ISH

Laufzeit: 05.10.2006 bis 30.06.2010

Es wurden das Quell- und Schwindverhalten von Probekörpern aus Fichte, Lärche, Kunstharzpressholz (KHP) und thermisch modifizierten Holz (TMT) sowie von Hybridproben untersucht. Die Beanspruchung der Probekörper bestand aus einer künstlichen und/oder natürlichen Bewitterung (Freibewitterung).

2.5.2.8 Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit (AP 1.8)

Beteiligt: ISH

Laufzeit: 01.12.2006 bis 30.06.2010

Neben Delaminationsversuchen wurde die Dauerhaftigkeit zahlreicher Probekörper im Freibewitterungsversuch auf einem Versuchsgelände in Freital bei Dresden untersucht. Es wurden bis zu 2 m lange Verbundbohlen aus TMT und Fichtenholz, Hybridträger aus BSH-Fichte mit KHP-Decklamellen sowie kurze Verbundquerschnitte aus TMT und Lärchenholz untersucht. Zusätzlich zu diesen Massivholzproben befinden sich unbewehrte und textilverstärkte Rohre aus Formholz in der Freibewitterung. Zudem wurde am ihd die Dauerhaftigkeit alpiner Lärche gegen Basidiomyceten geprüft.

2.5.2.9 Ermittlung von Materialparametern (AP 1.9)

Beteiligt: ISH

Laufzeit: 01.01.2007 bis 30.06.2010

Für die Berechnung und die Simulation der Bauteile wurden mechanischen Kennwerte der Werkstoffe benötigt. Des Weiteren waren zusätzliche Untersuchungen für die Genehmigungsfähigkeit des Pilotprojektes „Fußgängerbrücken“ erforderlich. Folgende Untersuchungen wurden durchgeführt:

- Druck- und Biegeprüfungen an Kleinproben aus Fichtenholz (unverdichtet und verdichtet), KHP und TMT
- Druckversuche parallel und quer zur Faserrichtung
- Quelldruckversuche an unverdichteter und verdichteter Fichte
- Kriechversuche an KHP-Proben (am ihd)
- Versuche zum Brandverhalten von Pressholz und Formholzrohren

2.6 Verbindung von Pressholz und technischen Textilien (AP 2)

2.6.1 Verantwortliche und Beteiligte

Verantwortlich: ISH

Beteiligt: ISH, Hess

Laufzeit: 01.09.2006 bis 06.11.2009

2.6.2 Inhalte

2.6.2.1 Herstellung von Bohlen mit lokaler Verdichtung (AP 2.1)

Dieses Arbeitspaket wurde wegen der Aufnahme einiger zusätzlicher Untersuchungen in AP 1 (vgl. Kap. 2.5.1) gestrichen.

2.6.2.2 Entwicklung von Gelenkverbindungen mit lokaler Verdichtung und textiler Verstärkung (AP 2.2)

Beteiligt: Hess, ISH

Laufzeit: 01.09.2006 bis 25.04.2008

Mit der Entwicklung der Gelenkbolzenverbindungen in verschiedenen Ausführungen wurde mit Projektstart begonnen, um mögliche Pilotprojekte daraus abzuleiten. Untersucht wurde eine Reihe von Anschlüssen mit GFK-Verstärkungen, die zu deutlichen Steigerungen bzgl. Traglast und Duktilität der Verbindungen führten. Als Verstärkungselemente wurden GFK-Halbzeuge oder Gestricke mit kraftgerechter Faserorientierung appliziert.

2.6.2.3 Erarbeitung von Fachwerkknoten in gelenkiger und starrer Ausbildung (AP 2.3)

Beteiligt: Hess, ISH

Laufzeit: 01.11.2006 bis 31.10.2007

Der Einsatz von Profilquerschnitten in ebenen oder räumlichen Stabwerkkonstruktionen erfordert die Entwicklung geeigneter Knoten- und Anschlusslösungen. Da der Entwurf der Details stark von den geometrischen Randbedingungen sowie den Belastungssituationen abhängig ist, wurde entschieden, die verschiedenen Knotenvarianten anhand konkreter Bauvorhaben zu untersuchen und vorzubemessen. Anhand des Vergleichs mit bestehenden Tragwerken können bereits konkrete Aussagen bezüglich Fertigung, Tragverhalten und Wirtschaftlichkeit der untersuchten Varianten getroffen werden. Für den Fall des ebenen Tragwerks wurde eine bereits ausgeführte Stahl-Fachwerkkonstruktion der Neutronenleiterhalle des Hahn-Meitner-Instituts in Berlin als Referenz herangezogen. Die entwickelte HHT-Lösung basiert auf der Verwendung von Kastenprofilen, welche mittels verleimter Vollholz- oder Schichtholzknoten zu einem Fachwerk zusammengesetzt werden. Für den Fall der räumlichen Knotenelemente wurde die Konstruktion des Pilotprojektes „Hess-Innenhofüberdachung“ gewählt. Entworfen wurden verschiedene Knotenlösungen bestehend aus zusammengesetzten ebenen Schichtholzknoten, herkömmliche Stahlknotenverbindungen und Vergussknoten auf Zement- oder Kunstharzbasis. Auf Grund der primär auf Druck beanspruchten Anschlüsse erscheint die letztgenannte Lösung als sehr effektiv und wirtschaftlich, da der Hohlraum der Rohrprofile gleichzeitig als Schalung für die Vergussmasse dient. Wegen der hohen Passgenauigkeit sind sehr leistungsfähige Anschlüsse möglich.

Zur Bemessung von Fachwerkbindern mit Gelenkbolzenverbindungen wurde ein analytischer als auch ein numerischer Berechnungsansatz verfolgt. Die Entwicklung des numerischen Models inkl. eines Berechnungsbeispiels ist in Abschnitt 3.6.3.3 beschrieben.

2.6.2.4 Erarbeitung ebener und räumlicher Knotenelemente zur Aufnahme der Formholzprofile (AP 2.4)

Beteiligt: Hess, ISH

Wegen der Spezifik der Knotenelemente wurde dieses Arbeitspaket nicht getrennt behandelt sondern im Rahmen des Pilotprojektes Hess-Innenhofüberdachung (siehe Kap. 3.8.4) sowie bei der Verbindung von Rohren mit massiven Knoten zu Tragwerksteilen (siehe Kap. 3.5.4) bearbeitet. Ein getrenntes AP 2.4 existiert daher nicht.

2.7 Entwicklung von textilen Bewehrungen für Bauteile und Verbindungen (AP 3)

2.7.1 Verantwortliche und Beteiligte

Verantwortlich: ITM

Beteiligt: ITM, ISH, Hess, ILK

Laufzeit: 01.11.2006 bis 23.12.2009

2.7.2 Inhalte

2.7.2.1 Entwicklung und Anpassung von ringförmigen Gestricken (AP 3.1)

Beteiligt: ITM

Laufzeit: 01.11.2006 bis 29.01.2008

Bei der Verbindung von Stäben im Holzbau treten Spannungsspitzen auf, denen Holz vor allem quer zur Faserrichtung oft nicht genügend Tragfestigkeit entgegen setzen kann. Entsprechend dient die Verbindungsstelle als Bemessungsgrundlage des gesamten Stabes. Somit ist der Restquerschnitt des Stabes meistens deutlich überdimensioniert. Um die Wirtschaftlichkeit von Holzstabwerken zu erhöhen, können die Verbindungspunkte in Pressholz durch Applikation von textilen Verstärkungsstrukturen mittels Epoxidharz auf die Holzelemente verstärkt werden. In Zusammenarbeit mit dem Institut für Stahl- und Holzbau der TU Dresden wurden im Rahmen des SFB 528 – Textile Bewehrung zur Bautechnischen Verstärkung und Instandsetzung- Grundlagenuntersuchungen zu verschiedenen Verstärkungsmöglichkeiten durchgeführt.

Ziel im Rahmen des HHT-Projekts war, aufbauend auf den Ergebnissen der Voruntersuchungen, die Entwicklung und Umsetzung von anforderungsgerechte textilen gestrickten Halbzeugen für die Lochleibungsverstärkung. Dazu sollten im Rahmen dieses Arbeitspakets technisch-technologische Möglichkeiten und Grenzen bei der stricktechnischen Herstellung von ringförmigen, verstärkten Gestrickhalbzeugen entsprechend den Vorgaben (geometrischen Abmessungen) unter Berücksichtigung z. B. des Einflusses von Fadenfeinheit, Anordnung von Bindungselementen (Masche, Henkel, Flottung) sowie Maschenlänge untersucht werden. Im Ergebnis sollten die für die weiteren Untersuchungen zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften benötigten textilen Halbzeuge bereitgestellt werden.

2.7.2.2 Entwicklung maßgeschneiderter, textiler Schläuche im Flachstrickverfahren (AP 3.2)

Beteiligt: ITM

Laufzeit: 01.11.2006 bis 23.12.2009

Im Rahmen der Entwicklungen sollten aufbauend auf Grundlagenuntersuchungen anforderungsgerechte flachgestrickte Schlauchstrukturen mit axialer Verstärkung für Formholzprofile umgesetzt werden. Im Weiteren sollte die Flachstricktechnologie im Rahmen dieses Arbeitspaketes derart erweitert werden, dass die gleichzeitige Implementierung von axialen und tangentialen Verstärkungsfäden in die Strukturen möglich wird. Im Ergebnis sollten dann biaxial verstärkte Schlauchgestricke als Verstärkungshalbzeuge realisiert werden.

Für die Integration der Verstärkungsfäden sind geeignete Verfahrensprinzipe zu entwickeln und auf ihre Umsetzbarkeit hin zu überprüfen. Weiterhin wurde angestrebt, unter Nutzung z. B. der „Fully-Fashion“ Technologie komplexe Abläufe zur Herstellung formgestrickter Teile zu programmieren und stricktechnisch umzusetzen. Die Fertigung von in verschiedenen Richtungen verstärkten schlauchförmigen Strukturen erfolgte nach den geometrischen Angaben, die im Institut für Stahl- und Holzbau entsprechend den auftretenden Beanspruchungen ermittelt wurden.

2.7.2.3 Anpassung handelsüblicher Textilien (AP 3.3)

Beteiligt: Hess

Unter der Anpassung handelsüblicher Textilien ist das Handlaminieren von Formholzprofilen und Anschlüssen mit gekauften Produkten zu verstehen. Für den Holzmast der Windkraftanlage wurde dies von der Firma Fibertech, Chemnitz übernommen, für kleinere Proben vom ISH durchgeführt. Da die gekauften Produkte unverändert ohne Schwierigkeiten genutzt werden konnten, entfiel ein eigenes Arbeitspaket.

2.7.2.4 Wickelverbünde (AP 3.4)

Beteiligt: ILK

Laufzeit: 29.10.2007 bis 28.04.2009

Die Wickelverbünde wurden auf der ILK-Wickelmaschine hergestellt und untersucht. Sie werden gemeinsam mit dem zusätzlich untersuchten Flechtverfahren und der Verwendung vorkonfektionierter Schläuche des ITM unter dem Titel „Textile Verstärkung von Formholzprofilen (siehe Kap. 3.4.3) beschrieben.

2.7.2.5 Laminierung der Profile und Anschlussbereiche (AP 3.5)

Beteiligt: ISH

Laufzeit: 29.10.2007 bis 31.08.2009

Mit der Laminierung eines Großteils der Rohr- und Kastenprofile wurde die Firma SGL Carbon beauftragt. Die Armierung der Profile mit Kohlefasern wurde 2009 abgeschlossen. Insgesamt wurden 25 lfm Formholz-Rohrprofil und 15 lfm Kastenprofil laminiert. Variiert wurden die Laminatdicke als auch der Faserwinkel der Wicklung. Weitere Rohrprofile wurden vom ILK laminiert und sind unter dem Titel „Textile Verstärkung von Formholzprofilen (siehe Kap. 3.4.3) beschrieben.

Da die Laminierung eng mit den textilen Verstärkungen verknüpft ist, wird sie bei den Untersuchungen der textilen Verstärkungen mitbeschrieben. Ein eigenes Arbeitspaket entfällt daher.

2.7.2.6 Bewehrung der Profile im Autoklaven (AP 3.6)

Beteiligt: ILK

Bei einer Harzimprägnierung im Autoklaven kann nicht sicher ausgeschlossen werden, dass Harzmaterial in den Holzwerkstoff eintritt. Dies führt oftmals zu einer schlechten Durchtränkung der Verstärkungstextilien und einer schlechten Oberflächenversiegelung. Zusätzlich dazu ist der Massezuwachs durch die vermehrte Harzaufnahme des Holzwerkstoffes unwirtschaftlich und nicht mehr mit den Anforderungen an den modernen Leichtbau zu vereinbaren. Deshalb wurden innerhalb des Projektes die Untersuchungen zu den Verstärkungsvarianten auf das Wickel- und Flechtverfahren sowie die vorkonfektionierten Gestrickschläuche konzentriert.

2.7.2.7 Imprägnierung der Gestricke (AP 3.7)

Beteiligt: ITM, Hess

Laufzeit: 04.09.2007 bis 23.12.2009

Voraussetzung für die Ausnutzung des Verstärkungspotentials textiler Verstärkungshalbzeuge z. B. im Bauwesen ist deren erfolgreiche, vollständige und dabei reproduzierbare Imprägnierung sowie deren Verankerung auf dem zu verstärkenden Grundbauteil. Dafür müssen die textilen Halbzeuge z. B. mit einem Harzsystem imprägniert werden. Gleichzeitig wird dadurch auch eine Fixierung und Stabilisierung der Anordnung der eingesetzten Verstärkungsfasern erreicht. In ersten Untersuchungen wurde dafür das Handlaminierverfahren eingesetzt. Dabei zeigte sich allerdings durch den notwendigen hohen Anteil manueller Arbeiten ein sehr großer Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften der Bauteile. Das Handlaminieren muss weiterhin direkt vor Ort auf der Baustelle oder in separaten Produktionsräumen vor der Anlieferung erfolgen. Bei den Arbeiten direkt auf der Baustelle können die klimatischen Bedingungen stark variieren und somit das erreichbare Verstärkungsniveau einschränken. Daneben erfordert das Handling textiler Strukturen und deren Verarbeitung zu Verbundbauteilen besondere Aufmerksamkeit, die in der Art auf einer Baustelle nicht immer gegeben ist. Im Rahmen der Untersuchungen wurde daher die Entwicklung und Umsetzung eines seriennahen Produktionsprozesses zur Herstellung von Patches auf der Basis der ringförmigen Gestricke angestrebt. Dadurch konnten Verstärkungsbauteile für die Applikation mittels Klebeverfahren auf zu verstärkenden Grundstrukturen realisiert werden. Im Rahmen der Untersuchungen sollten entsprechende Bauteile für die weiteren Untersuchungen bereitgestellt werden.

2.8 Technologiesynthese – Verdichten, Formen, Bewehren (AP 4)

2.8.1 Verantwortliche und Beteiligte

Verantwortlich: ISH

Beteiligt: ISH, IaFB

Laufzeit: 01.01.2007 bis 28.05.2010

2.8.2 Inhalte

Die Arbeitspakete 4.5 und 4.6 wurden neu aufgenommen, da sich kreisrunde Profile aus statischen und konstruktiven Gründen wenig effektiv als Biegeträger (beispielsweise bei einer Brücke) einsetzen lassen. Die Träger wurden deshalb als Rechteckquerschnitt (Vollholz oder Kastenprofil) ausgeführt. Die Kastenprofile wurden ähnlich den Rohrprofilen ebenfalls mit Textilien (im konkreten Fall mittels einer CFK-Wicklung) verstärkt.

2.8.2.1 Knick- und Biegeversuche an unverstärkten und verstärkten Formholzrohren (AP 4.1)

Beteiligt: ISH

Laufzeit: 29.10.2007 bis 20.11.2009

Sowohl die Druckversuche (Knickversuche) als auch die Biegeversuche wurden im Otto-Mohr-Labor der TU-Dresden durchgeführt. Die Verformungen in axialer und radialer Richtung wurden mittels induktiver Wegaufnehmer, Dehnmessstreifen und optischer Messverfahren (Kamerasystem der Firma LIMESS) erfasst.

Das Versuchsprogramm im ersten Teil bestand aus insgesamt 109 Probekörpern gleichen Querschnitts und unterschiedlicher Schlankheitsgrade, welche axial oder exzentrisch auf Druck beansprucht wurden. Zu Referenzzwecken wurden 23 unbewehrte Rohrprofile geprüft. Im Laufe der Versuche hat sich gezeigt, dass die Prüfung vergleichsweise kurzer Segmente genügt, um Rand- bzw. Einspanneffekten ausschließen zu können. Deshalb wurden neben den bauteilnahen Probenabmessungen (Länge > 2m) auch Rohre der Länge 0,8 m untersucht. Schwerpunkt der Untersuchungen war dabei die Bestimmung des Einflusses von stofflichen und geometrischen Imperfektionen.

Des Weiteren wurden eine Reihe von Biege- und Torsionsversuchen an kohlefaserverstärkten Formholz- und Hohlkastenprofilen durchgeführt.

2.8.2.2 Untersuchung textiler Bewehrungen von Verbindungspunkten im Pressholz (AP 4.2)

Beteiligt: ISH

Laufzeit: 03.09.2007 bis 02.11.2009

Zugversuche an lokal verstärkten Gelenkbolzenverbindungen

Thema des Arbeitspaketes war die Entwicklung und Dimensionierung von Gelenkbolzenverbindungen mit verstärkten Anschlussbereichen. Ziel der Untersuchungen war, die Traglast und die Steifigkeit von Gelenkbolzenverbindungen mit Bolzendurchmessern von bis zu 50 mm durch lokale Verstärkung, z. B. mittels faserverstärkter Kunststoffe, auf das Niveau des ungestörten Holzbauteils anzuheben. Untersucht wurde der Wirkungsgrad verschiedener Verstärkungsmaterialien und Applikationstechniken. Neben handelsüblichen Textilien und Halbzeugen wurden vom ITM gefertigte, ringförmige Gestricke (AP 3.2) verwendet.

Versuche an Trägern mit Gelenkbolzenverbindungen

Um die Steifigkeit und Traglast nachgiebig verbundener Biegeträger zu erhöhen, wurden verschiedene Verstärkungsmaßen der Anschlussbereiche und Querschnitte entwickelt. Gegenstand der Untersuchungen ist eine Gitterrostkonstruktion aus kreuzenden Brettlamellen, welche im Rahmen des 3. Pilotprojekts „Hess-Innenhofüberdachung“ in Absprache mit dem IaFB, Hess und dem ISH entwickelt wurde.

Um den Wirkungsgrad der Verstärkungen zu bestimmen, wurde eine Reihe von Traglastversuchen an 2- und 3-lamelligen Biegeträgern durchgeführt. Da die Tragfähigkeit der nachgiebig verbundenen Träger maßgeblich von der Steifigkeit des Verbindens abhängt, wurden Abscherversuche an 3- und 5-teiligen Druckscherproben durchgeführt. Es wurden unverstärkte Proben mit Bolzenverbindungen, KHP-verstärkte Versuchskörper mit Bolzenverbindung, unverstärkte Proben mit gekreuzt eingedrehten Schrauben und KHP-verstärkte Proben mit Schrägverschraubung untersucht.

2.8.2.3 Untersuchungen zur Tragfähigkeit von Rohrverbindungen und Anschlüssen (AP 4.3)

Beteiligt: ISH

Laufzeit: 25.08.2008 bis 20.01.2010

Untersucht wurden geleimte Rohr-Rohr- und Rohr-Knoten-Verbindungen als auch Rohr-Knoten Verbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln. Bei den geleimten Verbindungen wurden zwei verschiedene Stoßvarianten untersucht und von Hess gefertigt: die kreisrunde Schäftung und die Generalkeilzinkverbindung.

Um ein Ausweichen in radialer Richtung zu verhindern, wurden Versuche an Rohrsegmenten mit einbetonierten (eingefassten) Randbereichen durchgeführt, so dass die reelle Traglast der Verbundrohe bestimmt werden konnte. Der Vorteil ist, dass die axialen Spannungen gleichmäßig in den Verguss eingeleitet und so Fertigungsungenauigkeiten ausgeglichen werden.

2.8.2.4 Verbindungen von Rohren mit massiven Knoten zu Tragwerksteilen (AP 4.4)

Beteiligt: ISH, IaFB

Auf die Prüfung ganzer Bauteile wurde verzichtet, da nicht die Knoten, sondern der Anschluss der Knoten an die Profile das schwächste Glied der Kette darstellt. Somit sind alle für den Entwurf und die Bemessung von Tragwerken relevanten Bereiche bereits in AP 4.1 und 4.3 untersucht und geprüft worden.

2.8.2.5 Herstellung von Profilquerschnitten mittels alternativer Verfahren (AP 4.5)

Beteiligt: ISH

Laufzeit: 02.07.2007 bis 31.12.2007

Parallel zu den Formholzprofilen wurden Rohre im Alternativverfahren durch Verleimung von trapezförmigen Holzsegmenten mit Nut und Feder hergestellt und geprüft. Die Verstärkung mit textiler Bewehrung kann auf gleiche Art hergestellt werden, wie dies bei den Formholzprofilen erfolgt ist.

Der im Alternativverfahren hergestellte konische Rohrmast der Windkraftanlage wurde von Hess nach Vorgaben vom ISH gefertigt. Dazu wurden aus einer BSH-Platte zwölf konisch zulaufende, trapezförmige Segmente zu einem polygonförmigen Profil verleimt und anschließend mit einem Glasfaser-Polyesterharz-Verbund wetterseitig armiert.

2.8.2.6 Verstärkung von Brettschichtholzträgern (AP 4.6)

Beteiligt: ISH

Laufzeit: 01.02.2007 bis 26.06.2009

Für die Realisierung des 1. Pilotprojektes („Fußgängerbrücken“), einschl. Genehmigung der Elemente, wurden folgende Untersuchungen notwendig:

- Biegeprüfungen an KHP-verstärkten BSH-Trägern
- Biegeprüfungen an TMT-Hybridbohlen

Untersucht wurde der Verstärkungseffekt von verdichtetem Holz als Biegedruck- und Biegezugbewehrung. Zur Bestimmung der Biegesteifigkeit und der Biegefestigkeit von KHP-verstärkten Brettschichtholzträgern wurden 4-Punkt-Biegeprüfungen durchgeführt.

Die geringere Biegefestigkeit als auch das spröde Materialverhalten von TMT lassen den Einsatz in tragenden Bauteilen derzeit nicht zu. Deshalb soll eine Hybridbohle bestehend aus einer TMT-Druckzone (Nutzschicht) und einer Fichten- bzw. Lärchenbohle (Biegeträger) zum Einsatz kommen.

2.8.2.7 Sensorische Verstärkungsfasern (AP 4.7)

Beteiligt: ISH, ITM

Laufzeit: 01.10.2007 bis 31.12.2009

Aufgrund gravierender Schadensfälle an Holzbaukonstruktionen (z. B. Einsturz der Eislaufhalle in Bad Reichenhall) ist das Thema Bauwerks-Monitoring aktueller denn je. Da sich Kohlenstofffasern auch zu sensorischen Zwecken nutzen lassen, wurde geprüft, inwiefern Verstärkungsfasern gleichzeitig zur Messung von Verformungen im Holz genutzt werden können. Ziel der Bauteilüberwachung ist die Bestimmung der Dehnungen und Detektierung von Rissen in Verbindungen und Anschlussbereichen sowie in Biegeträgern aus Holz. Werden Risse oder aber kritische Verformungen frühzeitig erkannt, können entsprechende Gegenmaßnahmen ergriffen und damit die Sicherheit der Tragwerke erhöht werden.

Innerhalb dieses Projektes erfolgte durch das IaFB eine Harmonisierung der Anforderungen der widerstandsbasierten Messmethodik der Kohlenstofffasermessbrücke des ITM der TU Dresden (AP 4.7) und der faseroptischen Sensorik des Aufstockungsantrages (AP 10) mit den technischen und technologischen Randbedingungen der Planung des Bauwerks und der Herstellung der Brückenträger sowie den Anforderungen hinsichtlich der Durchführung der Messungen an den Probekörpern und den eingesetzten Brückenträgern.

2.9 Entwicklung und Anwendung werkstoffmechanischer Berechnungs- und Simulationsmethoden (AP 5)

2.9.1 Verantwortliche und Beteiligte

Verantwortlich: ILK

Beteiligt: ILK, ISH, IaFB

Laufzeit: 01.03.2007 bis 01.06.2010

2.9.2 Inhalte

Entgegen dem Antrag konnte der wissenschaftliche Mitarbeiter des ILK erst 2007 mit der wissenschaftlichen Bearbeitung des Projektes beginnen. Der dafür vorgesehene Mitarbeiter war noch bis Ende 2006 an ein anderes Projekt gebunden und konnte kurzfristig nicht umgesetzt werden.

Untersucht wurde das Verbundverhalten von Holz und faserverstärkten Kunststoffen (FVK) hinsichtlich der Spannungsverteilung infolge Feuchte- und Temperaturänderungen sowie der daraus resultierenden interlaminaren Schubspannungen. Zu diesen Themen wurden analytische und numerische Berechnungsroutinen erstellt, die Spannungs- und Stabilitätsprobleme (lokales und globales Beulen) der Strukturen berücksichtigen bzw. abbilden können. Vergleiche von analytischen und numerischen Berechnungsergebnissen mit den Versuchsergebnissen zeigen gute Übereinstimmung. Für einen weitergehenden Abgleich ist jedoch eine Versuchsdatenbasis größeren Umfangs notwendig.

2.9.2.1 Entwicklung eines werkstoffgerechten Modells für Holz-Textil-Verbunde (AP 5.1)

Beteiligt: ILK

Laufzeit: 01.03.2007 bis 28.09.2007

Im Rahmen dieses Projektes wurden anwendungsorientierte Dimensionierungskonzepte zur Auslegung von textilbewehrten Hochleistungsholztragwerken entwickelt und verifiziert, um die für derartige Holz-Textil-Verbundstrukturen kritischen Beanspruchungszustände vorauszuberechnen und mit werkstoffgerechten realistischen Versagenshypothesen zu bewerten.

Für die analytische Untersuchung des Anisotropieverhaltens der hybriden mehrschichtigen textilbewehrten Holzstruktur wurde als makroskopisch verschmierte Simulationsmethode die erweiterte Laminattheorie eingesetzt. Dazu wurde der Holzwerkstoff als homogenes Kontinuum mit anisotropen Eigenschaften betrachtet. Die Berücksichtigung der Bewehrung (z.B. Textilbewehrung oder KHP-Verstärkung) erfolgt mit der Erweiterung der Laminattheorie auf derartige Hybridverbunde. Darauf aufbauend wurde für den mehrschichtigen Holz-Hybrid-Verbund ein rechnerischer Festigkeitsnachweis auf Basis neuartiger realistischer bruchebenenbezogener Festigkeitskriterien erarbeitet. Dazu wurde das physikalisch begründete versagensmodebezogene Festigkeitskriterium von Cuntze erweitert und verifiziert. Die Formulierung des Versagenskriteriums für unterschiedliche voneinander unabhängige physikalisch begründete Bruchmoden ermöglicht eine anschauliche und vereinfachte Handhabung, was eine effektive Modifizierung der Versagensmodelle für die hier untersuchten textilverstärkten Holzverbunde ermöglicht. Des Weiteren wurden mehrere Degradationsmodelle zur Wiedergabe des komplexen Schädigungsverhaltens derartiger verstärkter Verbundstrukturen erarbeitet und vorgestellt.

Durch die Interaktion dieser Modelle (das Strukturgesetz, zur Beschreibung des charakteristischen Spannungs-Dehnungs-Zusammenhangs; das Versagenskriterium, zur Definition der allgemeinen Bruchbedingungen; sowie das Degradationsgesetz, zur Charakterisierung des Materialverhaltens nach dem Überschreiten der jeweiligen Bruchbedingung) lässt sich das prinzipielle Materialverhalten derartiger Holz-Hybrid-Verbunde beschreiben und berechnen. Die analytische Formulierung der Modellansätze ermöglicht eine schnelle Variation der Geometrie-, Material-, Belastungs-, und Schichtparameter zur iterativen Optimierung des mehrschichtigen

Verbundaufbaus. Die Verifizierung der erarbeiteten Modelle wurde an innerhalb des Projektes untersuchten Probekörpern durchgeführt.

2.9.2.2 Simulation des Strukturverhaltens von Holz-Textil-Verbundkomponenten, verifizierende Untersuchungen (AP 5.2)

Beteiligt: ILK, ISH

Laufzeit: 01.10.2007 bis 28.10.2009

ILK:

Zur Umsetzung der neuartigen Verbundbauweise von faserverstärkten Textilien und Formpressholz in die Baupraxis musste die prinzipielle Berechenbarkeit nachgewiesen werden. Dazu wurde das erarbeitete Berechnungsmodell an praxisgerechten Beispielen eingesetzt und verifiziert. Die werkstoffgerechten Material-, Versagens- und Degradationsmodelle wurden dafür in einem einfachen Excel-Berechnungstool umgesetzt. In Treffen und Diskussionen mit dem IaFB wurden praxisnahe und werkstoffgerechte Materialeigenschaften (Festigkeiten, Spannungs-Dehnungsbeziehungen etc.) definiert sowie Ergebnisse des entwickelten ILK-Berechnungsmodells diskutiert und mit dem IaFB-Modell abgeglichen.

In Absprache mit den Projektpartnern wurde die Simulation des charakteristischen Verbundstrukturverhaltens an Probekörpern aus den Forschungsschwerpunkten der beteiligten Projektpartner (Biegebalken aus KHP-verstärktem Brettschichtholz bzw. textilverstärkte Formholzröhre) durchgeführt. Die Ergebnisse der Simulation zeigten dabei gute Übereinstimmungen mit den Versuchswerten. Es konnte gezeigt werden, dass auf Basis des erarbeiteten Modells für derartige Holz-Hybrid-Verbunde sowohl das mehrschichtige lineare Werkstoffverhalten als auch die komplexe Versagens- und Schädigungscharakteristik erfasst werden kann.

ISH:

Untersucht wurde das Verbundverhalten von Holz und faserverstärkten Kunststoffen (FVK) hinsichtlich der Spannungsverteilung infolge Feuchte- und Temperaturänderungen sowie der daraus resultierenden interlaminaren Schubspannungen. Zu diesen Themen wurden analytische und numerische Berechnungsroutinen erstellt, die Spannungs- und Stabilitätsprobleme (lokales und globales Beulen) der Strukturen berücksichtigen bzw. abbilden können.

2.9.2.3 Auslegung von Holz-Textil-Tragstrukturen mit Verbindungselementen (AP 5.3)

Beteiligt: ILK, ISH

Laufzeit: 01.02.2008 bis 23.03.2010

ILK:

Aufbauend auf dem erarbeiteten mehrschichtigen Strukturgesetz wurde ein analytisches Modell zur Kerbspannungsanalyse mit überlagerter Bolzenbelastung für derartige Holz-Hybrid-Verbunde konzipiert. Zur Kerbspannungsanalyse der betrachteten Verbindungsbereiche und Ausschnitte bei mehrschichtigen bewehrten Holztragstrukturen bietet sich das Verfahren der konformen Abbildungen in Verbindung mit komplexwertigen Verschiebungsfunktionen an. Derartige analytisch gewonnene Lösungsausdrücke erlauben eine schnelle Variation von Einflussparametern wie Textilanordnung, Belastungsart und -richtung sowie Kerbgeometrie.

ISH:

Zur Auslegung von Rohrprofilen mit und ohne FVK-Wicklung wurden analytische und numerische Berechnungsroutinen erstellt. Die Modelle dienen der Beurteilung von druck- und biegebeanspruchten Bauteilen unter Berücksichtigung verschiedener Querschnittsgeometrien und Beschichtungen (Faserart, Faserorientierung, Schichtdicke).

2.9.2.4 Zusammenführung der Ergebnisse zu baupraktischen Richtlinien und Bemessungsvorschriften (AP 5.4)

Beteiligt: IaFB

Laufzeit: 04.01.2010 bis 01.06.2010

Die Forschungsergebnisse wurden kontinuierlich erfasst und für die baupraktische Anwendung durch Tragwerksplaner und Architekten aufbereitet. Dazu wurden praxisorientierte Rechenvorschriften und Anwendungsrichtlinien erstellt sowie Materialmerkblätter und Praxisempfehlungen erarbeitet.

2.10 Konstruktionsentwicklung (AP 6)

2.10.1 Verantwortliche und Beteiligte

Verantwortlich: IaFB

Beteiligt: IaFB

Laufzeit: 01.08.2006 bis 27.07.2010

2.10.2 Inhalte

2.10.2.1 Zusammenstellen des „state of the art“ im Ingenieurholzbau (AP 6.1)

Laufzeit: 01.08.2006 bis 31.10.2006

Als Grundlage für die Entwicklung neuer leistungsfähiger Holzkonstruktionen wurden der „state of the art“ im Ingenieurholzbau zusammengestellt und die vorhandenen Defizite aus tragwerksplanerischer Sicht detailliert analysiert. Der Bericht gibt den Kenntnisstand zu Projektbeginn wieder und ist daher in Auszügen in Kap. 1.4 enthalten. Ausgegangen vom Ist-Zustand erfolgte dann die Überführung der Forschungsergebnisse in praktikable Tragwerkskonstruktionen. Nach etwa zwei Jahren wurde zusätzlich ein State-of-the-art der Verbindungen erstellt, welcher neben dem Kenntnisstand zu Projektbeginn auch die in den ersten zwei Jahren diesbezüglich gewonnenen Erkenntnisse enthält. Dieser ist in Auszügen in Kap. 3.7.2 dargestellt.

2.10.2.2 Ausarbeitung von Tragwerkslösungen (AP 6.2)

Laufzeit: 01.02.2008 bis 02.04.2010

Im Rahmen von Variantenuntersuchungen und Entwurfsstudien wurden neue Konstruktionsteile im Ingenieurholzbau im Hinblick auf Verbesserung vor allem der Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit entwickelt, welche potentiell die beste Ausnutzung aller Vorteile von Hochleistungshölzern bieten. Hauptziele waren dabei:

- eine effektive Gestaltung von Verbindungsknoten
- die Reduktion des Stahlanteils in Holzkonstruktionen
- ein beanspruchungsgerechtes Entwerfen, Konstruieren und Bemessen von Holzkonstruktionen

Die Vielzahl der Vorschläge der Tragwerkslösungen wurde systematisiert und die jeweiligen Anforderungen beschrieben. Daraus wurde für die Projektpartner ein Bauteilkatalog mit typischen Konstruktionselementen und den zugehörigen, üblicherweise zu erwartenden Schnittkraftzuständen erstellt. Im Zusammenhang mit der Akquisition von Pilotprojekten wurden dann die Vorzugslösungen vertiefend bearbeitet.

2.10.2.3 Zusammenstellung praxisorientierter Bemessungsverfahren und Anwendungsrichtlinien (AP 6.3)

Laufzeit: 26.10.2009 bis 30.08.2010

Aus den Ergebnissen der Konstruktionsuntersuchungen wurden kontinuierlich konstruktionsbezogene Bemessungsverfahren und Anwendungsrichtlinien für Tragwerksplaner und Architekten entwickelt. Weiterhin erfolgte die Erstellung baupraktischer Anwendungsrichtlinien für Hochleistungsholz.

Es wurden Merkblätter, Praxisempfehlungen sowie Kurzdokumentationen erstellt, die dem späteren Anwender die neuen Konstruktionen und Materialien vorstellen, nötige Kennwerte sowie Verarbeitungshinweise geben und Anwendungsbeispiele zeigen. Zudem werden Anwendungsempfehlungen ausgesprochen und Literaturquellen genannt. Grundsätzlich sind die Merkblätter in die Themenkomplexe „Material“, die Praxisempfehlungen in „Bemessungsverfahren“, „Bemessungsvorschläge“ sowie „Konstruktion und Technologie“ unterteilt, die Kurzdokumentationen informieren über die Pilotprojekte.

Die Merkblätter, Praxisempfehlungen und Kurzdokumentationen sind im Anhang dieses Berichtes enthalten.

2.11 Pilotprojekte (AP 7)

2.11.1 Verantwortliche und Beteiligte

Verantwortlich: IaFB

Beteiligt: IaFB, ISH, Hess

Laufzeit: 01.08.2006 bis 25.08.2010

2.11.2 Inhalte

2.11.2.1 Akquise, Planung der Pilotprojekte, Klärung von Genehmigungsfragen (AP 7.1)

Laufzeit: 01.08.2006 bis 20.10.2009

Der frühe Beginn dieses Arbeitspaketes resultiert aus den erforderlichen Vorlaufzeiten für die Akquisition und Planung der einzelnen Projekte. Gegebenenfalls auftretende Probleme sollten frühzeitig erkannt und gelöst werden können.

Potentiellen Bauherren wurden technische Unterlagen, Kostenschätzungen und Dokumente zur Umweltverträglichkeit sowie Ökobilanz der neuartigen Baustoffe zugearbeitet. Parallel zur Akquisetätigkeit wurden technische und betriebswirtschaftliche Fragestellungen der Bauherren speziell für das jeweils anvisierte Projekt bearbeitet.

Wesentliche Aufgabe im Zuge der Umsetzung von Pilotprojekten war die Klärung bauaufsichtlicher Genehmigungsfragen sowie die Konzipierung der für die Erlangung der Genehmigung erforderlichen Versuchsreihen. So wurden beispielsweise mit der Genehmigungsbehörde in Berlin relevante Genehmigungsfragen allgemein und hinsichtlich konkreter Pilotprojekte abgestimmt. Darüber hinaus konnten durch eine Sichtung der gesetzlichen Vorschriften, allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassungen (abZ) und der Literatur zu Bauvorhaben mit Zulassungen im Einzelfall (ZiE) mögliche Wege zur Ausführung von Bauvorhaben mit nicht gesetzlich geregelten Bauprodukten und Bauweisen aufgezeigt werden.

Aus verschiedenen Gründen haben sich nicht alle potentiellen Bauherren für die Umsetzung entschieden, so dass während der Projektlaufzeit insgesamt drei Pilotprojekte detailliert bearbeitet und geplant wurden.

- Pilotprojekt Fußgängerbrücken (Schwerpunkt Hybridbauteile): Für eine Fuß- und Radwegbrücke in Berlin wurden BSH-KHP-Hybridträger und TMT-Lärche-Hybridbohlen geplant (vgl. Kap. 3.8.2).

- Pilotprojekt Vertikalachswindkraftanlage (Schwerpunkt: Hohlprofil mit textiler Verstärkung): Zu konzipieren war der Holzmast einer Windkraftanlage. Neben statischen Gesichtspunkten stand hier vor allem das dynamische Verhalten im Vordergrund (vgl. Kap. 3.8.3).
- Pilotprojekt Hess-Innenhofüberdachung (Schwerpunkt Anschlüsse): Für eine Innenhofüberdachung wurde eine auf vier Streben und einer Stütze punktförmig gelagerte Holzstapelkonstruktion geplant (vgl. Kap. 3.8.4).

2.11.2.2 Versuchskörper für Pilotprojekte (AP 7.2)

Laufzeit: 16.01.2007 bis 16.11.2009

IaFB:

Gemeinsam mit der TU Dresden wurden Bauteilversuche an kompletten Traggliedern und Versuche zur Bestimmung von elementaren (Material)kennwerten an Kleinproben geplant und durchgeführt. Diese dienten einerseits der Verifizierung der Bemessung des jeweiligen Pilotprojektes und andererseits als Eingangsgrößen für die ausgearbeiteten Bemessungsmodelle.

Nachdem aus den Versuchswerten vom Projektpartner TU Dresden unter Beachtung der mitgeltenden Prüfnormen und den Vorgaben des Prüfingenieurs charakteristische Werte und nach Einbettung in das Sicherheitskonzept der aktuellen Normung Bemessungswerte ermittelt wurden, erfolgte die Auslegung der Bauteile.

Hess:

Zu den Pilotprojekten Fußgängerbrücken, Windkraftanlage und Überdachung „Hess-Schirm“ wurden Versuchskörper hergestellt. Dies war z.B. aufgrund der sehr unterschiedlichen Bauteilformen (Röhre, Vollwandträger und aufgelöster Träger) zur Abschätzung notwendig.

ISH:

2.11.2.2.1. Pilotprojekt Fußgängerbrücken

Eine durchgeführte Variantenuntersuchung zur Verstärkung von Brettschichtholzträgern hat die Potentiale der verschiedenen Verstärkungstechnologien aufgezeigt. Demnach lassen sich die mechanischen und physikalischen Eigenschaften hölzerner Bauelemente durch deren Kombination mit vergüteten Hölzern und textilen Bewehrungen wesentlich verbessern. Der konstruktiv richtige und effiziente Einsatz der Verstärkungsmaterialien kann dabei den i. d. R. höheren Material- und Herstellungsaufwand ausgleichen.

Für die Genehmigungsfähigkeit der Konstruktionselemente und somit zur Realisierung des Tragwerkes waren folgende zusätzliche Untersuchungen erforderlich:

- Druck- und Biegeprüfungen zur Ermittlung von Materialparametern
- Biegeprüfungen an KHP-verstärkten Brettschichtholzträgern (siehe AP 4.6)
- Biegeprüfungen an TMT-Fichte-Hybridbohlen (siehe AP 4.6)
- Versuche zur Verbundqualität bei Spannungen infolge unterschiedlicher Quellmaße
- Kriechversuche am KHP (siehe AP 1.9)

Ein Hauptträger (KHP-BSH-Verbund) der Brücke wurde im Vier-Punkt-Biegeversuch geprüft.

2.11.2.2.2. Pilotprojekt Vertikalachswindkraftanlage

In diesem Pilotprojekt wurde untersucht, ob der Einsatz eines Holzrohrs mit textiler Bewehrung zu einem günstigen Trag- bzw. Schwingungsverhalten von Vertikalachswindkraftanlagen führt. Der vordem verwendete Stahlmast zeigt starke Schwingungen im Betriebszustand. Deshalb sollte dieser durch einen Holzmast ersetzt werden.

Holzmasten besitzen folgende Vorteile:

- wegen der höheren Materialdämpfung sind geringere Schwingungsamplituden im Resonanzfall zu erwarten
- das geringe Gewicht bei gleicher oder höherer Steifigkeit führt zu höheren Eigenfrequenzen, diese liegen über der kritischen Frequenz des Rotors, daher ist kein Resonanzfall zu erwarten
- die Rohre lassen sich mit geringem Mehraufwand konisch fertigen
- Holzrohre sind kostengünstiger, da auch Verbindungen wegfallen
- ökologischer Aspekt – Verwendung eines nachwachsenden Rohstoffes

Die Nachteile der Holzlösung sind vorausichtlich die geringe Dauerhaftigkeit und der schwierige Anschlussbereich am Fußpunkt. Deshalb wird auf eine textile Bewehrung (zumindest an der Einspannung) nicht verzichtet werden können. Eine Vorbemessung (statisch und dynamisch) wurde vom ISH durchgeführt.

Die im Mai 2008 errichtete Windkraftanlage liefert wichtige Daten bzgl. der Dauerhaftigkeit des Holz-Textil-Verbundes in der Freibewitterung.

2.11.2.2.3. Pilotprojekt Hess-Innenhofüberdachung

Für dieses Pilotprojekt wurden verschiedene Knotenlösungen von IaFB, Hess und ISH erarbeitet und vorbemessen. Untersuchungen des nachgiebigen Verbunds des Trägerrostes inkl. der mit GFK-verstärkten Anschlussbereiche wurden in AP 4.2 beschrieben.

2.11.2.3 Begleitung und Bauüberwachung von Pilotprojekten (AP 7.3)

Laufzeit: 01.02.2007 bis 31.08.2010

Die Pilotprojekte wurden vom IaFB in unterschiedlichen Arbeitsphasen begleitet. Zum einen fanden eingehende statische Untersuchungen und teilweise sehr umfangreiche material- und konstruktionsspezifische Modellierungen statt. Zum anderen wurden abstimmende Gespräche zwischen Bauherren, Genehmigungsbehörden und ausführenden Firmen geführt.

Im Rahmen des ersten Pilotprojektes erfolgte die inhaltliche Abstimmung mit dem öffentlichen Bauherren sowie der Genehmigungsbehörde und dem eingebundenen Prüfingenieur. Eine Koordinierung war hierbei vor allem hinsichtlich unterschiedlicher Forderungen seitens des Bauherrn, der Forschungspartner und des Ausführungsunternehmens nötig.

Darüber hinaus mussten für die speziellen eingesetzten Materialien (alpine Lärche, KHP, TMT) besondere Übereinstimmungsnachweise bzw. explizite Prüfungen durchgeführt werden, um zu belegen, dass das Produkt im Allgemeinen und die gelieferte Charge im Besonderen tatsächlich auch die angesetzten Eigenschaften aufweist.

2.12 Entscheidungsorientierte Umweltleistungsmessung – Ökobilanzierung (AP 8)

2.12.1 Verantwortliche und Beteiligte

Verantwortlich: BU

Beteiligt: BU, ISH

Laufzeit: 01.08.2007 bis 31.03.2010

2.12.2 Inhalte

Inhalt des Arbeitspaketes 8 war die ökologische Bewertung mit Hilfe der Ökobilanzierung nach genormtem Vorgehen. Hierzu ist nach Norm [71] ein Vorgehen in vier Schritten vorgesehen, die in die vier Teilarbeitspakete der Projektplanung übersetzt wurden:

- Versuchsauswertung und Ermittlung der Zusammenhänge (AP 8.1)
- Ermittlung einer Sachbilanz (Input-Output-Bilanz) (AP 8.2)
- Durchführung einer Wirkungsabschätzung (AP 8.3)
- Entscheidungsorientierter Alternativenvergleich und Identifizierung von Leistungstreibern (AP 8.4)

Zur Beschreibung der Inhalte des Projektes werden die vier Teilarbeitspakete an dieser Stelle zusammengefasst. Im weiteren Verlauf des Berichts sind für die zentralen Untersuchungsobjekte detaillierte Betrachtungen der einzelnen Arbeitspakete vorgenommen worden.

In Zusammenarbeit mit allen Projektpartnern wurden, wie es die Normen zur Ökobilanzierung vorsehen, nach den Ermittlungen der grundsätzlichen Zusammenhänge der Prozessabläufe auch die Erfassung von Stoff- und Energieflüssen ermittelt [71][72]. Die Erstellung der Sachbilanz gilt im Allgemeinen als sehr arbeitsintensiver Schritt der Ökobilanz. So müssen die Daten für die Untersuchungsobjekte detailgenau erhoben werden. Die einzelnen erhobenen Posten der Sachbilanz wiederum wurden durch die Suche nach entsprechenden Sachbilanzdaten, also Daten über die Herstellung der verwendeten Stoffe, ergänzt. So wurde die Phase der Wirkungsabschätzung vorbereitet. Dazu war in Einvernehmen mit den Projektpartnern ein Wirkungsabschätzungsmodell zu wählen. Hier wurde der Eco-indicator99 als anfängliches Modell gewählt, da es mit seiner einfachen (eindimensionalen) Darstellung die Ergebnisse schnell mit einer einzigen Zahl ergreifbar macht. Erste Abschätzungen der Umwelteinwirkungen der Formholzprofile konnten so bereits recht frühzeitig erstellt und Vergleiche mit anderen Konstruktionslösungen (Stahlprofil) durchgeführt werden. Im weiteren Verlauf des Projekts rückten mehr die Pilotprojekte der Brücken in den Fokus der Untersuchungen und, im Hinblick auf die Literatur und die zukünftige Publikation der Ergebnisse, auch mehrdimensionale Wirkungsabschätzungsmethoden, hier insbesondere der Ressourcenverbrauch (KEA) [289] und die CML-Methodik [290]. Die Anschaffung einer speziellen Software (SimaPro) erwies sich gerade für den Schritt der Wirkungsabschätzung als unumgänglich, da der iterative Charakter der Ökobilanzierung ständig wiederkehrende Erneuerungen der Ergebnisse erforderlich macht und dementsprechend auch ständig neue Berechnungen erforderlich macht. Die Diskussion der Ergebnisse wurde zum Ende des Projekts durch die externe Begutachtung (Peer Review) abgerundet. Dieser durch die Norm geforderte Bestandteil einer vergleichenden Ökobilanzierung brachte noch einmal erheblichen Bearbeitungsaufwand mit sich. Bei der Kommunikation der Ergebnisse nach außen kann das Peer Review jedoch auch als Nachweis für eine neutrale und unvoreingenommene Bewertung der Umweltauswirkungen der Untersuchungsobjekte dienen.

2.13 Verwertung und Verbreitung der Ergebnisse (AP 9)

2.13.1 Verantwortliche und Beteiligte

Verantwortlich: IaFB, GWT

Beteiligt: IaFB, ISH, Hess, ITB, ILK, BU, GWT

Laufzeit: 01.08.2006 bis 31.08.2010

2.13.2 Inhalte

IaFB:

Die umfassende Verwertung und Verbreitung der Projektergebnisse und damit ihre schnelle Einführung in die Baupraxis war ein zentrales Anliegen des Vorhabens. Die Forschungs- und Entwicklungsergebnisse des Projektes sollen einem breiten Fachpublikum sowie auch der Holz- und Bauwirtschaft zur Verfügung gestellt werden.

Projektbegleitend wurde in einigen Fachzeitschriften veröffentlicht. Um die technologischen Möglichkeiten von Hochleistungshölzern aufzuzeigen, wurde das Projekt und der Ergebnisfortschritt regelmäßig auf den wichtigsten Fach- und Branchenmessen vorgestellt.

Zur Unterstützung der Umsetzung der Forschungs- und Entwicklungsergebnisse wurden in der letzten Phase des Projekts Arbeitshilfen und Anwendungsrichtlinien für Bauingenieure, Architekten und andere Interessierte entwickelt. Diese dienen einerseits der Vorstellung der neuartigen Materialien und Konstruktionen und bieten andererseits Anwendungsempfehlungen und Bemessungsvorschläge, so dass sowohl die Bekanntheit als auch die Einsetzbarkeit gefördert wird.

Genaueres zur Verwertung und Verbreitung der Ergebnisse ist in Kapitel 4 zu finden.

GWT:

Das Projekt strebte eine enge Verflechtung von Verbundprojektmanagement und Transfer der Ergebnisse in die Wirtschaft an. Zur Verdeutlichung des Ergebnisfortschritts, zur Marktarbeit und zur Wissensvermittlung waren zielführende Maßnahmenkomplexe zu konzipieren, organisieren und mit den Projektpartnern zu realisieren.

2.14 Faseroptische Sensorik (AP 10)

2.14.1 Verantwortliche und Beteiligte

Verantwortlich: IaFB

Beteiligt: IaFB, BAM

2.14.2 Inhalte

Im Zusammenhang mit den Anforderungen der Genehmigungsbehörden für die Hochleistungsholzbrücke im Pilotprojekt „Fußgängerbrücken“ an die Qualitätssicherung der Ausführung der Bauwerke und die Überwachung für einen Teil ihrer Nutzungsdauer wurde die Notwendigkeit einer experimentellen Begleitung der neuartigen Bauweise erkannt. Ein zerstörungsfreies Tragwerksmonitoring, um die bei der Planung vorgesehene Art der Beanspruchung und das Verhalten verfolgen zu können, erschien dafür am geeignetsten. Deshalb wurde im Rahmen eines Aufstockungsantrages das Arbeitspaket 10 „Faseroptische Sensorik“ hinzugefügt. Die Bearbeitung läuft noch bis Juni 2012, so dass es erst nach Abschluss des Vorhabens und entsprechender dann vorliegender Ergebnisse einen getrennten Bericht für dieses Arbeitspaket geben wird. Die anderen Arbeitspakete werden davon nicht tangiert.

3 Durchführung der Forschungsarbeiten und erzielte Ergebnisse

3.1 Allgemeines

Im Anschluss an die kurze Darstellung der Arbeitspakete in Kap. 2 folgen an dieser Stelle die ausführlichen Berichte. Die verantwortlichen Autoren sind hier angegeben, so dass sich bei eventuellen Fragen an diese gewandt werden kann. Bei mehreren Autoren sind diese in alphabetischer Reihenfolge genannt. Ausnahmen bilden lediglich hinten angestellte Autoren von betreuten Diplomarbeiten o.ä.. Kontaktdaten können Kap. 1.3 entnommen werden.

3.2 Materialien und Querschnittsbildung

Kurzreferat vom Verantwortlichen (ISH)

Festigkeit und Steifigkeit spielen eine herausragende Rolle bei tragenden Anwendungen. Um den Anforderungen an tragende Baustoffe gerecht zu werden, wird die Festigkeit von Holz für bautechnische Anwendungen apparativ sortiert. In der Tat zeigen Rund- und Schnittholz ungefähr einen Faktor von fünf und zwei bezüglich der Festigkeit beziehungsweise der Steifigkeit. Verglichen mit anderen Baustoffen weisen die Festigkeitsklassen von Schnitt- und Brettschichtholz ein Verhältnis von 1,7 zwischen der höchsten und der geringsten Klasse auf, mit einer Stufung von etwa 1,3. Untersuchungen zur Holzqualität belegen, dass Festigkeit und Steifigkeit längs zur Faser entscheidend von der Dichte abhängen. Die Unterschiede zwischen einzelnen Holzarten – etwa Balsa verglichen mit Tropenholz oder der reinen Zellwand – belaufen sich auf etwa eine Zehnerpotenz. Die Sortierung von Nadelholz erfolgt in einem schmalen Bereich zwischen 380 und 500 kg pro Kubikmeter. Der Vergleich von Bauholz mit faserparallelem, astfreiem Holz fördert nochmals einen Faktor zwei bis drei zutage, so dass das Festigkeitspotenzial reichlich mehr als eine Zehnerpotenz beträgt.

Es ist allgemein bekannt, dass Holz, insbesondere Laubholz, bei etwa 140 °C einer Verdichtung quer zur Faser unterzogen werden kann. So z. B. wird Kunstharzpressholz aus Furnieren für technische Anwendungen wie etwa elektrischen Anlagen oder dem Transport hergestellt. Voraussetzung hierfür ist das poröse Zellgefüge, das mit einem Druck von etwa 5 MPa zusammengepresst werden kann, nachdem das Lignin thermisch erweicht wurde. Beim Pressen erhöhen sich Festigkeit und Steifigkeit proportional zur Dichte, grob gesprochen um einen Faktor zwei bis drei für heimisches Nadelholz. Von großer Bedeutung ist die Feststellung, dass die Stauchung ohne Schädigungen der Mikrostruktur bei geeignetem Prozessregime wieder nahezu vollständig rückgängig gemacht und fixiert werden kann. Der große Porenanteil führt somit zu einer völlig neuen Betrachtungsweise des Holzes als schaumstoffartiges, zelluläres Gebilde, das zu einem sehr leicht zu verarbeitenden Material wird. Auf diese Weise erhöht sich die Bruchdehnung in Faserquerrichtung von einem auf 100 %, also um zwei Größenordnungen. Nadel- und Laubhölzer sind dafür gleichermaßen geeignet.

Ausgehend von dem Prozess des Verdichtens wurden am ISH erstmals tragende Profile aus Pressholzplatten gefertigt [262][283]. Von großer Bedeutung ist dabei die Tatsache, dass die Stauchung in einem geeigneten thermo-hygro-mechanischen Prozessregime wieder rückgängig gemacht und erneut fixiert werden kann. Wenn nötig, lassen sich die Zellen wieder vollständig auseinander falten. Der Krümmungsradius der Umformung hängt von der vorherigen Verdichtung ab. Die minimale Krümmung entspricht verfahrensbedingt in etwa der zweifachen Plattendicke. Technologisch betrachtet erfolgt damit erstmalig die Herstellung eines tragenden Querschnittes in einem thermo-hygro-mechanischen Prozess. Nach diesem Verfahren lassen sich aus massiven Pressholzplatten abwickelbare Profile formen. Nachstehende Abbildung zeigt das Prinzip der Herstellung geformter Rohrprofile.

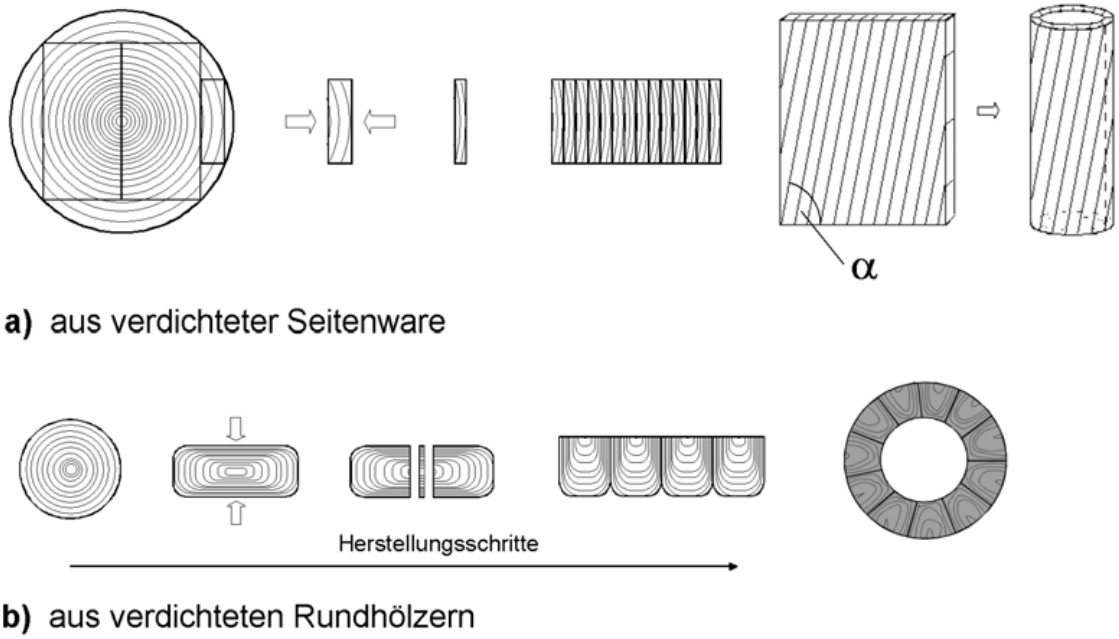


Abb. 3.1: Prozess zur Herstellung geformter Holzprofile aus Kant- und Rundholz

Konstruktiv gesehen stellen Profilquerschnitte eine Abkehr von dem im Holzbau vorherrschenden Vollquerschnitt dar. Vollquerschnitte weisen im Vergleich zu technischen Profilen aus Metallen und Kunststoffen eine geringe Materialeffizienz auf, bei der die hohen Verluste im Sägewerk und Holzleimbaubetrieb noch nicht berücksichtigt sind.

Das in diesem Forschungsvorhaben zur Herstellung der Formholzrohre benötigte Pressholz wurde von der Firma „Deutsche Holzveredelung“ in Kirchhundem verdichtet. Das verdichtete Holz wurde von Hess zu Platten verleimt und diese bei Sindelfinger Holzringe zu Rohrprofilen geformt.

Die Entwicklung faser- und textilbewehrter Formholzprofile greift die Vorstellungswelt von Ingenieuren und Architekten auf, indem sie einen effizienten Querschnitt hoher spezifischer Tragfähigkeit und Steifigkeit bereitstellt, dessen anisotrope Struktur und Dauerhaftigkeit durch die Bewehrung in weiten Grenzen maßgeschneidert werden kann.

3.2.1 Verdichten von Schnittholz und Herstellen von Pressholzplatten
Autor: Jan Fandler (Hess)

3.2.1.1.1 Herstellung Pressholzplatten

Rohrquerschnitte werden aus zuvor stabverleimten verdichteten Holzplatten umgeformt.

Die Holzplatten wurden aus einzelnen, zuvor aufgetrennten Leisten verklebt. Die wesentlichen Arbeitsschritte waren:

1. Rohholzbretter hobeln
2. Bretter auftrennen zu Leisten
3. Leisten umkanten
4. Leisten hobeln
5. Verleimen der Stäbchenplatte
6. Hobeln der Stäbchenplatte

Zur Breitenverklebung der Stäbe zu Platten wurde Resorcinleim mit fugenfüllender Eigenschaft (Klebstoff Prefere 4094 in Verbindung mit dem Härter Prefere 5827, Dynea ASA, Norwegen) verwendet.

Vorteilhaft an einer Herstellung der Platten aus einem zuvor verklebten Brettschichtholz ist die fertigungstechnisch vereinfachte Handhabung der Brettlamellen vom Hobeln über den Leimauftrag bis zur Paktierung und Verpressung. Hinzu zählen der vereinfacht kontrollierbare Leimauftrag und Pressvorgang während der Herstellung.

3.2.2 Keilzinkenverbindungen und Schäftungen verschiedener Materialien
Autor: Jan Fandler (Hess)

3.2.2.1 Test Keilzinkenverbindung und Schäftung (AP 1.2)

Die Schäftungsklebungen aus KHP (Kunstharzpressholz von der Firma Dehonit, Kirchhundem) und Fichtenholz im Biegeversuch in Anlehnung an EN 408 [65] wurden im Vergleich zur Keilzinkenverbindung nach EN 385 [62] und DIN 1052:2008-12 [1] geprüft.

Nachstehend werden die Proben beschrieben; im Anschluss hieran wird über die Versuchsdurchführung, die Versuchsergebnisse und die Bewertung dieser berichtet.

3.2.2.1.1 Beschreibung der Schäftungsproben

Die Abmessungen der Schäftungsproben betrugen Breite • Dicke • Länge = 90 mm • 26 mm • 600 mm. Die Schäftungsproben bestanden jeweils aus Fügeteilen der Holzart Fichte (Picea Abies) und dem Holzwerkstoff KHP Buche. Mittels Kombination wurden drei Konfigurationen an Proben hergestellt. Als Referenzkonfiguration wurden jeweils beide Fügeteile aus der gleichen Holzart, beziehungsweise dem gleichen Holzwerkstoff miteinander verklebt. Sortiert wurden die Fichtenholzbretter mit Hilfe der Sortiermaschine Microtec „Golden Eye 702“ in die Festigkeitsklasse C35M. In Längenmitte der Proben wurde die Schäftungsverbindung angeordnet, und deren Verlauf über die Schmalseite angeordnet (26 mm breite Seitenfläche). Die Neigung der Schäftungsklebfuge betrug 1/10, welche einem Winkel von etwa 5,71° entspricht. Hinsichtlich der Astigkeit der Fichtenholz-Fügeteile wurde darauf geachtet, dass keine Äste mit einem Astdurchmesser größer 20 mm im Schäftungsbereich zu liegen kamen.

Für die Verklebung der Fügeteile wurde der Klebstoff Prefere 4094 in Verbindung mit dem Härter Prefere 5827 der Firma Dynea ASA, Lilleström/Norwegen, verwendet.

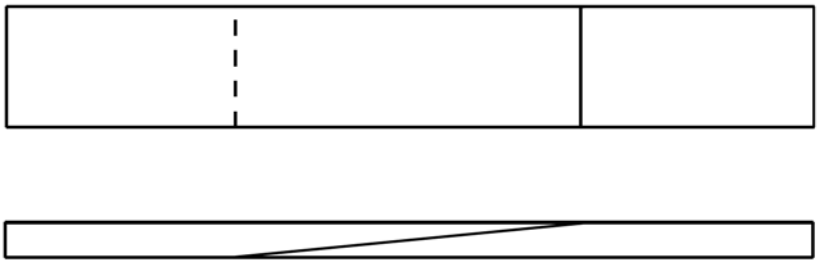


Abb. 3.2: Darstellung Schäftungsprobe

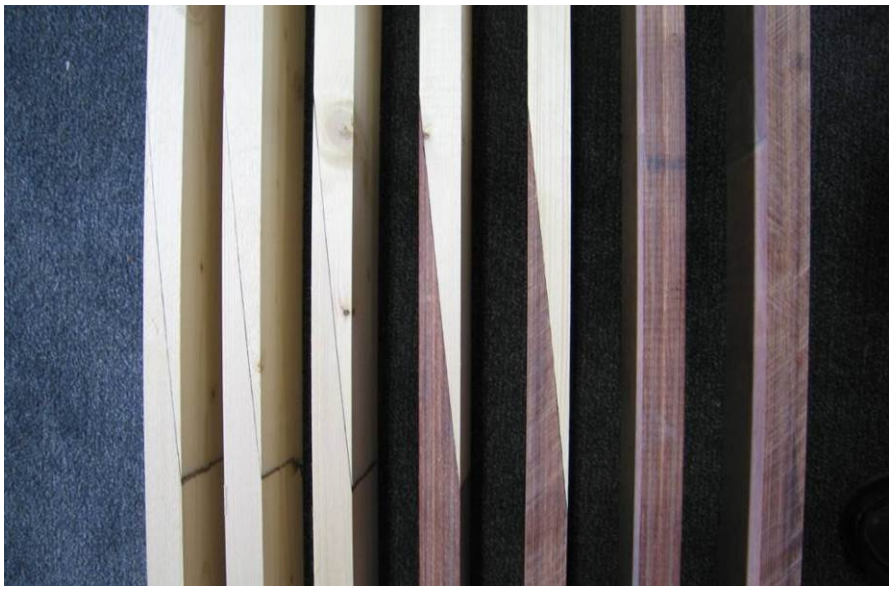


Abb. 3.3: Übersicht der verschiedenen Schäftungsproben

3.2.2.1.2 Versuchsdurchführung

Geprüft wurde die Biegetragfähigkeit der Schäftungsverbindung in Analogie zur Keilzinkung gemäß werkseigener Produktionskontrolle nach EN 408 und DIN 1052:2008-12. Die Schäftungsverbindung wurde mittig im Bereich der Lasteinleitung angeordnet und hatte eine Länge von 250 mm. Der Abstand zwischen den Auflagern betrug 375 mm und 150 mm zwischen den Lasteinleitungspunkten.

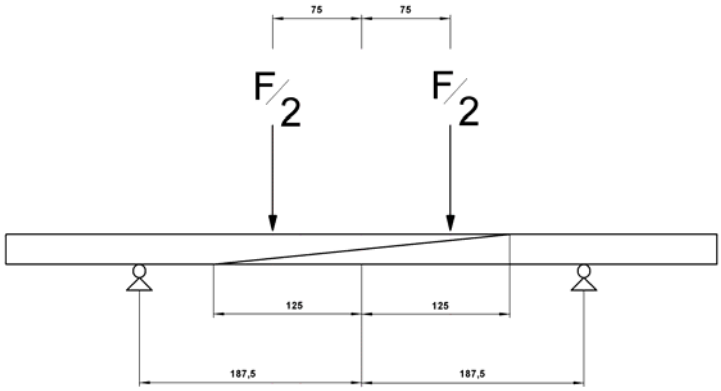


Abb. 3.4: Versuchsaufbau in Analogie zur Keilzinkenprüfung nach EN 408

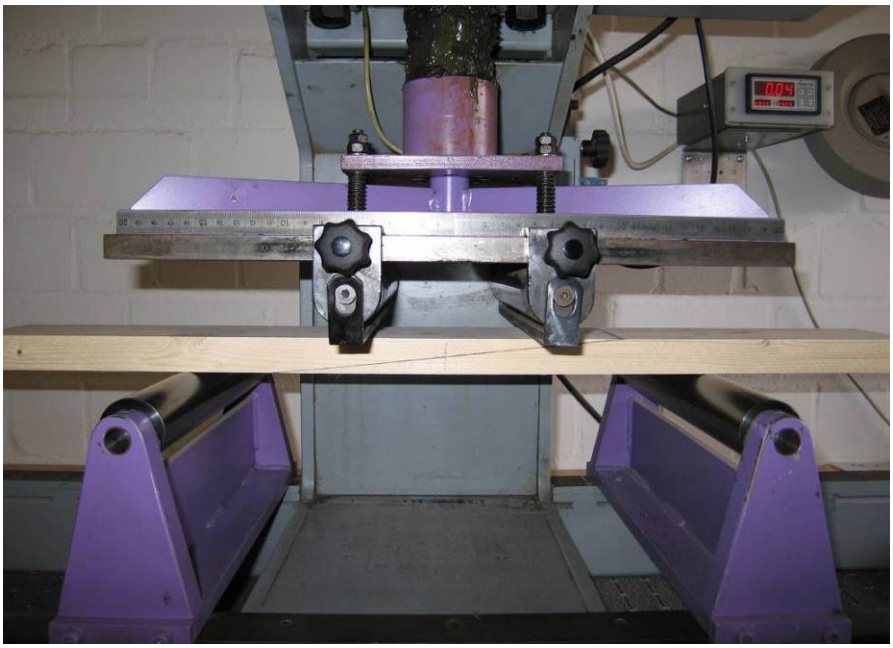


Abb. 3.5: Schäftungsprobe in der Biegeprüfmaschine

3.2.2.1.3 Versuchsergebnisse

Alle im Biegeversuch geprüften Proben versagten im Bereich der Schäftungsklebung. Die erhaltenen Versuchsergebnisse können der Tabelle 3.1 entnommen werden.

Der Kleinstwert der Proben Nr. 1136-1138 mit ausschließlich aus der Holzart Fichte verklebten Fügeteilen betrug $f_{m,min}$ = 52,733 N/mm² und lag damit deutlich über dem Wert der charakteristischen Biegefestigkeit für Keilzinkenverbindungen, der nach DIN 1052: 2008-12, Tabelle I.1 in Höhe von $f_{m,k}$ = 35 N/mm² für die Festigkeitsklasse C35 ausgewiesen wird.

Probe Nr. 1140 lag mit 20,67 N/mm² unter dem charakteristischen Wert von $f_{m,k}$ = 35 N/mm². Die durch den Bruch geöffnete Klebefuge zeigte eine unzureichende Flächenverklebung.

Proben Nr. 1141-1142 wiesen als Kleinstwert mit $f_{m,min}$ = 131,67 N/mm² eine deutlich höhere Festigkeit auf, wobei dieser Wert vergleichsweise zu ungeschäftetem KHP (f_m = 180,00 N/mm²) geringer ausfällt.

Tabelle 3.1: Zusammenstellung der Versuchsergebnisse

Probe	Holzart bzw. Holzwerkstoff der Fügeteile	Festigkeits-klasse	Höchstkraft F kN	Biegefestigkeit f_m N/mm²	Mittelwert $f_{m,Mittel}$ N/mm²
1136	Fichte/Fichte	C35M	11,49	76,6	63,67
1137	Fichte/Fichte	C35M	7,91	52,733	
1138	Fichte/Fichte	C35M	9,25	61,667	
1139	Fichte/KHP	(C35M)	9,4	62,667	41,367
1140	Fichte/KHP	(C35M)	3,01	20,067	
1141	KHP/KHP		19,75	131,667	138,9
1142	KHP/KHP		21,92	146,133	

3.2.2.1.4 Bewertung der Versuchsergebnisse

Grundlegend deuten die Prüfergebnisse im Vergleich der Schäftungsverbindung mit der Keilzinkenverbindung auf eine leistungsfähige Längsverbindung von Brettlamellen aus KHP hin. Somit stellt die Schäftungsverbindung von KHP-Lamellen als solches und auch in Verbindung mit Fichtenholz eine Möglichkeit der tragfähigen Längsverbindung dar und ermöglicht einen längenunabhängigen Einsatz des KHP.

Bezüglich der Fertigungstechnologie der Schäftung von KHP-Lamellen ist anzumerken, dass sich im Rahmen der Anfertigung der Proben die passgenaue Verpressung der Verklebung als grundsätzlich geometrisches Problem dargestellt hat, was sich sodann auch in den Prüfergebnissen darstellte, indem die KHP/KHP Schäftungsklebungen nur eine Festigkeit von ca. 70% des vergleichsweise ungeschäftetem KHP aufwiesen.



Abb. 3.6: Probekörper nach dem Biegeversuch

3.2.2.2 Die Rohrschäftung

Die Formholzprofile können nur bis zu einer bestimmten Länge produziert werden. Solch eine Begrenzung in der Länge ist geometrisch durch die Verdichtungs- und Umformtechnologie bedingt.

Daher ist es notwendig eine Verbindungsmöglichkeit für das Rundrohrprofil zu finden. Für kreisrunde Querschnitte wurde als Verbindungsmöglichkeit die Schäftung untersucht. Durch neueste CNC-Technologie kann die Schäftung mit entsprechender Frästechnik am Rohrrand ausgeführt werden.

Bereits nach kreisbahnförmiger Fräsung der ersten Rohrsegmente zeigte sich die Problematik, dass die Bearbeitung nicht gleichmäßig zur Außenkante des Rohrrands verläuft. Die Außenkante verläuft abweichend zur Kreisform.
Ursache der Kreisformabweichung des Holzrohrs ist die naturgemäß werkstoffbedingte Inhomogenität der Wuchsform der verwendeten Hölzer und deren Reaktion auf die thermische Behandlung in Form von Werfungen und Torsion.

Für die Schäftungsfräsungen wurden die Holzarten Pappel und Fichte verwendet. Im Vergleich zum Fichtenholz weist das verwendete Pappelholz in der Wuchsform eine höhere Gleichmäßigkeit im Wuchsbild auf. Dieser Unterschied der Wuchsform beider Holzarten zeigte sich darin, dass die Rohrränder der Holzart Pappel eine geringere Abweichung zur kreisförmig gefrästen Bearbeitung aufwiesen.

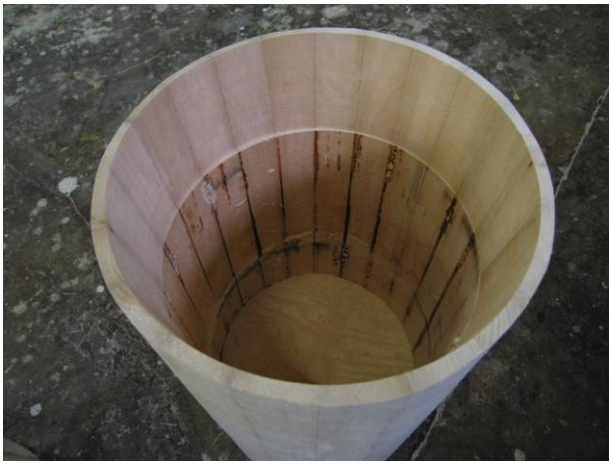


Abb. 3.7: Draufsicht Rohrschäftung mit geringer Kreisformabweichung aus Pappelholz



Abb. 3.8: Zusammengesetzte geschäftete Rohrsegmente mit geringer Kreisformabweichung aus Pappelholz

Eine unzureichende Kreisform der bearbeiten Rohrränder zeigt, bei Verbindung zweier Rohrsegmente, einen seitlichen Versatz. In Bezug auf die Belastbarkeit der Rohrschäftung wirkt sich ein Versatz der Schäftungsverbindung als Verminderung der Tragfähigkeit aus.

Als Verbesserung der Formstabilität der Rohre sollten, wie schon bereits versuchsweise erprobt, die Rohrsegmente an den Enden mit kreisrunden Deckeln innenseitig formschlüssig stabilisiert und sodann außenseitig zusätzlich mit Rohrschellen verspannt werden.

Aufgrund der Bearbeitung und der Zerspanung des Holzes kann die Schäftungsverbindung nicht vollständig über die gesamte Wandstärke der Rohre ausgeführt werden. Es sind fertigungsbedingte Abplattungen vorzusehen, die wiederum keine Zugspannungen übertragen können.

Die beschriebene verminderte Querschnittstragfähigkeit, durch die zu erwartende Kreisformtoleranz der Rohrsegmente verursacht, wird somit um die fertigungsbedingt erforderlichen Abplattungen erhöht.



Abb. 3.9: Draufsicht Rohrschäftung mit hoher Kreisformabweichung aus Fichtenholz



Abb. 3.10: Zusammengesetzte geschäftete Rohrsegmente mit hoher Kreisformabweichung aus Fichtenholz

3.2.2.3 Die Rohrzinkung

Alternativ zur Rohrschäftung wurde auch die Verbindungsmöglichkeit der Rohrzinkung untersucht. Auch bei dieser gewählten Verbindung ist die Bearbeitung der Rohrränder mittels CNC-Technologie möglich, jedoch funktioniert die Bearbeitung nur bis zu einem begrenzten Durchmesser. Die Rohrzinkung wird durch eine lineare Fräsbearbeitung, bestehend aus den zwei Fertigungsschritten Schlitzfräsen und dem Zinkenfräsen an den Rohrrändern, hergestellt.



Abb. 3.11: Schlitzfräsung der Rohrzinkung

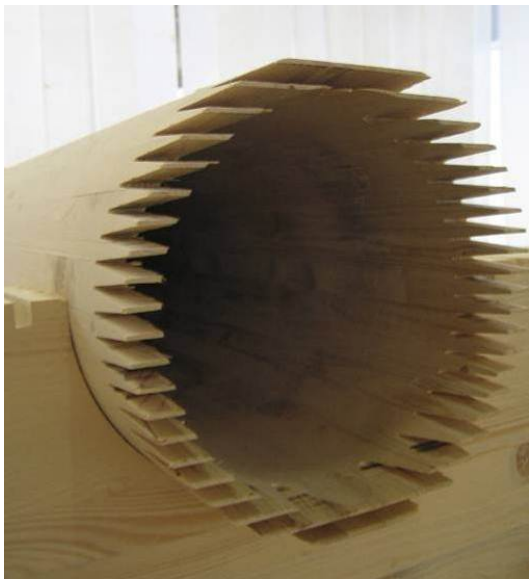


Abb. 3.12: Zinkenfräsung der Rohrzinkung

Aufgrund der linearen Fräsbearbeitung kann die später bei der Verklebung geforderte Passgenauigkeit der Bearbeitung nicht durch eine einfache Sichtkontrolle geprüft werden. Hierzu wären zur Kontrolle der Bearbeitungsgenauigkeit Hilfsmittel in Form von Schablonen für beide Seiten der Rohrzinkung geeignet. Bei Fügung der gezinkten Rohrenden kann durch die bearbeitungsbedingte Linearfräsung der Rohrenden die Toleranz (Kreisformabweichung der Rohre) bedingt ausgeglichen werden.

Abweichend zur Rohrschäftung ist die Rohrzinkung eine Längsverbindung, die bedingt durch die Ausrichtung der Fräsbearbeitung (linear und nicht kreisförmig wie Rohrschäftung), eine nur einachsig hohe Beanspruchung zulässt.



Abb. 3.13: Verklebung der Rohrzinkung aus Fichtenholz



Abb. 3.14: Verpressung der Rohrzinkung aus Fichtenholz

3.2.3 Untersuchungen zur Verbundqualität und Holzveredelung (AP 1.3)
Autor: Robert Putzger (ISH)

3.2.3.1 Holzveredlung durch Furniertränkung in Kunstharz (KHP)

3.2.3.1.1 Herstellung von KHP

Kunstharzpressholz (KHP) besteht aus Rotbuchenfurnieren als Harzträger, die durch Zugabe von Kunstharzen wie Phenol-, Melamin-, Polyester- und Epoxidharz imprägniert und verleimt werden. Für den Bereich des Holzbaus ist nur mit Phenolharzen imprägniertes und verpresstes KHP von Bedeutung, da dieses die mechanisch hochwertigsten Qualitäten ergibt. Die bevorzugte Verwendung von Buchenholz, speziell Rotbuche, wird durch die gleichmäßige Porenverteilung über den gesamten Stamm begründet. Die meist 1,5 bis 2,5 mm, in Sonderfällen bis zu 4 mm dicken Buchenfurniere werden mit einer wässrigen Kunstharzlösung getränkt, aufeinander geschichtet und mit einem Pressdruck von 20 bis 30 N/mm² bei Verleimungstemperaturen zwischen 100 und 150°C auf etwa 1/2 bis 2/3 der Ausgangsdicke verdichtet.

Das stabilisierende und dichtende Harz durchtränkt die Holzstruktur. Dadurch werden die Poren geschlossen und die Zellwände dauerhaft und sicher miteinander verbunden. Das Endprodukt ist somit wasserabweisend, beständig gegen Öle und resistent gegen schwache Säuren. Weiterhin ist durch die Verwendung von Harz das KHP bräunlich eingefärbt und weist auf Grund der Verpressung eine glatte Oberfläche auf. Die Eigenschaften können durch eine Nachtränkung, beispielsweise mit Transformatorenöl, weiter beeinflusst werden. Dabei werden noch freie Poren ausgefüllt.

Der Herstellungsprozess beeinflusst die mechanischen Eigenschaften von KHP. Nachstehend werden die entscheidenden Faktoren aufgeführt und die wichtigsten mechanischen Eigenschaften genannt, die für die Beurteilung des Verstärkungspotenzials des Werkstoffes notwendig sind.

3.2.3.1.2 Mechanische Eigenschaften von KHP

Die mechanischen Eigenschaften des fertigen Produktes werden von vielen Faktoren beeinflusst (vgl. Tabelle 3.2). Dies sind in erster Linie:

- die Furnierdicke,
- die Furnierrichtung (Schichtaufbau),
- das Kunstharz,
- die Kunstharzlösung,
- der Pressdruck (Verdichtungsstufe) und
- die Verleimungstemperatur.

Dabei hat sich gezeigt, dass insbesondere die Furnierdicke und die Orientierung der Schichten die Eigenschaften merklich verändern. KHP als Schicht- oder Sperrholz mit dicken Furnieren weist demnach eine hohe Druck- und Lochleibungsfestigkeit auf und eignet sich demzufolge für Verbundelemente. Dagegen ist KHP aus dünnen Einzelfurnieren mehr für die Verwendung in zug- und biegebeanspruchten Bauteilen prädestiniert.

Für die Herstellung der Probekörper wurde KHP der Firma Deutsche Holzveredelung Schmeing oHG mit dem KHP-Markennamen dehonit® verwendet. Das KHP wird nach DIN 7707 hergestellt und besteht aus Schälfurnieren der Rotbuche, die in Phenolharz getränkt und nach der Imprägnierung unter hohem Druck und hoher Temperatur verpresst werden.

Durch Variation des Tränkungsgrades der Furnierlagen, der Verdichtung und der Anordnung bzw. Ausrichtung der Furnierlagen über den Querschnitt können verschiedene KHP-Qualitäten erzeugt und das Material gezielt den Anforderungen angepasst werden. Visuell lässt sich ein hoher Tränkungsgrad auch an einer insgesamt dunkleren Farbe des KHP erkennen.

Für die Versuche im Rahmen des Projektes wurden verschiedene KHP-Querschnitte verwendet (vgl. Abb. 3.15). Es folgt eine kurze Materialbeschreibung. Zum Einsatz kamen sowohl halb- als auch vollgetränkte KHP-Qualitäten.

a) KHP – vollgetränkt (Herstellerbezeichnung: A 740-1):
Der KHP-Querschnitt ist symmetrisch (Furnierlagen: 8x längs / 1x quer / 8x längs) und besteht insgesamt aus 17 Furnierlagen. Nur die mittlere Furnierlage ist quer zur Längsrichtung angeordnet. Die Rohdichte beträgt 1,40 g/cm³. Die Gesamtdicke des KHP beträgt ca. 22 mm.

b) KHP – vollgetränkt (Herstellerbezeichnung unbekannt):
Der KHP-Querschnitt ist symmetrisch aufgebaut und besteht aus 26 Furnierlagen, welche jeweils abwechselnd in Längs- und Querrichtung orientiert sind. Nur die beiden mittleren Lamellen sind gleich in Längsrichtung angeordnet. Die Gesamtdicke der KHP-Decklamelle beträgt ca. 16 mm.

c) KHP – halbgetränkt (Herstellerbezeichnung unbekannt):
Der KHP-Querschnitt ist ebenfalls symmetrisch aufgebaut (Furnierlagen: 8x längs / 1x quer / 8x längs) und besteht insgesamt aus 17 Furnierlagen. Die mittlere Furnierlage ist quer zur Längsrichtung angeordnet. Im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen vollgetränkten KHP-Querschnitten unterscheiden sich bei diesem Material die Schnittflächen der Furnierlagen in Faserlängs- und -querrichtung nur unwesentlich in ihrer Farbe. Auf Grund des geringeren Tränkungsgrades ist das halbgetränkte KHP grundsätzlich heller im Erscheinungsbild. Die Gesamtdicke der KHP-Decklamelle beträgt ca. 20 mm.



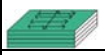
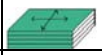
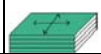
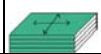
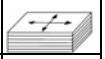
a) KHP vollgetränkt (A740-1) b) KHP vollgetränkt (Bez. unbek.) c) KHP halbgetränkt (Bez. unbek.)

Abb. 3.15: Vergrößerte Querschnitte von KHP

Aus den obigen Angaben ist ersichtlich, dass sich die Dicke des KHP mit dem jeweiligen Materialaufbau ändert und von der Anzahl der Furnierlagen abhängig ist. Des Weiteren beeinflusst der Tränkungsgrad die Dicke der einzelnen Furnierlagen, wobei auch innerhalb eines Materials Furnierlagen unterschiedlicher Dicke verpresst werden.

Laut Herstellerangaben sind die Festigkeitseigenschaften des KHP zwischen denen von Kunststoffen wie GFK und denen von Aluminium einzuordnen. Tabelle 3.2 zeigt diese für ausgewählte Materialien. Die gute Temperatur- und Wasserbeständigkeit wird vom Hersteller besonders hervorgehoben.

Tabelle 3.2: Mechanische Eigenschaften ausgewählter KHP-Qualitäten (Dehonit [236])

		Qualität	A735-1	B895-8	B825-8	B735-1	A840	B735-1	E730-1
dehonit®		Materialaufbau							
Eigenschaften	**Einheit**								
Dichte	g/cm³	DIN 53479	1,35	0,95	1,25	1,35	1,40	1,35	1,30
Biegefestigkeit	N/mm²	DIN 53 452	220	120	150	150	240	140	180
Biege E-Modul	N/mm²	DIN EN ISO 178	18500	11000	13000	15500	22000	15000	19000
Druckfestigkeit (senk.)	N/mm²	DIN EN ISO 604	180	200	240	270	125	240	140
Druckfestigkeit (paral.)	N/mm²	DIN EN ISO 604	170	70	90	180			
Zugfestigkeit (paral.)	N/mm²	DIN EN ISO 527	185	80	100	100			
lin. . Ausdehnungsk.	1/K						8x10^4	8x10^4	7x10^4
Wasseraufnahme	%	DIN 53495					5	0,7	1
Ölaufnahme	%	IEC 61061	<2	25	10	<2			

3.2.3.2 Holzveredlung durch thermische Modifikation von Holz (TMT)

Zur Herstellung von Verbundbohlen wurde thermisch modifiziertes Eschenholz (Thermally Modified Timber – TMT) des Herstellers Thermoholz Spreewald GmbH verwendet. Laut Hersteller [237] erfolgt die thermische Modifizierung ohne chemische Zusätze bei Temperaturen von ca. 200°C und verändert so die physikalischen und chemischen Eigenschaften des Holzes. Thermisch modifiziertes Holz zeichnet sich im Vergleich zu herkömmlichen Holzwerkstoffen oder naturbelassenem Holz durch eine erhöhte Beständigkeit gegenüber Feuchte aus (vgl. Abb. 3.16). Die Ausgleichsfeuchte von TMT ist nur noch etwa halb so groß wie vor der Hitzebehandlung. Dies führt zu einer erhöhten Dimensionsstabilität sowie zu einer besseren Resistenz vor holzzerstörenden Pilzen. Durch die Eigenschaftsänderungen infolge des Thermoprozesses eignet sich selbst Holz der Esche ohne zusätzlichen Holzschutz für den Einsatz im Außenbereich.

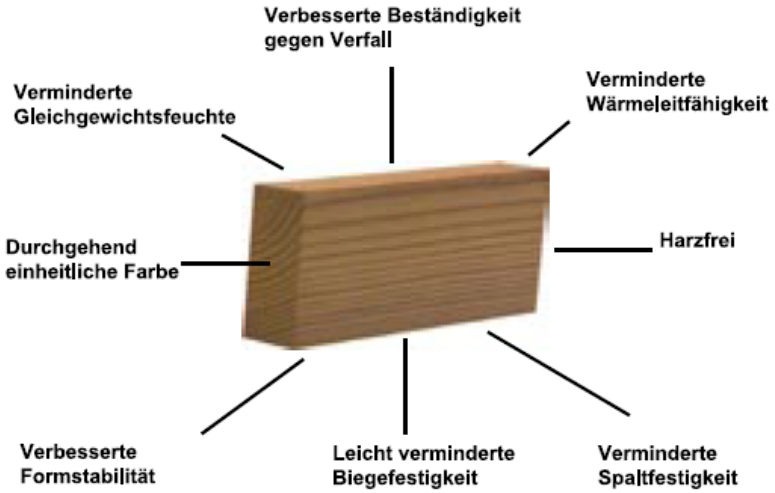


Abb. 3.16: Eigenschaften von TMT (ThermoWood [238])

Die Holzvergütung erfolgt nicht nur an der Oberfläche sondern das Holz erfährt eine durchgehende Veränderung, welche auch durch eine dunklere Färbung des ganzen Querschnittes feststellbar ist. Neben der Farbänderung ist auch mit steigendem Temperaturniveau während des Vergütungsprozesses eine Abnahme der Festigkeiten (vgl. Abb. 3.16) des Holzes verbunden, was u. a. zu einem spröderen Materialverhalten führt. Weitere Materialeigenschaften können den Datenblättern des Herstellers entnommen werden.

Auch für TMT gilt, dass sich durch Sonnenstrahlung und Bewitterung eine Veränderung der Farbe und Oberflächenbeschaffenheit einstellt. Ohne eine zusätzliche Schutzbehandlung ist auch TMT nicht lichtecht und wird mit zunehmender Auswaschung des Lignins im oberflächennahen Bereich silbrig-grau. Die Vergrauung kann durch ein geeignetes Anstrichsystem (pigmentierte Lasuren, deckende Lacke oder Öle und Wachse) vermindert und verzögert werden. Die Änderung des Farbtones sowie eine mögliche Besiedlung der Oberfläche mit holzverfärbenden Pilzen (z. B. Bläuepilz) ist nicht mit einer Beeinträchtigung der technischen Funktionen des TMT verbunden [239].

3.2.3.3 Commingling-Garne

Es wurde der Verbund von Probekörpern aus Fichtenholz und Mehrlagengestricken (MLG) mit eingearbeiteten thermoplastischen Fäden (Commingling-Garne) untersucht. Bei Einwirkung hoher Temperaturen beginnen die thermoplastischen Fäden zu schmelzen. Die Versuche dienten der Beurteilung der Verbundqualität zwischen Holz und Textil (Commingling-Garn).



Abb. 3.17: MLG mit thermoplastischen Fäden (Hersteller ITM)

Das vom Projektpartner ITM zur Verfügung gestellte Textil ist ein MLG, welches vom ITM im Rahmen des SFB 639 entwickelt und hergestellt wurde. Als Randbedingungen galt es dabei Prozesszeiten beim Vorheizen, Pressen und Abkühlen von je einer Stunde zu berücksichtigen. Des Weiteren stand eine eigenständige Nutzung des MLG als Ziel und weniger der Verbund mit anderen Materialien im Vordergrund.

Die Zusammensetzung des MLG zeigt Tabelle 3.3. Die von der Firma OCV (früher VETROTEX) verwendeten TWINTEX Garne sind je zur Hälfte aus einer thermoplastischen Matrix und Verstärkungsfasern (Glasfasern) zusammengesetzt. Die in das Textil eingearbeiteten thermoplastischen Fäden bestehen aus Polypropylen.

Tabelle 3.3: Zusammensetzung des Mehrlagengestrickes (MLG-Variante 1, Hersteller ITM)

	Material	**Faden-anzahl**	**Gesamtfeinheit [tex]**	**Garnanteil [Gew.-%]**	**GF-Anteil [Vol.-%]**	**Verhältnis KF:SF**
KF	TWINTEX®-R PP 73	1	1511	42,93	20,58	1:1
SF	TWINTEX®-R PP 73	1	1511	42,92	20,57	
MF	ITM-HG 2	1	138,5	14,24	4,88	
Flächenmasse: 970 g/m² GF-Anteil (theoretisch): 46,04 Vol.-% GF-Anteil (gemessen): 48,87 Vol.-%			KF…Kettfäden SF…Schussfäden MF…Matrixfäden			

Die Herstellung der Probekörper erfolgte im Januar 2007 im Versuchstechnikum in Freital-Hainsberg an einer Heizpresse. In den durchgeführten Voruntersuchungen wurden die Presszeit, -temperatur und der Verdichtungsgrad des Holzes als Einflussparameter auf den Herstellprozess untersucht.

Vor dem Pressen wurden zwei Fichtenholzbrettchen bündig übereinander angeordnet und dazwischen das MLG in die Fuge gelegt. Das Pressen erfolgte in der Heizpresse bei ca. 190°C. Beim Pressvorgang wurden nicht nur die Matrixfäden aufgeschmolzen, auch das Holz konnte gleichzeitig um bis zu 25 % der Ausgangsdicke verdichtet werden.

Die Abmessungen der Brettchen waren 10 x 38 cm. Die Dicke des Fichtenholzes vor dem Pressvorgang betrug 2 cm (vgl. Abb. 3.18).



Heizpresse zur Herstellung der Verbundproben



Fuge mit Commingling-Garn im Querschnitt nach dem Pressen



Holz und Commingling-Garn nach dem Öffnen der Fuge

Abb. 3.18: Verbunduntersuchungen an Fichtenholzbrettchen und Commingling-Garnen

In dem untersuchten Temperaturbereich von 160 bis 190°C bei Presszeiten zwischen 1 und 15 Minuten war es jedoch nicht möglich, mit Hilfe der im Textil eingearbeiteten thermoplastischen Fäden einen dauerhaften Verbund zwischen den Brettchen zu erhalten. Das rechte Bild von Abb. 3.18 zeigt einen Probekörper, der nach dem Verpressen in der Heizpresse wieder geöffnet wurde. Das Trennen der Fichtenholzbrettchen erfolgte von Hand und ohne großen Kraftaufwand. Die thermoplastischen Fäden des in die Fuge eingelegten Textils sind geschmolzen, konnten sich jedoch nicht vollflächig und kraftschlüssig mit dem Holz verbinden. Die ursprünglich ebenen, gehobelten Fichtenholzbrettchen zeigten nach dem Pressen eine wellige Oberfläche (vgl. Abb. 3.18, mittleres Bild). Mit den untersuchten Materialien sowie den getesteten Presszeiten, -temperaturen oder -drücken war es nicht möglich, eine hohe Verbundfestigkeit zwischen Holz und Textil zu erreichen.

Die Arbeiten wurden nach den Vorversuchen beendet, da die Ergebnisse gezeigt hatten, dass die eingesetzten MLG für den speziellen Einsatzfall zur Holzbeschichtung ungeeignet sind. Für erfolgreiche Verbunduntersuchungen mit MLG hätten diese in ihrer Zusammensetzung modifiziert werden müssen, was jedoch auf Grund des großen Arbeitsumfanges nicht im Rahmen des Projektes erfolgen konnte. Somit bieten Untersuchungen an Commingling Garnen mit einer Schmelztemperatur von ca. 160°C sowie einem gleichzeitig höheren Anteil von thermoplastischen Fäden im Textil reichlich Potenzial zukünftiger Forschungsarbeiten.

3.2.3.4 Verbundqualität der Leimfugen von Hybridträgern (BSH-Lärche mit KHP-Decklamelle)

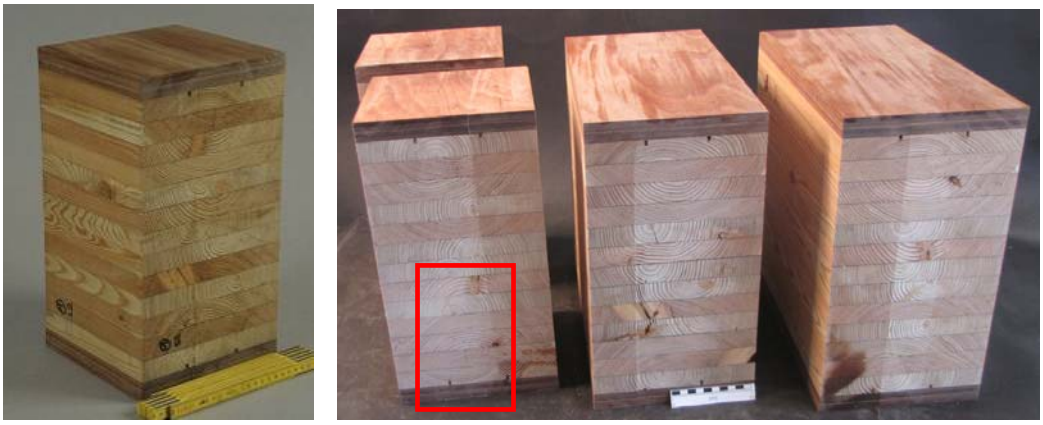


Abb. 3.19: Trägerquerschnitt aus BSH-Lärche mit KHP-Decklamellen

An insgesamt vier Probekörpern (vgl. Abb. 3.19) wurde die Verbundqualität der Leimfuge zwischen den Decklamellen aus KHP und dem unbehandelten BSH aus Lärchenholz nach zyklisch wechselnder Be- und Entfeuchtung untersucht. Die Verbundquerschnitte aus KHP der Firma Deutsche Holzveredelung Schmeing oHG (dehonit®: Qualität A740-1, vollgetränkt) und BSH-

Lärche (alpine Lärche) wurden mit einem Resorcinharz des Herstellers Dynea (Prefere 4094 und Härter 5827) verleimt.

Die Querschnittsmaße von 20 x 37,5 cm der Probekörper entsprechen denen des Hauptträgers der Fußgängerbrücke (1. Pilotprojekt). Es wurden je zwei Blöcke von 20 und 40 cm Länge in wechselnden Klimaregimen bei -5°C/65 %, 20°C/65 %, 30°C/95 % sowie 20°C/40 % rel. LF insgesamt über 5000 Stunden im Klimaschrank (vgl. Abb. 3.20) beansprucht.

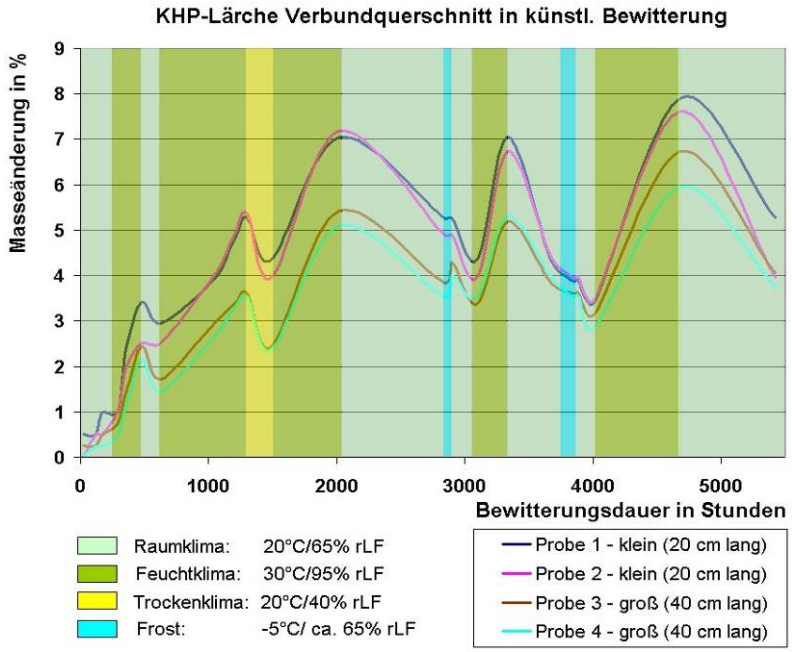


Abb. 3.20: Masseänderung der Probekörper während der künstlichen Bewitterung

Das deutlich geringere Feuchteaufnahmevermögen von KHP im Vergleich zu unbehandeltem Holz (vgl. Abschn. 3.2.6.1) führte während der Bewitterungszyklen zu Verformungen des Verbundquerschnittes. Trotz wechselnder Temperatur- und Feuchtebeanspruchung blieb die Verbundfuge ohne sichtbare Schäden. Die Leimfugen zwischen KHP und Lärchenholz zeigten auch nach über 5000 Stunden Beanspruchung im Klimaschrank keine Risse oder Delamination.



Abb. 3.21: Detailansicht des rot markierten Probekörpers aus Abb. 3.19 während der künstlichen Bewitterung

Dagegen zeigte die Verleimung im BSH der Lärche bereits nach 2500 Stunden eine vom Querschnittsrand beginnende Delamination einzelner Leimfugen bis zu einer Tiefe von ca. 2 cm (vgl. Abb. 3.23). Mit Beginn des Trockenklimazyklus, in Abb. 3.20 gelb markierter Bereich bei ca. 1500 Stunden Bewitterungsdauer, zeigte das Hirnholz der BSH-Querschnitte gleichmäßig verteile Schwindrisse (vgl. Abb. 3.21). Diese Schwindrisse schlossen und öffneten sich zyklisch mit fortschreitender Bewitterungsdauer entsprechend der sich jeweils einstellenden Ausgleichsfeuchte im BSH. Das KHP zeigte keine Risse, weder am Querschnitt noch zwischen den einzelnen Furnierlagen.

Das deutlich kleinere Feuchteaufnahmevermögen von KHP gegenüber Lärchenholz führte jedoch zu sichtbaren Verformungen der Probekörper. So betrug das Stichmaß auf Grund der Schüsselung der KHP-Decklamellen nach Befeuchtungszyklen bis zu 3 mm (vgl. Abb. 3.22, oben). Auch quollen die einzelnen Lamellen des Lärchenholzes entsprechend ihrer Jahrringlage und -dichte unterschiedlich stark in der Breite des Querschnittes auf (vgl. Abb. 3.22, unten).



Abb. 3.22: Verformung des KHP- (oben) und der BSH-Lamellen (unten)



Abb. 3.23: Delamination der Leimfuge im BSH der Lärche

3.2.3.5 TMT-Lärche-Querschnitte im Klimaschrank – Verbundfuge

Zur Herstellung der Probekörper wurde thermisch behandeltes Eschenholz (TMT) der Thermoholz Spreewald GmbH und unbehandeltes Lärchenholz (alpine Lärche) verwendet. Die Proben wurden mit Klebstoff der Firma DYNEA, je zur Hälfte mit einem Resorcinharz-Klebstoff (PREFERE 4094) bzw. mit einem 1-Komponenten Polyurethan-Klebstoff (PREFERE 6000) so verleimt, dass die Markseite des Lärchenholzes zur Leimfuge ausgerichtet war.

Von 36 untersuchten Probekörpern hatten 20 eine Breite von 20 cm und 16 Probekörper (einschl. Referenzproben) waren 15 cm breit. Die Probenbreite wurde in späteren Versuchsserien reduziert, um die Breite der Probekörper denen der Trägerbohlen für die HHT-Brücke des Pilotprojektes Fußgängerbrücken anzupassen. Des Weiteren wurde auch beim TMT streng auf eine Ausrichtung der Markseite zur Leimfuge geachtet. Bei den breiteren Probekörpern war die Ausrichtung noch beliebig.

Alle Probekörper hatten eine Länge von 10 cm in Faserrichtung und waren 5,5 cm dick. Die Dicke der oberen Lamelle aus TMT betrug dabei 2,5 cm. Vor der Verleimung wurde die Rohdichte an je einer Bohle aus TMT und Lärchenholz zu 0,64 g/cm³ bzw. 0,72 g/cm³ bestimmt. Die mit der Darrtrocknungsmethode bestimmte Holzfeuchte betrug beim TMT 4,1 %, beim Lärchenholz 12,2 %.

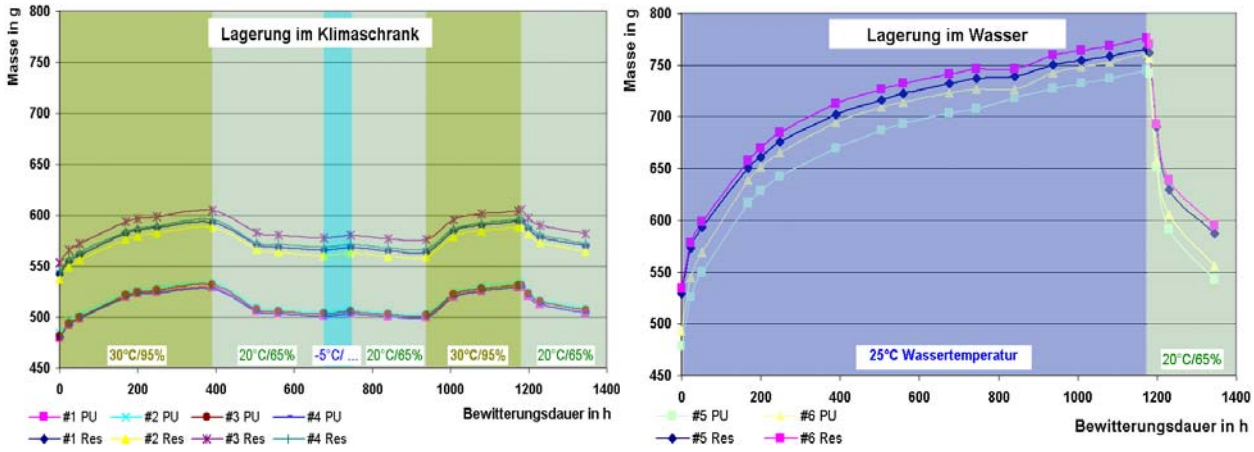


Abb. 3.24: Masse der Probekörper während Exposition (Bewitterungsdauer: 1400 Stunden)

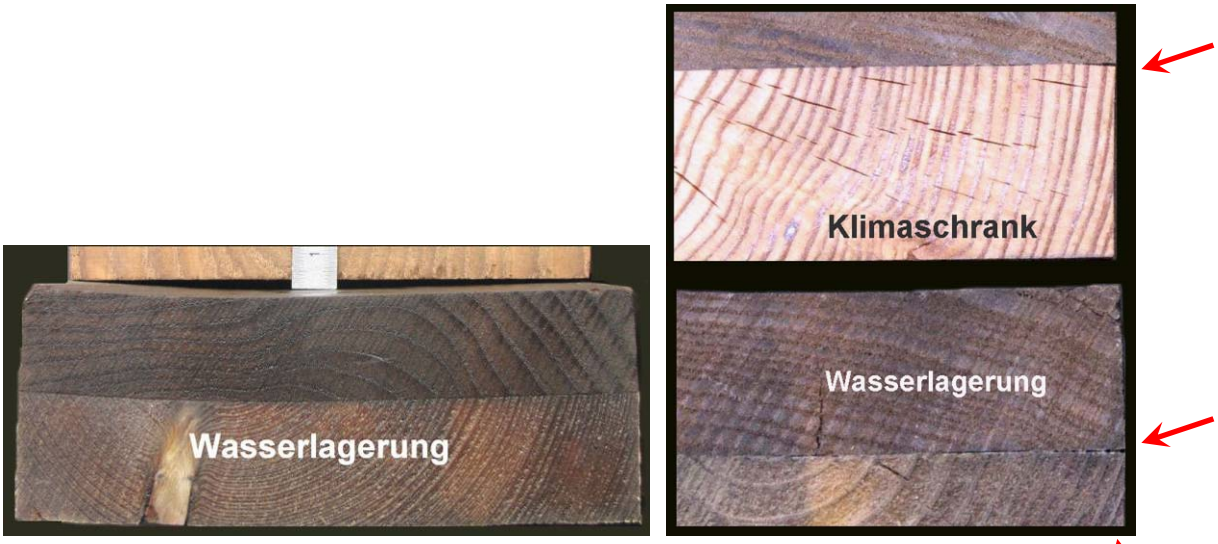
Die 20 cm breiten Verbundquerschnitte mit einer Resorcin-Leimfuge (Res) zeigten nach Lagerung im Wasserbad (1000 Stunden) und anschließender Bewitterung im Klimaschrank (2500 Stunden) gegenüber den Probekörpern mit einer PU-Leimfuge (PU) eine bessere Verbundqualität nach visueller Begutachtung. So öffneten sich am Ende des Untersuchungszeitraumes von insgesamt über 3500 Stunden die PU-Leimfugen nach einem Trockenzyklus bis ca. 3 cm tief in den Querschnitt hinein. Bei ca. der Hälfte der PU-Leimfugen wurde eine beginnende Delamination an den Rändern der Verbundfugen festgestellt. Dies konnte bei der Verleimung mit Resorcinharz nur an einem Probekörper beobachtet werden. Bei Feuchteabgabe zeigte sowohl das TMT als auch das Lärchenholz Schwindrisse, die bis über den ganzen Querschnitt reichten.

In einer zweiten Versuchsserie hatten die Probekörper eine Breite von 15 cm und die Bewitterungsdauer betrug ca. 1350 Stunden. Die 16 Probekörper wurden wie zuvor verschiedenen Klimaregimen ausgesetzt und im Wasserbad gelagert (vgl. Abb. 3.24). Bei der zyklischen Be- und Entfeuchtung im Klimaschrank wechselte das Klima zwischen den Zyklen 30°C/ 95 %, 20°C/ 65 % und -5°C/ bei ca. 60 % rel. LF. Je nach Klimaregime dauerte die Beanspruchung zwischen 3 und 15 Tagen. Die Proben aus der Wasserlagerung wurden die letzten sieben Tage ebenfalls im Klimaschrank bei 20°C/65 % rel. LF gelagert.

Während der Bewitterung wurde regelmäßig die Masse der Proben bestimmt (vgl. Abb. 3.24) und visuell die Verbundqualität der Leimfuge untersucht.



Abb. 3.25: Probekörper nach 744 h Exposition: Ansichten von Oberseiten aus TMT, Unterseiten aus Lärche, Querschnitten (links: Resorcin- / rechts PU-Leimfuge)



nach 1174 h: Verwölbung des Querschnittes Detail: Schadhafte PU-Leimfugen

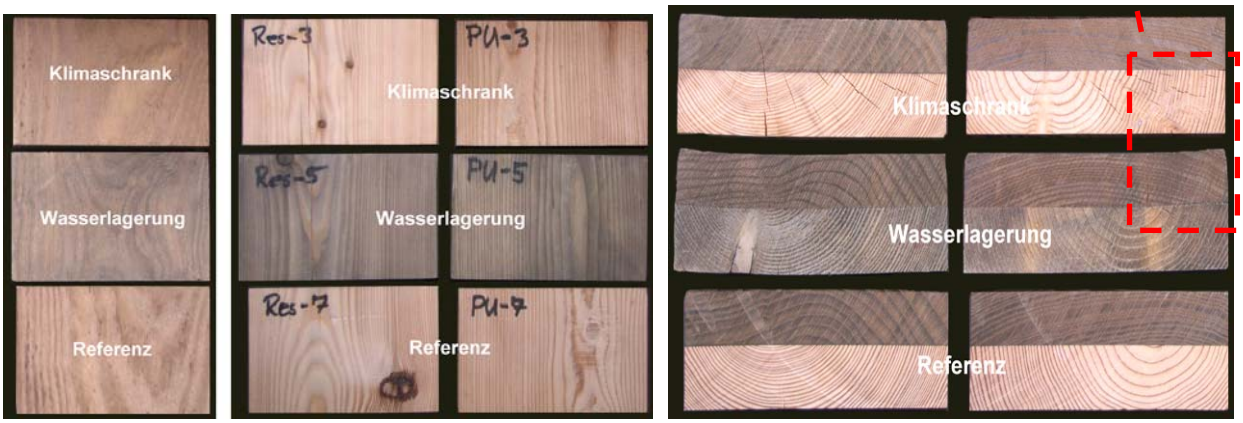


Abb. 3.26: Probekörper nach 1230 h Exposition: Ansichten von Oberseiten aus TMT, Unterseiten und aus Lärche, Querschnitten (links: Resorcin- / rechts PU-Leimfuge)

Alle Proben zeigten mit zunehmender Bewitterungsdauer, besonders bei Lagerung im Wasserbad, eine sichtbare Aufschüsselung des TMT in Verbindung mit einer Verwölbung des Lärchenholzes an der Bohlenunterseite. Das Stichmaß über die Probekörperbreite betrug bis zu 3 mm.

Im Laufe der Bewitterung im Klimaschrank bildeten sich im Hirnholz sowohl vom Lärchenholz als auch vom TMT fein verteilte Schwindrisse. Während des zyklisch auftretenden feucht warmen Klimas schlossen sich diese überwiegend wieder. Nach ca. 1200 h im Klimaschrank bildeten sich in der Leimfuge der mit PU verleimten Probekörper Risse. Diese blieben auch bis zum Ende der gesamten Bewitterungsdauer auf die Randbereiche beschränkt. Mit Resorcinharz verleimte Fugen zeigten dieses Rissverhalten nicht.

Die zur Bewitterung im Wasserbad gelagerten Proben wurden abschließend im Klimaschrank bei 20°C und 65 % relativer Luftfeuchte getrocknet. Bis zur Entnahme aus dem Wasserbad blieben die Verbundprobekörper beider Klebstoffe sowohl im Hirnholz als auch in der Leimfuge ungerissen.

Bereits nach kurzer Zeit im Klimaschrank bildeten sich feine über den Verbundquerschnitt verteilte Schwindrisse. Bei Proben mit PU-Verleimung öffnete sich nach ca. zwei Tagen im Klimaschrank die Leimfuge vereinzelt. Dieses anfangs nur am Probenrand aufgetretene Verbundversagen verstärkte sich mit zunehmender Trocknung im Klimaschrank. Am Ende der Bewitterung nach ca. 1344 h versagte die PU-Verleimung flächenhaft. Die Delamination der PU-

Leimfuge erreichte eine Tiefe bis ca. 5 cm. An Leimfugen aus Resorcinharz konnten bei gleicher Bewitterungsdauer keine Verbundschäden beobachtet werden.

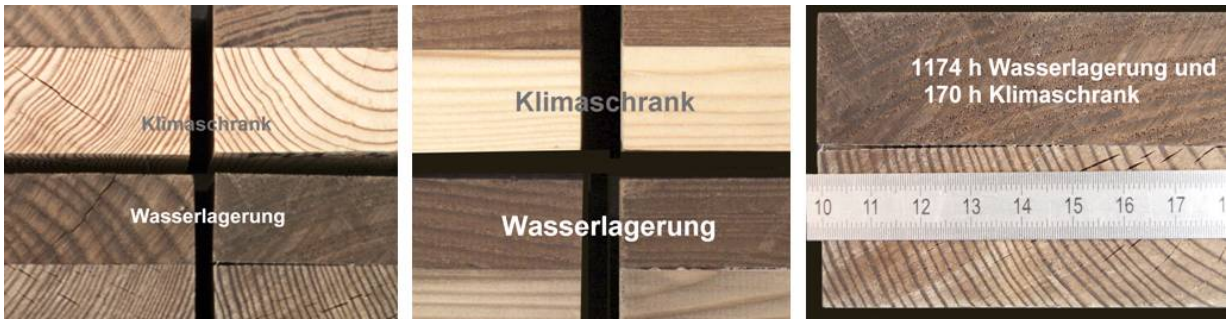


Abb. 3.27: Probekörper nach 1344 h Exposition: Ansichten von Querschnitt und Längsschnitt (links: Resorcin- / rechts PU-Leimfuge) sowie der Delamination einer PU-Leimfuge

Basierend auf den Versuchsergebnissen aus der künstlichen Bewitterung im Klimaschrank sowie einer extremen Beanspruchung durch Wasserlagerung zeigte die Resorcinharz-Verleimung ein besseres Verbundverhalten. Damit sind offensichtlich nicht alle Leime für die Kombination von Thermoholz mit Lärche gleich gut geeignet. Grundsätzlich sind die verschiedenen Eigenschaften der jeweiligen Leimsysteme des Herstellers zu beachten. Die Hersteller von TMT empfehlen z. B. PU-Klebstoff [238]. Bei der Verwendung von PU-Leimen ist jedoch ein Mindestmaß an Wasser zum Verleimen notwendig. Wenn sowohl die Luft als auch das Holz sehr trocken sind, kann unter Umständen der Leim nicht vollständig aushärten. Zudem dürfen einige PU-Klebstoffe nicht zur Verklebung von Lärchenholz verwendet werden.

Während der Versuche wurde das Wasser für die Beanspruchung im Wasserbad regelmäßig erneuert. Trotzdem konnte ab ca. 500 h ein zunehmender Essig-Geruch wahrgenommen werden. Zugleich bildete sich an der Oberfläche der Probekörper eine kaum sichtbare seifige Ablagerungsschicht, welche sich jedoch leicht abwaschen ließ.

Als Ergänzung zur Beurteilung des Feuchteverhaltens befinden sich Verbundbohlen aus verschiedenen Materialien in Bauteilgröße in der Freibewitterung. Nach 1,5 Jahren sind die Verbundquerschnitte formstabil. Es zeigen sich aber Verfärbungen oder feine Schindrisse an den Stirnseiten. Größere Bewitterungsschäden konnten nicht festgestellt werden. Dagegen zeigen die kleineren nur 10 cm langen Probekörper in den Sommermonaten Schwindrisse sowohl im Hirnholz als auch vereinzelt in den Leimfugen. Ein Unterschied im Verbundverhalten zwischen PU- und Resorcinharz-Klebstoff konnte nach einer Freibewitterung nicht festgestellt werden.

Zudem wurden Hybridbohlen aus TMT-Esche und Fichte getestet. Bei diesen konnte jedoch kein Unterschied bzgl. der verwendeten PU- und Resorcinharz-Klebstoffe festgestellt werden (vgl. auch Kap. 3.2.6.3). Auf eine detaillierte Beschreibung dieser Versuche wird verzichtet, da letztendlich die Kombination TMT-Esche und Lärche mit Resorcinharzklebstoff als Vorzugsvariante ausgewählt und zum Einsatz in einer Fußgängerbrücke des Pilotprojektes „Fußgängerbrücken“ (vgl. Kap. 3.8.2.3) vorgesehen wurde.

3.2.4 Formen von Pressholzplatten zu Hohlprofilen

Autor: Andreas Heiduschke (ISH)

Die Fertigung der Formholzrohre erfolgte bei den Sindelfinger Holzringe e. K. Abb. 3.28 zeigt das Dämpfen und anschließende Formen der Pressholzplatten zu Rohren nach dem in Abschn. 3.2 beschriebenen Verfahren. Das rechte Bild zeigt die seit 2009 zur Verfügung stehende Pilotanlage zur Serienfertigung von Formholzprofilen in Chemnitz.

Die gefertigten Formholzrohre haben einem Außendurchmesser von 274 mm, eine Wandstärke von 19 mm und eine Rohrlänge von 2500 mm.



Abb. 3.28: Formen der Pressholzplatten zu Rohren in Sindelfingen (links) Pilotanlagen zum Holzformen in Chemnitz (rechts)

3.2.5 Bearbeitung und Abbund (verschiedener Bauteile)
Autor: Jan Fandler (Hess)

Die Verwendung von neuen Baumaterialien und Holzarten in der Produktion, die oft als Verbundbauteile hergestellt werden mussten, erforderte einen verhältnismäßig hohen Aufwand an Arbeitsvorbereitung. Insbesondere die Mitarbeiter in der Produktion benötigten sehr detaillierte Arbeitsanweisungen, damit auch alle geforderten Bedingungen eingehalten werden konnten. Dies ist aber ein völlig normaler Prozess, wenn bisher unbekannte Arbeitsweisen ausgeführt werden müssen.

Da für die Bearbeitung der Bauteile, aufgrund der Neuartigkeit des herzustellenden Bauteils, teilweise nicht die übliche Fertigungstechnologie Anwendung finden konnte, wurden Lösungen gesucht und gefunden, so dass die Bearbeitung ermöglicht wurde.

Bei dem Abbund der Bauteile war stets zwischen handwerklichem Abbund und CNC-Abbund abzuwägen, so dass für die Bauteile eine präzise, auch im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit, geeignete Herstellungsweise gefunden wurde.

3.2.6 Untersuchungen zur Maß- und Formhaltigkeit (verschiedener Bauteile)
Autor: Robert Putzger (ISH)

3.2.6.1 Probekörper aus KHP und Fichte in Klimaschrank und Wasserlagerung

Bei den Untersuchungen zur Form- und Maßhaltigkeit wurden Probekörper aus unbehandelter Fichte mit vergleichsweise großer und geringer Dichte sowie KHP mit teilgetränkten und vollgetränkten Furnierlagen untersucht. Die Probekörper wurden im Klimaschrank und direkt im Wasserbad einer Feuchtebeanspruchung ausgesetzt.

Dabei zeigte jedes Material bzw. jeder Werkstoff entsprechend seinem Aufbau ein charakteristisches Verhalten. Bei den untersuchten Probekörpern aus Fichte wurde ein von der Ausgangsdichte unabhängiges Verhalten unter Feuchteeinwirkung beobachtet. Die Gewichtszunahme bzw. Feuchteaufnahme des Fichtenholzes war bei kleiner und großer Dichte annähernd gleich groß.

Grundsätzlich lässt sich festhalten, dass vollgetränktes KHP auch nach 1000 Stunden Beanspruchung in einem feuchtwarmen Klima bei 35°C und 98 % rel. LF mit ca. 3 % Gewichtszunahme sehr dauerhaft und formstabil ist. Eine Teiltränkung ist dagegen unzureichend und reduzierte die Wasseraufnahme und damit das Quellverhalten im Vergleich zu unbehandelter Fichte nur um 1 % auf insgesamt 11 %. Nach 1000 Stunden Bewitterung im Klimaschrank betrug die Änderung in Dickenrichtung von teilgetränktem KHP ca. 20 % und war damit vier- bis sechsmal so stark wie bei Fichte bzw. vollgetränktem KHP.

In den Versuchen mit einer direkten Lagerung im Wasserbad betrug nach zwei Wochen die durchschnittliche Wasseraufnahme von unbehandelter Fichte 100 %. Bei Verwendung von teilgetränktem KHP reduzierte sich der Wert der Wasseraufnahme bereits wirksam auf 45 %. Letztlich zeigte nur vollgetränktes KHP mit ca. 3 % Gewichtszunahme und keinerlei Verformungserscheinungen eine ausgesprochen hohe Form- und Feuchtebeständigkeit.



Abb. 3.29: Probekörper aus Fichte und KHP mit verschiedenen Tränkungsgraden (Ansicht und Querschnitt) zur künstlichen Bewitterung im Klimaschrank

Tabelle 3.4: Masse- und Geometrieänderung ausgewählter Probekörper aus KHP und Fichte vor und nach 980 h künstlicher Bewitterung im Klimaschrank

lima35°C/98% LF			#1 Fichte								#2 KHP (teilgetränkt)								#3 KHP (vollgetränkt)							
Lagerung:	Datum / Uhrzeit	Dauer [h]	Klimaschrank 35°C / 98%								Klimaschrank 35°C / 98%								Klimaschrank 35°C / 98%							
Nr.:			9	Delta	10	Delta	11	Delta	12	Delta	3	Delta	4	Delta	7	Delta	8	Delta	1	Delta	2	Delta	5	Delta	6	Delta
Geometrie:			gross	[%]	gross	[%]	klein	[%]	klein	[%]	gross	[%]	gross	[%]	klein	[%]	klein	[%]	gross	[%]	gross	[%]	klein	[%]	klein	[%]
Gewicht [g]	Start		21,51		12,90		7,08		10,55		46,92		47,06		20,07		20,88		44,33		43,97		20,24		20,00	
Volumen [cm³]	26.07.2007		39,9		40,7		20,3		19,7		39,8		40,3		17,3		17,5		33,4		33,2		15,2		15,1	
Dichte [g/cm³]	16:00	0	0,54		0,32		0,35		0,54		1,18		1,17		1,16		1,20		1,33		1,32		1,33		1,32	
Breite quer Faser 1			29,5		30,2		30,3		29,7		29,6		30,0		29,4		29,5		30,9		30,6		30,6		30,6	
Breite quer Faser 2			29,6		30,4						29,5		29,5						30,7		30,7					
Länge paral. Faser 3			66,7		66,5		33,2		32,6		66,9		67,0		29,3		29,6		67,9		67,8		30,8		30,7	
Dicke bei Breite 1 4			20,2		20,2		20,2		20,3		20,1		20,0		20,1		20,0		16,1		16,1		16,1		16,1	
Dicke bei Breite 2 5			20,2		20,2						20,2		20,2						15,8		15,8					
Dicke Stirnseite links 6			20,2		20,2		20,2		20,3		20,0		20,2		20,1		20,0		16,1		16,1		16,1		16,1	
Dicke Stirnseite rechts 7			20,3		20,2						20,2		20,4						15,8		15,9					
Gewicht [g]	05.09.2007	979	24,2	12,4	14,5	12,2	7,9	12,1	11,9	12,5	52,1	11,0	52,4	11,3	22,4	11,5	23,1	10,5	45,6	2,9	45,3	3,0	20,9	3,3	20,6	3,2
Volumen [cm³]	11:00		43,5	9,2	43,2	6,1	21,8	7,3	21,5	9,5	49,5	24,5	50,0	24,3	21,8	26,2	21,8	24,7	34,9	4,6	34,6	4,3	15,8	4,4	15,8	4,7
Dichte [g/cm³]			0,56	3,0	0,34	5,8	0,36	4,5	0,55	2,8	1,05	-10,8	1,05	-10,4	1,02	-11,6	1,06	-11,4	1,31	-1,6	1,31	-1,3	1,32	-1,0	1,30	-1,4
Breite quer Faser 1			30,4	3,1	30,9	2,3	31,1	2,6	30,9	4,0	29,7	0,3	29,7	-1,0	29,5	0,3	30,7	4,1	31,0	0,3	30,7	0,3	30,7	0,3	30,7	0,3
Breite quer Faser 2			30,6	3,4	31,1	2,3					29,6	0,3	29,6	0,3					30,9	0,7	30,9	0,7				
Länge paral. Faser 3			66,9	0,3	66,6	0,2	33,4	0,6	32,7	0,3	68,6	2,5	69,1	3,1	30,6	4,4	29,8	0,7	68,0	0,1	67,9	0,1	30,8	0,0	30,7	0,0
Dicke bei Breite 1 4			21,4	5,9	20,9	3,5	21,0	4,0	21,3	4,9	24,0	19,4	24,0	20,0	24,2	20,4	23,8	19,0	16,8	4,3	16,8	4,3	16,8	4,3	16,8	4,3
Dicke bei Breite 2 5			21,4	5,9	20,8	3,0					24,7	22,3	24,7	22,3					16,5	4,4	16,4	3,8				
Dicke Stirnseite links 6			21,3	5,4	21,0	4,0	21,0	4,0	21,3	4,9	24,0	20,0	24,1	19,3	24,2	20,4	23,8	19,0	16,8	4,3	16,8	4,3	16,7	3,7	16,8	4,3
Dicke Stirnseite rechts 7	ENDE		21,2	4,4	21,0	4,0					24,7	22,3	24,9	22,1					16,2	2,5	16,2	1,9				

3.2.6.2 Bestimmung der Feuchteaufnahme von KHP

Untersucht wurde das Feuchteaufnahmevermögen von voll- und teilgetränktem KHP nach Lagerung im Wasserbad oder Beanspruchung bei hoher Luftfeuchte.

Die Diagramme (vgl. Abb. 3.30 bis Abb. 3.33) zeigen die Feuchteaufnahme der Prüfkörper in Masse-% bezogen auf die Masse zu Versuchsbeginn bei Lagerung im Klimaschrank bei einer Temperatur von 35°C und 98 % rel. LF nach DIN EN 60068-2-78 bzw. in einem Wasserbad von ca. 5 cm Tiefe. Die Holzfeuchte zu Versuchsbeginn betrug im Durchschnitt 3 % bei KHP A740-1

(vollgetränkt) bzw. 7 % bei KHP (vollgetränkt, Herstellerbezeichnung unbekannt). Je nach Serie dauerten die Versuche zwischen 650 und 1655 Stunden.

Tabelle 3.5: Masseänderung der Probekörper aus KHP (vollgetränkt) vor und nach künstlicher Bewitterung im Klimaschrank bzw. Lagerung im Wasserbad

Prüfkörper		Dauer in h /	Abmessung in mm			Masse in g		
Nr.	Material	Lagerung	Breite	Länge	Dicke	darrtrocken	Versuchsbeginn	Versuchsende
1	KHP A740-1 (vollgetr.)	980 / Klima	31	68	16	43,5	44,3	45,6
2	KHP A740-1 (vollgetr.)	980 / Klima	31	68	16	43,2	44,0	45,3
5	KHP A740-1 (vollgetr.)	980 / Klima	31	31	16	19,8	20,2	20,9
6	KHP A740-1 (vollgetr.)	980 / Klima	31	31	16	19,5	20,0	20,6
gr.	KHP A740-1 (vollgetr.)	1320 / Wasser	31	68	16	42,3	43,5	45,9
kl.	KHP A740-1 (vollgetr.)	1320 / Wasser	31	31	16	19,7	20,4	21,7
13	KHP (vollgetr.)	650 / Klima	30	66	17	44,2	46,7	49,6
14	KHP (vollgetr.)	650 / Klima	29	66	17	41,8	44,4	47,3
15	KHP (vollgetr.)	650 / Klima	30	66	17	43,8	46,4	49,3
16	KHP (vollgetr.)	650 / Klima	29	32	17	19,8	21,1	22,6
17	KHP (vollgetr.)	1655 / Wasser	31	68	17	46,1	50,4	59,7
18	KHP (vollgetr.)	1655 / Wasser	34	68	17	50,5	55,2	65,1
19	KHP (vollgetr.)	1655 / Wasser	31	31	17	20,1	22,3	26,5

Vergleicht man die Diagramme in Abb. 3.30 und Abb. 3.31 so lässt sich feststellen, dass das Material KHP A740-1 gegenüber dem Vergleichsmaterial KHP (ebenfalls vollgetränkt) eine um über 50 % geringere Feuchteaufnahme besitzt. Dies gilt sowohl für eine Lagerung im Feuchtklima als auch bei unmittelbarer Lagerung des KHP im Wasserbad.

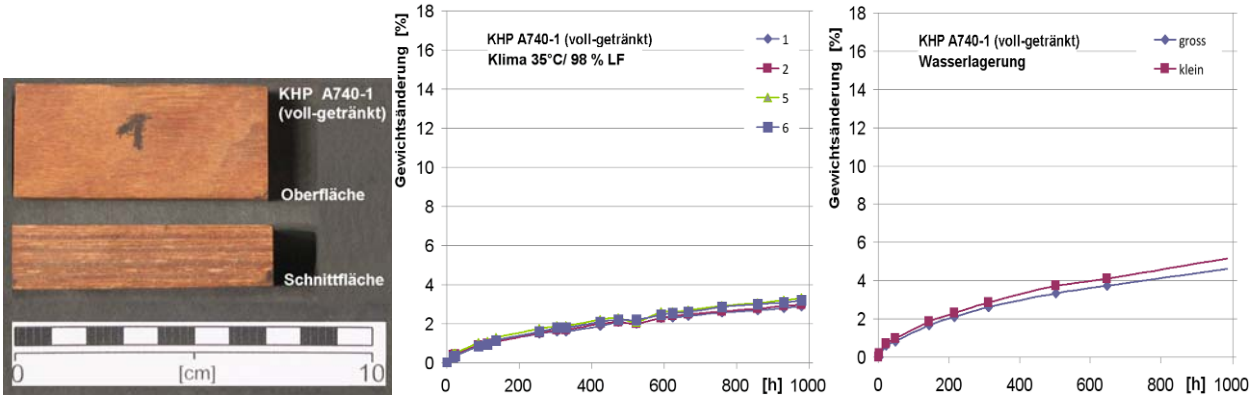


Abb. 3.30: Masseänderung von KHP A740-1 (vollgetr.) nach 1000 h Feuchtebeanspruchung

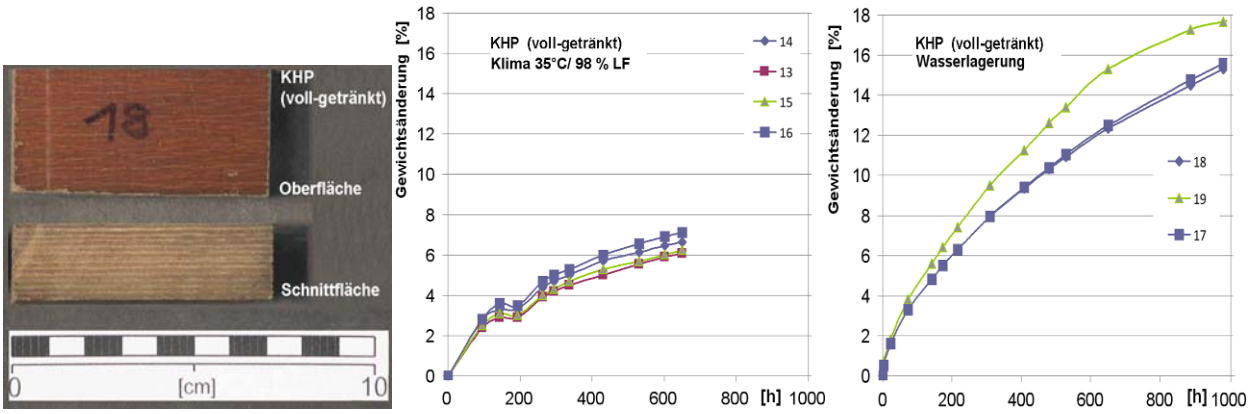


Abb. 3.31: Masseänderung von KHP (vollgetr., Herstellerbezeichnung unbekannt) nach 1000 h Feuchtebeanspruchung

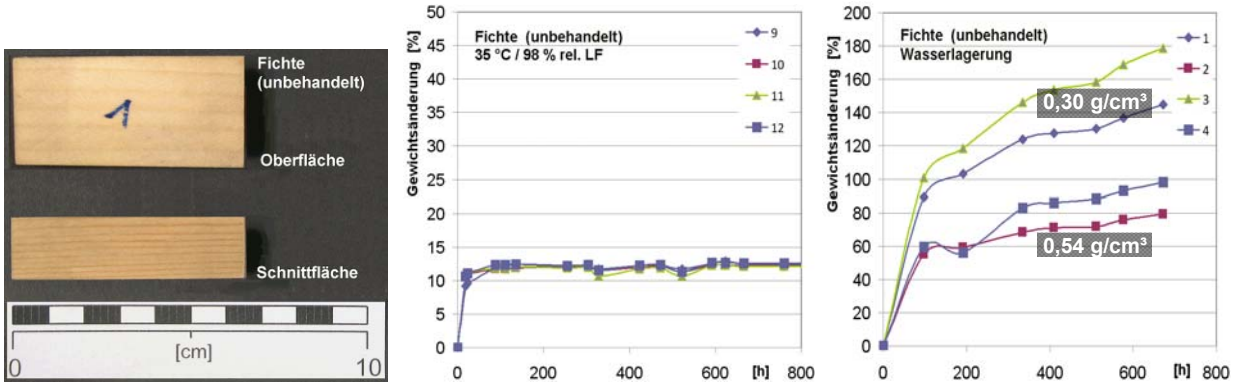


Abb. 3.32: Masseänderung von Fichte unbehandelt (Referenz) nach 800 h Feuchtebeanspruchung

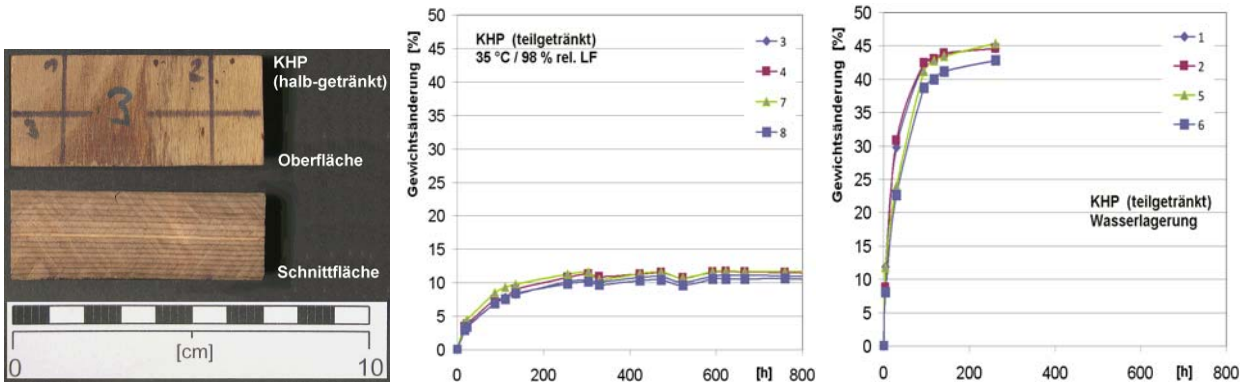


Abb. 3.33: Masseänderung von KHP A740-1 (halbgetr., Herstellerbezeichnung unbekannt) nach 800 h Feuchtebeanspruchung

Zum Vergleich zeigen Abb. 3.32 und Abb. 3.33 das Verhalten von unbehandelter Fichte und teilgetränktem KHP. Deutlich zu erkennen ist, dass die um ein vielfaches größeren Werte der Feuchteaufnahme bei Fichte oder teilgetränktem KHP ihr Maximum nach ca. 200 Stunden Feuchtebeanspruchung erreicht haben und im Gegensatz zu vollgetränktem KHP keine weitere Feuchteaufnahme mit fortscheitender Bewitterungsdauer stattfindet.

3.2.6.3 Bestimmung des Quell- und Schwindverhaltens von Verbundquerschnitten

Untersucht wurde das Quell- und Schwindverhalten von Verbundquerschnitten aus TMT bzw. KHP und konventionellem Voll- bzw. Brettschichtholz. Dabei wurden verschiedene veredelte Holzprodukte sowie unbehandeltes Fichten- und Lärchenholz einer zyklisch wechselnden Be- und Entfeuchtung im Klimaschrank oder im Wasserbad ausgesetzt und insbesondere die Verbundqualität der Leimfuge untersucht. Die Verbundquerschnitte wurden aus Kunstharzpressholz KHP (A740-1, vollgetränkt) und BSH-Fichte, TMT-Esche und Fichte, TMT-Esche und Lärche sowie TMT-Fichte und Fichte gefertigt. Die insgesamt 25 Probekörper hatten eine Länge von 7 cm in Faserrichtung. Die Probenbreite variierte zwischen 12 und 14 cm bei einer Probendicke von 4 bis 8 cm.

Zur Befeuchtung wurden die Proben zwölf Tage im Wasserbad gelagert oder im Klimaschrank bei 25°C und 90 % rel. Luftfeuchte befeuchtet. Anschließend wurden die Proben 24 Stunden im Heizschrank bei 40°C bzw. 65°C getrocknet.

Tabelle 3.6: Masse- und Geometrieänderung ausgewählter Probekörper nach künstlicher Bewitterung im Klimaschrank oder Wasserlagerung

	TMT-Esche/Fichte	TMT-Esche/Lärche	KHP/Fichte-BSH	TMT-Esche/Fichte	TMT-Esche/Lärche	KHP/Fichte-BSH	TMT-Esche/Fichte	TMT-Esche/Lärche	KHP/Fichte-BSH	TMT-Esche/Fichte	TMT-Esche/Lärche	KHP/Fichte-BSH	TMT-Esche/Fichte	TMT-Esche/Lärche	KHP/Fichte-BSH	TMT-Esche/Fichte	TMT-Esche/Lärche	KHP/Fichte-BSH	TMT-Esche/Fichte	TMT-Esche/Lärche	KHP/Fichte-BSH
Dauer [h]	**0**			240			264			294			312				578		610		
	Klimaschrank bei 25 °C/ 90 % rel. LF						Trockenschrank 75 °C						Klimaschrank bei 25 °C/ 90 % rel. LF						Trockenschrank 40 °C		
Gewicht [g]	**192,9**	**244,7**	**808,9**	**203,4**	**260,6**	**849,0**	**185,9**	**234,5**	**778,0**	**197,2**	**247,4**	**821,1**	**199,3**	**250,6**	**830,7**	**203,9**	**260,3**	**849,1**	**191,2**	**243,6**	**798,9**
Abmessung [mm]																					
TMT-Breite	120,7	135,9	93,5	122,3	137,8	93,8	120,1	135,5	93,7							122,5	138,3	93,7	121,3	136,8	93,8
TMT-Länge	72,3	73,4	67,9	72,3	73,5	67,9	72,2	73,4	67,9							72,2	73,5	67,9	72,3	73,5	67,9
Fuge-Breite	121,2	135,5	93,5	122,7	137,7	94,0	120,3	134,7	93,3							122,8	137,8	93,8	121,0	135,9	93,2
Fichte-Breit	120,5	135,2	93,1	123,1	138,0	95,2	119,0	133,4	91,4							123,1	137,5	95,0	119,4	134,6	92,3
Fichte-Länge	72,3	73,6	67,1	72,4	73,7	67,2	72,2	73,6	67,1							72,3	73,7	67,0	72,2	73,6	67,1
Fuge-Länge	72,7	74,2	67,6	72,8	74,3	67,6	72,6	74,1	67,9							72,8	74,2	67,6	72,7	74,2	67,6
Dicke an Breitseite	40,8	37,7	201,5	41,3	38,6	205,0	40,6	37,3	200,0							41,3	38,5	205,5	40,7	37,8	202,0
Dicke an Längsseite	39,5	37,8	200,5	40,4	38,7	203,5	39,3	37,3	199,0							40,3	38,7	203,0	39,4	37,7	200,0
				Wasserlagerung									Trockenschrank 65 °C								
Gewicht [g]	**188,7**	**243,7**		**264,1**	**338,6**		**266,9**	**341,8**		**270,2**	**344,6**		**187,5**	**242,2**							
Abmessung [mm]																					
TMT-Breite	121,1	136,0		123,9	139,7		124,0	140,0		124,0	139,9		121,9	136,9							
TMT-Länge	71,7	73,1		71,7	73,5		71,7	73,3		71,7	73,3		71,8	73,1							
Fuge-Breite	121,1	135,6		124,8	139,6		124,8	139,8		124,9	139,9		122,0	136,8							
Fichte-Breit	120,9	135,3		126,1	140,2		126,4	140,3		126,4	140,3		121,1	136,5							
Fichte-Länge	71,6	73,1		71,6	73,1		71,7	73,1		71,7	73,2		71,8	73,2							
Fuge-Länge	71,6	73,0		71,7	73,1		71,5	73,1		71,6	73,1		71,8	73,0							
Dicke an Breitseite	40,3	37,8		41,2	39,3		41,3	39,3		41,3	39,3		40,0	38,2							
Dicke an Längsseite	39,0	37,8		40,5	39,3		40,5	39,3		40,3	39,3		38,6	37,9							

Die verminderte Feuchteaufnahme von KHP und TMT führte im Verbund zu insgesamt geringeren Quellerscheinungen (vgl. Tabelle 3.6). Bei allen untersuchten Materialien kam es nur durch den Quellvorgang zu keinen sichtbaren Schäden. Die sich an eine Befeuchtung der Proben anschließende Trocknung bei 40°C im Trockenschrank resultierte in feinen über den Verbundquerschnitt verteilten Schwindrissen. Die vergleichsweise scharfe Exposition im Trockenschrank bei einer Temperatur von 65°C führte schon nach wenigen Stunden zu einer starken Ausbreitung von Schwindrissen sowohl im unbehandelten als auch im kunstharzgetränkten oder thermisch vergüteten Holzquerschnitt. Bei zuvor im Wasserbad getränkten Proben versagte örtlich sogar die Leimfuge und Delaminationen wurden sichtbar.



Abb. 3.34: Verbundquerschnitte aus TMT-Esche und Lärche (links), TMT-Esche und Fichte (Mitte) sowie Fichte-BSH mit KHP-Decklamellen (rechts) vor der Bewitterung

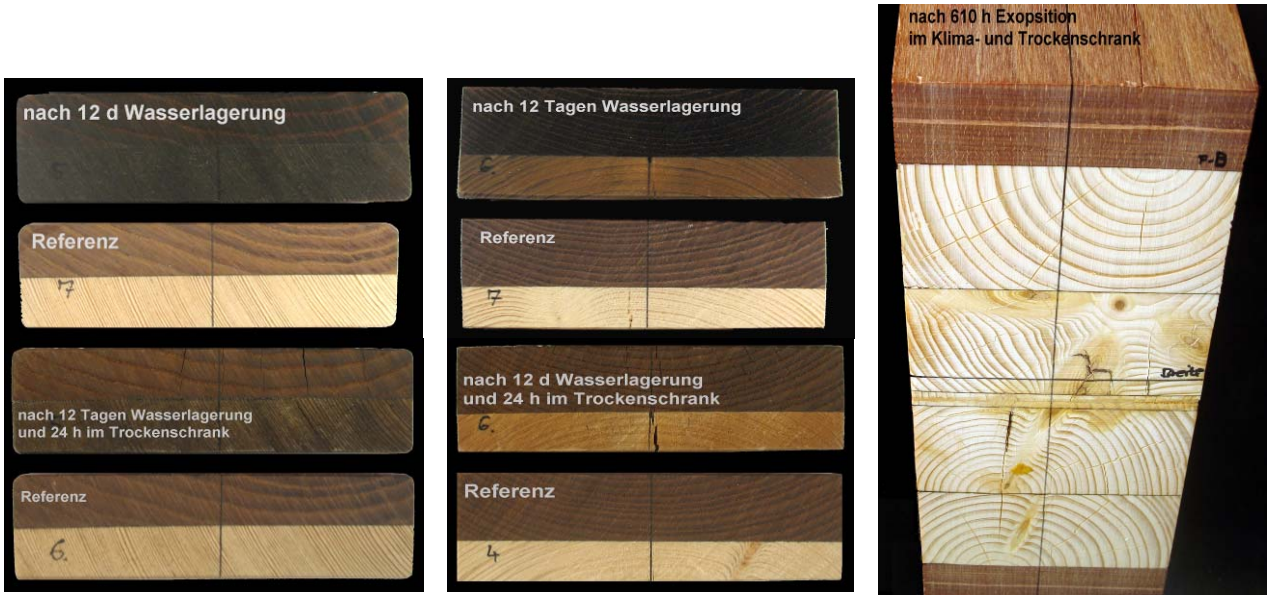


Abb. 3.35: Verbundquerschnitte aus TMT-Esche und Lärche (links), TMT-Esche und Fichte (Mitte) sowie Fichte-BSH mit KHP-Decklamellen (rechts) nach der Bewitterung

Als Ergänzung zur Beurteilung des Feuchteverhaltens befinden sich Verbundbohlen in Bauteilgröße in der Freibewitterung. Das veredelte Holz wurde über ein zugelassenes PUR-Leimsystem mit dem unbehandelten Fichtenholz verleimt. Nach einem Jahr in der Freibewitterung ist der Verbundquerschnitt formstabil und außer Verfärbungen oder feinen Schwindrissen an den Stirnseiten sind keine nennenswerten Bewitterungsschäden feststellbar.

3.2.6.4 Formholzrohre in der Freibewitterung

Seit Januar 2007 befinden sich sechs Rohrsegmente (vgl. Tabelle 3.7) im Freilandversuch. Die Formholzprofile aus Fichtenholz besitzen einen Außendurchmesser von 15 cm, eine Wandstärke von 2 cm sowie eine Höhe von ca. 30 cm. Sie wurden auf dem Versuchsgelände in Freital-Hainsberg auf Pfählen in 1 m Höhe über dem Erdboden so befestigt, dass die untere Stirnseite der Rohre offen ist und die obere Stirnseite mit einer Kunststoffabdeckung verschlossen wird. So ist das Innere der Formholzprofile vor Spritz- und Regenwasser geschützt, aber eine Durchlüftung problemlos möglich. Die Stirnseiten sowie ein kleiner ca. 2 cm breiter Randstreifen wurden mit einer Beschichtung entsprechend Tabelle 3.7 zusätzlich vor Witterungseinflüssen geschützt.

Tabelle 3.7: Oberflächenbehandlungen der Formholzrohre für die Freibewitterung

Formholz-Rohr	1	2	3	4	5	6
Oberfläche	**unbehandelt**	**Lasur-Anstrich**	**textilverstärkt**			
Matrix	-	Lasur	Epoxid-Harz			
Textile Verstärkung	-	-	Glastextilkomplex (540 g/m²)			
Schichtenaufbau	-	3 Anstriche	Vlies-Lage (140 g/m²) auf Holz geleimt, UD-Lage (400 g/m²) außen			
Orientierung	-	-	UD-Lage in Umfangsrichtung			
Wetterschutzcoating (Matrix, Farbton)	-	-	-	Glossfinnish (UP, transp.)	Vorgelat (UP, transp.)	90% Vorgelat (UP, transp)
Abtönung (Matrix, Farbton)	-	Lasur im Farbton teak	-	-	-	10% Farbpaste (UP, silbergrau)
Laminierung	-	-	RTM - Verfahren		von Hand	
Stirnseiten	transp. Coat.	Lasur	transp. Coating			
Geometrie (ca.) Länge: 30 cm Ø-außen: 15 cm Wandstärke: 2 cm						

Nach bis zu zwei Jahren natürlicher Bewitterung befanden sich alle Formholzprofile in einem guten Zustand. Einzig das unbehandelte Rohr zeigte eine deutlich sichtbare Bewitterung der Oberfläche sowie vereinzelte Risse in den mit Epoxidharz versiegelten Stirnseiten.

Der Zustand der Formholzprofile mit und ohne textile Verstärkung ist auch nach über drei Jahren Bewitterung nach visueller Kontrolle gut. Schäden am Laminat bzw. ein abnehmender Verbund zwischen Laminat und Formholz konnten nicht festgestellt werden. Mit fortschreitender Bewitterungsdauer zeigt sich jedoch verstärkt die Notwendigkeit einer Erneuerung der Oberflächenbeschichtung. Die aufgebrachte Wetterschutzschicht auf Basis von Epoxidharz blättert vereinzelt ab und setzt damit die darunter liegende Schicht der textilen Verstärkung den Umweltfaktoren aus. Auch das ausschließlich mit Lasur behandelte Rohrsegment ist von Materialauswaschungen und damit einhergehenden Oberflächenverfärbungen gekennzeichnet.

In einem Abstand von ca. ein bis zwei Monaten wurden die Probekörper vermessen, gewogen und fotografiert. Beim Vermessen werden der Durchmesser, die Wandstärke und die Rohrlänge jeweils an den Viertelspunkten des Kreisquerschnittes an beiden Stirnseiten der Rohrprofile bestimmt. Zur exakten Markierung der Messstellen wurden jeweils an der oberen Stirnseite der Rohre vier Nägel eingeschlagen. So konnten mit Hilfe eines Messschiebers die Abstände der mit Nägeln markierten Viertelspunkte auf 0,1 mm genau vermessen werden. Die gedachte Verbindungslinie zwischen gegenüberliegenden Messstellen bildet jeweils eine Achse des kartesischen Koordinatensystems (X; Y) mit dem Mittelpunkt des Kreisquerschnittes als Koordinatenursprung.

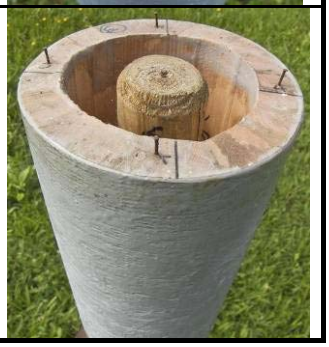
Die Diagramme in Abb. 3.37 zeigen entsprechend die Veränderung der Querschnittsform anhand der Messwerte des Durchmessers in X- und Y-Richtung sowie die Veränderung der Masse der Formholzrohre mit zunehmender Bewitterungsdauer. Die Datenkurven der unbewehrten Formholzrohre (1 Fichte unbehandelt und 2 Fichte mit Lasur behandelt) heben sich deutlich von den Kurven der textilverstärkten Rohre (3, 4, 5 und 6) ab. Erwartungsgemäß zeigen damit die textilverstärkten Rohrsegmente im Vergleich zu unbewehrten Probekörpern nur vernachlässigbare Verformungen auf Grund von Quellen und Schwinden.

Die in den Wintermonaten aufgetretene Massezunahme ist bei den unverstärkten Rohren um den Faktor 1,5 größer und erreichte im Dezember 2009 mit 10 % Masseänderung ihren Maximalwert. In den Sommermonaten kehrte sich der Prozess um und die unbewehrten Formholzrohre trockneten im Vergleich zu den bewehrten Formholzrohren auch wieder stärker ab, so

dass alle Rohre fast einheitlich den Minimalwert von ca. 3 % Masseänderung im Vergleich zur Masse bei Witterungsbeginn erreichten.

Dieses periodische Schwanken bzw. die starken jahreszeitlichen Änderungen der Messwerte zeigten sich auch bei den Untersuchungen der Durchmesser der unbewehrten Formholzrohre. Auf Grund der fehlenden textilen Verstärkung kann der unverstärkte Querschnitt ohne äußere Zwänge quellen und schwinden. Die damit einhergehende Zu- und Abnahme des Rohrumfanges erfolgt überwiegend gleichmäßig. Die größten Änderungen des Durchmessers in X- und Y-Richtung waren mit ca. 14 bzw. 12 % annähernd gleich groß, was letztlich zum Erhalt der kreisrunden Form des Querschnittes über die gesamte Bewitterungszeit führte.

Tabelle 3.8: Unverstärkte und verstärkte Formholzrohre (Nr. 2, 3 und 6) in der Freibewitterung

Dauer der Freibewitterung	unverstärkt mit Lasuranstrich	textilverstärkt, ohne Wetterschutzcoating	textilverstärkt, graues Wetterschutzcoating
4 Monate			
20 Monate			
42 Monate			

Im Gegensatz dazu werden bei den bewehrten Formholzrohren die Beanspruchungen beim Quellen in Rohrumfangsrichtung vom Laminat aufgenommen. Der sich einstellende Quelldruck erzeugt im Formholzquerschnitt in Abhängigkeit von der Materialfestigkeit, Rohdichte und Wandstärke unterschiedliche Druckspannungen. Da jedoch die Rohdichte von Holz einer natürlichen Streuung unterliegt, ist damit auch das Materialverhalten bzw. die Querschnittsverfor-

mung beim Quellen wie auch beim Schwinden lokal unterschiedlich ausgeprägt. Dies kann, wie es insbesondere bei den bewehrten Formholzrohren 3 und 4 geschehen ist, zu einer Ovalisierung des einst kreisrunden Querschnittes führen. Eine Zunahme des Durchmessers in der einen Richtung ist direkt mit einer Abnahme des Durchmessers in der senkrecht dazu liegenden Richtung verbunden. Falls diese kaum sichtbare Formänderung (max. 2 % des Rohrdurchmessers) auftritt, ist sie nach ca. zwölf Monaten abgeschlossen. Danach stattfindende Feuchteauf- oder -abnahmen des Formholzes haben nahezu keinen Einfluss mehr auf den Rohrdurchmesser (vgl. Diagramme in Abb. 3.37, unten). Dies ist überraschend, denn die Werte für die Masseänderungen sind auch über das erste Jahr hinaus unverändert hoch und zeigten keine Abnahme mit zunehmender Bewitterungsdauer.

Grundsätzlich kann bei allen untersuchten Formholzrohren die Änderung der Wandstärke bzw. der Länge des Rohrs über den gesamten Bewitterungszeitraum vernachlässigt werden. Bei 300 mm Rohrlänge betrug die größte gemessene Längenänderung ca. 2 mm. Bei einer durchschnittlichen Wandstärke von 22 mm betrug die Differenz zwischen Quellen und Schwinden ca. 0,5 mm. Bei den Längen- und Dickenmessungen der Formholzrohre wurde kein Einfluss der Bewehrung festgestellt. Mit der eingesetzten Messtechnik konnte allerdings nicht die große Genauigkeit auf ein Zehntel mm wie bei der Querschnittsvermessung erreicht werden.



Abb. 3.36: Detailaufnahmen von Formholzrohr Nr. 1 (unverstärkt und unbehandelt) ca. aller zwei Monate in der Freibewitterung aufgenommen

Abb. 3.36 zeigt für das unbewehrte und unbehandelte Formholzrohr einen Ausschnitt der oberen Rohrwand über einen Bewitterungszeitraum von 2,5 Jahren. Die an den Messstellen eingeschlagenen Nägel sowie die mit Epoxidharz versiegelten Stirnseiten sind gut erkennen.

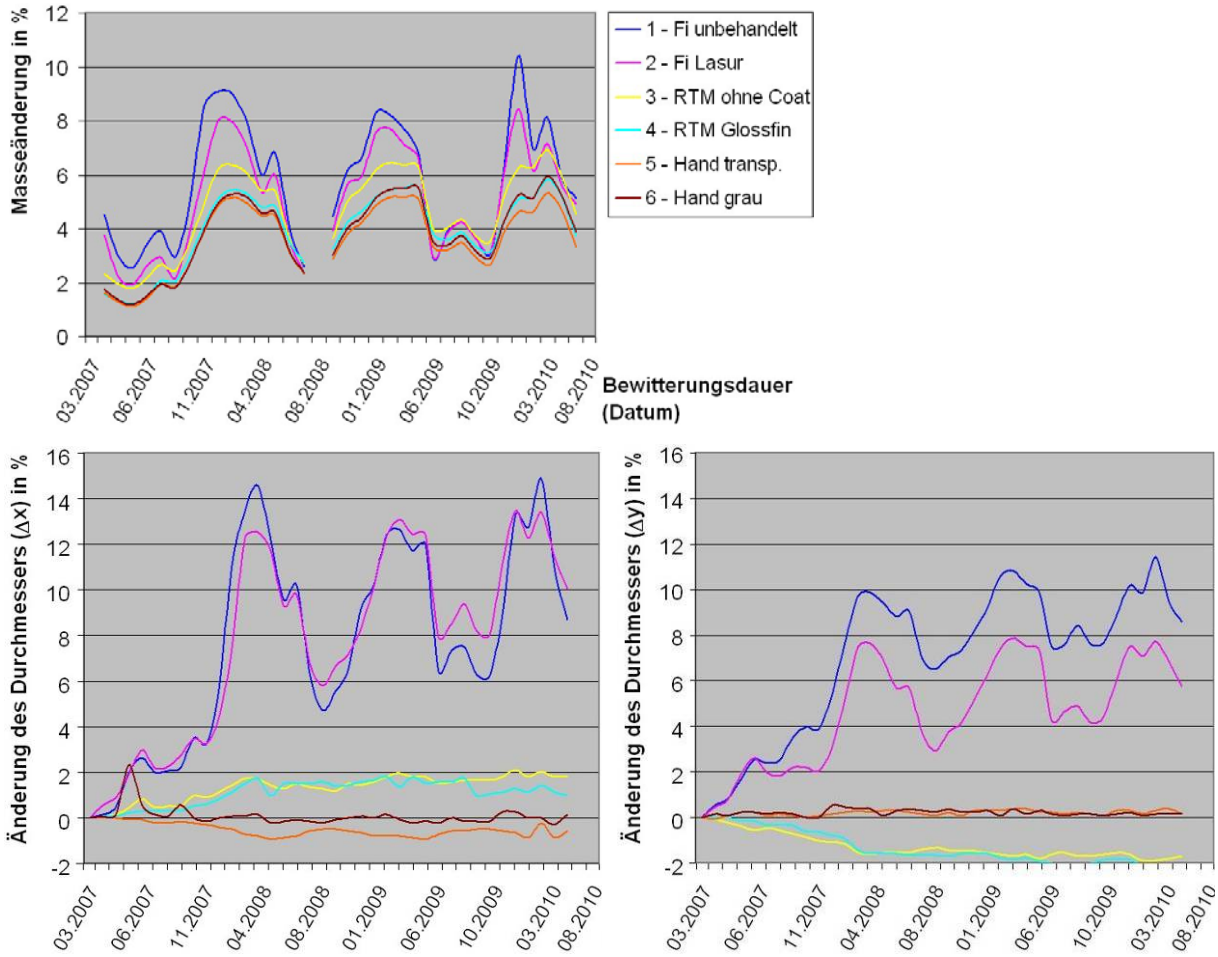


Abb. 3.37: Masse und Geometriedaten der Formholzrohre im Verlauf der Freibewitterung

Im November 2009 wurden drei weitere textilverstärkte Formholzrohre zur Freibewitterung ausgelagert. In Anlehnung an die durchgeführten Druckversuche (vgl. Abschn. 3.5.2) handelte es sich dabei um Rohre mit einem Durchmesser von 30 cm. Das applizierte Laminat mit einer Dicke von ca. 1 mm besteht aus Kohlefasern und wurde zu Vergleichszwecken sowohl mit als auch ohne einen farblosen Wetterschutzanstrich auf Epoxidharz-Basis behandelt. Die CFK-Rohre mit einer Faserwicklung im Winkel von etwa 90° sind 60 cm lang, das Rohr mit einer Wicklung im Winkel von 45° ist 30 cm lang. Bereits nach einem knappen Jahr in der Freibewitterung wirkt das Laminat ohne Wetterschutzcoating matt. Neben diesen sichtbaren Witterungserscheinungen bildeten sich jeweils an den Rändern der Wicklungen im Laminat feine Delaminationen, die zu einer leicht aufgerauten Oberfläche führten. Diese feinen Fehlstellen sind damit Angriffspunkte für Schmutz- oder Moosablagerungen, welche das Laminat zusätzlich beanspruchen.

Dagegen zeigen die Laminate mit Wetterschutzschicht eine unverändert glatte, glänzende Oberfläche ohne jeden Mangel. Diese Beobachtungen unterstreichen die gute Schutzwirkung eines abschließenden Coatings auf dem Laminat.

3.2.7 Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit

Autoren: Jan Fandler (Hess), Petra Kubowitz (IaFB), Robert Putzger (ISH)

3.2.7.1 Delaminationsprüfungen

Autor: Jan Fandler (Hess)

3.2.7.1.1 Delaminierungsprüfungen Fichte / KHP

Da die beiden Holzarten Fichte und Buche-Kunstharzpressholz (KHP), bedingt durch ihre unterschiedlichen Materialeigenschaften in ihren Oberflächen auf sehr unterschiedliche Weise den Klebstoff in der Flächenverklebung aufnehmen, war mit den Proben zu prüfen, ob die Klebfugen in den Delaminierungsprüfungen haltbar bleiben.

Bei der Wahl des Klebstoffes wurde Resorcinleim zur Lamellenverklebung gewählt, da zu diesem Klebstoff bisher sehr gute Erfahrungen für Flächenverklebungen unterschiedlicher Holzarten gemacht wurden.

Die Proben wurden im Rahmen der Herstellung von Biegeprüfträgern mit dem Hybrid-Aufbau Fichte/KHP entnommen.

Bei keiner der Delaminierungsprüfungen zeigte sich eine Öffnung der Klebfuge Fichte/KHP. Jedoch zeigte sich, dass KHP (nicht getränkt) Öffnungen zwischen den KHP Schichten aufweist, KHP (getränkt) jedoch nicht.

KHP (nicht getränkt) war zudem nach dem Delaminierungstest in seinen Abmessungen deformiert und gequollen.

Die Verbundfuge von KHP-BSH-Verbundträgern aus Lärche und KHP wurde vom ISH im Klimaschrank geprüft (vgl. Kap. 3.2.3.4).



Abb. 3.38: Delaminierungsprobe Fichte/KHP (KHP nicht getränkt)

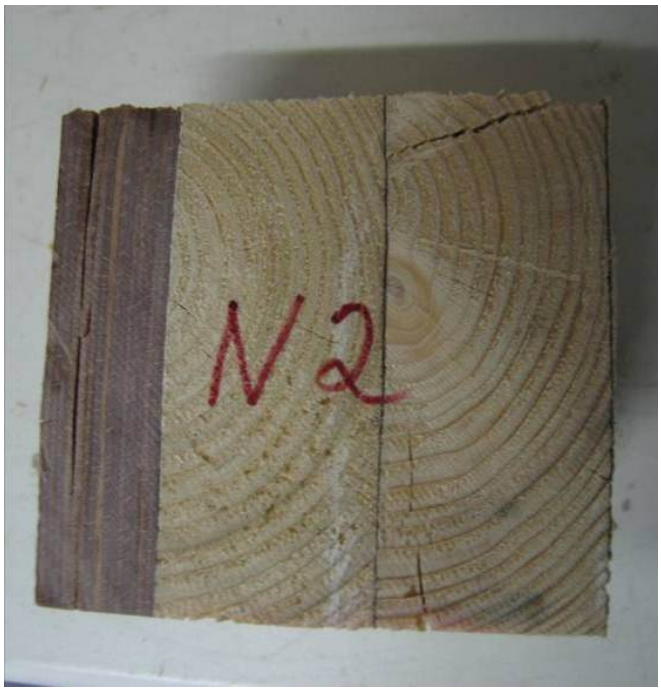


Abb. 3.39: Probe mit delaminierter Klebfuge in der KHP-Lamelle (KHP nicht getränkt)

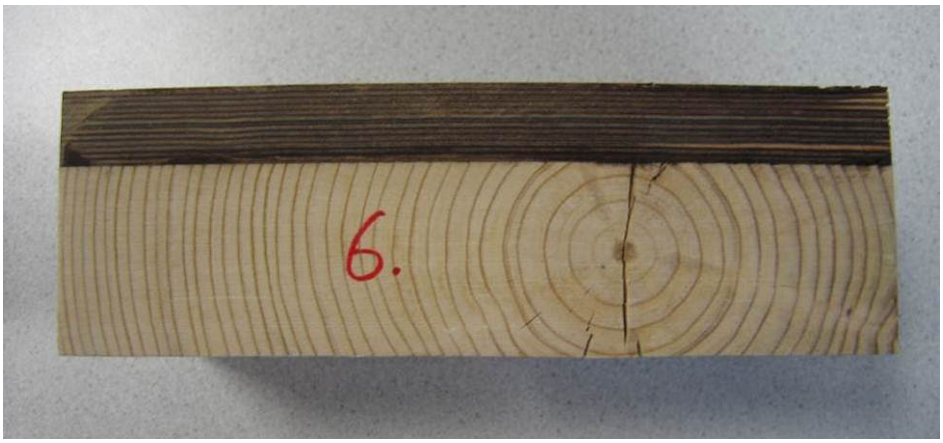


Abb. 3.40: Delaminierungsprobe Fichte/KHP (KHP getränkt)

3.2.7.1.2 Delaminierungsprüfungen Thermoholz

Zur Ausführung des Brückenbelags der HHT-Brücke im Pilotprojekt „Fußgängerbrücken“ ist eine Kombination aus thermisch modifiziertem Eschenholz (TMT) und alpinem Lärchenholz geplant.

Die Brückenbohlen sind jeweils aus einer Lamelle beider Holzarten verleimt. Da beide Holzarten unterschiedliche Holzfeuchtigkeiten nach technischer Trocknung und thermischer Behandlung aufweisen, war es nun Ziel, mit der Delaminierungsprüfung nach DIN EN 391: 2001 die Dauerhaftigkeit der Klebfuge bei der Kombination dieser Holzarten zu prüfen.

Betrachtet man den für Thermoholz spezifisch geringen Feuchtegehalt und die damit verbundene Sprödigkeit des Holzes, so stellt die Delaminierungsprüfung für Brettschichtholz eine nicht geeignete Prüfungsart für dieses Holz dar, da TMT infolge der durch die Delaminierungsprüfung induzierten Querzugspannungen versagt, ohne dass der Bereich der Klebfuge überhaupt qualitativ beurteilt werden kann.

In einem Vorversuch wurden Proben hergestellt, die aus der Holzart Fichte hergestellt wurden. Es wurden Proben mit Resorcinklebstoff (Klebstoff Dynea Prefere 4994 in Verbindung mit Härter Prefere 5827) und Polyurethan-Klebstoff (Dynea Prefere 6000) angefertigt.

Im Ergebnis zeigte sich bei der TMT-Esche starke Rissbildung. Ursächlich hierfür ist der geringe Feuchtigkeitsgehalt des Holzes, der die Dehnfähigkeit des Holzes unter Querzugspannungen erheblich herabsetzt.

Auffällig waren zudem die mittels Polyurethan (PU) verleimten TMT-Esche - Lärche Proben. Hierbei kam es nach der Delaminierung zur Öffnung der Klebfugen. Zu begründen ist dies zum Teil mit dem geringen Feuchtigkeitsgehalt des TMT. Da PU-Klebstoff für die Aushärtung die Feuchtigkeit des angrenzenden Holzes benötigt, ist der unzureichende Feuchtigkeitsgehalt der TMT Esche ursächlich für die Verhinderung der vollständigen Aushärtung der Klebfuge. Allerdings konnte bei den Proben aus TMT-Esche und Fichte mit PU-Verklebung kein solches Verhalten beobachtet werden. Hier kam es zwar auch zu geringfügigen Öffnungen, mit maximal 3,4% der Leimfugen lagen diese jedoch deutlich im zulässigen Bereich. Daher wird vermutet, dass die Lärche selbst zu einem nicht unerheblichen Teil für die schlechte Klebwirkung des PU-Klebstoffes verantwortlich ist. Dafür spricht, dass eine Verklebung von Lärchenkernholz für die Außennutzung mit 1-K-PU-Klebstoffen aufgrund von im Lärchenholz eventuell vorkommenden Inhaltsstoffen in Einzelfällen problematisch sein kann und ungünstigstenfalls Ablösungen auftreten können. Menge und Art der Lärcheninhaltsstoffe unterliegen je nach Wuchsgebiet und Alter der Bäume Schwankungen. Für den ausgewählten 1-K-PU Klebstoff DYNEA Typ Prefere 6000 wird vom Hersteller jedoch keine Einschränkung der Verwendbarkeit für Lärche angegeben. Nichtsdestotrotz erwies er sich für die Verklebung von Lärchenkernholz mit TMT-Esche als ungeeignet. Hier überlagerten sich wohl die ungünstigen Bedingungen der geringen Holzfeuchte (des TMT) und einiger Kerninhaltsstoffe (der Lärche).



Abb. 3.41: Delaminierungsprobe aus Fichtenholz mit TMT-Esche

3.2.7.1.3 Delamierungsprüfungen verdichteter Platten

Rohrquerschnitte werden aus zuvor stabverleimten verdichteten Fichtenholzplatten umgeformt.

Im Rahmen der Herstellung der stabverleimten Platten, welche dann zu Rohren umgeformt werden, sind Delaminierungsproben entnommen worden.

Zur Breitenverklebung der Stäbe zu Platten wurde Resorcinleim mit fugenfüllender Eigenschaft (Klebstoff Prefere 4094 in Verbindung mit dem Härter Prefere 5827, Dynea ASA, Norwegen), verwendet.



Abb. 3.42: Angelieferte verdichtete Lamellen aus Fichtenholz von Dehonit



Abb. 3.43: Stabverleimung des verdichteten Fichtenholzes zu Platten

Die Vorgehensweise der Entnahme und Prüfung der Proben wurde in Anlehnung an DIN EN 391:2001 [63] vorgenommen. Bedingt durch die Plattenabmessungen konnten keine normkonformen Probenabmessungen entnommen werden.

Nach Beanspruchung der Proben im Delaminierungsofen und anschließender Trocknung zeigte sich folgendes Ergebnis:

Bei den Proben aus verdichtetem Fichtenholz konnten keine geöffneten Klebstofffugen, die als Delaminierungen betrachtet werden, festgestellt werden. Es trat kein Versagen der Klebstofffuge zwischen der Klebstoffschicht und dem Holzuntergrund, noch nahe den ersten Zellschichten

auf. Auffällig ist die deutliche Verformung der Proben. Das zuvor verdichtete Holz ist durch den Feuchteeintrag der Delaminierungsprüfung ungleichmäßig gequollen.



Abb. 3.44: Stirnansicht Delaminierungsprobe aus verdichtetem Fichtenholz



Abb. 3.45: Seitenansicht Delaminierungs-probe aus verdichtetem Fichtenholz

3.2.7.2 Dauerhaftigkeit alpiner Lärche

Autor: Petra Kubowitz (IaFB)

3.2.7.2.1 Allgemeines

Europäische Lärche wird nach DIN EN 350-2 (vgl. [56]) in die Dauerhaftigkeitsklasse 3-4 (mäßig bis wenig dauerhaft) eingestuft. Diese Klassifizierung bezieht sich auf die Haltbarkeit von Holz in Erdkontakt (Gefährdungsklasse 4). Da Untersuchungen von Rapp und Augusta (siehe [173]) bekannt sind, die bestätigen, dass sich die Dauerhaftigkeit bei Verwendung im Außenbereich ohne Erdkontakt (Gefährdungsklasse 3) verbessert, sollte für einige Pilotprojekte Lärchenholz im Außenbereich verwendet werden. Ziel war, auf chemischen Holzschutz verzichten zu können.

Es bestand die Vermutung, alpine Lärche (europäische Lärche aus alpinen Lagen, Wuchsgebiet oberhalb von 1000 m ü. N.N.) könne eine höhere Dauerhaftigkeit aufweisen als „normale“ europäische Lärche, da sie durch langsameres Wachstum (aufgrund der Kargheit des Standortes) mehr Kerninhaltsstoffe bildet. Diese Kerninhaltsstoffe sind vor allem im Spätholz vorhanden und nehmen vom Stamminneren nach außen zu. Ältere Bäume mit vielen (äußeren) Jahrringen sowie enge Jahrringe mit hohem prozentualem Spätholzanteil sollten folglich eine hohe Dauerhaftigkeit liefern (vgl. beispielsweise [172]). Andere Untersuchungen weisen darauf hin, dass die Farbe des Kernholzes ausschlaggebendes Indiz für das Vorhandensein der für die Dauerhaftigkeit verantwortlichen Kerninhaltsstoffe ist (vgl. [169] - [171]). Da die Forderung nach einer bestimmten Farbe bei Holzbestellungen im Bauwesen zurzeit jedoch schwer zu realisieren ist, wurde auf diese Angabe verzichtet und untersucht, inwieweit die Forderung nach alpinem Wuchsgebiet bzw. Einschlag oberhalb von 1000 m ü .N.N. ausreichend ist, um eine bessere Dauerhaftigkeitsklasse als 3-4 zu erreichen.

Zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit alpiner Lärche wurden daher (im März 2009 und Dezember 2009) zwei Prüfungen gegen holzzerstörende Basidiomyceten in Auftrag gegeben. Die Prüfungen der Dauerhaftigkeit von Handelssortimenten alpiner Lärche gegen holzzerstörende Basidiomyceten wurden an der Entwicklungs- und Prüflabor Holztechnologie GmbH (EPH) nach DIN CEN/TS 15083-1 bzw. DIN EN 350-1 mit den Prüfpilzen Coniophora puteana und Oligoporus placenta durchgeführt.

3.2.7.2.2 Versuchsergebnisse der ersten Prüfung

Die Lärchenprobekörper wurden vor der ersten Pilzprüfung einer zweiwöchigen Auswaschbeanspruchung (künstliche Alterung durch Lagerung im Wasserbad) unterzogen. Dies ist für eine Dauerhaftigkeitsprüfung nicht erforderlich, kann jedoch sinnvoll sein, wenn das Material später im Außenbereich eingesetzt wird. Üblicherweise wird die Auswaschung bei der Eignungsprüfung von Holzschutzmitteln für den Außenbereich eingesetzt. Die Referenzproben aus Kiefern-

splintholz wurden keiner Auswaschung unterzogen. Alles Weitere kann dem Prüfbericht [165] entnommen werden. Unter diesen Randbedingungen ergab sich für das geprüfte Lärchensortiment die Dauerhaftigkeitsklasse 4 nach DIN CEN/TS 15083-1 [59] bzw. Dauerhaftigkeitsklasse 5 nach DIN EN 350-1 [55].

Vergleicht man jedoch die erhaltenen Masseverluste mit anderen Prüfungen an Lärchenholz, fällt Folgendes auf: Der Masseverlust der Referenzhölzer aus Kiefernsplint ist sehr gering. Beispielsweise wird in [168] ein Masseverlust von 55% für Coniophora puteana und 29% für Oligoporus placenta angegeben, in [172] ein Masseverlust von 66,1% für Coniophora puteana (wobei nicht mit Oligoporus placenta getestet wurde). In unserem Fall erhielten wir Masseverluste von 34,5% für Coniophora puteana und 22,7% für Oligoporus placenta. Dies könnte bedeuten, dass die verwendeten Referenzproben eine erstaunlich hohe natürliche Dauerhaftigkeit aufweisen. Da Splintholz verwendet wurde, ist dies jedoch nicht sehr wahrscheinlich. Vielmehr deuten die geringeren Masseverluste darauf hin, dass die Pilze weniger aggressiv waren. Infolgedessen müssten jedoch auch die Masseverluste am Lärchenholz geringer sein. Dem ist jedoch nicht so. Während in [168] Masseverluste von 21% für Coniophora puteana und 20% für Oligoporus placenta ermittelt wurden, erhielten wir Masseverluste von 22,4% für Coniophora puteana und 22,9% für Oligoporus placenta. (Der Vergleich mit [172] wird nicht herangezogen, da dort sibirische Lärche getestet wurde, hierbei wurden für Coniophora puteana Masseverluste von im Mittel 23,2% bestimmt, bei einer sehr hohen Schwankungsbreite von 2,5% bis 53,7%.) Besonders stutzig macht der Masseverlust von 22,9% für Oligoporus placenta, der damit sogar geringfügig höher ist als der des Referenzsplintholzes (22,7%). Dieses schlechte Ergebnis erscheint zunächst nicht plausibel. Dass ein Lärchenkernholz weniger dauerhaft sein soll als ein Kiefernsplintholz, ist schwer vorstellbar, daher wurden zur Ergebnisinterpretation und Ursachenforschung neben eigenen Überlegungen auch aus der Literatur bekannte Fachleute herangezogen. Die Fragestellungen lauteten:

- War das getestete Holz evtl. keine alpine Lärche oder diese zu schnell gewachsen, so dass wenige Kerninhaltsstoffe gebildet wurden? War das Holz zu jung? Lag teilweise Splintholz statt Kernholz vor?
- War die Prüfung fehlerhaft?
- Kann die Auswaschbeanspruchung dieses schlechte Resultat bewirken?
- Welche weiteren Ursachen könnten für das schlechte Ergebnis verantwortlich sein?

3.2.7.2.3 Ursachenforschung und Ergebnisinterpretation bzgl. der ersten Prüfung

Laut optischer Einschätzung des IHD lag beim geprüften Material tatsächlich Lärche aus alpinem Wuchsgebiet vor. Das Lärche liefernde Sägewerk bestätigte dies. Die Lärche wurde demnach über einen Lieferanten bezogen und stammt lt. Aussage aus Österreich, Wuchs oberhalb von 800 m. Das genaue Einschlaggebiet konnte jedoch auch auf Nachfrage nicht genannt werden. Das Baumalter hätte sich nur noch durch Zählen der Bohlenjahrringe abschätzen lassen. Deutlich mehr Jahrringe als die Bohlen dürfte der Stamm wegen der großen Bohlenbreite von 20 cm nicht gehabt haben. Mit durchschnittlich 6 Jahrringen/cm ergäbe sich so ein Alter von etwa 60 Jahren. Da dies jedoch nicht weiter überprüft werden konnte (die Stämme lagen nicht mehr vor) und daher mit großen Unsicherheiten behaftet ist, wird darauf nicht weiter eingegangen. Die Splintanteile waren laut IHD gering. Es wurde darauf geachtet, dass Fehler und Splintholz herausgeschnitten wurden.

Die verwendeten Pilzkulturen waren normkonform (nach DIN CEN/TS 15083-1, Pkt. 5.1.1 [59] bzw. DIN EN 113, Pkt. 5.1 [53]). „Oligoporus placenta“ entspricht „Poria placenta“. (vgl. auch Pilznamensliste [174]). Die Mindestwerte der Masseverluste an den Kiefernreferenzproben waren eingehalten. Dass diese Werte geringer ausfielen als in anderen Veröffentlichungen (vgl. [168] und [172]) ist kein Indiz für eine fehlerhafte Prüfung sondern liegt an der schwankenden Aktivität der Pilze. Andere Fehler im Versuchsablauf sind ebenfalls nicht bekannt. Allgemein schwanken die Ergebnisse von Dauerhaftigkeitsprüfungen bei Lärche stark, weshalb immer

wieder verstärkt über Lärche diskutiert wird, obwohl europäische Lärche allgemein in DIN 350-2 [56] mit der Dauerhaftigkeitsklasse 3-4 angegeben wird.

Bzgl. des Einflusses der Auswaschbeanspruchung gibt es sehr unterschiedliche Ansichten in der Fachwelt. Dass ein Einfluss vorhanden ist, ist unumstritten, fraglich ist jedoch, wie hoch dieser ausfällt. Während Frau Augusta (Autor von z.B. [168]) und Herr Koch (Autor von z.B. [172]) von einem sehr geringen Einfluss des Auswaschens auf die Dauerhaftigkeit ausgehen, vermutet Frau Gierlinger (Autor von z.B. von [169], [170]), dass die Auswaschbeanspruchung erheblichen Einfluss auf das Versuchsergebnis haben kann. Der Grund dafür sind die vielen wasserlöslichen Kerninhaltsstoffe, die speziell Lärche aufweist. Dies ist in erster Linie Arabinogalactan, ein Zucker, der nicht nur in der Zellwand sondern auch im Lumen vorhanden ist. Dieser Zucker ist lärchenspezifisch, sein Einfluss auf die Dauerhaftigkeit ist noch nicht abschließend geklärt. Sein Vorhandensein auch im Lumen kann dafür verantwortlich sein, dass der Pilz gar nicht bis zur Zellwand kommt. Zudem können auch Phenole ausgewaschen werden. Der Einfluss ist jedoch wahrscheinlich geringer als bei Arabinogalactan. Da Frau Gierlingers Arbeitsgebiet gerade die Kerninhaltsstoffe der Lärche und ihr Einfluss auf die Dauerhaftigkeit gegen holzzerstörende Pilze sind (vgl. [169], [170]), wird angenommen, dass die Auswaschbeanspruchung ein Hauptgrund für das schlechte Versuchsergebnis ist. Durch die zweiwöchige Lagerung der relativ kleinen Proben (50mm * 25mm * 15mm) in destilliertem Wasser wurden höchstwahrscheinlich Kerninhaltsstoffe ausgewaschen. Hinzuzufügen ist, dass in den entsprechenden Prüfnormen ([55]und [59]) keine Auswaschbeanspruchung gefordert wird und bei den Versuchsreihen der befragten Fachleute auch nicht vorgenommen wurden, weshalb das erzielte schlechte Ergebnis kaum mit anderen vergleichbar ist.

Ein zweiter Grund für die ermittelte schlechte Dauerhaftigkeit wird im Vorhandensein eines hohen Anteils juvenilen Holzes an der geprüften Holzmenge vermutet. Alle Fachleute bestätigen, dass sich juveniles Holz (Holz unmittelbar in Nähe der Markröhre) weniger dauerhaft erweist als adultes. Fr. Augusta geht sogar davon aus, dass sich das Holz direkt um den Kern ähnlich schlecht verhält wie Splintholz. Leider kann nach Abschluss der Prüfungen nicht mehr nachvollzogen werden, wie viele marknahe Bereiche sich in den Proben befanden.

Es wird davon ausgegangen, dass die in der ersten Prüfung ermittelte schlechte Dauerhaftigkeit auf die genannten Gründe Auswaschbeanspruchung und teilweise juveniles Holz zurückzuführen war. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass ohne Auswaschbeanspruchung eine Dauerhaftigkeitsklasse 3-4 oder zumindest 4 ermittelt worden wäre, bei Proben ohne juveniles Holz eher Klasse 3. Um diese Vermutung zu bestätigen, wurde eine zweite Prüfung der Dauerhaftigkeit alpiner Lärche gegen holzzerstörende Basidiomyceten durchgeführt – ohne Auswaschbeanspruchung und mit einer getrennten Betrachtung von „normalem“ Kernholz und juvenilem Holz. Die zweite Prüfung wurde im Dezember 2009 in Auftrag gegeben.

3.2.7.2.4 Versuchsergebnisse der zweiten Prüfung

Die Lärchenprobekörper wurden in der zweiten Prüfung keiner Auswaschbeanspruchung unterzogen, die Referenzproben aus Kiefernsplintholz ebenfalls nicht. Die Prüfung mit dem Prüfpilz Coniophora puteana ergab beim Referenzholz einen mittleren Masseverlust von nur 28,1%. Damit sollte die Prüfung für eine Auswertung nach DIN CEN/TS 15083-1 nicht herangezogen werden, da dort ein Mindestwert von 30% gefordert wird. Die Auswertung nach DIN EN 350-1 hingegen darf verwendet werden, da dort der Mindestwert nach DIN EN 113 eingehalten werden muss, dieser beträgt 20%. Die Masseverluste der Referenzhölzer waren mit 28,1% bei Coniophora puteana und 20,6% bei Oligoporus placenta wiederum sehr gering. Diesmal zeigten sich jedoch auch bei den Lärchenprobekörpern nur geringe Masseverluste von im Mittel 10,3% für Coniophora puteana und 15,6% für Oligoporus placenta. Dies ist somit ein Zeichen insgesamt geringerer Pilzaktivität. Alles Weitere kann dem Prüfbericht [167] entnommen werden.

Die Prüfung erfolgte getrennt für Kernholz und juveniles Holz (marknahe Bereiche, die inneren bis zu 25 Jahrringe). Wird die Auswertung ebenfalls getrennt vorgenommen, ergibt sich folgendes Bild:

Tabelle 3.9: Dauerhaftigkeit der untersuchten alpinen Lärche (zweite Prüfung)

	Normales Kernholz		Juvenile Bereiche	
	Coniophora puteana	Oligoporus placenta	Coniophora puteana	Oligoporus placenta
Median des relativen Masseverlustes [%]	9,4	15,0	12,1	19,5
Dauerhaftigkeitsklasse nach DIN CEN/TS 15083-1	2 * 5 < 9,4 ≤ 10	**3** 10 < 15,0 ≤ 15	3 * 10 < 12,1 ≤ 15	**4** 15 < 19,5 ≤ 30
	3		**4**	
	* Die Auswertung der Prüfung mit dem Prüfpilz Coniophora puteana nach DIN CEN/TS 15083-1 sollte zur Ermittlung der Dauerhaftigkeitsklasse nicht herangezogen werden, da die geforderten Mindestwerte für den Masseverlust der Referenzhölzer nicht erzielt wurden.			
Mittelwert des relativen Masseverlustes [%]	9,8	14,7	13,3	20,3
x-Wert gemäß DIN EN 350-1	0,35	0,71	0,47	0,99
Dauerhaftigkeitsklasse nach DIN EN 350-1	**3** 0,3 < 0,35 ≤ 0,6	**4** 0,6 < 0,71 ≤ 0,9	**3** 0,3 < 0,47 ≤ 0,6	**5** 0,9 < 0,99
	4 bzw. 3-4		**5 (3-5)**	
Ermittelte Dauerhaftigkeitsklasse	**3 - 4**		**4 - 5**	

Das Kernholz der geprüften alpinen Lärche kann in die Dauerhaftigkeitsklasse 3-4 eingestuft werden. Damit verhält es sich ähnlich der „normalen“ europäischen Lärche, welche nach DIN EN 350-2 ebenfalls mit einer Dauerhaftigkeitsklasse 3-4 angegeben wird [56]. Das vermutete bessere Verhalten durch die Verwendung von oberhalb von 1000 m (bzw. 800 m) ü. N.N. gewachsenen Lärchenholzes (Lärche aus alpinen Wuchsgebieten – alpine Lärche) konnte in diesem Versuch nicht bestätigt werden.

Festzustellen ist, dass die juvenilen Bereiche eine schlechtere Dauerhaftigkeit aufweisen als der übrige Kernbereich und sich teilweise ähnlich ungünstig verhalten wie Splintholz (mit dem Prüfpilz Oligoporus placenta ergab sich eine Dauerhaftigkeitsklasse 4 nach DIN CENT/TS 15083-1 bzw. 5 nach DIN EN 350-1). Tendenziell wiesen die juvenilen Bereiche auch größere Jahrringbreiten auf als die sonstigen Kernbereiche. Eine wegen dieser Tendenz durchgeführte Korrelationsprüfung zwischen Masseverlust und Jahrringbreite ergab insgesamt allerdings mit Werten zwischen $R^2 = 0,01$ und $R^2 = 0,58$ keine bzw. kaum Korrelation.

3.2.7.2.5 Ergebnisse und Bewertung der Dauerhaftigkeitsprüfungen

Im Ergebnis kann festgestellt werden, dass eine zweiwöchige Auswaschbeanspruchung die Ergebnisse der Dauerhaftigkeit alpiner Lärche gegen holzzerstörende Basidiomyceten beeinflusst. Vor allem mit dem Prüfpilz Coniophora Puteana ergaben sich ohne vorherige Auswaschbeanspruchung deutlich bessere Ergebnisse (der x-Wert betrug nur 57% im Vergleich zum Versuch mit Auswaschung). Die Unterschiede beim Prüfpilz Oligoporus (Poria) Placenta waren ebenfalls vorhanden, jedoch weniger ausgeprägt (x-Wert betrug noch 74%). Dies stimmt mit Erkenntnissen von Gierlinger et. al. [169] überein, nach denen die Masseverluste bei Oligoporus Placenta bei unterschiedlichem Phenolgehalt der Proben weniger schwanken, d.h. Oligoporus Placenta scheint weniger empfindlich auf unterschiedliche Anteile an Phenolen als Kerninhaltsstoffe zu reagieren. Der im Verhältnis zu den Kiefernsplintreferenzhölzern geringere Masseverlustunterschied beim Prüfpilz Oligoporus Placenta weist ebenfalls darauf hin.

Es bleibt jedoch festzuhalten, dass für europäische Lärche aus alpinem Wuchsgebiet keine höhere Dauerhaftigkeit als für europäische Lärche allgemein angenommen werden kann. Enge Jahrringe mit hohem Spätholzanteil und eine tiefrote Farbe des Kernholzes lassen aufgrund der dann zahlreich vorhandenen Kerninhaltsstoffe eine hohe Dauerhaftigkeit vermuten, jedoch hängen diese Faktoren bzw. die Kerninhaltstoffe selbst viel mehr mit der Lage des Holzes im Stamm und den genauen Wuchsbedingungen zusammen als grundsätzlich mit einer Höhenlage oberhalb von 1000 m ü. N.N. Aus diesem Grund kann auch für das Kernholz europäischer Lärche aus alpinem Wuchsgebiet ohne weitere Prüfung lediglich von einer Dauerhaftigkeitsklasse 3-4 ausgegangen werden. Die Vermutung, europäische Lärche aus alpinem Wuchsgebiet weise eine höhere Dauerhaftigkeit auf als andere europäische Lärche konnte somit nicht bestätigt werden. Sowohl durch das Versuchsergebnis als auch durch die Aussagen der befragten Fachleute wird europäische Lärche aus alpinem Wuchsgebiet wie andere europäische Lärche eingestuft. Um zu prüfen, inwieweit alpine Lärche durch den langsamen Wuchs in Hochlagen im Mittel mehr Kerninhaltsstoffe bildet als andere europäische Lärche, wären Versuchsreihen mit Lärchen aus zahlreichen verschiedenen Wuchsgebieten nötig. Hier besteht sicherlich noch Forschungsbedarf, der jedoch im Rahmen des Forschungsvorhabens Hochleistungsholztragwerke nicht geleistet werden kann.

Das juvenile Holz (marknahe Bereiche) verhält sich erkennbar schlechter als das übrige, adulte Kernholz. Für die juvenilen Bereiche kann nach den vorliegenden Ergebnissen nur von mäßiger bis keiner Dauerhaftigkeit (Dauerhaftigkeitsklasse 4-5) ausgegangen werden. Hierbei ist allerdings anzumerken, dass die geringe Zahl der Proben aus marknahen Bereichen (10 Prüfkörper pro Prüfpilz) eine abgesicherte Aussage nicht zulässt. Die Versuche können diesbezüglich nur als Tastversuche angesehen werden.

3.2.7.2.6 Bedeutung der Ergebnisse für die HHT-Brücke im Pilotvorhaben „Fußgängerbrücken“ (siehe auch Kap. 3.8.2)

Nach DIN EN 460 [57] kann die natürliche Dauerhaftigkeit von Holz der Dauerhaftigkeitsklasse 3-5 auch für Gefährdungsklasse (GK) 3 ausreichend sein, dies hängt jedoch von der Holzart, ihrer Durchlässigkeit und den Gebrauchsbedingungen ab.

Bzgl. der Durchlässigkeit wird in Pkt. 6.1 [57] erläutert, dass sich in einem Holz mit geringerer Durchlässigkeit bei wechselnder Umgebungsfeuchte ein geringerer Feuchtegehalt einstellen wird, was zu einer geringeren Gefahr eines Pilzbefalls führt. Ein Hinweis auf die Durchlässigkeit liefert die Tränkbarkeitsklassifikation nach DIN EN 350-2 [56]. Lärchenkernholz wird mit der höchsten Tränkbarkeitsklasse 4 als „sehr schwer tränkbar“ (praktisch unmöglich zu tränken) eingestuft (s. [56]). Zudem zeigen Versuchsergebnisse einer Freilandbewitterung (ohne Erdkontakt) in Hamburg, dass die Holzfeuchte in Lärchenkernholz bei gleichen Umgebungsbedingungen weit geringer ist als die Feuchte von Kiefernsplintholz und erst bei sehr lang andauernder hoher Luftfeuchtigkeit Werte von 20% überschreitet (vgl. [173]). Dies bestätigt die durch die hohe Tränkbarkeitsklasse vermutete geringe Durchlässigkeit und damit geringere Feuchtigkeit. Darüber hinaus wird in [173] aus den Ergebnissen der Freilandversuche abgeleitet, dass Lärchenkernholz bei Prüfung und Einsatz in GK 3 eine bessere Einstufung der natürlichen Dauerhaftigkeit erzielt als bei Prüfung und Einsatz in GK 4, welches jedoch die übliche Prüfung nach DIN EN 350-1 bzw. DIN CEN/TS 15083-1 ist.

Bzgl. der Gebrauchsbedingungen an der HHT-Brücke lässt sich sagen, dass für die Lärche zwar grundsätzlich GK 3 vorliegt, dass durch die vorhandenen Abdeckungen, nämlich die TMT-Lamelle auf den Brückenbohlen und die KHP-Lamelle auf Längs- und Querträgern, stehendes Wasser auf Lärchenlamellen ausgeschlossen ist, so dass lediglich die Querseiten freibewittert sind. Zudem werden die Lamellen so angeordnet, dass kein Wasser in radiale Trocknungsrisse eindringen kann (s. Abb. 3.46), und die Rissgefahr wird durch den Einsatz dünner Lamellen von 24mm bis 27mm Dicke, wie in [175] für freibewittertes Brettschichtholz aus Lärche empfohlen, vermindert. Somit wird GK 3 in Richtung GK 2 verbessert.

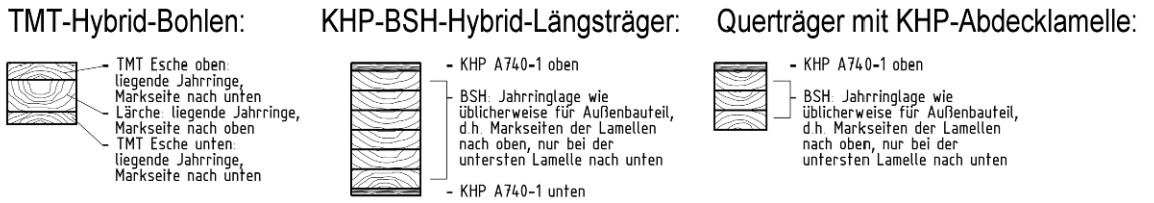


Abb. 3.46: Aufbau der Bohlen, Längs- und Querträger der HHT-Brücke

Nach DIN 68800 [55] kann zwar für Bauteile in GK 3 nur dann auf chemischen Holzschutz verzichtet werden, wenn splintfreies Holz der Resistenzklasse 1-2 (entspricht in etwa der neueren Bezeichnung Dauerhaftigkeitsklasse 1-2) verwendet wird, jedoch ist GK 3 nicht weiter unterteilt. In der Neufassung dieser Norm, die zwischenzeitlich als Entwurfsfassung erschienen ist, wird die Verwendung von Lärchenkernholz ohne zusätzliche Holzschutzmaßnahmen für die Gebrauchsklassen 2 und 3.1 explizit zugelassen, *„unabhängig davon, dass es nur in Dauerhaftigkeitsklasse 3-4 eingestuft ist, da sich der Einsatz dieser beiden Holzarten* (Anmerkung: hier ist neben der Lärche auch Douglasie genannt) *in GK 2 und 3.1 seit der letzten Ausgabe von DIN 68800-3:1990-04 in der Praxis bewährt hat“* (vgl. [58]). Für die abgedeckten Lärchenlamellen der HHT-Brücke liegt Gebrauchsklasse 3.1 vor („Holz oder Holzprodukt, nicht unter Dach, aber ohne ständigen Erd- und/oder Wasserkontakt, Anreicherung von Wasser im Holz, auch räumlich begrenzt, nicht zu erwarten“ – nur gelegentlich feucht (u > 20%) - vgl. [58]). Die Anreicherung von Wasser bzw. eine Feuchtigkeit, die häufig 20% oder mehr beträgt, tritt wie oben erläutert infolge der oberen Abdeckungen sowie der Verwendung von Lärchenholz nicht auf. Somit kann hier nach Stand von Wissenschaft und Technik auf chemischen Holzschutz verzichtet werden.

Das Vorhandensein juvenilen Holzes kann bei Lamellenbreiten von bis zu 20 cm allerdings nicht ausgeschlossen werden, es ist, im Gegenteil, sogar wahrscheinlich. Allerdings wird sich dieser juvenile Bereich immer im Inneren der Lamelle bzw. des Querschnitts befinden, so dass die vorhandene Holzfeuchtigkeit geringer als im Außenbereich ist und aller Wahrscheinlichkeit nach Werte weit unterhalb von 20% annehmen wird. Daher wird nicht davon ausgegangen, dass ein Pilzbefall frühzeitig im Bereich juvenilen Holzes auftritt. Eine Ausnahme bildet der Querträger. Hier wurde, wie für Brettschichtholz im Außenbereich üblich, vorgeschlagen, die unterste Lamelle mit der Kernseite nach außen anzuordnen. Diese Anordnung ist nach DIN EN 386 – und damit auch DIN 1052 – vorgeschrieben. Um sie beibehalten zu können, ohne Nachteile bzgl. der Dauerhaftigkeit in Kauf nehmen zu müssen, ist darauf zu achten, dass in dieser untersten Lamelle keine juvenilen Holzanteile vorhanden sind. Ein Drehen der Lamelle wäre möglich, hätte jedoch in der Ausführungsplanung bereits angegeben werden müssen, da in diesem Fall von der Norm abgewichen würde. Da evtl. eindringende Feuchtigkeit durch mögliche schräg nach unten gerichtete Trocknungsrisse jedoch nach unten aus dem nicht bekleideten Holz abgeführt werden kann, bestehen keine Bedenken bzgl. der Dauerhaftigkeit, wenn in dieser Lamelle kein juveniles Holz vorhanden ist. Zudem sind Haupt- und Querträger sichtbar und werden – zumindest in den ersten Jahren (die Brücke wird als Pilotprojekt einem umfangreichen Monitoring unterzogen, vgl. auch Kap. 3.8.2) – regelmäßig überprüft, so dass evtl. auftretende Schäden wie Risse oder Pilzbefall direkt festgestellt würden.

Zusammenfassend bestehen folglich keine Bedenken, das gewählte Lärchenkernholz aus alpinem Wuchsgebiet im gegebenen Anwendungsfall einzusetzen.

3.2.7.3 Freibewitterung von Hybridträgern (KHP-Decklamellen und BSH-Fichte)

Autor: Robert Putzger (ISH)

Die Bewitterung der Probekörper aus BSH-Fichte mit und ohne KHP-Decklamellen erfolgte auf einem Versuchsfeld in Freital bei Dresden mit Bewitterungsgestellen nach DIN 55665. Die insgesamt sieben ausgelegten Probekörper wurden nach visueller Prüfung aus unbeschädigten Bereichen verschiedener Balken herausgeschnitten, welche zuvor im Biegeversuch geprüft wurden.

Sämtliche in der Freibewitterung untersuchten Probekörper sind trapezförmig und besitzen eine durchschnittliche Länge von 40 cm sowie eine Höhe von 30 cm. Die Breite beträgt einheitlich 10 cm. Das BSH aus Fichtenholz besitzt jeweils eine Lamellendicke von 3,5 cm. Bis auf eine Referenzprobe besitzen alle Probekörper Decklamellen aus KHP. Das KHP dient der Querschnittsverstärkung und zugleich dem Witterungsschutz des Trägers. In den Versuchen wurde teil- und vollgetränktes KHP für die Decklamellen der Hybridträger verwendet.



Abb. 3.47: Probekörper mit Decklamelle aus KHP vollgetränkt (A740-1) und Referenzprobe mit BSH-Fichte ohne Decklamelle

Die Probekörper wurden in die Bewitterungsgestelle leicht schräg gestellt, um ein Abfließen des Niederschlagswassers zu ermöglichen. Bei zwei Probekörpern mit einer Decklamelle aus vollgetränktem KHP (Herstellerbezeichnung unbekannt) wurde die KHP-Decklamelle nicht bündig sondern an den Rändern ca. 3 cm überstehend zum BSH verleimt, so dass zusätzlich eine umlaufende Tropfkante an der Lamellenunterseite eingefräst werden konnte.

Im September 2007 begannen die Versuche zur Freibewitterung zunächst mit vier Probekörpern. Für die KHP-Decklamelle der Probekörper wurden Materialien mit verschiedenen Tränkungsgraden verwendet. Zu Vergleichszwecken wurde weiterhin ein Probekörper aus BSH-Fichte ohne KHP-Decklamelle ausgelagert. Das BSH aus Fichte wurde in zwei Anstrichen mit einer farblosen Wetterschutzlasur behandelt.

Zwei Monate später im November wurden drei weitere Probekörper mit einem Verbundquerschnitt aus KHP und BSH-Fichte ausgelagert. Zu Vergleichszwecken wurde bei diesen Probekörpern das BSH aus Fichte diesmal nicht mit einer Lasur behandelt. Abb. 3.48 zeigt die Hybridträger zu Versuchsbeginn. Die etwas dunklere Oberfläche der Probekörpern (vgl. Abb. 3.48, links) ist auf den Lasuranstrich des BSH zurückzuführen.



Abb. 3.48: Bewitterungsbeginn der Hybridträger

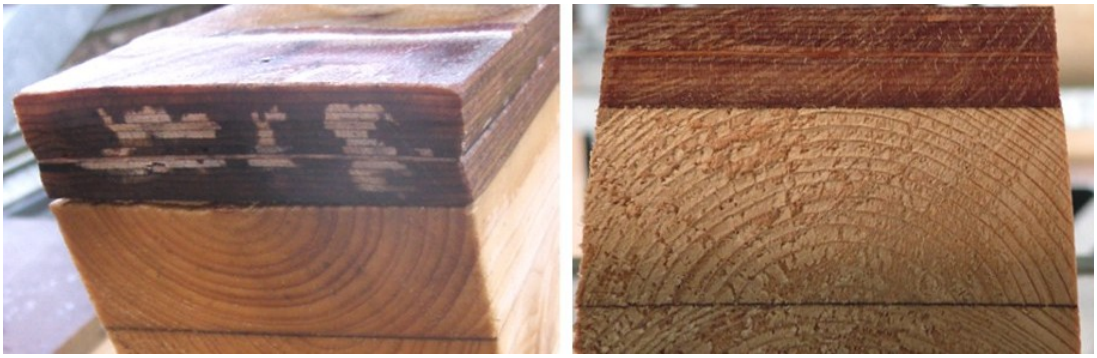


Abb. 3.49: 3 Monate Freibewitterung

Die Detailaufnahmen in Abb. 3.49 entstanden 3 Monate nach Bewitterungsbeginn. Das linke Foto zeigt eine Decklamelle aus nur teilgetränktem KHP. Bereits nach kurzer Zeit zeigte diese deutlich sichtbare Wölbungen der obersten Furnierlagen. Die Randfurnierlagen beim halbgetränkten KHP sind gegenüber den innen liegenden Furnierlagen stärker gequollen. Neben diesen Verformungen des Querschnittes in Breitenrichtung konnte auch eine geringe Quellung der einzelnen Furnierlagen in Dickenrichtung beobachtet werden. Besonders an den an der Oberfläche unmittelbar den Witterungseinflüssen ausgesetzten Furnierstößen konnte eine Dickenzunahme des halbgetränkten KHP festgestellt werden. Das rechte Foto in Abb. 3.49 zeigt dagegen eine vollgetränkte KHP-Lamelle (A740-1), welche trotz gleicher Bewitterungsdauer formstabil ist. Weiterhin ist deutlich zu erkennen, dass das BSH im Gegensatz zum KHP gequollen ist. Das Quellen des Fichtenholzes führte an einer Stirnseite eines Probekörpers zu einem Riss in der Leimfuge zwischen teilgetränkter KHP-Decklamelle und BSH. Bei der Bewertung ist jedoch zu berücksichtigen, dass auf Grund der vor Witterungsbeginn durchgeführten Biegeversuche bisher verdeckte Risse im Holz als Schadensursache nicht ausgeschlossen werden können.



Abb. 3.50: 4 Monate Freibewitterung

Abb. 3.50 zeigt die Verbundfuge einer vollgetränkten KHP-Decklamelle (A740-1) im Quer- und Längsschnitt. Auch nach mehrmonatiger Bewitterung sind die Leimfugen in einem fehlerfreien Zustand und die Oberfläche der vollgetränkten KHP-Decklamellen zeigte im Gegensatz zu Ausfaserungen an Lamellen aus teilgetränktem KHP keinerlei Anzeichen von Witterungsschäden.

Es zeigte sich insgesamt bereits nach wenigen Monaten Freibewitterung, dass das nur teilgetränkte KHP gegenüber KHP mit voller Tränkung für eine Außenanwendung deutlich schlechter geeignet ist. Auf Grund der guten Beständigkeit gegenüber Feuchte zeigte sich vollgetränktes KHP sehr formstabil.

Durch die am oberen und unteren Trägerrand aufgeleimten KHP-Decklagen wurde das feuchtempfindliche BSH der Fichte am Quellen in Breitenrichtung behindert. In der Mitte der Hybridträger kann sich dagegen das BSH ungehindert verformen, was bei den mit ca. 50 cm Länge verhältnismäßig kurzen Probekörpern stellenweise zu Wölbungen des Trägerquerschnittes führte.



Abb. 3.51: 11 Monate Freibewitterung

Abb. 3.51 zeigt die Stirnseiten zweier Probekörper mit vollgetränkten KHP-Decklamellen (links: A740-1, rechts: Bezeichnung unbekannt) nach knapp einem Jahr. Deutlich sind die Schwindrisse im BSH zu erkennen, welche bei allen Probekörpern ab den Sommermonaten 2008 beobachtet werden konnten. Im Vergleich zu den Stirnseiten zeigten die Flächen und Fugen an den Längsseiten nach in Augenscheinnahme keine Risse. Die Decklamellen aus vollgetränktem KHP einschließlich der Verbundfuge befinden sich ebenfalls in einem guten Zustand und zeigten an den Oberflächen nur eine geringe Verfärbung infolge UV-Strahlung.

Nach zwei Jahren Freibewitterung war der Zustand der Decklagen aus KHP stark abhängig vom Tränkungsgrad des KHP. So zeigte vollgetränktes KHP neben oberflächlichen Verfärbungen eine beginnende Rissbildung zwischen den KHP-Furnierlagen am Probekörperrand. Wie ein zu Kontrollzwecken ausgesägter Keil bestätigte, handelt es sich dabei aber um Rand- bzw. Oberflächenphänomene. Dagegen war nur halbgetränktes KHP von starken bis in tiefere Schichten reichende Auswaschungen in Verbindung mit flächenhaftem Ausfasern der Furnierlagen gekennzeichnet.



Abb. 3.52: **20 Monate** Freibewitterung, Querschnitt im Detail

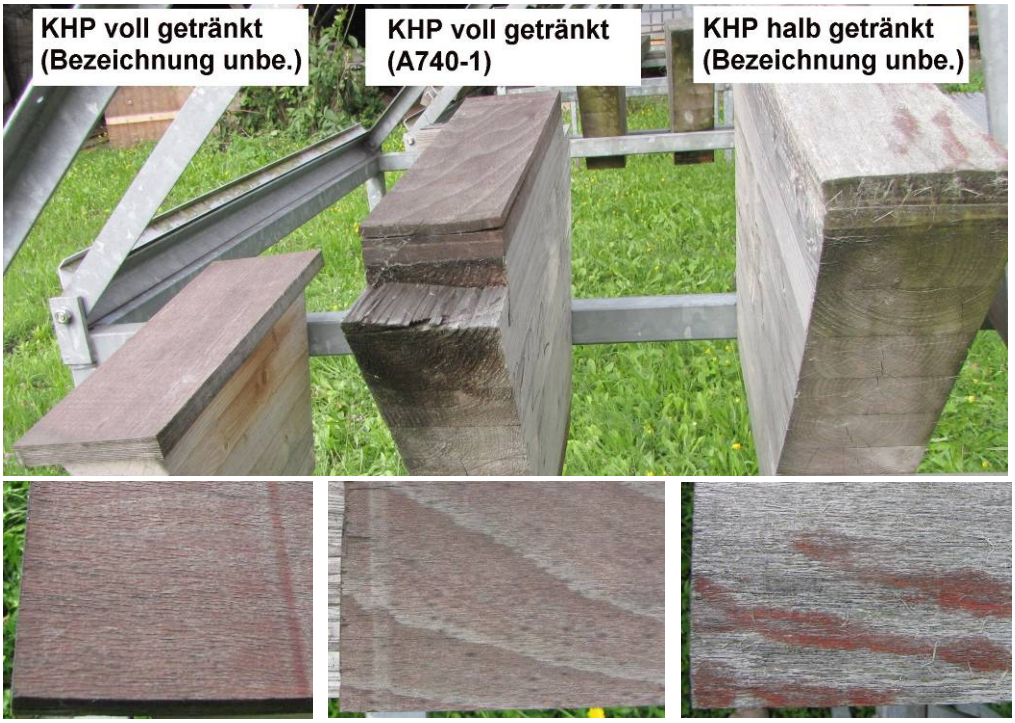


Abb. 3.53: **34 Monate Freibewitterung,** Ansicht von oben im Detail

3.2.7.4 Freibewitterung von Verbundbohlen aus TMT- und Fichtenholz

Autor: Robert Putzger (ISH)

Seit November 2007 befinden sich ebenfalls Verbundbohlen aus TMT und Fichtenholz in der Freibewitterung. Die Decklamellen der 1,2 m langen Probekörper bestehen aus thermisch vergütetem Eschen- und Fichtenholz.

Nach elf Monaten Freibewitterung ist der Verbundquerschnitt formstabil und außer Verfärbungen oder feinen Schwindrissen an den Stirnseiten sind keine nennenswerten Bewitterungsschäden feststellbar.

Nach zwei Jahren Freibewitterung konnte an einer Verbundbohle eine Delamination der Leimfuge (PU Leimsystem) vom Rand beginnend bis ca. 1 cm Tiefe beobachtet werden. Der Querschnitt selbst ist formstabil, zeigt jedoch an den Stirnseiten zahlreiche Schwindrisse, die zum Teil von sich gebildeten Moosablagerungen überdeckt werden (vgl. Abb. 3.54). Wie der Abb. 3.54 weiterhin entnommen werden kann, ist bei den zur Freibewitterung ausgelagerten Verbundbohlen nicht nur die Verschleisschicht an der Oberseite aus TMT ausgebildet sondern es wurde der Kern der Fichtenholzbohle auch im Auflagerbereich mit einer 1 cm dicken Schicht aus TMT verstärkt. Vereinzelt zeichnet sich an den Leimfugen übergetretener PU-Klebstoff ab, der von einem anfangs hellen mit zunehmender Verwitterung ins bräunliche übergehenden Farbton gekennzeichnet ist.

An den Leimfugen waren ansonsten auch nach Abschluss der Untersuchungen im Sommer 2010 nach Augenscheinnahme keine Schäden erkennbar. Auch die TMT-Deckschicht zeigte bis auf Vergrauungen und feine Schwindrisse keine sichtbaren Schäden.

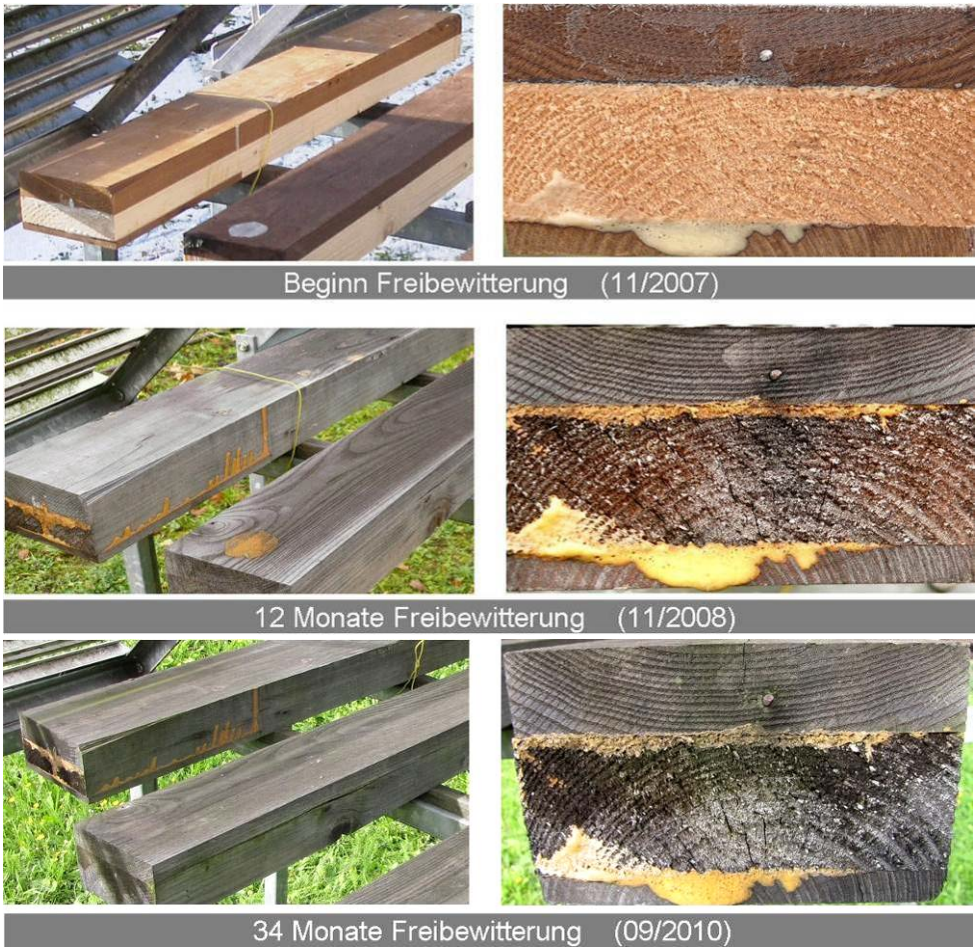


Abb. 3.54: Verbundbohlen aus TMT und Fichtenholz in der Freibewitterung

3.2.7.5 Freibewitterung von Verbundquerschnitten aus TMT und Lärchenholz

Autor: Robert Putzger (ISH)

Die Beobachtungen an Verbundquerschnitten aus TMT und Lärchenholz zeigten, dass knapp vier Monate Freibewitterung in einer trockenen Wetterperiode im Sommer 2009 die offensichtlich schärfere Beanspruchung im Vergleich zur Bewitterung im Klimaschrank und Wasserbad darstellten. So mussten neben zahlreichen Schwindrissen im Holz auch bis zu 1 cm lange Delaminationen in der Verbundfuge der beiden untersuchten Leimsysteme PU- und Resorcinharz festgestellt werden.



Abb. 3.55: Querschnitte aus TMT und Lärche zu Beginn und nach 26 Monaten Bewitterung



Abb. 3.56: Verbundquerschnitte im Detail nach 26 Monaten Freibewitterung mit PU (links) und Resorcin (rechts) Leimfuge

Um den Einfluss der Witterung auf die Tragfähigkeit der Verleimung (Resorcinharz) zwischen TMT und Lärchenholz abzuschätzen, wurde eine vier Monate freibewitterte und eine unbewitterte Trägerbohle im Biegeversuch geprüft (vgl. Abb. 3.57). Dabei führte die leichte Randdelamination der bewitterten Leimfuge zu einer um ca. 10 % geringeren Traglast. Beide Probekörper zeigten neben Biegezugversagen auch Schubversagen in der Leimfuge, welches auch auf die große Bauteildicke im Vergleich zur kurzen Spannweite zurückzuführen ist. Die Prüfgeschwindigkeit betrug 8 kN/min. Der geringe Wert liegt darin begründet, dass ursprünglich nur eine Bruchlast von 25 kN erwartet wurde.

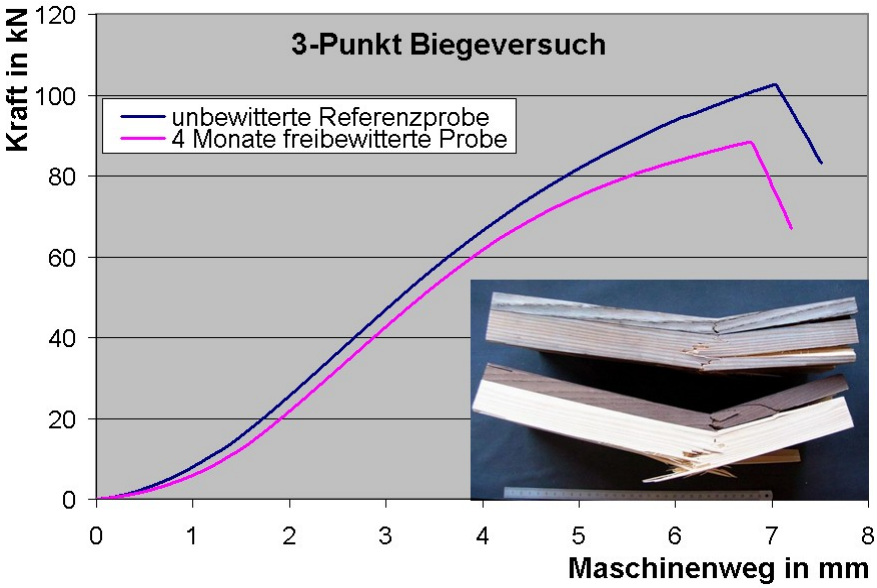


Abb. 3.57: Biegeprüfung von Verbundbohlen aus TMT und Lärche mit Resorcin Leimfuge

Nach dem Versuch wurde die Holzfeuchte der Verbundquerschnitte für TMT und Lärchenholz getrennt bestimmt (vgl. Tabelle 3.10). Dazu wurden in Probekörpermitte ca. 2 cm breite Scheiben herausgesägt und in den Drittelspunkten der Scheibenbreite zersägt. Damit konnte die Holzfeuchte der Probenkörper an Randstücken (R) sowie an Innenstücken (i) bestimmt werden. Abschließend wurde die Leimfuge aus Resorcinharz aufgesägt und alle Probekörperstücke 24 Stunden im TS bei 105 °C darrgetrocknet.

Erwartungsgemäß ist die Holzfeuchte von unbehandelter Lärche ca. zwei (nach Bewitterung) bis drei (Referenz) mal so groß wie die von TMT. In der Freibewitterung hatte also das TMT im Vergleich zu Lärchenholz verhältnismäßig mehr Feuchte aufgenommen. Die Unterschiede in der Holzfeuchte zwischen Rand- und Innenstücken sind bei beiden Materialien vernachlässigbar. Zum Vergleich sei hier noch einmal die Holzfeuchte von TMT mit ca. 4 % sowie von Lärchenholz mit ca. 12 % unmittelbar nach der Lieferung genannt.

Tabelle 3.10: Holzfeuchte der Verbundquerschnitte getrennt nach TMT und Lärche

Probe	Material	i-innen R-Rand	Gewicht in g vor/nach Trocknung 24 h bei 105°C		**Holzfeuchte** in %
Referenz	TMT	i - 1	9,21	8,88	3,7
	TMT	i - 2	9,52	9,20	3,5
	TMT	R - 1	7,77	7,50	3,6
	TMT	R - 2	9,73	9,39	3,6
					Mittelwert: 3,6
	Lärche	i - 1	12,89	11,69	10,3
	Lärche	i - 2	17,54	15,77	11,2
	Lärche	R - 1	16,10	14,47	11,3
	Lärche	R - 2	16,60	14,92	11,3
					Mittelwert: 11,0
4 Monate freibewittert	TMT	i - 1	6,57	6,25	5,1
	TMT	i - 2	7,23	6,89	4,9
	TMT	R - 1	6,62	6,29	5,2
	TMT	R - 2	6,23	5,92	5,2
					Mittelwert: 5,1
	Lärche	i - 1	12,01	10,58	13,5
	Lärche	i - 2	13,55	11,93	13,6
	Lärche	R - 1	12,83	11,31	13,4
	Lärche	R - 2	14,49	12,76	13,6
					Mittelwert: 13,5

3.2.8 Ermittlung von Materialparametern

Autoren: Andreas Heiduschke (ISH), Petra Kubowitz (IaFB), Robert Putzger (ISH)

3.2.8.1 Allgemeines

Autor: Robert Putzger (ISH)

In den durchgeführten Untersuchungen wurden die mechanischen Eigenschaften von unbehandeltem Laub- und Nadelholz sowie von thermisch veredeltem oder in Kunstharz getränktem Holz bestimmt. Mit Hilfe von insgesamt 63 Druck- und 73 Biegeprüfungen an Kleinproben aus KHP, TMT und Fichtenholz (unverdichtet und verdichtet) wurden charakteristische Kennwerte bestimmt.

Die Eigenschaften des für die Herstellung der Formholzrohre verwendeten Pressholzes sowie des faserverstärkten Kunststoffes sind Tabelle 3.37 zu entnehmen. Die mechanischen Eigenschaften der geleimten Pressholzplatten wurden in Biege- und Druckversuchen an faserparallelen Kleinproben (19 x40 x120 mm³) ermittelt. Die aufgeführten Materialkennwerte wurden nach DIN EN 408 bestimmt oder sind der Literatur entnommen.

3.2.8.2 Quellungsdrücke von Fichten- und Fichtenpressholz in Wasser

Autor: Robert Putzger (ISH)

Es wurde der Quelldruck an Kleinproben in Tangential-, Radial- oder Faserlängsrichtung bestimmt. Dafür wurde sowohl unbehandeltes Holz als auch Fichtenholz verwendet, welches zuvor thermo-mechanisch verdichtet wurde.

3.2.8.2.1 Einleitung

Die behinderte Quellung ist für die Bemessung von Bauteilen aus Holz, die Feuchteänderungen unterliegen, oft die maßgebende mechanische Beanspruchung. Je nach Feuchtegehalt des Holzes werden drei Grenzzustände des Sättigungsgrades unterschieden: Darrtrockenheit, Faser- und Wassersättigung. Bis zur Fasersättigung nimmt darrtrockenes Holz Flüssigkeit durch Kapillarkondensation und Absorption auf, wobei Flüssigkeitsmoleküle in die Zellwände eingelagert werden und somit deren Ausdehnung, die Quellung, bewirken. Bei diesem Vorgang stellt

sich eine Gleichgewichtsfeuchte für jede Holzart ein, die primär von der Feuchte, der Temperatur und dem Luftdruck der Umgebung sowie sekundär von einer Vorspannung abhängt. Wird die in Kraftwirkungsrichtung gemessene Höhe eines Probekörpers in einem Sättigungszustand unterhalb der Fasersättigung durch äußere Kräfte bei gleichzeitiger Befeuchtung konstant gehalten, entsteht eine innere Spannung, der Quellungsdruck.

3.2.8.2.2 Versuchsaufbau und Probekörper

In Abb. 3.58 ist der Versuchsaufbau zur Bestimmung des Quellungsdrucks schematisch dargestellt. Zwischen zwei festen Rändern sind hintereinander formschlüssig angeordnet: eine Kraftmessdose (Nennbereich: 5 kN), der Probekörper, der in einem dünnwandigen offenen Gefäß vollständig von Flüssigkeit umgeben ist, sowie ein U-Profil zur Kraftübertragung. Zur Bewertung des Versuchsaufbaus wurde zunächst der maximale tangentiale Quellungsdruck von Lärche bestimmt und mit Werten aus [240] verglichen.

Die anschließenden Versuche an unverdichteter und radial verdichteter Fichte in Wasser hatten jeweils einen Umfang von zehn Proben. Der Quellungsdruck radial verdichteter Fichte in Salzlösungen wurde an fünf Proben untersucht.

Die Proben aus Fichte und Lärche hatten zu Beginn der Versuche einen Feuchtegehalt von 6,5 % bzw. 9,0 %, eine Vorspannung von 0,15 N/mm², eine Querschnittsfläche von 200 mm² und die Abmessungen von 20 x 10 x 25 mm³, wobei der Abstand der Hirnholzflächen voneinander 10 mm beträgt. Diese Dicke wurde so klein gewählt, da die Flüssigkeit in Faserrichtung um ein Vielfaches schneller eindringt als quer dazu und eine zügige Durchfeuchtung noch vor Einsetzen der Relaxation gewährleistet, so dass ein hoher Wert für den maximalen Quellungsdruck erzielt wird. In Übereinstimmung mit der Empfehlung von DIN 52192 zum Druckversuch quer zur Faser (vgl.[69]) sind in den hier verwendeten Proben in radialer Richtung mindestens fünf Jahrringe vorhanden.

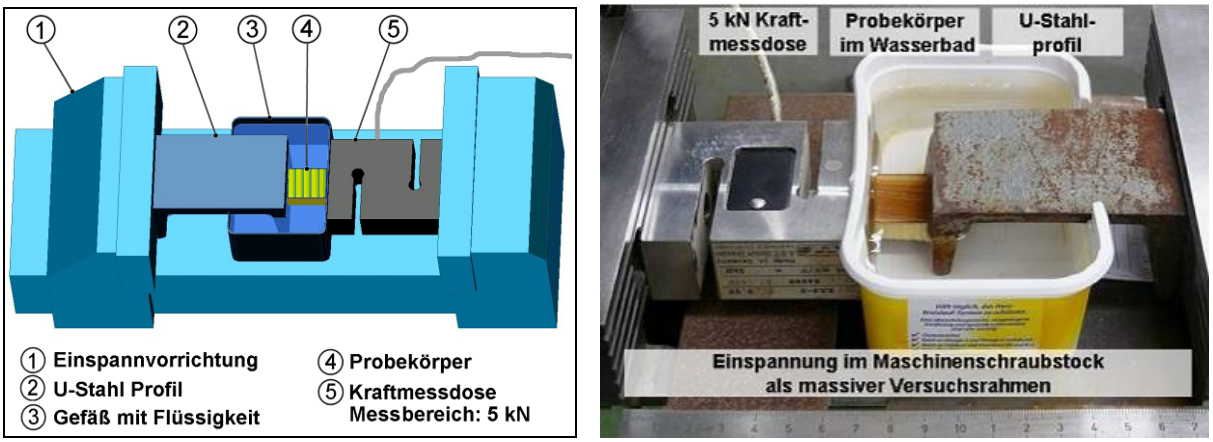


Abb. 3.58: Versuchseinrichtung mit Probekörper (BxDxL: 20x10x25 mm³) im Wasserbad

3.2.8.2.3 Referenzprobe aus Lärchenholz

In [240] werden Quellungsdruckmessungen an unverdichtetem Holz in Wasser vorgestellt. Dazu werden u. a. für Probekörper aus Lärche mit Holzfeuchten zu Versuchsbeginn von 12 % und 18 % auftretende mittlere und größte Maxima des zeitlichen Verlaufs des Quellungsdruckes in tangentialer Richtung für Vorspannungen von jeweils 0,0 N/mm² und 0,5 N/mm² tabellarisch angegeben. Die lineare Inter- und Extrapolation dieser Druckwerte über Ausgangsfeuchte und Vorspannung ergibt 1,89 N/mm² und 2,22 N/mm² für das mittlere bzw. das größte Maximum gegenüber 2,23 N/mm² bzw. 2,39 N/mm² der eigenen Versuche. Die Abweichungen sind nicht signifikant und im Rahmen für das Material Holz üblicher Streuungen.

3.2.8.2.4 Versuche an unverdichtetem und verdichtetem Fichtenholz in Wasser

In Abb. 3.59 sind zeitliche Verläufe des Quellungsdruckes bei Befeuchtung mit Wasser für eine repräsentative Auswahl an verdichteten und unverdichteten Probekörpern mit unterschiedlichen Dichten dargestellt.

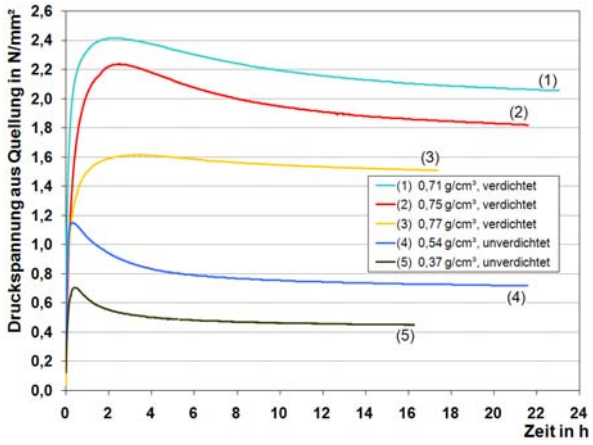


Abb. 3.59 Quellungsdruck in Radialrichtung in Wasser von Holzproben verschiedener Rohdichten

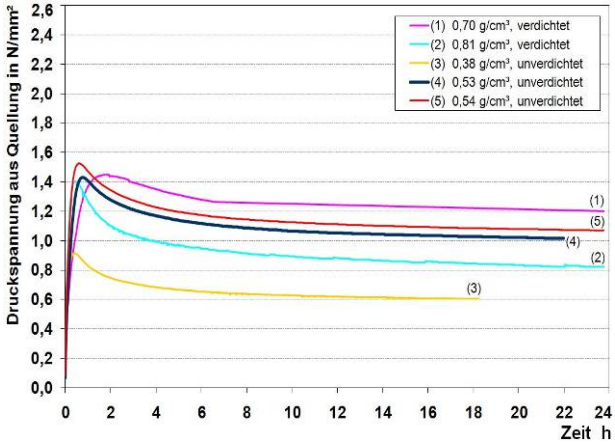


Abb. 3.60 Quellungsdruck in Tangential-Richtung von Holzproben verschiedener Rohdichten

Die Rohdichte der unverdichteten Fichtenholz-Probekörper beträgt zu Beginn 0,37 g/cm³ und 0,54 g/cm³, die des Pressholzes bei einer Verdichtung um ca. 30 % beträgt 0,71 g/cm³, 0,75 g/cm³ und 0,77 g/cm³. Der Quellungsdruck steigt mit zunehmender Holzfeuchte zunächst an. Bei Erreichen des Maximums führen plastische Deformationen bzw. Veränderungen am Zellgefüge zum Absinken der Quelldruckspannung (Relaxation).

Das Quellverhalten derselben Holzart wird maßgebend durch die Rohdichte bestimmt. Für natürliches Holz gilt weitgehend: Je größer die Dichte ist, desto größer ist der maximal erreichbare Quellungsdruck. Das Verhalten ist zudem abhängig davon, ob eine gegebene Rohdichte durch Verwendung natürlichen Holzes oder durch Verdichtung erzielt wurde.

Die Quellungsdrücke verdichteter Proben sind über den gesamten Verlauf größer als die der unverdichteten, was einerseits durch kleinere Hohlräume in der Zellstruktur und damit vergrößerte Flächen von sich untereinander berührenden Zellwänden, andererseits durch das Vermögen des verdichteten Holzes, in Wasser seine ursprüngliche Form vor Verdichtung wieder anzunehmen, zu erklären ist. Außerdem werden die Maximalwerte zu einem späteren Zeitpunkt erreicht, was darauf zurückzuführen ist, dass aus dem verdichteten Zustand heraus mit zunehmender Befeuchtung anfangs kleinste Verformungen in der Zellstruktur bzw. Entfaltungen der sich verdickenden Zellwände stattfinden, solange, bis eine stabile Struktur vorliegt, wie es bei unverdichtetem Holz von Beginn an der Fall ist.

Abb. 3.60 zeigt den Verlauf des Quellungsdruckes in Tangentialrichtung von Fichtenholz aus verschiedenen Rohdichten. Diese lagen vor Versuchsbeginn zwischen 0,38 g/cm³ (unverdichtet) und 0,81 g/cm³ (verdichtet).

Bei den untersuchten Proben ist der maximale Quellungsdruck in Tangentialrichtung bei unverdichteter und verdichteter Fichte nahezu gleich groß. Mit ca. 1,4 N/mm² sind die Quellungsdrücke des verdichteten Fichtenholzes im Vergleich zur Radialrichtung insgesamt kleiner. Auch fällt die Druckspannung mit Erreichen ihrer Maximalwerte nach ca. 1 Stunde mit zunehmender Versuchsdauer wegen Relaxation wieder ab.

3.2.8.3 Druckversuche an Massivholz parallel und quer zur Faser

Autor: Robert Putzger (ISH)

Es wurden die Druckfestigkeit und der Druck-Elastizitätsmodul an insgesamt 75 Probekörpern aus verdichtetem Fichten- und Lindenholz sowie an Referenzproben aus unverdichtetem Fichten-, Linden- und Buchenholz bestimmt. Der Verdichtungsgrad betrug ca. 30 %, wobei bereits die Rohdichte des unverdichteten Fichtenholzes mit 0,58 g/cm³ (Serien 3 bzw. 10) vergleichsweise hoch war.

In den Druckversuchen parallel zur Faser nach DIN 52185 hatten die Probekörper eine Kantenlänge von 2 bis 4 cm bei einer Probenhöhe von 12 cm. Die Tabelle in Abb. 3.61 enthält neben Angaben zur Geometrie auch die Dichte und die maximale Druckspannung. Für jede Serie wurden die Mittelwerte aus 5 Proben ermittelt und dargestellt. Die Probekörper aus verdichteter Fichte zeigten dabei Druckfestigkeiten von über 80 N/mm². Für die Bestimmung des E-Moduls wurde die Dehnung über eine Messlänge von 5 cm mit Wegaufnehmern gemessen. Die Versuche zur Bestimmung der Druckfestigkeit quer zur Faser orientierten sich an DIN 52192 [69]. Entsprechend den quer zur Faser erreichten Festigkeiten von bis zu 10 N/mm² wurde eine Belastungsgeschwindigkeit zwischen 50 und 80 N/s gewählt.



Serie	Material	Druck	Drucksp. [N/mm²]	Geometrie [mm] Breite	Länge	Höhe	Dichte [g/cm³]
1	Buche, unverd.	längs	**65,2**	40,1	20,7	120,6	**0,67**
2	Fichte, unverd.	längs	**70,2**	39,6	20,1	119,3	**0,60**
3	Fichte, unverd.	längs	**71,3**	40,0	39,5	120,3	**0,58**
4	Fichte, verd.	längs	**80,2**	40,2	20,1	119,7	**0,70**
5	Fichte, verd.	längs	**86,0**	40,4	40,0	123,0	**0,72**
6	Fichte, verd.	längs	**62,8**	39,8	44,7	119,0	**0,62**
7	Linde, verd.	längs	**70,4**	40,2	19,9	120,3	**0,69**
8	Buche, unverd.	quer	**10,4**	46,9	69,3	90,0	**0,64**
9	Fichte, unverd.	quer	**3,9**	39,1	69,9	79,4	**0,42**
10	Fichte, unverd.	quer	**5,6**	69,7	46,3	90,1	**0,58**
11	Fichte, verd.	quer	**8,8**	39,5	63,7	89,2	**0,60**
12	Fichte, verd., Leimq.	quer	**10,9**	40,3	71,6	79,4	**0,68**
13	Fichte, verd., Leimq.	quer	**9,4**	39,5	71,4	81,8	**0,76**
14	Fichte, verd., Leimq.	quer	**8,3**	39,6	70,8	79,3	**0,62**
15	Linde, verd.	quer	**10,7**	45,9	68,0	88,6	**0,68**

Abb. 3.61: Versuchseinrichtung und Ergebnisse der untersuchten Serien

3.2.8.4 Biege- und Druckfestigkeiten von KHP, TMT, Fichte und Lärche

Autor: Robert Putzger (ISH)

In den Versuchen wurden die mechanischen Eigenschaften von behandeltem und unbehandeltem Holz an Kleinproben mit Hilfe der folgenden Methoden bestimmt:

- Bestimmung des Biege-Elastizitätsmoduls und der Biegefestigkeit an kleinen, fehlerfreien Proben im Drei-Punkt-Biegeversuch nach DIN 52186
- Bestimmung der Druckfestigkeit parallel zur Faser an kleinen, fehlerfreien Proben nach DIN 52185

Dabei wurden die folgenden Holzarten untersucht:

- KHP (Kunstharzpressholz, Hersteller-Marke: Dehonit)
- Es wurde sowohl KHP mit vollständig kunstharzgetränkten Furnieren als auch KHP ohne vollständige Tränkung der Furniere mit Kunstharz untersucht.
- Formholz (Fichte, um ca. 25 % verdichtet)
- Fichte (BSH GL32c - Hersteller Hess, Brettlamellen aus Sortierklasse C35 und C24)
- Lärche (unbehandelt)
- TH_E (TMT - Thermoholz Esche, Hersteller THS)

Bei den KHP-Probekörpern war die Lage der Stöße der Furnierlagen dabei wahllos über den Querschnitt verteilt.

Die Fichtenprobekörper bestanden aus fehlerfreiem Holz ohne Drehwuchs oder Schrägfasrigkeit.

Sowohl die KHP- als auch die Fichten- und Lärchenholzprobekörper wurden aus Verbundträgern mit Bauteilgröße nach deren Biegeprüfung herausgesägt. Die KHP-Proben wurden verschiedenen Biegeträgern entnommen. Die Fichtenholzproben wurden dem Biegeträger mit der Bezeichnung KHPo_1_3 entnommen. Es handelt sich dabei um Prüfkörper aus drei übereinander geschichteten Brettlamellen (an der KHP-Lamelle an der Unterseite des Trägers entnommenen) mit der Bezeichnung L1, L2 und L3.

3.2.8.4.1 Biegeprüfung nach DIN 52186

Alle Prüfkörper hatten einen rechteckigen Querschnitt. In Abhängigkeit von der Prüfkörperhöhe (Fichte und KHP getränkt: 22 mm; KHP ohne Volltränkung: 20 mm) betrug bei einer Stützweite von 340 mm das Stützweitenverhältnis l/h 17 bzw. 15,5. Die Mittelwerte bzgl. Geometrie, Rohdichte, Biegefestigkeit und Biege-Elastizitätsmodul sind der nachfolgenden Tabelle zu entnehmen. Für die Werte der Dichte und Festigkeit wurden zusätzlich die 5 % Quantilwerte sowie die Standardabweichung der Versuchsergebnisse angeben.

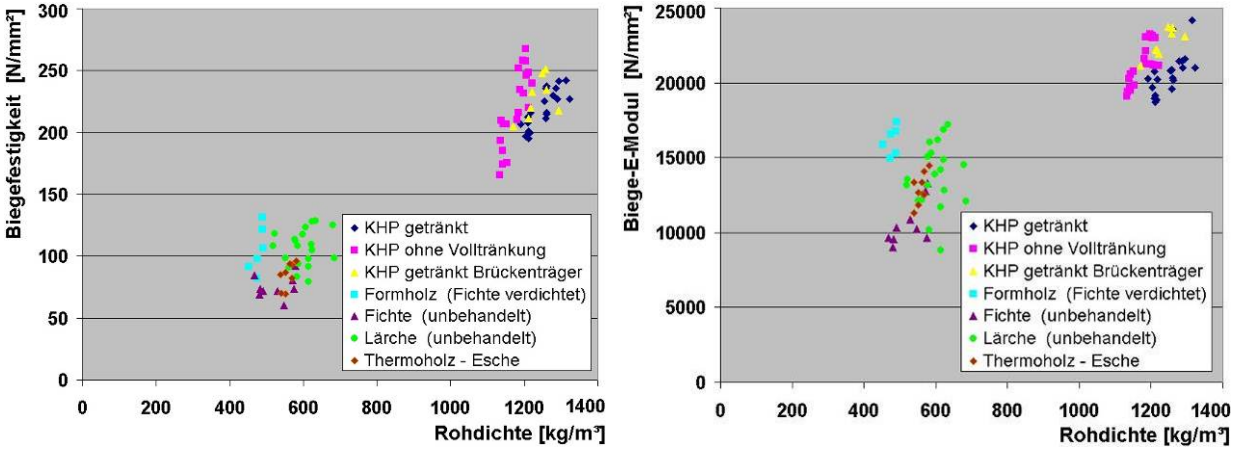


Abb. 3.62 Biegefestigkeiten in Abhängigkeit von der Rohdichte

Die vollständigen Versuchsergebnisse sind in Abb. 3.62 in Form von Diagrammen dargestellt. Jeder Messpunkt entspricht einem Probekörper, wobei sich die Prüfkörper aus KHP mit ihrer fast doppelt so großen Dichte deutlich von den Massivholzproben aus Fichte, Lärche oder Thermoholz absetzen. Mit der höheren Dichte zeigen die Ergebnisse auch größere Festigkeiten für die Prüfkörper aus KHP.



Abb. 3.63 Bruchbild ausgewählter Biegeprüfkörper aus vollständig und unvollständig getränktem KHP

Tabelle 3.11: Ergebnisse der Biegeversuche nach DIN 52186

	Länge [mm]	Breite [mm]	Höhe [mm]	A [mm²]	Gewicht [g]	Dichte [kg/m³]	Fmax [kN]	σ-max [N/mm²]	E-Modul [N/mm²]	Stützweite [mm]
KHP getränkt (Mittelwerte aus **20 Proben**)										
Mittelwert	400	21	22	460	230	**1251**	**4,3**	**219,0**	**20632**	**340**
5% Quantil								**195,4**	**18737**	
Standardabw.						**39**	**0,3**	**15,1**	**1412**	
KHP ohne Volltränkung (Mittelwerte aus **20 Proben**)										
Mittelwert	400	21	20	420	197	**1177**	**3,6**	**220,0**	**21216**	**340**
5% Quantil								**165,7**	**19092**	
Standardabw.						**31**	**0,4**	**30,7**	**1363**	
KHP getränkt – **Brückenträger** (Mittelwerte aus **8 Proben**)										
Mittelwert	467	22	22	491	283	**1236**	**4,2**	**227,5**	**22651**	
5% Quantil								**204,7**	**21129**	
Standardabw.						**38**	**0,3**	**16,8**	**935**	
Formholz – Fichte verdichtet (Mittelwerte aus **8 Proben**)										
Mittelwert	501	25	30	763	182	**558**	**3,6**	**105,2**	**16151**	**450**
5% Quantil								**82,1**	**14975**	
Standardabw.						**15**	**0,6**	**18,6**	**930**	
Fichte – unbehandelt (Mittelwerte aus **9 Proben**)										
Mittelwert	400	22	22	490	103	**525**	**1,6**	**75,3**	**10595**	**340**
5% Quantil								**60,4**	**9007**	
Standardabw.						**45**	**0,2**	**9,3**	**1488**	
Lärche – unbehandelt (Mittelwerte aus **20 Proben**)										
Mittelwert	456	22	22	473	129	**599**	**1,8**	**106,5**	**13669**	
5% Quantil								**79,2**	**8820**	
Standardabw.						**43**	**0,3**	**14,6**	**2174**	
TH_E – Thermoholz Esche (Mittelwerte aus **9 Proben**)										
Mittelwert	500	22	30	657	183	**558**	**2,5**	**85,7**	**12914**	**450**
5% Quantil								**69,6**	**11294**	
Standardabw.						**14**	**0,3**	**10,0**	**1024**	

3.2.8.4.2 Druckprüfung nach DIN 52186

Alle Prüfkörper hatten einen rechteckigen Querschnitt. Die Mittelwerte bzgl. Geometrie, Rohdichte und Druckfestigkeit sind der nachfolgenden Tabelle zu entnehmen. Für die Werte der Dichte und Festigkeit wurden zusätzlich die 5 % Quantilwerte sowie die Standardabweichung der Versuchsergebnisse angeben

Tabelle 3.12: Ergebnisse der Druckversuche nach DIN 52185

	Länge [mm]	Breite [mm]	Höhe [mm]	A [mm²]	Gewicht [g]	Dichte [kg/m³]	Fmax [kN]	σ-max [N/mm²]
KHP getränkt (Mittelwerte aus **20 Proben**)								
Mittelwert	120	22	22	464	70	**1261**	**84,9**	**183,1**
5% Quantil								**170,9**
Standardabw.						**20**	**3,2**	**7,3**
KHP ohne Volltränkung (Mittelwerte aus **20 Proben**)								
Mittelwert	121	20	21	421	60	**1187**	**54,1**	**128,3**
5% Quantil								**98,4**
Standardabw.						**55**	**5,1**	**12,3**
Formholz – Fichte verdichtet (Mittelwerte aus **8 Proben**)								
Mittelwert	121	30	25	769	61	**660**	**46,4**	**60,5**
5% Quantil								**40,6**
Standardabw.						**78**	**8,7**	**12,1**
Fichte – unbehandelt (Mittelwerte aus **6 Proben**)								
Mittelwert	58	23	23	518	13	**449**	**27,3**	**52,7**
5% Quantil								**43,3**
Standardabw.						**55**	**4,4**	**8,6**
TH_E –Thermoholz Esche (Mittelwerte aus **9 Proben**)								
Mittelwert	120	22	29	637	42	**551**	**39,0**	**61,4**
5% Quantil								**49,7**
Standardabw.						**46**	**3,2**	**6,2**

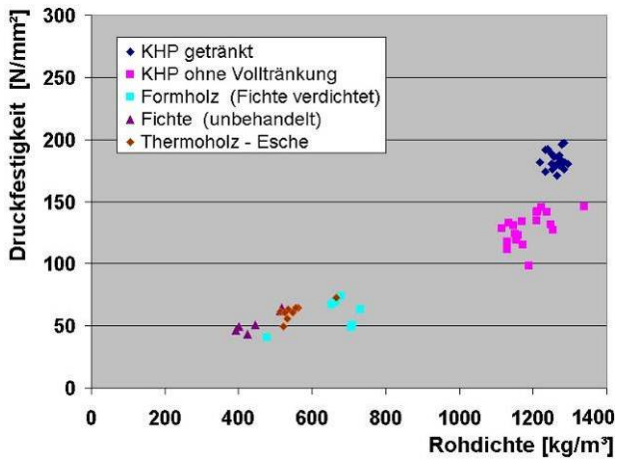


Abb. 3.64 Druckfestigkeiten in Abhängigkeit von der Rohdichte

Die vollständigen Versuchsergebnisse sind in Abb. 3.64 in Form eines Diagrammes dargestellt. Jeder Messpunkt entspricht einem Probekörper, wobei sich die Prüfkörper aus KHP mit ihrer fast doppelt so großen Dichte wieder deutlich von den Massivholzproben aus Fichte oder Thermoholz absetzen. Mit der höheren Dichte zeigen die Ergebnisse auch größere Festigkeiten für die Prüfkörper aus KHP. Druckversuche an Lärchenholz wurden nicht durchgeführt.

3.2.8.5 Kriechen von Kunstharzpressholz

Autor: Petra Kubowitz (IaFB)

3.2.8.5.1 Allgemeines

Zur Ermittlung der Kriechzahlen von Kunstharzpressholz (KHP) wurden Kriechversuche über jeweils 105 Tage in Auftrag gegeben. (Unter Kriechzahl wird hier der relative Kriechfaktor verstanden – vgl. 3.2.8.5.3). Die Versuche wurden in den Jahren 2009 und 2010 am ihd – Institut für Holztechnologie Dresden gemeinnützige GmbH – durchgeführt und vom IaFB ausgewertet. In den ersten Versuchen wurden die Kriechzahlen für KHP in Nutzungsklasse (NKL) 1 und NKL 2 ermittelt. Die zweiten Versuche enthielten die nötigen Referenzmessungen für übliches Nadelholz (Fichte und Lärche) in NKL 1 und ein zusätzliches Spannungsniveau für KHP ebenfalls in NKL 1. Da Kriechzahlen für ständige Lasteinwirkungsdauern gelten sollen (Klasse der Lasteinwirkungsdauer (KLED) ständig: akkumulierte Dauer der charakteristischen Lasteinwirkung beträgt mehr als 10 Jahre, s. [2]), wurden die Werte für NKL 1 und NKL 2 unter Zuhilfenahme verschiedener Ansatzfunktionen auf bis zu 100 Jahre hochgerechnet. Die Werte für NKL 3 wurden lediglich aufgrund der hochgerechneten Werte für die anderen beiden Nutzungsklassen abgeschätzt, hier fanden keine Versuche statt.

3.2.8.5.2 Versuchsdurchführung und Ergebnisse

Die Versuche wurden in Anlehnung an DIN V ENV 1156 ([60]) durchgeführt.

Zur Bestimmung der Kriechzahl von KHP wurden Proben einerseits im Normklima 20°C / 65% rLF (entspricht NKL 1) andererseits im Freien, jedoch überdacht (entspricht NKL 2) einer dauernden Biegebelastung von in der Regel 25% der Bruchlast unterzogen. Eine KHP-Probe wurde abweichend davon mit 50% einer Fichtebruchlast belastet, was in etwa 15% der KHP-Bruchlast entspricht.



Abb. 3.65: Versuchseinrichtung und Probekörper für die Kriechversuche (Fotos: ISH)

Die Prüfkörper wurden sämtlich bei 20°C / 65% rLF bis zur Gewichtskonstanz vorkonditioniert. Die Konditionierung (von Holz- und Holzwerkstoffen) gilt als abgeschlossen, wenn die Masseänderung innerhalb von 24h kleiner oder gleich 0,1% ist (s. beispielsweise [60]). Die Proben für die anschließende erste Prüfung in NKL 1 wurden nach der mehr als 4wöchigen Zimmerla-

gerung im ISH (ca. 25°C / 40%) dafür 8 Tage im Klimaschrank bei 20°C / 65% gelagert, bei der zweiten Prüfung in NKL 1 lagen die Proben nach langer Kellerlagerung im ISH (ca. 25°C / 30%) bis zur geforderten Massekonstanz ebenfalls einige Tage im Klimaschrank bei 20°C / 65%. Die Proben für die Prüfung in NKL 2 wurden nach der Zimmerlagerung im ISH ca. 4 Wochen im Klimaschrank bei 20°C / 65% konditioniert. Die Prüfkörper zur Bestimmung der Kriechzahl in NKL 1 verblieben im Klimaschrank, die Prüfkörper zur Bestimmung der Kriechzahl in NKL 2 wurden anschließend im Freien überdacht gelagert. Die Umgebungstemperatur sowie -feuchtigkeit wurde dabei aufgezeichnet und betrug im Mittel etwa 20°C / 75% rLF, bei doch erheblichen Feuchteschwankungen (55% bis 95%) sowie Temperaturschwankungen um die 10°C während der ersten 70 Tage und anschließendem Temperaturabfall bis auf 3°C. Die Verformung der Prüfkörper wurde unmittelbar nach Aufbringen der Belastung sowie nach Belastungsdauern von 1, 2, 3, 7, 10, 14, 21, 28, 42, 56, 70, 84 und 105 Tagen gemessen.

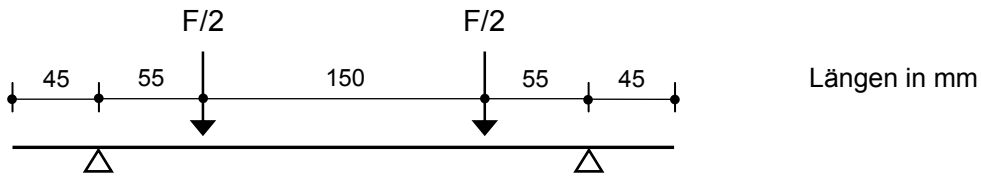


Abb. 3.66: Statisches System für die Kriechversuche

Die zu Beginn der Versuche bestimmten Bruchlasten ergeben unter Berücksichtigung des verwendeten statischen Systems (vgl. Abb. 3.66) und der aufgebrachten Belastung folgende Biegebruchfestigkeiten:

KHP (Mittelwert): f_m ~ 262 N / mm² (vgl. Versuche s. 3.2.8.4): Mittelwert: f_m = 219 N / mm²)
Lärche (Mittelwert): f_m ~ 116 N / mm² (vgl. DIN 68364 [61]: Mittelwert: f_m = 99 N / mm²)
Fichte (Mittelwert): f_m ~ 83 N / mm² (vgl. DIN 68364 [61]: Mittelwert f_m = 80 N / mm²)

Für die Kriechversuche unterlagen die Proben damit folgender Beanspruchung:

KHP 25%: σ_m ~ 65 N / mm² (Mittelwert der angesetzten unterschiedlichen Kriechbelastungen)
KHP 15%: σ_m = 42 N / mm² (Einzelwert)
Lärche: σ_m = 29 N / mm² (für alle Lärcheproben aufgebrachte Kriechbelastung)
Fichte: σ_m = 21 N / mm² (für alle Fichteproben aufgebrachte Kriechbelastung)

Da die zweiten Versuche lediglich eine Ergänzung der ersten Versuchsreihe darstellen sollten und vor allem die Referenzhölzer beinhalteten, wurde die Probekörperanzahl für die zweiten Versuche erheblich vermindert. Es wurden jeweils 4 Probestücke aus Lärche und Kiefer sowie 1 KHP-Probestück mit 25% der Bruchlast und 1 KHP-Probestück mit 15% der Bruchlast geprüft. Die Aussagen sind daher in diesem Fall nicht statistisch abgesichert und lediglich als Tendenz anzusehen.

In den ersten Versuchen ergaben sich nach 105 Tagen folgende Kriechzahlen:

NKL 1: KHP 25%: Mittelwert der Kriechzahlen: 0,42 (bei bis zu 33% Schwankung)
NKL 2: KHP 25%: Mittelwert der Kriechzahlen: 0,65 (bei ca. 40 % Schwankung)

In den zweiten Versuchen ergaben sich nach 105 Tagen folgende Kriechzahlen:

NKL 1: KHP 25%: Einzelwert: 0,51
NKL 1: KHP 15%: Einzelwert: 0,22
NKL 1: Lärche: Mittelwert der Kriechzahlen: 0,26 (bei ca. 50% Schwankung)
NKL 1: Fichte: Mittelwert der Kriechzahlen: 0,35 (bei ca. 50% Schwankung)

Für die Auswertung wurden die Ergebnisse der mit 25% der Bruchlast belasteten KHP-Probekörper in NKL 1 aus den ersten und zweiten Versuchen zusammengefasst.

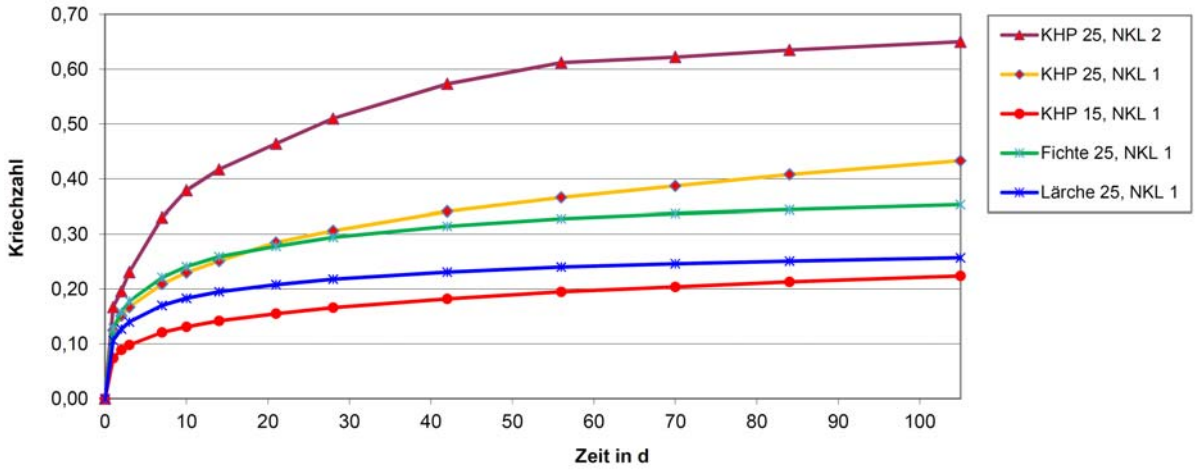


Abb. 3.67: Kriechzahlen von KHP, Fichte und Lärche – Versuchswerte

Die mit 25% der Bruchlast belasteten KHP-Proben zeigten größere Kriechbeiwerte als die Referenzproben, die mit 15% der Bruchlast belastete Einzel-KHP-Probe zeigte hingegen kleinere Kriechbeiwerte. Bei allen KHP-Proben ist auch am Ende der 105 Tage noch ein deutlicher Anstieg der Kriechkurve erkennbar (vgl. Abb. 3.67).

Alles weitere kann den Prüfberichten und den zugehörigen Nachträgen entnommen werden (s. [176], [177], [188], [189]).

3.2.8.5.3 Ergebnisinterpretation und Auswertung

Als schwierig stellte sich vor allem die Vergleichbarkeit der erhaltenen und hochgerechneten Werte mit in Normen (beispielsweise DIN 1052 [2]) angegebenen Kriechzahlen bzw. Verformungsbeiwerten heraus. Hierfür wurde zuerst eine Literaturrecherche sowie eine Befragung einiger in den entsprechenden Normenausschüssen tätiger Fachleute durchgeführt, die im Folgenden zusammengefasst sind.

Die Überarbeitung der DIN V ENV 1156 [60] im Normenausschuss NHM läuft. Die Auswertung bzgl. des Kriechens nach dieser Norm soll vorzugsweise auch zu den Kriechzahlen bzw. Verformungsbeiwerten (k_{def} - Werten) führen, die in EC 5 angegeben sind. Dies ist zur Zeit jedoch nicht unbedingt sichergestellt. Ein Diskussionspunkt ist die Angabe bzw. Ermittlung der Kriechzahlen. Streng genommen müssten Kriechzahlen für die Lebensdauer eines Bauteils ermittelt werden, jedoch gibt es keine Versuche über 50 Jahre oder mehr. Da Kriechzahlen für lange Lasteinwirkungsdauern gelten (sollten), müsste ehrlicherweise mindestens auf 10 Jahre hochgerechnet werden. Es ist nach DIN V ENV 1156 jedoch nicht vorgeschrieben, auf welchen Zeitraum die Kriechzahlen hochgerechnet werden müssen, lediglich der gewählte Zeitraum muss angegeben werden. Zudem ist unklar, wie die Werte nach EC 5 bzw. DIN 1052 ermittelt wurden. Mit einer Neufassung innerhalb der nächsten fünf Jahre ist daher nicht zu rechnen.

Die Klimatisierung und Bruchlastermittlung bei jeweils 20° C/ 65% rLF - unabhängig von den während der späteren Kriechversuche herrschenden Bedingungen (also nicht nur für Versuche in NKL 1 sondern entgegen der normativen Vorgabe auch für Versuche in NKL 2 oder 3) - ist lt. Aussage des ihd eine Einigung der Prüfeinrichtungen für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse. Hintergedanke dabei ist, das eine „Vorschädigung“ bzw. (klimatische) Vorbeanspruchung entfallen soll.

Kriechen von Holz und Holzwerkstoffen

Das Kriechen bezeichnet die Zunahme der Verformung bei gleichbleibender Belastung im Laufe der Zeit. Üblicherweise wird der relative Kriechfaktor (die Kriechzahl bzw. der Verformungsbeiwert) angegeben, seltener der Kriechfaktor. Wird die Verformung mit f bezeichnet, gilt:

$$\varphi(t) = \frac{f(t)}{f(0)}$$ Kriechfaktor

$$\varphi_{relativ}(t) = \frac{f(t) - f(0)}{f(0)} = \frac{f(t)}{f(0)} - 1 = \varphi(t) - 1$$ relativer Kriechfaktor, Kriechzahl, Verformungsbeiwert

In DIN 1052 [2] sind folgende Kriechzahlen (relative Kriechfaktoren, Kriechbeiwerte, Verformungsbeiwerte k_{def}) angegeben:

Vollholz u.ä.:	NKL 1: 0,6	NKL 2: 0,8 (ca. 133% von NKL 1) NKL 3: 2,0 (ca. 250% von NKL 2 bzw. 333% von NKL 1)
Sperrholz u.ä.:	NKL 1: 0,8	NKL 2: 1,0 (ca. 125% von NKL 1) NKL 3: 2,5 (ca. 250% von NKL 2 bzw. 313% von NKL 1)
Spanplatte u.ä.:	NKL 1: 2,25	NKL 2: 3,0 (ca. 133% von NKL 1) NKL 3: 4,0 (ca. 133% von NKL 2 bzw. 178% von NKL 1)

Das Kriechen von Holzwerkstoffen setzt sich zusammen aus dem Kriechen der Holzstrukturelemente, dem Kriechen der Klebefugen und Verschiebungen zwischen den Strukturelementen, das Kriechen der Klebefugen selbst ist jedoch meist vernachlässigbar gering (vgl. [180]). Dominierenden Einfluss auf das Kriechen hat die relative Luftfeuchte. Durch eine Oberflächenbeschichtung wird die Feuchteaufnahme und -abgabe reduziert, dadurch sinkt die Kriechverformung. Weitere Einflussgröße ist die Rohdichte, mit zunehmender Rohdichte sinkt in der Regel die Kriechverformung.

Bei trockenem Holz vergrößern bereits geringe Holzfeuchteänderungen die Kriechverformung stark (vgl. [183]). In der Nähe der Gleichgewichtsfeuchte enthält Holz adsorbiertes Wasser, welches Wasserstoffbrücken zwischen den Celluloseketten bildet. Schon geringe Feuchteänderungen stören das Gleichgewicht der vernetzten Celluloseketten. Ändert sich die Anzahl der Wasserstoffbrücken, so ändert sich die Beanspruchung der einzelnen Celluloseketten, zudem treten Gleitvorgänge in der kristallinen Zellwandstruktur auf. Im Fasersättigungsbereich ist neben dem adsorbierten Wasser auch kapillar gebundenes Wasser vorhanden (welches sich nicht an der Lastaufnahme beteiligt), somit können aufbrechende Wasserstoffbrücken schnell aus dem Kapillarwasser erneuert werden, so dass sich Feuchteänderungen weniger auswirken.

Die Kriechverformungen bei Druckbeanspruchung sind größer als die bei Zugbeanspruchung, da das Lignin stärker kriecht als die Cellulosefasern. Folglich treten bei Biegespannungen infolge des Kriechens Spannungsumlagerungen von der Druck- in die Zugzone auf, die Spannungsnulllinie verschiebt sich in Richtung Zugzone. Bei Biegeträgern ergeben sich in der Druckzone ca. 50% größere Kriechdehnungen als in der Zugzone. Es existiert eine lineare Abhängigkeit zwischen den Kriechfaktoren der Durchbiegung und der Randdehnung. Im Druckbereich sind die Faktoren annähernd gleich, im Zugbereich ist der Kriechfaktor der Durchbiegung annähernd doppelt so groß wie der der Randdehnung (vgl. [183]).

Es sind verschiedene Ansätze zur mathematischen Beschreibung des Kriechverhaltens vorhanden. Neben mathematischen Funktionen können auch mechanische Ersatzmodelle (rheologische Ansätze) betrachtet werden. Dies wird im Rahmen des HHT-Projektes jedoch nicht näher untersucht. Die Genauigkeit der Bestimmung von Konstanten einer Regressionsgleichung erhöht sich mit zunehmender Belastungsdauer. Ein konstantes Klima ist dabei entscheidend für die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse.

Die Kriechverformung steigt auch nach jahrelanger Belastung an. Bezogen auf eine Endverformung nach ca. 11 Jahren werden nach Niemz [180] folgende Werte in NKL 1 erreicht:

Holz:	6 Wochen: 40%;	1,1 Jahre: 67%;	3,3 Jahre: 79%
Sperrholz:	6 Wochen: 22%;	1,1 Jahre: 47%;	3,3 Jahre: 68%

Nach Gressel [181] liegt die Grenzspannung für überproportionales Kriechen für Fichte bei etwa 50% der Bruchspannung, für Furnierschichtholz etwas höher, für Flachpressplatten zwischen 30% und 50% und für Holzfaserplatten (Flachbiegung) bei etwa 30%. Bei scharfer Wechselklimabeanspruchung liegen die Grenzspannungen bei niedrigeren Belastungsgraden. Eine untere Kriechgrenze scheint nicht zu existieren. Die Kriechkurve für Biegung zeigt, dass das Kriechen nach 250 Tagen bei Fichte (20°C / 55% rLF, Belastungsgrad 20-30%) noch nicht abgeschlossen ist. Zudem geht Gressel von deutlich größeren Kriechzahlen aus als in DIN 1052 [2] angegeben. Die Kriechfaktoren im konstanten Normalklima werden auf ca. 2-3 geschätzt (entspricht einer Kriechzahl von 1-2); im natürlichen Außenklima auf 3-8 (Kriechzahl 2-7) und im definierten Wechselklima auf 4-10 (Kriechzahl 3-9) oder sogar mehr.

Gressel führte Versuche über längere Zeiträume (insgesamt etwa 9 Jahre) durch und prüfte für die jeweilige Beschreibung der Kriechfunktion folgende Ansätze (vgl. [182]):

$$Y = \beta_1 + \beta_2 \cdot (1 - e^{-\beta_3 \cdot X}) + \beta_4 \cdot X \tag{3.1}$$

$$Y = \beta_1 + \beta_2 \cdot (1 - e^{-\beta_3 \cdot X}) \tag{3.2}$$

$$Y = \beta_1 \cdot X^{\beta_2} + \beta_3 \tag{3.3}$$

$$Y = \beta_1 \cdot X^{\beta_2} \tag{3.4}$$

Die Anpassung der Messwerte an die Kriechfunktionen erfolgte dabei jeweils über das Prinzip vom Minimum der Fehlerquadrate:

$$S = \sum_{i=1}^{N} (Y_i - Y)^2 = \text{MIN} \tag{3.5}$$

Die Vorhersagegenauigkeit der Formeln (3.3) und (3.4) wurde von Gressel getestet. Beide werden von ihm als geeignet angesehen. Bei der Extrapolation kann es sinnvoll sein, den ersten Teil der Kriechkurve (ca. 20 Tage) unberücksichtigt zu lassen, da sich dort teilweise ein anderer Kurvenverlauf einstellt – die Einflüsse sind lt. Gressel jedoch gering. Bzgl. Formel (3.4) zeigt sich, dass bei einer Berücksichtigung nur der ersten 105 Tage zu große Verformungen (4% bis 48% zu groß) ermittelt werden. Für eine annähernd zutreffende Vorhersage der langfristigen Kriechverformungen (9 bis 114 Jahre) sind nach Gressels Auswertungen Belastungszeiten von mindestens 205 Tagen erforderlich.

Rautenstrauch testete Vollholz und Brettschichtholz aus Fichte im beheizten Innenraum, bei ungefähr gleichbleibend 20°C und unterschiedliche Feuchtigkeiten (Ausgleichsfeuchte im Sommer ca. 12%, im Winter ca. 10%). Die Versuche liefen über ca. 3700 h, d.h. etwa 155 Tage (vgl. [183]). Auch er untersuchte verschiedene Funktionen zur Beschreibung der Kriechkurven. Dabei lieferte die allgemein als sehr gut geeignet angesehene Potenzfunktion nicht immer befriedigende Ergebnisse, das Burgers-Modell (rheologischer Ansatz) erwies sich als besser. In den ersten 250 Stunden (ca. 10 Tage) lieferten alle Ansätze schlechtere Übereinstimmungen, wohl wegen vermehrt auftretender Strukturbrüche (durch Ausrichten der „verknäuelten“ Celluloseketten brechen viele Wasserstoffbrücken auf), dem Primärkriechen. Beim Extrapolieren auf ca. 114 Jahre – anhand der Versuchsergebnisse über ca. 155 Tage – ergaben sich mit dem Potenzansatz Kriechfaktoren von 3,9 (BSH) bzw. 6,4 (VH), also weit höhere Werte als nach DIN 1052. Das Kelvin-Modell lieferte einen unteren Grenzwert (1,0 für BSH), das Burgers-Modell einen oberen Grenzwert (26,3 für BSH). Da nach Gressel der Potenzansatz bei Extrapolation anhand von Versuchsergebnissen über ca. 208 Tage für lange Standzeiten (gemeint sind die etwa 114 Jah-

re) etwa 40% zu große Kriechverformungen ergab (vgl. [181], [182]), bildete Rautenstrauch aus dieser Erkenntnis einen Korrekturfaktor und damit eine angepasste Potenzfunktion.

Ansatz einer angepassten Potenzfunktion:

$$\varphi'(t) = X'_1 \cdot t^{X'_2} \tag{3.6}$$

mit

$X'_1 = \alpha \cdot X_1$ und $X'_2 = \beta \cdot X_2$

Aus den Bedingungen

$\varphi'(t_2 = 10^6\,h) \approx 0{,}6 \cdot \varphi(t_2 = 10^6\,h)$ (Kriechbeiwerte nach ca. 114 Jahren)

und

$\varphi'(t_1) = \varphi(t_1)$ (Kriechbeiwerte zum Ende des Versuchszeitraums nach ca. 155 Tagen)

ergeben sich die Faktoren zu:

$$\beta = \frac{\log 0{,}6}{X_2 \cdot (\log t_2 - \log t_1)} + 1 \quad \text{und} \quad \alpha = t_1^{X_2 \cdot (1-\beta)} \tag{3.7}$$

Rautenstrauch weist jedoch explizit darauf hin, dass dies durch Langzeitversuche überprüft werden muss.

Um Rautenstrauchs Extrapolation auf lange Standzeiten zu verifizieren, startete Moorkamp 1993 erneut Biege- und Druckversuche und berichtete darüber nach einem Versuchszeitraum von mehr als 7 Jahren (vgl. [184]). Die Versuche fanden in einem nicht ausgebauten Dachgeschoss statt – damit lag NKL 1-2, wegen der starken Schwankungen von Temperatur und Feuchtigkeit eher NKL 2, vor.

Bei den Biegeversuchen herrschte im ersten halben Jahr (ca. 180 Tage) eine sehr hohe Kriechgeschwindigkeit, weshalb Moorkamp eine Abschätzung des Endkriechwertes aus Kurzzeitversuchen (hier sind die 180 Tage gemeint) für sehr schwierig hält. Nach einer Versuchsdauer von 7 Jahren ergaben sich Kriechfaktoren von ca. 2,0 (d.h. Verformungsbeiwerte von 1,0 und damit 25% mehr als der in DIN 1052 [2] angegebene Wert von 0,8 für NKL 2, der eigentlich für eine Lasteinwirkungsdauer von mindestens 10 Jahren gelten soll). Auch nach mehr als 7 Jahren war noch kein Endkriechwert erreicht, verglichen mit den ersten beiden Jahren nahm die Kriechgeschwindigkeit jedoch deutlich ab.

Quell- und Schwindverformungen schienen lastabhängig zu sein (im Vergleich zum unbelasteten Zustand entstanden unter Druck größere Verformungen, unter Zug kleinere). Dies könnte die Verformungszunahme in Trocknungsperioden und Verformungsabnahme während Befeuchtungsphasen erklären.

Für den Ansatz von Kriechfunktionen und die „Güte“ der Extrapolation sollte lt. Moorkamp folgendes beachtet werden (vgl. [184]):

- Die Kriechkurve sollte sich asymptotisch einem Endkriechwert nähern.
- Mathematische Modelle scheinen gut geeignet zu sein. Potenzansätze liegen vermutlich auf der sicheren Seite, eigenen sich daher für baupraktische Auswertungen gut.
- Eine Extrapolation auf ca. 114 Jahre ergibt unter Berücksichtigung der Versuchswerte über 7 Jahre relative Kriechfaktoren von ca. 2,0 (Anmerkung: damit ca. 250% des Verformungsbeiwerts von 0,8 nach DIN 1052 [2]. Werte von 2,0 stehen jedoch nicht im Widerspruch zu Erfahrungswerten aus der Praxis.
- Der Potenzansatz lieferte einen rel. Kriechfaktor von ca. 2,2 (als Endkriechwert nach 114 Jahren aufgrund der Versuche über 7 Jahre). Rautenstrauch hatte einen Faktor von 6,4 ermittelt – als Endkriechwert nach 114 Jahren aufgrund der Versuche über 155 Tage.

Daher sollten Langzeitversuche über mindestens 3,5 Jahre geführt werden, dann wird der Endkriechwert nach Potenzfunktion nur noch ca. 30% überschätzt.

- Die Potenzfunktion, die anhand einer Versuchsdauer von 208 Tagen ermittelt wurde, überschätzt die Kriechverformungen um ca. 40 %. Rautenstrauch wird damit bestätigt, dessen Versuche liefen über eine geringere Zeitdauer und ergaben höhere Abweichungen (ca. 65%).
- Der Einfluss einer wechselnden Holzfeuchte auf das Kriechen ist weit größer als der einer hohen Holzfeuchte, daher sollte nicht die Gleichgewichtsfeuchte sondern der zu erwartende Holzfeuchtewechsel berücksichtigt werden.
- Der Vergleich mit Werten nach EC 5 ergibt, dass Verformungen bereits nach 7 Jahren unterschätzt werden. Statt k_{def} = 0,8 müsste für 7 Jahre 1,0 angesetzt werden, für ca. 100 Jahre sogar 2,0. (Moorkamp zieht das Fazit: „Der Deformationsfaktor für ständig wirkende Lasten in dieser Nutzungsklasse ist mit k_{def} = 0,8 offensichtlich zu klein." s. [184], S. 203)

A. Ranta-Maunus kommt in "Creep and effects of moisture in timber" (in [179]) zu dem Schluss, dass die Kriechbeiwerte nach EC 5 sehr niedrig sind im Vergleich zu Versuchen. Er gibt den Hinweis, dass Bauwerke allerdings normalerweise auch nicht mit hohen ständigen Lasten belastet sind und die Faktoren daher durchaus brauchbare Verformungen ergeben. Auch S. Thelandersson fasst in "Deformations in timber structures" (ebenfalls in [179]) zusammen, dass die Werte nach EC 5, welche für eine Lebensdauer von 50 Jahren gelten sollen, sehr gering erscheinen.

Kriechen von Epoxidharz

Allgemein verhalten sich Klebstoffe ausgeprägt visko-elastisch.

Borchert gibt an, dass das Kriechmaß üblicher, hochvernetzter Epoxidharze etwa 3-4 mal höher liegt als das von Beton (vgl. [185]). Damit würde die Kriechzahl einiger Epoxidharze bei etwa 8 liegen.

Habenicht verweist zudem darauf, dass die die Grenze der linearen Viskoelastizität für Epoxidharzklebstoffe relativ niedrig ist (vgl. [186]) und durch Feuchtigkeit eine größere Verformungsfähigkeit auftritt. Dies ist ein Indiz, dass auch das Kriechen von Epoxidharz feuchteabhängig ist.

Ruttert zeigt, dass das Kriechen von Klebstoffen spannungs-, temperatur- und feuchteabhängig ist (vgl. [187]). Leider werden jedoch nur Zeiträume bis zu 20 Tagen betrachtet. Zudem werden nur die Luftfeuchtigkeiten 0% rLF und 50% rLF untersucht, daher sind Angaben über die Feuchteabhängigkeit unter baupraktischen Bedingungen kaum möglich. Ein zweiparametriger Potenzansatz wird von Ruttert nicht für sinnvoll gehalten, da dieser nicht sowohl Primär- als auch Sekundärkriechen beschreiben kann und daher zwangsläufig zu ungenauen Ergebnissen führt, wenn beide Bereiche betrachtet werden sollen. Hierzu ist jedoch anzumerken, dass es im Rahmen des HHT-Projektes um weit längere Zeiträume geht und das Primärkriechen kaum eine Rolle spielen sollte. Um den Einfluss auszuschließen, können die Versuchswerte der ersten bis zu 20 Tage bei der Bestimmung der Kriechfunktionen außer Acht gelassen werden.

Forderungen bzgl. der Auswertung nach DIN V ENV 1156 [60]:

Ermittlung der Kriechzahl:

$$k_c = \frac{(w_T - w_0) - (w_1 - w_0)}{(w_1 - w_0)} \tag{3.8}$$

mit w_1: Durchbiegung nach 1 Minute

w_0: Durchbiegung zum Zeitpunkt 0 (unmittelbar nach Belastung)

w_T: Durchbiegung zum Zeitpunkt T

Es muss jeweils die zugehörige Belastungsdauer, die Nutzungsklasse sowie das verwendete Spannungsniveau angegeben werden.

Um die Kriechzahl für 10 Jahre zu bestimmen, ist jeweils der mittlere Kriechwert der 10 Proben zu bestimmen und der 10er-Logarithmus dieses Wertes gegen den 10er-Logarithmus der Belastungszeit in Minuten aufzutragen. Um zu Extrapolieren, wird durch diese Punkte (die ersten 10 Minuten sollen unbeachtet bleiben) eine Gerade gelegt und bis zum gewünschten Wert verlängert. Wird eine hohe Genauigkeit der Kriechzahl-Voraussage gefordert, dürfen folgende Formeln angewendet werden:

$$k_c = \beta_1 + \beta_2 \cdot [1 - \exp(-\beta_3 \cdot T)] + \beta_4 \cdot T^{\beta_5} \quad \text{(rheologisches Modell)} \tag{3.9}$$

$$k_c = \alpha_1 \cdot T^{\alpha_2} \quad \text{(mathematische Potenzfunktion)} \tag{3.10}$$

Weitere Hinweise aus DIN V ENV 1156 [60]:

- Ein Prüfkörpersatz muss aus 70 Paaren nebeneinander liegender Prüfkörper bestehen.
- Die Länge eines Prüfkörpers soll das 10-fache der Dicke plus 210mm betragen.
- Prüfkörper sind bis zur Massekonstanz zu klimatisieren. Es ist das Klima zu verwenden, das den schärfsten Bedingungen in der Nutzungsklasse entspricht.
  (NKL 1: 20°C / 65% rLF; NKL 2: 20°C / 85% rLF, NKL 3: 20°C / 95% rLF)
- Zuerst wird an jeweils einem Prüfkörper der Probenpaare die Kurzzeitbiegefestigkeit geprüft (unter den klimatischen Bedingungen der Vorklimatisierung). Dann wird der zweite für den Kriechversuch genutzt und dafür mit einem bestimmten Prozentsatz der Bruchlast (Spannungsniveau) belastet. Während des Kriechversuchs müssen die gleichen klimatischen Bedingungen herrschen wie im Kurzzeitbiegeversuch.
- Es reicht, nur ein Spannungsniveau (z.B. 25%) zu fahren, da davon ausgegangen wird, dass sich das Material bis zu einem Niveau von mindestens 40% der Bruchlast linear visko-elastisch verhält. Bestehen daran Zweifel, sollen verschiedene Kriechversuche mit Spannungsniveaus zwischen 10% und 40% durchgeführt werden.
- Die Dauer der Kriechprüfung muss mindestens 26 Wochen, vorzugsweise jedoch 52 Wochen betragen.
- Der Prüfbericht ist nach EN 326-1 zu erstellen und muss u.a. auch Schätzwerte für k_c und die Angabe des verwendeten Modells enthalten.

<u>Abweichungen von DIN V ENV 1156 [60]:</u>

Versuchsdauer und -anzahl:

Kriechversuche am KHP waren ursprünglich nicht geplant sondern wurden im Zuge der Genehmigungsfähigkeit für die HHT-Brücke im Pilotprojekt „Fußgängerbrücken“ in das Versuchsprogramm aufgenommen. Um den Kosten- und Zeitrahmen des Forschungsvorhabens einhalten zu können, wurde beschlossen, Prüfkörperanzahl und Versuchsdauer zu mindern. Es wurden 42 KHP-Prüfkörper erstellt, davon wurden 9 für Kriechversuche in NKL 1 mit einem Spannungsniveau von 25% genutzt, 11 für Kriechversuche in NKL 2 ebenfalls mit einem Spannungsniveau von 25% und 1 für einen Kriechversuch in NKL 1 mit einem Spannungsniveau von ca. 15%. Die restlichen Probekörper dienten der Ermittlung der Kurzzeitbiegebruchlasten. Zudem wurden je 8 Fichte- und Lärcheprobekörper erstellt und jeweils die Hälfte zur Ermittlung der Kurzzeitbiegebruchlasten und für Kriechversuche genutzt. Diese Proben stellten lediglich Referenzmessungen dar. Da die Eigenschaften von KHP wesentlich weniger streuen als die üblichen Vollholzes wird davon ausgegangen, dass die Kriechversuche unter 25% Bruchlast belastbare Ergebnisse liefern können. Der Einzelversuch mit 15% Bruchlast kann allerdings nur als Tastversuch angesehen werden und eine Tendenz für die Kriechzahl liefern, statistisch abgesichert ist das Ergebnis keineswegs. Als Versuchsdauer wurde in Abstimmung mit dem ihd ein Zeitraum von 105 Tagen gewählt. Dies war aus Zeitgründen nötig, stellte sich jedoch im Nachhinein

als sehr ungünstig heraus, da es die Hochrechnung sehr erschwerte und die Genauigkeit der errechneten Kriechzahlen deutlich mindert.

Probekörpermaße:

Die Länge der Probekörper war etwas größer als gefordert. Da die zusätzliche Länge jedoch als unbelastetes, auskragendes Ende (s. Abb. 3.66) genutzt wurde, wird davon ausgegangen, dass dies die Ergebnisse nicht beeinflusste.

Klimatisierung der Probekörper:

Es wird davon ausgegangen, dass das Vorgehen des ihd, die Bruchlasten jeweils nach Konditionierung im Normklima 20°C / 65% rLF zu bestimmen, zwar nicht normkonform, jedoch Stand der Technik ist. Allerdings war der Zeitraum für die Konditionierung der Probekörper zur Prüfung in NKL 1 in beiden Versuchsreihen sehr gering. Zwar war die Konditionierung laut Definition über die Masseänderung abgeschlossen, jedoch nimmt das KHP durch die Tränkung mit Kunstharzpressholz Feuchtigkeit nur sehr schlecht bzw. zeitlich erheblich verzögert auf, so dass die Wahrscheinlichkeit einer ständigen, jedoch geringen Feuchtigkeitszunahme über die gesamte Versuchsdauer für diese Proben hoch ist. Wegen dieser Vermutung wurden die Propekörpermassen der zweiten Versuchsreihe unmittelbar vor und nach den Biegekriechversuchen bestimmt. Es zeigte sich, dass die Masse der Lärche- und Fichteproben während der 105 Tage zwar geringfügig (bis zu 1 %) abnahm, was in etwa einer Änderung der Holzfeuchte um ebenfalls 1% (von ca. 13,5 % auf 12,5 %) entspricht, die Masse der KHP-Proben jedoch tatsächlich geringfügig (0,2 %) zunahm, was in etwa einer Änderung der Holzfeuchte um ebenfalls 0,2 % (von ca. 2,9 % auf 3,1 %) entspricht. Diese Zunahme ist überaus gering. Da die Holzfeuchte selbst beim KHP jedoch ebenfalls sehr gering ist, entspricht dies einer prozentualen Zunahme von immerhin 7 %. Die Proben zur anschließenden Prüfung in NKL 2 wurden länger vorklimatisiert, so dass diese wahrscheinlich eine etwas höhere Ausgangsfeuchtigkeit hatten. Die Feuchtigkeit wurde durch die Prüfung im Außenbereich anschließend jedoch nicht konstant gehalten sondern schwankte, was in der Regel zu höheren Kriechverformungen führt. Allerdings dürften kurzzeitige Feuchtigkeitsschwankungen wenig Einfluss haben, da sich diese nicht in einer veränderten KHP-Feuchte widerspiegeln, bedeutender sind hier Änderungen über einen längeren Zeitraum, die dann auch eine Anpassung der KHP-Feuchte hervorrufen. Es wird daher davon ausgegangen, dass sowohl die Werte für NKL 1 (langsame Erhöhung der Feuchtigkeit durch wahrscheinlich nicht abgeschlossene Konditionierung) als auch für NKL 2 (langsame Änderung der Feuchtigkeit durch schwankende Luftfeuchtigkeiten) tendenziell geringfügig zu hoch liegen.

3.2.8.5.4 Kriechzahlermittlung und Bewertung

Eine Hochrechnung der Versuchswerte auf mindestens 10 Jahre erscheint sinnvoll und nötig, da Kriechbeiwerte für ständige bzw. quasiständige Lasteinwirkungsdauern gelten sollen. Die Hochrechnung auf bis zu 100 Jahre wurde auf Basis der Versuchsdaten über eine Dauer von 105 Tagen vorgenommen und mittels folgender Ansätze durchgeführt:

- Logarithmischer Ansatz 1 (analog [60]):
  Doppeltlogarithmisches (10er Logarithmus) Auftragen der Versuchsergebnisse, Finden der Ausgleichsgerade durch Excel, Prüfen des Korrelationskoeffizienten, bei $R^2 > 0{,}9$: Verlängern der Gerade bis zum gewünschtem Zeitpunkt
- Zweiparametrige Potenzfunktion (analog [60]):
  Die Parameter werden durch Regression bestimmt (Methode der kleinsten Fehlerquadrate – das Minimum der Fehlerquadrate wurde durch den Solver von Excel ermittelt), dabei wurden die ersten Tage teilweise unberücksichtigt gelassen, um das Primärkriechen auszuschließen. Die Potenzansätze 1/105, 10/105 und 21/105 wurden untersucht (21/105 bedeutet z.B. die Berücksichtigung der Werte von Tag 21 bis Tag 105), der Ansatz 10/105 letztendlich gewählt.
  $k_{def} = \alpha_1 \cdot T^{\alpha_2}$
  mit α_1 und α_2 aus Regression mittels Methode der kleinsten Fehlerquadrate

- Angepasste zweiparametrige Potenzfunktion (in Anlehnung an [183]):
  Unter der Annahme, die Potenzfunktion (s.o.) liefere bei Extrapolation auf 100 Jahre aufgrund von Versuchsdaten aus 105 Tagen x% zu große Verformungen, werden die Parameter angepasst.

  $k_{def} = \alpha'_1 \cdot T^{\alpha'_2}$ mit

  a) $\alpha'_1 = \alpha_1 \cdot 151200^{\log_{\frac{151200}{52560000}} 0{,}4}$ und $\alpha'_2 = \alpha_2 - \log_{\frac{151200}{52560000}} 0{,}4$ (60% zu große Verformungen)

  b) $\alpha'_1 = \alpha_1 \cdot 151200^{\log_{\frac{151200}{52560000}} 0{,}6}$ und $\alpha'_2 = \alpha_2 - \log_{\frac{151200}{52560000}} 0{,}6$ (40% zu große Verformungen)

  c) $\alpha'_1 = \alpha_1 \cdot 151200^{\log_{\frac{151200}{52560000}} 0{,}7}$ und $\alpha'_2 = \alpha_2 - \log_{\frac{151200}{52560000}} 0{,}7$ (30% zu große Verformungen)

- Logarithmischer Ansatz 2:
  Finden einer logarithmischen (natürlicher Logarithmus) Trendlinie durch Excel

Der Vergleich der so ermittelten Kriechbeiwerte mit Normwerten ist schwierig, da unklar ist, wie diese Normwerte bestimmt wurden. Durchgeführte Versuche anderer ergaben immer größere Kriechverformungen als die Ermittlung mit Kriechbeiwerten nach Norm. Gerade für lange Standzeiten und schwankende Feuchtigkeiten wurden die Normwerte doch deutlich (ca. 250%) übertroffen (vgl. 3.2.8.5.3). Für den Vergleich und vor allem auch die Abschätzung der Werte für NKL 3 wurde daher eine Grenzwertbetrachtung vorgenommen und ein Schätzwert angegeben. Die ersten 10 Tage blieben dabei jeweils unberücksichtigt, um einen eventuellen Einfluss des Primärkriechens auszuschließen bzw. abzumindern.

Um zu entscheiden, welche Funktion sinnvolle Endkriechwerte liefert, wurde die Auswertung der Lärchen- und Fichteproben bezüglich Kurvenverlauf und Vergleichbarkeit mit Normwerten betrachtet. Die Auswertung der vier betrachteten Funktionen (vgl. Abb. 3.68 und Tabelle 3.13) ergibt folgendes Bild bzgl. der Kriechzahlen (gemeint sind die relativen Kriechfaktoren $\varphi_{relativ}$ bzw. k_{def}):

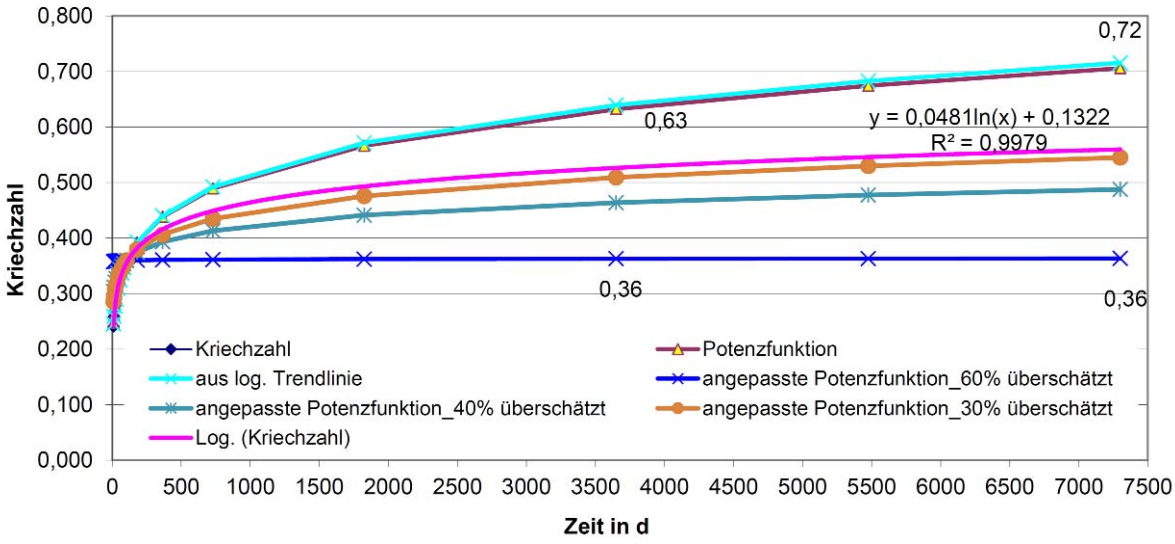


Abb. 3.68: Kriechzahlen von Fichte in NKL 1, Hochrechnung auf 20 Jahre

Tabelle 3.13: Kriechzahlen für Fichte und Lärche in NKL 1 (2. Versuchsreihe)

	Versuch		Funktion 1		Funktion 2		Funktion 3 a)		Funktion 3 b)		Funktion 4	
	Fichte	Lärche	Fichte	Lärche	Fichte	Lärche	Fichte	Lärche	Fichte	Lärche	Fichte	Lärche
105 Tage	0,353	0,257	0,359	0,261	0,358	0,260	0,358	0,260	0,358	0,260	0,356	0,259
1 Jahr			0,440	0,312	0,437	0,310	0,360	0,255	0,392	0,278	0,416	0,298
10 Jahre			0,639	0,434	0,631	0,430	0,362	0,247	0,463	0,315	0,527	0,371
100 Jahre			0,929	0,605	0,910	0,595	0,364	0,238	0,546	0,357	0,637	0,443

Die Hochrechnung der Werte für Fichte und Lärche zeigt, dass die anfangs angenommene Überschätzung der Kriechbeiwerte um 60% (Funktion 3a)) entgegen der Erwartung zu günstig erscheint. In diesem Fall ändern sich die Kriechbeiwerte im Zeitraum zwischen 105 Tagen und 100 Jahren kaum. Die Kurven für Lärche zeigen sogar sinkende Werte, was als unpassend angesehen wird. Zudem sind die so ermittelten Kriechbeiwerte von 0,36 für Fichte und 0,24 für Lärche zu klein – verglichen mit dem Wert nach DIN 1052 [2] für Vollholz in NKL 1 von 0,6. Andererseits sollten sich die Kriechbeiwerte nach 10 Jahren nicht noch deutlich ändern, die Asymptote der Kriechkurve also erkennbar sein. Aus diesem Grund wird die Annahme einer Überschätzung der Werte um 40% (Funktion 3b)) als realistisch angesehen. Mit diesem Vorgehen ergeben sich bei einer Hochrechnung auf 100 Jahre für Fichte Kriechbeiwerte von etwa 0,6, für Lärche etwa 0,4 (bei jeweils doch deutlichen Schwankungen der Einzelwerte). Zu erkennen ist, dass der Wert der angepassten Potenzfunktion nach 100 Jahren jeweils in etwa dem Wert der nicht angepassten Potenzfunktion nach 10 Jahren entspricht. Für Vollholz wird daher als einfache Vorgehensweise zur Bestimmung von Endkriechzahlen vorgeschlagen, den Wert der Potenzfunktion, ermittelt aus den Versuchsdaten zwischen 10 und 105 Tagen unter Beachtung des Minimums der Fehlerquadrate, auf 10 Jahre hochzurechnen und als rechnerischen Kriechbeiwert anzusetzen. Bei unseren Versuchswerten ergäbe das Kriechbeiwerte von 0,63 für Fichte und 0,43 für Lärche. Diese gelten – aufgrund der Versuchsanordnung – allerdings für Konstantklimate. Die Werte, die sich in NKL 1 bei schwankenden Umgebungsbedingungen einstellen, werden wegen der dann (leicht) schwankenden Holzfeuchtigkeit etwas höher liegen.

Zur Auswertung der Kriechversuche für KHP wurden ebenfalls die Funktionen 1, 2, 3 und 4 herangezogen. Die Funktionen 1 und 2 ähneln sich sehr stark, was nicht weiter verwundert, da die gewählte Ausgleichsgerade von Excel ebenfalls durch Minimierung der Fehlerquadrate bestimmt wird. Funktion 3 und 4 ähneln sich ebenfalls, obwohl der mathematische Hintergrund ein anderer ist. Funktion 3 b) wurde unter der Voraussetzung bestimmt, der 2parametrige Potenzansatz von Funktion 2 liefere für 100 Jahre 40% zu hohe Werte, Funktion 4 ist eine normallogarithmische Ausgleichsfunktion von Excel. Da der Literatur ([181], [182], [183] und [184]) entnommen werden kann, dass der Potenzansatz nach Funktion 2 tendenziell, gerade für kurze Versuchsdauern, zu hohe Werte liefert, werden die nach Funktion 4 und vor allem nach Funktion 3 (b) errechneten Kriechzahlen als bessere Abschätzung angesehen. Dafür spricht zudem, dass eine etwa 80%ige Vergrößerung der Kriechzahl von 10 auf 100 Jahre (wie die Funktionen 1 und 2 ergeben) unrealistisch erscheint. Auch wenn der Endkriechwert nach 10 Jahren noch nicht erreicht ist, sollte die Kriechkurve zu dieser Zeit eine Asymptote erkennen lassen, was nur bei Funktion 3 und 4 der Fall ist. Aus diesem Grund und wegen der bezüglich Lärche und Fichte gewonnenen Erkenntnisse wurde zur Ermittlung für die rechnerischen Kriechzahlen von KHP für eine Bauteillebensdauer von ca. 100 Jahren Funktion 3b herangezogen und damit ein „wahrscheinlicher Wert“ bestimmt. Die anderen Funktionen geben Grenzwerte an.

Für NKL 3 wird eine etwa 250%ige Erhöhung der Werte aus NKL 2 angesetzt, da die Unterschiede zwischen NKL1 und NKL2 mit ca. 130% im Bereich der entsprechenden Unterschiede von Vollholz und Sperrholz liegen. Es wird jedoch vermutet, dass die Unterschiede beim KHP eher geringer sind, da die Feuchteunterschiede infolge des Harzanteils weniger Einfluss auf den Kriechbeiwert haben dürften. Dies sollte in zukünftigen Projekten überprüft werden.

Die Auswertung der vier betrachteten Funktionen ergibt folgendes Bild bzgl. der Kriechzahlen (gemeint sind hier die relativen Kriechfaktoren $\varphi_{relativ}$ bzw. k_{def}):

Tabelle 3.14: Kriechzahlen für $KHP_{25\%}$ in NKL 1 und NKL 2 (1. Versuchsreihe)

	Versuch		Funktion 1		Funktion 2		Funktion 3 b		Funktion 4	
	NKL 1	NKL 2	NKL 1	NKL 2	NKL 1	NKL 2	NKL 1	NKL 2	NKL 1	NKL 2
105 Tage	0,423	0,650	0,424	0,683	0,426	0,683	0,426	0,683	0,415	0,669
1 Jahr			0,595	0,919	0,596	0,907	0,534	0,813	0,521	0,820
10 Jahre			1,114	1,592	1,109	1,533	0,814	1,124	0,716	1,102
100 Jahre			2,085	2,757	2,066	2,591	1,239	1,555	0,911	1,383

Tabelle 3.15: Kriechzahlen für $KHP_{25\%}$ und $KHP_{15\%}$ in NKL 1 (1. und 2. Versuchsreihe)

	Versuch		Funktion 1		Funktion 2		Funktion 3 b		Funktion 4	
	KHP 25	KHP 15	KHP 25	KHP 15	KHP 25	KHP 15	KHP 25	KHP 15	KHP 25	KHP 15
105 Tage	0,433	0,224	0,434	0,224	0,430	0,224	0,543	0,224	0,424	0,221
1 Jahr			0,606	0,298	0,598	0,298	0,537	0,267	0,531	0,270
10 Jahre			1,122	0,503	1,104	0,503	0,810	0,369	0,729	0,361
100 Jahre			2,078	0,850	2,037	0,850	1,222	0,510	0,926	0,452

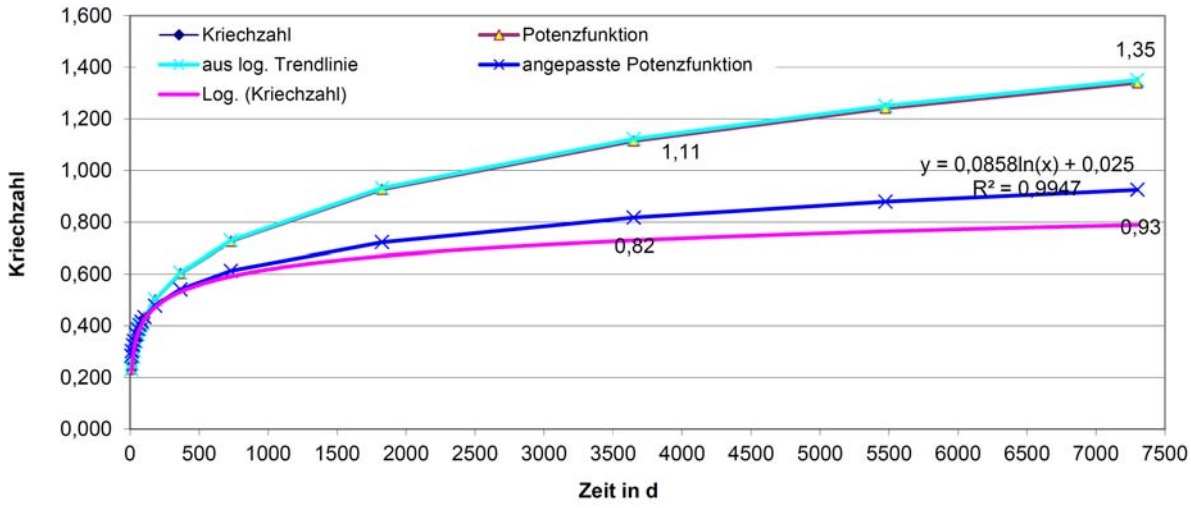


Abb. 3.69: Kriechzahlen für KHP25% in NKL 1 – Hochrechnung auf 20 Jahre nach den ersten Versuchen

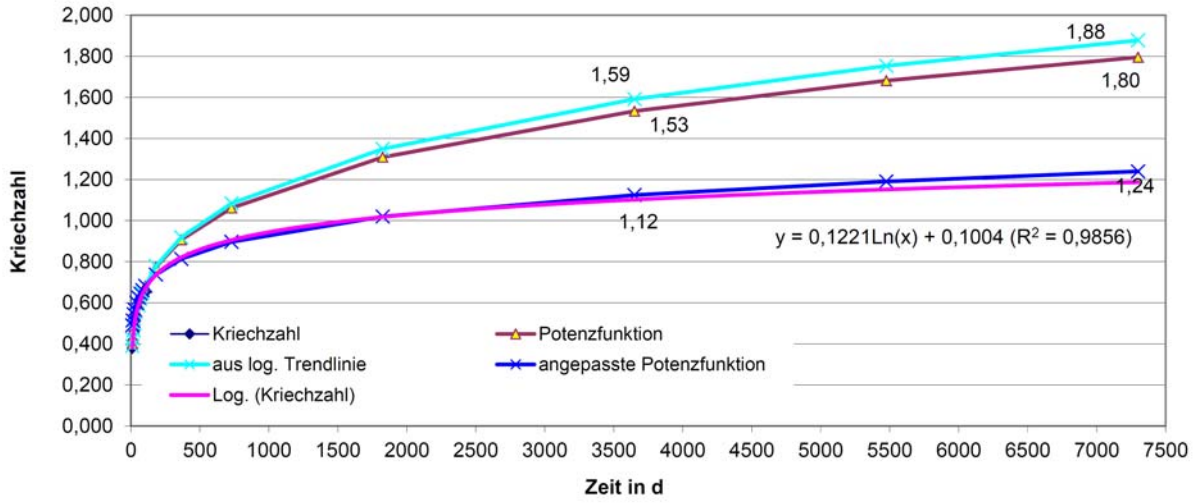


Abb. 3.70: Kriechzahlen für $KHP_{25\%}$ in NKL 2 – Hochrechnung auf 20 Jahre

Bei den mit 25% der Bruchlast belasteten KHP-Proben wird ein stärkerer Anstieg der Kriechkurven und eine sich wesentlich später einstellende Asymptote deutlich. Hier sind auch bei der angepassten Potenzfunktion (unter der Annahme 40%iger Überschreitung der Werte) nach 20 Jahren noch keine Endkriechbeiwerte erreicht. Hierzu ist allerdings zu bemerken, dass die Feuchtigkeit der Proben in NKL 1 über den Versuchszeitraum von 105 Tagen leicht anstieg, so dass vermutet wird, dass die Kriechbeiwerte im Konstantklima 20°C / 65% rLF etwas kleiner sind, und dass die Werte für NKL 2 im überdachten Außenbereich, also bei schwankenden Umgebungsbedingungen und damit auch leicht schwankender Holzfeuchte, ermittelt wurden, so dass auch hier vermutet wird, dass die Kriechbeiwerte im Konstantklima 20°C / 85% rLF etwas kleiner sind. Festzustellen ist jedoch, dass die Kriechbeiwerte von mit 25% der Bruchlast belastetem KHP höher ausfallen als von Lärche oder Fichte, was einerseits dem geschichteten Aufbau (analog Furnierschichtholz mit Querlagen), vor allem jedoch auch dem hohen Harzanteil zugeschrieben wird. Zudem unterscheiden sich die Werte für NKL 1 und 2 doch deutlich, so dass für NKL 3 ebenfalls von einer deutlichen Steigerung zu NKL 2 ausgegangen werden muss. Die Unterschiede zwischen NKL 1 und 2 vor Augen und den Abstand zu NKL 3 analog zu in DIN 1052 [2] geregelten Holz- bzw. Holzwerkstoffen angesetzt, ergeben sich folgende rechnerische Endkriechwerte (Werte nach 100 Jahren) für die mit 25% der Bruchlast belasteten KHP-Proben:

NKL 1:	0,9…..2,1	wahrscheinlicher Wert: k_{def} = 1,2		
NKL 2:	1,2…..2,8	wahrscheinlicher Wert: k_{def} = 1,5		
NKL 3:	(2,7....7,0)	wahrscheinlicher Wert: k_{def} = 3,7		(ca. 300% von NKL 1)
			bzw.	(ca. 250% von NKL 2)

Bei der mit etwa 15% der Bruchlast belasteten KHP-Probe zeigen sich deutlich kleinere Kriechbeiwerte, die sogar die für Lärche bzw. Fichte ermittelten Werte unterschreiten. Das Kriechverhalten von KHP ist folglich lastabhängig und das anfangs unterstellte lineare viskoelastische Verhalten bis etwa 40% der Bruchlast (wie bei üblichen Holz- und Holzwerkstoffen) damit nicht zutreffend. Zu beachten ist hierbei allerdings, dass es sich um einen Einzelwert handelt und eine statistisch abgesicherte Aussage damit nicht möglich ist. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

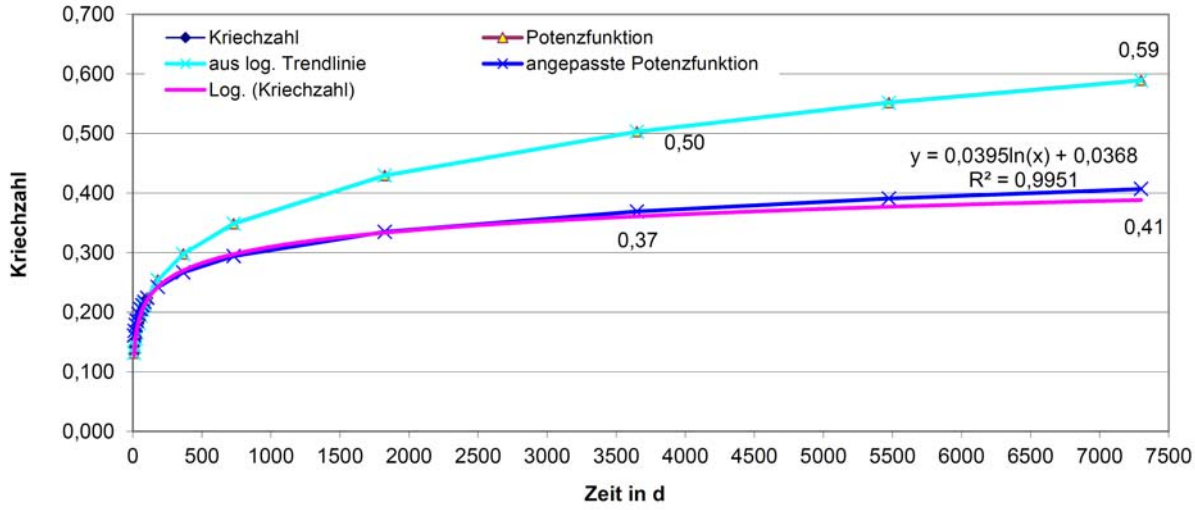


Abb. 3.71: Kriechzahlen für $KHP_{15\%}$ in NKL 1 – Hochrechnung auf 20 Jahre

Für die mit 15% der Bruchlast belastete KHP-Probe ergeben sich folgende rechnerische Endkriechwerte (Werte nach 100 Jahren):

NKL 1:	0,4…..0,9	wahrscheinlicher Wert: k_{def} = 0,5		
NKL 2:	(0,5....1,1)	wahrscheinlicher Wert: k_{def} = 0,7		(ca. 125% von NKL 1)
NKL 3:	(1,2....2,8)	wahrscheinlicher Wert: k_{def} = 1,7		(ca. 300% von NKL 1)
			bzw.	(ca. 250% von NKL 2)

3.2.8.5.5 Zusammenfassung und Fazit

Für KHP wurden Kriechbeiwerte durch Biegeversuche über 105 Tage bestimmt und auf bis zu 100 Jahre hochgerechnet. Die Proben für NKL 1 wurden dabei in einer Klimakammer (20°C / 65% rLF) vorkonditioniert und anschließend geprüft. Die Proben für NKL 2 wurden ebenfalls in einer Klimakammer (20°C / 65% rLF) vorkonditioniert, dann jedoch im Freien, überdacht geprüft. Als Referenzproben wurden Lärche- und Fichteprobekörper in NKL 1 geprüft. Die mit 25% der Bruchlast belasteten KHP-Proben zeigten größere Kriechbeiwerte als die Referenzproben, die mit 15% der Bruchlast belastete Einzel-KHP-Probe zeigte hingegen kleinere Kriechbeiwerte. Bei allen KHP-Proben war auch am Ende der 105 Tage noch ein deutlicher Anstieg der Kriechkurve erkennbar.

Für die Hochrechnung über den Versuchszeitraum hinaus wurden verschiedene Ansätze untersucht und hinsichtlich des Kurvenverlaufs sowie des Vergleichs der Versuchs- und Normwerte der Lärchen- und Fichtereferenzproben bewertet. Als beste Abschätzung wird eine Potenzfunktion angesehen, die anhand der Versuchswerte unter Beachtung des Minimums der Fehlerquadrate ermittelt wurde und deren Faktoren anschließend unter Annahme einer 40%igen Überschätzung der Werte nach 100 Jahren bei Hochrechnung aufgrund der Versuche über 105 Tagen angepasst wurden. Für die Referenzproben entspricht der so ermittelte Wert nach 100 Jahren in etwa dem Wert der nichtangepassten Potenzfunktion nach 10 Jahren.

Während die Kriechkurven für Lärche, Fichte und auch die gering belastete KHP-Probe nach 10 Jahren deutliche Asymptoten zeigen, lassen die Kriechkurven für die höher belasteten KHP-Proben selbst nach 100 Jahren noch deutliche Steigungen erkennen. Daher wird die Annahme der 40%igen Überschätzung in diesem Fall als auf der sicheren Seite liegend angesehen.

Die Vermutung, das Kriechen von KHP sei feuchteunabhängig, kann nicht bestätigt werden. Zwar ist die Feuchteänderung des Holzes selbst durch die Tränkung mit Kunstharzpressholz sehr gering, allerdings kriecht auch Epoxidharz feuchteabhängig. Leider lässt sich zwar das Grundkriechen von Epoxidharz abschätzen, jedoch fehlt eine quantitative Einschätzung des

feuchtebedingten Anteils für baupraktische Gegebenheiten. Es wird davon ausgegangen, dass das Grundkriechen relativ hoch ist, der feuchtebedingte Anteil demgegenüber dann eher gering ausfällt, jedoch noch merkbar vorhanden ist. Die hohe Rohdichte der verdichteten Furniere und der hohe Harzanteil haben gegenteiligen Einfluss. Während das Kriechen bei hohen Rohdichten geringer ausfällt, bewirkt das Harz selbst große Kriechverformungen. Daher wird vermutet, dass die Kriechzahlen tendenziell im Bereich von Furnierschichtholz mit Querlagen liegen, bei geringen Feuchtigkeiten eher etwas höhere Werte annehmen, bei höheren Feuchtigkeiten ähnliche oder geringere Werte erreichen.

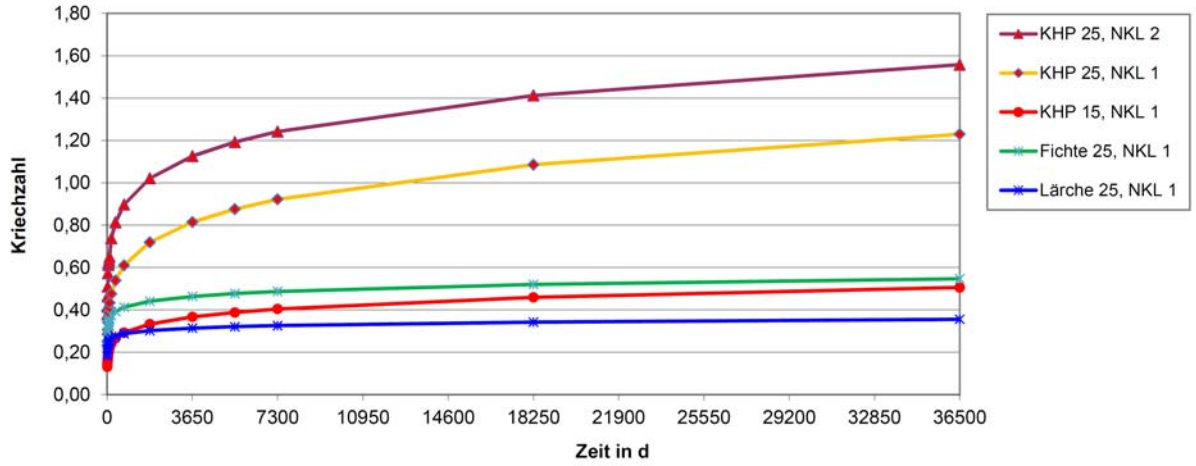


Abb. 3.72: Kriechzahlen für KHP, Fichte und Lärche – Hochrechnung auf 100 Jahre

Folgende rechnerische Kriechbeiwerte wurden durch Hochrechnung ermittelt:

KHP 25%:	$k_{c,\,100Y,\,SC\,1,\,25\%} = 1,2$	$k_{c,\,100Y,\,SC\,2,\,25\%} = 1,5$	$k_{c,\,100Y,\,SC\,3,\,25\%} = 3,7$
KHP 15%:	$k_{c,\,100Y,\,SC\,1,\,15\%} = 0,5$	$k_{c,\,100Y,\,SC\,2,\,15\%} = 0,7$	$k_{c,\,100Y,\,SC\,3,\,25\%} = 1,7$
Lärche 25%:	$k_{c,\,100Y,\,SC\,1,\,25\%} = 0,4$		
Fichte 25%:	$k_{c,\,100Y,\,SC\,1,\,25\%} = 0,6$		

Bzgl. der Indizierung gilt:
c: creep – Kriechen
100Y: 100 years – Vorhersagewert für 100 Jahre
SC 1: service class 1 – Nutzungsklasse 1 (SC 2 und SC 3 analog)
25%: Spannungsniveau betrug 25% der Biegebruchfestigkeit (15% analog)

Die KHP-Proben zeigen ein deutlich lastabhängiges Kriechverhalten, weshalb weiterer Forschungsbedarf zur statistisch abgesicherten Ermittlung von Kriechbeiwerten und Zeitstandfestigkeiten besteht. Dabei ist darauf zu achten, dass die Versuchsdauern möglichst hoch gewählt werden. Ein Zeitraum von 105 Tagen wird als zu klein erachtet. Es sollten mindestens die 26 bzw. 52 Wochen nach DIN V ENV 1156 [60] gewählt werden. Auch die angepasste Potenzfunktion zur Hochrechnung der Werte auf 100 Jahre sollte durch Langzeitversuche überprüft werden. Sicherlich sind Versuchszeiträume von 100 Jahren unrealistisch, 10 Jahre sollten jedoch durchaus einmal in Betracht gezogen werden. Zudem ist nicht abschließend geklärt, für welche Bedingungen die in DIN 1052 [2] angegebenen Kriechbeiwerte gelten. Diesbezüglich scheint die Voraussetzung eines Konstantklimas wahrscheinlich, weshalb sich in der Realität – bei schwankenden Holzfeuchten – größere Kriechbeiwerte einstellen sollten.

Die Kriechbeiwerte bei 25% Spannungsniveau sind so groß, dass eine Verwendung von KHP in Fällen hoher quasi-ständiger Belastung nicht empfohlen werden kann. Zudem wird vermutet, dass die Dauerfestigkeiten für KHP prozentual geringer ausfallen als die für Vollholz. Da sich bei höherer Belastung größere Kriechbeiwerte ergeben, wird es für wahrscheinlich gehalten, dass

nur bei sehr geringer Belastung eine dauernde Beanspruchung ertragen wird. Auch dies ist zukünftig zu prüfen und die Zeitstandfestigkeit zu ermitteln.

KHP wird daher für solche Anwendungen empfohlen, bei denen neben einer geringen ständigen Last vor allem hohe veränderliche Lasten – beispielsweise aus Wind, Schnee oder kurzzeitig wirkenden Verkehrslasten – oder hohe, kurzzeitig auftretende außergewöhnliche Einwirkungen – wie beispielsweise Anprall, Explosionen oder Erdbeben – abzutragen sind. Mögliche Einsatzbereiche sind daher zum Beispiel Dach- und Hallenkonstruktionen, Fuß- und Radwegbrücken sowie Ertüchtigungen für außergewöhnliche Lastfälle. In diesen Anwendungsfällen können die hohen Festigkeiten und Steifigkeiten ausgenutzt und somit das Potential des Kunstharzpressholzes ausgeschöpft werden.

3.2.8.5.6 Auswirkungen auf das Pilotprojekt „Fußgängerbrücken“ (s. auch Kap. 3.8.2)

Für die HHT-Brücke im Pilotprojekt „Fußgängerbrücken“ wurde überlegt, ab welcher Kriechzahl kritische Zustände erreicht werden. Dabei steht weniger die Verformung als vielmehr die Spannungsverteilung innerhalb des Hybridbauteils im Vordergrund. Unter Annahme eines über die Querschnittshöhe linearen Dehnungsverlaufes verteilen sich die Spannungen nach den Steifigkeiten. Da der E-Modul von KHP etwa doppelt so groß ist wie der von Brettschichtholz GL28h, die Festigkeit jedoch etwa 5-fach, wird die erste Brettschichtholzlamelle bemessungsmaßgebend. Kriecht das KHP im Laufe der Zeit nun stärker als das Brettschichtholz, entzieht es sich der Belastung und die Spannungen verlagern sich weiter in den Brettschichtholzkern. Um dies abzuschätzen, wurde die Spannungsverteilung unter Berücksichtigung folgender Steifigkeitskennwerte ermittelt: E_{GL28h} = 12600 N/mm², E_{KHP} = 20000 N/mm².

Wird der E-Modul für den Endzustand (nach abgeschlossenem Kriechvorgang) normkonform ermittelt zu

$$E_{End} = \frac{E_{Anfang}}{1 + k_{def}}, \tag{3.11}$$

ist der Bemessungswert der Biegefestigkeit in der ersten Brettschichtholzlamelle bereits bei einer KHP-Kriechzahl von 2,5 erreicht. Allerdings bleibt dabei unberücksichtigt, dass nur ständige bzw. quasi-ständige Lastanteile ein Kriechen bewirken. Für die geplante Fuß- und Radwegbrücke existiert neben dem ständig wirkenden Eigengewicht auch ein kleiner quasi-ständiger Anteil der Verkehrslast. Nach DIN-Fachbericht 101 beträgt dieser 20% (vgl. [73]: ψ_2 =0,2). Bei den gegebenen Bedingungen ergeben sich damit ständige bzw. quasi-ständige Anteile von 36% der Gesamtlast. Wird dies berücksichtigt und der E-Modul im Endzustand somit vereinfachend bestimmt zu

$$E'_{End} = \frac{E_{Anfang}}{1 + 0{,}36 \cdot k_{def}}, \tag{3.12}$$

erreicht die Spannung erst bei einer KHP-Kriechzahl von 3,4 die Bemessungsfestigkeit. Noch günstiger wird es, wenn zugrunde gelegt wird, dass aufgrund der Brückenlage mit einem wesentlich geringeren quasi-ständigen Anteil der Verkehrslast zu rechnen ist. Beträgt dieser nur 5%, verringert sich der ständige bzw. quasi-ständige Anteil auf 24% der Gesamtlast und die KHP-Kriechzahl könnte bis 3,8 steigen, ohne dass die Bemessungsfestigkeit im Brettschichtholz erreicht wird. Diese Werte werden aller Wahrscheinlichkeit nach nicht erreicht.

Zudem wurde bei der HHT-Brücke im Pilotprojekt „Fußgängerbrücken“ für das verwendete Kunstharzpressholz eine charakteristische Biegefestigkeit von $f_{m,k}$ = 133 N/mm² angesetzt. Der große Abstand zum Mittelwert der Biegebruchfestigkeit ($f_{m,k}$ = 219 N/mm², vgl. Kap. 3.2.8.4) kommt dabei nicht durch eine so große Streuung zustande (anhand der Versuche ergibt sich ein 5%-Fraktilwert von 195 N/mm²) sondern durch eingerechnete Korrekturfaktoren, um anhand der Versuchsanzahl von 20 Proben auf die (gedanklich unendliche) Grundgesamtheit zu schließen. Hier könnten sich folglich weitere Versuche lohnen. Da die KHP-Lamellen bei der HHT-Brücke der NKL 3 zuzuordnen sind, wurde als Bemessungsfestigkeit $f_{m,d}$ = 72 N/mm² angesetzt. Hier ist

ein Modifikationsfaktor von 0,7 enthalten, der sicherlich zu diskutieren ist, da vermutet wird, dass die Zeitstandfestigkeit prozentual geringer ausfällt als bei Furnierschichtholz oder vergleichbaren Holzwerkstoffen. Die vorhandene Spannung im KHP beträgt bei linear elastischer Rechnung im Anfangszustand allerdings nur 25 N/mm² und damit weit weniger als 15% der mittleren Bruchfestigkeit. In NKL 3 ist daher ein Kriechbeiwert von nur etwa 1,7 zu erwarten, was für den Biegeträger der HHT-Brücke unkritisch ist. Dieser Wert ist sogar geringer als der rechnerisch anzusetzende Wert für die Lärchelamellen, weshalb sich im Laufe der Zeit Spannungen von der bemessungsmaßgebenden Lärche in die KHP-Lamellen umlagern. Mit etwa 27 N/mm² liegen die Spannungen im Endzustand jedoch noch immer weit unterhalb von 15% der mittleren Bruchfestigkeit.

Eine Rechnung von Hybridbauteilen unter der Annahme einer gerissenen Zugzone und voller Auslastung der KHP-Lamellen (vgl. auch Kap. 3.7.3.3.2) ist insofern zur Zeit noch als kritisch anzusehen, als dass die Zeitstandfestigkeiten für KHP noch unbekannt und Modifikationsfaktoren daher reine Schätzwerte sind. Für die HHT-Brücke im Pilotprojekt „Fußgängerbrücken“ bestehen jedoch aufgrund der konservativ angesetzten linear elastischen Rechnung und der abgeschätzten Werte keinerlei Sicherheitsbedenken.

Zusätzlich wird die Brückenkonstruktion einem Monitoring unterzogen, bei welchem Dehnungen und Verformungen gemessen werden. Wird dabei festgestellt, dass die jeweils gemessenen Verformungen auf wesentlich höhere Kriechzahlen schließen lassen, muss gegebenenfalls in die Konstruktion eingegriffen werden. Dazu sollten die gemessenen Verformungen ebenfalls über die Zeit aufgetragen und der Kurvenverlauf mit den hier betrachteten vier Funktionen verglichen werden.

3.2.8.6 Brandverhalten von Pressholz und Formholzrohren

Autoren: Andreas Heiduschke (ISH), Albrecht Gilka-Bötzow

Es wurden Untersuchungen zum Brandverhalten von Pressholz und Formholzverbundrohren (Holz-FVK Verbund) durchgeführt und unter anderem die Abbrandrate von Holz in Abhängigkeit der Rohdichte ermittelt. Untersucht wurden Hölzer stark unterschiedlicher Dichte wie Balsaholz, unverdichtetes und verdichtetes Fichtenholz sowie Kunstharzpressholz mit Rohdichten von 155 bis 1340 kg/m³.

3.2.8.6.1 Brandverhalten von Pressholz

Für den rechnerischen Nachweis im Brandfall der i. d. R. dünnwandigen Profilquerschnitte sind Kennwerte bezüglich der Abbrandraten von verdichtetem Fichtenholz erforderlich.

Die Bemessung von Holzbauteilen im Brandfall nach DIN EN 1995-1-2 kann nach dem vereinfachten Bemessungsverfahren mit reduziertem Querschnitt mit Hilfe der Abbrandrate β_0 (in mm/min) erfolgen. Diese errechnet sich aus dem Quotienten der Abbrandtiefe und der Brandeinwirkungsdauer. Dabei ist die Abbrandtiefe die Distanz zwischen der ursprünglichen Bauteiloberfläche und der durch Temperatureinwirkung braun verfärbten, aber noch nicht zu Holzkohle umgewandelten, Schicht – der Abbrandgrenze [241]. Zur Ermittlung der Abbrandrate gibt es derzeit keine standardisierten Prüfverfahren. In der DIN 4102-8 ist lediglich ein Kleinprüfstand zur Bestimmung des Brandverhaltens von Baustoffen und Bauteilen geregelt. In Vorbereitung der Überarbeitung von DIN 4102 entwickelte Lache [241] ein Prüfverfahren und ermittelte die Abbrandgeschwindigkeiten von verschiedenen Holzarten.

Der Einfluss der Rohdichte auf die mechanischen Eigenschaften des Holzes ist hinlänglich bekannt [242]. Untersuchungen von Haller und Wehsener [243] haben gezeigt, dass sich Festigkeit und Steifigkeit von Fichtenholz etwa proportional mit dem Verdichtungsgrad bzw. der Rohdichte ändern. Ähnlich verhält sich dies in Bezug auf das Brandverhalten. Hölzer mit Rohdichten von kleiner als 300 kg/m^3 gelten als gut brennbar, jene mit Dichten von 300 bis 1000 kg/m^3 als mittelmäßig brennbar und wiederum jene mit Dichten über 1000 kg/m^3 als schlecht brennbar [244].

Nach Vorreiter [242] steigt die Brandgeschwindigkeit *B* (in %/min) hyperbolisch mit abnehmender Rohdichte, wobei *B* als das Differential der durch die Verbrennung entstandenen Gewichtsänderung nach der Abbrandzeit definiert ist. Untersucht wurden Hölzer verschiedener Rohdichten von Balsa (160 kg/m³) bis Pockholz (1270 kg/m³). Anzumerken ist, dass Prüfregime und Probengeometrie (4 x 20 x 100 mm) sich grundlegend von dem Verfahren nach Lache unterscheiden. Aus diesem Grund können die Ergebnisse der Brandversuche von Vorreiter nur eine Tendenz aufzeigen. Abbrandraten im Sinne der DIN EN 1995-2 lassen sich daraus nicht ableiten, da das Brandverhalten u. a. vom Verhältnis Oberfläche zu Volumen abhängt.

Die Relevanz von Dichteunterschieden auf die Abbrandgeschwindigkeit innerhalb einer Holzart ist nur für die üblichen Dichtestreuungen, nicht jedoch für verdichtetes Material, untersucht worden. In Vorreiter finden sich Angaben zur Brandgeschwindigkeit von Eichenholz in Abhängigkeit zur Rohdichte. Lache sichtete umfassend die bis dahin durchgeführten Untersuchungen zur Ermittlung von Abbrandraten. Die wohl wichtigste Erkenntnis ist, dass bei einer Brandbeanspruchung nach der Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK) die Abbrandrate über dem Versuchszeitraum konstant ist. In Tabelle 3.16 sind der Literatur entnommene Abbrandraten zusammengefasst.

Tabelle 3.16: Abbrandraten von Holz

Holzart	**Holzfeuchte** u in %	**Rohdichte** ρ in kg/m³	**Abbrandrate** β_0 in mm/min	**Quelle**
Nadel- u. Laubholz	–	≥ 290	0,65	DIN EN 1995-2
Laubholz (ohne Buche)	–	≥ 450	0,50	DIN EN 1995-2
Laubholz	–	≥ 350	0,54	Hartl
Nadelholz	–	≥ 290	0,67	Hartl
Fichtenholz	10	–	0,56 – 1,02	Mikkola
	20	–	0,60	Mikkola
	8	433	0,71	Lache
	20	459	0,63	Lache
	–	S 10, MS 10, ≥ BS	0,65 (Kernriss)	OEN B 3800-4
	–	MS 10, ≥ BS 11	0,60 (ungerissen)	OEN B 3800-4
Kiefernholz	10	–	0,80	Mikkola
	8	497	0,81 (Splint)	Lache
	8	491	0,69 (Kern)	Lache
Buchenholz	8	700	0,80	Lache
	20	689	0,72	Lache
	–	≥ 600	0,80	ÖN B 3800-4
	–	≥ 290	0,65	DIN EN 1995-2
Eichenholz	10 – 15	491	0,59	Topf, Röll
	8	656	0,60	OEN B 3800-4

Die in der DIN EN 1995 enthaltenen Bemessungswerte der eindimensionalen Abbrandrate β_0 bei Normbrandbeanspruchung basieren auf Literaturwerten unterschiedlicher Herkunft. Unterschieden wird nur zwischen Nadel- und Laubholz in Abhängigkeit der Rohdichte.

Der Einfluss der Holzfeuchte auf die Abbrandrate kann wegen der geringen Bandbreite der Ausgleichsfeuchte (zwischen 7 und 15 %) vernachlässigt werden.

Material und Methoden – Rahmen mit Einzellamellen

Da die Abbrandraten von Holzart zu Holzart deutlich voneinander abweichen können (vgl. Tabelle 3.16), beschränken sich die Untersuchungen im Wesentlichen auf Fichtenholz. Auf Grund ihrer geringen bzw. hohen Dichte wurden lediglich Balsa- und KHP-Proben nach DIN 7707 hinzugezogen. Um eine möglichst hohe Bandbreite von Rohdichten untersuchen zu können, wurde neben unverdichteten Proben auch verdichtetes Fichtenholz mit Rohdichten von 600 bis 1320 kg/m³ untersucht. Die Holzfeuchte des verdichteten Materials betrug im Mittel 7,2 % und lag damit ca. 2 % unter jener des unverdichteten Holzes (9 %). Die Herstellung des Pressholzes erfolgte nach dem in Abschn. 3.1 beschriebenen Verfahren. Dabei wird das Material in Heizpressen über Kontaktwärme bis auf ca. 140°C erwärmt und anschließend unter Druck senkrecht zur Faser um bis zu 70 % verdichtet.

Die Brandversuche orientieren sich an dem Verfahren von Lache, wobei auf eine kontinuierliche Messung der Abbrandgeschwindigkeit verzichtet wurde, da der Abbrand über die Zeit als konstant angesehen werden kann. Die Versuche wurden bei der Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig mbH durchgeführt. Abb. 3.73 zeigt die in einem Holzrahmen eingefassten Probekörper, welche bis auf Probe 1-08 (Hirnholz) senkrecht zur Faser beflammt wurden.



Abb. 3.73: Probenrahmen vor Brandversuch



Abb. 3.74: Querschnitt mit Holzkohleschicht und Abbrandgrenze

Insgesamt wurden drei Rahmen mit 51 Einzelbrettlamellen geprüft. Die Breite der Einzellamellen variierte je nach Rohdichte zwischen 1,2 und 4 cm. Die Länge der Brettlamellen betrug 20 cm und die Höhe 7 cm. Die Probekörper wurden in einen Kleinprüfstand nach DIN 4102-8 eingebracht und 30 Minuten einer Brandbelastung nach ETK ausgesetzt. Abb. 3.75 zeigt die Temperaturentwicklung nahe der Holzoberfläche.

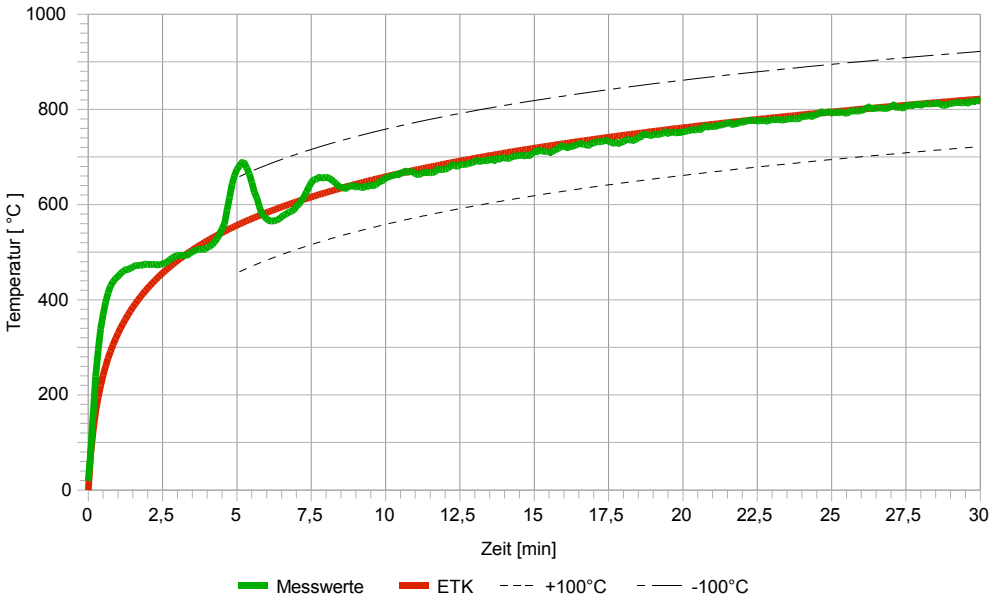


Abb. 3.75: Einheits-Temperaturzeitkurve

Der sprunghafte Temperaturanstieg nach ca. fünf Minuten kennzeichnet den realen Zeitpunkt der Rauchgasdurchzündung. Nach Ende des Versuchs wurden die Prüfkörper abgelöscht und die verkohlte Holzschicht bis auf die Abbrandgrenze abgetragen. Zur Ermittlung des Restquerschnitts wurden die Probekörper aufgetrennt (vgl. Abb. 3.74) und die verbliebenen Querschnittshöhen in Lamellenmitte ermittelt.

Ergebnisse und Diskussion – Rahmen mit Einzellamellen

Abb. 3.76 zeigt den fortschreitenden Abbrand der Probe.

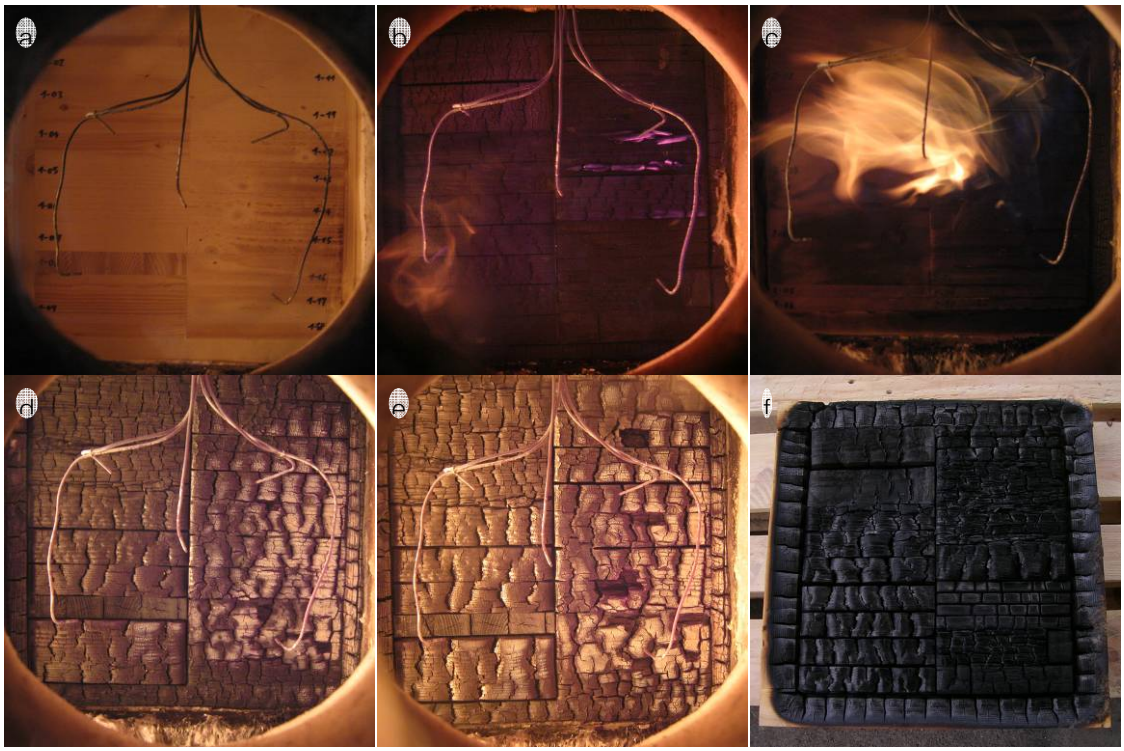


Abb. 3.76 a) erste Bräunung nach 50 s; b) auffälliges Herausquetschen von Material bei hochverdichtetem Holz nach 3:47 min c) Entzündung nach 4:48 min; d) Weißglühen nach 14:06 min; e) Auflösungserscheinung nach 23:14 min

Abb. 3.77 zeigt die ermittelten Abbrandgeschwindigkeiten von Balsa, unverdichteter und verdichteter Fichte sowie KHP in Abhängigkeit der Rohdichte.

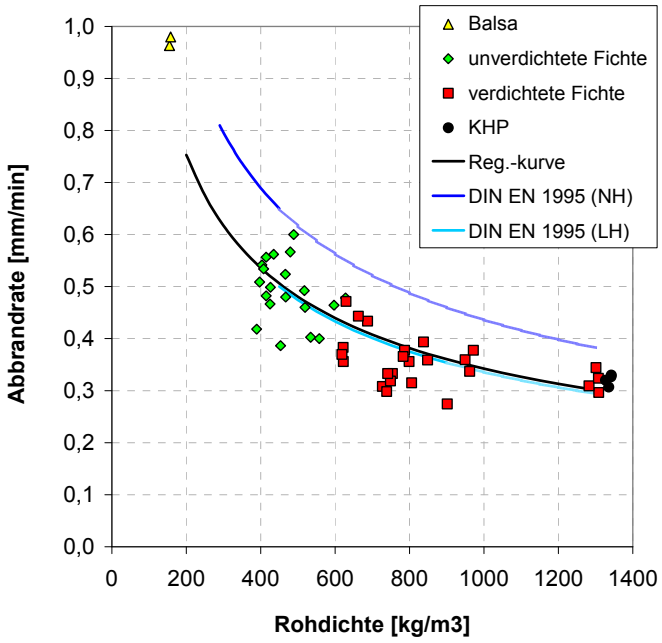


Abb. 3.77: Rohdichte-Abbrandrate-Diagramm

Das Rohdichte-Abbrandrate-Diagramm verdeutlicht, dass die Abbrandrate etwa exponentiell mit steigender Rohdichte abnimmt. Wählt man eine Regressionskurve potenzieller Form so ergibt sich die Abbrandrate β_ρ in Abhängigkeit der Rohdichte ρ zu:

$$\beta_\rho = 10{,}08 \times \rho^{-0{,}495} \quad \text{mit} \quad (R^2 = 0{,}78) \tag{3.13}$$

Die mittlere Rohdichte der unverdichteten Proben betrug 470 kg/m^3 mit einer durchschnittlichen Abbrandrate von 0,50 mm/min. Für verdichtete Proben mit Rohdichten von 860 kg/m^3 wurde die mittlere Abbrandrate zu 0,36 mm/min bestimmt.

Ebenfalls in Abb. 3.77 dargestellt sind die nach DIN EN 1995 bzw. Gl. (3.14) berechneten Abbrandraten in Abhängigkeit der Rohdichte. Den Kurven liegen β_0 -Werte von 0,65 und 0,5 für Nadel- bzw. Laubholz (siehe Tabelle 3.16) zu Grunde.

$$\beta_{0,\rho} = \beta_0 \times k_\rho \quad \text{mit} \quad k_\rho = \sqrt{\frac{450}{\rho_k}} \tag{3.15}$$

Dabei ist ρ_k die charakteristische Rohdichte in kg/m^3. Für den Fall: β_0 = 0,5 (Laubholz mit $\rho \geq$ 450 kg/m^3) sind Gl. (3.13) und Gl. (3.15) nahezu identisch (vgl. Abb. 3.77). Anzumerken ist, dass die Abbrandraten der Proben i. d. R. unter den Literaturwerten (Tabelle 3.16) liegen, in sich jedoch konsistent sind. Da es sich bei den Angaben nach DIN EN 1995 um Bemessungswerte handelt, liegen diese jedoch auf der sicheren Seite. Mögliche Ursache hierfür ist die welli-ge Oberfläche der Abbrandgrenze, welche nicht eindeutig zu bestimmen ist. Der dadurch entstandene Messfehler kann leicht bei ±0,5 mm liegen.

Ab Dichten > 800 kg/m^3 nähert sich die Abbrandrate einer Konstanten von ca. 0,3 mm/min und kann dann als annähernd dichteunabhängig bezeichnet werden. Ursache für den nichtlinearen Verlauf der Abbrandrate ist die etwa linear mit der Rohdichte steigende Wärmeleitfähigkeit λ des Holzes [242]. Für Rohdichten von 350 bzw. 1100 kg/m^3 werden λ-Werte von 0,09 bzw. 0,24 W/mK angegeben.

Bei Rohdichten von 1300 kg/m³ sind die Zellen derart stark gefaltet, dass nahezu keine Zelllumen mehr vorhanden sind und annähernd die Reindichte der Zellwand von 1500 kg/m³ [244] erreicht wird. Mit steigenden Dichten ändert sich nicht nur die Wärmeleitfähigkeit des Holzes sondern auch die Konsistenz der entstehenden Kohleschicht. Diese wird mit zunehmender Rohdichte hart und sehr spröde. Die obere Schicht dieser Kohleart löste sich quaderförmig in sehr festen Stücken ab. Die unteren Schichten ließen sich nur mit großer Mühe bis auf die Abbrandgrenze entfernen. Es ist anzunehmen, dass die Wärmeleitfähigkeit der Holzkohleschicht mit deren Dichte zunimmt. Das Abbrandverhalten des Holzes wird jedoch wesentlich von dieser Holzkohleschicht beeinflusst, da deren Leitfähigkeit etwa sechsmal geringer als jene des Holzes ist [245].

Des Weiteren wurde im Brandversuch bei Proben mit Verdichtungsrichtung senkrecht zur Plattenebene (vgl. Abb. 3.73, Probe 9) eine Dickenquellung aus der Plattenebene beobachtet. Diese Proben wurden in der Auswertung nicht berücksichtigt. Abb. 3.78 zeigt den Querschnitt eines um ca. 24 % verdichteten Holzes vor und nach dem Brandversuch. Die Dicke des unverdichteten Ausgangsmaterials betrug 40 mm.

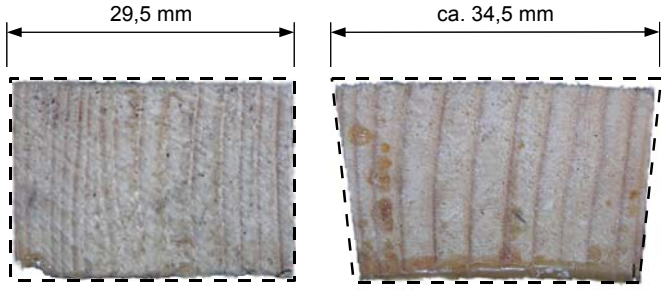


Abb. 3.78: Rückverformung der Pressholzprobe nach Brandbelastung

Abb. 3.78 verdeutlicht, dass durch das erneute Erhitzen des verdichteten Materials ca. die Hälfte des im thermomechanischen Verdichtungsprozess erzeugten Dichtezuwachses wieder verloren geht. Diese Rückverformung ist auf den so genannten „memory-effect“ des verdichteten Holzes zurückzuführen.

3.2.8.6.2 Brandverhalten des Formholzrohres

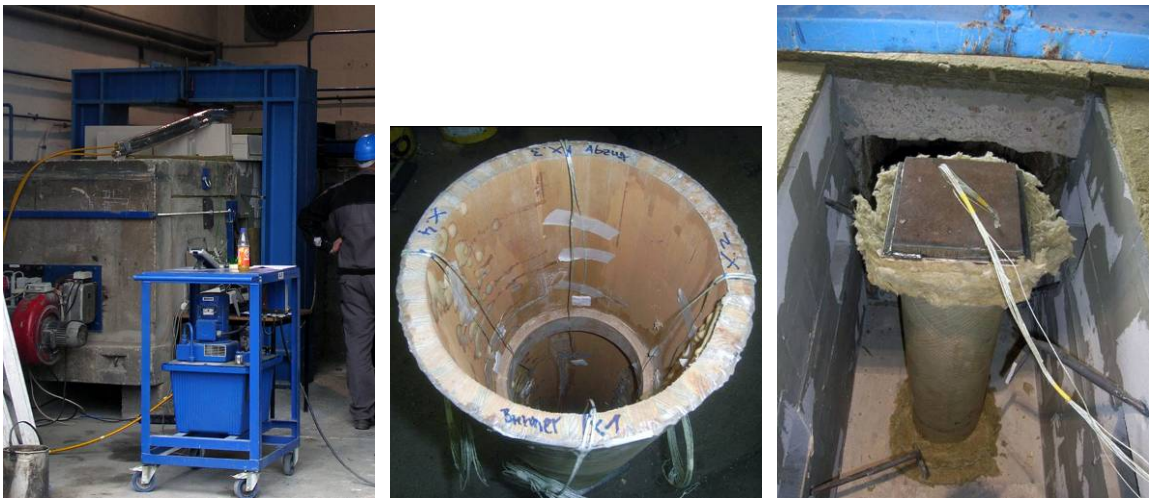
Um das allgemeine Brandverhalten von Formholzverbundrohren besser zu verstehen, wurde ein Brandversuch am Bauteil durchgeführt. Dieser dient einerseits zur Bestimmung des Feuerwiderstandes eines Formholzrohres und andererseits der Analyse des Brandverhaltens der aufgebrachten FVK-Bewehrung.

Das Verfahren zur Durchführung eines Feuerwiderstandsversuchs für eine Stütze mit der Einheits-Temperaturzeitkurve wird in der DIN EN 1365-4 beschrieben. Das Ziel eines solchen Versuchs ist die Quantifizierung des bauteilspezifischen Temperaturwiderstandes. Auf diese Weise soll das zeitliche Maß für die Brauchbarkeit des Bauteils im Brandfall bestimmt werden. Die Ergebnisse haben jedoch keinen direkten Bezug zur Dauer eines natürlichen Brandes.

Die bei einer Brandprüfung der Feuerwiderstandsdauer auf einen Probekörper aufgebrachte Prüflast übt einen wesentlichen Einfluss auf dessen Leistungsvermögen aus. Sie muss auch Gegenstand von Überlegung zur weiteren Anwendung der Prüfdaten zusammen mit Daten anderer vergleichbarer Prüfungen sein.

<u>Versuchsablauf - Formholzrohr</u>

Der Versuch wurde bei der Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig mbH in Laue durchgeführt. Das Prüfgerät war ein geschlossener Decken-Prüfofen nach DIN EN 1363-1, der mit einer Belastungseinrichtung nach DIN EN 1364-4 ausgestattet war (vgl. Abb. 3.79 a).



a) Prüfgerät: Deckenofen b) Messfühler am Rohr c) Einbau der Stütze im Ofen

Abb. 3.79: Versuchseinrichtung zur Bestimmung des Feuerwiderstandes eines Rohres

Beim Prüfkörper handelte es sich um eine Formholzrohrstütze mit einem Außendurchmesser d_a = 278 mm und 20 mm Wandstärke. Die Stärke der Bewehrung belief sich auf ca. 1 mm. Der Verdichtungsgrad des Pressholzes ε_p betrug ca. 25 %.der Die Höhe (h) wurde der Größe des Prüfgeräts angepasst und zu 1,2 m gewählt.

Das Rohr wurde beiderseitig gelenkig als Pendelstütze gelagert, wie in Abb. 3.79 c). zu sehen ist. Die Anordnung der Stütze im Ofen und die Beflammungsrichtung zeigt Abb. 3.80.

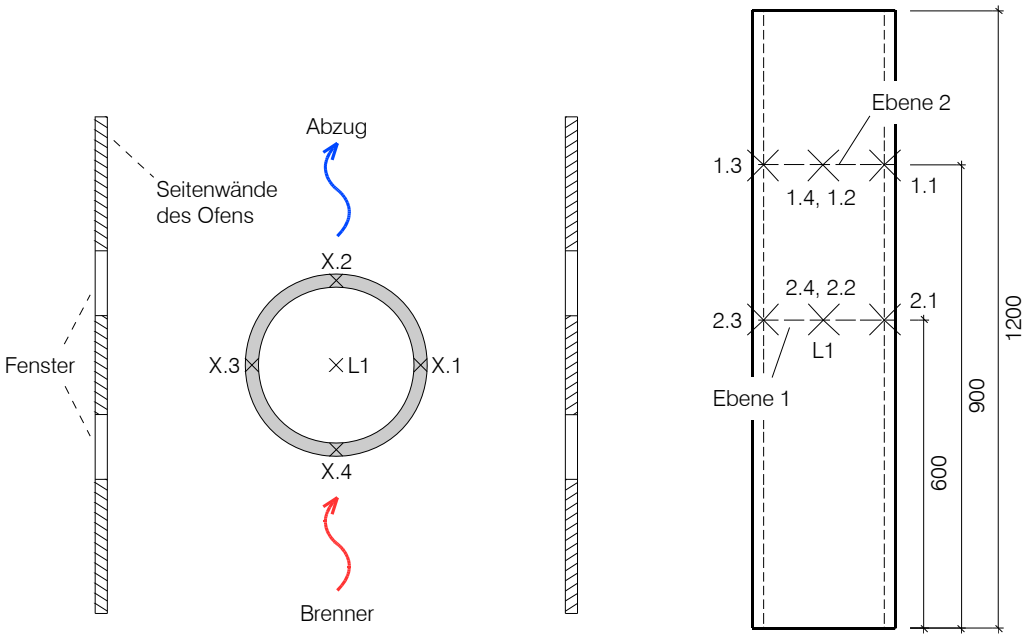


Abb. 3.80: Links: Horizontaler Schnitt; Anordnung des Formholzrohrs im Prüfofen
Rechts: Vertikaler Schnitt; Höhenanordnung der Temperaturmessfühler im Rohr

Nach dem Traglastverfahren wurde die Prüflast gemäß der maximal zulässigen Spannung in Bezug auf die Baustoffeigenschaften des Pressholzes errechnet. Mit einem Wert von 29 N/mm² für f_{ck} ergibt sich eine theoretische Prüflast (F) von ca. 470 kN. Im Versuch selbst wurde F = 400 kN als über die Zeit konstante Prüflast gewählt. Die Last wurde über eine hydraulische Presse von oben im kalten Zustand aufgebracht. Um das Versagenskriterium der begrenzten

Stauchung zu überwachen, wurde außerdem ein Wegaufnehmer an die Belastungsvorrichtung angebracht. Danach begann die einseitige Beflammung nach ETK.

Auf Grundlage theoretischer Berechnungen sollte das dünnwandige Rohr auf Grund der hohen Prüflast von 400 kN bereits bei ca. 3 mm Abbrand versagen. Bei einer angenommen Abbrandrate von 0,65 mm/min müsste demnach das Versagen nach 4:36 min eintreten.



a) Beflammung nach ETK b) Eigenbrand der Stütze nach Versagen c) Stütze nach Ausbau aus dem Prüfofen

Abb. 3.81: Brandversuch eines Formholzrohres mit CFK-Bewehrung

Ergebnisse des Bauteilversuches – Formholzrohr

Der dünnwandige Probekörper versagte nach 3:15 min infolge des Einknickens der Rohrwandung nach innen. Nach dem Abschalten des Brenners konnte ein starker Eigenbrand beobachtet werden (vgl. Abb. 3.81). Die Bewehrungsmatrix war auch nach Ende des Versuchs nur oberflächlich geschädigt, in tieferen Lagen konnte aber keine Farbänderung des Epoxidharzes festgestellt werden. An der dem Brenner zugewandten Stelle war jedoch die komplette Kunststoffmatrix zerstört und auch die Glasbewehrung stark geschädigt. Das Holz war lediglich oberflächlich, aber ganzseitig abgebrannt. Die Versuche bestätigten die schon gemachten Experimente zur Abbrandgeschwindigkeit von verdichtetem Holz. Die aufgebrachte Bewehrungsschicht hatte wie erwartet keinen oder nur einen verschwindend geringen Einfluss auf das Abbrandverhalten des Holzes.

Die folgende Abb. 3.82 zeigt das Zeit-Verformungs-Diagramm der Formholzstütze unter konstanter Last und Brandbeanspruchung nach ETK (an t = 0).

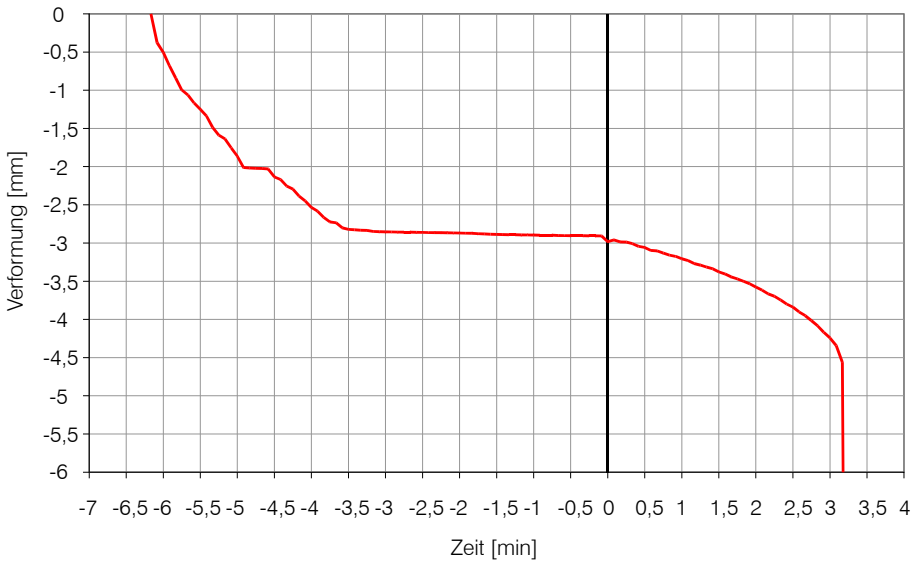


Abb. 3.82: Zeit-Weg-Diagramm der Stauchung der Formholzrohrstütze

Der Temperaturanstieg innerhalb der Stütze während des Versuches verlief ausgesprochen moderat und stellt damit die hervorragenden Wärmedämmeigenschaften von Holz unter Beweis. Den ermittelten Werten zufolge waren die Temperaturen zu jeder Zeit vom kritischen Bereich von über 150°C weit entfernt.

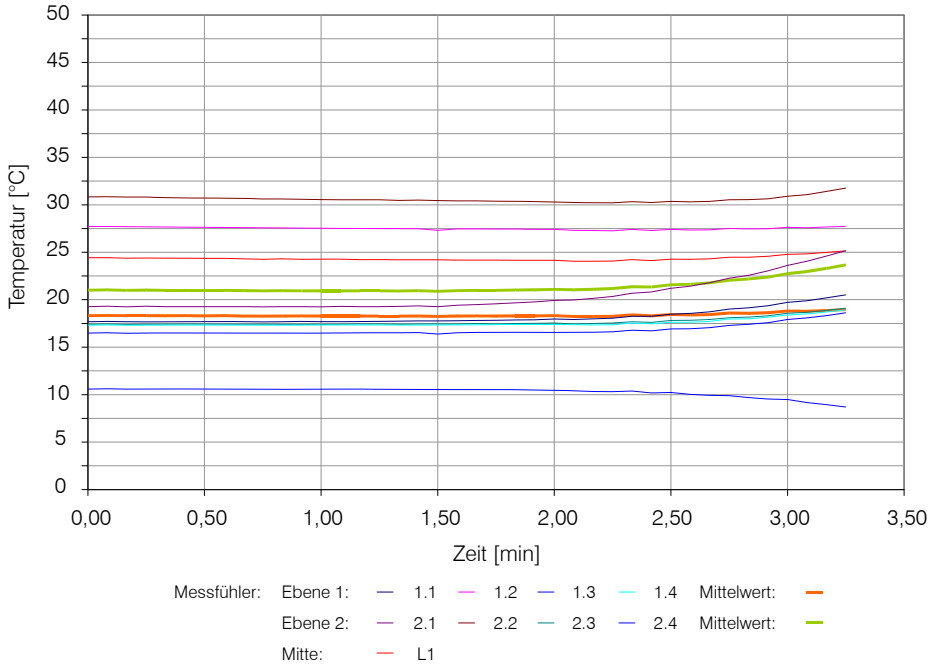


Abb. 3.83: Zeit Temperaturmessungen in der Formholzrohrstütze

3.2.8.6.3 Zusammenfassung

Die Brandversuche an Balsa, unverdichteter und verdichteter Fichte sowie KHP haben gezeigt, dass die Abbrandrate wesentlich von der Rohdichte beeinflusst wird. Dies gilt insbesondere für Rohdichten unter 800 kg/m³. Ab Rohdichten von über 800 kg/m³ kann die Abbrandrate dann als annähernd dichteunabhängig bezeichnet werden. Der untere Grenzwert der Abbrandrate liegt bei ca. 0,3 mm/min. Offensichtlich gewinnen bei sehr hoher Verdichtung die höheren Wärmeleitfähigkeiten des dichteren Holzes und der ebenfalls dichteren Holzkohleschicht überproportional

an Einfluss. Zur Abschätzung der Abbrandrate in Abhängigkeit der Rohdichte liefert Gl. (3.16) nach DIN EN 1995-2 mit einem Basiswert β_0 von 0,5 sehr gute Näherungen.

Es wurden Untersuchungen zum Brandverhalten von Pressholz und Formholzverbundrohren (Holz-FVK Verbund) durchgeführt und unter anderem die Abbrandrate von Holz in Abhängigkeit der Rohdichte ermittelt. Untersucht wurden Hölzer stark unterschiedlicher Dichte wie Balsaholz, unverdichtetes und verdichtetes Fichtenholz sowie Kunstharzpressholz mit Rohdichten von 155 bis 1340 kg/m³. Die Probekörper wurden in Kleinbrandversuchen einer 30-minütigen Brandbelastung gemäß der Einheits-Temperaturzeitkurve nach ISO 834 ausgesetzt. Die Brandversuche haben gezeigt, dass die Abbrandrate etwa exponentiell mit steigender Rohdichte abnimmt, ab einer Dichte von 800 kg/m³ jedoch nahezu konstant bleibt. Ursache für diesen nichtlinearen Verlauf ist die mit der Rohdichte steigende Wärmeleitfähigkeit des Holzes und der ebenfalls dichteren Holzkohle. Des Weiteren wurde bei den verdichteten Proben (ohne Tränkung) eine Dickenquellung in Verdichtungsrichtung beobachtet. Dies verdeutlicht, dass durch das erneute Erhitzen des verdichteten Materials ca. die Hälfte des im thermomechanischen Verdichtungsprozess erzeugten Dichtezuwachses wieder verloren geht. Diese Rückverformung ist auf den so genannten „memory effect“ des verdichteten Holzes zurückzuführen. Die GFK-Bewehrungsschicht hat auf Grund der geringen Schichtdicke (ca. 1 mm) kaum einen Einfluss auf das Abbrandverhalten bzw. die Abbrandgeschwindigkeit. Um eine Verringerung des Abbrandes zu erreichen, sind z. B. Schaum bildende Beschichtungen einzusetzen.

3.2.8.7 Bestimmung der Holzfeuchte von TMT

Autor: Robert Putzger (ISH)

Es wurden Versuche an Probekörpern aus TMT-Esche und unbehandeltem Lärchenholz mit zwei Feuchtemessgeräten durchgeführt (vgl. Abb. 3.84), um deren Zuverlässigkeit bei der Messung auch von niedrigen Holzfeuchten bzw. beim Einsatz von thermisch behandeltem Holz zu bestimmen. Als Vergleichsgrundlage diente die Bestimmung der Holzfeuchte mittels Darrtrocknung im Trockenschrank bei 105°C bis zur Massekonstanz.



MOIST 200 – Feuchtemeßsystem zerstörungsfreie Materialfeuchtemessung mit Mikrowellenmesskopf R1

Hydromette HT 95 T –Feuchtemeßsystem elektr. Widerstandsmessung im Material mit Einschlagelektrode M20

Abb. 3.84: Geräte zur Bestimmung der Holzfeuchte
(links: Mikrowellenmessgerät MOIST 20, rechts: kapazitives Messgerät GT..)

Das in den Versuchen eingesetzte Messgerät MOIST 200 wurde in Verbindung mit dem Oberflächenmesskopf MOIST-R (Eindringtiefe bis 3 cm) getestet. Leider stand nur eine Kalibrierung für Weichholz im Messgerät zur Verfügung. Das Funktionsprinzip des Gerätes basiert auf einem dielektrischen Feuchtemessverfahren mit Hilfe von Mikrowellen und führte bei Lärchenholz im

Bereich von ca. 5 bis 15 % Holzfeuchte zu einer guten Übereinstimmung mit den Referenzwerten. Messungen an Probekörpern aus TMT führten nur im Bereich von ca. 7 bis 9 % Holzfeuchte zu brauchbaren Ergebnissen. Außerhalb dieses Bereiches lagen die gemessenen Werte um bis zu 50 % über den Referenzwerten. Hier ist grundsätzlich eine neue Kalibrierung auf das Material TMT notwendig.

Das ebenfalls zur Holzfeuchtebestimmung eingesetzte Messgerät Hydromette HAT 95 T in Verbindung mit Einschlagsonden nutzt die Methode der elektrischen Widerstandsmessung. Es eignete sich gut zur Bestimmung der Holzfeuchte bei alpinem Lärchenholz. Die Genauigkeit nimmt jedoch mit kleiner werdenden Messwerten ebenfalls ab. Da das untersuchte TMT höchstens eine Holzfeuchte von 10 % erreichte, ist der Einsatz des Gerätes für thermisch modifiziertes Holz nur bedingt möglich.

Die Temperatur hat bei der dielektrischen Feuchtemessung und bei der elektrischen Widerstandsmessung einen großen Einfluss auf die gemessenen Feuchtewerte des Holzes. Um Fehlmessungen zu vermeiden, sollten sowohl die Probekörper als auch das Messgerät und die Raumluft gleich temperiert sein. Bei dem Messgerät Hydromette HAT 95 T ist diese zusätzlich durch einen Drehschalter am Gerät einzustellen. Grundsätzlich ist bei den durchgeführten Versuchen aufgefallen, dass bereits eine geringfügige Erwärmung des Oberflächenmesskopfes MOIST-R, z. B. durch einfaches Halten in der Hand, nach wenigen Minuten zu stark abweichenden Messwerten führt.

Die durchgeführten Versuche haben die Annahme bestätigt, dass eine zuverlässige Bestimmung der Holzfeuchte insbesondere bei niedrigen zu erwartenden Messwerten oder bei Verwendung von TMT nur mit der zeitintensiven Darrtrocknungsmethode möglich ist. Der Einsatz von Messgeräten unter Verwendung von Einschlagsonden oder Mikrowellenmessköpfen setzt aufwendige Kalibrierungsarbeiten voraus, die im Rahmen dieses Projektes nicht umsetzbar waren, jedoch interessante Untersuchungsmöglichkeiten für nachfolgende Forschungsarbeiten bieten.

3.3 Verbindungen mit Pressholz und technischen Textilien

Kurzreferat vom Verantwortlichen (ISH)

Die Tragfähigkeit von Holzverbindungen wird vorrangig von der Rohdichte bzw. Lochleibungsfestigkeit des Holzes, der Schlankheit und der Fließgrenze der Verbindungsmittel sowie der Anordnung der Verbindungsmittel beeinflusst. Da in Holzkonstruktionen die Kräfte häufig über Lochleibung übertragen werden, weisen die Verbindungen materialbedingt nur eine eingeschränkte Steifigkeit und Tragfähigkeit auf. Problematisch ist zudem die Anisotropie des Holzes. Die geringen Schub- und Zugfestigkeiten quer zur Faser können ein sprödes Versagen der Dübelverbindungen zur Folge haben. Dies macht die Bemessung der Verbindungen problematisch.

Zahlreiche Studien befassen sich mit der Verstärkung von Holzkonstruktionen. Untersucht wird der Einsatz von Schrauben, eingeklebten Stahlstäben, Glasfasermatten und/oder Sperrholzplatten, die im Bereich der Anschlussstelle aufgeleimt werden.

3.3.1 Gelenkverbindungen

Autor: Andreas Heiduschke (ISH)

3.3.1.1 Zugprüfungen an GFK-verstärkten Bolzenverbindungen

3.3.1.1.1 Allgemeines

Da Gelenkbolzenverbindungen lokal sehr hohe Lochleibungsfestigkeiten erfordern, werden die Anschlussstellen momentan mittels Stahlplatten, die auf die Oberfläche der Verbindungsstelle genagelt werden, verstärkt. Abhängig vom Dübeldurchmesser verwendet man Voll- oder Rohrdübel [270]. Nachteilig ist der relativ hohe Fertigungsaufwand beim Vernageln der Bleche. Aus diesem Grund werden Gelenkverbindungen meist nur in hochbeanspruchten Fachwerkkonstruktionen eingesetzt, wie zum Beispiel bei der Eisbahnüberdachung in Gerfath [271], einem Fachwerk von 4,1 m Höhe und 60 m Spannweite.

Leijten [272] untersuchte Dübelverbindungen, die mit verdichteten Furnierholzplatten verstärkt wurden. Diese sogenannten Rohrverbindungen nutzen Rohrdübel mit einem Durchmesser von bis zu 35 mm. Die hohe Lochleibungsfestigkeit des verdichteten Furniers führt zu einer deutlich höheren Steifigkeit und Tragfähigkeit der Verbindung, während das Stahlrohr die erforderliche Duktilität liefert.

Haller und Birk [273] untersuchten das Verhalten von textilverstärkten Dübelverbindungen. Ziel dieser Studie war es, durch das Aufleimen maßgeschneiderter Textilen die Tragfähigkeit, Steifigkeit und Duktilität der Anschlüsse zu verbessern. Die hier vorgestellten Entwicklungen basieren auf den Ergebnissen von Haller und Birk [273].

Ziel der Untersuchungen war, die Traglast und die Steifigkeit von Gelenkbolzenverbindungen (GBV) mit Bolzendurchmessern von 30-50 mm durch lokale Verstärkung, z. B. mittels faserverstärkter Kunststoffe, auf das Niveau des ungestörten Holzbauteils anzuheben. D. h. die Traglast der Verbindung ist so zu erhöhen, dass diese die Zugfestigkeit des Bruttoholzquerschnittes, mindestens jedoch 80 % dieses Wertes, erreicht. Auf diese Weise wird eine akzeptable Balance zwischen der Tragfähigkeit der Verbindungen und der Konstruktion geschaffen.

3.3.1.1.2 Material und Methoden

Versuchsaufbau

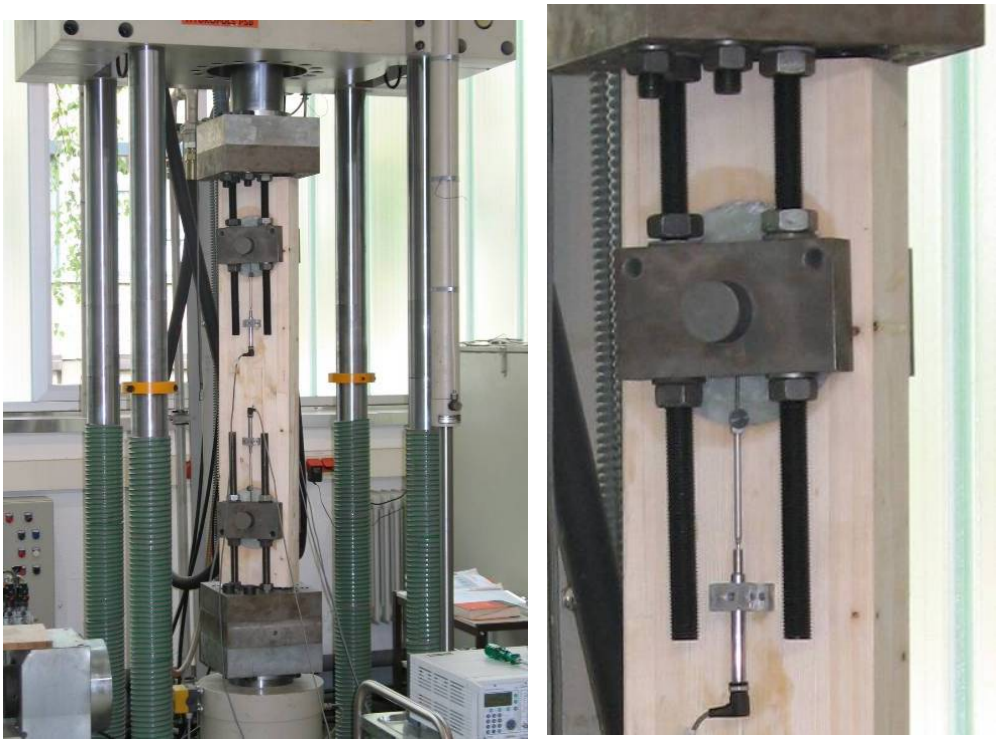


Abb. 3.85: Lochleibungsprüfung

Zur Bestimmung der Lochleibungsfestigkeit und der Bettungssteifigkeit der verstärkten Gelenkbolzenanschlüsse wurden Lochleibungsprüfungen gemäß DIN EN 383 [66] durchgeführt. Geprüft wurde in einer servohydraulischen Universalprüfmaschine mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 0,2 mm/min. Abb. 3.85 zeigt den Versuchsaufbau einschließlich der zur Verformungsmessung verwendeten IWA. Anhand der Verformungsmessungen wurden Schlupf und Verschiebungsmodul der Verbindung ermittelt.

Die Probekörper aus Brettschichtholz (GL24h) hatten einen Querschnitt von 9x22 cm² und eine Länge von 1,2 m. Der Abstand der Bolzen (D = 50 mm) zum belasteten Hirnholzende $a_{3,t}$ betrug 4d (200 mm) und zum unbelasteten Rand $a_{3,c}$ 2,2d (110 mm). In einem Fall wurden anstatt der massiven Bolzen Stahlrohrdübel (S235, 50x4 mm) eingesetzt. Die durchschnittliche Rohdichte des BSH betrug 540 kg/m^3, die Holzfeuchte 10 %. Insgesamt wurden 20 Proben (40 Verbindungen) geprüft. Zu Referenzwecken wurden 4 unbewehrte Proben untersucht.

Composite-Verstärkung

Um das Potential von faserverstärkten Kunststoffen zur Verstärkung von Gelenkdübelverbindungen zu untersuchen, wurden verschiedene Composite untersucht:

1) **OC** - orthotropes Composite – dünnes Standard-Glasfasergewebe
2) **JOJO** - spiralförmige Scheibe – biaxial gestricktes Textilspiral
3) **IC** - quasi isotropes Composite – Aufschichtung von Glasfasergelegen
4) **PP** - Pultrudierte Platte – von Fiberline Composites [277]

Beschreibung der Proben

OC – orthotropes Composite

Die Bewehrung besteht aus zwei Standard-Glasfasergeweben mit einer Faserorientierung von 0°/90° und 45°/-45° und einem Flächengewicht von 400 g/m^2 je Gewebe. Als Matrix wurde ein Epoxidharz verwendet. Die Aufgabe der vergleichsweise dünnwandigen Bewehrungsschicht (t = 0,7mm) war es, ein Spalten (Querzug- und Schubversagen) des Holzes zu verhindern.

JOJO – spiralförmige Gestricke

Abb. 3.86 zeigt das biaxiale Gestrick vor der Imprägnierung mit Epoxidharz. Die Fertigung der JOJOs erfolgte auf einer Flachstrickmaschine. Dabei werden in Kett- und Schussrichtung jeweils zwei Rovings (vgl. Abb. 3.86 (1) Kettfaden, (2) Schussfaden) gefacht zugeführt und mit einem Maschenfaden (3) verstrickt. Durch Staffelung des Schussfadeneintrags wird eine kreisförmige Verstärkungsstruktur erzeugt. Die Fäden der Jojos sind radial und tangential orientiert.

Das Gestrick hat ein Flächengewicht von 3170 g/m² und eine Stärke von ca. 3 mm. Je Scherfläche wurden vier dieser Gestricke geschichtet und in 13 mm tiefe, kreisrunde Fräsungen mit einem Durchmesser von 175 mm eingelegt (vgl. Abb. 3.86 und Abb. 3.89b). Anschließend wurde das ca. 280g Gestrick mittels EP-Harz verleimt. Die Flachstricktechnology eröffnet die Möglichkeit, verschiedene Strukturen und Formen von Textilien herzustellen - für nähere Informationen siehe [273] und [274].



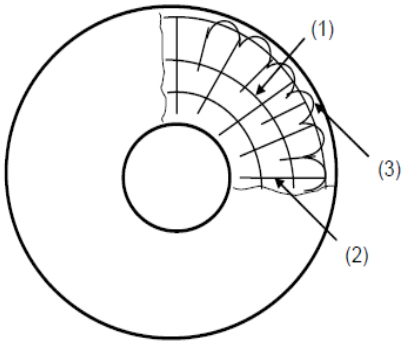


Abb. 3.86: Aufbau und Einbringen der Jojo-Gestricke

IC – quasi-isotropes Composite

Im Fall der IC Bewehrung handelt es sich um GFK-Halbzeug mit nahezu isotropen Eigenschaften in Plattenebene. Verwendet wurden unidirektionale Glasfasergelege mit einem Flächengewicht von 400 g/m^2 und einer Dicke von ca. 0,32 mm. Diese wurden in verschiedenen Winkeln (0°, 45°, 90°) aufeinander geschichtet. Laut Bergmann [275] erreicht man eine maximale Lochleibungsfestigkeit mit folgendem Lagenaufbau: 0° = 42 % (16 Lagen); 45° = 42 % (16 Lagen); 90° = 16 % (6 Lagen). Insgesamt wurden 38 Lagen zu einer 13 mm dicken GFK-Platte verleimt. Aus diesen Halbzeugen wurden dann kreisförmige Teller geschnitten. Diese wurden mittels Schraubenpressverleimung (4Schr 4,5x50mm) und EP-Harz in die kreisrunden Fräsungen eingeleimt (vgl. Abb. 3.89c).

PP - pultrudierte Platte

Die vierte Verstärkungsvariante basiert auf einem kommerziellen Produkt der Firma Fiberline Composites, das ähnlich wie zuvor als Halbzeug eingesetzt wird. Bei der Pultrusion handelt es sich um die Herstellung von faserverstärkten Kunststoffprofilen in einem kontinuierlichen Ablauf, dem sogenannten Strangziehverfahren. Ein Großteil der Faserbewehrung sind in Längsrichtung (in Richtung der Profilachse) orientierte Glasfasergarne. Ein vergleichsweise kleiner Teil sind Gewebe, die an der Profiloberfläche angeordnet sind. Deren Aufgabe ist es, Schub und Quer-

zugkräfte der stark orthotropen Profile aufzunehmen. Laut Hersteller beträgt die Lochleibungsfestigkeit in Längsrichtung 150 N/mm² und in Querrichtung 70 N/mm². Weitere Informationen können [260] entnommen werden.

Die hier eingesetzten pultrudierten Platten (300x200x10 mm) wurden mittels PU-Leim zwischen die Holzlamellen (1xPP vgl. Abb. 3.90a) oder aber auf die Holzoberfläche (2xPP) geklebt. Um den erforderlichen Anpressdruck zu erzeugen wurden vier Schrauben 4,5x50 mm verwendet.

Die Lochleibungsfestigkeit der einzelnen Verstärkungen wurde in Lochleibungstests ermittelt:

$f_{h,JOJO}$ = 144 N/mm^2 - JOJO

$f_{h,IC}$ = 215 N/mm^2 - IC

$f_{h,PP}$ = 197 N/mm^2 - PP

Auf Grund der geringen Schichtdicke der Gewebeverstärkung (OC) ist deren Einfluss auf die Lochleibungsfestigkeit des Verbundes vernachlässigbar. Die Gewebeverstärkung soll lediglich das Spalten des Holzes verhindern.

3.3.1.1.3 Ergebnisse und Diskussion

Abb. 3.87 zeigt die Versuchsergebnisse bzgl. Lochleibungsfestigkeit, Traglast und Verschiebungsmodul für verschiedene Gelenkbolzenverbindungen.

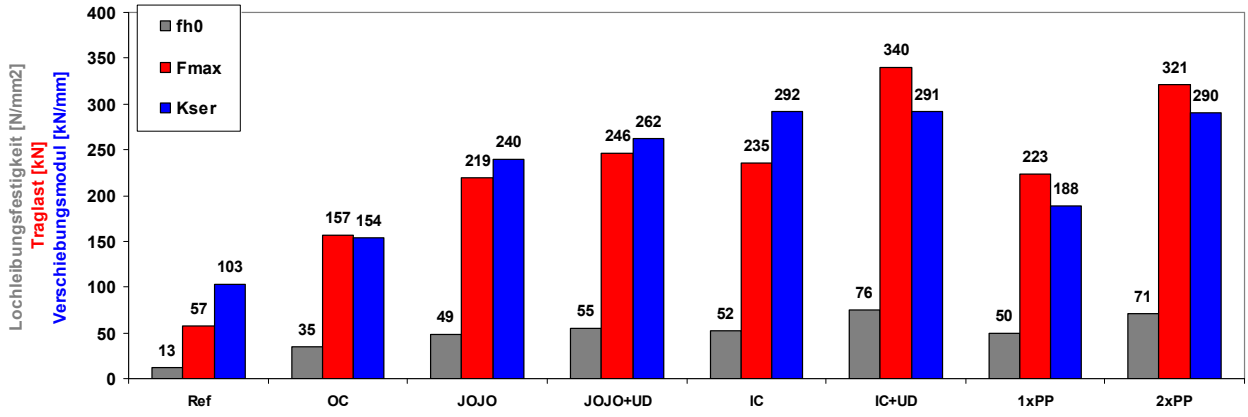


Abb. 3.87: Lochleibungsfestigkeit f_{h0}, Traglast F_{max}, Verschiebungsmodul K_{ser}

Der Lochleibungsversuch zeigt, dass Steifigkeit, Festigkeit und Duktilität von Gelenkbolzenverbindungen mittels FVK-Verstärkungen deutlich gesteigert werden können. Im Vergleich zur unbewehrten Holzprobe (Ref) stieg die Tragfähigkeit um das 6 fache und die Steifigkeit um das 3 fache.

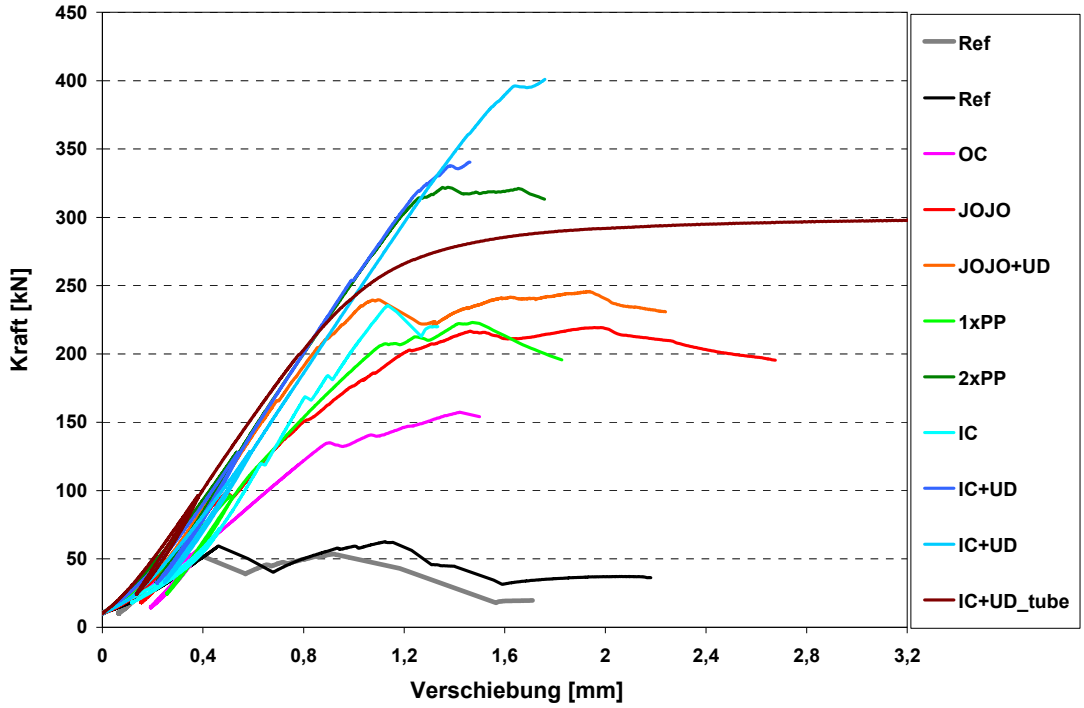
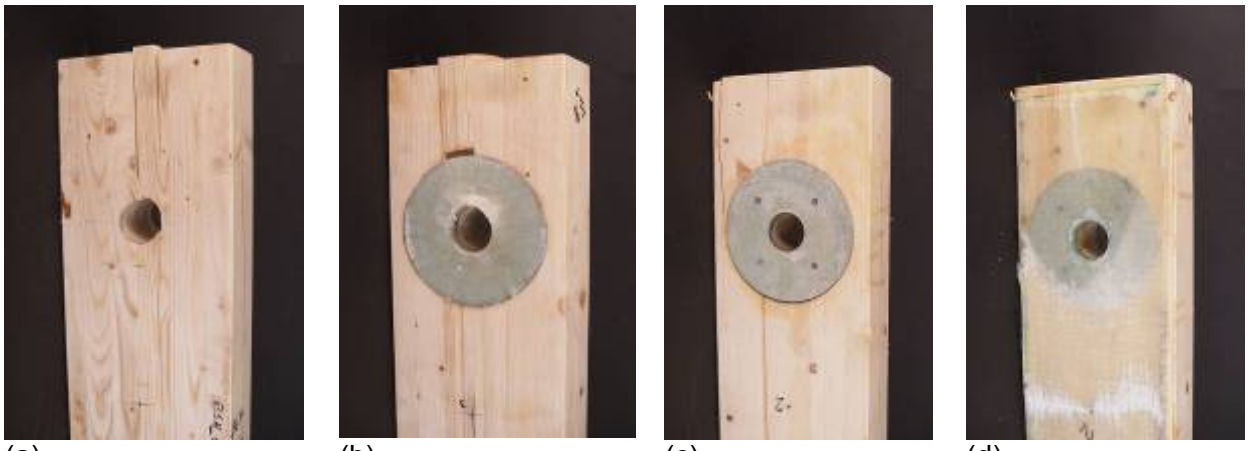


Abb. 3.88: Kraft-Verformungsbeziehung einiger ausgewählter Verbindungen

Die unbewehrten Proben erreichten bei einer Zugkraft von 57 kN ihre Traglast. Dies entspricht einer Lochleibungsspannung von 13 N/mm^2. Das Versagen der Proben ist spröde. Auf Grund der unzureichenden Vorholzlänge von nur 4d wird wie in Abb. 3.89a gezeigt ein Block abgeschert. Dies bedeutet, dass die vorhandene Lochleibungsfestigkeit des Holzes nicht ausgenutzt wurde. Um die reale Lochleibungsfestigkeit des Holzes zu erreichen, wurde die Gewebeverstärkte OC Probe geprüft. Im Vergleich zur unbewehrten Probe erreichte diese mit einer Lochleibungsspannung von 35 N/mm² rund eine dreifach höhere Traglast. Hinsichtlich der Steifigkeit ist der Einfluss der Bewehrung gering. Wie schon die Referenzprobe zeigte auch die OC-Probe einen Schubbruch im Vorholz.



(a) (b) (c) (d)

Abb. 3.89: Versagensformen: (a) Referenz und OC - Schubversagen; (b) JOJO – Überschreiten der Lochleibungsfestigkeit; (c) IC – Delaminierung zwischen Holz und GFK-Scheibe; (d) IC+UD – Delaminierung zwischen Holz und GFK-Teller + Zugversagen der UD-Schicht

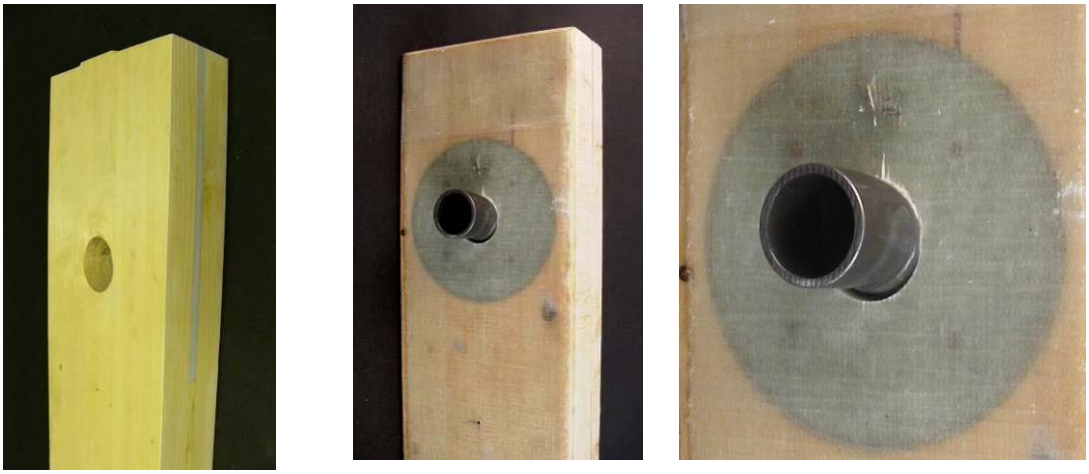
Um die Tragfähigkeit der Verbindung zu steigern, ist der Bewehrungsgrad deutlich zu erhöhen. Im Vergleich zu der unbewehrten Probe erreichten die JOJO-verstärkten Proben eine viermal so hohe Tragfähigkeit. Abb. 3.89b zeigt die JOJO Probe inkl. Lochleibungsversagen und Schub-

bruch im Vorholz. Die JOJO Verbindungen zeigen deutliche Verformungen im Holz und GFK am Bohrlochrand. Das Versagen ist entsprechend duktil.

Im Gegensatz zu den JOJOs trat bei den IC Verbindungen kein Lochleibungsversagen auf. Der Spalt zwischen der IC-Scheibe und dem Holz (Abb. 3.89c) verdeutlicht, dass sich die Verstärkung vom Holz gelöst hat. Der Grund für diese Delaminierung ist die unzureichende Klebefläche der Scheibe bzw. die geringe Scherfestigkeit des Holzes. Um die Tragfähigkeit der Verbindung zu steigern, ist eine entsprechend große Klebefläche nötig. Mit dem Ziel, die IC-Scheiben besser am Holz zu verankern, wurde eine zusätzliche Textilschicht mittels EP-Harz auf den Anschlussbereich auflaminiert (vgl. Abb. 3.89d). Dazu wurde ein unidirektionales Glasfasergelege (UD 530 g/m^2, Abmessung: 200x500mm) verwendet – Probenbezeichnung IC+DU. Diese zusätzliche Verankerung führte zu einer weiteren Steigerung der Tragfähigkeit. Da es bei den JOJO-verstärkten Proben bereits zu einem Lochleibungsversagen kam, ist die Traglaststeigerung bei JOJO+UD vergleichsweise gering. Die JOJO+UD Probe erreichte eine Traglast von 246 kN, während die IC+UD Probe erst bei 340 kN versagte. Die höhere Tragfähigkeit der IC+UD Probe ist bedingt durch den hohen Faservolumenanteil der GFK-Scheibe von 50 %, im Vergleich zu den JOJOs von ca. 30 %. Der plötzliche Traglastabfall deutet auf einen spröden Schubbruch hin. Wie in Abb. 3.89d zu sehen ist, versagte die Verankerung (UD-Gelege) auf Zug, etwa 20 cm neben der Scheibe (weißer Bereich).

Im Vergleich zu den Scheiben hatten die kommerziell verfügbaren GFK-Profile (1xPP und 2xPP) eine dreimal so große Klebefläche, sodass keine Delaminierung auftrat. Wie in Abb. 3.90a erkennbar, versagen die Verbindung infolge Überschreitens der Scherfestigkeiten von GFK und Holz. Abhängig vom Bewehrungsgrad (eine oder zwei GFK-Platten) wurden Traglasten von 223 kN bzw. 321 kN erreicht.

Da Gelenkverbindungen nur mittels eines Bolzens realisiert werden, ist es für die Sicherheit und die Robustheit des Tragwerkes notwendig, ein hohes Maß an Duktilität zu gewährleisten. Da von einem massiven Bolzen mit einem Durchmesser von 50 mm kaum nennenswerte plastische Verformungen zu erwarten sind, wurde ein Bolzen mit Rohrquerschnitt (50x4 mm, Stahlgüte S355) untersucht. Die Last-Verformungskurve des IC+UD_tube in Abb. 3.88 zeigt, dass die verstärkte Rohr-Bolzenverbindung hinsichtlich Tragfähigkeit, Steifigkeit und Duktilität ein exzellentes Tragverhalten aufweisen. Die Verbindung erreichte eine Traglast von 300 kN und zeigt eine deutliche Verformung des Verbindungsmittels (vgl. Abb. 3.90b und c). Der Versuch wurde bei einer Verschiebung von 7 mm abgebrochen. Im Vergleich zum ungeschwächten Holzquerschnitt (220x90 mm^2) wurde damit nahezu die charakteristische Festigkeit des BSH (GL24h) von 327 kN (220*90*16,5 N/mm^2) erreicht.



(a) (b) (c)

Abb. 3.90: Versagensformen: (a) 1xPP – Schubbruch in Holz und GFK; (b) und (c) IC+UD_tube – plastische Verformung des Rohrbolzens

Für den Entwurf und die Bemessung von GFK-verstärkten Gelenkbolzenverbindungen sind folgende Anmerkungen hilfreich: In Verbundbauteilen verteilen sich die Spannungen nach den Steifigkeiten. Das Last-Verformungsverhalten einer normalkraftbeanspruchten Gelenkbolzenverbindung kann also durch Superposition der Einzelkomponenten ermittelt werden. Unter der Voraussetzung, dass keine Bolzenverformungen infolge Biegung auftreten, kann das Tragverhalten von Holz und GFK zunächst unabhängig voneinander betrachtet werden. Dies gilt, bis die Bruchdehnung einer Komponente erreicht ist.

Diese Methode wird in DIN 1052:2008 [2] in ähnlicher Weise bei der Berechnung von sperrholzverstärkten Konstruktionen verwendet

Abb. 3.91 zeigt das Last-Verformungsverhalten einer 13 mm starken GFK-Platte (IC13) und eines 66 mm starken Holzbalkens (Ref66) inkl. Gewebeverstärkung. Das Gewebe hatte keinen Kontakt zum Bolzen, so dass die Lochleibungs-festigkeit des Holzes nicht beeinflusst wurde. Überlagert man Ref66 mit 2xIC13 (Superposition) erhält man annähernd die Last-Verformungskurve einer IC-Verbindung.

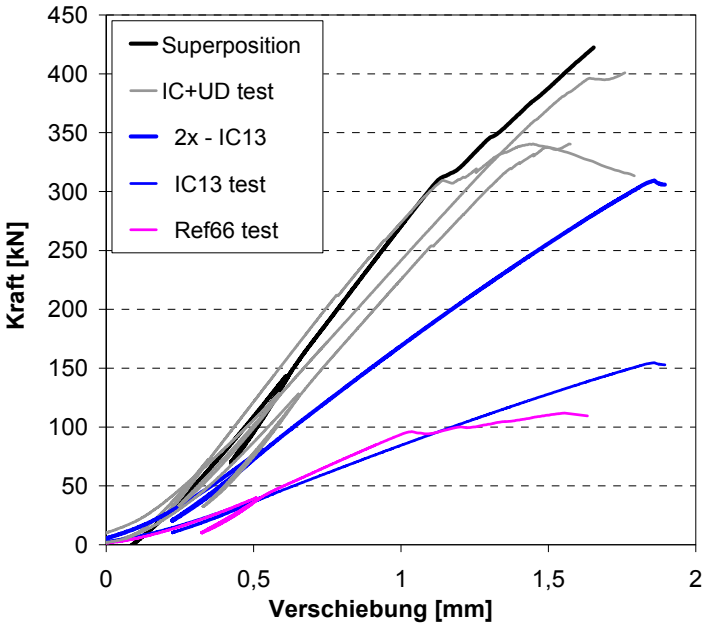


Abb. 3.91: Überlagerung der Versuchsergebnisse

Werden die Tragfähigkeiten der verschiedenen Komponenten überlagert, erreicht man eine theoretische Tragfähigkeit von über 400 kN. Für GFK-verstärkte Verbindungen bedeutet dies, dass die Bemessungsgleichungen für Stabdübelverbindungen mit verstärkten Anschlussbereichen nach Werner bzw. der DIN1052:2008 unter gewissen Voraussetzungen für hochfeste GFK Verstärkungen übernommen werden können. Wesentliche Bedingung ist dabei, dass die Bruchdehnungen der verschieden Materialien zu berücksichtigen sind und ggf. die Lochleibungsfestigkeit des GFKs entsprechend der Bruchdehnung des Holzes abzumindern ist. Weiterhin wurde deutlich, dass die Gelenkbolzen plastifizieren sollten, bevor die Lochleibungsfestigkeit des Holzes erreicht wird. Um ein sprödes Versagen der Verbindung auszuschließen bzw. duktiles Verhalten zu gewährleisten, ist die Klebefläche ausreichend zu dimensionieren. Die Bemessung geklebter Verbindungen ist jedoch schwierig, sodass auf Grund des starren Verbundes hohe Teilsicherheitsbeiwerte zu berücksichtigen sind. Zusätzliche Sicherungsmaßnahmen wie z. B. durch mechanische Verbindungsmittel (Schraubenpressverleimung) oder aber das Einlassen der Verstärkung sind zu empfehlen. Das Einlassen der GFK-Scheiben im Holz führt dazu, dass selbst bei Verlust der Klebeverbindung die GFK Scheiben noch als Einlassdübel wirken und so vergleichsweise Lasten abgetragen werden können.

3.3.1.1.4 Fazit

Die Anwendung von Gelenkbolzenverbindungen hat große Spannungskonzentrationen am Bohrlochrand zur Folge. Deshalb sind leistungsfähige Verstärkungstechniken einzusetzen, um eine sichere Lastabtragung zu gewährleisten. Auf Grund der hohen Lochleibungsfestigkeit als auch des guten Haftverbunds zwischen Holz und GFK, sind faserverstärkte Kunststoffe für diese Anwendungen hervorragend geeignet. Die GFK-Verstärkung ermöglicht eine ausgewogene Bemessung von Holzkonstruktionen hinsichtlich Traglast der Verbindung und der anzuschließenden Bauteile. Die Lochleibungsversuche haben gezeigt, dass quasi isotrope Composite und pultrudierte Platten die größten Tragfähigkeitssteigerungen erzielen, während sich die spiralförmigen Gestricke als besonders duktil erwiesen haben. Auf Grund der lokalen Lasteinleitung an der GFK Scheibe kann nicht von einer über die Klebefläche gleichmäßigen Schubspannungsverteilung ausgegangen werden. Die Problematik der Spannungsverteilung am Bohrlochrand kann nur anhand geeigneter finiter Elemente Modelle simuliert und analysiert werden (vgl. Abschn. 3.6.3.3).

3.3.2 Untersuchungen an nachgiebig verbundenen Bauteilen mit verstärkten Knotenpunkten

Autoren: Andreas Heiduschke (ISH), Yvette Lemke (IaFB), Rensteph Thompson (Hess), Maik Weise

3.3.2.1 Ausgangspunkt der Untersuchung

Intention dieser Untersuchungen sind Schwierigkeiten, die sich bei der Realisierung von Tragwerken mit aufgelösten Querschnitten ergeben - insbesondere hinsichtlich Steifigkeit und Traglast der nachgiebig verbundenen Bauteile (wie beispielsweise der Dachkonstruktion des Pilotprojektes „Hess-Innenhofüberdachung“ (vgl. Abb. 3.92)).

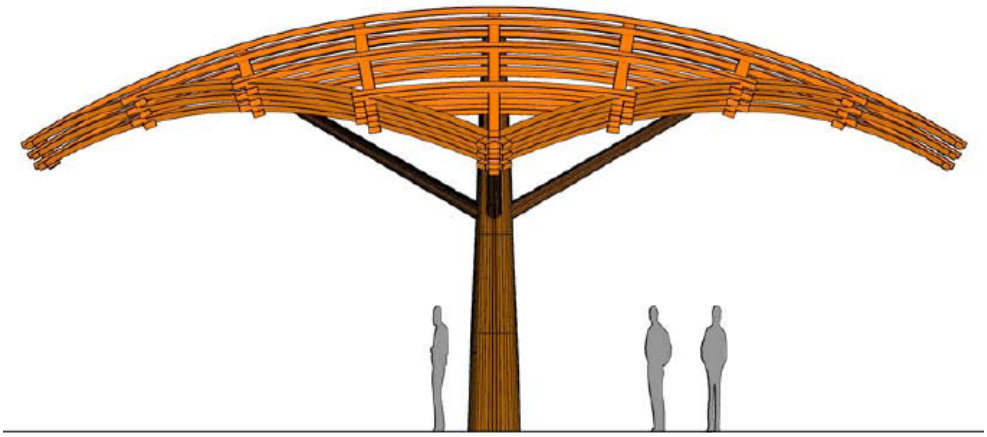


Abb. 3.92: Freistehender Schirm nach den Entwürfen von 'atelier pk' (Quelle: IaFB)

Das Dachtragwerk des Schirms soll aus einer dreilagigen, gewölbten Brettstapelkonstruktion hergestellt werden. Die einzelnen Brettlamellen von 81 mm Stärke und 160 mm Breite sind lagenweise orthogonal zueinander angeordnet und ergeben im Verbund einen Gitterrost. Die Brettstapelträger sind dabei im Winkel von 45° zu den Randträgern geneigt, und erschließen sich infolge der Kreuzungen zu dem gitterosttypischen orthogonalen Muster (vgl. Abb. 3.93).

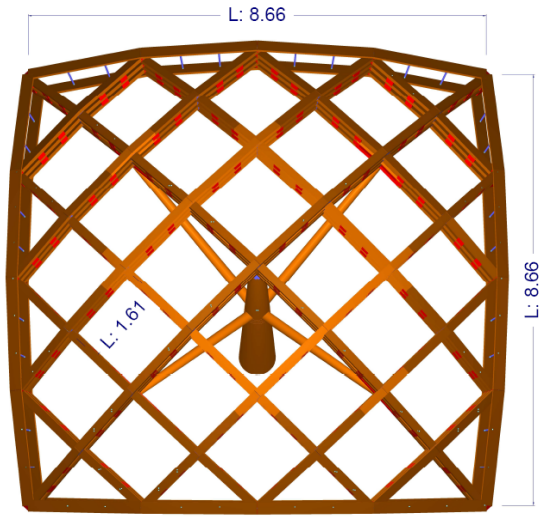


Abb. 3.93: Draufsicht Gitterrostkonstruktion

Ziel der zugrunde liegenden experimentellen Untersuchung ist am Beispiel der Hauptträger der Gitterrostkonstruktion, die Steifigkeit und Traglast nachgiebig verbundener Biegeträger durch geeignete Verstärkungsmaßnahmen der Anschlussbereiche und Querschnitte zu verbessern.

Bekannt ist, dass sowohl Festigkeit als auch Steifigkeit von auf Herausziehen beanspruchten Schrauben mit der Rohdichte des Holzes stark ansteigen. Der einfache Ansatz besteht darin, Biegefestigkeit und auch Steifigkeit der einzelnen Trägersegmente durch oberflächiges Bewehren mit KHP und/oder GFK zu erhöhen und diese Verstärkungslagen gleichzeitig zur Ertüchtigung der Verbindungen heranzuziehen. Dies gilt gleichermaßen für geschraubte und verbolzte Verbindungen.

3.3.2.1.1 Vier Verstärkungsmöglichkeiten zur Verbesserung der Steifigkeit und Tragfähigkeit:

<u>Verstärkung von Schrägverschraubungen</u>

Die Tragfähigkeit von auf Abscheren beanspruchten Schrauben ist geringer als jene von vergleichbaren Stabdübeln. Allerdings ist bei Schrauben eine hohe Tragfähigkeit auf Herausziehen gegeben, d. h. mit zunehmender Schrägstellung der Schrauben zur Scherfuge steigt die Lastverträglichkeit der Verbindung. Durch diese Neigung werden Seilkräfte in den Verbindungsmitteln aktiviert, die eine Verankerung der Schrauben in den zu verbindenden Bauteilen bewirken. Der Effekt dieser Traglaststeigerung wird voll ausgenutzt, wenn die Schrauben in einem Winkel von ca. 45° zur Scherfläche eingedreht werden.

Bei Verbindungen mit geneigt angeordneten Schrauben sind grundsätzlich zwei Fälle zu unterscheiden: Verbindungen mit ausschließlich parallel zueinander angeordneten Schrauben und Verbindungen, bei denen zwei unterschiedliche Neigungen der Schrauben auftreten. Im letzten Fall sind die Schrauben in der Regel gekreuzt oder abwechselnd geneigt eingebracht (vgl. Abb. 3.94). Bei Verbindungen mit ausschließlich parallel zueinander angeordneten Schrauben (vgl. Abb. 3.94, links) verursacht die Zugkraft in der Schraube eine Druckkraft in der Fuge zwischen den beiden Bauteilen. Diese Druckkraft bewirkt eine günstig wirkende Reibungskraft, die zur Erhöhung der Tragfähigkeit und Steifigkeit der Verbindung beiträgt und demzufolge in der Bemessung berücksichtigt wird.

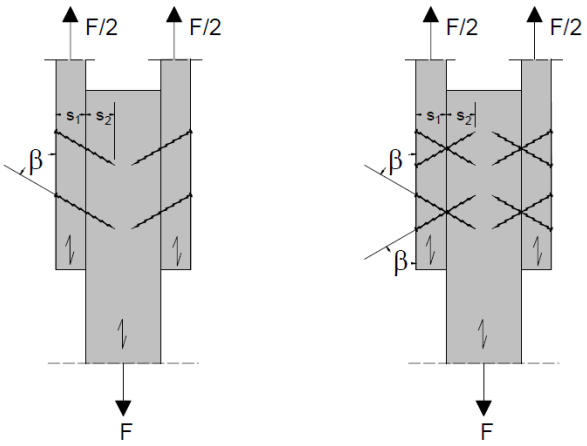


Abb. 3.94: Verbindung mit parallel zueinander angeordneten Schrauben (links) und gekreuzt angeordneten Schrauben (rechts)

Mit zunehmender Neigung der Schrauben steigt auch die Steifigkeit der Verbindung. Bei einer Schraubenneigung von 45° wird sogar eine Steigerung der Verbindungssteifigkeit um mehr als das 12-fache erreicht. Im Vergleich zu einer konventionellen Verbindung mit rechtwinklig zur Kraftrichtung angeordneten Schrauben wird nach den Ergebnissen von Blaß/Bejtka [236] eine deutliche Tragfähigkeitssteigerung erzielt.

Verstärkung mit Kunstharzpressholz (KHP)

Ziel der experimentellen Voruntersuchungen war es, das Last-Verformungsverhalten von Schrägverschraubungen in Holz-Holz-Verbindungen zu ermitteln. Dazu sind Scherverbindungen aus verschiedenen Holzarten und mit unterschiedlichen Schraubentypen erstellt worden, die über das höhenmäßig versetzte Mittelholz belastet wurden. Insbesondere wurde der Einfluss von Kunstharzpressholz auf die Tragfähigkeit und Steifigkeit als Verstärkungsmaterial im Verbindungsbereich untersucht (vgl. Abb. 3.95). Hierbei wurden die Scherfugen beidseitig mit 16 mm bzw. 20 mm starken KHP-Platten lamelliert (vgl. Abb. 3.95, rechts).



Abb. 3.95: a) Scherkörper aus Fichte; b) Buche; c) Fichteprobe lamelliert mit KHP

Die Schrauben wurden jeweils paarweise im Winkel von 45° eingedreht (vgl. Abb. 3.94, links) und verbanden jeweils ein Randholz mit dem Mittelholz. Folgende Schraubentypen wurden verwendet:

- SFS intec WT-T-8,2 nach Zulassung Z-9.1-472
- SSK Star Drive d=8 mm, d=10 mm nach Zulassung Z-9.1-656

Die Druckversuche wurden in Anlehnung an die DIN 26891 durchgeführt. In Tabelle 3.17 sind die Versuchsergebnisse zusammengefasst. Um den Wirkungsgrad der Verbindungsmittel in Bezug auf die Steifigkeit angeben zu können, wurde eine Verbindung mit starrem Verbund (Kleb) geprüft.

Tabelle 3.17: Zusammenfassung der Scherversuche

	Bezeichnung	K_{ser} gesamt [kN/mm]	K_{ser} je VM [kN/mm]	Wirk %	F_{max} [kN]	F_{max} je VM [kN]	K_{ser} Zulassung [kN/mm]
1	Fi_SK8_4	75,9	19,0	9	72,8	18,2	3,79
2	Fi_SF8_4	62,6	15,7	7	62,8	15,7	8,00
3	Fi_SF8_4_300	62,0	15,5	7	96,4	24,1	13,53
4	KHP20_SK8_4	124,0	31,0	15	108,9	27,2	3,79
5	Bu_SK8_4	84,1	21,0	10	110,1	27,5	3,79
6	KHP16_SK8_4	129,8	32,5	15	114,9	28,7	3,79
7	KHP16_SK8_4	99,4	24,9	12	105,2	26,3	3,79
8	Kleb (starrer Verbund)	838,6	419,3	100	221,4	110,7	»
9	Fi_SK10_4	71,1	17,8	8	94,0	23,5	3,94
10	Fi_SK8_8	120,8	15,1	14	153,2	19,2	3,79
11	KHP20_SK10_4	118,5	29,6	14	152,0	38,0	3,94

Abkürzungen:

- Fi - Fichte
- SK8 - Schraube SSK Star Drive 8 mm, analog SK10 – 10 mm
- _4 - Anzahl der Schrauben, hier 4, d. h. je 2 pro Scherfläche
- _300 - gesteigerte Schraubenlänge von 300 mm
- SF8 - Schraube SFS WT-T-8,2
- KHP20 - Kunstharzpressholz t = 20 mm
- Bu - Buche
- Leim - Leimverbindung

Aus den Versuchen geht hervor, dass die Verschiebungsmoduln die nach den jeweiligen Zulassungen berechneten Werte weit übertreffen. Besonders auffällig ist dies bei den Schrauben SSK StarDrive. Weiterhin wird deutlich, dass die Holzart wesentlichen Einfluss auf die Steifigkeit und Traglast der Verbindungen hat. Festgestellt wurde, dass mit zunehmender Rohdichte (Fichte < Buche) die Verbindungen tragfähiger und steifer werden. Dies gilt insbesondere für KHP-verstärkte Proben, wobei die Stärke der Lamellierung keinen nennenswerten Einfluss auf die Tragfähigkeit und Steifigkeit der Proben hat (vgl. Tabelle 3.17; Zeilen 4, 6, 7 und 11). Im Vergleich zu den unverstärkten Proben aus Fichtenholz können durch die Lamellierung mit KHP Steifigkeit und Tragfähigkeit nahezu verdoppelt werden. Dieser Verstärkungseffekt wird anhand folgender Last-Verformungs-Kurven belegt.

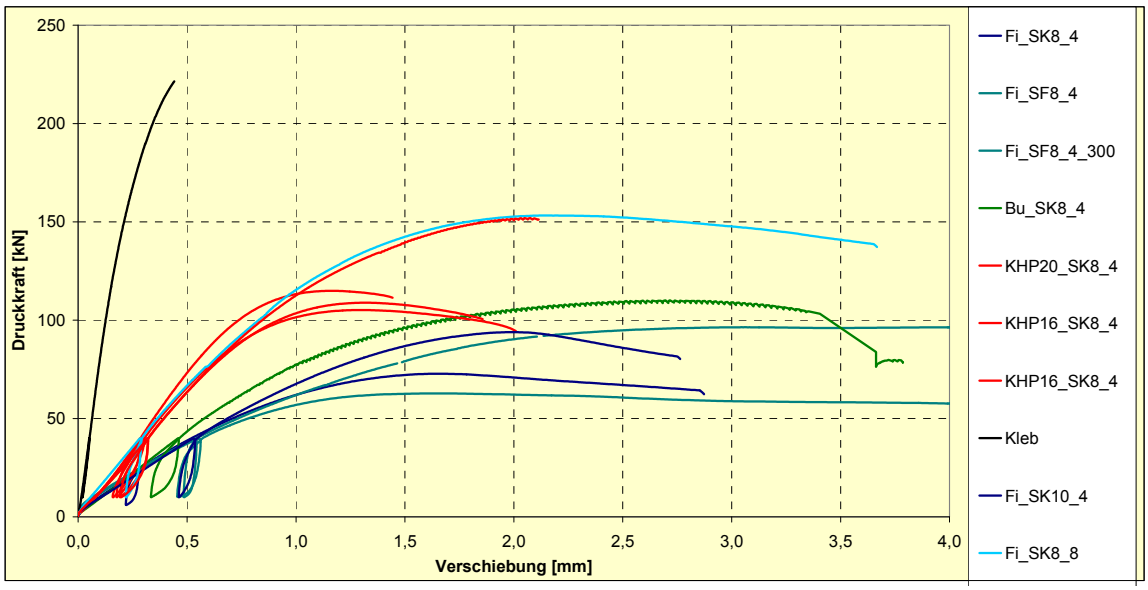


Abb. 3.96: Last-Verschiebungs-Kurven von Scherverbindungen mit Schrägverschraubung

Hier zeigen vor allem die unverstärkten Verbindungen ein ausgesprochen duktiles Verhalten. Die Duktilität der KHP-lamellierten Proben ist etwas geringer. Ursache für deren Versagen ist das Abscheren bzw. der Zugbruch der Schrauben, d.h. die Fließgrenze des Stahls. Die unverstärkten Proben versagen infolge des Herausziehens der Schrauben.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass Verstärkungen durch KHP-Lamellierungen zu einer Erhöhung der Steifigkeit und Tragfähigkeit von schräg verschraubten Verbindungen führen, wobei die Stärke der KHP-Schicht anscheinend keinen Einfluss auf die zuvor genannten Parameter hat, diese also auch deutlich schlanker dimensioniert werden kann.

KHP-verstärkte Bolzenverbindungen

In weiterführenden Untersuchungen soll geklärt werden, inwiefern Passbolzenverbindungen mittels KHP-Lamellierungen verstärkt werden können und welche Besonderheiten hierbei auftreten. Diesbezüglich wurden bereits umfangreiche Untersuchungen an der TU Delft unter der Leitung von A.J.M Leijten durchgeführt (Untersuchung der physikalischen und mechanischen Eigenschaften von KHP) [267]. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Dicke der Lamellierungen (8-10-12 mm) und der Abstand zum beanspruchten Rand in Kraftrichtung signifikant die Steifigkeit und Tragfähigkeit von Verbindungen mit stabförmigen VBM beeinflussen.

Verstärkung von Bolzenverbindungen mit faserverstärkten Kunststoffen (GFK)

Zur Verstärkung der Bolzenverbindungen werden spiralförmige Glasfasergestricke verwendet (vgl. Abschn. 3.3.1). Um Verwechslungen mit Gelenkbolzenverbindungen zu vermeiden, werden diese JOJOs im Folgenden als Patches bezeichnet.

3.3.2.2 Biegeversuche an nachgiebig verbundenen Trägern

3.3.2.2.1 Aufbau nachgiebig verbundener Träger für die Biegeversuche

Voruntersuchungen an mit KHP-verstärkten Verbindungen haben gezeigt, dass neben der Traglast auch die Steifigkeit der Anschlussbereiche durch den beanspruchungsgerechten Einsatz der Verstärkung deutlich verbessert wird. Aufbauend auf diesem Kenntnisstand wurden 2- und 3-schichtige Träger mit verschiedenen Verstärkungs- und Verbindungsvarianten hergestellt und in 3-Punkt-Biegeprüfungen untersucht. Da die Fugensteifigkeit nachgiebig verbundener Biegeträger entscheidenden Einfluss auf die Spannungsverteilung und damit auf die Lastverträglichkeit der Tragglieder hat, werden im zweiten Teil Scherversuche an separaten Verbindungen

durchgeführt. Hinsichtlich des Einsatzes der Verstärkungen in den auf Biegung und Schub beanspruchten Trägern in Kombination mit den verschiedenen Verbindungstypen, liegt das Augenmerk der Scherversuche auf der Ermittlung der Verschiebungsmoduln. Für eine Abschätzung des Wirkungsgrads der Verbindungen wurden weiterhin ebenso Biegeträger und Scherkörper mit starrem Verbund (geleimte Verbindungen) geprüft.

Zunächst ist der Fokus auf Traglastuntersuchungen an nachgiebig verbundenen Biegeträgern gerichtet. Die Haupttragglieder dieser Träger werden mit verschiedenen Materialien verstärkt und mittels mechanischer Verbindungstypen (Passbolzen und Vollgewindeschrauben) zusammengefügt.

Tragglieder der Biegekörper

Die Geometrie bzw. Querschnitte sind an jene der geplanten Dachstruktur der Schirme angelehnt. Die Länge der Brettlamellen wurde auf 2 m begrenzt. Neben den unverstärkten Proben wurden sogenannte Hybridlamellen gefertigt. Hierbei wurden die Deckflächen der Rechteckquerschnitte mit jeweils 12 mm starken Platten aus KHP verstärkt. Diese wurden auf 57 mm (bzw. 40 mm) hohe Brettschichtholzlamellen geleimt, um eine Trägerhöhe von 81 mm zu erzielen. Abb. 3.97 (links) zeigt den Aufbau der Hybridlamelle. Die Kunstharzpressholzplatten (A 740-1) des Herstellers dehonit sind längsfurniert mit einer mittigen Querlage. Das Brettschichtholz aus Fichte entspricht der Festigkeitsklasse GL28h.



Abb. 3.97: links: Hybridlamelle aus BSH (57mm) und KHP (2x12 mm) rechts: BSH-Lamelle

Die folgende Übersicht fasst den Probenumfang mit den entsprechenden Bezeichnungen zusammen:

Tabelle 3.18: Lamellenübersicht mit Bezeichnungen

Probenkennzeichen	Aufbau	Abmessungen (LxBxH)
Fi-1 bis Fi-18	81 mm BSH GL 28h	2000 mm x 160 mm x 81 mm
K-1 bis K-4 K-7 bis K-10	57 mm BSH GL 28h + 2x12 mm KHP A 740-1	2000 mm x 160 mm x 81 mm
K-5 bis K-6	40 mm BSH GL 28h + 2x12 mm KHP A 740-1	2000 mm x 160 mm x 64 mm

Bestimmung der Biege-Elastizitätsmoduln der Lamellen

Vor der Fertigung und Prüfung der Versuchsträger wurden die Biege-Elastizitätsmoduln E_B der Lamellen im 3-Punkt-Biegeverfahren ermittelt. Diese Vorgehensweise ist notwendig, um bei der späteren Modellierung möglichst präzise Materialparameter einsetzen zu können. Die zerstörungsfreie Biegeprüfung wurde in Anlehnung an die DIN 52186 durchgeführt, wobei zur Bestimmung des E-Moduls nur bis zu etwa einem Drittel der theoretischen Höchstkraft belastet wurde.

Konstruktionsbeschreibung der 2-lamelligen Biegeträger

Die Lamellen der Versuchsträger sind über Futterhölzer in den Randbereichen miteinander verbunden, die die kreuzenden Brettlamellen der Gitterrostkonstruktion ersetzen. Als Verstärkungsmaterialien kommen KHP (Hybridlamellen) und GFK-Scheiben (Patches) zum Einsatz. Die Lamellen werden über Passbolzen oderVollgewindeschrauben miteinander verbunden.

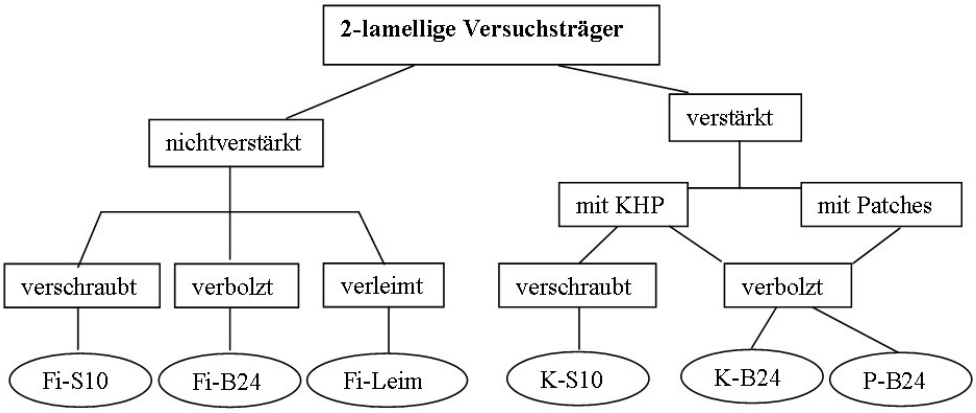


Abb. 3.98: Übersicht und Kennzeichnung der 2-lamelligen Versuchsträger

Nachstehende Abbildungen zeigen unterschiedliche Versuchsreihen, mit und ohne Verstärkung der Versuchsträger.

Unverstärkte Proben

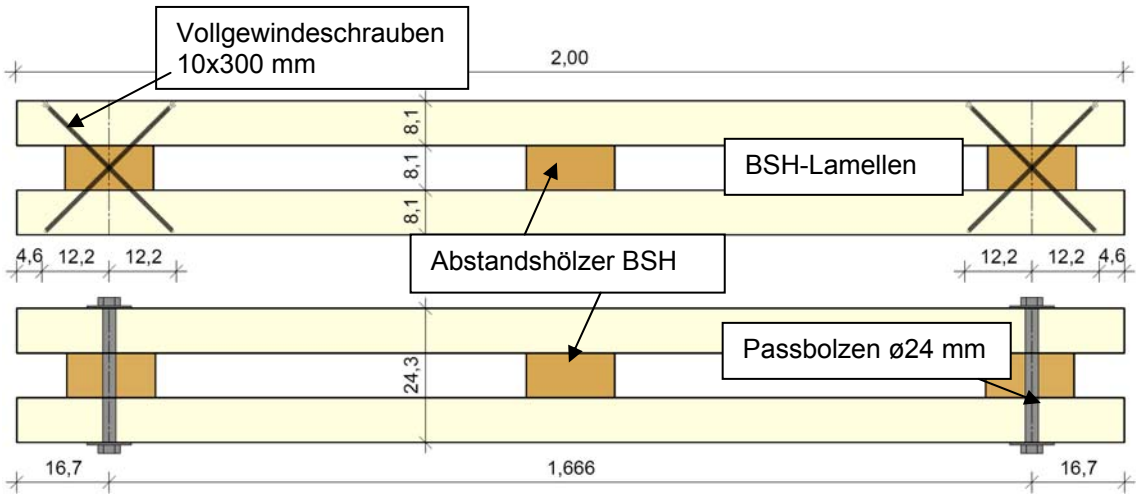


Abb. 3.99: Aufbau der 2-lamelligen unverstärkten Versuchsträger

Die Bauhöhe beträgt 243 mm und setzt sich aus den beiden Brettschichtholzlamellen und den Zwischenhölzern (je 81 mm) zusammen. Die mittleren Abstandshölzer dienen dabei der Kraftübertragung zwischen den Lamellen. Die 160 mm breiten Futterhölzer (300 mm lang) symbolisieren die kreuzenden Bauteile der Gitterrostkonstruktion.

Als Verbindungsmittel (VBM) kommen Passbolzen (M24) und schräg eingedrehte Schrauben zum Einsatz (vgl. Abb. 3.100).



Abb. 3.100: VBM: Vollgewindeschraube, Passbolzen; rechts: Schraubenbild

Die Eckdaten der Verbindungsmittel sind nachstehend zusammengefasst:

- Passbolzen: *Ø24 mm*, L_{Gesamt}*=335 mm*, L_{Schaft}*=240 mm*, Festigkeitsklasse 4.6
- Schrauben: StarDrive Vollgewinde nach Zulassung Z-9.1-656, d_1*=10 mm*, *L=300 mm*

Die Bolzen wurden mit U-Scheiben (85x6 mm) eingebracht und leicht angezogen. Im Fall der geschraubten Verbindungen wurden jeweils zwei Schraubenpaare gekreuzt unter 45° eingedreht (vgl. Abb. 3.99). Die Rand- und Zwischenabstände sind Abb. 3.100 zu entnehmen. Zur Abschätzung des Wirkungsgrades wurde ein Biegeträger mit starrem Verbund (‚Fi-Leim') hergestellt. Dazu werden die Zwischenhölzer mit den Brettlamellen verleimt.

Tabelle 3.19: Unverstärkte 2-lamellige Versuchsträger

Probenkennzeichen	**Lamellen**	**VBM**
Fi-B24-1	Oben: Fi-6 Unten: Fi-5	2 x Bolzen Ø24 mm
Fi-B24-2	Oben: Fi-9 Unten: Fi-10	2 x Bolzen Ø24 mm
Fi-S10-1	Oben: Fi-2 Unten: Fi-1	2 x 4 x Schmid StarDrive Vollgewinde d_1=10 mm, L=300 mm, Vorgebohrt Ø7 mm
Fi-S10-2	Oben: Fi-12 Unten: Fi-11	2 x 4 x Schmid StarDrive Vollgewinde d_1=10 mm, L=300 mm, Vorgebohrt Ø7 mm
Fi-Leim	Oben: Fi-8 Unten: Fi-7	Leim

Verstärkte Proben

Der schematische Aufbau der verstärkten Versuchsträger mit KHP ist in Abb. 3.101 dargestellt. Dem Entwurf des Schirmes entsprechend sollen nur die beiden Hauptdiagonalträger der Gitterrostkonstruktion als Hybridlamellen ausgeführt werden. Für die Nebenträger wird nur Brettschichtholz verwendet. Demzufolge sind die Futterhölzer der Verbundfugen unbewehrtes Brettschichtholz. Auf Grund des hohen Eindrehwiderstandes der KHP-verstärkten Schraubverbindungen wurden die Lamellen mit dem Kerndurchmesser der VBM (0,7d = 7 mm) vorgebohrt.

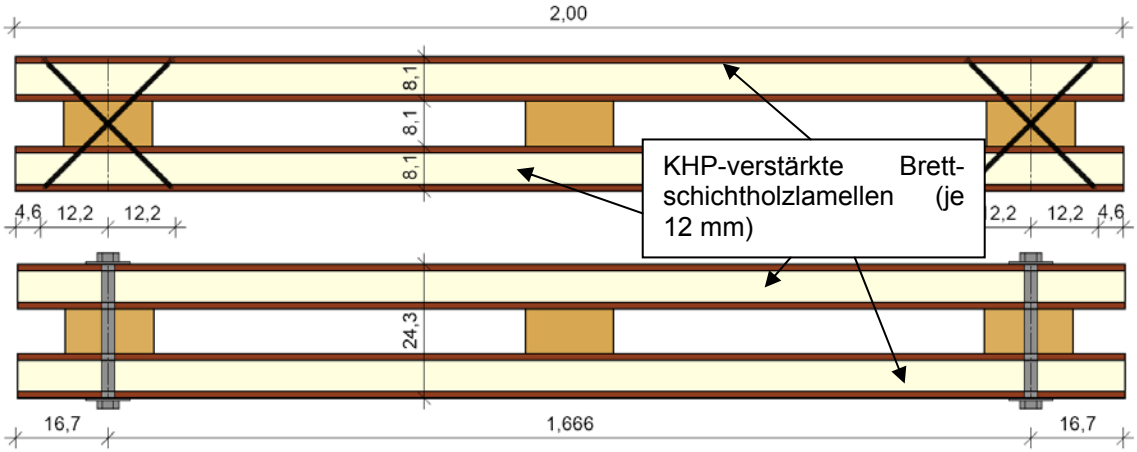


Abb. 3.101: Aufbau der KHP-verstärkten Versuchsträger

Die bereits erwähnten GFK-Scheiben (Patches) kommen nur zur Verstärkung der Bolzenverbindungen zum Einsatz. Der Unterschied zu den in Abschn. 3.3.1.1 verwendeten JOJOs besteht darin, dass die Glasfasergestricke nicht in situ in die Fräsungen eingebracht und verleimt werden, sondern als fertige Halbzeuge (Patch) in dafür vorgesehene Vertiefungen eingeklebt werden. Die Patches mit einem Durchmesser von 120 mm und einer Stärke von 10 mm wurden mittels Epoxidharz verleimt (vgl. Abb. 3.102).



Abb. 3.102: Patches - links: Gestalt der Kunststoffteller; rechts: Einleimung der Teller

Abb. 3.103 zeigt die Anordnung der Patches.

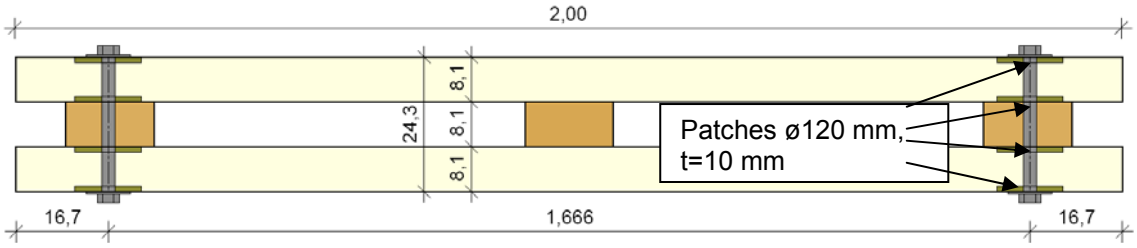


Abb. 3.103: Anordnung der Patches

Tabelle 3.20: Probekörper der verstärkten 2-lamelligen Versuchsträger

Probenkennzeichen	Lamellen	VBM
K-B24-1	Oben: K-1 Unten: K-2	2 x Bolzen Ø24 mm
K-B24-2	Oben: K-7 Unten: K-8	2 x Bolzen Ø24 mm
K-S10-1	Oben: K-3 Unten: K-4	2 x 4 x Schmid StarDrive Vollgewinde d_1=10 mm, L=300 mm
K-S10-2	Oben: K-10 Unten: K-9	2 x 4 x Schmid StarDrive Vollgewinde d_1=10 mm, L=300 mm
P-B24-1	Oben: Fi-14 Unten: Fi-17	2 x Bolzen Ø24 mm
P-B24-2	Oben: Fi-15 Unten: Fi-16	2 x Bolzen Ø24 mm

Konstruktionsbeschreibung der 3-lamelligen Biegeträger

Der Aufbau der 3-lamelligen Träger gleicht denen der 2-lamelligen Versuchsträger. Die Bauhöhe beträgt auf Grund der zusätzlichen Lamelle 405 mm. Damit weisen die 3-lamelligen Versuchskörper eine für Biegeträger untypische Schlankheit auf (L/H = 166,6/40,5 ≈ 4). Da geplant ist, die Tragglieder der Gitterrostkonstruktion in den Knotenpunkten ausschließlich mit Passbolzen zu verbinden, sind die Versuche auf verbolzte Proben beschränkt.

Tabelle 3.21: Probenumfang der 3-lamelligen Proben und Sonderprobe

Probenkennzeichen	Lamellen	VBM
Fi3-B24	Oben: Fi-4 Mitte: Fi-18 Unten: Fi-3	2 x Bolzen Ø24 mm
K3-B24	Oben: K-11 Mitte: Fi-13 Unten: K-12	2 x Bolzen Ø24 mm
Sonderprobe K64-S8	Oben: K-5 Unten: K-6	2 x 6 x Schrauben Schmid Rapid Komprex d_1=8 mm, L=80 mm 2 x 2 x Schmid StarDrive Vollgewinde d_1=8 mm, L=300 mm, vorgebohrt Ø5mm

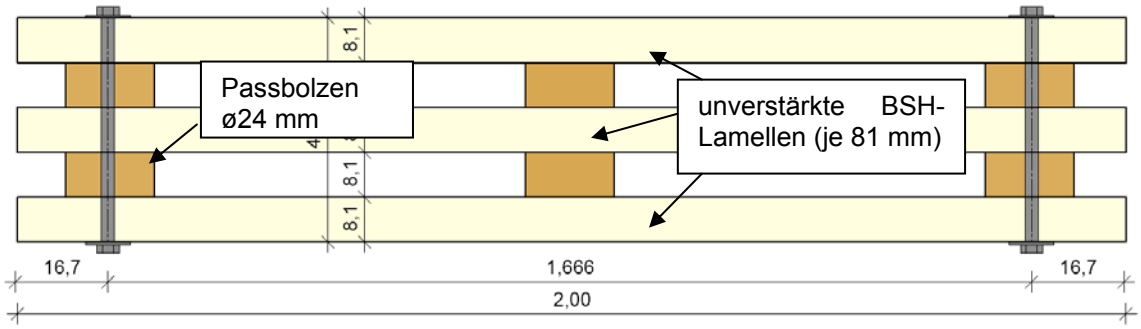


Abb. 3.104: Aufbau des unverstärkten 3-lamelligen Versuchsträgers 'Fi3-B24'

Der Versuchsträger ‚K3-B24' ist als Ausschnitt der diagonalen Hauptträger der Gitterrostkonstruktion zu betrachten. Hierbei werden die oberen und unteren Lagen aus Hybridlamellen hergestellt. Die Mittellamelle wird unverstärkt ausgeführt.

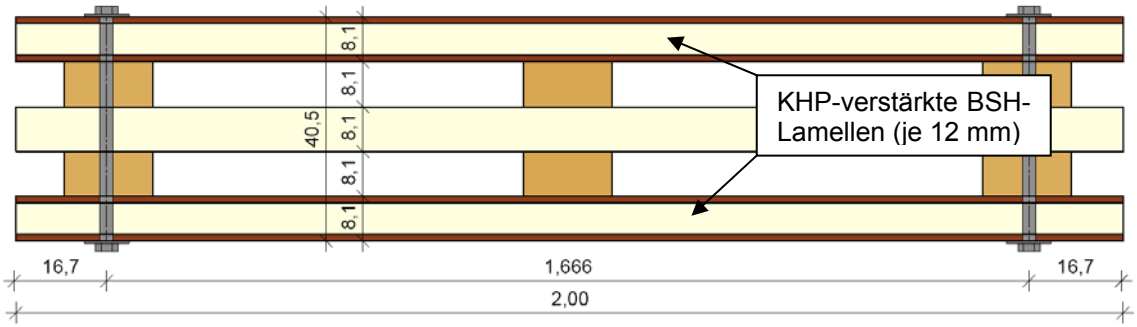


Abb. 3.105: Aufbau des verstärkten Versuchsträgers 'K3-B24'

Die zuvor betrachteten Verstärkungslösungen befassen sich nicht mit dem Aufbau der Füllhölzer, die in den Bereichen zwischen den Knotenpunkten eingesetzt werden. Diese Füllhölzer können jedoch einen wichtigen Beitrag für die Versteifung des nachgiebigen Verbundes leisten. Aus diesem Grund wurde die Sonderprobe ‚K64-S8' entwickelt. Wie Abb. 3.106 zeigt, werden zwei 45° geneigte KHP-Platten als Füllholz verwendet.



Abb. 3.106: Verbindungseinheit der Sonderprobe 'K64-S8'

Die diagonalen KHP-Platten sind 29 mm stark und 140 mm breit. Diese werden mit drei Holzbauschrauben (8x80 mm - Schmid Rapid Komprex nach Zulassung Z-9.1-564) mit den Lamellen verschraubt (vgl. Abb. 3.106). Die Schrauben sind so orientiert, dass diese bei der Biegeprüfung auf Zug beansprucht werden. Um ein Abheben der Lamellen, und damit ein Aufstellen der schrägen KHP-Platten, zu verhindern, wurden zwei Vollgewindeschrauben senkrecht zur Trägerachse eingedreht.

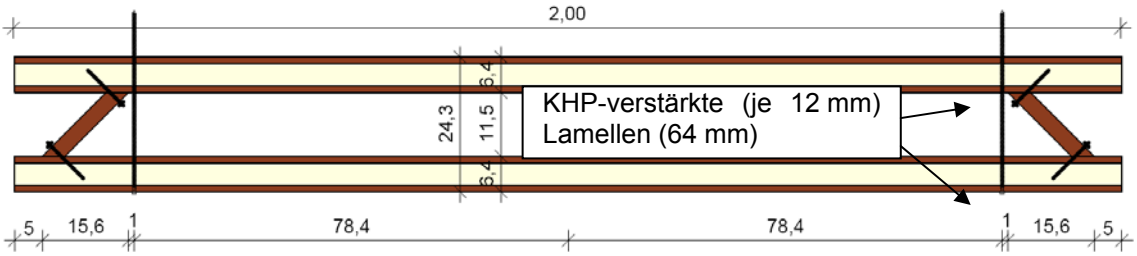


Abb. 3.107: Aufbau der Sonderprobe 'K64-S8'

3.3.2.2.2 Aufbau und Durchführung der Biegeprüfungen

Abb. 3.108 zeigt den Versuchsaufbau der 3-Punkt-Biegeprüfungen für einen 3-lamelligen Träger.



Abb. 3.108: Versuchsträger 'K3-B24' in der Prüfanlage

Die Stützweite in den Versuchen betrug 166,6 cm. Die Verformung der Versuchskörper wurde sowohl über induktive Wegaufnehmer (IWA) als auch photogrammetrisch (Vic3D) erfasst.

Grundlagen des optischen Messsystems - Vic3D

Zahlreiche Versuche wurden von Verformungsmessungen mit einem optischen Messsystem der Firma LIMESS Messtechnik begleitet. Mit Hilfe der Software werden 3D-Koordinaten, Verschiebungen und Dehnungen flächenhaft mittels Bildkorrelation berechnet. Das stereoskopische Kamerasystem besteht aus zwei Kameras und kann kontinuierlich in Kameraabstand und -winkel variiert werden. Dadurch ist eine flexible Anpassung des Messfeldes von ca. 10 mm² bis mehr als 100 m² möglich. Das Verfahren ist für nahezu alle optisch zugängliche Materialoberflächen geeignet. Aus diesen Gründen wurde es insbesondere bei Versuchen mit Proben komplexer Oberfläche, wie z. B. den Trägern mit nachgiebigem Verbund oder den Rohrprofilen, eingesetzt. Für eine präzise Korrelation wird die Objektoberfläche mit einem stochastischen Zufallsmuster präpariert. Das Muster (Speckle) wird mit weißer bzw. schwarzer Sprühfarbe aufgebracht (vgl. Abb. 3.108).

Die Verschiebungsgenauigkeit beträgt typischerweise 0,01 Pixel. Dies entspricht z. B. 1 µm bei 100 mm Messfeldbreite (bei 1000 Pixel). Die lokale Dehnungsauflösung beträgt 0,01 % (100 µm/m) und kann durch größere Auswertesubsets bis ca. 10 µm/m verbessert werden. Es können Dehnungen über 200 % gemessen werden. Die Software Vic3D bietet die Möglichkeit zur Definition beliebig vieler Auswertebereiche. Die implementierten Bildkorrelationalgorithmen besitzen eine hohe Messgenauigkeit und erlauben durch zusätzliche spezielle Suchverfahren eine vollautomatische Auswertung von Bildsequenzen auch bei nichtlinearen Verformungsvorgängen und großen Starrkörperbewegungen. Dehnungen werden nach den Tensoren Lagrange, Hencky und Euler-Almansi berechnet. Hauptdehnungen sowie Dehnungen nach Tresca und Mises stehen ebenfalls zur Verfügung. Die Ergebnisvisualisierung erfolgt als aussagekräftige 2D-Farbüberlagerung oder 3D-Konturbild mit Farboberfläche.

Biegeprüfung der 2-lamelligen Versuchsträger

Im Folgenden werden beispielhaft nur die Versuche der Reihe ‚K-S10‘ ausgewertet. Eine Zusammenfassung aller Versuchsergebnisse zeigt Tabelle 3.22.

Verstärkte Probekörper der Versuchsreihe ‚K-S10'

Die höchsten Traglasten der 2-lamelligen Träger wurden für die Versuchskörper ‚K-S10-1' und ‚K-S10-2' erwartet und in den Versuchen mit Bruchlasten von jeweils 123,86 kN bzw. 135,03 kN auch bestätigt.

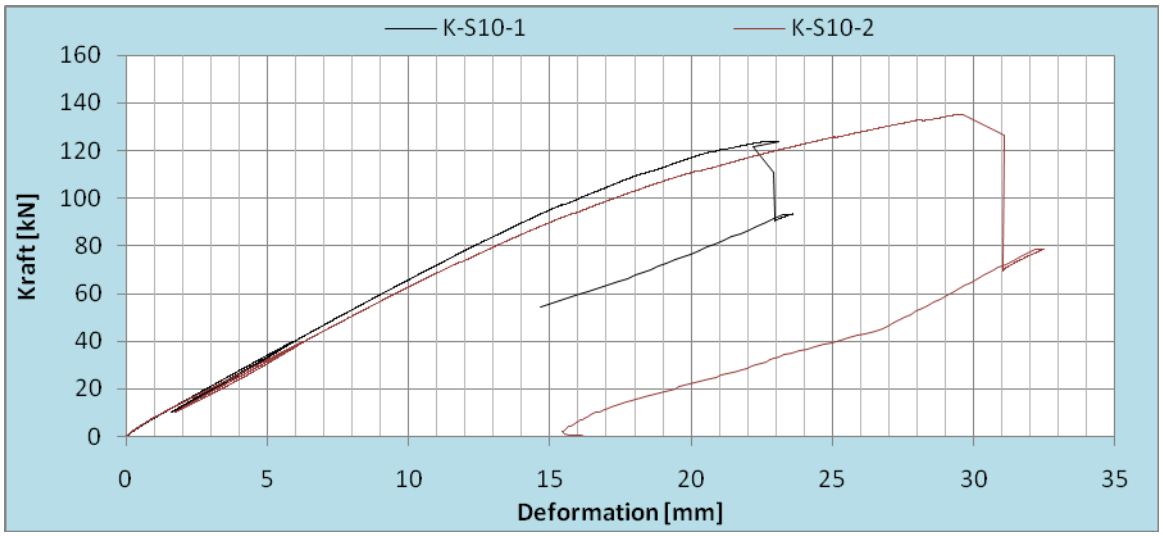


Abb. 3.109: Kraft-Verschiebungs-Kurven für 'K-S10-1' und 'K-S10-2'

Das Last-Verformungs-Diagramm (vgl. Abb. 3.109) zeigt bei beiden Versuchskörpern bis etwa 70 kN ein annähernd lineares Verhalten. Auffällig ist die große Diskrepanz bzgl. der Verformungen zwischen oberer und unterer Lamelle der Probe ‚K-S10-1' (vgl. Abb. 3.110).

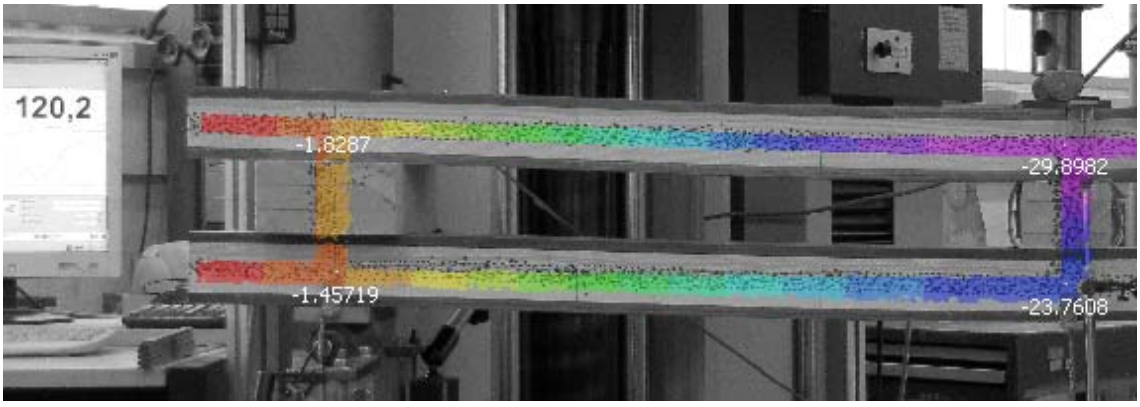


Abb. 3.110: 'K-S10-1' - Verformungsunterschiede zw. oberer und unterer Lamelle

Da diese Abweichungen vor allem im oberen Lastbereich stetig zunehmen, lässt dies auf ein Zusammendrücken des Zwischenholzes schließen. Aus diesem Grund wurde eine zweite Probe mit drucksteifen Abstandshölzern untersucht. Diese Maßnahme löste das Problem der Querverformungen.

Die Versagensursache für den ersten Probekörper ist das Ablösen der oberen Kunstharzpressholzschicht im Biegedruckbereich zwischen Zwischenholz und dem Auflager. Die zweite Probe versagt im Biegezugbereich der unteren Lamelle. Dabei löst sich die untere KHP-Lamelle vom BSH ab (vgl. Abb. 3.111).



Abb. 3.111: 'K-S10-2'- Ablösen der unteren KHP-Lamelle vom BSH

Biegeprüfung der 3-lamelligen Versuchsträger

Die Spannweite in den 3-Punkt-Biegeprüfungen beträgt analog zu den 2-lamelligen Proben 166,6 cm.

Unverstärkter Versuchsträger ‚Fi3-B24'

Die 3-lamellige unverstärkte Probe erreicht in der Biegeprüfung eine Traglast von 90,48 kN. Abb. 3.112 zeigt die mit IWA aufgezeichneten Durchbiegungen der Probe in Feldmitte.

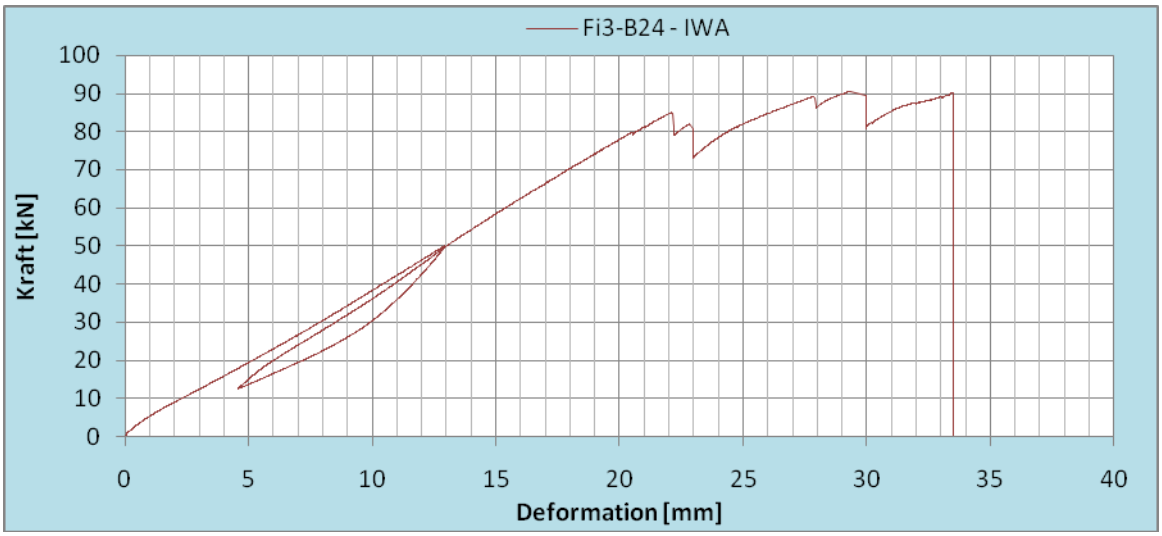


Abb. 3.112: Kraft-Verschiebungs-Kurve für 'Fi3-B24'

Das Last-Verformungsverhalten ist bis zum Teilversagen der oberen Lamelle bei 85 kN annähernd linear-elastisch. Anschließend ist ein sukzessives Versagen weiterer Trägerbereiche einschließlich der Mittellamelle zu beobachten. Das endgültige Versagen tritt mit dem Biegezugversagen der unteren Lamelle bei einer Belastung von 90,2 kN ein.

Abb. 3.113 zeigt deutlich die Schubverformungen in den Kontaktfugen zwischen den Lamellen. Weiterhin weisen die Zwischenhölzer im Randbereich deutliche Abweichungen von ihrer Ausgangslage auf. Diese sind Folge der Schrägstellung und Verformung der Bolzen sowie der Aufweitungen der Bolzenlöcher.

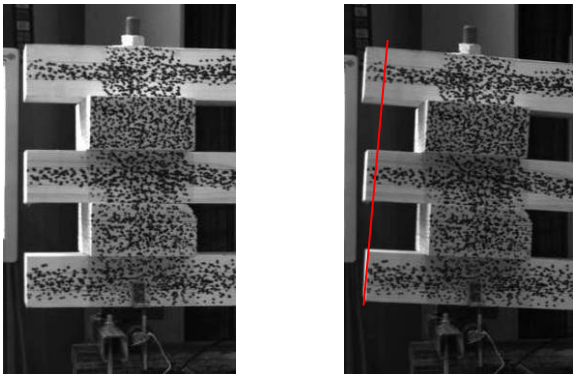


Abb. 3.113: Schubverformung der Lamellenlagen

Verstärkter Versuchsträger ‚K3-B24'

Die KHP-verstärkte Probe erreicht ihre Traglast bei 174,4 kN. Abb. 3.114 zeigt die mittels IWA und photogrammetrischer Analyse aufgezeichneten Last-Verformungs-Kurven des Trägers.

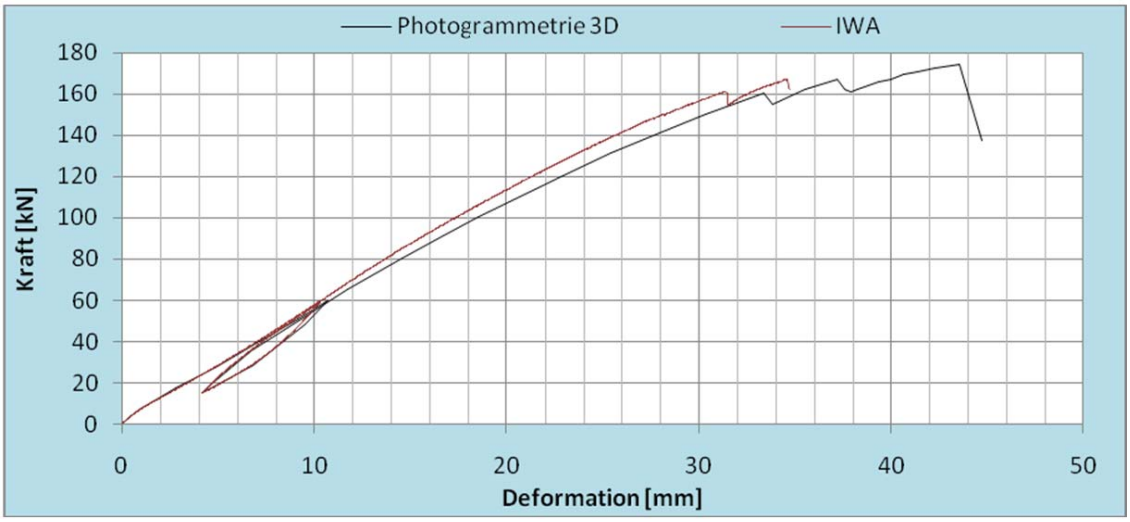


Abb. 3.114: Kraft-Verschiebungs-Kurven für 'K3-B24'

Bis etwa 100 kN zeig die Probe elastisches Verhalten. Anschließend wird das Tragverhalten zunehmend nichtlinear. Das Versagen der Probe wird durch den Bruch der unbewehrten Mittellamelle eingeleitet. Diese versagte bei 161 kN gefolgt von oberem und unterem Trägersegment. Abb. 3.115 zeigt den Biegezugbruch in der unteren KHP-Lamelle.



Abb. 3.115: Biegezugversagen der KHP-Schicht

Nach der Demontage der Träger wurden erhebliche Verformungen an den Bolzen sowie der Lochwandung im BSH (Mittellamelle) festgestellt. Die Bolzenlöcher im KHP hingegen weisen nur geringe Verformungen auf.

Sonderprobe ‚K64-S8'

Die Sonderprobe ‚K64-S8' erreicht in der Biegeprüfung eine Traglast von 92,5 kN. Das Tragverhalten des Trägers ist bis zum Bruch nahezu elastisch (vgl. Abb. 3.116). Bei Belastungen von 70 kN und 80 kN sind kleinere Sprünge in den Last-Verformungskurven zu verzeichnen, die auf erste Delaminationen hinweisen, jedoch nicht näher lokalisiert werden konnten. Das Versagen des Trägers tritt mit dem Ablösen der KHP-Lamelle vom Restquerschnitt im Biegedruckbereich des unteren Trägersegmentes ein.

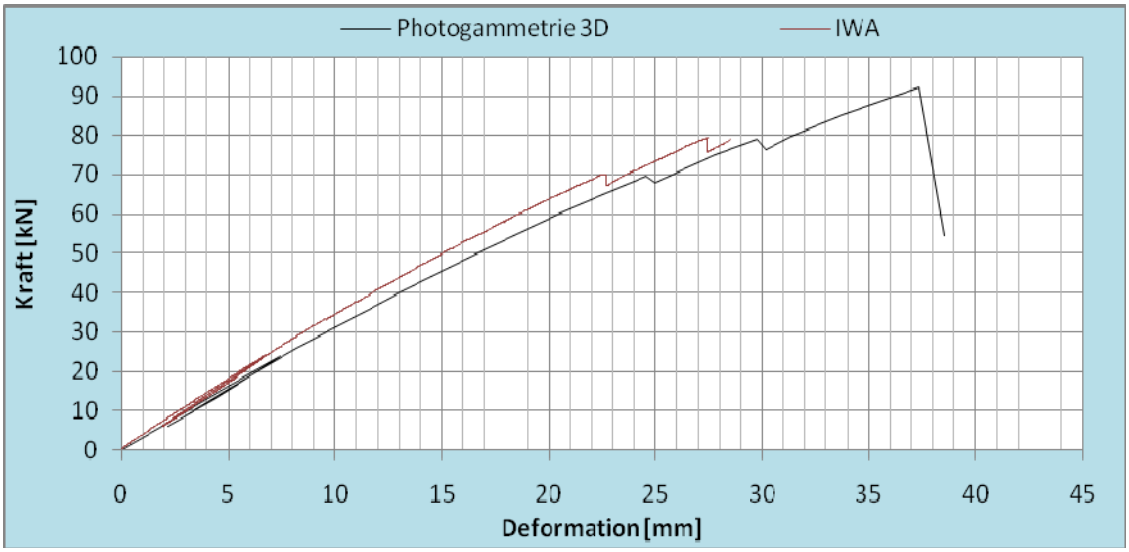


Abb. 3.116: Kraft-Verschiebungs-Kurven für Sonderprobe 'K64-S8'

Festzustellen ist, dass sich die Trägersegmente nur unwesentlich gegeneinander verschieben. Dies lässt auf eine sehr schubsteife Verbindung schließen (vgl. Abb. 3.117).



Abb. 3.117: Verformung der Sonderprobe 'K64-S8'

3.3.2.2.3 Auswertung der Biegeversuche

In der Auswertung werden die 2- und 3-lamelligen Versuchsträger getrennt betrachtet. Dabei wird besonderes Augenmerk auf den Einfluss der Verbindungstypen und der Verstärkungsmaterialien auf die Tragfähigkeit und die Biegesteifigkeit der Proben gelegt.

Zur Beurteilung der Verbindungstypen wird der Wirkungsgrad hinsichtlich der Biegesteifigkeit der Verbundträger abgeschätzt. Dieser Wirkungsgrad wird anhand des verleimten Referenzträgers ermittelt.

Kennwerte

Zur Auswertung der Versuche werden die Kennwerte der Proben hinsichtlich Traglasten F_{max}, maximalen Durchbiegungen w_{max} bei F_{max} und Biegesteifigkeiten im linearen Last-Verformungs-Bereich verwendet. Als Steifigkeit ist der Anstieg der Last-Verformungskurven zwischen 10 % und 40 % der Traglast definiert. Diese bildet die Grundlage für die Ermittlung der effektiven Biegesteifigkeit EI_{eff} die sich bei 3-Punkt-Biegung wie folgt berechnet:

$$EI_{eff} = \frac{\Delta F}{\Delta w} \cdot \frac{L^3}{48} \qquad \text{mit L = 1666 mm} \qquad (3.17)$$

Der Wirkungsgrad der Verbindungen wurde wie folgt ermittelt:

$$\eta = \frac{EI_{eff,Probe,Versuch}}{EI_{eff,Fi-Leim,Versuch}} \cdot 100\% \qquad (3.18)$$

Auswertung und Vergleich der 2-lamelligen Versuchsträger

Tabelle 3.22 fasst die Versuchsergebnisse der 2-lamelligen Proben mit Brettschichtholzlamellen zusammen. Die höchsten Traglasten und Steifigkeiten werden von den schrägverschraubten Trägern erzielt. Dies zeigt sich auch im Wirkungsgrad der Versuchsreihe, der bei etwa 75 % liegt. Der Träger mit verleimten Futterhölzern (Fi-Leim) besitzt eine hohe Steifigkeit bei vergleichsweise geringer Traglast. Dies ist auf das frühzeitige Abscheren der Futterhölzer zurückzuführen.

Tabelle 3.22: Kennwerte der 2-lamelligen Biegeträger aus BSH

Proben-bez.	F_{max} [kN]	w_{max} [mm]	Versagensart	$\Delta F/\Delta w$ [N/mm]	EI_{eff} [kNm²]	Wirkungsgrad [%]
Fi-Leim	**33,8**	**6,2**	Scheren der Zwischenhölzer in der Leimfuge	**5994**	**577**	**100**
Fi-B24-1	51,4	21,3	Biegezug untere Lamelle	2690	259	45
Fi-B24-2	49,8	20,0	Biegezug untere Lamelle	2678	258	45
Fi-B24 Mittel	**50,6**	**20,7**		**2684**	**258**	**45**
Fi-S10-1	63,7	18,8	1. Biegezug obere Lamelle - 2. Biegezug untere Lamelle -> Versagen	4441	427	74
Fi-S10-2	67,6	22,9	1. Biegezug obere Lamelle - 2. Biegezug untere Lamelle -> Versagen	4508	434	75
Fi-S10 Mittel	**65,7**	**20,9**		**4475**	**431**	**75**
P-B24-1	57,9	27,4	1. Biegezug untere Lamelle - 2. Biegezug obere Lamelle -> Versagen	2869	276	48
P-B24-2	61,4	26,4	2. Biegezug obere Lamelle - 2. Biegezug untere Lamelle -> Versagen	2949	284	49
P-B24 Mittel	**59,6**	**26,9**		**2909**	**280**	**48**

In Bezug auf die Steifigkeit ist der Einfluss der GFK-Patches gering. Nur hinsichtlich der Traglast sind nennenswerte Verbesserungen zu verzeichnen. Dies schlägt sich in einem Zuwachs von knapp 10 kN im Vergleich zur unverstärkten Variante nieder. Abb. 3.118 verdeutlicht die Effizienz der Verbindungsmittel und Verstärkung anhand der gezeigten Last-Verformungs-Kurven in Relation zum verleimten Träger und jenem mit losem Verbund.

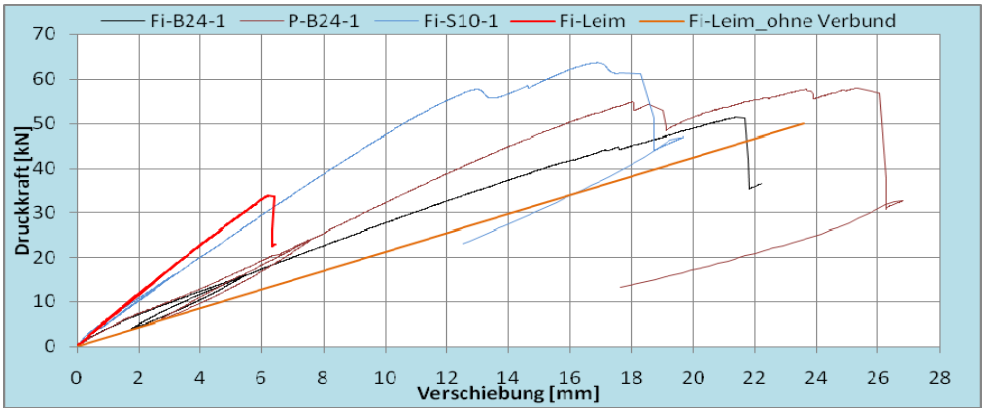


Abb. 3.118: Kraft-Verschiebungs-Kurven ausgewählter Proben

Die Versuchsträger mit Hybridlamellen sind durch deutlich höhere Traglasten und Steifigkeiten gekennzeichnet. Dies ist in erster Linie auf die höheren Biege-Elastizitätsmoduln der Hybridlamellen zurückzuführen. Ähnlich wie bei den reinen BSH-Trägern werden auch hier die besseren mechanischen Eigenschaften von den verschraubten Trägern erzielt. Im Vergleich zu den unverstärkten Trägern werden die Traglasten um mehr als den Faktor zwei verbessert. Die Steifigkeiten der verschrauben Träger erreichen das Niveau des verleimten Querschnitts.

Tabelle 3.23: Kennwerte der Versuchsreihen mit Hybridlamellen

Proben-bez.	F_{max} [kN]	w_{max} [mm]	Versagensart	$\Delta F/\Delta w$ [N/mm]	EI_{eff} [kNm²]	Wirkungsgrad [%]
K-B24-1	85,0	24,3	Schubbruch BSH von Mittelachse ausgehend - Herstellungsfehler	3975	383	66
K-B24-2	118,7	37,5	Querzug - Ablösen der oberen KHP-Lamelle im Biegedruckbereich/ Querdruck-Eindrückungen im Lasteinleitungsbereich	4453	429	74
K-B24* Mittel	**118,7**	**37,5**		**4214**	**406**	**70**
K-S10-1	123,8	27,5	Querzug - Ablösen der oberen KHP-Schicht im Biegedruckbereich der unteren Lamelle	6119	589	102
K-S10-2	135,0	31,6	Biegezug untere Lamelle - Ablösen der unteren KHP-Schicht	6140	592	103
K-S10 Mittel	**129,4**	**29,5**		**6129**	**590**	**102**

* Probe ‚K-B24-1' wird nicht in die Mittelwertbildung einbezogen, da die Prüfung auf Grund des Herstellungsfehlers vorzeitig abgebrochen wurde.

Den Einfluss der hybriden Lamellen auf die Biegesteifigkeit und Traglast der Proben verdeutlicht Abb. 3.119.

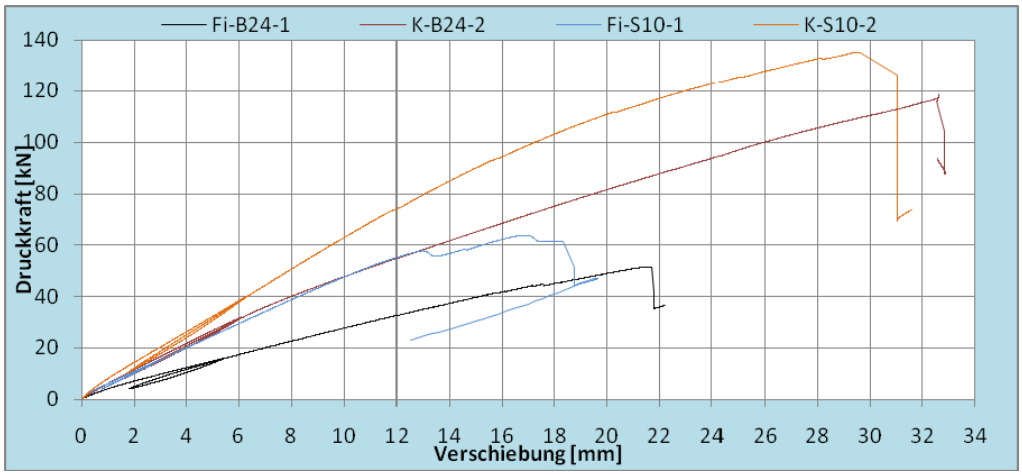


Abb. 3.119: Kraft-Verschiebungs-Kurven von Träger mit und ohne KHP

Bei Betrachtung des Diagramms fällt auf, dass der Versuchsträger ‚K-B24-2' und die unverstärkte Probe ‚Fi-S10-1' nahezu identische Biegesteifigkeiten aufweisen, was die Effizienz der gekreuzt eingebrachten Schrauben unterstreicht. Tendenziell kann den hybriden Trägern eine größere Elastizität und hohe Traglast bescheinigt werden.

Abgesehen von Probe ‚K-B24-1' wurden bei den Untersuchungen ähnliche Versagensmuster beobachtet. Dabei lösen sich die KHP-Lamellen vom Restquerschnitt ab, wobei sich in zwei Fällen die oberen KHP-Lamellierungen im Biegedruckbereich infolge Querzugversagen vom Bauteil trennen.

Zusammenfassung der Versuchsergebnisse

Der Einfluss der Verstärkungen und Verbindungstypen auf die Tragfähigkeit und Biegesteifigkeit nachgiebig verbundener Bauteile wird in nachstehendem Diagramm deutlich:

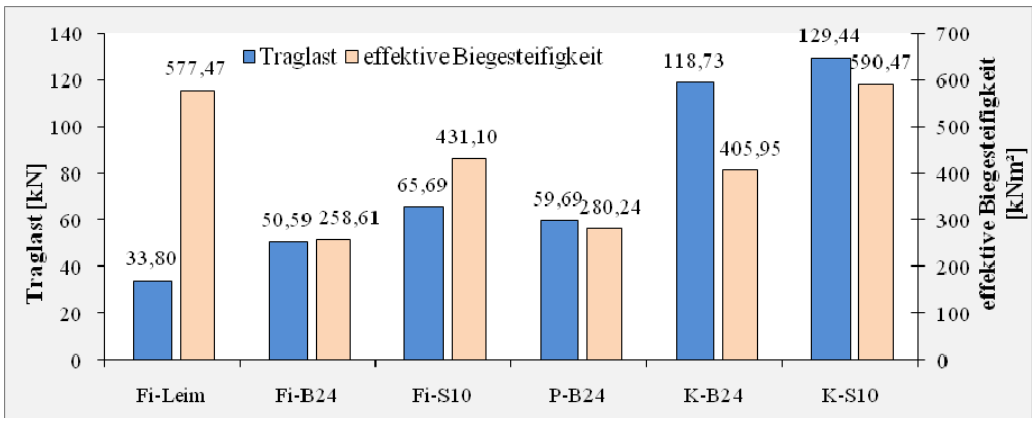


Abb. 3.120: Zusammenfassung 2-lamellige Versuchsträger

Das Diagramm unterstreicht die Effizienz der Schrägverschraubung im Vergleich zu den Verbindungen mit Bolzen. Belegt wird diese Feststellung sowohl durch den Vergleich der unverstärkten Versuchsreihen ‚Fi-B24' und ‚Fi-S10' als auch bei Betrachtung der mit KHP-verstärkten Proben ‚K-B24' und ‚K-S10'. Durch die lokale Verstärkung der Bolzenverbindung mit GFK-Patches werden die Traglast und die Steifigkeit der Träger verbessert. Das Niveau der Schrägverschraubung wird jedoch nicht erreicht. Die Schrägverschraubung zeichnet sich vor allem durch eine hohe Steifigkeit aus, was besonders durch einen Vergleich zum verleimten Träger ‚Fi-Leim' deutlich wird. Aussagen über den Wirkungsgrad der Verstärkungen bzgl. der Traglast

können an dieser Stelle nicht getroffen werden, da die starr verbundene Probe infolge des lokalen Versagens der Leimfugen nicht bis zum Bruch der Lamellen belastet werden konnte.

Auswertung der Sonderprobe

Tabelle 3.24: Kennwerte der Sonderprobe

Proben-bez.	F_{max} [kN]	w_{max} [mm]	Versagensart	ΔF/Δw [N/mm]	EI_{eff} [kNm²]	Wirkungsgrad [%]
K64-S8	92,5	38,4	Querzug - Ablösen der KHP-Schicht im Biegedruckbereich der unteren Lamelle	3091	298	k. A.

Mit einer Höchstlast von 92,5 kN übertrifft der Träger die 2-lagigen Versuchsträger mit 81 mm hohen Brettschichtholzlamellen. Die effektive Biegesteifigkeit ist etwas höher als jene der verbolzten Versuchsreihen mit BSH-Lamellen (‚Fi-B24'), obwohl das Flächenträgheitsmoment 2. Grades des niedrigen Trägers mit 64 mm hohen Hybridlamellen deutlich geringer ist. Aus diesem Grund wurde auch auf die Angabe eines Wirkungsgrades verzichtet.

Auswertung und Vergleich der 3-lamelligen Versuchsträger

Die Auswertung der 3-lamelligen Versuchsträger gestaltet sich dahingehend als schwierig, da die Proben die für Biegeträger typischen Schlankheiten deutlich unterschreiten und somit der Einfluss der Querkraft stark zunimmt.

Tabelle 3.25: Kennwerte der 3-lamelligen Träger

Proben-bez.	F_{max} [kN]	w_{max} [mm]	Versagensart	ΔF/Δw [N/mm]	EI_{eff} [kNm²]
Fi3-B24	90,5	36,2	1. Biegezug obere Lamelle - 2. Biegezug Mittellamelle - 3. Biegezug untere Lamelle -> Versagen	3700	357
K3-B24	174,4	45,6	1. Biegezug mittlere Brettschichtholzlamelle - 2. Biegezug BSH obere Lamelle - 3.Biegezug untere KHP-Schicht obere Lamelle -> Versagen	5172	498

Durch den Einsatz der Hybridlamellen wurde die Traglast des Trägers von 90,5 kN auf 174,4 kN gesteigert. Des Weiteren liegt die Biegesteifigkeit des verstärkten Trägers um 40 % über jener der unverstärkten Variante.

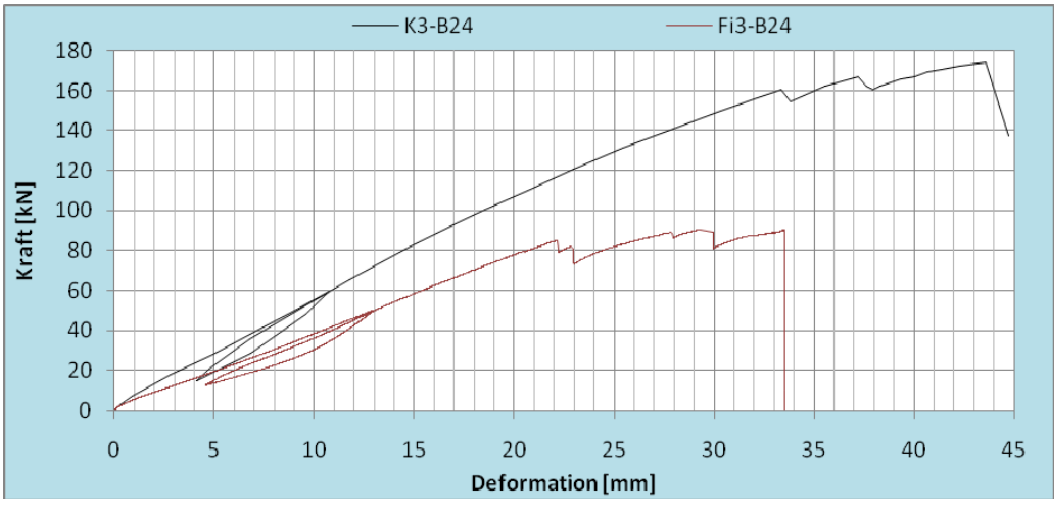


Abb. 3.121: Last-Verformungs-Kurven der 3-lamelligen Versuchsträger

3.3.2.3 Druck-Scherversuche an Verbindungen

Die Biegeversuche haben gezeigt, dass die Nachgiebigkeit der Verbindungen die Verformung und die Traglast der aufgelösten Träger entscheidend beeinflusst. Zur Bestimmung der Steifigkeiten der Verbindungen werden drei- und fünfteilige Scherkörper hergestellt und im Druck-Scherversuch geprüft.

3.3.2.3.1 Dreiteilige Prüfkörper

Die Scherkörper bestehen aus 50 cm langen Trägersegmenten. Der Aufbau der dreiteiligen Prüfkörper inklusive der Verbindungsmittel ist in den folgenden Abbildungen dargestellt.

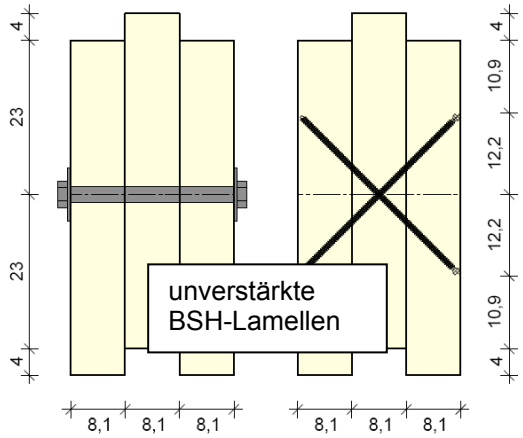


Abb. 3.122: Aufbau der dreiteiligen unverstärkten Scherproben

Der Versatz der Mittellamelle, welche zur Krafteinleitung genutzt wird, zu den Randlamellen betrug 4 cm. Die nach DIN 1052:2004-08 geforderten Randabstände der Passbolzen zum beanspruchten Hirnholzende von 7d (7x24=168 mm < 270 mm) werden eingehalten. Die Schraubenverbindungen wurden analog dem Schraubenbild der Biegeträger ausgeführt. Alle KHP-verstärkten Schraubverbindungen sind mit Kerndurchmesser der VBM (0,7d = 7 mm) vorgebohrt worden. Abb. 3.123 zeigt die Schichtung und Lage der KHP-Lamellen sowie die der GFK-Patches.

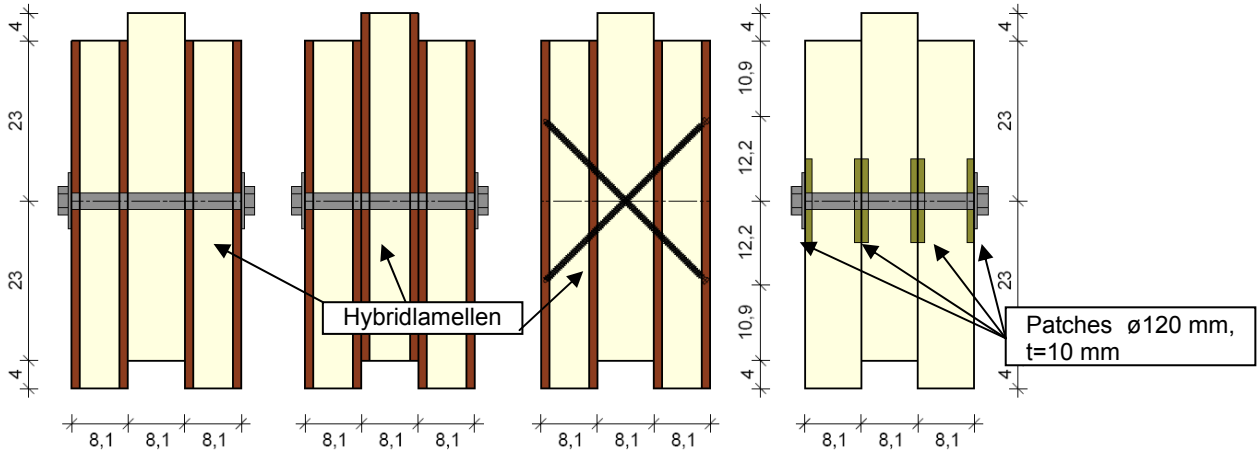


Abb. 3.123: Aufbau der dreiteiligen verstärkten Scherproben

Die GFK-Patches wurden jeweils in die Deckflächen der Lamellen, in dafür vorgesehene Fräsungen, mit Epoxidharz eingeklebt.

Um den Wirkungsgrad der Verbindungsmittel in Kombination mit den verschiedenen Verstärkungen zu beurteilen, wurde als Referenz eine verleimte Verbindung (‚FiA-Leim') geprüft.

Tabelle 3.26: Probenumfang dreiteiliger Scherkörper

Proben-bezeichnung	Lamellen	VBM	
FiA-B24-1 **FiA-B24-2**	BSH 160 x 81 x 500 (B x H x L in mm)	Passbolzen Ø24mm L = 335 mm	
FiA-S10-1 **FiA-S10-2**	BSH 160 x 81 x 500 (B x H x L in mm)	4 x Vollgewinde-schrauben d_1=10 mm, L=300 mm	
PA-B24-1	BSH+ Patches ø120mm, t = 10mm	Passbolzen Ø24 mm L = 335 mm	
KA-B24-1	Hybridlamellen (außen) + BSH-Mittellamelle	Passbolzen Ø24 mm L = 335 mm	
KA-B24-2	Hybridlamellen		
KA-S10-1 **KA-S10-2**	Hybridlamellen (außen) + BSH-Mittellamelle	4 x Vollgewinde-schrauben Vorgebohrt Ø7 mm	
FiA-Leim	BSH 160 x 81 x 500 (B x H x L in mm)	Leim	

3.3.2.3.2 Fünfteilige Prüfkörper

Der Unterschied zum Aufbau der dreiteiligen Proben besteht darin, dass zwischen den Rand- und der Mittellamelle jeweils eine kurze Brettschichtholzlamelle geschaltet ist (vgl. Abb. 3.124). Die Faserrichtung ist dabei rechtwinklig zu denen der Rand- und Mittellamelle. Zu berücksichtigen ist, dass die vergleichsweise große Stützweite ein zusätzliches Biegemoment erzeugt.

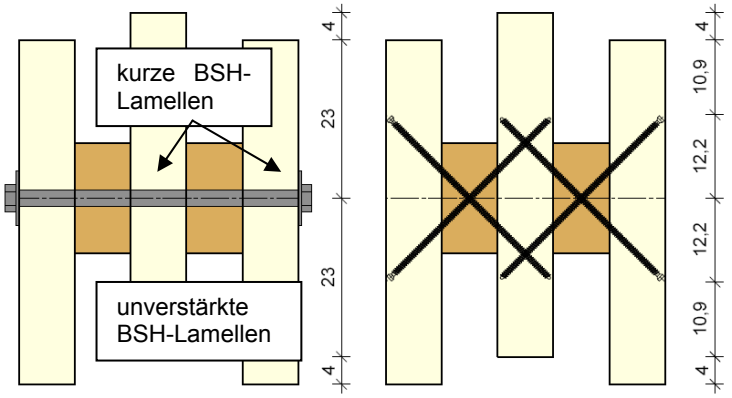


Abb. 3.124: Aufbau der fünfteiligen nicht verstärkten Scherproben

Als Verbindungsmittel kommen auch hier Passbolzen und Vollgewindeschrauben zum Einsatz. Im Gegensatz zu der asymmetrischen Beanspruchung im Träger werden die Verbindungen bei diesem Versuchsaufbau symmetrisch belastet. Der Aufbau der mit KHP- und Patches verstärkten Proben ist in Abb. 3.125 dargestellt.

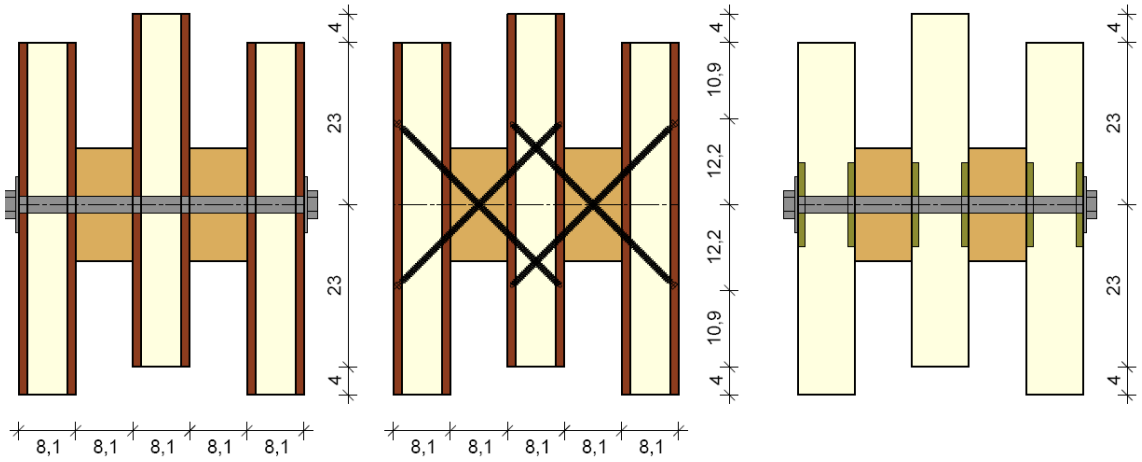


Abb. 3.125: Aufbau der verstärkten fünfteiligen Scherproben

Dabei werden die Mittellamellen genau wie die Randlamellen verstärkt ausgeführt, um die oberen und unteren Lamellen der Versuchsträger nachzubilden. Die dazwischen geschalteten Kurzlamellen sind quer zur Faser mit eingedrehten Schrauben verstärkt, um ein Aufspalten infolge der Keilwirkung der Bolzen zu vermeiden.

Tabelle 3.27: Probenumfang fünfteiliger Scherkörper

Proben-bezeichnung	Rand- und Mittellamellen	VBM	
PA-B24-2	BSH+ Patches ø120 mm, t = 10 mm	Passbolzen Ø24 mm L = 335 mm	
FiA-B24-3 **FiA-B24-4**	BSH 160 x 81 x 500 (B x H x L mm)	Passbolzen Ø24 mm L = 480 mm	
FiA-S10-3 **FiA-S10-4**	BSH	2 x 4 x Schmid StarDrive Vollgewinde d_1=10 mm, L=300 mm	
KA-B24-3 **KA-B24-4**	Hybridlamellen	Passbolzen Ø24 mm L = 480 mm	
KA-S10-1 **KA-S10-2**	Hybridlamellen	2 x 4 x Schmid StarDrive Vollgewinde d_1=10 mm, L=300 mm Vorgebohrt Ø7 mm	

3.3.2.3.3 Versuchsaufbau und Durchführung der Scherversuche

Die Druck-Scherversuche wurden analog den Traglastversuchen der Biegeträger in der Prüfmaschine Zwick Z250 durchgeführt.

Die Krafteinleitung erfolgt über eine Kugelkalotte, die eine zentrische Lasteinleitung gewährleistet. Die Relativverschiebungen zwischen den Lamellen wurden mittels induktiver Wegaufnehmer aufgezeichnet. Um dies zu vereinfachen, wurden die Randlamellen über eine Traverse verbunden und so der Mittelwert der Relativverschiebung bestimmt (vgl. Abb. 3.126).

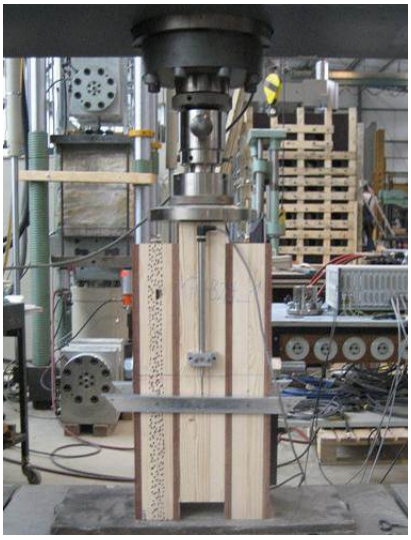


Abb. 3.126: Versuchsaufbau Druck-Scherversuch

Die Proben KA-B24-4 und FiA-S10-4 wurden zusätzlich photogrammetrisch erfasst. Die Aufzeichnung der Relativverschiebung beginnt nach dem Aufbringen einer Vorlast von 200 N. Die Versuche wurden in Anlehnung an die DIN EN 26891 durchgeführt. Als Abbruchkriterien wurden das Erreichen der Bruchlast oder eine Gesamtverschiebung von mehr als 15 mm definiert.

3.3.2.3.4 Ergebnisse der Scherversuche dreiteiliger Proben

Abb. 3.127 zeigt die Last-Verformungs-Kurven der Verbindungen und der Referenzprobe ‚FiA-Leim'. Die Kurven lassen erkennen, dass Traglast und Steifigkeit der geschraubten Verbindungen deutlich über jenen der verbolzten Verbindungen liegen. Die geleimte Probe wurde primär zur Bestimmung der Steifigkeit benötigt. Die Traglast der Referenzprobe lag über 250 kN und somit über dem Messbereich der Kraftmessdose.

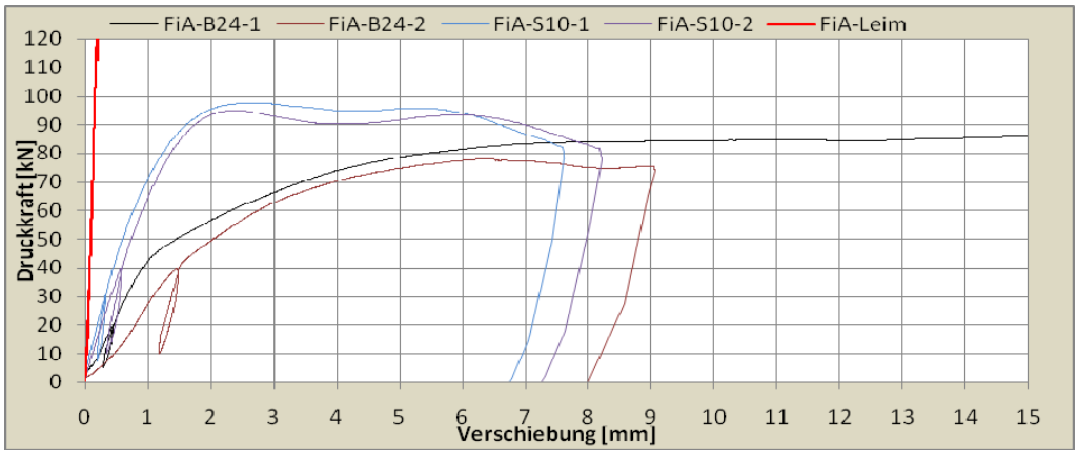


Abb. 3.127: Last-Verformungs-Kurven der nicht verstärkten dreiteiligen Scherproben

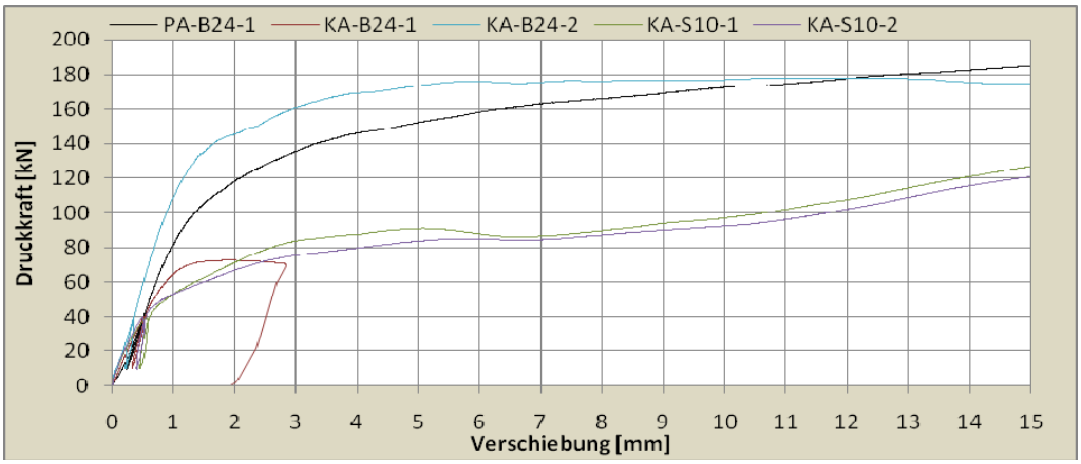


Abb. 3.128: Last-Verformungs-Kurven der verstärkten dreiteiligen Scherproben

Der KHP-verstärkte Scherkörper ‚KA-B24-2' zeigt im Versuch annähernd das Verhalten der Patch-verstärkten Probe. Die Last-Verformungs-Kurven sind bis etwa 100 kN linear. Danach bildet sich, in Kombination mit Lochleibungsversagen, im VBM ein Fließgelenk aus. Auffällig ist, dass das Lochleibungsversagen der KHP-Probe weniger in den Scherfugen (KHP), sondern vielmehr in Bereich des BSH auftritt. Neben der großen Bolzenverformung waren die Lochaufweitungen des KHP verhältnismäßig gering. Abb. 3.129 zeigt die Relativverschiebung der Mittel- gegenüber den Randlamellen und lässt die Bolzenverformung erahnen.

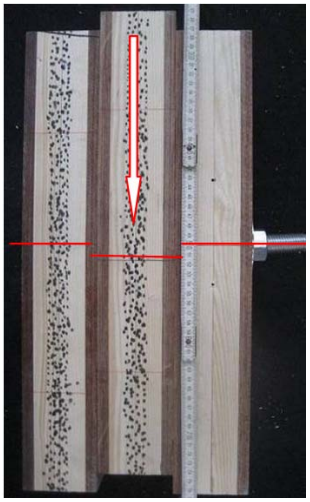


Abb. 3.129: Probe 'KA- B24-2'

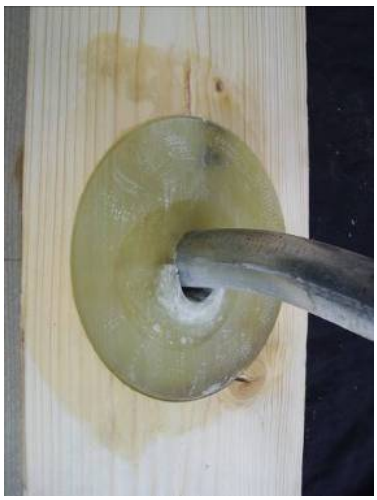


Abb. 3.130: Verformungen in Bolzen und GFK-Patch

Abb. 3.130 zeigt sowohl die erheblichen plastischen Verformungen des Patches als auch des Bolzens nach Demontage der Verbindung. Dies verdeutlicht die hohe Beanspruchung des Verbindungsmittels und der Verstärkung im Bereich der Scherfuge. Ein Ablösen der Patches oder aber Schädigungen der umgebenen Holzstruktur wurden nicht beobachtet.

Die vergleichsweise geringe Traglast der geschraubten Verbindungen ist schlicht auf die unverstärkte Mittellamelle zurückzuführen, die nur begrenzt in der Lage ist, die Kräfte in die KHP-verstärkten Lamellen einzuleiten. Überraschend ist jedoch, dass die Verstärkung das Tragverhalten der geschraubten Verbindung eher negativ zu beeinflussen scheint. Die Ursache hierfür ist herstellungsbedingt. Da die KHP-verstärkten Proben einschließlich des unverstärkten Mittelholzes vorgebohrt werden müssen, kommt es im Versuch zu vergleichsweise großen Eindrückungen der Schrauben im Mittelholz und dementsprechend auch zu etwas geringeren Traglas-

ten. Dieses Verhalten ist in ähnlicher Weise auch bei den fünfteiligen Probekörpern zu beobachten. Die in den Versuchen ermittelten Kennwerte der Verbindungen sind in Tabelle 3.28 zusammengefasst. Die Traglasten und Verschiebungsmodule sind je Scherfläche (SF) angegeben.

Tabelle 3.28: Versuchsergebnisse dreiteiliger Proben je Scherfläche

Unverstärkte Proben	**FiA-Leim**	**FiA-B24-1**	**FiA-B24-2**	**Mittel FiA-B24**	**FiA-S10-1**	**FiA-S10-2**	**Mittel FiA-S10**
F_{max} je SF [kN]	>125	43	39	**41**	48	46	**47**
k_s je SF [kN/mm]	278	21	15	**18**	43	33	**38**
Verstärkte Proben	**FiA-Leim**	**PA-B24-1**	**KA-B24-1**	**KA-B24-2**	**KA-S10-1**	**KA-S10-2**	**Mittel KA-S10**
F_{max} je SF [kN]	>125	92	36	88	63	60	**62**
k_s je SF [kN/mm]	277	45	38	52	32	35	**34**

3.3.2.3.5 Ergebnisse der Scherversuche fünfteiliger Prüfkörper

Abb. 3.131 und Abb. 3.132 zeigen die Ergebnisse der Scherversuche an fünfteiligen verstärkten bzw. unverstärkten Proben.

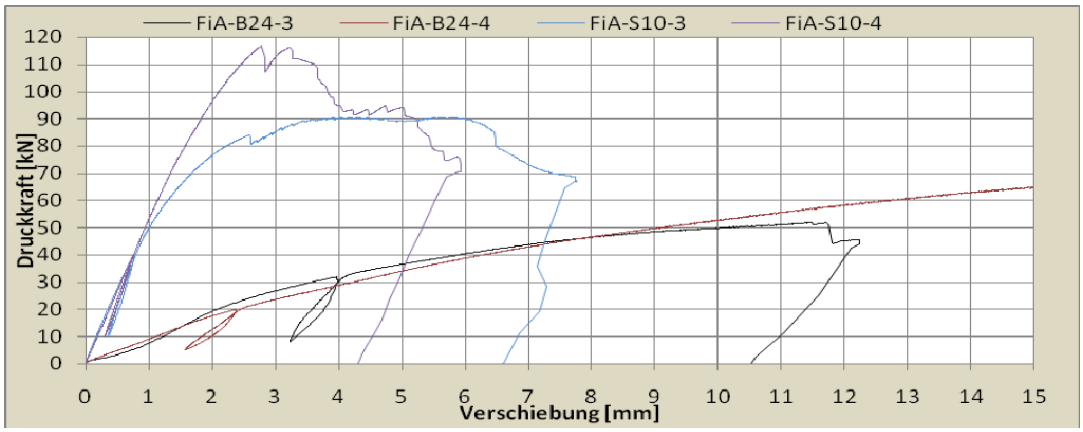


Abb. 3.131: Last-Verformungs-Kurven der unverstärkten fünfteiligen Scherproben

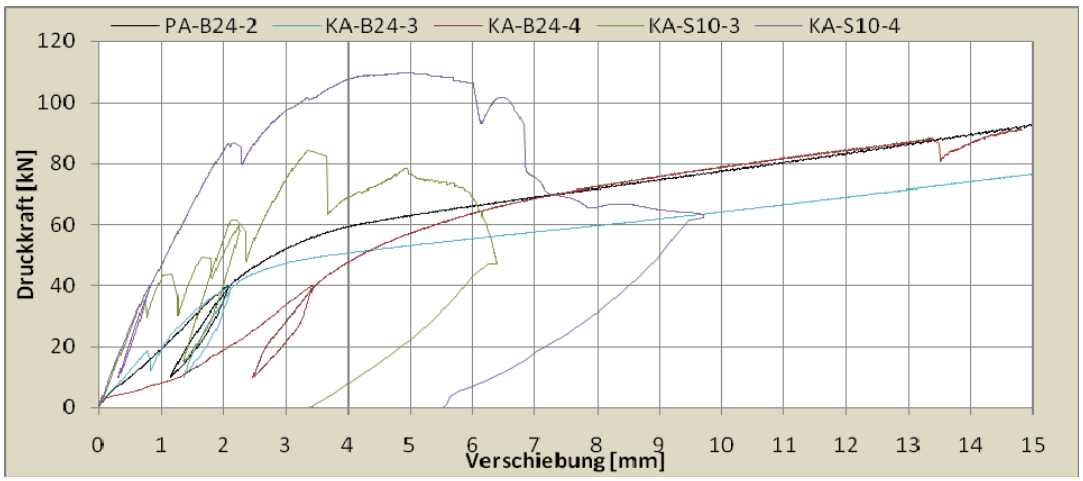


Abb. 3.132: Last-Verformungs-Kurven der verstärkten fünfteiligen Scherproben

Wie bereits bei den dreiteiligen Proben beobachtet, ist die Steifigkeit der verschraubten Proben deutlich größer als jene der Bolzenverbindung. Für die fünfteiligen Proben werden die Traglast und der Verschiebungsmodul je Verbindungsseite (VS) angegeben.

Tabelle 3.29: Versuchsergebnisse dreiteiliger Proben

Probe	**FiA-Leim**	**FiA-B24-3**	**FiA-B24-4**	**Mittel FiA-B24**	**FiA-S10-3**	**FiA-S10-4**	**Mittel FiA-S10**
F_{max} je VS [kN]	>125	26	32	**29**	45	58	**52**
k_s je VS [kN/mm]	277	4,1	4,1	**4,1**	25	27	**26**
Probe	**PA-B24-2**	**KA-B24-3**	**KA-B24-4**	**Mittel KA-B24**	**KA-S10-3**	**KA-S10-4**	**Mittel KA-S10**
F_{max} je VS [kN]	46	38	46	**42**	42	55	**48**
k_s je VS [kN/mm]	9,5	8,8	7,1	**8**	25	23	**24**

3.4 Textile Bewehrungen für Bauteile und Verbindungen

Kurzreferat vom Verantwortlichen (ISH)

In diesem Arbeitspaket wurden verschiedene Verfahren zur textilen Flächenbildung untersucht. Die Fasern bzw. Textilien wurden in unterschiedlichen Laminierverfahren appliziert, zum Teil können beide Verfahren in einem Arbeitsschritt erfolgen, wie z. B. im Wickelverfahren. Für die Verstärkung von Verbindungen wurden beispielsweise ringförmige Gestricke gefertigt und diese im Handlaminierverfahren appliziert.

3.4.1 Ringförmige Gestricke

Autor: Wolfgang Trümper (ITM)

Im Rahmen des Projekts erfolgte die Entwicklung und Umsetzung von flachgestrickten Verstärkungsstrukturen zur Erhöhung der Steifigkeit und Festigkeit von Holzbauteilen. Die konventionelle Flachstricktechnik bietet die Möglichkeit, reine Maschenstrukturen bereits während der Herstellung an die gewünschte Endkontur anzupassen. Das betrifft sowohl die äußere Kontur als auch die Fertigung von 3D Geometrien wie z. B. kompletten Pullovern in einem Stück. Dadurch kann z. B. in der Bekleidungsindustrie der Aufwand für das Zuschneiden von Einzelteilen und das anschließende Konfektionieren zum fertigen Erzeugnis verringert bzw. vermieden werden. Aufgrund der guten Drapierbarkeit von Gestricken kann eine Restanpassung an eine vorgegebene Geometrie darüber hinaus auch durch eine gezielte Strukturverzerrung erfolgen. Weiterhin können der erforderliche Materialeinsatz deutlich reduziert bzw. das Fadenmaterial entsprechend den Anforderungen lokal in die Maschenstruktur eingebracht werden. Die Weiterentwicklung der Flachstricktechnik am ITM erlaubt nunmehr die Herstellung von Mehrlagengestricken durch das Einbringen von gestreckten Verstärkungsfäden in Kett- (0°) und Schussrichtung (90°). Dabei können sowohl für die Verstärkungs- als auch für die Maschenfäden z. B. Hochleistungsfaserstoffe aus Glas, Kohle oder Aramid aber auch jedes andere Material, das in Fadenform verfügbar ist, eingesetzt werden. Die von der reinen Maschenstruktur bekannten Formgebungstechniken können prinzipiell auch bei der Herstellung der Mehrlagengestricke (MLG) eingesetzt werden. Somit besitzt die Flachstricktechnik ein hohes Potenzial zur Herstellung anforderungs- und endkonturgerechter Verstärkungshalbzeuge für Verbundanwendungen.

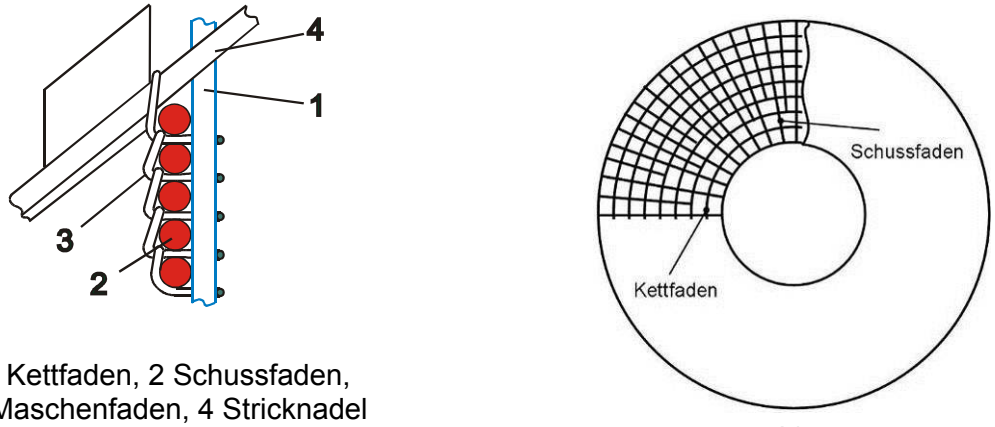
Zunächst folgt eine kurze Erläuterung der Begriff Faser, Filament, Faden und Garn. Klassisch wird ein Faden oder Garn aus Naturfasern, wie Baumwolle oder Wolle, in einem mehrstufigen Spinnprozess hergestellt. Die Naturfasern weisen dabei in der Regel eine begrenzte Länge auf. Durch die Entwicklungen im Bereich der synthetischen Fasern und der entsprechenden Spinnprozesse können heute technische Fasern unbegrenzter Länge hergestellt werden. Als Ausgangsmaterialen können dabei z. B. Polypropylen, Polyester, Polyamid aber auch Hochleistungsfaserstoffe wie Glas oder Aramid verwendet werden. Für Fasern unbegrenzter Länge hat sich die Bezeichnung Filament etabliert. Als Filamentgarne oder Rovings werden Garne oder Fäden bezeichnet, die durch das Zusammenfassen vieler Filamente entstehen. Für die weitere, insbesondere textile Verarbeitung der Filamentgarne ist ein ausreichender Fadenschluss zwischen den einzelnen Filamenten erforderlich. Dazu sind verschiedene Verfahren bekannt, wie Verdrehen, Verzwirnen oder eine Behandlung im Luftstrom (Texturieren). Auf den Oberflächen der Filamentgarne aus in der Regel spröden Hochleistungsfaserstoffen werden für das Erreichen eines ausreichenden Fadenschlusses meist Schlichten appliziert. Die chemische Struktur der Schlichten hat dabei einen großen Einfluss z. B. auf die Faser-Matrix-Haftung in Faserverbundbauteilen und damit auf deren mechanischen Eigenschaften. Filamentgarne aus Hochleistungsfaserstoffen mit jeweils angepassten Schlichten für die gängigsten Matrixsysteme sind kommerziell verfügbar. Die Fadenfeinheit wird unabhängig von der Herstellungsart oder dem Material in der Einheit tex [1tex = 1g/1000m] angegeben.

Die Aufgabe im Rahmen des Projekts bestand in der Entwicklung und Umsetzung ringförmiger MLG zur Verstärkung von Lasteinleitungsstellen an Holzbauteilen. Die Gestricke wurden dabei entsprechend den Vorgaben hinsichtlich Geometrie und Verstärkungswirkung ausgelegt und umgesetzt. Als Fadenmaterial wurden Filamentgarne als Verstärkungs- (ungezwirnt) und Ma-

schenfäden (gezwirnt) aus Glas eingesetzt. Die für die Gestrickentwicklung notwendigen Vorgaben der Projektpartner waren Ergebnis der Belastungsanalyse der konkreten Konstruktionen.

Alle stricktechnischen Entwicklungen erfolgten auf einer modifizierten Flachstrickmaschine CMS 320 TC der Firma Stoll mit der Maschinenfeinheit E5 (5 Nadeln auf 1 engl. Zoll). Die Maschine am ITM ist für das Einbringen von Verstärkungsfäden in Kett- und Schussrichtung entsprechend angepasst. Die dafür notwendigen Modifikationen betreffen im Wesentlichen den Strickschlitten, die Fadenführung der Kett- und Schussfäden zum/im Maschenbildungsbereich und die Fadenspeicher für die einzelnen Fadensysteme.

Die Abb. 3.133 zeigt in einer schematischen Darstellung den Querschnitt und den Aufbau eines ringförmigen MLG. In den ringförmigen MLG erfolgte die stricktechnische Anordnung der Verstärkungsfäden umlaufend in tangentialer (Kettfaden) und 90° dazu in radialer Richtung (Schussfaden). Die Kettfäden wurden mit Hilfe einer Kettfadenbarre bis in den Maschenbildungsbereich geführt. Der Schussfadeneintrag erfolgte mit einem speziellen Schussfadenführer.

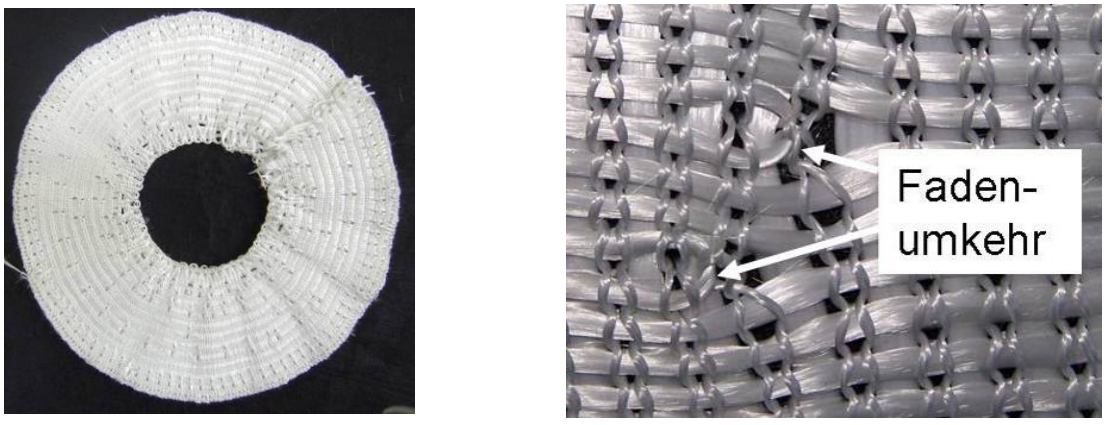


1 Kettfaden, 2 Schussfaden,
3 Maschenfaden, 4 Stricknadel

a) b)

Abb. 3.133: Schematische Darstellung von Mehrlagengestricken (MLG) a) Querschnitt, b) kreisringförmiges MLG

Die Abb. 3.134 a zeigt ein realisiertes ringförmiges MLG. Die ringförmige Geometrie wurde dabei durch Eintrag des Schussfadens in jeder Maschenreihe über eine unterschiedliche Arbeitsbreite (Teilschuss) erreicht. Im Ergebnis sind daher am Außendurchmesser des Gestricks entsprechend mehr und am Innenrand weniger Schussfäden angeordnet. Die Fixierung der Schuss- und Kettfadenanordung im MLG erfolgte durch den Maschenfaden. Beim Eintrag von Teilschüssen entstehen im Gestrick prinzipbedingt Fadenumkehren (Abb. 3.134), die lokal zu Strukturinhomogenitäten führen.



a b

Abb. 3.134: Kreisringförmiges Mehrlagengestrick a) Schema, b) umgesetztes Gestrick

Durch die mehrfache unmittelbar aufeinanderfolgende Anordnung der Fadenumkehr im Bereich derselben Nadel können im Gestrick Bereiche entstehen, in denen keine Verstärkungsfäden vorhanden sind. In diesen Bereichen ist nach der Konsolidierung ausschließlich Harz vorhanden, durch das in der Regel spröde Verhalten des reinen Harzes unter Belastung ist damit die Gefahr einer vorzeitigen Schädigung in diesen Bereichen sehr groß. Daher ist bei der Gestrickentwicklung darauf zu achten, dass die Fadenumkehren innerhalb des Gestricks immer versetzt angeordnet werden.

Die Beeinflussbarkeit von Gestrickparametern wie die Verstärkungsfadendichte in Schussfadenrichtung, die Innen- und Außendurchmesser oder die Drapierbarkeit über Maschineneinstellwerte wie Kuliertiefe, Abzugswert oder Fadenspannungen war Bestandteil grundlegender Untersuchungen. Dabei bewirken höhere Kuliertiefen und Abzugswerte prinzipiell eine Verringerung der Maschendichten. Eine Erhöhung der Kuliertiefe bewirkt gleichzeitig eine Verringerung der Belastungen des Maschenfadens. Die Erhöhung der Abzugswerte und der Fadenspannungen wirkt dem entgegen. Die Maschineneinstellwerte müssen dabei aufeinander abgestimmt werden, um in allen Bereichen des Gestricks die geforderten Gestrickparameter und gleichzeitig eine reproduzierbare, fehlerfreie Fertigung zu erreichen. Die maximalen Fadendichten in Kettfadenrichtung können in geringem Umfang durch die genannten Einstellwerte beeinflusst werden, sind aber im Wesentlichen durch die Feinheit der verwendeten Strickmaschine vorgegeben. Bei der Gestrickentwicklung ist weiterhin zu beachten, dass die genannten Parameter sich wechselseitig beeinflussen und bei einer Variation immer im Zusammenhang betrachtet werden müssen.

Die besondere Herausforderung bei der Entwicklung der ringförmigen MLG bestand in der Bereitstellung von MLG mit den für den konkreten Einsatz geforderten Innendurchmessern im Bereich von 20 bis 50 mm zur Verstärkung von Bolzenverbindungen und einer in allen Bereichen der Gestricken annähernd gleichen Verstärkungsfadendichte. Wie bereits beschrieben werden die Schussfäden zur Realisierung einer ringförmigen Struktur als Teilschüsse in das MLG eingebracht. Dazu müssen am Außenrand gegenüber dem Innenrand entsprechend mehr Schussfäden angeordnet werden. Im Rahmen der Untersuchungen musste daher zunächst ermittelt werden, bis zu welchem Innendurchmesser in Abhängigkeit von der Gestrickbreite eine Fertigung erfolgen kann. Zur Begrenzung des Versuchsumfangs wurde für alle Untersuchungen das gleiche Fadenmaterial eingesetzt. Ausgehend von früheren Untersuchungen wurde dabei für eine gleiche Verteilung der Verstärkungsfadenanteile in Kett- und Schussrichtung das in Tabelle 3.30 aufgeführte Fadenmaterial eingesetzt.

Tabelle 3.30: Materialeigenschaften der textilen Ausgangsmaterialien

Material	**Glas-Filament-Roving**	**Glas-Filament-Roving**	**Glas-Filament-Zwirn**
Bezeichnung	OCV 2400tex P196 FU (Kettfaden, 0°)	OCV 1200tex P196 FU (Schussfaden, 90°)	Culimeta 3x68tex
Elastizitätsmodul E [N/mm^2]	73000		
Zugfestigkeit f_t [N/mm^2]	3400		
Bruchdehnung ε [%]	3,5-4		
Wärmeausdehn.-koef. α_T [1/K]	$5*10^{-6}$		
Spez. el. Widerstand ρ [Ω cm]	10^{15}		

Zu Beginn der Gestrickentwicklung wurde zunächst der Umfang am Innen- und Außendurchmesser bestimmt, daraus die Anzahl theoretisch notwendiger Schussfadenumkehrstellen bestimmt sowie deren Verteilung im Gestrick simuliert. Die Abb. 3.135 zeigt schematisch mögliche Anordnungen der Umkehrpunkte der Teilschussfadeneinträge in den MLG entweder entlang

einer Linie (Abb. 3.135 a) oder stochastisch (Abb. 3.135 b). Bei der Anordnung der Umkehrpunkte entlang einer Linie zeichnet sich diese sehr deutlich im Gestrick ab (vgl. Abb. 3.134 b). Entlang der Linie sind potentielle Schwachstellen sehr konzentriert angeordnet. Zudem besteht hier die Gefahr, dass Lastpfade unterbrochen werden. Bei der stochastischen Anordnung der Umkehrpunkte entsteht eine insgesamt gleichmäßigere Gestrickoptik. Wie bereits genannt ist dann zusätzlich auch die Gefahr des Entstehens harzreicher Bereiche im späteren Bauteil deutlich reduziert. Aus den genannten Gründen wurde im Folgenden die weitgehend stochastische Verteilung der Umkehrstellen bei der Gestrickherstellung angewendet.

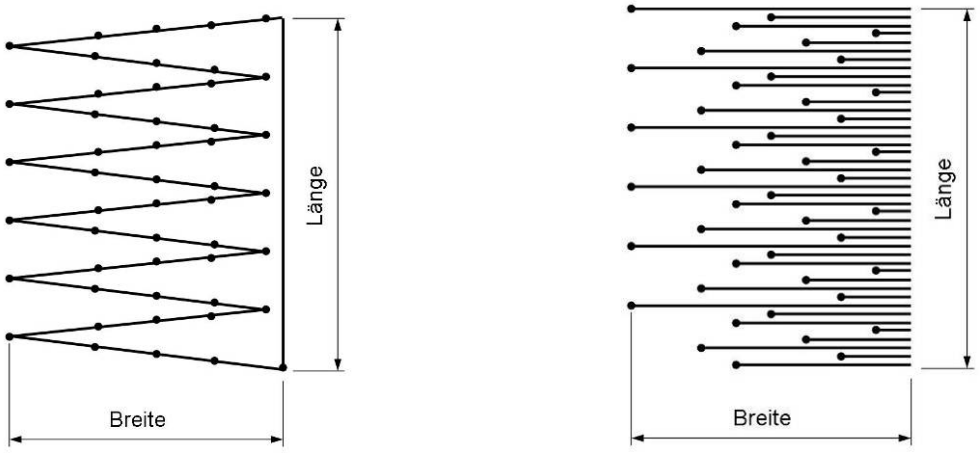


Abb. 3.135: Schema der Verteilung der Schussfäden a) gleichmäßig entlang einer Linie, b) stochastisch

In den Untersuchungen zeigte sich ein deutlicher Einfluss der Maschineneinstellungen auf die Gestrickparameter. Allerdings konnten zunächst keine Einstellwerte ermittelt werden, die die Herstellung eines fehlerfreien Gestricks erlauben. Insbesondere am Innendurchmesser werden immer wieder Maschen zerstört. Zur Erzielung der kreisringförmigen Geometrie werden hier weniger Maschen als am Außenrand gebildet, so dass die Maschen länger in der Ruheposition, auf den Nadeln verbleiben. Durch die Einführung von Durchstrickreihen über die gesamte Gestrickbreite sollen alle auf den Nadeln befindlichen Maschen in regelmäßigen Abständen abgestrickt und somit durch neue ersetzt werden. Die beim Strickprozess wirkenden Beanspruchungen soll dadurch reduziert und ein Zerstören von Maschen verhindert werden. Die Untersuchungen zeigten, dass eine entsprechende Durchstrickreihe über die gesamte Gestrickbreite nach ca. 5 - 6 Teilschusseinträgen vorgesehen werden muss. Die Anzahl der notwendigen Durchstrickreihen beeinflusst den minimal erreichbaren Innendurchmesser der ringförmigen MLG. In den weiteren Versuchen konnte ein minimaler Innendurchmesser im Bereich von etwa 35 mm realisiert werden.

Eine weitere Reduzierung der Durchstrickreihenanzahl und damit des Innendurchmessers kann nicht allein über die Maschineneinstellwerte erreicht werden. Bei den bisherigen Versuchen wirkte die Abzugskraft immer relativ gleichmäßig auf alle Bereiche des Gestricks. Die serienmäßig vorgesehen Möglichkeiten zur lokalen Beeinflussung der Abzugswirkung ermöglichen aufgrund der Dicke der MLG in den Bereichen, in denen jeweils aktuell nicht gestrickt wird, nur eine sehr ungenügende Entlastung der Maschen. Im Weiteren sollte daher untersucht werden, inwieweit durch eine Modifikation des Abzugssystems die für den Strickprozess notwendige Abzugswirkung auf die jeweils aktiven Strickbereiche begrenzt werden kann. Dazu wurden verschiedene konstruktive Modifikationen des Abzugs untersucht. In der Abb. 3.136 sind der serienmäßige Abzug und die vorgenommenen konstruktiven Änderungen dargestellt.



a b c

Abb. 3.136: Konstruktive Abzugsmodifkationen a) Ausgangssituation; b) einzeln steuerbare Segmente (breit); c) einzeln steuerbare Segmente (schmal)

Das serienmäßige Abzugssystem (Abb. 3.136 a) besteht aus zwei Wellen, auf denen in engen Grenzen gegeneinander verdrehbare Abzugswalzen angeordnet sind. Zusätzlich kann lokal der Anpressdruck der Abzugswalzen gegeneinander unterschiedlich eingestellt werden. Allerdings reichen diese Einstellmöglichkeiten nicht aus, um bei der Herstellung von MLG eine ausreichende lokal unterschiedliche Abzugswirkung über der Gestrickbreite und -länge zu erreichen.

In einem ersten Schritt wurde daher eine der Wellen mit Abzugswalzen entfernt und durch einzelne, ca. 12 cm breite Segmente (Abb. 3.136 b) ersetzt. Über Federdruck kann die Anpresskraft jedes Segments gegen die zweite Abzugswelle stufenlos eingestellt werden. Bei der Herstellung flächiger MLG kann dadurch ein für die Formgebung während des Strickens sehr positiver Effekt erzielt werden. Die Maschendichten in den Bereichen mit vielen und wenigen Maschenreihen sind im Vergleich zum serienmäßigen Abzugssystem deutlich homogener. Bei der Herstellung der ringförmigen MLG ist der durch die Abzugsegmente beeinflusste Bereich jedoch noch zu groß, so dass weiterhin noch Maschen zerstört werden können. In einem zweiten Schritt wurde deshalb die Breite der Segmente halbiert (Abb. 3.136 c). Dadurch kann gegenüber den breiteren Segmenten lokal eine stärkere Abzugswirkung erreicht werden. Allerdings ist die Breite des Gestricks, die durch ein einzelnes Abzugssegment beeinflusst wird, für die Herstellung von schmalen ringförmigen MLG immer noch zu groß. Auch durch eine weitere Reduzierung der Segmentbreite kann keine Verbesserung erreicht werden. Durch die Abzugswirkung werden insbesondere am Innenradius der ringförmigen MLG zwar deutlich weniger aber immer noch Maschen zerstört.

Das Ziel, mit einfachen konstruktionstechnischen Maßnahmen eine nur lokal wirksame Abzugskraft auf die Gestricke aufzubringen, kann somit für schmale ringförmigen MLG nicht erreicht werden. Die Hauptabzugswalzen der Strickmaschine sind aktuell ca. 20 cm von der Abschlagkante bzw. dem Strickbereich entfernt angeordnet. Nach Auswertung der Versuche steht fest, dass für das Erreichen einer lokal begrenzten Abzugskraft die einstellbaren Abzugssegmente deutlich in Richtung der Abschlagkante verschoben werden müssen. Aufgrund der sehr engen Platzverhältnisse im Bereich des Abzugs/Abschlagkante sind dafür allerdings sehr umfangreiche Um- bzw. Neukonstruktionen der Strickmaschine und des Abzugssystems sowie die Entwicklung, Auslegung und Umsetzung der entsprechenden Steuerungstechnik notwendig. Derartig umfangreiche Arbeiten waren zu Projektbeginn nicht als notwendig erkennbar und konnten daher im Rahmen des Projekts nicht durchgeführt werden.

Die weiteren Versuche konzentrierten sich daher auf die Realisierung der geforderten ringförmigen Geometrie unter Verwendung des gravimetrischen Abzugsprinzips. Aus den bisherigen Untersuchungen ist weiterhin bekannt, dass neben der Variation der Maschenlänge innerhalb der Strickreihe auch die Einstellung für die Fadenspannungen, insbesondere die Kettfadenspannungen, einen sehr großen Einfluss auf die erzielbare Geometrie hat. In umfangreichen Versuchsreihen wurden für die Maschineneinstellungen (Kuliertiefe, Abzug, Fadenspannung) geeignete Werte ermittelt. Im Ergebnis der durchgeführten Untersuchungen können Innendurchmesser bis minimal etwa 20 mm bei einer Gestrickbreite von 50 mm realisiert werden. Die

ringförmigen MLG weisen allerdings am Außendurchmesser gegenüber dem Innendurchmesser eine höhere Dicke und Schussfadendichte auf.

Die angegebene Gestrickbreite erlaubt eine weitgehend gleichmäßige Verteilung der Umkehrpunkte des Schussfadens über der Gestrickbreite beim Einbringen von Teilschüssen. Dadurch kann eine gehäufte Anordnung von Umkehrpunkten im Bereich derselben Nadel und somit eventuell daraus resultierenden strukturbedingten Inhomogenitäten vermieden werden. Diese Inhomogenitäten sind, wie erläutert, insbesondere bei der notwendigen Konsolidierung der MLG problematisch, da sich hier harzreiche Bereiche ausbilden, in denen keine Verstärkungsfasern angeordnet sind.

Im Ergebnis der Untersuchungen konnte anhand von zwei Varianten der ringförmigen MLG gezeigt werden, dass Verstärkungsstrukturen für Lasteinleitungsstellen für den geforderten Bereich des Innendurchmessers von 24 bis 50 mm realisiert werden können. Die Gestricke wurden im Rahmen der in Kapitel 3.4.4 beschriebenen Untersuchungen zur Herstellung von Patches für die Lochleibungsverstärkung eingesetzt. Für die Dickenprüfungen wurde das Dickenmessgerät K300B der Firma Hans Schmidt & Co. GmbH mit einem Prüfstempel von 20 mm Durchmesser und deiner Druckkraft von 2,5 N verwendet. In den textilphysikalischen Untersuchungen wurden für die beiden Varianten folgende Kennwerte ermittelt:

Tabelle 3.31: Ergebnisse der textilphysikalischen Untersuchungen an ringförmigen Gestricken

Kennwert		**Variante 1 (V1)**	**Variante 2 (V2)**
Durchmesser [mm]			
	Innen	50	24
	Außen	160	120
Maschendichten [Maschen/10cm]			
	Innen	28	20
	Außen	55	50
Gestrickdicke [mm]			
	am Innendurchmesser	1	2
	am Außendurchmesser	2	5
Gewicht [g/Schicht]		90	25

3.4.2 Textile Schläuche im Flachstrickverfahren

Autor: Wolfgang Trümper (ITM)

Zur Erhöhung der Steifigkeit und Festigkeit röhrenförmiger Holzbauteile sollten geeignete textile Strukturen und Verfahren zur Umsetzung entwickelt werden. Die textilen Strukturen werden auf der Oberfläche der Holzbauteile appliziert und mit duromeren Harzsystemen laminiert.(vgl. Kapitel 3.4.3) Ziel ist dabei eine Erhöhung der Biege- und Druckbelastbarkeit durch die Bereitstellung von flachgestrickten textilen Strukturen, die eine Verstärkungswirkung in Holzfaserlängsrichtung (radial) und/oder quer dazu (tangential) ermöglichen. Für eine optimale Ausnutzung des Verstärkungspotentials der eingesetzten Fadenmaterialien wird dabei insbesondere in tangentialer Richtung eine umlaufende, nicht unterbrochene Verstärkungsfadenanordnung angestrebt. Dazu müssen die textilen Strukturen entsprechend schlauchförmig ausgeführt sein. Die Flachstricktechnik zeichnet sich für die Realisierung derartiger Strukturen aus, da die Gestrickbreite und damit der Schlauchdurchmesser problemlos an verschiedene Anforderungen angepasst werden kann. Bei Gestricken als reine Maschenstruktur ohne zusätzliche Kett- und Schussfäden kann eine Durchmesseranpassung in großem Maße durch Strukturverzerrungen erfolgen. Bei

der Integration von gestreckten Verstärkungsfäden in die Maschenstruktur ist die Möglichkeit der Strukturverzerrungen deutlich reduziert, so dass eine sehr genaue stricktechnische Realisierung des jeweiligen Durchmessers erforderlich wird. Auch bei der Integration von Verstärkungsfäden in die Maschenstruktur bietet die Flachstricktechnik die Möglichkeit textile Strukturen formgerecht herzustellen und so z. B. weitgehend an eine Bauteilkontur anzupassen. Weiterhin können die Gestrickeigenschaften wie die Drapierbarkeit z. B. über die Einstellung der Maschenlänge auch lokal innerhalb eines Gestricks anforderungsgerecht verändert werden.

In einem ersten Schritt erfolgte die Entwicklung von flachgestrickten textilen Schläuchen mit in tangentialer Richtung umlaufenden Verstärkungsfäden. Ziel der Untersuchungen war dabei die Ermittlung geeigneter sticktechnischer Parameter zur Anpassung der Gestrickgeometrie an die Bauteilabmessungen und die Sicherstellung einer anforderungsgerechten Anordnung der Verstärkungsfäden im Bauteil nach Applikation und Konsolidierung. Die Applizierung und Konsolidierung der Gestricke auf den Oberflächen der Holzröhren wird in Kapitel 3.4.3.3 beschrieben. Die Abb. 3.137 zeigt ein schlauchförmiges Gestrick mit tangentialer Verstärkungsfadenanordnung appliziert auf ein als Röhre ausgeführtes Formholzprofil sowie im Detail die Gestrickstruktur.

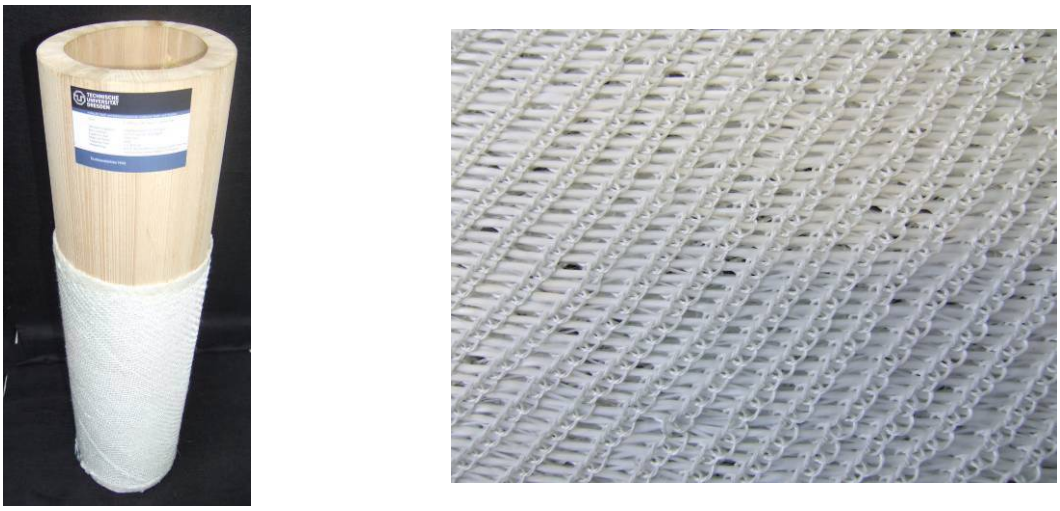


Abb. 3.137: Tangential verstärktes Schlauchgestrick

Für die Schlauchgestricke wurden die gleichen Fadenmaterialien verwendet, wie auch für die ringförmigen MLG (vgl. Kapitel 3.4.1). Die Herstellung der Gestricke selbst erforderte umfangreiche Untersuchungen zur Ermittlung geeigneter Maschineneinstellwerte wie Kuliertiefe, Abzug, Fadenspannungen und Maschinengeschwindigkeit. Die konkreten Einstellwerte sind dabei an die jeweils geforderten Eigenschaften der Gestricke, wie erforderliche Schussfadendichten oder Drapierbarkeit und das verwendete Fadenmaterial anzupassen.

Schlauchgestricke bestehen aus zwei an den Rändern miteinander verbundenen Flächen. Auf einer Flachstrickmaschine mit zwei Nadelbetten erfolgt die Herstellung indem eine Fläche des Schlauchs auf dem ersten Nadelbett und eine weiteren Fläche auf dem zweiten Nadelbett gefertigt wird. Durch die Verwendung desselben Maschenfadens für beide Flächen werden diese an den Rändern miteinander verbunden. Die Vorzugsvariante als flachstrickspezifisches Bindungsschema zur Realisierung derartiger Strukturen zeigt die Abb. 3.138:.

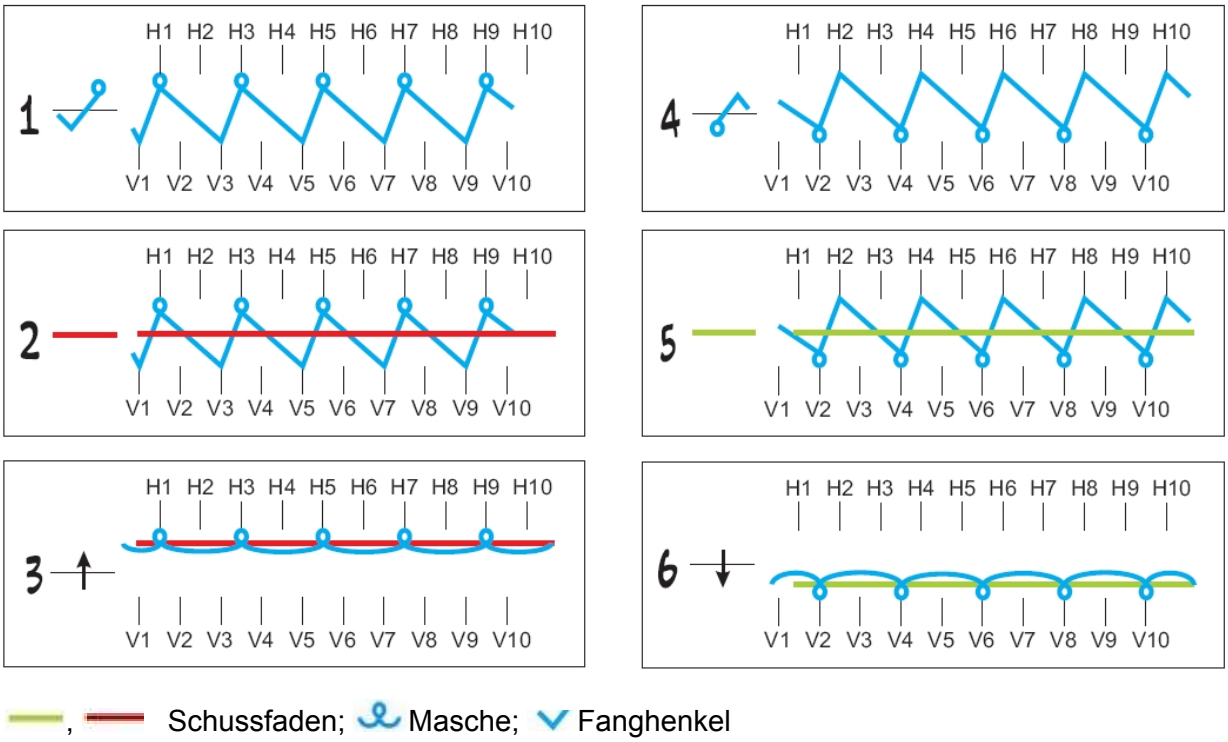


Abb. 3.138: Bindungsschema zur Herstellung tangential verstärkter Schlauchgestricke

Das dargestellte Bindungsschema als Vorzugsvariante erlaubt die regelmäßige Einbindung des Schussfadens in die Maschenstruktur bei geringstmöglichen freien Fadenstücken des Schussfadens zwischen den Einbindungsstellen. Das Einbringen von Schussfäden als tangentiale Verstärkung erfordert das Stricken einer Fläche des Schlauchgestricks z. B. nur auf jeder 2. Nadel des ersten Nadelbetts und das Einlegen eines Fanghenkels in die freien Nadeln des gegenüberliegenden Nadelbetts (Abb. 3.138 -1). In die so gebildete Netzreihe erfolgt die Einlage des Schussfadens (Abb. 3.138 -2). Durch Umhängen der Fanghenkel auf das erste Nadelbett wird der Schussfaden in der Maschenstruktur fixiert (Abb. 3.138 -3). Die Herstellung der zweiten Fläche erfolgt analog dazu (Abb. 3.138 4 - 6). Durch die Verwendung desselben Maschen- und Schussfadens für jede Fläche entsteht das Schlauchgestrick mit umlaufendem Schussfaden.

Die genaue Anpassung und Einstellung der Maschineneinstellwerte an die Struktur und das Fadenmaterial ist insbesondere für einen fehlerfreien Ablauf der notwendigen Umhängeprozesse bei der Gestrickherstellung wichtig. Die Verwendung von Maschenfäden aus Glas zur Realisierung materialhomogener Gestricke stellt dabei besonders hohe Ansprüche und erfordert darüber hinaus eine sehr schonende Verarbeitung des Fadenmaterials. Diese Fadenmaterialien sind aufgrund ihres in der Regel spröden Materialverhaltens empfindlich gegenüber Belastungen quer zur Fadenlängsachse. Im Ergebnis der Untersuchungen konnten Schlauchgestricke mit tangentialer Verstärkung realisiert und den Partnern für die weiteren Untersuchungen übergeben werden. Am ITM wurden in textiltechnischen Untersuchungen für diese Strukturen folgende Kennwerte ermittelt:

Tabelle 3.32: Ergebnisse der textilphysikalischen Untersuchungen an Schlauchgestricken

Kennwert		**Schlauchgestrick**
Durchmesser [mm]		2750
Maschendichten [Maschen/10cm]		
	Maschenstäbchenrichtung	14
	Maschenreihenrichtung	11
Schussfadendichte [SF/10cm]		50
Flächengewicht [g/m²]		1170

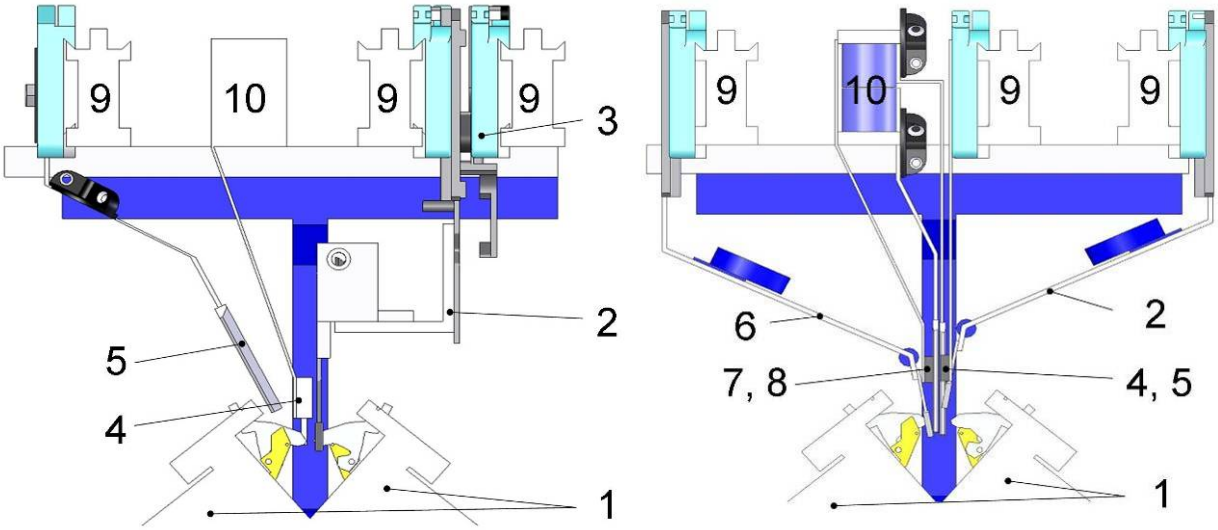
Der beschriebene Prozess zur Herstellung der Schlauchgestricke ist sehr zeitaufwendig. Zudem ist die Gefahr des Auftretens von Strickfehlern durch das Umhängen sehr hoch. Daher wurden in einem zweiten Schritt verfahrenstechnische Möglichkeiten untersucht, um die Produktivität zu erhöhen und gleichzeitig die Notwendigkeit des Umhängens von Fadenstücken zu minimieren. Gegenstand der Untersuchungen war auch die Ableitung notwendiger maschinentechnischer Anpassungen zur Integration radialer Verstärkungsfäden in die Schlauchgestricke.

Die Herstellung von Schlauchstrukturen mit ausschließlich tangentialer Verstärkung ohne Umhängeprozesse ist auf einer Flachstrickmaschine mit zwei Nadelbetten nicht möglich. Prinzipiell herstellbar sind solche Strukturen auf Strickmaschinen mit vier Nadelbetten, wie sie von der Fa. Shima Seiki, Japan erhältlich sind. Untersuchungen auf einer derartigen Maschine waren allerdings nicht Gegenstand des Projekts, zumal auch aktuell ein Zugriff auf eine derartige Maschine nicht gegeben ist.

Die Untersuchungen zur Realisierung ringförmiger MLG zeigen, dass auf einem Nadelbett flächige biaxial verstärkte Gestricke ohne Umhängen herstellbar sind. Darauf aufbauend war der Schwerpunkt der weiteren Untersuchungen die Verfahrensentwicklung zur Realisierung von Schlauchgestricken mit integrierten radialen und tangentialen Verstärkungsfäden. Aufgrund der notwendigen umfangreichen Untersuchungen und konstruktiven Entwicklungen wurden die Arbeiten in zwei aufeinander aufbauenden Etappen aufgeteilt:

1. Untersuchungen zur Verfahrensentwicklung und -umsetzung für die Realisierung von radial und tangential verstärkten Schlauchstrukturen ohne umlaufenden Schussfaden mit dem Ziel des prinzipiellen Nachweises der Realisierbarkeit derartiger Strukturen,
2. Untersuchungen zur Verfahrensentwicklung und -umsetzung für die Realisierung von radial und tangential verstärkten Schlauchstrukturen mit umlaufendem Schussfaden.

Eine wesentliche Voraussetzung zur Herstellung von radial und tangential verstärkten Schlauchstrukturen ist die Zuordnung von Kettfäden zu jeder der beiden Gestrickflächen. Weiterhin müssen die konstruktiven und steuerungstechnischen Voraussetzungen für die Schussfadeneinlage in beide Flächen geschaffen werden. Die Abb. 3.139 zeigt eine CAD-Darstellung der Fadenführeranordnung in der Ausgangssituation (links) sowie die maschinentechnischen notwendigen Änderungen zur Realisierung von Schlauchstrukturen der Etappe 1 (rechts).



1 Nadelbetten; 2, 6 Schussfadenführer; 3 Drückerteil; 4, 7 Kettfadenführung;
5, 8 Maschenfadenführer; 9 Fadenführerschienen serienmäßig;
10 Fadenführerschiene modifiziert

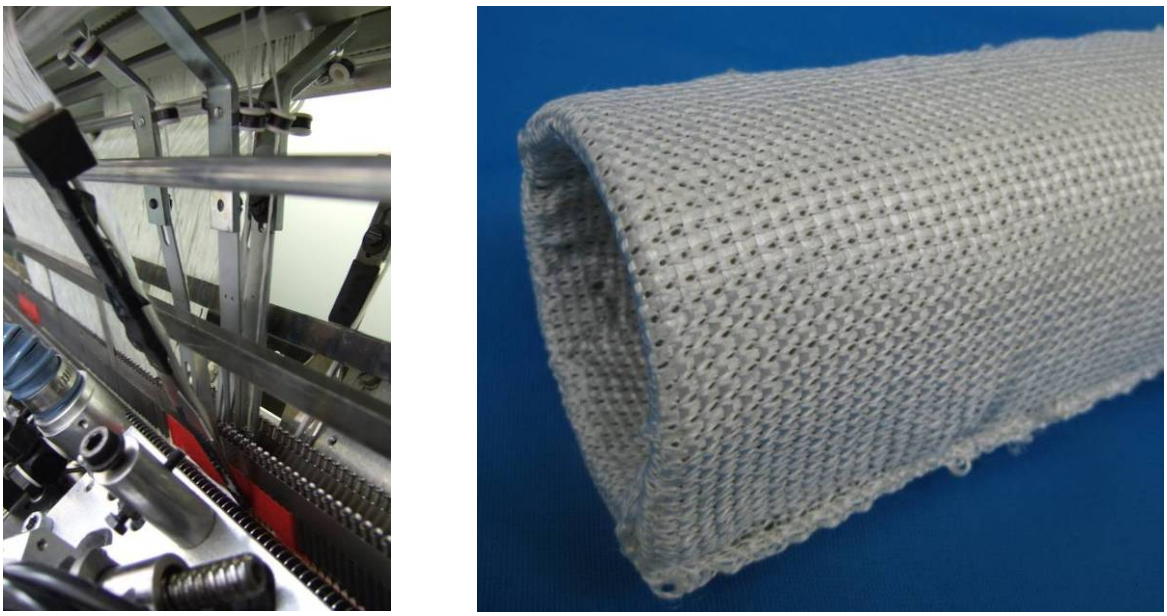
Abb. 3.139: Arbeitsstelle der Flachstrickmaschine a) Ausgangsituation zur Herstellung von MLG, b) modifiziert zur Herstellung von schlauchförmigen MLG

Die Arbeitsstelle (Abb. 3.139 a) der verwendeten Strickmaschine wurde für die Herstellung von biaxial verstärkten flächigen MLG mit einer Verstärkungsfadenanordung in 0°-Richtung (Kettfäden) und 90°-Richtung (Schussfäden) konzipiert. Der Schussfaden wird mit einem Schussfadenführer (2) eingelegt. Dieser ist federnd gelagert und wird über das Drückerteil (3) aktiviert bzw. deaktiviert (von der Ruhe- in die Strickposition und zurück gebracht). Dadurch kann der Schussfaden so abgelegt werden, dass kein Anstechen bei der Maschenbildung erfolgt und weiterhin eine Beschädigung des Fadenführers in der Ruheposition verhindert wird. Für den Schussfadeneintrag sind durch diese Art der Steuerung jeweils zwei gegenüberliegende Fadenführerschienen erforderlich, was die maximale Anzahl von Schussfadenführern begrenzt. Durch die Maschenbildung unmittelbar nach dem Schussfadeneintrag erfolgt die Fixierung der Anordnung von Schuss- und Kettfaden in der Maschenstruktur. Die Zuführung der Kettfäden erfolgt über die Kettfadenführung (4) von oben in den Strickbereich.

Der für die Herstellung der Schlauchstrukturen notwendige zweite Schussfadeneintrag (Abb. 3.139 - 6) erfordert die konstruktive Umgestaltung des Mechanismus zur Aktivierung / Deaktivierung des Schussfadenführers, da an der Maschine kein zweites Paar gegenüberliegender Fadenführerschienen vorhanden ist. Für die Aktivierung / Deaktivierung des Schussfadenführers wurden verschiedene Varianten analysiert, z. B. Schrittmotoren oder Zahnstangenantrieb. Aufgrund der beengten Platzverhältnisse und der Kosten für die Umsetzung der Varianten wurde im Ergebnis der konstruktiven Entwicklung die pneumatische Aktivierung des Schussfadenführers als Vorzugsvariante ausgewählt. Dabei wird ein Pneumatikzylinder im Strickschlitten angebracht, der bei der Auswahl des Schussfadenführers für den Strickprozess diesen nach unten in das Nadelbett drückt. Die Deaktivierung erfolgt nach Wegnahme der Druckkraft des Pneumatikzylinders durch Federkraft. Der Schussfadenführer musste dazu so modifiziert werden, dass eine ausreichend große Fläche für das Aufbringen der Druckkraft zur Verfügung steht. Die Fadenführergeometrie war an die konkret verwendete Fadenführerschiene anzupassen und konstruktiv so zu gestalten, dass ein Kontakt mit anderen Elementen im Maschenbildungsbereich vermieden wird.

Ein Schwerpunkt der konstruktiven Entwicklung war die Auslegung und Umsetzung der Kettfadenzuführungen. Abweichend von der bisherigen Maschinenkonfiguration werden für die Herstellung biaxial verstärkter Schlauchstrukturen zwei gegenüberliegende Kettfadenbarren zur Zuführung der radialen Verstärkungsfäden zum Maschenbildungsbereich benötigt. Die Kettfäden müssen dabei bis zur Fixierung durch die Maschenbildung vor Beschädigungen durch Nadeln oder Fadenführer geschützt werden. Die bisherigen Untersuchungen haben die sehr gute Eignung von Metallröhrchen gezeigt, durch die die Kettfäden geführt werden. Diese weisen eine für den Strickprozess ausreichende Robustheit auf. Die Röhrchen müssen den für die Verarbeitung von Verstärkungsfäden der Feinheit 1200 bis 2400 tex notwendigen Innendurchmesser im Bereich von 1,0 mm bis 1,5 mm aufweisen. Daraus resultiert ein entsprechender Außendurchmesser von 1,8 mm bis 2,2 mm. Der notwendige Platzbedarf für die Implementierung der Kettfadenröhrchen in den Maschenbildungsbereich erfordert die Erarbeitung neuer robuster Lösungen für die Gestaltung und Ausführung der Kettfadenzuführungen.

Nach Abschluss der ersten konstruktiven Entwicklungsphase der zur Fadenführung notwendigen Baugruppen entsprechend Abb. 3.139 b, erfolgte deren prototypische Umsetzung und Einbau auf einer Flachstrickmaschine (FSM) sowie anschließend die Erprobung der gesamten Maschinentechnik. Die Einbausituation der modifizierten Baugruppen im Maschenbildungsbereich an einer FSM zeigt die Abb. 3.140: a. Eine realisierte Schlauchstruktur mit tangentialer und radialer Verstärkung ist in der Abb. 3.140: b zu sehen.



a b

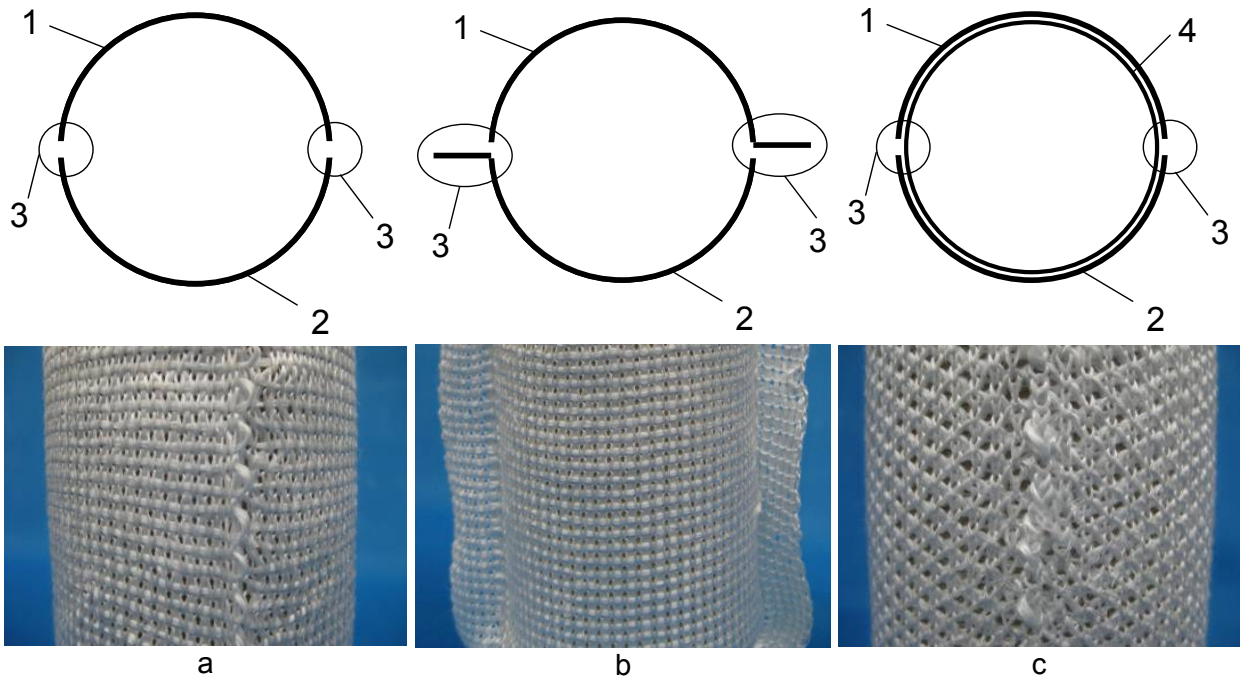
Abb. 3.140: a) Einbausituation an FSM nach Modifikation; Kettfadenbleche und Fadenführer für Maschen- und Schussfadensysteme; b) flachgestrickte Schlauchstruktur mit biaxialer Verstärkung

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass flachgestrickte Schlauchstrukturen mit gestreckt angeordneten Verstärkungsfäden in axialer und tangentialer Richtung realisiert werden können. Die Schlauchstrukturen bei der Fertigungsvariante der Etappe 1 bestehen dabei aus zwei Gestrickflächen mit jeweils biaxialer Verstärkung, wobei der Schussfaden auf der Außenseite und die Kettfäden auf der Innenseite der Schlauchstrukturen angeordnet sind. Die Verbindung der beiden Flächen an den Rändern erfolgt während der Gestrickherstellung durch die Maschenfadensysteme (Abb. 3.141 a).

Da somit die Verbindungsstellen der beiden biaxial verstärkten Flächen potentielle Schwachstellen in einem Verbund sein können, wurden verschiedene Möglichkeiten untersucht, diesen Bereich durch geeignete Maßnahmen zusätzlich zu verstärken:

- stricktechnische Ausbildung von Überlappungen an den Verbindungsstellen der beiden Gestrickflächen (Abb. 3.141 b),
- stricktechnische Einbindung von umlaufenden Verstärkungsfäden mit dem Bindungselement Fanghenkel (Abb. 3.141 c),
- Anordnung von zwei Schlauchgestricken übereinander,
- stricktechnische Verstärkungsfadenanordnung: Schussfaden innen, Kettfaden außen.

In der Abb. 3.141 ist jeweils schematisch die Anordnung der Schussfäden (1, 2) in den Strukturen und die Ausbildung der Verbindungsstellen (3) gezeigt. Die Verbindungsstelle nach dem in Abb. 3.141 c gezeigten Muster wird durch einen umlaufenden Verstärkungsfaden verstärkt, der als Henkel (4) eingebunden ist.



1 Schussfaden hintere Fläche; 2 Schussfaden vordere Fläche;
3 Verbindungsstelle; 4 umlaufender Faden als Henkel

Abb. 3.141: Verbindungsbereich zwischen den biaxialen Flächen a) nur Maschenfaden; b) überlappendes Gestrick; c) umlaufender Verstärkungsfaden als Fanghenkel eingebunden

Die Untersuchungen zeigten, dass das stricktechnische Ausbilden von biaxial verstärkten einflächigen Gestricken als Überlappungen über die Verbindungsstellen (3) der beiden Gestrickflächen (1,2) des Schlauchs möglich ist (Abb. 3.141 b). Die einflächigen Gestricke können dabei je nach Anforderung in verschiedene Breiten ausgeführt werden. Nachteil dieser Lösung ist eine lokale Aufdopplung der textilen Strukturen, die sich nach der Konsolidierung auf der Oberfläche abzeichnen kann. Weiterhin ist die Gefahr von Delaminationen gegeben, da die Verstärkungslagen nur übereinander abgelegt und nicht miteinander verbunden sind.

Die Integration des umlaufenden Verstärkungsfadens durch die teilweise Einbindung in die Struktur über das Bindungselement Fanghenkel (vgl. Abb. 3.141 c) ist stricktechnisch ebenfalls möglich. Der Verstärkungsfaden wird dabei auf der Innenseite der Schlauchgestricke angeordnet. Derartige Strukturen zeichnen sich durch eine hohe Strukturdehnung bei geringen Kräften

und damit eine sehr gute Drapierbarkeit aus. Dadurch sind das Aufziehen der Gestricke auf einen Kern bzw. die Formholzröhren und die Anpassung an den jeweiligen Durchmesser sehr einfach möglich. Nachteilig ist die durch die notwendige Einbindung in das Gestrick nicht gestreckte Anordnung des umlaufenden Verstärkungsfadens.

Prinzipiell denkbar ist die Realisierung von Schlauchgestricken mit einer Kombination aus gestreckt angeordneten Schussfäden in der Fläche und umlaufendem Verstärkungsfaden eingebunden über das Bindungselement Fanghenkel. Bei den stricktechnischen Versuchen zur Umsetzung derartiger Strukturen traten im Maschenbildungsbereich Materialanhäufungen auf. In der Folge wurden die Verstärkungsfäden von den Nadeln erfasst, vermascht und dabei geschädigt bzw. zerstört. Insgesamt ist somit festzustellen, dass die Herstellung derartiger Strukturen in einem Strickprozess nicht möglich ist.

Neben den stricktechnischen Anpassungen kann eine Verstärkung der Verbindungsstellen auch durch das übereinander Anordnen von zwei Schlauchgestricken erreicht werden. Durch diese Art der Anordnung ist die Gestrickdicke an allen Stellen gleich und lokale Flächenmasseunterschiede werden vermieden. Ein Nachteil besteht auch hier in der Gefahr von Delaminationen, da die beiden Schlauchgestricke nicht miteinander verbunden sind. Eine weitere Schwierigkeit resultiert aus dem Prozess des Anordnens der Gestricke auf den Formholzröhren, wenn die Gestricke nacheinander auf der Holzröhre appliziert werden. Während das erste Gestrick noch gut auf einen relativ glatten Kern aufgezogen werden kann, muss das zweite Gestrick auf die rauere Gestrickoberfläche des ersten Gestricks aufgezogen werden. Da die Gestricke weitgehend den Durchmesser des Kerns aufweisen müssen, ist dabei die Gefahr des Verschiebens von Verstärkungsfaden aus der gewünschten Anordnung sehr groß. Werden beiden Gestricke gemeinsam appliziert, kann die Ausrichtung der Verstärkungsfäden des innen angeordneten Gestricks nicht überprüft werden.

Neben den stricktechnischen Herausforderungen bei der Realisierung von Schlauchstrukturen hat sich weiterhin gezeigt, dass die zunächst favorisierte Lösung für die Gestaltung der Kettfadenbarren für den stricktechnischen Einsatz nicht ausreichend robust ist. Aufgrund der beengten Platzverhältnisse wird dabei eine Lösung verwendet, bei der die Kettfadenröhrchen an zwei Punkten mittels Laserschweißen an einer Metallschiene befestigt sind. Das erlaubt eine sehr kompakte Bauweise der Kettfadenschiene, allerdings kann während des Strickens der Kontakt zwischen Nadeln bzw. Fadenführern und Röhrchen nicht vollständig verhindert werden. Dadurch werden die Röhrchen zunächst verformt und in der Folge teilweise von der Metallschiene abgelöst. Deshalb sind in den weiteren konstruktiven Entwicklungsarbeiten neuer Lösungsansätze zur Befestigung der Kettfadenröhrchen zu erarbeiten.

Die durchgeführten Untersuchungen zeigten, dass im Rahmen der Entwicklungen der Etappe 1 Schlauchgestricke mit tangentialer und radialer Verstärkung prototypisch realisiert werden können. Diese Gestricke weisen keinen umlaufenden Schussfaden auf, so dass die Verbindungsbereiche zwischen den beiden Gestrickflächen potentielle Schwachstellen in einem Verbund sein können. Daher wurden verschiedene Möglichkeiten zur nachträglichen Verstärkung dieser Bereiche aufgezeigt und die Realisierbarkeit an entsprechenden Prototypen demonstriert.

Aufbauend auf den erzielten Ergebnissen wurde in der Etappe 2 im Rahmen des Projekts die Entwicklung von Schlauchstrukturen mit gestreckt angeordneten tangentialen und radialen Verstärkungsfäden angestrebt. Der tangentiale Verstärkungsfaden soll dabei umlaufend und nicht unterbrochen in die Struktur integriert werden. Für die Anordnung der Verstärkungsfäden in der Schlauchstruktur sind prinzipiell zwei Varianten denkbar. Bei der Variante 1 sind die tangentialen Verstärkungsfäden auf der Innenseite und die radialen Verstärkungsfäden auf der Außenseite der Schlauchstrukturen angeordnet. Die Fadenordnung der Variante 2 ist entsprechend umgekehrt dazu.

Für die Herstellung der Strukturen nach Variante 1 wird das gleiche Fertigungsprinzip wie auch für die Schlauchstrukturen mit lediglich tangentialen Verstärkungsfäden angewendet. Der Vorteil dieses Prinzips besteht in der Möglichkeit der Integration des umlaufenden Verstärkungsfadens ohne aufwendige Maschinen- oder Fadenführermodifikationen. Zur Realisierung der biaxialen

Verstärkung in den Schlauchstrukturen ist lediglich die Integration einer zweiten Kettfadenschiene notwendig. Das Fertigungsprinzip erfordert allerdings in jeder Strickreihe ein umfangreiches Umhängen von Maschen. Aufgrund der zusätzlichen Integration von tangentialen Verstärkungsfäden erfolgt dieses Umhängen durch zwei Lagen Kettfäden hindurch. Dabei unterliegen die Maschenfäden extrem hohen mechanischen Beanspruchungen. Frühere Untersuchungen haben ergeben, dass durch die Einstellung stricktechnischer Parameter z. B. für den Strickablauf, die Kuliertiefen, den Abzug, die Fadenspannungen oder die Strickgeschwindigkeit in den Umhängereihen die Beanspruchungen beeinflusst werden können. Ziel der Untersuchungen war die Ermittlung geeigneter Parameter zur Minimierung der an den Maschen auftretenden Beanspruchungen.

Prinzipbedingt erfordern die Umhängeprozesse, wie bereits beschrieben, bei der Herstellung von Schlauchstrukturen freie Nadeln auf dem jeweils gegenüberliegenden Nadelbett, auf die die Maschen umgehängt bzw. in die die Fanghenkel eingelegt werden können. Das hat zur Folge, dass die Verstärkungsfäden in radialer Richtung abweichend von der angestrebten Anordnung (Abb. 3.142 a) entweder nicht gleichmäßig über der Gestrickbreite aufgeteilt sind (Abb. 3.142 b) oder die Verstärkungsfadendichte reduziert werden muss (Abb. 3.142 c).

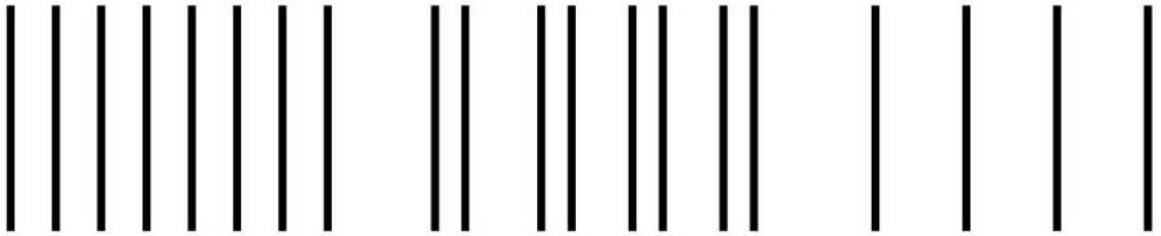


Abb. 3.142: Schematische Darstellung der Verstärkungsfadenanordnung in radialer Richtung a) angestrebt; b) prinzipbedingte ungleichmäßige Verteilung; c) prinzipbedingt reduzierte Fadendichte

Die Untersuchungen zeigten, dass das Auftreten von Maschenfadenbrüchen beim Umhängen durch eine größere Maschenlänge der umzuhängenden Maschen, eine Entlastung des Gestricks beim Umhängen durch Zurückdrehen des Abzugs und/oder die Anpassung der Fadenspannungen reduziert werden konnte. Im Ergebnis der Untersuchungen ist aber festzuhalten, dass für die verwendete modifizierte Strickmaschine kein geeigneter Parametersatz ermittelt werden konnte, der einen fehlerfreien Transfer der Maschen zwischen den Nadelbetten erlaubt. Da die Maschen aus einem Faden hergestellt werden und über der Gestricklänge miteinander verbunden sind, haben schon wenige zerstörte Maschen eine weitgehende Zerstörung der Maschenstruktur als Ganzes zur Folge. Eine Fixierung der Verstärkungsfadenanordnung ist dann nicht mehr gegeben. Dieses Fertigungsprinzip ist somit für die Realisierung von Schlauchstrukturen mit biaxialer Verstärkung nicht geeignet.

Bei den bisherigen Lösungen zur Herstellung von biaxialen Schlauchstrukturen ist entweder das Einbringen von umlaufenden Verstärkungsfäden nicht möglich oder das Fertigungsprinzip dafür ungeeignet. Die weiteren Arbeiten konzentrierten sich daher auf die Entwicklung eines Konzepts zur Realisierung von Schlauchstrukturen der Variante 2, bei der die umlaufenden tangentialen Verstärkungsfäden außen und die radialen innen angeordnet sind.

Der Grundgedanke ist dabei, den Schussfaden auf dem ersten Nadelbett in das Gestrick einzulegen und durch eine Maschenbildung in der Struktur zu fixieren. Anschließend erfolgt die Übergabe des Schussfadenführers zum anderen Nadelbett und analog die Fadeneinlage und Fixierung in der Maschenstruktur. Dazu wird an beiden Gestrickrändern jeweils eine Übergabeeinrichtung für den Schussfadenführer benötigt. Für den Übergabevorgang müssen allerdings ein geeignetes Konzept und darauf aufbauend die Übergabeeinrichtung konstruktiv entwickelt werden. Die Steuerung der Übergabeeinrichtung muss in die Gesamtmaschinensteuerung integriert

werden. Ein weiterer Schwerpunkt der erforderlichen Entwicklung besteht in der Auslegung der Schussfadenführung und -speicherung, so dass eine umlaufende, nicht unterbrochene Fadeneinlage gewährleistet ist. Dabei muss der Schussfadenspeicher entweder so positioniert werden, dass jederzeit eine Entnahme des Fadens ohne eine Einschnürung der Kettfäden möglich ist oder der Schussfadenspeicher muss analog zum Fadenführer mit übergeben werden. Die Komplexität der Aufgabenstellung wird durch die beengten Platzverhältnisse im Maschenbildungsbereich weiter deutlich erhöht.

In einem ersten Schritt sollen zunächst Schlauchstrukturen mit einem festen Durchmesser über der Gestricklänge realisiert werden. Dadurch erfolgt die Übergabe des Schussfadenführers an den Gestrickrändern in jeder Strickreihe jeweils an der gleichen Position. In der weiteren Entwicklung ist aber auch ein Verschieben der Übergabeposition von Strickreihe zu Strickreihe denkbar, so dass eine größere Vielfalt an 3D-Schlauchförmigen textilen Strukturen realisiert werden kann. Eine Auswahl solcher Strukturen ist schematisch in Abb. 3.143 dargestellt. Die wichtigsten Ideen zu möglichen Verfahren und Strukturen sind in auch in der Patentanmeldung DE102009026894.4 zusammengefasst.

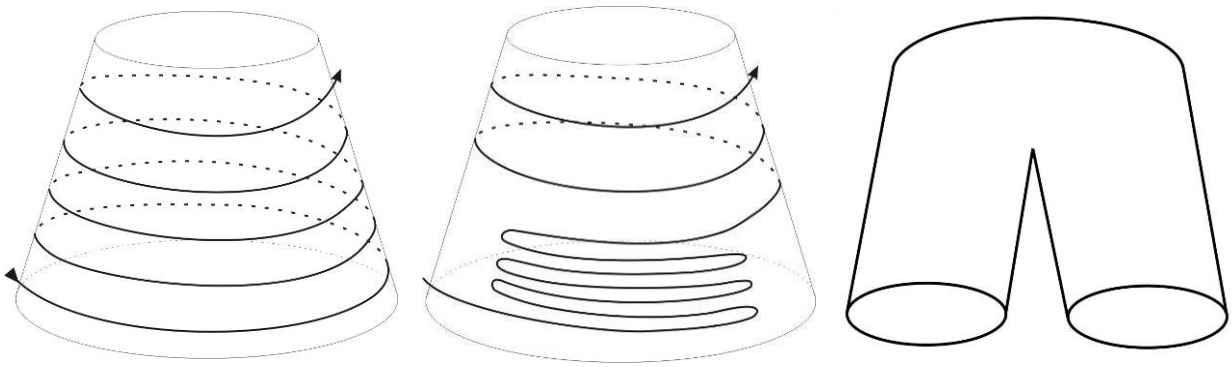


Abb. 3.143: Schematische Darstellung von 3D-Verstärkungsstrukturen mit umlaufendem Schussfaden

Die konstruktive Entwicklung des Verfahrens und der Übergabeeinrichtungen konnte aufgrund der hohen Komplexität und des zur Lösung der Aufgabenstellung erforderlichen Zeitaufwands nur teilweise im Rahmen des Projekts bearbeitet werden. Aktuell werden im Rahmen einer studentischen Arbeit verschiedene Übergabeprinzipien evaluiert und die praktische Umsetzbarkeit an der am ITM vorhanden Maschinentechnik untersucht.

3.4.3 Textile Verstärkung von Formholzprofilen

Autor: Mike Thieme (ILK)

Durch die Formholztechnologie sind bei der Tragwerksdimensionierung ganz neue Gestaltungsvarianten und Funktionalitäten möglich. Insbesondere die Formholzröhren bieten ein großes Einsatzpotential für einen nachhaltigen Baustoffeinsatz bei maximaler Tragfähigkeitsausnutzung. Durch die freie Querschnittsgestaltung wie etwa einer Hohlstütze, sind ein effektiver Materialeinsatz und ein hohes Leichtbaupotenzial möglich. Dabei wird die für Holzbaustoffe charakteristische Orthotropie der Materialeigenschaften zur belastungsgerechten Tragwerksdimensionierung gezielt genutzt, wodurch hohe Kräfte in Tragwerkslängsrichtung derartiger unverstärkter Formholzprofile aufgenommen werden können. In Umfangsrichtung weist der Querschnitt hingegen ein eher schwächeres Eigenschaftsprofil auf. Bedingt durch die Orthotropie des Holzbaustoffes und die Lage der Stoßfugen beim Herstellungsprozess können im Vergleich zur Rohrlängsrichtung nur geringe Kräfte aufgenommen werden. Die auftretenden Querzugkräfte bzw. Schubkräfte verhindern somit eine darüber hinaus gehende Ausnutzung des Tragfähigkeitspotentials unverstärkter Formholzprofile. Zur weiteren Erschließung des Leichtbaupotentials derartiger Formholzanwendungen sollen innerhalb dieses Projektes die Möglichkeiten zum Ausgleich der geringen Querzug- und Schubkennwerte durch eine entsprechende textile Verstärkung un-

tersucht werden. Dazu wurden durch das ILK verschiedene praxisgerechte Verstärkungstechnologien am Beispiel der Formholzröhren untersucht sowie deren technologisches Potential analysiert.

Zur textilen Verstärkung derartiger Formholzprofile wurden beispielhaft für die Formholzröhren drei Technologievarianten (Wickeltechnik, Flechttechnik sowie vorkonfektionierte Schlauchgestricke) untersucht und umgesetzt. Die mit diesen unterschiedlichen textilen Strukturen verstärkten Tragstrukturen wurden dann weiterführend am ISH experimentell untersucht und bewertet.

Zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit der experimentellen Ergebnisse für die einzelnen Technologievarianten wurden in Absprache mit dem ISH allgemeine Richtwerte definiert, welche in den jeweiligen Verstärkungsverfahren angestrebt werden sollten. Die textile Verstärkung sollte hierbei vor allem zur Sicherung der Längsfugen und der Verbesserung der Eigenschaften in Umfangsrichtung eingesetzt werden, was einer idealen Fadenorientierung in Umfangsrichtung (d.h. 90° gegenüber der Röhrenlängsrichtung) entsprechen würde. Bedingt durch die technologisch notwendige kontinuierliche Verstärkungsfadenführung über die gesamte Längsachse der Formholzröhre ist eine entsprechende kraftflussgerechte Ausrichtung der textilen Verstärkung allerdings technologisch nicht erreichbar, sodass eine real erreichbare Zielvorgabe der Faserablage für die Röhrenverstärkung von +/-85° definiert wurde. Als Verstärkungsgrad wurde für alle Technologievarianten ein Flächengewicht von insgesamt ca. 800 g/m² (dies entspricht jeweils 400 g/m² in +85° bzw. -85°-Richtung) als Zielvorgabe definiert. Bedingt durch die Technologieparameter der Flecht- bzw. Wickelmaschine und auch der Strickmaschine am ITM kann es dabei zu geringen Abweichungen kommen. Bei allen Verstärkungsvarianten wurden Glasfasern mit Feinheiten von 1.200 tex und das Epoxidharz L1100 mit dem Härter EPH 295 verwendet.

Die drei untersuchten Varianten zeigten dabei grundsätzlich eine gute technologische Beherrschbarkeit und bieten ein prinzipielles Potential für eine industrielle Umsetzung aller Technologievarianten. Darüber hinaus wurden die eingesetzten Produktmengen, die Technologieabläufe, der aufgewendete Energieeinsatz und die mögliche Gefahrengutspezifizierungen der Materialien als Grundlage für die entscheidungsorientierte Umweltleistungsbewertung dokumentiert und der BU übermittelt.

3.4.3.1 Herstellung der textilen Verstärkung im Wickelverfahren

Das Umfangswickelverfahren wurde an der ILK-eigenen 5-Achsen-Wickelmachine realisiert. Die prinzipielle Funktionsweise ist in Abb. 3.144 dargestellt.

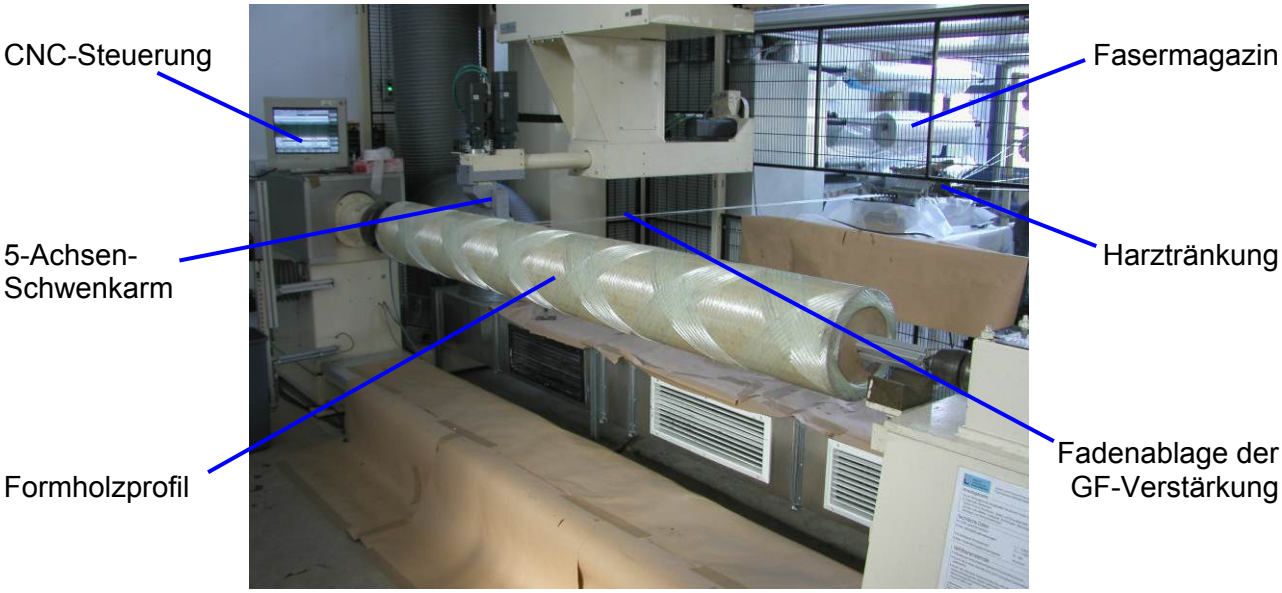


Abb. 3.144: Aufbau und Funktionsweise ILK-5-Achsen-Wickelmaschine

Vorteil dieses Verfahren ist seine einfache technologische Handhabung, da das Aufbringen der textilen Verstärkung und die Harzimprägnierung gleichzeitig innerhalb eines Arbeitsschrittes erfolgen. Beim sogenannten Nassverfahren läuft die aufzubringende Glasfaser durch ein Harzbad und wird harzgetränkt „nass“ auf das Holzrohr gewickelt. Durch die Steuerung der Fadenkraft mittels eines Fadenspannsystems kann der notwendige Anpressdruck in Abhängigkeit von der Wickelgeschwindigkeit derart eingestellt werden, dass eine gute Harzimprägnierung in das textile Flächengebilde schon innerhalb des Wickelvorgangs sichergestellt werden kann und kaum überschüssige Harzmengen entstehen. Eine nachträgliche Imprägnierung ist hierbei somit nicht notwendig.

Aus technologischer Sicht konnte bei diesem Verfahren ein maximaler Winkel der Verstärkungsfasern von ca. 87° realisiert werden. Durch den Einsatz zusätzlicher Hilfsvorrichtungen (wie etwa spezielle Zahnkränze an den Stirnseiten der Röhre) sind prinzipiell auch sehr geringe Verstärkungswinkel von fast 0° (also eine reine Längsverstärkung) möglich. Die maximale Röhrenlänge bzw. der maximale Durchmesser ist dabei im Allgemeinen durch die Abmessungen der jeweiligen Maschine definiert (ILK-Wickelmaschine: max. Wickelkernlänge von 2.800 mm und max. Wickelkerndurchmesser von 1.300 mm).

Die Fadenablage für die vordefinierte Flächenmasse und Orientierung der textilen Verstärkungsschicht wurde über CADWIND HighEnd berechnet und durch die CNC-Steuerung umgesetzt. Die detaillierten Maschinensteuerungsparameter (z.B. Drehgeschwindigkeit oder Fadenspannkraft) wurden in Vorstudien an Trockenwickeltests (siehe Abb. 3.145) mit den Vorgaben (wie etwa Wickelwinkel bzw. Flächenmasse) verglichen und gegebenenfalls angepasst.

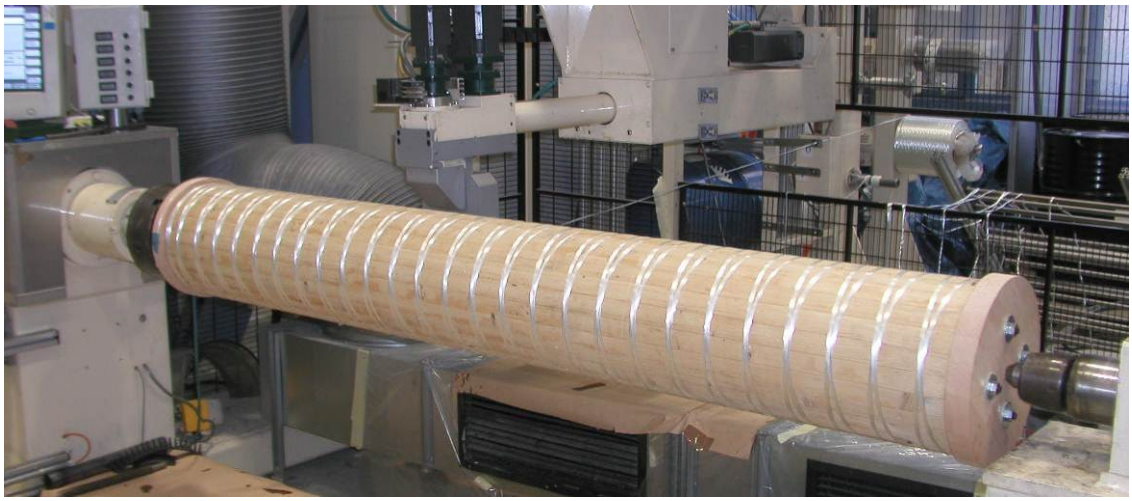


Abb. 3.145: Vorstudien zur Umsetzung des Wickelverbundsystems und der Fadenablage

Bedingt durch die offenporige Oberfläche des Holzwerkstoffes besteht die Möglichkeit, dass das Harz aus den getränkten Faserbündeln in die Holzoberfläche eingesaugt wird und somit die Verstärkungsfäden nicht optimal getränkt appliziert werden können. Zur Sicherstellung eines notwendigen Imprägnierungsgrades der Faserlagen und der daraus resultierenden Gewährleistung eines guten Verbundes der textilen Verstärkung mit dem Holzwerkstoff wurde eine dünne Harz-Grundschicht händisch auf die unbehandelte Holzoberfläche aufgetragen (Abb. 3.146).



Abb. 3.146: Aufbringen und Aushärten der Matrix-Grundierung aus Epoxidharz

Durch die weitestgehend starke Automatisierung des gesamten Wickelprozesses ist eine definierte und reproduzierbare Fertigung der Wickelverstärkung möglich. Durch die computergestützte Steuerung der Wickelanlage auf Basis der CAD-Berechnung und der Vorstudie wird sowohl die Fadenablage als auch der Harzanteil definiert eingestellt und sichert somit eine hohe Fertigungsgenauigkeit.

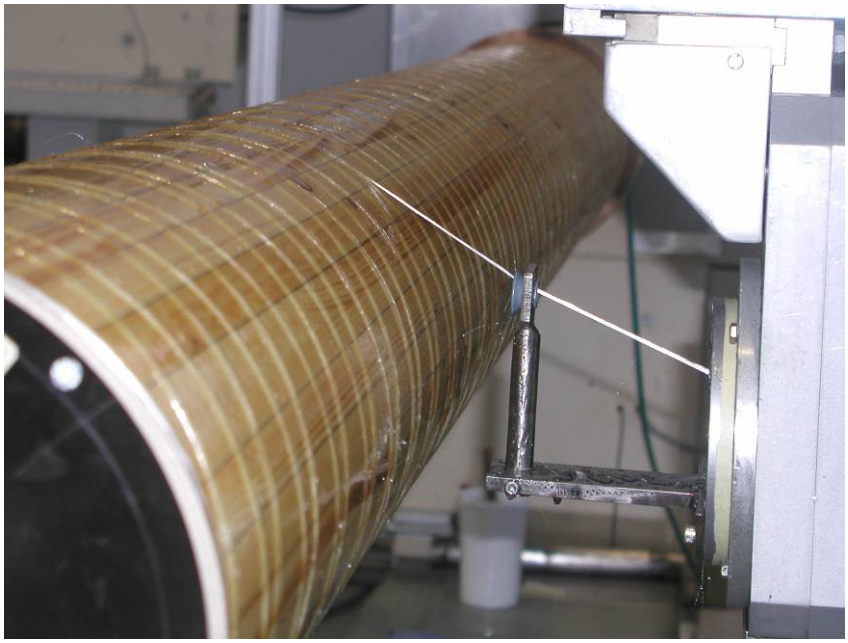


Abb. 3.147: Herstellung der Wickelverbünde auf der ILK-5-Achsen-Wickelmaschine

Zum Vergleich der Verstärkungsverfahren und zur weiterführenden Berechnung der theoretischen Materialparameter der textilverstärkten Röhren wurden die folgenden Ausgangsmaterialparameter und Geometriekennwerte für die unverstärkte Formholzröhre entsprechend Abschnitt 3.5.2.1.2 angesetzt:

E_0 =	15.600 N/mm²	H =	2.500 mm
E_{90} =	770 N/mm²	D_i =	239 mm
G =	840 N/mm²	D_a =	275 mm

Für die vordefinierte Quasi-Umfangswicklung von +/-85° und der Zielvorgabe von 400 g/m² ergibt sich aus der Röhrengeometrie und der Maschinenparameter eine Flächenmasse von

409,37 g/m² je Verstärkungsrichtung, was einem Faser-Volumen-Gehalt von ca. 39,67% der Verstärkungsschicht entspricht. Für die wickelverstärkten Formholzrohre lassen sich aus den Geometrie- und Materialparametern mithilfe der Mischungsregel für Mehrschichtverbunde die folgenden theoretischen mechanischen Grundkennwerte berechnen:

$E_0 =$ 15.370 N/mm²

$E_{90} =$ 3.000 N/mm²

$G =$ 1.030 N/mm²

Zur Erfassung der prinzipiellen Prozesskette für eine spätere aussagefähige Ökobilanz wurden in Absprache mit der BU der Prozessablauf sowie der Material- und Maschineneinsatz am Beispiel einer 2,5 m langen Formholzröhre erfasst. Eine entsprechende Übersicht dazu ist in Tabelle 3.33 zusammengestellt.

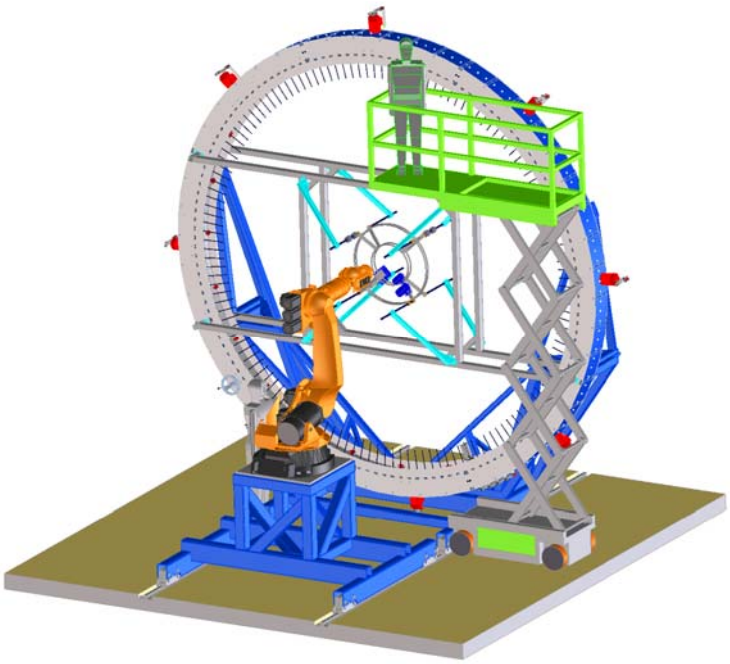
Tabelle 3.33: Prozessdaten für Wickelverfahren

Prozess	**Prozessbeschreibung**	**Material-einsatz***	**Maschinen-laufzeit***	**Maschine**
1. Vorbereitung der Holzröhren	Abdrehen der Holzoberfläche zur Sicherstellung eines rotationssymmetrischen Röhrenquerschnitts mit gut weiterverarbeitbarer Oberfläche			Hess-Drehmaschine
2. Aufbringen einer Matrix-Grundschicht	Zur Verbesserung der Faserhaftung und für eine gleichmäßige Matrixbeschichtung auf der Holzoberfläche wird händisch ein dünner Harzfilm auf die rotierende Röhre aufgebracht	550 g Harz	1,5 Stunde	ILK-Wickelmaschine
3. Aushärten der Grundschicht	Für eine gleichmäßige Matrixschicht muss das Harz auf der rotierenden Wickelmaschine aushärten		12 Stunden	ILK-Wickelmaschine
4. „Nass“-Wickeln	Die Glasfasern werden im Harzbad mit Harz getränkt und dann nass entsprechend der Verstärkungswirkung und Ausrichtung auf die Holzröhre gewickelt	1.800 g Glasfaser 1.050 g Epoxidharz	3,5 Stunden	ILK-Wickelmaschine
5. Aushärten der Verbundschicht	Der Glasfaser-Epoxidharz-Verbund muss auf der rotierenden Wickelmaschine aushärten.		12 Stunden	ILK-Wickelmaschine

* bezogen auf ein 2,5m Formholzrohr

3.4.3.2 Herstellung der textilen Verstärkung im Flechtverfahren

Als weiteres technologisches Verfahren zur textilen Verstärkung der Formholzprofile wurde die Flechttechnik untersucht. Die Formholzröhren wurden für dieses Projekt auf der ILK-Flechtmaschine textil verstärkt. Der Flechtwinkel der Faserorientierung und die resultierende Flächenmasse werden dabei durch das Verhältnis von Flecht- und Vorschubgeschwindigkeit sowie die Anzahl der verwendeten Verstärkungsfäden gesteuert. Die allgemeinen Maschinenspezifikationen sowie die prinzipielle Funktionsweise ist in Abb. 3.148 dargestellt.



ILK RF1/288-100 Radialflechter

- 288 Klöppel
- 144 Stehfäden
- 100 mm Stichmaß der Flügelräder
- 6,6 m Gesamthöhe
- 4,2 m maximaler Kerndurchmesser
- 50-200 U/min Drehzahl der Flügelräder
- 265 cm³ (55 x 130mm) Flechtspulen

Abb. 3.148: Aufbau und Funktionsweise ILK-Flechtmaschine

Analog zum Wickelverfahren wurden die relevanten Maschinensteuerungsparameter (z.B. Vorschubgeschwindigkeit und Spulenanzahl) in einzelnen Vorstudien mit den Zielvorgaben verglichen und teilweise angepasst. Des Weiteren wurde zur guten Faser-Harz-Tränkung die Oberfläche der zu umflechtenden Röhren wie beim Wickelverfahren mit einer dünnen Harz-Grundierung versehen.



Abb. 3.149: Herstellung der textilen Verstärkung mit dem ILK-Flechtrad

Zum Aufbringen der GF-Verstärkungsfäden wird das unverstärkte Rohr durch die rotierenden Flechtklöppel geschoben. Die Länge des Flechtkerns ist hierbei lediglich durch die maximale Auslegung des Roboters begrenzt, der das Rohr durch das Flechtrad fährt. Prinzipiell wären aber bei diesem Verfahren auch größere Längen möglich. Dazu kann z.B. auch das rotierende Flechtrad über einen feststehenden Flechtkern verfahren werden. Durch eine entsprechende Produktionsstraße in einer ausreichend großen Halle wäre sogar eine Online-Verstärkung von Formholzröhren (Endlosfertigung) denkbar. Der Durchmesser der umflochtenen Struktur ist dabei lediglich durch die Größe des Flechtrades begrenzt. Entsprechend Abb. 3.148 sind am ILK-Flechtrad maximale Kerndurchmesser von 4.200 mm möglich.

Das Erreichen des gewünschten Flächengewichtes und des Flechtwinkels wird zum einen durch die Anzahl der verwendeten Klöppel und zum anderen durch die computergesteuerte Regulierung der Vorschubgeschwindigkeit des Flechtkerns realisiert. Durch technologische Restriktionen analog zum Wickelverfahren ist auch bei der Flechttechnik maximal ein Faserwinkel von ca. 87° zu erreichen. Dahingegen ist die Fixierung der Fadenablage durch das „Trockenflechten" nicht so einfach wie beim Wickeln umsetzbar, sodass nur mit großen technologischem Aufwand Flechtwinkel von unter 20° erreichbar sind. Durch die computergestützte Steuerung des Roboterarms sind aber in der Flechttechnik auch textile Verstärkungen unsymmetrischer bzw. dreidimensionaler Strukturen möglich.

Im Gegensatz zum zuvor beschriebenen Wickelverfahren ist die Faserablage und Fasertränkung beim Flechtverfahren technologisch nicht innerhalb eines Arbeitsschrittes möglich. Die trocken aufgebrachte textile Verstärkung muss somit noch mit Harz imprägniert und rotierend ausgehärtet werden, wobei aufgrund des Einpressens des Harzes mittels Abreißgewebe eine größere Harzmenge (siehe Tabelle 3.34) verbraucht wird.

Die Faserlage der noch nicht harzimprägnierten Flechtverstärkung auf der Holzröhre ist in Abb. 3.150 der Verstärkungslage mit den Rundstrickschläuchen gegenübergestellt.

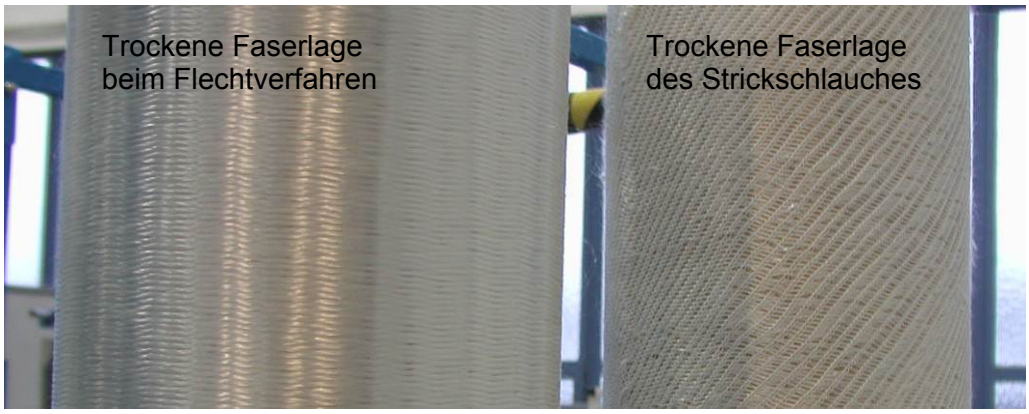


Abb. 3.150: Trockene Verstärkungslage beim Flechtverfahren bzw. Rundstrickschlauch

Für die aus den Anforderungen vordefinierte Faserorientierung von +/ -85° ergibt sich für das Flechtverfahren aus den Geometrie- und Technologieparametern eine theoretische Flächenmasse von 375,65 g/m² je Verstärkungsrichtung, was einem Faser-Volumen-Gehalt von 36,4% entspricht. Wie zuvor bereits erwähnt, wird die Einstellung der Flächenmasse über die Anzahl der verwendeten Klöppel realisiert. Beim Flechtprozess muss eine gleichmäßige Verteilung der Fadenzahl über dem Flechtrad gesichert sein, sodass die Flächenmassen der unterschiedlichen Verstärkungsvarianten variieren. Für eine rechnerische Auslegung der textil verstärkten Formholzröhre können somit die folgenden theoretischen Materialparameter für die textile Verstärkung angenommen werden:

$E_0 =$ 15.300 N/mm²

$E_{90} =$ 2.830 N/mm²

$G =$ 1.010 N/mm²

Zur Erfassung der Prozesskette wurde auch für das Flechtverfahren der prinzipielle Prozessablauf sowie Material- und Maschineneinsatz erfasst und ist in Tabelle 3.34 zusammengestellt.

Tabelle 3.34: Prozessdaten für Flechtverfahren

Prozess	Prozessbeschreibung	Material-einsatz*	Maschinen-laufzeit*	Maschine
1. bis 3.	Da die vorgelagerten Prozessschritte 1 bis 3 für alle Verstärkungsverfahren gleich sind, wird hier darauf nicht weiter eingegangen (siehe dazu Tabelle 3.33).			
4. Trocken-Flechten	Die Glasfasern werden trocken entsprechend der Verstärkungswirkung und Ausrichtung auf die Holzröhre geflochten.	1.650 g Glasfaser	3 Stunden	ILK-Flechtmaschine
5. Harzimprägnierung	Das Matrixharz wird auf die geflochtene Holzröhre aufgebracht. Anschließend wird Abreißgewebe mit leichtem Anpressdruck händisch auf die Struktur aufgewickelt und das Harz in die Fasern gepresst. Überschüssiges Harz wird durch das Abreißgewebe aufgesaugt.	1.350 g Epoxid-Harz	2,5 Stunden	ILK-Wickelmaschine
6. Aushärten der Verbundschicht	Der Glasfaser-Epoxydharz-Verbund muss zur Sicherstellung einer gleichmäßigen Oberfläche rotierend aushärten.		12 Stunden	ILK-Wickelmaschine

* bezogen auf ein 2,5m Formholzrohr

3.4.3.3 Herstellung der textilen Verstärkung mit vorkonfektionierten Schlauchgestricken

Als dritte Verstärkungsvariante sollte eine einfach handhabbare Technologie mit vorkonfektionierten Verstärkungsschläuchen untersucht werden. Dazu wurden am ITM an die Geometrie der Formholzrohre angepasste Schlauchgestricke mit tangentialer Verstärkung auf der Flachstrickmaschine gefertigt (siehe Abschnitt 3.4.2) und am ILK vergleichbar zum Wickel- bzw. Flechtverfahren auf die Formrohre appliziert. Analog zu den anderen Verstärkungsverfahren wurden die Prozessparameter der Schlauchgestricke, wie etwa die Drapiereigenschaften (Abb. 3.151), in Voruntersuchungen getestet und angepasst.



Abb. 3.151: Vorversuche mit vorkonfektionierten ITM-Gestrickschläuchen

Um Faserschädigungen beim Drapieren der Schlauchgestricke zu vermeiden, wurde eine Trennfolie als Gleithilfe temporär über die Röhrenoberfläche gezogen. Nach dem Aufziehen des Textilschlauches lässt sich die Faserausrichtung entsprechend der vordefinierten Vorgaben leicht anpassen. Anschließend kann die Trennfolie entfernt und die Schlauchgestricke an den Stirnflächen (z.B. mit Klebeband) fixiert werden.

Die Anwendung dieses Verfahrens ist somit auch ohne den Einsatz von kostenintensiven Großmaschinen möglich und könnte theoretisch auch direkt vor Ort angewendet werden. Durch die Vielfältigkeit der heutigen textiltechnischen Möglichkeiten einer derartigen Rundstricktechnologie ist ein hohes Potential an Variabilität und Effektivität möglich.

Analog zur Flechttechnik ist auch hierbei eine gleichzeitige Aufbringung der Verstärkungsschicht und die Harzimprägnierung innerhalb eines Arbeitsschrittes nicht möglich. Die trocken verstärkte Röhre muss somit, wie etwa in Abbildung Abb. 3.152 dargestellt, nachträglich imprägniert werden.



Abb. 3.152: Nachträgliche Harzimprägnierung auf der Wickelmaschine

Auch für das Strickschlauchverfahren wurde in Zusammenarbeit mit der BU der Prozessablauf sowie Material- und Maschineneinsatz erfasst. Eine entsprechende Übersicht dazu ist in Tabelle 3.35 zusammengestellt.

Tabelle 3.35: Prozessdaten für Strickschlauchverfahren

Prozess	Prozessbeschreibung	Material-einsatz*	Maschinen-laufzeit*	Maschine
1. bis 3.	Da die vorgelagerten Prozessschritte 1 bis 3 für alle Verstärkungsverfahren gleich sind, wird hier darauf nicht weiter eingegangen (siehe dazu Tabelle 3.33).			
4. Aufziehen der Gestrickschläuche	Die vorkonfektionierten Gestrick-schläuche werden auf die Form-holzröhren aufgezogen und die Lagesicherung der textilen Schicht punktuell fixiert.	vorkonfektio-nierter Glasfaser-gestrick-schlauch **	1 Stunde	
5. Harzimprägnie-rung	Das Matrixharz wird auf die ge-flochtene Holzröhre aufgebracht. Anschließend wird Abreißgewebe mit definiertem Anpressdruck auf die Struktur aufgewickelt und das Harz in die Fasern gepresst. Über-schüssiges Harz wird durch das Abreißgewebe aufgesaugt.	1.200 g Epoxid-Harz	2,5 Stunden	ILK-Wickelmaschine
6. Aushärten der Verbundschicht	Der Glasfaser-Epoxidharz-Verbund muss zur Sicherstellung einer gleichmäßigen Oberfläche rotie-rend aushärten.		12 Stunden	ILK-Wickelmaschine

* bezogen auf ein 2,5m Formholzrohr

** Mengenangaben ergeben sich aus den realisierten Flächenmassen entsprechend der Angaben des Gestrick-schlauchherstellers und wurden nicht separat ermittelt (für eine erste Abschätzung der Ökobilanzierung wurde ein Einsatz von 1.750 g Glasfaser angenommen, für die zur Anwendung kommenden Schlauchgestricke ergaben sich später 2527g inkl. Verstärkungs- und Maschenfäden)

3.4.3.4 Technologische Bewertung der Verstärkungsvarianten

Der Vergleich der unterschiedlichen Verstärkungstechnologien der Formholzröhren zeigt deutlich, dass alle drei Varianten praxisnah eingesetzt werden können. Es wurde für alle Varianten eine gute Übereinstimmung mit den vordefinierten Zielanforderungen (z.B. Flächenmasse, Faserorientierung) an die Verstärkungsschicht sowie eine vergleichbare Qualität in der Ausführung erreicht. Die leicht variierenden Flächenmassen ergeben sich dabei aus den technologischen Besonderheiten der einzelnen Maschinen. Durch eine ähnliche Lichtbrechungscharakteristik des Harzes und der Glasfaser ist für alle Verfahren die charakteristische und optisch ansprechende Holzoptik weiterhin noch sichtbar.

Das Wickelverfahren weist vor allem den Vorteil auf, dass der gesamte Prozess auf einer einzigen Maschine erfolgen kann. Des Weiteren laufen die Prozessschritte für das Aufbringen der textilen Verstärkung und für die Harzimprägnierung innerhalb eines Arbeitsschrittes ab. Es ist somit eine einfache und überschaubare Prozessgestaltung mit einem großen Potential für eine effektive Herstellung einzelner Formholzverstärkungen.
Des Weiteren kann durch die Verwendung „nasser“ harzgetränkter Fasern im Wickelprozess eine gute Imprägnierung des textilen Flächengebildes durch die Steuerung der Fadenspannung ohne zusätzlichen Technologieeinsatz sichergestellt werden und es entstehen keine überschüssigen Harzmengen.

Das Flechtverfahren weist insbesondere bei der Herstellung großer Stückzahlen an textil verstärkten Formholzrohren viele Vorteile auf. Abhängig vom vordefinierten Verstärkungsgrad werden alle Glasfaserfäden gleichzeitig auf die Röhre aufgebracht, sodass eine schnelle, praxisnahe und automatisierte Prozessführung möglich ist. Ein weiterer Vorteil des Flechtverfahrens ist, dass die Länge der Holzröhre nicht durch die Maschine begrenzt wird. Es ist somit theoretisch eine Online-Verstärkung möglich. Durch die Komplexität der Flechtmaschine ist es allerdings nicht möglich den Prozessschritt der Harzimprägnierung innerhalb des Flechtprozesses zu realisieren. Es ist somit ein weiterer Arbeitsschritt an einer weiteren Maschine notwendig. Das Harz

muss dazu nachträglich in das trockene textile Flächengebilde gepresst und das überschüssige Harz muss abgezogen und entsorgt werden.

Der Vorteil des Gestrickschlauch-Verfahrens ist der geringe Einsatz an komplexen und teuren Maschinen. Die entsprechend den definierten Vorgaben vorkonfektionierten Schläuche lassen sich auch unter praxisnahen Bedingungen einfach und in kurzen Zeiten händisch auf die Formholzröhren aufbringen. Damit lässt sich bei Sicherstellung einer gleichbleibend guten Qualität der Verstärkung durch die maschinelle Vorfertigung der Schläuche ein komplexer Technologieschritt in der Prozesskette einsparen. Durch den Einsatz vorkonfektionierter Schlauchgestricke ist eine hohe Flexibilität und Individualität bei der Gestaltung der textilen Verstärkung möglich. Allerdings ist analog zur Flechttechnik ebenfalls eine nachträgliche Imprägnierung notwendig, wobei insbesondere die Lagesicherung der Fadenausrichtung durch eine entsprechende Fixierung gesichert werden muss.

Eine Bewertung der mechanischen Kennwerte der einzelnen Verstärkungsvarianten erfolgt in Abschnitt 3.5.2 durch die experimentellen Knick- und Biegeuntersuchungen an Formholzrohren.

3.4.4 Imprägnierung der Gestricke

Autoren: Wolfgang Trümper (ITM)

Die vollständige Ausnutzung des Verstärkungspotentials der entwickelten textilen Strukturen ist erst durch die Einbettung in eine Matrix möglich. Je nach Einsatzgebiet kommen dabei verschiedene, z. B. duromere, thermoplastische oder mineralische Matrixsysteme in Betracht. Ziel der Untersuchungen im Rahmen des Projekts war die Erhöhung der Steifigkeit und Festigkeit sowie der Ausgleich der Anisotropie des Werkstoffs Holz durch den Einsatz von textilen Strukturen. Der Schwerpunkt lag dabei zunächst auf der Bereitstellung von Patches unter Verwendung von ringförmigen MLG (vgl. Kap. 3.4.1) zur Erhöhung der Lochleibungsfestigkeiten an Verbindungsstellen von Holzkonstruktionen. Daher war bei der Auswahl der Matrices auf eine hohe Kompatibilität mit dem Werkstoff Holz zu achten. Die zu verstärkende Holzkonstruktion ist beispielsweise eine Tragwerksstruktur für eine Innenhofüberdachung im Außenbereich. Dabei ist zwar primär nicht von einem direkten Einwirken der Witterung auf die Verbindungsstellen auszugehen, trotzdem sollte der Verbund eine ausreichende Widerstandsfähigkeit gegen Witterungseinflüsse gewährleisten.

Ausgangspunkt der Entwicklungen war das Ziel, die Patches möglichst in großer Stückzahl und reproduzierbar in Bezug auf Eigenschaften und Bauteilqualität herzustellen. Der Nachweis der Leistungsfähigkeit von ringförmigen MLG für die Lochleibungsverstärkung erfolgte an Proben die zunächst im Handlaminierverfahren (Abb. 3.153:) hergestellt wurden(vgl. Gelenkbolzenverbindungen in Kap.3.3.1).



Abb. 3.153: Herstellen von Proben mit ringförmigen MLG im Handlaminierverfahren für die Prüfung der Lochleibungsfestigkeit (links); Bauteildetail nach der Prüfung (rechts)

Das Handlaminierverfahren wird vielfach eingesetzt, wenn aufgrund der Bauteilgeometrien keine geeigneten automatisierbaren Verfahren angewendet werden können oder dies aufgrund der Losgröße wirtschaftlich nicht sinnvoll ist. Nachteilig ist die durch die manuelle Herstellung einge-

schränkte Reproduzierbarkeit der Bauteilqualität. In Verbindung mit Holzbauteilen besteht darüber hinaus die Notwendigkeit des Einlaminierens der textilen Strukturen vor Ort auf der Baustelle oder vorher in entsprechenden Werkstätten. Hier müssen dann jeweils der notwendige Platz und die entsprechenden Bedingungen vorhanden sein, um die Laminierarbeiten ordnungsgemäß ausführen zu können sowie die entsprechende Lagerung zur Aushärtung der Bauteile zu gewährleisten. Bei den ersten Untersuchungen zur Applikation der ringförmigen Gestricke im Handlaminierverfahren hat sich gezeigt, dass eine vollständige Imprägnierung aller Glasfilamente der textilen Struktur und damit die vollständige Einbettung in die Matrix nur schwer realisierbar sind. Weiterhin besteht die Gefahr, dass nach der Konsolidierung im Bauteil Luftblasen und auch Lunker vorhanden sein können.

Durch eine Vorfertigung der Patches und die anschließende Integration in die Holzbauteile sollen die beschriebenen Nachteile vermieden werden. In einem ersten Schritt muss dazu zunächst die Matrix ausgewählt werden. Darauf aufbauend und in Abhängigkeit vom verwendeten Konsolidierverfahren kann dann ein entsprechendes Werkzeugkonzept entwickelt werden.

Aufgrund der Einsatzbedingungen im Außenbereich und der unter Sonneneinstrahlung möglichen Einsatztemperaturen bis ca. 80°C wurde ein duromeres Epoxid-Harzsystem als Matrixsystem ausgewählt. Ein Vorteil derartiger Systeme ist z. B. die Vernetzung bzw. das Aushärten auf Basis einer Polyaddition, so dass keine Stoffe abgespalten werden, die gegebenenfalls aus dem Werkzeug nach außen abgeführt werden müssten. Die Harzsysteme weisen bei der Aushärtung nur ein geringes Schwinden auf, so dass maßhaltige Bauteile ohne aufwendige Nachbearbeitung hergestellt werden können. Das geringe Schwinden verhindert gleichzeitig das Entstehen von inneren Spannungen im Bauteil durch das Aushärten. Epoxidharze sind zudem sehr gut geeignet, eine Vielzahl unterschiedlicher Materialien klebtechnisch zu verbinden. Darüber hinaus sind solche Harzsysteme in der Vergangenheit an Holzbauteilen unter Witterungseinflüssen bereits erfolgreich getestet worden.

Erste Vorversuche zur Imprägnierung textiler Strukturen wurden mit dem Epoxid-Harz LN1 und dem zugehörigen Härter der Firma VOSSCHEMIE GmbH durchgeführt. Dieses Harz wurde auch in den Versuchen zum Handlaminieren verwendet, da es vom Hersteller besonders für die Anwendung an Bauteilen aus Holz empfohlen wird. Ein Nachteil des Harzes ist seine hohe Viskosität, die dazu führt, dass nicht alle Bereiche der textilen Struktur ausreichend imprägniert werden können. Daher wurde auch nach Rücksprache mit verschiedenen Lieferanten in den weiteren Untersuchungen das niedrig viskosere Harzsystem SR8100 mit dem Härtern SD8822 und SD8824 und der Firma Sicomin Epoxy Systems eingesetzt. In Vorversuchen wurden die Topfzeiten der Harz-Härter Kombinationen sowie die Aushärtezeiten und die dabei auftretenden Temperaturen ermittelt. Die dazu verwendeten Harzmengen entsprechen in etwa denen, die für das spätere Bauteil benötigt werden. Weiterhin wurde der Einfluss des Vorwärmens von Härter und/oder Harz auf die Aushärtezeiten bestimmt, um für die spätere Bauteilherstellung eine Taktzeit ableiten zu können.

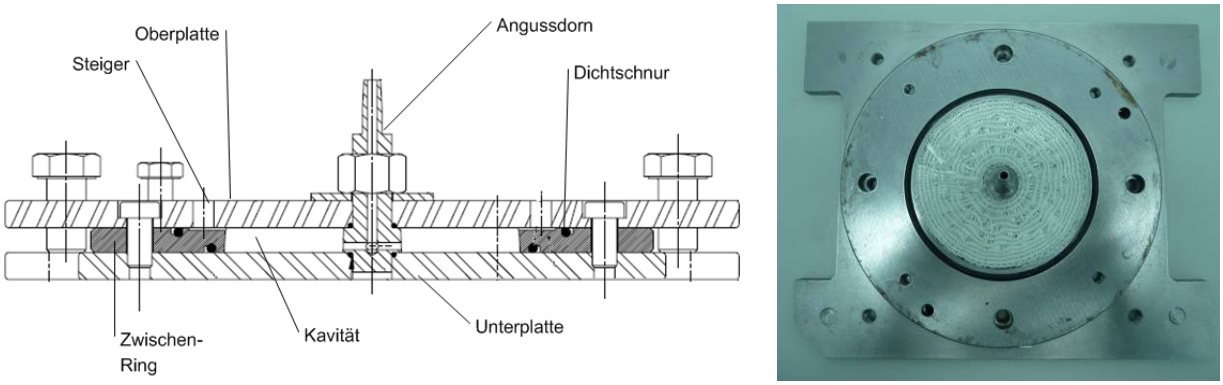
Der Einsatz des Härter SD8824 führt zu einer schnellen Aushärtung des Harzes innerhalb von ca. 30 bis 60 min. Damit lassen sich bei der Bauteilherstellung kurze Taktzeiten realisieren. Allerdings erfordert die stark exotherme Reaktion beim Aushärten ein temperaturbeständiges Werkzeug mit einer guten, gleichmäßigen Wärmeableitung bzw. eine gute Prozesskontrolle, um bei den während des Aushärtens gemessenen Temperaturen bis 220°C eine Verkohlung des Harzes zu verhindern.

Durch den Einsatz des Härters SD8822 kann die während der Aushärtung auftretende Maximaltemperatur deutlich gesenkt werden. Die notwendige Aushärtzeit erhöht sich dabei auf mehrere Stunden. In den nachfolgenden Versuchen konnte durch ein Vorwärmen des Härters auf ca. 40°C die Aushärtezeit auf ca. 100 bis 120 min verringert werden. Die auftretende Maximaltemperatur betrug ca. 80°C. Die für die Verarbeitung des Harzes wichtige Topfzeit wurde mit etwa 30 bis 40 min bestimmt. Die deutlich reduzierte Maximaltemperatur verringert die Gefahr von lokalen Harzverbrennungen und vereinfacht zudem die Werkzeugauslegung. Für die Bauteilherstellung wurde daher das Harz SR8100 mit dem Härter SD8822 eingesetzt. Der Härter wurde vor dem Vermischen der beiden Komponenten entsprechend vorgewärmt.

Die textilen Verstärkungsstrukturen lagen als trockene Preformen vor. Für die Herstellung von Verbundbauteilen aus diesen Preformen hat sich die Verwendung von Flüssigimprägnierverfahren bewährt. Je nach Anforderungen an die Taktzeiten und an die Qualität der Bauteiloberflächen sind verschiedenen Verfahren bekannt. Sie unterscheiden sich im Wesentlichen durch das notwendige Werkzeug und die Prozessführung. Am bekanntesten ist das klassische RTM-Verfahren (Resin Transfer Molding) bei dem in ein zweischaliges festes Werkzeug unter Druck Harz in die Kavität mit der trockenen textilen Preform injiziert wird. Nach dem Aushärten der Bauteile in der Form werden diese entformt und der notwendigen Nachbearbeitung zugeführt. Ein weiteres Verfahren ist die Infusion textiler Preformen. Dabei wird das Halbzeug auf einem einseitigen, formstabilen Werkzeug aufgelegt und mit einem Vakuumsack abgedeckt. Nach dem Abdichten wird ein Vakuum angelegt und nach Erreichen der erforderlichen Druckdifferenz das Harz in die Form geleitet. Das Verfahren erlaubt bei der Verwendung von entsprechend geeigneten Verteilmedien für das Harz eine sehr schnelle Infusion auch von großen Bauteilen. Darüber hinaus sind noch eine Vielzahl weiterer Prozesse bekannt auf die an dieser Stelle nicht weiter eingegangen werden soll, da die zur Realisierung von Bauteilen notwendige Technik bei den Projektpartnern nicht vorhanden ist.

Die Patches für die Lochleibungsverstärkung sollten auf beiden Seiten eine gleiche Oberflächenqualität aufweisen. Da nur die Bauteilunterseite durch ein festes Werkzeug abgebildet wird, kann dies in den Infusionsprozessen bei den relativ kleinen Bauteilabmessungen nicht immer hinreichend sichergestellt werden. Für die Bauteilherstellung wird daher das RTM-Verfahren in einem zweischaligen festen Werkzeug ausgewählt und eingesetzt.

Die Patches sollten einen Durchmesser außen von 120 mm und innen von 24 mm aufweisen. Die Bauteildicke sollte etwa 10 mm betragen. Das Werkzeug war für etwa 200 Abformungen auszulegen. Bei der Umsetzung mussten Punkte wie Gestaltung und Position des Angusses sowie der Steiger, Entformbarkeit, Maßgenauigkeit und Standzeit betrachtet werden. Die Abb. 3.154 zeigt eine CAD-Zeichnung des entwickelten und umgesetzten Werkzeugs.



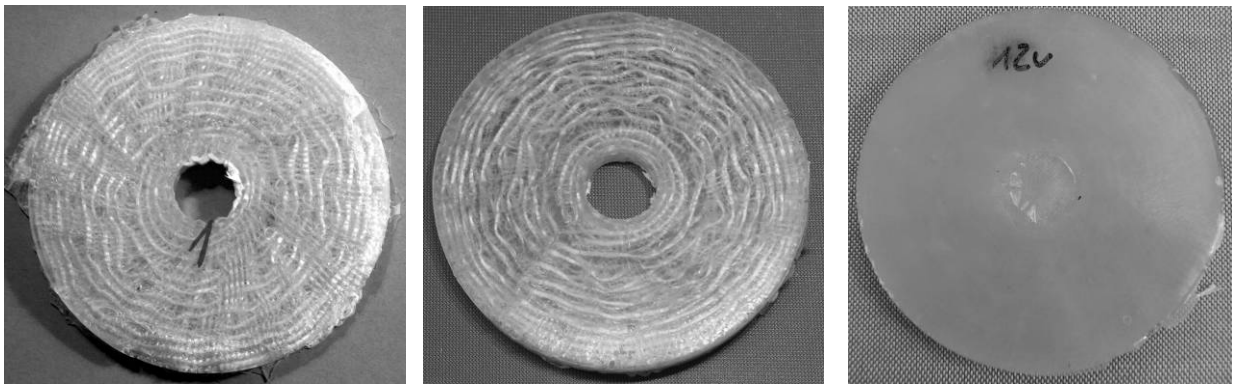
a) b)

Abb. 3.154: RTM-Werkzeug: a) CAD-Querschnittsdarstellung; b) mit MLG bestückt

Eine besondere Herausforderung bei der Entwicklung des Werkzeugs war die Anzahl und die Anordnung von Angüssen und Steigern. Diese mussten so platziert werden, dass alle Bereiche der Preform gleichmäßig mit der Matrix infiltriert und Lufteinschlüsse in der Matrix verhindert werden. Daneben ist die vollständige Imprägnierung der textilen Strukturen aber auch von den Parametern Viskosität und Injektionsdruck des Harzes abhängig. In den durchgeführten, systematischen Versuchen mussten daher geeignete Parameter für den Druck, die Anzahl der Steiger und deren Position ermittelt werden.

Die herzustellenden Bauteile sind rotationssymmetrisch. Der Anguss wurde daher als Zentralanguss am Innendurchmesser ausgeführt. Damit sind die Fließwege für das Harz bis zum Außenrand in allen Bereichen eines Bauteils gleich lang. Die Steiger werden am Außenradius gleichmäßig über dem Umfang verteilt. Die Abb. 3.155: zeigt Probekörper die mit verschiedenen

Parametern für den Druck und einer unterschiedlichen Anzahl von Steigern am Werkzeug hergestellt werden.



a) b) c)

Abb. 3.155: Patches aus ringförmigen MLG, verschiedene Versuchsstadien
a) 4 Steiger, 2 bar Druck; b) 6 Steiger, 1 bar Druck; c) 6 Steiger, 0,5 bar Druck

Die zunächst vorgesehenen vier Steiger reichen nicht aus, um das Werkzeug während der Infiltration ausreichend zu entlüften. Im Bauteil ist daher eine Vielzahl von Lufteinschlüssen vorhanden. Gleichzeitig schießt das Harz durch den hohen Infiltrationsdruck von 2 bar sehr schnell durch die textile Struktur ohne die Rovings ausreichend zu imprägnieren. Dadurch sind im Bauteil die Verstärkungsfäden noch deutlich zu erkennen (Abb. 3.155: a). Dieses Ergebnis machte eine konstruktiven Umgestaltung des Werkzeugs und die zusätzliche Anordnung von zwei weiteren Steigern erforderlich. In den Versuchen mit dem geänderten Werkzeug wurde gleichzeitig der Druck bei der Infiltration auf 1 bar reduziert, was zu deutlich weniger Lufteinschlüssen im Bauteil (Abb. 3.155: b) führt. Durch den verringerten Druck läuft auch die Infiltration langsamer ab, so dass die Verstärkungsfasern deutlich besser, aber immer noch nicht vollständig imprägniert werden. Durch eine nochmalige Verringerung des Arbeitsdrucks auf 0,5 bar bei der Infiltration wurde eine vollständige Imprägnierung erreicht.

Mit dem geänderten Werkzeug und den ermittelten Prozessparametern für die Injektion konnten die Bauteile weitgehend ohne Lufteinschlüsse und mit einer vollständig imprägnierten Verstärkungsstruktur für die weiteren Untersuchungen zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften gefertigt und bereitgestellt werden. Das Harz wurde bei Raumtemperatur verarbeitet und mit dem zur Beschleunigung der Aushärtung auf 40°C vorgewärmten Härter vermischt. Die Taktzeit liegt mit einem Werkzeug, bedingt durch die notwendige Zeit für das Aushärten und Nachtempern der Bauteile, bei etwa 3 Stück am Tag. Durch das Nachtempern kann ein gleichmäßiges und vollständiges Aushärten der Bauteile erreicht werden. Das Entstehen innerer Spannungen im Bauteil kann verringert werden. In den Versuchen wurden alle Bauteile bei etwa 60°C für vier Stunden getempert.

3.5 Technologiesynthese

3.5.1 Allgemeines

Autor: Andreas Heiduschke (ISH)

Auf Grund der hohen Haft- bzw. Verbundfestigkeit von verschiedensten Matrixsystemen auf Holz eignen sich faserverstärkte Kunststoffe hervorragend zur Verstärkung von Holzbauteilen sowie deren Anschlussbereichen. Technische Fasern und Textilien eignen sich in besonderem Maße zur Verstärkung gekrümmter Oberflächen [284], wobei Verstärkungsgrad, Faserwinkel und Material der jeweiligen statischen Beanspruchung maßgeschneidert angepasst werden können. Die Bewehrung erhöht die Querzug-, Schub- und Lochleibungsfestigkeit [274] des Holzes und bietet Schutz vor Witterung [285] und anderen äußeren Einwirkungen. Dies setzt sowohl eine hohe Verbundfestigkeit als auch eine hohe Dauerhaftigkeit des Verbundes voraus.

Während Holz von der Festigkeit, Steifigkeit und Dauerhaftigkeit der faserverstärkten Kunststoffe profitiert, gewinnen FVK durch die Umweltfreundlichkeit und den sehr geringen Preis des Holzes an Wettbewerbsfähigkeit, so dass diese Kombination hohe Synergien für das Bauwesen verspricht. Nachfolgende Tabelle soll die vorhandenen Synergiepotenziale aufzeigen. Zu diesem Zweck sind, stark vereinfacht, die wesentlichen Vor- und Nachteile von Holz und FVK aufgeführt.

Tabelle 3.36: Vor- und Nachteile von Holz und FVK

	Holz	GFK	CFK
Preis	+ +	-	--
Traglast	o	+	+ +
Steifigkeit	o	o	+ +
Dauerhaftigkeit	--	+	+
Formstabilität	--	+	+ +
Armierung	-	+	+ +
Formgebung	- / +	+	+
Verbindungen	-	o	o
Nachhaltigkeit	+ +	-	-

Beispielsweise lässt sich das Stabilitätsproblem der vergleichsweise dünnwandigen FVK-Profile durch einen preisgünstigen Wickelkern aus Holz lösen, der zudem zu einem deutlichen Zuwachs bzgl. Traglast und Steifigkeit des Verbundbauteils führt. Abb. 3.156 verdeutlicht, dass beide Materialien eine hohe spezifische Festigkeit und Steifigkeit aufweisen. Dementsprechend lassen sich hochleistungsfähige Verbundbauteile fertigen.

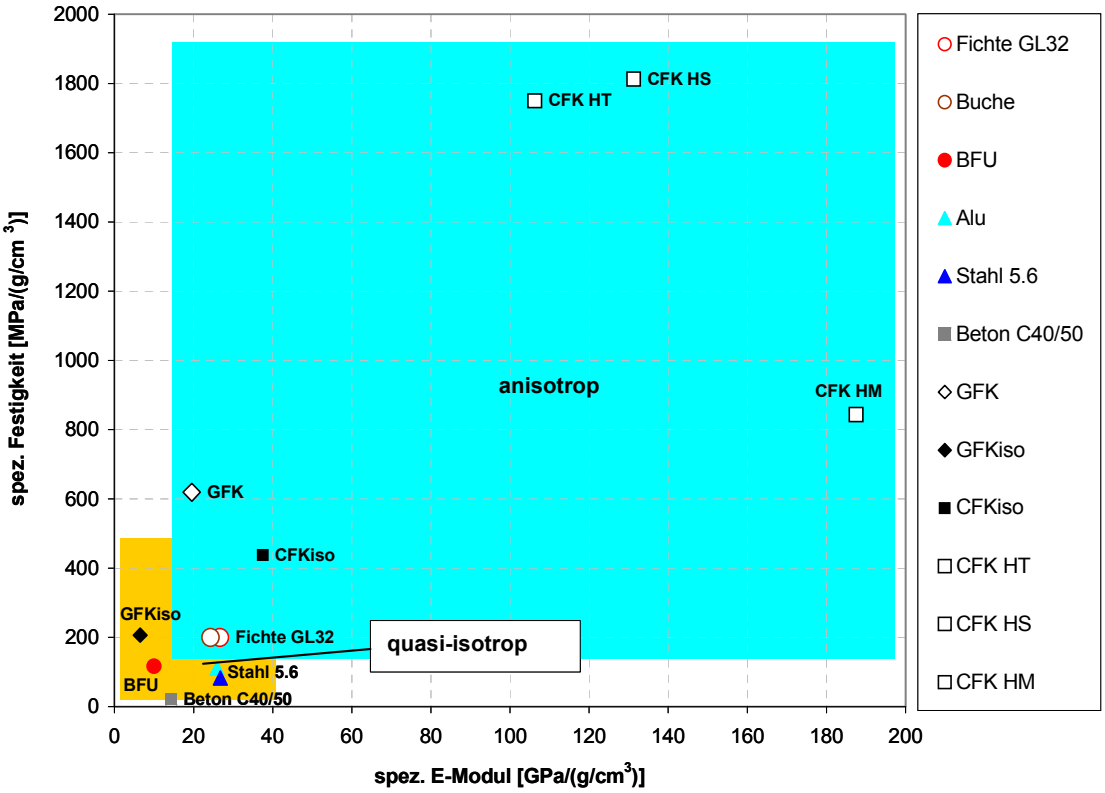


Abb. 3.156: spezifische Festigkeiten und Steifigkeiten verschiedener Werkstoffe

Die Herstellung von Formholzprofilen beruht auf einem neuen Verfahren, welches Holz als zelluläres Material auffasst, das unter Wärme und Druck verdichtet, geformt und erneut fixiert werden kann (vgl. Abschn. 3.1). Konstruktiv gesehen stellen Profilquerschnitte eine Abkehr von den im Holzbau vorherrschenden Vollquerschnitten dar. Diese weisen im Vergleich zu technischen Profilen aus Metallen und Kunststoffen eine geringe Materialeffizienz auf, in der die hohen Verluste im Sägewerk und Holzleimbaubetrieb noch nicht berücksichtigt sind.



Abb. 3.157: Formholzprofile mit Kohlefaserwicklung (Foto: L. Sprenger)

Die Entwicklung faser- und textilbewehrter Formholzprofile greift die Vorstellungswelt von Ingenieuren und Architekten auf, indem sie einen effizienten Querschnitt hoher spezifischer Tragfähigkeit und Steifigkeit bereitstellt, dessen anisotrope Struktur und Dauerhaftigkeit durch die Bewehrung in weiten Grenzen maßgeschneidert werden kann. Die Kombination beider Materialien führt zu neuen Konstruktionen in Architektur, Bauwesen und Leichtbau.

In den nachfolgenden Abschnitten wird das Tragverhalten von Holz-FVK-Verbundquerschnitten (Rohr- und Kastenprofile) für verschiedenste Belastungssituationen (Druck, Zug, Biegung, Torsion) untersucht und analysiert.

3.5.2 Knick- und Biegeversuche an verstärkten und unverstärkten Holzbauteilen
Autor: Andreas Heiduschke (ISH)

3.5.2.1 Knickversuche an Formholzprofilen

Bauteile übertragen Kräfte und Momente unter Berücksichtigung der Gebrauchstauglichkeit. Mit Ausnahme des Zugstabes ist hierbei das Flächenmoment 2. Grades von Bedeutung, da die Maße der Fläche mit der Potenz, die Materialeigenschaften aber nur linear in die Bemessung eingehen. Im Holzbau herrscht der runde oder rechteckige Vollquerschnitt vor, dessen Fläche im Vergleich zu technischen Profilen nur ein geringes Flächenmoment erzielt. Diese Tatsache und die Verluste, die bei der Transformation des Rohholzes in tragende Querschnitte entstehen [262], gehen zu Lasten der Ressourceneffizienz, wodurch ein Wettbewerbsnachteil gegenüber konkurrierenden Bau- und Werkstoffen entsteht. Dies mag zu einem guten Teil erklären, weshalb ein Rohstoff, der auf einem Drittel der Fläche unseres Landes mit Hilfe von Sonnenenergie nachwächst, von Materialien preislich unterboten werden kann, zu deren Herstellung viel Energie und Kapital bereitgestellt werden muss.

Faserverstärkte Profilquerschnitte im Holzbau

Profilquerschnitte gehören im Holzbau zum Stand der Technik [281]. Da diese vornehmlich auf Biegung ausgelegt sind, herrscht der Doppel-T-Querschnitt vor. Abgesehen von kleineren Abmessungen im Schalungsbau bestehen die dünnen Stege meist aus Holzwerkstoffen, deren Werkstoffstruktur dem Träger eine höhere Schubfestigkeit verleiht. Aber auch Rohrquerschnitte aus Brettern sind bekannt, welche zunächst trapezförmig profiliert und anschließend zu einem Polygon verleimt werden [282]. Die Herstellung dieser und weiterer Profile beruht auf zwei grundlegenden Technologien: dem Trennen und anschließenden Fügen mit synthetischen Bindemitteln.

Am ISH wurden erstmals tragende Profilquerschnitte nach dem in Abschn. 3.1 beschriebenen Verfahren hergestellt. Nach diesem Prinzip lassen sich aus massiven Pressholzplatten abwickelbare Profile formen.

Profile haben geringe Wandstärken, die in Verbindung mit der Anisotropie Fragen bezüglich des Struktur- und Brandverhaltens sowie der Dauerhaftigkeit aufwerfen. Im Verbund mit technischen Fasern und Textilien sowie geeigneten Matrices oder fertigen Laminaten können diese Schwierigkeiten umgangen werden.

Bewehrung von Formholzrohren mit technischen Fasern und Textilien

Die Herstellung eines faser- oder textilbewehrten Formholzprofils kann auf verschiedene Arten erfolgen:

a) im Flecht- oder Wickelverfahren (vgl. Abb. 3.158a und Abb. 3.158b) bei Verwendung loser Fäden,

b) durch Umwickeln mit flächigen Geweben oder Gelegen sowie

c) durch Aufziehen gestrickter Schläuche (vgl. Abb. 3.158c), die ein- oder zweiachsig verstärkt sein können.

Die trockene Bewehrung wird anschließend mit einem Harz infiltriert, sofern der Faden nicht wie beim Wickelverfahren bereits vorher durch das Harz geleitet und aufgetragen wird. Bei der Aushärtung entsteht ein Laminat, das einen festen Verbund mit der Holzoberfläche eingeht.

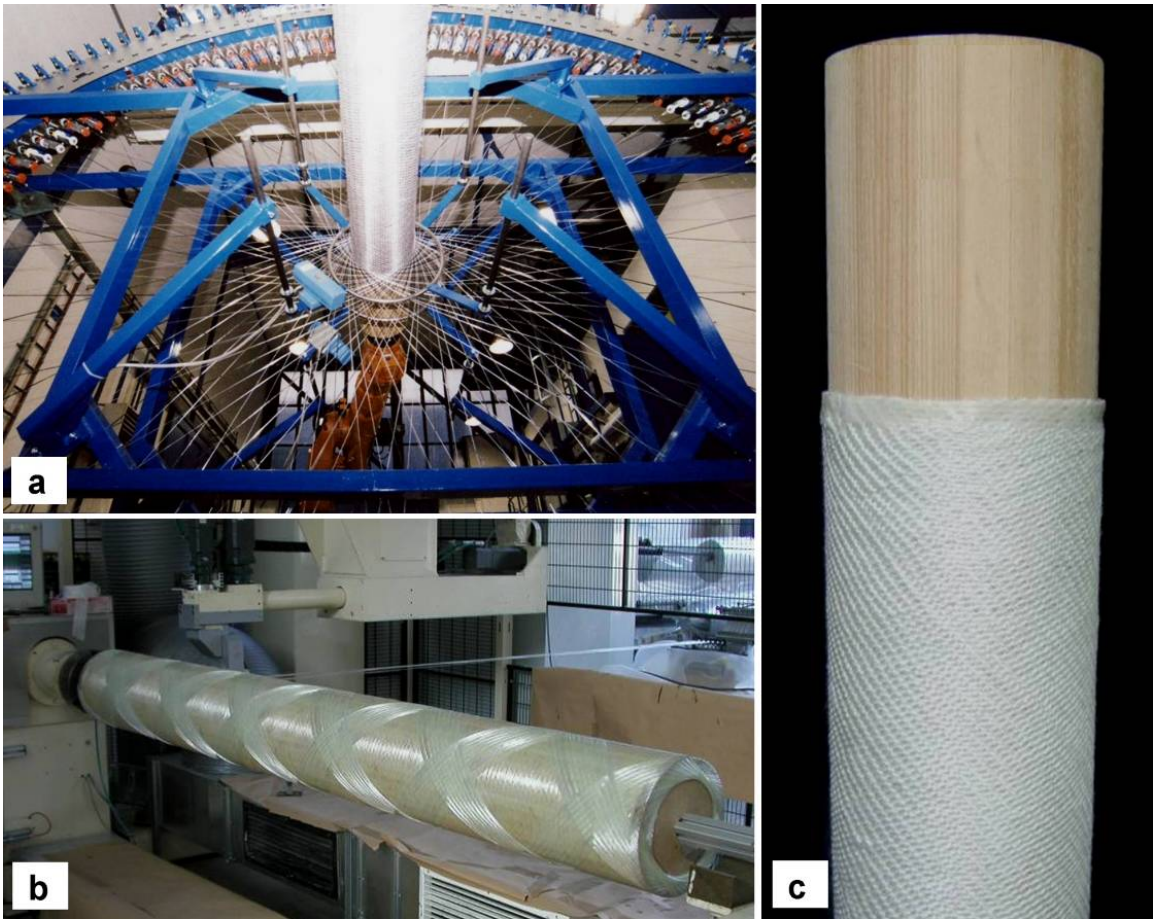


Abb. 3.158: (a) Flechten und (b) Wickeln der Formholzrohre am ILK und (c) Rohr mit Schlauchgestrick vom ITM der TU Dresden

Das Wickeln der Formholzrohre erfolgte mit ausgeglichener Schraubenwicklung verschiedener Winkel direkt auf dem Formholzrohr. Abb. 3.159 zeigt unbewehrte Formholzrohre und Wickelverbunde mit ±45° orientierten Verstärkungsfasern. Zur Verstärkung können je nach Anforderung verschiedene Fasertypen wie Glas-, Aramid- und Kohlefaser eingesetzt werden.

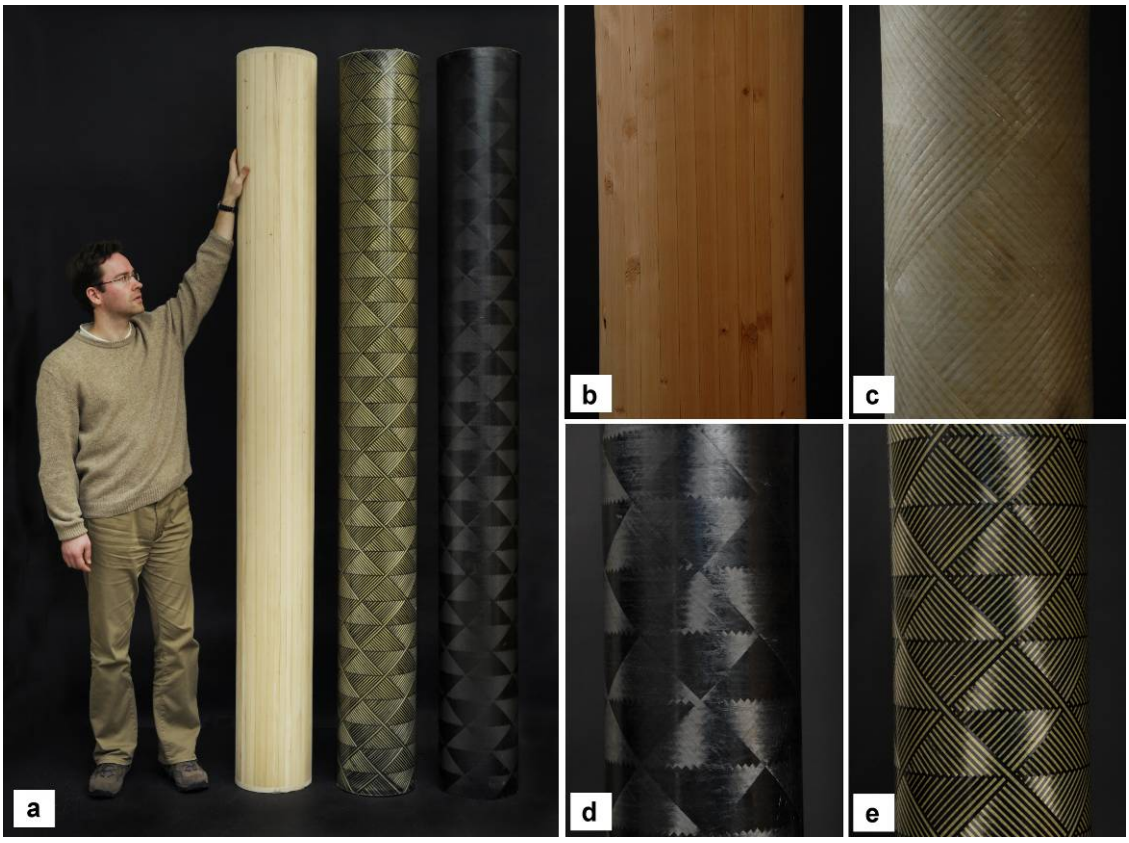


Abb. 3.159: (a) Formholzrohre inkl. Detailansicht (b) eines unbewehrten Rohres und verschiedener mit (c) E-Glas-, (d) Kohle- (e) Kohle-Aramidfasern bewehrter Rohre

3.5.2.1.1 Formholzrohre unter zentrischem Druck

Formholz weist gegenüber Schnitt- und Brettschichtholz Besonderheiten auf, die zusätzliche Versuche erfordern: Zunächst neigt eine dünne Rohrwand anders als der Vollquerschnitt zum Beulen; ferner nimmt die Dichte nach der Formung der Platte zum Rohr linear von innen nach außen ab, wovon infolge der Proportionalität zwischen Dichte und Festigkeit auch die Tragfähigkeit tangiert wird [243].

Zur Bemessung von Druckstäben nach DIN 1052:2008-[2] kann wahlweise das Ersatzstabverfahren oder der Spannungsnachweis nach Theorie 2. Ordnung angewandt werden. Beim strukturmechanischen Verhalten von Formholz-Verbundrohren muss zur Gewährleistung der Tragsicherheit nach folgenden Versagensarten unterschieden werden:

- I - Überschreitung der Festigkeit des Holzes oder der Bewehrung (z. B. Druckfestigkeit parallel zur Faser, Querzugfestigkeit etc.)
- II - Knicken des Stabes (Stabilität nach Euler)
- III - Ring- oder Schachbrettbeulen der Rohrwand (lokale Stabilität)

Beim Stabilitätsnachweis des Formholz-Verbundrohres gehen neben dem E-Modul die Geometrie des Querschnitts und die Stablänge ein. Für das Knicken nach Euler ist die Schlankheit λ, für das Beulen der Formfaktor *r/t* maßgeblich, der sich aus dem Verhältnis der Wandstärke *t* und des mittleren Radius *r* ergibt. Dieser Faktor dient der Klassifizierung der Beulschlankheiten von Zylinderschalen. Nach Simitses [246] können Zylinder aus faserverstärkten Kunststoffen mit einem Formfaktor $r/t \geq 30$ als dünnwandig bezeichnet werden, deren Analyse recht genau mit Hilfe der klassischen Laminattheorie erfolgen kann. Gemäß Simitses [246] werden Zylinder mit $10 < r/t < 30$ als Schalen mittlerer Dicke und jene mit $r/t \leq 10$ als dickwandig eingestuft. Demzufolge fallen die hier untersuchten Formholzrohre mit Formfaktor $r/t = 6{,}5$ (r = 129 mm, t = 20 mm) in letztere Kategorie, bei deren Analyse die Schubverformung und die Spannung in ra-

dialer Richtung σ_r zu berücksichtigen sind. Dies geschieht mit der Schubdeformationstheorie bzw. der erweiterten Laminattheorie [247]. Diese analytische Berechnung dickwandiger Rohre ist aufwändig, so dass i. d. R. numerische Modelle zum Einsatz kommen [248]. Im Vergleich dazu, ist die Bemessung dünnwandiger Rohre einfach, da auf die elementare Kesselformel der Technischen Mechanik und auf die klassische Laminattheorie zurückgegriffen werden kann. Dies setzt für jede Schicht einen ebenen Spannungszustand voraus. Als Faustregel gilt: Spannungszustände, bei denen die Spannung in radialer Richtung σ_r mindestens eine Zehnerpotenz kleiner ist als jene in Längs- und Umfangsrichtung σ_z bzw. σ_φ können näherungsweise als eben betrachtet werden. Diese Voraussetzung ist bei Rohren mit $r/t \leq 10$, insbesondere im Bereich von Krafteinleitungen, nicht mehr erfüllt. Dennoch können, nach Jakobi [249], selbst Rohre mit r/t ≥ 5,5 noch als dünnwandig betrachtet werden. Für diesen Fall ist jedoch in der Spannungsanalyse mit einem Fehler von 10 % bis 20 %, zur unsicheren Seite hin, zu rechnen.

Dünnwandige Rohre weisen unter axialem Druck lokale Beulmuster auf, die abhängig von den mechanischen Eigenschaften des Laminats ring- oder schachbrettartig beschaffen sein können und eine Folge geometrischer Imperfektionen und anisotroper Kopplungseffekte sind. Zur Abschätzung der kritischen Beulspannungen $\sigma_{cr,Beulen}$ dünnwandiger FVK-Zylinder werden in [262], [248] und [250] einfache Berechnungsansätze angegeben:

$$\sigma_{cr,Beulen} = \min \begin{vmatrix} \frac{t}{\sqrt{3}\cdot r}\sqrt{\frac{E_z E_\varphi}{1-\mu_{z\varphi}\mu_{\varphi.z}}} & \text{Ringbeulen} \\ \frac{t}{\sqrt{3}\cdot r}\sqrt{\frac{2G_{z\varphi}\sqrt{E_z E_\varphi}}{1-\sqrt{\mu_{z\varphi}\mu_{\varphi.z}}}} & \text{Schachbrettbeulen} \end{vmatrix} \tag{3.19}$$

Dabei sind E_Z and E_φ die E-Moduln in Längs- bzw. Umfangsrichtung, $G_{z,\varphi}$ der Schubmodul sowie $\mu_{\varphi z}$ und $\mu_{z\varphi}$ die Querdehnzahlen. Auf Grund des geringen Schubmoduls wird beim unbewehrten Holzrohr stets das Schachbrettbeulen maßgebend. Bei statischen Untersuchungen an orthotropen FVK-Zylindern wurde festgestellt, dass die gemessenen Spannungen beim Ringbeulen nur den 0,58-fachen Wert der berechneten Spannung erreichen [247], so dass anstatt $1/\sqrt{3}$ (vgl. (3.19) mit dem Faktor 1/3 abgemindert wird. Nach weiteren Vereinfachungen ergibt sich gemäß [247] folgende Gleichung:

$$\sigma_{cr,Ring} = \frac{t}{3\cdot r}\cdot\sqrt{E_z \cdot E_\varphi} \qquad [247] \tag{3.20}$$

In der Bemessungsnorm für Verbundwerkstoffe - EUROCOMP [251] wird zur Berechnung der kritischen Beulspannung $\sigma_{cr,III}$ Gleichung (3.21) angegeben, wobei der Beulnachweis nur für Rohre mit $r/t > 10$ zu erbringen ist.

$$\sigma_{cr,III} = \frac{t}{4\cdot r}\cdot E_z \qquad [251] \tag{3.21}$$

Ein unterer Grenzwert ergibt sich, wenn E_z durch den quasi-isotropen E-Modul E_{iso} nach Tsai [252] ersetzt wird. Da in diesem Projekt nur dickwandige Rohre (r/t = 6,5) mit leichter Bewehrung untersucht wurden, ist lediglich der Festigkeits- und Knicknachweis zu führen.

Die Dicke der FVK-Bewehrung t_{FVK} ist im Vergleich zur Wandstärke des Formholzrohres t_{FH} klein ($t_{FH} \gg t_{FVK}$), so dass deren Steifigkeit und Festigkeit nur einen geringen Beitrag im Verbund leistet und daher beim Stabilitätsnachweis gedrungener Stäbe näherungsweise außer Acht gelassen werden kann. Die Bewehrung entfaltet ihre Wirkung demzufolge in Umfangsrichtung, indem sie die Querzugfestigkeit erhöht und so ein Aufspalten des Rohres in Längsrichtung verhindert. Unter dieser Voraussetzung lässt sich die kritische Spannung $\sigma_{cr,I+II}$ für die Druck- und Knickkraft des bewehrten Formholzrohres mit dem Ersatzstabverfahren nach DIN 1052 [2] berechnen, wobei die Druckfestigkeit des Holzes $f_{c,0}$ mit dem Knickbeiwert k_c abgemindert wird.

$$\sigma_{cr,I+II} = f_{c,0}\cdot k_c \tag{3.22}$$

Details zur Bestimmung des Knickbeiwerts sind der DIN 1052:2008-12 [2] zu entnehmen. Anzumerken ist, dass bei der Festlegung der Ersatzstablänge die Schubsteifigkeit $S = GA/n$ des Querschnitts berücksichtigt werden sollte, wobei G der Schubmodul und n der Schubkorrekturfaktor ist. Für rechteckige und runde Vollquerschnitte beträgt n = 1,20 bzw. 1,11 [253]; bei dünnwandigen Kreisringen ist n = 2, da nur etwa die Hälfte der Querschnittsfläche die Schubkraft überträgt [254].

Spröde Querzug- und Schubbrüche werden bei der Bemessung des Stabes nach DIN 1052:2008 [2] nicht berücksichtigt. Große Vollquerschnitte weisen oft Schwundrisse auf, welche die Traglast aber nur in geringem Umfang herabsetzen. Formholzrohre hingegen neigen wegen ihrer dünnen Wandstärke kaum dazu; dort muss die Entstehung von Rissen jedoch zwingend vermieden werden, da diese die Traglast erheblich vermindern. Godoy [255] hat deren Einfluss auf das Tragverhalten axial beanspruchter Zylinderschalen untersucht. Demgemäß führt ein Längsriss zu einer Verlagerung der Spannung σ_z auf die dem Riss diametral entgegengesetzte Seite des Querschnitts und zu Biegespannungen in der Nähe der Rissflanken infolge der nunmehr fehlenden Membranwirkung. Der Formfaktor r/t beeinflusst die Größe dieser Biegespannungen wesentlich. Godoy bewertet Risse in dicken Schalen weit weniger kritisch als in dünnen.

Risse entstehen bei axialer Stauchung eines Rohres ε_z infolge der Querdehnung, die zu Ausdehnungen bzw. einer Ausbauchung des Querschnitts in Umfangsrichtung ε_φ führen. Aus den Beziehungen $\varepsilon_\varphi = -\varepsilon_z * \mu_{z,\varphi}$ und $u_r = r * \varepsilon_\varphi$ lassen sich die tangentiale Dehnung ε_φ und die radiale Verschiebung u_r berechnen. Mit Hilfe des einfachen Versagenskriteriums - maximale Dehnung am Rohrumfang - kann die kritische Druckspannung $\sigma_{cr,\varepsilon 90}$ für das Spalten des unbewehrten Formholzrohres abgeschätzt werden:

$$\sigma_{cr,\varepsilon 90} = \frac{f_{t,90} \cdot E_0}{\mu_{z\varphi} \cdot E_{90}} \tag{3.23}$$

Zur Bestimmung der Bruchdehnung in Umfangsrichtung $\varepsilon_{\varphi,cr}$ wird die charakteristische Querzugfestigkeit $f_{t,90,k}$ von Brettschichtholz mit 0,5 N/mm² [2] angesetzt. Die mittlere Querzugfestigkeit beträgt je nach Probengeometrie ca. 1,5 N/mm^2 [256] und ist starken Streuungen unterworfen. Hinzu kommt, dass bei einer Ovalisierung des Querschnitts kein gleichmäßiger Verlauf der Dehnung am Umfang mehr vorhanden ist, und dass auch nach Entstehung eines Risses die Traglast des Formholzrohres nicht zwangsläufig erreicht sein muss [255]. Die Verwendung der Bruchdehnung $\varepsilon_{\varphi,cr}$ als Versagenskriterium und die daraus abgeleitete Druckfestigkeit $\sigma_{cr,\varepsilon 90}$ können deshalb nur eine grobe Näherung darstellen. Gute Näherungen sind nur mit vollständigen Interaktionskriterien wie z. B. nach Tsai-Wu [257] zu erzielen, die jedoch die Kenntnis des vollständigen Spannungszustandes voraussetzen [258] – siehe dazu Abschn. 3.6.3.4 sowie [280].

Diese Überlegungen verdeutlichen, dass mit einer Bewehrung des Formholzrohres in Umfangsrichtung signifikante Traglaststeigerungen erzielt werden können. Im Massivbau werden Faserverbundmaterialien seit längerem zur Verstärkung von Stützen eingesetzt. Die Umschnürung des Betonkerns bewirkt dabei einen dreiachsigen Druckspannungszustand, der zu einer deutlichen Erhöhung der Traglast führt. Lignola et al. [259] haben hierfür ein Rechenmodell erstellt, das in der Lage ist, das Tragverhalten faserumschnürter Betonrohre hinsichtlich Traglast und Duktilität mit hinreichender Genauigkeit abzubilden.

Im Gegensatz zu Beton ist bei Holz wegen der geringen Querdruckfestigkeit nicht mit einem ähnlichen Anstieg der Traglast zu rechnen. Die dreiachsigen Druckspannungen wirken jedoch auch hier dem Entstehen von Rissen entgegen. Da die Radialspannung im Holz, die sich unter der Bewehrung aufbauen kann, durch die Querdruckfestigkeit des Holzes $f_{c,90}$ begrenzt ist, kann die maximale Ringspannung $\sigma_{\varphi,FVK}$ im Laminat mit der Kesselformel abgeschätzt werden.

$$\sigma_{\varphi,FVK} \approx -\frac{f_{c,90} \cdot r_{i,FVK}}{t_{FVK}} \tag{3.24}$$

Dies setzt voraus, dass die mechanische oder hygrische Beanspruchung eine hohe Querdehnung im Holz hervorruft. Da die Querdehnungen infolge mechanischer Beanspruchungen von der Stauchgrenze in Längsrichtung begrenzt werden, sind diese vergleichsweise gering. Bezüglich der Querdruckspannung infolge Quellung ist anzumerken, dass deren Höhe maßgeblich von der Feuchte und der Dichte abhängt. Für das Pressholz der untersuchten Formholzrohre wurden Quellspannungen längs und quer zur Verdichtungsrichtung von 2,4 N/mm^2 bzw. 1,5 N/mm^2 ermittelt, wobei nach zyklischem Quellen und Schwinden mit einer Verringerung dieser Werte zu rechnen ist. Folglich liegen die tatsächlichen Ringspannungen deutlich unter den nach Gl. (3.20) errechneten Werten. Der vereinfachte Berechnungsansatz verzichtet auf eine genaue Spannungsanalyse des Schichtenverbunds und auf eine Bruchhypothese für anisotrope Materialien. Zur Abschätzung der kritischen Spannung σ_{cr} von Formholzrohren wird folgende Vorgehensweise gewählt:

$$\sigma_{cr} = \min \begin{vmatrix} \sigma_{cr,I+II} \\ \sigma_{cr,III} \end{vmatrix} \text{ falls,}$$

<u>unbewehrte Rohre (REF):</u>

$\sigma_{cr} \leq \sigma_{cr,\varepsilon 90}$ bzw. $\varepsilon_{\varphi} \leq \varepsilon_{cr,\varphi}$

Dehnungskriterium

<u>faserverstärkte Rohre (FVK):</u>

$\sigma_{\varphi,\varepsilon 90} \leq f_{t,FVK}$

Spannungskriterium im Laminat

(3.25)

3.5.2.1.2 Materialien und Methoden

<u>Materialeigenschaften des verdichteten Holzes und des FVK</u>

Die Fertigung der Formholzrohre erfolgte nach dem in Abschn. 3.2.4 [262] beschriebenen Verfahren. Dazu wurden verdichtete Stäbe aus Fichte zu einer Platte verleimt. Ihr Verdichtungsgrad *V* betrug 25 %, was einer Verringerung der Höhe der Bohlen nach dem Pressen um eben diesen Betrag entspricht. Die mechanischen Eigenschaften der geleimten Pressholzplatten wurden in Biege- und Druckversuchen an Kleinproben (19x40x120 mm) ermittelt. Die in Tabelle 3.37 aufgeführten mechanischen Eigenschaften des verdichteten Holzes wurden nach DIN EN 408 [65] bestimmt (vgl. Tabelle 3.11 und Tabelle 3.12) oder sind der Literatur [244] entnommen. Poisson'sche Konstanten und E-Modul definieren sich aus folgendem Verhältnis $E_0 * \mu_{90,0} = E_{90} * \mu_{0,90}$, wobei der erste Index der Querdehnzahl die Lastrichtung und der zweite Index die zugehörige Verformung in transversaler Richtung vorgibt.

Tabelle 3.37: Materialeigenschaften von Pressholz und FVK

Material-eigenschaft	Symbol	Einheit	Fichtenpress-holz V = 25%	FVK Laminat		
				GFK [1]	GFK [2]	CFK [3]
Faserorientierung				UD	UD	UD
Faservolumenanteil	v_f	%	--	45	33	60
Rohdichte	ρ	kg/m^3	610 (40)*	1800	1700	1500 +
Biegefestigkeit	$f_{m,0}$	N/mm^2	105 (18,6)*	--	--	1670
Druckfestigkeit	$f_{c,0}$ $f_{c,90}$	N/mm^2	60,5 (6)* 7,5 (0,74)*	610 118	447 118	1470 168 +
Zugfestigkeit	$f_{t,0}$ $f_{t,90}$	N/mm^2	90 1,4	1062 31	779 31	2550 69
Scherfestigkeit	τ	N/mm^2	8.8	72	72	48 +
E-Modul	E_0 E_{90}	N/mm^2	15600 (2300)* 770 (320)*	38600 8270	26600 6900	135000 9650 +
Schubmodul	G	N/mm^2	840	4140	3000	4550 +
Poisson'sche Konstante	$\mu_{0,90}$, $\mu_{z,\varphi}$ $\mu_{90,0}$, $\mu_{\varphi,z}$	--	0,35 0,017	0,26 0,056	0,26 0,067	0,3 + 0,021 +
spezifische Druckfestigkeit	$f_{c,0}/\rho$	N/mm^2 / (kg/m^3)	0,11	0,34		0,98
spezifische Steifigkeit	E_0/ρ	N/mm^2 / (kg/m^3)	26	21		90

[1] GFK – empirische Kennwerte nach Tsai [252]
[2] GFK – abgeleitet aus GFK [1] und unter Berücksichtigung der Mischungsregel [247]
[3] CFK - TORAYCA T700S Datenblatt (TORAY Carbon Fibers America, Inc.)
+ abgeleitet aus Kennwerten von Tsai [252] für T300-F934
* Mittelwert aus 10 Versuchen (Standardabweichung)
z: axial (0°), φ: tangential, r: radial (90°) - transversal isotropes Material

Die Bewehrung der Formholzrohre erfolgte mit E-Glas- und Kohlenstofffasern (T700). Die Fasern wurden in eine Epoxidharz-Matrix von Voss-Chemie (LN-1) eingebettet. Der E-Modul des Epoxidharzes wird vom der Hersteller mit 3700 N/mm^2 angegeben. Die Materialkennwerte der Laminate in Tabelle 3.37 basieren auf Kennwerten von Tsai [252] für unidirektionale GFK- und CFK-Laminate. Um die Unterschiede im Faservolumengehalt zu berücksichtigen, wurden die Festigkeiten mit dem Verhältnis der Faservolumenanteile modifiziert. Beispielsweise wurde die Festigkeit des Laminates mit einem Faservolumengehalt von 33 % mittels eines Faktors von 33/45 abgemindert. Die elastischen Eigenschaften des GFK-Laminats wurden unter Verwendung der Mischungsregel [247] angepasst. Bei allen Kennwerten handelt es sich um mittlere Festigkeiten bzw. Steifigkeiten. Um die, für eine Bemessung der Bauteile erforderlichen, charakteristischen Kennwerte zu erhalten, sind diese mit verschiedenen Teilsicherheitsbeiwerten abzumindern. Nähere Angaben zu Sicherheitswerten für die Bemessung von FVK-Bauteilen sind [251] zu entnehmen.

Versuchsaufbau und Durchführung

Das Tragverhalten der Formholzrohre wurde in einer 6 MN Mauerwerkspresse untersucht. Die Belastung erfolgte weggesteuert mit einer Geschwindigkeit von 1,2 mm/min. Abb. 3.160 zeigt sowohl den Versuchsaufbau zur Prüfung einer 3,8 m CFK-Formholzstütze als auch die Probengeometrie inkl. Faserwicklung und Anordnung der Verformungs- bzw. Dehnungsmesser.

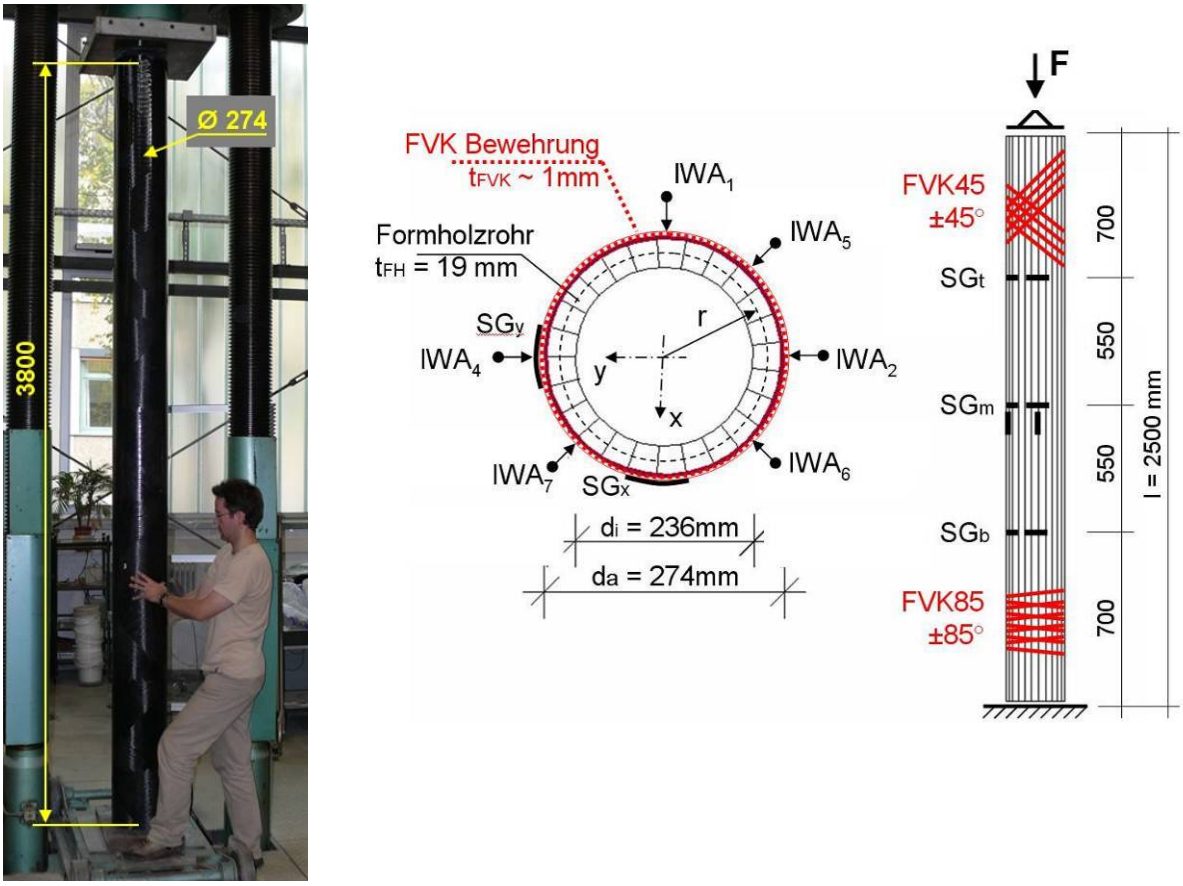


Abb. 3.160: Versuchsaufbau zur Prüfung eines CFK-Formholzrohres sowie Probengeometrie inkl. Anordnung der Messtechnik

Die Druckversuche wurden in Anlehnung an DIN EN 408 [65] durchgeführt. Die Lagerbedingungen am Stützenkopf und Stützenfuß sind Abb. 3.160 zu entnehmen. Die obere Druckplatte ist gelenkig gelagert, die untere starr, so dass die Stütze als nachgiebig eingespannt betrachtet werden kann.

Die Verformungen in axialer, tangentialer und radialer Richtung wurden mittels acht Dehnmessstreifen (SG) und acht induktiver Wegaufnehmer (IWA) aufgezeichnet. Die IWA wurden bei l/2 angeordnet und zur Aufzeichnung der Rohrdeformationen in radialer Richtung verwendet. Im Fall der Dehnmessstreifen (HBM 100/120 LY41; Kleber X60) wurden sechs in Umfangsrichtung und zwei in axialer Richtung orientiert (vgl. Abb. 3.160). Zusätzlich wurde ein optisches Messsystem (LIMESS VIC 3D) benutzt, um die 3-dimensionalen Verformungen der Rohroberfläche zu erfassen. Mittels digitaler Bildkorrelation konnten lokale und globale Beulformen erfasst werden.

Insgesamt wurden 33 Proben mit stützennahen Abmessungen von 1,8 m bis 3,8 m Länge geprüft, davon 9 unbewehrte Referenzrohre und 24 FVK-verstärkte Proben. Zusätzlich wurden 75 Rohrsegmente von 0,08 m bis 1 m Länge geprüft. Wie in Abb. 3.160 schematisch gezeigt, sind die Fasern in Winkeln von ±45°; ±85° oder aber ±7°/±45° zur Stützenachse orientiert. Detaillierte Angaben zu den verschiedenen FVK-Bewehrungen inkl. Fasertyp, Faserwinkel, Flächengewicht, Laminatdicke und Faservolumenanteil sind Tabelle 3.38 zu entnehmen. Die Dicke des Laminates t_{FVK} betrug ca. 1 mm und wurde anhand des Flächengewichtes und des Faservolumengehaltes v_f ermittelt. Die Formholzrohre haben eine Masse von ca. 10 kg je Meter Rohrlänge zzgl. 0,7 kg/m bis 1,5 kg/m FVK-Verstärkung. Die Querschnittsfläche des unbewehrten Formholzrohres (d_a = 274 mm, t_{FH} = 19 mm) beträgt 152 cm^2.

Auf Grund limitierter Pressengrößen ist die Länge der Rohre derzeit auf 2,5 m beschränkt. Um längere Rohre prüfen zu können, wurden zwei Rohre à 2,5 m mittels Keilzinkverbindung (KZV) zu einem 5 m Rohr verleimt. Als Leim wurde Resorcinharz verwendet. Die Länge der Zinken betrug 50 mm (vgl. Abb. 3.162).

3.5.2.1.3 Versuchsergebnisse

In Tabelle 3.38 sind die Ergebnisse der Druckversuche zusammengefasst. Unterschieden wurde zwischen zentrisch und exzentrisch belasteten Proben sowie zwischen Proben mit und ohne Vorschädigung (Riss). Angegeben sind die Anzahl der Proben, die Bruchlast und die Spannung bezogen auf die volle Querschnittsfläche. Anzumerken ist, dass Durchmesser und Wandungsstärke der Proben auf Grund von Herstellungstoleranzen um bis zu ±2 mm variieren. Bei den in Abb. 3.160 angegeben Querschnittswerten handelt es sich Mittelwerte.

Tabelle 3.38: Testmatrix und Versuchsergebnisse

Bezeichnung		FVK Verstärkung Type FVK	Faser-winkel °	Flächen-gewicht g/m²	Dicke t_{FVK} mm	Faser-volumen %	Proben-länge l mm	Bruchspannung ohne Riss Anzahl	F_u kN	σ_u N/mm²	exzentrische Last e = 60 mm Anzahl	F_u kN	σ_u N/mm²	vorgeschädigt mit Risslänge 1,5d Anzahl	F_u kN	σ_u N/mm²
	REF						2500	8	564	41,6	1	481	35,2			
Referenz	REF						800	2	653	43,7				1	532	39,8
(REF)	REF						500	3	608	47,6						
	REF						200	3	793	62,1						
	REF						80	5	832	64,7						
	GFK45 (W)	GFK	±45	2*410	1	33	2500	3	1019	61,7	1	602	35,0			
Glas	GFK45 (W)	GFK	±45	2*410	1	33	800	1	922	53,7				1	914	53,2
gewickelt	GFK45 (W)	GFK	±45	2*410	1	33	80	3	1031	60,2						
(W)	GFK85 (W)	GFK	±85	2*410	1	33	2500	6	952	58,5	2	647	38,9			
	GFK85 (W)	GFK	±85	2*410	1	33	800	5	903	54,1				3	827	49,2
	GFK85 (W)	GFK	±85	2*410	1	33	80	5	872	54,7						
Glas	GFK85 (BF)	GFK	±85	2*450	1	33	2500	1	740	45,3	2	651	39,8			
geflochten	GFK85 (BF)	GFK	±85	2*450	1	33	800	5	819	48,5				3	933	54,6
(BF)	GFK85 (BF)	GFK	±85	2*450	1	33	80	7	969	57,0						
Glas	GFK90 (KF)	GFK	90	900	1,4	25	2500	1	796	48,3	1	546	34,7			
Gestrick	GFK90 (KF)	GFK	90	900	1,4	25	800	2	818	48,9				3	732	44,2
(KF)	GFK90 (KF)	GFK	90	900	1,4	25	80	5	848	51,0						
	GFK090 (WF)	GFK	0/90	3*300	1,4	25	2500	3	761	55,9						
Glas	GFK090 (WF)	GFK	0/90	3*300	1,4	25	500	3	788	57,9						
Gewebe	GFK090 (WF)	GFK	0/90	3*300	1,4	25	200	3	884	64,9						
(WF)	GFK090 (WF)	GFK	0/90	3*300	1,4	25	80	7	903	66,3						
	CFK45 (W)	CFK	±45	2*300	0,55	60	3000	1	782	49,1	Keilzinkung					
	CFK45 (W)	CFK	±45	2*300	0,55	60	1800	1	809	50,8						
Carbon	CFK85 (W)	CFK	±85	2*300	0,55	60	3800	1	638	39,5	Keilzinkung					
gewickelt	CFK85 (W)	CFK	±85	2*300	0,55	60	900	1	772	47,8						
(W)	CFK85 (W)	CFK	±85	2*300	0,55	60	80	1	744	46,0						
	CFK745 (W)	CFK	±7/±45	4*300	1,1	60	3800	1	985	59,1	Keilzinkung					
	CFK745 (W)	CFK	±7/±45	4*300	1,1	60	900	2	1088	65,2						
	CFK745 (W)	CFK	±7/±45	4*300	1,1	60	900	1	1157	69,4	Keilzinkung					
	CFK745 (W)	CFK	±7/±45	4*300	1,1	60	80	1	1121	67,2						
Summe								**91**			**7**			**11**		

Bei kurzen Segmenten mit Längen von 0,08 m ergeben sich kaum Unterschiede zwischen bewehrten und unbewehrten Proben. Die mittlere Druckfestigkeit von 34 Proben (REF und FVK) beträgt 59,1 N/mm^2. Damit entspricht deren Druckfestigkeit etwa der Festigkeit fehlerfreier Kleinproben ($f_{c,0,mean}$ = 60,5 N/mm^2 - vgl. Tabelle 3.37).

Im Vergleich zu den kurzen Segmenten nimmt mit zunehmender Stablänge (l = 2,5 m) die Traglast der Referenzproben um 30 % ab. Bemerkenswert ist, dass FVK-bewehrte Druckstäbe (l ≥ 1,8 m) nahezu 100 % der Festigkeit kurzer Segmente und somit die Druckfestigkeit fehlerfreier Kleinproben erzielen. Daraus folgt, dass der limitierende Parameter die Druckfestigkeit des Holzes parallel zur Faser ist. Dies hat mehrere Gründe: (1) Bei Druck wirken sich Wuchsmerkmale wie z. B. Äste in geringerem Maße auf die Festigkeit aus als bei Zug. (2) Die Spannungen verteilen sich entsprechend den Steifigkeiten, so dass Bereiche hoher Dichte auch hohe Spannungen übertragen. (3) Die Duktilität des Holzes bei Druck ermöglicht eine Umlagerung der Spannung, so dass nach dem Versagen einer Holzlamelle der Sprödbruch unterbleibt. (4) Die Bewehrung hat einen dreiachsigen Spannungszustand zur Folge, der sich positiv auf die Traglast auswirkt.

Die Traglastunterschiede zwischen bewehrten Proben mit l = 0,5 m und 2,5 m sind gering, woraus folgt, dass zur Ermittlung der Traglast gedrungener Stützen eine Probenlänge von l ≥ 0,5 m genügt, vorausgesetzt, ein Beulen der Struktur tritt nicht auf.

Um den Einfluss von Imperfektionen oder aber möglicher Vorschädigungen der Rohrwandung abschätzen zu können, wurden 11 Proben mit definiertem Längsriss geprüft. Dazu wurde per Handkreissäge je Probe ein 0,3 m langer Schnitt eingebracht, wobei Formholz und Bewehrung vollständig durchtrennt wurden. Die Proben mit einer Länge von 0,8 m waren vergleichsweise kurz. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass der Einfluss der Risse/Imperfektionen gering ist. Der Riss im unbewehrten Rohr führte zu einer Abnahme der Traglast um ca. 10 %. Im Fall der bewehrten Proben wurden nahezu keine Traglastunterschiede festgestellt. Ursache für die vergleichsweise hohen Traglasten der vorgeschädigten Profile ist die relativ starke Rohrwand, die ein Ausbeulen der Struktur verhindert. Unter der Annahme, dass Imperfektionen für Zylinder mittlerer Dicke unkritisch sind [286], ist jedoch auch der Einfluss der Rand- bzw. Lagerbedingung zu betrachten. Im Auflagerbereich kommt es auf Grund der unverschieblichen Lagerung der Rohrwand infolge Reibung zu Biegemomenten. Nach Jakobi [249] sind Randstörungen in einem Abstand von mindestens dem Betrag des Radius r abgeklungen. Demzufolge sind Probenlängen von l ≥ 3r ausreichend, um den Einfluss der Lagerung auszuschließen. Dies eröffnet die Möglichkeit, eine Vielzahl von Experimenten inkl. Bewehrungsvarianten an vergleichsweise kurzen Proben durchführen zu können.

Im Gegensatz zu der Vorschädigung der Struktur durch Risse, ist der Einfluss einer exzentrischen Belastung der Rohre deutlich. Der außermittige Lastangriff von 60 mm am Stützenkopf (exzentrische Kalottenlagerung) führte bei den 2,5 m langen Proben zu einer Abnahme der Traglast um ca. 30 % (maximal 43 %, minimal 12 %). Die Proben versagten im Bereich der Lasteinleitung infolge der dortigen Lastkonzentration.

Abb. 3.161 zeigt die Kraft-Verschiebungs-Kurven verschiedener Formholzstützen. Um die unterschiedlichen Stablängen zu berücksichtigen, ist die Verformung (mm/m) je Laufmeter Rohr angegeben. Die mittlere Traglast F_z der Referenzproben wurde zu 564 kN bestimmt. Dies entspricht einer mittleren Druckspannung von 41,6 N/mm^2. Das Last-Verformungs-Verhalten der unbewehrten Rohre ist bis zum Bruch linear-elastisch. Die Duktilität D ist gemäß DIN 12512 [1] als Verhältnis von Grenzverschiebung zu Fließverschiebung definiert. Für die Referenzproben ergibt sich demnach für D ein Wert von 1,0.

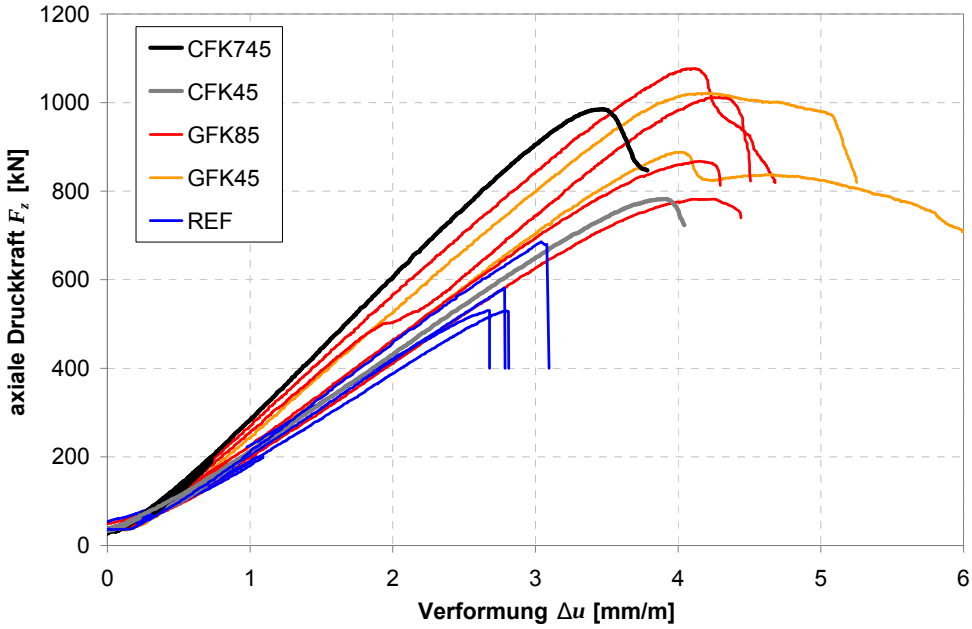


Abb. 3.161: Kraft-Verschiebungs-Kurven verschiedener Stützen

Im Vergleich zu den Referenzproben erzielten die bewehrten Formholzrohre, mit durchschnittlich 893 kN, deutlich höhere Traglasten. Die größten Traglaststeigerungen wurden von den Probekörpern mit steilem Faserwinkel ±45° erzielt. Bezogen auf die unbewehrten Rohre konnte die Traglast um über 50 % gesteigert werden. Hinsichtlich des Bruchverhaltens erweisen sich die Serien mit ±45° Faserorientierung als besonders duktil. Für die Formholzrohre GFK45 und GFK85 wurde *D* zu 1,35 bzw. 1,08 ermittelt. Der Einfluss der Wicklung auf die Längssteifigkeit der Rohre ist auf Grund des dünnwandigen Laminates gering.

Um die Unterschiede im Tragverhalten der Rohre zu verdeutlichen, zeigt Abb. 3.162 verschiedene Bruchbilder bewehrter und unbewehrter Proben. Im Fall der Referenzproben ist die Abnahme der Traglast über der Stützenlänge auf das Spalten des Holzes infolge der Querzugspannung am Umfang zurückzuführen (vgl. Gl.(3.23)). Abb. 3.162a zeigt das in Einzelsegmente gespaltene Formholzrohr.

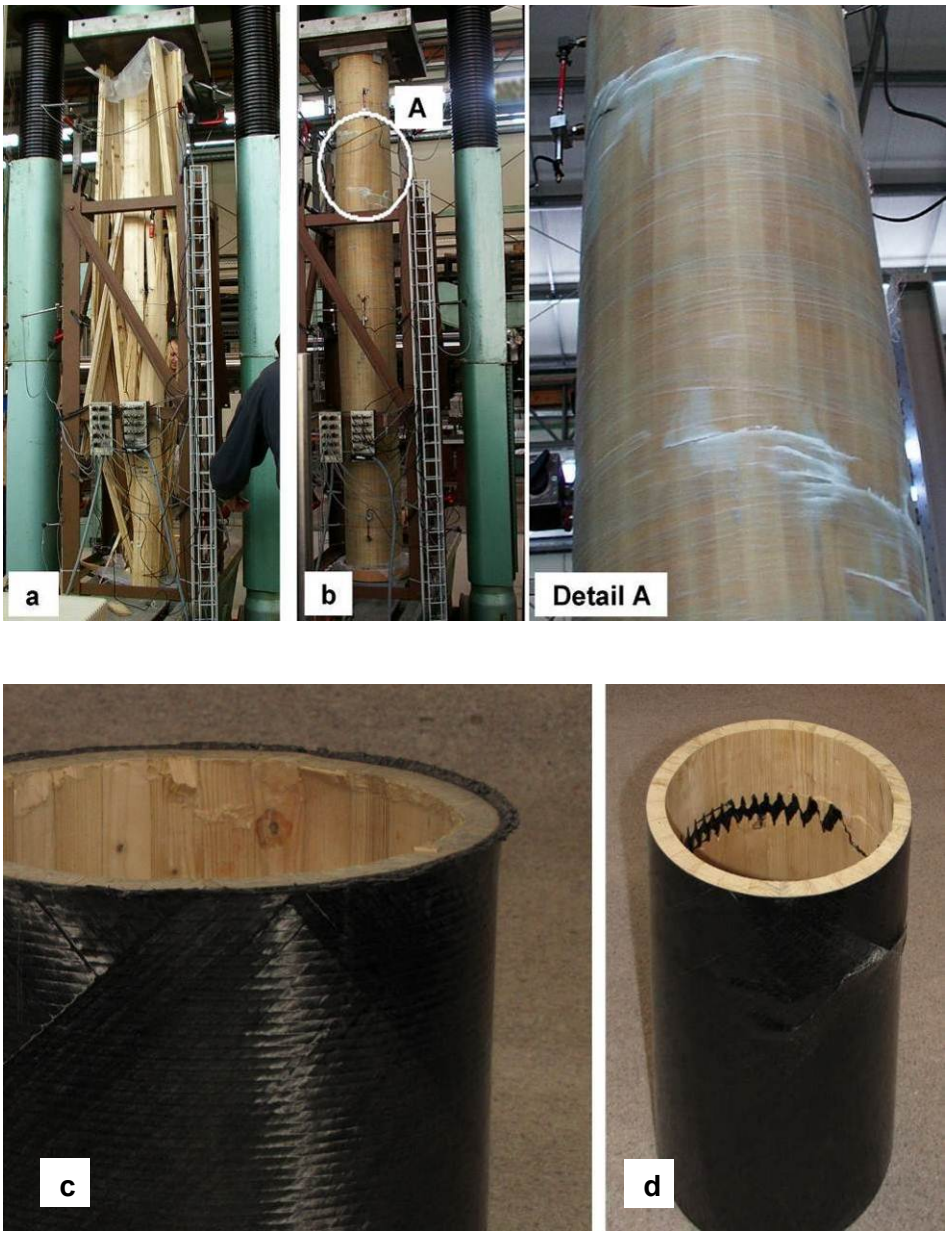


Abb. 3.162: Bruchbilder der Formholzrohre: (a) in Segmente gespaltene Referenzprobe, (b) gestauchte Probe GFK85 inkl. Detail A (c) lokale Stauchung des Holzes und der CFK-Wicklung (d) Stauchung des Verbundquerschnitts am Zinkengrund

Im Gegensatz zur Referenzprobe zeigen die bewehrten Formholzrohre duktiles Verhalten. Ursache des Versagens ist die Druckfestigkeit des Holzes parallel zur Faser. Das Versagen kündigt sich durch die Bildung von Druckfalten an und führt schließlich zum lokalen Einknicken der Wandung (vgl. Abb. 3.162b).

Die Unterschiede im Tragverhalten von GFK- und CFK-bewehrten Formholzrohren sind gering, da die 45°- bzw. 85°-Wicklungen nur unwesentlich an der Lastabtragung beteiligt werden. Dies ändert sich im Fall der CFK745-Proben mit 50 % Faseranteil in 7°-Richtung, d. h. mit annähernd in Kraftrichtung orientierten Fasern. Dieses Laminat beteiligt sich auf Grund der hohen Steifigkeit parallel zur Stabachse an der Lastabtragung. Folge ist ein Anstieg der Traglast um ca. 20 % als auch ein anderes Bruchbild. Wie Abb. 3.162c zeigt, versagt der Verbundquerschnitt an der Kontaktfläche zwischen Rohr und Kalotte. Deutlich erkennbar ist die Stauchung der Holzfasern

sowie das Ausweichen der CFK-Wicklung. Das am Rand geschnittene 45°-Laminat ist nicht in der Lage, das 7°-Laminat zu stützen, sodass dieses seitlich ausweicht bzw. ausknickt. Um das Versagen an der Lasteinleitung zu verhindern, können zusätzliche 90°-Umschnürungen aufla-miniert werden oder aber die Stützenenden lokal z. B. mit Polymerbeton vergossen werden. Ein Verguss der Rohre hat zudem den Vorteil, dass eventuelle Passungenauigkeiten ausgeglichen werden und somit kein Schlupf der Verbindung auftritt. Die Druckfestigkeit solcher Vergussmör-tel wird mit > 100 N/mm^2 angegeben und liegt damit deutlich über der Festigkeit des Verbund-querschnitts von max. 67 N/mm^2. Abb. 3.190 zeigt einen in Beton/Polymerbeton eingegossen Stützenfuß. Die Traglast der 0,9 m Probe CFK745 inkl. Keilzinkenverbindung lag bei 1157 kN.

Ein weiterer Parameter, der das Tragverhalten von Holzkonstruktionen stark beeinflusst, sind Verbindungen (vgl. Abschn. 3.5.3). Im Gegensatz zu Verbindungen mit mechanischen Verbin-dungsmitteln können geleimte Anschlüsse annähernd die Festigkeiten ungeschwächter Quer-schnitte erreichen. Im Fall von Keilzinkenverbindungen kann davon ausgegangen werden, dass von der geleimten Verbindung mindestens 80 % der Festigkeit des ungeschwächten Bauteils erzielt werden (DIN 1052:2008 [2]). Die geprüften Keilzinkenverbindungen der Proben CFK45 und CFK85 bestätigen dies. Die Stützen erreichten 92 % der Festigkeit kurzer Segmente. Die Bauteile versagen im Bereich der Keilzinkung infolge Stauchung des Verbundquerschnitts am Zinkengrund (vgl. Abb. 3.162d). Bemerkenswert ist, dass die 3,8 m Probe CFK745 nicht im Be-reich der KZV, sondern an der Krafteinleitung versagt. Dies bedeutet, dass das Laminat in der Lage ist, die Schwächung am Zinkengrund auszugleichen.

Für eine grundlegende Analyse des Tragverhaltens der Profile sind die aufgezeichneten Ver-formungen und Dehnungen heranzuziehen. Die mittels induktiver Wegaufnehmer erfassten ra-dialen Verformungen der Querschnitte lassen eine zunehmende Ovalisierung des Kreisquer-schnitts erkennen (vgl. Abb. 3.163). Zur besseren Lesbarkeit wurden die Messwerte mit dem Faktor 25 skaliert.

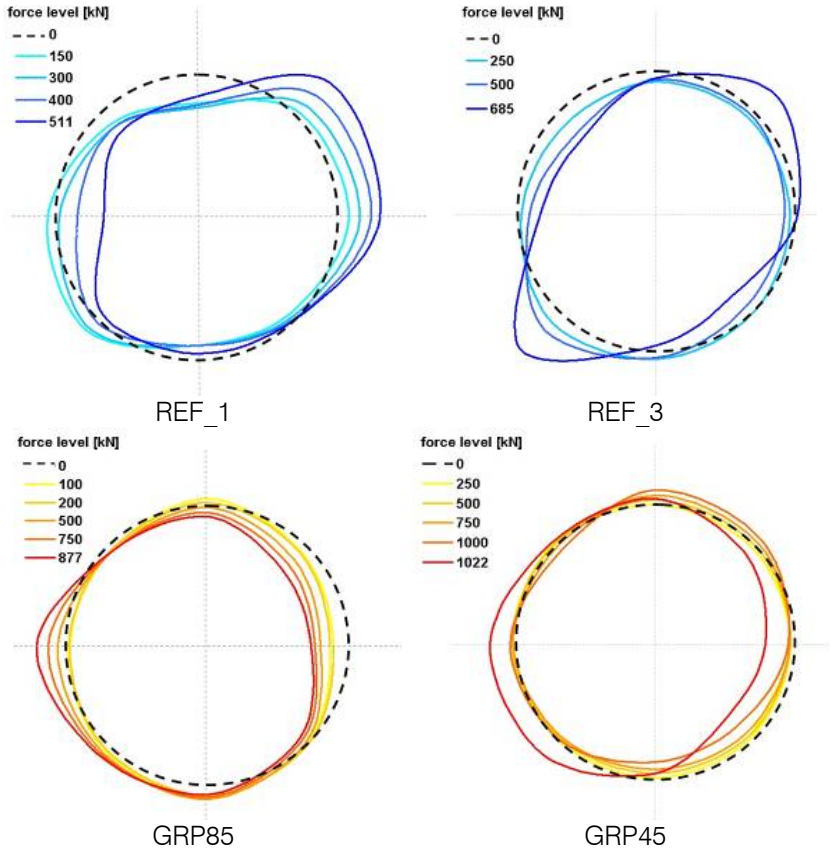


Abb. 3.163: Querschnittsverformungen bei verschiedenen Laststufen REF und GFK85

Die Verformungsbilder der vier Proben lassen erkennen, dass die Profile mit zunehmender Belastung ovalisieren, wobei die Ovalisierung der Referenzproben, auf Grund der vergleichsweise geringen Steifigkeit in Umfangsrichtung, deutlicher ausfällt. Die Ursache für die Deformation der Querschnitte sind Biegemomente, die auf zwei mögliche Faktoren zurückzuführen sind: (1) die Inhomogenität des Materials und (2) die anfängliche Schiefstellung und/oder Krümmung der Stütze. Ein Vergleich mit Abb. 3.165 und dem numerischen Modell (vgl. Abb. 3.260) deutet darauf hin, dass sich Verformungen ähnlich der 1. Beulform ausbilden.

Die Querdehnungen, welche von der Ovalisierung hervorgerufen werden, führen zu Querzugversagen (vgl. Abb. 3.162a). Mit der mittleren Querdruckfestigkeit des Formholzes von 7,5 N/mm^2 (vgl. Tabelle 3.37) lässt sich nach Gl. (3.24) die zulässige Spannung der Wicklung $\sigma_{\varphi,FVK}$ in Umfangsrichtung abschätzen. Der Grenzwert der Ringspannung liegt demnach bei 1035 N/mm^2 (= 7,5*138/1) und damit 33 % über der Zugfestigkeit der GFK-Wicklung von 779 N/mm^2 (vgl. Tabelle 3.37). Demzufolge beträgt die erforderliche Dicke des Laminats t_{FVK} ca. 1,3 mm. Es ist jedoch unrealistisch anzunehmen, dass ein Querdruck von 7,5 N/mm^2 aktiviert werden kann.

Die Ovalisierung des Querschnitts kann die Traglast der Profile deutlich herabsetzen, da sich die lokalen Spannungen mit den Spannungen infolge Querdehnung überlagern. Abb. 3.164 zeigt die in Umfangs- und Axialrichtung aufgezeichneten Spannungs-Dehnungs-Beziehungen verschiedener Profile.

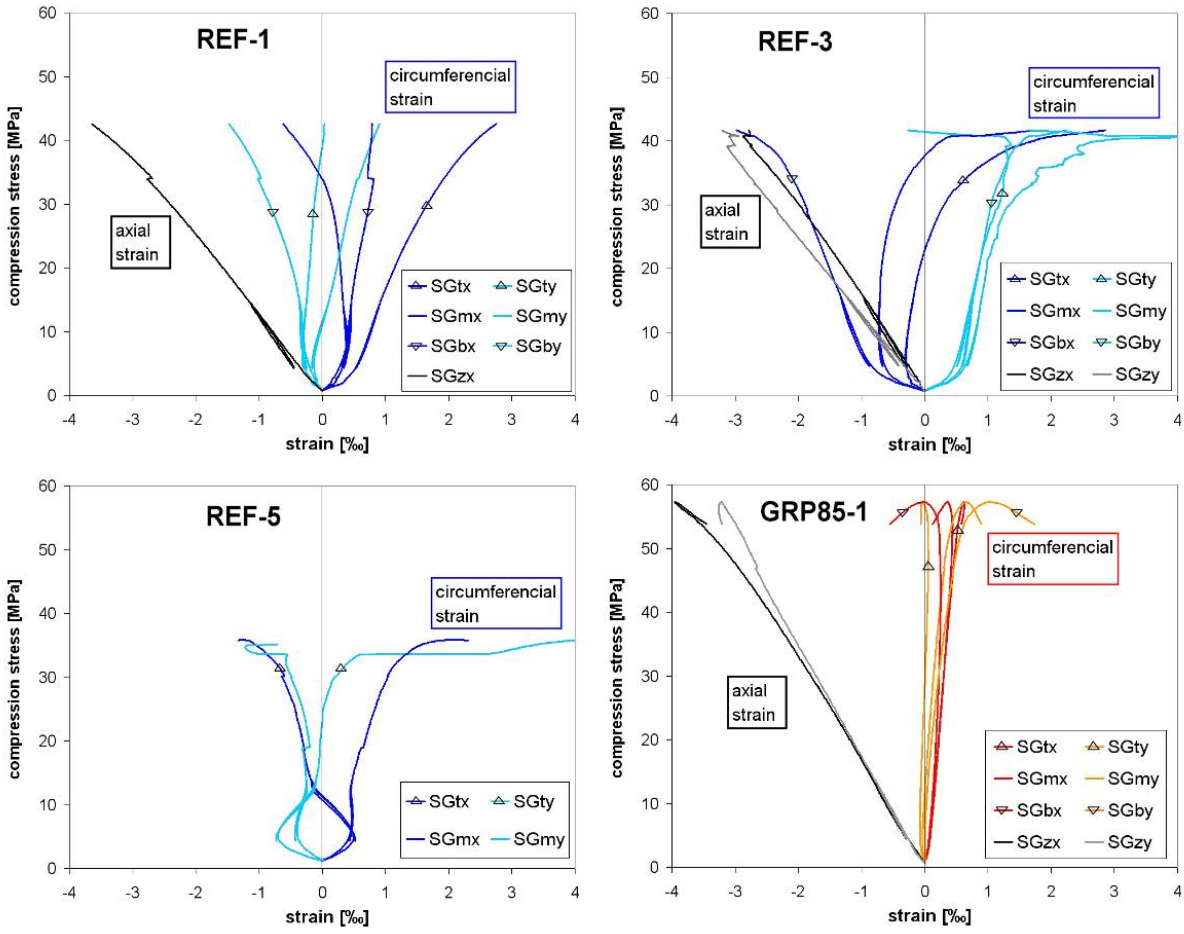


Abb. 3.164: Spannungs-Dehnungs-Kurven in Axial- und Umfangsrichtung der Profile

Die Kurven zeigen deutliche Unterschiede bzgl. der Dehnungen in Umfangsrichtung zwischen REF und bewehrten Proben. Die Spannungs-Dehnungs-Kurven der bewehrten Proben (z. B. GFK85-1) bestätigen die analytischen Ansätze. Die Dehnungen in Umfangsrichtung sind positiv und steigen annähernd linear mit der Spannung. Bei einer Druckspannung von 30 N/mm^2 wurden durchschnittliche Dehnungen von ε_φ = 0,20 ‰ in Umfangsrichtung und ε_z = -1,76 ‰ in axialer Richtung gemessen. Demnach ergibt sich für den Formholz-GFK-Verbund eine Querdehnzahl $\mu_{z,\varphi}$ von 0,11 ($\mu_{z,\varphi} = -\varepsilon_\varphi / \varepsilon_z$). Die Querzugspannungen $\sigma_{t,GFK}$ im GFK85-Laminat (Umfangsrichtung) sind gering. Nach Hook'schem Gesetz ergibt sich für eine durchschnittliche Querdehnung von 0,5 ‰ (bei Erreichen der Traglast) eine Zugspannung von ca. 14 N/mm^2. Wird die maximale Dehnung von 1,74‰ (SG_{by}) zu Grunde gelegt, so ergibt sich eine maximale Spannung von 50 N/mm^2. Dies bedeutet, dass nicht einmal 10 % der Festigkeit des Laminats ausgenutzt wurden.

Um das weitaus komplexere Trag-Verformungs-Verhalten der unbewehrten Formholzrohre zu analysieren, wurden drei Proben ausgewertet (vgl. Abb. 3.164 - REF). Bei einer Druckspannung von 30 N/mm^2 wurden Längsdehnungen ε_z von -2,1 ‰ gemessen. Demnach ergibt sich für das Formholzrohr ein mittlerer E-Modul von 14300 N/mm^2. Für fehlerfreie Kleinproben wurde ein Wert von E_0 = 15600 N/mm^2 ermittelt (vgl. Tabelle 3.37). Das Verformungsverhalten der Referenzproben ist durch starke Anfangsverformungen gekennzeichnet, die sich bei Spannungen unterhalb von 5 N/mm^2 einstellen. Da die Dehnungen in Umfangsrichtung je nach Anordnung (X oder Y) umgekehrte Vorzeichen aufweisen, kann davon ausgegangen werden, dass der Querschnitt ovalisiert und die Verformungsfigur der 1. Biege-Eigenform ähnelt.

Nach Einstellung der Eigenform erreicht die Stütze einen Gleichgewichtszustand, und die Verformungen steigen linear entsprechend der Beanspruchung. Bei Druckspannungen über 30 N/mm^2 steigen insbesondere die Dehnungen in Umfangsrichtung überproportional an. Es ist anzunehmen, dass ein starkes Risswachstum einsetzt, welches im Spalten der Querschnitte endet.

Die Ingenieurkonstanten für einen symmetrischen Formholz-FVK-Verbund können anhand der Nachgiebigkeitsmatrix [a] berechnet werden. Diese ist die Inverse der Steifigkeitsmatrix [A] des Laminats in Plattenebene ($[a] = [A]^{-1}$). Die effektive Steifigkeit des Verbundwerkstoffes berechnet sich aus den Einzelsteifigkeiten der DU-Laminate sowie deren Orientierung – Details siehe in [252]. Da die Ingenieurkonstanten dickenunabhängig sind, ist die Nachgiebigkeitsmatrix zu normieren ($[a^*] = t \cdot [a]$), um die effektiven Konstanten zu erhalten. Diese Steifigkeiten können dann mit den Kennwerten anderer Materialien verglichen werden (vgl. Tabelle 3.39). Die Ingenieurkonstanten sind wie folgt definiert: $E_0 = 1/a_{11}^*$; $E_{90} = 1/a_{22}^*$; $G = 1/a_{33}^*$; $\mu_{0,90} = -a_{21}/a_{11}$; etc.

Tabelle 3.39: Ingenieurkonstanten verschiedener Materialien

Ingenieur-konstanten	Formholz REF	FH-GFK85	FH-GFK45	FH-CFK45	FH-CFK745	Stahl
E_0 [N/mm^2]	15600	15350	15490	15710	18970	210000
E_{90}	770	2300	1410	1880	2100	
G [N/mm^2]	840	980	1240	1820	1920	81000
$\mu_{0,90}$, $\mu_{z,\varphi}$	0.350	0.154	0.430	0.619	0.590	0.3
$\mu_{90,0}$, $\mu_{\varphi,z}$	0.017	0.023	0.039	0.074	0.065	

Die für GFK85 im Experiment ermittelte Querdehnzahl $\mu_{z,\varphi}$ von 0,11 wird vom berechneten Wert ($\mu_{0,90}$ = 0,154) bestätigt.

Um die, auf Basis der Messungen (IWA und SG), gezogenen Schlussfolgerungen zu verifizieren, werden die Auswertungen der optischen Messung herangezogen. Gewählt wurde ein Zylinderkoordinatensystem, um die Relativverschiebungen in radialer Richtung Δr darstellen zu können. Abb. 3.165 zeigt beispielhaft für die Proben REF und GFK85 die Verformungen der Rohrwand für verschiedene Laststufen.

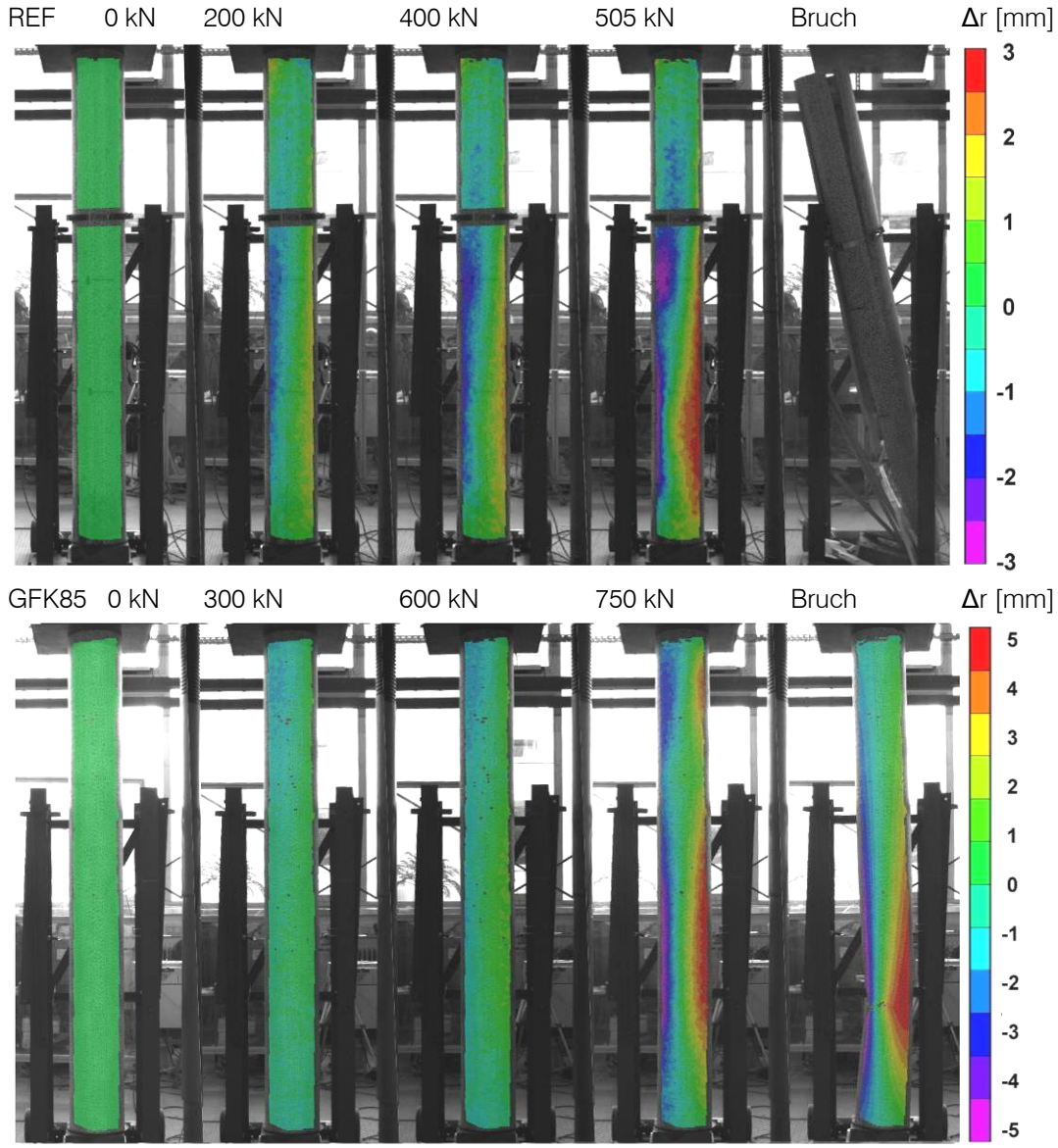


Abb. 3.165: Rohrverformungen infolge Laststeigerung (REF und GFK)

Die Abbildungen zeigen für beide Rohre ein globales Knicken, wobei die Referenzprobe im mittleren Bereich auch lokal hohe Verformungen aufweist. Bemerkenswert ist, dass das bewehrte Profil erst bei Druckkräften über 600 kN nennenswerte Verformungen zeigt.

Abb. 3.166 zeigt die Auswertung der optischen Messung für vorgeschädigte Rohrsegmente (REF und GFK85 inkl. Riss). Wie gezeigt, öffnen sich die Profile mit steigender Belastung, wobei die Relativverschiebungen in radialer Richtung Δr mit < 1 mm gering sind. Die Bruchbilder lassen erkennen, dass die REF-Probe zwar spröde versagt, jedoch an den Rändern gehalten wird, so dass kein Zerbersten wie bei den 2,5 m Proben beobachtet werden kann. Ein sprödes Versagen bzw. ein erkennbarer Rissfortschritt tritt selbst bei deutlicher Deformation (Δr > 8mm) des Querschnitts der Probe GFK85 nicht auf.

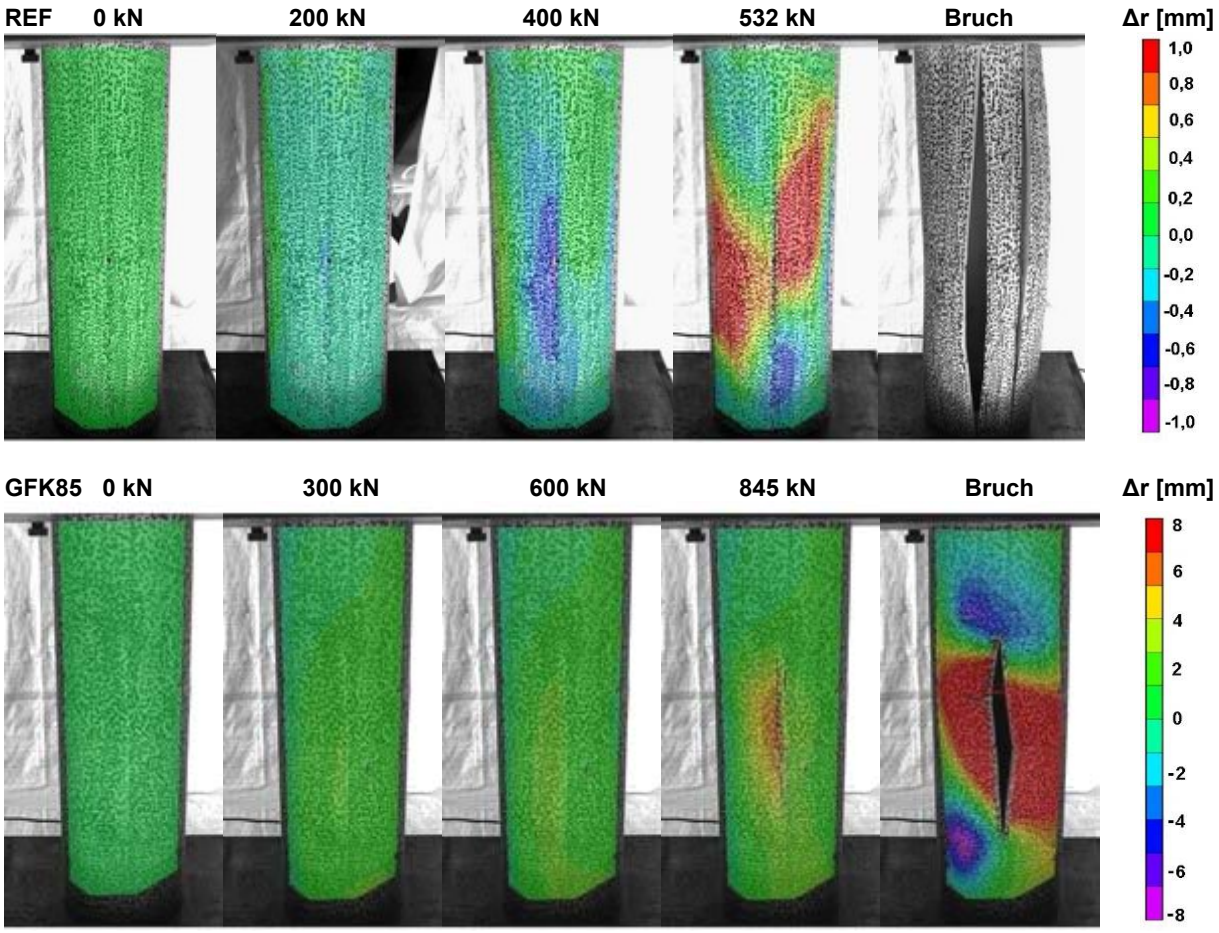


Abb. 3.166: Verformungen geschädigter Rohrsegmente bei verschiedenen Laststufen (positives Vorz. bei Ausbauchung)

3.5.2.1.4 Vergleich der analytischen Berechnungen vs. Experiment

Zur Verifizierung der Rechenmodelle wurden die max. Druck- bzw. Knickspannungen aller Probekörper herangezogen und diese in Abhängigkeit der Schlankheit *l/r* in Abb. 3.167 dargestellt. Die Trendlinie der Funktion $y = cx^b$ extrapoliert die gemessenen Spannungen der Referenzproben.

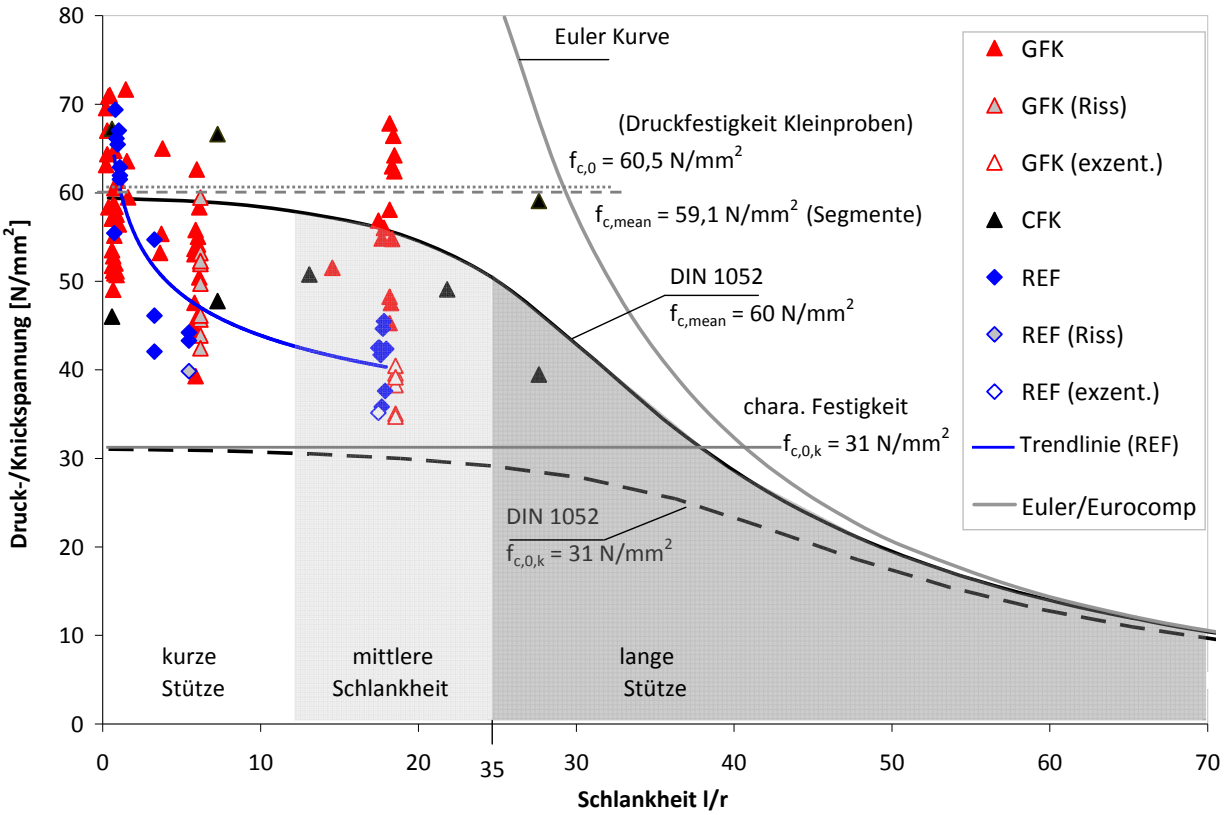


Abb. 3.167: Maximale Druckspannung der Formholzstützen als Funktion der Schlankheit - Experiment und Berechnung

Die in Abb. 3.167 angegebenen Kennlinien wurden nach dem Bemessungsansatz (vgl. Gl. (3.25)) ermittelt. Die Versuchs- und Berechnungsergebnisse stimmen für die faserverstärkten Formholzrohre gut überein. Den Berechnungen nach Euler und der DIN 1052 [2] liegt der gelenkig gelagerte Stab und die mit dem Teilsicherheitsbeiwert abgeminderten Steifigkeitskennwerte von BSH GL36h zugrunde. Des Weiteren wurden die mittlere Druckfestigkeit der Rohrsegmente ($f_{c,mean}$ = 60 N/mm²) bzw. die charakteristische Druckfestigkeit eines GL36h ($f_{c,0,k}$ = 31 N/mm²) in Ansatz gebracht. Bei den Referenzproben ergeben sich teils erhebliche Unterschiede, die auf die großen Streuungen der Querzugfestigkeit zurückzuführen sind. Auf Grund der schwer zu berechnenden Traglasten unbewehrter Hohlprofile ist eine Bemessung nach dem Ersatzstabverfahren nicht zu empfehlen, es sei denn, die Wandstärke ist groß genug, um ein Spalten bzw. sprödes Versagen der Bauteile ausschließen zu können.

Der kritische Punkt, d. h. der Übergang von Stütze mittlerer zu großer Länge, liegt bei etwa 66 % der kritischen Spannung gedrungener Stäbe [261]. Dieser wird bei einer Stablänge von ca. 5 m erreicht. Auf Grund von geometrischen Einschränkungen hinsichtlich der Prüftechnik, konnten nur Profile bis 3,8 m Länge geprüft werden.

3.5.2.1.5 Schlussfolgerungen

In einem umfangreichen Versuchsprogramm wurden insgesamt 109 Rohrprofile unterschiedlicher Schlankheitsgrade, axial oder exzentrisch auf Druck beansprucht. Zu Referenzzwecken wurden 23 Formholzprofile ohne Bewehrung geprüft. Die 86 faserbewehrten Rohre wurden in verschiedenen Laminiertechniken (Flecht-, Wickel- und Handlaminierverfahren) armiert. Abb. 3.168 zeigt den Wickelprozess eines 5 m langen keilgezinkten Formholzrohres bei SGL Carbon.



Abb. 3.168: Wicklung der 5 m langen Formholzrohre bei SGL Carbon

Folgende Parameter und deren Einfluss auf das Trag-Verformungs-Verhalten der Profile wurden untersucht:

a) Fasertyp (Glas- und Kohlefasern)
b) Faserorientierungen (±7°, ±45°, ±85° und 0°/90°) sowie diverse Kombinationen
c) Laminatdicke (t = 0,55 mm bis 1,1 mm)
d) Art der Belastung (zentrisch und exzentrisch mit e = 60 mm)
e) Imperfektionen wie z. B. Längsrisse von 300 mm Länge
f) Schlankheit (Probenlängen von 80 mm bis 3800 mm)
g) Verbindungen (Rohrverlängerung mittels Keilzinkverbindung – AP 4.3)

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass bereits unverstärkte Formholzrohre relativ hohe Druckkräfte abtragen können, wegen der geringen Querzugfestigkeit des Holzes aber zu sprödem Versagen neigen. Die mittlere Traglast der Referenzproben von 2,5 m Länge lag bei 564 kN. Dies entspricht einer mittleren Druckspannung von 41,6 N/mm^2. Das Last-Verformungs-Verhalten ist bis zum Bruch linear-elastisch.

Im Vergleich zur Referenzprobe erzielen die faserverstärkten Formholzrohre deutlich höhere Traglasten und ein duktiles Verhalten. Im Mittel wurden Traglasten von 893 kN erzielt. Bezogen auf die unbewehrten Rohre, bedeutet dies einen Anstieg der Traglast um über 50 %. Ferner belegen die Versuche, dass bereits ein geringer Bewehrungsgrad Traglast und Duktilität der Formholzrohre signifikant verbessert. Dies ist damit zu erklären, dass ein flacher Steigungswinkel des Wickelverbundes der Spannung in Umfangsrichtung eine höhere Querfestigkeit entgegensetzt, so dass die Druckfestigkeit des Holzes parallel zur Faser besser ausgenutzt werden kann.

In Bezug auf die Punkte a) bis g) kann zusammengefasst werden:

a) Der Fasertyp hat keinen erkennbaren Einfluss auf das Tragverhalten der Rohre, vorausgesetzt, die Bewehrung wirkt primär als Querzugverstärkung (±45° und ±85°). Grund dafür ist, dass die hohen Festigkeiten sowohl von Glas- als auch Kohlefasern nicht ausgenutzt werden und dementsprechend nicht traglastrelevant sind.

b) Die hohe Steifigkeit der Kohlefasern kann erst bei faserparalleler Orientierung (in Axialrichtung ±7°) genutzt werden. In diesem Fall wurden ±45°-Faserwicklungen zur Stützung der ±7°-Fasern sowie als Querzugverstärkung eingesetzt. Diese Faserwinkelkombination hat sich als hochleistungsfähig erwiesen. Das Versagen tritt in diesem Fall weder in den Keilzinkenverbindungen noch im Rohrquerschnitt, sondern an der Krafteinleitung auf (Zerdrücken der geschnittenen Fasern). Hinsichtlich der Duktilität erweisen sich die Probekörper mit ±45°-geneigten Verstärkungsfäden als besonders geeignet. Der Unterschied zwischen ±45°- und ±85°-Wicklungen ist jedoch gering.

c) Hinsichtlich der Laminatdicke sind zwei Kategorien zu unterscheiden: c1) ausreichende Faserbewehrung in Umfangsrichtung – Folge: Druckversagen/Einknicken der Rohrwandung; aufgetreten bei: nahezu allen bewehrten Proben; c2) ausreichende Faserbewehrung in Umfangs- und Längsrichtung – Folge: Druckversagen/Stauchen der Fasern an der Krafteinleitung; aufgetreten bei: kohlefaserbewehrten Proben mit Faserorientierung ±7°/±45° und einer Laminatdicke von 1,1 mm.

d) Eine exzentrische Belastung der Profile (Ausmitte 60 mm) führt bei unbewehrten und bewehrten Proben zu einer Abnahme der Traglast um bis zu 40 %.

e) Der Einfluss von Imperfektionen (per Handkreissäge eingebrachte Längsschnitte von 300 mm Länge) ist gering. Risse in unbewehrten Proben führten zu einer Abnahme der Traglast um ca. 10 %. Im Fall der bewehrten Proben sind nahezu keine Traglastunterschiede feststellbar. Ursache für die vergleichsweise hohen Traglasten der vorgeschädigten Profile ist die relativ starke Rohrwand, die ein frühzeitiges Ausbeulen der Wandung verhindert.

f) Der Einfluss der Probenlänge (Knicklänge) ist nur bei unbewehrten Rohren, infolge des spröden Versagens, signifikant. Mit zunehmender Stablänge (bis 2,5 m) nimmt die Traglast der unbewehrten Referenzproben um ca. 30 % im Vergleich zu fehlerfreien Kleinproben ab. FVK-bewehrte Druckstäbe erzielen nahezu die Druckfestigkeit fehlerfreier Kleinproben. Die Traglastunterschiede zwischen den Proben mit Längen von 0,5 m bis 2,5 m sind gering, woraus folgt, dass zur Ermittlung der Traglast gedrungener Stützen eine Mindestprüflänge von $l \geq 0{,}5$ m ausreichend ist. Da ein Knicken nach Euler erst ab Rohrlängen von über 5 m eintritt, ist der Längeneinfluss entsprechend gering. Mit steigenden Rohrlängen steigt lediglich die Anzahl der Fehlstellen (Äste etc.). Dies führt im Fall der bewehrten Proben zu tendenziell niedrigeren Traglasten.

g) Verbindungen haben auf Grund der damit einhergehenden Querschnittsschwächung einen Einfluss auf das Tragverhalten der Profile. Die Traglast der keilgezinkten Profile liegt bei ca. 92 % eines nicht gestoßenen Rohres.

Zur Abschätzung der Traglast faser- und textilbewehrter Formholzrohre eignet sich der Bemessungsansatz nach DIN 1052 [2] in Ergänzung einfacher Formeln. Auf Grund des spröden Versagens der vergleichsweise dünnwandigen Profile kann das Tragverhalten unbewehrter Formholzrohre mit den üblichen Bemessungsansätzen jedoch nicht beschrieben werden.

3.5.2.2 Druckversuche an Hohlkastenprofilen

Neben dem Formholzrohr wurden bewehrte und unbewehrte Hohlkastenprofile aus Fichtenholz (vgl. Abb. 3.169) im Druckversuch geprüft. Die Hohlkästen hatten eine Höhe von 300 mm und eine Breite von 180 mm. Wie gezeigt, wurden die 40 mm breiten Brettlamellen der Sortierklasse C24 mittels Nut und Feder zu Kästen verleimt. Die Querschnittsfläche der Hohlkasten ist mit 320 cm^2 etwa doppelt so groß wie jene der Formholzprofile. Genaue Angaben zu den Querschnittsabmessungen sowie zur Bewehrung können Tabelle 3.44 entnommen werden. Um die CFK-Wicklungen nicht zu schädigen, wurden die Längskanten rund gefast (r = 10 mm).

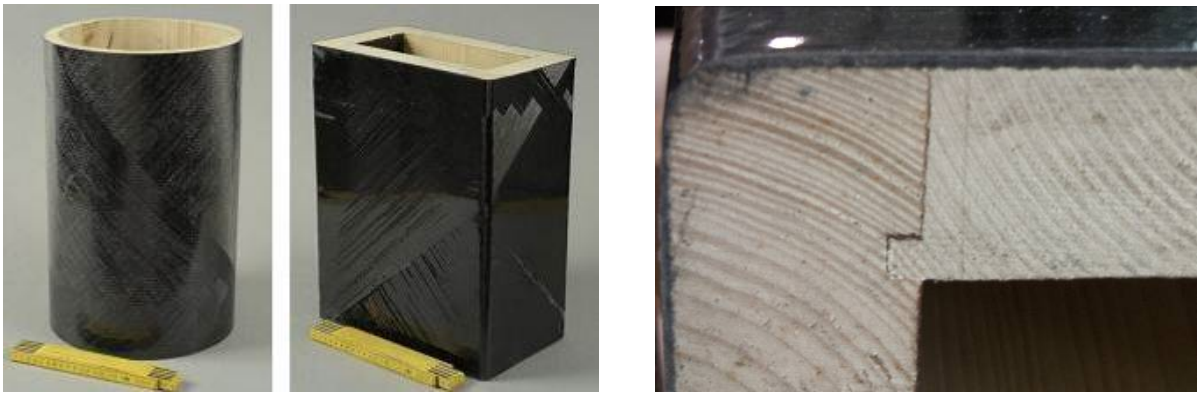


Abb. 3.169: Querschnitt und Eckdetail eines Hohlkastens im Vergleich zum Rohrprofil

Der Aufbau der Druckversuche entspricht jenem der Formholzrohre. Neben dem Maschinenweg wurden bei l/2 die Längsdehnung jeweils an den Breitseiten sowie die Querdehnung an jeder Profilseite mit Dehnmessstreifen bestimmt. Um nach dem Einbau in die Prüfmaschine eine zentrische Lasteinleitung sicherzustellen, wurde die herstellungsbedingte geringe Schiefstellung der hohen Profile mit Ausgleichsmörtel an den Stirnseiten ausgeglichen.

Die Bruchlasten und zugehörigen Spannungen der Prüfkörper sind folgender Tabelle zu entnehmen.

Tabelle 3.40: Bruchlasten bewehrter und unbewehrter Hohlkastenprofile

Profil	Bewehrung	Höhe [m]	Bruchlast [kN]	Bruchspannung [N/mm²]	Bemerkung
Hohlkasten HK-CFK45	Fichte C24 Wicklung ±45°	3,8	1393	42,1	Stirnseiten unbearbeitet, Schiefstellung wurde durch Unterlegen von Blechen ausgeglichen
Hohlkasten HK-CFK45	Fichte C24 Wicklung ±45°	0,9	1475	44,6	Stirnseiten mit Sikadur-Ausgleichsschicht, geringe Schiefstellung wurde durch Kalotte ausgeglichen
Hohlkasten HK REF	Fichte C24 unbewehrt	3,8	669	20,9	Stirnseiten unbearbeitet, Schiefstellung wurde durch Unterlegen von Blechen ausgeglichen
Hohlkasten HK REF	Fichte C24 unbewehrt	0,6	1268	39,6	Stirnseiten unbearbeitet, geringe Schiefstellung durch Kalotte ausgeglichen

Die Bruchlast des unbewehrten Profils von 669 kN liegt bei ca. 50 % des CFK-bewehrten Hohlkastens. Abb. 3.170 zeigt, dass das Trag-Verformungs-Verhalten der Kastenprofile jenem der Rohrprofile ähnelt. Beispielsweise zeigt das unbewehrte Profil (HK REF) vergleichsweise hohe Querdehnungen (positiv und negativ) bei geringer Beanspruchung. Im Vergleich dazu zeigt das bewehrte Profil (HK-CFK45) stetig steigende positive Querdehnungen.

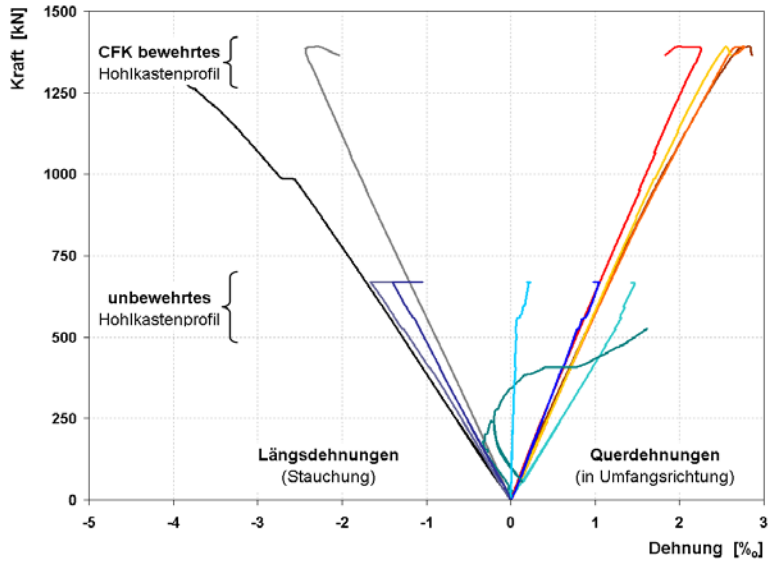


Abb. 3.170: Hohlkastenprofil im Druckversuch (bewehrt und unbewehrt, Höhe: 3,8 m)

Abb. 3.171 zeigt die Bruchbilder der Kastenprofile.



Abb. 3.171: Hohlkastenprofile vor/nach Druckversuch (unbewehrt und CFK45-bewehrt, Probenlänge 3,8 m)

Die unbewehrten Profile versagen grundsätzlich spröde. Mit Erreichen der Bruchlast zersplitterte der Hohlkasten schlagartig. Im Fall der HK-CFK45 Probe wurde der Versuch bei einer Last von ca. 1400 kN auf Grund starker Verformungen in Längsrichtung abgebrochen. Der Probekörper versagte lokal im unteren Drittel der Stütze. Beobachtet wurde eine Delamination mit anschließender starker Stauchung der CFK-Bewehrung in Verbindung mit Druckversagen im Holz.

3.5.2.3 Biegeversuche an Hohlprofilen

Es wurden Biegeversuche an einem CFK-Formholzrohr und einem CFK-Hohlkasten durchgeführt. Der Versuchsaufbau in Abb. 3.172 zeigt, dass die Last mittels einer 1 m langen Stahltraverse von der Prüfmaschine auf den Probekörper geleitet wird und damit die Versuche einem 4-Punkt-Biegeversuch entsprechen. Auf Grund der großen Längen der Prüfkörper musste der

Unterbau der zur Verfügung stehenden Prüfmaschine mittels zweier BSH-Träger (18x36 cm) auf 5,5 m Länge vergrößert werden.

Die Verformung wurde in Probekörpermitte mit IWAs sowie zusätzlich über die gesamte Probekörperlänge mit Hilfe eines optischen Messsystems Vic3D bestimmt (vgl. Abb. 3.172). Grundsätzlich ist bei der Interpretation der Ergebnisse der Verformungsmessungen, insbesondere der Vorzeichen der Messwerte, darauf zu achten, dass in der Versuchseinrichtung die Lasteinleitung in Rohrmitte das unverschiebliche Widerlager darstellt. Während des Versuches fährt der Unterbau nach oben und drückt so an den Auflagern am Rand gegen den Biegeträger.

3.5.2.3.1 Kohlefaserverstärktes Formholzrohr (CFK)

Das im Biegeversuch geprüfte kohlefaserverstärkte Formholzrohr war 4,85 lang und hatte in der Mitte einen Keilzinkenstoß. Der Außendurchmesser betrug 27,5 cm. Die zur Verstärkung auf das Formholzrohr aufgebrachte Wicklung aus Kohlenstofffasern (CFK) hatte einen Winkel von 45° und war ca. 0,55 mm dick. Für eine gleichmäßige Kraftverteilung an den Auflager- und Lasteinleitungsstellen des Rohres war es vor der Prüfung notwendig, eine ebene Fläche mittels Vergussmörtel zu schaffen. Es wurden kleine Schalungskästen (18 cm breit, 14 cm lang) an den Rohrquerschnitt angepasst und jeweils zwölf Schrauben (Durchmesser 4 mm, 5 bzw. 7 cm lang) zur Verstärkung eingedreht.



Abb. 3.172: CFK-Rohr mit Specklemuster für optische Verformungsmessung und IWA

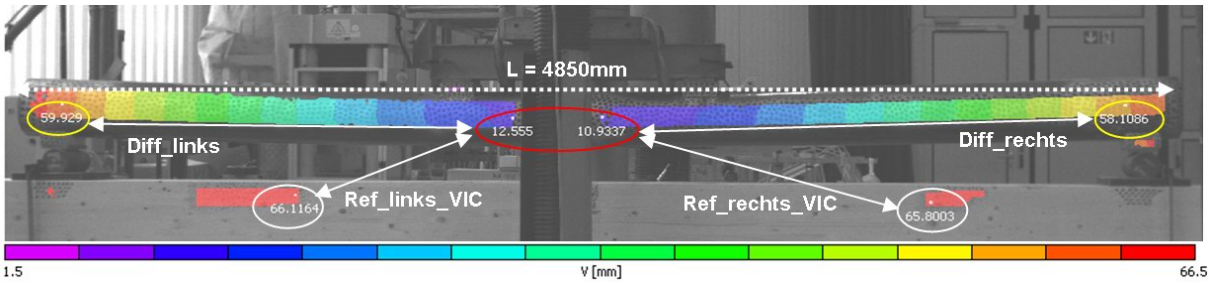


Abb. 3.173: Bestimmung der vertikalen Durchbiegung V mittels Verformungsanalyse Vic3D

Zusätzlich diente ein 2 mm dickes Lochblech als Bewehrung. Es war leicht gebogen und damit gut an die Kreisform des Querschnittes angepasst. Die Fugen zwischen Schalungskasten und Rohr wurden mit einem Dichtungsband abgedichtet.

Als Vergussmörtel wurde ein Epoxidharz der Firma PAGEL verwendet. Pro Schalungskasten wurden 900 g EP-Harz mit 90 g Härter und ca. 700 g Sand vermischt. Um ein lokales Ausbeulen/Verformen zu vermeiden, wurden abschließend noch jeweils zwei Vollgewindeschrauben (Durchmesser 12 mm, 28 cm lang) an den Lasteinleitungsstellen horizontal in Rohrmitte eingedreht.

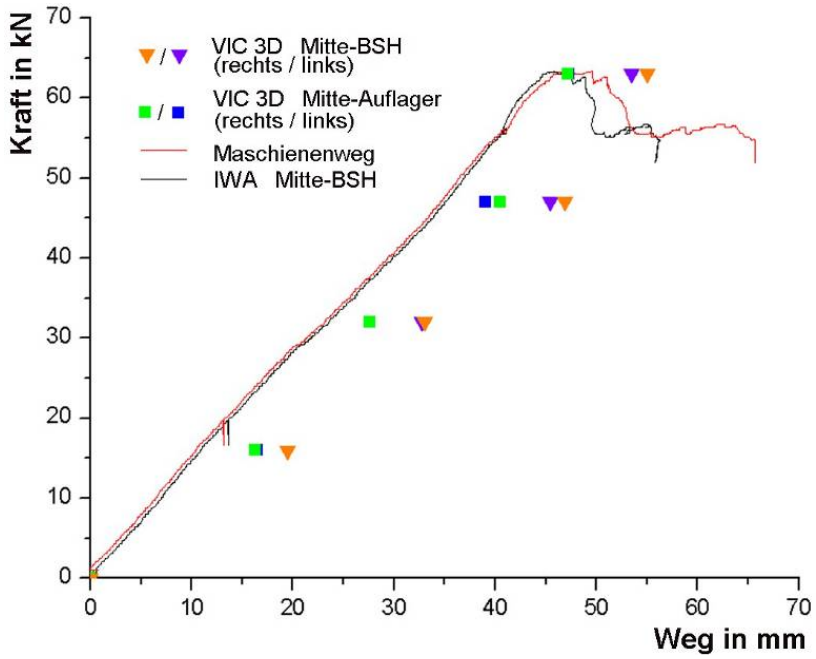


Abb. 3.174: Kraft-Weg-Diagramm des CFK-Rohres

Abb. 3.174 zeigt die Vertikalverschiebung des CFK-Rohres beim Biegeversuch. Im Diagramm sind die Weg-Daten der Prüfmaschine (rote Linie: Traversenweg), des IWAs (schwarze Linie: Verformung in Rohrmitte bzgl. BSH-Balken) sowie die Verschiebungswerte aus der optischen Messung (Vic3D) enthalten. Mittels der Software Vic3D wurden die Verschiebungen punktuell an vier Kraftstufen (25 %, 50 %, 75 % und 100 % der Maximalkraft) bestimmt. Dazu wurden die Verformungen in Rohrmitte mit den Verformungen folgender Bezugspunkte jeweils für die linke und rechte Probekörperhälfte verrechnet.

- Bezugspunkt am BSH (weißer Kreis in Abb. 3.173, vgl. auch Tabelle 3.41)
- Bezugspunkt am Auflager (gelber Kreis in Abb. 3.173, vgl. auch Tabelle 3.42)

Das lila bzw. orange Dreieck im Diagramm in Abb. 3.174 kennzeichnet die Differenz der Vertikalverschiebung zwischen dem Referenzpunkt am BSH-Balken (weiße Kreise, vgl. Abb. 3.173) und in Rohrmitte (roter Kreis, vgl. Abb. 3.173). Das blaue bzw. grüne Quadrat kennzeichnet entsprechend die Differenz der Vertikalverschiebung zwischen Auflager (gelbe Kreise, vgl. Abb. 3.173) und Rohrmitte.

Tabelle 3.41: Vergleich der mit IWA und Vic3D gemessen Verformungen (BSH-Rohrmitte)

Kraft		**IWA**	**VIC – Verformungsanalyse [mm]**						**Diff IWA-VIC**	
von		in Rohrmitte	Linke Trägerhälfte			Rechte Trägerhälfte			links	rechts
max F	[kN]	[mm]	BSH-Ref	Mitte	Diff	BSH-Ref	Mitte	Diff	[mm]	[mm]
0 %	0									
25 %	16	**11,0**	21,5	2,0	**19,5**	21,8	2,3	**19,5**	**8,6**	**8,6**
50 %	32	**23,5**	35,3	2,6	**32,7**	35,5	2,5	**33,0**	**9,2**	**9,5**
75 %	47	**35,3**	51,3	5,9	**45,4**	51,5	4,6	**46,9**	**10,1**	**11,6**
100 %	63	**45,9**	66,1	12,6	**53,5**	65,9	10,9	**55,0**	**7,6**	**9,1**

IWA: Messwert des Induktiven Wegaufnehmers **in Rohrmitte** (vgl. Abb. 3.172)
BSH-Ref: Verformungswert eines Referenzpunktes am BSH-Balken (weißer Kreis vgl. Abb. 3.173)
Mitte: Verformungswert eines Punktes **annähernd in Rohrmitte** (roter Kreis vgl. Abb. 3.173)
Diff: Differenz der Verformungswerte von Referenzpunkt und Rohrmitte
Diff IWA-VIC: Differenz der Messwerte der beiden Messmethoden VIC und IWA

Tabelle 3.42: Vergleich der mit IWA und Vic3D gemessenen Verformungen (Auflager-Rohrmitte)

Kraft		**IWA**	**VIC – Verformungsanalyse [mm]**						**Diff IWA-VIC**	
von		in Rohrmitte	Linke Trägerhälfte			Rechte Trägerhälfte			links	rechts
max F	[kN]	[mm]	Auflager	Mitte	Diff	Auflager	Mitte	Diff	[mm]	[mm]
0 %	0									
25 %	16	**11,0**	18,5	2,0	**16,5**	18,6	2,3	**16,3**	**5,5**	**5,3**
50 %	32	**23,5**	30,2	2,6	**27,6**	30,1	2,5	**27,6**	**4,1**	**4,1**
75 %	47	**35,3**	44,9	5,9	**39,0**	45,1	4,6	**40,5**	**3,7**	**5,2**
100 %	63	**45,9**	59,9	12,6	**47,3**	58,1	10,9	**47,2**	**1,4**	**1,3**

Auflager: Verformungswert eines Referenzpunktes am Auflager (gelber Kreis vgl. Abb. 3.173)
Restliche Bezeichnungen siehe Tabelle 3.41

Ein Vergleich der beiden Messmethoden IWA und Vic3D zeigt eine bessere Übereinstimmung der Verschiebungsdifferenzen am Auflager im Vergleich zu den etwa doppelt so großen Werten in Rohrmitte. Die Ursache für die Abweichungen sind Verformungen an den Lagern sowie der Unterkonstruktion, die in die Messungen mit einfließen, so dass sich beispielsweise kein Unterschied zwischen IWA und Maschinenweg ergibt.

3.5.2.3.2 Kohlefaserverstärkter Hohlkasten

Neben dem Formholzrohr wurde auch ein CFK-bewehrtes Hohlkastenprofil im Biegeversuch geprüft. Die Querschnittsabmessungen sowie Angaben zur Bewehrung enthält Tabelle 3.44. Das Kastenprofil war mit 4,20 m Länge zwar etwas kürzer als das geprüfte Rohrprofil, es konnte damit jedoch auf einen Stoß in der Prüfkörpermitte verzichtet werden.



Abb. 3.175: Kohlefaserverstärkter Hohlkasten aus Fichtenholz mit aufgetragenem Speckle-muster für optische Verformungsmessung

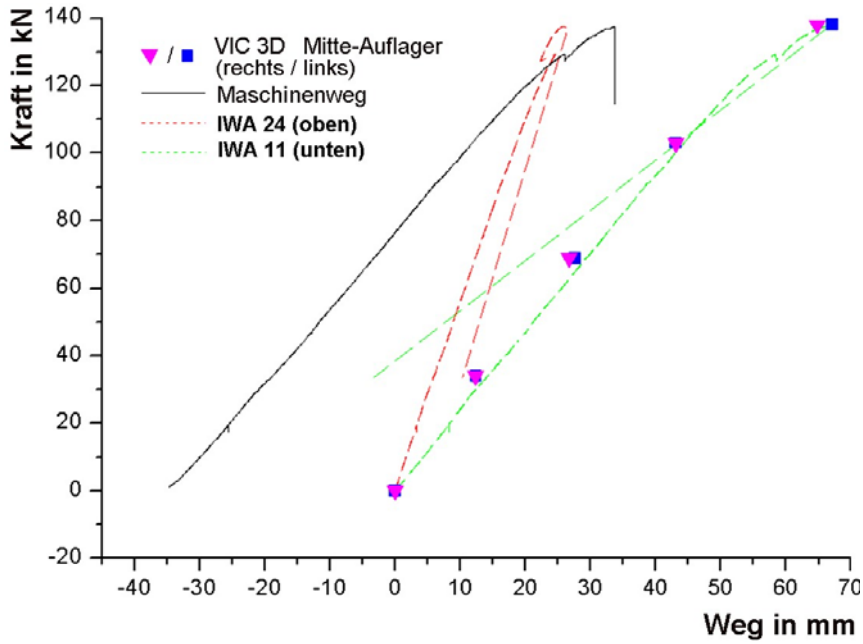


Abb. 3.176: Kraft-Weg-Diagramm des CFK-Hohlkastens

Abb. 3.176 zeigt die Vertikalverschiebung des CFK-Hohlkastens beim Biegeversuch.

Im Diagramm sind die Weg-Daten der Prüfmaschine (schwarze Linie: Traversenweg), zweier IWA (rot gepunktete Linie: Verformung in Hohlkastenmitte bzgl. einer 2 m langen Messlatte und grün gepunktete Linie: Verformung in Hohlkastenmitte bzgl. BSH-Auflager) sowie die Verschiebungswerte aus der optischen Messung (Vic3D-Symbole in magenta und blau) enthalten. Mittels der Software Vic3D wurden die Verschiebungen punktuell an vier Kraftstufen (25 %, 50 %, 75 % und 100 % der Maximalkraft) bestimmt. Dazu wurden die Verformungen in Hohlkastenmitte mit den Verformungen am Auflager jeweils für die linke und rechte Probekörperhälfte verrechnet.

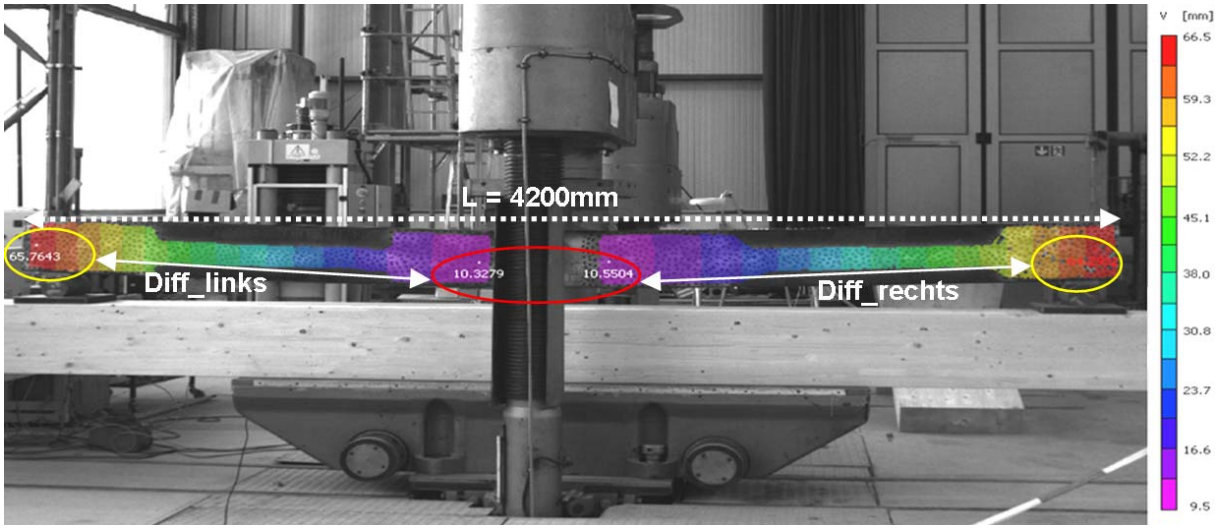


Abb. 3.177: Bestimmung der vertikalen Durchbiegung V mittels Verformungsanalyse Vic3D

Abb. 3.177 zeigt die Ermittlung der Durchbiegung des Hohlkastens mittels Verformungsanalyse Vic3D. In der Mitte hinter dem Hohlkasten befinden sich die induktiven Wegaufnehmer. Die Verformungswerte wurden analog zu den Werten der Wegaufnehmer ermittelt. Um die Durchbiegung ermitteln zu können, wurde die Differenz zwischen den Verformungswerten in der Mitte

(roter Kreis) und den Verformungswerten direkt über den Auflagern (gelbe Kreise) (vgl. Tabelle 3.67) gebildet.

Tabelle 3.43: Vergleich der mit IWA und Vic3D gemessenen Verformungen (Auflager-Mitte)

Kraft		**IWA 11**	**VIC – Verformungsanalyse [mm]**						**Diff IWA-VIC**	
von		in HK-Mitte	Linke Trägerhälfte			Rechte Trägerhälfte			links	rechts
max F	[kN]	[mm]	Auflager	Mitte	Diff	Auflager	Mitte	Diff	[mm]	[mm]
0 %	0									
25 %	34	14,1	17,0	4,6	**12,4**	17,0	4,7	**12,3**	**1,74**	**1,84**
50 %	69	29,4	33,7	6,1	**27,6**	33,0	6,3	**26,7**	**1,75**	**2,65**
75 %	103	44,4	50,9	7,9	**43,0**	51,0	8,0	**43,0**	**1,43**	**1,42**
100 %	138	65,7	73,0	5,9	**67,1**	73,0	8,2	**64,8**	**-1,40**	**59,8**

Entsprechende Bezeichnungen siehe Tabelle 3.41

3.5.2.4 Torsionsversuche an Profilquerschnitten

Torsion ist der Widerstand eines prismatischen Körpers gegen eine Verdrehung um dessen Längsachse. Im Hinblick auf den Einsatz der faserbewehrten Profilquerschnitte in turmartigen Tragwerken, wie z. B. der Windkraftanlage oder als Stütze für die Hess-Innenhofüberdachung, wurden Torsionsversuche an verschiedenen Querschnittformen durchgeführt. Ziel der Untersuchungen war die Verifizierung der Torsionsfestigkeit und der Torsionssteifigkeit bzw. des Schubmoduls der Verbundquerschnitte sowie deren Vergleich mit Referenzbauteilen.

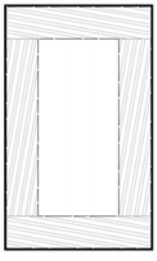
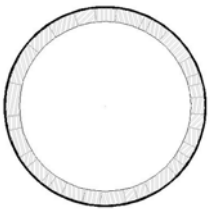
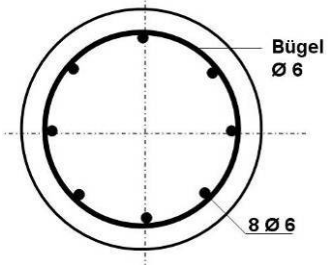
Auf Grund der relativ geringen Scher- bzw. Torsionsfestigkeit von Holz sind torsionsbeanspruchte Stabquerschnitte kritisch zu betrachten. So kommt es z. B. in Nadelholzwäldern bei starken Stürmen mit drehenden Winden (Wirbelstürmen, Tornados etc.) zu teils großflächigen Schäden am Bestand. Der Grund für das Versagen bzw. das Abknicken der Bäume ist eine kombinierte Beanspruchung der Stammquerschnitte auf Torsion und Biegung, mit der Folge, dass die Bäume häufig ca. 3 bis 8 m über dem Erdboden abgeknickt bzw. abgedreht werden. In diesem Zusammenhang erscheint eine Schubverstärkung der dünnwandigen Profilquerschnitte mit FVK als sinnvoll.

3.5.2.4.1 Material und Methoden

<u>Querschnittsformen</u>

Insgesamt wurden fünf Probekörper untersucht, vier Holzprofile mit und ohne CFK-Wicklung sowie ein kreisrunder Stahlbeton-Vollquerschnitt. Die Abmessungen und der Aufbau der Querschnitte sind Tabelle 3.44 zu entnehmen.

Tabelle 3.44: Querschnittsformen

BSH	**HK-CFK**	**Rohr-CFK**	**Beton**
GL24h Rechteck: 20 x 20 cm²	Brettlamellen C24 Hohlkasten: 30 x 18 cm² Wandung: t_{Holz} = 4 cm	Formholz - Rohrprofil Durchmesser: 27,4 cm Wandung: t_{Holz} = 1,9 cm	Stahlbeton - Rundprofil C25/30 BSt 500 Durchmesser: 32 cm
	Wicklung: CFK45 t_{CFK} ~ 1,1mm 4x 0,28 mm, 2x(45°/-45°)	Wicklung: CFK745 t_{CFK} ~ 1,1mm 4x 0,28 mm, (7/-7/45/-45)	Bewehrungsplan (vgl. Anlage A3)
			

Die zwei herkömmlichen BSH-Träger mit Rechteckquerschnitt und die massive Stahlbetonstütze wurden zu Referenzzwecken geprüft. Die Versuchsdaten des Stahlbetonquerschnitts wurden vom Institut für Massivbau der TU Dresden zur Verfügung gestellt.

Das Formholzrohr sowie das aus Brettlamellen zusammengeleimte Kastenprofil wurden mit einer ca. 1,1 mm dicken CFK-Wicklung armiert. Details bzgl. der Wicklung sind Abschn. 3.5.2 zu entnehmen.

Versuchsaufbau

Abb. 3.178 zeigt den Aufbau des Torsionsversuches. Die Torsionskraft wurde über zwei hydraulische Pressen aufgebracht. Die Einspannung erfolgte beiderseits über jeweils zwei starre miteinander verschraubte Stahlträger. Auf Grund der hohen Querdruckpressungen wurden die Einspannbereiche der Proben mittels Schrauben und Vergussmörtel verstärkt.

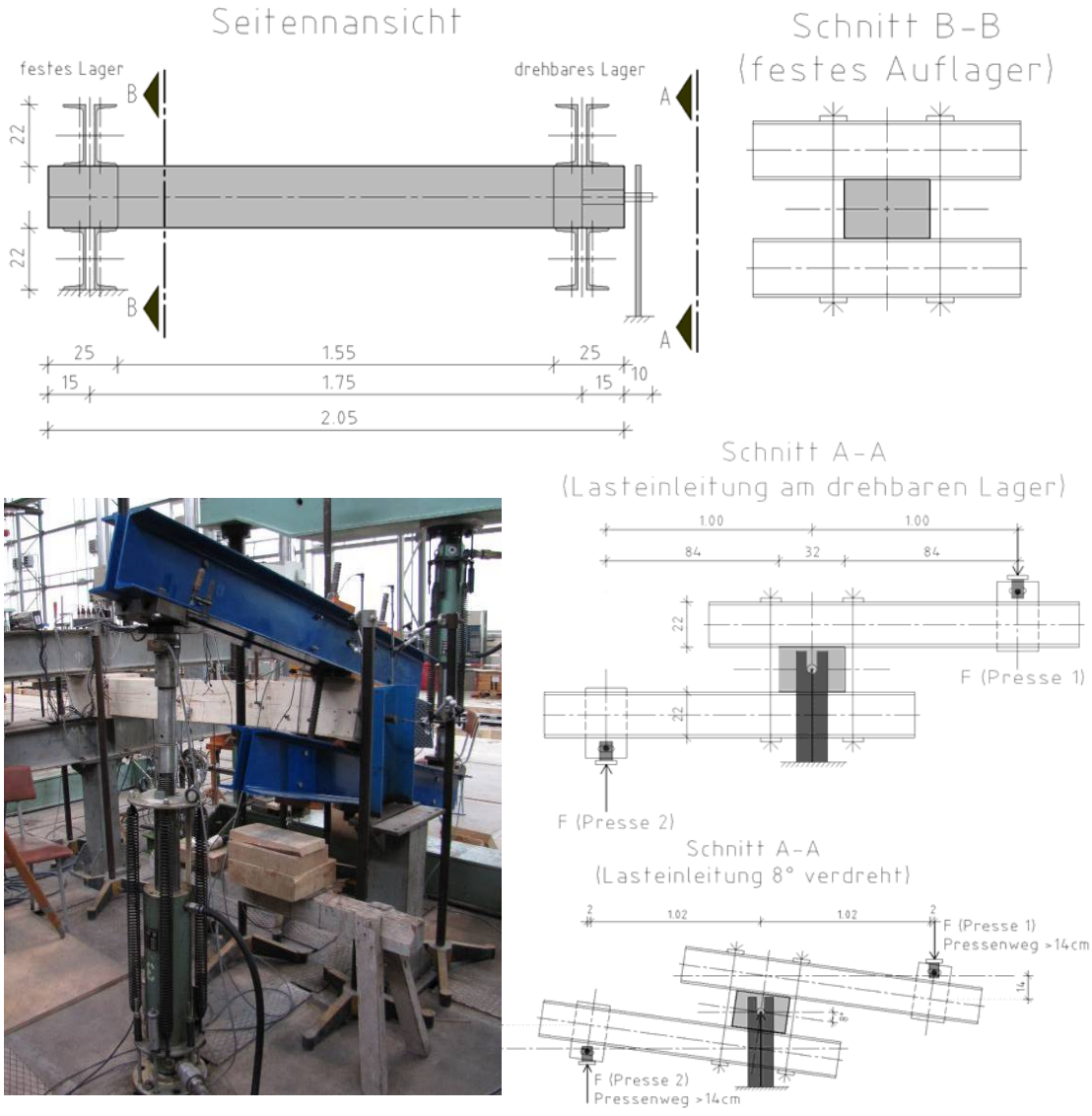


Abb. 3.178: Versuchsaufbau

Abb. 3.179 zeigt die Anordnung der Messinstrumente: des Neigungsmessers (N1, N2), der Dehnmessstreifen (DMS 1-8) und der induktiven Wegaufnehmer (IWA 40-47, 50, 55).

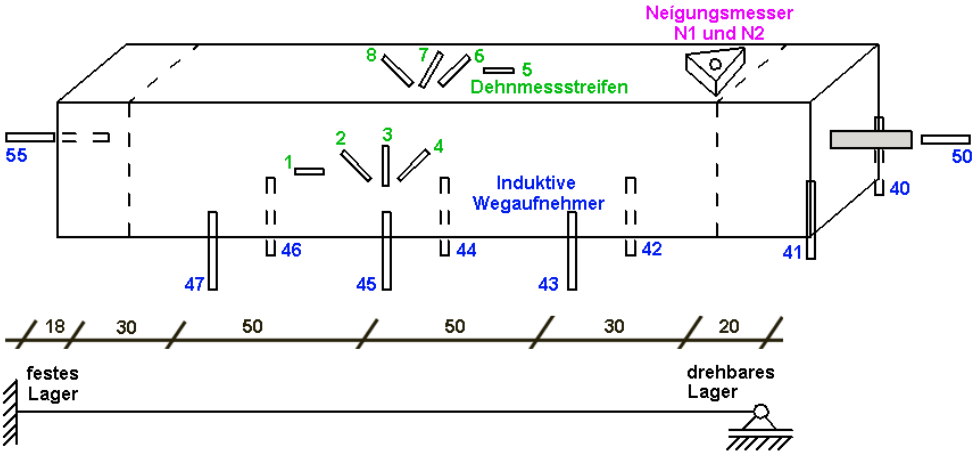


Abb. 3.179: Anordnung der Messinstrumente

Messverfahren

Neigungsmesser (NM):

Da die Verformung der Probe mit nur einem Neigungsmesser erfasst wurde, lässt sich die relative Verdrillung über eine definierte Messlänge nur näherungsweise bestimmen. Ursache dafür ist sowohl die nachgiebige Verbindung zwischen Probe und Lasteinleitung (Druck senkrecht zur Faser) als auch die Nachgiebigkeit der gesamten Einspannvorrichtung. Um die Verdrillung dennoch abschätzen zu können, wurde angenommen, dass die Proben am festen Auflager drehsteif gelagert sind (d. h. in Mittelachse der Einspannung treten keine Verdrehungen auf). Demnach beträgt der vom Neigungsmesser erfasste Messbereich ca. 1,69 m (Abstand NM zur Einspannung – vgl. Abb. 3.179).

Induktive Wegaufnehmer (IWA):

Da sich mittels der 1-dimensionalen IWA nur die Vertikalkomponente der Verformung erfassen lässt, werden die Messungen mit zunehmenden Verformungen ungenau. Zur Erhöhung der Genauigkeit wurden die IWA paarweise (an Vorder- und Hinterseite) angebracht.

Dehnmessstreifen (DMS):

Um die bei Torsion auftretenden Dehnungen bzw. Verzerrungen zu erfassen, wurden jeweils vier DMS rosettenartig im Winkel von 0-45-90-135° auf zwei Seitenflächen der Proben geklebt.

Optische Messung (DSA)

Zusätzlich wurden Verformungen und Dehnungen der Proben mit einem optischen Messsystem (Vic3D) erfasst. Das Messfeld entspricht ca. der Querschnittsbreite mal 1,2 m Probenlänge. Die optische Messung mittels Digital Spectral Analysis (DSA) erlaubt, Verformungen und Verzerrungen flächig auf der Probekörperoberfläche darzustellen. Neben dem Vorteil der flächigen Datenerfassung ist diese Methode berührungsfrei, so dass der Einfluss von Befestigungsmitteln, wie sie beim Einsatz von IWA und DMS notwendig sind, entfällt. Zur Überprüfung der Genauigkeit der Methode wurden die optisch erfassten Daten mit denen der DMS und IWA verglichen – vgl. Tabelle 3.45.

Ausbildung der Krafteinleitung

Auf Grund der dünnwandigen Profilquerschnitte ergeben sich insbesondere Schwierigkeiten beim Verbinden bzw. dem Anschließen der Bauteile an andere Konstruktionselemente.

Im Torsionsversuch sind relativ hohe Querdrücke und Schubspannungen in das Bauteil bzw. dessen Wandung einzuleiten. Deshalb wurden Rohr- und Kastenquerschnitt in Polymerbeton eingegossen (vgl. Abb. 3.180). Um eine hohe Verbundqualität zu gewährleisten, wurden zusätzlich mechanische Verbindungsmittel (Schrauben) und Bohrungen (Ø 30 mm) ins Holz einge-

bracht. Diese Maßnahmen sollten sicherstellen, dass die Scherfestigkeit des Polymerbeton-CFK-Verbundes hoch genug ist, um die Scherspannungen flächig in das Bauteil einzuleiten.

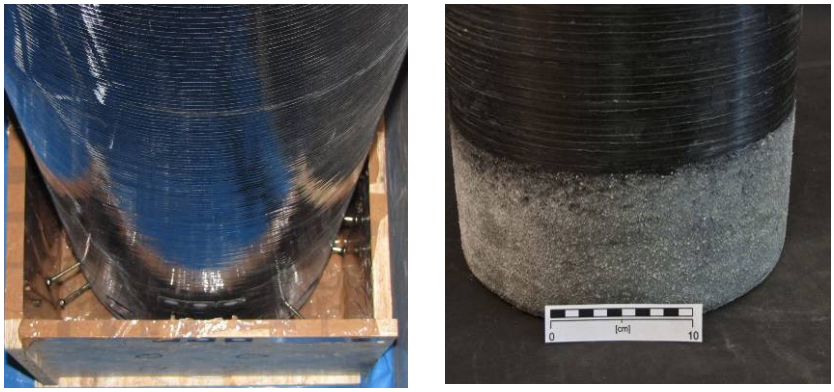


Abb. 3.180: Einspannung des Formholzrohres mittels Polymerbeton

Diese Art der Einspannung von dünnwandigen Holzprofilen hat sich im Torsionsversuch als sehr effektiv und leistungsfähig erwiesen, sodass dieser Verbindungstyp in Abschn. 3.5.3.2 näher analysiert und diskutiert wird. Vorteil des Vergusses ist die hohe Passgenauigkeit, Steifigkeit und Festigkeit des Anschlusses. Zudem ist das Verbindungssystem sehr variabel, da es insbesondere das Anbinden schwieriger Geometrien wie z. B. dünnwandiger Rohrprofile, ermöglicht. Nachteilig sind die vergleichsweise hohen Kosten für den Vergussmörtel.

3.5.2.4.2 Ergebnisse und Diskussion

Abb. 3.181 zeigt die Moment-Verzerrungs-Kurven der verschiedenen Probekörper. Exemplarisch sind die Beträge der ±45° DMS dargestellt.

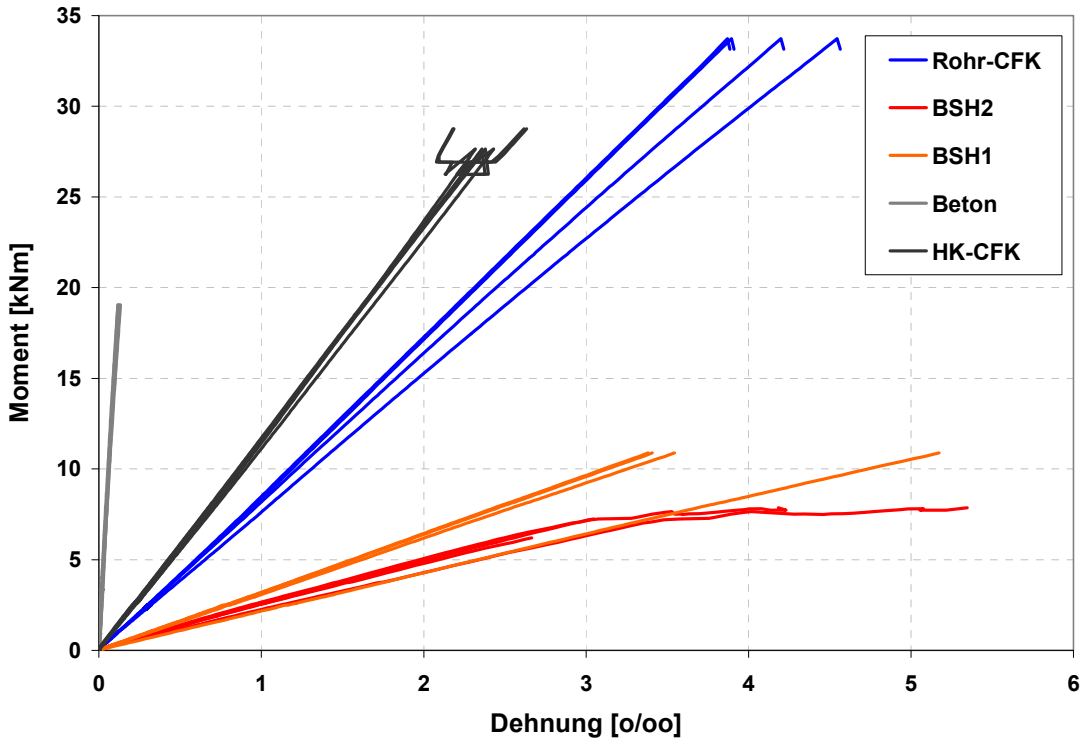


Abb. 3.181: Moment-Verzerrungs-Kurven der verschiedenen Proben (DMS 2, 4, 6, 8)

Auf Grund des hohen Schubmoduls sowie des großen Außendurchmessers (d_a = 32 cm) sind die Verzerrungen des Betonquerschnitts deutlich geringer als jene der Holzprofile. Die CFK-bewehrten Kasten- oder Rohrprofile hingegen zeichnen sich durch eine hohe Traglast aus. Die Bruchdehnung der Holzprofile liegt zwischen 2 und 5 ‰, jene des Betonquerschnitts bei ca. 0,1 ‰.

Die mechanischen Kennwerte der untersuchten Verbundquerschnitte, wie z. B. maximale Schubspannung, Schubmodul und Torsionssteifigkeit, wurden anhand folgender Beziehungen berechnet:

Torsionsspannung τ [N/mm²]		Schubmodul G [N/mm²]
$\tau = \frac{M_T}{W_T} = \frac{M_T}{I_T} \cdot r$	$\tau = G \cdot \gamma$	$G = \frac{M_T \cdot l}{\theta \cdot I_T}$
Verdrehungswinkel θ [rad] bzw. Verzerrung γ [‰]		Torsionssteifigkeit K_T [Nmm²]
$\theta = \frac{M_T \cdot l}{G \cdot I_T}$ mit $\theta = \frac{\delta}{r}$ und $\gamma = \frac{\delta}{l} = \frac{r\theta}{l}$		$K_T = G \cdot I_T = \frac{M_T}{\vartheta'}$

Dabei ist: M_T das Torsionsmoment, I_T das Torsionsträgheitsmoment, l die Länge des Messfeldes und r der Radius. Die Definition der geometrischen Parameter ist Abb. 3.182 zu entnehmen.

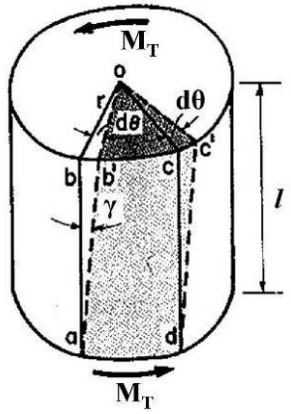


Abb. 3.182: Torsionsbeanspruchter Kreisquerschnitt

Die Ergebnisse der Torsionsversuche inkl. der ermittelten Querschnitts- und Materialkennwerte sind in Tabelle 3.45 zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 3.45: Zusammenfassung der Torsionsversuche

Probenbez. / Kennwerte	Abk.	Einheit	BSH 1	BSH 2	HK-CFK	Rohr-CFK	Beton
Querschnitt		cm	bxh = 20x20		30x18	D = 27,4	D = 32
Querschnittsfläche	A	cm^2	400		320 (Holz) 9,6 (CFK)	152 (Holz) 8,6 (CFK)	804
Torsionswiderstands-moment	W_T	cm^3	1660		1620	1550	6430
Torsionsflächen-moment	I_T	cm^4	22400		22410	26510	102940
Torsionsmoment max. M_T	M_T	kNm	10,9	9,6	28,8	33,7	19,0 (41,1*)
Verdrehwinkel / m 0,4 M_T (max. M_T) IWA Neigungsmesser DMS (±45°) Optische Messung	θ	° °/m	 1,33 (3,65) 1,55 (4,85) 1,55 (3,95) 1,36 (5,25)	 1,33 (7,33) 1,31 (6,20) 1,89 (--)	 0,90 (2,43) 1,37 (3,80) 0,76 (1,83) 0,80 (1,98)	 1,40 (3,58) 1,42 (4,22) 1,37 (3,43) 1,36 (3,64)	 0,038 (0,102) 0,114 (0,621) 0,033 (0,088)
Verzerrung bei 0,4 M_T (max. M_T) [1] Optische Messung DMS (±45°)	 ε_{45} ε_{45} γ_{xy}	 ‰ ‰ ‰	 1,49 (5,10) 1,35 (3,44) 2,70 (6,88)	 1,64 (--) 3,28 (--)	 1,06 (2,60) 1,00 (2,40) 2,00 (4,80)	 1,68 (4,35) 1,65 (4,13) 3,30 (8,26)	 0,046 (0,123) 0,092 (0,246)
max. Torsions-spannung	τ	N/mm^2	6,6	5,8	17,7	21,8	3,0 (6,4*)
Schub- bzw. Torsions-festigkeit	$f_{v,k}$	N/mm^2	2,5 (DIN 1052)				*0,45 (1,8)* *(DIN 1045)* [2]
Torsionssteifigkeit $M_T * l / \theta = G * I_T$	K_T	Nmm^2	170	150	730	550	12400
Schubmodul bei 0,4 M_T IWA Neigungsmesser DMS Optische Messung **gewähltes Mittel**	G	N/mm^2	 820 710 700 730. **700**	 760 770 530 -- **700**	 2860 *1890* 3390 2830 **2800**	 2090 2060 2140 2040 **2100**	 11050 *3730* 12880 -- **12200**
Schubmodul theoretisch DIN 1052-2008 CLT bzw. EC2	G_{mean}	N/mm^2	720			1920	12700 [3]
Versagensform/ort			Spalten über ges. Probelänge inkl. Auflager	Spalten in Trägermitte Ast	Spalten am Auflager teils Schubbruch des CFK	Schubbruch des CFK in Trägermitte	45° geneigte Risse im Beton in Trägermitte
Materialvolumen der Probekörper	V	m^3	0,080		0,066	0,032	0,161
Materialverbrauch	g	kg	40 BSH		32 Holz 3 CFK	20 Formholz 3 CFK	370 Beton 10 Stahl

[1] Betrag der Dehnung in 45° (Mittelwert aus 4 DMS)
[2] nur grobe Richtwerte für Torsionsfestigkeit von Stahlbeton (siehe Erläuterungen zur DIN 1045)
[3] Schubmodul Stahlbeton = $G = E/(2(1+\mu))$ mit E_{cm} = 30500 N/mm^2 und μ = 0,2
* Versuchswerte einer Stahlbeton-Rundstütze mit textiler Bewehrung (CFK-Umschnürung)

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass sich bereits bei einem geringen Bewehrungsgrad (Schichtdicke CFK ca. 1,1 mm) deutliche Traglaststeigerungen erzielen lassen. Vorteil der Profilquerschnitte ist der vergleichsweise große Hebelarm der oberflächig angeordneten Bewehrung zum Rotationszentrum.

Bei den angegebenen Materialkennwerten handelt es sich „verschmierte“ Steifigkeits- bzw. Festigkeitsangaben mit der Annahme $G = G_{LT} = G_{LR}$ (transversal isotropes Material). Je nach Bewehrungsverhältnis ist der Schubmodul des faserbewehrten Holzes ca. 3- bis 4-mal höher als

jener des unbewehrten Brettschichtholzes. Schubmodul und Torsionssteifigkeit des Stahlbetonquerschnitts liegen deutlich über den Steifigkeiten der Holzquerschnitte. Beispielsweise liegt zwischen Stahlbeton und CFK-Rohrprofil ein Faktor von 22.

Eine detaillierte Analyse der Verbundquerschnitte inkl. der in den jeweiligen Schichten auftretenden Spannungen erfordert eine Berechnung z. B. mittels Laminattheorie. Nachfolgend ist dies für das CFK-verstärkte Formholzprofil erfolgt.

Vergleich Analytische Berechnung vs. Experiment

Die analytische Berechnung des Verbundquerschnitts erfolgte mittels AlfaLam.nl Version VDI 2014 1.0. Die den Berechnungen zu Grunde liegenden Materialparameter, der Schichtaufbau sowie die daraus ermittelten Ingenieurkonstanten für das CFK-Rohrprofil sind Abb. 3.183 zu entnehmen.

laminate lay-up

lamina	t_k [mm]	α	φ	material	ΔT [K]
1	0,28	45	0,6	8	0
2	0,28	-45	0,6	8	0
3	0,28	5	0,6	8	0
4	0,28	-5	0,6	8	0
5	38	0	0,5	9	0
6	0,28	-5	0,6	8	0
7	0,28	5	0,6	8	0
8	0,28	-45	0,6	8	0
9	0,28	45	0,6	8	0
10					

thermal loads

copy/paste lamina

delete lamina

info

material	no.
E-Glas / EP	1
E-Glas/LY556/HY917/DY070	2
E-Glas/MY750/HY917/DY063	3
E-Glas/LY556/HT907/DY063	4
AS4/3501-6	5
T300/LY556	6
T300/BSL914C	7
T700/EP	8
wood	9
GFK	10

adapted lamina properties (adapted from choosen φ)

lamina	$E_{\parallel}$	$E_{\perp}$	$G_{\perp\parallel}$	$\nu_{\perp\parallel}$	$R_{\parallel}^{t}$	$R_{\parallel}^{c}$	$R_{\perp}^{t}$	$R_{\perp}^{c}$	$R_{\perp\parallel}$
1	135000	9650	4550	0,3	2550,0	1470	69	168	48
2	135000	9650	4550	0,3	2550,0	1470	69	168	48
3	135000	9650	4550	0,3	2550,0	1470	69	168	48
4	135000	9650	4550	0,3	2550,0	1470	69	168	48
5	15600	770	840	0,35	26,0	31	0,5	3,6	2,5
6	135000	9650	4550	0,3	2550,0	1470	69	168	48
7	135000	9650	4550	0,3	2550,0	1470	69	168	48
8	135000	9650	4550	0,3	2550,0	1470	69	168	48
9	135000	9650	4550	0,3	2550,0	1470	69	168	48
10									

strain state, stress state and stress exposure of linear analysis

lamina	angle [α]	ε_1[%]	ε_2[%]	γ_{21}[%]	σ_1 [N/mm²]	σ_2 [N/mm²]	τ_{21} [N/mm²]	$f_{E,FF}$	$f_{E,IFF}$	fracture mode	fracture angle	weakening
1	45	0,420	-0,420	0	561,6	-28,7	0	0,22	0,24	C	44,23	2
2	-45	-0,42	0,42	0	-561,6	28,7	0	0,38	0,48	A	0	2
3	5	0,07	-0,07	0,83	97,5	-5	37,9	0,04	0,76	B	0	1
4	-5	-0,07	0,07	0,83	-97,5	5	37,9	0,07	0,82	A	0	1
5	0	0	0	0,84	0	0	7,1	0,00	2,84	A	0	1
6	-5	-0,07	0,07	0,83	-97,5	5	37,9	0,07	0,82	A	0	1
7	5	0,07	-0,07	0,83	97,5	-5	37,9	0,04	0,76	B	0	1
8	-45	-0,42	0,42	0	-561,6	28,7	0	0,38	0,48	A	0	2
9	45	0,42	-0,42	0	561,6	-28,7	0	0,22	0,24	C	44,23	2

neutral plane

z_x [mm]	---
z_y [mm	---
z_{xy} [mm	---

engineering constants

$E_{x,\ tension}$ [N/mm²]	18969	$E_{x,\ bending}$ [N/mm²]	26935
$E_{y,\ tension}$ [N/mm²]	2099	$E_{y,\ bending}$ [N/mm²]	4843
$G_{xy,\ shear}$ [N/mm²]	1918	$G_{xy,\ torsion}$[N/mm²]	3964
ν_{xy} [-]	0,065		
ν_{yx} [-]	0,591		

global values

ε_x [%]	0,00
ε_y [%]	0,00
γ_{xy} [%]	0,845
κ_x [1/mm]	0,00
κ_y [1/mm]	0,00
κ_{xy} [1/mm]	0,00

Abb. 3.183: Schichtaufbau, Materialparameter und Ingenieurkonstanten für das CFK-verstärkte Rohrprofil sowie Verzerrungen und Spannungen bei Bruchlast (AlfaLam.nl)

Die in Abb. 3.183 angegebenen Verzerrungen und Spannungen wurden für eine am Querschnitt angreifende Schubspannung ermittelt, die sich aus dem maximalen Torsionsmoment (M_T = 33,7 kNm) berechnet. Die Zug- bzw. Druckspannung im 45°-CFK-Laminat (Deckschicht) beträgt bei der Bruchlast der Probe ca. 560 N/mm². Dies entspricht einer Laminatdehnung ε von 4,20 ‰. Diese analytisch ermittelten Dehnungen wurden durch die Messungen mittels DMS bestätigt (ε_{DMS} = 4,13 ‰ – vgl. Tabelle 3.45).

Die Scherspannungen im Formholz betragen bei einer Verzerrung γ_{xy} von 0,84 % etwa 7,1 N/mm^2. Damit ist die Scherfestigkeit des Holzes von ca. 6,2 N/mm^2 überschritten (siehe die für BSH ermittelten Torsionsfestigkeiten in Tabelle 3.45). Ursache des Versagens der Probe ist demnach die Scherung des Holzrohrs. Dies wird auch vom Bruchbild der Probe bestätigt (vgl. Abb. 3.184 – Rohr-CFK). Dieses zeigt, dass die CFK-Wicklung auf Schub versagt. Die Zugfestigkeit des Laminates von 2550 N/mm^2 wird nur zu ca. 20 % genutzt.



BSH 1



BSH 2



Rohr-CFK



HK-CFK



Beton

Abb. 3.184: Bruchbilder der Torsionsproben

Der bewehrte Hohlkastenquerschnitt (HK-CFK) versagt im Bereich der Einspannung, wobei sich der Polymerbetonkern von der Holzoberfläche löst. Ursache für den Verlust der Verbundwirkung ist das Abrollen der Holzfasern (Rollschubversagen). Dieses Rollschubversagen tritt beim Rohrprofil nicht auf, da der Polymerbeton das Rohr umschließt und somit die textile Verstärkung als eine Art Haftvermittler zwischen Holz und Polymerbeton zum Tragen kommt. Die BSH-Referenzproben zeigen einen klassischen Schubbruch, d. h. eine Torsionsbeanspruchung parallel zur Faserrichtung führt zu einem Aufspalten des Stabes in Längsrichtung (vgl. Abb. 3.184 - BSH 1) [244]. Teils sind auch lokale Wuchsstörungen, wie Faserabweichungen und Äste (siehe BSH 2), für das Versagen der Probe mit verantwortlich.

Analyse der optischen Messungen

Mittels der optischen Messung lassen sich die Dehnungsverteilung über den Querschnitt und über den Versuchsverlauf darstellen. Der wesentliche Vorteil der optischen Messung liegt im großen Messfeld, so dass lokal auftretende Schädigungen sukzessive erfasst werden können. Der Vergleich der mittels DMS und optischer Messung ermittelten Verzerrungen bzw. Dehnungen in Tabelle 3.45 zeigt, dass sich insbesondere für den Gebrauchslastbereich (ca. 40 % der Bruchlast) sehr gute Übereinstimmungen ergeben.

Rohr-CFK

Abb. 3.185 zeigt die Verformungen des Rohres für verschiedene Lastniveaus. Der Darstellung d_{Theta} ist zu entnehmen, dass die Dehnung infolge Torsion gleichmäßig über den Querschnitt von der Einleitungsstelle in die Einspannung eingetragen wird.

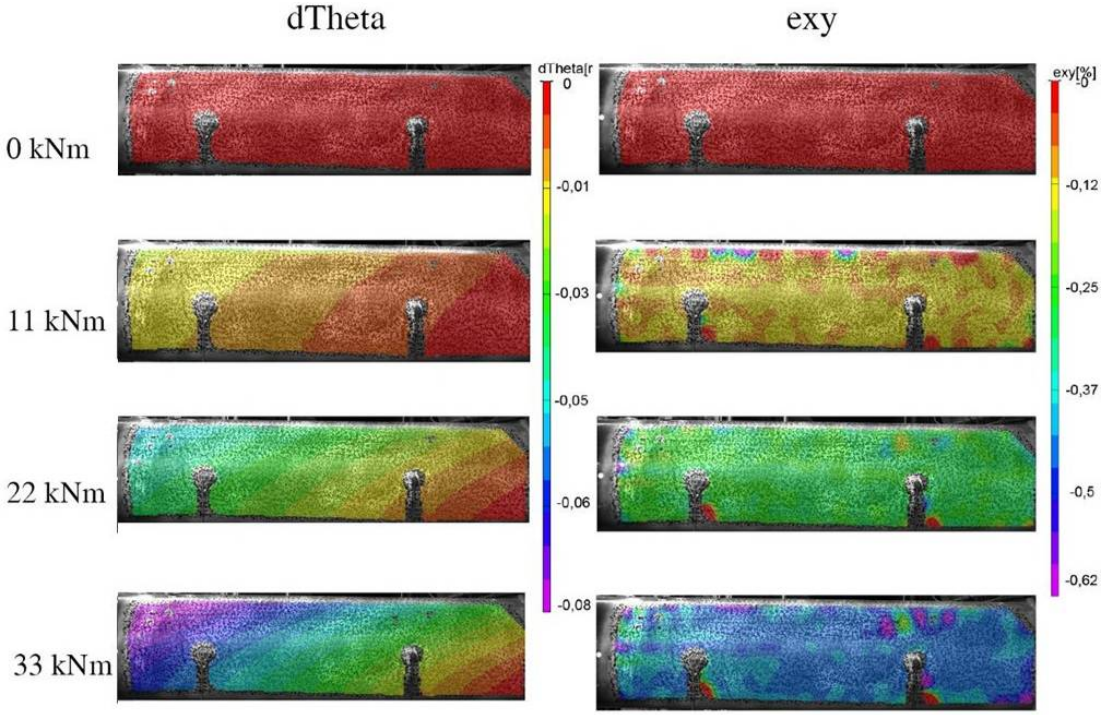


Abb. 3.185: Verdrehung (θ in rad) bzw. Verzerrungen (ε_{xy} in %) des Formholzrohres

Untersucht wurde der Bereich von Probenmitte bis hin zur festen Einspannung (rechte Bildseite). Für die ebenen Querschnitte wie Hohlkasten und BSH, sind die Verformungen in kartesischen Koordinaten, für den Rundquerschnitt in Zylinderkoordinaten angegeben.

HK-CFK

Im Fall des Hohlkastens wurde die Schmalseite (h = 18 cm) der Probe untersucht. Entlang der Torsionsachse sind die Dehnungen (ε_{xx}) des HK-CFK ausschließlich negativ. Die größten Dehnungen treten im Bereich der festen Einspannung auf. Die Verzerrungen sind auch bei höherer Belastung gleichmäßig über den Probekörper verteilt.

BSH

Im Vergleich zu HK-CFK ist die Dehnungsverteilung in Torsionsachse beim BSH weniger deutlich ausgeprägt. Abgesehen von diffusen Bereichen mit erhöhter negativer Dehnung an der Einspannungsstelle treten außerdem noch erhöhte negative Dehnungen in Trägermitte auf. Weitaus deutlicher orientiert ist e_{yy}: schon bei geringer Belastung konzentrieren sich die maximalen Zugdehnungen auf eine gedachte Linie vom oberen Bereich des festen Auflagers zum unteren Bereich des freien Auflagers. In xy-Richtung treten in Trägermitte im unteren Drittel vermehrt Zugdehnungen auf, die dann zum Aufspalten des Stabes in Längsrichtung führen (vgl. Abb. 3.184 BSH 1). Die mittlere Torsionsfestigkeit von fehlerfreien Kleinproben aus Fichtenholz beträgt ca. 9 N/mm^2 [244]. Im Versuch wurde eine mittlere Festigkeit von 6,2 N/mm^2 erreicht (vgl. Tabelle 3.45).

3.5.2.5 Formholzprofile im Vergleich zu etablierten Materialien und Querschnitten

Um die Potenziale der Formholzprofile fundierter darstellen zu können, wurde ein Variantenvergleich am Beispiel einer zentrisch gedrückten Stütze erstellt. Die 2,5 m lange Stütze sei beidseitig gelenkig gelagert und soll eine Traglast R_d von > 380 kN aufweisen, die somit die funktionale Einheit des Variantenvergleiches darstellt. Für den Vergleich wurden verschiedene Querschnitte, Materialien und Materialkombinationen herangezogen. Neben den unbewehrten sowie CFK verstärkten Formholzrohren wurden Standard BSH-Stützen mit rundem oder quadratischem Querschnitt als auch Rohrprofile aus Stahl und GFK sowie eine Stahlbetonstütze untersucht. Die den Berechnungen zu Grunde liegenden Materialkennwerte inkl. der angesetzten Teilsicherheitsbeiwerte sind Tabelle 3.46 zu entnehmen.

Tabelle 3.46: Kennwerte der untersuchten Materialien für den Variantenvergleich

Material	Stahl	GFK*	Holz			CFK (UD)***	C20/25-BSt500
Sortierklasse /Güte	S355	E-Glas-Polyester	GL32h Rechteck	GL32h Rundholz	Formholz** 1,1*GL36h	T700-Epoxy	Stahlbeton - Beton (Stahl)
Druck-E-Modul $E_{0,c,k}$ [N/mm^2]	210000	24000	13700	13700	16200	135000	28850 (210000)
Rohdichte [kg/m^3] Spez. Gewicht	7850	1800	430 500	430 500	450 600	1500	2500
Zugfestigkeit $f_{t,0,k}$ [N/mm^2]	510	410	22,5	22,5	28,6	2550	-- (510)
Druckfestigkeit $f_{c,0,k}$ [N/mm^2]	510	270	29	29	34,1	1470	20 (510)
Teilsicherheits-beiwert γ_m ($/k_{mod}$)	1,1	~ 2 (1,5*1,1*1,2)	~ 1,6 (1,3/0,8)			~ 3,1 (1,5*1,7*1,2)	1,5

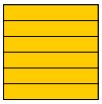
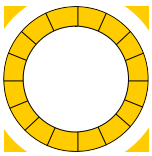
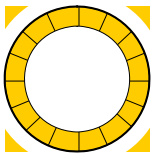
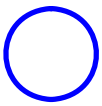
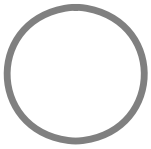
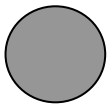
*GFK – Pultrudiertes E-Glas/Polyester Profil – Faservolumenanteil 48% (Verhältnis Rovings/Matten = 4/1) nach Eurocomp design code [251]
** Formholzrohr – Annahme: Basis sind Materialkennwerte eines GL36h die auf Grund der Verdichtung mit dem Faktor 1,1 erhöht wurden
*** CFK - TORAYCA T700S Datenblatt (TORAY Carbon Fibers America, Inc.) – Faservolumenanteil 60 %

Die für die Bemessung erforderlichen Teilsicherheitsbeiwerte sind den jeweiligen Normen entnommen. Im Falle der faserverstärkten Kunststoffe wurden die Beiwerte des Eurocomp design codes [251] zu Grunde gelegt.

Zur Bestimmung der Traglast wurde der Tragsicherheitsnachweis inkl. einer Stabilitätsanalyse (Knicken, Ring- und Schachbrettbeulen) durchgeführt (vgl. Abschn. 3.5.2.1.1). Die in Tabelle 3.47 vorgestellten Kennwerte als auch die Bewertungen der verschiedenen Profile dient ledig-

lich der Orientierung bzw. als Entscheidungshilfe für Querschnitts- und Materialwahl. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass die Berechnungsergebnisse stark von den gewählten Querschnitten abhängig sind. Bereits geringe geometrische Änderungen können zu erheblichen Abweichungen bzgl. Steifigkeit und Traglast führen. Im Fall des angegebenen Stahlbetonquerschnitts ist anzumerken, dass die minimal nötige Materialmenge berechnet wurde. Auf Grund des sich daraus ergebenen kleinen Stützendurchmessers ist jedoch beispielsweise die Betondeckung nicht eingehalten worden.

Tabelle 3.47: Variantenvergleich der Stützen

							
Querschnitt / Material	**Vollholz Quadrat**	**Vollholz Rund**	**Formholz-Rohr***	**Formholzrohr + CFK7****	**Stahlrohr**	**GFK-Rohr*****	**Stahlbeton**
Durchmesser d_a [mm]	160x160	180	276	278	127	240	150
Wandstärke t [mm]	--	--	19	19 (+0,5)	4	5,1	--
Querschnitt A [cm^2]	256	255	153	153 (+4,35)	15,5	37,6	177 (A_B), 7 (A_S)
Bauteilmasse m [kg]	32	32	23	23 (+1,6)	30	17	110
Traglast R_d [kN]	393	385	*316*	382	380	389	380
Steifigkeit EA/l [kN/m]	140	139	99	126	130	36	204

* Formholzrohr – mögliches Querzugversagen bei Traglastberechnung nicht berücksichtigt
** CFK Wicklung – T700/Epoxy ±7° Wicklung
*** GFK – Pultrudiertes Rohr

Da das untersuche Formholzrohr auf Grund der geringen Wandungsstärke von 19 mm zum Aufspalten neigt, wurde nur das CFK-bewehrte Formholzrohr für 380 kN bemessen. Um die CFK Wicklung sinnvoll in Ansatz bringen zu können, wurden die Kohlefasern im Winkel von ±7° zur Stabachse orientiert. Des Weiteren ist zu beachten, dass für das Bauwesen wesentliche Konstruktionsparameter (wie z. B. Ästhetik, Anschlusstechnik, Dimensionsstabilität, Brandverhalten, Wartung, Robustheit - Lastumlagerung infolge plastischer Reserven) nicht in die Bewertung eingeflossen sind.

3.5.3 Tragfähigkeit von Rohrverbindungen und Anschlüssen
Autor: Andreas Heiduschke (ISH)

Untersucht wurden sowohl geleimte Rohr-Rohr- und Rohr-Knoten-Verbindungen als auch Rohr-Knoten-Verbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln.

3.5.3.1 Druckversuche an Rohr-Knoten-Verbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln

Verbindungen mit stiftförmigen VBM haben den Vorteil, dass sie sich vergleichsweise einfach fertigen lassen und i. d. R. ein duktiles Verhalten aufweisen. Bei den hier untersuchten Anschlüssen wurden die Rohrquerschnitte vorgebohrt, auf massive Rundholzquerschnitte aufgeschoben und im Anschluss mittels Kammnägeln vernagelt (vgl. Abb. 3.186). Bei diesem Anschluss handelt es sich um eine einschnittige Holz-Holz-Verbindung. Die Druckversuche an Rohr-Knoten-Verbindungen erfolgten weggesteuert mit einer Prüfgeschwindigkeit von 3 mm/min.



Abb. 3.186: Druckversuch an Rohr-Knoten-Verbindung mit Kammnägeln – Versuchsaufbau, Nagelbild (UN_150_2o) und Bruchbild der Probe UN_276_1

Insgesamt wurden zehn Verbindungen mit einem Rohrdurchmesser von 276 mm (Wandung 19 mm) und vier Verbindungen mit einem Durchmesser von 150 mm (Wandung 20 mm) sowie ein massives Rundholz als Referenz (RH_150) geprüft. Als VBM wurden je Anschluss 54 Kammnägel 6x80 mm oder 48 Kammnägel 4x50 mm verwendet (vgl. Tabelle 3.48).

Tabelle 3.48: Testmatrix und Versuchsergebnisse der Nagelverbindungen

Bezeichnung	Kammnägel	Besonderheit	Textil-bewehrt	Fließgrenze		Traglast bei u = 5 mm F_{ult} [kN]	Steifigkeit K [kN/mm]
				F_y [kN]	u_y [mm]		
UN_276_1o	3x18 KN 6x80		nein	103	1,6	132	58,8
UN_276_1u	3x18 KN 6x80		nein	107	1,7	135	54,5
UN_276_2o	3x18 KN 6x80		nein	111	1,9	143	72,1
UN_276_2u	3x18 KN 6x80		nein	105	1,3	139	50,4
R45_278_1o	3x18 KN 6x80		GFK 45°	126	1,5	160	79,2
R45_278_1u	3x18 KN 6x80		GFK 45°	127	1,5	163	76,0
R85_278_1o	3x18 KN 6x80	5 mm Übermaß	GFK 85°	138	2,7	148	48,5
R85_278_1u	3x18 KN 6x80		GFK 85°	138	2,7	146	49,2
R85_278_2o	3x18 KN 6x80		GFK 85°	135	3,3	131	81,4
R85_278_2u	3x18 KN 6x80		GFK 85°	138	3,0	138	76,2
UN_150_1o	4x12 KN 4x50	10 mm Spalt	nein	63	1,7	73 (422)	32,7 (500)
UN_150_1u	4x12 KN 4x50	10 mm Spalt	nein	63	1,7	76 (422)	31,5 (500)
UN_150_2o	4x12 KN 4x50	5 mm Spalt	nein	56	1,6	71 (400)	27,8 (500)
UN_150_2u	2x12 KN 4x50	Kontakt Hirnholz	nein			400	520
RH_150	nein	Kontakt Hirnholz	nein			689	1030

Die Angaben in ( ) sind Werte bzgl. des Tragverhaltens nach Kontakt der Hirnholzflächen

Auf Grund der großen Dübelfläche (Rohrumfang) bei gleichzeitig geringer Wandungsstärke empfiehlt es sich, viele Verbindungsmittel mit kleinem Durchmesser zu verwenden. Dies ermöglicht die Ausbildung plastischer Gelenke in den Verbindungsmitteln selbst bei kleinen Wandstärken von nur ca. 2 cm. Die Verkrümmung der Nägel bewirkt, dass der Rohrquerschnitt im Anschlussbereich durch die sich nach innen neigenden Nagelköpfe eine Einschnürung erfährt. Dies führt dazu, dass selbst unverstärkte Rohre nicht aufspalten (vgl. Abb. 3.186). Dies gilt gleichermaßen für druck- und zugbeanspruchte Verbindungen.

Im Vergleich zur Traglast des ungestoßenen Profils von ca. 900 bzw. 690 kN (RH_150) erreichen die genagelten Verbindungen mit 160 bzw. 75 kN nur etwa 10 bis 20 % der vollen Traglast (vgl. Tabelle 3.48). Auf Grund der hohen Duktilität der Anschlüsse gilt die Traglast bei Verformungen von 5 mm als erreicht. Abb. 3.187 zeigt die Last-Verformungskurven der Verbindungen. Werden die Enden der Knotenelemente zapfenförmig gefertigt (vgl. Abb. 3.186 – UN_150), so dass die Druckkräfte zwischen Knoten und Rohr mittels stirnseitigen Kontakts übertragen werden können, dann lassen sich Traglast und Steifigkeit um ein Vielfaches steigern.

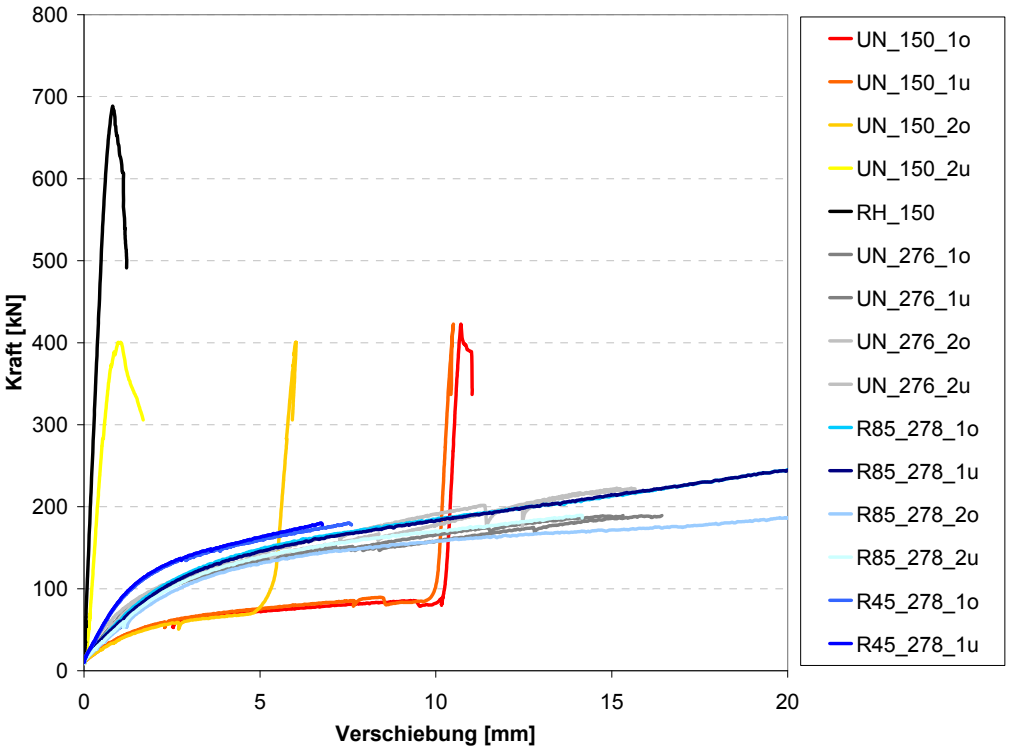


Abb. 3.187: Kraft-Verformungsverhalten der Rohr-Knoten-Verbindung

3.5.3.2 Geleimte Rohr-Rohr- und Rohr-Knoten-Verbindungen

Für die Ausführung von geklebten Verbindungen muss der Hersteller bzw. der Ausführende im Besitz der jeweils erforderlichen Bescheinigung als auch geeigneter Einrichtungen sein.

Bei den geklebten Verbindungen wurden zwei verschiedene Stoßvarianten von Hess gefertigt: (1) eine kreisrunde Schäftung und (2) eine Generalkeilzinkverbindung (vgl. Abb. 3.188). Zum Verleimen der Bauteile wurde Resorcinharz verwendet. Nachteil der Schäftung ist die Neigung der Klebefläche, die nach DIN 1052:2008 einen Wert von 1/10 nicht überschreiten sollte. Dies erfordert bei 20 mm Wandstärke eine Schäftungslänge von 200 mm. Da die sehr spitz zulaufenden Schnittkanten zum Ausbrechen neigen und das Aufbringen eines definierten Pressdruckes sehr schwierig ist, wurde dieser Verbindungstyp gefertigt, jedoch nicht näher untersucht.



Abb. 3.188: geschäftete und keilgezinkte Verbindungen von Formholzrohren

Auf Grund der vergleichsweise einfach herzustellenden Generalkeilzinkenverbindung (Zinkenlänge 50 mm) wurde dieser Verbindungstyp gewählt und verschiedenen mechanischen Prüfungen (Druck- und Biegeprüfung) unterzogen. Insgesamt wurden zehn Rohre à 2,5 m gezinkt und zu 5 m-Rohren verleimt. Diese Rohre wurden im Anschluss bei SGL Carbon mit Kohlefaserwicklungen versehen. Die Prüfung der Rohre ergab, dass die Traglast der keilgezinkten Rohre über 90 % der Traglast nicht gestoßener Rohre erreicht (vgl. Abschn. 3.5.2.1). Dies gilt für Rohrverbindungen mit geringen Bewehrungsgraden (CFK45 - t_{CFK} = 0,55 mm). Die Proben versagen im Bereich des Zinkengrundes auf Grund der dortigen Querschnittsschwächung. Eine zusätzliche Armierungsschicht in ±7° (t_{CFK} = 1,1 mm), d. h. nahezu parallel zur Stabachse, hatte eine Änderung des Bruchverhaltens zur Folge. Die Armierung der Rohre in Axialrichtung stützt den keilgezinkten Bereich, so dass die Wicklung an der Lastabtragung beteiligt wird. Dieses Rohr versagte an den Lasteinleitungen (Kontaktfläche zu den Druckplatten der Prüfmaschine) durch Ausknicken der Fasern bei einer Last von 985 kN. Um ein Ausweichen in radialer Richtung zu verhindern, wurden die Enden der Rohrsegmente einbetoniert (vgl. Abb. 3.190). Die Einfassung der Proben mittels Normal- oder Polymerbeton ermöglichte es, die reelle Traglast der Verbundbauteile zu bestimmen. Für die keilgezinkte CFK745 Probe (inkl. in Polymerbeton gegossener Lasteinleitung) wurde eine Traglast von 1157 kN ermittelt. Abb. 3.189 zeigt die Kraft-Dehnungsbeziehung dieses Rohres sowie das Auswölben der CFK-Bewehrung im Bereich der Keilzinkung.

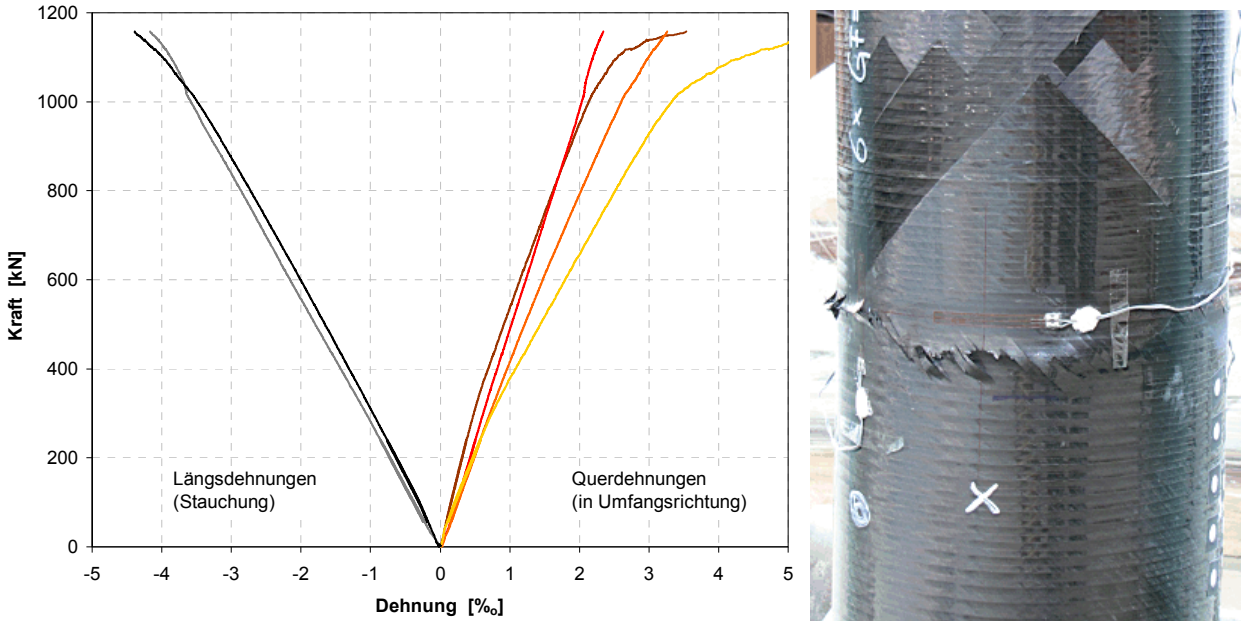


Abb. 3.189: Kraft-Dehnungsbeziehung der keilgezinkten CFK745-Probe und Bruchbild

Ein wesentlicher Vorteil der eingegossenen Rohrenden ist die Passgenauigkeit des Anschlusses. Der Verguss stellt sicher, dass die axialen Spannungen gleichmäßig (ohne Schlupf infolge Fertigungsungenauigkeiten etc.) in die angrenzenden Bauteile abgetragen werden und löst zugleich das Querdruckproblem an der Krafteinleitung. Diese Ausführung des Anschlussbereiches stellt zugleich eine mögliche Anschlussvariante für Stützen an herkömmliche Stahlbetondecken dar. Abhebende Kräfte werden von eingeleimten Gewindestangen oder aber mittels verdübelter Zuganker aufgenommen.



Abb. 3.190: einbetoniertes CFK-Formholzrohr

Für den in Abb. 3.190 dargestellten Anschluss wurde eine Mischvariante aus Normal- und Polymerbeton verwendet. Auf Grund der vergleichsweise hohen Kosten für Polymerbeton wurde dieser nur als Kontaktschicht zwischen Rohrwandung und Betonfuß eingesetzt. Polymerbeton hat den Vorteil, dass (1) er eine hohe Druckfestigkeit besitzt und deshalb hohe Spannungskonzentrationen problemlos erträgt, (2) er eine gute Verbundwirkung mit hoher Haftfestigkeit zu FVK, Holz und Beton aufweist und (3) er das Holz vor Feuchteeinwirkung (insbes. des Normalbetons) schützt.

3.5.4 Verbindungen von Rohren mit massiven Knoten zu Tragwerksteilen

Autoren: Andreas Heiduschke (ISH), Yvette Lemke (IaFB), Maik Weise

3.5.4.1 Allgemeines

Auf Grund des großen Versuchsumfangs an den zuvor beschriebenen Rohr-Knoten-Verbindungen sollte sich die Fertigung ganzer Tragwerksteile auf die Realisierung des Pilotprojektes Hess-Innenhofüberdachung beschränken. Die Prüfung der Rohr-Knoten-Verbindungen hat verdeutlicht, dass der Anschluss des Rohres an ein Vollholz stets das schwächste Glied der Konstruktion darstellt. Die Traglast des massiven Knotens sowie der Stäbe (Rohre) spielt für den Entwurf und die Bemessung eine untergeordnete Rolle. Aus diesem Grund wurde auf weiterführende Untersuchungen verzichtet. Anhand der gesammelten Daten ist der Entwurf verschiedener Tragwerkslösungen möglich.

Für die Ausführung des zentralen Knotens des Hess-Schirmes sowie einer biegesteifen Stütze-Riegel-Verbindung wurden folgende Lösungen auf Basis vergossener Knoten erarbeitet.

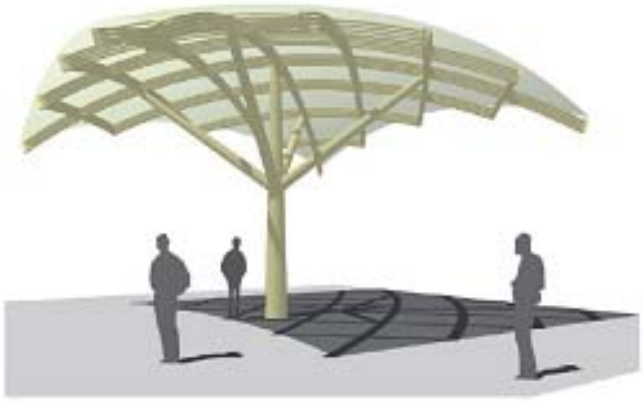


Abb. 3.191: Entwurf des Hess-Schirmes

Der Einsatz von Profilquerschnitten in ebenen oder räumlichen Stabwerkkonstruktionen erfordert die Entwicklung geeigneter Knoten- und Anschlusslösungen. Da der Entwurf der Details stark von den geometrischen Randbedingungen sowie den Belastungssituationen abhängig ist, wurde entschieden, die verschiedenen Knotenvarianten anhand konkreter Bauvorhaben zu untersuchen und vorzubemessen. Anhand des Vergleichs mit bestehenden Tragwerken können bereits konkrete Aussagen bezüglich Fertigung, Tragverhalten und Wirtschaftlichkeit der untersuchten Varianten getroffen werden.

Für den Fall des ebenen Tragwerks wurde eine bereits ausgeführte Stahl-Fachwerkkonstruktion der Neutronenleiterhalle des Hahn-Meitner-Instituts in Berlin als Referenz herangezogen. Die entwickelte HHT-Lösung basiert auf der Verwendung von Kastenprofilen, welche mittels verleimter Vollholz- oder Schichtholzknoten zu einem Fachwerk zusammengesetzt werden.

Für den Fall der räumlichen Knotenelemente wurde die Konstruktion des Pilotprojektes „Hess-Innenhofüberdachung“ gewählt. Entworfen wurden verschiedene Knotenlösungen bestehend aus zusammengesetzten ebenen Schichtholzknoten, herkömmlichen Stahlknotenverbindungen und Vergussknoten auf Zement- oder Kunstharzbasis. Auf Grund der primär auf Druck beanspruchten Anschlüsse erscheint die letztgenannte Lösung als sehr effektiv und wirtschaftlich, da der Hohlraum der Rohrprofile gleichzeitig als Schalung für die Vergussmasse dient. Wegen der hohen Passgenauigkeit sind sehr leistungsfähige Anschlüsse möglich. Als nachteilig zu bewerten sind die zu erwartenden Quell- und Schwindverformungen der Holzprofile, mit denen auf Grund des Eintrags von Wasser zu rechnen ist. Dies ist jedoch nur bei zementbasierten Vergussmassen der Fall.

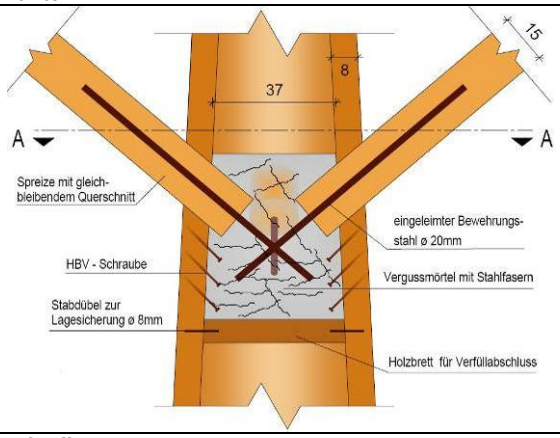
Weiterverfolgt wurde ebenfalls das Konzept der Knotenblech-Verbindungen mit eingeschlitzten GFK-Blechen und Stabdübeln sowie selbstbohrenden Vollgewindeschrauben (siehe dazu AP 4.4).

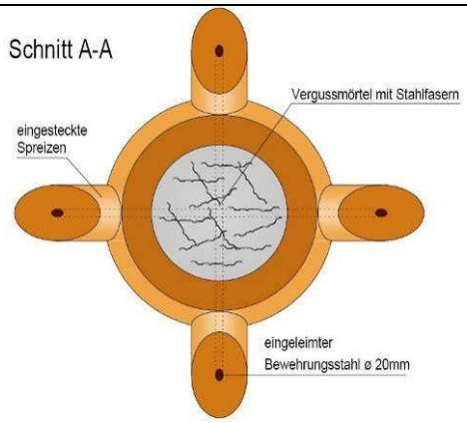
3.5.4.2 Detaillösungen für den Anschluss der Spreizen an die Stütze

Die Entwicklung räumlicher Knotenelemente wurde eng an das Pilotprojekt „Hess-Innenhofüberdachung“ gekoppelt (vgl. Abb. 3.92). Diesbezüglich wurden verschiedene Ausführungsvarianten für den zentralen Knoten des Schirmes entwickelt und vorbemessen

In der folgenden Übersicht werden 5 Varianten von Spreizen-zu-Stütze-Verbindungen aufgezeigt. Dabei wird jeweils auf ihre Vorteile und Nachteile eingegangen.

Variante 1





Beschreibung:

- Spreizen (möglichst schlank, hier d=15 cm) werden durch die Stützenwand (Rohrprofil) in den Innenraum eingesteckt
- in den Spreizen wird zentral ein Bewehrungsstahl eingeleimt
- Innenwand der Stütze wird über eine bestimmte Höhe mit Holz-Beton-Verbundschrauben (HBV-Schrauben) versehen
- Schrauben werden im Winkel von 45° eingedreht, um optimale Tragfähigkeit zu gewährleisten
- Innenraum wird in einer bestimmten Höhe mit schwindfreiem Vergussmörtel verfüllt
- dem Vergussmörtel werden zusätzlich Stahlfasern beigemischt, um optimalen Verbund zu HBV-Schrauben zu erzielen
- bei der Fertigung der Stütze wird ein Holzbrett eingebracht, das den Verfüllabschluss bildet
- Stabdübel gewährleisten die Lagesicherung des Brettes

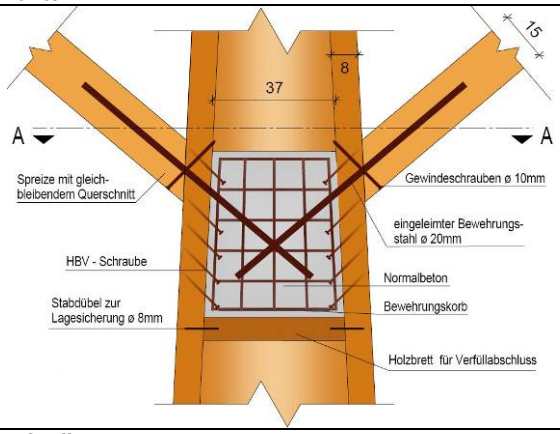
Vorteile:

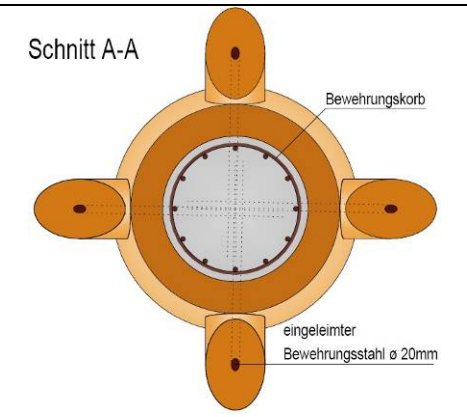
- einfache innovative Konstruktion
- Baumoptik ideal umgesetzt -> keine sichtbaren Fugen
- geringe Festigkeit des Holzes bei Druck senkrecht zur Faser wird umgangen

Nachteile:

- Löcher in der Stützenwandung schwächen den Querschnitt -> größerer Stützendurchmesser erforderlich, um Biegemoment aufzunehmen
- Abdichtung dieser Löcher nötig und schwierig

Variante 2





Beschreibung:

- Spreizen werden nicht in den Innenraum eingesteckt
- in den Spreizen wird zentral ein Bewehrungsstahl eingeleimt, diese werden in der Stütze verankert
- Innenwand der Stütze wird über eine bestimmte Höhe mit Holz-Beton-Verbundschrauben (HBV-Schrauben) versehen
- Schrauben werden im Winkel von 45° eingedreht, um optimale Tragfähigkeit zu gewährleisten
- in den Innenraum wird ein Bewehrungskorb eingesetzt
- Innenraum wird in einer bestimmten Höhe mit Normalbeton verfüllt
- am Spreizenanfang werden zusätzlich Holzgewindeschrauben schräg zur Faser eingedreht
- bei der Fertigung der Stütze wird ein Holzbrett eingebracht, das den Verfüllabschluss bildet
- Stabdübel gewährleisten die Lagesicherung des Brettes

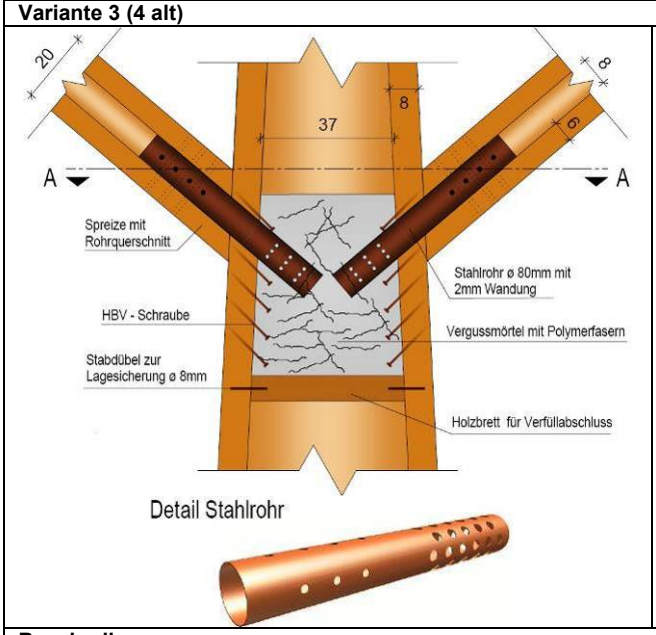
Vorteile:

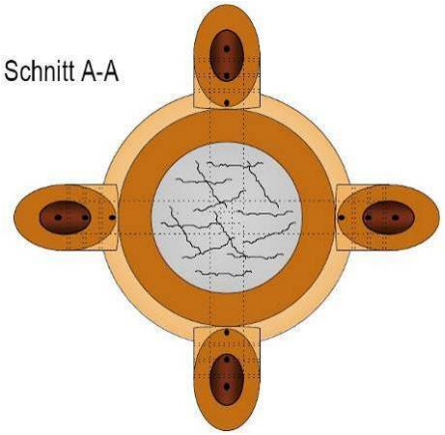
- einfache innovative Konstruktion
- beliebiger Spreizenquerschnitt möglich

Nachteile:

- Gefahr der Fugenbildung am Spreizenende, auf Grund Verformung des Bewehrungsstahls

Variante 3 (4 alt)





Beschreibung:

- Spreizen als Rohrprofile
- in den Spreizen wird Stahlrohr eingesteckt, das mittels Stabdübeln befestigt wird
- Stahlrohr wird in den Sützenraum eingesteckt (Stahlrohr am Ende mit Löchern und Abschlussplatte versehen, um Verankerung zu gewährleisten)
- Innenwand der Stütze wird über eine bestimmte Höhe mit Holz-Beton-Verbundschrauben (HBV-Schrauben) versehen
- Schrauben werden im Winkel von 45° eingedreht, um optimale Tragfähigkeit zu gewährleisten
- Innenraum wird in einer bestimmten Höhe mit Vergussmörtel verfüllt
- dem Vergussmörtel werden Polymerfasern beigemischt
- bei der Fertigung der Stütze wird ein Holzbrett eingebracht
- Holzbrett wird mittels Stabdübeln verankert

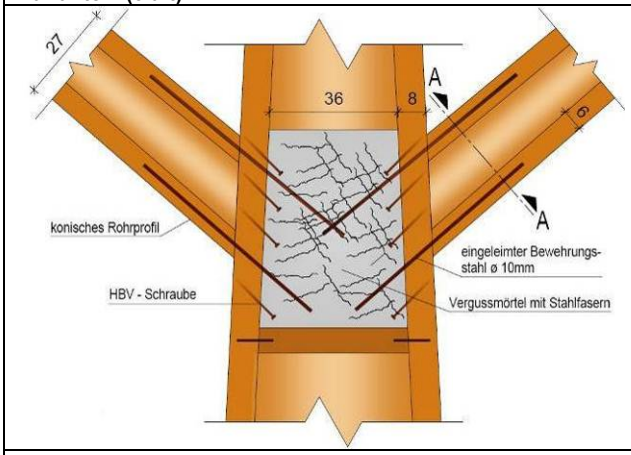
Vorteile:

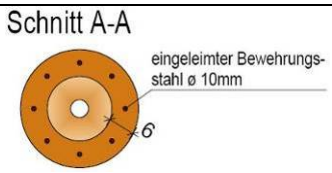
- ideal bei Verwendung von Rohrprofilen
- Spreizen können rückgebaut werden
- geringe Festigkeit des Holzes bei Druck senkrecht zur Faser wird umgangen

Nachteile:

- Löcher für das Stahlrohr in der Stützenwandung schwächen den Querschnitt -> größerer Stützendurchmesser erforderlich, um Biegemoment aufzunehmen

Variante 4 (5 alt)





Beschreibung:

- Spreizen als Rohrprofile
- in den Spreizen werden Bewehrungsstähle eingeleimt (gleichmäßig auf Mittellinie der Wandung verteilt)
- in die Stützenwand werden Löcher für die Bewehrungsstähle gebohrt
- Innenwand der Stütze wird über eine bestimmte Höhe mit Holz-Beton-Verbundschrauben (HBV-Schrauben) versehen
- Schrauben werden im Winkel von 45° eingedreht, um optimale Tragfähigkeit zu gewährleisten
- Innenraum wird in einer bestimmten Höhe mit Vergussmörtel verfüllt
- bei der Fertigung der Stütze wird ein Holzbrett eingebracht
- Holzbrett wird mittels Stabdübeln verankert

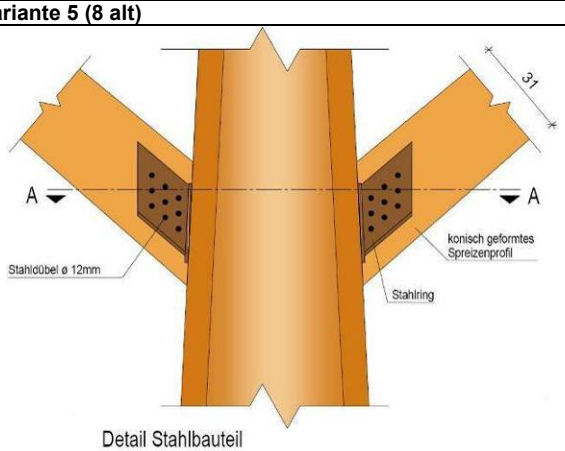
Vorteile:

- Stützenquerschnitt wird minimal geschwächt
- beliebiger Spreizenquerschnitt möglich

Nachteile:

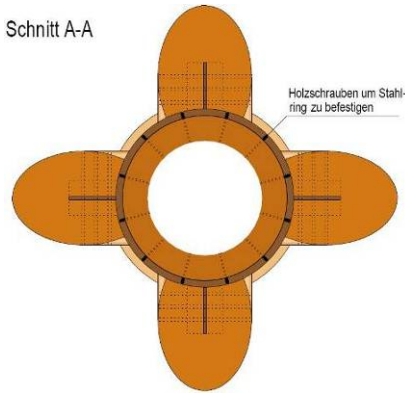
- Bewehrungsstähle werden auf Abscheren beansprucht , -> Holz-Bewehrungsstahl-Verbindung stark beansprucht, daher evtl. zusätzlich Holzgewindeschrauben im Anschlussbereich durch Spreize und Stütze eindrehen

Variante 5 (8 alt)



Detail Stahlbauteil





Beschreibung:

- konisch geformte Spreizen mit Vollquerschnitt
- in die Spreize werden Schlitze für die Stahlbauteile eingefräst
- Spreizen werden auf Stahlbauteile aufgesteckt und mit Stabdübeln befestigt
- Stahlbauteil (umgekehrte T-Profile geschweißt an Stahlring) wird über die Stütze übergestülpt und mit Holzschrauben fixiert

Vorteile:

- geringe Festigkeit des Holzes bei Druck senkrecht zur Faser wird umgangen
- Spreizen wieder abnehmbar
- beliebiger Spreizenquerschnitt möglich

Nachteile:

- Stahlring sichtbar -> optisch nicht ideal

Zusammenfassung:

Es zeigt sich, dass es viele verschiedene Möglichkeiten der Knotenlösung gibt. Um die optimale Lösung zu finden, müssen die jeweiligen Detaillösungen hinsichtlich ihrer Vor- und Nachteile abgewogen werden.

Bei der Variantenauswahl wurde hier auf eine reine Holzbauverbindung (z. B. eine Zapfenverbindung) verzichtet, da durch den Anschluss der Spreizen Kräfte rechtwinklig zur Faser der Stützenwandung eingeleitet werden. Da die Festigkeit des Holzes rechtwinklig zur Faser nur ca. 10% der Festigkeit parallel zur Faser beträgt, wird die Kontaktfläche stark beansprucht, und es kann zu Deformierungen kommen. Für das Pilotprojekt Hess-Innenhofüberdachung wurde jedoch ein Versatzanschluss mit eingeklebtem Vollholzstück detailliert untersucht.

Viele Varianten beinhalten eine Verfüllung des Stützeninnenraums. Dadurch werden die Kräfte aus den Spreizen über einen zentralen Knoten in die Stütze umgeleitet. Vorteile einer solchen Konstruktion sind im Wesentlichen der Brandschutz und die optimale Formgestaltung des Vergussmaterials. Die Baustoffe werden dabei so eingesetzt, dass ihre positiven Eigenschaften ausgenutzt werden. Zum Verfüllen können verschiedene Materialien genutzt werden, deren Vor- und Nachteile im Folgenden genannt werden:

Normalbeton:

+ kostengünstig, hohe Druckfestigkeit
- schwindanfällig, feucht bei der Herstellung (schlecht für Holz, Quellgefahr)

Kunstharzmörtel (3-Kompontenmörtel auf Epoxidharz-Basis):

+ schwindfrei, hohe mechanische Festigkeiten, kurze Durchhärtungsdauer
- kostenintensiv, feucht bei der Herstellung

zementbasierende Vergussmörtel:

+ schwindfrei, hohe mechanische Festigkeiten, schnelle Festigkeitsentwicklung, kein Entmischen
- kostenintensiv, feucht bei der Herstellung

Um einen Feuchtigkeitsaustausch zwischen Holz und Vergussmaterial zu vermeiden, müssen bei der Verfüllung im Stützeninnenraum Folien angebracht werden. Weiterhin werden den Verfüllstoffen Bewehrungsmaterialen beigefügt, um den Verbund zu den HBV-Schrauben zu gewährleisten. Dabei können normaler Bewehrungsstahl, Stahlfasern, Holzfasern oder Polymerfasern eingesetzt werden. Faserbeimischungen verringern die Rissbreiten von Frühschwindrissen. Weiterhin wird durch Holz- und Polymerfasern das Brandverhalten der Konstruktion positiv beeinflusst, auf Grund größerer Porenräume im Beton und der daraus folgenden Wasserdampfdruckminderung im Brandfall.

Zu berücksichtigen ist, dass die hier vorgestellten Verfahren alle mehr oder weniger biegesteife Anschlüsse darstellen. Ist dies nicht erwünscht, sind andere Anschlussvarianten zu wählen wie beispielsweise der nahezu gelenkige Versatzanschluss des Pilotprojektes Hess-Innenhofüberdachung (vgl. Kap. 3.8.4).

Materialauswahl

Bei der Auswahl der Materialen für die Stütze und die Spreizen können folgende Werkstoffe in Betracht gezogen werden:

- WPC (Wood-Polymer-Composite, Holz-Kunststoff-Verbindungen)
  + splitterfrei, freie Formbarkeit, feuchtebeständig, geringfügig verwitterungsanfällig
  - kostenintensiv
- Brettschichtholz
  + hohe Formbeständigkeit und Maßhaltigkeit, große Tragfähigkeit, makellos
  - witterungsanfällig

- Vollholz
  + günstig
  - bedingt formbar, witterungsanfällig
- kunstharzgebundene Naturfasern

Die Entscheidung, welche der Materialien zum Einsatz kommen, hängt vom Anspruch an die Witterungsbeständigkeit und dem Kostenfaktor ab. Ist die Witterungsbeständigkeit von hoher Bedeutung, hätte dies beispielsweise eine nachträgliche Behandlung von Brettschichtholz und Vollholz zur Folge, die bei Verwendung von WPC nicht notwendig wäre. Da eine Wicklung der Stützen und der Spreizen mit Kunststoff geplant ist, kann auf eine nachträgliche Behandlung verzichtet werden.

3.5.5 Alternative Verfahren zur Herstellung von Profilquerschnitten

Autor: Andreas Heiduschke (ISH)

Parallel zu den Formholzprofilen wurden zwei Rohre im Alternativverfahren durch Verleimung von 16 trapezförmigen Holzsegmenten mit Nut und Feder hergestellt und geprüft. Die Alternativrohre erzielten eine mittlere Traglast von 1144 kN. Dabei ist jedoch anzumerken, dass die im Alternativverfahren hergestellten Rohrprofile, mit einem Außendurchmesser von 295 mm und einer Wandstärke von 30 mm, eine doppelt so große Querschnittsfläche aufweisen. Dies erklärt die im Vergleich zu den unbewehrten Formholzrohren höhere Traglast der Alternativrohre. Analog dazu wurde die Stütze für den Holzmast im Pilotprojekt „Vertikalachswindkraftanlage“ aus 12 trapezförmigen Holzsegmenten hergestellt (s. Abschn. 3.8.3.4).

Angeregt von den Ergebnissen des Variantenvergleiches von Profilquerschnitten mit und ohne CFK-Wicklung wurden von Hess fünf Hohlkastenprofile (LxBxH 4400x180x300 mm) mit einer Wandstärke von 40 mm aus verleimten Fichtenbrettlamellen gefertigt. Die Profile wurden im Wickelverfahren laminiert und im Biegeversuch geprüft (s. Abschn. 3.5.2.3).

3.5.6 Verstärkungen von Brettschichtholzträgern

Autoren: Andreas Heiduschke (ISH), Rensteph Thompson (Hess), Andrea Untergutsch (IaFB)

3.5.6.1 Einleitung

Die Untersuchungen hatten die Entwicklung eines Hybridbalkens mit exzellenten mechanischen Eigenschaften und hoher Dauerhaftigkeit zum Ziel. Der Verbundbalken muss in der Außenanwendung als Bauteil einer Fußgängerbrücke der Witterung widerstehen können, wobei ein besonderes Augenmerk auf die Lager und auf die Oberseite des Trägers gelegt wurde, die bei einigen Varianten gleichzeitig als Handlauf dienen soll.

Das Tragvermögen von Brettschichtholzbindern wird von den natürlichen Fehlstellen wie Ästen und Keilzinkenverbindungen auf der Zugseite der Träger beschränkt. Aus diesem Grund ist die Verstärkung in Längsrichtung von BSH Inhalt zahlreicher Forschungsarbeiten, in denen Stahl oder Glas-, Aramid- bzw. Kohlefaserverstärkte Kunststoffe (GFK, AFK, CFK) auf der Zugseite angebracht werden, um die Biegetragfähigkeit und die Steifigkeit zu erhöhen.

Blaß et al. [263] untersuchten das Verhalten von CFK-verstärkten Trägern. Neben ihren überdurchschnittlichen mechanischen Eigenschaften haben die FVK-Lamellen den Vorteil einer theoretisch unbegrenzten Länge. Nachteile dieser Lösung sind die hohen Kosten von Kohlefasern sowie die Notwendigkeit einer Abdeckung der Verstärkungsschicht z. B. mit einer zusätzlichen Brettlage, um das CFK vor Feuer oder mechanischen Einwirkungen zu schützen.

Bei Kompositwerkstoffen sind die Spannungen jeder Lage von der Steifigkeit des Materials abhängig. Daher ist es ratsam, zur Verstärkung Materialien mit einem hohen E-Modul zu verwenden. Blaß erreicht durch seine Verstärkung eine 1,4- bis 1,7-fach höhere Festigkeit und 1,1- bis 1,3-fach höhere Steifigkeit gegenüber herkömmlichen BSH. Zu ähnlichen Ergebnissen kam

Tingley [264]. Diese Ergebnisse zeigen, dass die Erhöhung der Tragfähigkeit, insbesondere aber der Steifigkeit durch eine Verstärkung mit FVK begrenzt ist. Dies ist zum einen auf die geringe eingesetzte Menge an FVK und zum anderen auf die ohnehin hervorragenden Eigenschaften des Holzes in Längsrichtung zurückzuführen. Unabhängig von einer Bewehrung ist die Tragfähigkeit des BSH durch die Tragfähigkeit der äußersten Lamellen begrenzt. Daher kann unbewehrtes BSH mit Lamellen höherer Güteklassen in den äußeren Bereichen die gleiche Tragfähigkeit wie bewehrtes BSH erreichen.

Unlängst wurde die Verwendung von Buchenlamellen für strukturelle Anwendungen von Frese und Blaß [265] untersucht. Dieses Buche-Fichte-BSH zeigte höhere Tragfähigkeiten und Steifigkeiten. Allerdings sind bei der Verwendung von Buchenlamellen deren relativ hohe Kosten und ihre geringe Dauerhaftigkeit von Nachteil.

Die Anwendung kombinierter oder hybrider Balken ist nicht neu. Braun und Moody [266] führten eine Serie von Biegetests an BSH durch, das an der Zugseite mit Furnierschichtholz (LVL - Laminated Veneer Lumber) verstärkt war. Die Biegetragfähigkeit stieg auf Grund der höheren Tragfähigkeit der Lamellen aus Furnierschichtholz deutlich an, da das Furnierschichtholz herstellungsbedingt über keine Keilzinken sowie über eine bessere Verteilung der natürlichen Fehlstellen verfügt.

Im HHT-Projekt wurde das Verhalten von Hybridbalken bestehend aus BSH und KHP untersucht. Ziel dieser Untersuchungen war die Entwicklung eines Kompositträgers für die Verwendung als Hochleistungsfußgängerbrücke mit schlanken Trägern. Als besondere Anforderung sollte die Dauerhaftigkeit der ungeschützten Träger unter natürlicher Witterung (UV-Strahlung, Regen, Frost-Tau-Wechsel u. a.) gewährleistet werden. Für die Versuche wurde vollgetränktes KHP, das sich durch eine hohe Dauerhaftigkeit und Dimensionsstabilität auszeichnet, verwendet. Ein besonderes Augenmerk gilt den Lagern und den Oberseiten der Balken, die auch als Handläufe dienen können sollen. Die multifunktionelle Verwendung rechtfertigt die höheren Kosten, die beim Einsatz von KHP entstehen.

3.5.6.2 Materialeigenschaften – Holz und Kunstharzpressholz

Zur Herstellung des BSH wurde Holz unterschiedlicher Güteklassen verwendet. Um die Materialeigenschaften der Brettschichtholzbinder zu ermitteln, wurden Biege- und Druckversuche an kleinen Proben mit einem Querschnitt von 20x20 mm^2 durchgeführt. Es wurden zwei Arten von Pressholz, nicht imprägniertes und kunstharzimprägniertes Pressholz, verwendet. Abgesehen von einer Furnierlage waren alle Lagen in die gleiche Richtung orientiert. Die eine Furnierlage, die senkrecht angeordnet ist, dient der Stabilisierung der Platte während des Verdichtens. Die Größe der Furnierplatten entsprach der üblicher Sperrholzplatten.

Leijten [267] führte ausführliche Experimente durch, um die mechanischen und physikalischen Eigenschaften von KHP für strukturelle Anwendungen zu bestimmen. Laut Leijten steigt die Sprödigkeit mit dem Harzgehalt. Unglücklicherweise geht dieses Verhalten mit einem Abfallen der Festigkeit und Steifigkeit einher. Wie die Versuche zeigen wurden keine wesentlichen Unterschiede zwischen nicht- und imprägnierten Proben gemessen. Der Grund dafür ist, dass der Harzgehalt der imprägnierten KHPi nur 10-20 % betrug. Dieser Harzgehalt ist zu gering, um die mechanischen Eigenschaften zu beeinflussen, allerdings hoch genug, um die Dauerhaftigkeit ausreichend zu verbessern. In Bezug auf die Druckfestigkeit verhält sich harzgetränktes Material wie ungetränktes Material. Die erzielten Versuchsergebnisse einschließlich der Standardabweichungen sind in Tabelle 3.49 dargestellt.

Tabelle 3.49: Materialeigenschaften und Standardabweichung von Fichte und KHP

	Harz-tränkung	Probekörper-anzahl	Dichte [kg/m^3]	Druckfestigkeit [N/mm^2]	Biegefestigkeit [N/mm^2]	E-Modul [N/mm^2]
Fichte C24	Nein	3	510 (54)	47 (2)	72 (3)	10340 (380)
Fichte C35	Nein	6	530 (44)	55 (10)	77 (11)	12310 (1640)
KHPn	Nein	20	1180 (44)	128 (12)	220 (31)	21220 (1363)
KHPi	Ja	20	1260 (31)	183 (7)	219 (15)	20630 (1412)

Standardabweichung in ( )

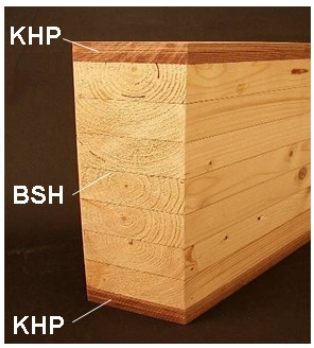
Die Herstellung der verstärken BSH-Träger erfolgte nach demselben Verfahren wie die Herstellung normaler BSH-Träger. Als Bindemittel wurde Resorcin-Formaldehyd verwendet.

3.5.6.3 Versuchsaufbau

Abb. 3.192 zeigt den Versuchsaufbau des 4-Punkt-Biegetests nach EN 408 [14]. Die Länge der Träger beträgt 4,5 m, die Spannweite 4,2 m. Das Verhältnis von Spannweite zu Höhe beträgt L/h = 13,5 und entspricht damit nicht den Anforderungen der EN 408, die ein Verhältnis L/h= 18±3 fordert. Der Abstand zwischen Auflager und Lasteinleitung beträgt 1,35 m.



Trägerquerschnitt
100 x 310 mm



Versuchsaufbau 4-Punkt Biegeprüfung

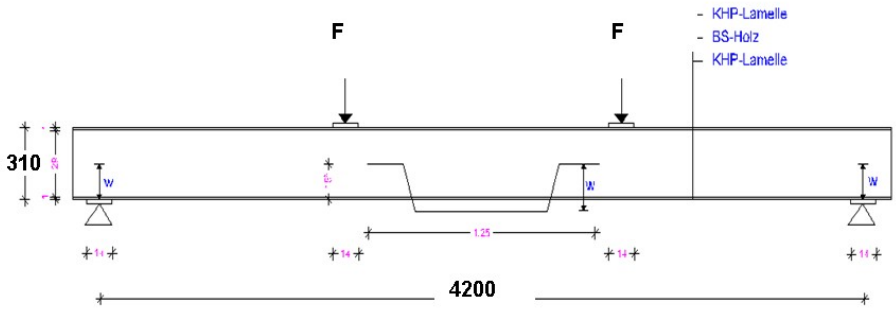


Abb. 3.192: Versuchsaufbau – 4 Punkt-Biegung

Es wurden zahlreiche Versuche mit unterschiedlich bewehrten Trägern durchgeführt. Die Serie KHP_1R wurde auf der Zug-, die Serie KHP_2R auf der Zug- und Druckseite mit KHP verstärkt. Die Dimensionen und Charakteristiken der Träger sind in Tabelle 3.50 zusammengestellt.

Tabelle 3.50: Abmessungen und Materialkenndaten der Testbalken

	Balken Breite/Höhe b / h [mm]	Güte der Lamellen außen	innen	Harztränkung	Dicke des KHP h_{KHP} [mm]	Verstärkungsgrad h_{KHP}/h [%]	Bemerkungen
GL24_1 to 3	100/310	C24		Nein	-	-	Referenz
GL32	95/323	C35	C24	Nein	-	-	Referenz – höhere Güte
KHPn_1R_1 to 3	100/310	C24		Nein	1 x 20	6,5	
KHPn_1R_4	95/312	24		Nein	1 x 20	6,4	KHP Schäftung bei L/2
KHPn_1R_5	95/312	C35	C24	Nein	1 x 20	6,4	
KHPn_1R_6	95/312	C35	C24	Nein	1 x 20	6,4	KHP Schäftung bei L/2
KHPn_1R_7	95/312	C24		Nein	1 x 20	6,4	Schäftung Fichte-KHP bei L/6 und L5/6
KHPn_1R_8	95/312	C24		Nein	1 x 20	6,4	KHP Schäftung bei L/2 *
KHPn_1R_9	95/250	C24		Nein	1 x 20	8	L = 16,8h
KHPn_2R_1 to 3	100/310	C24		Nein	2 x 20	12,9	
KHPi_1R_1	95/315	C24		Ja	1 x 22	7	
KHPi_2R_1	95/315	C24		Ja	2 x 22	14	KHP Schäftung bei L/3
KHPi_2R_2	95/315	C24		Ja	2 x 22	14	

* um ein Versagen in der letzten Lamelle zu simulieren wurde diese bei L/3 durchtrennt, so dass keine Lastübertragung möglich war

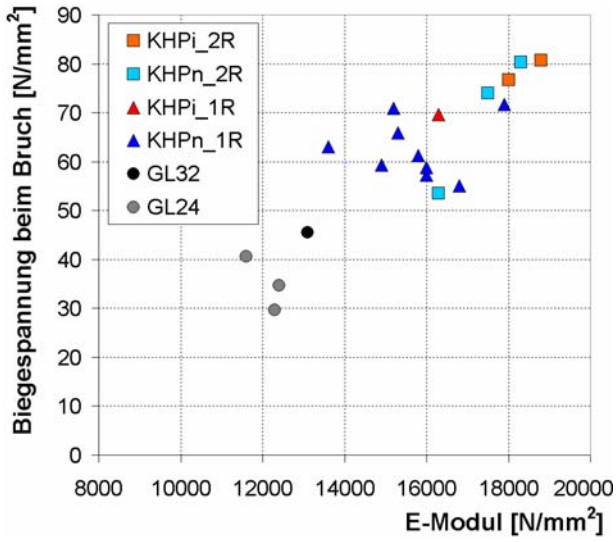
Abb. 3.193 zeigt eine Schäftung mit einer Neigung von 1/10 zwischen der Fichte und der KHP-Lamelle. Die KHP-Verstärkung mit einer Länge von 2,8 m befindet sich im Bereich der maximal auftretenden Zugspannungen. Im Fall der Proben KHP-KHP befand sich der Stoß im Bereich des maximalen Moments. Diese Anordnung wurde gewählt, um die Tragfähigkeit eines Trägers mit Schäftung der Lamellen zu untersuchen. Auf Grund der verfügbaren Heißpresse ist die Länge der KHP-Lamellen momentan noch auf 10 m begrenzt.



Abb. 3.193: KHPn_1R_7 – Schäftung Fichte-KHP

3.5.6.4 Ergebnisse und Diskussion

Abb. 3.194 zeigt die Biegespannung und den effektiven E-Modul beim Versagen der Hybridträger. Die Effektivität der KHP-Verstärkung zeigt sich in einer erheblichen Steigerung der Tragfähigkeit und der Steifigkeit gegenüber der Referenzproben (GL24). Die Tragfähigkeit stieg um das 1,8- bis 2,25-fache, die Steifigkeit um das 1,35- bis 1,5-fache.



	Versagensarten Fichte	KHP
GL24_1 und 3	Ast	
GL24_2	Ast, FJ	
GL32c	f_t	
KHPn_1R_1,2,4,5,9	τ, f_c	-
KHPn_1R_3	Ast	f_t
KHPn 1R_6	FJ	SJ
KHPn_1R_7	f_c, FJ	S
KHPn 1R_8	f_t	f_t
KHPn_2R_1	FJ	f_t
KHPn_2R_2	f_c, Ast	f_t
KHPn_2R_3	T	-
KHPi_1R_1	f_c, FJ	f_t
KHPi_2R_1	st	SJ
KHPi_ R_2	τ	-

Abkürzungen: FJ –Keilzinkung, SJ – Schäftung, f_t –Zug-, f_c – Druck- bzw. τ – Schubversagen

Abb. 3.194: Effektiver E-Modul und Biegetragfähigkeit

Die Träger versagten gleichermaßen durch Zugversagen, Druckversagen und Scherversagen – sie Tabelle oben.

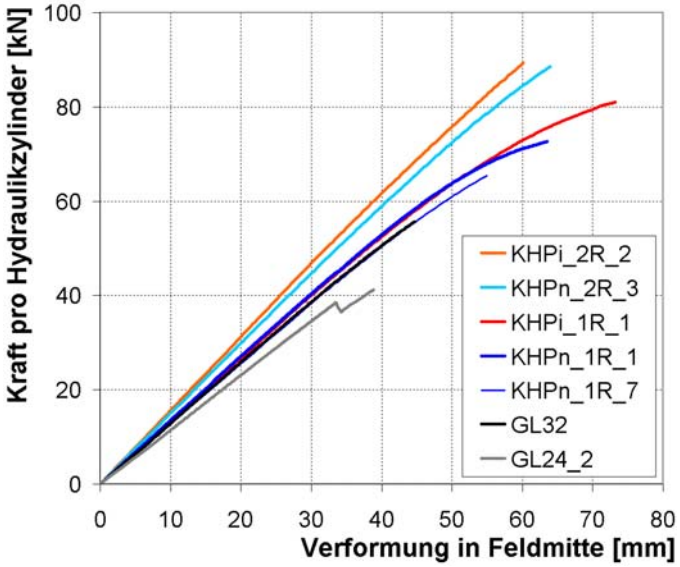


Abb. 3.195: Last-Verformungs-Beziehung

Die Last Verformungskurven in Abb. 3.195 zeigen, dass mehrere Hybridträger (KHP_1R – in der Zugzone KHP-verstärkt) unmittelbar vor dem Versagen ein nichtlineares Verhalten zeigten, das auf ein Erreichen der Festigkeit in der Druckzone schließen lässt. Die Holzfasern versagten ab einer Druckspannung von 50 N/mm^2. Fünf der fünfzehn verstärkten Träger versagten zunächst in der Druckzone, gefolgt von einem Versagen auf Zug oder Schub. Das Druckversagen trat in der Nähe der Lasteinleitungspunkte auf. Das Last-Verformungsverhalten der Referenzproben war linear-elastisch. Die Träger versagten auf Grund von Ästen, Keilzinkungen und Zugversagen der Holzfasern (vgl. Abb. 3.196).

Die Hälfte der verstärkten Träger versagte, bevor die maximale Biegespannung erreicht wurde. Das spröde Versagen trat auf Grund von Schubversagen des BSH im Bereich der Auflager auf (vgl. Abb. 3.197).



Abb. 3.196: GL32 – Zugversagen des Fichteleimholzes



Abb. 3.197: KHPn_1R_1 – Schubversagen am Auflager

Die vielen Schubversagen sind vermutlich auf das geringe Verhältnis von Spannweite zu Höhe von L/h= 13,5 zurückzuführen. Aus diesem Grund wurde die Höhe der Probe KHPn_1R_9 auf 250 mm reduziert, was einem Verhältnis L/h= 16,8 entspricht. Das Schubversagen trat jedoch erneut bei einer Schubspannung von 3,3 N/mm^2 auf. Das Schubversagen der Hybridträger lag bei Werten zwischen 3,3 und 4,5 N/mm^2. Somit wurde hier ein kritischer Spannungszustand erreicht, so dass eine weitere Laststeigerung nur erfolgen kann, wenn eine zusätzliche Schubbewehrung vorgesehen wird.

Nur fünf der fünfzehn verstärkten Träger versagten durch Überschreiten der Zugspannung im KHP oder im Holz (vgl. Abb. 3.198). Im Fall der Probe KHPn_2R_1 führte eine schlecht ausgeführte Keilzinkung zum Versagen bei der relativ geringen Spannung von 54 N/mm^2.

Um das Verhalten eines verstärkten Trägers mit versagter letzter Lamelle zu simulieren, wurde diese bei Probe KHPn_1R_8 bei L/3 durchtrennt. Dieser Träger erreichte eine Biegespannung von 59 N/mm^2 und die Lamelle versagte auf Grund des Überschreitens der Zugspannung an der Sollbruchstelle.

Drei der fünf Proben mit Schäftungen versagten teilweise an der Lamellenfuge im Bereich der Schäftung (vgl. Abb. 3.199). Dennoch wurde die Biegefestigkeit durch die Schäftungen nicht erheblich verringert. Ordnet man die Stumpfstöße in Bereichen geringer Spannungen an, wie dies in einigen Trägern der Fall war (z. B. KHPn_1R_7, f_m = 57 N/mm^2), scheint eine Verstärkung mit Schäftungen effizient zu sein.



Abb. 3.198: KHPi_1R_1- Zugversagen der Fichte und des KHP



Abb. 3.199: KHPi_2R_1 – Zugversagen der Schäftung im KHP

3.5.7 Sensorische Verstärkungsfasern

Autoren: Wolfgang Trümper (ITM), Andreas Heiduschke (ISH)

Aufbauend auf früheren Ergebnissen sollten im Rahmen des Projekts Kohlenstofffasern zur Überwachung der Dehnung kritischer Balken in eine Holztragstruktur integriert werden. Der Arbeitspunkt „Bauteilüberwachung durch sensorische Fäden“ ist ein zusätzlich in die Projektbearbeitung aufgenommener Arbeitspunkt, der bei der Antragstellung noch nicht vorgesehen war.

Vor dem Hintergrund gravierender Schadensfälle an Holzbaukonstruktionen, z. B. dem Einsturz der Eislaufhalle in Bad Reichenhall, ist für die Erhöhung der Betriebssicherheit das Thema Bauwerksüberwachung/Monitoring sowie die Schadensdiagnose aktueller denn je (vgl. [218]). Im Rahmen der Arbeiten zum SFB 639 konnten am ITM in Zusammenarbeit mit dem Institut für Akustik und Sprachkommunikation (IAS) erfolgreich z. B. Kohlenstofffasern als Sensorfäden in Gestricke integriert werden. Durch entsprechende Konsolidierungsprozesse konnte aus den Gestricken beispielsweise eine textilbasierte Kohlenstofffasermessbrücke als Demonstrator realisiert werden (Abb. 3.200:).

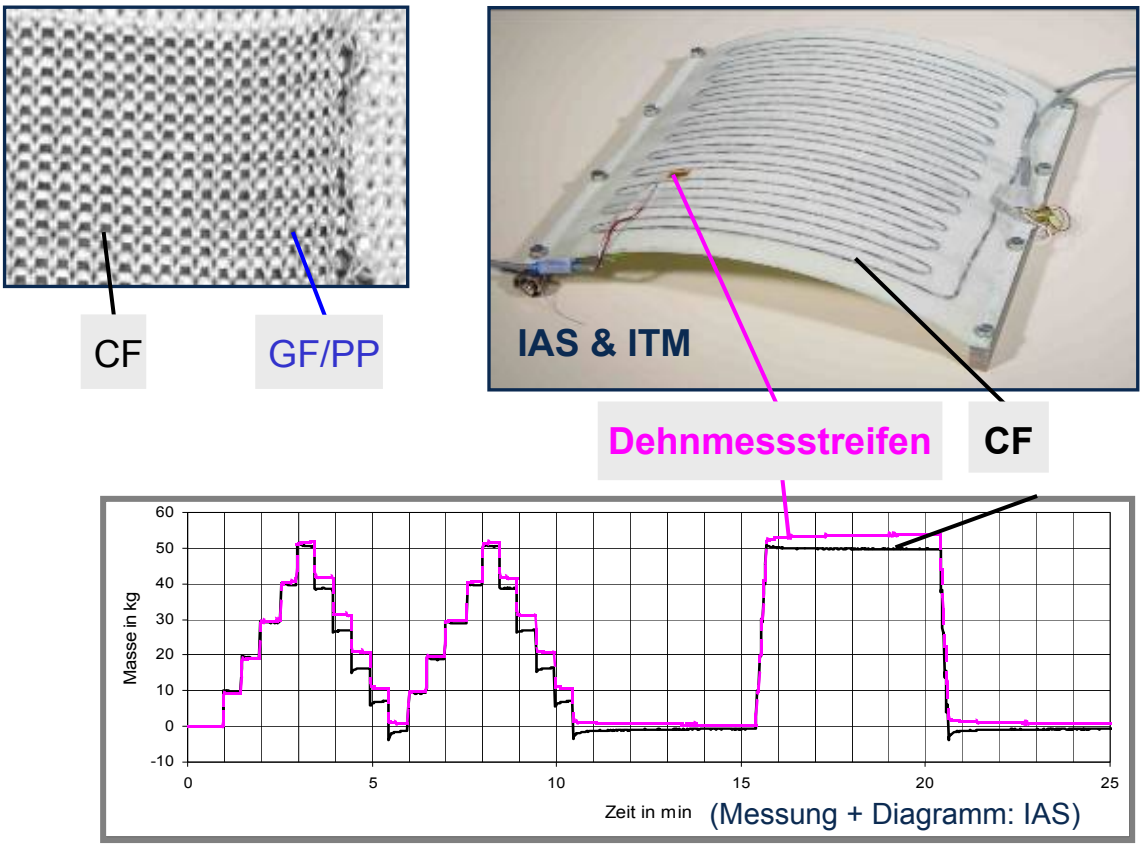


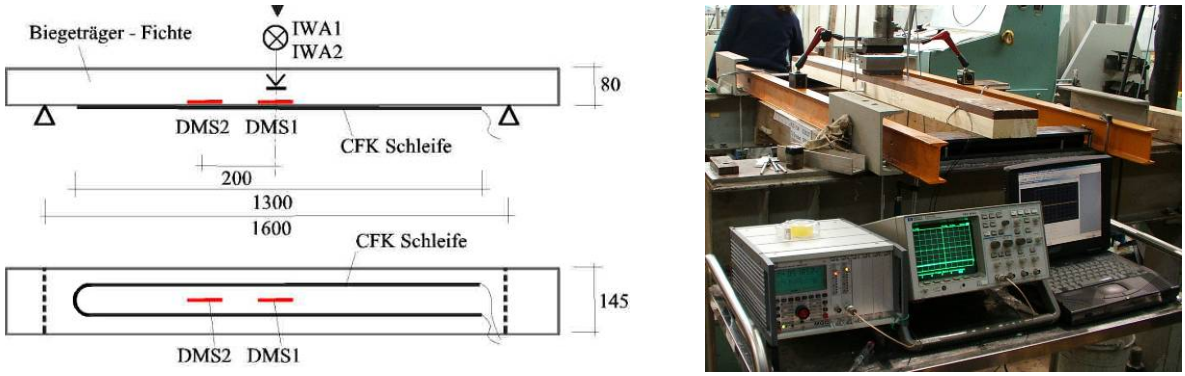
Abb. 3.200: Kohlenstofffasermessbrücke - SFB 639 [288]

Der Vergleich der mittels Kohlenstofffasern und der parallel auch mit Dehnmessstreifen am Demonstrator aufgenommen Dehnungen unter Belastung zeigt eine sehr gute Übereinstimmung. Das Messprinzip beim Einsatz von Kohlenstofffasern als Sensor ist ähnlich dem herkömmlichen Metall- oder Halbleiter-Dehnmessstreifen (DMS). Eine Dehnung der Kohlenstofffasern hat eine Querschnittsänderung und damit eine messbare Änderung des elektrischen Widerstands ΔR zur Folge. Die relative Widerstandsänderung $\Delta R/R_0$ (R_0 - elektrischer Widerstand des unbelasteten DMS) und die Dehnung ε stehen in einem festen Verhältnis zueinander, das als Empfindlichkeit k ($k = (\Delta R/R_0)/\varepsilon$) bezeichnet wird. Dementsprechend lassen sich bei Kenntnis des k-Faktors und der Widerstandsänderungen die Dehnungen bestimmen. Die Messung der Widerstandsänderung erfolgt indirekt mittels Wheatstone’scher Brückenschaltung. Dazu ist zunächst der Widerstand der Kohlenstofffasern zu bestimmen und die Halbbrücke durch das Hinzuschalten eines

gleich großen Widerstands abzugleichen. Der Widerstand der Kohlenstofffasern ist abhängig von der verwendeten Kohlenstofffasertype, dem Querschnitt des Rovings sowie der Länge der Kohlenstofffasern. In den Versuchen wurde für eine Einstellung des zuzuschaltenden Widerstands ein Potentiometer verwendet. Die Brückenspannung über einer abgeglichenen Brücke beträgt 0V.

Aufgrund des Materialverhaltens ist das Erkennen kritischer Belastungszustände von Holzkonstruktionen wünschenswert. In der Regel verhalten sich biegebeanspruchte Holzbauteile bis zum Bruch nahezu linear-elastisch. Versagensrelevant sind häufig natürliche Inhomogenitäten des Holzes, wie Äste und Drehwuchs, aber auch konstruktionsbedingte Störungen im Bereich der Biegezugzone wie Keilzinkenverbindungen. Die Bauteile zeigen in der Regel ein sprödes Versagen im Zugbereich. Anders als im Stahlbau besteht hier keine Möglichkeit der Lastumlagerung durch die Ausbildung plastischer Gelenke. Die spröden Versagensformen sind hinsichtlich der Tragwerkssicherheit problematisch und führen zu entsprechend hohen Materialsicherheitsbeiwerten in der Bemessung. Ziel ist es daher, die Überwachung von Holzbauteilen während des Betriebs und die Früherkennung von kritischen Dehnungen bzw. Schädigungen zu erreichen. Der Einsatz von Kohlenstofffasern als Sensorfasern erlaubt dabei gleichzeitig die Überwachung und die Verstärkung der Tragwerke. Daher sind insbesondere schub- und querzugbeanspruchte Bereiche, wie Verbindungen, Ausklinkungen und gekrümmte Träger, von Interesse, da sich hier beide Funktionen optimal ergänzen können [220].

Mit 3-Punkt-Biegeprüfungen an Einfeldträgern nach DIN 52186 [67] wurde zunächst grundlegend die Eignung von Kohlenstofffasern für das Erkennen des Belastungszustands derartiger Träger untersucht. Für die Ermittlung der Dehnungen der Holzbauteile müssen die Kohlenstofffasern kurzschlussfrei auf der Oberfläche appliziert werden. Kann ein fester Verbund von Holz mit auf- oder einlaminierten Kohlenstofffasern gewährleistet werden, lässt sich somit auch die Dehnung des Holzes bestimmen. Dazu ist es jedoch notwendig die Kohlenstofffasern entsprechend zu kontaktieren um die Widerstandsänderung unter Belastung aufnehmen zu können. Die gemessenen Widerstände bzw. Spannungen können dann in Dehnungen umgerechnet werden. Zur Kalibrierung und zur Bestimmung der Empfindlichkeit k_{CF} der Kohlenstofffasern sind derzeit noch Referenzmessungen mittels herkömmlicher Dehnmessstreifen (DMS, HBM DMS 100/120 LY41; Messlänge 100 mm; R = 120 Ω; k = 2,1; Kleber X60) erforderlich. Dazu werden zwei DMS (DMS 1 und 2) in der Bauteilmitte appliziert. Das ist der Bereich, in dem bei der 3-Punkt-Biegeprüfung üblicherweise die größten Durchbiegungen auftreten. Ebenfalls in der Balkenmitte wird zusätzlich auch die Durchbiegung über induktive Wegaufnehmer (IWA) aufgezeichnet. Die Abb. 3.201 zeigt die Abmessung der Proben, die Anordnung der applizierten Messsensoren und den Versuchsaufbau für die Biegeprüfungen.



DMS…Dehnmessstreifen, IWA…induktive Wegaufnehmer, CFK…Kohlenstofffasern

Abb. 3.201: Biegebalken: a) Anordnung der Sensoren (schematisch); b) Versuchsaufbau Biegeversuch

Die Länge des Messbereichs der Kohlenstofffasersensoren beträgt 1300 mm. Die in Epoxidharz getränkten Kohlenstofffasern werden, bis zum Aushärten, mittels an den Enden befestigter Gewichte gestreckt, sodass die Fasern über den gesamten Messbereich gleichmäßig vorgespannt und damit gestreckt werden. Die Materialkennwerte sind in Tabelle 3.51 aufgeführt.

Tabelle 3.51: Materialkennwerte der Kohlenstofffaser, der Matrix und des Holzes [222]

Material	**Kohlen-stofffaser**	**Matrix - Epoxy**	**Fichtenholz**	
Bezeichnung	Tenax Fibers J/E HTA5131, 200 tex, 3000 Fila-mente/Garn	VOSS Chemie Harz LN-1A, Härter LN-1B	parallel zur Faser	senkrecht zur Faser
Elastizitätsmodul E [N/mm^2]	238.000	3.700	10.000 – 13.000	300 - 800
Zugfestigkeit f_t [N/mm^2]	3.950	60	30 - 100	0,5 - 2,5
Bruchdehnung ε [%]	1,7	3,0	0,25 - 0,9	0,1 - 0,5
Wärmeausdehnungs-koeffizient α_T [1/K]	$-0{,}1*10^{-6}$	$80*10^{-6}$	$3{,}5*10^{-6}$	$30*10^{-6}$
Spezifischer elektrischer Widerstand ρ [Ω cm]	$1{,}6*10^{-3}$	$1*10^{13}$	$1*10^{10\,(1)}$	$6*10^{10\,(1)}$

(1) bei einer Holzfeuchte von 8%, die Werte sind stark feuchteabhängig

In den Versuchen wurden Träger aus Fichtenholz mit zwei verschiedene Anordnungen der Kohlenstofffasersensoren untersucht. Zum einen wurden die Sensoren auf der Zugseite oberflächig appliziert (ES7) und zum anderen mit einer Decklamelle abgedeckt (ES9). Durch die Abdeckung kann ein besserer Schutz der Sensoren gegen äußere Einflüsse, vor allem mechanische Beschädigungen, erreicht werden. Aus den Versuchen sollte der Einfluss der Anordnung der Sensoren auf das Messergebnis abgeleitet werden.



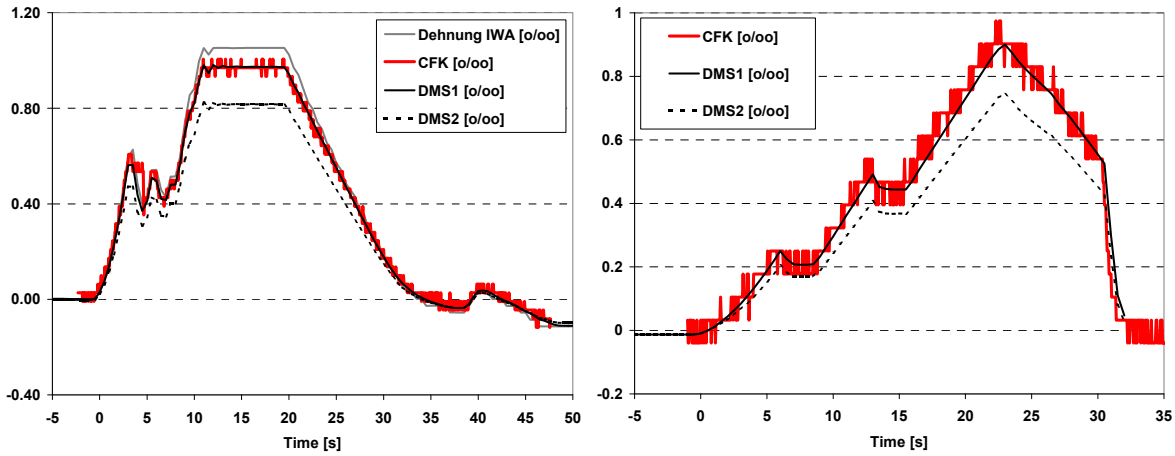
a) b)

Abb. 3.202: Proben mit unterschiedlicher Anordnung der Kohlefasersensoren a) auf der Oberfläche des Biegebalkens (ES 7); b) Sensoren unter ein Zwischenlammelle (ES 9)

Zur Generierung eines größeren Datenumfangs für die Bewertung des Verhaltens der Kohlenstofffasersensoren wurden die Proben zunächst nach einem Stufenschema bis etwa 40 % der Bruchlast be- und anschließend wieder entlastet (Abb. 3.203:). In einem zweiten Versuch erfolgte dann die Steigerung der Belastung bis zum Bruch der Proben (Abb. 3.204:). Die Belastung der Proben erfolgte weggesteuert mit einer Geschwindigkeit von 1 mm/s.

Unter der Annahme, dass die Maximaldehnungen in Feldmitte auftreten und diese vom DMS 1 genau erfasst werden, lässt sich die Dehnungsempfindlichkeit der Kohlenstofffasersensoren ermitteln. Zur Kalibrierung wurden die Messdaten des Versuchs ES_7_40% verwendet und der Empfindlichkeitsfaktor zu k_{CF} = 0,86 bestimmt. Dieser Wert wurde auch für die Kalibrierung der weiteren Kohlenstofffasersensoren im Rahmen der Prüfungen verwendet.

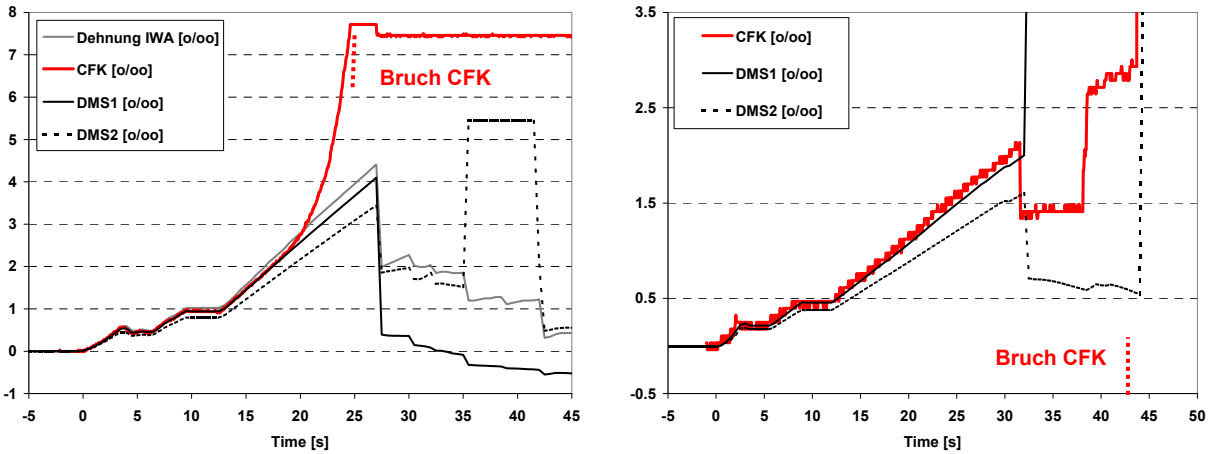
Abb. 3.203: zeigt, dass die mittels Kohlenstofffasersensoren ermittelten Werte auch im Bereich kleiner Dehnungen (ε < 0,1 %) ausreichende Genauigkeit aufweisen. Die erkennbaren geringfügigen Sprünge im Zeit-Dehnungsverlauf bei den Kohlenstofffasersensoren sind auf Digitalisiereffekte zurückzuführen.



a) b)

Abb. 3.203: Dehnungs-Zeit-Diagramme für die Proben ES7 (a) und ES9 (b) bei Stufenbelastung

Auch in den anschließenden Bruchversuchen an den Trägern wurde die Belastung wieder stufenartig aufgebracht. In der letzten Stufe wurde die Belastung dann bis zum Bruch der Proben erhöht. in der Abb. 3.204 ist die von den verschiedenen Sensoren aufgezeichnete Dehnung über der Zeit dargestellt.



a) b)

Abb. 3.204: Dehnungs-Zeit-Diagramme für die Proben ES7 und ES9 bei Belastung bis zum Bruch

Die Messergebnisse der verschiedenen Sensoren zeigen eine gute Übereinstimmung der aufgenommenen Dehnungen (vgl. Abb. 3.204). Die Dehnungs-Zeit-Diagramme des DMS 1 und des Kohlenstofffasersensors sind bis zu einer Dehnung von 0,2 % nahezu identisch. Danach zeigen die Sensoren unterschiedliche Dehnungen. Dabei ist zu beachten, dass DMS die Dehnungen nur lokal über begrenzte Längenabschnitte aufnehmen können. Im Unterschied dazu können die Dehnungen mit Kohlenstofffasersensoren integral über große Längen aufgenommen werden. Die im Holz vorhandenen starken Steifigkeitsunterschiede oder erste Risse im Bereich eines Astes in der Biegezone, über welchen die Kohlenstofffasern verlaufen, können somit einen starken Einfluss auf das Messergebnis haben. Der Bruch der Träger ist dann wieder an allen Sensoren deutlich erkennbar.

Bei dem Träger ES9 sind der Kohlenstofffasersensor und die DMS zwischen dem Träger und der Decklamelle im Zugbereich angeordnet. Auch hier ist wieder eine gute Übereinstimmung der aufgezeichneten Dehnungen an allen Sensoren erkennbar. Dadurch kommt es trotz des Bruchs der Randlamellen nicht zum sofortigen Versagen des Kohlenstofffasersensors. Bedingt durch den geänderten Aufbau des Trägers wurden am Ende der Messung alle 3 Messsensoren zerstört (Abb. 3.204 links). Erkennbar ist dies an den charakteristischen, gleichbleibenden Werten für die Dehnung nach dem Bruch des Sensors. Die Abb. 3.205 zeigt die getesteten Träger nach dem Bruch.



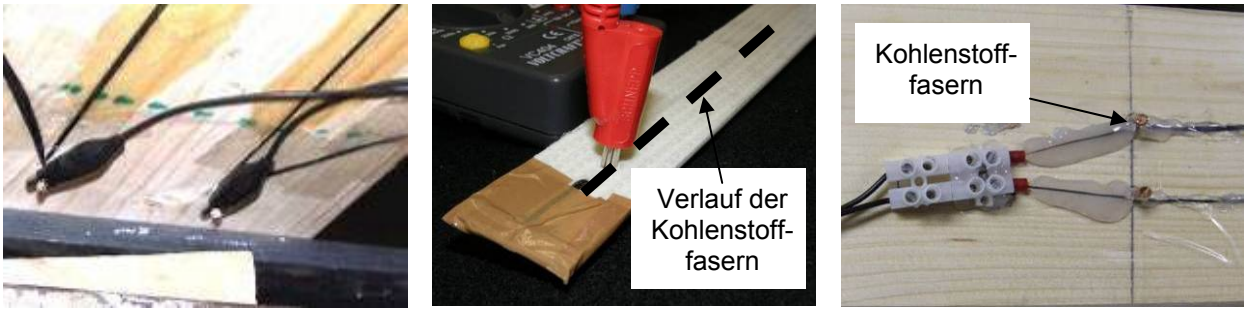
Abb. 3.205: Träger ES7 und ES9 nach dem Bruch

Beim Bruch der Träger werden auch die Kohlenstofffasersensoren bei allen Versuchen zerstört. In den Diagrammen und den Bruchbildern ist dies sehr deutlich erkennbar. Die ermittelten Biegerandspannungen σ liegen bei 49,9 N/mm² bis 74,2 N/mm². Der Biege-E-Modul liegt zwischen 10400 N/mm² und 13000 N/mm². Alle Proben zeigen bis zum Bruch linear-elastisches Verhalten mit einem spröden Versagen in der Zugzone auf Grund von Ästen.

Im Ergebnis der Versuche ist festzuhalten, dass Kohlenstofffasern für kurzzeitige Messungen zur Aufnahme der Bauteildehnungen geeignet sind. Verfahrensbedingt wird bei den Messungen jeweils ein integrativer Maximalwert der Dehnung bestimmt. Somit lassen sich für das Versagen relevante extreme Bauteilüberbeanspruchungen erkennen. Risse in den Trägern haben ein lokales Zugversagen der Kohlenstofffasern zur Folge. Die dadurch hervorgerufene charakteristische Widerstandsänderung ist in den Diagrammen eindeutig als Faserbruch erkennbar. Der Ort der maximalen Dehnung lässt sich nicht lokalisieren. Weiterhin ist für die Bewertung der aufgenommenen Dehnungen derzeit noch eine Vergleichsmessung mit anderen Sensoren erforderlich [222].

In den weiteren Versuchen sollten weitere grundlegende Aussagen zur Kontaktierung der Kohlenstofffasern, zum Temperatureinfluss auf das Messergebnis und zur Langzeitstabilität des Messsignals erarbeitet werden.

Voraussetzung für die Dehnungsmessung sowie die Aufzeichnung der Daten ist eine sichere und dauerhafte Kontaktierung der Kohlenstofffasern. Dies ist aufgrund der hohen Empfindlichkeit der Fasern gegenüber Druck quer zur Faserlängsachse eine besondere Herausforderung. Kontaktierungen, wie sie bei Metalldrähten üblich sind, können dadurch nicht verwendet werden. Die Abb. 3.206 zeigt beispielhaft die untersuchten Kontaktierungsvarianten.

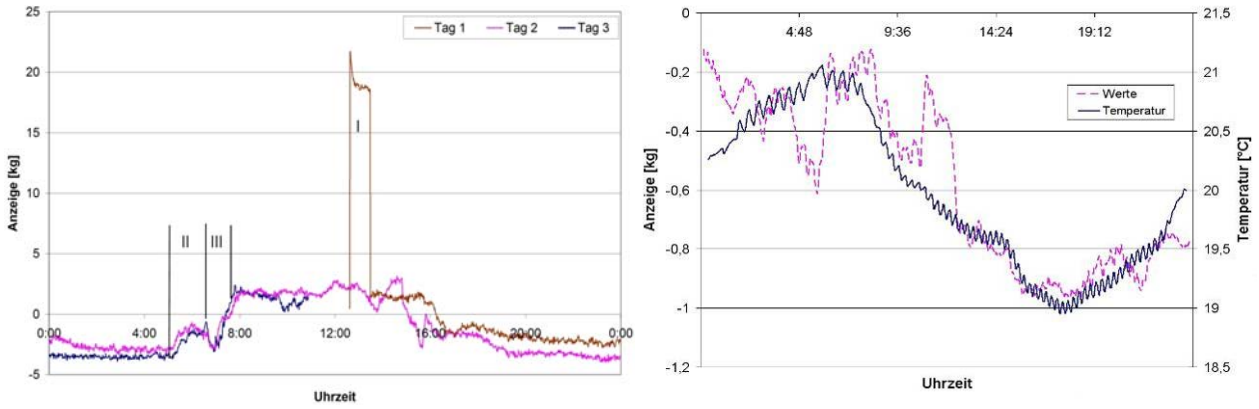


a) b) c)

Abb. 3.206: Varianten zur Kontaktierung von Kohlenstofffasern a) Umwickeln von Metalldrähten; b) Steckverbindung; c) Lüsterklemme

Für die ersten grundlegenden Biegeversuche wurden die Enden der auf der Holzoberfläche auflaminierten Kohlenstofffasern mit Silberleitlack beschichtet und anschließend mit einem Metallstift klebtechnisch verbunden. Der Metallstift kann dann z. B. mittels Krokodilklemmen kontaktiert werden (Abb. 3.206 a). In den Biegeversuchen die von der Art her eher den Charakter von Kurzzeitmessungen aufweisen, konnte die Kontaktierung problemlos verwendet werden. Als problematisch wird allerdings die Dauerhaftigkeit der Klebverbindung Faser–Stift sowie der sich durch Korrosion möglicherweise verändernde Übergangswiderstand zwischen Stift und Klemme eingeschätzt. Eine weitere Möglichkeit ist die Kontaktierung der Fasern durch eine Steckverbindung ohne weitere Hilfsmittel (Abb. 3.206 b). Die Kohlenstofffaser ist dabei in einen Verbund eingebettet. Diese Art der Verbindung ist sehr einfach realisierbar und zeigt gute Ergebnisse bei der Messung, wird aber für die perspektivisch vorgesehene intervallartige Überwachung von Holzkonstruktionen und das dafür notwendige mehrmalige An- und Abstecken der Messeinrichtung ebenfalls als nicht zweckmäßig angesehen. Da hierbei immer wieder Faserstücke herausgelöst werden können, besteht die Gefahr, dass die Kontaktierung im Laufe der Zeit nicht mehr gegeben ist. Daher wurde die Variante nach Abb. 3.206: c) entwickelt. Auf die Enden der Kohlenstofffasern werden dabei Aderendhülsen aufgebracht und durch Crimpen gegen ein Verrutschen gesichert. Zur Sicherstellung der Kontaktierung aller Filamente des Faserbündels werden die Enden der Fasern vorher mit Silberleitlack versehen. Die Aderendhülsen wurden mit Lüsterklemmen verbunden, die fest mit dem Messobjekt verschraubt sind. Die Anbindung der Kohlenstofffasern an die Messtechnik über die Lüsterklemmen ist dann mit handelsüblichen Verdrahtungen problemlos möglich. Diese Art der Kontaktierung wurde in allen weiteren Messungen verwendet.

Für die Etablierung eines Messsystems sind die Kenntnis des Langzeitverhaltens der Sensoren sowie die Ermittlung des Temperatureinflusses auf das Messergebnis wichtig. Für eine grundlegende Einschätzung hierzu wurde das Messsignal an unbelasteten 2 m langen Holzbalken aus Fichtenholz mit oberflächig applizierten Kohlenstofffaser-Sensoren über mehrere Tage aufgezeichnet. Die Sensoren sind jeweils auf der Ober- und der Unterseite der Holzbalken in Form einer Schlaufe appliziert. Die Kohlenstofffasersensoren sind für die Messungen in einer Wheatstone'schen Brückenschaltung so geschaltet, dass Temperatureinflüsse kompensiert werden können. Exemplarisch ist in Abb. 3.207 das Ergebnis der Messungen über den Zeitraum von drei Tagen ohne parallele Temperaturmessung sowie in einem Raum mit Temperaturregelung über einen Tag an einem unbelasteten Holzbalken dargestellt. Bei der zweiten Messung mit Regelung der Temperatur wurde diese parallel zum Messsignal an den Kohlenstofffasern ebenfalls aufgezeichnet.



a) b)

Abb. 3.207: Messungen an unbelasteten Holzbalken mit Kohlenstofffaser-Sensoren a) über mehrere Tage, b) über einen Tag, parallel Aufzeichnung der Temperatur

Die Software zur Aufzeichnung der Messdaten der Kohlenstofffasern wurde so konzipiert, dass sofort eine Umrechnung in eine Gewichtskraft erfolgt. Somit wird in den Diagrammen die entsprechende Gewichtskraft angegeben, die die jeweilige Dehnung verursacht. Zu Beginn der Messungen erfolgte eine Kalibrierung der Anzeige (Abb. 3.207, Bereich I). Dazu wurde in der Mitte des Balkens eine Gewichtskraft von 20 kg aufgebracht. Mit zunehmender Verweildauer der aufgebrachten Last ist ein Abfall des Signals zu erkennen. Nach Wegnahme der Last ist ein gleichmäßiger Verlauf des Signals über der Zeit bis gegen 16 Uhr erkennbar. Nach dem Abfall auf einen unteren Wert bleibt das Messsignal in etwa konstant, bis am nächsten Tag im Bereich II wieder ein Anstieg, gefolgt vom Bereich III mit einem Abfall des Signals und anschließendem Ansteigen der Werte auf das Vortagsniveau registriert wird. Auch an den folgenden Tagen stellt sich dieser charakteristische Verlauf des Messsignals ein. Die Schwankungen sind auf die Änderungen der Raumtemperatur infolge der Anpassung der Raumheizung (Tag-, Nachtabsenkung) und das Lüften des Raumes am Morgen (Bereich II, III) zurückzuführen. Weitere Messungen, bei denen parallel jeweils auch die Temperatur aufgezeichnet wurde, zeigen den Einfluss der Temperaturänderungen auf das Messergebnis (Abb. 3.207 b).

Alle Messungen wurden mittels Temperaturkompensation durchgeführt, trotzdem kann der Einfluss auf das Messergebnis nicht vollständig eliminiert werden. Während der Messungen über einen Zeitraum von ca. 4 Wochen wurden die Holzbalken in regelmäßigen Abständen mit einer Gewichtskraft beaufschlagt und die Messsignale der Dehnungsmessungen aufgezeichnet. Die aufgenommenen Änderungen des Messsignals zeigen dabei die jeweilige Belastung der Holzbalken an. Die Ergebnisse bestätigen somit, dass die Kohlenstofffasersensoren nach entsprechender Kalibrierung für das Erkennen kurzzeitiger Belastungen an Tragstrukturen aus Holz geeignet sind.

Die Schwankungen des Messsignals durch die Temperaturänderungen sind daher für die Erfassung der kritischen Dehnung am verwendeten Holzbalken in geschlossenen Räumen vernachlässigbar und das ermittelte Messsignal ist somit hinreichend genau. Beim Auftreten größerer Temperaturschwankungen, z. B. klimatisch bedingt, ist nach den bisherigen Ergebnissen vermutlich ein Korrekturfaktor für die Temperatur zu ermitteln. Für eine entsprechende Einschätzung sind allerdings weitere umfangreiche Untersuchungen unter verschiedenen Umgebungstemperaturen notwendig. Im Rahmen der Projektlaufzeit konnten derartige Messungen aufgrund des erforderlichen erheblichen Zeitaufwands nicht mehr durchgeführt werden. Für ein besseres Verständnis des Verhaltens der Kohlenstofffasersensoren ist zudem eine genauere Betrachtung der einzelnen Bestandteile des Messsystems (Messtechnik, Umgebungsbedingungen, Holz, Kohlenstofffasern, Matrix) und ihrer wechselseitigen Beeinflussung notwendig.

Der Einsatz der Kohlenstofffasersensoren zur Bauwerksüberwachung ist in den Längsträgern der HHT-Brücke des Pilotprojekts „Fußgängerbrücken“ vorgesehen (vgl. Kapitel 3.8.2). Die Spannweite des Trägers beträgt 7,25 m. Die Träger werden als Brettschichtholzträger mit auf der Ober- und Unterseite aufgebrachter Kunstharzpressholz (KHP)-Lamelle als Verstärkung und Witterungsschutz ausgeführt. Der Nachweis der mechanischen Eigenschaften erfolgt in einem Biegeversuch an einem Träger in Originalgröße entsprechend den Bauwerksabmessungen. Die Durchbiegung des Trägers während des Versuchs wurde von mehreren Dehnmessstreifen (DMS), induktiven Wegaufnehmern (IWA) und eines zwischen unterer KHP- und Lärchenlamelle (vgl. Abb. 3.211) applizierten Kohlenstofffasersensors sowie zu Vergleichszwecken von ebenfalls dort angebrachten faseroptischen Sensoren aufgenommen. Die Fasersensoren wurden dabei als Schutz vor Beschädigungen so appliziert, dass sie von der KHP-Lamelle abgedeckt werden (Abb. 3.208: a). Die Enden der Fasern werden, um die Kontaktierung zu ermöglichen, seitlich aus dem Träger herausgeführt (Abb. 3.208: b). Die Applizierung der faseroptischen Sensorfasern wurde von der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung Berlin (BAM) vorgenommen.



Abb. 3.208: Applizierung der Fasersensoren auf Brückenträger a) in die in Lamellen integrierte Nuten zur Aufnahme der Sensoren, b) Kontaktierungsstellen der Sensoren nach Fertigstellung des Trägers

Die Abb. 3.209: zeigt den Versuchsaufbau der Biegeprüfung.



Abb. 3.209: Brückenträger während der Biegeprüfung

Die Belastung des Trägers erfolgte zunächst stufenweise, um das Verhalten der Sensoren analysieren und z. B. Hysteresefehler bestimmen zu können. Im Anschluss daran erfolgte die Belastung des Trägers bis zum Bruch. Die Abb. 3.210: zeigt das Belastungsregime für den Träger in Stufenform, das für die Prüfung angewendete wurde.

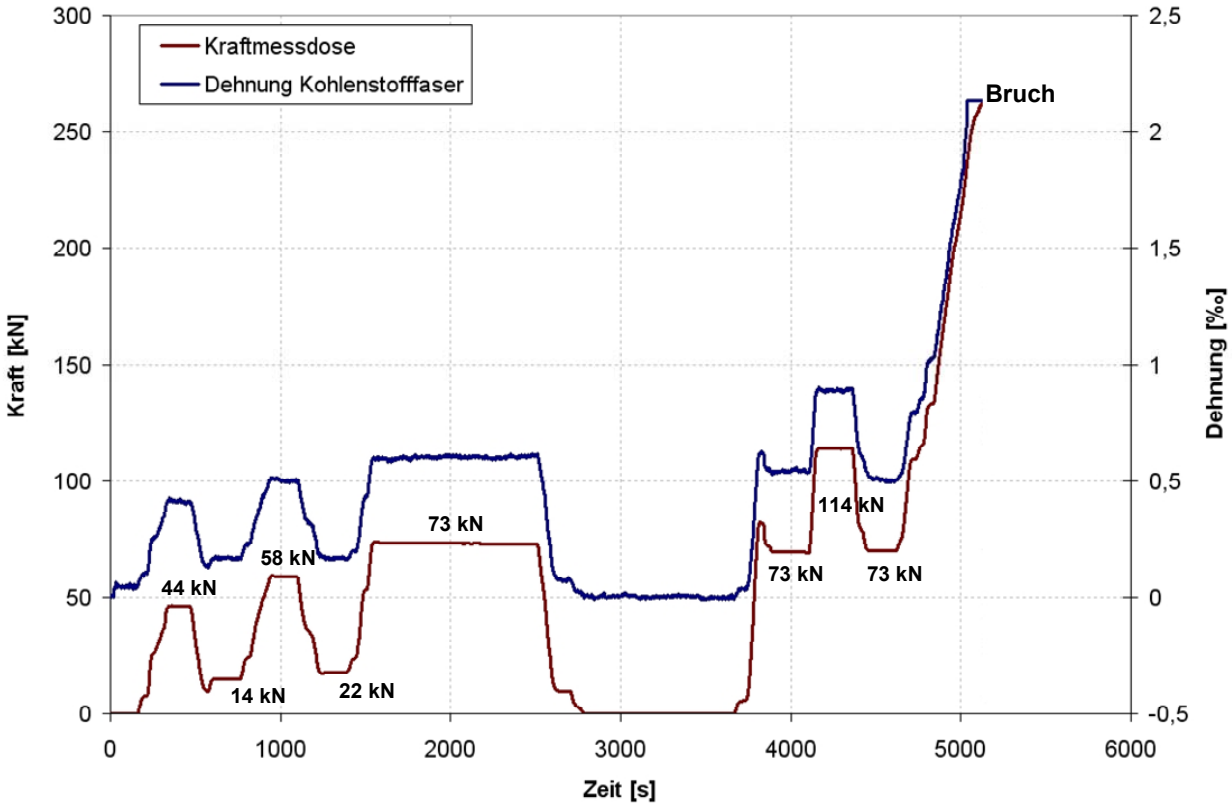


Abb. 3.210: Belastungsregime für den Träger und Dehnung des Kohlenstofffasersensors während der Biegeprüfung

Die durch die während der Biegeprüfung aufgebrachten Belastungen verursachten Dehnungen des Trägers werden durch den Kohlenstofffasersensor deutlich erkennbar erfasst und wiedergegeben. Dabei sind klar die einzelnen Stufungen sowie die darauffolgenden Entlastungen in der Dehnungsmessung erkennbar. Unmittelbar vor dem Bruch des Trägers wird der in der Zugzone angeordnete Sensor zerstört.

Parallel zu den Messungen an der Kohlenstofffaser und den optischen Sensoren wurden Vergleichsmessungen bei l/2 (Trägermitte) mittels DMS durchgeführt. Die Anordnung der verschiedenen Sensoren am Querschnitt des Trägers ist in der Abb. 3.211 dargestellt.

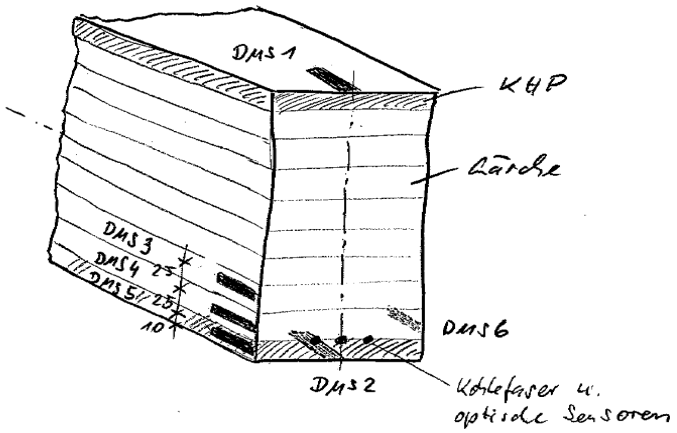


Abb. 3.211: Anordnung der Messsensoren am Querschnitt in Trägermitte

Wie gezeigt, wurden zwei DMS (DMS 1 und DMS 2) auf die Deckflächen des KHPs appliziert. Die Dehnungen der Lärchenholzlamellen wurde an den Seitenflächen (DMS 3, 4, 6) abgenommen.

Die Ergebnisse der Dehnungsmessungen sind in Abb. 3.212: dargestellt.

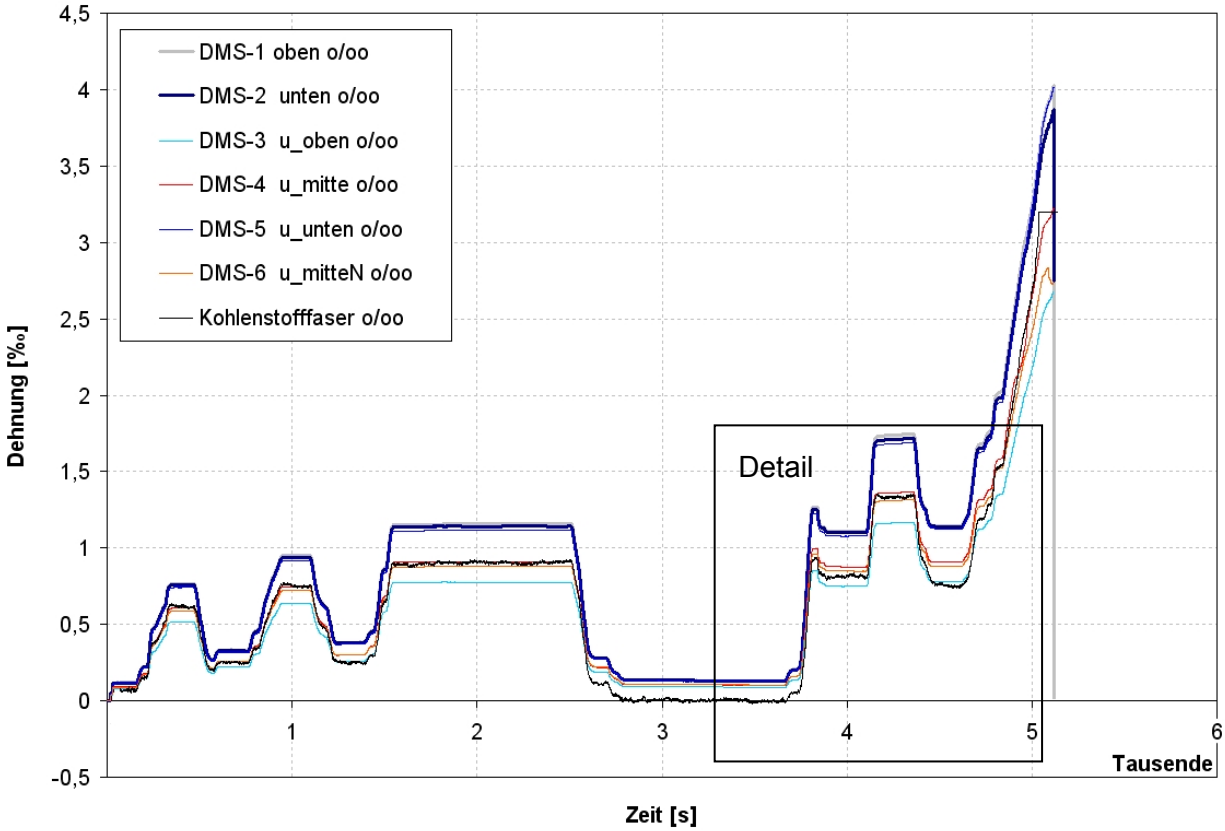


Abb. 3.212: Biegeprüfung nach Abb. 3.210:, Dehnung über der Zeit ermittelt an DMS und Kohlenstofffasersensor

Ein Vergleich der DMS mit den Kohlenstofffasersensoren zeigt eine gute Übereinstimmung der ermittelten Dehnungen. Für die Betrachtung des Hysteresefehlers der Sensoren wurde der in Abb. 3.212: markierte Bereich nochmals vergrößert in Abb. 3.213 dargestellt. Von besonderem Interesse ist dabei der Bereich der Erhöhung der Belastung von Lastniveau 1 (LN1: 73 kN) auf Lastniveau 2 (LN2: 114 kN) und die anschließend die Verringerung der Belastung zurück auf Lastniveau 1.

Die Ergebnisse der faseroptischen Sensorik sind hier nicht dargestellt. Sie wurden von der BAM ausgewertet und werden im Bericht zu AP 10 erläutert.

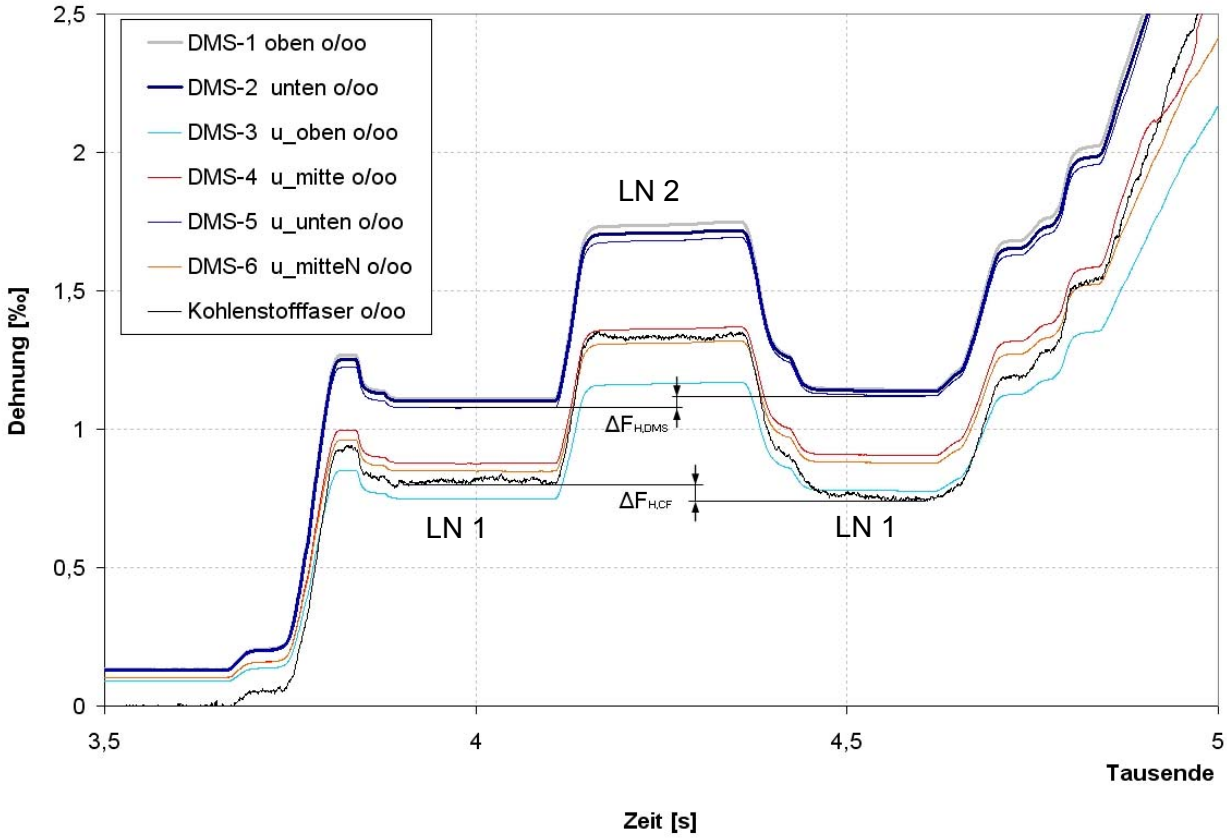


Abb. 3.213: Detail der Abb. 3.210:, Dehnung über der Zeit ermittelt an DMS und Kohlenstofffasersensor

Dabei zeigte sich erwartungsgemäß bei der Erhöhung der Belastung von LN 1 auf LN 2 eine erhöhte Dehnung. Bei der anschließenden Entlastung bis zum LN 1 sinkt die Dehnung, je nach Sensortyp wird dabei die Ausgangsdehnung über- (DMS) bzw. unterschritten (Kohlenstofffasersensoren). Diese messtechnische Abweichung wird als Hysteresefehler bezeichnet und ist eine wichtige Kenngröße für die Einschätzung der Messgenauigkeit eines Messsystems [221].

Die Ergebnisse aus den Versuchen legen nahe, dass der Hysteresefehler bei den Kohlenstofffasersensoren im Vergleich zu DMS betragsmäßig höher ist. Für eine statistisch gesicherte Aussage hierzu ist allerdings ein wesentlich größerer Versuchsumfang erforderlich.

Im Ergebnis der durchgeführten Untersuchungen ist festzustellen, dass sich Kohlenstofffasersensoren für die kurzzeitige Bauwerksüberwachung bzw. das Erkennen von lokalen Zerstörungen prinzipiell eignen. Die Vorteile der Kohlenstofffasersensoren sind der niedrige Ausdehnungskoeffizient, das einfache Handling, die Verfügbarkeit als Endlosfaser und somit die Möglichkeit der Überwachung großer Bauteile, die Datenerfassung mittels Standard-Messtechnik und die einfachen Applikationsmöglichkeiten von Kohlenstofffasern auf Holzoberflächen bzw. Integration bei der Herstellung von Brettschichtholzträgern zwischen den einzelnen Holzlamellen. Insbesondere aufgrund der erschwerten Dehnungsmessung aufgrund der Anisotropie und der Inhomogenität des porösen Werkstoffs Holz, ist hervorzuheben, dass mittels der endlosen Kohlenstofffasern ein lokales Versagen der Bauteile sicher erkannt werden kann. Weiterhin ist es aufgrund der stark schwankenden elastischen Kennwerte von Vorteil, ausreichend lange Sensoren zur Ausmittelung der Partialdehnungen zu verwenden. Da die Kohlenstofffasern als Endlosfäden zur Verfügung stehen, lassen sich diese auch auf weitspannende Holzträger problemlos applizieren.

Wesentlicher Nachteil des Messverfahrens ist, dass der Ort maximaler Dehnungen nicht lokalisiert werden kann. Da aber nur der Maximalwert der Dehnung sicherheitsrelevant ist, ist dessen

Lokalisierung nicht immer zwingend erforderlich. Bei der Applizierung der Sensorfasern ist drauf zu achten, dass ein Kurzschluss der Fasern, z. B. durch quer liegende Kohlefasern oder Kontakt mit Stahlteilen, ausgeschlossen ist. Messungen über Äste, Keilzinkverbindungen und Schwindrisse können zu irreführenden Resultaten führen. Der Einfluss dieser Störgrößen auf das Messergebnis bedarf einer eingehenderen Untersuchung. Darüber hinaus sind für die Langzeitüberwachung des Belastungszustands von Holzkonstruktionen allerdings noch umfangreiche messtechnische Fragestellungen zu beantworten, wie Verhalten bei starken Temperaturänderungen oder Feuchteeinfluss.

Die enthaltenen faseroptischen Sensoren können hingegen auch den Ort der Dehnungen anzeigen, jedoch sind die Untersuchungen und Ergebnisse der faseroptischen Sensorik Bestandteil von AP 10 und werden daher erst im Abschlussbericht zu AP 10 erläutert.

Aufbauend auf den Untersuchungsergebnissen an einzelnen Kohlenstofffaserrovings wurden in einem letzten Schritt die Rovings in textile Strukturen mit dem Ziel des Erkennens kritischer Schädigungen an Lochleibungen integriert. Zur Realisierung größerer Holzkonstruktionen sind Verbindungsstellen zwischen den einzelnen Elementen zwingend notwendig. Die Sicherheit der gesamten Konstruktion ist allerdings gefährdet, wenn an diesen Verbindungsstellen Schadensfälle auftreten. Aufbauend auf den positiven Ergebnissen aus den Untersuchungen zur Eignung der Kohlenstofffasern als Sensorfäden und der Verstärkung von Lochleibungen durch MLG ist die Entwicklung kombinierter textiler Verstärkungs- und Sensorstrukturen für diese Verbindungsstellen ein weiteres Ziel. Für die ersten grundlegenden Untersuchungen wurden zunächst in flächige MLG während der Fertigung lokal Kohlenstofffasern integriert. Die Abb. 3.214: zeigt die Abmessungen der flächigen MLG sowie eine umgesetzte Gestrickstruktur.

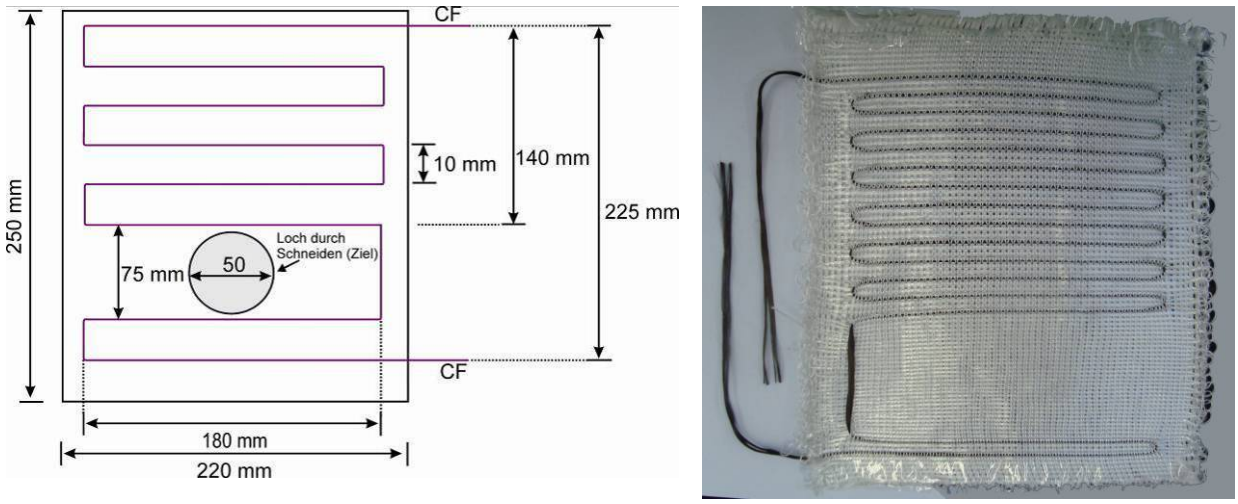


Abb. 3.214: MLG mit integrierten Kohlenstofffasern als Sensorfäden

Durch die Applikation der MLG auf Holzbauteile und anschließende Lohleibungsbelastungen soll ermittelt werden, inwieweit eine charakteristische, messbare Widerstandsänderung der Kohlenstofffasern hervorgerufen wird, um so das Potential zur Überwachung von Lochleibungen und den dort auftretenden Belastungen abschätzen zu können. Für die grundlegenden Untersuchungen hierzu wurden fertigungstechnisch einfach realisierbare MLG hergestellt. Damit sollte abgeschätzt werden, inwieweit die Kohlenstofffasern geeignet sind eine, im Vergleich zu den Biegeprüfungen, völlig andere Belastungsrichtung und ein Versagen der Lochleibung erkennen können.

Im Rahmen von textilphysikalischen Untersuchungen wurden an den umgesetzten MLG die in Tabelle 3.52 aufgeführten Kennwerte bestimmt:

Tabelle 3.52: Textilphysikalische Kennwerte Patch-Kohlenstofffasersensoren

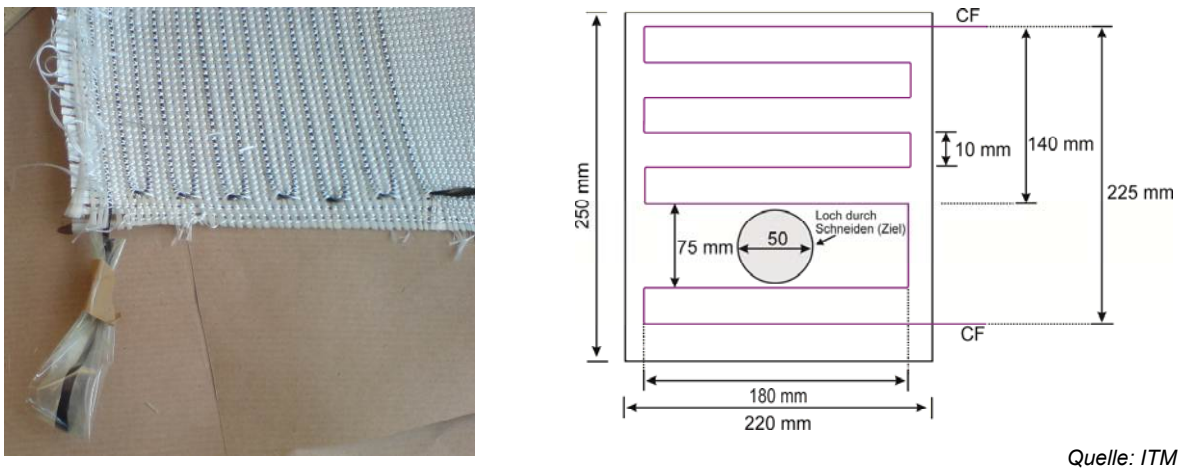
Kennwert		Kohlenstofffasersensor-Patch
Maschendichten [Maschen/10cm]		
	Maschenstäbchenrichtung	35
	Maschenreihenrichtung	28
Flächengewicht [g/m²]		1636

Die MLG wurden für die weiteren Untersuchungen an Lochleibungsproben an das ILK übergeben. Die dort durchgeführten Versuche sind im folgenden Kapitel beschrieben.

3.5.8 Lochleibungsuntersuchungen mit integrierten Messfasern
Autor: Mike Thieme (ILK)

Den Verbindungs- und Lasteinleitungspunkten kommt bei der Auslegung komplexer Bauteile eine entscheidende Schlüsselrolle zu. Die hierbei auftretenden stark lokal begrenzten großen Spannungskonzentrationen setzen für eine robuste Tragwerksauslegung die genaue Kenntnis der Spannungs- und Dehnungszustände während der gesamten Lebenszeit des Bauteils voraus. Durch die Entwicklung einer integrierten Online-Überwachung des aktuellen Belastungs- und Versagenszustands soll ein vielseitiger und sicherer zukünftiger Praxiseinsatz derartiger Textil-Holz-Verbunde ermöglicht werden. Damit lassen sich auch neue Einsatzgebiete erschließen, welche eine derzeit übliche Sichtprüfung während der Lebenszeit nicht ermöglichen. Deshalb wurde ergänzend zu den Untersuchungen textiler Bewehrungen von Verbindungspunkten in Abschnitt 3.5 im Rahmen dieses Forschungsprojektes der prinzipielle Einsatz integrierter Messfasern in die textile Verstärkung an Verbindungspunkten zur integrierten Überwachung untersucht.

Für diese Untersuchungen wurden am ITM Glasfaser-Biaxialgestricke mit integrierten Messfasern entwickelt und hergestellt (siehe Abb. 3.217 und Kap. 3.5.7).



Quelle: ITM

Abb. 3.215: Biaxialgestrick mit integrierter Kohlenstofffaser

Zur aussagekräftigen Erfassung des Belastungs- und Versagenszustandes ist eine gute mechanische Ankopplung der Messfasern an der Holzoberfläche sicherzustellen. Dazu wurden unterschiedliche Applizierungs- bzw. Aushärtmethoden untersucht und bewertet.



Abb. 3.216: Applizierung der textilen Strukturen mit integrierten Messfasern

Es wurde für alle Versuche das Epoxidharz L1100 mit dem Härter 294 verwendet. Dabei wurden die Art der Applizierung, die Imprägnierung des Harzes in das Biaxialgestrick und das Aushärten des Harzsystems variiert. Für eine Harzimprägnierung ohne Vakuum wurde dabei ein Lagenaufbau mit einem Saugvlies und einer Trennfolie gewählt. Bei der Vakuumsimprägnierung wurde ein Saugvlies, eine Lochfolie und Abreißgewebe verwendet. Eine Übersicht der verwendeten Parameter und beobachten Ergebnisse für die untersuchten Varianten ist in Tabelle 3.53 zusammengestellt.

Tabelle 3.53: Übersicht der Applizierungsvarianten

	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4
Gestrick-applizierung	einseitiges Hand-laminieren	einseitiges Hand-laminieren	einseitiges Hand-laminieren	beidseitiges Hand-laminieren
Harzimpräg-nierung	ohne Vakuum	ohne Vakuum	1,0 bar Vakuum	1,0 bar Vakuum
Aushärten des Harzsystems	rotierend aushär-ten auf der Wi-ckelmaschine	liegend aushärten	liegend aushärten im Vakuumsack	stehend aushärten im Vakuumsack
Versuchs-beobachtungen	• glatte Oberflä-che • Luftblasen unter Gewebe • verschobene Randbereiche an den Textilien durch zu starke Einschnürung der Folienbefes-tigung	• glatte Oberflä-che • Luftblasen un-ter Gewebe • dickere Ver-bundschicht durch schlech-tere Verteilung des Harzes	• sehr stark ver-presst • wenig Harz im Laminat • raue Oberfläche • später zusätzlich Harz aufge-bracht und ohne Vakuum ausge-härtet	• gut verpresst • wenig Harz im Laminat • raue Oberfläche • später zusätz-lich Harz auf-gebracht und ohne Vakuum ausgehärtet

Dabei zeigte sich, dass die Varianten 3 bzw. 4 durch die gute Verpressung die beste Ankopplung des Biaxialgestricks an die Holzoberfläche erreichte. Basierend auf diesen Parametern wurden die Biaxialgestricke mit integrierten Messfasern auf die zu untersuchenden Prüfkörper appliziert (siehe Abb. 3.216). Zur abgesicherten Beurteilung der ermittelten Messsignale der

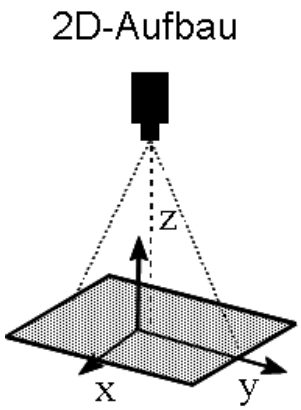
Messfasern wurden an den Prüfkörpern an beiden Lasteinleitungsbereichen (oben/unten) und auf beiden Seiten (Frontseite/Rückseite) derartige Messpatches angebracht.





Abb. 3.217: Integration der Messfasern in die textile Struktur

Begleitend zu den herkömmlichen Versuchsmessungen mit Wegaufnehmern wurde das optische Messsystem ARAMIS zur Erfassung der örtlich aufgelösten Dehnungsfelder eingesetzt. Die Wirkungsweise und der prinzipielle Aufbau ist in Abb. 3.218 veranschaulicht. Die Aufbereitung und grafische Darstellung der Messwerte wurde dann im Programm TRITOPS umgesetzt.



- Rasterverfahren
- gestützt auf stochastische Grauwertverteilung
- automatische Auswertung von manuell festzulegendem Startpunkt ausgehend (Grauwertkorrelationsverfahren)
- Messung diskreter Zustände
- Berechnung von Verschiebungs- und Dehnungsfeldern

Abb. 3.218: Messeinrichtung ARAMIS 2D / Messauswertung Tritops

Zur optischen Erfassung der Dehnungsfelder wurde auf die zu messende Oberfläche ein Grauwertmuster aufgebracht (Abb. 3.219 links). Die Genauigkeit des Messverfahrens ist dabei über die Definition des untersuchten Messbereiches begrenzt.





Abb. 3.219: Vorbereitung der Prüfkörper und des optischen Messsystems

Durch den gewählten Versuchsaufbau wurden zum einen die lokal aufgelösten Dehnungsfelder und die Verschiebungen der Bolzen und zum anderen die Messsignale der integrierten Messfasern während des Versuchs gemessen. Zur Synchronisation der optischen Messwerte mit dem Belastungskenngrößen auf der Zugprüfmaschine wurde eine optische Anzeige der aktuellen Belastungsgröße im Aufnahmebereich der Kamera befestigt. Damit können die ermittelten Dehnungsfelder der aktuell vorhandenen Lastgröße exakt zugeordnet werden. Der prinzipielle Versuchsaufbau ist in Abb. 3.220 veranschaulicht. Zur Erhöhung der Aussagesicherheit wurden in jedem Versuch vier textile Messpatches an den Lochleibungen appliziert (Vorder-/Rückseite der oberen bzw. unteren Einspannung). Der Versuchsaufbau wurde analog zu den Untersuchungen am ISH zu den Lochleibungsverstärkungen realisiert.

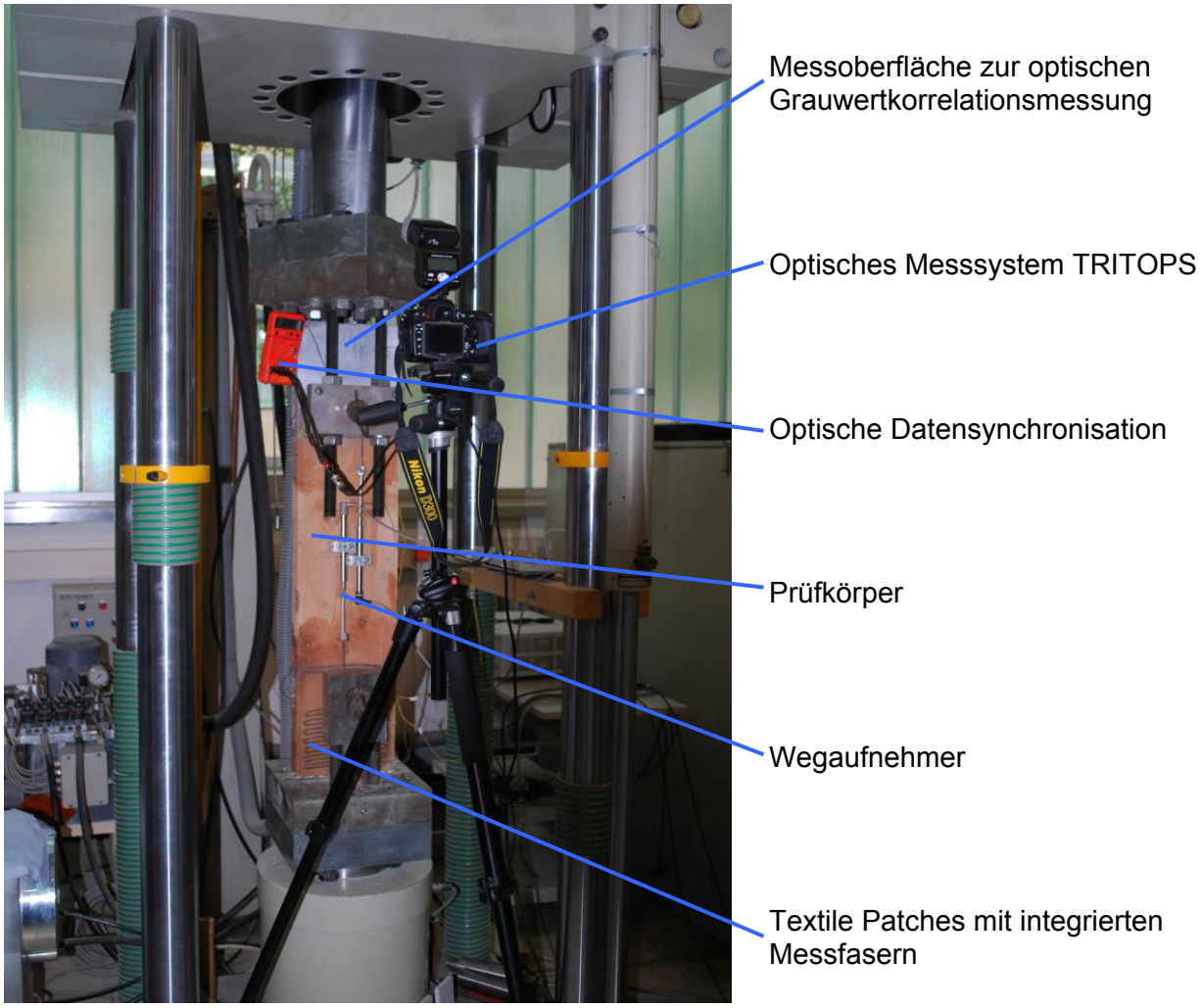


Abb. 3.220: Versuchsaufbau

Die Veranschaulichung des Versagensbereiches in Abb. 3.221 zeigt deutlich, dass eine gute Ankopplung des Biaxialgestricks an die Holzoberfläche mit der verwendeten Vorzugsvariante gewährleistet wurde, sodass es bei den Untersuchungen zu keinen Ablösungen der textilen Struktur kam.

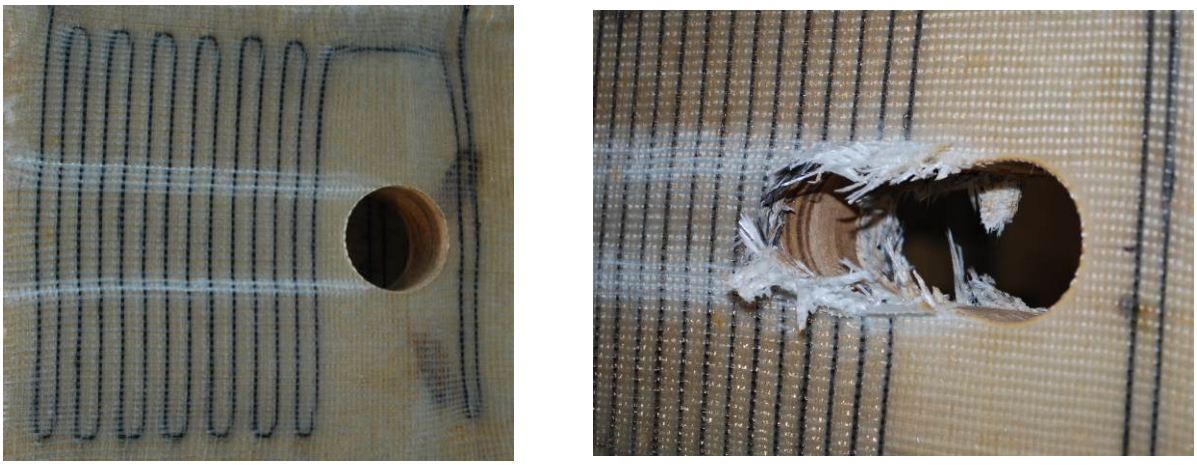


Abb. 3.221: Ankopplung der Messfasern

Dabei war vielmehr zu beobachten, dass sich in dem Holzquerschnitt entlang der natürlichen Faserorientierung, wie in Abb. 3.222 deutlich zu erkennen ist, Trennflächen bildeten. Dadurch kam es zum Herausschieben der entstandenen Holzkerne und letztlich zum Totalversagen der Gesamtstruktur.

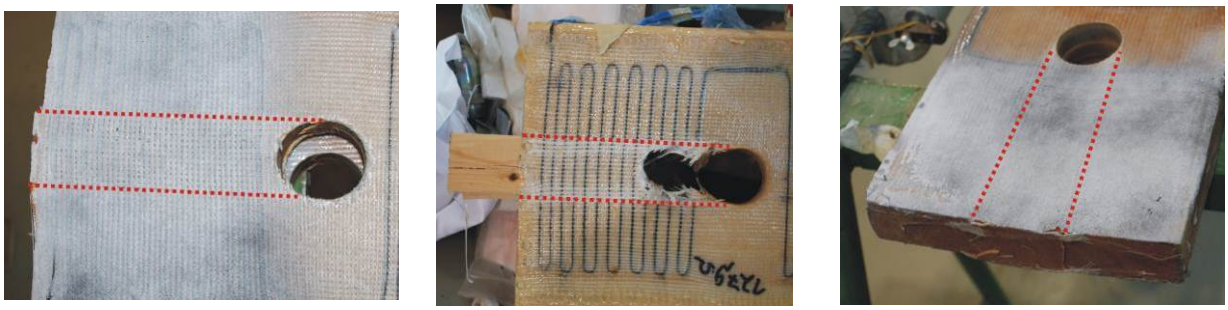


Abb. 3.222: Charakteristisches Versagensmuster

Wie in Abb. 3.223 gezeigt lässt sich diese charakteristische Ausbildung von Versagensgrenzflächen auch eindeutig durch die Auswertung der optischen Messverfahren visualisieren. Es lässt sich deutlich der entstehende Holzkern erkennen (blauer Bereich annähernd ohne Dehnungen).

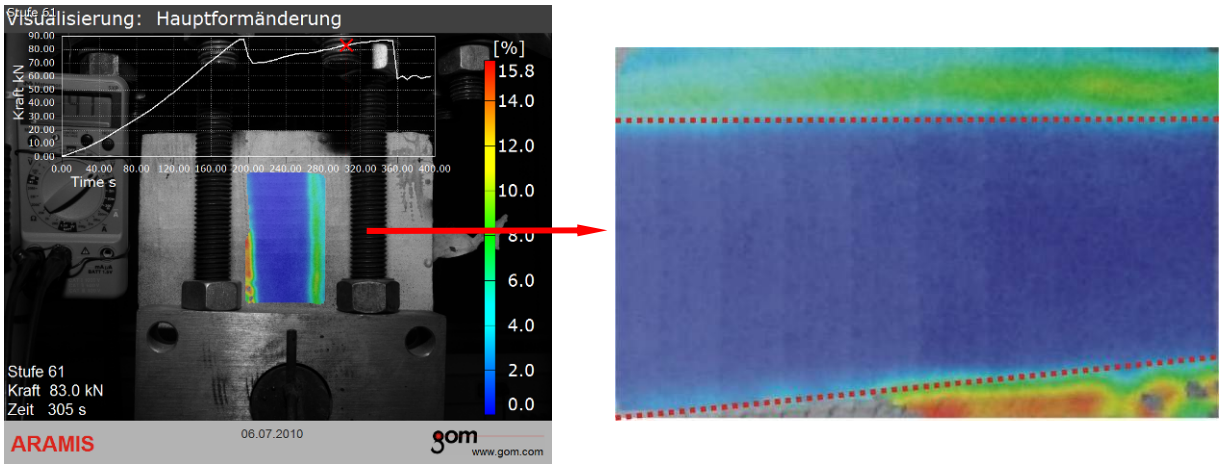


Abb. 3.223: Optische Visualisierung der Versagensgrenzflächen

Die Abb. 3.224 zeigt hingegen die charakteristische Ausbildung des Längs- bzw. Querdehnungsfeldes an einer Lochleibung. Es lässt sich deutlich die Konzentration der Dehnungsspitzen an den Lochrändern herausstellen. Diese lokal stark verdichteten Merkmalausprägungen klingen relativ schnell ab und verschmieren sich immer stärker mit wachsender Entfernung vom Lochrand zu einem nahezu homogenisieren Dehnungsfeld.

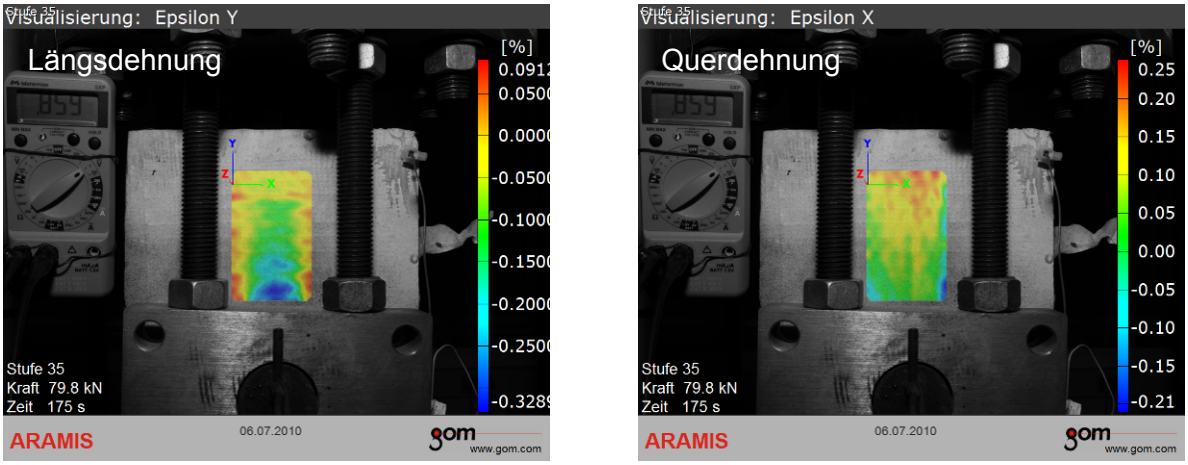


Abb. 3.224: Charakteristische Längs- und Querdehnungsfelder bei 79,8 kN

Zur Bewertung der Lochleibungsuntersuchungen mittels integrierter Messfasern wurden die hierbei ermittelten elektronischen Messsignale der Textilpatches und die experimentellen Ergebnisse in fünf Lochleibungsversuchen erfasst und gegenübergestellt. Die so gewonnenen Ergebnisse wurden dann der Lochleibungsbelastung und den optisch ermittelten Verformungsfeldern gegenübergestellt und bewertet.

Dabei konnte gezeigt werden, dass eine prinzipielle Erfassung des Versagensverhaltens innerhalb des Messbereiches des Textilpatches möglich ist. Wie in Abb. 3.225 beispielhaft für den Versuch V-4 gezeigt, führt die Steigerung der Bolzenbelastung zu einem lokalen Anstieg der Dehnungen oberhalb des Lochrandes. Die daraus resultierende Veränderung des Widerstandes in der integrierten Kohlefaser kann messtechnisch erfasst und zur Beurteilung des verschmierten Dehnungsfeldes genutzt werden. Eine eindeutige Beurteilung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens ist, bedingt durch die stark streuende Empfindlichkeit des Messverfahrens und die lokale Positionierung der Messpatches, allerdings nicht möglich. Bei der Erfassung der auftretenden Versagensereignisse über der Belastung bietet der Einsatz derartiger integrierter Messfaserpatches ein großes Anwendungspotential. In allen Versuchen konnte der Versagenszeitpunkt durch die Messpatches eindeutig durch einen starken Abfall des Messsignals lokalisiert werden.

Dies lässt sich sehr anschaulich in der Versuchsauswertung von Versuch V-4 in Abb. 3.225 veranschaulichen. Die aufgebrachte Zugkraft und die elektronischen Messwerte wurden zur besseren Darstellung auf den entsprechenden Maximalwert bezogen. Bei den oberflächlich aufgebrachten Messpatches ist im Bereich kleiner Zugkräfte keine Änderung des Widerstandes zu beobachten, da die schlaffen Messfasern erst gestreckt werden und noch keine Dehnungsanteile aufnehmen. Erst nach dem Erreichen einer bestimmten Dehngrenze beteiligt sich die Messfaser an der Aufnahme der lokalen Dehnungen und es kommt zu einer Erhöhung des Widerstandes in der Kohlefaser. Bedingt durch das Auftreten kleiner lokaler Schädigungsereignisse können während der Lochleibungsbelastung kleinere Signalausprägungen auftreten. Hierbei empfiehlt sich die Anordnung mehrerer lokal getrennter Messpatches. Dadurch könnten derartige lokale Effekte ausgeglichen werden. Es zeigt sich dabei ein deutlicher direkter Zusammenhang zwischen der Steigerung der Lochleibungsbelastung und dem stetigen Anwachsen des Messsignals.

Beim Auftreten der ersten Schädigungsphänomene (nichtlineares Verhalten der Lastkurve im Bereich ab ca. 130 ms) ist ebenfalls ein geringeres Ansteigen bzw. teilweise sogar ein Absinken des Messsignals zu beobachten. Die Erfassung schädigungsinitiierender Spannungszustände ist somit durch derartige textile Messsysteme prinzipiell möglich.

Das Totalversagen der Tragstruktur kann dabei eindeutig durch einen starken Abfall des Messsignals ermittelt werden.

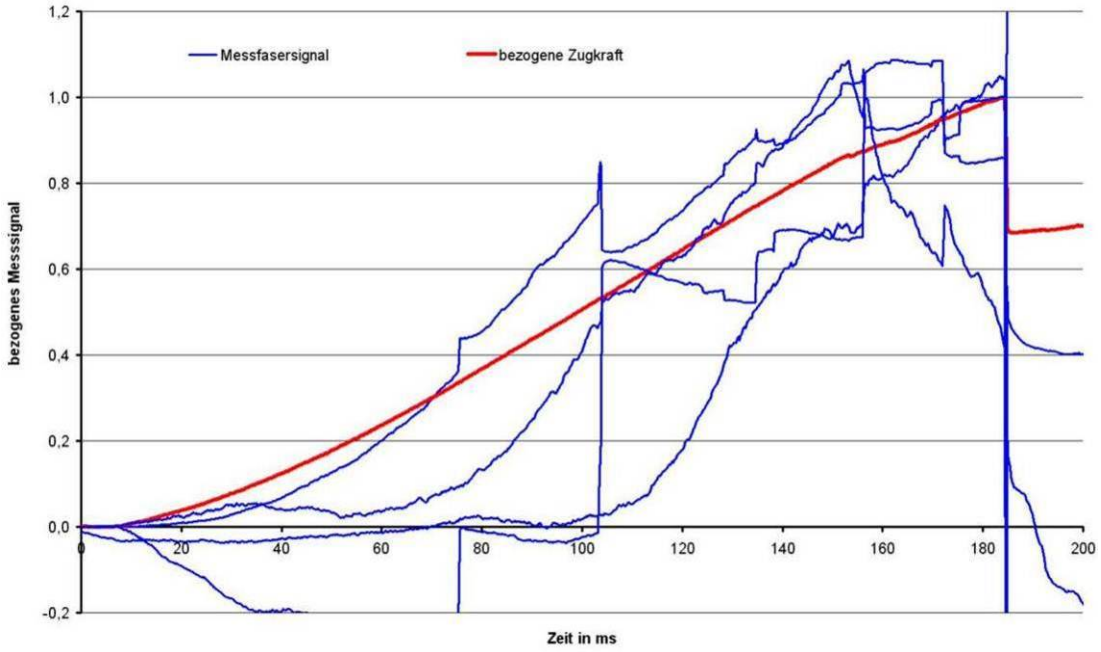


Abb. 3.225: Vergleich von Tragwerksverhalten und Messsignal (V-4)

Durch die Auswertung mehrerer lokal getrennter Messpatches lassen sich die charakteristischen Versagensphänomene noch eindeutiger ermitteln. In Abb. 3.226 wurde der Lochleibungsbelastung ein verschmiertes Messsignal aus dem Mittelwert aller Einzelereignisse gegenübergestellt. Man erkennt deutlich die charakteristischen Bereiche: die Messfaseraktivierung nahezu ohne Signalausprägung, den linearen Bereich mit annähernd konstantem Anstieg des Widerstandes mit lokalen kleinen Schädigungsereignissen, den nichtlinearen Bereich mit einer Reduzierung des Messsignalanstiegs bzw. sogar eines Rückgangs und dem Totalversagen mit einem charakteristischen Abfall des Signals.

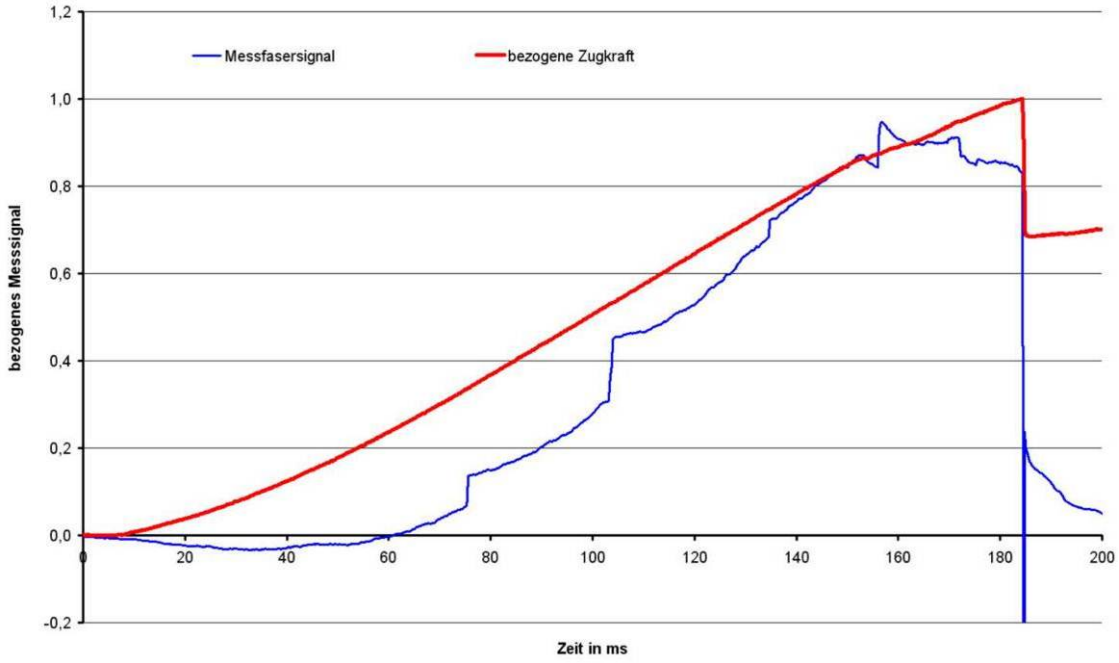


Abb. 3.226: Darstellung mehrerer Signalausprägungen als verschmiertes Messsignal (V-4)

Darüber hinaus lassen sich durch die Auswertung der Messfasern spezielle Versagensphänomene wie etwa das Ausbilden charakteristischer Versagensgrenzflächen über dem Belastungsverlauf gut darstellen. Ein entsprechendes Versagensverhalten konnte in Versuch V-3 beobachtet werden. Die entsprechenden verschmierten Messwerte sind in Abb. 3.227 dargestellt. Die lokalen Versagensereignisse führen dabei noch nicht zum Totalversagen des Gesamtsystems. Diese Versagenscharakteristik kann mit den Messfasern entsprechend erfasst und bewertet werden.

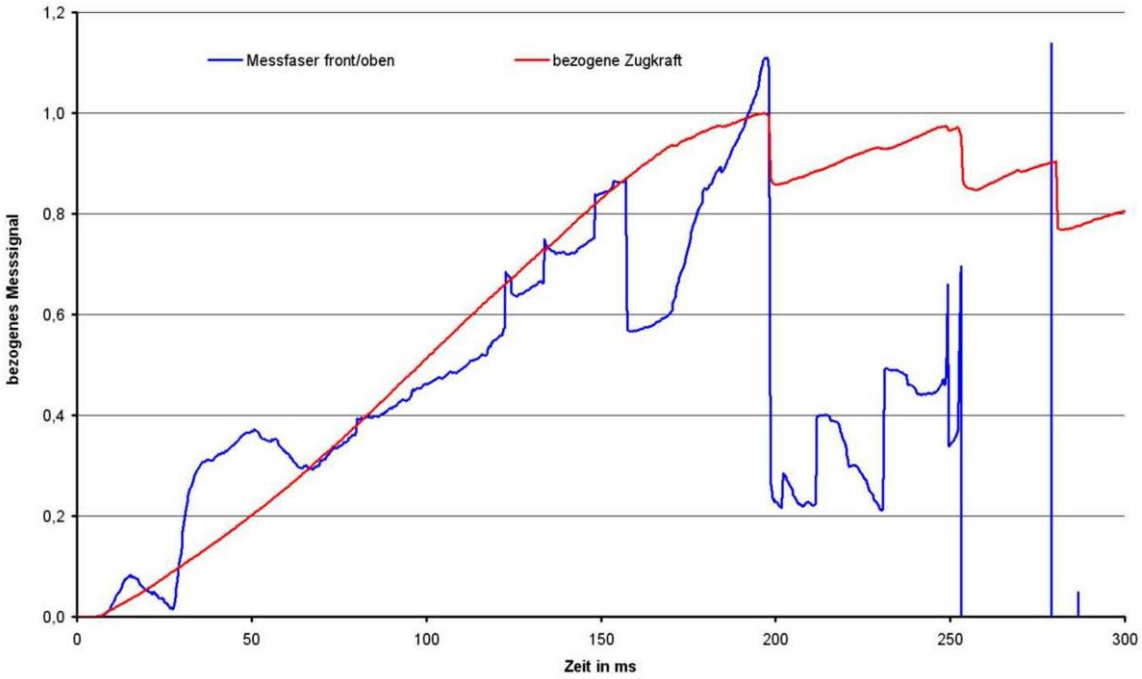


Abb. 3.227: Vergleich von Tragwerksverhalten und Messsignal (V-3)

Die hier vorgestellten Vorstudien zum Einsatz von integrierten Messfasern haben eine prinzipielle Anwendung derartiger Überwachungsverfahren bestätigt. Durch gezielte Weiterentwicklungen des vorgestellten Messprinzips und weiterführende Untersuchungen kann die Aussagekraft der Messsignale erhöht und die Zuverlässigkeit verbessert werden.

Insbesondere die Positionierung der Messfasern muss noch detaillierter auf die Lochgeometrie und den jeweiligen Versagensfall abgestimmt werden. Wie in Abb. 3.228 zu erkennen ist, konzentriert sich das charakteristische versagensbestimmende Dehnungsfeld auf einen eingeschränkten Bereich in der Nähe des Lochquerschnitts. Um derartige versagenskritische Dehnungszustände eindeutiger und rechtzeitiger erfassen zu können, wird bei zukünftigen Anwendungen eine stärkere Konzentration der Positionierung der Messfäden in Lochnähe empfohlen.

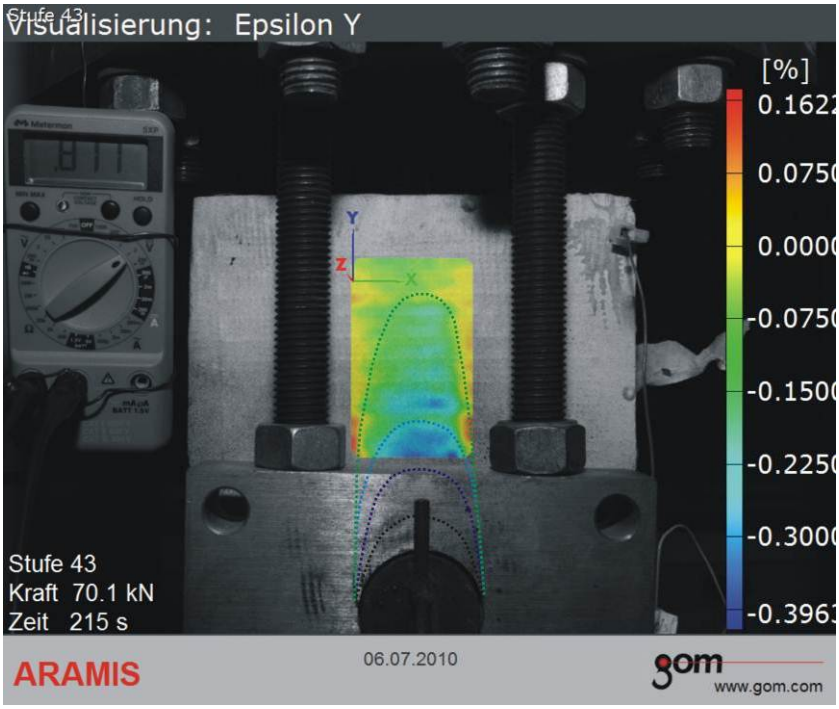


Abb. 3.228: Verteilung der Längsdehnungen bei Laststufe 43 (70,1 kN)

Da der Gradient der Spannungskonzentration allerdings sehr stark von der Lochentfernung dominiert wird, scheint eine eindeutige Korrelation von ermitteltem Messsignal und sich ergebenden diskreten Spannungs- oder Dehnungsgrößen nicht umsetzbar. Dahingegen konnte mit diesen Untersuchungen gezeigt werden, dass der Einsatz derartiger Messfasertextilien zur direkten online-Erfassung der auftretenden Versagensphänomene während der Nutzungsdauer möglich ist und neue Einsatzgebiete von Holz-Textil-Verbundkomponenten für funktionsintegrierenden Leichtbau erschlossen werden können.

3.6 Entwicklung und Anwendung werkstoffmechanischer Berechnungs- und Simulationsmodelle

3.6.1 Werkstoffgerechtes Modell für Holz-Textil-Verbunde

Autor: Mike Thieme (ILK)

Zum effektiven Einsatz textilverstärkter Hochleistungsholztragwerke ist eine werkstoffgerechte Auslegung der Strukturelemente notwendig. Für die innerhalb dieses Projektes untersuchte Verbundbauweise von faserverstärkten Kunststoffen und technischen Textilien mit Holz und Holzwerkstoffen existieren bisher keine ganzheitlichen werkstoffgerechten Berechnungsansätze. Zur Gewährleistung eines abgesicherten und berechenbaren Einsatzes von unverstärkten und verstärkten Formholzprofilen in der Praxis wurde ein entsprechendes Berechnungsmodell entwickelt.

Um die Komplexität des Materials realistisch abzubilden wurde eine Laminatmodellierung verwendet, bei dem die mehrschichtige Struktur (wie beispielhaft in Abb. 3.229 dargestellt) gedanklich in mehrere homogenisierte Einzelschichten (Basisschichten) mit orthotropen Eigenschaften aufgelöst wird.

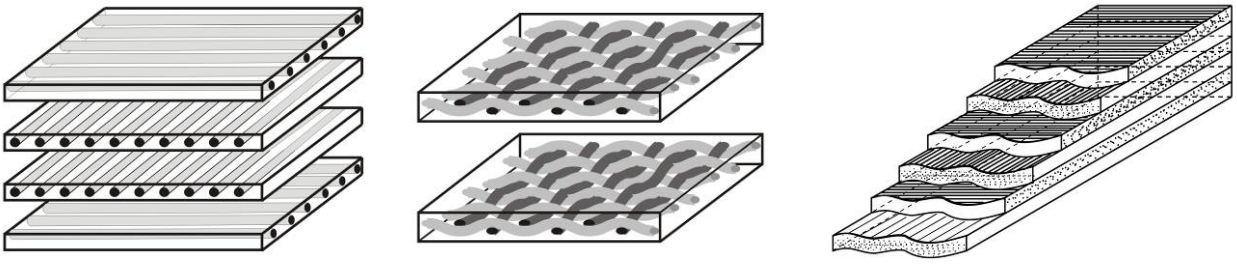


Abb. 3.229: Auflösen von Textilverbunden in äquivalente Basisschichten

Darauf aufbauend wurde das werkstoffmechanische Verhalten der Verbunde durch ein entsprechendes Strukturgesetz (welches den charakteristischen Spannungs-Dehnungs-Zusammenhang beschreibt) ein Versagenskriterium (welches die allgemeinen Bruchbedingungen des Werkstoffs definiert) sowie ein Degradationsgesetz (welches das Materialverhalten nach dem Überschreiten der jeweiligen Bruchbedingungen charakterisiert) ganzheitlich beschrieben. Zur Berechnung der neuartigen Holz-Textil-Verbunde wurden innerhalb dieses Projektes derartige Modelle erarbeitet, weiterentwickelt, zusammengeführt und verifiziert.

Die Wirkungsweise und die Interaktion der einzelnen Simulationsmodelle Strukturgesetz, Versagensbedingung und Degradationsmodell ist in Abb. 3.230 veranschaulicht.

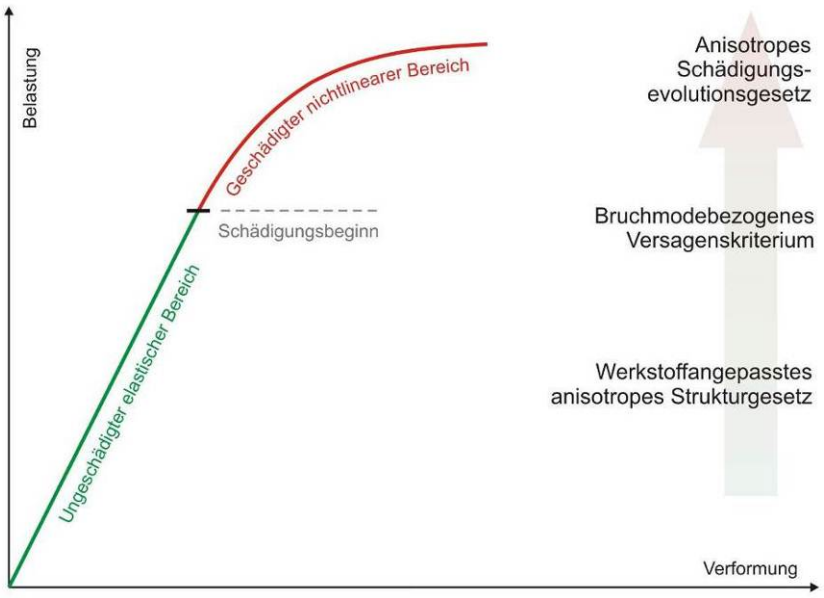


Abb. 3.230: Interaktion der werkstoffgerechten Modelle für Holz-Textil-Verbunde

3.6.1.1 Werkstoffangepasstes anisotropes Strukturgesetz

Die Grundlage des Berechnungsmodells für derartige mehrschichtige Verbundstrukturen bildet die Erweiterung der Kirchhoffschen Ansätze auf mehrschichtige Laminate über die klassische Laminattheorie [223], [224]. Sie basiert auf den gleichen Annahmen wie die Kirchhoffsche Plattentheorie. Die Schubdeformationen γ_{xz}, γ_{yz} verschwinden, es existiert keine Verzerrung in Dickenrichtung ε_z, und es herrscht ein ebener Spannungszustand in den Einzelschichten ($\sigma_z = 0$). Im Unterschied zu den Ansätzen der Kirchhoffschen Theorie werden Mittelflächenverschiebungen u_0 bzw. v_0 zugelassen.

Da die auftretenden Schubdeformationen für bestimmte Plattentragwerke einen wesentlichen Anteil an der Verformung haben können und Schichtverbunde im Vergleich zu den homogenen Einzelschichten aus traditionellen Werkstoffen in Dickenrichtung ein eher schubweicheres Verhalten aufweisen, wurde das Berechnungsmodell für schubweiche Platten ausgelegt. Im Fall der Kinematik schubweicher Platten wird eine verallgemeinerte Darstellung für mehrschichtige Laminate durch die Schubdeformationstheorie 1. Ordnung bereitgestellt. Basierend auf den Ansätzen von MINDLIN und REISSNER [225] müssen die kinematischen Annahmen der klassischen Laminattheorie bezüglich der Rotationen ψ_x, ψ_y modifiziert werden. Es wurden dabei ebenfalls konstante, aber jetzt von w unabhängige Rotationen ψ_x, ψ_y über der Plattendicke angenommen. Bei der Berechnung von Laminaten mit schubsteifer Charakteristik kann diese Modellerweiterung entfallen.

Für allgemeines linear elastisches anisotropes Materialverhalten ergibt sich das verallgemeinerte Hooksche Gesetz in der allgemeinen Form (Trikline Anisotropie) entsprechend

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{15} & C_{25} & C_{35} & C_{45} & C_{55} & C_{56} \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & C_{46} & C_{56} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \tag{3.26}$$

mit dem Steifigkeitstensor C_{ijkl} und in invertierter Form zu

$$\begin{bmatrix}\varepsilon_1\\ \varepsilon_2\\ \varepsilon_3\\ \gamma_{23}\\ \gamma_{13}\\ \gamma_{12}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16}\\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26}\\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36}\\ S_{14} & S_{24} & S_{34} & S_{44} & S_{45} & S_{46}\\ S_{15} & S_{25} & S_{35} & S_{45} & S_{55} & S_{56}\\ S_{16} & S_{26} & S_{36} & S_{46} & S_{56} & S_{66}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\sigma_1\\ \sigma_2\\ \sigma_3\\ \tau_{23}\\ \tau_{13}\\ \tau_{12}\end{bmatrix} \tag{3.27}$$

mit dem Nachgiebigkeitstensor S_{ijkl}. Da das Materialverhalten der untersuchten Materialien prinzipiell durch zwei Symmetrieebenen (z.B. 12-, 13-Ebene) charakterisiert ist, lässt sich das Strukturgesetz wie folgt in eine orthogonal anisotrope Struktur der Nachgiebigkeitsmatrix überführen:

$$\begin{bmatrix}\varepsilon_1\\ \varepsilon_2\\ \varepsilon_3\\ \gamma_{23}\\ \gamma_{13}\\ \gamma_{12}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0\\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0\\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\sigma_1\\ \sigma_2\\ \sigma_3\\ \tau_{23}\\ \tau_{13}\\ \tau_{12}\end{bmatrix}. \tag{3.28}$$

Durch diese Vereinfachung werden nur noch 9 unabhängige Materialkonstanten zur vollständigen Beschreibung des Nachgiebigkeitsverhaltens benötigt. Die hierbei definierten Steifigkeiten bzw. Nachgiebigkeiten lassen sich durch die in der Praxis verwendeten Ingenieurkonstanten E_{kl}, v_{kl} sowie G_{kl} wie folgt ausdrücken:

$$\begin{bmatrix}S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0\\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0\\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0\\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0\\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_3} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}}\end{bmatrix}. \tag{3.29}$$

Die Definition der Indizes der der Querkontraktionszahlen wurde dabei entsprechend der Richtlinie VDI 2014 folgendermaßen festgelegt: Der erste Index gibt die Richtung der auftretenden Querkontraktion an. Der zweite Index bezeichnet die Beanspruchung, durch welche die Querkontraktion bewirkt wird.

Unter Annahme eines ebenen Spannungszustandes lässt sich das allgemeine Strukturgesetz für den Fall der Orthotropie auch durch die Einführung sogenannter reduzierter Steifigkeiten Q_{ij} wie folgt darstellen:

$$\sigma = Q \cdot \varepsilon \tag{3.30}$$

$$\begin{bmatrix}\sigma_1\\ \sigma_2\\ \tau_{12}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}Q_{11} & Q_{12} & 0\\ Q_{12} & Q_{22} & 0\\ 0 & 0 & Q_{66}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\varepsilon_1\\ \varepsilon_2\\ \gamma_{12}\end{bmatrix}. \tag{3.31}$$

Die reduzierten Steifigkeiten Q_{ij} ergeben sich analog aus den Ingenieurkonstanten zu:

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \tag{3.32}$$

$$Q_{12} = Q_{21} = \frac{\nu_{21}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \tag{3.33}$$

$$Q_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \tag{3.34}$$

$$Q_{66} = G_{12} \ . \tag{3.35}$$

Zur Berücksichtigung der Faserorientierung der einzelnen Laminatschichten bei der Berechnung von Mehrschichtverbunden müssen die einzelnen lokalen faserangepassten Schichtsteifigkeiten in ein einheitliches globales Koordinatensystem entsprechend Abb. 3.231 transformiert werden.

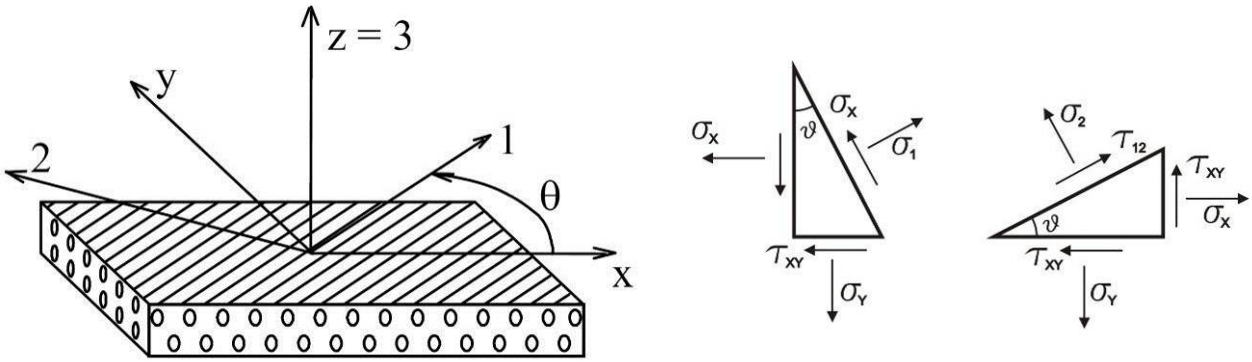


Abb. 3.231: Globales und faserangepasstes Koordinatensystem

Aus der Transformation der Spannungen bzw. Dehnungen zwischen lokalem faserangepassten Koordinatensystem (1,2,3) der Einzelschicht und globalem Koordinatensystem (x,y,z) des Verbundes entsprechend

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2\vartheta & \sin^2\vartheta & -2\cos\vartheta\sin\vartheta \\ \sin^2\vartheta & \cos^2\vartheta & \cos\vartheta\sin\vartheta \\ \cos\vartheta\sin\vartheta & -\cos\vartheta\sin\vartheta & \cos^2\vartheta - \sin^2\vartheta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \text{ und} \tag{3.36}$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2\vartheta & \sin^2\vartheta & -\cos\vartheta\sin\vartheta \\ \sin^2\vartheta & \cos^2\vartheta & \cos\vartheta\sin\vartheta \\ 2\cos\vartheta\sin\vartheta & -2\cos\vartheta\sin\vartheta & \cos^2\vartheta - \sin^2\vartheta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \tag{3.37}$$

ergeben sich die Transformationsbeziehungen für die einzelnen reduzierten Steifigkeiten wie folgt:

$$\overline{Q}_{11} = Q_{11}\cos^4\vartheta + 2\left(Q_{12} + Q_{66}\right)\cos^2\vartheta\sin^2\vartheta + Q_{22}\sin^4\vartheta \tag{3.38}$$

$$\overline{Q}_{12} = \left(Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66}\right)\cos^2\vartheta\sin^2\vartheta + Q_{12}\left(\cos^4\vartheta + \sin^4\vartheta\right) \tag{3.39}$$

$$\overline{Q}_{22} = Q_{11}\sin^4\vartheta + 2\left(Q_{12} + Q_{66}\right)\cos^2\vartheta\sin^2\vartheta + Q_{22}\cos^4\vartheta \tag{3.40}$$

$$\overline{Q}_{16} = \left(Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66}\right)\cos^3\vartheta\sin\vartheta + \left(Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66}\right)\cos\vartheta\sin^3\vartheta \tag{3.41}$$

$$\overline{Q}_{26} = \left(Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66}\right)\cos\vartheta\sin^3\vartheta + \left(Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66}\right)\cos^3\vartheta\sin\vartheta \tag{3.42}$$

$$\overline{Q}_{66} = \left(Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 2Q_{66}\right)\cos^2\vartheta\sin^2\vartheta + Q_{66}\left(\cos^4\vartheta + \sin^4\vartheta\right) \tag{3.43}$$

Durch die Verknüpfung mehrerer Einzelschichten zu einem Laminat lässt sich daraus ein werkstoffangepasstes Strukturgesetz herleiten, welches vollkommene Haftung zwischen den Einzellagen voraussetzt. Dabei besteht jede Einzelschicht des Laminates aus charakteristischen Steifigkeitsgrößen, welche sich aus den verschiedenen Materialien und der unterschiedlichen Orientierung ergeben. Die Iteration über der Schichtdicke kann somit nicht stetig über den gesamten Querschnitt, sondern muss schichtweise erfolgen.

$$N = \begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \sum_k N^{(k)} \qquad N^{(k)} = \begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix}^{(k)} \qquad N^{(k)} = \int_{z_{k-1}}^{z_k} \sigma^{(k)} dz \tag{3.44}$$

$$M = \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \sum_k M^{(k)} \qquad M^{(k)} = \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix}^{(k)} \qquad M^{(k)} = \int_{z_{k-1}}^{z_k} \sigma^{(k)} z\, dz \tag{3.45}$$

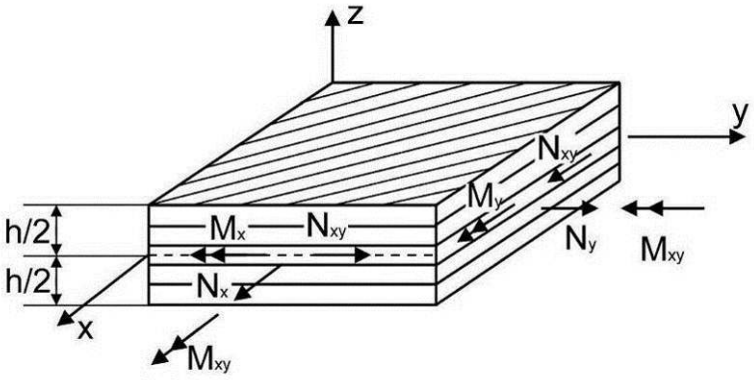


Abb. 3.232: Schnittkräfte und -momente am Plattenelement

Daraus ergibt sich ein Strukturgesetz aus den vollständigen Spannungs-Verzerrungs-Gleichungen über die charakteristische Steifigkeitsmatrix (ABD-Matrix).

$$\begin{bmatrix} N \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon \\ \kappa \end{bmatrix} \tag{3.46}$$

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \varepsilon_{xy}^0 \\ \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} \tag{3.47}$$

Die Untermatrix A beinhaltet die Dehnsteifigkeitskenngrößen, B die Kopplungen zwischen den Scheiben und Plattengrößen und D die Biegesteifigkeiten.

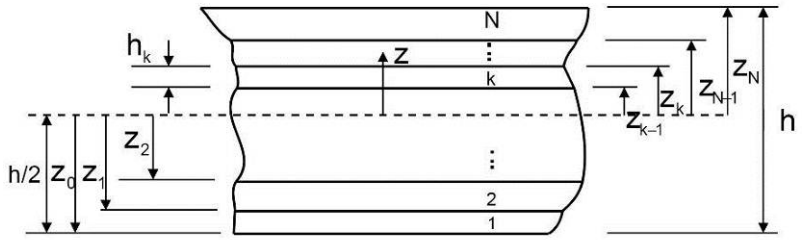


Abb. 3.233: Definition der Schichtdicken und Lage der Laminate

Unter Beachtung der Definition der statischen Ortskoordinate z gemäß Abb. 3.233 werden die Untermatrizen folgendermaßen ermittelt:

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^{n} Q_{ij}^{(k)} \left(z^{(k)} - z^{(k-1)} \right) \tag{3.48}$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{n} Q_{ij}^{(k)} \left(z^{(k)^2} - z^{(k-1)^2} \right) \tag{3.49}$$

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^{n} Q_{ij}^{(k)} \left(z^{(k)^3} - z^{(k-1)^3} \right) \tag{3.50}$$

Im Rahmen der klassischen Laminattheorie können daraus aber nur Gleichungen für die ebenen Schnittgrößen und nicht für die Querkräfte abgeleitet werden. Zur verbundgerechten Berechnung textilverstärkter Holztragwerke könnte eine Berücksichtigung der Querkräfte und Schubverzerrungen hingegen notwendig sein. Eine entsprechende Erweiterung für schubweiche Laminate basierend auf den Ansätzen von MINDLIN und REISSNER wurde für die Berücksichtigung der Schubdeformationen abgeleitet. Damit lässt sich eine Erweiterung der klassischen Laminattheorie durch die Querkräfte Q_x und Q_y wie folgt formulieren:

$$\begin{pmatrix} Q_x \\ Q_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{55} & A_{54} \\ A_{45} & A_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{pmatrix}. \tag{3.51}$$

Die Komponenten können dabei wie folgt in erster Näherung aus der Multiplikation der Schubsteifigkeiten mit den Schichtdicken abgeschätzt werden.

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^{n} G_{ij}^{(k)} h^{(k)} \tag{3.52}$$

Die resultierenden Querkraftschubspannungen sind dabei aber entgegen den Forderungen der Gleichgewichtbedingungen konstant über der Dicke des Laminates. Somit können die sich ergebenen Schubsteifigkeiten bei der Berechnung in Abhängigkeit von den geometrischen Verhältnissen erheblich überschätzt werden. Durch die Einführung sogenannter Schubkorrekturfaktoren k^s_{ij} kann dieser Einfluss rechnerisch berücksichtigt werden.

$$\begin{pmatrix} Q_x \\ Q_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k^s_{55} A_{55} & k^s_{54} A_{54} \\ k^s_{45} A_{45} & k^s_{44} A_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{pmatrix} \tag{3.53}$$

Nach der Elastizitätstheorie sind die Gleitung sowie die Querkraftschubspannungen über der Plattendicke nicht konstant. Die Ansätze der ersten Schubdeformationstheorie ermöglichen aber nur die Berechnung konstanter Gleitungen und Schubspannungen. Um diesen Fehler auszugleichen, werden die globale Gleitung als gemittelte Gleitung über der Laminatdicke sowie die lokalen Schichtgleitungen als Gleitung der Einzelschichten über die Ergänzungsarbeit verglichen. Die Berechnung des Schubkorrekturfaktors für Laminate erfolgt entsprechend REISSNER

(siehe [225]) unter der Voraussetzung, dass das Laminat symmetrisch und somit die Koppelmatrix B nicht besetzt ist, wie folgt:

$$\frac{1}{k_i^s} = A_i \sum_{k=1}^{n} \int_{z^{(k-1)}}^{z^{(k)}} \frac{g_i^{(k)^2} z}{G^{(k)}} dz \ . \tag{3.54}$$

Die Funktion $g^{(k)}_i$ enthält dabei die Steifigkeiten des Mehrschichtverbundes und ist für die jeweilige Richtung x oder y folgendermaßen definiert:

$$g_x^{(k)} = d_{11}^* \left\{ - Q_{11}^{(k)} \frac{z^2}{2} + \sum_{j=1}^{k} \left[Q_{11}^{(j)} - Q_{11}^{(j-1)} \right] \frac{z^{(j-1)^2}}{2} \right\} + d_{12}^* \left\{ - Q_{12}^{(k)} \frac{z^2}{2} + \sum_{j=1}^{k} \left[Q_{12}^{(j)} - Q_{12}^{(j-1)} \right] \frac{z^{(j-1)^2}}{2} \right\} \tag{3.55}$$

und

$$g_y^{(k)} = d_{22}^* \left\{ - Q_{22}^{(k)} \frac{z^2}{2} + \sum_{j=1}^{k} \left[Q_{22}^{(j)} - Q_{22}^{(j-1)} \right] \frac{z^{(j-1)^2}}{2} \right\} + d_{12}^* \left\{ - Q_{12}^{(k)} \frac{z^2}{2} + \sum_{j=1}^{k} \left[Q_{12}^{(j)} - Q_{12}^{(j-1)} \right] \frac{z^{(j-1)^2}}{2} \right\} \ . \tag{3.56}$$

Die Elemente d^* sind die Elemente der Inversen D^* der Biegesteifigkeitsmatrix D.

3.6.1.2 Bruchmodebezogenes Versagenskriterium

Aufbauend auf der Beschreibung des anisotropen Strukturgesetztes ist zur praxisgerechten Auslegung der betrachteten Holz-Textil-Verbunde darüber hinaus ein rechnerischer Festigkeitsnachweis auf Basis anisotroper Bruchkriterien notwendig. Für die Versagensanalyse von textilverstärkten Verbundwerkstoffen kommen in der Ingenieurpraxis überwiegend sogenannte pauschale Interaktionskriterien und Normalspannungs- bzw. Dehnungskriterien zum Einsatz. Dabei haben sich in der Praxis vor allem Versagensmodelle durchgesetzt, bei denen die Bruchcharakteristik bruchmodebezogen formuliert wird (siehe [226]). Dazu werden für die sich einstellenden unterschiedlichen Versagensmoden (wie etwa Faserversagen oder Zwischenfaserversagen) getrennte Bruchbedingungen definiert und zu einem geschlossenen Versagenskriterium zusammengeführt. Durch die orthotrope Ausprägung des Versagensverhaltens sowohl von Holz als auch von Textilverbunden in Faserrichtung oder quer zur Faserrichtung eignen sich derartige Modelle gut für die ganzheitliche analytische Beschreibung von Textil-Holz-verbunden. Die neuartigen, bruchmodebezogenen Versagenskriterien bieten eine gute Voraussetzung für die realistische Bestimmung der tatsächlichen Versagenscharakteristik. Diese wurden im Rahmen dieser Untersuchungen für den Einsatz bei der anisotropen Versagensanalyse von textilverstärkten Mehrschichtverbunden herangezogen und auf die komplexe Werkstoffcharakteristik angepasst. Ausgangsbasis dafür waren die für derartige Verbunde oft angewendeten bruchmodebezogenen Versagensmodelle von CUNTZE [227], [228] bzw. von HASHIN/PUCK [229].

Für die Formulierung des wirkebenenbezogenen Bruchkriteriums zur Bewertung von dreidimensionalen Spannungszuständen wird von HASHIN/PUCK in Bezug auf die gebräuchlichen pauschalen Interaktionskriterien ein vollkommen neuer Weg beschritten. Dabei erfasst dieses Kriterium nicht nur den entscheidenden Unterschied zwischen den Bruchmoden Faserversagen (FB) und Zwischenfaserversagen (ZFB), sondern es beinhaltet darüber hinaus auch einen Bruchwinkel als freien Parameter, der weitere Bruchmoden in der faserparallelen Ebene charakterisiert. Dabei werden die Versagensmoden Faser- und Zwischenfaserversagen durch unterschiedliche Versagensbedingungen erfasst, wobei ausschließlich die in der Bruchebene wirkenden Spannungen berücksichtigt werden. Dabei wird angenommen, dass Faserversagen ausschließlich durch die faserparallele Spannung ausgelöst wird und von anderen auftretenden Spannungen unbeeinflusst bleibt. Die Bruchbedingungen für Zwischenfaserversagen sind im Vergleich zum FB-Kriterium deutlich komplizierter, da unterschiedliche Versagensformen wie Adhäsionsbruch der Grenzflächen oder Kohäsionsversagen der Matrix sowie unterschiedliche Versagensmoden wie Zug-, Längsschub-, und Querschub-Versagen realistisch zu beschreiben sind. Aufgrund

seiner Einfachheit in der Modellformulierung basiert das Versagensmodell von HASHIN/PUCK hingegen nicht auf physikalisch begründeten Versagenskriterien, weshalb eine praxisnahe Verwendung für die innerhalb dieses Projektes betrachteten Schichtverbunde als bedenklich einzustufen ist.

Zur Einführung der praktischen Handhabung physikalisch begründeter Versagenskriterien hat CUNTZE einen neuen Ansatz entwickelt, mit dem auch problematische Aspekte des HASHIN/PUCK-Kriteriums umgangen werden können. Zum einen zählt hierzu, dass der von PUCK eingeführte Wirkebenenwiderstand experimentell nicht direkt messbar ist, sodass kein unmittelbarer Festigkeitsnachweis durchgeführt werden kann. Zum anderen stellt sich beim Verbundversagen nicht immer eine Bruchebene im Sinne der Hypothese von MOHR ein. Des Weiteren geht CUNTZE davon aus, dass sich mikromechanische und statistische Wechselwirkungen insbesondere bei überlagerter Belastung nicht eindeutig voneinander unterscheiden lassen. Unter Berücksichtigung dieser Faktoren erarbeitete CUNTZE ein versagensmodebezogenes Festigkeitskriterium, welches er als Invariantendarstellung formulierte, um damit eine universelle Anwendbarkeit bei einfacher mathematischer Handhabung zu ermöglichen. Der wesentliche Unterschied der für die Versagensanalyse betrachteten Kriterien ergibt sich insbesondere hinsichtlich einer vereinfachten Handhabung, was eine effektive Modifizierung der Versagensmodelle für die hier untersuchten textilverstärkten Holzverbunde ermöglichte.

Bei diesem bruchmodebezogenen Versagenskriterium werden prinzipiell die folgenden Bruchbedingungen unterschieden:

Faserbruchbedingungen:

$$F_{\parallel}^{\sigma} = \frac{\sigma_{eq}^{\parallel\sigma}}{R_{\parallel}^{(+)}} = \frac{I_1}{R_{\parallel}^{(+)}} = 1 \ , \tag{3.57}$$

$$F_{\parallel}^{\tau} = \frac{\sigma_{eq}^{\parallel\tau}}{R_{\parallel}^{(-)}} = \frac{I_1}{R_{\parallel}^{(-)}} = 1 \ . \tag{3.58}$$

Zwischenfaserbruchbedingungen:

$$F_{\perp}^{\sigma} = \frac{\sigma_{eq}^{\perp\sigma}}{R_{\perp}^{(+)}} = \frac{I_2 + \sqrt{I_4}}{2R_{\perp}^{(+)}} = 1 \ , \tag{3.59}$$

$$F_{\perp\parallel} = \frac{\sigma_{eq}^{\perp\parallel}}{R_{\perp\parallel}} = \frac{\sqrt{I_3} + b_{\perp\parallel} I_2}{R_{\perp\parallel}} = 1 \ , \tag{3.60}$$

$$F_{\perp}^{\tau} = \frac{\sigma_{eq}^{\perp\parallel}}{R_{\perp}^{(-)}} = \frac{\left(b_{\perp}^{\tau} - 1\right) I_2 + b_{\perp}^{\tau}\sqrt{I_4}}{R_{\perp}^{(-)}} = 1 \ . \tag{3.61}$$

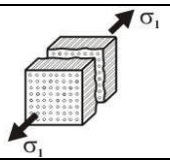
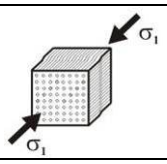
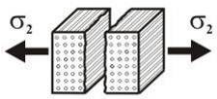
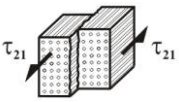
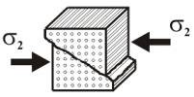
Die freien Parameter $b_{\perp\parallel}$ und $b_{\perp}^{\tau}$ repräsentieren dabei die innere Werkstoffreibung und können entsprechend [227] ermittelt werden.

Die auf mikromechanischen und probabilistischen Effekten beruhende Interaktion zwischen den Bruchmoden wird mit Hilfe des Ausrundungsparameters $\dot{m}$ realisiert (Cuntze empfiehlt als praxisnahen Wert $\dot{m}$=3,1). Für die Schädigungsinitiierung ergibt sich damit aus der Gegenüberstellung der bruchmodebestimmenden Schichtspannungen σ_i und der entsprechenden Festigkeit R_i die Bedingung:

$$F^{\dot{m}} = \left(\frac{\sigma_{eq}^{\parallel\sigma}}{R_{\parallel}^{(+)}}\right)^{\dot{m}} + \left(\frac{\sigma_{eq}^{\parallel\tau}}{R_{\parallel}^{(-)}}\right)^{\dot{m}} + \left(\frac{\sigma_{eq}^{\perp\sigma}}{R_{\perp}^{(+)}}\right)^{\dot{m}} + \left(\frac{\sigma_{eq}^{\perp\parallel}}{R_{\perp\parallel}}\right)^{\dot{m}} + \left(\frac{\sigma_{eq}^{\perp\tau}}{R_{\perp}^{(-)}}\right)^{\dot{m}} = 1 \tag{3.62}$$

Ein Überblick der unterschiedlichen Versagenskriterien ist in Tabelle 3.54 zusammengestellt.

Tabelle 3.54: Bruchmodenüberblick für Faserverbunde nach CUNTZE

	Faserbruchmoden		**Zwischenfaserbruchmoden**		
Bezeichnung	FF1	FF2	IFF1	IFF2	IFF3
Versagens-form					
Basisfestig-keiten	$R_{\parallel}^{(+)}$	$R_{\parallel}^{(-)}$	$R_{\perp}^{(+)}$	$R_{\perp\parallel}$	$R_{\perp}^{(-)}$
Bruch-bedingung	(3.57)	(3.58)	(3.59)	(3.60)	(3.61)

Bei der beispielhaften Simulation und Verifikation in Abschnitt 3.6.2 wurde die Versagensmodellierung für die beiden Faserbruchmoden FF1 und FF2 umgesetzt und untersucht.

Die sich aus den Kriterien für Schädigung ergebenden Versagensoberflächen verändern durch die Entfestigungseffekte (Degradation) ihre Form. Diese variablen Flächen werden dabei im Gegensatz zur klassischen Versagensanalyse ohne Berücksichtigung von Schädigung durch die veränderlichen Funktionen $\tilde{F}(\sigma_i, D_{ij}, r)$ beschrieben.

$$\tilde{F} = \left[\left(\frac{\sigma_{eq}^{\parallel\sigma}}{R_{\parallel}^{(+)}} \right)^{\dot{m}} + \left(\frac{\sigma_{eq}^{\parallel\tau}}{R_{\parallel}^{(-)}} \right)^{\dot{m}} + \left(\frac{\sigma_{eq}^{\perp\sigma}}{R_{\perp}^{(+)}} \right)^{\dot{m}} + \left(\frac{\sigma_{eq}^{\perp\parallel}}{R_{\perp\parallel}} \right)^{\dot{m}} + \left(\frac{\sigma_{eq}^{\perp\tau}}{R_{\perp}^{(-)}} \right)^{\dot{m}} \right]^{\frac{1}{\dot{m}}} - r = 0 \qquad (3.63)$$

Der Schwellwert r beschreibt die Verkleinerung der Fläche für diskrete Schädigung im Spannungsraum bei Überschreiten der Festigkeit R (Entfestigung). In der Literatur wird der Schwellwert r auch als ”fiktive“ Anstrengung bezeichnet, da er ein Verhältnis angibt, um welches die ursprünglich ertragbare Belastung überschritten worden ist, siehe z. B. [232].

3.6.1.3 Anisotropes Schädigungsevolutionsgesetz

Neben dem anisotropen Strukturgesetz und einer bruchmodebezogenen Versagensmodellierung ist die aussagefähige Wiedergabe des Degradationsverhaltens derartigen textilverstärkter Verbundstrukturen zur effektiven nichtlichtlinearen Berechnung notwendig. Ausgehend von den Ansätzen von LEMAITRE [230] und dem Prinzip der Dehnungsäquivalenz lässt sich ein entsprechendes Deformationsgesetz unter Berücksichtigung von Schädigung formulieren. Bei schädigungsmechanischen Modellen erfolgt die Beschreibung der Schädigung durch die kontinuumsmechanische Charakterisierung der veränderlichen Eigenschaften eines homogenisierten Ersatzmaterials. Als Maß für die Reduktion der Steifigkeiten werden sogenannte Schädigungsparameter eingeführt, deren Veränderungen durch Evolutionsgleichungen beschrieben werden. Aufgrund der ausgeprägten Anisotropie der untersuchten Verbundwerkstoffe ergibt sich auch hierbei eine Berücksichtigung der Anisotropie der Schädigungskenngrößen. Eine Beschreibung des Degradationsverhaltens kann daher nicht mehr mit einem einzigen skalaren Schädigungsparameter erfolgen, sondern bedingt die Notwendigkeit der Definition des Schädigungsparameters als tensorielle Größe. Die Änderung der Schädigungsparameter wird dabei entsprechend BÖHM [231] durch die Einführung sogenannter Schädigungsevolutionsgleichungen in Abhängigkeit von der zugeordneten werkstoffmechanischen Größe beschrieben. Im Sinne der bruchmodebezogenen Betrachtungsweise wird analog zur Formulierung der Festigkeitshypothese ange-

nommen, dass die Schädigungsparameter ausschließlich von den im jeweiligen Mode maßgebenden Spannungskomponenten σ_i abhängen. Diese modebezogenen Schädigungszuwächse φ^j ergeben sich dabei in Abhängigkeit von den jeweiligen modebezogenen Schwellwerten r_j bei Erfüllung der Schädigungsbedingung in (3.62). Zur Beschreibung dieses Schädigungsfortschritts wurden für die hier betrachteten textilverstärkten Holzverbundstrukturen drei entsprechende Schädigungsevolutionsansätze erarbeitet und vorgestellt.

Das Auftreten der beiden Faserversagen Bruchmoden (FF1 und FF2) führt bei reinen Faserverbundstrukturen sofort zum Totalversagen der repräsentativen Basisschicht (kritische Schädigung), sodass bei derartigen Materialien für die Evolutionsgleichung ein vereinfachter Ansatz (Sudden-Death-Modell) entsprechend (3.64) gewählt werden kann.

$$\phi^j = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} \tag{3.64}$$

Einen weiteren einfachen Ansatz zur Erfassung des prinzipiellen Schädigungsverlaufes mit nur einem zusätzlichen freien Materialparameter β_j stellt die folgende Exponentialfunktion dar:

$$\phi^j = \begin{cases} 0 \\ 1 - \exp\left(\frac{1}{\beta}\left(r_0^{\beta} - r^{\beta}\right)\right) \end{cases} \tag{3.65}$$

Der freie Parameter β_j steuert dabei das Wachstum der Schädigung in Abhängigkeit von der jeweiligen Spannungskombination. Dieser einfache Ansatz mit nur einem freien Parameter lässt die Schädigungsevolution der Basisschichten für derartige Holzverbunde nicht immer realistisch genug abbilden, da der Knick in der Funktion φ^j (3.65) bei Erfüllung der Schädigungsbedingung einen plötzlichen Steifigkeitsverlust der Basisschicht bewirkt.

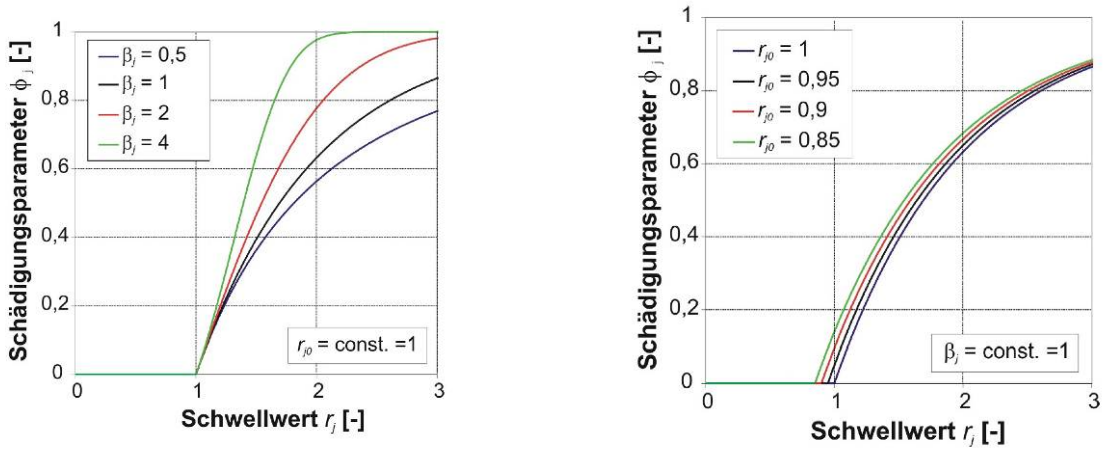


Abb. 3.234: Auswirkung der Parameter β_j und r_j auf die Schädigungsevolution

Eine höhere Genauigkeit bei der Beschreibung der Schädigungsevolution kann erreicht werden, wenn ein aus der Plastizitätstheorie bekanntes modifiziertes Potenzgesetz entsprechend

$$\phi^j = \begin{cases} 0 \\ 1 - \left(\frac{1-\eta}{1+\beta\left(r - r_0\right)^{\kappa}} + \eta\right) \end{cases} \tag{3.66}$$

verwendet wird. Der zusätzliche freie Parameter κ_j dient der Vermeidung der oben angesprochenen abrupten Änderung von φ^j bei $r_j=r_{j0}$ und erlaubt damit eine verbesserte Anpassung der Evolutionsgleichung an die Versuchsergebnisse. Der zusätzliche freie Parameter η_j beschreibt in Anlehnung an [232] eine mögliche Reststeifigkeit der Basisschicht, gekennzeichnet durch den Grenzwert, den φ^j bei $r_j = \infty$ annimmt. Für die hier betrachteten Holz-Textil-Verbunde lässt sich keine derartige Reststeifigkeit beobachten, sodass sich für die Berechnung $\eta_j=0$ ergibt.

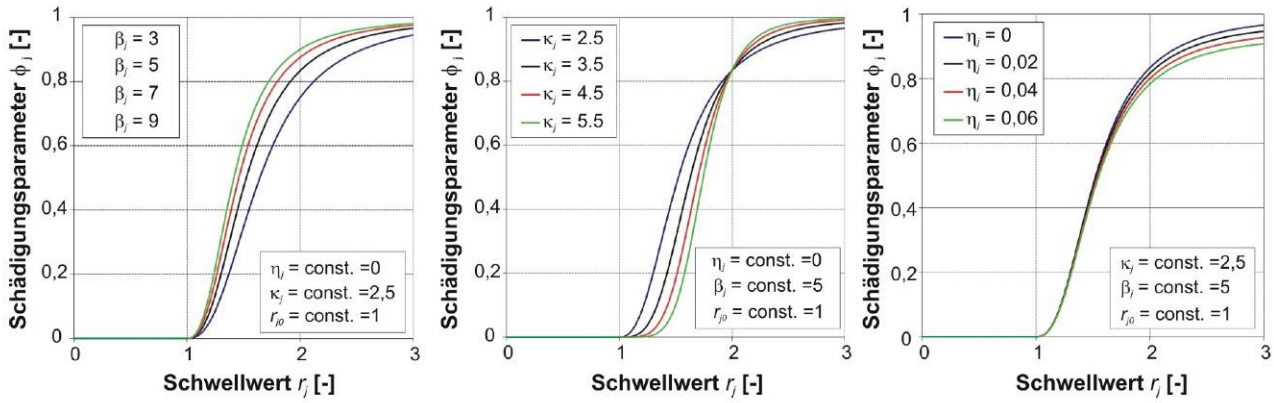


Abb. 3.235: Auswirkung der Parameter β_j, κ_j und η_j auf die Schädigungsevolution

Durch den Einsatz verschiedener Degradationsmodelle für die entsprechenden Versagensmoden (Zugbeanspruchung mit Sudden-Death-Modell und Druckbeanspruchung mit dem Dreiparametermodell) lässt sich das charakteristische nichtlineare Werkstoffverhalten, wie in Abb. 3.237 veranschaulicht, in der Berechnung simulieren.

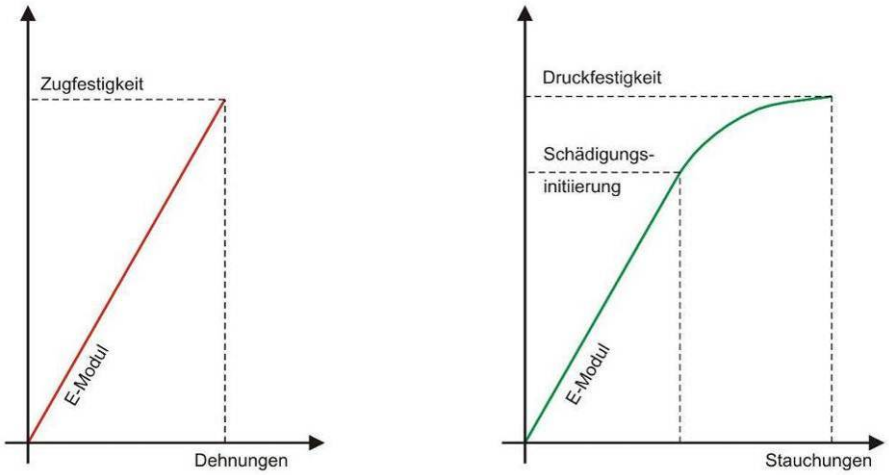


Abb. 3.236: Einsatz unterschiedlicher Degradationsmodell

Die erarbeiteten analytischen Modelle für das werkstoffgerechte Mehrschichtstrukturgesetz, das bruchmodebezogene Versagenskriterium und das anisotrope Degradationsmodell wurden in ein entsprechendes Berechnungstool zur beispielhaften Strukturanalyse ausgewählter textilverstärkter Hochleistungsstrukturen eingearbeitet und in Abschnitt 3.6.2 angewendet und verifiziert.

3.6.2 Simulation des Verbundverhaltens und verifizierende Untersuchungen
Autor: Mike Thieme (ILK)

Zur Umsetzung der neuartigen Verbundbauweise von faserverstärkten Textilien und Formpressholz in die Baupraxis muss die prinzipielle Berechenbarkeit nachgewiesen sein. Dazu sollte das erarbeitete Berechnungsmodell an praxisgerechten Beispielen eingesetzt und verifiziert werden. Das in Abschnitt 3.6.1 vorgestellte werkstoffgerechte Materialmodell für Holz-Textil-Verbunde wurde dafür in einem einfachen Berechnungstool (siehe Excel-Bildschirmoberfläche in) umgesetzt. In regelmäßigen Treffen und Diskussionen mit dem IaFB wurden praxisnahe und werkstoffgerechte Materialeigenschaften (Festigkeiten, Spannungs-Dehnungsbeziehungen etc.) definiert sowie Ergebnisse des entwickelten ILK-Berechnungsmodells diskutiert und mit den IaFB-Modellen (vgl. Kap. 3.7.3.3.2) abgeglichen.

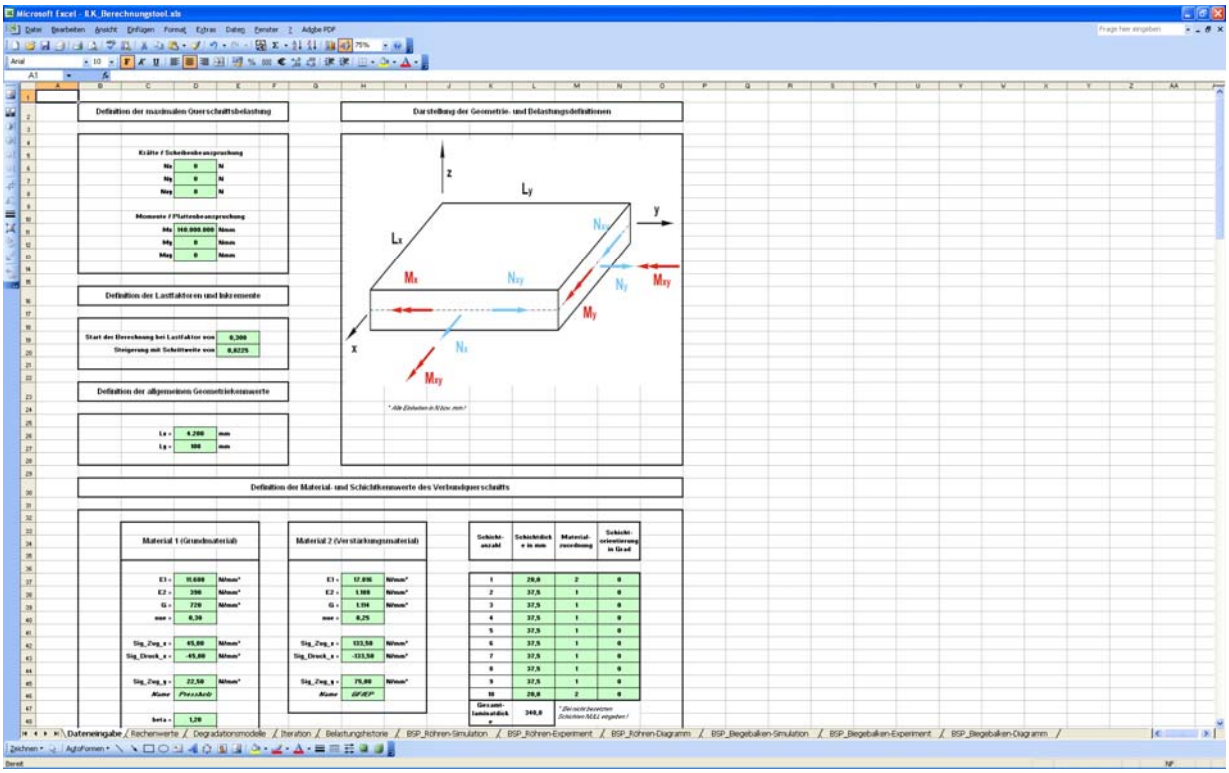


Abb. 3.237: Excel-Screenshot der Eingabemaske des analytischen Berechnungstools

In Absprache mit den Projektpartnern sollte die Simulation des charakteristischen Verbundstrukturverhaltens an den Demonstratorstrukturen aus den Forschungsschwerpunkten der beteiligten Projektpartner (Biegebalken aus KHP-verstärktem Brettschichtholz bzw. textilverstärkte Formholzröhre) angewendet und verifiziert werden. Die Simulationsergebnisse sollen später zur Ableitung allgemeiner baupraktischer Richtlinien dienen und eine allgemeine Berechenbarkeit derartiger Holz-Textil-Verbunde gewährleisten.

3.6.2.1 Modellverifikation am Beispiel der KHP-verstärkten Biegeträger

Biegeträger aus Brettschichtholz (BSH) bieten den Vorteil relativ hoher Festigkeiten bei geringem Gewicht und möglicher großer Querschnittsabmessungen durch das Verkleben von Einzellamellen. Durch den Einsatz einer zusätzlichen Verstärkung in der Zug- bzw. Druckzone des Biegebalkens sollen die Biegefestigkeiten gesteigert bzw. die Bauhöhen verringert und die Konstruktion verschlankt werden. Zur Verifikation des Strukturverhaltens derartiger mehrschichtiger Verbundstrukturen wurden auf Basis des in Abschnitt 3.6.1 vorgestellten analytischen Berechnungstools die am ISH durchgeführten experimentellen Untersuchungen an KHP-verstärkten Biegeträgern (siehe Kap. 3.5.6) nachgerechnet. Dabei wurden insbesondere die Einflüsse des Verstärkungsmaterials, wie etwa Dicke und Art der Verstärkungsschicht, untersucht.

Es konnte hierfür in Voruntersuchungen gezeigt werden, dass ein Vernachlässigen der Querkraftanteile in der Modellformulierung nur zu geringfügigen Abweichungen der Simulationsergebnisse führt (Abb. 3.238), sodass ein Ansatz der Schubspannungen bei der Simulation des Strukturverhaltens der hier untersuchten Demonstratorstrukturen in der Programmumsetzung vernachlässigt werden konnte.

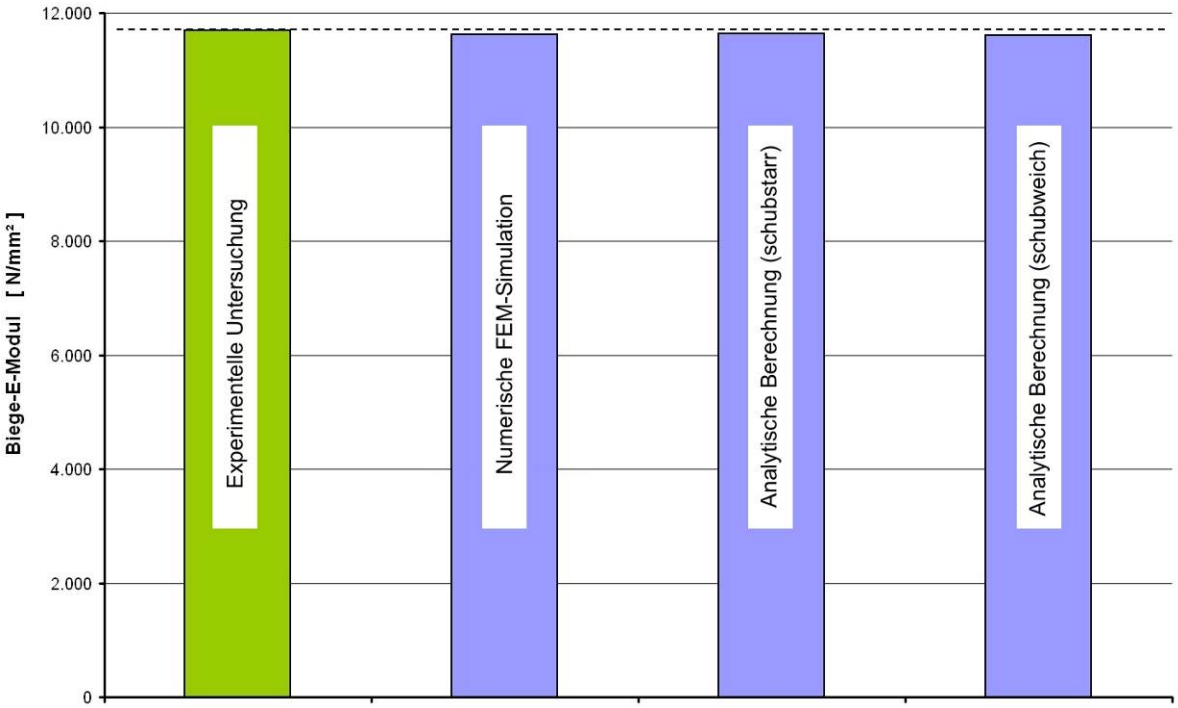


Abb. 3.238: Vergleich der Ergebnisse schubstarrer und schubweicher Plattentheorie

Die für die analytische Berechnung des verstärkten bzw. unverstärkten Biegeträgers verwendeten Geometrie- und Materialparameter sind in Tabelle 3.55 zusammengefasst.

Tabelle 3.55: Modellparameter* für Biegeträgerberechnung (entsprechend Kap. 3.5.6)

	Holz	KHP-Verstärkung
E-Modul in Faserrichtung - E_1	11.600 N/mm²	17.816 N/mm²
E-Modul quer zur Faserrichtung - E_2	390 N/mm²	1.188 N/mm²
Schubmodul - G_{12}	720 N/mm²	1.114 N/mm²
Querdehnzahl - v_{12}	0,30	0,25
Zugfestigkeit in Faserrichtung	45,0 N/mm²	133,5 N/mm²
Schädigungsinitiierung bei Druckbeanspruchung in Faserrichtung	-45,0 N/mm²	-133,5 N/mm²
Trägerhöhe	300 mm (unverstärkt)	340 mm (inkl. beidseitiger KHP-Verstärkung)
Trägerlänge	4.200 mm	
Trägerbreite	100 mm	

* Die Simulationsrechnung inkl. der verwendeten Modellparameter finden Sie auf der beiliegenden CD als Anhang 7.011 Simulationsbeispiel 1 und 7.012 Simulationsbeispiel 2.

Durch die Gegenüberstellung der analytischen Simulationsergebnisse mit den experimentellen Messwerten vom ISH für den unverstärkten Biegebalken (Abb. 3.239) lässt sich deutlich eine aussagekräftige Berechenbarkeit für derartige Verbundstrukturen mit den erarbeiteten Versagens- und Schädigungsmodellen zeigen.

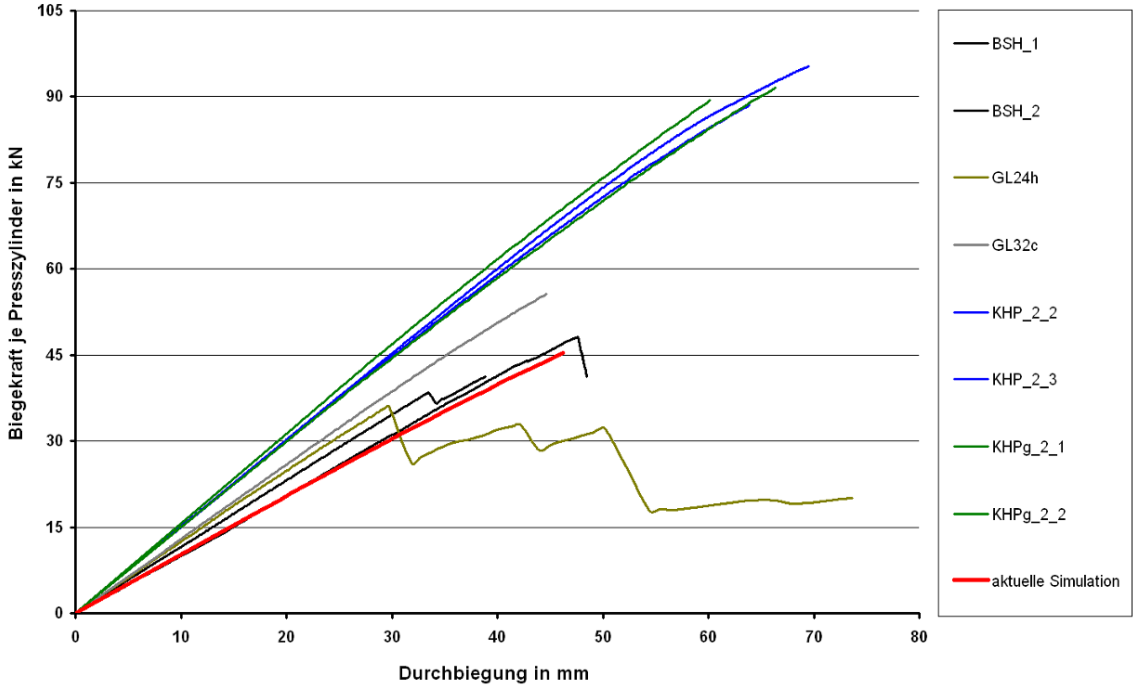


Abb. 3.239: Verifikation des Berechnungsmodells für den unverstärkten Biegeträger

Die Übertragung des Modells auf den beidseitig KHP-verstärkten Biegeträger ist in Abb. 3.240 dargestellt. Die Erhöhung der Traglast durch die KHP-Verstärkung sowie das charakteristisch nichtlineare Versagensverhalten wird dabei durch das Berechnungsmodell gut abgebildet.

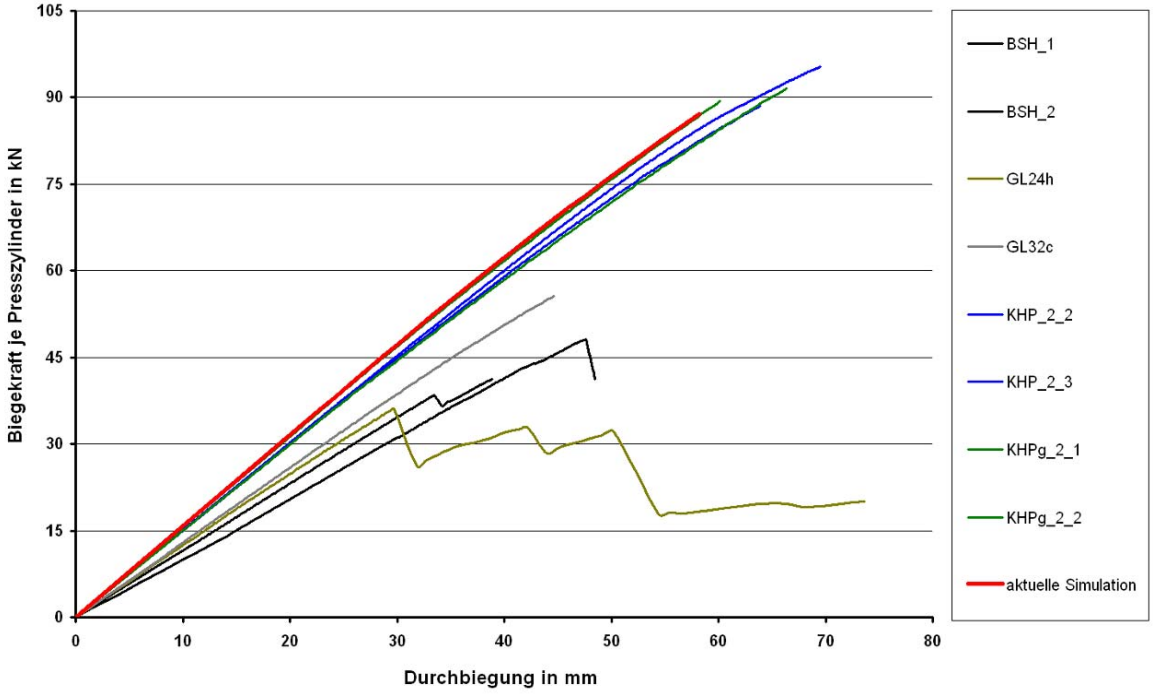


Abb. 3.240: Verifikation des Berechnungsmodells für den KHP-verstärkten Biegeträger

Die eingeführten Mechanismen von Strukturgesetz, Versagensbedingung und Degradationsmodell können die real eintretenden Versagensphänomene gut analytisch abbilden und ermöglichen somit eine robuste Auslegung derartiger Holz-Textil-Hybridstrukturen.

Das abrupte Zugversagen aufgrund der Modellierung mit der Sudden-Death-Formulierung für die Steifigkeitsdegradation der unteren Holzschichten führt durch entsprechende Lastumlagerungen in die KHP-Schichten mit höheren Festigkeiten nicht zu einem Totalversagen des gesamten Biegeträgers. Die weitere Belastung kann somit noch bis zum tatsächlichen Totalversagen der Gesamtstruktur gesteigert werden. Das nichtlineare Druckverhalten wird hingegen durch die modifizierte Potenzformulierung der Steifigkeitsdegradation umgesetzt. Das Wirksamwerden und Ineinandergreifen der einzelnen Berechnungsmodelle ist in Abb. 3.241 beispielhaft veranschaulich.

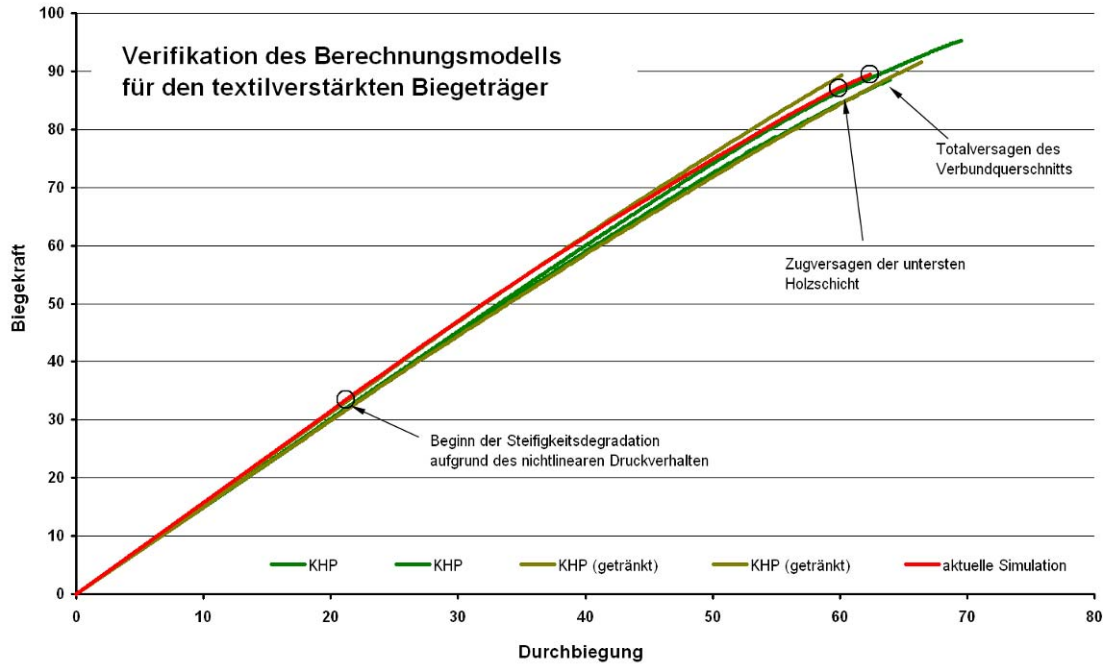


Abb. 3.241: Modellierung des Versagensverhaltens eines KHP-verstärkten Biegeträgers

Die Wirkungsweise der einzelnen Simulationsmodelle Strukturgesetz, Versagensbedingung und Degradationsmodell lässt sich an der Betrachtung der Spannungsverläufe über dem Querschnitt der Einzelschichtspannungen ablesen. Im linearen Bereich wird der Spannungsverlauf ausschließlich durch die Zusammenführung der Einzelschichten zu einem Mehrschichtverbund innerhalb des Strukturgesetzes dominiert. Daraus resultiert der in Abb. 3.242 gezeigte lineare Spannungsverlauf der Spannungen über dem Biegeträgerquerschnitt.

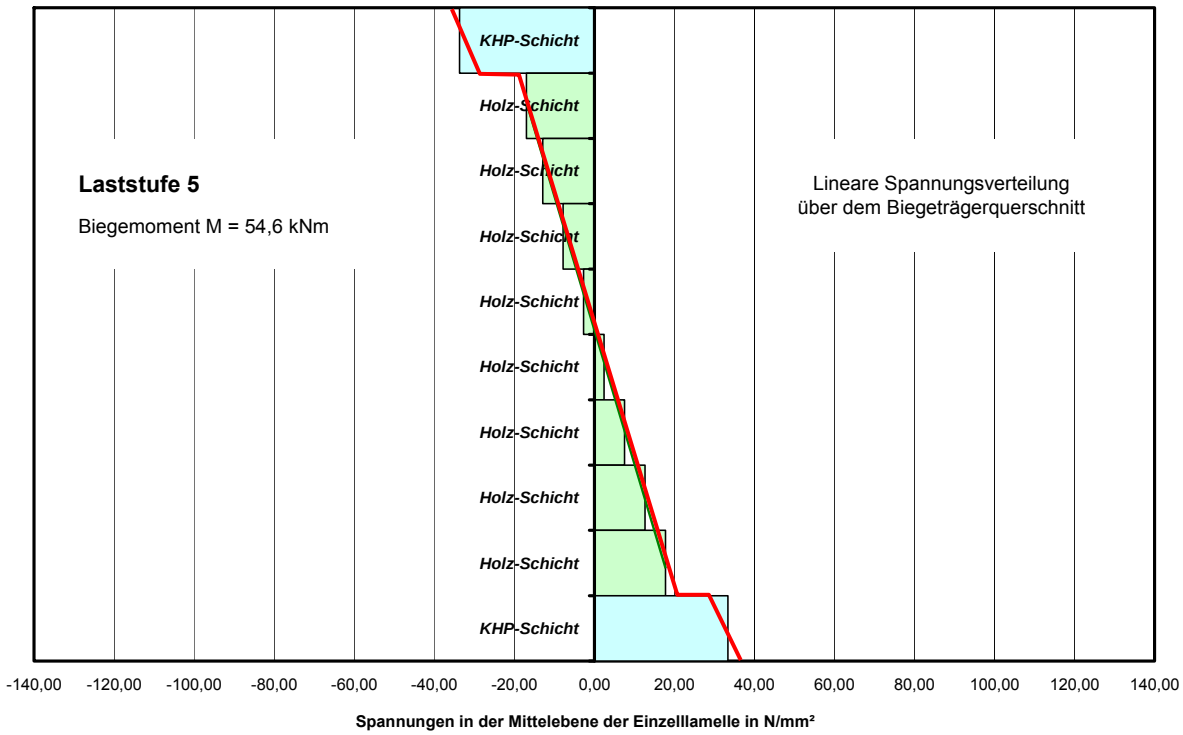


Abb. 3.242: Verteilung der Einzelschichtspannungen bei M = 54,6 kNm

Die Spannungs-Dehnungs-Kurve von Holz weist im Druckbereich einen charakteristischen nichtlinearen Verlauf bis zum endgültigen Druckversagen auf. Dies resultiert aus Endfestigungseffekten (Degradation der Steifigkeiten) über dem Belastungsprozess. Diese nichtlineare Steifigkeitsdegradation ist gut in dem nichtlinearen Spannungsverlauf der Einzelschichtspannungen im Druckbereich zu erkennen (Abb. 3.243). Im Zugbereich weist Holz hingegen keine derart ausgeprägte Nichtlinearität auf, welches weiterhin durch die lineare Spannungsverteilung bis zum Erreichen der Zugfestigkeit durch die erarbeiteten Berechnungsmodelle approximiert wird. Die Zugfestigkeit wird als erstes in der untersten Holzschicht überschritten und führt aufgrund der Sudden-Death-Modellierung der Steifigkeitsdegradation zu einem Sofortversagen der betreffenden Schicht. Die dadurch freiwerdenden Spannungen können in die anliegenden Schichten umgelagert werden, sodass es nach Überschreiten der Holzzugfestigkeit nicht direkt zu einem Totalversagen der Gesamtstruktur kommt. Durch die hohen Zugfestigkeiten der KHP-Schicht ist somit eine weitere Laststeigerung möglich.

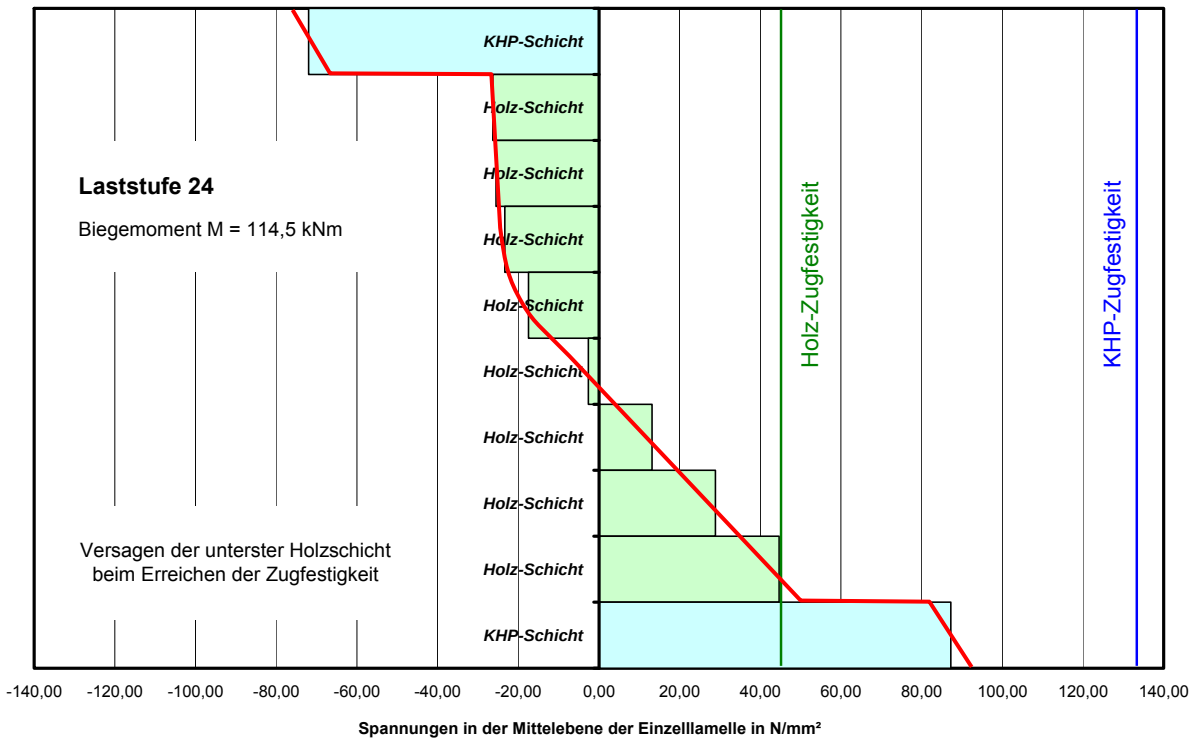


Abb. 3.243: Verteilung der Einzelschichtspannungen bei M = 114,6 kNm

Beim weiteren Steigern der Belastung kommt es zusätzlich zum Ausfall der nächsten Holzschicht und die Zugspannungen werden fast ausschließlich durch die unterste KHP-Schicht aufgenommen (Abb. 3.244). Beim Erreichen der Zugfestigkeit der KHP-Schicht können diese Spannungen nicht mehr umgelagert werden und es kommt zum Totalversagen des gesamten Biegeträgers.

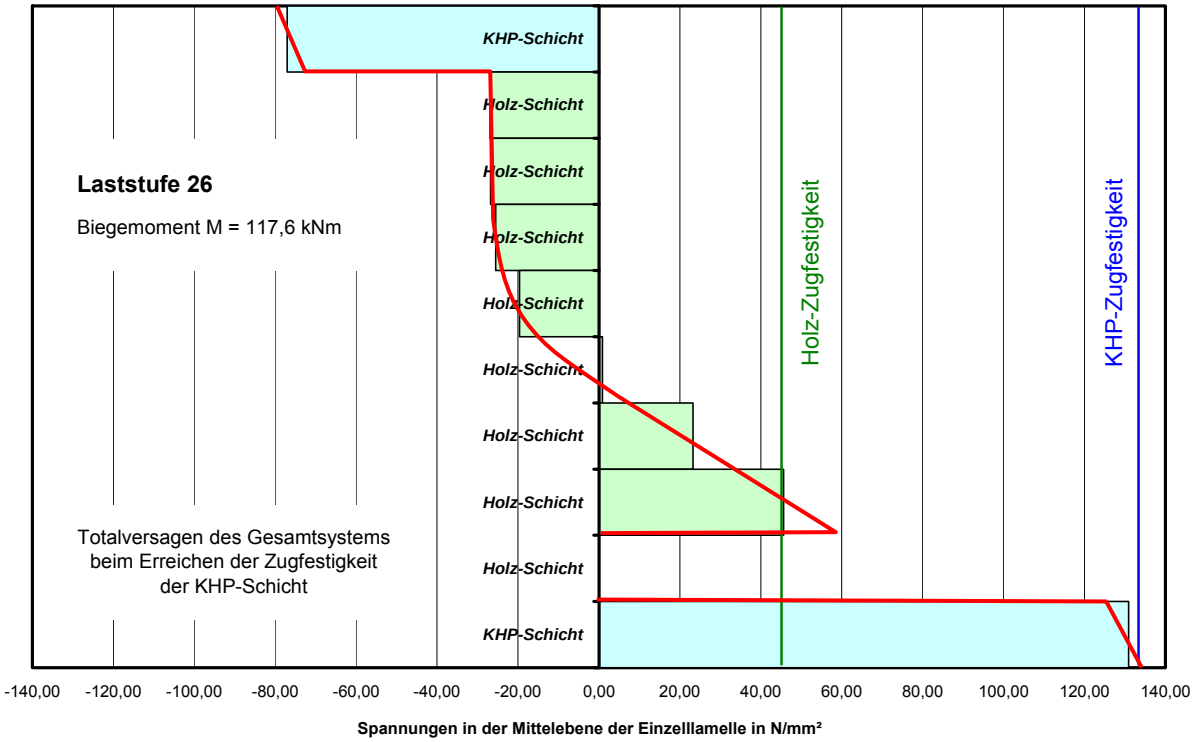


Abb. 3.244: Verteilung der Einzelschichtspannungen bei M = 117,6 kNm

Dieser Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Versuchsergebnissen zeigt, dass auf der Basis des erarbeiteten analytischen Berechnungsmodells derartige Verbundstrukturen berechnet und optimiert werden können.

3.6.2.2 Modellverifikation am Beispiel der Formholzröhren

Des Weiteren sollte die Anwendbarkeit des Berechnungsmodells für die innerhalb dieses Projektes untersuchten textilverstärkten Holzrohre gezeigt werden. Dazu wurden die am ISH durchgeführten experimentellen Parameterstudien (siehe Kap.3.5.2.1) zu den Holzrohren auf Basis des entwickelten Versagens- und Schädigungsmodells in Abhängigkeit von Rohrgeometrie, Verstärkungsgrad oder Faserorientierung simuliert.

Die für die analytische Berechnung der verstärkten bzw. unverstärkten Formholzröhren verwendeten Geometrie- und Materialparameter sind in Tabelle 3.56 zusammengefasst.

Tabelle 3.56: Modellparameter* für Formholzröhrenberechnung entsprechend Versuch am ISH

	Pressholz	GF/EP-Verstärkung
E-Modul in Faserrichtung - E_1	15.600 N/mm²	31.300 N/mm²
E-Modul quer zur Faserrichtung - E_2	770 N/mm²	10.950 N/mm²
Schubmodul - G_{12}	840 N/mm²	3.400 N/mm²
Querdehnzahl - v_{12}	0,35	0,27
Zugfestigkeit in Faserrichtung - $R_{\parallel}^{(+)}$	90,0 N/mm²	500,0 N/mm²
Druckfestigkeit in Faserrichtung - $R_{\parallel}^{(-)}$	-66,7 N/mm²	-500,0 N/mm²
Querzugfestigkeit - $R_{\perp}^{(+)}$	1,4 N/mm²	110,0 N/mm²
Schichtdicke	18 mm	1,3 mm
Schichtorientierung	0°	±85°
Röhrenlänge	2.500 mm	
Röhrendurchmesser	257 mm	

* Die Simulationsrechnung inkl. der verwendeten Modellparameter finden Sie auf der beiliegenden CD als Anhang 7.013 Simulationsbeispiel 3 und 7.014 Simulationsbeispiel 4.

Die Abb. 3.245 zeigt die Gegenüberstellung des Simulationsergebnisses mit den Versuchsergebnissen für eine unverstärkte Formholzröhre. Es ist zu erkennen, dass das prinzipielle Strukturverhalten mit dem Modell gut abgebildet werden kann. Allerdings weisen die Versuchsergebnisse entgegen der analytischen Tragwerksberechnung ein eher plötzliches Totalversagen der Rohrprofile auf.

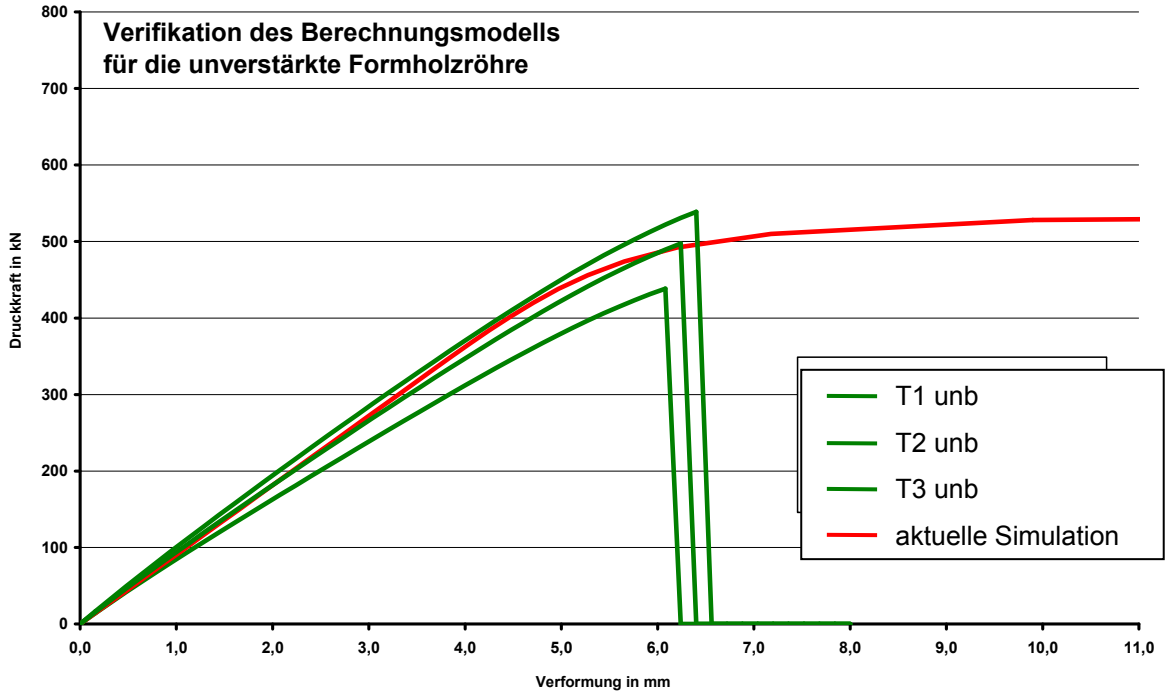


Abb. 3.245: Verifikation des Berechnungsmodells für unverstärkte Formholzröhren

Die Auswertung der Versuche zeigt dabei, dass die schlanken Abmessungen des Rohres und die Belastungsdefinition zu einem lokalen Beulen der Stützquerschnitte und somit zu einem teilweisen plötzlichen Stabilitätsversagen des realen Holzrohres führen. Das entwickelte Berechnungsmodell kann allerdings derartige Stabilitätsphänomene bei der Strukturauslegung nicht berücksichtigen. Somit lassen sich insbesondere die real auftretenden Dehnungsgrößen in der unmittelbaren Nähe der Versagenslast nicht eindeutig analytisch abbilden. Die Gegenüberstellung des allgemeinen Strukturverhaltens (wie etwa Kraft-Verformungs-Kurven oder Bruchlasten) von Simulation und Versuch zeigt die gute Übereinstimmung und die prinzipielle Anwendbarkeit für die Auslegung derartiger Verbundstrukturen.

Die Verifikation der Simulationsergebnisse für die textilverstärkte Formholzröhre ist in Abb. 3.246 dargestellt. Auch hierbei konnte eine aussagefähige Wiedergabe des nichtlinearen Struktur- und Versagensverhaltens mit dem Berechnungsmodell gezeigt werden. Analog zu der analytischen Simulation der unverstärkten Formholzröhren entstehen insbesondere bei der Annäherung an die Versagenslast Abweichungen zu den experimentellen Ergebnissen. Dies resultiert größtenteils aus den Einflüssen der real auftretenden geometrischen Nichtlinearitäten, welche das analytische Modell nicht abbilden kann.

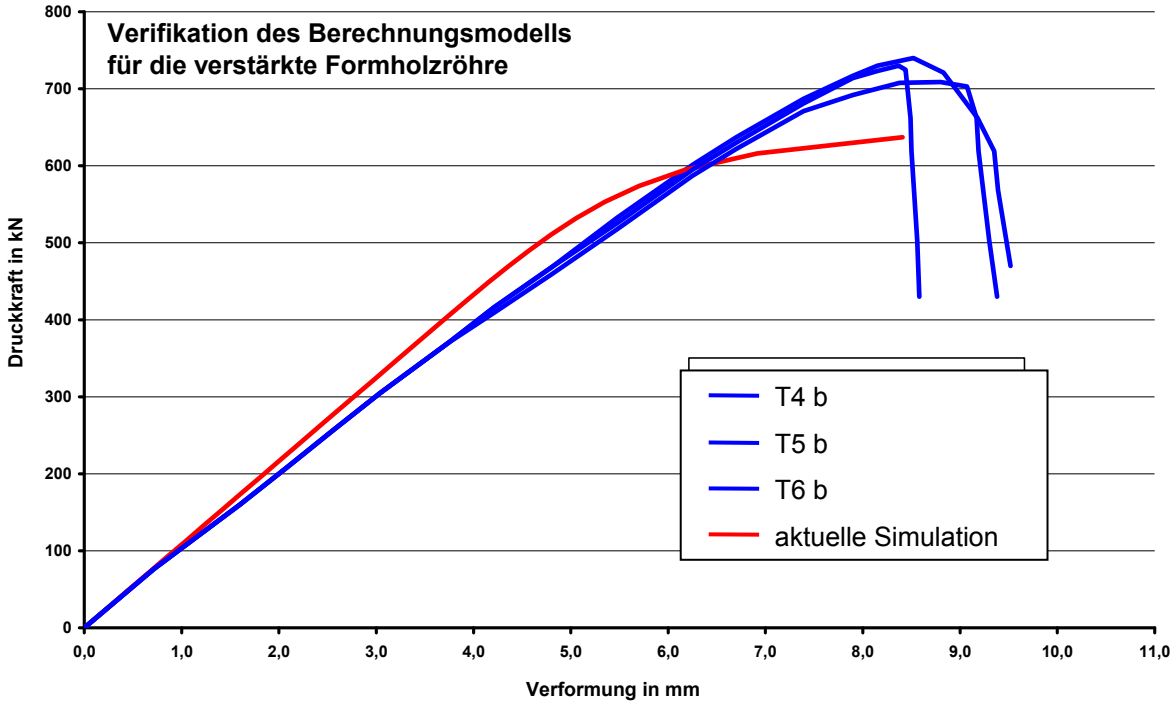


Abb. 3.246: Verifikation des Berechnungsmodells für textilverstärkte Formholzröhren

3.6.3 Auslegung von Holz-Textil-Tragstrukturen mit Verbindungselementen

Autoren: Andreas Heiduschke (ISH), Mike Thieme (ILK)

3.6.3.1 Allgemeines

Autor: Mike Thieme (ILK)

Bei der Auslegung von Bauteilen kommt der Auswahl und Berechnung der Verbindungselemente eine entscheidende Schlüsselrolle zu. Während die mathematischen Grundlagen zur Berechnung konventioneller Verbindungstechniken in isotropen Materialien heute weitestgehend bekannt sind und als gesichert gelten, ist eine robuste Berechnung von Verbindungselementen bei der Konstruktion mit anisotropen Mehrschichtverbunden (wie etwa Holz-Textil-Mehrschichtverbunde) noch nicht eindeutig geklärt. Störzonen in Form von Ausschnitten, elastischen Einschlüssen sowie Verbindungs- und Krafteinleitungselementen in derartigen anisotropen Mehrschichtverbunden prägen daher stark die Auslegung der gesamten Leichtbaustruktur.

Zur Ausschöpfung des hohen Leichtbaupotentials derartiger Verbundwerkstoffe ist jedoch die Bereitstellung von angepassten Berechnungskonzepten für die Problembereiche der Kerbzonen und Bolzenverbindungen unerlässlich. Diese Verfahren müssen zum einen den strukturmechanischen Effekten, welche bei anisotropen Mehrschichtverbunden auftreten, Rechnung tragen und zum anderen müssen sie für den Konstrukteur leicht und schnell anwendbar sein. Komplexe Simulationen auf Basis der Finite-Elemente-Methode (FEM) oder der Boundary-Elemente-Methode (BEM) sind durch einen großen Modellierungsaufwand und lange Rechenzeit oftmals ungeeignet, um schnelle Aussagen während des Konstruktionsprozesses zu erhalten. Deshalb soll im Rahmen dieser Untersuchungen ein zugängliches analytisches Modell basierend auf vereinfachten und abstrahierten mechanischen Ersatzmodellen vorgestellt werden.

3.6.3.2 Analytisches Modell zur Strukturanalyse von anisotropen Verbundstrukturen mit elastischen Einschlüssen bzw. Bolzenbelastung

Autor: Mike Thieme (ILK)

Die Grundlagen für eine entsprechende wirklichkeitsnahe Strukturanalyse faserverstärkter Hybridverbunde mit Einschlüssen bzw. Bolzenbelastung wurden ausgehend von der verallgemeinerten Plattengleichung (siehe Abschnitt 3.6.1.1) abgeleitet. Dabei wird als mathematisches Modell ein Mehrschichtverbund unendlicher Ausdehnung mit zentrischem Ausschnitt definiert. Die Grundlage der Berechnungsmodelle für derartige Mehrschichtverbunde bildet dabei in Analogie zu Abschnitt 3.6.1 die klassische Laminattheorie. Zur Berücksichtigung der Koppeleffekte bei unsymmetrischen Verbunden werden auch hierbei in Erweiterung der Kirchhoffschen Theorie bei den Kräfte- und Momentengleichgewichten am differentiellen Plattenelement neben den Plattenbeanspruchungen auch die Schnittnormalkräfte des Scheibenproblems mit berücksichtigt. Daraus lässt sich die verallgemeinerte Plattengleichung für Mehrschichtverbunde herleiten, welche die Kopplung des Scheiben-Platten-Problems beinhaltet. Für den Sonderfall eines symmetrischen Verbundes würden die Koppelterme B entfallen.

$$\begin{bmatrix} N \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon \\ \kappa \end{bmatrix} \tag{3.67}$$

Die homogene Lösung bei rein mechanischer Beanspruchung der verallgemeinerten Plattengleichung für Mehrschichtverbunde wurde hierbei durch den Ansatz komplexwertiger Verschiebungsfunktionen entsprechend GRÜBER [233] hergeleitet. Durch die Einführung komplex differenzierbarer Verschiebungsansatzfunktionen ergibt sich eine gleichwertige partielle Differentialgleichung achter Ordnung mit konstanten Koeffizienten (siehe [233]). Dazu wurden zuerst die Mittelflächenverschiebungen $u_0(x,y)$, $v_0(x,y)$ und $w_0(x,y)$ als Funktion von komplexen Veränderlichen $\varsigma = \varsigma(x,y)$ angesetzt. Hierzu bieten sich zwei Ansätze an:

$$\varsigma_1 = x + \mu y \quad \text{bzw.} \quad \varsigma_2 = \varsigma + \lambda\varsigma_3 = (1+\lambda)x + i(1-\lambda)y \tag{3.68}$$

Die bei den Ansätzen für ς verwendeten komplexen Parameter μ bzw. λ werden im Weiteren derart bestimmt, dass beliebige komplex differenzierbare Ansatzfunktionen in $\varsigma(x,y)$ die homogene Differentialgleichung im gesamten Bereich der Platte identisch erfüllen. Ein Koeffizientenvergleich für Gleichung (3.68) zeigt, dass sich die Ansätze für ς_1 und ς_2 nur durch einen konstanten Faktor unterscheiden.

$$\varsigma_1 = (1+\lambda)\varsigma_2 \tag{3.69}$$

$$\text{mit} \quad \mu = i\frac{1-\lambda}{1+\lambda} \quad \text{bzw.} \quad \lambda = \frac{1-i\mu}{1+i\mu} \tag{3.70}$$

Durch die mathematische Formulierung der entsprechenden Rand- und Übergangsbedingungen ergeben sich die Ansatzfunktionen u_0, v_0 sowie w_0 und die analytische Lösung des gekoppelten Scheiben-Platten-Problems kann in allgemeiner Form mathematisch formuliert werden. Die Randbedingungen können in der üblichen Weise durch die Parameterform nach der Bogenlänge s_k dargestellt werden.

$$\Gamma_k = \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_k(s_k) \\ y_k(s_k) \end{bmatrix} \tag{3.71}$$

Die Bogenlänge s_k wird dabei von einem beliebigen aber festen Startpunkt aus gemessen und die Umlaufrichtung so gewählt, dass das Gebiet der Platte links der Randkurve liegt. Für die äußeren Normalen n_k und die zugehörigen äußeren Tangenten t_k ergibt sich damit

$$\cos(n_k, x) = \cos(t_k, y) = \frac{dy_k}{ds_k}, \qquad \cos(n_k, y) = -\cos(n_k, x) = -\frac{dx_k}{ds_k}. \tag{3.72}$$

Damit gilt für den Randnormalen- bzw. Randtangentialenvektor

$$\vec{n}_k = \begin{pmatrix} \cos(n_k, x) \\ \cos(n_k, y) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{dy_k}{ds_k} \\ -\frac{dx_k}{ds_k} \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad \vec{t}_k = \begin{pmatrix} \cos(t_k, x) \\ \cos(t_k, y) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{dx_k}{ds_k} \\ \frac{dy_k}{ds_k} \end{pmatrix} \tag{3.73}$$

Die Verschiebungsrandbedingungen $\tilde{u}_k(s_k)$, $\tilde{v}_k(s_k)$ und $\tilde{w}_k(s_k)$ an den freien Rändern können direkt in die folgende Formulierung der Verschiebungsfunktionen eingearbeitet werden. Die benötigten Koeffizienten und Integrationskonstanten sind in [233] angegeben.

$$u_0 = 2\,\mathrm{Re}\left(\sum_{k=1}^{4} p_k \Psi_k(\varsigma_{1k_k}) + c_{k1}\,\varsigma_{1k} + c_{k2} \right) \tag{3.74}$$

$$v_0 = 2\,\mathrm{Re}\left(\sum_{k=1}^{4} q_k \Psi_k(\varsigma_{1k}) + c_{k3}\,\varsigma_{1k} + c_{k4} \right) \tag{3.75}$$

$$w_0 = 2\,\mathrm{Re}\left(\sum_{k=1}^{4} r_k \Psi_k(\varsigma_{1k}) \right) \tag{3.76}$$

Die definierten Rand- und Übergangsbedingungen gelten dabei in allgemeiner Form für Ausschnitte und Einschlüsse beliebiger geometrischer Gestalt. Um ebenfalls ein einheitliches analytisches Vorgehen unabhängig von der jeweiligen Kerbkontur zur Bestimmung der Verschiebungsfunktionen zu ermöglichen, wurde der Berechnungsalgorithmus durch die Methode der konformen Abbildung für beliebige Ausschnitts- und Einschlussformen erweitert. Dazu wird das Gebiet S der Platte in der komplexen ς-Ebene konform (lokal winkel- und maßstabstreu) auf das Äußere S' der ζ-Ebene abgebildet. Die Bestimmung der gesuchten Verschiebungsfunktionen unter Berücksichtigung der Rand- und Übergangsbedingungen erfolgt dann in der korrespondierenden komplexen ζ-Ebene. Die konkrete Angabe einer derartigen konformen Abbildung ist allerdings nur für wenige ausgewählte Randkonturen möglich. Hierzu zählen unter anderem Abbildungen für die Ellipse mit den Hauptachsen a und b gemäß

$$\varsigma = \omega(\zeta) = \frac{a+b}{2} \cdot \zeta + \frac{a-b}{2} \cdot \frac{1}{\zeta} \tag{3.77}$$

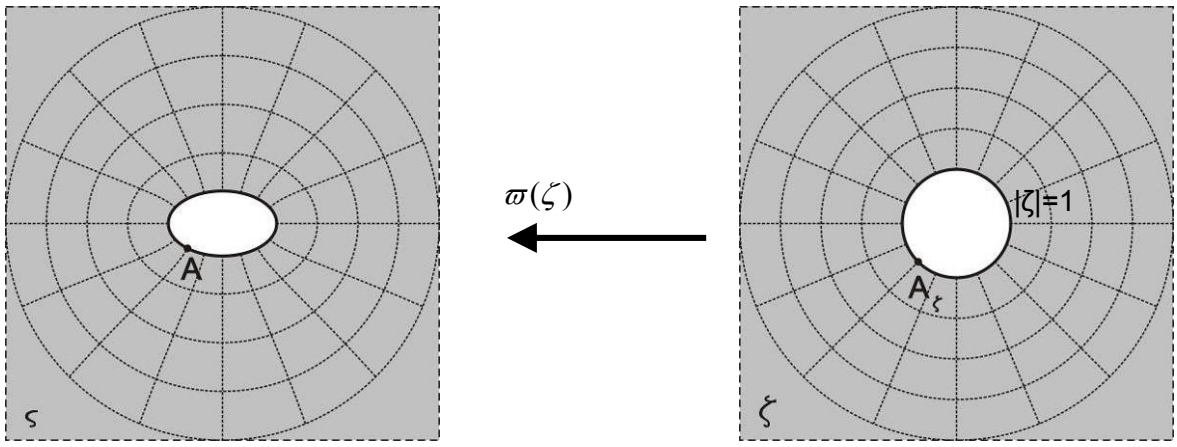


Abb. 3.247: Konforme Abbildung der ζ-Ebene in die ς-Ebene

Die Abbildung polygonal berandeter Konturen kann mittels der Christoffel-Schwarz'schen Formel (3.78) realisiert werden. Da derartige Lochformen für die hier betrachteten Verbindungselemente nicht angesetzt werden, wird hier auf die weitere Vertiefung dieses Ansatzes nicht weiter eingegangen. Weiterführende ausführliche Betrachtungen dazu sind in [234] angegeben.

$$\varsigma = \omega(\zeta) = R \cdot \int_{\zeta_0}^{\zeta} \prod_{\nu=1}^{n} \left(1 - \frac{f_\nu}{t}\right)^{\gamma_\nu - a} dt + C \tag{3.78}$$

Für einen elliptischen Ausschnitt mit den Halbachsen a und b bzw. der Exzentrizität c=a/b wird dies entsprechend der Veranschaulichung in Abb. 3.247 durch die aus Gleichung (3.77) abgeleitete Abbildungsfunktion realisiert.

$$\varsigma = \omega(\zeta) = \frac{a+b}{2} \cdot \zeta + \frac{a-b}{2} \cdot \frac{1}{\zeta} = a\left(\frac{1+c}{2} \cdot \zeta + \frac{1-c}{2} \cdot \frac{1}{\zeta}\right) \tag{3.79}$$

Die entsprechende Umkehrfunktion ergibt sich dabei wie folgt.

$$\zeta = \omega^{-1}(\varsigma) = \frac{\varsigma + \sqrt{\varsigma^2 - \left(a^2 - b^2\right)}}{a-b} \tag{3.80}$$

Um die anwendungsrelevanten Belastungszustände ebener Strukturen durch äußere Kräfte und Momente in seiner Komplexität erfassen zu können, wird das Gesamtproblem mittels des Superpositionsprinzips in mehrere diskrete Teilprobleme zerlegt (Abb. 3.248). Damit zerfällt das ursprüngliche Problem in das Teilproblem I der gekerbten Scheibe mit Belastungen am Außen- und am Kerbrand sowie das Teilproblem II des endlichen Einschlusses mit äußerer Belastung. Ersteres Problem wird analog zum Vorgehen von LEPPER und GRÜBER [235] in weitere Teilprobleme (siehe Abb. 3.248 unten) zerlegt:

Ia: Endliche ungekerbte Platte mit Belastung am Außenrand,

Ib: Unendliche gekerbte Platte mit derart angepasster Belastung am Kerbrand, dass sich bei Überlagerung von Ia und Ib insgesamt ein freier unbelasteter Kerbrand ergibt,

Ic: Unendlich gekerbte Platte mit Belastung am Kerbrand, die sich durch das Freischneiden des Einschlusses ergibt.

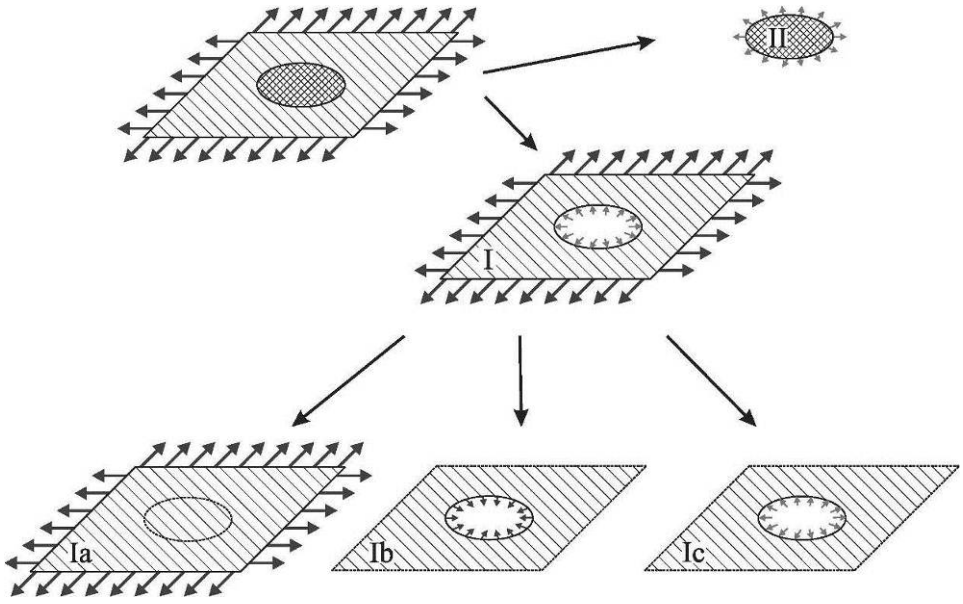


Abb. 3.248: Zerlegung des Plattenproblems mittels Superpositionsprinzip

Darüber hinaus wurde für bolzenbelastete Löcher (pin-loaded hole) in Mehrschichtverbunden eine analytische Berechnungsmethode erarbeitet, die eine Vorausberechnung des Spannungs- und Verzerrungsfeldes sowohl am Kerbrand als auch in einem Gebiet um die belastete Bohrung ermöglichen. Für die Modellbildung wurde die Bolzenlast, wie in der Literatur vielfach üblich, durch eine sinusförmige Randnormalrandkraftverteilung auf einem zusammenhängenden Teil des Kerbrandes (Abb. 3.249) approximiert. Das Kontaktproblem wurde dabei nicht betrachtet. Der Anfangspunkt und der Endpunkt der partiellen Randlast werden durch die zugehörigen Randkurvenparameter ϑ_0^B bzw. ϑ_0^B definiert. Diese Parameter sind, bezogen auf den Kerbdurchmesser, sowohl von den geometrischen Verhältnissen des Bolzens als auch von der Materialpaarung abhängig und müssen für konkrete Problemstellungen geeignet gewählt werden.

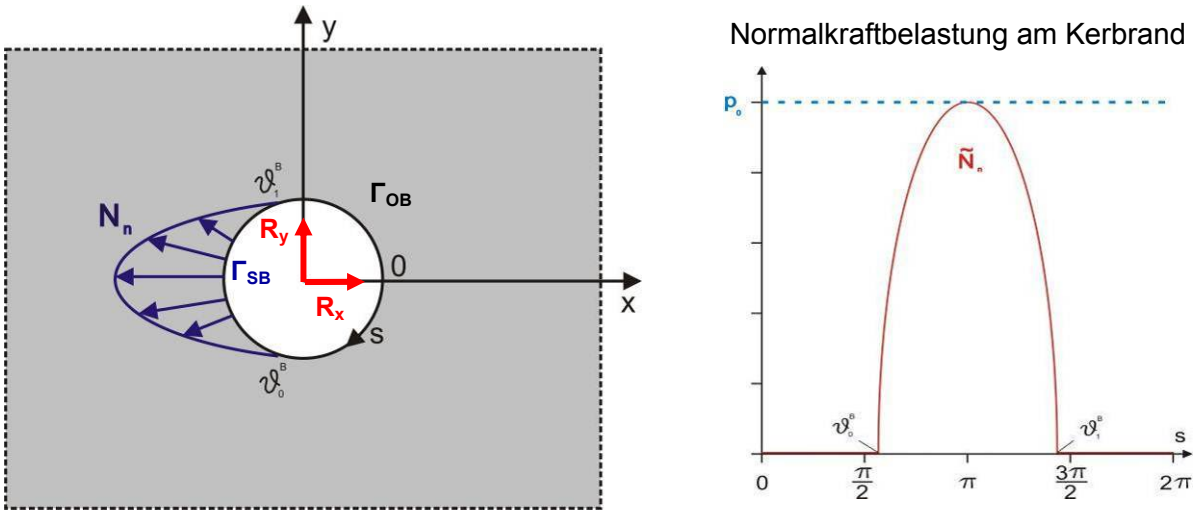


Abb. 3.249: Ausschnitt mit partieller, sinusförmiger Normalkraftbelastung am Kerbrand

Als mathematisches Ersatzmodell für die Platte mit Bolzenbelastung dient die unendliche Platte mit kreis- oder ellipsenförmigem Ausschnitt. Der Rand Γ des Ausschnittes zerfällt dabei in zwei Teilbereiche Γ_{OB} und Γ_{SB}. Der Teilrand Γ_{OB} ist lastfrei, während auf dem Teilrand Γ_{SB} die sinusförmig verteilte Randkraft normal zur Randkurve wirkt. Die einzelnen Teilränder sind in sich zusammenhängend und es gilt

$$\Gamma = \Gamma_{OB} \cup \Gamma_{SB} \quad \text{und} \quad \Gamma_{OB} \cap \Gamma_{SB} = 0 \tag{3.81}$$

Bei der so vorgegebenen Belastung am Kerbrand ist offensichtlich, dass die statischen Gleichgewichtsbedingungen an der Platte nicht erfüllt sind, da im betrachteten Ersatzmodell keine Lagerungsbedingungen am Außenrand vorgegeben werden können. Deshalb muss hier die virtuelle Resultierende $R=(R_x,R_y)^T$ im Inneren des Ausschnitts als Hilfsgröße entsprechend Abb. 3.249 eingeführt werden.

$$R = \begin{bmatrix} R_x \\ R_y \end{bmatrix} = -\oint \begin{bmatrix} \tilde{N}_x \\ \tilde{N}_y \end{bmatrix} \tag{3.82}$$

Dabei muss diese den folgenden geometrischen Beziehungen für die äußere Normale n und die Tangentiale t am Kerbrand erfüllen.

$$\cos(n,x) = \cos(t,y) = \frac{dy}{ds}, \qquad \cos(n,y) = -\cos(t,y) = -\frac{dx}{ds} \tag{3.83}$$

Mit Hilfe der so definierten virtuellen Resultierenden werden die statischen Gleichgewichtsbedingungen für die Gesamtplatte identisch erfüllt, so dass die Berechnung der Schnittgrößen und Verschiebungen am Ausschnittsrand eindeutig möglich ist.

Da die Auswertung der entwickelten Lösungsausdrücke einschließlich der Bestimmung der Reihenglieder für die konforme Abbildung nicht mehr manuell zu bewältigen ist, wurde die erarbeitete (semi)-analytische Lösungsmethode zu Verifikationsrechnungen in ein am ILK entwickeltes Berechnungstool implementiert. Dies erlaubt eine schnelle Variation von Einflussparametern wie Textilanordnung, Belastungsart bzw. -richtung sowie Kerbgeometrie.

3.6.3.3 Auslegung von Gelenkbolzenverbindungen

Autor: Andreas Heiduschke (ISH), David Mikolášek

Im Folgenden wird die Entwicklung eines numerischen Models zur Simulation von Gelenkbolzenverbindungen beschrieben. Zur Verifizierung der 3D-Modelle wurden die Lochleibungsversuche an Stabelementen mit verstärkten Anschlussbereichen herangezogen. Dabei beschränkt sich die Modellierung auf die verstärkte Rohr-Bolzenverbindung (vgl. Abschn. 3.3.1 - IC+UD_tube). Die für die Simulation der Verbindungen benötigten Materialkennwerte wurden an Kleinproben bestimmt. Zur 3-dimensionalen numerischen Simulation des Anschlusses wurde die Software ANSYS benutzt.

Nach der Verifizierung der Verbindungsmodelle wurde ein Fachwerkträger mit 24 m Spannweite generiert, dessen Anschlussbereiche analog den zuvor entwickelten und geprüften Verbindungen modelliert wurden. Die Geometrie und die mechanischen Eigenschaften der Verbindungen entsprechen jenen der geprüften Anschlussbereiche. Anhand des FE-Modells wurden die Tragwerksverformungen des Gelenkbolzenfachwerkes abgeschätzt als auch die Spannungen in den jeweiligen Querschnittsteilen ermittelt.

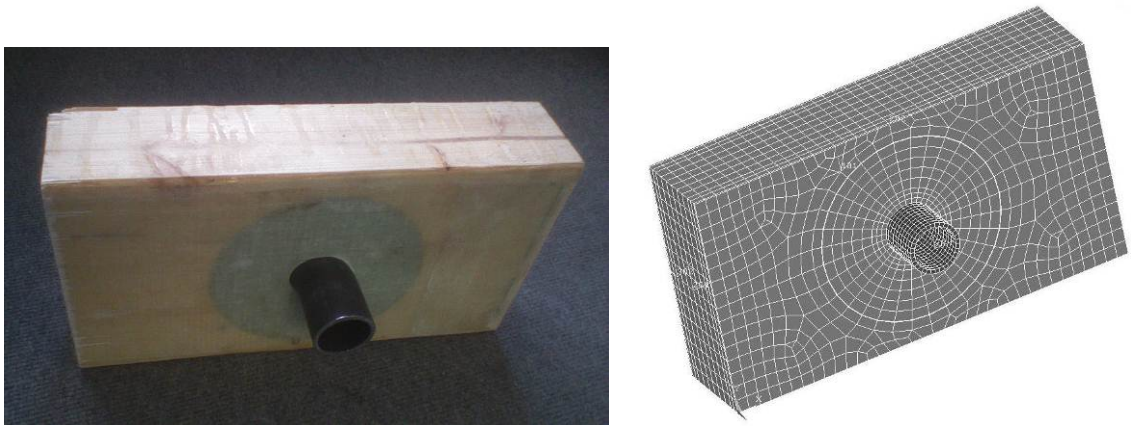


Abb. 3.250: geprüfter Anschluss (IC+UD_tube) und vernetztes Anschlussdetail

Abb. 3.250 zeigt die geprüfte Verbindung als auch das vernetzte Anschlussdetail. Die Geometrie des FE-Modells ist identisch dem Gelenkbolzenanschluss aus Abschn. 3.3.1. Der Holzquerschnitt wurde mittels Volumenelementen mit orthotropen Materialeigenschaften vernetzt (entsprechend DIN1052:2008 GL28h). Der eingelassenen GFK-Scheibe als auch der UD-Verankerungsgelege) wurden wie dem Stahlrohr isotrope Materialeigenschaften zugewiesen (E_{GFK} = 30000 N/mm^2; E_S = 210000 N/mm^2). Um die im Versuch beobachteten plastischen Verformungen des Rohres abbilden zu können, wurde dem ein Stahl multi-lineares Spannungs-Dehnungs-Verhalten zugrunde gelegt ($f_{y,k}$ = 360 N/mm^2, $f_{u,k}$ = 630 N/mm^2). Der Kontakt inkl. Schlupf zwischen Stahlrohr und Lochwandung (Holz und GFK) wurde mittels Kontaktelementen simuliert. Die Klebung der GFK-Strukturen auf dem Holz wurde als starrer Verbund, d. h. identische Knoten, simuliert.

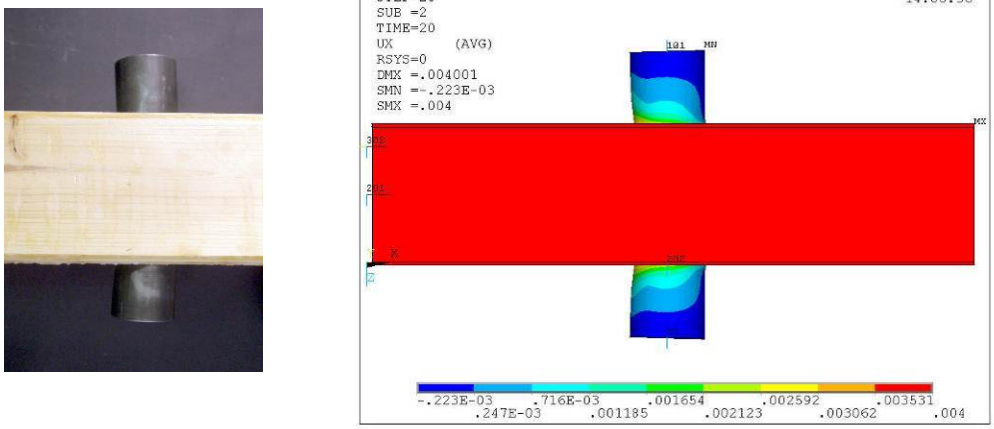


Abb. 3.251: Verformtes Stahlrohr der Probe (IC+DU_tube) und verformtes FE-Modell bei 4 mm Verschiebung

Abb. 3.252 zeigt den Vergleich von Versuch und Simulation bei Definition verschiedener Streckgrenzen und Zugfestigkeiten. Die beste Übereinstimmung wird bei einer Zugfestigkeit von 630 N/mm^2 erreicht. Dies entspricht den mechanischen Eigenschaften der Stahlgüte S355.

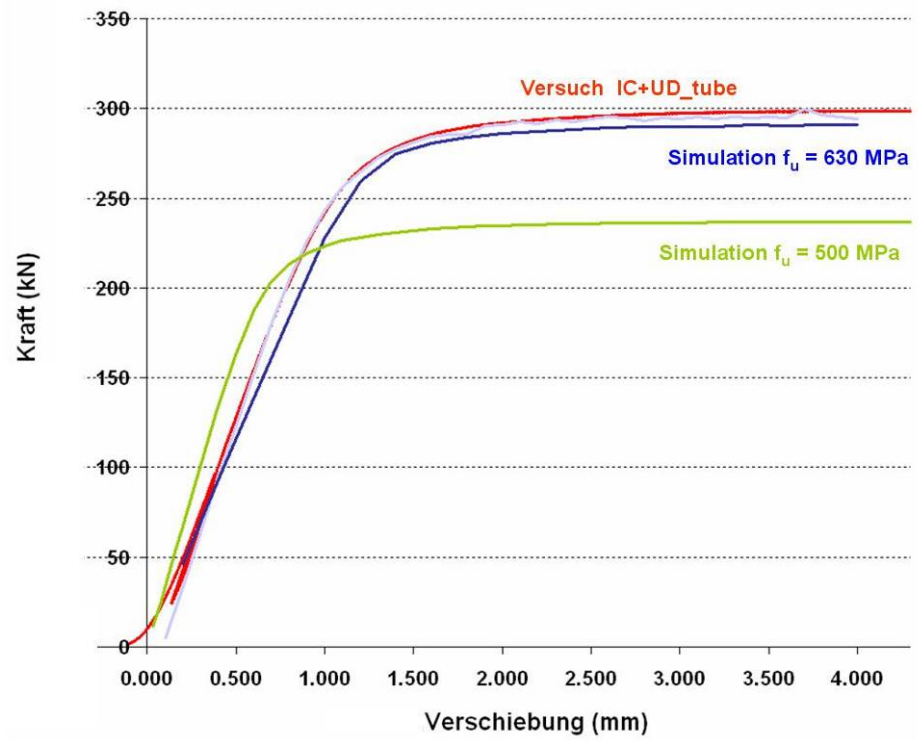


Abb. 3.252: Kraft-Verschiebungs-Kurven: Versuch vs. Simulation

Für Bolzenverschiebung von 4 mm, d. h. einer Last von ca. 300 kN, ergeben sich in den jeweiligen Querschnittteilen folgende Spannungsverteilungen:

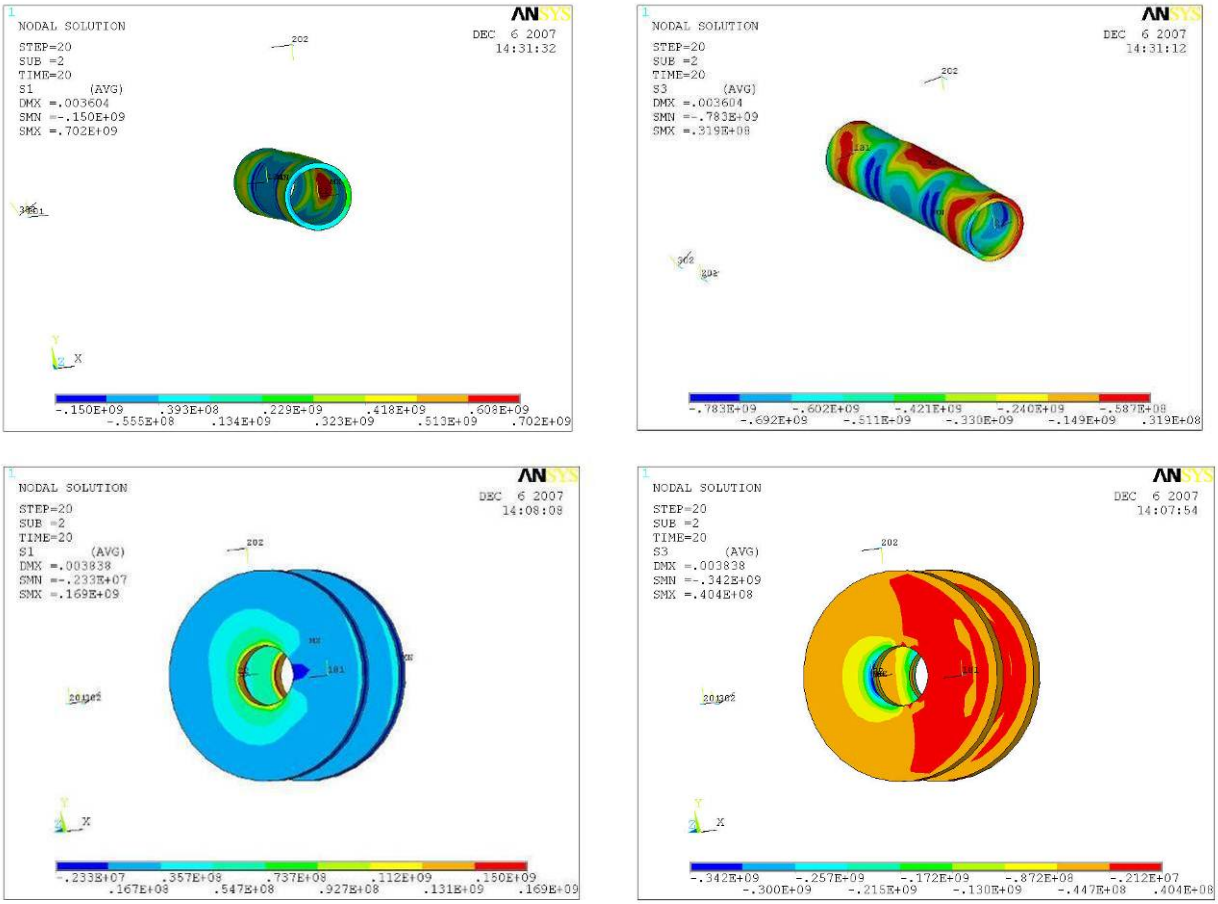


Abb. 3.253: Hauptspannungen S1 und S3 für Stahlrohr und GFK-Scheibe

Wie bereits in Abb. 3.251 gezeigt, verdeutlicht auch Abb. 3.253, dass die Streckgrenze des Stahles von 360 N/mm^2 (S355) in großen Bereichen des Rohres bereits deutlich überschritten ist. Dies gilt sowohl für Zug- als auch Druckspannungen (S1 und S3). Wie bereits in Abschn. 3.3.1 erwähnt, treten im Bereich der Lochwandung der GFK-Scheiben hohe Spannungskonzentrationen auf. In radialer Richtung wurden Lochleibungsdrücke (S3) von max. 342 N/mm^2 und in tangentialer Richtung Querzugspannungen (S1) von 169 ermittelt, wobei die Spitzen der Lochleibungsspannungen durch lokales Plastifizieren des GFK teilweise abgebaut werden. Die im Versuch ermittelte Lochleibungsfestigkeit der GFK-Scheiben (IC) liegt bei 215 N/mm^2.

Gelenkbolzenverbindung am Beispiel eines Fachwerkträgers

Um die Wirkungsweise der GFK-verstärkten Gelenkbolzenverbindung zu zeigen, wurde ein 3-dimensionales FE-Modell für den in Abb. 3.254 gezeigten Fachwerkträger erstellt.

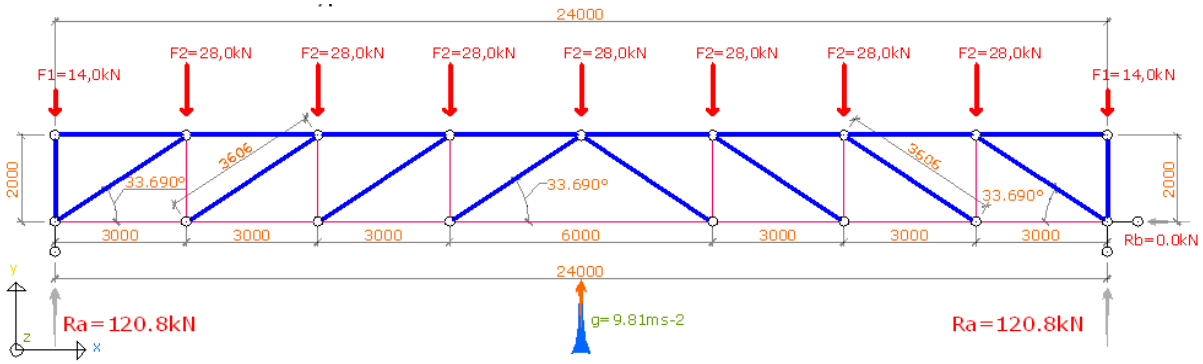


Abb. 3.254: Statisches System

Das untersuchte Fachwerk mit geneigten Druckstreben hat eine Stützweite von 24 m und eine statische Höhe von 2 m. Unter Annahme eines Binderabstandes von 5 m und einer Verkehrslast von 0,75 kN/m^2 infolge Schnee sowie Eigengewicht der Dachhaut von 0,58 kN/m^2 ergibt sich für den Grenzzustand der Tragfähigkeit eine Bemessungskraft F_d von 28 kN (20 kN * 1,4) in den Knotenpunkten.

Die Querschnittsabmessungen der Gurte und Druckdiagonalen sind Abb. 3.255 zu entnehmen. Als Zugstreben wurden zwei M24-Gewindestäbe mit Spannschloss gewählt. Diese werden über angeschweißte Zuglaschen mit den Gelenkbolzen verbunden.

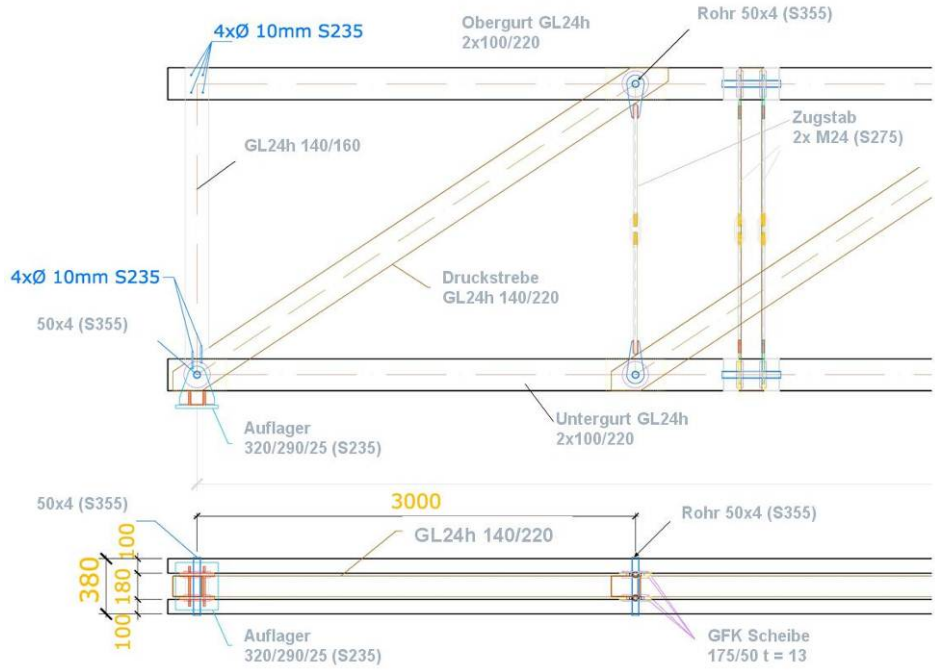


Abb. 3.255: Querschnitte des Fachwerkes am Auflager

Diese Fachwerkkonstruktion inkl. Auflagersituation wurde analog der Verbindung mittels Volumenelementen vernetzt (vgl. Abb. 3.256).

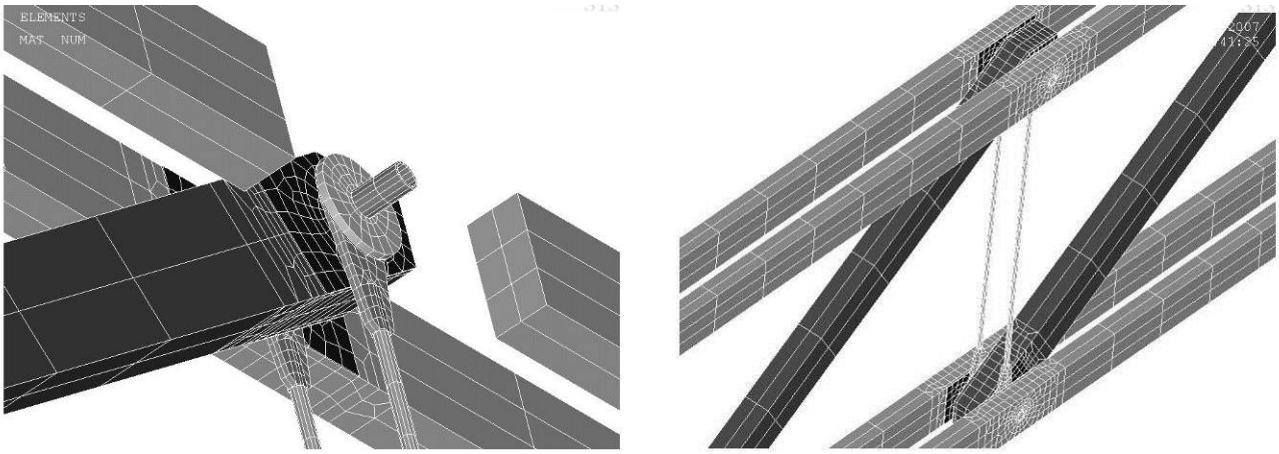


Abb. 3.256: vernetzter Fachwerkknoten und Trägersegment mit Gurt, Diagonale und Zugstange

Im Folgenden werden nur ausgewählte Ergebnisse der FE-Berechnungen gezeigt und diskutiert.

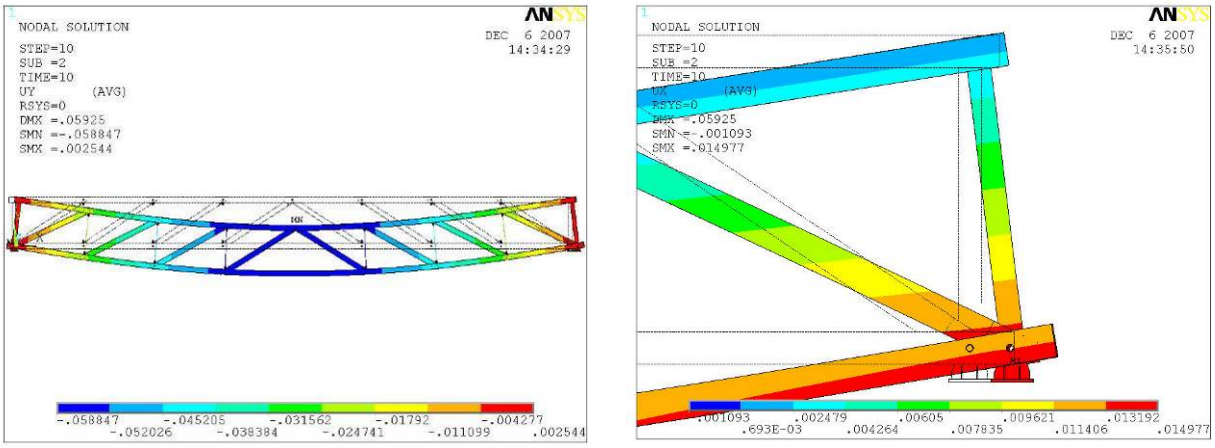


Abb. 3.257: Durchbiegung und Auflagerverschiebung des Fachwerkträgers

Unter Berücksichtigung der Nachgiebigkeit der Verbindungen inkl. des Schlupfes beträgt die maximale Durchbiegung u_y des Fachwerkträgers in Feldmitte 58,8 mm und die zugehörige Auflagerverschiebung u_x = 15 mm. Die Berechnungsergebnisse wurden anhand von Vergleichsrechnungen mittels herkömmlicher Stabwerksprogramme überprüft.

Abb. 3.258 zeigt die Hauptspannungen in den Stahlbauteilen für den Zugstabanschluss und das Auflager. In beiden Fällen wird für den Gelenkbolzen die Streckgrenze des Stahles von 360 N/mm^2 überschritten, so dass neben den elastischen Verformungen auch plastische Deformationen des Rohres zu verzeichnen sind. Im Mittelbereich übersteigen die Zugspannungen (S1) einen Wert von 500 N/mm^2. Die Zugfestigkeit des Stahles von 630 N/mm^2 wird jedoch nicht erreicht.

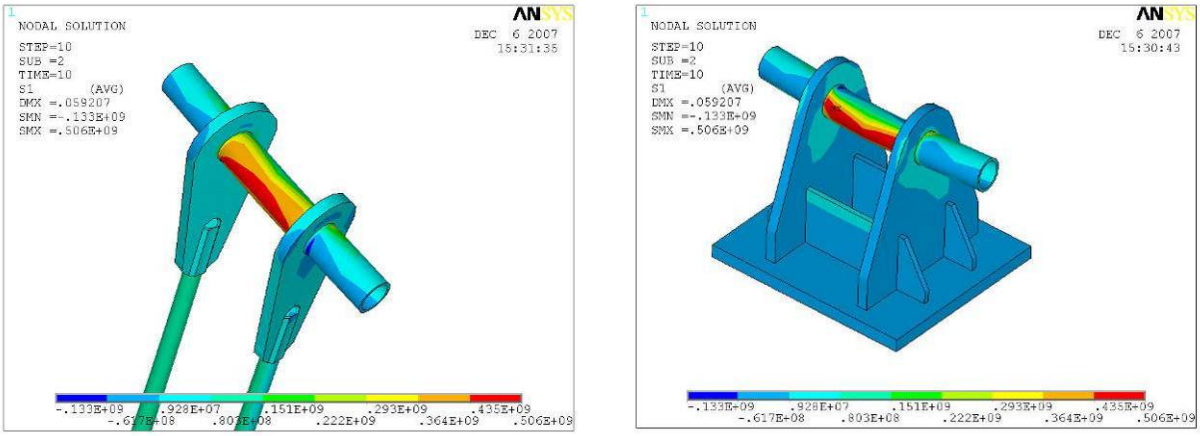


Abb. 3.258: Hauptspannungen S1 der Bolzenverbindung an Zugstange und Auflager

Folge der Verformung (Biegung) des Gelenkbolzens sind unsymmetrische Lochleibungsspannungen am Bohrlochrand insbes. der GFK-Scheiben (vgl. Abb. 3.259). Der berechnete Lochleibungsdruck (S3) liegt bei 132 N/mm^2. D. h. die Lochleibungsfestigkeit der GFK-Scheiben von 215 N/mm^2 wird nicht erreicht. Zu berücksichtigen ist jedoch, dass es sich bei der angegebenen Festigkeit um einen Versuchswert handelt, d. h. der Bemessungswert deutlich niedriger anzusetzen ist. Als Orientierung kann die von Fiberline Composites [260] angegebene Lochleibungsfestigkeit eines ähnlichen Laminates (PP) dienen. Die charakteristische Lochleibungsfestigkeit wird mit 150 N/mm^2 angegeben. Im Versuch wurde eine Festigkeit von 197 N/mm^2 ermittelt. Unter Berücksichtigung eines Materialsicherheitsbeiwerts von 1,3 ergibt sich ein Bemessungswert der Lochleibungsfestigkeit von 115 N/mm^2. Dieser Wert überschreitet die berechnete Lochleibungsspannung, wobei zu berücksichtigen ist, dass es sich um eine Spannungsspitze eines FE-Modells handelt.

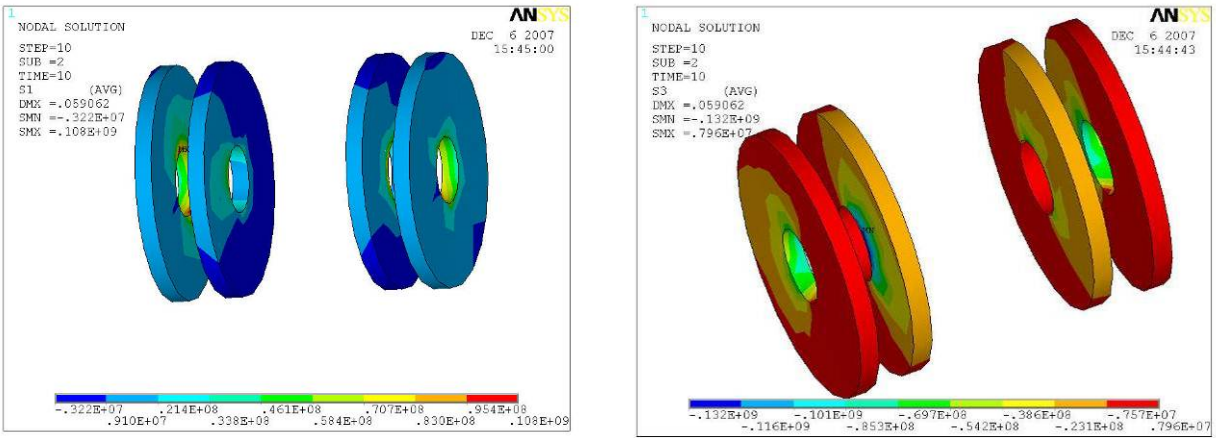


Abb. 3.259: Hauptspannungen S1 und S3 für GFK Scheibe

Dieser sehr grobe Ansatz einer Vorbemessung zeigt, dass eine Realisierung einer Fachwerkkonstruktion mit Gelenkbolzen durchaus realistisch ist. Genaue Nachweise sind jedoch erforderlich.

3.6.3.4 Auslegung von bewehrten Formholzrohren

Autor: Andreas Heiduschke (ISH), Jose Cabrero

Basierend auf analytischen und numerischen Berechnungsroutinen wurde ein Vergleich zu geprüften Profilquerschnitten mit und ohne GFK-Wicklung erstellt. Die numerischen Untersuchungen dienen der Beurteilung von druck- und biegebeanspruchten Bauteilen unter Berücksichtigung verschiedener Querschnittsgeometrien und Beschichtungen. Insbesondere wurde der Einfluss der Armierung (Faserart, Faserorientierung, Schichtdicke) auf das Trag- und Verformungsverhalten der Rohrprofile untersucht.

3.6.3.4.1 FE-Modell

Für die numerische Analyse wurde das Softwarepaket ANSYS 11.0 [278] verwendet. Die geometrischen Eingangsdaten entsprechen jenen der geprüften Formholzrohre. Um Imperfektionen zu berücksichtigen, wurde eine Anfangsverformung angenommen, welche der ersten Beulform des unverstärkten Rohres entspricht. Die Beulformen in Abb. 3.260 wurden mit Hilfe der gleichen Software bestimmt.

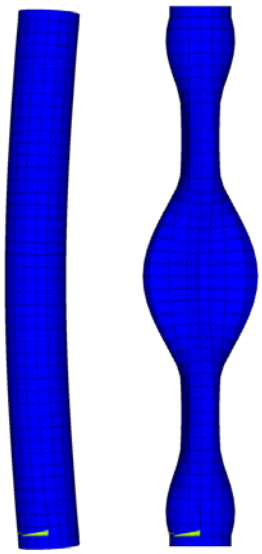


Abb. 3.260: 1. Knick- und Beulform

Die Druckkraft wurde als gleichförmig wirkende Linienlast am oberen Rand des Rohres modelliert. Bis auf die Längsrichtung (Kraftrichtung) sind die Elemente am oberen Lasteinleitungsbereich des Rohres unverschieblich gelagert. Im Fußbereich des Formholzrohres sind alle Verschiebungsfreiheitsgrade gehalten. Diese Wahl der Randbedingungen vermeidet sowohl örtliche Spannungsspitzen als auch Verformungen im Lasteinleitungsbereich und simuliert auf geeignete Weise die experimentellen Gegebenheiten.

Die Rohre wurden mit dem Volumenelement SOLID46 [278] modelliert. Dieses Element ist eine geschichtete Variante des 8-Knoten-Volumenelementes, welches für die Modellierung dicker Schalen oder Volumen entwickelt wurde. Für dieses Element können die Schichtdicke, die Orientierung/Winkel des Schichtmaterials und orthotrope Materialeigenschaften definiert werden. Für beide Materialien wurden orthotrope Materialeigenschaften und linear-elastisches Verhalten angenommen. Die der Simulation zu Grunde liegenden Materialeigenschaften sind Tabelle 3.37 zu entnehmen.

Die Profilwandung wurde in zwölf Schichten unterteilt, wobei den zwei äußeren die Eigenschaften des FVK zugewiesen wurde. Die Wandung des Formholzes wurde folglich mit 10 Schichten simuliert.

Zur Bruchlastabschätzung der Rohre wurde sowohl für das Holz als auch die Faser-Verstärkung das Tsai-Wu-Versagenskriterium verwendet. Demnach tritt das Versagen des Bauteils ein, wenn das quadratische Interaktionskriterium einer der Schichten den Grenzwert von 1 überschreitet. In der Simulation wurde außer der standardmäßig in dem Softwarepaket [278] integrierten Methoden kein spezielles Verfahren zur Versagensprüfung verwendet. Das Versagenskriterium wird während der Analyse nicht ausgewertet. Folglich werden die mechanischen Eigenschaften (Steifigkeiten) des Materials beim Auftreten eines Versagens auch nicht schrittweise angepasst.

Zur Validierung des FE-Models wurden die Versuchsergebnisse von 13 unverstärkten und 16 verstärkten Formholzrohren verwendet. Alle Rohre hatten den gleichen Querschnitt jedoch unterschiedliche Längen (80mm bis 2500mm) und somit unterschiedliche Schlankheitsgrade λ. Um den Einfluss der Faserwicklung zu erfassen, wurden Rohre mit verschiedenen Glasfaserarmierungen in die Untersuchungen einbezogen. Untersucht wurden gewickelte Rohre mit Faserwinkeln von ±45° bzw. ±85° als auch Rohre mit handlaminierten Gewebe (Faserorientierung 0°/90°).

3.6.3.4.2 Ergebnisse der Simulation

Abb. 3.261 zeigt die Ergebnisse der numerischen Simulation im Vergleich zu den Versuchsergebnissen an GFK-verstärkten und unverstärkten Rohren.

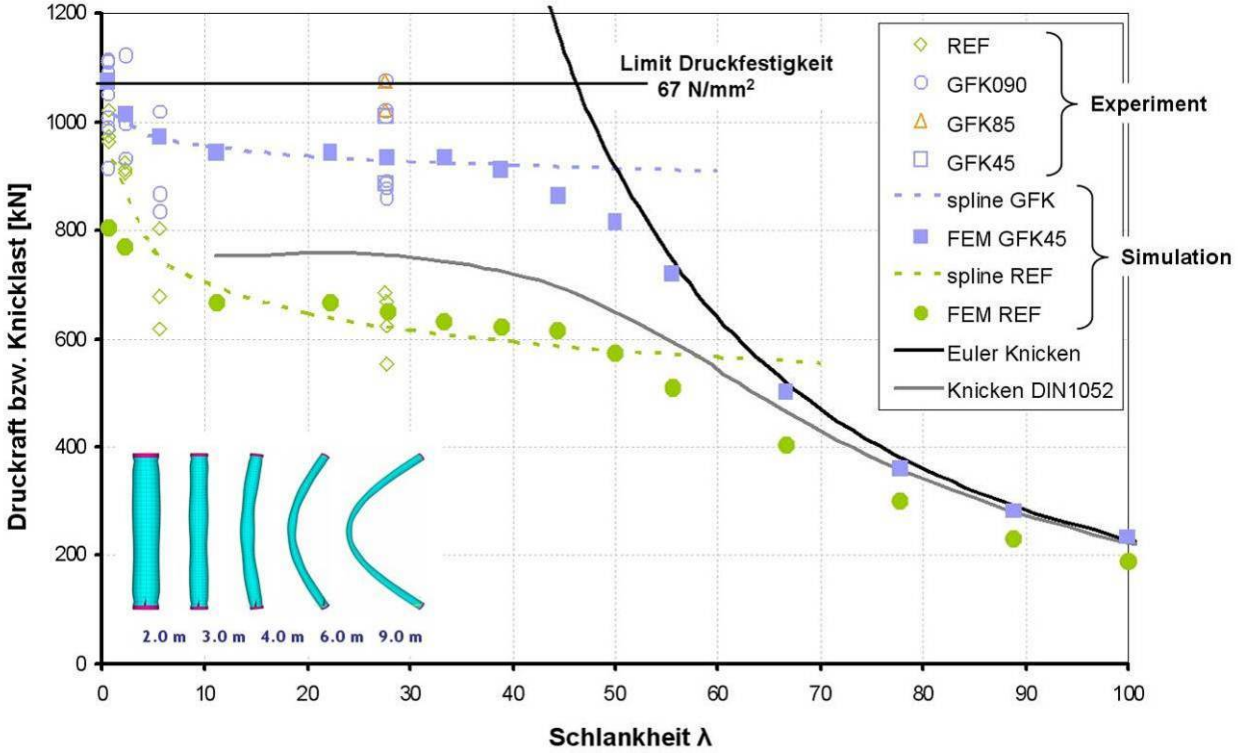


Abb. 3.261: Kraft-Schlankheits Beziehung für unverstärkte (REF) und GFK-verstärkte Rohre - Versuche vs. Simulation

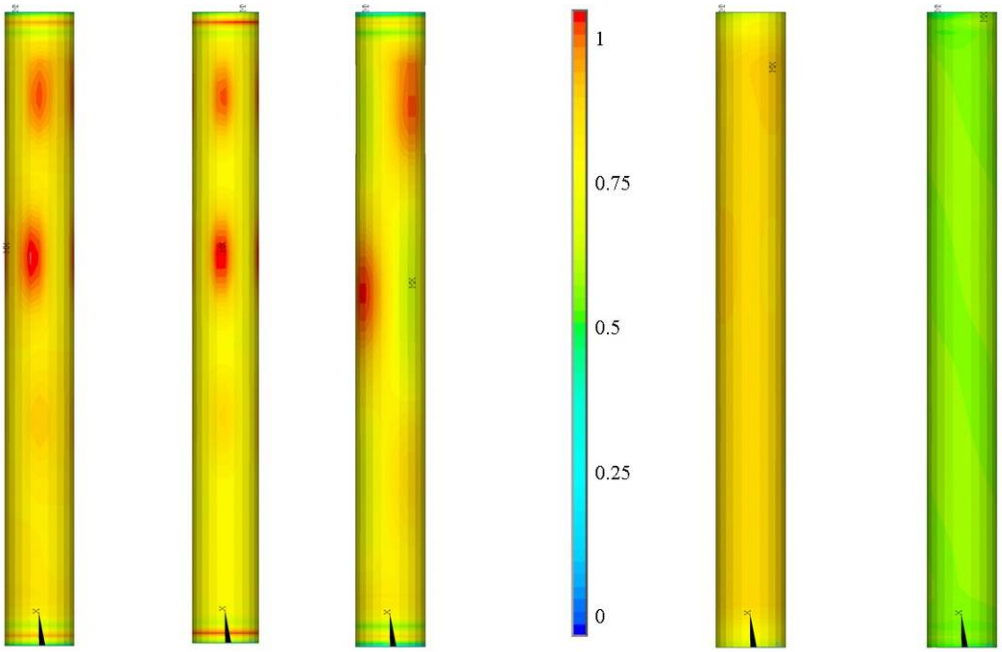
Das entwickelte Modell zeigt in beiden Fällen gute Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen. Die Abweichung liegt bei unter 12 %.

Die Versagensanalyse der unverstärkten Referenzproben verdeutlicht, dass das Bruchverhalten der Rohre von der Zugfestigkeit des Holzes quer zur Faser bestimmt wird. Aus diesem Grund lässt sich die Traglast unverstärkter Rohre mit guter Genauigkeit abschätzen. Mit zunehmender Schlankheit fällt die Traglast der REF-Rohre auf ca. 60 % des Ausgangswertes von ca. 1000 kN bzw. der mittleren Druckfestigkeit des Holzes von 67 N/mm^2. Gründe für die Abnahme sind geometrische Imperfektionen, die über die Rohrlänge steigende Anzahl von Fehlstellen und das Spaltversagen der unverstärkten Rohre. Obwohl eine textile Verstärkung quer zur Faserrichtung des Holzes nicht direkt an der Lastabtragung beteiligt ist, werden im Vergleich zu den REF deutlich höhere Traglasten erzielt. Dies ist auf den Einschnürungseffekt der GFK-Umwicklung zurückzuführen. Dies führt dazu, dass selbst Rohre großer Schlankheit zumindest 90% der Traglast kurzer Rohre erzielen.

Wie Abb. 3.261 (Knicken nach DIN 1052) zeigt, decken die Bemessungsgleichungen nach DIN 1052 das ganze Last-Schlankheits-Verhältnis der Rohre ab. Ist das Schlankheitsverhältnis kleiner als 30, dann ist die Knicklast gleich der Drucklast entsprechend der Festigkeit des Holzes.

Abb. 3.262 zeigt das erreichte Versagensniveau für unverstärkte und GFK-verstärkte Rohrquerschnitte. Die Referenzprobe erreicht ihr kritisches Niveau (= 1) bei einer Last von 616 kN. Der Mittelwert aus 8 Versuchen liegt bei 564 kN (vgl. Tabelle 3.38). Deutlich erkennbar ist, dass der Grenzwert nur lokal überschritten wird und zwar entsprechend der im Vorfeld definierten Imperfektion, die der 1. Beulform entspricht. Ein weiteres Ergebnis der FE Untersuchungen ist, dass die 85°-Wicklung theoretisch zu etwas höheren Traglasten als vergleichbare Rohre mit 45°-Wicklung, führen sollte. Dies konnte im Versuch jedoch nicht bestätigen werden. Die mittlere

Traglast der GFK45 Rohre (3 Versuche) liegt bei 1019 kN jene der GFK85 Rohre (6 Versuche) bei 952 kN. Wie in Abb. 3.262 gezeigt, hat der höhere Verstärkungseffekt in Umfangsrichtung des GFK85 Rohres eine geringe Auslastung der Bewehrung zur Folge.



REF F_{fail} 616kN | GFK45 F_{fail} 908kN | GFK85 F_{fail} 1059kN | Versagens-kriterium | GFK45 F_{fail} 908kN | GFK85 F_{fail} 1059kN

Holzschichten - Traglast bei Erreichen des Grenzwertes

GFK Schichten - Versagensniveau in Bewehrung (bei Erreichen der Traglast im Holz)

Abb. 3.262: Versagensniveaus im Holz bzw. der FVK-Bewehrung (rechter Bildteil)

Mit Hilfe des entwickelten Simulationsmodells für faserverstärkte Rohrprofile lässt sich das Trag-Verformungsverhalten von bewehrten und unbewehrten Profilquerschnitten mit hinreichender Genauigkeit abschätzen. Das Versagen der Profile wird maßgeblich von der Druckfestigkeit des Holzes parallel zur Faser als auch dessen Querzugfestigkeit beeinflusst.

Basierend auf den entwickelten Simulationsmodellen lassen sich nun je nach Belastungssituation (Druck, Zug, Biegung, Schub) Querschnittsoptimierungen, insbesondere hinsichtlich der Auslegung der FVK Armierung, durchführen.

Der Variantenvergleich hat die Potentiale textilbewehrter Profilhölzer aufgezeigt. Demnach lassen sich die mechanischen und physikalischen Eigenschaften hölzerner Bauelemente durch Kombination von Profilholz und Bewehrungen deutlich verbessern. Der konstruktiv richtige und effiziente Einsatz der Verstärkungsmaterialien kann dabei den i. d. R. höheren Material- und Herstellungsaufwand ausgleichen.

3.6.4 Zusammenführung der Ergebnisse zu baupraktischen Richtlinien und Bemessungsvorschriften

Autoren: Petra Kubowitz, Yvette Lemke, Anke Schäcke (alle IaFB)

3.6.4.1 Holz-Textil-Verbunde allgemein

Autor: Anke Schäcke (IaFB)

Für die in den Abschnitten 3.5.2 und 3.5.6 vorgestellten Holz-Textil-Verbunde wurde auf der Grundlage eines werkstoffgerechten Modells in Abschnitt 3.6.1 ein Berechnungsprogramm vom ILK in Absprache mit dem IaFB entwickelt, welches dem Anwender die Möglichkeit bietet, mehrschichtige Verbundquerschnitte aus beliebigen Materialien zu bemessen.

Die Grundlage des Bemessungsprogramms bildet die Schubdeformationstheorie bzw. die erweiterte Laminattheorie, bei dem die mehrschichtige Struktur gedanklich in mehrere homogenisierte Einzelschichten (Basisschichten) mit orthotropen Eigenschaften aufgelöst wird. Es können die neuartigen Verbundbauweisen wie z.B. Querschnitte aus Formpressholz, die mit technischen Textilien verstärkt sind, u. a. so nachgewiesen werden.

Die Querschnitte sind i.d.R. allgemeine Rechteckquerschnitte. Ist das Moment gleich Null, bzw. geht das Trägheitsmoment nicht in die Berechnung ein, so können auch andere Querschnitte z.B. Kreisquerschnitte mit Normalkraftbeanspruchungen berechnet werden, die durch flächenäquivalente Schichten Berücksichtigung finden.

Allgemeine Annahmen / Berechnungsgrundlagen:

- Anwendbarkeit der Laminattheorie
- Berechnung auf Zugversagen der Einzelschichten, Sudden-Death-Modell (Ausfall der Einzelschichten nach Überschreitung der Zugfestigkeiten)
- Unterscheidung von Zug- und Druckfestigkeiten möglich
- Berücksichtigung einer Steifigkeitsdegradation nach Überschreitung der Druckfestigkeiten der Einzelschichten (kein Sudden-Death-Modell)
- keine Berücksichtigung von Stabilitätsversagen
- keine Berücksichtigung der Schub- bzw. Querfestigkeiten
- Auswertungen der Spannungen in den Mittelebenen der Einzelschichten

Im Ergebnis der Berechnung erhält der Anwender die maximal aufnehmbaren Schnittgrößen des Querschnitts sowie das Kraft-Verformungs-Diagramm, aus der er die Bruchlast ablesen kann.

Das Bemessungsprogramm ist als Anlage „7.01 Bemessungstool für Holz-Textil-Verbunde“ auf beiligender CD enthalten. Im Berechnungsprogramm wurden Vergleichsrechnungen zu Hybridträgern (vgl. Abschnitt 3.6.4.2) und Formholzrohren (vgl. Abschnitt 3.6.4.3) geführt.

3.6.4.2 KHP verstärkte Brettschichtholz-Biegeträger

Autor: Petra Kubowitz (IaFB)

3.6.4.2.1 Allgemeines

Die erstellten Berechnungs- und Simulationsmodelle für Holz-Textil-Verbunde können ganz allgemein auch für Verbundquerschnitte aus Holz bzw. Holzwerkstoffen und anderen Materialien genutzt werden. Zu beachten ist dabei, dass die elastomechanischen Kennwerte wie Festigkeiten und Steifigkeiten und auch das Materialverhalten im Bruchzustand sowie die Spannungs-Dehnungsbeziehungen bekannt sein müssen. Beim erstellten Modell sind die in 3.6.4.1 genannten Einschränkungen zu beachten. So wird beim Erreichen der Zugfestigkeit von einem plötzlichen Versagen ausgegangen, hier wird also ein linear-elastisches Verhalten vorausgesetzt, was für übliche Holz- oder Holzwerkstoffprodukte zutreffend ist. Unter Druckbelastung wird nach

anfänglichem elastischem Verhalten eine Plastifizierung vorausgesetzt. Beim Erreichen der (linear-elastischen) Druckfestigkeit ist der Bruchzustand somit noch nicht erreicht. Es kommt zu Spannungsumlagerungen und großen Verformungen, somit also zur Steifigkeitsabnahme, bevor ein Versagen eintritt. Die simulierte Spannungsdegradation wurde in Anlehnung an die Spannungs-Dehnungslinie für Vollholz unter Druck (s. Abb. 3.263, Kennlinie a, näherungsweise abgeschätzt durch Kennlinie b) erstellt und ist somit streng genommen auch nur für Vollholz gültig. Das IaFB gab dabei das zu berücksichtigende Materialverhalten vor, die Umsetzung dieses Verhaltens durch Ansatz einer Degradationskurve für den Druckbereich wurde vom ILK vorgenommen. Das Programm selbst wurde ebenfalls vom ILK erstellt, hier wurden vom IaFB lediglich Vorgaben bzgl. der Anwendbarkeit, einiger hilfreicher grafischer Ausgaben der Spannungsverläufe über den Querschnitt und der allgemeinen Bedienfreundlichkeit gemacht.

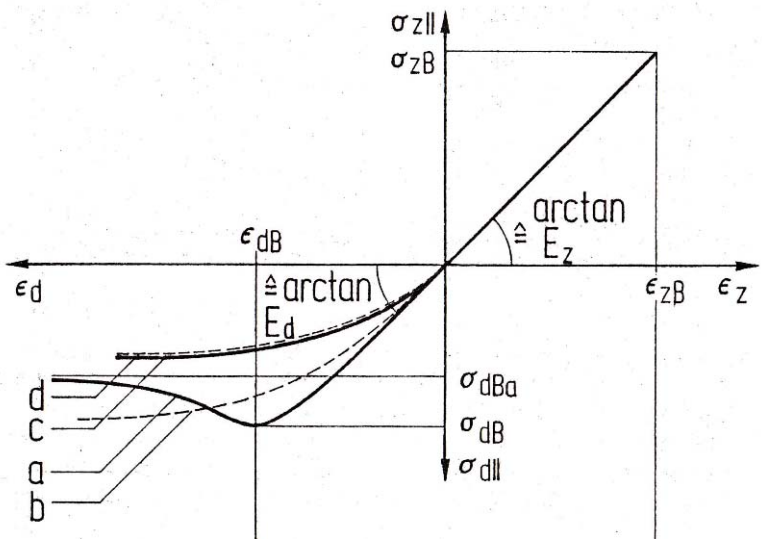


Abb. 3.263: Spannungs-Dehnungslinien für Bauholz nach Glos [190]

Wird unterstellt, dass sich Brettschichtholz und Kunstharzpressholz (KHP) wie übliches Vollholz verhalten, kann das Modell folglich auch für Verbundquerschnitte aus diesen Materialien verwendet werden. Bezüglich des Brettschichtholzes wird diese Annahme als hinreichend genau angesehen, für KHP ist sie eine Abschätzung und in weiteren Versuchen zu überprüfen.

Betrachtet wurden Hybridträger mit einem Kern aus Brettschichtholz und einer Biegezugverstärkung oder einer Biegezug- und Biegedruckverstärkung aus KHP. Das KHP wurde dabei als äußere Lamelle angeordnet und mit den übrigen Vollholzlamellen verklebt, so dass ein starrer Verbund vorliegt (vgl. auch 3.7.3.3). Für solche Hybridträger aus Brettschichtholz- und KHP-Lamellen kann das Berechnungs- und Simulationsmodell nach Kap. 3.6.2 zur Vorbemessung genutzt werden. Soll die charakteristische Biegetragfähigkeit des Verbundträgers ermittelt werden, sind in der Eingabemaske die charakteristischen Biegefestigkeiten und E-Moduln anzugeben. Für einen Hybridträger aus Brettschichtholz GL28h und KHP A 740-1 gelten beispielsweise folgende Werte:

$f_{m,k,GL28h}$ = 28 N/mm² $f_{m,k,KHP\ A740-1}$ = 133,5 N/mm²

$E_{0,mean,GL28h}$ = 12600 N/mm² $E_{0,mean,KHP\ A740-1}$ = 20000 N/mm²

Das Programm liefert das mit diesen Eingangsgrößen maximal aufnehmbare Moment. Für die Angabe der verschmierten Gesamtbiegefestigkeit ist lediglich durch das Widerstandsmoment des Gesamtquerschnitts zu dividieren. Da die charakteristische Biegefestigkeit des KHP etwa fünfmal höher ist als die des Brettschichtholzes, die Steifigkeit jedoch nur etwa doppelt so hoch, wird – wegen der Verteilung nach den Steifigkeiten – die Festigkeit zuerst in der äußersten Brettschichtholzlamelle erreicht. Wie beschrieben wird im Programm ein Ausfall der mit Zugspannungen oberhalb der Biegezugfestigkeit belasteten Bereiche sowie eine Plastifizierung im

Druckbereich berücksichtigt. Somit kann ein Verhalten unter Ansatz einer gerissenen Zugzone abgeschätzt werden. Das KHP wirkt dabei analog einer Zugbewehrung im gerissenen Stahlbeton. (Bereiche im Brettschichtholz reißen wegen zu hoher Biegezugbelastungen auf, die Spannungen werden vom KHP übernommen bis maximal auch dessen Zugfestigkeit erreicht ist.) Bei gleicher Biegedruck- und Biegezugfestigkeit wird sich jedoch kein ausgeprägter plastischer Bereich in der Druckzone ausbilden. Soll diese Plastifizierung stärker berücksichtigt werden, bietet es sich an, für die Biegedruckfestigkeit die reine Druckfestigkeit einzusetzen. Diese ist geringer als die Biegefestigkeit, da die Fasern bei reinem Druck einer konstanten Beanspruchung ausgesetzt sind, während bei Biegung die Belastung der Fasern von außen nach innen – in Richtung der Spannungsnulllinie – abnimmt und somit das Zusammentreffen der höchsten Beanspruchung mit der schwächsten Faser (die zufällig im Querschnitt angeordnet ist) unwahrscheinlicher ist. Dieses Vorgehen sollte konsequenterweise genutzt werden.

Zu beachten ist, dass die reinen Druck- und Zugfestigkeiten für KHP nicht getestet wurden und somit nicht bekannt sind. Ermittelt wurden lediglich die Biegefestigkeiten. Da die Dicke der KHP-Lamelle in der Regel gering ist, ist der reine Biegespannungsanteil natürlich jedoch gering gegenüber den Druck- bzw. Zugspannungsanteilen. Für eine genauere Rechnung sollten die Druck- und Zugfestigkeiten daher zusätzlich ermittelt und angesetzt werden.

3.6.4.2.2 Rechenbeispiel – Benutzung des ILK-Bemessungstools

Hinweis: Das Beispiel ist als Anlage „7.02 Beispiel Hybridträger (Beispielsrechnung zu 7.01)“ auf beiligender CD enthalten).

Gesucht ist die charakteristische Biegefestigkeit eines Hybridträgers nach Abb. 3.264. Der Träger ist ein einfacher Balken auf zwei Stützen mit einer Länge von 8,0 m.

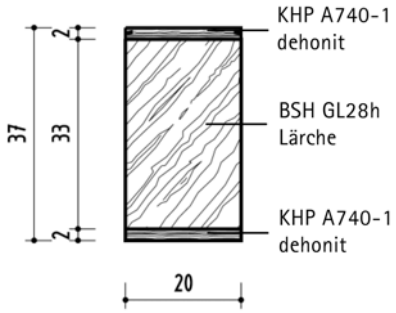


Abb. 3.264: BSH-KHP-Hybridquerschnitt

Das Programm verlangt Eingabewerte in den Einheiten N und mm und gibt die Ergebnisse ebenfalls in diesen Einheiten aus.

Eingabewerte

Maximale Querschnittsbelastung:

Es wird einachsige Biegung um die starke Achse untersucht. Wegen der im Programm vorgenommenen Achsbezeichnungen ist daher ein Startwert für M_x einzugeben. Dieser Startwert ist vorzuschätzen. Bestehen diesbezüglich Unsicherheiten, sind mehrere Startwerte zu prüfen, da das Programm nur eine gewisse Anzahl an Iterationsschritten durchführt und daher der Endwert bei sehr ungenauen Startwerten eventuell nicht erreicht wird. Hier wird vorgeschätzt, dass ein charakteristisches Moment von nicht mehr als 250 kNm aufnehmbar ist.

Kräfte / Scheibenbeanspruchung		
Nx	0	N
Ny	0	N
Nxy	0	N

Momente / Plattenbeanspruchung		
Mx	250.000.000	Nmm
My	0	Nmm
Mxy	0	Nmm

Lastfaktoren und Inkremente:

Die Berechnung soll hier mit einem Moment von 75 kNm beginnen. Dies entspricht 30% des geschätzten Maximalwertes. Als Lastfaktor ist daher ein Startwert von 0,3 einzugeben.

Zusätzlich ist die Schrittweite vorzugeben, mit welcher dieser Lastfaktor gesteigert wird. Je kleiner diese Schrittweite gewählt wird, desto genauer wird das maximal aufnehmbare Moment bestimmt, da die Ermittlung jeweils zu diesen schrittweise gesteigerten Lastfaktoren erfolgt. Zu kleine Werte sollten jedoch vermieden werden, da aufgrund der begrenzten Schrittanzahl das maximale Moment dann evtl. nicht erreicht wird. Je kleiner die Schrittweite gewählt wird, desto genauer müssen die Startwerte abgeschätzt werden.

Start der Berechnung bei Lastfaktor von	0,300
Steigerung mit Schrittweite von	0,0225

Geometriekennwerte:

Hier wird die Länge des Trägers L_x und die Breite des Trägers L_y angegeben. Die Höhe ergibt sich im nächsten Schritt aus der Definition der Einzelschichten. Für das gewählte Beispiel ist also Folgendes einzugeben:

Lx =	8.000	mm
Ly =	200	mm

Hinweis: Da in diesem Beispiel das vom Querschnitt maximal aufnehmbare Moment (und nicht die aufnehmbare Belastung) gesucht wird, ist die Länge L_x unbedeutend, hier könnte ein beliebiger Wert ungleich Null eingegeben werden.

Material- und Schichtkennwerte:

Für Material 1 (Grundmaterial) ist hier ein homogenes Brettschichtholz GL28h gewählt. Die entsprechenden Festigkeiten und Steifigkeiten sind DIN 1052 [2] zu entnehmen und einzugeben.

Wie beschrieben ist es für die Ausbildung einer Plastifizierung im Druckbereich sinnvoll, die Druckfestigkeit (statt der Biegefestigkeit) anzugeben. Für den Zugbereich ist jedoch wegen der Biegebeanspruchung die Biegezugfestigkeit einzugeben. Im gewählten Beispiel wurde dabei zusätzlich der Höhenfaktor k_h nach DIN 1052 [2] beachtet, der sich bei der Querschnittshöhe von 37 cm zu k_h = 1,07 errechnet. Damit ergibt sich eine einzusetzende Biegezugfestigkeit von $f_{m,k,GL28h}$ = 1,07 * 28 = 29,96 N/mm². Als E_1 ist der E-Modul parallel zur Faser anzugeben; die

übrigen Festigkeits- und Steifigkeitswerte sind für das Beispiel mit einachsiger Biegung nicht relevant.

Beta, Kappa und Eta sind Faktoren für die Steifigkeitsdegradation und damit die Berücksichtigung der Plastifizierung im Druckbereich. Diese Werte sollten nicht geändert werden, solange keine genauere Spannungs-Dehnungsbeziehung zugrunde gelegt werden kann.

Für Material 2 (Verstärkungsmaterial) ist ein Kunstharzpressholz – als Furnierholz mit einer Querlage – KHP A740-1 gewählt. Auch hier sind für die einachsige Biegung nur die Festigkeiten parallel zur Faser und der E_1-Modul relevant. Als E-Modul parallel zur Faser wird 20.000 N/mm² eingegeben. Die Druck- und Zugfestigkeiten werden wie beschrieben mit der KHP-Biegefestigkeit von 133,5 N/mm² eingegeben, da genauere Werte zurzeit nicht bekannt sind.

Material 1 (Grundmaterial)

E1 =	12.600	N/mm²
E2 =	420	N/mm²
G =	780	N/mm²
nue =	0,30	
Sig_Zug_x =	29,96	N/mm²
Sig_Druck_x =	-26,50	N/mm²
Sig_Zug_y =	0,50	N/mm²
Name	*GL28h*	
beta =	1,20	
kappa =	0,33	
eta =	0,00	

Material 2 (Verstärkungsmaterial)

E1 =	20.000	N/mm²
E2 =	2.000	N/mm²
G =	1.000	N/mm²
nue =	0,25	
Sig_Zug_x =	133,50	N/mm²
Sig_Druck_x =	-133,50	N/mm²
Sig_Zug_y =	1,00	N/mm²
Name	*KHP A740-1*	

Der hybride Aufbau des Trägers wird durch die Angabe von Einzelschichten berücksichtigt. Die KHP-Lamellen am oberen und unteren Trägerrand bestehen laut Definition aus Material 2 und haben eine Höhe von 20 mm. Da insgesamt 10 Schichten zur Verfügung stehen, werden sie als Schicht 1 und Schicht 10 eingegeben.

Der Brettschichtholzkern hat eine Höhe von 33 cm. Diese wird gleichmäßig auf die verbleibenden 8 Schichten aufgeteilt, so dass sich für jede dieser Schichten, bestehend aus dem Material 1, eine willkürliche Höhe von 330 / 8 = 41,25 mm ergibt. Es besteht auch die Möglichkeit, größere Schichtdicken einzugeben und dafür eine geringere Schichtanzahl zu berücksichtigen. Dabei sollte jedoch beachtet werden, dass sämtliche Werte in Schichtmitte ermittelt werden und daher die Genauigkeit mit geringerer Schichtdicke steigt. Daher wird empfohlen, grundsätzlich die zur Verfügung stehende Schichtanzahl auszunutzen.

Da sämtliche Schichten in Trägerlängsrichtung ausgerichtet sein sollen, ist die Schichtorientierung somit parallel zur Faser, und als Winkel wird daher 0° eingegeben.

Schicht-anzahl	Schichtdicke in mm	Material-zuordnung	Schicht-orientierung in Grad
1	20,00	2	0
2	41,25	1	0
3	41,25	1	0
4	41,25	1	0
5	41,25	1	0
6	41,25	1	0
7	41,25	1	0
8	41,25	1	0
9	41,25	1	0
10	20,00	2	0
Gesamt-laminatdicke	370,0	* Bei nicht besetzten Schichten NULL eingeben !	

Ausgabewerte:

Das Programm gibt die mit den entsprechenden Eingabewerten ermittelten maximal aufnehmbaren Schnittgrößen aus. Da im Beispiel charakteristische Werte eingegeben wurden, wird folglich ein charakteristisches Biegemoment ausgegeben. Dieses beträgt 187,5 kNm.

Der maximale Lastfaktor sollte bei jeder Rechnung kontrolliert werden. Bei Werten nahe 1 sollte ein größerer Startwert für das Maximalmoment eingegeben werden, um sicherzustellen, dass das Programm bis zum rechnerischen Versagen durchlief ohne dass vorher die maximale Schrittanzahl erreicht war. Zudem kann der Startwert des Lastfaktors in der Eingabe dem maximalen Lastfaktor angeglichen und die Schrittweite dann verkleinert werden, um die Genauigkeit der Rechnung zu vergrößern.

0,750						
max. Lastfaktor	0	0	0	187.500.000	0	0
	Nx	Ny	Nxy	Mx	My	Mxy
	maximale Belastung bzw. Versagenslast					

Die weiteren Ausgabewerte interessieren in diesem Beispiel nicht.

Anwendern, die das Programm zur Vorbemessung nutzen wollen, wird empfohlen, dieses Beispiel mit verschiedenen Startwerten durchzuspielen, um ein Gefühl für die beschriebenen Abhängigkeiten zu bekommen.

Abgeschätzte Biegefestigkeit

Aus dem angegebenen, maximal aufnehmbaren Moment lässt sich die Gesamtbiegefestigkeit wie folgt ermitteln:

$$f_{m,k,gesamt} = \frac{M_{k,gesamt}}{W_{gesamt}} = \frac{M_{max,Programm}}{b \cdot h^2/6} = \frac{6 \cdot 18750\ kNcm}{20\ cm \cdot (37\ cm)^2} = 4{,}109\ kN/cm^2 = 41{,}09\ N/mm^2 \qquad (3.84)$$

Die bedeutet eine Steigerung von 37% gegenüber dem unverstärkten Träger (mit der angesetzten erhöhten Biegefestigkeit $f_{m,k}$ = 29,96 N/mm²). Dieses Ergebnis erscheint durchaus plausibel, liegt jedoch sehr nah an einer rein-linear-elastischen Rechnung. Diese ergäbe eine Biegefestigkeit von 3,93 kN/cm², während bei Ansatz einer Plastifizierung im Druckbereich sowie einer teilweise gerissenen Zugzone (nach Rechenmodell 3, vgl. Kap. 3.7.3.3.2) eine Biegefestigkeit von 4,58 kN/cm² errechnet wird. Mit Blick auf den Bruchversuch für das Pilotprojekt „Fußgängerbrücken“ (vgl. Kap.3.8.2.5) erscheint die errechnete Festigkeit von 4,11 kN/cm² sehr gering, auch wenn an dieser Stelle kein Vergleich gezogen werden kann, da sich das Beispiel explizit auf die Ermittlung charakteristischer Werte bezieht. Der Vergleich zwischen Versuchswerten und mit dem Berechnungstool des ILK ermittelten Bruchlasten wurde in Kap. 3.6.2.1 gezogen. Trotzdem bleibt festzuhalten, dass das Bemessungstool für charakteristische oder auch Bemessungsgrößen tententiell zu geringe Festigkeiten liefert. Damit liegen die Werte zwar auf der sicheren Seite, jedoch sollte die Degradation zukünftig überprüft und angepasst werden. Beispielsweise ergibt sich eine rechnerische Biegefestigkeit von 4,48 kN/cm², wenn die Steifigkeitsabnahme erst bei einer Spannung von 85% der Druckfestigkeit begonnen wird, was durchaus mit den Vorschlägen von Glos übereinstimmt (vgl. Abb. 3.263).

3.6.4.2.3 Weitere Hinweise zum Programm

Soll die Bruchtragfähigkeit eines Hybridträgers ermittelt werden, sind statt der charakteristischen Werte die Bruchfestigkeiten in der Eingabemaske anzugeben. Das Programm ermittelt daraus das maximal aufnehmbare Moment im Bruchzustand, ebenfalls unter Berücksichtigung einer gerissenen Zugzone und einer teilweise plastifizierten Druckzone. Biegebruchfestigkeiten für KHP können Kap. 3.2.8.4 entnommen werden. Auch hierbei ist zu berücksichtigen, dass für eine genauere Rechnung die Druck- und Zugfestigkeiten des KHP ermittelt und eingesetzt werden sollten. Zudem sei darauf hingewiesen, dass das Programm nur für KHP-BSH-Hybridträger der untersuchten Art und Geometrie getestet wurde (vgl. Kap. 3.5.6.4). Sollen Träger anderer Abmessungen und vor allem auch mit anderen Verstärkungen bemessen werden, ist das Programm diesbezüglich zu validieren.

Weiterhin ist zu beachten, dass das Programm keine Aussagen bezüglich der Schubspannungen bzw. Schubtragfähigkeiten liefert. Ebenso können Stabilitätsprobleme wie Knicken und Kippen nicht berücksichtigt werden. Diesbezüglich sind weitergehende Untersuchungen nötigt. Die im Forschungsvorhaben betrachteten Hybridträger waren reine Biegeträger ohne Kippgefahr.

Soll eine Bemessung nach DIN 1052 erfolgen, kann das Programm ohne Änderung ebenfalls nicht verwendet werden. Die Norm lässt zurzeit lediglich eine linear-elastische Rechnung zu. Daher müsste auch für den Druckbereich mit einem Sudden-Death-Modell gearbeitet werden. Zudem wäre nach dem Ausfall irgendeines Querschnittsbereiches sofort die Gesamttragfähigkeit erreicht; gerissene Zonen und Spannungsumlagerungen dürften nicht berücksichtigt werden. Hierfür müsste das Programm geringfügig geändert werden, was jedoch ohne großen Aufwand möglich ist. Allerdings ist für eine linear-elastische Rechnung kein Programm nötig, sie kann ohne weiteres mit den Angaben nach DIN 1052 erfolgen. Als Bemessungshilfe wurde dazu eine Exceltabelle mit den normativen Formeln erstellt (siehe Kap. 3.7.3.3 und Anlage „7.03 Bemessung von Hybridträgern und Hybridbohlen“ auf beiligender CD).

In Kapitel 3.7.3.3 findet sich zudem eine Übersicht über mögliche Rechenverfahren sowie eine anwenderfreundliche Aufbereitung dieser Verfahren unter Berücksichtigung von Normal- und Schubspannungen. Der Praxis empfohlen wird die Rechnung unter Ansatz einer gerissenen Zugzone sowie eines plastischen Bereiches in der Druckzone nach 3.7.3.3.2, Rechenmodell 3.

3.6.4.3 Faser- und Textilbewehrte Formholzrohre

Autoren: Andreas Heiduschke (ISH), Yvette Lemke (IaFB)

Da im Abschnitt 3.5.2.1die Herleitung für den Bemessungsvorschlag druckbelasteter Formholzrohre erläutert wird, soll an dieser Stelle darauf verzichtet und lediglich der dazugehörige Bemessungsalgorithmus dargestellt werden.

Zu beachten ist, dass die Bemessung nur für Rohre mit folgenden Einschränkungen gilt:

- nur für Rohre mit rein axialer Druckbelastung
- nur für Rohre mit einem Formfaktor r/t ≈ 6,5 (r – Radius; t – Wandungsdicke)

Unterschieden werden die folgenden Versagensarten:

I – Überschreitung der Festigkeit des Holzes oder der Bewehrung

II – Knicken des Stabes

III – Ring- oder Schachbrettbeulen der Rohrwand (lokale Stabilität)

Zur Abschätzung der kritischen Druckspannungen σ_{cr} von Formholzrohren wird folgende Vorgehensweise vorgeschlagen.

3.6.4.3.1 Unbewehrte Rohre

$$\sigma_{cr} \le \sigma_{cr,\varepsilon 90} \text{ bzw. } \varepsilon_{\phi} \le \varepsilon_{\phi,cr} \qquad \text{Dehnungskriterium} \tag{3.85}$$

$$\sigma_{cr} = \min\begin{cases}\sigma_{cr,I+II}\\ \sigma_{cr,III}\end{cases} \tag{3.86}$$

Dabei ist:

$$\sigma_{cr,I+II} = f_{c,0} \cdot k_c \tag{3.87}$$

$$\sigma_{cr,III} = \frac{t}{4 \cdot r} \cdot E_z \tag{3.88}$$

<u>Stabiliäts- bzw. Festigkeitsversagen:</u>

Für den Knickbeiwert k_c gilt das Vorgehen nach dem Ersatzstabverfahren laut DIN 1052: 2008-12, 10.3. Es wird vorgeschlagen, bei der Ermittlung der Ersatzstablänge, die Schubsteifigkeit zu berücksichtigen. Im Folgenden wird die entsprechende Reihenfolge für die Formholzröhren vorgegeben.

$$l_{ef} = \beta \cdot h \cdot \sqrt{1 + \frac{E \cdot I \cdot \Pi^2}{(\beta \cdot h)^2 \cdot S}} \tag{3.89}$$

l_{ef}	Ersatzstablänge
β	Knicklängenbeiwert (siehe Anhang E der DIN 1052)
h	Stablänge
I	Trägheitsmoment mit $I_{Ring} = \frac{\Pi}{4}\left(R^4 - r^4\right)$
S	Schubsteifigkeit mit $S = \frac{G \cdot A}{n}$
	G Schubmodul
	A Querschnittsfläche
	n Schubkorrekturfaktor; n = 2 für dünnwandige Kreisringe

Bei allen Materialwerten sind eigentlich die zugehörigen 5 %-Quantilwerte einzusetzen. Für Formholz gibt es keine derartigen statistischen Werte, deshalb wird an dieser Stelle auf die Mittelwerte einer Versuchsreihe mit 10 Werten in Tabelle 3.37 verwiesen, da davon ausgegangen wird, dass die Verhältnisse von Quantilwerten zu Mittelwerten für E und G etwa gleich groß sind.

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} \qquad \text{Trägheitsradius} \tag{3.90}$$

$$\lambda = \frac{l_{ef}}{i} \qquad \text{Schlankheitsgrad} \tag{3.91}$$

$$\lambda_{rel,c} = \frac{\lambda}{\Pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \tag{3.92}$$

$\lambda_{rel,c}$	bezogener Schlankheitsgrad
$f_{c,0,k}$	charakteristische Druckfestigkeit in Faserrichtung
$E_{0,05}$	Elastizitätsmodul, parallel zur Faser

Bei den Werten $f_{c,0,k}$ und $E_{0,05}$ handelt es sich ebenfalls eigentlich um 5 % Quantilwerte. Auch hier wird davon ausgegangen, dass die Verhältnisse von Quantilwerten zu Mittelwerten dieser beiden Materialwerte etwa gleich groß sind, so dass an dieser Stelle mit den Mittelwerten aus der Versuchsreihe, siehe Tabelle 3.37, gerechnet wird. Da es sich bei dieser Versuchsreihe aber lediglich um 10 Werte handelt, wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass dieses Vorgehen nicht statistisch abgesichert ist. Für eine zukünftige Bemessung sind weitere Versuche und entsprechende Auswertungen erforderlich.

Es wird angesetzt: $f_{c,0,k}$ = 66,7 N/mm² und $E_{0,05}$ = 15600 N/mm² (vgl. Tabelle 3.37), so dass sich für den bezogenen Schlankheitsgrad $\lambda_{rel,c}$ ergibt:

$$\lambda_{rel,c} = \frac{\lambda}{\Pi} \cdot \sqrt{\frac{66,7}{15600}} = \frac{\lambda}{\Pi} \cdot 0,065 \tag{3.93}$$

Damit lässt sich der Faktor k ermitteln:

$$k = 0,5\left[1 + \beta_c \cdot \left(\lambda_{rel,c} - 0,3\right) + \lambda_{rel,c}^2\right] \tag{3.94}$$

Zu dieser Formel sind zwei Bemerkungen zu machen. Zum einen ist diese Formel explizit für Vollholz, Balkenschichtholz, Brettschichtholz und geregelte Holzwerkstoffe ermittelt worden, so dass die Übertragbarkeit auf Formholz nicht zwangsläufig gegeben ist. Damit zusammenhängend ist der Faktor β_c. Auch diesen gibt es nur für die genannten Produkte. Hier sollte der größere Wert β_c = 0,2 angenommen werden. Es wird aber angemerkt, dass es für Formholz noch einen Wert β_c zu ermitteln gilt bzw. die Gültigkeit der Formel (3.94) für Formholz zu prüfen ist. Dies sollte Untersuchungsgegenstand weiterer Forschungen werden.

$$k_c = \min\left\{\frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel,c}^2}}; 1\right\} \tag{3.95}$$

$$\sigma_{cr,I+II} = f_{c,0} \cdot k_c \tag{3.96}$$

<u>Beulen der Rohrwand</u>

Nach der Berechnung der kritischen Druckspannung für Überschreitung der Festigkeit und des Stabknickens $\sigma_{cr,I+II}$, ist anschließend σ_{III} zu ermitteln. Dazu sind folgende Werte erforderlich:

t	Wandungsdicke in mm
r	Radius in mm
E_0	E-Modul in Faserrichtung

Damit ergibt sich:

$$\sigma_{cr,III} = \frac{t}{4 \cdot r} \cdot E_0 \qquad (3.97)$$

Kritische Spannung des unbewehrten Rohres

Der kleinere der beiden Werte $\sigma_{cr,I+II}$ und σ_{III} ist der kritischen Druckspannung für das Spalten des unbewehrten Rohres $\sigma_{cr,\varepsilon 90}$ gegenüber zu stellen. Diese ergibt sich zu:

$$\sigma_{cr,\varepsilon 90} = \frac{f_{t,90} \cdot E_0}{\mu_{z\phi} \cdot E_{90}} \qquad (3.98)$$

$f_{t,90}$	Querzugfestigkeit
E_0 /E_{90}	E-Moduln
$\mu_{z\varphi}$	Poissonsche Konstante bzw. Querdehnzahl

Die dazu erforderlichen Materialwerte sind der Tabelle 3.37 zu entnehmen. Auch hier gilt der Hinweis auf die Unsicherheit dieser Werte aufgrund fehlender statistisch abgesicherter Untersuchungen.

Wie in 3.5.2.1 vermerkt, ist die aus dem Versagenskriterium Bruchdehnung abgeleitete Druckfestigkeit $\sigma_{cr,\varepsilon 90}$ nur eine grobe Näherung. Für bessere Näherungen ist die Kenntnis des vollständigen Spannungszustandes, z.B. mittels der vollständigen Interaktionskriterien nach Tsai-Wu, erforderlich.

3.6.4.3.2 Bewehrte Rohre

Handelt es sich um ein bewehrtes Rohr, wird das Spannungskriterium im Laminat ($\sigma_{\varphi,B} \le f_{t,B}$) herangezogen.

$$\sigma_{\phi,B} \le f_{t,B} \qquad \text{Spannungskriterium im Laminat} \qquad (3.99)$$

Zunächst ist die maximale Ringspannung $\sigma_{\varphi,B}$ im Laminat mit der Kesselformel (gilt nur für schlanke Zylinder) abzuschätzen.

$$\sigma_{\varphi,B} \approx \frac{f_{c,90} \cdot r_{i,B}}{t_B} \qquad (3.100)$$

t_B	Dicke der Bewehrungsschicht
r	Radius in mm
E_z	E-Modul in Längsrichtung

Diese ist dann der Zugfestigkeit des Laminats $f_{t,B}$ (entsprechend Tabelle 3.37) gegenüberzustellen.

Erkennbar ist, dass für einen vollständigen Bemessungsvorschlag noch einige Untersuchungen zu Materialparametern und Strukturverhalten notwendig sind. Deshalb ist das vorgenannte Vorgehen nur mit den genannten Einschränkungen gültig und durch weitere Forschungsarbeiten zu verifizieren ist. Für die Einführung in die Praxis ist es weiterhin erforderlich, ein Sicherheitskonzept zu erarbeiten.

3.7 Konstruktionsentwicklung

Kurzreferat vom Verantwortlichen (IaFB)

Als Grundlage für die Entwicklung neuer leistungsfähiger Holzkonstruktionen wurden der „state of the art“ im Ingenieurholzbau zu Beginn des Projektes zusammengestellt und die vorhandenen Defizite aus tragwerksplanerischer Sicht detailliert analysiert. Die umfangreiche Literaturrecherche hat die vorhandenen Vorhaben verschiedener Forschungseinrichtungen umfänglich systematisiert und katalogisiert. Es konnten hierbei auch über das Projektziel hinausgehende Erkenntnisse auf dem Gebiet der physikalischen und chemischen Modifikation von Hölzern zusammengefasst werden. Eine umfängliche Erweiterung des Sachstandsberichtes im Ingenieurholzbau erfolgte nach etwa 1,5 Jahren Projektlaufzeit für den Bereich der Verbindungsmittel durch Erstellung eines eigenständigen State-of-the-art-Berichts. Dabei wurden die relevanten Inhalte aus dem allgemeinen Berichtsteil vom Beginn des Projektes aufgegriffen und um neue Ergebnisse aus der Projektarbeit erweitert und den Partnern zugänglich gemacht. In den entsprechenden Kapiteln 1.4.2 State of the art – Ingenieurholzbau und 3.7.2 State of the art – Verbindungsmittel werden die wichtigsten Ausschnitte dargestellt.

Nach diesem Überblick zum Stand von Wissenschaft und Forschung zu Projektbeginn und nach etwa 1,5 Jahren Projektlaufzeit wurde jeweils festgelegt, welche Richtungen im Projekt weiterverfolgt werden sollten. Dazu wurden die Anforderungen an Bauteile bzw. Tragwerke definiert und Tragwerkslösungen unter anforderungsgerechter Verwendung von Hochleistungsholz ausgearbeitet. Dies geschah oft in enger Verknüpfung zum Arbeitspaket 7 – Pilotprojekte, da einerseits vorgeschlagene Konstruktionen wünschenswerterweise auch eingesetzt werden sollten und andererseits die Anforderungen der Bauherren wertvolle Impulse für weitere Untersuchungen gaben, die sich jedoch teilweise als sehr zeitintensiv herausstellten (vgl. auch Kap. 3.8). Schließlich wurden für die betrachteten Konstruktionen praxisorientierte Bemessungsverfahren und Anwendungsrichtlinien zusammengestellt.

3.7.1 State of the art – Ingenieurholzbau
Autor: Petra Kubowitz (IaFB)

Der vom IaFB im Rahmen des Arbeitspaketes AP 6.1 erstellte state-of-the-art-Bericht gibt den Wissenschaftlichen und technischen Kenntnisstand im Ingenieurholzbau zu Projektbeginn wieder. Aus diesem Grund ist er in Auszügen im Kap. 1.4.2 enthalten.

3.7.2 State of the art – Verbindungsmittel
Autor: Yvette Lemke (IaFB)

3.7.2.1 Einteilung nach DIN

In der Holzbaunorm DIN 1052: 2004-08 [1] werden im Kapitel 11 *Verbindungen, Ausklinkungen, Durchbrüche und Verstärkungen* die Verbindungen hinsichtlich ihrer Kraftaufnahme in Zug- und Druckverbindungen sowie Queranschlüsse eingeteilt. Des Weiteren ist das Zusammenwirken verschiedener Verbindungsmittel geregelt.

Als mögliche Verbindungsmittel werden in der Norm stiftförmige metallische Verbindungsmittel, Verbindungen mit sonstigen mechanischen Verbindungsmitteln, Klebungen und zimmermannsmäßige Verbindungen für Bauteile aus Holz angegeben. Zu den stiftförmigen metallischen Verbindungsmitteln gehören Stabdübel, Passbolzen, Bolzen, Gewindestangen (Gewindebolzen nach DIN 976-1), Nägel, Schrauben und Klammern; sonstige mechanische Verbindungsmittel sind Nagelplatten, Dübel besonderer Bauart und Stahlblechformteile.

Klebungen müssen den Anforderungen des Anhangs A bzw. geklebte Verbundbauteile aus Brettschichtholz (BSH) zusätzlich denen des Anhangs B entsprechen. Sie werden in Schraubenpressklebung, Verbindung mit eingeklebten Stahlstäben, geklebte Tafelelemente, Universal-Keilzinkenverbindungen von BSH und Balkenschichtholz (BASH), Schäftungsverbindungen und

Verbundteile aus BSH unterschieden. Zu den zimmermannsmäßigen Verbindungen gehören Versätze, Zapfenverbindungen und Holznagelverbindungen.

3.7.2.2 Übersicht möglicher Verstärkungen und Verbesserungen von Verbindungen

Zunächst wird hier ein grober Überblick über die möglichen Maßnahmen zur Verstärkung von Verbindungen gegeben. In den darauffolgenden Kapiteln werden wesentliche Verstärkungsmöglichkeiten für Holz erläutert.

3.7.2.2.1 Holzvergütungen

Mit dem Ziel, das mechanisch-physikalische und/oder das chemisch-biologische Verhalten von Holz zu verbessern, wird es in seinen Eigenschaften verändert. Dabei geht es vor allem um die Verbesserung der Dimensionsstabilität (Schwinden und Kriechen), die Dauerhaftigkeit und Fotostabilität, die mechanischen Eigenschaften, die thermische Verformbarkeit und die Verleimbarkeit.

3.7.2.2.2 Verstärkung mit technischen Textilien

Neben Zug-, Biegezug- und Schubverstärkungen von kompletten Bauteilen, können technische Textilien auch als Verstärkungen von Anschlüssen und Krafteinleitungsbereichen genutzt werden. Die Verstärkung des Holzes geschieht dabei im Allgemeinen in Richtung seiner schwächeren Achse quer zur Faser bzw. zwischen den Fasern, also auf Zug oder Schub. Weiterhin kann Querzug, der aus der Krafteinleitung über stabförmige Verbindungsmittel in das Holz resultiert sehr gut mit gezielt aufgebrachten gerichteten textilen Strukturen aufgenommen werden.

3.7.2.2.3 Verstärkung mit Nageldübeln

Im Bereich der stiftförmigen Verbindungsmittel lassen sich Stabdübelverbindungen auch mit Nagelplatten effizient verstärken. Dadurch wird die Lochleibungsfestigkeit des Anschlusses erhöht und gleichzeitig werden auftretende sekundäre Querzugkräfte vor dem Dübel aufgenommen. Bezüglich der Duktilität konnte infolge der Beteiligung der Stahlbleche am Lastabtrag eine erhöhte Zähigkeit mit verbessertem Nachbruchverhalten beobachtet werden.

Diese Verstärkungsidee könnte auch auf Dübel besonderer Bauart Anwendung finden. Bei den einseitigen Einlass- und Einpressvarianten ist mit einer sehr guten Verstärkungswirkung zu rechnen, wenn das gegenüberliegende Holzbauteil auf diese Art ertüchtigt wird.

3.7.2.2.4 Einsatz eines Einzeldübels zur Einleitung großer Kräfte

Mit diesem Verstärkungsansatz sollen mit einem Einzeldübel (z.B. Dübel besonderer Bauart) große Kräfte mit der Zielstellung der Ausbildung eines idealen Gelenks in Fachwerkknoten eingeleitet werden.

Dies lässt sich u.a. mit rohrförmigen Dübeln und ihrer hohen Duktilität erzeugen.

3.7.2.2.5 Sonstige

Querzug- bzw. Querdruckverstärkung können – außer durch Einsatz von technischen Strukturen – auch anders ausgeführt werden. Beispiele dafür sind das Einleimen von Gewindestangen nach DIN 975 / 976, Stangen mit Gewinde nach DIN 571 (Schlossschrauben), Betonrippenstählen (GEWI-Stähle) oder das Eindrehen von Schrauben. Die empfohlene Einleim- oder Einschraublänge sollte dabei etwa 20...40*d betragen.

3.7.2.3 Holzvergütungen

Der vom *Institut für angewandte Forschung im Bauwesen* (IaFB) verfasste Bericht *„Zusammenfassung des Standes der Technik und der Forschung zu Beginn der Bearbeitung des Verbundprojektes HHT – Hochleistungsholztragwerke“* (state of the art report) [203] beschreibt die notwendigen Prozesse und Prozessbedingungen der einzelnen Holzvergütungsmethoden detail-

liert. Deshalb soll an dieser Stelle darauf verzichtet und eine tabellarische Zusammenfassung (Tabelle 3.57) hinsichtlich positiver Effekte, Nachteile und Einsatzmöglichkeiten gegeben werden.

Tabelle 3.57: Holzvergütungsmaßnahmen

Vergütung	Vorteile	Probleme	Anwendungen	Verklebbarkeit	Besonderheiten
Wärme-behandlung Öl-Hitze behandeltes Holz	verbesserte Dimensionsstabilität edle, dunkle Farbtöne	Verleimungs- und Beschichtungsprobleme Ölaustritt während Nutzungsphase mögl. evtl. Farbänderung keine Zulassung für tragende Bauteile	mit hohen Anforderungen an Dauerhaftigkeit der Konstruktion: Boden- und Terrassenbeläge Spielplätze Fassadenelemente Verschalungen Lärmschutzwände		
Wärme-behandlung Thermally Modified Timber (**TMT**) Thermoholz	positive Beeinflussung Quell- und Schwindverhalten (Dimensionsstabilität) erhöhte Dauerhaftigkeit edle, dunkle Farbtöne	Versprödung und Festigkeitsabnahme -> Sortierung des Ausgangsmaterials notwendig Verringerung der Dichte evtl. Farbänderung gesundheitsschädlicher Schleifstaub keine Zulassung für tragende Bauteile	mit hohen Anforderungen an Dauerhaftigkeit der Konstruktion: - Thermoflooring - Möbel - Spielplätze - Fassaden und Verschalungen	Schwierigkeiten sind nicht bekannt herkömmliche Klebesysteme einsetzbar bei Furnierverleimungen ist auf die geringe Absorptionsfähigkeit des Thermoholzes achten	bisher keine Normung für tragende Bauteile nur zulässig, wenn Verwendbarkeit nachgewiesen wird Versprödung des Materials und thermische Zersetzung unter Abgabe von Aromaten bei Temperaturen > 104°C, besondere Maßnahmen gegen die Aufnahme der Stäube in die Atemwege ergreifen
Verdichtung Verfahren der TU DD	Vergütung hinsichtlich Tragfähigkeit negative Effekte der Dichteverringerung werden aufgehoben	Dimensionsstabilität, Untersuchungen zum gezielten Rückkühlen bzw. Temperieren oder Bedampfen in der Presse wünschenswert gesundheitsschädlicher Schleifstaub durch Wärmebehandlung	Einsatz für tragende Anwendungen angestrebt		
Verdichtung Kunstharzpressholz (**KHP**)	gute mechanische Eigenschaften: hohe Festigkeit und Steifigkeit, gute Abriebfestigkeit, hohe Kerbschlagzähigkeit) widerstandsfähig gegenüber Umwelteinflüssen				Zugfestigkeit: 85...210 N/mm² Biegezugfestigkeit: 155...280 N/mm²

3.7.2.4 Verstärkung mit technischen Textilien

Bei faserverstärkten Kunststoffen (FVK) handelt es sich um Verbundstoffe, die aus Verstärkungsfasern und einem Matrixsystem gebildet werden. Die Tragstruktur wird dabei von den Fasern gebildet und die Kunststoffmatrix sorgt für die Konsolidierung, Formgebung und die Herstellung des Verbundes.

Je nach Dübelanzahl und -durchmesser, Verstärkungsart und Grad der Verstärkung sowie Richtung der Beanspruchungen können für diese Verbindungen (mit Dübeln oder Bolzen), Erhöhungen der Tragfähigkeit um 200% nachgewiesen werden. Hierbei ist sowohl die Verbesserung der

Festigkeit als auch der Steifigkeit gemeint. Durch Kombination mit anderen Verstärkungsmaßnahmen, wie das Verdichten von Holz mit einem Potential von 100...150% Traglastzuwachs können in der Summe Verstärkungswirkungen von insgesamt über 300% erreicht werden.

An der TU Dresden (Sonderforschungsbereich 528 „Textile Bewehrungen zur bautechnischen Verstärkung und Instandsetzung“) wurden textile Gewebe, Gelege und Gestricke auf ihre Verstärkungswirkung hin untersucht. Ein Fokus lag dabei auf der Ertüchtigung von Anschlussbereichen. Die Tabelle 1.2 aus dem state of the art – Ingenieurholzbau gibt eine Übersicht hinsichtlich der Ergebnisse zu Verstärkungswirkung von kommerziellen Geweben, Nähgelegen und biaxial verstärkten Gestricken im Bereich eines Einzeldübels mit großem Durchmesser.

Durch die eingebrachte Bewehrung könnte eventuell auf eine Abminderung der wirksamen Dübelanzahl, wie sie die DIN 1052: 2004-08 in Kapitel 12.3 (9) vorschreibt, verzichtet werden, wenn der rechnerische Nachweis, dass die auftretenden Spaltzugkräfte vor den Dübeln durch die dann als Querzugbewehrung wirkenden textilen Strukturen aufgenommen werden, erbracht wird [203].

Neben der Verstärkungswirkung in statischer Hinsicht haben Faserbewehrungen auch für dynamische Beanspruchungen große Vorteile. Aus Erdbebenbeanspruchungen oder anderen dynamischen Einwirkungen resultierende Belastungen erfordern von Traggliedern und Anschlüssen im Holzbau eine erhöhte Duktilität. Zusätzlich erhöhen, lässt sich diese Duktilität durch das Aufbringen von textilen Bewehrungen im Bereich der Anschlussmittel. Außerdem verbessert sich das Nachbruchverhalten maßgeblich. Das trägt zusätzlich zu einer Erhöhung des Sicherheitsniveaus bei, weil unter Umständen der Kollaps des Gesamttragwerks vermieden werden kann [203].

3.7.2.4.1 Verstärkung von konventionellen Stabdübeln mit technischen Textilen oder Faserhalbzeugen

Derzeit werden Gelenkbolzenverbindungen (GBV) nur in Verbindung mit verstärkten Nagelblechen verwendet. Da ein hoher Fertigungsaufwand notwendig ist, wurden GBV oft nur in sehr großen Fachwerkbindern eingesetzt. Im Fall von kleineren Tragwerken werden GBV wegen der hohen Anzahl von Nägeln meist unwirtschaftlich und werden deshalb nur selten (z.B. bei der Verankerung von Zugbändern aus Stahl) eingesetzt.

Mit einer Verstärkung des Anschlussbereiches durch faserverstärkte Kunststoffe (FVK) soll die Höhe der Traglast und der Steifigkeit von Gelenkbolzenverbindungen auf die eines ungestörten Holzbauteils angehoben werden. Die Traglast der Verbindung muss also so erhöht werden, dass diese die Zugfestigkeit des Bruttoholzquerschnittes – mindestens 80 % - erreicht. Das hieße, dass die Traglast einer GBV der einer geklebten Verbindung (z.B. einer Universalkeilzinkenverbindung - UKZV) entspräche.

Der Wirkungsgrad unter Zug einer UKZV liegt bei ca. 80 %, der einer Schäftung bei ca. 90 % und der einer Stabdübelverbindung bei ca. 50 % des Holzquerschnittes.

Um die Lochleibungsfestigkeit und die Bettungssteifigkeit verstärkter Gelenkbolzenverbindungen zu bestimmen, wurden an der TU Dresden im Otto-Mohr-Labor standardmäßige Lochleibungsprüfungen durchgeführt. Diese Zugprüfungen erfolgten nach DIN 383: 1993 (Holzbauwerke – Prüfverfahren: Bestimmung der Lochleibungsfestigkeit und Bettungswerte für stiftförmige Verbindungsmittel).

In der Summe wurden 20 Proben untersucht. Dabei wurde folgende Probenkennzeichnung vereinbart [206]:

z.B. H50_GFK+TK_Schä

1 2 3 4

1 – Grundmaterial: H = Holz

2 – Bolzendurchmesser in mm

3 – Verstärkung + zusätzliche Rückverankerung der Verstärkung (TK Textilglaskomplex)

H	Referenzproben Holz
JOJO	GF-Gestrick + Epoxy (vier kreisrunde Gestricke)
GFK	GF-Gelege + Epoxy (0°/ ±45°/ 90°)*
GW	GF-Gewebe + Epoxy
ST	Stahlblech (zwei kreisrunde Stahlbleche t=3mm, gelocht)
FL	Fiberline GFK Flachprofile
KHP	Kunstharzpressholzplatte (kreuzweise verleimte Furniere, gelocht)

* Faserorientierung der UD-Gelege: 43% - 0°; 40% - ±45°; 17% - 90° Lagen; insgesamt 30 Lagen UD-Gelege mit einem Flächengewicht von 310 g/m² (Faservolumenanteil ca. 30%)

4 – Schä – Verbindungen geschäftet doppeltes Blatt, Neigung h/l = 1/3

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sollen hier zusammenfassend in einem Diagramm dargestellt werden.

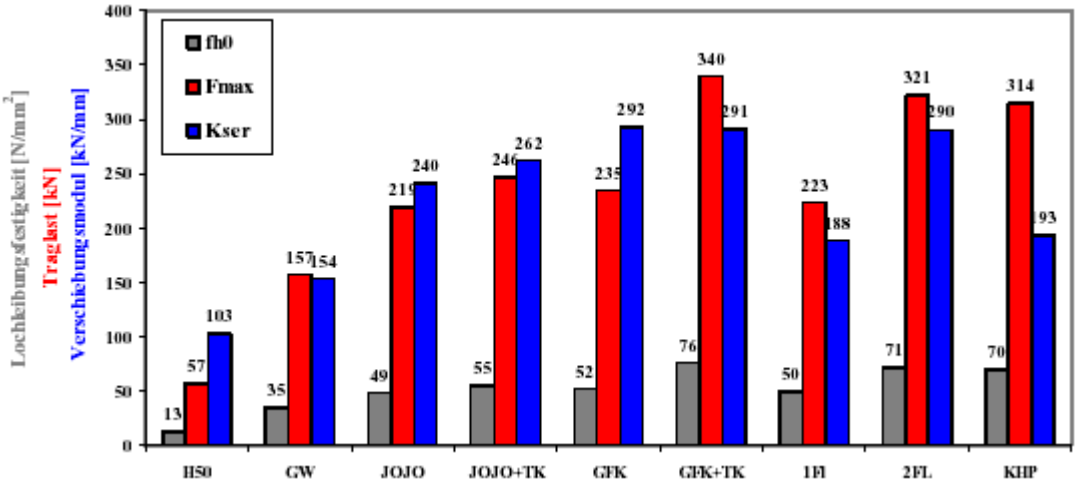


Abb. 3.265: Lochleibungsfestigkeiten, Traglasten und Verschiebungsmoduln [206]

Es ist erkennbar, dass die Verstärkung der Anschlussbereiche zu einer deutlichen Steigerung der Traglast und Steifigkeit von Gelenkbolzenverbindungen führt. Vergleichend mit den unverstärkten Referenzverbindungen (H50) konnte – je nach Art und Grad der Verstärkung – die Traglast um das bis zu Sechsfache und die Steifigkeit um das bis zu Dreifache gesteigert werden. Das der Verstärkungseffekt hinsichtlich der Tragfähigkeit so hoch ausfällt, liegt wohl vor allem an der geringen Festigkeit der unverstärkten Referenzverbindungen.

Sämtliche geprüfte Proben wurden aus Brettschichtholz der Sortierklasse BSH GL24 hergestellt, dabei lag die Rohdichte des Fichtenholzes zwischen 450 und 580 kg/m³. [206]

3.7.2.4.2 Bemessungsmodel für verstärkte Gelenkbolzenverbindungen

Ausgehend von den Versuchsergebnissen wurde ein Bemessungsmodell für verstärkte Gelenkbolzenverbindungen [207] vorgeschlagen. Dieses enthält unter anderem die erweiterte Johansen-Theorie nach Werner.

Abfrage, ob die Klebefuge angesetzt werden darf, muss vorgeschaltet werden.

Der Ansatz der Verstärkung mittels Klebungen wurde gewählt, um eine höhere Lochleibungsfestigkeit zu erreichen. Das Spalten sollte weitestgehend verhindert werden, um so geringere Randabstände zu ermöglichen.

Um die Diskrepanz zwischen der Versagensgefahr und damit verbundenen hohen Sicherheitsfaktoren und dem eigentlichen hohen Tragfähigkeitspotential zu überwinden, sind weitere Untersuchungen notwendig.

3.7.2.4.3 Weiterhin besteht hinsichtlich folgender Punkte weiterer Forschungsbedarf [207]:

- Die Bemessungsgleichungen für Stabdübelverbindungen mit verstärkten Anschlussbereichen nach Werner gelten für Furnierschichtplatten, Sperrholz etc., können jedoch nicht für hochfeste GFK Verstärkungen angewandt werden. Die Gleichungen sind zu überarbeiten – Abminderung der Lochleibungsfestigkeit des GFKs entsprechend der Bruchdehnung des Holzes.
- Die Wirkung der Scheibendübel-Kontaktfläche kann auf Grund der Verleimung in Rechnung gestellt werden. Dies ist jedoch von den Steifigkeiten der druck- und schubbeanspruchten Klebung abhängig – dazu werden numerische Untersuchungen erforderlich.
- Die Bemessung geklebter Verbindungen ist generell schwierig – erfordert hohe Teilsicherheitsbeiwerte. Zudem ist der Spannungsverlauf auf Grund der komplexen Geometrie nur numerisch erfassbar.
- Der Ansatz einer gleichmäßigen Schubspannungsverteilung über die Klebefläche ist nicht gerechtfertigt – die berechneten Traglasten sind demnach nicht auf der sicheren Seite.
- Ziel sollte die Überdimensionierung der Verbundfläche sein, so dass die Bemessung nach Johansen-Theorie (stiftförmige VBM) erfolgen kann.
- Problematisch sind große Bolzendurchmesser – keine plastischen Gelenke in den Dübeln – dies erfordert duktile VBM – Lochleibungsversagen.

3.7.3 Ausarbeitung von Tragwerkslösungen

Autoren: Petra Kubowitz, Yvette Lemke, Anke Schäcke (alle IaFB)

3.7.3.1 Allgemeine Ziele

Autor: Yvette Lemke (IaFB)

Hauptanspruch des Projektes war es, mittels technischer Möglichkeiten (wie u.a. mittels technischer Textilien, vergüteter, verdichteter und geformter Hölzer) Holzbauteile in ihrer Leistungsfähigkeit zu steigern. Dazu gehört, die Tragfähigkeit und die Dauerhaftigkeit zu steigern, sowie Anschlüsse so zu konstruieren, dass diese nicht mehr bemessungsmaßgebend werden. Damit soll es möglich werden, mit Holz beanspruchungsgerecht konstruieren zu können.

Ergebnisse dieser Überlegungen und Untersuchungen sind verschiedene praktikable Tragwerkslösungen, die um Folgenden vorgestellt werden.

Damit werden Möglichkeiten aufgezeigt, welche die Probleme des heutigen Holzbaus angehen und zu neuen Konstruktionsideen sowie neuen Denkweisen im Umgang mit dem Baustoff führen. Hierbei sollen substantielle Verbesserungen vor allem des Tragverhaltens, der Gebrauchstauglichkeit und der Dauerhaftigkeit, aber auch der Wirtschaftlichkeit und des ästhetischen Erscheinungsbildes von Holztragwerken erreicht werden.

3.7.3.2 Verstärkte Bauteile

Autor: Anke Schäcke (IaFB)

Die mechanischen Eigenschaften von Holz erfordern oft Querzug-, Biegezug- oder Schubverstärkungen an Bauteilen, um adäquate Querschnittsdimensionen zu technischen Profilen anderer Materialen zu erreichen. Im HHT-Projekt wurden Biege- und Längskraftverstärkungen von Holzbauteilen, Verstärkungen von Anschlüssen und Krafteinleitungsbereichen, sowie Verstärkungen von Formholzprofilen untersucht. Dabei haben sich die Verstärkungsmaterialien Kunstharzpressholz (KHP) und Faserkunststoffverbunde (FKV) als sehr geeignet für Holzbauteile erwiesen, deren Einsatz in vielfältigen Anwendungen über die aktuellen Forschungsergebnisse hinaus bereits gezeigt wurden, jedoch fehlt es oft an in der Baupraxis einsetzbaren und geregelten Lösungen.

Ein Faserkunststoffverbund ist ein Werkstoff bestehend aus Verstärkungsfasern und einer Kunststoffmatrix. Durch das Einbetten der Fasern in die Matrix werden die Fasern räumlich fixiert und die Lasteinleitung und Lastausleitung ermöglicht. Die Matrix schützt die Fasern gegen Umgebungseinflüsse und stützt sie z.B. gegen Ausknicken bei faserparallelem Druck. Die FKV werden beeinflusst durch den Werkstoff (Fasern, Matrix, Halbzeuge), die Fertigungstechnik (Umformen, Pressen, Laminieren, Wickeln) und die Konstruktion (Platten, Profile, Rohre, Formteile). Zu den wichtigen Materialien wurden spezielle HHT-Merkblätter erarbeitet und dem Anhang beigefügt (siehe Anlage A4: HHT-Merkblätter Material.).

FKV weisen hohe spezifische Steifigkeiten und Festigkeiten auf. Im Holzbau sind beispielsweise CFK-Lamellen zur Biege- und Längskraftverstärkung von Holzbauteilen in zunehmendem Maß für den Einsatz im Neubau und in der Sanierung interessant. In Abhängigkeit vom eingesetzten Material und dem erzielten Bewehrungsgrad (~0,5%) führt diese Art der Verstärkung von BSH-Biegeträgern zu einem Anstieg von Festigkeit und Steifigkeit zwischen 20% und 55% [196]. Die erweiterte Berechnung und Bemessung von verstärkten Bauteilen (z.B. BSH - Biegeträger mit Lamellen aus FKV) wird im Abschnitt 3.7.3.3 Hybridbauteile detailliert vorgestellt.

Textile Verstärkungen von Anschlüssen und Krafteinleitungsbereichen stellen neben der Zug-, Biegezug- und Schubverstärkung von kompletten Bauteilen eine der wichtigsten Einsatzmöglichkeiten für FKV im Holzbau dar. Mit beanspruchungsgerecht verstärkten Holzbauteilen (beispielsweise mittels ringförmiger Mehrlagengestricke) lassen sich die Traglast und die Steifigkeit der Verbindung erhöhen. Durch das veränderte Bruchverhalten textilverstärkter Anschlüsse tritt das für konventionelle Holzverbindungen mit einer geringen Anzahl großer Dübel typische spröde Versagen nicht mehr auf, dadurch werden Tragreserven in der Verbindung erschlossen. Im Projekt sind ringförmige Mehrlagengestricke zur Verstärkung von Verbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmittel entwickelt und umgesetzt worden. Mit der Flachstrickmaschine und Maschenfäden aus Glas konnten Innendurchmesser mit minimal ca. 20 mm (Verbindungsmitteldurchmesser) bei einer Gestrickbreite von 50 mm realisiert werden (vgl. Kap. 3.4.1). Praxistaugliche Bauteile (Patches) entstehen durch Imprägnierung der Gestricke mit einem Harzsystem. Als Matrixsystem wurde ein duromeres Epoxid-Harzsystem gewählt. Als Verfahren zur Bauteilherstellung wurde ein Harzinjektionsprozess im Handlaminierungsverfahren und mit dem RTM-Werkzeug (Flüssigimprägnierverfahren) untersucht. Die entwickelten Patches haben einen Außendurchmesser von 120 mm und eine Dicke von 10 mm mit einem vorgesehenen Dübelloch von 20 mm. Der Faservolumengehalt der Bauteile liegt derzeit bei etwa 20%. Dieser Prozentsatz ist in Zukunft zu erhöhen, um die Traglast zu steigern. Es war geplant, diese Bauteile im 3. Pilotprojekt „Hess-Innenhofüberdachung“ für die Verstärkung der Passbolzenverbindung in einigen Kreuzungsknoten einzusetzen (Abb. 3.266).

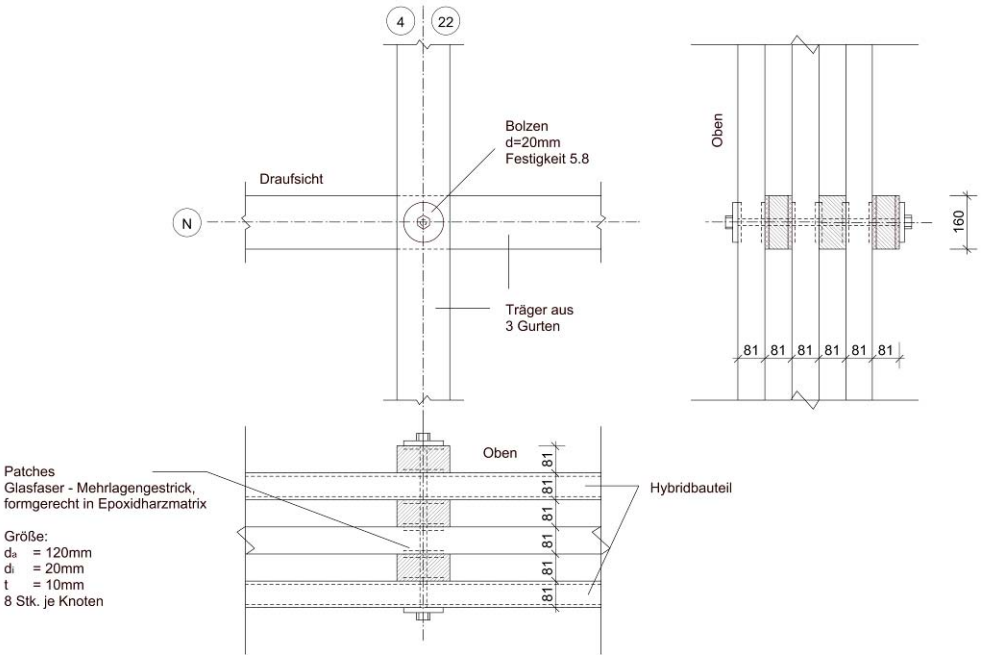


Abb. 3.266: Verstärkte Kreuzungsknoten in den Achsen N/4 und N/22 im 3. Pilotprojekt

Ein Bemessungsvorschlag für stiftförmige Verbindungen mit Verstärkungen aus FKV wurde in Anlehnung an die Herleitung von Werner [197] für stiftförmige Verbindungen mit Verstärkungen aus Holzwerkstoffplatten erarbeitet und wird in Abschnitt 3.7.3.5 vorgestellt.

Eine mit textilen Fasern bewehrte Stütze zählt ebenfalls zu den verstärkten Bauteilen, die im Projekt untersucht wurden. Durch eine Faserbewehrung kann die Traglast einer Formholzröhre gegenüber einer nicht verstärkten signifikant verbessert werden. Weitere Erläuterungen dazu im Abschnitt 3.7.3.4.

Neben den FKV sind auch verdichtetes Holz oder Kunstharzpressholz (KHP) bestens für das Verstärken von Bauteilen oder aber auch von Anschlüssen und Krafteinleitungsbereichen geeignet. KHP weist hohe spezifische Steifigkeiten und Festigkeiten auf. Daher sind die Einsatzgebiete im Holzbau mit denen von FVK zu vergleichen. KHP ist ein mit Kunstharz getränktes Produkt aus unter Temperatureinwirkung verdichteten, faserparallel oder kreuzweise verleimten Furnierschichtlagen. Insbesondere die Kombination von konventionellen BSH-Bauteilen mit KHP in den Decklagen ist eine Möglichkeit für eine wirksame Verbesserung des Tragverhaltens und der Dauerhaftigkeit von Holzkonstruktionen. Diese Bauweise kann neue Einsatzmöglichkeiten im Holzbau mit erhöhten Anforderungen an die Dauerhaftigkeit erschließen. Im 1. Pilotprojekt „Fußgängerbrücken“ wurden Hybridträger als Brückenlängsträger verwendet. Im 3. Pilotprojekt „Hess-Innenhofüberdachung“ wurden für einzelne Dachträger Hybridbauteile aus BSH-Gurten mit verklebten KHP-Lamellen eingesetzt (Abb. 3.267).

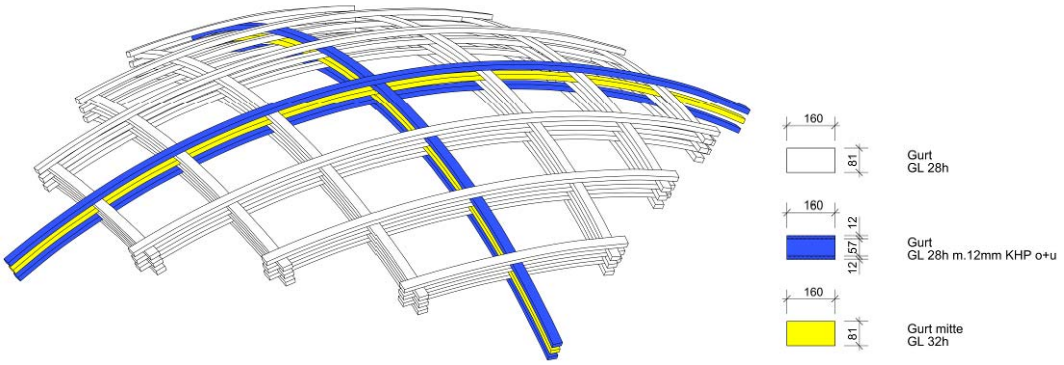


Abb. 3.267: Isometrie Verstärkung der Gurte in den Mittelachsen N und 13 im 3. Pilotprojekt

Bei den oberen und unteren Gurten in den Mittelachsen N und 13 ist die Normalkraftbeanspruchung in Kombination mit der Biegebeanspruchung am größten. Durch die Wahl von Verstärkungslamellen aus KHP war es möglich, eine beanspruchungsgerechte Dachkonstruktion zu entwickeln.

3.7.3.3 Hybridbauteile

Autor: Petra Kubowitz (IaFB)

3.7.3.3.1 Allgemeines

Wie im Bauwesen üblich werden unter Hybriden Verbundbaustoffe bzw. -bauteile verstanden. Die Einzelelemente weisen dabei unterschiedliche Eigenschaften auf und können jeweils bestimmte Anforderungen erfüllen. Durch das Zusammensetzen der Elemente können Eigenschaften verbessert, Schwächen vermindert oder auch neue Eigenschaften erzielt werden. Ein Hauptziel des HHT-Projektes war die Herstellung von Hochleistungsbauprodukten mit je nach Anforderungen gewünschten Eigenschaften (vgl. Kap. 1.2). Eine Möglichkeit, dieses Ziel zu erreichen, besteht in der Verwendung von Hybridbauteilen. Dabei können sowohl die Tragfähigkeit als auch die Gebrauchstauglichkeit, die Dauerhaftigkeit, ökonomische oder ökologische Aspekte, die Ästhetik oder eine Kombination einiger oder sogar aller genannter Punkte im Vordergrund stehen.

Formholzprofile können zwar ebenfalls als Hybridbauteile bezeichnet werden, werden aufgrund ihrer Besonderheit jedoch als getrennter Punkt behandelt (siehe 3.7.3.3).

Im Folgenden werden Hybridbauteile aus üblichem Voll- oder Brettschichtholz (als Grundmaterial) in Verbindung mit vergüteten Produkten auf Holzbasis wie beispielsweise TMT oder KHP betrachtet. Für Biege- oder Längskraftverstärkungen aus anderen Materialien wie beispielsweise Faserkunststoffverbunde können die folgenden Betrachtungen ebenfalls Anwendung finden. Dabei wird jeweils starrer Verbund vorausgesetzt. Die einzelnen Lamellen müssen folglich miteinander verklebt werden, für nachgiebige Verbindungsmittel gelten die in Abschnitt 3.7.3.3.2 vorgestellten Rechenmodelle nicht. Zudem wird ein Ebenbleiben der Querschnitte vorausgesetzt und damit eine über den Querschnitt linear verteilte Dehnung angenommen.

Werden Hybridbauteile mit dem Ziel der Tragfähigkeitserhöhung erstellt, wird auch von verstärkten Bauteilen gesprochen. Damit eine Verstärkung tragfähigkeitssteigernd wirken kann, muss sie eine Mindestfestigkeit aufweisen, die unter der vereinfachten Annahme einer linearen Spannungs-Dehnungsbeziehung (Gültigkeit des Hook‘schen Gesetzes) wie folgt ermittelt werden kann:

$$f_{Verstärkung} \geq f_{Grundmaterial\,(Holz)} \cdot \frac{E_{Verstärkung}}{E_{Grundmaterial}} \tag{3.101}$$

Sinnvoll ist eine Verstärkung demnach nur dann, wenn sie nicht nur eine höhere Festigkeit sondern auch eine höhere Steifigkeit als das Grundmaterial aufweist, um aufgrund dieser größeren Steifigkeit (und der Verteilung nach den Steifigkeiten) dann Lastanteile anziehen zu können. Für den Lastabtrag bei rein linear-elastischem Verhalten ideal wäre ein gleiches Verhältnis von Festigkeiten und Steifigkeiten. Ist der Faktor der Festigkeiten größer als der der Steifigkeiten, kann die Festigkeit der Verstärkung nicht voll ausgenutzt werden, das Grundmaterial wird für die Bemessung maßgebend (Gleichung (3.102)). Dies ist üblicherweise der Fall. Ist der Faktor hingegen kleiner, wird die Verstärkungsfestigkeit maßgebend und das Grundmaterial nicht voll ausgenutzt (Gleichung (3.103)).

$$\frac{f_{Verstärkung}}{f_{Grundmaterial\,(Holz)}} > \frac{E_{Verstärkung}}{E_{Grundmaterial}} \quad : \text{ Grundmaterial bemessungsmaßgebend} \tag{3.102}$$

$$\frac{f_{Verstärkung}}{f_{Grundmaterial\,(Holz)}} < \frac{E_{Verstärkung}}{E_{Grundmaterial}} \quad : \text{ Verstärkungsmaterial bemessungsmaßgebend} \tag{3.103}$$

Besondere Vorteile ergeben sich, wenn durch das Zusammensetzen verschiedener Einzelteile zu Hybridbauteilen mehrere Anforderungen erfüllt werden können, beispielsweise nicht nur die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit sondern auch die Dauerhaftigkeit gesteigert und negative Umwelteinflüsse vermindert werden. Entscheidend ist jedoch, dass anfänglich die Anforderungen an das Hybridbauteil definiert werden und die Zusammensetzung der Einzelteile zum Hybrid dann auf genau diese Anforderungen abgestimmt wird. Ist beispielsweise lediglich eine erhöhte Dauerhaftigkeit erwünscht bzw. erforderlich, muss kein hochfestes Material gewählt werden. Die anforderungsgerechte Zusammenstellung von Hybridbauteilen sollte nicht zuletzt aus ökologischen und ökonomischen Gründen erfolgen.

Im HHT-Projekt waren schwerpunktmäßig zwei verschiedene Hybridbauteile Gegenstand der theoretischen und praktischen Untersuchungen. Einerseits sollten Hybridträger realisiert werden, für die – gegenüber üblichem Brettschichtholz – erhöhte Tragfähigkeiten und erhöhte Dauerhaftigkeiten gefordert wurden. Andererseits sollten Hybridbohlen gefertigt werden, die zwar geringere Anforderungen bezüglich der Tragfähigkeit zu erfüllen hatten, jedoch ebenfalls eine erhöhte Dauerhaftigkeit aufweisen sollten. Für beide Hybridbauteilarten wurden im Rahmen eines Pilotprojektes zudem ökologische und ökonomische Bewertungen vorgenommen, um die gewählten Zusammensetzungen auch diesbezüglich kritisch hinterfragen zu können.

Hybridträger

Als Grundmaterial der Hybridträger wurde übliches Brettschichtholz gewählt. Die Verklebung mit einem zweiten Material zu einem Hybrid sollte sowohl die Anforderungen an eine erhöhte Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit als auch an eine erhöhte Dauerhaftigkeit erfüllen. Daher wurde ein Material mit hohen Festigkeiten und Steifigkeiten sowie hoher Dauerhaftigkeit gegenüber Pilz- und Insektenbefall bzw. hoher Feuchteresistenz gesucht. Verpresstes bzw. verdichtetes Holz, wie zur Herstellung von Formholzprofilen genutzt, weist zwar hohe Festigkeiten und Steifigkeiten auf, die Dauerhaftigkeit wird durch die Verdichtung jedoch weniger beeinflusst, unter Feuchte findet sogar wieder eine Teilentdichtung statt (s. auch „Shape-Memory“-Effekt in Kap. 1.4.2.1.2). Daher muss ein Feuchteangriff während der Nutzung verhindert werden. Dies kann durch eine Epoxidharztränkung des Materials erfolgen. Unter dem Namen Kunstharzpressholz (KHP) ist ein ähnliches Material seit fast einem Jahrhundert bekannt, für das Bauwesen bisher jedoch nicht genutzt und auch nicht zugelassen. Es besteht aus verdichteten, verklebten und kunstharzgetränkten Furnierholzschichten. Durch die hohe Verdichtung – bis zu Dichten von 1,4 g/cm³ – werden hohe Festigkeiten und Steifigkeiten erreicht. Im Projekt wurde KHP aus Buchenholzfurnieren der Firma dehonit verwendet. Die Biegebruchfestigkeit beträgt etwa 220 N/mm², der Biege-E-Modul etwa 20000 N/mm² (vgl. auch Kap. 3.2.8.4). Wird ein vollgetränktes Produkt gewählt, liegt neben der hohen Tragfähigkeit auch eine hohe Dauerhaftigkeit vor. Hohlräume sind dann vollständig mit Kunstharz gefüllt, so dass kein Wassereintritt erfolgen kann. Nebeneffekt ist daher eine hohe Formbeständigkeit, da Schwinden und Quellen kaum auftreten. Im Projekt wurden sowohl teilgetränkte als auch vollgetränkte Produkte untersucht. Die Tragfähigkeit unterscheidet sich kaum, die Dauerhaftigkeit teilgetränkter KHP-Lamellen ist jedoch überaus gering, sie sollten daher nicht im Außenbereich eingesetzt werden (vgl. auch Kap. 3.2.7.3).

KHP-BSH-Hybridträger dieser Art wurden patentiert (vgl. Patentschrift DE102008004091A1, www.patent-de.com/20090716/DE102008004091A1.html).

Zur Tragfähigkeitssteigerung von Biegeträgern wurden einerseits reine Biegezugverstärkungen (Anordnung einer KHP-Lamelle außen am Biegezugrand) und andererseits kombinierte Biegezug- und Biegedruckverstärkungen (Anordnung je einer KHP-Lamelle am oberen und unteren Querschnittsrand, vgl. auch Abb. 3.268) vorgeschlagen und am ISH getestet. Bestehen geringe Anforderungen an die Dauerhaftigkeit, müssen die KHP-Lamellen nicht über die gesamte Trägerlänge durchgeführt werden, sondern können nur in den Bereichen angeordnet werden, in welchen die Größe des Momentes (bzw. allgemein der Beanspruchung) dies erfordert. Daher wurden zudem Biegeträger im Vierpunktbiegeversuch getestet, die lediglich im mittleren Bereich verstärkt wurden. Sämtliche Versuche wurden am OML der TU Dresden vom ISH durchgeführt

und sind in Kap. 3.5.6 beschrieben. Soll neben der Tragfähigkeit auch die Dauerhaftigkeit gesteigert werden, sind in jedem Fall vollgetränkte KHP-Produkte zu wählen und die Lamellen sinnvollerweise an den freibewitterten Stellen des Trägers anzuordnen. Für Hybridträger mit erhöhten Anforderungen an Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit sind daher durchlaufende KHP-Lamellen am oberen und unteren Querschnittsrand sehr effektiv. Die kombinierte Wirkung dieser Verstärkungslamellen führte dazu, dass für Hybridträger solcher Art im Jahr 2009 ein Patent erteilt wurde (vgl. Kap. 4.3). Aus Gründen der Dauerhaftigkeit gegen Pilzbefall kann zudem überlegt werden, den Brettschichtholzkern aus Holzarten höherer Dauerhaftigkeit zu fertigen. Im Projekt wurde daher Lärche aus alpinen Einschlaggebieten untersucht und zur Anwendung bei der HHT-Brücke im Pilotprojekt Fußgängerbrücken vorgesehen (vgl. Kap. 3.2.7.2 und 3.8.2.3).

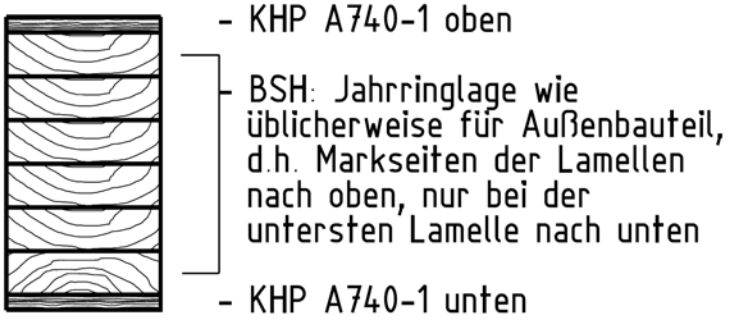


Abb. 3.268: Querschnitt eines KHP-BSH-Hybridträgers

Das unterschiedliche Verhalten bei Feuchteangriff führt bei Hybridbauteilen aus Brettschichtholz und Kunstharzpressholz zu Zwangsspannungen aufgrund der unterschiedlichen Quell- und Schwindverformungen der Einzellamellen. Um diese zu vermindern, können Entlastungsnuten in den miteinander verklebten Lamellen unterschiedlichen Materials vorgesehen werden. Zudem ist es günstig, die unvergüteten Brettschichtholzlamellen mit der (weniger schwindenden bzw. quellenden) Kernseite zum KHP hin anzuordnen (vgl. Abb. 3.268). Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass in der Freibewitterung auch Probestücke ohne Entlastungsnuten und mit umgedrehten Lamellen lediglich im Stirnholzbereich Quell- und Schwindrisse zeigten (vgl. Kap. . 3.2.7.3). Offensichtlich konnten die klimatisch bedingten Zwangsspannungen aufgenommen werden.

Aus ökologischer Sicht muss die Verwendung von Kunstharz kritisch hinterfragt werden. In KHP-Produkten ist nicht nur ein großer Harzanteil vorhanden – dieser ist aus Gründer der Dauerhaftigkeit nötig und erwünscht – ein weit größerer Anteil verdampft während des Herstellprozesses, wird also für die Herstellung zurzeit benötigt, ist im Endprodukt jedoch nicht enthalten. Dies bewirkt, dass die Ökobilanz gegenüber reinem Brettschichtholz sehr negativ ausfällt und die Umwelteinflüsse fast ähnlich der eines vergleichbaren Stahlträgers zu werten sind (vgl. Kap. 3.9.2). Erst wenn durch langjährigen Einsatz im Außenbereich nachgewiesen werden kann, dass die unterstellte höhere Dauerhaftigkeit im Vergleich zu imprägnierten Nadelhölzern zuverlässig vorhanden ist, lohnt sich der Einsatz dieses Produktes auch aus ökologischer Sicht. Nichtsdestotrotz sollte der Harzeintrag im Herstellprozess vermindert werden. Aus ökonomischer Sicht ist hinzuzufügen, dass KHP zurzeit noch sehr teuer ist. Hier ist mit Preisen von etwa 6,50 €/kg und damit bei den verwendeten hohen Dichten mit etwa 9000 €/m³ zu rechnen. Dies übersteigt den Preis unvergüteten Brettschichtholzes bei Weitem und wird sich voraussichtlich erst ändern, wenn Serienprodukte gefertigt werden können. Aus diesen Gründen sollte KHP nur dort eingesetzt werden, wo es auch gebraucht wird und seine Vorteile genutzt werden können. Dazu gehört, dass sowohl Anforderungen an erhöhte Tragfähigkeiten als auch an erhöhte Dauerhaftigkeiten bestehen und die diesbezüglichen Potentiale des Materials ausgeschöpft werden.

Der große Harzanteil führt bei hoher ständiger Belastung zu einem ausgeprägten Kriechen des Kunstharzpressholzes (vgl. 3.2.8.5). Aus diesem Grund sind – neben reinen KHP-Trägern – auch BSH-KHP-Hybridträger nicht für Anwendungen mit einem hohen ständigen oder quasiständigen Lastanteil geeignet. Glücklicherweise sind die Anteile aus ständigen Lasten im Holz-

bau eher gering. Es sollte darauf geachtet werden, dass dies auch unter Verwendung verdichteter – und damit schwererer – Holzprodukte beibehalten wird. Auch aus diesem Grund sind BSH-KHP-Hybridträger reinen KHP-Trägern vorzuziehen.

Hybridbohlen

Für Hybridbohlen wurde als Grundmaterial übliches Nadelholz gewählt. Zur Erhöhung der Dauerhaftigkeit wurde auf der Oberseite eine TMT-Lamelle vorgesehen. TMT (thermally modified timber) ist ein thermisch modifiziertes Holz, auch unter dem Namen Thermo-Holz bekannt, was durch die Hitzebehandlung eine stark erhöhte Feuchteresistenz aufweist. Negativer Nebeneffekt ist jedoch ein Absinken der Festigkeiten und vor allem eine Versprödung des Materials, gerade im ohnehin eher spröden Zugbereich. Aus diesem Grund ist TMT für tragfähigkeitssteigernde Maßnahmen ungeeignet, und ein Einsatz unter Zugbeanspruchungen sollte vermieden werden (vgl. auch Kap. 1.4.2.1.1). Eine Anordnung im Druckbereich zur Erhöhung der Dauerhaftigkeit ist jedoch möglich und wurde im Projekt daher vorgeschlagen und untersucht. Dabei ist zu beachten, dass die Schwind- und Quellverformungen wegen der äußerst geringen Feuchteaufnahme klein gegenüber üblichem Nadelholz ausfallen, weshalb mit Zwangsspannungen zu rechnen ist, die nicht vollständig abgebaut werden. Um mögliche Rissbildungen zu verringern, sollten daher die unterschiedlichen Schwind- und Quellverformungen in radialer und tangentialer Richtung unter Berücksichtigung der erwarteten Feuchteschwankungen während der Nutzung beachtet werden. Problematisch bei der Beurteilung der Rissgefahr sind die noch unbekannten Querzugfestigkeiten für TMT. Daher kann eine Rissbildung zurzeit weder ausgeschlossen noch nachgewiesen werden. Durch Betrachtung verschiedener Szenarien bzgl. Einbaulage, Ausgangs- und Zielfeuchte der Einzellamellen sollte jedoch die Einbaulage bestimmt werden, bei der die Rissgefahr am geringsten ausfällt. Für die im Projekt ausgeführten Hybridbohlen aus Lärche mit einer Decklamelle aus TMT-Esche ergab sich als günstigste Einbaulage ein Anordnen der oberen TMT-Lamelle mit der Kernseite nach unten auf der Lärchenholzlamelle mit der Kernseite nach oben, so dass also die beiden Kernseiten miteinander verklebt wurden (vgl. Abb. 3.269).

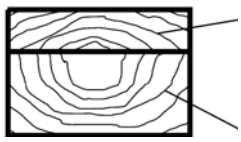


Abb. 3.269: Querschnitt einer Hybridbohle aus TMT-Esche und Lärche

Trotzdem kam es in der Freibewitterung bei einigen Proben zu Rissbildungen im TMT (vgl. auch Kap. 3.2.7.5). Ob sich die erhöhte Rissgefahr auch bei bauteilnahen Abmessungen zeigt, wird durch die Verwendung von TMT-Lärche-Hybridbohlen im Pilotprojekt Fußgängerbrücken (vgl. Kap. 3.8.2) geprüft. Sollten auch dort vermehrte Rissbildungen zu beobachten sein, können Hybridbohlen dieser Art trotz der zu Projektbeginn als sehr vielversprechend erachteten Betrachtungen nicht empfohlen werden. Für tragende Anwendungen sollte dann eher auf andere vergütete Produkte wie beispielsweise acetyliertes Holz zurückgegriffen werden.

Für erhöhte Anforderungen bezüglich der Dauerhaftigkeit sind alle Produkte interessant, bei denen die Wasseraufnahme durch Vergütung des Ausgangsmaterials vermindert wird. Allerdings ist dies immer auch mit kleineren Quell- und Schwindverformungen verbunden, weshalb in Kombination mit unvergüteten Holzlamellen jeweils mit Zwangsspannungen, die nur zum Teil abgebaut werden, zu rechnen ist. Sowohl die Größe der verbleibenden Zwangsspannungen als auch die entsprechenden Festigkeiten sind in zukünftigen Projekten näher zu untersuchen, um die vergüteten Produkte in Hybridbauteilen für tragende Anwendungen mit der üblichen Sicherheit einsetzen zu können.

3.7.3.3.2 Tragfähigkeit

Im Folgenden werden einige Rechenmodelle zur Ermittlung der Tragfähigkeit von einseitig oder beidseitig verstärkten Hybridbauteilen beschrieben. Vorausgesetzt wird, dass die Verstärkungen entweder über die gesamte Trägerlänge durchgeführt werden oder eine ausreichende Verankerungslänge vorhanden ist, so dass ein Versagen der Verankerung ausgeschlossen ist. Auch Querdruckversagen an Lasteinleitungsstellen oder damit verbundenes Querzugversagen in der Umgebung wird nicht behandelt. Somit wird grundsätzlich die Gültigkeit der Bernoulli-Hypothese vom Ebenbleiben der Querschnitte vorausgesetzt. Die Rechenmodelle gelten für Biegeverstärkungen. Für Längskraftverstärkungen können sie ebenfalls genutzt werden, da die Grundgleichungen ohne weiteres übertragbar sind. Alle davon abgeleiteten Gleichungen sind jedoch neu aufzustellen. Für Schubverstärkungen, Querdruck- oder Querzugverstärkungen gelten die Modelle nicht. Hierfür bieten sich die genannten Materialien KHP und TMT auch nicht unbedingt an. Faserkunststoffverbunde mit beanspruchungsgerecht angeordneten Faserrichtungen sind jedoch durchaus denkbar, waren jedoch nicht Gegenstand der hier durchgeführten Untersuchungen.

Für Hybridträger und -bohlen dieser Art ergibt sich das einfachste Rechenmodell bei Ansatz einer linear-elastischen Spannungs-Dehnungsbeziehung bei ungerissenen Querschnitten, was in DIN 1052:2008-12 [2] geregelt ist. Abweichend von der Norm kann jedoch auch ein teilweises Plastifizieren der Druckzone, eine teilweise gerissene Zugzone (analog dem Zustand II im Stahlbetonbau) oder eine Kombination aus beidem angesetzt werden. Die verschiedenen Modelle werden im Folgenden erläutert. Dabei werden jeweils ein Querschnitt mit einer reinen Biegezugverstärkung, welche (bei positivem Moment) am unteren Querschnittsrand angeordnet ist, und ein Querschnitt mit einer Biegedruck- und Biegezugverstärkung, welche am oberen und am unteren Querschnittsrand vorhanden ist, betrachtet (s. Abb. 3.270). Um andere Anordnungen berücksichtigen zu können, werden jeweils die Grundgleichungen angegeben, so dass die Tragfähigkeiten bei Bedarf durch Lösen dieser Gleichungen ermittelt werden können. Zudem wird zur einfacheren Darstellung eine reine Momentenbeanspruchung vorausgesetzt. Bei einer zusätzlichen Längskraft sind die Gleichungen entsprechend um diese Kraftanteile zu erweitern.

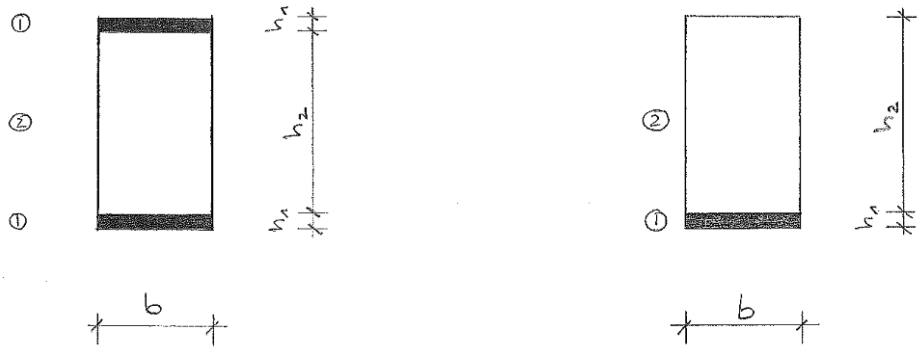


Abb. 3.270: a) beidseitig verstärkter Querschnitt b) einseitig verstärkter Querschnitt

Für alle Rechenmodelle gelten folgende allgemeine Bezeichnungen:

- h: Gesamthöhe des Querschnitts
- b: Breite des Querschnitts
- $h_{1(u/o)}$: Höhe der Verstärkungslamelle $1_{(unten\ bzw.\ oben)}$
- h_2: Höhe des unverstärkten Kerns (Material 2)
- z_{NA}: Abstand des Gesamtschwerpunkts zum unteren Querschnittsrand
- $z_{1(u/o)}$: Abstand des Schwerpunkts von Material $1_{(unten\ bzw.\ oben)}$ zum unteren Querschnittsrand
- z_2: Abstand des Schwerpunkts von Material 2 zum unteren Querschnittsrand

und die Faktoren

$\alpha_{1/2} = \frac{h_{1/2}}{h}$ Höhenverhältnisse

$\alpha_{NA} = \frac{z_{NA}}{h}$ Verhältnis der Höhe des Gesamtschwerpunkts zur Querschnittshöhe

$n = \frac{E_1}{E_2}$ Verhältnis der E-Moduln

Grundsätzlich gelten für jedes Rechenmodell auch die grundlegenden Gleichgewichtsbeziehungen für Kräfte- und Momentengleichgewicht:

$\sum F = 0$ und damit bei reiner Momentenbeanspruchung: $\sum D_i = \sum Z_i$ (3.104)

$\sum M = 0$ und daraus das aufnehmbare Moment $M = \sum M_i$ (3.105)

Rechenmodell 1: linear-elastisch, ungerissen

a) Beidseitig verstärkter Querschnitt (vgl. Abb. 3.270 a))

Für den beidseitig verstärkten, symmetrischen Querschnitt ergibt sich Folgendes:

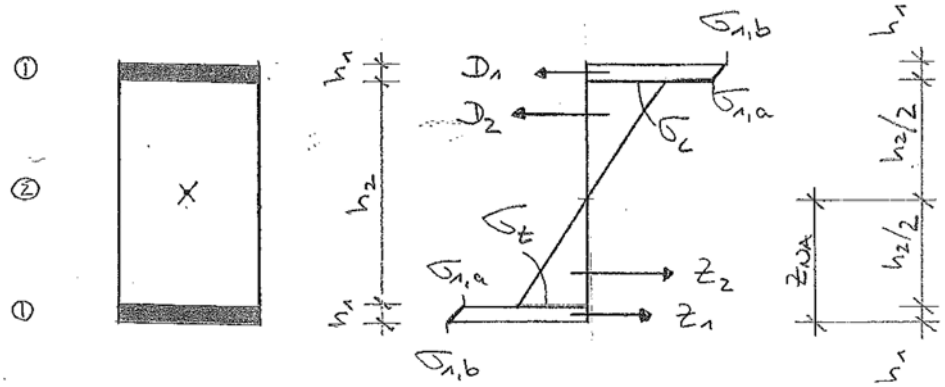


Abb. 3.271: Geometrie und Spannungen des einseitig verstärkten Querschnitts

Wegen der Symmetrie befindet sich die Spannungsnulllinie in Querschnittsmitte, damit gilt.

$$z_{NA} = h_1 + \frac{h_2}{2} = \frac{h}{2} \cdot (2 \cdot \alpha_1 + \alpha_2) \quad (3.106)$$

Wird vorausgesetzt, dass der Biegezugrand des Grundmaterials 2 bemessungsmaßgebend wird, ergeben sich die Spannungen – unter Berücksichtigung des linearen Spannungsverlaufs und daher ähnlicher Dreiecke im Druck- und Zugbereich – wie folgt:

$\sigma_t = f_t$ (Die Zugspannung darf maximal die Zugfestigkeit erreichen) (3.107)

$\sigma_c = f_t$ (aus $\frac{\sigma_c}{h_2/2} = \frac{\sigma_t}{h_2/2}$) (3.108)

$\sigma_{1,a} = n \cdot f_t$ (Gleiche Dehnungen am Übergang von 1 zu 2) (3.109)

$\sigma_{1,b} = f_t \cdot n \cdot \frac{z_{NA}}{z_{NA} - h_1} = f_t \cdot n \cdot \frac{\alpha_{NA}}{\alpha_{NA} - \alpha_1} = f_t \cdot n \cdot \frac{h}{h - 2 \cdot h_1}$ (aus $\frac{\sigma_{1,b}}{z_{NA}} = \frac{\sigma_{1,a}}{z_{NA} - h_1}$) (3.110)

Daher lässt sich das maximal aufnehmbare Moment des symmetrischen Trägers berechnen durch:

$$M = 2 \cdot \frac{1}{2} \sigma_t \cdot b \cdot \frac{h_2}{2} \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{h_2}{2} + 2 \cdot \sigma_{1,a} \cdot b \cdot h_1 \cdot (\frac{h_1}{2} + \frac{h_2}{2}) + 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot (\sigma_{1,b} - \sigma_{1,a}) \cdot b \cdot h_1 \cdot (\frac{h_2}{2} + \frac{2 \cdot h_1}{3}) \quad (3.111)$$

und nach kurzem Umformen bestimmen zu:

$$M = f_t \cdot b \cdot \frac{h^2}{6} \cdot \left[{\alpha_2}^2 + 3 \cdot n \cdot \frac{2 - 2 \cdot \alpha_1}{1 - 2 \cdot \alpha_1} \cdot \alpha_1 \cdot (\alpha_1 + \alpha_2) \right] \quad (3.112)$$

Es sei nochmals darauf hingewiesen, dass vorausgesetzt wird, dass das Grundmaterial (Material 2) bemessungsmaßgebend wird. Soll ein Hybridträger behandelt werden, bei dem zuerst die Festigkeit der Verstärkung (Material 1) erreicht und somit die Verstärkung bemessungsmaßgebend wird ist entsprechend $\sigma_{1,b} = f_{t,\text{Verstärkung}}$ zu setzen und die Spannungsgleichungen sind entsprechend umzustellen. Das Moment ergibt sich dann durch Einsetzen dieser umgestellten Gleichungen in Formel (3.111).

Das Moment kann ebenso nach DIN 1052 errechnet werden, in dem starrer Verbund vorausgesetzt, die Einzelschnittgrößen der Querschnittsteile errechnet und das Gesamtmoment durch Aufstellen des Momentengleichgewichts bestimmt wird.

Die Schubspannungen können ebenfalls nach DIN 1052 bestimmt werden. Daher wird hier nicht darauf eingegangen.

b) Einseitig verstärkter Querschnitt (vgl. Abb. 3.270 b))

Für den einseitig (im Biegezugbereich) verstärkten Querschnitt ergibt sich Folgendes:

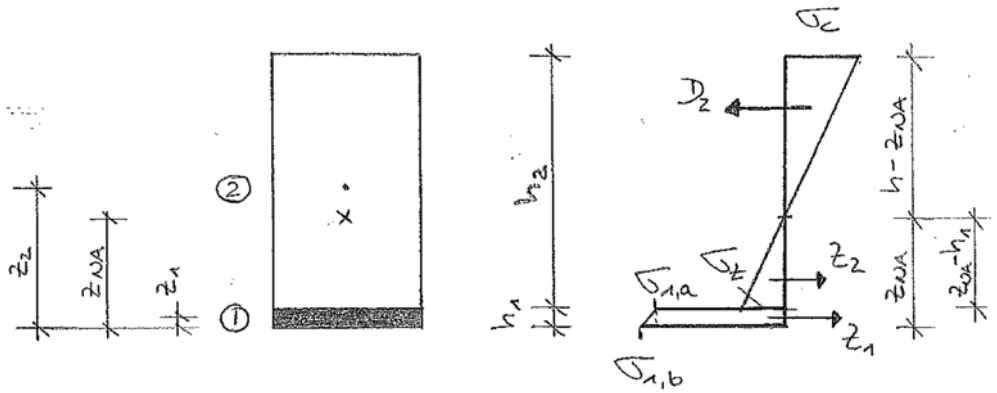


Abb. 3.272: Geometrie und Spannungen des einseitig verstärkten Querschnitts

Es gilt bezüglich der Höhenfaktoren:

$$\alpha_1 + \alpha_2 = 1 = 1^2 = (\alpha_1 + \alpha_2)^2 = {\alpha_1}^2 + 2 \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2 + {\alpha_2}^2 \quad (3.113)$$

Damit lässt sich die Spannungsnulllinie folgendermaßen bestimmen.

$$z_{NA} = \frac{h_2 \cdot z_2 + n \cdot h_1 \cdot z_1}{h_2 + n \cdot h_1} = \frac{\alpha_2 \cdot h \cdot (\alpha_2 / 2 + \alpha_1) \cdot h + n \cdot \alpha_1 \cdot h \cdot \alpha_1 / 2 \cdot h}{\alpha_2 \cdot h + n \cdot \alpha_1 \cdot h} =$$

$$\frac{h}{2} \cdot \frac{{\alpha_2}^2 + 2 \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2 + {\alpha_1}^2 + (n-1) \cdot {\alpha_1}^2}{\alpha_2 + \alpha_1 + (n-1) \cdot \alpha_1} = \frac{h}{2} \cdot \frac{1 + (n-1) \cdot {\alpha_1}^2}{1 + (n-1) \cdot \alpha_1} \quad (3.114)$$

Wird wieder vorausgesetzt, dass der Biegezugrand des Grundmaterials 2 bemessungsmaßgebend wird, ergeben sich die Spannungen – unter Berücksichtigung des linearen Spannungsverlaufs und daher ähnlicher Dreiecke im Druck- und Zugbereich – wie folgt:

$$\sigma_t = f_t \qquad \text{(Die Zugspannung darf maximal die Zugfestigkeit erreichen)} \qquad (3.115)$$

$$\sigma_c = f_t \cdot \frac{h - z_{NA}}{z_{NA} - h_1} = f_t \cdot \frac{h - h \cdot \alpha_{NA}}{h \cdot \alpha_{NA} - h \cdot \alpha_1} = f_t \cdot \frac{1 - \alpha_{NA}}{\alpha_{NA} - \alpha_1} \qquad \left(\text{aus } \frac{\sigma_c}{h - z_{NA}} = \frac{\sigma_t}{z_{NA} - h_1}\right) \qquad (3.116)$$

$$\sigma_{1,a} = n \cdot f_t \qquad \text{(Gleiche Dehnungen am Übergang von 1 zu 2)} \qquad (3.117)$$

$$\sigma_{1,b} = f_t \cdot n \cdot \frac{z_{NA}}{z_{NA} - h_1} = f_t \cdot n \cdot \frac{\alpha_{NA}}{\alpha_{NA} - \alpha_1} \qquad \left(\text{aus } \frac{\sigma_{1,b}}{z_{NA}} = \frac{\sigma_{1,a}}{z_{NA} - h_1}\right) \qquad (3.118)$$

Daher lässt sich das maximal aufnehmbare Moment berechnen durch:

$$\begin{aligned} M = \; & \frac{1}{2} \cdot \sigma_c \cdot b \cdot (h - z_{NA}) \cdot \frac{2}{3} \cdot (h - z_{NA}) + \frac{1}{2} \cdot \sigma_t \cdot b \cdot (z_{NA} - h_1) \cdot \frac{2}{3} \cdot (z_{NA} - h_1) \\ & + \sigma_{1,a} \cdot b \cdot h_1 \cdot (z_{NA} - z_1) + \frac{1}{2} \cdot (\sigma_{1,b} - \sigma_{1,a}) \cdot b \cdot h_1 \cdot (z_{NA} - \frac{h_1}{3}) = \\ = \; & \frac{1}{2} \cdot b \cdot \frac{1 - \alpha_{NA}}{\alpha_{NA} - \alpha_1} \cdot f_t \cdot h \cdot (1 - \alpha_{NA}) \cdot \frac{2}{3} \cdot h \cdot (1 - \alpha_{NA}) \\ & + \frac{1}{2} \cdot b \cdot f_t \cdot h \cdot (\alpha_{NA} - \alpha_1) \cdot \frac{2}{3} \cdot h \cdot (\alpha_{NA} - \alpha_1) \\ & + n \cdot f_t \cdot b \cdot h \cdot \alpha_1 \cdot h \cdot (\alpha_{NA} - \frac{\alpha_1}{2}) + \frac{1}{2} \cdot b \cdot f_t \cdot (\frac{\alpha_{NA}}{\alpha_{NA} - \alpha_1} \cdot n - n) \cdot h \cdot \alpha_1) \cdot h \cdot (\alpha_{NA} - \frac{\alpha_1}{3}) \end{aligned} \qquad (3.119)$$

und nach einigem Umformen bestimmen zu:

$$M = f_t \cdot \frac{b \cdot h^2}{6} \cdot \frac{2}{\alpha_{NA} - \alpha_1} \cdot \left[(1 - \alpha_{NA})^3 - (n - 1) \cdot (\alpha_{NA} - \alpha_1)^3 + n \cdot {\alpha_{NA}}^3 \right] \qquad (3.120)$$

Dies ist zwar eine vielleicht ungewöhnlich anmutende Schreibweise, wird jedoch in [195] ähnlich dargestellt und ist im Grunde nichts anderes als die Regelung in DIN 1052, wo Einzelmomente und Einzelnormalkräfte für die Querschnittsteile angegeben werden. Allerdings ist zu beachten, dass hier vorausgesetzt wird, dass die Zugspannung im Grundmaterial (Material 2) bemessungsmaßgebend wird und sich bis zur Zugfestigkeit steigern lässt. Zwangsläufig entstehen auf der Druckseite dann größere Spannungen, was nach DIN 1052 bei gleichen Biegedruck- und Biegezugfestigkeiten nicht zugelassen wird. Soll das strenge Vorgehen nach Norm berücksichtigt werden, sind die Gleichungen unter folgenden Annahmen $\sigma_c = f_c$ (und damit $\sigma_t < f_t$) umzuformen:

$$\sigma_c = f_c \qquad (3.121)$$

$$\sigma_t = \frac{z_{NA} - h_1}{h - z_{NA}} \cdot \sigma_c = \frac{\alpha_{NA} - \alpha_1}{1 - \alpha_{NA}} \cdot f_c \qquad (3.122)$$

Damit würde der Biegedruckrand bemessungsmaßgebend. Die weiteren Größen ergeben sich daraus. Es sei jedoch angemerkt, dass die untersuchten Hybridträger und -bohlen in der Regel im Biegezugbereich versagen, weshalb das hier vorgestellte, von der Norm abweichende, Vorgehen als vereinfachte Abschätzung für sinnvoll gehalten wird. Die genaueren Rechenmodelle folgen.

Die Schubspannungen können wiederum nach DIN 1052 [2] bestimmt werden.

Rechenmodell 2: elastisch-plastisch, ungerissen

Während im Zugbereich weiterhin ein rein lineares Spannungs-Dehnungs-Verhalten vorausgesetzt wird, wird im Druckbereich für das Grundmaterial (Vollholz oder Brettschichtholz) vereinfacht ein bilineares Verhalten angesetzt. Bis zum Erreichen der Druckfestigkeit verhält sich das unvergütete Grundmaterial linear-elastisch, danach kann die Spannung nicht weiter gesteigert werden, die Dehnungen nehmen jedoch kontinuierlich zu (vgl. Abb. 3.273). Im Querschnitt ergibt sich daher eine teilweise plastifizierte Druckzone. Die Spannungen im Biegezugbereich können bis zum Erreichen der Biegefestigkeit in der äußeren Faser gesteigert werden. Im Biegedruckbereich wird hingegen nach Erreichen der Druckfestigkeit keine weitere Spannungssteigerung zugelassen. Da hier wegen der Plastifizierung nicht nur die äußere Faser sondern größere Querschnittsteile mit der vollen Druckspannung belastet sind und daher das Zusammentreffen der größten Beanspruchung mit dem (durch Fehler bzw. allgemein Inhomogenitäten bedingten) kleinsten Widerstand wahrscheinlicher ist, wird im Sinne des semiprobabilistischen Sicherheitskonzeptes im Holzbau bei diesem Rechenmodell die Biegedruckspannung also nur bis zur Druckfestigkeit und nicht bis zur (höheren) Biegefestigkeit gesteigert.

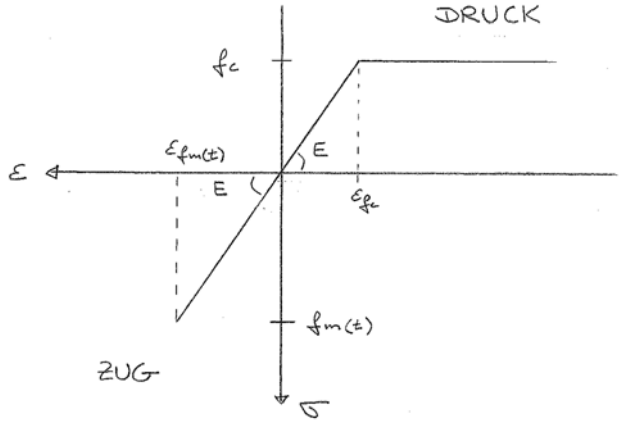


Abb. 3.273: bilineares Spannungs-Dehnungs-Verhalten

Für unverstärkte Träger und auch für mit KHP symmetrisch verstärkte Träger ergibt sich daher der Effekt, dass das so ermittelte maximal aufnehmbare „plastische“ Moment kleiner ausfällt als das sich nach rein linear-elastischer Rechnung ermittelte aufnehmbare Moment. Dies ist natürlich baupraktisch nicht zu begründen und wenig sinnvoll, es ist allein durch die Festlegung der kleineren Druckfestigkeit begründet. Aus diesem Grund sollte das Verfahren lediglich für einseitig im Zugbereich verstärkte BSH-KHP-Hybridträger angewandt werden. Da die Rechenmodelle jedoch allgemeingültig aufgestellt werden, die Grundgleichungen für Hybridträger aller Art gelten und die Festigkeiten durchaus durch Versuchswerte ausgetauscht werden können, werden die Formeln trotzdem für beide Verstärkungsarten angegeben.

a) Beidseitig verstärkter Querschnitt (vgl. Abb. 3.270 a))

Für den beidseitig verstärkten, symmetrischen Querschnitt ergibt sich Folgendes:

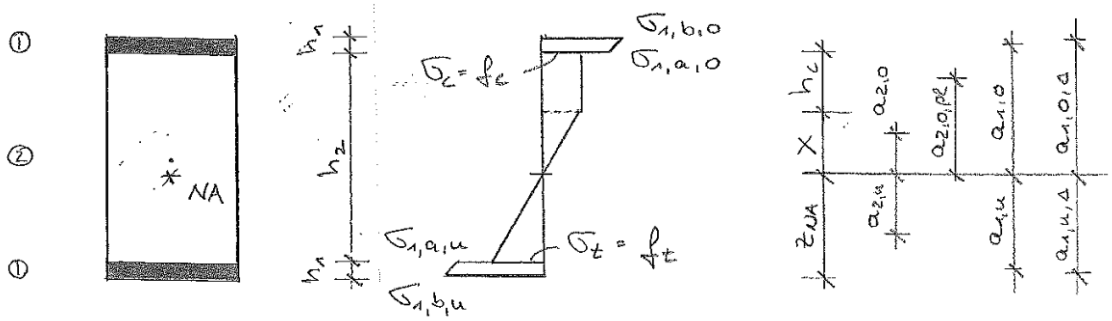


Abb. 3.274: Geometrie und Spannungen des einseitig verstärkten Querschnitts

Wegen der Ausbildung des plastischen Bereiches in der Druckzone des Grundmaterials befindet sich die neutrale Achse trotz des symmetrischen Aufbaus nicht mehr in Querschnittsmitte sondern rutscht in den Zugbereich. Die Annahme eines linearen Dehnungsverlaufes wird beibehalten.

Es wird vorausgesetzt, dass die Spannungen am Biegezugrand des Grundmaterials (Material 2) bis zur Biegezugspannung (im Folgenden der Vereinfachung und Verallgemeinerung wegen jedoch nichtsdestotrotz mit f_t bezeichnet) und in der Biegedruckzone bis zur Druckfestigkeit steigen und sich darüber hinaus ein plastischer Bereich in der Druckzone ausbildet. Damit kann für die Spannungen angesetzt werden:

$\sigma_t = f_t$ ($f_t = f_m$! Die Zugspannung darf maximal die Biegezugfestigkeit erreichen) (3.123)

$\sigma_c = f_c$ (Die Druckspannung darf maximal die Druckfestigkeit erreichen) (3.124)

$\sigma_{1,a,u} = n \cdot f_t$ (Gleiche Dehnungen am unteren Übergang von 1 zu 2) (3.125)

$$\sigma_{1,b,u} = \sigma_{1,a,u} \cdot \frac{\alpha_{NA}}{\alpha_{NA} - \alpha_1} = n \cdot f_t \cdot \frac{\alpha_{NA}}{\alpha_{NA} - \alpha_1} \quad \left(\text{aus } \frac{\sigma_{1,b,u}}{z_{NA}} = \frac{\sigma_{1,a,u}}{z_{NA} - h_1}\right) \tag{3.126}$$

$$\sigma_{1,a,o} = \sigma_{1,a,u} \cdot \frac{1 - \alpha_{NA} - \alpha_1}{\alpha_{NA} - \alpha_1} = n \cdot f_t \cdot \frac{1 - \alpha_{NA} - \alpha_1}{\alpha_{NA} - \alpha_1} \quad \left(\text{aus } \frac{\sigma_{1,a,u}}{z_{NA} - h_1} = \frac{\sigma_{1,a,o}}{h - z_{NA} - h_1}\right) \tag{3.127}$$

$$\sigma_{1,b,o} = \sigma_{1,a,o} \cdot \frac{1 - \alpha_{NA}}{1 - \alpha_{NA} - \alpha_1} = n \cdot f_t \cdot \frac{1 - \alpha_{NA}}{\alpha_{NA} - \alpha_1} \quad \left(\text{aus } \frac{\sigma_{1,b,o}}{h - z_{NA}} = \frac{\sigma_{1,a,o}}{h - z_{NA} - h_1}\right) \tag{3.128}$$

Bezüglich der Hebelarme der einzelnen Druck- und Zugkräfte gilt:

$$\alpha_{2,o} = 2/3 \cdot x = 2/3 \cdot h \cdot (1 - \alpha_{NA} - \alpha_1 - \alpha_c) \tag{3.129}$$

$$\alpha_{2,o,pl} = h \cdot (1 - \alpha_{NA} - \alpha_1 - \alpha_c/2) \tag{3.130}$$

$$\alpha_{1,o} = h \cdot (1 - \alpha_{NA} - \alpha_1/2) \tag{3.131}$$

$$\alpha_{1,o,\Delta} = h \cdot (1 - \alpha_{NA} - \alpha_1/3) \tag{3.132}$$

$$\alpha_{2,u} = 2/3 \cdot h \cdot (\alpha_{NA} - \alpha_1) \tag{3.133}$$

$$\alpha_{1,u} = h \cdot (\alpha_{NA} - \alpha_1/2) \tag{3.134}$$

$$\alpha_{1,u,\Delta} = h \cdot (\alpha_{NA} - \alpha_1/3) \tag{3.135}$$

mit dem Höhenfaktor α_c für den plastischen Bereich der Druckzone:

$$\alpha_c = 1 - \alpha_{NA} \cdot \left(1 + \frac{f_c}{f_t}\right) - \alpha_1 \cdot \left(1 - \frac{f_c}{f_t}\right) \quad \left(\text{aus } \frac{f_c}{x} = \frac{f_t}{z_{NA} - h_1} \text{ mit } x = h - z_{NA} - h_1 - h_c\right) \tag{3.136}$$

Die Höhe der neutralen Achse und damit der Faktor α_{NA} werden durch das Aufstellen des Kräftegleichgewichts ermittelt. Für den Fall des symmetrisch verstärkten Trägers wurde keine geschlossene Lösung gefunden, weshalb der Faktor durch Iteration derart bestimmt werden muss, dass für reine Momentenbeanspruchung die inneren Druck- und Zugkräfte gleich groß sind. Folgende Gleichung muss daher durch Iteration gelöst werden:

$$D = \frac{1}{2} \cdot f_c \cdot b \cdot h \cdot \left(1 - \alpha_{NA} - \alpha_1 + \alpha_c + 2 \cdot n \cdot \frac{f_t}{f_c} \cdot \alpha_1 \cdot \frac{1 - \alpha_{NA} - \alpha_1/2}{\alpha_{NA} - \alpha_1}\right) =$$

$$Z = \frac{1}{2} \cdot f_t \cdot b \cdot h \cdot \left(\alpha_{NA} - \alpha_1 + 2 \cdot n \cdot \alpha_1 + \frac{n \cdot \alpha_1^{\,2}}{\alpha_{NA} - \alpha_1}\right) \tag{3.137}$$

Damit lässt sich das maximal aufnehmbare Moment des symmetrischen Trägers bei Ansatz einer teilweise plastifizierten Druckzone durch Addieren der jeweiligen Teilmomente, bestehend aus den Teilkräften mal ihren Hebelarmen zur neutralen Achse, berechnen zu:

$$\begin{aligned} M = \quad & \frac{1}{2}\cdot f_c \cdot b \cdot h \cdot \frac{2}{3}\cdot h \cdot (1-\alpha_{NA}-\alpha_1-\alpha_c)^2 + f_c \cdot b \cdot h \cdot \alpha_c \cdot h \cdot (1-\alpha_{NA}-\alpha_1-\frac{\alpha_c}{2}) \\ & + n \cdot f_t \cdot b \cdot h \cdot \alpha_1 \cdot \frac{1-\alpha_{NA}-\alpha_1}{\alpha_{NA}-\alpha_1}\cdot h \cdot (1-\alpha_{NA}-\frac{\alpha_1}{2}) + \frac{1}{2}\cdot n \cdot f_t \cdot b \cdot h \cdot \alpha_1 \cdot \frac{\alpha_1}{\alpha_{NA}-\alpha_1}\cdot h \cdot (1-\alpha_{NA}-\frac{\alpha_1}{3}) \\ & + \frac{1}{2}\cdot f_t \cdot b \cdot h \cdot (\alpha_{NA}-\alpha_1)\cdot \frac{2}{3}\cdot h \cdot (\alpha_{NA}-\alpha_1) + n \cdot f_t \cdot b \cdot h \cdot \alpha_1 \cdot h \cdot (\alpha_{NA}-\frac{\alpha_1}{2}) \\ & + \frac{1}{2}\cdot n \cdot f_t \cdot b \cdot h \cdot \alpha_1 \cdot \frac{\alpha_1}{\alpha_{NA}-\alpha_1}\cdot h \cdot (\alpha_{NA}-\frac{\alpha_1}{3}) \end{aligned} \tag{3.138}$$

und nach kurzem Umformen bestimmen zu:

$$M = \quad f_t \cdot b \cdot h^2 \cdot \left[\begin{array}{l} \frac{1}{3}\cdot\frac{f_c}{f_t}\cdot(1-\alpha_{NA}-\alpha_1-\alpha_c)^2 + \frac{f_c}{f_t}\cdot\alpha_c\cdot(1-\alpha_{NA}-\alpha_1-\frac{\alpha_c}{2}) \\ + \; n\cdot\alpha_1\cdot\frac{(1-\alpha_{NA}-\alpha_1)\cdot(1-\alpha_{NA}-\alpha_1/2)}{\alpha_{NA}-\alpha_1} + \frac{1}{2}\cdot n\cdot\frac{{\alpha_1}^2\cdot(1-\alpha_{NA}-\alpha_1/3)}{\alpha_{NA}-\alpha_1} \\ + \; \frac{1}{3}\cdot(\alpha_{NA}-\alpha_1)^2 + n\cdot\alpha_1\cdot(\alpha_{NA}-\frac{\alpha_1}{2}) + \frac{1}{2}\cdot n\cdot\frac{{\alpha_1}^2\cdot(\alpha_{NA}-\alpha_1/3)}{\alpha_{NA}-\alpha_1} \end{array} \right] \tag{3.139}$$

Es sei nochmals darauf hingewiesen, dass dieses Rechenmodell für symmetrisch verstärkte BSH-KHP-Hybridträger der im Projekt betrachteten Art wenig sinnvoll ist und nur aufgenommen wurde, um evtl. andere Hybridträger nach den zusammengestellten Gleichungen bemessen zu können.

Die in der neutralen Achse auftretenden Schubspannungen werden bestimmt, in dem ein Teilstück des Hybridträgers der Länge dx betrachtet und das Kräftegleichgewicht des oberen, druckbeanspruchten Teils aufgestellt wird (vgl. Abb. 3.275). Es gilt:

$$\tau_{max}\cdot b\cdot dx = D + dD - D = dD \equiv \frac{dM}{a} \tag{3.140}$$

$$(\text{mit } M = a\cdot D = a\cdot Z \text{ , daher } D = \frac{M}{a} \text{ und somit } dD = \frac{dM}{a})$$

Daraus folgt

$$\tau_{max} = \frac{dD}{b\cdot dx} = \frac{dM}{a\cdot b\cdot dx} = \frac{V}{a\cdot b} \qquad (\text{mit } V = \frac{dM}{dx}) \tag{3.141}$$

Dies kann allgemein für alle hier vorgestellten Rechenmodelle angesetzt werden, wenn der jeweilige innere Hebelarm a bestimmt wird. Dafür müssen neben dem maximal aufnehmbaren Moment (Gleichung (3.137)) lediglich die inneren Druck- bzw. Zugkräfte (Gleichung (3.139)) bestimmt werden.

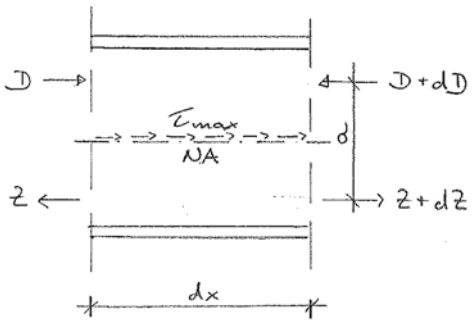


Abb. 3.275: Hybridträgerstück der Länge dx

b) Einseitig verstärkter Querschnitt (vgl. Abb. 3.270 b))

Für den einseitig (im Biegezugbereich) verstärkten Querschnitt ergibt sich Folgendes:

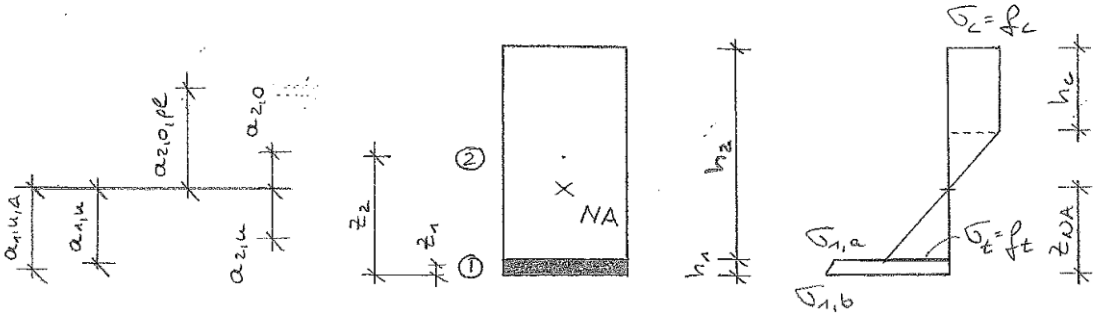


Abb. 3.276: Geometrie und Spannungen des einseitig verstärkten Querschnitts

Wiederum wird vorausgesetzt, dass die Spannungen am Biegezugrand des Grundmaterials (Material 2) bis zur Biegezugspannung und in der Biegedruckzone bis zur Druckfestigkeit steigen und sich darüber hinaus ein plastischer Bereich in der Druckzone ausbildet. Damit kann für die Spannungen angesetzt werden:

$\sigma_t = f_t$ ($f_t = f_m$! Die Zugspannung darf maximal die Biegezugfestigkeit erreichen) (3.142)

$\sigma_c = f_c$ (Die Druckspannung darf maximal die Druckfestigkeit erreichen) (3.143)

$\sigma_{1,a} = n \cdot f_t$ (Gleiche Dehnungen am unteren Übergang von 1 zu 2) (3.144)

$$\sigma_{1,b} = \sigma_{1,a} \frac{\alpha_{NA}}{\alpha_{NA} - \alpha_1} = n \cdot f_t \cdot \frac{\alpha_{NA}}{\alpha_{NA} - \alpha_1} \qquad \left(\text{aus } \frac{\sigma_{1,b}}{z_{NA}} = \frac{\sigma_{1,a}}{z_{NA} - h_1}\right) \qquad (3.145)$$

Die Höhe der Spannungsnulllinie bzw. der entsprechende Höhenfaktor lässt sich aus dem Kräftegleichgewicht (Gleichsetzen der inneren Druck- und Zugkräfte bei reiner Biegebeanspruchung) bestimmen zu:

$$\alpha_{NA} = \frac{z_{NA}}{h} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1 - \alpha_c^{\,2} + \alpha_1^{\,2} \cdot (n-1)}{1 + \alpha_1 \cdot (n-1)} \qquad (3.146)$$

mit dem Höhenfaktor α_c für den plastischen Bereich der Druckzone:

$$\alpha_c = 1 - \alpha_{NA} \cdot \left(1 + \frac{f_c}{f_t}\right) + \alpha_1 \cdot \frac{f_c}{f_t} \qquad \left(\text{aus } \frac{f_c}{1 - \alpha_{NA} - \alpha_c} = \frac{f_t}{\alpha_{NA} - \alpha_1}\right) \qquad (3.147)$$

Die durch Einsetzen des Höhenfaktors α_c quadratische Gleichung für α_{NA} lässt sich nach Blaß und Romani [195] folgendermaßen lösen:

$$\alpha_{NA} = \left(1+\frac{f_c}{f_t}\right)^{-2} \cdot \left(\frac{f_c}{f_t} - \alpha_1 \cdot (n-1) + \alpha_1 \cdot \frac{f_c}{f_t} \cdot (1+\frac{f_c}{f_t})\right)$$

$$= \left(1+\frac{f_c}{f_t}\right)^{-2} \cdot \sqrt{\left(\alpha_1 \cdot (n-1) - \frac{f_c}{f_t}\right)^2 + {\alpha_1}^2 \cdot (n-1) \cdot \left(1-\left(\frac{f_c}{f_t}\right)^2\right) - 2 \cdot \alpha_1 \cdot \frac{f_c}{f_t}\left(1+\frac{f_c}{f_t}\right)} \qquad (3.148)$$

Bezüglich der Hebelarme der einzelnen Druck- und Zugkräfte gilt:

$$\alpha_{2,o} = 2/3 \cdot h \cdot (1-\alpha_{NA}-\alpha_c) \qquad (3.149)$$

$$\alpha_{2,o,pl} = h \cdot (1-\alpha_{NA}-\alpha_c/2) \qquad (3.150)$$

$$\alpha_{2,u} = 2/3 \cdot h \cdot (\alpha_{NA}-\alpha_1) \qquad (3.151)$$

$$\alpha_{1,u} = h \cdot (\alpha_{NA}-\alpha_1/2) \qquad (3.152)$$

$$\alpha_{1,u,\Delta} = h \cdot (\alpha_{NA}-\alpha_1/3) \qquad (3.153)$$

Damit lässt sich das maximal aufnehmbare Moment des einseitig im Biegezugbereich verstärkten Hybridträgers bei Ansatz einer teilweise plastifizierten Druckzone durch Addieren der jeweiligen Teilmomente, bestehend aus den Teilkräften mal ihren Hebelarmen zur neutralen Achse, berechnen durch:

$$\begin{aligned} M = \quad & \frac{1}{2} \cdot f_c \cdot b \cdot h \cdot \frac{2}{3} \cdot h \cdot (1-\alpha_{NA}-\alpha_c)^2 + f_c \cdot b \cdot h \cdot \alpha_c \cdot h \cdot (1-\alpha_{NA}-\frac{\alpha_c}{2}) \\ & + \frac{1}{2} \cdot f_t \cdot b \cdot h \cdot (\alpha_{NA}-\alpha_1) \cdot \frac{2}{3} \cdot h \cdot (\alpha_{NA}-\alpha_1) + n \cdot f_t \cdot b \cdot h \cdot \alpha_1 \cdot h \cdot (\alpha_{NA}-\frac{\alpha_1}{2}) \\ & + \frac{1}{2} \cdot n \cdot f_t \cdot b \cdot h \cdot \alpha_1 \cdot \frac{\alpha_1}{\alpha_{NA}-\alpha_1} \cdot h \cdot (\alpha_{NA}-\frac{\alpha_1}{3}) \end{aligned} \qquad (3.154)$$

und nach einigem Umformen (in analoger Schreibweise zu [195]) bestimmen zu:

$$M = \quad f_t \cdot b \cdot h^2 \cdot \left[\begin{array}{l} 2 \cdot \frac{f_c}{f_t} \cdot \left(3 \cdot \alpha_c \cdot (1-\alpha_{NA}-\frac{\alpha_c}{2}) + (1-\alpha_{NA}-\alpha_c)^2\right) \\ -2 \cdot (n-1) \cdot (\alpha_{NA}-\alpha_1)^2 + 2 \cdot n \cdot \frac{{\alpha_{NA}}^3}{\alpha_{NA}-\alpha_1} \end{array} \right] \qquad (3.155)$$

Für einseitig verstärkte Hybridträgers ist dies ein durchaus sinnvolles Rechenmodell und wird auch für Verbundträger aus Brettschichtholz und faserverstärkten Kunststoffen bzw. textilen Faserkunststoffverbünden genutzt (vgl. beispielsweise [195]).

Die Tragfähigkeit lässt sich rechnerisch jedoch noch erhöhen, wenn zugelassen wird, dass Teile des Grundmaterials aufreißen und die Verstärkung dann die Zugkräfte übernimmt. Dies wird im Folgenden behandelt.

Die maximalen Schubspannungen lassen sich wiederum nach Gleichung (3.141) bestimmen, wenn der innere Hebelarm aus dem bestimmten Moment und der zugehörigen inneren Druck- bzw. Zugkraft ermittelt wird. Bezüglich der Druck- und Zugkräfte gilt:

$$D = \frac{1}{2} \cdot f_c \cdot b \cdot h \cdot (1-\alpha_{NA}+\alpha_c) = Z = \frac{1}{2} \cdot f_t \cdot b \cdot h \cdot (\alpha_{NA}-\alpha_1+n \cdot \alpha_1 + \frac{n \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_{NA}}{\alpha_{NA}-\alpha_1}) \qquad (3.156)$$

Rechenmodell 3: elastisch-plastisch mit gerissener Zugzone

Wird ein Reißen des Grundmaterials rechnerisch zugelassen, wirkt die Verstärkung wie die Bewehrung in (gerissenen) Stahlbetonquerschnitten. Im Holzbau ist es allerdings wenig zielführend von einer vollständig gerissenen Zugzone auszugehen, da die Biegezugfestigkeit gegenüber der Druckfestigkeit nicht vernachlässigen werden sollte. Zur ersten Abschätzung können zwar sehr vereinfachte Modelle (beispielsweise aus [191]) genutzt werden, diese sind jedoch nur für überschlägliche Handrechnungen zu empfehlen, da sie einerseits nicht die vollen Tragreserven ausschöpfen und andererseits wegen der Vernachlässigung von Zugspannungen im Holzquerschnitt einen praktisch nicht auftretenden Spannungszustand beschreiben. In der erstellten Exceltabelle (vgl. 3.7.4.1 und Anlage „7.03 Bemessung von Hybridträgern und Hybridbohlen“ auf beiligender CD) wurde der vereinfachte Ansatz nach [191] zum Vergleich mit aufgenommen.

Eine genauere Berücksichtigung gerissener Zugzonen wird im Folgenden vorgestellt. Dabei wird weiterhin ein über den Querschnitt linearer Dehnungsverlauf vorausgesetzt. Ebenso wird weiterhin davon ausgegangen, dass sich im Druckbereich nach Erreichen der Druckfestigkeit plastische Zonen ausbilden. Im Zugbereich hingegen ist die Versagenslast noch nicht erreicht, wenn die Biegezugspannungen des Grundmaterials die Biegezugfestigkeit erreicht haben. Bei Überschreiten der Biegezugfestigkeit kommt es hier zu Rissen im Grundmaterial und damit zu spannungslosen Bereichen. Die Spannungen werden nicht mehr vom Grundmaterial abgetragen sondern in die Verstärkung verlagert. Erst wenn dieses Tragverhalten berücksichtigt wird, kann die volle Tragfähigkeit eines Hybridträgers rechnerisch ausgeschöpft werden.

Das hier vorgestellte Verfahren geht davon aus, dass die Verstärkung voll ausgenutzt wird. Auf Grundlage des linearen Dehnungsverlaufes sowie der Vorgaben, dass ein Plastifizieren des Grundmaterials bei Erreichen der Druckfestigkeit und ein Reißen bei Erreichen der Biegezugfestigkeit auftreten, werden die übrigen Spannungen sowie die Höhen des plastischen und des gerissenen Bereiches bestimmt. Es sei darauf hingewiesen, dass eine solche Abschätzung nicht auf der sicheren Seite liegt sondern durchaus zu große Tragfähigkeiten ergeben kann, weshalb sie für den jeweiligen Anwendungsfall durch Versuche geprüft werden sollte. Beispielsweise ist das Verfahren für hochfeste und/oder hochsteife Verstärkungsmaterialien ungeeignet, da entweder kein Gleichgewicht erfüllt werden kann (die hohen Festigkeiten können nicht ausgenutzt werden) oder unrealistisch große plastifizierte Bereiche bei verschwindend kleinen gerissenen Bereichen entstehen. Für solche Hybridträger können zwar die folgenden Grundgleichungen ohne Einschränkung angesetzt werden, die sich ergebenden Größen einschließlich der Tragfähigkeit gelten jedoch nicht, da dort als maximale Biegespannung im Verstärkungsmaterial immer die volle Biegefestigkeit angesetzt wurde. Für BSH-KHP-Hybridträger liefert das Verfahren jedoch sinnvolle Ergebnisse (vgl. Versuche in Kap. 3.5.6).

Für künftige Forschungsvorhaben sollten einerseits die vollständigen Spannungs-Dehnungs-Beziehungen von Grund- und Verstärkungsmaterial bestimmt werden. Während diese für Vollholz bekannt ist (vgl. Abb. 3.263) und damit auf Brettschichtholz übertragbar wäre, hätte sie für alle im Projekt verwendeten vergüteten Materialien wie KHP, TMT und Faserkunststoffverbunde in zahlreichen Versuchen ermittelt werden müssen. Dies war sowohl aus finanziellen als auch aus zeitlichen Gründen leider nicht möglich. Andererseits sollten wünschenswerterweise zudem Bemessungstafeln analog den k_d-Tafeln im Stahlbetonbau erstellt werden, um dem Anwender die Iteration über Dehnungen und Spannungen zu ersparen.

Im Bemessungstool des ILK wurde eine auf Grundlage des Vollholzverhaltens abgeschätzte Spannungs-Dehnungs-Beziehung berücksichtigt (vgl. Kapitel 3.6.4.2.1). Daher wird hier nicht weiter darauf eingegangen sondern ein Ansatz unter Berücksichtigung einer anderen Art der Abschätzung, nämlich die beschriebene Voraussetzung der vollen Ausnutzung des Verstärkungsmaterials, vorgestellt.

a) Beidseitig verstärkter Querschnitt (vgl. Abb. 3.270 a))

Für den beidseitig verstärkten, symmetrischen Querschnitt ergibt sich Folgendes:

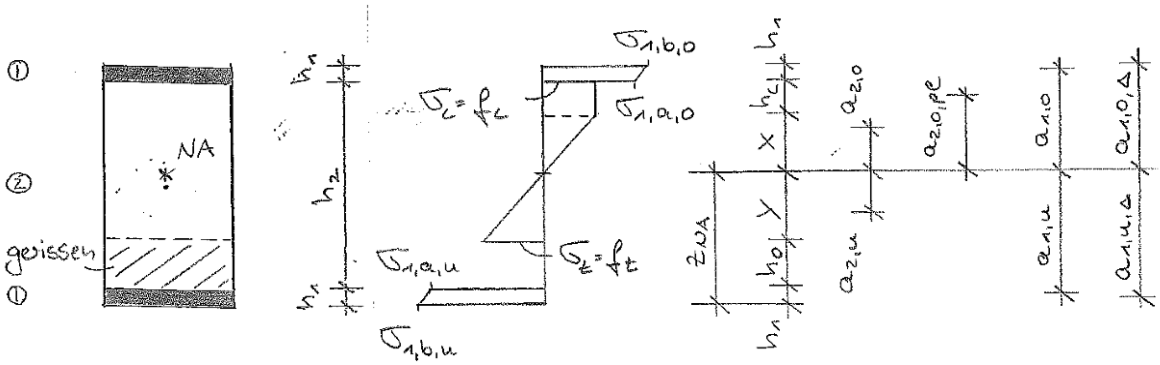


Abb. 3.277: Geometrie und Spannungen des einseitig verstärkten Querschnitts

Wegen des gerissenen und damit spannungslosen Bereiches in der Zugzone des Grundmaterials befindet sich die neutrale Achse trotz des symmetrischen Aufbaus nicht mehr in Querschnittsmitte sondern rutscht (trotz der teilweise plastifizierten Druckzone) in der Regel in den Zugbereich. Die Annahme eines linearen Dehnungsverlaufes wird weiterhin beibehalten.

Es wird vorausgesetzt, dass die Spannungen am Biegezugrand des Grundmaterials (Material 2) bis zur Biegezugspannung (im Folgenden der Vereinfachung und Verallgemeinerung wegen jedoch nichtsdestotrotz mit f_t bezeichnet) steigen und das Grundmaterial bei weiterer Laststeigerung reißt, so dass sich eine teilweise gerissene Zugzone ausbildet. In der Biegedruckzone steigen die Spannungen im Grundmaterial bis zur Druckfestigkeit, darüber hinaus bildet sich wiederum ein plastischer Bereich in der Druckzone aus. Unter diesen Voraussetzungen kann für die Spannungen Folgendes angesetzt werden:

Mit den Hilfshöhen

$$x = h - z_{NA} - h_1 - h_c = h \cdot (1 - \alpha_{NA} - \alpha_1 - \alpha_c) \tag{3.157}$$

$$y = z_{NA} - h_0 - h_1 = h \cdot (\alpha_{NA} - \alpha_0 - \alpha_1) \tag{3.158}$$

und dem linearen Dehnungsverlauf über den Querschnitt ergeben sich die Spannungen zu:

$\sigma_t = f_t$ ($f_t = f_m$! Die Zugspannung darf maximal die Biegezugfestigkeit erreichen) (3.159)

$\sigma_c = f_c$ (Die Druckspannung darf maximal die Druckfestigkeit erreichen) (3.160)

$\sigma_{1,b,u} = f_{t,1}$ (hier vorausgesetzt: volle Ausnutzung der Verstärkung am Biegezugrand) (3.161)

$$\sigma_{1,a,u} = n \cdot f_t \cdot \frac{\alpha_{NA} - \alpha_1}{\alpha_{NA} - \alpha_0 - \alpha_1} \qquad \left(\text{aus } \frac{\varepsilon_{1,a,u}}{z_{NA} - h_1} = \frac{\varepsilon(\sigma_t)}{z_{NA} - h_0 - h_1}\right) \tag{3.162}$$

$$\sigma_{1,b,u} = \sigma_{1,a,u} \cdot \frac{\alpha_{NA}}{\alpha_{NA} - \alpha_1} = n \cdot f_t \cdot \frac{\alpha_{NA}}{\alpha_{NA} - \alpha_0 - \alpha_1} \qquad \left(\text{aus } \frac{\sigma_{1,b,u}}{z_{NA}} = \frac{\sigma_{1,a,u}}{z_{NA} - h_1}\right) \tag{3.163}$$

$$\sigma_{1,a,o} = n \cdot f_c \cdot \frac{1 - \alpha_{NA} - \alpha_1}{1 - \alpha_{NA} - \alpha_1 - \alpha_c} \qquad \left(\text{aus } \frac{\varepsilon_{1,a,o}}{h - z_{NA} - h_1} = \frac{\varepsilon(\sigma_c)}{h - z_{NA} - h_1 - h_c}\right) \tag{3.164}$$

$$\sigma_{1,b,o} = \sigma_{1,a,o} \cdot \frac{1 - \alpha_{NA}}{1 - \alpha_{NA} - \alpha_1} = n \cdot f_c \cdot \frac{1 - \alpha_{NA}}{1 - \alpha_{NA} - \alpha_1 - \alpha_c} \qquad \left(\text{aus } \frac{\sigma_{1,b,o}}{h - z_{NA}} = \frac{\sigma_{1,a,o}}{h - z_{NA} - h_1}\right) \tag{3.165}$$

Aus der Voraussetzung der vollen Ausnutzung des Verstärkungsmaterials (Gleichung (3.161)) und dem Ansatz des linearen Dehnungsverlaufes (Gleichung (3.163)) kann die Höhe des gerissenen Bereiches h_0 bzw. der entsprechende Höhenfaktor α_0 bestimmt werden zu.

$$\alpha_0 = \alpha_{NA} \cdot (1 - n \cdot \frac{f_t}{f_{t,1}}) - \alpha_1 = \frac{h_0}{h} \tag{3.166}$$

Dies verliert natürlich seine Gültigkeit, wenn die Voraussetzung der vollen Ausnutzung des Verstärkungsmaterials entfällt.

Hinweis: Soll iteriert werden, müssen jeweils die Dehnungen am Übergang Grundmaterial zu Verstärkungsmaterial überprüft werden. Folgende Gleichung ist dann zu erfüllen:

$$\frac{\varepsilon_{1,b,u}}{z_{NA}} = \frac{\varepsilon(\sigma_t)}{z_{NA} - h_0 - h_1} \text{ und daraus } \varepsilon_{1,b,u} = \frac{z_{NA}}{z_{NA} - h_0 - h_1} \cdot \varepsilon(\sigma_t) = \frac{\alpha_{NA}}{\alpha_{NA} - \alpha_0 - \alpha_1} \cdot \varepsilon(\sigma_t) \quad (3.167)$$

Ist diese Gleichung nicht eingehalten, kann nicht die volle Biegezugfestigkeit für das Verstärkungsmaterial angesetzt werden sondern die zur ermittelten (kleineren) Dehnung gehörende (kleinere) Spannung. Bei linear-elastischem Verhalten von Grund- und Verstärkungsmaterial wäre dies beispielsweise:

$$\sigma_{1,b,u} = E_1 \cdot \varepsilon_{1,b,u} = E_1 \cdot \frac{\alpha_{NA}}{\alpha_{NA} - \alpha_0 - \alpha_1} \cdot \frac{f_t}{E_2} = \frac{E_1}{E_2} \cdot \frac{\alpha_{NA}}{\alpha_{NA} - \alpha_0 - \alpha_1} \cdot f_t \le f_{t,1} \quad (3.168)$$

Mit der so ermittelten Spannung ist dann wiederum das Gleichgewicht aufzustellen und die Gleichheit der Dehnungen zu überprüfen. Diese Iteration ist solange fortzuführen bis sowohl Kräfte- und Momentengleichgewicht als auch die Dehnungsgleichheit am Übergang der Materialien erfüllt ist.

Die Hebelarme der inneren Druck- und Zugkräfte sind wie vor beim ungerissenen elastisch-plastischen Ansatz zu ermitteln, einzige Ausnahme ist der Hebelarm der Zugkraft im Grundmaterial, dieser muss unter Berücksichtigung des gerissenen Bereiches bestimmt werden zu:

$$\alpha_{2,u} = 2/3 \cdot h \cdot (\alpha_{NA} - \alpha_1 - \alpha_0) \tag{3.169}$$

Ansonsten gelten für die Hebelarme der Druckkräfte die Gleichungen (3.129) bis (3.132) und für die Hebelarme der Zugkräfte im Verstärkungsmaterial die Gleichungen (3.134) und (3.135).

Der Höhenfaktor α_c für den plastischen Bereich der Druckzone ergibt sich ebenfalls unter Berücksichtigung der gerissenen Zugzone zu:

$$\alpha_c = 1 - \alpha_{NA} \cdot (1 + \frac{f_c}{f_t}) - \alpha_1 \cdot (1 - \frac{f_c}{f_t}) + \frac{f_c}{f_t} \cdot \alpha_0 \qquad (\text{aus } \frac{f_c}{x} = \frac{f_t}{y}) \tag{3.170}$$

Die Höhe der neutralen Achse und damit der Faktor α_{NA} werden wiederum durch das Aufstellen des Kräftegleichgewichts ermittelt. Auch hier wurde keine geschlossene Lösung gefunden sondern muss iteriert werden. Wie gehabt müssen für reine Momentenbeanspruchung die inneren Druck- und Zugkräfte gleich groß sein. Folgende Gleichung muss daher durch Iteration gelöst werden:

$$D = \frac{1}{2} \cdot f_c \cdot b \cdot h \cdot \left(1 - \alpha_{NA} - \alpha_1 + \alpha_c + \frac{n \cdot \alpha_1^{\,2} + 2 \cdot \alpha_1 \cdot (1 - \alpha_{NA} - \alpha_1)}{1 - \alpha_{NA} - \alpha_1 - \alpha_c} \right) =$$

$$Z = \frac{1}{2} \cdot f_t \cdot b \cdot h \cdot \left(\alpha_{NA} - \alpha_0 - \alpha_1 + n \cdot \alpha_1 \cdot \frac{2 \cdot \alpha_{NA} - \alpha_1}{\alpha_{NA} - \alpha_1 - \alpha_0} \right) \tag{3.171}$$

Damit lässt sich das maximal aufnehmbare Moment des symmetrischen Trägers bei Ansatz einer teilweise plastifizierten Druckzone und einer teilweise gerissenen Zugzone durch Addieren der jeweiligen Teilmomente berechnen durch:

$$M = \frac{1}{2}\cdot f_c \cdot b \cdot h \cdot \frac{2}{3}\cdot h \cdot (1-\alpha_{NA}-\alpha_1-\alpha_c)^2 + f_c \cdot b \cdot h \cdot \alpha_c \cdot h \cdot (1-\alpha_{NA}-\alpha_1-\frac{\alpha_c}{2})$$
$$+ n \cdot f_c \cdot b \cdot h \cdot \frac{\alpha_1 \cdot (1-\alpha_{NA}-\alpha_1)}{1-\alpha_{NA}-\alpha_1-\alpha_c}\cdot h \cdot (1-\alpha_{NA}-\frac{\alpha_1}{2}) + \frac{1}{2}\cdot n \cdot f_c \cdot b \cdot h \cdot \frac{\alpha_1^{\,2}}{1-\alpha_{NA}-\alpha_1-\alpha_c}\cdot h \cdot (1-\alpha_{NA}-\frac{\alpha_1}{3})$$
$$+ \frac{1}{2}\cdot f_t \cdot b \cdot h \cdot \frac{2}{3}\cdot h \cdot (\alpha_{NA}-\alpha_1-\alpha_0)^2 + n \cdot f_t \cdot b \cdot h \cdot \frac{\alpha_1 \cdot (\alpha_{NA}-\alpha_1)}{\alpha_{NA}-\alpha_1-\alpha_0}\cdot h \cdot (\alpha_{NA}-\frac{\alpha_1}{2})$$
$$+ \frac{1}{2}\cdot n \cdot f_t \cdot b \cdot h \cdot \frac{\alpha_1^{\,2}}{\alpha_{NA}-\alpha_1-\alpha_0}\cdot h \cdot (\alpha_{NA}-\frac{\alpha_1}{3}) \qquad (3.172)$$

und nach kurzem Umformen bestimmen zu:

$$M = f_t \cdot \frac{b \cdot h^2}{6} \cdot \left[\begin{array}{l} \frac{f_c}{f_t}\cdot \frac{3\cdot n\cdot \alpha_1^{\,2}\cdot(1-\alpha_{NA}-\alpha_1/3)+6\cdot n\cdot\alpha_1\cdot(1-\alpha_{NA}-\alpha_1)\cdot(1-\alpha_{NA}-\alpha_1/2)}{1-\alpha_{NA}-\alpha_1-\alpha_c} \\ + \; 6\cdot\frac{f_c}{f_t}\cdot\alpha_c\cdot(1-\alpha_{NA}-\alpha_1-\alpha_c/2)+2\cdot\frac{f_c}{f_t}\cdot(1-\alpha_{NA}-\alpha_1-\alpha_c)^2 \\ + \; 2\cdot(\alpha_{NA}-\alpha_1-\alpha_0)^2 \\ + \frac{6\cdot n\cdot\alpha_1\cdot(\alpha_{NA}-\alpha_1)\cdot(\alpha_{NA}-\alpha_1/2)+3\cdot n\cdot\alpha_1^{\,2}\cdot(\alpha_{NA}-\alpha_1/3)}{\alpha_{NA}-\alpha_1-\alpha_0} \end{array} \right] \qquad (3.173)$$

Damit kann das maximal aufnehmbare Moment eines beidseitig symmetrisch verstärkten Hybridträgers im gerissenen Zustand bestimmt werden, wenn wie beschrieben die volle Ausnutzung der Biegezugverstärkung angenommen bzw. aktiviert werden kann.

Die maximalen Schubspannungen lassen sich wiederum nach Gleichung (3.141) bestimmen, wenn der innere Hebelarm aus dem nach Gleichung (3.173) bestimmten Moment und der zugehörigen inneren Druck- bzw. Zugkraft (nach Gleichung (3.171)) ermittelt wird. Diese Allgemeingültigkeit der angegebenen Gleichung zur Ermittlung der maximalen Schubspannungen in der neutralen Achse ist ihr großer Vorteil. Sie kann für alle beschriebenen Rechenmodelle genutzt werden.

b) Einseitig verstärkter Querschnitt (vgl. Abb. 3.270 b))

Für den einseitig (im Biegezugbereich) verstärkten Querschnitt ergibt sich Folgendes:

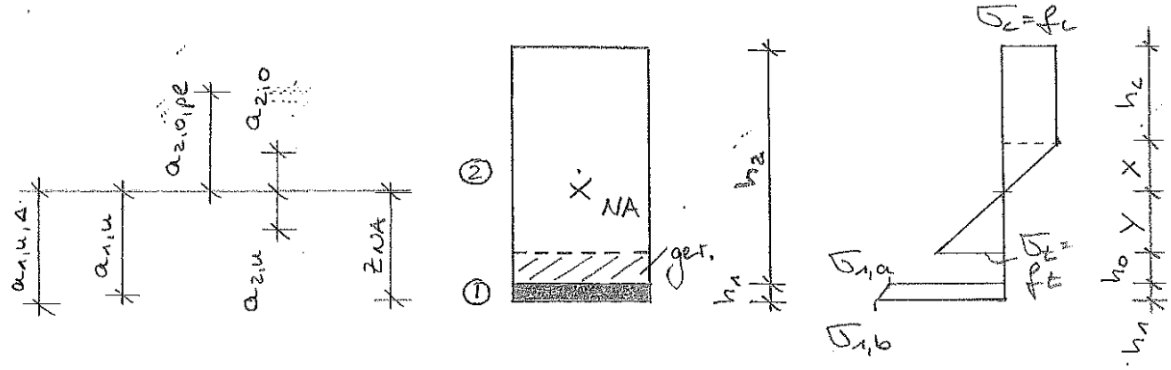


Abb. 3.278: Geometrie und Spannungen des einseitig verstärkten Querschnitts

Wegen des gerissenen und damit spannungslosen Bereiches in der Zugzone sowie der teilweise plastifizierten Druckzone des Grundmaterials rutscht die Spannungsnulllinie in der Regel in den Zugbereich. Die Annahme eines linearen Dehnungsverlaufes wird wiederum beibehalten.

Es wird wie beim symmetrisch verstärkten Träger vorausgesetzt, dass die Spannungen am Biegezugrand des Grundmaterials (Material 2) bis zur Biegezugspannung (im Folgenden der Vereinfachung und Verallgemeinerung wegen jedoch nichtsdestotrotz mit f_t bezeichnet) steigen und das Grundmaterial bei weiterer Laststeigerung reißt, so dass sich eine teilweise gerissene Zugzone ausbildet. In der Biegedruckzone steigen die Spannungen im Grundmaterial bis zur Druckfestigkeit, darüber hinaus bildet sich wiederum ein plastischer Bereich in der Druckzone aus. Unter diesen Voraussetzungen kann für die Spannungen Folgendes angesetzt werden:

Mit den Hilfshöhen

$$x = h - z_{NA} - h_c = h \cdot (1 - \alpha_{NA} - \alpha_c) \tag{3.174}$$

$$y = z_{NA} - h_0 - h_1 = h \cdot (\alpha_{NA} - \alpha_0 - \alpha_1) \tag{3.175}$$

und dem linearen Dehnungsverlauf über den Querschnitt ergeben sich die Spannungen zu:

$\sigma_t = f_t$ ($f_t = f_m$! Die Zugspannung darf maximal die Biegezugfestigkeit erreichen) (3.176)

$\sigma_c = f_c$ (Die Druckspannung darf maximal die Druckfestigkeit erreichen) (3.177)

$\sigma_{1,b} = f_{t,1}$ (hier vorausgesetzt: volle Ausnutzung der Verstärkung am Biegezugrand) (3.178)

$$\sigma_{1,a} = n \cdot f_t \cdot \frac{\alpha_{NA} - \alpha_1}{\alpha_{NA} - \alpha_0 - \alpha_1} \qquad \left(\text{aus } \frac{\varepsilon_{1,a}}{z_{NA} - h_1} = \frac{\varepsilon(\sigma_t)}{z_{NA} - h_0 - h_1}\right) \tag{3.179}$$

$$\sigma_{1,b} = \sigma_{1,a} \cdot \frac{\alpha_{NA}}{\alpha_{NA} - \alpha_1} = n \cdot f_t \cdot \frac{\alpha_{NA}}{\alpha_{NA} - \alpha_0 - \alpha_1} \qquad \left(\text{aus } \frac{\sigma_{1,b}}{z_{NA}} = \frac{\sigma_{1,a}}{z_{NA} - h_1}\right) \tag{3.180}$$

Aus der Voraussetzung der vollen Ausnutzung des Verstärkungsmaterials und dem Ansatz des linearen Dehnungsverlaufes kann die Höhe des gerissenen Bereiches h_0 bzw. der entsprechende Höhenfaktor α_0 wie beim symmetrisch verstärkten Hybridträger nach Gleichung (3.166) bestimmt werden. Soll unter Beachtung einer anderen Spannungs-Dehnungs-Beziehung iteriert werden, verlieren auch hier Gleichungen (3.178) und (3.166) ihre Gültigkeit.

Die Hebelarme der inneren Druck- und Zugkräfte sind wie vor beim ungerissenen elastisch-plastischen Ansatz zu ermitteln, einzige Ausnahme ist der Hebelarm der Zugkraft im Grundmaterial, dieser muss unter Berücksichtigung des gerissenen Bereiches bestimmt werden zu:

$$\alpha_{2,u} = 2/3 \cdot h \cdot (\alpha_{NA} - \alpha_1 - \alpha_0) \tag{3.181}$$

Ansonsten gelten für die Hebelarme der Druckkräfte die Gleichungen (3.149) und (3.150) sowie für die Hebelarme der Zugkräfte im Verstärkungsmaterial die Gleichungen (3.152) und (3.135).

Der Höhenfaktor α_c für den plastischen Bereich der Druckzone ergibt sich ebenfalls unter Berücksichtigung der gerissenen Zugzone zu:

$$\alpha_c = 1 - \alpha_{NA} \cdot \left(1 + \frac{f_c}{f_t}\right) + \alpha_1 \cdot \frac{f_c}{f_t} + \alpha_0 \cdot \frac{f_c}{f_t} \qquad \left(\text{aus } \frac{f_c}{x} = \frac{f_t}{y}\right) \tag{3.182}$$

Die Höhe der neutralen Achse und damit der Faktor α_{NA} werden wiederum durch das Aufstellen des Kräftegleichgewichts ermittelt. Auch hier wurde keine geschlossene Lösung gefunden sondern muss iteriert werden. Wie gehabt müssen für reine Momentenbeanspruchung die inneren Druck- und Zugkräfte gleich groß sein. Folgende Gleichung muss daher durch Iteration gelöst werden:

$$D = \frac{1}{2}\cdot f_c \cdot b \cdot h \cdot \left(1-\alpha_{NA}+\alpha_c\right) = Z = \frac{1}{2}\cdot f_t \cdot b \cdot h \cdot \left(\alpha_{NA} - \alpha_0 - \alpha_1 + n \cdot \alpha_1 \cdot \frac{2\cdot\alpha_{NA}-\alpha_1}{\alpha_{NA}-\alpha_1-\alpha_0} \right) \qquad (3.183)$$

Damit lässt sich das maximal aufnehmbare Moment des symmetrischen Trägers bei Ansatz einer teilweise plastifizierten Druckzone und einer teilweise gerissenen Zugzone durch Addieren der jeweiligen Teilmomente berechnen durch:

$$\begin{aligned} M = \quad & \frac{1}{2}\cdot f_c \cdot b \cdot h \cdot \frac{2}{3}\cdot h \cdot (1-\alpha_{NA}-\alpha_c)^2 + f_c \cdot b \cdot h \cdot \alpha_c \cdot h \cdot (1-\alpha_{NA}-\frac{\alpha_c}{2}) \\ & + \frac{1}{2}\cdot f_t \cdot b \cdot h \cdot \frac{2}{3}\cdot h \cdot (\alpha_{NA}-\alpha_1-\alpha_0)^2 + n \cdot f_t \cdot b \cdot h \cdot \frac{\alpha_1 \cdot (\alpha_{NA}-\alpha_1)}{\alpha_{NA}-\alpha_1-\alpha_0} \cdot h \cdot (\alpha_{NA}-\frac{\alpha_1}{2}) \\ & + \frac{1}{2}\cdot n \cdot f_t \cdot b \cdot h \cdot \frac{{\alpha_1}^2}{\alpha_{NA}-\alpha_1-\alpha_0} \cdot h \cdot (\alpha_{NA}-\frac{\alpha_1}{3}) \end{aligned} \qquad (3.184)$$

und nach kurzem Umformen bestimmen zu:

$$M = f_t \cdot \frac{b\cdot h^2}{6} \cdot \left[\begin{array}{l} + \ 6\cdot\frac{f_c}{f_t}\cdot\alpha_c\cdot(1-\alpha_{NA}-\alpha_c/2) + 2\cdot\frac{f_c}{f_t}\cdot(1-\alpha_{NA}-\alpha_c)^2 \\ + \ 2\cdot(\alpha_{NA}-\alpha_1-\alpha_0)^2 \\ + \frac{6\cdot n\cdot\alpha_1\cdot(\alpha_{NA}-\alpha_1)\cdot(\alpha_{NA}-\alpha_1/2) + 3\cdot n\cdot{\alpha_1}^2\cdot(\alpha_{NA}-\alpha_1/3)}{\alpha_{NA}-\alpha_1-\alpha_0} \end{array} \right] \qquad (3.185)$$

Damit kann das maximal aufnehmbare Moment eines einseitig (im Biegezugbereich) verstärkten Hybridträgers im gerissenen Zustand bestimmt werden, wenn wie beschrieben die volle Ausnutzung der Biegezugverstärkung angesetzt bzw. aktiviert werden kann.

Die maximalen Schubspannungen lassen sich wiederum nach Gleichung (3.141) bestimmen, wenn der innere Hebelarm aus dem nach Gleichung (3.185) bestimmten maximal aufnehmbaren Moment und der zugehörigen inneren Druck- bzw. Zugkraft nach Gleichung (3.183) ermittelt wird.

Bewertung der Rechenmodelle

Normativ geregelt ist einzig das linear-elastische Verfahren (Rechenmodell 1). Dieses ist jedoch als konservativ zu bezeichnen, da es die Tragfähigkeiten von Hybridträgern mit Verstärkungslamellen teilweise deutlich unterschätzt. Realistischer ist ein Ansatz unter Berücksichtigung einer teilweisen plastifizierten Druckzone (Rechenmodell 2 für einseitig im Biegezugbereich verstärkte Träger) und, für einige Anwendungen, der Ansatz einer teilweise gerissenen Zugzone (Rechenmodell 3). Wird hierbei als Abschätzung die volle Ausnutzung des Verstärkungsmaterials vorausgesetzt, ist dieses Verfahren nur für Anwendungsfälle zu empfehlen, in denen die Materialien ähnliche Verhältnisse von Steifigkeit zu Festigkeit aufweisen, da ansonsten unrealistisch große plastifizierte Zonen entstehen könnten und die Tragfähigkeit zu hoch abgeschätzt würde. Für Verstärkungen aus hochfesten und/oder hochsteifen Materialien wie beispielsweise CFK- oder GFK-Lamellen ist anzumerken, dass für solche Materialien unter Ansatz ihrer vollen Festigkeit nach Rechenmodell 3 in der Regel kein Gleichgewicht gefunden wird bzw. sich bei Finden eines Gleichgewichtszustandes die Höhe der gerissenen Zugzone zu annähernd Null ergibt und ein Großteil des Querschnitts druckbelastet und plastifiziert ist. Dies wird als unrealistisch eingeschätzt, weshalb Hybridträger mit solchen Verstärkungen mit anderen Modellen zu bemessen sind.

Für BSH-KHP-Hybridträger ist der Ansatz nach Rechenmodell 3 – unter Berücksichtigung einer teilweise plastifizierten Druckzone sowie einer teilweise gerissenen Zugzone – jedoch gut geeignet. Der Ansatz der vollen Ausnutzung des KHP auf der Biegezugseite sollte zwar tendenziell etwas zu hohe Tragfähigkeiten liefern, für eine Kombination aus BSH und KHP ergeben sich

jedoch plausible Werte (vgl. Bruchversuch in Kap. 3.8.2.5 und Trägervergleich in Tabelle 3.60). Das Modell bildet die Spannungen bzw. Tragfähigkeiten im Bruchzustand gut ab, wenn die Bruchfestigkeiten der einzelnen Materialien als Eingangswerte genutzt werden. Die zugehörigen Dehnungen werden vom Modell jedoch weniger gut abgebildet, hier treten große Unterschiede auf. Zukünftig sollte das Modell daher unter Ansatz von Spannungs-Dehnungslinien unterschiedlicher Grund- und Verstärkungsmaterialien überarbeitet werden.

Für eine genauere Berücksichtigung einer gerissenen Zugzone sind foglich die vollständigen Spannungs-Dehnungslinien von Grund- und Verstärkungsmaterial zu bestimmen. Sind diese bekannt, kann wie beschrieben über die Dehnungen iteriert werden. Für zukünftige Forschungsvorhaben wäre es dann wünschenswert, für den Anwender Tabellen ähnlich den k_d-Tafeln im Stahlbetonbau zu erstellen, welche verhindern, dass jeder Nutzer die Iteration selbst durchführen muss.

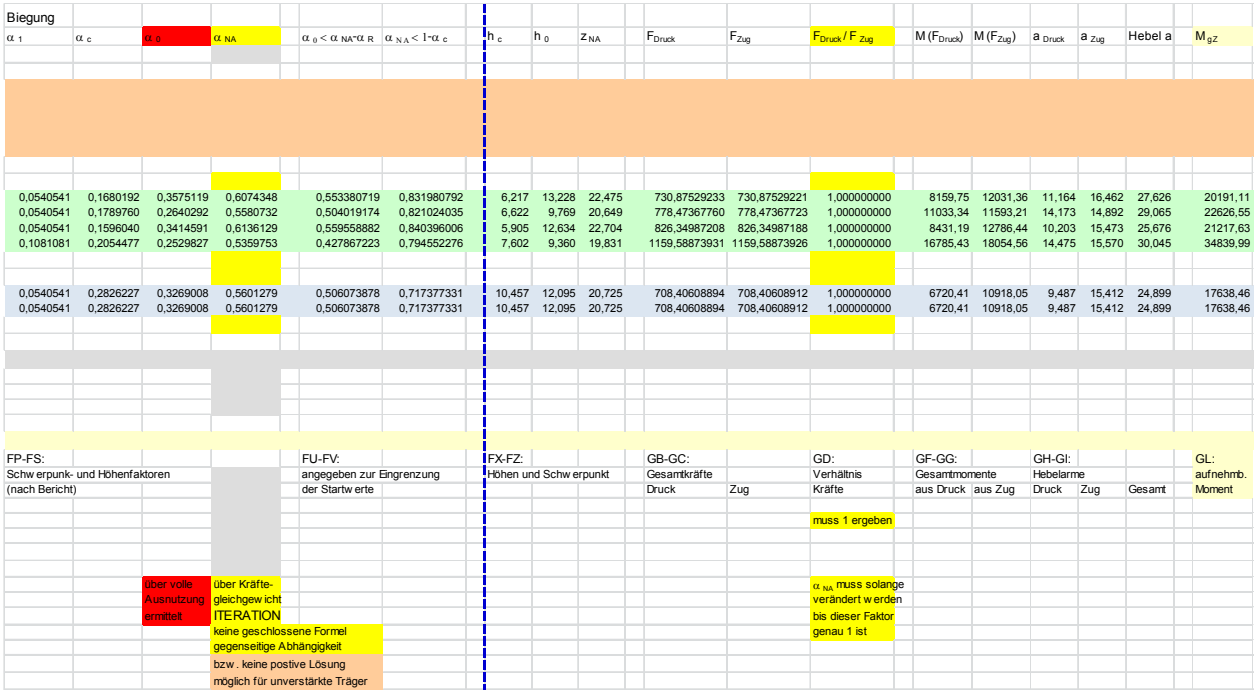
Baupraktische Aufbereitung

Für den Anwender wurden die hier vorgestellten Rechenmodelle in einer Exceldatei aufbereitet. Diese ist als Anlage „7.03 Bemessung von Hybridträgern und Hybridbohlen“ auf der beiliegenden CD enthalten. Die Datei kann zur Bemessung von unverstärkten (orange), symmetrisch verstärkten (grün) und einseitig im Biegezugbereich verstärkten (blau) Trägern nach den vorgestellten verfahren genutzt werden. Einzugebende Werte – Geometrien und Materialkennwerte – sind in grau markierten Spalten einzutragen. Es wird dringend empfohlen, auch nur diese Spalten für die Nutzung zu ändern. Ausgabewerte sind in hellgelb markierten Spalten enthalten. Neben den aufnehmbaren Momenten sind dies vor allem die sich ergebenden Spannungen und die entsprechenden Spannungsnachweise. Als Einheiten sind cm und kN zu verwenden.

					RECHNUNG							alles in cm und kN							
	Querkraft	Moment	W gesamt	σ rechnerisch	Eingangswerte														
Bezeichnung	[kN]	[kNm]	[cm³]	[N/mm²]	h gesamt	E_1	h_1	b_1	A_1	I_1	W_1	E_2	h_2	b_2	A_2	I_2	W_2		
unverstärkte Träger																			
GL28h	50,0	90,00	4563,3	19,72	37				0	0,0	0,0	1260	37	20	740	84421,7	4563,3		
GL36h	50,0	90,00	4563,3	19,72	37				0	0,0	0,0	1470	37	20	740	84421,7	4563,3		
Mittelw erte Lärche	50,0	90,00	4563,3	19,72	37				0	0,0	0,0	1370	37	20	740	84421,7	4563,3		
KHP charakt.	50,0	90,00	4563,3	19,72	37				0	0,0	0,0	1820	37	20	740	84421,7	4563,3		
Mittelw erte KHP	50,0	90,00	4563,3	19,72	37				0	0,0	0,0	2265	37	20	740	84421,7	4563,3		
symmetrisch verstärkte Hybridträger (biegezug- und Biegedruckverstärkung)																			
TWPI Henzesteg	50,0	90,00	4563,3	19,72	37	1781,6	2	20	40	13,3	13,3	1260	33	20	660	59895,0	3630,0		
Variante 1	135,5	327,91	4563,3	71,86	37	2376	2	20	40	13,3	13,3	1260	33	20	660	59895,0	3630,0		
Variante 2	135,5	327,91	4563,3	71,86	37	1782	2	20	40	13,3	13,3	1470	33	20	660	59895,0	3630,0		
Variante 3	135,5	327,91	4563,3	71,86	37	1782	4	20	80	106,7	53,3	1260	29	20	580	40648,3	2803,3		
einseitig verstärkte Hybridträger (nur Biegezugverstärkung)																			
Zugverstärkung 1	135,5	327,91	4563,3	71,86	37	1782	2	20	40	13,3	13,3	1260	35	20	700	71458,3	4083,3		
Zugverstärkung 2	135,5	327,91	4563,3	71,86	37	1782	2	20	40	13,3	13,3	1260	35	20	700	71458,3	4083,3		
Einzugebende Werte in Spalte																			
A:	B, C:				G:	I-K:						O-Q:							
Trägerbezeichnung	Schnittgrößen				Gesamthöhe	Werte Verstärkung						Werte Grundmaterial							
frei w ählbar	V	M				E-Modul	Höhe	Breite				E-Modul	Höhe	Breite					
Ausgegebende Werte in Spalte																			
			D:	E:					L-N:						R-T:				
			Gesamtw erte						Geometriew erte Verstärkung						Geometriew erte Grundmaterial				
			W	Biegespannung					A	I	W				A	I	W		

Abb. 3.279: Erstes Blatt der Exceldatei zur Bemessung von Hybridbauteilen

Muss iteriert werden, ist dies in der Datei deutlich gekennzeichnet – einerseits durch die kräftig gelbe Markierung der Spalte, deren Werte durch Iteration zu bestimmen sind, andererseits durch die Markierung der Spalte für die der Wert 1 zu erreichen ist (vgl. Abb. 3.280).



Biegung																		
α_1	α_c	α_0	α_{NA}	$\alpha_0 < \alpha_{NA}$-α_R	$\alpha_{NA} < 1$-α_c	h_c	h_0	z_{NA}	F_{Druck}	F_{Zug}	F_{Druck} / F_{Zug}	M (F_{Druck})	M (F_{Zug})	a_{Druck}	a_{Zug}	Hebel a	M_{gZ}
0,0540541	0,1680192	0,3575119	0,6074348	0,553380719	0,831980792	6,217	13,228	22,475	730,87529233	730,87529221	1,000000000	8159,75	12031,36	11,164	16,462	27,626	20191,11
0,0540541	0,1789760	0,2640292	0,5580732	0,504019174	0,821024035	6,622	9,769	20,649	778,47367760	778,47367723	1,000000000	11033,34	11593,21	14,173	14,892	29,065	22626,55
0,0540541	0,1596040	0,3414591	0,6136129	0,559558882	0,840396006	5,905	12,634	22,704	826,34987208	826,34987188	1,000000000	8431,19	12786,44	10,203	15,473	25,676	21217,63
0,1081081	0,2054477	0,2529827	0,5359753	0,427867223	0,794552276	7,602	9,360	19,831	1159,58873931	1159,58873926	1,000000000	16785,43	18054,56	14,475	15,570	30,045	34839,99
0,0540541	0,2826227	0,3269008	0,5601279	0,506073878	0,717377331	10,457	12,095	20,725	708,40608894	708,40608912	1,000000000	6720,41	10918,05	9,487	15,412	24,899	17638,46
0,0540541	0,2826227	0,3269008	0,5601279	0,506073878	0,717377331	10,457	12,095	20,725	708,40608894	708,40608912	1,000000000	6720,41	10918,05	9,487	15,412	24,899	17638,46

FP-FS:				FU-FV:		FX-FZ:			GB-GC:		GD:	GF-GG:		GH-GI:			GL:
Schw erpunk- und Höhenfaktoren				angegeben zur Eingrenzung		Höhen und Schw erpunkt			Gesamtkräfte		Verhältnis	Gesamtmomente		Hebelarme			aufnehmb.
(nach Bericht)				der Startw erte					Druck	Zug	Kräfte	aus Druck	aus Zug	Druck	Zug	Gesamt	Moment
											muss 1 ergeben						
		über volle Ausnutzung ermittelt	über Kräfte-gleichgew icht ITERATION								α_{NA} muss solange verändert w erden bis dieser Faktor genau 1 ist						
			keine geschlossene Formel gegenseitige Abhängigkeit														
			bzw. keine postive Lösung möglich für unverstärkte Träger														

Abb. 3.280: Iterationsblatt der Exceldatei zur Bemessung von Hybridbauteilen

Leider war es nicht möglich, diese Iteration aufzulösen, was für die Anwendung immer einigen Zeitaufwand mit sich bringt. Für den Nutzer sollten daher zukünftig Tabellen, Grafiken oder Programme erstellt werden, die diese Iteration überflüssig machen – beispielsweise in Form der erwähnten, aus dem Stahlbetonbau bekannten k_d-Tafeln.

3.7.3.3.3 Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit

Die Gebrauchstauglichkeit lässt sich grundsätzlich immer dann verbessern, wenn Materialien verwendet werden, die eine höhere Steifigkeit aufweisen als das Grundmaterial. Dann steigt zwangsläufig die Gesamtsteifigkeit des Hybridbauteils. Dies korrespondiert in der Regel mit einer Tragfähigkeitssteigerung. Eine Abschätzung kann über die linear-elastische Ermittlung der effektiven Biegesteifigkeit erfolgen. Werden zur Ermittlung der Tragfähigkeit andere Modelle – wie der Ansatz von Plastifizierungen und gerissenen Zugzonen – genutzt, sollte natürlich auch die Gebrauchstauglichkeit nach diesen Modellen bestimmt werden. Dazu sind neben den Einzelsteifigkeiten lediglich die Steineranteile unter Berücksichtigung des jeweiligen Schwerpunktes a_i der Einzelteile zu bestimmen. Ein nachgiebiger Verbund wird wie erwähnt hier nicht behandelt. Daher gilt:

$$(EI)_{eff} = \sum (E_i \cdot I_i + E_i \cdot A_i \cdot a_i^2) \tag{3.186}$$

In der erstellten Exceldatei sind die entsprechenden effektiven Biegesteifigkeiten für die einzelnen Rechenmodelle enthalten (siehe Anlage „7.03 Bemessung von Hybridträgern und Hybridbohlen“ auf beiliegender CD).

Zu berücksichtigen ist, dass für Hybridbauteile wegen des in der Regel unterschiedlichen Langzeitverhaltens der Einzelteile mindestens der Anfangszustand – unter Berücksichtigung der Kurzzeitsteifigkeiten – und der Endzustand – unter Berücksichtigung des Kriechens – zu betrachten ist. Nach DIN 1052 darf der E-Modul für den Endzustand vereinfacht ermittelt werden zu:

$$E_{End,i} = \frac{E_{Anfang,i}}{1 + k_{def,i}} \tag{3.187}$$

Das Material, welches stärker kriecht, entzieht sich im Laufe der Zeit der Belastung, so dass Spannungen in das weniger kriechende Material umgelagert werden. Gerade bei Materialien, die für eine Traglaststeigerung vorgesehen sind, ist folglich darauf zu achten, dass diese nicht „wegkriechen“ und damit ihre tragfähigkeitssteigernde Wirkung verlieren. Besteht die Gefahr großer Kriechverformungen, sollten diese Materialien daher nur dort eingesetzt werden, wo hohe veränderliche Lasten, jedoch geringe ständige oder quasi-ständige Lasten abzutragen sind, da nur letztere ein Kriechen bewirken.

Für KHP wurden zum Teil sehr große Kriechzahlen k_{def} ermittelt (vgl. Kap. 3.2.8.5). Während KHP unter einer geringen Dauerlast sehr wenig kriecht, treten bei hohen Dauerlasten große Kriechzahlen auf. Bei Ansatz eines linear-elastischen Rechenmodells ist dies unkritisch, da in diesem Fall nur geringe Spannungen im KHP und damit kleine Kriechzahlen auftreten. Soll jedoch ein Rechenmodell unter Ansatz einer gerissenen Zugzone und der vollen Ausnutzung der Biegezugfestigkeit des Verstärkungsmaterials verwendet werden (Rechenmodell 3), müssen die großen Kriechzahlen von im Mittel 1,2 in NKL 1 bis 3,7 in NKL 3 (vgl. Kap. 3.2.8.5) zwingend berücksichtigt werden. Dies führt dazu, dass die tragfähigkeitssteigernde Wirkung von KHP bei hohen Dauerlasten im Laufe der Zeit verloren geht. Zudem sind die Dauerfestigkeiten noch nicht bestimmt, weshalb der Nachweis im Endzustand zur Zeit mit großen Unsicherheiten behaftet ist.

Hybridbauteile mit stark kriechenden Verstärkungslamellen werden daher für solche Anwendungen empfohlen, bei denen neben einer geringen ständigen Last vor allem hohe veränderliche Lasten – beispielsweise aus Wind, Schnee oder kurzzeitig wirkenden Verkehrslasten – abzutragen sind. Mögliche Einsatzbereiche sind daher zum Beispiel Dach- und Hallenkonstruktionen sowie Fuß- und Radwegbrücken. Auch zum Abtrag kurzzeitig wirkender hoher außergewöhnlicher Einwirkungen – wie beispielsweise Anprall, Explosionen oder Erdbeben – eignen sich solche Hybridbauteile gut. Zum Abtrag hoher ständiger Lasten sind sie jedoch ungeeignet.

Zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit eignen sich alle Materialien, bei denen die Wasseraufnahme und der Aufschluss durch Pilze und Insekten vermindert sind. Bei Hybridbauteilen, die solche Materialien enthalten, ist zu beachten, dass diese in der Regel ein verändertes Schwind- und Quellverhalten zeigen, so dass mit Zwangsspannungen in den Verbundfugen zu rechnen ist. Bei vergüteten Materialien sind zudem größere Temperaturausdehnungskoeffizienten möglich, so dass auch das Verhalten bei veränderlichen Temperaturen untersucht werden sollte, auch wenn dieses im Holzbau in der Regel von untergeordneter Bedeutung ist.

Für die im Projekt vertieft untersuchten KHP-BSH-Hybridträger und TMT-Lärche-Hybridbohlen wurde daher einerseits das Verhalten der Einzelteile untersucht (vgl. Kap. 3.2.3.1: „Holzveredlung durch Furniertränkung in Kunstharz (KHP)“, Kap. 3.2.3.2: „Holzveredlung durch thermische Modifikation von Holz (TMT)“, Kap. 3.2.6.2: „Bestimmung der Feuchteaufnahme von KHP“ sowie Kap. 3.2.7.2: „Dauerhaftigkeit alpiner Lärche“). Andererseits wurde das Verhalten der Hybridbauteile inkl. des Einflusses zwei verschiedener Klebstoffe betrachtet (vgl. Kap. 3.2.3.4: „Verbundqualität der Leimfugen von Hybridträgern (BSH-Lärche mit KHP-Decklamelle)“, Kap. 3.2.3.5: „TMT-Lärche-Querschnitte im Klimaschrank – Verbundfuge“, Kap. 3.2.6.3: „Bestimmung des Quell- und Schwindverhaltens von Verbundquerschnitten“, Kap. 3.2.7.1: „Delaminationsprüfungen“, Kap. 3.2.7.3: „Freibewitterung von Hybridträgern (KHP-Decklamellen und BSH-Fichte)“, Kap. 3.2.7.4: „Freibewitterung von Verbundbohlen aus TMT- und Fichtenholz“ und Kap. 3.2.7.5: „Freibewitterung von Verbundquerschnitten aus TMT und Lärchenholz“).

3.7.3.3.4 Zusammenfassung und Ausblick

Im HHT-Projekt wurden schwerpunktmäßig zwei verschiedene Hybridbauteile untersucht. Einerseits sollten Bauteile realisiert werden, für die – gegenüber üblichem Brettschichtholz – erhöhte Tragfähigkeiten und erhöhte Dauerhaftigkeiten gefordert wurden. Dies wurde durch KHP-BSH-Hybridträger verwirklicht, welche patentiert wurden (vgl. Patentschrift DE102008004091A1, www.patent-de.com/20090716/DE102008004091A1.html). Andererseits sollten Bauteile gefertigt werden, die zwar geringere Anforderungen bezüglich der Tragfähigkeit zu erfüllen hatten, jedoch ebenfalls eine erhöhte Dauerhaftigkeit aufweisen sollten. Dies wurde durch TMT-Lärche-Hybridbohlen erreicht.

Zur Ermittlung der Tragfähigkeit wurden verschiedene Rechenmodelle untersucht und in einer Exceldatei aufbereitet. Diese liefern auch die zur Ermittlung der Gebrauchstauglichkeit nötigen Kenngrößen. Für KHP-BSH-Hybridträger wird der Ansatz mit teilweise plastifizierter Druckzone und teilweise gerissener Zugzone (Rechenmodell 3) empfohlen, um das volle Tragfähigkeitspotential auch rechnerisch ausnutzen zu können. Diese Hybridträger eignen sich – wegen der teilweise hohen Kriechzahlen des KHP – gut für Einsatzbereiche mit hohen veränderlichen Lasten bei geringen ständigen Lasten, sollten bei hohen Dauerlasten jedoch nicht eingesetzt werden. TMT-Lärche-Hybridbohlen weisen hingegen keine erhöhten Tragfähigkeiten auf. Für diese Hybridbohlen wird das linear-elastische Verfahren (Rechenmodell 1) empfohlen. Wegen der Materialversprödung gerade im Zugbereich ist zudem darauf zu achten, dass TMT nur in der Druckzone von Hybridbauteilen angeordnet wird.

Bezüglich der Dauerhaftigkeit wurden verschiedene Versuche sowohl für die Materialien selbst als auch für die Hybridbauteile durchgeführt. Für TMT liegen zudem mit dem „Gütezeichen TMT“ und den in diesem Zusammenhang durchgeführten Prüfungen des Entwicklungs- und Prüflabor Holztechnologie GmbH (eph) zahlreiche Materialkennwerte und die Einstufung in Dauerhaftigkeitsklassen vor. Für das verwendete Produkt TMT Esche 200 der Firma Thermoholz Spreewald GmbH kann die Dauerhaftigkeitsklasse 1 (gegen holzzerstörende Pilze) angesetzt werden, das Material ist also sehr dauerhaft (Zertifikat TMT-2008-04-02-02). Für KHP stehen solche Einstufungen aus. Die im Projekt durchgeführten Versuche zeigen eine sehr hohe Dauerhaftigkeit, dies ist jedoch in Langzeituntersuchungen und beispielsweise Pilzprüfungen weiter zu untersuchen, um statistisch abgesicherte Angaben zu erhalten.

Die Ökobilanzierung zeigt, dass TMT aus ökologischer Sicht als unkritisch zu bewerten ist, da hier im Vergleich zum Vollholz lediglich ein erhöhter Energieaufwand für das Erhitzen aufgebracht werden muss (vgl. Kap. 3.9.2). KHP zeigt in der Ökobilanzierung hingegen deutlich schlechtere Werte. Maßgebend sind hier der zur Zeit noch sehr hohe Harzeintrag und der Energieaufwand zum Herstellen und Verpressen der Furniere (vgl. Kap. 3.9.2). Dazu ist jedoch anzumerken, dass die Lebenszyklusanalyse am Hybridträger für die HHT-Brücke im Pilotprojekt „Fußgängerbrücken“ vorgenommen wurde. Die ökologische Bewertung bezieht sich also explizit auf den dort verwendeten Träger. Für diesen wurde die Tragfähigkeit nach dem linear-elastischen Verfahren bestimmt, da zum Zeitpunkt der Entwurfsplanung im Jahr 2006 lediglich für dieses Verfahren die nötigen Kennwerte und gesicherten Rechenmodelle vorlagen. Die angesetzte Tragfähigkeit ist damit sehr gering (vgl. Übersicht über die Tragfähigkeiten nach Rechnung und im Bruchversuch in Kap.3.8.2.3 und Tabelle 3.60). Zum jetzigen Zeitpunkt kann die Tragfähigkeit genauer abgeschätzt werden, so dass die Trägerhöhe und damit der Materialeinsatz deutlich reduziert werden könnte, was natürlich die Ökobilanzierung verbessert. Zudem wurde die gleiche Nutzungsdauer wie bei der konventionellen Holzbrücke am angesetzt. Die erhöhte Dauerhaftigkeit wurde in der Lebenszyklusanalyse also nicht berücksichtigt, da sie zum damaligen Zeitpunkt zwar bereits vermutet wurde, jedoch noch nicht untersucht und damit bestätigt worden war. Eine verlängerte Nutzungsdauer aufgrund der höheren Dauerhaftigkeit wirkt sich natürlich deutlich auf die Ökobilanzierung aus. Auch dies sollte zukünftig Berücksichtigung finden. Zudem sollte jedoch auch der Herstellprozess des KHP vor allem im Sinne eines geringeren Harzeinsatzes optimiert werden. Selbst wenn der Ansatz der höheren Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit die Ökobilanzierung sehr günstig ausfallen lässt, besteht hier noch Optimierungspotential.

Aus ökonomischer Sicht ist anzumerken, dass neue Materialien tendenziell immer teurer sind als Produkte, die bereits in Serienfertigungen massenweise produziert werden. Gerade KHP ist zur Zeit noch sehr kostenintensiv. Hier ist mit einem Faktor 10 gegenüber Standardbrettschichtholz zu rechnen (die Festigkeiten liegen allerdings auch um einen Faktor 5 - 9 höher, und die Dauerhaftigkeit ist ebenfalls deutlich erhöht).

Wichtig ist in jedem Fall, dass anfänglich die Anforderungen an das zu konzipierende Hybridbauteil definiert werden und die Zusammensetzung der Einzelteile zum Hybrid dann auf genau diese Anforderungen abgestimmt wird. Besondere Vorteile ergeben sich immer dann, wenn mehrere Anforderungen erfüllt werden können, wie beispielsweise erhöhte Tragfähigkeiten und

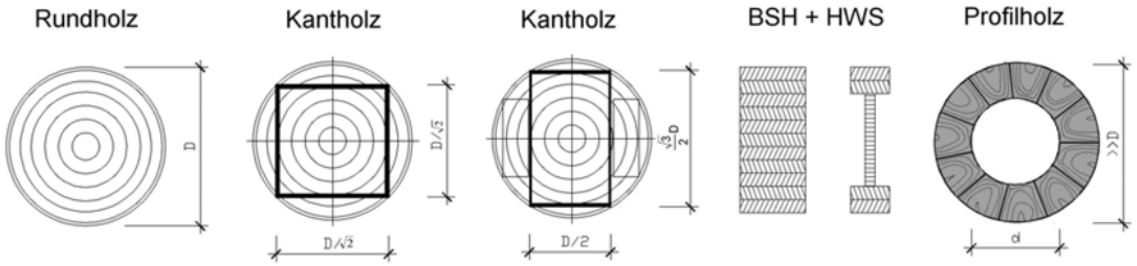
erhöhte Dauerhaftigkeiten für Hochleistungsholztragwerke im Außenbereich. Die anforderungsgerechte Zusammenstellung von Hybridbauteilen sollte dabei jedoch im Vordergrund stehen und nicht zuletzt aus ökologischen und ökonomischen Gründen erfolgen.

3.7.3.4 Formholzprofile

Autor: Yvette Lemke (IaFB)

Die Erfindung der Formholztechnologie basiert auf einem neuen Materialverständnis, das Holz als zellulären Stoff begreift, der sich unter Wärme und Druck stauchen lässt, wobei sich die Zellwände zusammenfalten.

Obwohl der Vollquerschnitt eine geringe Ressourcenproduktivität aufweist, ist er im Holzbau selbstverständlich. Für Kant- oder Brettschichtholz ergibt sich - verglichen mit technischen Profilen - bezüglich der Ressourcenproduktivität ein Verhältnis von bis zu 1:15, was zum einen mit den Verlusten im Sägewerk und zum anderen mit dem geringen Flächenmoment eines Vollquerschnittes zusammenhängt. Ausgehend vom Rundholz ist in Abb. 3.281 die Stoffausbeute sowie das erzielte Flächenmoment in der Wertschöpfungskette verschiedener Querschnittsarten dargestellt.



A / A_{max}	1	0,64	0,55	0,5	1
$\bar{E}I / EI_0$	1	0,42	0,55	…	>2

Abb. 3.281: Holzausbeute bezogen auf das Rundholz und Biegesteifigkeit EI verschiedener Querschnittstechnologien [211]

Im Allgemeinen beträgt das Porenvolumen von Nadelholz aus deutschen Wäldern ca. 60 %. Wegen seiner polymeren Zusammensetzung lässt es sich bei Temperaturen von 140°C und Druck von 5 MPa quer zur Faser leicht verformen, so dass sich die Mikrostruktur des Holzes zusammenfaltet. Nadel- und Laubhölzer sind für diesen Prozess gleichermaßen geeignet.

Die Verdichtung von Holz (hauptsächlich Laubholz) unter Wärme und Druck ist seit langem bekannt. Der Zellaufbau des Holzes, der nach Erreichen der Erweichungstemperatur des Lignins unter einer Presse verdichtet werden kann, ist die Voraussetzung für das Verdichten. Unter bestimmten hygro-thermischen Bedingungen lässt sich Holz wegen seines Porengehaltes von bis zu 60 Volumenprozent leicht wie ein Schwamm zusammendrücken. Durch die thermomechanische Verdichtung entsteht wegen der chemischen und mechanischen Veränderungen ein neuer Werkstoff. Die höhere Dichte führt zu größeren Festigkeiten.

Auch Formholz wird mittels thermomechanischer Verfahren hergestellt. Bei dem patentierten Verfahren des ISH werden Brettlamellen aus (derzeit noch ausschließlich) Fichtenholz in einer Mehretagenpresse bei einer Temperatur von etwa 140°C unter Feuchtigkeit und mit einem Druck von etwa 5 MPa senkrecht zur Faserrichtung um etwa 30 % verdichtet. Das verdichtete Material wird anschließend zu massiven Platten zugeschnitten und verklebt. Das Formen der Platten zu (derzeit noch ausschließlich) Rohrprofilen erfolgt nach erneuter Befeuchtung des Holzes in einer Formpresse. Die durch das Verdichten eingebrachten Verformungsreserven werden dabei genutzt. Eine schematische Darstellung wird in Abb. 3.282 gezeigt.

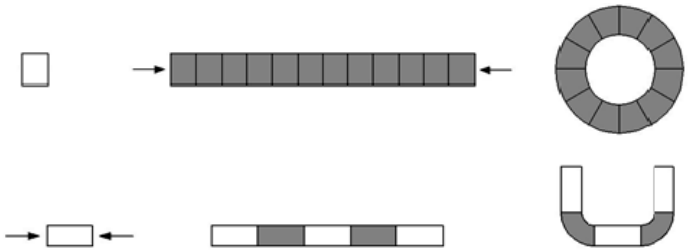


Abb. 3.282: Schema der Formholzherstellung

Die wichtigsten Prozessschritte von der sägerauen Brettware zum Formholzprofil können wie folgt beschrieben werden: zunächst wird das Material abgerichtet bzw. gehobelt und mit einem Verdichtungsgrad von etwa 25 bis 30 % verdichtet. Anschließend werden die verdichteten Querschnitte zu Platten verklebt und die Platte zum Profil geformt. Am Institut für Stahl- und Holzbau (ISH) der TU Dresden wurden dazu massive Platten aus verdichteter Fichte hergestellt, die danach wiederum unter Wärme und Feuchtigkeit zu runden Hohlprofilen geformt wurden. Dabei wird die Faltung der Wände teilweise wieder rückgängig gemacht. Der Krümmungsradius des Profils hängt von der vorherigen Verdichtung ab.

Im Prinzip sind auf diese Weise alle abwickelbaren Formen in beliebiger Länge und Querabmessung herstellbar. Bisher wurden jedoch ausschließlich Rohrprofile hergestellt und untersucht. Die bisher herstellbaren Abmessungen betragen 2,50 m in der Länge bei einem Rohrdurchmesser von 30 cm und einer Wandstärke von 2 cm. Mit einer Keilzinkung (siehe 3.2.1) lassen sich die Rohre verbinden und so gedanklich endlose Rohre herstellen.

Für einen wirtschaftlichen Einsatz im Bauwesen fehlen aber einige Materialparameter, ein vollständiger Bemessungsvorschlag und ein Sicherheitskonzept. Ein Ansatz für die Bemessung reiner Druckbeanspruchung ist in Kap. 3.5.2.1 hergeleitet und in Kap. 3.6.4.3 erläutert.

Weitere Querschnittsformen wurden bisher lediglich theoretisch durchdacht.

Bisher gibt es lediglich für das o.g. herstellbare Rohr eine Maschine für die Fabrikation, so dass andere Profile bisher nicht in der Formholztechnologie herstellbar sind. So konnte der Mast des Pilotprojektes Vertikalachswindkraftanlage (siehe 3.8.3) nicht in Formholz hergestellt werden, weil die erforderliche und beanspruchungsgerechte Geometrie zwar theoretisch möglich, jedoch noch nicht praktisch herstellbar ist.

Durch eine Faserbewehrung kann die Traglast einer Formholzröhre gegenüber einer nicht verstärkten signifikant verbessert werden, außerdem lässt sich dadurch im Bereich der Anschlussmittel die Duktilität zusätzlich erhöhen. Das Nachbruchverhalten wird maßgeblich verbessert. Die textile Bewehrung kann die Querzug-, Schub- und Lochleibungsfestigkeit des Holzes erhöhen und bietet in Kombination mit der Matrix Schutz vor Witterung und anderen äußeren Einflüssen. Es wurden im HHT - Projekt drei verschiedene Technologien der textilen Verstärkung auf Formholzrohren untersucht. Sowohl die Wickel- und Flechttechnik, als auch Rundgestricke (Schläuche) mit einem Flächengewicht von ca. 400 g/m² je Richtung lassen sich praxisnah einsetzten. Alle drei Varianten zeigten eine gute Übereinstimmung mit den mechanischen Anforderungen an die Verstärkungsschicht. Es wurde eine vergleichbare Qualität von allen in der Ausführung erreicht. In den durchgeführten Versuchen erzielten Formholzrohre mit CFK-Wickelung deutlich höhere Traglasten (Steigerungen um über 50 %) und ein duktiles Verhalten im Vergleich zu den unverstärkten Referenzproben. Ferner belegen die Versuche, dass bereits ein geringer Bewehrungsgrad Traglast und Duktilität der Formholzrohre signifikant steigert (vgl. Kap. 3.5.2.1).

Die Stütze des Dachtragwerkes im 3. Pilotprojekt „Hess-Innenhofüberdachung“ (Abschnitt 3.8.4) ist eine Kragstütze. Sie wurde aufgrund der besseren Querschnittsausnutzung als Rohr entwickelt und erhält eine Faserbewehrung zum Schutz gegen Umwelteinflüsse und zur Verbesserung der Traglast und Steifigkeit des Verbundbauteils. Verstärkungsgrad, Faserwinkel und Ma-

terial lassen sich der statischen Beanspruchung anpassen. Für den rechnerischen Nachweis der Stütze im 3. Pilotprojekt wurde die Faserbewehrung jedoch nicht mit angesetzt, da bisher nur reine Druck- und Torsionsversuche an Formholzrohren durchgeführt wurden, für die Kragstütze aber die kombinierte Beanspruchung aus Biege- und Torsionsspannungen maßgebend wird. Inwieweit eine Faserbewehrung hier greift, ist noch weiter zu untersuchen. Bei schlanken Rohrprofilen mit geringer Wandungsstärke und axialer Druckbeanspruchung lassen sich Faserbewehrungen als Verstärkung sehr wirtschaftlich einsetzen.

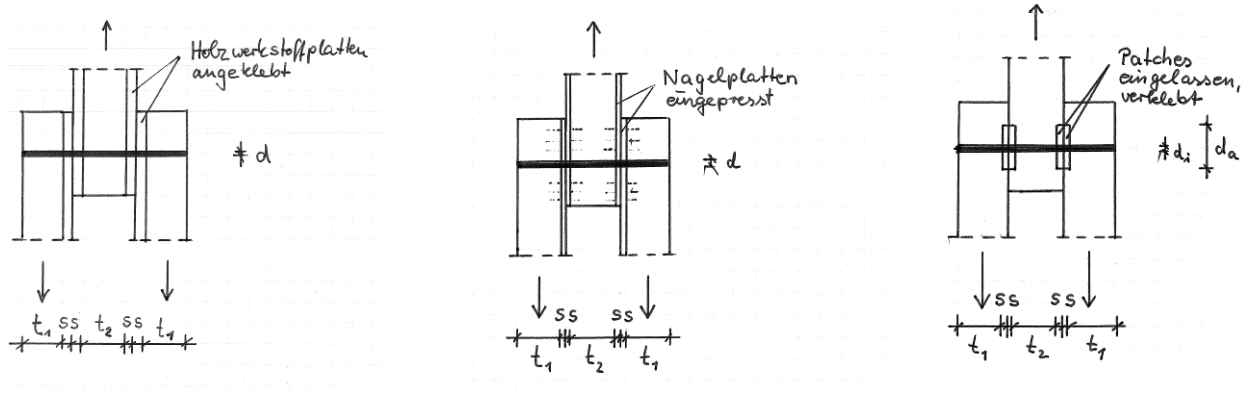
Die beiden Pilotprojekte „Windkraftanlage“ (3.8.3) und „Innenhofüberdachung“ (3.8.4) greifen einige der möglichen Anwendungsmöglichkeiten für Formholzröhren auf. Es sind aber neben der Anwendung als Mast oder Stütze sicher auch andere Einsatzmöglichkeiten wie zum Beispiel Versorgungsrohr denkbar. Um das Formholzrohr in der Praxis einsetzen zu können, müssen aber außer einem Bemessungskonzept auch Lösungen für Anschlüsse gefunden werden. Vorschläge für Anschlussmöglichkeiten sind im Abschnitt 3.7.3.8 erläutert.

3.7.3.5 Verbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln und Verstärkungen mit FKV

Autor: Anke Schäcke (IaFB)

Die Tragfähigkeit einer Verbindung mit stiftförmigen Verbindungsmittel unter Beanspruchung rechtwinklig zur Stiftachse (Abscheren) wird maßgeblich durch die Lochleibungsfestigkeit der anzuschließenden Holzbauteile bestimmt. D. h. werden die Holzbauteile im Anschlussbereich verstärkt, lassen sich die Verbindungen in ihrer Tragfähigkeit steigern.

Bekannt sind bereits die beiden folgenden Möglichkeiten der Verstärkung von Stiftverbindungen. Zum einen können in den Scherfugen Holzwerkstoffplatten (HWP) je Holzseite aufgeklebt werden (Abb. 3.283-a), und zum anderen besteht die Möglichkeit der Verstärkung, wenn in den Scherfugen Nagelplatten je Holzseite eingepresst werden (Abb. 3.283-b).



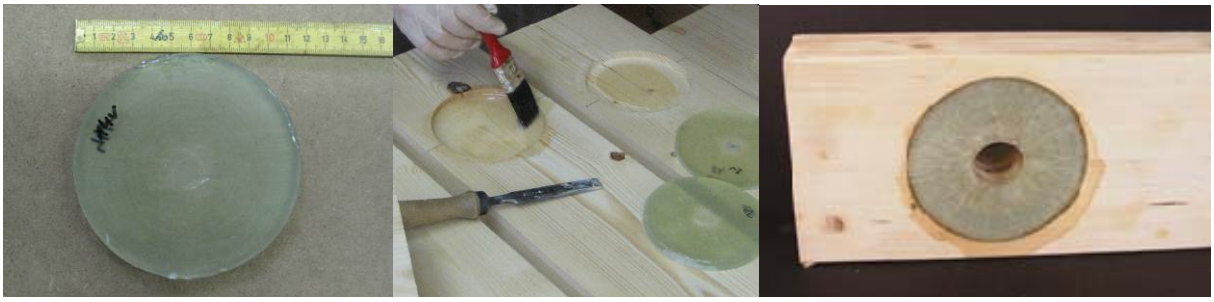
(a) (b) (c)

Abb. 3.283: Stabdübelverbindung mit Verstärkungen aus (a) Holzwerkstoffplatten (b) Nageldübeln und (c) Patches (FKV)

Eine neue Möglichkeit der Verstärkung der Holzbauteile besteht, wenn Faserkunststoffverbunde (FKV) in Form von Patches in die Holzbauteile je Scherfugenseite eingelassen und eingeklebt werden (Abb. 3.283-c). Ein Vorteil ist, dass der Querschnitt sich durch die Verstärkung nicht verbreitert, da die Patches im Holzbauteil eingelassen sind. Für den Nachweis des Holzbauteils im Anschluss ist aber die Querschnittsreduzierung zu berücksichtigen.

Patches aus FKV sind Gestricke, Gelege oder Gewebe aus Fasern, beanspruchungs- und formgerecht in einer Matrix eingebettet. Aus früheren Untersuchungen war bekannt, dass Schlaufen, Spiralen und sternförmige Gelege aus Glasfaserrovings, die dem Kraftverlauf um den Dübel im Anschluss am besten angepasst sind, die größte Verstärkungswirkung zeige. [198]. Daher wurden im Projekt Glasfaser Mehrlagengestricke (MLG) kreisringförmig in Epoxid-

harzmatrix als praxistaugliche Bauteile zur Verstärkung von Verbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmittel entwickelt und umgesetzt (vgl. Abb. 3.284 und Abschnitt 3.4.1). Die Lochleibungsfestigkeit der Patches ist um ein vielfaches höher als die der anzuschließenden Holzbauteile, so wird die Tragfähigkeit des Anschlusses wesentlich gesteigert und das Spalten der Hölzer der Verbindung wird verhindert.



(a) (b) (c)

Abb. 3.284: Ausführung einer stiftförmigen Verbindung mit eingeklebtem Patch, (a) Patch, (b) Einleimung des Patch und (c) Eingeklebtes Patch im Bauteil

Im HHT-Projekt fanden Versuche zur Lochleibungsfestigkeit nach DIN EN 383 an den beschriebenen beanspruchungsgerecht verstärkten Holzbauteilen mit einem Einzeldübel unter Belastung parallel zur Faser statt (vgl. Abschnitt 3.3.1). Dabei erreichte die mit Gestricken verstärkte Verbindung eine Steigerung der Traglast um 384% und der Steifigkeit um 233% gegenüber der Referenzverbindung. Das Verhalten der Verbindung im Versuch war duktil, welches auf das Lochleibungsversagen der Patch zurückzuführen ist.

Die im weiteren Projektverlauf neu entwickelten Patches haben einen Außendurchmesser von 120 mm und eine Dicke von 10 mm mit einem vorgesehenen Dübelloch (und damit Innendurchmesser) von 20 mm (Abb. 3.284). Der Faservolumengehalt der Bauteile liegt bei etwa 20%. Es wurde geplant diese Bauteile im HHT-Pilotprojekt „Hess-Innenhofüberdachung“ für die Verstärkung der Passbolzenverbindung in einigen Kreuzungsknoten einzusetzen (vgl. Abschnitt 3.8.4). Daher fanden Bauteilversuche statt, um Traglastuntersuchungen vorzunehmen und den Biege-Elastizitätsmodul verschiedener Verbindungen zu bestimmen. Die durchgeführten Biegeversuche an mehrteiligen Biegeträgern mit nachgiebigem Verbund haben bestätigt, dass die Nachgiebigkeit der Verbundfugen entscheidenden Einfluss auf die Deformation und die Traglast der Träger haben. Daher wurden Scherversuche an stiftförmigen Verbindungen mit und ohne Verstärkungsmaßnahmen durchgeführt. Hierbei wurde festgestellt, dass die Verstärkung von Bolzenverbindungen mit Patch eine Erhöhung der Traglast von mehr als 200% gegenüber den nichtverstärkten Referenzbauteilen bewirkt. Die Steifigkeit der Verbindung wächst dabei auf 2,4-fache Werte an. [199]

Um die mit Patches verstärkten stiftförmigen Verbindungen rechnerisch nachweisen zu können, ist ein Bemessungsvorschlag erarbeitet worden, der im Folgenden vorgestellt wird.

Für die Ermittlung der Tragfähigkeit bei Beanspruchung rechtwinklig zur Stiftachse (Abscheren) können die Bemessungswerte der Tragfähigkeit R_k je Scherfuge und Verbindungsmittel nach dem genaueren Nachweisverfahren in der DIN 1052:2008-12, Anhang G nicht ohne weiteres angewendet werden, da die Lochleibungsfestigkeit der Verstärkung nicht berücksichtigt wird. Die Grundlage für diese Gleichungen zur Berechnung der Tragfähigkeit von Verbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln gehen auf die Arbeit von Johansen [200] zurück. Dabei darf für die Stifte unter Biegebeanspruchung und für das Holz und die Holzwerkstoffe unter Lochleibungsbeanspruchung ideal-plastisches Verhalten angenommen werden (DIN 1052:2008-12, Abschn. 12.2.1 (1). Nach der Johansen-Theorie ist die Tragfähigkeit einer Verbindung mit Stiften erreicht, wenn die Lochleibungsspannungen in mindestens einem der verbundenen Bauteile die Lochleibungsfestigkeit erreichen und in bestimmten Fällen gleichzeitig Fließgelenke im Stift

auftreten. Der Typ des Versagensmechanismus hängt von der Geometrie der Verbindung, dem Fließmoment des Stiftes und der Lochleibungsfestigkeit des Holzes bzw. der Holzwerkstoffe ab.

In Anlehnung an Johansen [200] hat Werner in [197] die rechnerischen Tragfähigkeiten von Holz-Holz und Stahlblech-Holz-Verbindungen mit Verstärkungen aus Holzwerkstoffplatten hergeleitet und durch Versuche überprüft.

Die Tragwirkung der verstärkten Verbindung mit FKV gleicht der der Verstärkung mit HWP. Beide sind verklebt mit dem Holzbauteil und das Lochleibungsversagen zeigt in den Versuchen gleiche Muster. Daher können die Gleichungen für die rechnerische Tragfähigkeit von Stiftverbindungen mit Verstärkungen aus FKV in Anlehnung an die Herleitung von Werner [197] angegeben werden. Die Bemessung erfordert die Kenntnis der Lochleibungsfestigkeit der verschiedenen Baustoffe und der Biegetragfähigkeit des Verbindungsmittels. In [197] werden die zusätzlichen Systemeigenschaften einer Verbindungsart in einem Systemfaktor k_{sys} zusammengefasst. Bei Versagenskriterien, in denen nur das Lochleibungsversagen die Tragfähigkeit bestimmt, entfällt dieser Systemfaktor. Werner gibt in [197] an, dass durch das Aufkleben von Holzwerkstoffplatten auf die Hölzer die Art der Stauchung unter dem Verbindungsmittel beeinflusst wird, so dass die charakteristische Lochleibungsfestigkeit der Hölzer um 10 % gegenüber den in DIN 1052:2008-12, Abschn. 12 angegebenen Werten erhöht werden kann. Da wir für das Verhalten von FKV auf Holz geklebt bisher keine Versuche in für statistisch abgesicherte Ergebnisse ausreichender Anzahl durchgeführt haben, kann auch keine qualitative Aussage über die Art der Stauchung unter dem Verbindungsmittel getroffen werden. Daher wird der Systemfaktor k_{sys} bei Verstärkungen mit FKV zu 1 gesetzt, d. h. er findet keine Berücksichtigung in den Gleichungen. Treten Versagensmechanismen mit plastischen Gelenken im Stift auf, so sind die entsprechenden Gleichungen für Versagensmechanismen mit Ausbildung von Fließgelenken im Stift in der Praxis noch nicht gesichert anwendbar. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf, um durch eine ausreichende Anzahl von Versuchen für Stiftverbindungen mit Verstärkungen aus FKV den Systemfaktor k_{sys} zu bestimmen. Bei Auftreten von reinem Lochleibungsversagen (keine Fließgelenke im Verbindungsmittel) sind die entsprechenden Bemessungsgleichungen in der Praxis anwendbar.

Es ergeben sich am Beispiel der zweischnittigen Holz – Holz Verbindung die folgenden Gleichungen für die Tragfähigkeit R_d bei Beanspruchung rechtwinklig zur Stiftachse (Abscheren) pro Verbindungsmittel und Scherfuge.

Dabei gelten die Abkürzungen

t_1 und t_2	Dicke der Hölzer oder Eindringtiefe des Verbindungsmittel
s	Dicke der eingeklebten Patches (FKV)
$f_{h,1}$ und $f_{h,2}$	Lochleibungsfestigkeiten der Hölzer in t_1 bzw. t_2
$f_{h,s}$	Lochleibungsfestigkeit der eingeklebten Patches (FKV)
k_{sys} = 1,0	Systemfaktor für Verstärkungen mit Patches (FKV)

und die Substitutionen $\beta = \frac{f_{h,2,d}}{f_{h,1,d}}$ und $\eta = \frac{f_{h,s,d}}{f_{h,1,d}}$.

Für die Dicke und die Lochleibungsfestigkeit der jeweils in den Scherflächen eingeklebten Patches wurde die gleiche Größe gewählt, zur Vereinfachung der Gleichungen.

Zweischnittige Holz-Holz Verbindung

$$R_d = \min \begin{cases} f_{h,1,d} \cdot t_1 \cdot d + f_{h,s,d} \cdot s \cdot d \\ 0{,}5 \cdot f_{h,2,d} \cdot t_2 \cdot d + f_{h,s,d} \cdot s \cdot d \\ k_{sys} \cdot \dfrac{\beta \cdot f_{h,1,d} \cdot d}{2+\beta} \left(\sqrt{(t_1 + 4s)^2 + \dfrac{2+\beta}{\beta} \left(t_1^2 - 4 \cdot \eta \cdot s^2 + \dfrac{4M_{y,d}}{d \cdot f_{h,1,d}} \right)} - (t_1 + 4s) \right) + f_{h,s,d} \cdot s \cdot d \\ k_{sys} \cdot \dfrac{2 \cdot \beta \cdot f_{h,1,d} \cdot d}{1+\beta} \left(\sqrt{s^2 - \dfrac{1+\beta}{2\beta} \left(\eta s^2 - \dfrac{2M_{y,d}}{d \cdot f_{h,1,d}} \right)} - s \right) + f_{h,s,d} \cdot s \cdot d \end{cases} \quad (3.188)$$

In der HHT-Praxisempfehlung „Stiftverbindungen mit Verstärkungen aus FKV“ sind alle Gleichungen aus dem Bemessungsvorschlag zur Ermittlung der rechnerischen Tragfähigkeiten von Holz-Holz und Stahlblech-Holz-Verbindungen mit Verstärkungen aus FKV zusammengestellt. Die HHT – Praxisempfehlung ist dem Anhang beigefügt (siehe Anlage A5: HHT-Praxisempfehlungen).

Die Klebefuge (Abb. 3.285) ist sowohl bei Verstärkungen aus HWP als auch bei Verstärkungen aus FKV nachzuweisen, da für die Anwendungen starrer Verbund zwischen Holz und Verstärkung vorausgesetzt wird und der Nachweis der Klebefuge nicht bemessungsmaßgebend werden darf.

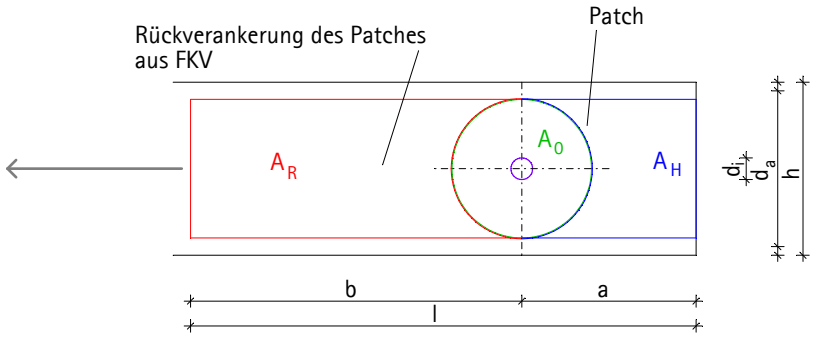


Abb. 3.285: Ansicht der Klebefuge mit möglicher Rückverankerung aus FKV

Da die Patches in das Holzbauteil eingelassen und eingeklebt werden, ist die Tragwirkung als Scheibendübel zu vermuten. Beim Ansatz der Tragfähigkeit der Klebefuge wird daher nicht nur die Klebefläche des Patch A_0, sondern auch die Vorholzfläche A_H mit in Ansatz gebracht, weil die Scherfestigkeit des Holzes kleiner ist als die der Faserkunststoffmatrix und damit maßgebend wird. Die mögliche Ermittlung der Tragfähigkeit der Verbindung mit Scheibendübel (Dübel besonderer Bauart) wird nicht in Ansatz gebracht, da aufgrund der geringen Randabstände die Scherfestigkeit des Vorholzes maßgebend und damit die Klebefuge wieder relevant wird. Der Bemessungsvorschlag von Stiftverbindungen mit Verstärkungen aus Patches (FKV) sieht daher vor, dass die Klebefuge nicht versagt und somit der Nachweis der Klebefuge nicht maßgebend wird. Dafür ist die Klebefuge ausreichend groß zu dimensionieren. Das heißt, ist die Scherfläche des Patch A_0 und der mitwirkenden Vorholzfläche A_H zu klein, um die Tragfähigkeit der Lochleibung des eingeklebten Patch zu übertragen, so muss das Patch eine zusätzliche Rückverankerung aus FKV A_R erhalten (Abb. 3.285).

Tragfähigkeit der Lochleibung des Patch

$$R_{L,k} = f_{h,s,k} \cdot s \cdot d \tag{3.189}$$

mit

$f_{h,s,k}$ Lochleibungsfestigkeit des Patch (FKV)
s Plattendicke
d Durchmesser des Verbindungsmittels

Tragfähigkeit der Klebefuge ohne zusätzliche Rückverankerung des Patch

$$R_{Klebung,k} = f_{v,k}\left(A_0 + A_H\right) \tag{3.190}$$

mit

$$A_0 = \frac{\pi}{4}\left(d_a - d_i\right)^2 \tag{3.191}$$

$$A_H = a \cdot d_a - \frac{\pi}{4}\left(d_a - d_i\right)^2 / 2 \tag{3.192}$$

und

$f_{v,k}$ wirksame Scherfestigkeit der Klebefuge bzw. des Holzes,
für Brettschichtholz $f_{v,k}$ = 2,5 N/mm², Klebefugenfestigkeit bei nicht faserparallelen Scherbeanspruchungen (Rollschub) $f_{k2,k}$ = 0,75 N/mm²
A_0 Klebefläche Patch
A_H Scherfläche Vorholz
d_a Außendurchmesser des Patch
d_i Innendurchmesser des Patch

Tragfähigkeit der Klebefuge mit zusätzlicher Rückverankerung des Patch

$$R_{Klebung,Rück,k} = f_{v,k}\left(A_0 + A_H\right) + R_{Rückveran\,ker\,ung,k}$$

Die Tragfähigkeit der Rückverankerung des Patch wird beschrieben durch die Zugfestigkeit des Geleges (FKV), die Scherfestigkeit zwischen dem Patch und der Rückverankerung und der Scherfestigkeit der Klebefuge der Rückverankerung aus FKV. Der kleinere Wert ist maßgebend.

$$R_{Rückveran\,ker\,ung,k} = \min \begin{cases} R_{Zug,Gelege} \\ R_{Abscheren,FKV-FKV} \\ R_{Abscheren,Rück} \end{cases} \tag{3.193}$$

$$R_{Rückveran\,ker\,ung,k} = \min \begin{cases} f_{t,G,k} \cdot d_a \\ f_{v,s,k} \cdot A_0 \\ f_{v,k} \cdot A_R \end{cases} \tag{3.194}$$

mit

$$A_R = a \cdot d_a - \frac{\pi}{4}\left(d_a - d_i\right)^2 / 2 \tag{3.195}$$

und

$f_{t,G,k}$ Zugfestigkeit des Geleges je Flächengewicht der Fasern in [N/mm]
$f_{v,s,k}$ Scherfestigkeit der Matrix,
nach BS4995 z.B. Epoxy $f_{v,s,k}$ = 12 N/mm² (EUROCOMP)

Der Nachweis der Klebefuge lautet:

ohne zusätzliche Rückverankerung des Patch

$$R_{Klebung,k} \geq R_{L,k} \tag{3.196}$$

mit zusätzlicher Rückverankerung des Patch

$$R_{Klebung,Rück,k} \geq R_{L,k} \tag{3.197}$$

Da die Teilsicherheitsbeiwerte γ_M für FKV und deren Klebeverbindung noch nicht bestimmt sind, ist die Bemessung der Klebeverbindung allgemein schwierig. Es können bisher nur die charakteristischen Werte angegeben werden. Auch hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

3.7.3.6 Punktgestützter Holzstapelrost

Autor: Yvette Lemke (IaFB)

Im Zuge der Überlegungen für das Pilotprojekt „Innenhofüberdachung“ (3.8.4) wurde eine Konstruktion entwickelt, bei der ein gekrümmter, gitterartiger Gurtstapel punktgestützt auf einer Stütze und vier davon abgehenden Streben gelagert wird.

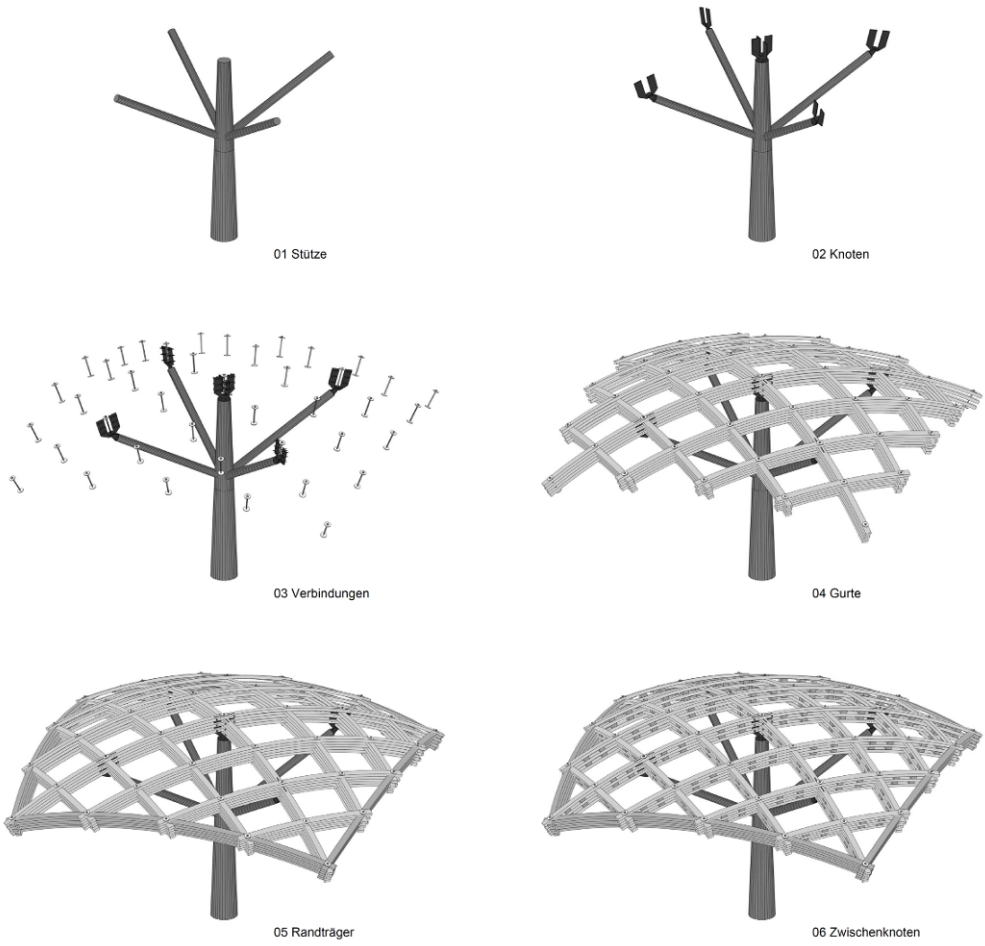


Abb. 3.286: Isometrien – Einzelteile eines punktgestützten Holzstapelrostes

Die Verbindungen der Gurte und Randträger sollen dabei jeweils nur über ein stiftförmiges Verbindungsmittel erfolgen, so dass sowohl Stahl als auch Montagezeit gespart wird.

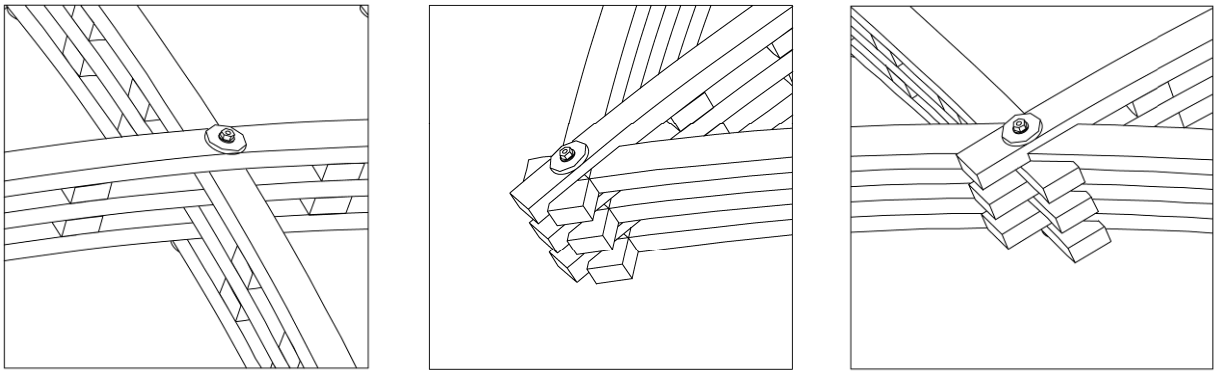
Da in den entsprechenden Kapiteln des Pilotprojektes eingehend die Konstruktionsentwicklung (3.8.4.3) und die Modellierung (3.8.4.4) erläutert wird, soll an dieser Stelle darauf verzichtet werden. Im Folgenden werden zusätzlich die Tragwirkung der Kreuzungsknoten eines Gurtstapels sowie die zugehörigen Nachweise beschrieben.

3.7.3.7 Knoten im Holzstapelrost mit einem Passbolzen als Verbindungsmittel

Autor: Anke Schäcke (IaFB)

3.7.3.7.1 Tragwirkung

Die Tragkonstruktion des punktgestützten Holzstapelrostes aus dem Pilotprojekt Hess-Innenhofüberdachung ist in Abschnitt 3.8.4.3 beschrieben. Bei der Ausbildung der Verbindungen der sich kreuzenden Holzgurte wurde eine einfache und schnell montierbare Lösung angestrebt. Ein einziger Passbolzen soll jeweils das Verbindungsmittel sowohl für die Kreuzungs- (KK) und Randknoten (RK), als auch für die Eckknoten (EK) sein (Abb. 3.287). Die Norm DIN 1052:2008-12, Abschnitt 12.3, Absatz (3) lässt einen Passbolzen je Verbindung zu, falls der charakteristische Wert der Tragfähigkeit nur zur Hälfte in Rechnung gestellt wird. Diese Forderung wird im Pilotprojekt für die KK und RK eingehalten. Für die am stärksten beanspruchten vier EK in der Dachkonstruktion beträgt die errechnete Ausnutzung der achtschnittigen Verbindung mit zwei Zwischenschichten jedoch ca. 70 % bzgl. der Gesamttragfähigkeit und bis zu 90% in einzelnen Fugen. Aufgrund der durchgeführten Bauteilversuche und der detaillierten Untersuchung der Versagenskriterien, soll im Pilotprojekt im Sinne eines Probebaus gezeigt werden, dass mehrschnittige Verbindungen mit einem Passbolzen durchaus auch bei höheren Auslastungen einzelner Fugen ausgeführt werden können. Die drei gekrümmten Gurte je Dachträger kreuzen sich orthogonal um eine Gurtstärke höhenversetzt, so dass im KK ein Holzstapel ohne Querschnittsschwächung entsteht. Durch diese Anordnung der Gurtträger entsteht jedoch für das Verbindungsmittel eine unsymmetrische Beanspruchung quer zur Stiftachse (Abscheren), welche im Folgenden näher betrachtet wird. Die Verbundwirkung der drei Holzgurte entsteht im Wesentlichen durch die Art der Verbindung der Zwischenknoten (schrägen Schrauben), aber auch durch die der Kreuzungsknoten.



KK Kreuzungsknoten EK Eckknoten RK Randknoten

Abb. 3.287: Knoten im Holzstapelrost mit einem Gelenkbolzen als Verbindungsmittel

Die Tragwirkung der Knoten wird beschrieben zum einen durch die Verschiebesteifigkeit der Passbolzenverbindung und zum anderen durch die Verdrehsteifigkeit des Holzstapels mit Bolzensicherung im Gurtträgerrost. Daraus ergeben sich drei Nachweise. Das sind erstens für das Verbindungsmittel die maßgebende Bolzenbiegung und evtl. das Abscheren des Bolzens (Stahlspannungsnachweis). Zweitens erfolgt der Nachweis der unsymmetrischen Verbindung mit stiftförmigem Verbindungsmittel. Dabei wird das maßgebende Versagenskriterium ermittelt und nachgewiesen. Drittens erfolgt der Nachweis der Holzstapelfuge mit der Beanspruchung senkrecht zur Faserrichtung des Holzes. In der Holzstapelfuge können nur Druckkräfte übertragen werden. Zugkräfte sind ausgeschlossen. Zur Sicherung der Fuge muss der Passbolzen folglich als Zugstab ausgebildet werden. Das Kurzschließen der Bolzenzugkraft in den Knoten zurück erfolgt über Unterlegscheiben auf den oberen bzw. unteren Gurt. Es werden die maximale Druckpressung im Holz senkrecht zur Faser, die mögliche Zugkraft im Bolzen und die Aufnahme der Ausziehkraft des Bolzens über die Unterlegscheibe als Flächenpressung auf den oberen bzw. unteren Gurt nachgewiesen.

Am Kreuzungsknoten Abb. 3.288 wird beispielhaft die Bemessung und Nachweisführung im Folgenden erläutert.

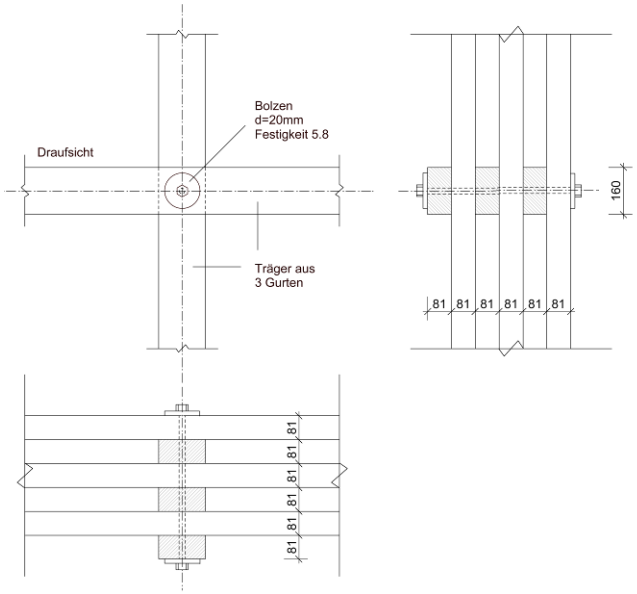


Abb. 3.288: KK Kreuzungsknoten mit einem Passbolzen

3.7.3.7.2 Nachweise

Bolzenbiegung

Die vorhandenen Bolzenschnittgrößen M_y, M_z, V_y und V_z werden mit dem Spannungsnachweis nach DIN 18800 nachgewiesen.

Normalspannungsnachweis:

$$\sigma_{x,d} = \pm\frac{M_{y,d}}{W_y} \pm \frac{M_{z,d}}{W_z} + \frac{N}{A} \le f_{y,d} \tag{3.198}$$

Da der Normalspannungsanteil sehr gering gegenüber der Biegespannung im KK ausfällt, wird nur die reine Biegetragfähigkeit des Bolzens ermittelt. Für Kreisquerschnitte gilt $W_y = W_z$ und daraus ergibt sich aufgrund der Biegetragfähigkeit des Bolzens ein erforderlicher Mindestdurchmesser von:

$$erf d = 3\sqrt{\frac{32}{\pi} \cdot \frac{\left(M_{y,d} + M_{z,d}\right) \cdot \gamma_M}{f_{y,k}}} \tag{3.199}$$

Schubspannungsnachweis:

$$\tau_{xz,d} = \frac{V_{z,d} \cdot S_y}{I_y \cdot d} \le \tau_{R,d} \tag{3.200}$$

$$\tau_{xy,d} = \frac{V_{y,d} \cdot S_z}{I_z \cdot d} \le \tau_{R,d} \tag{3.201}$$

Aufgrund der Schubspannungsnachweise ergibt sich ebenfalls ein erforderlicher Mindestdurchmesser:

$$erf d_{y;z} = \sqrt{\frac{16}{3\pi} \cdot \frac{V_{y,d;z,d} \cdot \sqrt{3} \cdot \gamma_M}{f_{y,k}}} \tag{3.202}$$

Falls $\sigma/\sigma_{R,d} \leq 0{,}5$ oder $\tau/\tau_{R,d} \leq 0{,}5$, was in der Regel der Fall ist, darf der Nachweis der Vergleichsspannungen entfallen und der größere Mindestdurchmesser ist maßgebend. Andernfalls ist der Vergleichsspannungsnachweis zu führen:

$$\sigma_{v,d} = \sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2 + 3\tau_{xz}^2} \leq \sigma_{R,d} \tag{3.203}$$

mehrschnittige unsymmetrische Verbindung mit einem stiftförmigem Verbindungsmittel

Die stiftförmige Verbindung des Kreuzungsknotens KK hat fünf Scherfugen und ist unsymmetrisch. Für die Berechnung der Tragfähigkeit einer mehrschnittigen Verbindung mit stiftförmigen Verbindungsmitteln ist die plausible Abfolge möglicher Versagensarten über die Länge des Stiftes zu betrachten. Beispielhaft sind die bekannten Versagensarten einer symmetrischen zwei-, vier- und sechsschnittigen Stiftverbindung in Abb. 3.289 (aus [201]) dargestellt. Die hier verwendeten Buchstaben stellen den Bezug zu den Gleichungen nach DIN 1052:2008-12, Anhang G her. Gesucht wird dabei die Versagensart, die den kleinsten Bemessungswert der Tragfähigkeit liefert.

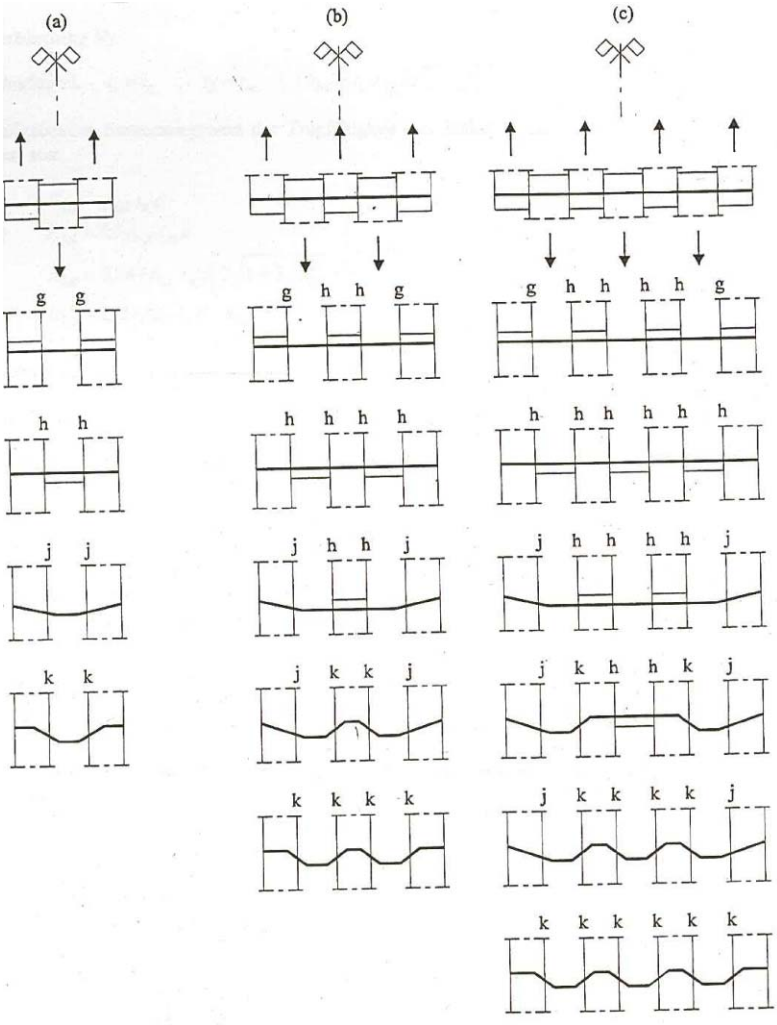
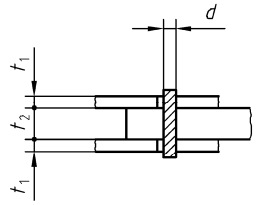
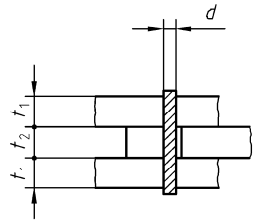
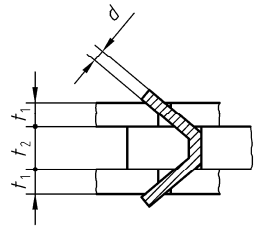
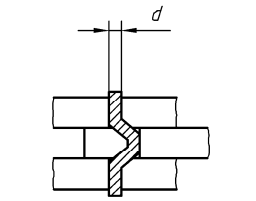


Abb. 3.289: Versagensarten einer (a) zwei-, (b) vier- und (c) sechsschnittigen Stiftverbindung

Die folgende Tabelle 3.58 zeigt die möglichen Versagensarten einer zweischnittigen Verbindung von Bauteilen aus Holz bzw. Holzwerkstoffen (HW) und die Zuordnung der verwendeten Buchstaben.

Tabelle 3.58: Versagensarten einer zweischnittigen Verbindung von Bauteilen aus Holz / HW

Lochleibungsversagen in Bauteil 1 (DIN 1052:2008-12, Anhang G, Gl. G.7)	(g)	
Lochleibungsversagen in Bauteil 2 (DIN 1052:2008-12, Anhang G, Gl. G.8)	(h)	
Lochleibungsversagen in Bauteil 1 und 2, Ausbildung eines Fließgelenkes in Bauteil 2 je Scherfuge (DIN 1052:2008-12, Anhang G, Gl. G.9)	(j)	
Lochleibungsversagen in Bauteil 1 und 2, Ausbildung zweier Fließgelenke in Bauteil 1 und 2 je Scherfuge (DIN 1052:2008-12, Anhang G, Gl. G.10)	(k)	

Für die Berechnung der Tragfähigkeit der fünfschnittigen Verbindung mit einem Stift (Bolzen) im KK wird die plausible Abfolge möglicher Versagensarten über die Länge des Stiftes in Abb. 3.290 betrachtet. Dabei ist festzustellen, dass in einer unsymmetrischen Verbindung im Vergleich zu einer symmetrischen Verbindung (Abb. 3.289) die Versagensarten in der ersten und fünften (letzten) Scherfuge nicht identisch sein müssen. Somit ergibt sich eine größere Anzahl von möglichen Versagensarten bei den unsymmetrischen Verbindungen.

Im Falle gleicher Bauteildicken liefert bei einer symmetrischen Verbindung das Lochleibungsversagen der innenliegenden Bauteile (h_i) den in Summe kleinsten Wert der Tragfähigkeit und daher wird die Versagensart (h_1 h_2 h_3 h_4 h_5) maßgebend. Hingegen liefert in der fünfschnittigen unsymmetrischen Verbindung die Ausbildung eines Fließgelenkes im letzten Bauteil 5 mit der Kombination aus Lochleibungsversagen der innenliegenden Bauteile 2 und 4 den in Summe kleinsten Bemessungswert der Tragfähigkeit (Versagensart h_1 h_2 h_3 h_4 j_5).

EC5 legt fest, dass in mehrschnittigen Verbindungen die Gesamttragfähigkeit als Summe der Mindesttragfähigkeiten aller Scherfugen bestimmt wird, wobei jede Scherfuge als Teil einer Reihe zweischnittiger Verbindungen anzusehen ist.

Um die Vorgehensweise bei einer unsymmetrischen Verbindung näher zu erläutern, wird der Berechnungsgang in Anlehnung an den EC 5 am fünfschnittigen Fall beschrieben (siehe Abb. 3.291).

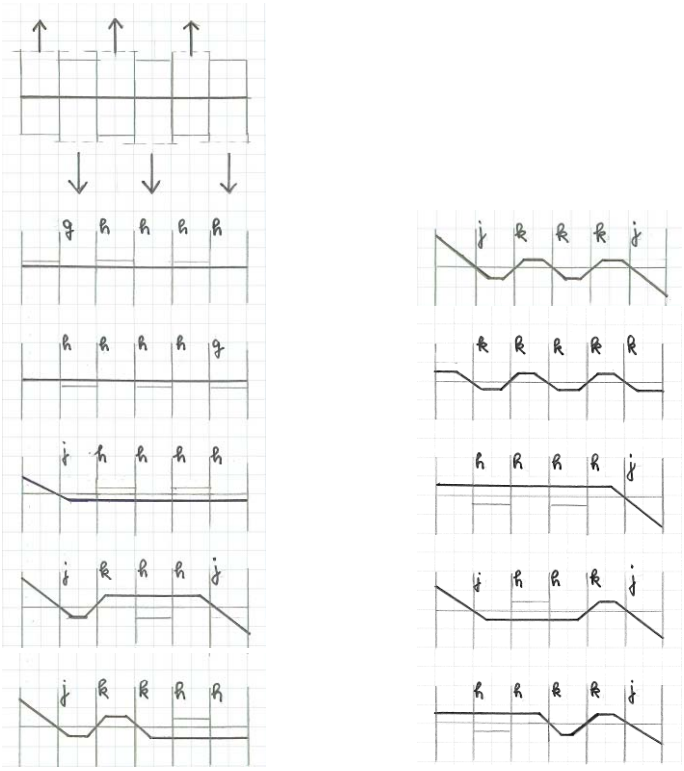


Abb. 3.290: Versagensarten einer 5-schnittigen Stiftverbindung

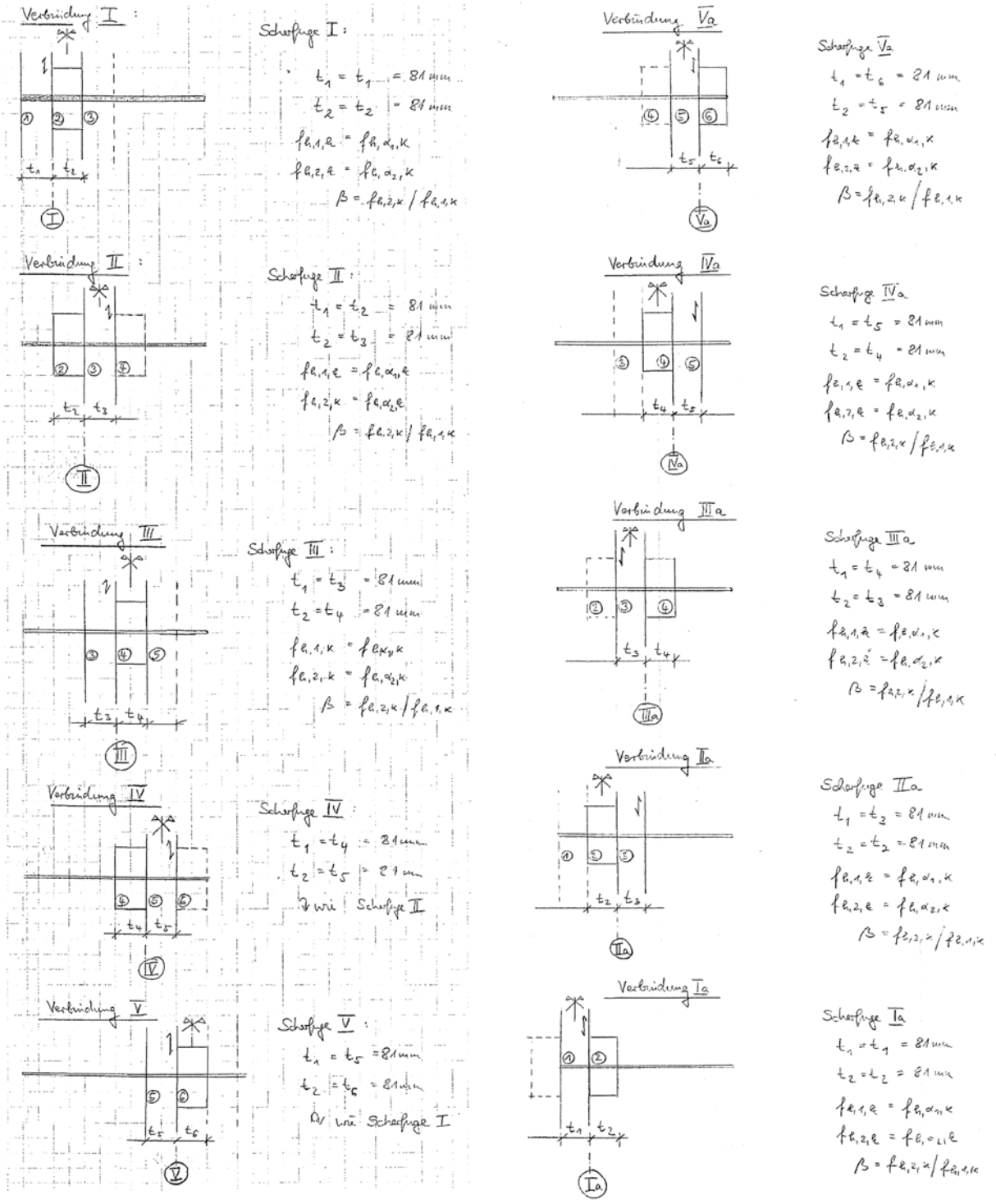
Zu Beginn wird die mehrschnittige Verbindung in zweischnittige Verbindungen I, II, III, IV und V von links betrachtet aufgeteilt. Bei unsymmetrischen mehrschnittigen Verbindungen muss die Aufteilung sowohl von links als auch von rechts vorgenommen werden, um den ungünstigsten Bemessungswert jeder Scherfuge zu ermitteln.

Die Hölzer 1, 2 und 3 bilden die erste zweischnittige Verbindung I, von der aber nur die Scherfuge I zwischen Holz 1 und 2 untersucht wird. Das Holz 3 wird als identisch mit Holz 1 angenommen, um die Verhältnisse der zweischnittigen Verbindung nach Tabelle 3.58 zu erhalten. Für die Verbindung I werden anhand der Versagensarten g, h, j und k die entsprechenden Bemessungswerte der Tragfähigkeit $R_{I,d}$ des Stiftes in der Scherfuge I ermittelt, um daraus im Anschluss den kleinsten Wert zu bestimmen.

Die Hölzer 2, 3 und 4 bilden die zweite zweischnittige Verbindung II, von der aber nur die Scherfuge II zwischen den Hölzern 2 und 3 untersucht wird. Das Holz 4 wird als identisch mit dem Holz 2 angenommen. Es sind die Versagensarten g, h und k zu untersuchen. Die Versagensart j entfällt, da sie sich nur in einem Randholz einstellen kann. Nur ein Fließgelenk im Mittelholz der zweischnittigen Verbindung, also hier Holz 3, kann sich nicht ausbilden, wenn noch weitere Scherfugen nach links bzw. rechts folgen. Bei den zweischnittigen Verbindungen III und IV ist ebenso zu verfahren.

Die Hölzer 5, 6 und ein gedachtes Holz 7 bilden die fünfte zweischnittige Verbindung V, von der aber nur die Scherfuge V zwischen den Hölzern 5 und 6 untersucht wird. Die Vorgehensweise erfolgt wie bei der Verbindung I.

Aufgrund der unsymmetrischen Verbindung muss nun die Aufteilung der mehrschnittigen Verbindung in die entgegengesetzte Betrachtungsrichtung erfolgen. Das heißt, die Hölzer 4, 5 und 6 bilden die erste zweischnittige Verbindung Va, von der aber nur die Scherfuge Va zwischen Holz 5 und 6 untersucht wird. Die weitere Vorgehensweise erfolgt analog zu den Verbindungen I bis V.



von oben (links) betrachtet von unten (rechts) betrachtet

Abb. 3.291: Aufteilung der Verbindung in zweischnittige Verbindungen I, II, ...und Ia, IIa,…

Der jeweils maßgebende Bemessungswert der Tragfähigkeit in den Fugen I bis V und Ia bis Va ist der kleinste Wert aus (g), (h), (j) oder (k). Die Scherfugen I, II, II, IV, V und die Scherfugen Ia, IIa, IIIa, IVa, Va treten jeweils nicht gleichzeitig auf, der minimale Wert aus dem jeweiligem Paar (z.B. I oder Ia) ist maßgebend.

Aufgrund der Unsymmetrie in der Verbindung kann für die Ermittlung der Gesamttragfähigkeit der fünfschnittigen unsymmetrischen stiftförmigen Verbindung die Versagensart (g) bzw. (h) in den Scherfugen I bzw. Ia und V bzw. Va nicht gleichzeitig auftreten.

Da bei gleichen Bauteildicken die Versagensart (h) den kleineren Wert aus (h) und (g) liefert, ergibt sich der Bemessungswert der Tragfähigkeit des Stiftes für den KK zu:

$$\begin{aligned} R_{Stift,d} &= \min\left\{R_{I,min,d};R_{Ia,min,d}\right\} + \min\left\{R_{II,min,d};R_{IIa,min,d}\right\} + \min\left\{R_{III,min,d};R_{IIIa,min,d}\right\} \\ &+ \min\left\{R_{IV,min,d};R_{IVa,min,d}\right\} + \min\left\{R_{V,min,d};R_{Va,min,d}\right\} \end{aligned} \tag{3.204}$$

mit den Bedingungen:

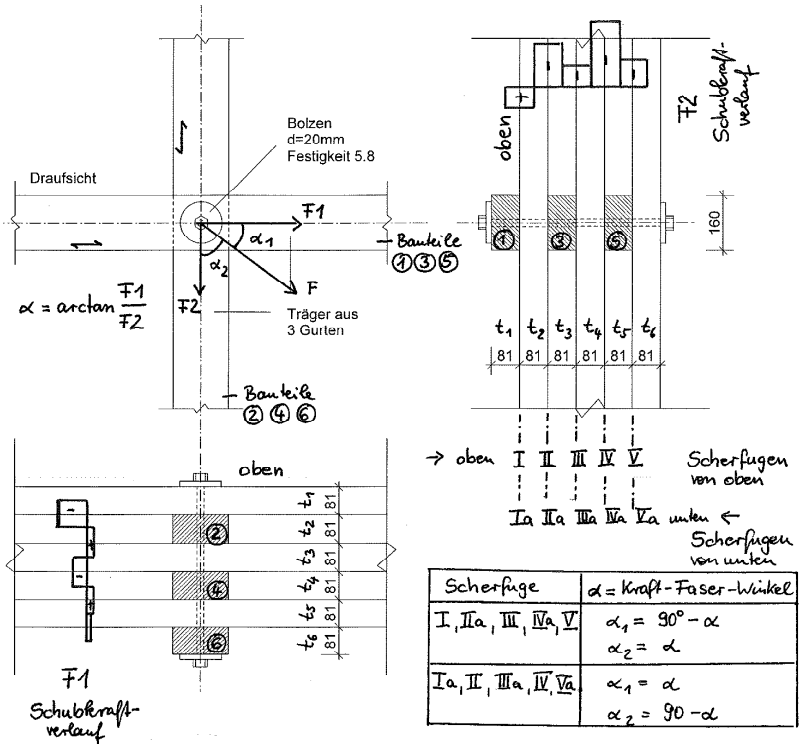
falls

$$\min\left\{R_{I,min,d};R_{Ia,min,d}\right\} = (h) \quad \text{dann} \quad \min\left\{R_{V,min,d};R_{Va,min,d}\right\} \neq (h) \tag{3.205}$$

bzw. falls

$$\min\left\{R_{V,min,d};R_{Va,min,d}\right\} = (h) \quad \text{dann} \quad \min\left\{R_{I,min,d};R_{Ia,min,d}\right\} \neq (h) \tag{3.206}$$

Für die Ermittlung der Tragfähigkeit der stiftförmigen Verbindung ist es erforderlich, die Lage der Kraft zur Faserrichtung des Holzes zu berücksichtigen. Es werden zwei Schubkraftrichtungen F1 und F2 definiert (Abb. 3.292), die den Kraft-Faser-Winkel α beschreiben. Dabei liegen F1 und F2 parallel zur Faserrichtung in den Gurtstabachsen. Die vorhanden Kräfte im Dachknoten des Pilotprojektes „Hess-Innenhofüberdachung“ sind nicht faserparallel und je Scherfuge nicht direkt übereinander, daher liegen die Resultierenden Scherkräfte F aller Scherfugen nicht in einer Ebene. Die Gesamttragfähigkeit der Verbindung wird als Summe der Mindesttragfähigkeiten aller Scherfugen bestimmt und ist somit richtungsunabhängig, da die jeweilige Kraftrichtung je Scherfuge unterschiedlich ist.



Scherfuge	α = Kraft-Faser-Winkel
I, IIa, III, IVa, V	$\alpha_1 = 90° - \alpha$ $\alpha_2 = \alpha$
Ia, II, IIIa, IV, Va	$\alpha_1 = \alpha$ $\alpha_2 = 90 - \alpha$

Abb. 3.292: Schubkräfte je Scherfuge und Bestimmung des Kraft-Faser-Winkels α

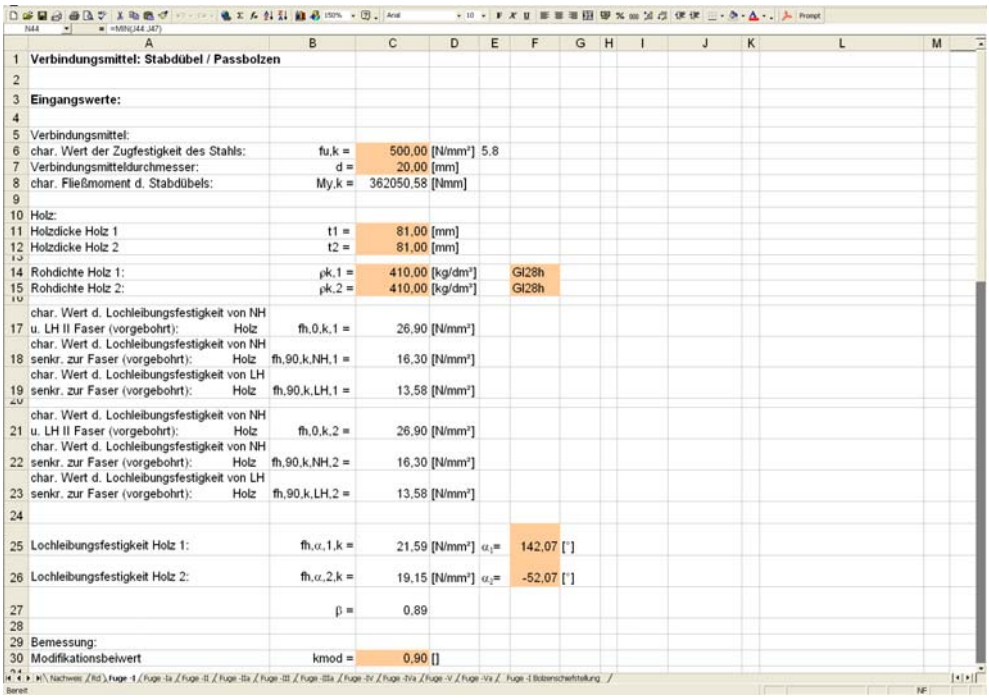
Die anfangs ermittelten Bemessungswerte der Tragfähigkeit des Stiftes als plausible Abfolge der Versagensarten über die Länge des Stiftes liegen höher als der ermittelte Bemessungswert der Tragfähigkeit des Stiftes in Anlehnung an den EC 5, da dort die Gesamttragfähigkeit als

Summe der Mindesttragfähigkeiten je Scherfugen bestimmt wird, ohne nicht plausible Versagensarten auszuschließen.

Der Berechnungsgang zur Ermittlung der Gesamttragfähigkeit einer mehrschnittigen unsymmetrischen Verbindung mit stiftförmigen Verbindungsmittel in Anlehnung an den EC 5 lautet:

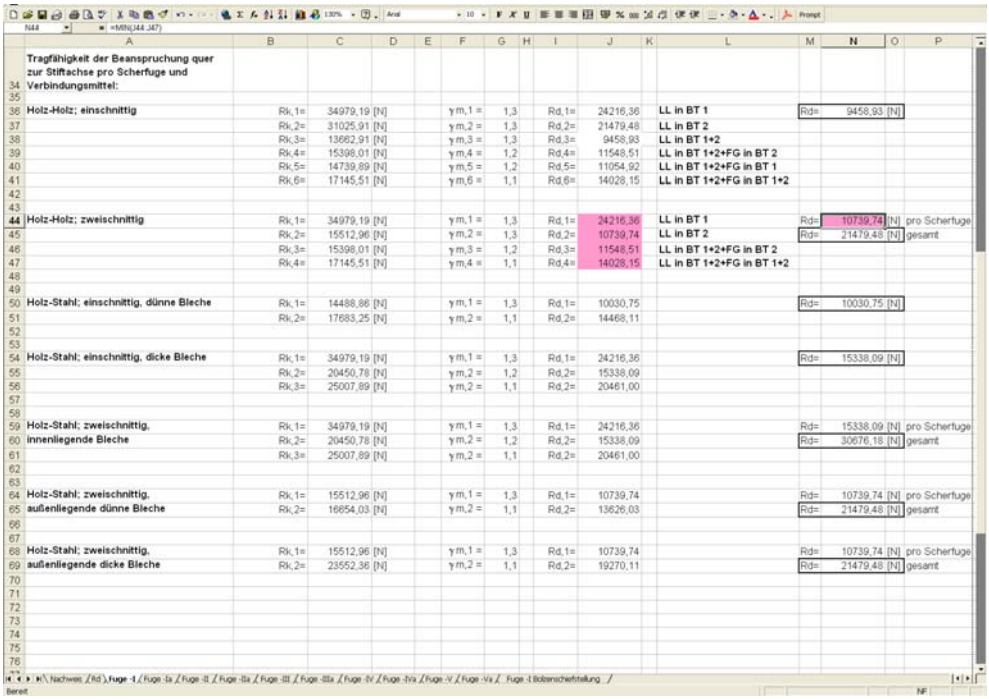
- Die Verbindung wird aufgeteilt in zweischnittige Verbindungen I,.II,… und Ia, IIa,…
- Bei den zweischnittigen Verbindungen I,.II,… und Ia, IIa,…gehen jeweils nur die an die betrachtete Scherfuge angrenzenden Teile in die Berechnung von R_d ein.
- Die Versagensart (G.9) DIN 1052:2008-12 kann bei den innenliegenden Scherfugen II, III,... und IIa, IIIa,… nicht auftreten.
- Wegen Unsymmetrie in der Verbindung kann die Versagensart (G.7) DIN 1052:2008-12 bzw. (G.8) DIN 1052:2008-12 in den Scherfugen I bzw. Ia und V bzw. Va nicht gleichzeitig auftreten.
- Ermittlung der Bemessungswerte der Tragfähigkeit pro Scherfuge R_d nach DIN 1052:2008-12, Anhang G, Tabelle G.3
- Bemessungswert der Tragfähigkeit des Stiftes $R_{Stift,d}$ ermittelt sich nach der Gleichung (3.204) und deren Bedingungen (3.205) und (3.206)
- Nachweis des Verbindungsmittels $\frac{F_{Stift,d}}{R_{Stift,d}} \leq 1$

Für die Ermittlung der Bemessungswerte der Tragfähigkeit senkrecht zur Stiftachse pro Scherfuge und Verbindungsmittel unter Berücksichtigung des Kraft-Faser-Winkels α und für den Nachweis des KK als fünfschnittige unsymmetrische Verbindung wurde für den Anwender eine Excel - Arbeitsmappe erstellt. Das Berechnungsprogramm ist auf beiliegender CD als Anlage „7.08 KK_Bemessung der Passbolzenverbindung auf Abscheren“ enthalten, ein durchgeführtes Beispiel findet sich als Anlage „7.09 Bemessung eines Kreuzungsknotens (Beispielrechnung zu 7.08)“. Die Abbildungen Abb. 3.293 bis Abb. 3.295 und Abb. 3.297 zeigen einige Arbeitsblätter aus dem Programm.



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	**Verbindungsmittel: Stabdübel / Passbolzen**												
2													
3	**Eingangswerte:**												
4													
5	Verbindungsmittel:												
6	char. Wert der Zugfestigkeit des Stahls:	fu,k =	500,00	[N/mm²]	5.8								
7	Verbindungsmitteldurchmesser:	d =	20,00	[mm]									
8	char. Fließmoment d. Stabdübels:	My,k =	362050,58	[Nmm]									
9													
10	Holz:												
11	Holzdicke Holz 1	t1 =	81,00	[mm]									
12	Holzdicke Holz 2	t2 =	81,00	[mm]									
14	Rohdichte Holz 1:	ρk,1 =	410,00	[kg/dm³]		GI28h							
15	Rohdichte Holz 2:	ρk,2 =	410,00	[kg/dm³]		GI28h							
17	char. Wert d. Lochleibungsfestigkeit von NH u. LH II Faser (vorgebohrt): Holz	fh,0,k,1 =	26,90	[N/mm²]									
18	char. Wert d. Lochleibungsfestigkeit von NH senkr. zur Faser (vorgebohrt): Holz	fh,90,k,NH,1 =	16,30	[N/mm²]									
19	char. Wert d. Lochleibungsfestigkeit von LH senkr. zur Faser (vorgebohrt): Holz	fh,90,k,LH,1 =	13,58	[N/mm²]									
21	char. Wert d. Lochleibungsfestigkeit von NH u. LH II Faser (vorgebohrt): Holz	fh,0,k,2 =	26,90	[N/mm²]									
22	char. Wert d. Lochleibungsfestigkeit von NH senkr. zur Faser (vorgebohrt): Holz	fh,90,k,NH,2 =	16,30	[N/mm²]									
23	char. Wert d. Lochleibungsfestigkeit von LH senkr. zur Faser (vorgebohrt): Holz	fh,90,k,LH,2 =	13,58	[N/mm²]									
24													
25	Lochleibungsfestigkeit Holz 1:	fh,α,1,k =	21,59	[N/mm²]	α1=	142,07	[°]						
26	Lochleibungsfestigkeit Holz 2:	fh,α,2,k =	19,15	[N/mm²]	α2=	-52,07	[°]						
27		β =	0,89										
28													
29	Bemessung:												
30	Modifikationsbeiwert	kmod =	0,90	[]									

Abb. 3.293: Programm Kreuzungsknoten, Eingabewerte für Scherfuge I



| | | |

für die Scherfuge I der ungünstigste Winkel α ermittelt, der den kleinsten und damit maßgebenden Bemessungswert $R_{Stift,Bolzenschiefstellung,d}$ liefert.

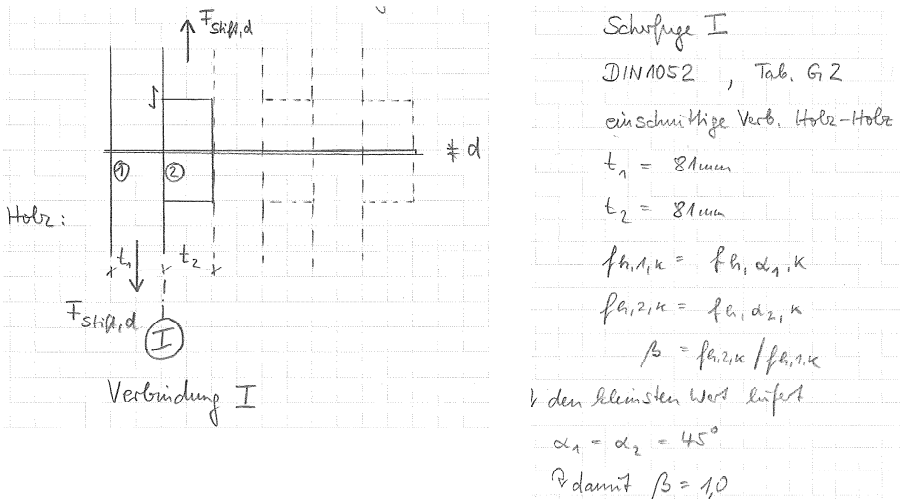


Abb. 3.296: Versagensfall Bolzenschiefstellung, einschnittige Verbindung in Scherfuge I

Abschließend erfolgen die Nachweise der mehrschnittigen unsymmetrischen Verbindung mit stiftförmigen Verbindungsmittel mit den maßgebenden Versagenskriterien.

Das sind:

Nachweis der Gesamttragfähigkeit des Stiftes:

$$\frac{F_{Stift,d}}{R_{Stift,d}} \leq 1 \tag{3.207}$$

Nachweis der einzelnen Scherfuge einer mehrschnittigen unsymmetrischen stiftförmigen Verbindung:

$$\frac{F_{i,d}}{\min\left\{R_{i,min,d};R_{ia,min,d}\right\}} \leq 1 \tag{3.208}$$

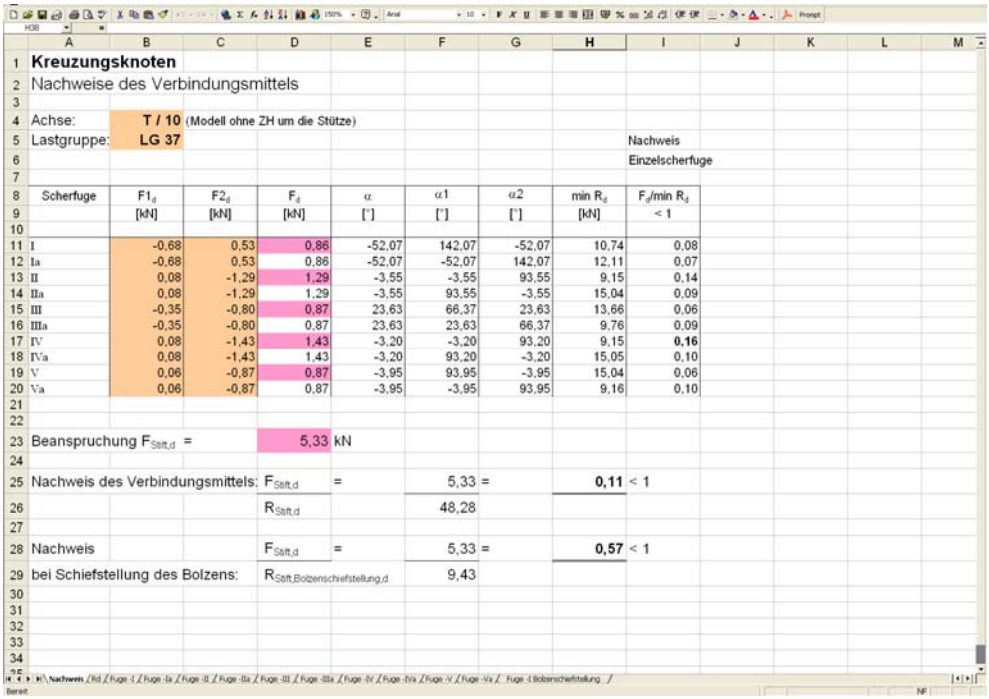
mit

$$i = I,II,III,IV,V$$

Nachweis bei Schiefstellung des Bolzens:

$$\frac{F_{Stift,d}}{R_{Stift,Bolzenschiefstellung,d}} \leq 1 \tag{3.209}$$

Die Abb. 3.297 zeigt die Nachweise des Verbindungsmittels für den Kreuzungsknoten im Berechnungsprogramm.



Kreuzungsknoten

Nachweise des Verbindungsmittels

Achse: **T / 10** (Modell ohne ZH um die Stütze)

Lastgruppe: **LG 37**

Nachweis Einzelscherfuge

Scherfuge	$F1_d$ [kN]	$F2_d$ [kN]	F_d [kN]	α [°]	$\alpha 1$ [°]	$\alpha 2$ [°]	min R_d [kN]	F_d/min R_d < 1
I	-0,68	0,53	0,86	-52,07	142,07	-52,07	10,74	0,08
Ia	-0,68	0,53	0,86	-52,07	-52,07	142,07	12,11	0,07
II	0,08	-1,29	1,29	-3,55	-3,55	93,55	9,15	0,14
IIa	0,08	-1,29	1,29	-3,55	93,55	-3,55	15,04	0,09
III	-0,35	-0,80	0,87	23,63	66,37	23,63	13,66	0,06
IIIa	-0,35	-0,80	0,87	23,63	23,63	66,37	9,76	0,09
IV	0,08	-1,43	1,43	-3,20	-3,20	93,20	9,15	**0,16**
IVa	0,08	-1,43	1,43	-3,20	93,20	-3,20	15,05	0,10
V	0,06	-0,87	0,87	-3,95	93,95	-3,95	15,04	0,06
Va	0,06	-0,87	0,87	-3,95	-3,95	93,95	9,16	0,10

Beanspruchung $F_{Stift,d}$ = 5,33 kN

Nachweis des Verbindungsmittels: $F_{Stift,d}$ = 5,33 / 48,28 = **0,11** < 1

Nachweis bei Schiefstellung des Bolzens: $F_{Stift,d}$ = 5,33 / $R_{Stift,Bolzenschiefstellung,d}$ 9,43 = **0,57** < 1

Abb. 3.297: Programm Kreuzungsknoten, Nachweise

Holzstapelfuge mit Bolzensicherung

Gegeben sind die Fugenkräfte N, M_y, M_z, aus der Schnittgrößenberechnung mittels Stabwerkprogramm und daraus die Lage der resultierenden Normalkraft R. In der Abb. 3.298 sind die Kräfte, die Bedingungen zur Stabilität und die auftretenden Spannungen senkrecht zur Holzstapelfuge dargestellt.

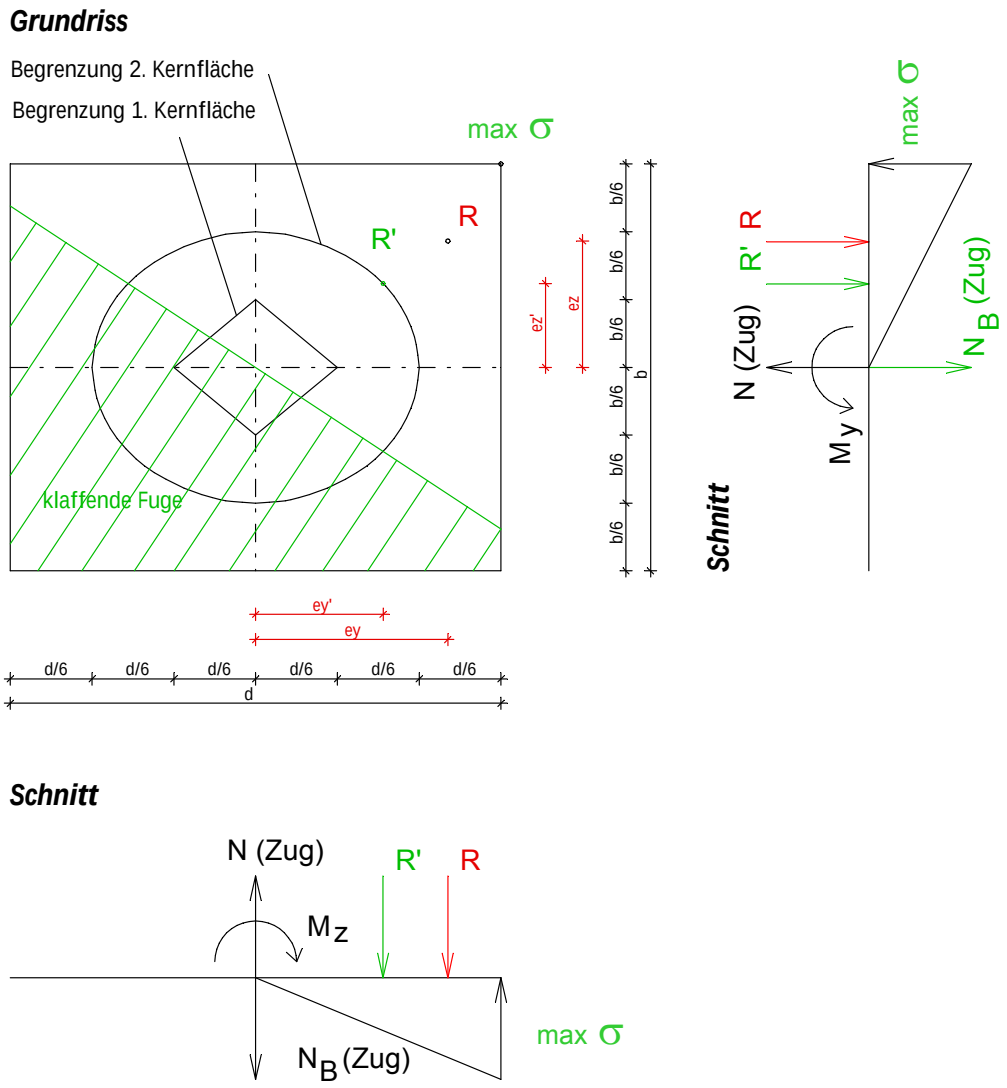


Abb. 3.298: Kräfte in der Holzstapelfuge mit Bolzensicherung

In der Holzstapelfuge können nur Druckkräfte übertragen werden. Zugkräfte sind ausgeschlossen. Falls die Biegezugspannungen in der Fuge so groß sind, dass eine klaffende Fuge über die Schwerachse hinaus auftritt, ist die Holzstapelfuge nicht mehr ausreichend kippsicher und würde rechnerisch versagen. Die Exzentrizität bzw. die Lage der resultierenden Normalkraft R liegt in diesem Fall außerhalb der 2. Kernfläche. Um die Holzstapelfuge zu stabilisieren, ist die Bedingung zu formulieren, dass die Kippsicherheit in der Fuge erfüllt sein muss. Aus dem Grundbau und dem Mauerwerksbau ist der Begriff der Kippsicherheit bekannt. Zur Sicherung der Fuge muss der Passbolzen als Zugstab ausgebildet werden. Das Kurzschließen der Bolzenzugkraft in den Knoten zurück erfolgt über Unterlegscheiben auf den oberen bzw. unteren Gurt. Durch die Ermittlung der kleinsten erforderlichen Zugkraft in jeder einzelnen Holzfuge des Stapels wird die maßgebende Bolzenkraft im Knoten bestimmt.

In der Holzstapelfuge werden also die Druckkraft im Holz senkrecht zur Faser N_H, die maximale Kantenpressung im Holz max σ , die notwendige Bolzenzugkraft N_B und die Aufnahme der Ausziehkraft des Bolzens über die Unterlegscheibe als Flächenpressung auf den oberen bzw. unteren Gurt ermittelt.

Im Kippversagensfall ist die erforderliche Lage der Resultierenden R' mit e_y', e_z' auf der 2. Kernfläche zu bestimmen, damit keine klaffende Fuge über die Schwerachse hinaus auftreten kann.

Es gelten die Bedingungen:

1. Kernfläche: $\frac{e_y}{d} + \frac{e_z}{b} \le \frac{1}{6}$ (3.210)

2. Kernfläche: $\left(\frac{e_y}{d}\right)^2 + \left(\frac{e_z}{b}\right)^2 \le \frac{1}{9}$ (3.211)

Kräftegleichgewicht: $R' = N - N_B = N_H$ (mit den Vorzeichen nach Abb. 3.298) (3.212)

Momentengelichgewicht: $e_y' = \frac{|M_z|}{R'} = \frac{|M_z|}{N_H}$ (3.213)

Durch die möglichen Schnittgrößen in der Holzstapelfuge treten 7 Beanspruchungsarten (Fälle) auf. Sie werden im Folgenden näher erläutert:

Fall 1: Druck mit Doppelbiegung bzw. Biegung; Exzentrizität e > 2. Kernfläche

Es tritt Stabilitätsversagen in der Fuge auf. Der Nachweis der Kippsicherheit ist nur dann erfüllt, wenn die Bolzenzugkraft so aktiviert wird, dass die klaffende Fuge maximal bis zur Schwerachse aufklafft. D. h., dass sich bei einem Rechteckquerschnitt mindestens die Hälfte der Fläche an der Druckübertragung beteiligt, und im Grenzfall die Nulllinie durch den Schwerpunkt geht. Da im Fall 1 die vorhandene Exzentrizität außerhalb der 2. Kernfläche liegt, ist eine Bolzenzugkraft erforderlich, die die Holzstapelfuge stabilisiert.

Sie wird ermittelt aus den Bedingungen

$$\left(\frac{e_y}{d}\right)^2 + \left(\frac{e_z}{b}\right)^2 = \frac{1}{9} \tag{3.214}$$

$$N_H = \frac{M_y}{e_z'} = \frac{M_z}{e_y'} \qquad \text{d.h. } e_y' = \frac{M_z \cdot e_z'}{M_y} \tag{3.215}$$

Damit folgt:

$$e_z' = \frac{b \cdot d}{3 \cdot \sqrt{d^2 + M_z^2 \cdot \frac{b^2}{M_y^2}}} \qquad \text{falls } M_y = 0 \text{ gilt } e_z' = 0 \tag{3.216}$$

$$e_y' = \frac{b \cdot d}{3 \cdot \sqrt{b^2 + M_y^2 \cdot \frac{d^2}{M_z^2}}} \qquad \text{falls } M_z = 0 \text{ gilt } e_y' = 0 \tag{3.217}$$

Die maximale Spannung im Holz kann bestimmt werden durch

$$\max \sigma = \mu \cdot \frac{N_H}{b \cdot d} \tag{3.218}$$

Mit

μ:Tafel der μ-Werte z. B. aus Schneider Bautabellen mit den folgenden Eingangswerten

$$\frac{e_z}{b} = \frac{e_z'}{b} \text{ und } \frac{e_y}{d} = \frac{e_y'}{d} \tag{3.219}$$

$$N_B = N_H - |N| \tag{3.220}$$

Fall 2: Zug und Doppelbiegung bzw. Biegung

Es tritt Stabilitätsversagen in der Fuge auf. Die Kippsicherheit wird mit den Bedingungen wie in Fall 1 erfüllt. Es gelten die Gleichungen (3.214) bis (3.218) aus Fall 1

jedoch

$$N_B = N_H + |N| \tag{3.221}$$

Fall 3: Zug ohne Biegung

Die Zugkraft wird vom Bolzen abgetragen.

$$N_H = 0 \tag{3.222}$$

$$\max \sigma = \mu \cdot \frac{N_H}{b \cdot d} = 0 \tag{3.223}$$

$$N_B = |N| \tag{3.224}$$

Fall 4: Druck mit Doppelbiegung bzw. Biegung; Exzentrizität e < 1. Kernfläche

Die Kippsicherheit in der Fuge ist erfüllt. Es entsteht keine klaffende Fuge, da die resultierende Normalkraft innerhalb der 1. Kernfläche liegt. Eine Bolzenzugkraft ist nicht erforderlich.

$$e_y = \frac{M_z}{|N|} \tag{3.225}$$

$$e_z = \frac{M_y}{|N|} \tag{3.226}$$

$$N_H = |N| \tag{3.227}$$

$$\max \sigma = \mu \cdot \frac{N_H}{b \cdot d} \qquad \text{Tafel der } \mu\text{-Werte z. B. aus Schneider Bautabellen.} \tag{3.228}$$

$$N_B = 0 \tag{3.229}$$

Fall 5: Druck mit Doppelbiegung bzw. Biegung; Exzentrizität 1. Kernfläche < e < 2. Kernfläche

Die Kippsicherheit in der Fuge ist erfüllt. Eine klaffende Fuge tritt bis maximal zur Schwerachse auf, da die Resultierende innerhalb der 2. Kernfläche liegt. Eine Bolzenzugkraft ist nicht erforderlich. Es gelten die Gleichungen aus Fall 4.

Fall 6: Doppelbiegung bzw. Biegung ohne Normalkraft; Exzentrizität ist unendlich e = ∞

Es tritt Stabilitätsversagen in der Fuge auf. Die Kippsicherheit wird mit den Bedingungen wie in Fall 1 erfüllt. Es gelten die Gleichungen (3.214) bis (3.218) aus Fall 1

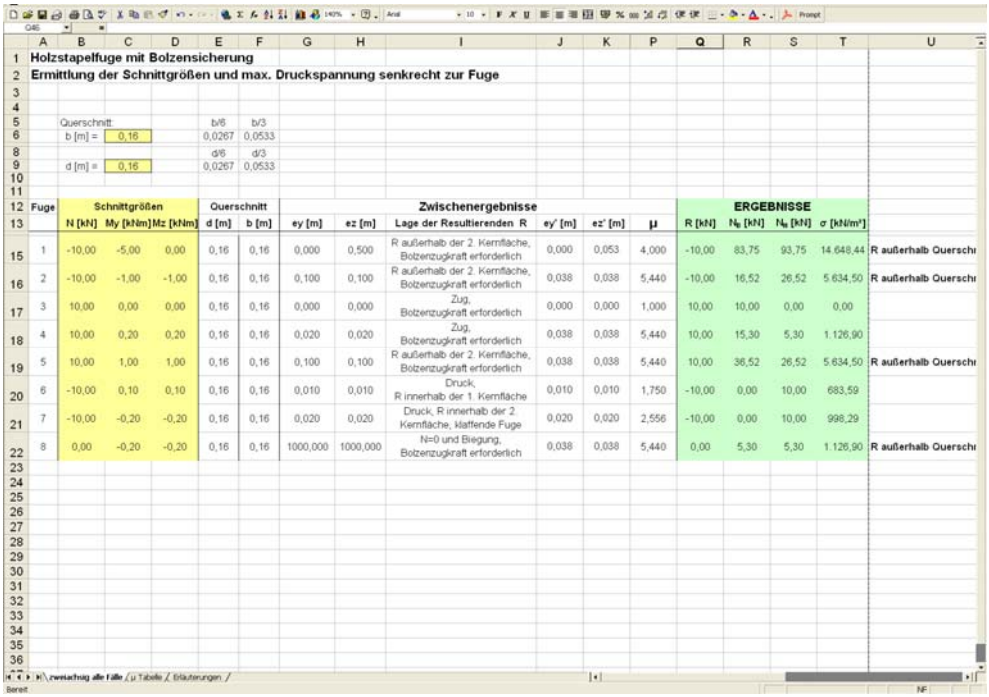
jedoch

$$N_B = N_H \tag{3.230}$$

Fall 7: Druck ohne Biegung

Die Kippsicherheit in der Fuge ist erfüllt. Es gelten die Gleichungen (3.227) bis (3.229) aus Fall 4.

Für die Ermittlung der Beanspruchungsarten in der Holzstapelfuge mit Bolzensicherung wurde für den Anwender eine Excel - Arbeitsmappe erstellt. Das Berechnungsprogramm ist auf beiliegender CD als Anlage „7.07 Holzstapelfuge mit Bolzensicherung“ enthalten. Die Abb. 3.299 zeigt die Excel - Arbeitsmappe.



Holzstapelfuge mit Bolzensicherung
Ermittlung der Schnittgrößen und max. Druckspannung senkrecht zur Fuge

Querschnitt: b [m] = 0,16; d [m] = 0,16

	b/6	b/3
	0,0267	0,0533
	d/6	d/3
	0,0267	0,0533

Fuge	Schnittgrößen N [kN]	My [kNm]	Mz [kNm]	Querschnitt d [m]	b [m]	Zwischenergebnisse ey [m]	ez [m]	Lage der Resultierenden R	ey' [m]	ez' [m]	μ	ERGEBNISSE R [kN]	N_R [kN]	N_R [kN]	σ [kN/m²]	
1	-10,00	-5,00	0,00	0,16	0,16	0,000	0,500	R außerhalb der 2. Kernfläche, Bolzenzugkraft erforderlich	0,000	0,053	4,000	-10,00	83,75	93,75	14.648,44	R außerhalb Querschn
2	-10,00	-1,00	-1,00	0,16	0,16	0,100	0,100	R außerhalb der 2. Kernfläche, Bolzenzugkraft erforderlich	0,038	0,038	5,440	-10,00	16,52	26,52	5.634,50	R außerhalb Querschn
3	10,00	0,00	0,00	0,16	0,16	0,000	0,000	Zug, Bolzenzugkraft erforderlich	0,000	0,000	1,000	10,00	10,00	0,00	0,00	
4	10,00	0,20	0,20	0,16	0,16	0,020	0,020	Zug, Bolzenzugkraft erforderlich	0,038	0,038	5,440	10,00	15,30	5,30	1.126,90	
5	10,00	1,00	1,00	0,16	0,16	0,100	0,100	R außerhalb der 2. Kernfläche, Bolzenzugkraft erforderlich	0,038	0,038	5,440	10,00	36,52	26,52	5.634,50	R außerhalb Querschn
6	-10,00	0,10	0,10	0,16	0,16	0,010	0,010	Druck, R innerhalb der 1. Kernfläche	0,010	0,010	1,750	-10,00	0,00	10,00	683,59	
7	-10,00	-0,20	-0,20	0,16	0,16	0,020	0,020	Druck, R innerhalb der 2. Kernfläche, klaffende Fuge	0,020	0,020	2,556	-10,00	0,00	10,00	998,29	
8	0,00	-0,20	-0,20	0,16	0,16	1000,000	1000,000	N=0 und Biegung, Bolzenzugkraft erforderlich	0,038	0,038	5,440	0,00	5,30	5,30	1.126,90	R außerhalb Querschn

Abb. 3.299: Holzstapelfuge mit Bolzensicherung – Schnittgrößenermittlung senkrecht zur Fuge

Die drei Nachweise in der Holzstapelfuge lauten:

Druck senkrecht zur Faserrichtung des Holzes nach DIN 1052:2008-12, Abschn. 10.2.4

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,90} \cdot f_{c,90,d}} \leq 1 \tag{3.231}$$

mit

$$\sigma_{c,90,d} = \max \sigma \tag{3.232}$$

und

$k_{c,90}$=1,0

Ein höherer Querdruckbeiwert wird auf der sicheren Seite liegend nicht angesetzt, auch wenn in der Nähe der KK keine Ränder oder weitere Lasteinleitungen vorhanden sind.

Zug im Bolzen nach DIN 18800 Teil 1, Abschn. 7.5.2

$$\frac{\sigma}{\sigma_{R,d}} \leq 1 \tag{3.233}$$

mit

$$\sigma_{R,d} = \frac{f_{y,k}}{\gamma_M} \tag{3.234}$$

$$\sigma = \frac{N}{A} \tag{3.235}$$

Aufnahme der Ausziehkraft des Bolzens über die Unterlegscheibe; Nachweis der Querdruckspannung nach DIN 1052:2008-12, Abschn. 10.2.4

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,90} \cdot f_{c,90,d}} \leq 1 \qquad (3.236)$$

mit

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{F_{c,90,d}}{A_{ef}} \qquad (3.237)$$

Dabei ist

$F_{c,90,d}$ N_B

A_{ef} wirksame Querdruckfläche unter den Unterlegscheiben

$k_{c,90}$=1,0 ein Querdruckbeiwert.

Für die Ermittlung der wirksamen Querdruckfläche A_{ef} darf das Maß der tatsächlichen Unterlegscheibe in Faserrichtung des Holzes an jedem Rand um bis zu 30 mm verlängert werden. Ein höherer Querdruckbeiwert wird auf der sicheren Seite liegend nicht angesetzt.

3.7.3.7.3 Zusammenfassung

Am Beispiel des Kreuzungsknotens aus dem Pilotprojekt Hess-Innenhofüberdachung wurde die Tragwirkung eines Knotens aus dem Holzstapelrost erläutert und die erforderlichen Nachweise am KK hergeleitet.

Der kugelförmig gekrümmte Gurtstapelrost wird durch die Randgurte stabilisiert. Die vier Randgurte bestehen, wie auch die Dachträger aus jeweils drei Gurten, die in die Zwischenräume des Stapels eingeschoben werden (Abb. 3.287). An den Randknoten laufen die Randgurte ohne Querschnittsschwächung durch, hier müssen die Dachgurte um eine halbe Querschnittshöhe ausgeklinkt werden, um sie an die Randgurte anzuschließen.Aufgrund des sich kreuzenden Stapels der Dachgurte, ist es am Eckknoten erforderlich, sowohl die Dachgurte als auch die Randgurte um eine halbe Querschnittshöhe auszuklinken, um den Anschluss zu bilden. Dabei werden noch zwei Zwischenhölzer der halben Gurtstärke notwendig, um eine Passbolzenverbindung herstellen zu können. Durch die Stapelung weist die stiftförmige Verbindung des Eckknotens acht Scherfugen mit zwei Zwischenschichten auf. Aufgrund der reduzierten Querschnittshöhe der Gurte im Anschluss und der daraus resultierenden geringeren Lochleibungsfestigkeit sind die Nachweise zweier Einzelscherfugen vollständig ausgenutzt (bis ca. 100% Auslastung). Die Nachweise der Gesamttragfähigkeit der Passbolzenverbindung sind hingegen zu 70 % ausgenutzt, da in mehrschnittigen Verbindungen die Gesamttragfähigkeit als Summe der Mindesttragfähigkeiten aller Scherfugen bestimmt wird. Neben den detaillierten Untersuchungen zu den Versagenskriterien wurden Bauteilversuche durchgeführt, die gezeigt haben, dass mehrschnittige Verbindungen mit nur einem Passbolzen durchaus ausgeführt werden können, auch wenn der charakteristische Wert der Tragfähigkeit über die Hälfte in Rechnung gestellt wird.

Als Anlage „7.09 Bemessung eines Kreuzungsknotens (Beispielrechnung zu 7.08)“ ist ein Beispiel der Berechnung des Kreuzungsknotens in der Achse T/10 zu finden. Es wurden für den Anwender im Rahmen des HHT-Projektes auch Praxisempfehlungen erarbeitet zu den Themen Konstruktion, Technologie und Bemessung, diese liegen ebenfalls dem Anhang bei. Die Praxisempfehlung zum vorliegenden Bemessungsvorschlag eines KK lautet „Knoten im Holzstapelrost mit einem Passbolzen als VM“.

3.7.3.8 Anschlüsse von Voll- und Hohlprofilen

3.7.3.8.1 Allgemeines

Autor: Yvette Lemke (IaFB)

Um die im Projekt untersuchten und weiterentwickelten Formholzprofile einsetzen zu können, ist es wichtig, praktikable Anschlussmöglichkeiten zu finden. Dazu wurden im Rahmen einer Belegarbeit [202] an der TU Dresden für das Pilotprojekt „Innenhofüberdachung“ (3.8.4) verschiedene Möglichkeiten des Anschlusses von vier Streben an eine Hohlstütze untersucht. Natürlich gelten diese nicht nur für den im Pilotprojekt vorgesehenen Anschluss sondern stellen allgemein Möglichkeiten zum Anschluss von Voll- oder Hohlprofilen an Hohlprofile dar. Einige Varianten sind in 3.5.4 beschrieben.

Ein weiterer Lösungsvorschlag wurde vom IaFB im Zuge der Bearbeitung des Pilotprojektes „Innenhofüberdachung“ erarbeitet. Eine Darstellung dazu ist in Abb. 3.300 zu finden, eine genauere Erläuterung im Abschnitt 3.7.3.8.2.

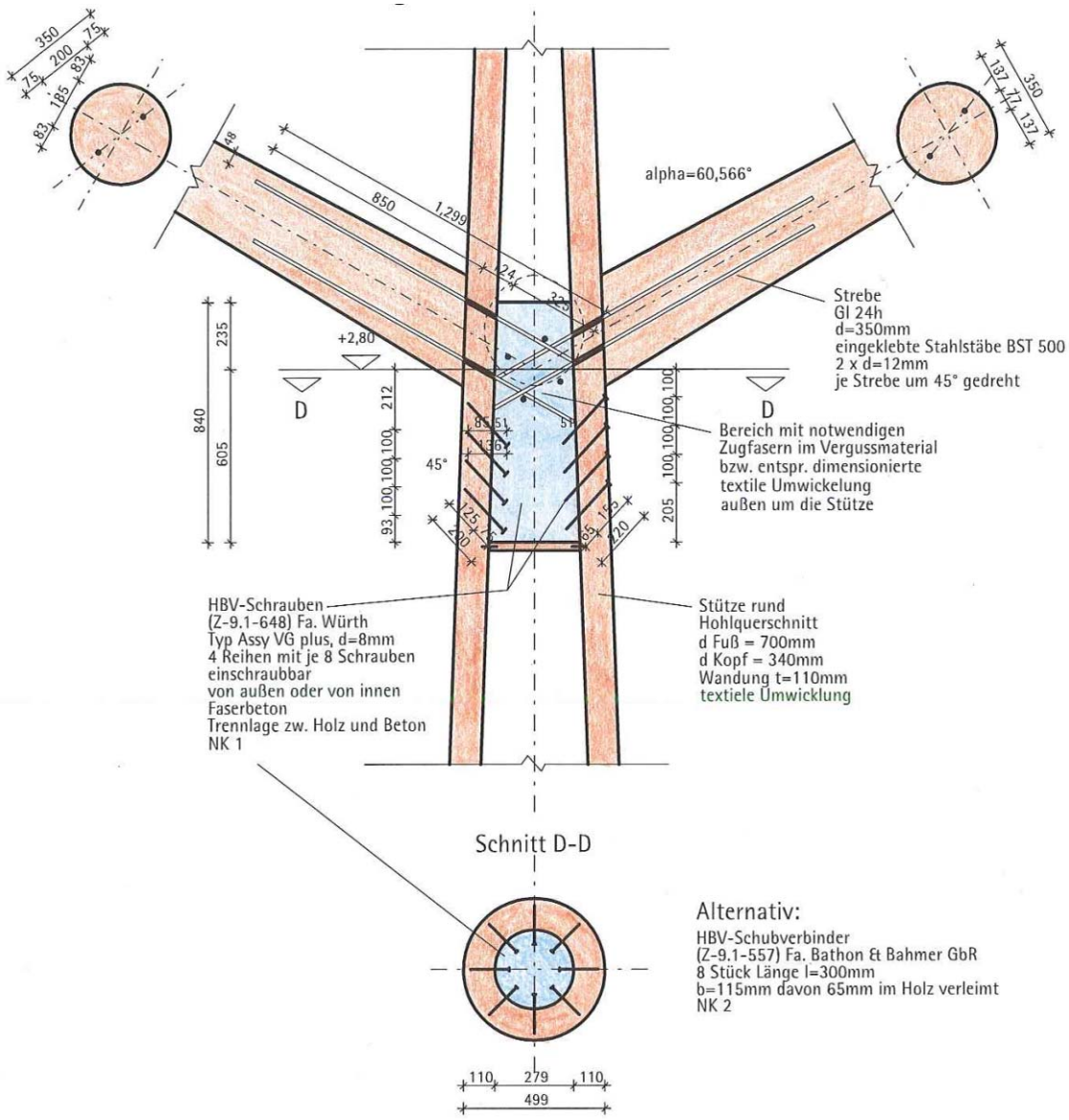


Abb. 3.300: biegesteife Variante eines Anschlusses von vier Streben an eine Hohlstütze

Bei all diesen Lösungen handelt es sich um mehr oder weniger biegesteife Anschlüsse. Für das konkrete Problem beim Pilotprojekt „Innenhofüberdachung“ war jedoch ein weicherer Anschluss notwendig, so dass eine weitere Lösung, der Versatzanschluss, gefunden wurde, dargestellt in Abb. 3.301. Eine Beschreibung zur Wirkungsweise ist im entsprechenden Kapitel (3.8.4.3) des Pilotprojektes zu finden.

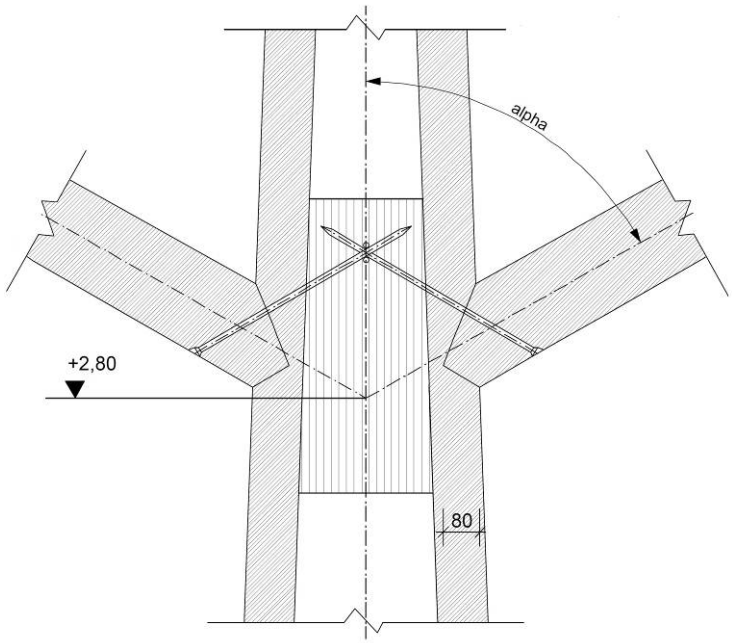


Abb. 3.301: fast gelenkige Variante eines Anschlusses von vier Streben an eine Hohlstütze

3.7.3.8.2 Verfüllte Stabwerksknoten (Betonknoten)

Autor: Anke Schäcke (IaFB) mit Andreas Heiduschke (ISH), Maik Weise

Die Anschlussausbildung von stabförmigen Holztragwerken und Fachwerkknoten erfolgt in der Praxis überwiegend mit Stahlanschlussblechen bzw. Stahlformteilen. Traditionelle Holzverbindungen wie z. B. Zapfenverbindung, Versatz o. ä. finden weniger Anwendung und sind in großen Konstruktionen selten im Einsatz. Es wirken bei Holzverbindungen meist Kräfte rechtwinklig zur Faser des Holzes. So kommt es bei starker Beanspruchung in der Regel zu Deformationen, die im Gesamtsystem zu berücksichtigen sind.

Der Entwurf und die Bemessung der Tragglieder bzw. Stäbe erfolgt mit Rücksicht auf die Verbindungen. Es werden im Holzbau oft große Querschnitte benötigt, um z. B. die erforderlichen Stabdübel für den Anschluss ausreichend auf die Fläche verteilen zu können. Der maßgebende Stabwerksknoten bestimmt meist die Größe der Gurte im Fachwerk, da diese nicht bzw. nur sehr aufwendig innerhalb des Tragwerks verändert werden können, um eine wirtschaftliche Konstruktion herzustellen. Die Diagonalen im Fachwerk können hingegen entsprechend ihrer Beanspruchung abgestufte Querschnitte erhalten, d. h. sie schließen mit unterschiedlichen Breiten an die Gurte an.

Ziel ist es beim Entwurf und der Bemessung von stabförmigen Holztragwerken beanspruchungsgerecht zu konstruieren. Dabei soll der Einsatz des Baustoffes Stahl bei der Anschlussausbildung aufgrund seines hohen ungünstigen Einflusses auf die Ökobilanzierung der Konstruktion verringert bzw. vermieden werden. Die anzuschließenden Kräfte sollen zentral ein- und ausgeleitet werden. Dabei ist auch darauf zu achten, dass eine Druckbelastung in den Holzbauteilen rechtwinklig zur Faser vermieden wird, da deren Festigkeiten sehr gering sind.

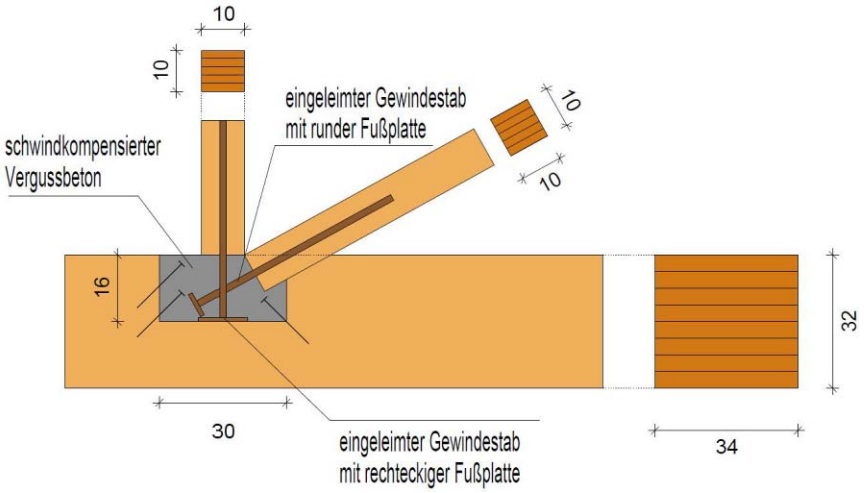


Abb. 3.302: Beispiel der Ausbildung eines sog. Betonknotens aus [202]

Mit dem Ziel, Baustoffe entsprechend ihrer Eigenschaften einzusetzen und auszunutzen, wurde im Rahmen dieses Forschungsprojektes die Entwurfsidee bei Verbindungen mit Hohlprofilen den Anschlussinnenraum mit einem flüssigen nachhärtenden Material zu verfüllen aufgegriffen und als mögliche Tragwerkslösung weiter untersucht (Abb. 3.302). Als Vergussmaterial, welches hohe mechanische Festigkeiten besitzen muss, kommen z. B. Betone, Kunstharzmörtel oder auch zementbasierende Vergussmörtel in Frage.

Die Belegarbeit von M. Weise [202] hatte u. a. auch den Entwurf und die Berechnung von verfüllten Knoten, den sogenannten „Betonknoten“ zum Inhalt. Anhand eines Fachwerkbinders aus einer realisierten Stahl-Dachkonstruktion der Neutronenleiterhalle für das Hahn Meitner Institut in Berlin aus dem Jahre 2004 sollte ein Holz-Fachwerkbinder entwickelt werden.

In Abb. 3.303 sind die gewählten Systemabmessungen des untersuchten Holz-Fachwerkbinders dargestellt. Die Schlankheit des Trägers ermittelt sich dabei zu 22,86 m / 1,8 m = 12,7 und kennzeichnet eine typische Fachwerkgeometrie im Holzbau. Der Binderabstand der Halle beträgt 6,0 m.

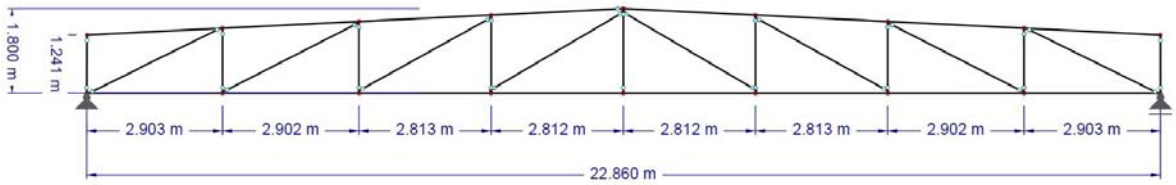


Abb. 3.303: System Holz – Fachwerkbinder aus [202]

Im Ergebnis der Studie wurden die Gurtquerschnitte aus Rechteckhohlprofilen (Variante 1) gebildet, die Diagonalen und Vertikalen aus Vollholzprofilen, wobei diese im Anschluss in die Gurte geführt und mit einem Vergussmaterial verfüllt werden. Die Vergussmasse wird dabei nur im erforderlichen Knotenbereich eingesetzt, die verbleibenden Gurtquerschnitte sind Hohlprofile. Bei der Bemessung der Gurte sind die geschwächten Querschnitte im Anschluss zu berücksichtigen. Zur Begrenzung der Vergussmasse sind zusätzlich eingeleimte Holzklötze notwendig, woraus z. T. wieder Vollprofile entstehen (Variante 2).

In der Tabelle 3.59 sind die nachgewiesenen möglichen Querschnitte der Fachwerkstäbe für die Varianten 1 und 2 aufgeführt.

Tabelle 3.59: Querschnittswerte der Fachwerkstäbe für Variante 1 und 2

Stäbe	Variante 1	Variante 2
Ober- und Untergurt	Quadrathohlprofil a/t = 400/80 mm Gl 32h	Vollprofil b/h = 340/320 mm Gl 32h
Pfosten 1 (außen)	b/h = 180/100 mm Gl 24h	
Pfosten 2	b/h = 180/100 mm Gl 24h	
Pfosten 3	b/h = 140/100 mm Gl 24h	
Pfosten 4	b/h = 100/100 mm Gl 24h	
Pfosten 5 (Mitte)	b/h = 100/100 mm Gl 24h	
Diagonale 1 (außen)	b/h = 280/180 mm Gl 24h	
Diagonale 2	b/h = 200/180 mm Gl 24h	
Diagonale 3	b/h = 140/140 mm Gl 24h	
Diagonale 4 (Mitte)	b/h = 100/100 mm Gl 24h	

Es wurden drei Anschlussknoten untersucht (siehe Abb. 3.304), das sind der Knoten 1: die Auflagerung auf einer gedachten Hallenstütze, der Knoten 2: der Anschluss Pfosten/Diagonale an den Untergurt und der Knoten 3: der Anschluss Pfosten/Diagonale an den Obergurt.

In der Abb. 3.305 ist die Ausbildung der Anschlussknoten 1 bis 3 als Ergebnis der Untersuchungen von M. Weise [202] im Detail dargestellt.

Die Tragwirkung eines verfüllten Anschlussknotens kann wie folgt allgemein beschreiben werden. Die anzuschließende Normalkraft wird aus dem Füllstab in das Verbindungselement eingeleitet. Das Verbindungselement ist der Stahlstab, welcher über das Einkleben ins Holz seine Kraft erhält. Die Kraftausleitung erfolgt entweder in das Vergussmaterial über die Verankerungslänge des Stahlstabes und oder über eine kleine Fußplatte bei Druckkraft in den Gurt selbst über Kontaktpressung oder aber bei Zugkraft als zusätzliche Rückverankerung in den Beton. Die Kraftübertragung vom Vergussmaterial in das Haupttragglied (Ober- und Untergurt) erfolgt durch Kontaktpressung bzw. durch Holzbetonverbund-Elemente wie z. B. HBV-Schrauben oder HBV-Schubverbinder (siehe Abb. 3.305).

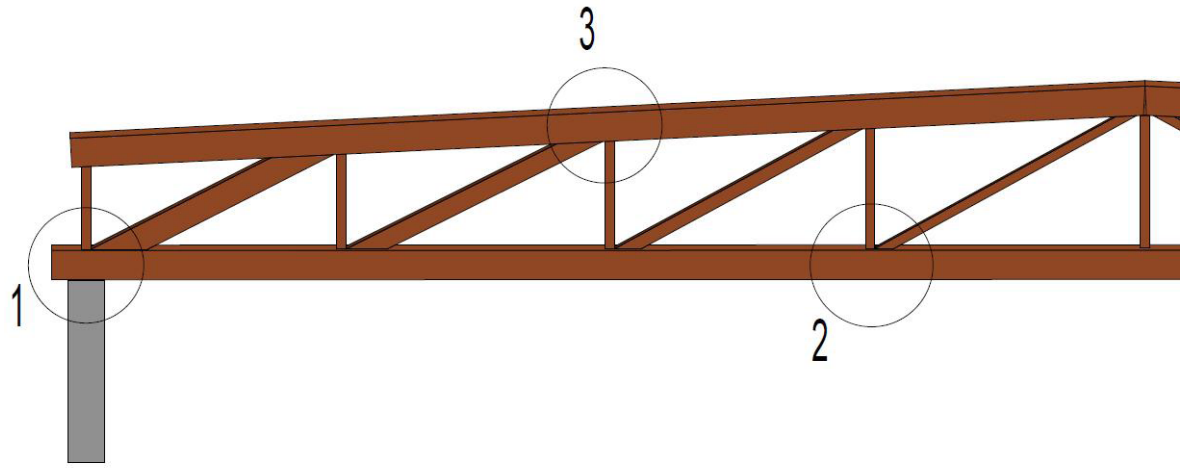


Abb. 3.304: Schematische Darstellung des Holz–Fachwerkbinders mit Kennzeichnung der exemplarisch untersuchten Anschlussknoten aus [202]

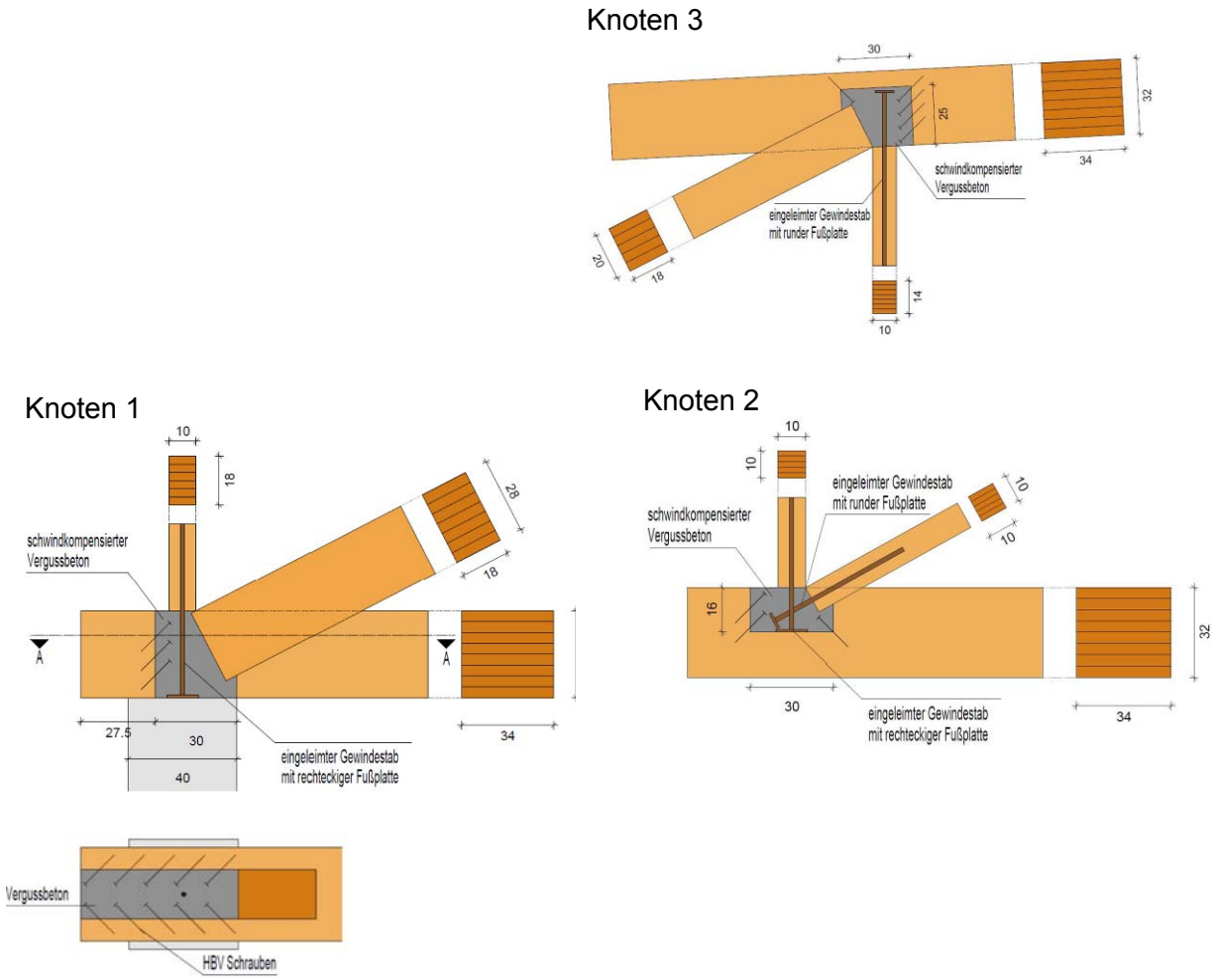


Abb. 3.305: Ausbildung der Anschlussknoten 1 bis 3 aus [202]

Die Art der Anschlussausbildung weist gute Brandschutzeigenschaften auf, und es bleibt die Holzsichtigkeit im Anschlussbereich erhalten. Weitere Vorteile sind die Verbesserung der Ökobilanzierung der Konstruktion, da weniger Stahlelemente eingesetzt werden müssen. Durch die Verwendung eines geeigneten Vergussmaterials ist es möglich, die Formgestaltung der Knoten zu optimieren.

Vergussmaterialien können u.a. sein:

- Normalbeton
- Kunstharzmörtel
- Zementbasierende Vergussmörtel

Normalbetone sind kostengünstig und haben eine hohe Druckfestigkeit. Nachteilig ist zu nennen, dass sie bei der Herstellung feucht verarbeitet werden, das heißt es besteht Quellgefahr bei direktem Kontakt mit dem Holz. Zudem sind Betone schwindanfällig.

Kunstharzmörtel haben den großen Vorteil, dass sie nicht schwinden, hohe mechanische Festigkeiten besitzen und kurze Durchhärtungszeiten ausweisen. Dagegen stehen die hohen Kosten und die feuchte Verarbeitung, so dass auch bei Kunstharzmörtel das Kontaktholz aufquellen kann.

Zementbasierende Vergussmörtel sind ebenfalls schwindarm und besitzen hohe mechanische Festigkeiten. Es kommt nicht zum Entmischen der Masse und sie weisen eine schnelle Festigkeitsentwicklung auf. Aber auch hier sind die Kosten hoch und die Feuchtigkeit bei der Herstellung muss vom Holz fern gehalten werden.

Im Pilotprojekt „Hess-Innenhofüberdachung“ (siehe Abschnitt 3.8.4) wurde auch untersucht, ob für einige Anschlüsse die Möglichkeit der verfüllten Stabwerksknoten geeignet wäre. Dabei stellte sich heraus, dass der Anschluss der Streben an die Stütze geeignet wäre. In der Abb. 3.306 ist das Ergebnis der Untersuchungen im Detail dargestellt. Die vier Streben sind Kreisvollprofile aus Brettschichtholz und die Einzelkragstütze des gesamten Daches wird als Kreishohlprofil aus Brettschichtholz hergestellt. Die Stütze weist im Anschluss einen Außendurchmesser von ca. 500 mm bei einer Wandung von 110 mm auf. Die untere Begrenzung des Vergussmaterials im Inneren der Stütze kann durch eine Holzplatte geschehen, die durch Stabdübel an der Wandung der Stütze gesichert wird. Die Streben enden an der Außenkante der Stütze, nur die Verbindungselemente führen durch entsprechend geneigte Bohrungen in die Stütze. Aufgrund der großen Druckbeanspruchung aus dem Dach und der daraus resultierenden großen Verankerungslängen, konnte der Anschluss nicht nur mit einem eingeklebten Stahlstab als Verbindungselement umgesetzt werden. Auch weil sich sonst alle vier Stahlstäbe der Streben in einem Punkt der Stütze getroffen hätten und eine Ausführung somit nicht möglich gewesen wäre. Eine geometrische Lösung bietet sich, wenn je Strebe zwei Stahlstäbe in die Stütze gesteckt werden, und jede Strebe jeweils um 45° im Anschluss gedreht wird, so dass sich die Stahlstäbe im inneren der Stütze nicht berühren. Die einzuleitende Druckkraftdifferenz aus unsymmetrischem Lastfall des Daches in die Stütze wird über Kontaktpressung aus dem Vergussmaterial ausgeleitet. Die horizontal wirkende Ringkraft aus den geneigten Druckstreben im Vergussmaterial muss entweder durch ausreichende Zugfasern im Vergussmaterial bzw. durch entsprechend dimensionierte textile Umwickelung im Außenbereich der Stütze gesichert werden. Die vertikale Lasteinleitung in die Stütze erfolgt über HBV-Elemente wie z. B. HBV-Schrauben oder HBV-Schubverbinder unterhalb der Anschlussachse (siehe Abb. 3.306). Das Einpressen des Vergussmaterials erfolgt durch eine separate Öffnung in der Stützenwandung und entsprechend notwendigen Kontrollbohrungen. Erst nach Aushärtung des Vergussmaterials können die notwendigen Montageunterstützungen der Streben entfernt werden.

Die rein rechnerisch anzusetzende Stabendgelenke der Streben im Stabwerk können in diesem hoch beanspruchten Fall und der Anschlussausbildung mit den verfüllten Knoten real nicht ausgebildet werden. Sie sind in der gewählten Ausführung mit mehrteiligen Stahlstäben teileingespannt und können so Momentenanteile übertragen. Das heißt die verfüllten Knoten sind in ihrer Ausbildung steifer als in der Stabwerksberechnung ursprünglich angesetzt. Um den realen Grad der Teileinspannung feststellen zu können, waren weiterführende Untersuchungen notwendig. Im Ergebnis daraus war festzulegen, ob eventuelle Momentenbeanspruchungen bei der Bemessung berücksichtigt werden müssen.

Die von uns durchgeführte Stabwerksberechnung am Gesamtsystem unter Berücksichtigung der Ersatzdrehfedersteifigkeit, die den Anschluss mit mehrteiligen Gewindestäben ($\geq$2) beschreibt, hat gezeigt, dass dadurch relativ große Momente von den Streben abgetragen werden müssen. Problematischer ist, dass der Anschluss selbst zusätzlich auch Biegemomente übertragen muss. Der Anschluss war damit überbeansprucht. Im vorliegenden Beispiel war es deshalb erforderlich, die Strebendurchmesser von 200 mm bei ursprünglich gelenkigem Anschluss auf 350 mm unter Teileinspannung zu vergrößern.

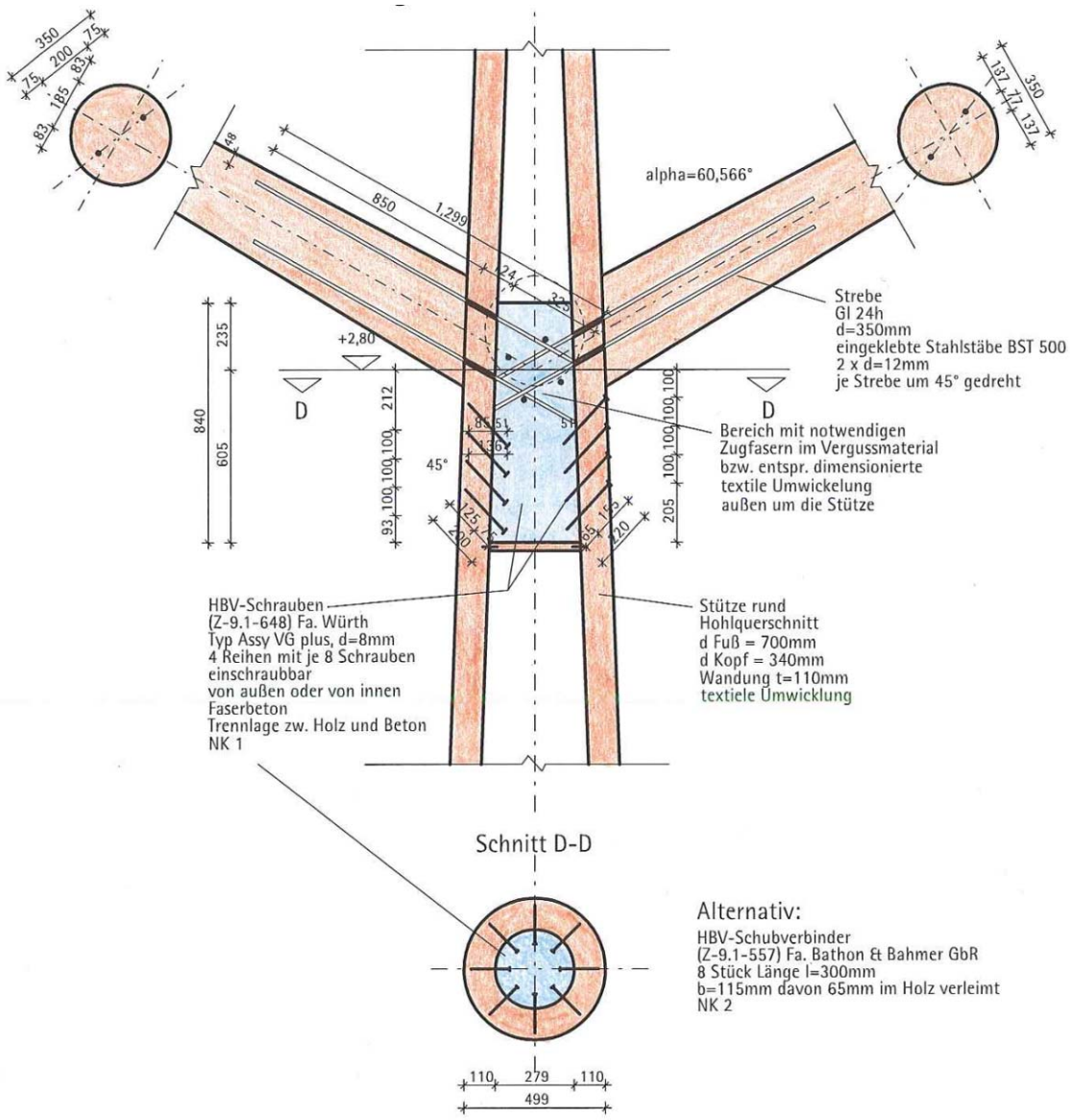


Abb. 3.306: Pilotprojekt: Hess-Innenhofüberdachung, Anschluss Streben an Stütze als Betonknoten

Für die Ausbildung von verfüllten Stabwerksknoten werden zusammenfassend die folgenden Konstruktionshinweise genannt:

Die Anschlussausbildung sollte mit möglichst einem Stahlstab in der Stabachse erfolgen, andernfalls sind Ersatzdrehfedersteifigkeiten im Gesamtsystem zu berücksichtigen.

Zur Vermeidung des Feuchtigkeitsaustausches zwischen dem Vergussmaterial und dem Holz ist in geeigneter Form eine Folie anzuordnen.

Bei Verwendung von HBV-Elementen wie z. B. HBV-Schrauben oder HBV-Schubverbinder sind die Allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen zu beachten. In der Regel sehen die notwendige Bewehrungen im Beton vor. Da in den oben beschriebenen Konstruktionslösungen aus Platz- und Montagegründen oft keine Bewehrungsanordnung möglich ist, sind die auftretenden Zugspannungen z. B. durch dem Vergussmaterial beigemengte Fasern (Stahl-, Holz- oder Polymerfasern) aufzunehmen. Dabei kann es notwendig werden, dass eine Zustimmung im Einzelfall beantragt werden muss, um deren Verwendbarkeit nachzuweisen. Die Faserbeimengungen verringern auch die Rissbreiten von Frühschwindrissen.

Weiterhin wird durch Holz- und Polymerfasern das Brandverhalten der Konstruktion positiv beeinflusst, aufgrund größerer Porenräume im Beton und der daraus folgenden Wasserdampfdruckminderung im Brandfall.

Für die Einstufung der Nutzungsklasse sind ebenfalls die verwendeten Allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen zu berücksichtigen.

3.7.4 Praxisorientierte Bemessungsverfahren und Anwendungsrichtlinien
Autoren: Petra Kubowitz, Anke Schäcke (alle IaFB)

3.7.4.1 Allgemeines
Autor: Petra Kubowitz (IaFB)

Um zukünftigen Anwendern die neuen Materialien und Bemessungsvorschläge vorzustellen und die diesbezüglich im Projekt erhaltenen Erkenntnisse in Fachkreisen zu verbreiten, wurden einige Merkblätter, Praxisempfehlungen und Kurzdokumentationen erstellt, die einem schnellen Informationsgewinn dienen und somit die Bekanntheit und den zukünftigen Einsatz von Hochleistungsholztragwerken fördern sollen. Folgende Themen wurden dazu in Merkblattform aufbereitet und sind als Anlage A4 bis A6 enthalten:

Materialmerkblätter (Anlage A4: HHT-Merkblätter Material)

Titel	Autor
Glasfasern	Tilo Birk (ehem. IaFB)
Aramidfasern	Tilo Birk (ehem. IaFB)
Kohlenstofffasern	Tilo Birk (ehem. IaFB)
Matrixsysteme	Tilo Birk (ehem. IaFB)
Textile Flächenbildung	Tilo Birk (ehem. IaFB)
Faserkunststoffverbunde (FKV)	Anke Schäcke (IaFB)
Verdichtetes Holz	Tilo Birk (ehem. IaFB)
Kunstharzpressholz (KHP)	Andrea Untergutsch (IaFB)
Thermisch modifiziertes Holz	Yvette Lemke (IaFB)
Formholz	Yvette Lemke (IaFB)
Ökobilanzierung	Christian Manthey (BU)

Praxisempfehlungen (Anlage A5: HHT-Praxisempfehlungen)

Titel	Autor
Textile Verstärkungen	Anke Schäcke (IaFB)
Hybridbauteile	Petra Kubowitz (IaFB)
Formholzrohre	Yvette Lemke (IaFB)
Mehrschnittige Verbindungen mit stiftförmigen VM	Anke Schäcke (IaFB)
Stiftverbindungen mit Zwischenschichten	Anke Schäcke (IaFB)
Stiftverbindungen mit Verstärkungen aus HWP	Anke Schäcke (IaFB)
Stiftverbindungen mit Verstärkungen aus Nagelplatten	Anke Schäcke (IaFB)
Stiftverbindungen mit Verstärkungen aus FKV	Anke Schäcke (IaFB)
Knoten im Holzstapelrost mit einem Passbolzen als VM	Anke Schäcke (IaFB)

Kurzdokumentationen (Anlage A6: HHT-Kurzdokumentationen)

Titel	Autor
Pilotprojekt Fußgängerbrücken	Andrea Untergutsch (IaFB)
Pilotprojekt Vertikalachswindkraftanlage	Andrea Untergutsch (IaFB)
Pilotprojekt Hess-Innenhofüberdachung	Yvette Lemke (IaFB)

3.7.4.2 Hybridträger

Autor: Petra Kubowitz (IaFB)

Für das interessierte Fachpublikum und zukünftige Anwender – beispielsweise Bauherren, Tragwerksplaner und Architekten – wurde die HHT-Praxisempfehlung „Hybridbauteile“ erstellt (siehe Anlage A5: HHT-Praxisempfehlungen).

Als Bemessungsverfahren wurde einerseits ein linear-elastisches Rechenmodell untersucht, andererseits wurden Rechenmodelle unter Ansatz einer plastifizierten Druckzone und einer gerissenen Zugzone betrachtet, welche das Tragverhalten von Hybridträgern mit Verstärkungslamellen in vielen Fällen realistischer abbilden können (vgl. Kap. 3.7.3.3.2). Die zu berücksichtigenden Formeln wurden in einer Exceldatei aufbereitet, die dem Anwender für die Bemessung zur Verfügung steht und als Anlage „7.03 Bemessung von Hybridträgern und Hybridbohlen“ auf der beiliegenden CD enthalten ist. Auch das vom ILK erstellte Bemessungstool ist auf der CD als Anlage „7.01 Bemessungstool für Holz-Textil-Verbunde“ enthalten und kann für eine überschlägliche Bemessung genutzt werden.

Zur Berücksichtigung der im Bauwesen üblichen Sicherheiten sind für neuartige Materialien einerseits die charakteristischen Kenngrößen zu bestimmen, andererseits muss ein Sicherheitskonzept aufgestellt werden.

Für die im Projekt untersuchten Materialien auf Holzbasis wird vorgeschlagen, das Sicherheitskonzept des üblichen Holzbaus zu übernehmen. Nachweise sind daher in der bekannten Form zu führen, die sicherstellt, dass der Bemessungswert der Einwirkungen E_d kleiner ist als der Bemessungswert des Widerstandes X_d. Folglich gilt:

$$E_d \leq X_d \quad \text{mit} \quad X_d = \frac{X_k \cdot k_{mod}}{\gamma_M} \tag{3.238}$$

Für diesen Fall spricht nichts dagegen, als Teilsicherheitsbeiwert des Materials den für Holz üblichen Faktor von 1,3 anzusetzen. Kritischer ist der Ansatz des Modifikationsfaktors k_{mod}, welcher den Einfluss von Feuchtigkeit und Lasteinwirkungsdauer auf die Festigkeiten berücksichtigt. Im Projekt wurde zwar der entsprechende Faktor für Voll-, Brettschicht- und Balkenschichtholz sowie Furnierschichtholz und Sperrholz übernommen, dies ist jedoch lediglich als erste grobe Abschätzung anzusehen und sollte in zukünftigen Forschungsvorhaben dringend untersucht werden. Gerade für KHP, bei welchem eine prozentual geringere Dauerfestigkeit vermutet wird, könnten zumindest in NKL 3 deutlich kleinere Werte zu berücksichtigen sein. In der Exceldatei wurde auf die Eingabe von Teilsicherheits- und Modifikationsbeiwerten daher verzichtet. Diese sind entweder in die Eingabewerte der Festigkeiten oder bei den Nachweisen einzurechnen.

Zudem sei an dieser Stelle nochmals darauf hingewiesen, dass bei allen betrachteten Hybridbauteilen starrer Verbund der Einzelteile vorausgesetzt ist, diese werden also miteinander verklebt. Für nachgiebige Verbindungen gelten die Bemessungsverfahren nicht. Wird eine Verstärkung angeordnet, ist vorausgesetzt, dass diese ausreichend verankert ist oder ohnehin über das gesamte Bauteil durchgeführt wird. Des Weiteren gelten sämtliche Ausführungen nur für Längsverstärkungen.

Sollen hochfeste oder hochsteife Verstärkungslamellen aus Faserkunststoffverbunden eingesetzt werden, sollte das Verfahren unter Ansatz einer gerissenen Zugzone bei voller Ausnutzung der Festigkeit des Verstärkungsmaterials nicht angewendet werden, da in diesem Fall, falls überhaupt ein Gleichgewichtszustand gefunden wird, unrealistisch große plastische Zonen errechnet werden. Für solche Verstärkungen sollte dann auch das oben genannte Sicherheitskonzept überdacht und der Materialteilsicherheitsbeiwert diskutiert werden.

3.7.4.3 Verbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln

Autor: Anke Schäcke (IaFB)

Zu den Verbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmittel wurden im Projekt für den Anwender folgende HHT - Praxisempfehlungen erarbeitet und dem Anhang beigefügt (siehe Anlage A5).

- Mehrschnittige Verbindungen mit stiftförmigen VM (Bemessungsverfahren)
- Stiftverbindungen mit Zwischenschichten (Bemessungsverfahren)
- Stiftverbindungen mit Verstärkungen aus HWP (Bemessungsverfahren)
- Stiftverbindungen mit Verstärkungen aus Nagelplatten (Bemessungsverfahren)
- Stiftverbindungen mit Verstärkungen aus FKV (Bemessungsvorschlag)

Dabei beinhalten die HHT - Praxisempfehlungen bis auf die “Stiftverbindungen mit Verstärkungen aus FKV“ praxisorientierte Bemessungsverfahren. Für unsymmetrische mehrschnittige Verbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmittel sind die Gleichungen für die Ermittlung der Bemessungswerte der Tragfähigkeit im Projekt hergeleitet worden. Die anderen Bemessungsverfahren wurden aus Veröffentlichungen Dritter für den Anwender aufbereitet, um Abbildungen ergänzt und zusammengestellt.

Für die Ermittlung der Bemessungswerte der Tragfähigkeit senkrecht zur Stiftachse pro Scherfuge und Verbindungsmittel unter Berücksichtigung des Kraft-Faser-Winkels α für Stabdübel, Passbolzen, Stiftverbindungen mit Zwischenschichten, Stiftverbindungen mit Verstärkungen aus HWP, Stiftverbindungen mit Verstärkungen aus Nagelplatten wurden für den Anwender entsprechende Excel-Arbeitsmappen erstellt. Des Weiteren sind für eine symmetrische vierschnittige und eine unsymmetrische fünfschnittige Passbolzenverbindung der Nachweis auf Abscheren in jeweils einer Excel- Arbeitsmappe erstellt worden. Die Berechnungsprogramme „Bemessung stiftförmiger Verbindungsmittel auf Abscheren“, „Berechnung einer vierschnittigen Passbolzenverbindung auf Abscheren“ und „Berechnung einer fünfschnittigen Passbolzenverbindung auf Abscheren“ sind auf beiliegender CD als Anlagen 7.04, 7.06 und 7.05 enthalten.

Bei den „Stiftverbindungen mit Verstärkungen aus FKV“ wurde ein Bemessungsvorschlag erarbeitet, der in Abschnitt 3.7.3.5 vorgestellt und erläutert wird. Hierbei fehlen noch die Vorgaben zu den Teilsicherheitsbeiwerten der FKV und der Klebeverbindung. Bisher können nur charakteristische Werte hierfür angegeben werden. Außerdem ist zur Bestimmung des Systemfaktors k_{sys} noch eine ausreichende Anzahl von Versuchen durchzuführen, um auch die Gleichungen für Versagensmechanismen mit Ausbildung von Fließgelenken im Stift in der Praxis anwenden zu können. Bei beiden Punkten besteht weiterer Forschungsbedarf. Im Forschungszeitraum wurden spezielle Patch aus FKV entwickelt. Die Lochleibungsfestigkeit hängt maßgebend vom Faservolumenanteil, aber auch von der Art der Mehrlagengestricke und der genauen Faserlage am Dübelloch ab. Es wurde im Projekt gezeigt, dass praxistaugliche Bauteile (Patches) hergestellt werden können. Damit diese auch mit allen technischen Angaben zur Bemessung (z. B. Lochleibungsfestigkeit und Sicherheitskonzept) für die Baupraxis vorliegen, sind jedoch weitere Untersuchungen nötig.

3.7.4.4 Knoten im Holzstapelrost mit einem Passbolzen als Verbindungsmittel

Autor: Anke Schäcke (IaFB)

Im Abschnitt 3.7.3.7 ist für einen Knoten im Holzstapelrost mit einem Passbolzen als Verbindungsmittel ein Bemessungsvorschlag vorgestellt und erläutert worden. Für den Anwender wurde die gleichnamige HHT- Praxisempfehlung erarbeitet und dem Anhang dieses Berichtes beigefügt (siehe Anlage A5: HHT-Praxisempfehlungen.).

Der Bemessungsvorschlag ist in drei Teilnachweise gegliedert. Das sind erstens für das Verbindungsmittel der Nachweis der maßgebenden Bolzenbiegung und das Abscheren des Bolzens (Spannungsnachweis), zweitens der Nachweis der unsymmetrischen Verbindung mit stiftförmigen Verbindungsmittel und drittens der Nachweis der Holzstapelfuge mit der Beanspruchung senkrecht zur Faserrichtung des Holzes. Sowohl für den Nachweis der unsymmetrischen Ver-

bindung mit stiftförmigen VM als auch für den Nachweis der Holzstapelfuge sind Berechnungsprogramme in Form von Excel-Arbeitsmappen erstellt worden. Sie sind auf der beiliegenden CD als Anlagen 7.05 und 7.07 enthalten.

3.8 Pilotprojekte

Kurzreferat vom Verantwortlichen (IaFB)

Ziel war, die im Forschungsvorhaben untersuchten Hochleistungsholztragwerke in Pilotprojekten einzusetzen, um die praktische Machbarkeit zeigen und Argumente für den Einsatz von Hochleistungsholz durch Erfahrungen bei Genehmigung, Bau und Nutzung ergänzen zu können. Dazu mussten Bauherren überzeugt bzw. Bauvorhaben akquiriert werden. Es stellte sich heraus, dass die Verwendung von neuen und daher nicht bauaufsichtlich geregelten Materialien, Bauweisen bzw. Bemessungsverfahren oft Ausschlusskriterium war, da hier das zeitliche und/oder finanzielle Risiko zur Erlangung der nötigen Zustimmung im Einzelfall schwer einzuschätzen ist.

Mit der Genehmigungsbehörde in Berlin wurden zu Beginn relevante Genehmigungsfragen allgemein und hinsichtlich konkreter Pilotprojekte abgestimmt. Darüber hinaus konnten durch eine Sichtung der gesetzlichen Vorschriften, allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassungen und der Literatur zu Bauvorhaben mit Zulassungen im Einzelfall mögliche Wege zur Ausführung von Bauvorhaben mit nicht gesetzlich geregelten Bauprodukten und Bauweisen aufgezeigt werden.

Neben zahlreichen Entwürfen wurden letztendlich drei Pilotprojekte vertieft bearbeitet und bis zur Ausführungsreife geplant. Dies sind das Pilotprojekt Fußgängerbrücken (siehe Kap. 3.8.2), das Pilotprojekt Vertikalachswindkraftanlage (siehe Kap. 3.8.3) sowie das Pilotprojekt Hess-Innenhofüberdachung (siehe Kap. 3.8.4). Während der Projektlaufzeit wurde wurde leider nur das Pilotprojekt Vertikalachswindkraftanlage realisiert. Für die HHT-Brücke im Pilotprojekt „Fußgängerbrücken“ wurde die Ausschreibung durch den öffentlichen Bauherren zwar getätigt, dann jedoch aus Kostengründen unerwartet zurückgezogen. Hier wird eine Ersatzbrücke auf Privatgelände erstellt werden. Die Hess-Innenhofüberdachung kam aus finanziellen Gründen ebenfalls nicht zur Ausführung.

3.8.1 Akquise

Autor: Martin Hamann (IaFB)

Um die Technologieergebnisse und deren technische Machbarkeit anhand von Pilotprojekten darstellen zu können, wurden potentiellen Bauherren technische Unterlagen, Kostenschätzungen und Dokumente zur Umweltverträglichkeit sowie Ökobilanz der neuartigen Baustoffe zugearbeitet.

Parallel zur Akquisetätigkeit wurden in Gesprächen und Treffen mit möglichen Bauherren deren technische und betriebswirtschaftliche Fragestellungen speziell für das jeweils anvisierte Projekt bearbeitet.

Wesentliche Aufgabe im Zuge der Umsetzung von Pilotprojekten war die Klärung bauaufsichtlicher Genehmigungsfragen sowie die Konzipierung der für die Erlangung der Genehmigung erforderlichen Versuchsreihen. Dabei zeigte sich, dass oft der damit zusammenhängende nötige zusätzliche Aufwand gescheut und das zeitliche Risiko nicht auf sich genommen wurde.

Im Laufe der Bearbeitungszeit wurden folgende potentielle Pilotprojekte angefragt:

- Ersatzneubau einer Fuß- und Radwegbrücke als Hochleistungsholztragwerk im Vergleich mit einer konventionellen Holzbrücke und einer Stahlbrücke; öffentlicher Bauherr; Beteiligte: Philipp Koch, pk-Architekten
- Holzmast als Alternative zum Stahlmast einer Vertikalachswindkraftanlage; Bauherr: Helix Wind ®,
- Überdachung eines Innenhofes in Form einer Schirmkonstruktion; Bauherr: Hess Timber GmbH & Co. KG
- Errichtung eines Erweiterungsbaus mit Tagungszentrum und Multifunktionsflächen für die SGL-Carbon AG; Beteiligte: Kehrbaum Architekten, Augsburg
- Realisierungswettbewerb für Typenbau für sechs Kindertagesstätten in München (HBV-Konstruktionen)

- Einsatz von thermisch modifizierten Hölzern (TMT) im Fassadenbereich, Forschungshaus Molekulare Veterinärmedizin; Bauherr: Freie Universität Berlin; u.a. Klärung von Brandschutzaspekten von TMT im Fassadenbereich
- Neubau einer Kindertagesstätte am Römerhof mit Schutzbauwerk für eine archäologische Ausgrabungsstätte; Bauherr: Gemeinde Remchingen; Einsatz von Biegeträgern zur Unterstützung einer Pultdachkonstruktion, Alternativvorschlag: Dachkonstruktion mit einer Schalenkonstruktion
- Reithalle mit Saloon und Kutschenhaus; privater Bauherr; Einsatz von textilverstärkten Formholzprofilen als Hauptstützen der Dachkonstruktion einer Reithalle
- Unterkonstruktion für Solaranlagen; Bauherr Phoenix Solar AG; Einsatz von Formholzprofilen als Unterkonstruktion für großformatige Photovoltaik-Anlagen
- Einsatz von vergüteten Anschlüssen und Formholztechnologie in Systembauweisen; Projektentwicklung Harm und Pro-Ment Elementbau
- Einsatz verdichteter Hölzer, Sporthalle Birkenfeld der HTWG Trier; Maas Ingenieure

Aus verschiedenen Gründen haben sich nicht alle potentiellen Bauherren für die Umsetzung entschieden, so dass während der Projektlaufzeit insgesamt drei der genannten Pilotprojekte detailliert bearbeitet und ausführungsreif geplant wurden. Eine Fuß- und Radwegbrücke (siehe Pilotprojekt Fußgängerbrücken, Kap. 3.8.2), ein Holzmast einer Vertikalachswindkraftanlage (siehe Pilotprojekt Vertikalschswindkraftanlage, Kap. 3.8.3) und eine Innenhofüberdachung (siehe Pilotprojekt Hess-Innenhofüberdachung, Kap. 3.8.4).

3.8.2 Pilotprojekt Fußgängerbrücken

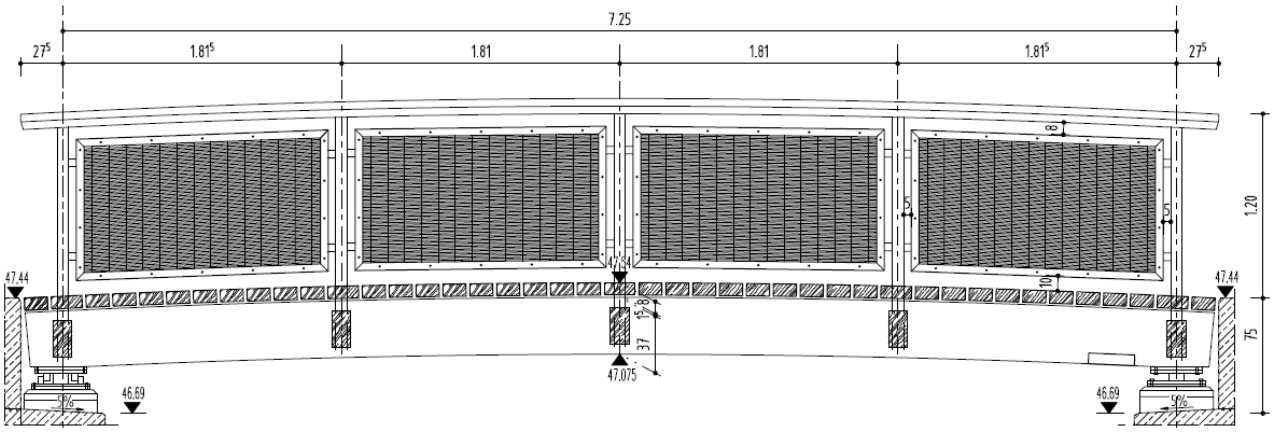
3.8.2.1 Allgemeines

Autoren: Petra Kubowitz, Yvette Lemke nach Andrea Untergutsch (alle IaFB)

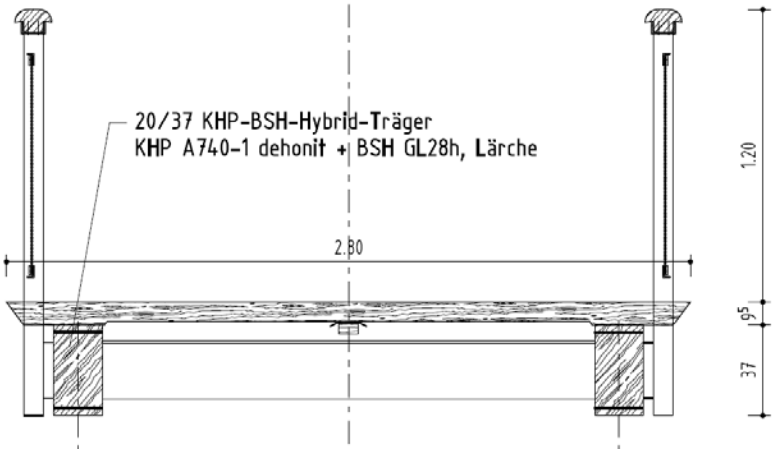
Für eine Fuß- und Radwegbrücke in Berlin-Pankow wurde ein Ersatzneubau geplant, bei dem neuartige Holzverbundbauteile zum Einsatz kommen. Das geplante Bauwerk ist eine Einfeldbrücke mit einer Stützweite von 7,25 m und einer Breite von 2,50 m zwischen den Geländern.

Dem öffentlichen Bauherren wurden mehrere Ausführungsalternativen präsentiert, die sich im wesentlichen durch die Anordnung der Haupttragglieder und deren Form unterscheiden. Im Folgenden wird die Konstruktion beschrieben, die vom Bauherren gewünscht wurde. Zwei alternative Entwürfe sind in Kap. 3.8.2.4 beschrieben.

Der Überbau besteht aus zwei Hauptträgern, die mit Querträgern ausgesteift werden, sowie einem Holzbohlenbelag. Die seitliche Absturzsicherung soll durch ein 1,20 m hohes Edelstahlgeländer erfolgen. Das Bauwerk wird flach gegründet. In Abweichung zur konventionellen Holzbrückenbauweise werden die Hauptträger der Brücke als Hybridträger mit einem Kern aus unbehandeltem Nadelholz und ober- und unterseitig aufgeleimten Kunstharzpressholzlamellen (KHP-BSH-Hybridträger) ausgeführt. Die Querträger aus unbehandeltem Nadelholz verfügen über eine oberseitige KHP-Abdecklamelle. Die Bohlen werden als Hybridbauteile aus thermisch vergütetem Laubholz auf der Oberseite und unbehandeltem Nadelholz auf der Unterseite gefertigt (TMT-Lärche-Hybridbohlen). Als Nadelholz wird für alle Holzbauteile Lärchenkernholz aus alpinen Einschlagsgebieten verwendet. Die folgenden Abbildungen zeigen den Aufbau und die Abmessungen der Brücke.



(a) Längsschnitt der Brücke



(b) Regelquerschnitt der Brücke

Abb. 3.307: Längs- und Querschnitt der Fuß- und Radwegbrücke („HHT-Brücke“)

Die Hybridbauteile wurden im Rahmen des Verbundprojektes vom IaFB gemeinsam mit den Projektpartnern entwickelt. Dabei mussten die entsprechenden Materialkennwerte ermittelt, zahlreiche Versuche für die Genehmigungsfähigkeit durchgeführt und zusammen mit den angesetzten Tragfähigkeiten, Gebrauchstauglichkeiten und Aussagen zur Dauerhaftigkeit in einem „Bericht zu den Grundlagenuntersuchungen […]“ (siehe [212]) für Prüfingenieur und Genehmigungsbehörde zusammengefasst werden. Dieser Bericht liefert die Grundlagen für eine Zustimmung im Einzelfall und gibt die bauaufsichtlich nötigen Hinweise zum Einsatz von KHP und TMT. Die eigentliche Tragwerksplanung auf Grundlage dieses Berichtes oblag der KRONE Ingenieurbüro GmbH, jetzt Krone Hamann Reinke Ingenieurbüro GmbH.



(a) Ansicht analog Hauptträgerquerschnitt

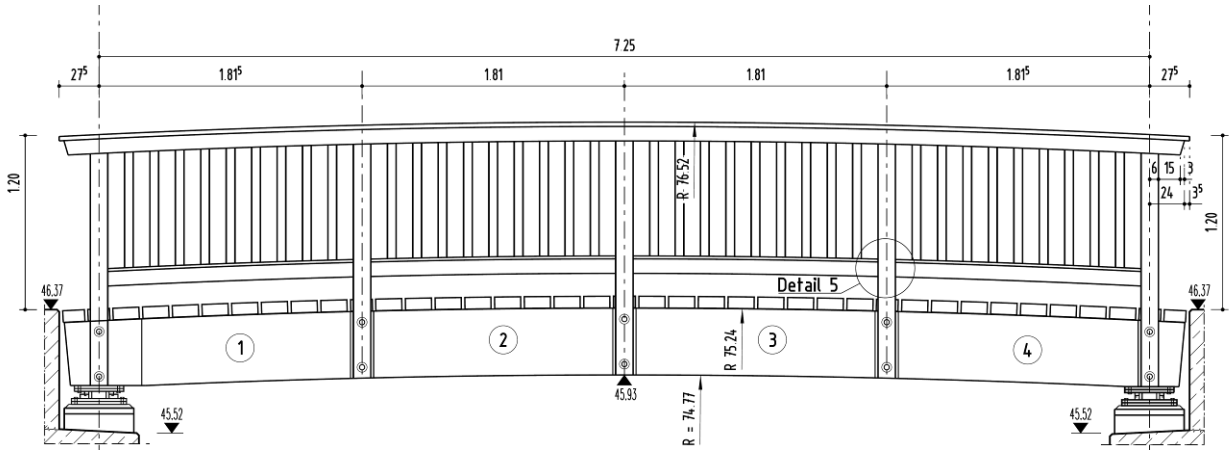


(b) Ansicht analog Bohlenquerschnitt

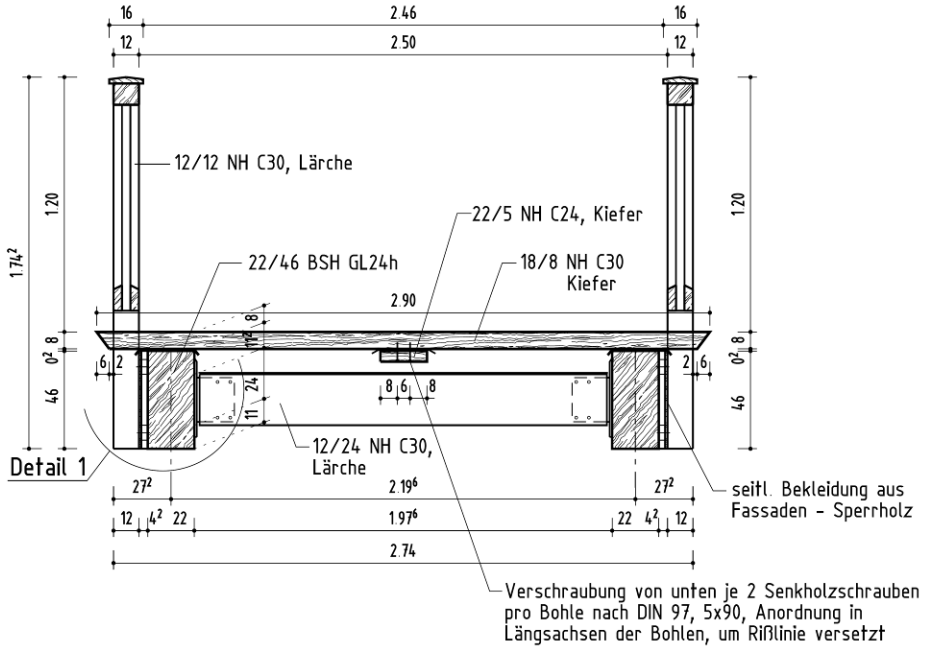
Abb. 3.308: Hauptträger und Bohlen

Aufgrund der Neuartigkeit der Hybridbauteile soll die Brücke ab ihrer Fertigstellung einem umfangreichen Monitoring (Arbeitspaket AP 10) unterzogen werden. Dieses beinhaltet zum einen die visuelle Kontrolle der Bauteile, zum anderen aber auch eine fasersensorische Überwachung der Hauptträger. Hierbei sollen die Dehnungen der Hauptträger mit Hilfe optischer Fasersensoren in regelmäßigen Abständen gemessen werden. AP 10 wird wegen der gegenüber dem Basisprojekt verschobenen Laufzeit in einem getrennten Bericht beschrieben.

Während sich die Tragfähigkeitssteigerungen rechnerisch bereits vor der Errichtung der Brücke quantifizieren ließen, kann eine Evaluierung der tatsächlichen Dauerhaftigkeit der Hybridbauteile nur über eine Untersuchung über die Lebensdauer erfolgen. Für den direkten Vergleich mit konventionell hergestellten Bauteilen wird ein Vergleichsobjekt in die Betrachtungen einbezogen. Hierbei handelt es sich um eine gleichzeitig in Berlin zu errichtende Fuß- und Radwegbrücke mit identischem statischem System, gleichen Abmessungen und sehr ähnlichen Bewitterungsbedingungen in konventioneller Holzbauweise („Holzbrücke“) Der Zustand der Holzbauteile beider Brücken kann so direkt gegenübergestellt und verglichen werden.



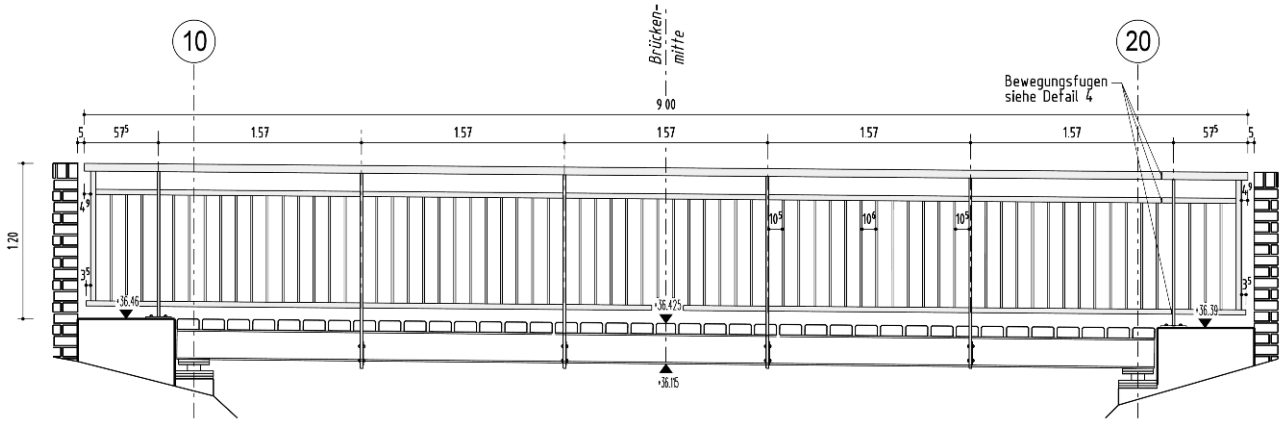
(a) Längsschnitt der konventionellen Holzbrücke



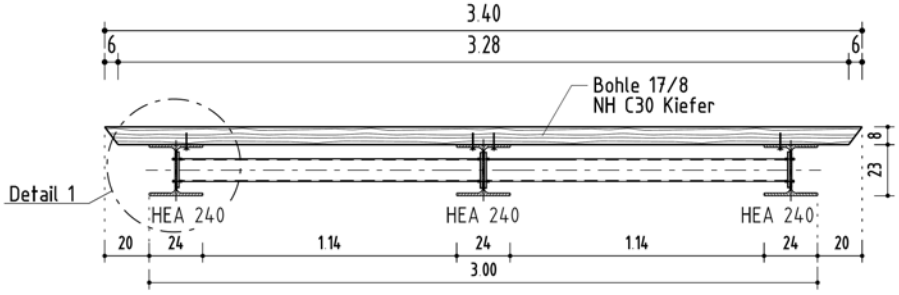
(a) Regelquerschnitt der konventionellen Holzbrücke

Abb. 3.309: Längs- und Querschnitt der Fuß- und Radwegbrücke „Holzbrücke“

Für die ökologische Bewertung wurde zudem eine dritte Fuß- und Radwegbrücke, eine in Stahlbauweise mit ähnlichen Abmessungen und gleichem statischen System konzipierte Brücke („Stahlbrücke“) herangezogen. Damit sind vergleichende Aussagen bzgl. einer konventionellen Holzbrücke, einer Hochleistungsholzbrücke und einer konventionellen Stahlbrücke möglich (vgl. auch Kap.3.9.2).



(a) Längsansicht der konventionellen Stahlbrücke



(b) Regelquerschnitt der konventionellen Stahlbrücke (Darstellung ohne Geländer)

Abb. 3.310: Längsansicht und Querschnitt der Fuß- und Radwegbrücke „Stahlbrücke“

Hinweis: Leider hat der Bauherr das Vergabeverfahren wegen der Preisentwicklung unerwartet nach Ende der Projektlaufzeit aufgehoben, so dass das Projekt Gefahr lief, nicht realisiert zu werden. Um trotzdem die Langzeituntersuchungen der Hybridbauteile vornehmen und das Monitoring (AP 10) gemeinsam mit der BAM durchführen zu können, wird Anfang 2011 von den Partnern IaFB und BAM eine modifizierte Variante auf dem Gelände der BAM in Berlin errichtet. Dieser Ersatzbau besteht aus den beiden Längsträgern, welche als Hybridträger die Sensoren enthalten, und einem Bohlenbelag, welcher zu einem Teil aus Hybridbohlen und ansonsten aus handelsüblichen imprägnierten Bohlen besteht. Als Absturzsicherung wird ein Geländer vorgesehen. Die Ersatzbrücke enthält einerseits den Versuchsträger für die Langzeitversuche (einer der Längsträger) und soll andererseits die Erprobung der faseroptischen Sensorik unter realen Bedingungen ermöglichen. Im Vergleich zum ursprünglich geplanten Sensoreinsatz an der Fuß- und Radwegbrücke („HHT-Brücke“) besteht zwar der Nachteil, dass die Verkehrslasten geringer ausfallen werden, es bieten sich jedoch folgende Vorteile:

- *Dauermessung möglich*
  kontinuierliche Auslesung der Messfasern direkt im benachbarten BAM-Gebäude
- *Repräsentative Lage der Versuchskörper auch für interessierte Fachkreise*
  Poster, Führungen, Anzeige der Messwerte direkt neben dem Bauwerk u. ä. möglich
- *Definierte Belastungsmöglichkeiten ohne Einschränkung der Öffentlichkeit*
- *Bruchversuch nach Ende des Monitorings möglich*
  Belastung bis zum Bruch des Tragwerks lässt Rückschlüsse auf die Langzeitfestigkeit zu

3.8.2.2 Klärung von Genehmigungsfragen

Autoren: Petra Kubowitz (IaFB), Robert Putzger (ISH)

Für die Genehmigungsfähigkeit waren zahlreiche Untersuchungen nötig. Diese bezogen sich einerseits auf die Ermittlung der anzusetzenden Materialkennwerte und der daraus zu bestimmenden charakteristischen Kenngrößen für die Nachweise der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit. Andererseits mussten auch die Bemessungsverfahren selbst dargelegt und genehmigt werden. Zudem war die Herstellung der Hybridbauteile zu beschreiben, der dauerhafte starre Verbund der Klebefuge sicherzustellen und die Dauerhaftigkeit der Einzelteile und der Hybridbauteile zu untersuchen. In zahlreichen Besprechungen mit dem Prüfingenieur, der Genehmigungsbehörde, dem Tragwerksplaner sowie dem Bauherren wurde das umfangreiche Untersuchungsprogramm festgelegt. Die Untersuchungen wurden im Rahmen des Projektes über mehrere Jahre durchgeführt und ihre Ergebnisse im „Bericht zu den Grundlagenuntersuchungen“ [212] zusammengefasst. Dieser war im Sinne einer Zustimmung im Einzelfall Grundlage für die Genehmigungsfähigkeit. Alle enthaltenen Angaben zu ungeregelten Baustoffen, Konstruktionsprinzipien und zur Berechnung wurden vom IaFB in enger Abstimmung mit der KRONE Ingenieurbüro GmbH erarbeitet und flossen nach Absprache mit dem Bauherren, der Genehmigungsbehörde und dem Prüfingenieur in die Planungsunterlagen ein. Die Materialeigenschaften wurden größtenteils von den Projektpartnern ermittelt, einige konnten durch Literaturrecherchen festgelegt werden.

Im Einzelnen wurden folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Bestimmung mechanischer Kennwerte an kleinen Proben aus Fichte, KHP und TMT durch das ISH (vgl. Kap. 3.2.8.4)
- Biegeprüfungen an KHP-BSH-Hybridträgern durch das ISH (vgl. Kap. 3.5.6)
- Bauteilversuch: Bruchprüfung eines Längsträgers (KHP-BSH-Hybridträger mit Fasersensoren) durch ISH, BAM, IaFB (vgl. Kap. 3.8.4.5.3)
- Freibewitterungs-, Wasserlagerungs- und Klimakammerversuche an TMT, KHP und Hybridprobekörpern durch das ISH (vgl. Kap. 3.2.7.3, 3.2.7.4, 3.2.7.5, 3.2.3.4, 3.2.3.5)
- Delaminierungstests zur Beurteilung der Klebefugen von Hybridträgern und Hybridbohlen durch Hess (vgl. Kap. 3.2.7.1)
- Kriechversuche am KHP durch das Institut für Holzforschung Dresden (vgl. Kap. 3.2.8.5).
- Dauerhaftigkeitstests gegen Basidiomyceten an alpiner Lärche durch das Institut für Holzforschung Dresden (vgl. Kap. 3.2.7.2)

Im Ergebnis wurden für KHP Festigkeits- und Steifigkeitswerte aus den Versuchen ermittelt, für TMT aufgrund vorhandener Werte festgelegt. Als Bemessungsverfahren wurde das linear-elastische Verfahren gewählt, da die anderen Verfahren zur damaligen Zeit nur angedacht, jedoch noch nicht detailliert untersucht waren. Der Bauteilversuch des KHP-BSH-Hybridträgers zeigte ein gegenüber dem Bemessungsmoment mehr als dreifaches Bruchmoment, damit konnte die ausreichende Sicherheit bestätigt werden. Für die Bohlen wurde wegen der bekannten Versprödung des TMT zusätzlich nachgewiesen, dass das TMT nur biegedruckbeansprucht wird. Aufgrund der Delaminierungstests und Klimakammerversuche wurde zur Verklebung ein Resorcinharz-Leimsystem gewählt. Die Freibewitterungsversuche und die Bestimmung der Holzfeuchtigkeiten ließen auf eine stark verbesserte Dauerhaftigkeit des vollgetränkten KHP schließen. Die Holzfeuchte blieb für das harzgetränkte KHP im relevanten Klimazyklus immer unterhalb von 7%. Diese deutlich verringerte Ausgleichsfeuchte lässt einen Aufschluss des Materials durch holzzerstörende Pilze nicht zu. Der hohe Tränkungsgrad mit duroplastischen Harzen verhindert zudem einen Aufschluss durch Mikroorganismen und Insekten. Die Freibewitterungsversuche bestätigten dies, sollten jedoch noch über größere Zeiträume weitergeführt werden. Für TMT lag ein Zertifikat vor, was die Einstufung in Dauerhaftigkeitsklasse 1 belegt. Die Dauerhaftigkeit der alpinen Lärche wurde durch die Pilzprüfungen mit Dauerhaftigkeitsklasse 3-4 bestimmt. Die Kriechversuche am KHP ergaben für geringe Dauerlasten unkritische niedrige Kriechbeiwerte (bei hohen Dauerlasten traten jedoch sehr große Kriechbeiwerte auf).

Mit diesem Untersuchungsprogramm und den erzielten Ergebnissen wurde die Genehmigung zum Einsatz der ungeregelten Materialien und der vorgesehenen Hybridbauteile erzielt.

3.8.2.3 Konstruktionsentwicklung

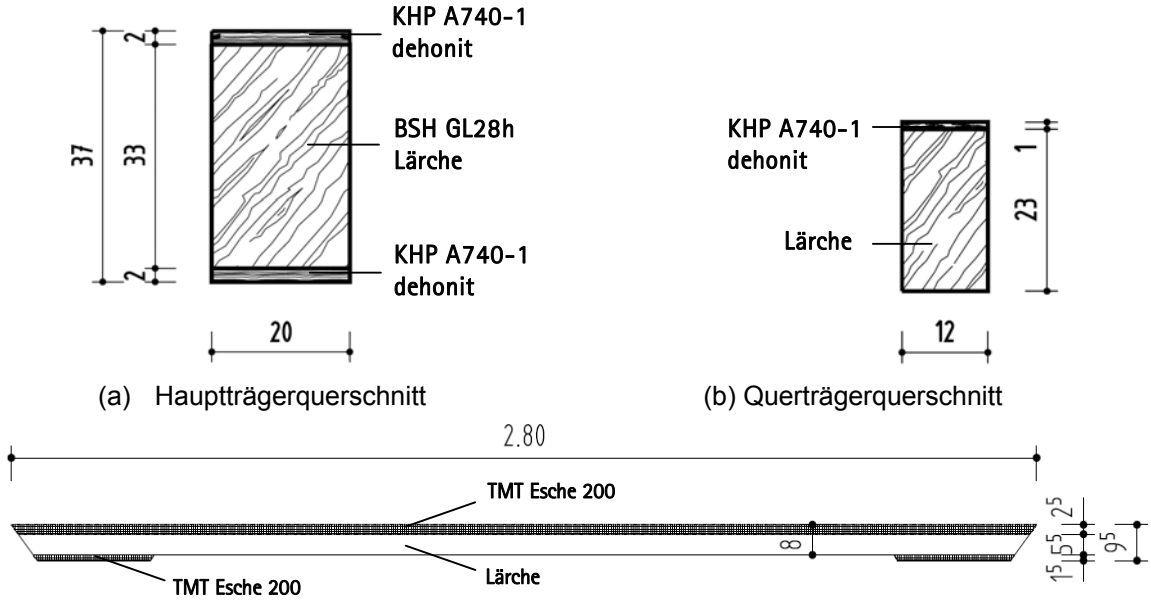
Autoren: Petra Kubowitz, Yvette Lemke, Andrea Untergutsch (alle IaFB)

Die Hybridbauteile wurden mit der Zielsetzung entwickelt, die Leistungsfähigkeit der Brücke hinsichtlich ihrer Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit gegenüber einer konventionell errichteten Holzbrücke zu erhöhen.

Als Nadelholz wird das Kernholz europäischer Lärche aus alpinen Wuchsgebieten (Höhenlage 1000 m ü. NN) verwendet.

Kunstharzpressholz (KHP) ist ein marktgängiges Holzwerkstoffprodukt, das bisher jedoch nicht für tragende Bauteile eingesetzt wird. Kunstharzpressholz besteht aus verleimten, thermisch verdichteten und mit Kunstharz getränkten Buchenholzfurnierlagen. Die Verdichtung der Furnierschichten führt zu einer Erhöhung der Festigkeiten und Steifigkeiten des Materials. Zur Ausschaltung des sogenannten Rückerinnerungsvermögens des Holzes (Entspannen unter Feuchteeinwirkung) und zur Erhöhung der Dauerhaftigkeit erfolgt die Tränkung mit Kunstharz. Kunstharzpressholz ist sehr dimensionsstabil und resistent gegenüber Umwelteinflüssen. Die konkreten Materialeigenschaften verschiedener KHP-Materialien hängen sehr stark von der Orientierung der Lagen, der Feinheit der Furniere, dem Schichtenaufbau sowie dem Verdichtungs- und Tränkungsgrad ab. Im Pilotprojekt wurde das Produkt KHP A 740-1 dehonit (parallele Schichtrichtung mit einer Querlage, Furnierstärke 2,0 mm; vollständige Tränkung) der Firma Deutsche Holzveredlung Schmeing GmbH& Co. KG eingesetzt.

Bei thermisch modifiziertem Holz (TMT) handelt es sich um ein durch Wärmebehandlung in seinen Eigenschaften verändertes Vollholz. Die Behandlung mit Wärme wirkt sich positiv auf die Dauerhaftigkeit des Materials aus. Durch chemische Umwandlungen im Holz während der Behandlung werden die Eigenresistenz des Holzes erhöht, die Wasseraufnahmefähigkeit reduziert und die Dimensionsstabilität verbessert. Wesentliche Nebenwirkungen der thermischen Behandlung sind eine Versprödung des Materials und eine verringerte Zugfestigkeit gegenüber unbehandeltem Holz, weshalb darauf geachtet wurde, TMT nur in der Biegedruckzone der Hybridbohlen einzusetzen. Die Materialeigenschaften werden stark durch die Bedingungen im Vergütungsprozess beeinflusst. Für den Bohlenbelag der Pilotprojektbrücke wurde das Produkt TMT Esche 200 (Prozesstemperatur 200°C) der Firma Thermoholz Spreewald GmbH gewählt.



(a) Hauptträgerquerschnitt (b) Querträgerquerschnitt

(b) Bohlenlängsschnitt

Abb. 3.311: Bauteile des Überbaus der Fuß- und Radwegbrücke „HHT-Brücke“

Durch die Verstärkung des Brettschichtholzes der Hauptträger mit außenliegenden Kunstharzpressholzlamellen kann sowohl die Tragfähigkeit der Träger als auch die Dauerhaftigkeit der Bauteile verbessert werden. Die rechnerische Tragfähigkeit erhöht sich allein bei einer linear elastischen Berechnung der Träger als klassische Verbundbauteile um 26 %. Bei Ansatz eines plastischen Materialverhaltens im Druckbereich sowie einer teilweise gerissenen Zugzone sind die Tragfähigkeitssteigerungen mit 47 % deutlicher (siehe Tabelle 3.60), da erst dann das volle Potential des Hybridträgers ausgenutzt wird (bzgl. der Rechenmodelle siehe Kap. 3.7.3.3.2).

Neben der Erhöhung der Tragfähigkeit dient die obere KHP-Lamelle gleichzeitig aufgrund ihrer guten Witterungsbeständigkeit als oberseitiger Witterungsschutz und erübrigt damit eine zusätzliche Blechabdeckung der Träger. Auf einen seitlichen Überstand der KHP-Lamellen, chemischen Holzschutz und eine seitliche Bekleidung der Hauptträger wurde aufgrund folgender konstruktiver Bedingungen verzichtet: stehendes Wasser wird durch die Trägerlängsneigung und Abdeckung mit KHP-Lamellen verhindert, Wassereintritt in radiale Trocknungsrisse wird durch die Anordnung der Lärchelamellen mit der Kernseite nach oben verhindert, verbunden mit der geringen natürlichen Durchlässigkeit der Lärche folgt daraus eine geringe Feuchteaufnahme. Zudem sind die Hauptträger frei zugänglich und werden regelmäßig begutachtet.

Bei der Ausbildung der Querträger und Bohlen stand die Verbesserung der Dauerhaftigkeit der Bauteile bei gleichzeitigem Verzicht auf Blechabdeckungen und chemischen Holzschutz im Vordergrund. Für die Querträger gilt bezüglich des Witterungsschutzes Gleiches wie bei den Hauptträgern. Als oberseitige Lage der Verbundbohlen wurde das thermisch modifizierte Eschenholz TMT Esche 200 der Firma Thermoholz Spreewald GmbH verwendet, weil es der Dauerhaftigkeitsklasse 1 nach DIN EN 350-2 [46] zugeordnet werden kann und somit eine optimale Resistenz gegenüber witterungsinduzierten Schäden aufweist. Auf einen seitlichen Überstand der KHP- bzw. TMT-Lamellen wurde wie bei den Hauptträgern verzichtet.

In der folgenden Tabelle werden die geplanten hybriden Brückenträger hinsichtlich ihrer Tragfähigkeit und Abmessungen mit konventionellen BSH-Trägern verglichen. Die für die Bemessung der Brückenträger erforderlichen Festigkeiten und Steifigkeiten von KHP A740-1 dehonit wurden am ISH der TU Dresden ermittelt (siehe auch Kap. 3.2.8.4).

Tabelle 3.60: Vergleich verschiedener Trägerausführungen gleicher Breite (b = 20 cm)

Trägerausführung	Material	Bemessungsverfahren	Höhe [cm]	Volumenfaktor [/][a]	Bemessungsmoment [kNm]	Tragfähigkeitsfaktor [/][b]
(1) Hybridträger HHT-Brücke	KHP A740-1 BSH GL28h	linear elastisch	37	1,00	92,5	1,00
(2a) BSH-Träger Tragfähigkeit wie (1)	BSH GL28h	linear elastisch	41,5	1,12	92,5	1,00
(2b) BSH-Träger Maße wie (1)	BSH GL28h	linear elastisch	37	1,00	73,6	0,80
(3a) Hybridträger Maße wie (1)	KHP A740-1 BSH GL28h	Plast. Druckzone, geriss. Zugzone [c]	37	1,00	108,2	1,17
(3b) Hybridträger Tragfähigkeit wie (1)	KHP A740-1 BSH GL28h	Plast. Druckzone, geriss. Zugzone [c]	32,5	0,88	92,5	1,00

[a] Der Volumenfaktor gibt als einfaches Maß für den Materialaufwand das Verhältnis aus dem Volumen der betrachteten Trägervariante zum Volumen des geplanten Hybridträgers (1) an.

[b] Der Tragfähigkeitsfaktor setzt zum Vergleich der Tragfähigkeiten das Bemessungsmoment der betrachteten Trägervariante ins Verhältnis zu der des geplanten Hybridträgers (1).

[c] Die Rechnung erfolgte unter der Annahme, dass das KHP voll ausgenutzt ist.

Zu erwähnen ist, dass das im Bruchversuch an einem Hybridträger ermittelte Bruchmoment 328 kNm betrug und damit deutlich über den Bemessungsmomenten liegt. Als Abstand zu charakteristischen Momenten ergibt sich immerhin noch ein Faktor von 1,63 beim Verfahren mit plastifizierter Druckzone und gerissener Zugzone bzw. ein Faktor von 1,91 beim linear-elastischen Verfahren. Dies zeigt einerseits, dass das linear-elastische Verfahren weit auf der sicheren Seite liegt und lässt andererseits darauf schließen, dass die Bruchfestigkeiten von Lärche und KHP mehr als 50% über den charakteristischen Werten lagen, was durchaus üblich ist.



Abb. 3.312: Hybridträger im Bruchversuch

Bezüglich der Dauerhaftigkeit für das Kunstharzpressholz in vollgetränkter Qualität kann nach Quellenlage und Versuchen im Rahmen des Forschungsvorhabens von einer sehr guten Dauerhaftigkeit für den Einsatz im Außenbereich ausgegangen werden. Die Versuche an der TU Dresden stützen die Erkenntnis, dass KHP eine um über 50 % verringerte Ausgleichsfeuchte gegenüber Vollholz aufweist und die Feuchteaufnahme im feuchten Umgebungsklima sowie bei Wasserlagerung stark verzögert erfolgt. Für KHP A740-1 wurde bei Wasserlagerung eine Holzfeuchte von 7 % nicht überschritten (vgl. Kap. 3.2.6.2). Diese deutlich verringerten Ausgleichsfeuchten lassen einen Aufschluss des Materials durch holzzerstörende Pilze nicht zu. Zusätzlich verhindert der hohe Tränkungsgrad des Schichtwerkstoffs mit duroplastischen Harzen einen Aufschluss des Holzes durch Mikroorganismen und Insekten. Aus diesen Gründen lässt sich ein Befall des Kunstharzpressholzes durch holzzerstörende Pilze und Insekten ausschließen. Die sehr gute Dauerhaftigkeit des Kunstharzpressholzes zeigt sich auch in den durchgeführten Freibewitterungstests. Auch nach über 2 Jahren in der Freibewitterung zeigen die Verbundquerschnitte mit vollgetränktem KHP neben Vergrauungen und freien Schwindrissen an den Stirnseiten keine Bewitterungsschäden (vgl. Kap. 3.2.7.3). Die Schutzwirkung der KHP-Decklamellen wird durch die Versuche demnach bestätigt.

Für das thermisch vergütete Eschenholz Esche 200 ist die Einstufung in Dauerhaftigkeiten der Klasse 1 belegt [212]. Es ist somit ausreichend dauerhaft für den Einsatz als Bohlenbelag. Weiterhin ist von einer ausreichenden Verschleißfestigkeit des Materials auszugehen, da in Untersuchungen kein signifikanter Abfall der Abriebfestigkeiten von thermisch modifiziertem Laubholz festgestellt wurde, dies sollte allerdings durch Untersuchungen am ausgeführten Bauwerk überprüft werden.

Auf einen chemischen Holzschutz des oberseitig abgedeckten Brettschichtholzes wurde verzichtet. Lärchenkernholz ist gemäß DIN EN 350-2 in die Dauerhaftigkeitsklasse 3-4 einzustufen und kann nach DIN EN 460 unter bestimmten Voraussetzungen unbehandelt für Bauteile der Gebrauchsklasse 3 verwendet werden. Untersuchungen zeigen, dass unbehandeltes Lärchenkernholz sehr gut für den Einsatz in Gebrauchsklasse 3 geeignet ist. Daher wird in der Neufassung der DIN 68800 Lärchenkernholz ohne zusätzliche Holzschutzmaßnahmen für die Gebrauchsklassen 2 und 3.1 explizit zugelassen werden, *„unabhängig davon, dass es nur in Dauerhaftigkeitsklasse 3-4 eingestuft ist, da sich der Einsatz […] in GK 2 und 3.1 seit der letzten Ausgabe von DIN 68800-3:1990-04 in der Praxis bewährt hat“* (vgl. [58]). Ziel der Auswahl alpiner Einschlagsgebiete für das Lärchenkernholz war es, Holz mit einem besonders hohem mittleren Gehalt an positiv mit der Dauerhaftigkeit korrelierenden Extraktstoffen zu gewinnen. Eine Überprüfung der Dauerhaftigkeit des verwendeten alpinen Lärchenholzes durch eine normge-

mäße Beaufschlagung mit holzzerstörenden Basidiomyceten zeigte jedoch, dass es im konkreten Fall nicht besser als in die Dauerhaftigkeitsklasse 3-4 einzustufen war (vgl. Kap. 3.2.7.2.6).

Die für die Dauerhaftigkeit der Verbundbauteile wichtige Qualität der Klebefugen konnte in Delaminationsprüfungen nach DIN EN 391 (vgl. Kap. 3.2.7.1) und Klimaschrankversuchen nachgewiesen werden (vgl. Kap. 3.2.3.4 und 3.2.3.5).

3.8.2.4 Alternativentwürfe

Autoren: Andreas Heiduschke (ISH), Andrea Untergutsch (IaFB)

Neben der letztendlich zur Ausführung kommenden Variante mit untenliegenden Hauptträgern (vgl. Abb. 3.307) wurden zwei Varianten mit obenliegenden Trägern untersucht.

Variante 1:

Die grundsätzliche Idee hinter der hier dargestellten Variante 1 war es, die Haupttragstruktur oberhalb der dem Verschleiß und der Witterung ausgesetzten Gehbahn anzuordnen und ähnlich wie bei einer Trogbrücke die Tragstruktur als Handlauf zu verwenden. Abb. 3.313 zeigt die Variante mit einer Spannweite von 8 m.

Bei dieser Hängebrücke wird die Gehbahn von Hängern getragen die an den einfachen Hybridbalken angeschlossen werden. Die Horizontalkräfte der Handläufe werden direkt in die Widerlager abgeführt.

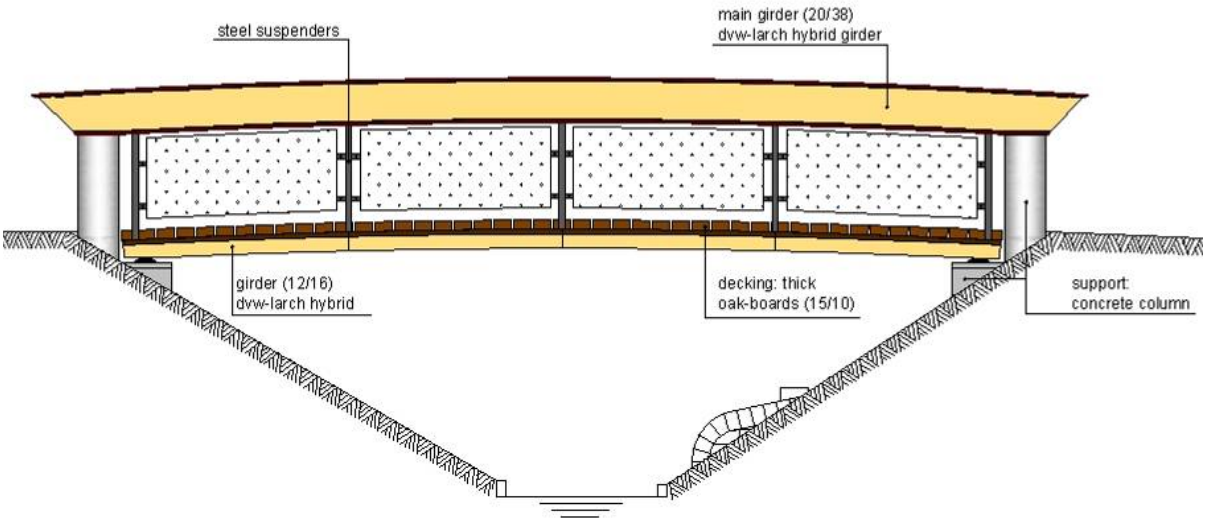


Abb. 3.313: Ansicht der Brücke Variante 1

Die Oberseite der Längsträger hat eine überstehende KHP-Lamelle mit einer Tropfnase, um den Querschnitt vor Niederschlag zu schützen. Aus architektonischen Gründen bleiben die vertikalen Seiten des BSH abgesehen von einem Anstrich der Witterung ausgesetzt. Die Fahrbahn wird durch einen unter den Bohlen liegenden Kreuzverband ausgesteift.

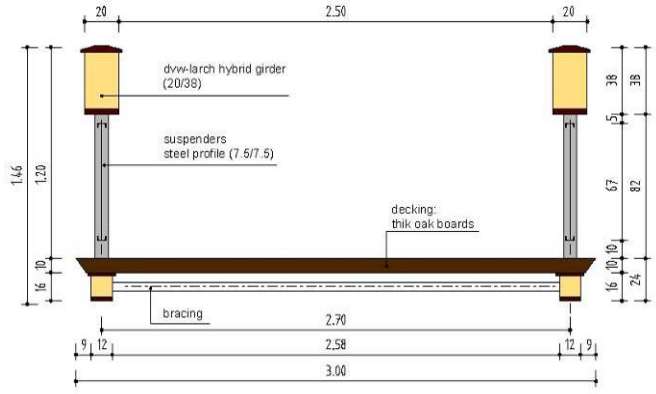


Abb. 3.314: Brückenquerschnitt Variante 1 (Maße in cm)

Die Brücke wurde so konzipiert, dass das Holz den Witterungseinflüssen zwar ausgesetzt ist, durch dessen einfache Zugänglichkeit jedoch gut überprüft und gewartet werden kann. Gebrauchsteile wie die Gehbahn können damit bei Bedarf einfach ausgetauscht werden. Ein weiterer Gesichtspunkt war die Anzahl der Verbindungen und Verbindungsmittel zu minimieren, da diese hinsichtlich der Dauerhaftigkeit und des Wassereindringens oft Problemstellen sind. Dieses Konzept wurde auch bei Variante 2 angwendet (siehe unten).

Variante 2

Die grundsätzliche Idee der Variante 2 war ebenfalls, die Haupttragstruktur oberhalb der dem Verschleiß und der Witterung ausgesetzten Gehbahn anzuordnen und gleichzeitig als Handlauf zu verwenden. Abb. 3.315 zeigt die zweite Variante einer Hängebrücke mit einer Spannweite von 8 m.

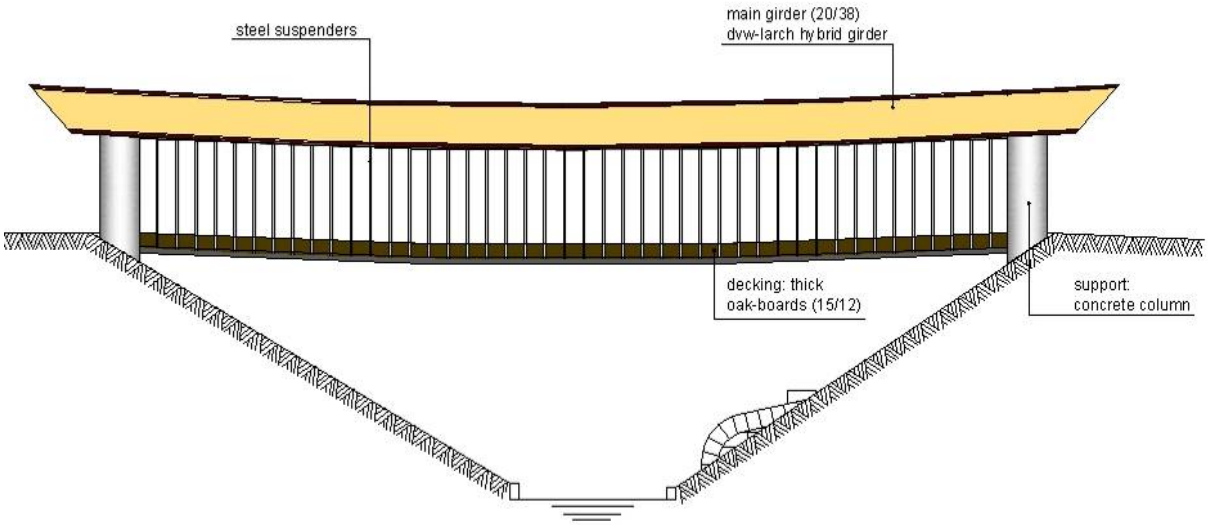


Abb. 3.315: Ansicht der Brücke Variante 2

Die Hauptträger haben hier eine “negative” Krümmung, die die Struktur auch optisch eindeutig als Hängebrücke definieren soll. Die gebogenen Träger minimieren die Momente an den Brückenpfeilern (Träger-Auflager), die durch die Horizontalkräfte hervorgerufen werden, die auf den Oberseiten der Träger (Handläufe) auftreten. Die vertikalen Hänger bestehen aus Flachprofilen und dienen gleichermaßen als Hänger und Geländer. An die Hänger aus Flachstahl ist ein sich nach unten öffnendes U-Profil angeschweißt. Abb. 3.316 zeigt den Querschnitt der Brücke.

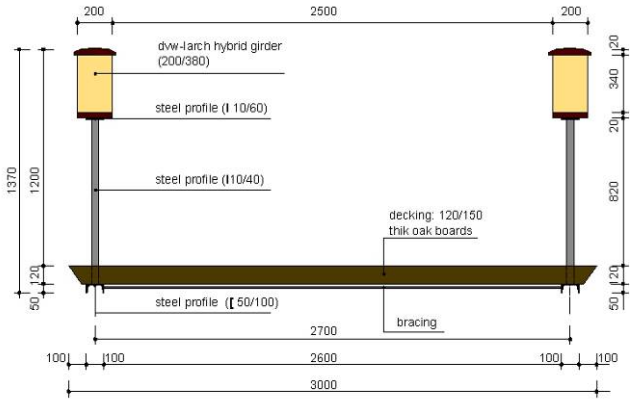


Abb. 3.316: Brückenquerschnitt Variante 2 (Maße in mm)

Die Oberseite der Längsträger hat wie bei Variante 1 eine überstehende KHP-Lamelle mit einer Tropfnase, die vertikalen Seiten des BSH bleiben ebenfalls bis auf einen Anstrich der Witterung ausgesetzt. Die geschweißten Stahlhänger sind durch selbstbohrende Schrauben (8x340 mm) mit den Hauptträgern verbunden. Das der dicken Eichen-Gehbahn als Auflager dienende U-Profil ist mittels Bolzen mit dem Auflager aus Beton verbunden. Abstandshalter zwischen dem U-Profil und der hölzernen Gehbahn reduzieren das Eindringen von Wasser an der Kontaktstelle auf ein Minimum. Diese schlanke Brücke benötigt ein starkes Aussteifungssystem um die Konstruktion zu stabilisieren und durch Vibrationen ausgelöste Bewegungen zu minimieren.

3.8.2.5 Versuche am Brückenträger

Autoren: Andreas Heiduschke (ISH), Rensteph Thompson (Hess)

Zur Bestimmung der Biegefestigkeit eines mit KHP-verstärkten Brettschichtholzträgers aus alpinem Lärchenholz wurde eine 4-Punkt-Biegeprüfung durchgeführt. Der Träger entsprach in Aufbau und Geometrie den im Pilotprojekt „Fußgängerbrücken“ einzusetzenden Brückenlängsträgern der HHT-Brücke. Der Verbundträger hatte eine Länge von 7750 mm und einem Querschnitt bxh von 200x370 mm (BSH-Lärche 330 mm, zwei KHP-Decklamellen 20 mm (Bezeichnung: KHP A740-1)). Der Versuchsaufbau inkl. Anordnung der induktiven Wegaufnehmer (IWAs) ist nachfolgender Abbildung zu entnehmen.

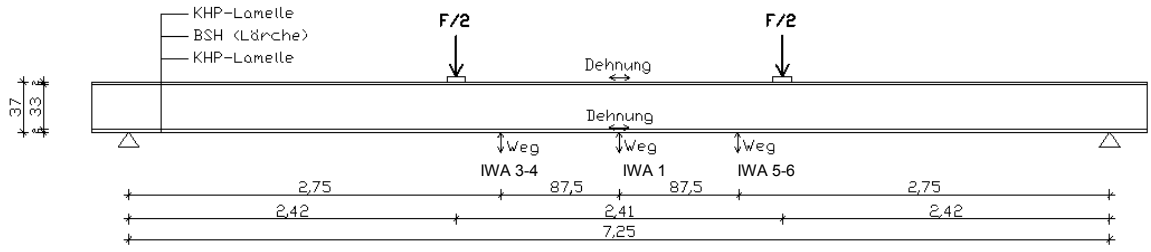
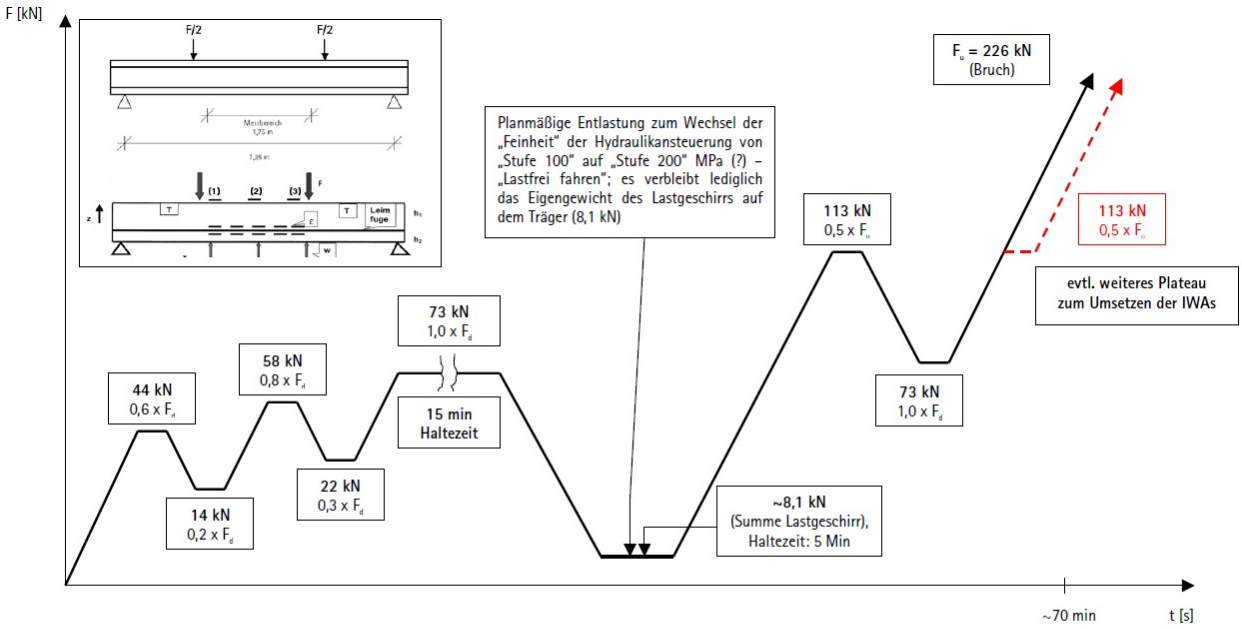


Abb. 3.317: Versuchsaufbau der 4-Punkt-Biegeprüfung

Die Verformungen des Trägers wurden mittels verschiedener Messsysteme (IWA, DMS, Vic 3D, sensorische Fasern) erfasst. Um die Längsdehnungen in den kritischen Bereichen (Zug- und Druckzone) zu bestimmen, wurden sechs DMS auf die jeweiligen Lamellen (KHP und Lärche) appliziert. Die Anordnung der DMS ist Abb. 3.211 zu entnehmen. Die optische Verformungsmessung kam im Bereich zwischen IWA 4 und IWA 6 zum Einsatz.

Da in der unteren Leimfuge (zw. KHP und Lärchenlamelle) zusätzlich optische und elektrische Messfasern integriert waren, wurde die Bruchlast nicht linear gesteigert, sondern mit mehreren Be- und Entlastungsstufen angesteuert. Abb. 3.318 zeigt das Belastungsregime.



Gebrauchlastniveau:	F_d = **73,9 kN** / 89,4 kNm / 15,6 N/mm² (Lärche) + 24,7 N/mm² (KHP)	(linear-elastische Auslegung des Vollholzkernes auf GL 28-Niveau)
Erwartete Bruchlast:	F_u = **226 kN** / 275 kNm / ~60 N/mm² (mittlere Spannung) 480 kN / 580 kNm / 120 N/mm²	(realistischer Erwartungswert für den Bruch aus Bemessung + Versuchen) (maximale (theoretische) Kraft zur Dimensionierung des Prüfzylinders)
Erwartete Durchbiegung (Mitte):	41,9 mm bei 73,9 kN 272 mm bei 480 kN **128 mm bei 226 kN**	
Belastungsgeschwindigkeit:	15 kN / min	
Haltezeit an den Lastplateaus:	2 min	

Abb. 3.318: Be- und Endlastungsstufen der Biegeprüfung

Die einzelnen Laststufen wurden mit Hilfe des für den Träger zutreffenden Gebrauchslastniveaus sowie der ungefähr zu erwarteten Bruchlast definiert. Basierend auf einer zu erwartenden Bruchspannung von ca. 60 N/mm^2 ergibt sich die voraussichtliche Traglast der Probe bei linear-elastischer Rechnung zu 226 kN.

3.8.2.5.1 Versuchsergebnisse

Abb. 3.319 zeigt das Kraft-Durchbiegungs-Diagramm des Trägers. Als Traglast wurde eine Druckkraft von 271 kN ermittelt. Demnach beträgt das maximale Feldmoment 328 kNm und die gemittelte Biegerandspannung 71,8 N/mm^2. Die Durchbiegung in Feldmitte bei Versagen der Probe betrug 129,8 mm. Anzumerken ist, dass die IWAs auf Grund ihrer begrenzten Messlänge ausfielen und die Kurven mit Hilfe der durch das optische Messsystem ermittelten Verformungen korrigiert bzw. extrapoliert werden mussten (Abb. 3.320). Diese korrigierten Werte sind in der Legende der Abb. 3.319 durch den Zusatz „kor" gekennzeichnet.

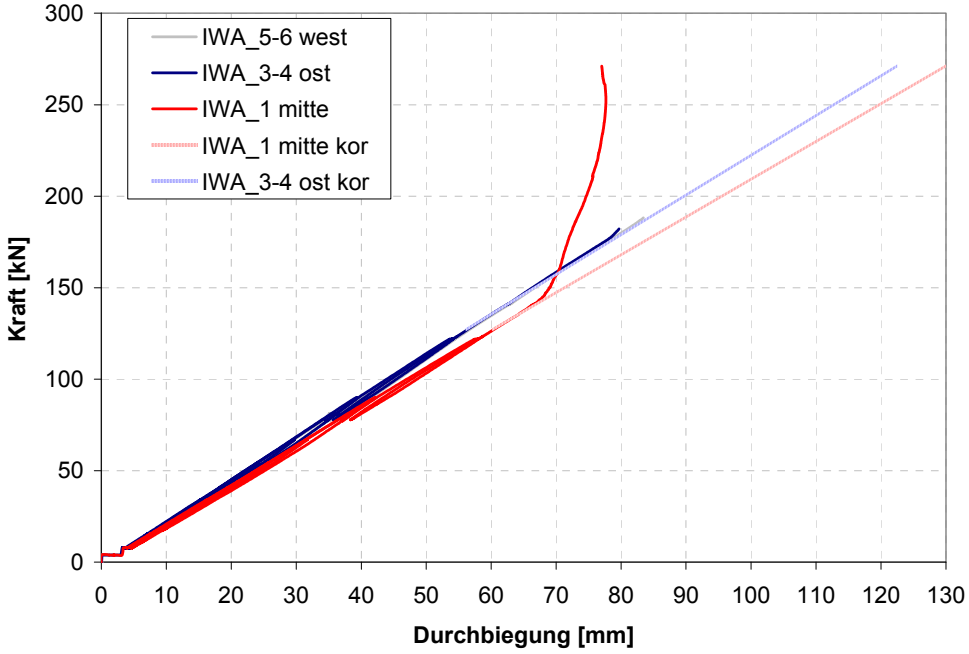


Abb. 3.319: Kraft-Durchbiegungs-Diagramm

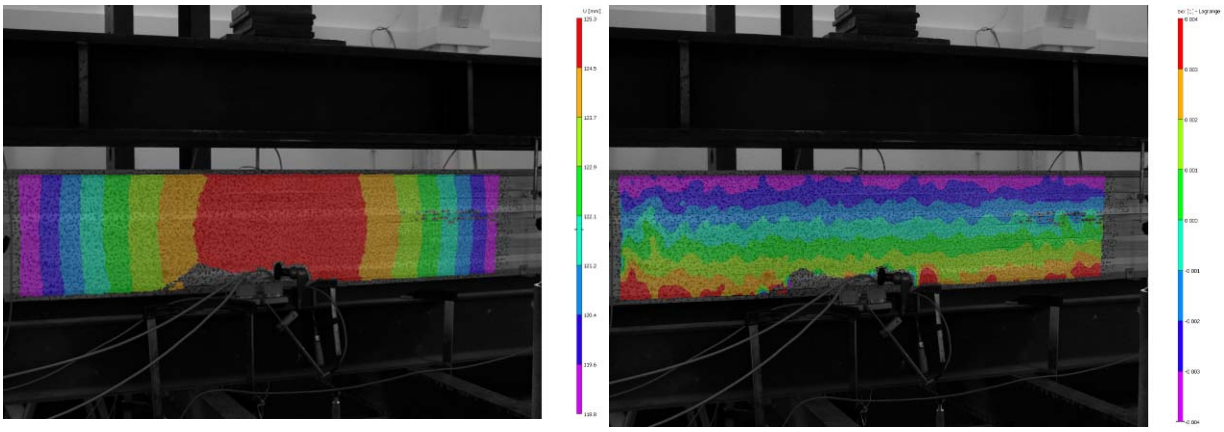


Abb. 3.320: Durchbiegungen und Längsdehnungen vor dem Versagen der Probe

Ähnlich dem Kraft-Durchbiegungs-Diagramm in Abb. 3.319 lässt auch das in Abb. 3.321 dargestellte Kraft-Dehnungs-Diagramm erkennen, dass die Probe bis kurz vor Erreichen der Traglast ein nahezu linear-elastisches Last-Verformungs-Verhalten aufweist. Die Dehnungen auf Ober- und Unterseite des Trägers sind sehr ähnlich. In der Zugzone erreicht die Dehnung einen Maximalwert von 3,87 ‰ (DMS 2 – KHP Lamelle) und 3,23 ‰ (DMS 4 – unterste Lärchenholzlamelle). Auf Grundlage der in den Biegeprüfungen an fehlerfreien Kleinproben ermittelten Steifigkeiten (vgl. Tabelle 3.11: E_{KHP} = 22700 N/mm^2 und $E_{Lärche}$ = 13700 N/mm^2) errechnen sich Zugspannungen von 88,2 N/mm^2 für die KHP-Lamelle und 44,3 N/mm^2 für die Lärche. Die Kleinproben wurden nach Prüfung des Trägers aus dessen Querschnitt geschnitten.

Die Druckseite (DMS 1) zeigt wie zu erwarten eine etwas höhere Stauchung (-4,03 ‰ KHP in Abb. 3.321 pos. dargestellt). Abb. 3.320 zeigt die mittels optischer Messung ermittelte Dehnungsverteilung über den Querschnitt mit Spitzenwerten von ca. ±4 ‰.

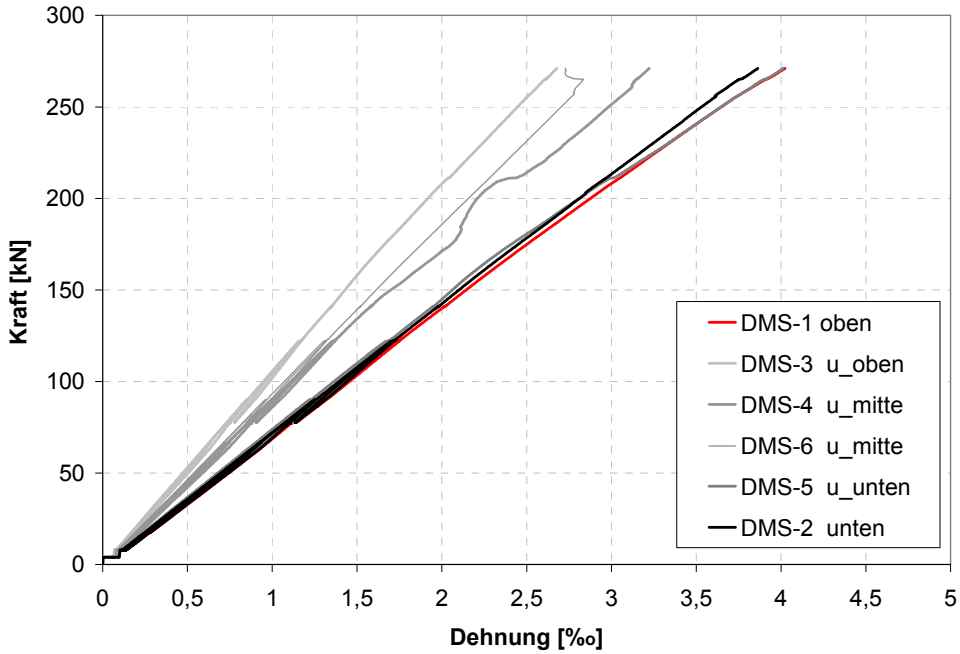


Abb. 3.321: Dehnungs-Zeit- und Kraft-Dehnungs-Diagramm

Abb. 3.322 zeigt den spröden Bruch in der Biegezugzone. Mögliche Schubrisse, die auf ein Scherversagen des Trägers am Auflager hindeuten würden, wurden nicht beobachtet.

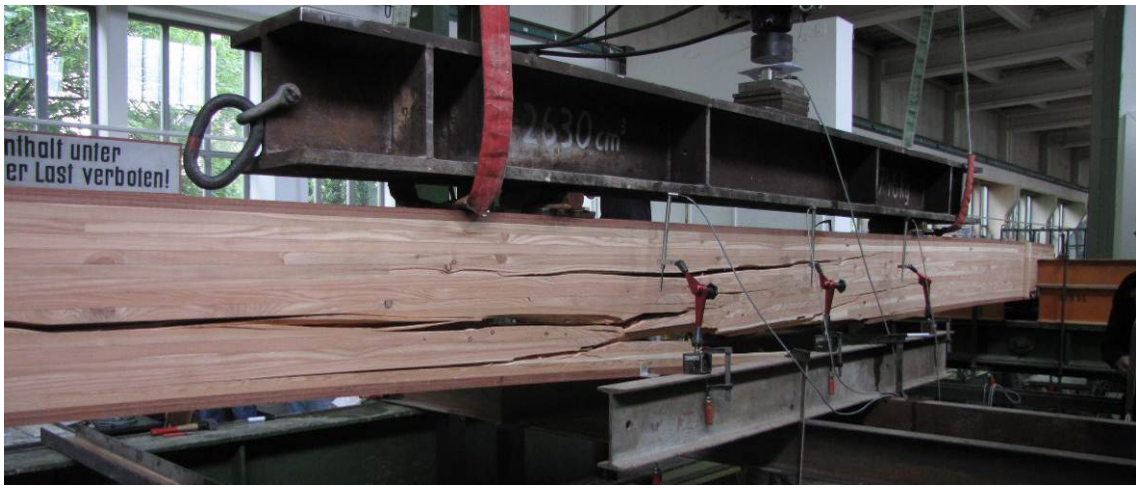


Abb. 3.322: Bruchbild des Verbundträgers – Zugversagen in Trägermitte

Für die Genehmigungsfähigkeit der Konstruktionselemente und somit zur Realisierung des Tragwerkes wurden zudem zahlreiche Untersuchungen an Kleinproben durchgeführt (vgl. Kap. 3.8.2.2).

3.8.2.5.2 Versuchskörper für Bauteilversuche

Autor: Jan Fandler (Hess)

Zur Überprüfung der Tragfähigkeit wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens zwei Prüfträger zur Überprüfung der Tragfähigkeit des KHP-BSH-Hybrids vorgesehen.

Aufgrund der erheblich unterschiedlichen Festigkeitsmerkmale zwischen dem KHP Werkstoff und dem Lärchenholz wurden im Prüfträger in der Klebfuge zwischen Lärche und KHP auf der Seite des Biegezugrandes Messfasern vorgesehen, die bis zur Aufbringung der Bruchlast die Messdaten aufzeichnen sollten.

Bevor der Prüfträger angefertigt wurde, waren noch Ausführungsdetails zur Ausleitung der Messfasern zwischen dem IaFB und Hess abzustimmen, so dass durch alle Produktionsschritte die Sensoren beschädigungsfrei im Prüfträger erhalten wurden.

Die Herstellung erfolgte zudem unter der Aufzeichnung bzw. Einhaltung folgender Vorgaben:

- BSH-Aufbau wie für den Außeneinsatz, d.h. Markseiten nach oben, unterste Lamelle drehen, so dass die Markseite zur Unterseite zeigt
- Lärchenlamelle, auf der die Fasern appliziert werden, möglichst homogen und störungsfrei wählen, so dass die Keilzinkung nicht in Längsmitte des Brettes liegt
- Aufzeichnung der Rohdichten der einzelnen Bretter
- Dokumentation der Anordnung der Brettlamellen im Bauteil
- Holzfeuchtigkeit des Lärchenholzes zum Einbauzeitpunkt festhalten
- bei Überschleifen der Lärchenholzlamelle sind die eingeklebten Fasern vor Beschädigung zu schützen
- Ausführung des Prüfträgers wie in der Ausführungsplanung vorgesehen (Aufbau und Geometrie)

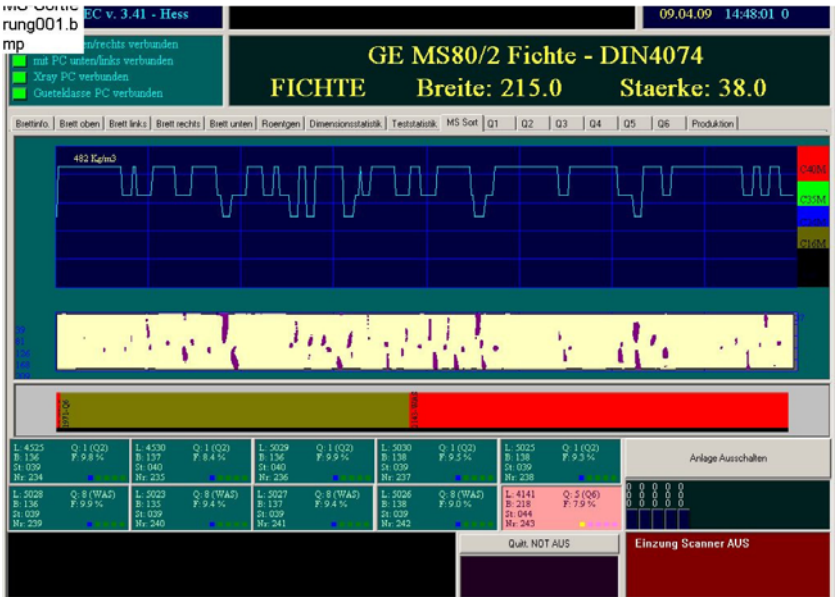


Abb. 3.323: Aufzeichnung lokaler Minimalrohdichten der Brettlamellen



Abb. 3.324: Nutführung in den Brettlamellen



Abb. 3.325: Lamellenverklebung des Prüfträgers im Formpressbett



Abb. 3.326: Grob-Egalisierung der Oberfläche vor dem Hobeln der Seitenflächen



Abb. 3.327: Fertig gehobelter Prüfträger mit seitlich ausgeleiteten Messfasern

3.8.2.6 Begleitung und Bauüberwachung

Autor: Petra Kubowitz (IaFB)

Die Begleitung begann mit den ersten Akquisegesprächen des IaFB beim Bauherren. Bereits in diesem Stadium mussten zahlreiche Fragen zur Konstruktion selbst, zu den neuen Materialien, ihrer Einsetzbarkeit und voraussichtlichen Genehmigungsfähigkeit geklärt werden. Dies erforderte von IaFB, ISH und Hess neben viel Recherchearbeit und internen Abstimmungen auch einige Vorversuche bzgl. vorzuschlagender Ausführungsmöglichkeiten. Mit den verschiedenen Beteiligten wurden die Voraussetzungen abgesprochen, unter denen die Ausführung einer Fußgängerbrücke als Hochleistungsholztragwerk möglich erschien. In weiteren Schritten wurden Entwürfe für Hochleistungsholzbrückenkonstruktionen mit den Projektpartnern erarbeitet, mit dem Bauherren abgesprochen und vom Bauherren, der in diesem Fall auch Genehmigungsbehörde war, die KRONE Ingenieurbüro GmbH (jetzt Krone Hamann Reinke Ingenieurbüro GmbH)

als Tragwerksplaner und ein Prüfingenieur hinzugezogen. Gemeinsam wurde ein umfangreiches Untersuchungsprogramm festgelegt (vgl. Kap. 3.8.2.2 und 3.8.2.5), was Grundlage für die Genehmigungsfähigkeit war. Dies führte dazu, dass einige Arbeitspakete neu in das HHT-Projekt aufgenommen und andere aus dem ursprünglichen Arbeitsplan vorgezogen werden mussten. Es stellte sich heraus, dass die Überzeugung des Prüfingenieurs bzgl. der neuartigen Träger und Bohlen weit einfacher war als die des Bauherren, was sicherlich nicht zuletzt daran liegt, dass bei einem öffentlichen Bauherren zahlreiche Abteilungen an einem Bauvorhaben beteiligt sind und daher zu den Gesprächen hinzugezogen wurden. Die größtenteils von ISH und Hess durchgeführten Versuche wurden vom IaFB gemeinsam mit KRONE als Grundlage für den „Bericht zu den Grundlagenuntersuchungen…“ [212] genutzt, welcher vom Prüfingenieur geprüft und genehmigt wurde und somit im Sinne einer Zustimmung im Einzelfall die Genehmigungsfähigkeit darstellt. Die Tragwerksplanung wurde von KRONE durchgeführt, hier stand das IaFB beratend zur Seite und war zudem an allen Absprachen zwischen Planer, Prüfer, Bauherr und Genehmigungsbehörde beteiligt. So wurde das Bauvorhaben bis zur Fertigstellung der Ausschreibungsunterlagen begleitet. Zur eigentlichen Bauüberwachung kam es nicht, da die Brücke während der Projektlaufzeit nicht gebaut wurde.

Hinweis: Da der Bauherr das Vergabeverfahren unerwartet nach Ende der Projektlaufzeit aufhob, wird von den Partnern des AP 10 (IaFB und BAM) eine modifizierte Variante auf dem Gelände der BAM in Berlin errichtet werden. Die Bauüberwachung dieses Ersatzbaus wird daher im Rahmen des Abschlussberichtes zum AP 10 beschrieben.

3.8.2.7 Monitoring

Autor: Petra Kubowitz (IaFB)

Wegen der Neuheit der zur Ausführung kommenden Hybridträger und -bohlen ist neben visuellen Prüfungen ein umfangreiches Monitoring der Brückenkonstruktion vorgesehen.

Das Monitoring wird als eigenes Arbeitspaket (AP 10) geführt und vom IaFB sowie der BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung bearbeitet. Diesbezüglich werden vor allem die im Hauptträger enthaltenen Messfasern – faseroptische Sensoren und Carbonfasern – ausgelesen und die Ergebnisse bewertet. AP 10 wurde im Zuge einer Aufstockung zum Gesamtprojekt hinzugefügt, daher ist die Laufzeit gegenüber den übrigen Arbeitspaketen des Basisprojektes nach hinten versetzt. Die Ergebnisse beeinflussen das Basisprojekt nicht. Aus diesem Grund wird für AP 10 ein eigener Abschlussbericht nach Ende der Laufzeit erstellt.

3.8.3 Pilotprojekt Vertikalachswindkraftanlage

3.8.3.1 Allgemeines

Autoren: Andreas Heiduschke (ISH), Petra Kubowitz (IaFB), Yvette Lemke (IaFB)

Auf Wunsch der Firma Marc Power GmbH bzw. VENCO Power wurde die Vertikalachswindkraftanlage MARC-Twister-1000-T alternativ zu der üblichen Bauart mit Stahlmast mit einem Holzmast geplant und im Jahr 2008 auf einem Windkraftanalgentestfeld in Cuxhaven probeweise errichtet. Die Anlage mit Vertikalachsrotor besitzt eine Gesamthöhe von ca. 9 m und eine Nennleistung von 1 kW. Sie beginnt sich ab einer Windgeschwindigkeit von 1,5 m/s zu drehen, der Arbeitsbereich liegt bei Windgeschwindigkeiten zwischen 3,5 m/ und 20 m/s. Darüber hinaus muss sie in der Parkstellung einer Spitzengeschwindigkeit von 50 m/s standhalten. Zielsetzungen der Ausführung mit einem Holzmast waren die Erhöhung der System-Eigenfrequenz der Anlage sowie eine gegenüber der Stahlvariante erhöhte Dämpfung, um die Schwingungsamplituden im Resonanzfall zu reduzieren.

Windkraftanlagen mit vertikalen Windturbinen – auch als H- oder Darrieus-Rotoren bekannt – sind aufgrund der wechselnden Winkel der angreifenden Winde auf die Rotoren relativ großen Belastungsschwankungen ausgesetzt. Im Gegensatz zu Windkraftanlagen mit den üblichen horizontalen Rotationsachsen kommt es daher bei denen mit vertikal angeordneten Rotationsachsen zu stark wechselnden Beanspruchungen. Ziel dieses Pilotprojektes war die Entwicklung

eines Prototyps für einen 8 m hohen Mast für eine kleine Windturbine mit einer Leistung von 1 kW. Der röhrenförmige, konische Mast besteht aus ringförmig verleimtem Holz, das mittels eines Glasfaser-Polyesterharz Verbundes auf der Außenseite verstärkt und vor der Witterung geschützt wird. Der Prototyp war von 2008 bis 2009 auf einem Testfeld in Cuxhaven in Betrieb und steht seit 2010 auf Privatgelände in Wremen. Ein zweiter Prototyp wurde 2010 auf Privatgelände in Chemnitz aufgestellt.

Technisches Ziel war es, einen steifen und dauerhaften Mast zu entwickeln, dessen Eigenfrequenz außerhalb der Arbeitsfrequenz (effizienter Bereich) der Turbine bei Windgeschwindigkeiten zwischen 8 und 20 m/s liegt. Um die dynamischen Charakteristiken dieses Tragsystems zu ermitteln, wurden zahlreiche Feldversuche (Hochfahren, Betrieb und Abbremsen der Anlage, freie Schwingung - Ausschwingversuch, Impulsanregung etc.) durchgeführt. Diese zeigen, dass der Mast sich bei Belastung gut verhält und die Systemcharakteristiken wie erwartet ausfallen.

Holztragwerke verhalten sich bei dynamischer Belastung sehr gutmütig. Das Material hat eine geringe Kerbempfindlichkeit und eine hohe Ermüdungsfestigkeit. In Abhängigkeit von der Anzahl der Belastungszyklen und der Amplitude erreicht Holz mindestens 25 % der Biegefestigkeit bei Kurzzeitbelastung. Beispielsweise hat ein Brettschichtholzbinder (GL32h) bei 10^7 Lastzyklen eine Ermüdungsfestigkeit von $f_{fat,m,d} \geq 8\ N/mm^2$. Im Vergleich zu anderen Materialien wie z.B. Stahl erreicht Holz damit relativ hohe Dauerschwingfestigkeiten. Hinsichtlich der Dämpfung erreicht Holz gegenüber Stahl den vierfachen Wert. Aus diesen Gründen ist Holz bei dynamischer Belastung sehr gut geeignet.

Üblicherweise verwendet man für kleine Windturbinen dünne Stahlrohre, die mittels Stahlkabeln verankert und/oder abgespannt werden. Vorteile dieser Strukturen sind: sie sind leicht, einfach zu transportieren und montieren, einfach zu demontieren und preisgünstig (geringe Kosten für Material und Gründung). Das statische System ist dennoch das eines Turmes: ein zur Spitze konisch zulaufendes Rohr, das im Boden verankert ist. Dieses System wird üblicherweise auch für große Windkraftanlagen mit horizontaler Achse verwendet. Oft sind die Verbindungen die kritischen Punkte einer Konstruktion, vor allem, wenn diese dynamischen Belastungen unterworfen wird. Hinsichtlich der Struktur sind Fachwerke hocheffiziente Tragsysteme. Aufgrund ihrer großen Anzahl stark belasteter Verbindungsmittel, die der Witterung ungeschützt ausgesetzt sind, werden sie jedoch nur selten verwendet. Dies ist insbesondere der Fall, wenn der Werkstoff Holz eingesetzt werden soll. Aus diesem Grund wurde entschieden, einen röhrenförmigen, konisch zulaufenden Holzmast herzustellen, der von einer Glasfaserwicklung geschützt wird.

Im Gegensatz zu den gebräuchlicheren Windkraftanlagen (WKA) mit horizontaler Achse sind WKA mit vertikaler Achse aufgrund des wechselnden Windangriffswinkels auf die Rotoren größeren Lastwechseln ausgesetzt. Die bestehenden stählernen Masten bestehen aus zwei zylindrischen Rohren (oben Ø273x5 mm; unten Ø355,6x8 mm), die über eine Flanschverbindung mittig verschraubt sind. Das Problem der Stahlvariante sind relativ große Schwingungsamplituden am Mastkopf während des Betriebs der Anlage, d. h. im Arbeitsbereich. Das Ziel beim Entwurf des Holzmastes war, eine Anlage zu konzipieren, deren Eigenfrequenzen außerhalb der Arbeitsfrequenzen der Turbine liegen. Zudem sollten die Schwingungsamplituden und Vibrationen im Resonanzfall auf ein akzeptables Niveau beschränkt bleiben, so dass die Turbine ohne Einschränkungen arbeiten kann.



Abb. 3.328: MARC-Twister-1000-T, links: mit Stahlmast, rechts: Prototyp mit Holzmast

Das Ziel war eine Verbesserung der Nachhaltigkeit, des Tragverhaltens, der Betriebsfähigkeit, der ökonomischen und ökologischen Effizienz und der ästhetischen Erscheinung von Holzstrukturen, um den Begriff “Hochleistung” zu rechtfertigen.

Wie Schwingungsuntersuchungen in der Planungsphase und Messungen an der Pilotanlage zeigten, konnten die Zielsetzungen erreicht werden. Die zur Erhöhung der Eigenfrequenz des Mastes erforderliche Reduktion seines Eigengewichtes bei gleichzeitiger Erhöhung seiner Steifigkeit konnte durch einen sich zum Mastkopf hin verjüngenden Holzprofilquerschnitt erreicht werden. Wesentlicher Vorteil des Baustoffes Holz war hierbei die einfache Herstellbarkeit des konischen Profils ohne zusätzliche Verbindungen. Zudem besitzt der Baustoff Holz eine wesentlich höhere Materialdämpfung als Stahl.

Die Schwingungsuntersuchungen sowie eine darauf aufbauende Vordimensionierung des Holzmastes und seiner Anschlusspunkte erfolgten an der Technischen Universität Dresden, Institut für Stahl- und Holzbau (ISH). Von der KRONE Ingenieurbüro GmbH, jetzt Krone Hamann Reinke Ingenieurbüro GmbH, wurden die statischen Nachweise für die tragende Konstruktion der Pilotanlage erarbeitet. Mit der Fertigung des Holzmastes war die Firma Hess Wohnwerk GmbH & Co. KG, jetzt Hess Timber GmbH & Co. KG, beauftragt.

3.8.3.2 Klärung von Genehmigungsfragen

Autoren: Petra Kubowitz, Yvette Lemke (alle IaFB)

Für die Ermittlung der Grundlagen für Entwurf, Planung, Bemessung und Zertifizierung wurden die DIBt-Richtlinie für Windenergieanlagen - Einwirkungen und Standsicherheitsnachweise für Turm und Gründung, die DIN 1052: 2008-12 – Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken sowie die DIN EN 61400 - Windenergieanlagen Teil 1 und 2 herangezogen.

Neben dem Eigengewicht wurden aerodynamische Belastungen durch Wind und den Betrieb der Turbine angesetzt. Es erfolgte eine Variantenuntersuchung und Vorbemessung für Standardlastfälle. Weiterhin wurden Sonderlastfälle wie Transport und Montage, Parkstellung, Manöver (Bremsen) und Störfall untersucht. Der Nachweis für eine Betriebsfestigkeit entfiel für den Prototyp, da ein Abbau nach sechs Monaten erfolgte.

Mit dem Abschluss der Ausführungsplanung für den temporären Prototyp und die Beobachtungen über mehr als 2 Jahre Standzeit kann die Genehmigungsfähigkeit als erreicht angesehen werden. Für eine Typenzulassung ist dann der Nachweis der Betriebsfestigkeit noch zu erbringen. Zusätzlich muss noch der Einfluss unterschiedlicher Baugrundbeschaffen an möglichen Standorten untersucht werden.

3.8.3.3 Konstruktionsentwicklung

Autoren: Andreas Heiduschke (ISH), Petra Kubowitz, Yvette Lemke (alle IaFB)

Zielsetzung bei diesem Pilotprojekt war, durch die Ausführung mit einem Holzmast die System-Eigenfrequenz sowie die Dämpfung der Anlage gegenüber der Stahlvariante zu erhöhen, um die Schwingungsamplituden im Resonanzfall nahe des Arbeitspunktes der Anlage zu reduzieren.

Daraus ergab sich für die Verbundpartner die Aufgabe, einen Holzmast zu entwerfen, der zum einen ausreichend tragfähig und für die freie Bewitterung geeignet ist und zum anderen für günstige Schwingungseigenschaften der Windenergieanalage sorgt. Hierbei sollte insbesondere eine Erhöhung der System-Biegeeigenfrequenz sowie eine gegenüber der Stahlvariante erhöhte Dämpfung erzielt werden, um die Schwingungsamplituden im Resonanzfall zu begrenzen. Darüber hinaus mussten geeignete Verbindungsmittel für den Anschluss des Maschinenteils der Anlage am Mastkopf sowie für die Verankerung des Mastfußes im Fundament entwickelt werden.

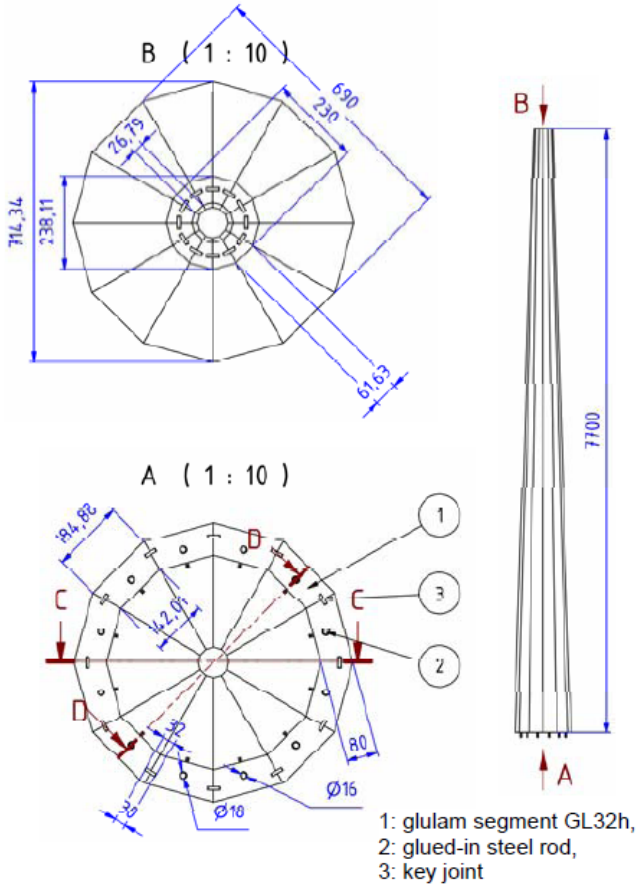


Abb. 3.329: Aufsichten Holzprofilrohrfuß (A) und -kopf (B), Ansicht Mast

Die Höhe des röhrenförmigen Mastes beträgt 7,70 m (ohne Endplatte). Eine Ausführung des konisch zulaufenden Mastes als Formholzprofilrohr war aus fertigungstechnischen Gründen noch nicht möglich. Sowohl die konische Form als auch die relativ großen Wandungsstärken und großen Durchmesser sind zur Zeit nicht aus Formholz herstellbar, waren für eine beanspruchungsgerechte Konstruktion jedoch nötig. Aus diesem Grund wurde stattdessen ein aus Segmenten zusammengeklebtes Holzprofilrohr gefertigt. Der Querschnitt des Masts ist annährend ringförmig, die Wandstärke beträgt 80 mm. Genau genommen ist es ein zwölfeckiges Hohlprofil, das aus zwölf einzelnen Segmenten hergestellt wurde. Jedes dieser Segmente wurde aus Brettschichtholz GL32h (Fichte) mit trapezförmigem Querschnitt, der sich zur Spitze hin linear verjüngt, hergestellt. Die Segmente wurden zugesägt, winkelförmig angeordnet, mit Nut-Feder-Verbindungen lagegesichert und mit Resorcinharz zu einem zwölfeckigen Vieleck verklebt (vgl. Kap. 3.8.3.4). Der Außendurchmesser des Rohres beträgt 690 mm, der Innendurchmesser 230 mm. Der Neigungswinkel der konisch zulaufenden Röhre ergibt sich damit zu 1,7°.

Um den Mast zu verstärken und eine ausreichende Dauerhaftigkeit des Holzes bei freier Bewitterung bei Wahrung der Holzsichtigkeit sicherzustellen, wurde der Holzmast mit einer 1,9 mm dicken Schicht Glasfaserkunststoff (GFK) umlaufend laminiert und mit einem UV-beständigen Schutzlack versehen. Es wurden zwei bidirektionale Vliese mit einem Flächengewicht des Textils von 610 g/m^2 und eine Matte mit einem Flächengewicht von 225 g/m^2 verwendet. Das korrespondierende Faservolumen beträgt 30 %. Im Gegensatz zu Kohlefaserkunststoffen sind jene aus Glasfasern transparent, wenn sie in eine Epoxidharzmatrix eingebettet sind, so dass die Holzstruktur der Oberfläche weiterhin sichtbar bleibt. Die Faserorientierung betrug ±45° bezogen auf die Mastachse, um die geringe Schub- und Torsionssteifigkeit des Holzes auszugleichen. Außerdem schützt das GFK den Mast vor Wettereinflüssen, so dass die Holzfeuchte permanent unter 20 % liegt. Der Mast kann somit in die Nutzungsklasse 2 eingestuft werden.

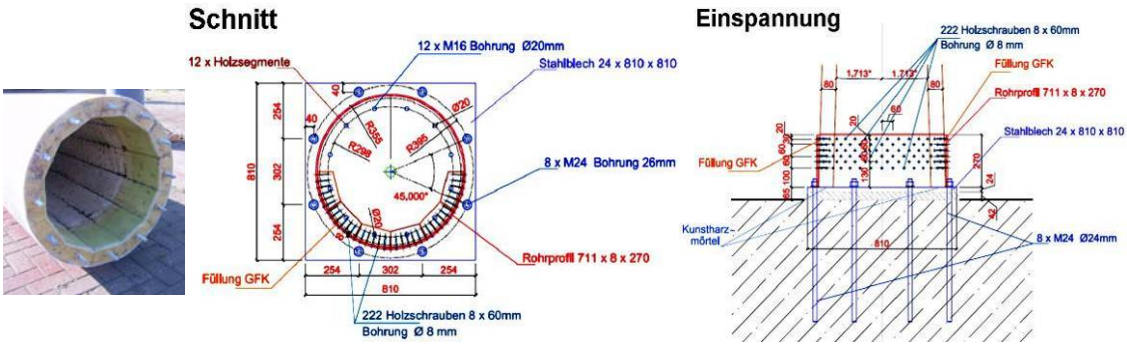


Abb. 3.330: röhrenförmiger Holzmast – Blick von unten (nach GFK-Bewehrung, incl. eingeklebten Verbindungen 12x Ø16 mm) und CAD-Zeichnung vom Querschnitt und der Einspannung

Die Verbindungsmittel an beiden Enden müssen sowohl Biegemomente als auch Torsionsmomente und Schubkräfte in Kombination mit kleinen Normalkräften übertragen können.

Zur Befestigung des Maschinenteils der Anlage wurde über den Mastkopf ein Stahlrohrprofil (O 244,5x5 mm) mit aufgeschweißter Kopfplatte geschoben und mit diesem mit 45 Schrauben 8x60 mm verschraubt.

Der Mastfuß wurde mittels annährend parallel zur Faserrichtung eingeklebter Gewindestangen mit einer im Stahlbetonfundament verankerten Fußplatte aus Stahl verschraubt. Ein auf die Fußplatte geschweißtes Stahlrohr bietet die Möglichkeit einer zusätzlichen Verschraubung, wurde jedoch nur beim 2. Prototyp zur Längskraftübertragung genutzt (dafür entfielen bei diesem 2. Mast die eingeklebten Gewindestangen). Die eingeklebten Gewindestangen übertragen ausschließlich Zugkräfte. Die Druckkräfte werden über den Kontaktstoß zwischen Stahl und Holz übertragen. Das Stahlrohr am Ende überträgt hier lediglich Schubspannungen. GFK und Stahlrohr schützen darüber hinaus die Enden des Masts und die Verbindungsmittel vor Feuchtigkeit

und Verwitterung. Für Kopf- und Fußpunkt des Mastes wurde eine dichte Ausführung geplant, um Wasser vom Mastinneren fern zu halten.



Abb. 3.331: links: Verbindung des Mastes mit dem Maschinenteil, rechts: Fuß des armierten Holzmastes mit 12 herausstehenden Gewindestangen vor der Verankerung im Fundament

Die Masse des Rotors beträgt 140 kg (GFK-Blätter 3x 6 kg, Speichen 6x 5,5 kg, Generator 60 kg, Wirbelstrombremse 29 kg), die Masse des Mastes einschließlich der Endplatten beträgt etwa 380 kg. Die Höhe der Rotorblätter und der Durchmesser des Rotors beträgt 1,9 m.

Wie Schwingungsuntersuchungen in der Entwicklungsphase und Messungen am errichteten Prototypen zeigten, konnte mit diesem gewählten Holzprofilmast ein günstiges Schwingungsverhalten erreicht werden. Das gegenüber dem Stahlmast reduzierte Eigengewicht und der sich zum Mastkopf verjüngende Holzprofilquerschnitt führten zu der gewünschten Erhöhung der Biegeeigenfrequenz des Mastes. Beim Durchlaufen dieser Frequenz werden die auftretenden resonanzbedingten Amplituden des Mastes aufgrund der hohen Materialdämpfung des Holzes stark reduziert. Ein wesentlicher Vorteil des Baustoffes Holz war zudem die einfache Herstellbarkeit des konischen Profils ohne zusätzliche Verbindungen.

Die Fertigungskosten des Holzmastes im Segmentverfahren einschließlich der Anschlüsse lagen etwa im Bereich der Kosten der entsprechenden Stahlkonstruktion. Hier besteht noch Optimierungspotential. Bei der Ausführung des Mastes als Formholzprofilrohr ist mit einer Kostenreduktion zu rechnen.

3.8.3.4 Herstellung des Mastes

Autor: Jan Fandler (Hess)

Der konische Mast der Windkraftanlage wurde aus einem Rohr, verleimt aus trapezförmigen Brettschichtholzsegmenten, hergestellt.

Diese Segmente wurden zuvor als gerades BSH der Holzart Fichte verleimt und sodann auf dem CNC-Portal trapezförmig zugeschnitten und genutet. Die Nutung wurde vorgesehen, um bei der späteren Verleimung eine genaue Fixierung der Bauteile zu gewährleisten.



Abb. 3.332: Bearbeitung Segment auf CNC-Portalbearbeitungsmaschine



Abb. 3.333: Fußpunkt der bearbeiteten Segmente

Zur Verklebung der Segmente wurde Resorcinleim mit fugenfüllender Eigenschaft (Klebstoff Prefere 4094 in Verbindung mit dem Härter Prefere 5827, Dynea ASA, Norwegen), verwendet. Die Verpressung der Klebfugen wurde zweckmäßiger Weise mit Spanngurten durchgeführt, da diese Verspannung die gegenseitige Verpressung der Segmente gewährleistet. Die Spannkraft eines einzelnen Gurtes wurde zuvor im Versuch mit einer Druckkraftmesseinheit überprüft, so dass während der Verklebung des Rohrquerschnitts eine ausreichende Presskraft gewährleistet werden konnte.

Zur Verleimung größerer Röhren empfiehlt es sich, während der Verklebungen Deckel an den Enden dieser Röhren einzusetzen, so dass die kreisrunde Form während der Verklebung sichergestellt wird.



Abb. 3.334: Verleimung der Segmente zum konischen Rohr

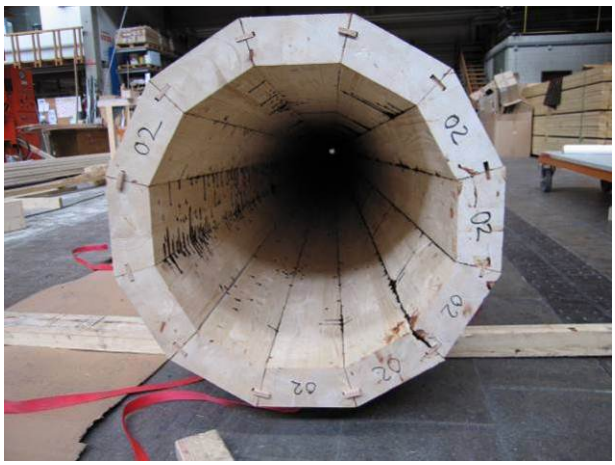


Abb. 3.335: Innenansicht fertig verleimtes Rohr

Nach der Verklebung des Rohres wurde abschließend die Oberfläche für die darauf folgende Textilbeschichtung vorbereitet und am Fußpunkt Gewindestangen im Hirnholz eingeklebt.

3.8.3.5 Versuche

Autor: Andreas Heiduschke (ISH)

Um die dynamische Antwort des Tragwerkes auf periodische Anregungen zu erfassen und die dynamischen Charakteristika (Eigenform, Eigenfrequenz, Dämpfung) zu ermitteln, wurden folgende Versuche durchgeführt:

1) Impulsanregung (Hammerschlag in X- und Y-Richtung)
2) Ausschwingversuch (des gesamten Systems als auch nur des Rotors)
3) Feldversuch (während des Betriebs der Anlage inkl. Hochfahren und Abbremsen)

Zur Aufzeichnung der Bauwerksbewegungen wurde ein bi-axialer Beschleunigungssensor verwendet, der 0,3 m unterhalb des Rotors am Mast befestigt wurde. Mit diesen Sensoren wurden die Systembeschleunigungen in den horizontalen Richtungen (acc-x and acc-y) aufgezeichnet. Die horizontale Auslenkung des Mastes wurde sowohl mittels eines optischen Messsystems als auch mittels der Schwingungssensoren, d. h. durch numerische Integration der Beschleunigungen, ermittelt.

Während des ersten Probelaufes wurde ein lautes Brummen im Arbeitsbereich der Anlage registriert. Um dieses Brummen zu eliminieren, wurden zwischen Rotornabe und Kopfplatte des Mastes (vgl. Abb. 3.336) zusätzliche Gummimuffen eingesetzt und so der Mast vom Rotor teilweise entkoppelt.

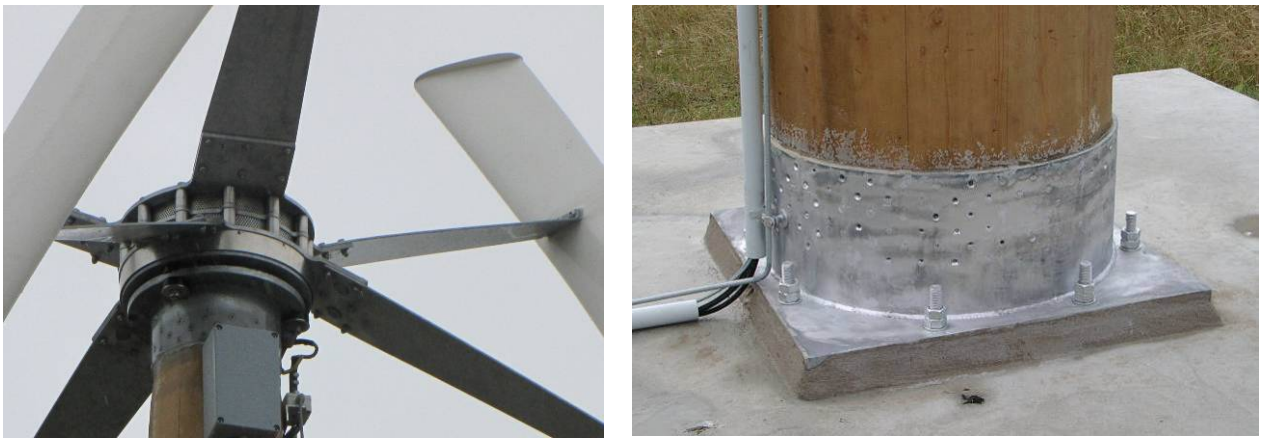


Abb. 3.336: Anschlüsse des Holzmastes um Rotor und Fundament

Die elastische Bettung des Rotors löste das Geräuschproblem, erschwert jedoch die Analyse des Systems. Die elastisch gebettete Rotornabe als auch die biegeweichen Streben der Rotorblätter haben zur Folge, dass der gesamte Rotor als eine federnd gelagerte Masse betrachtet werden muss und im günstigsten Fall als Schwingungstilger fungiert. Die Simulation dieses hochgradig nichtlinearen Systems ist schwierig. Hinzu kommen Dämpfungseffekte aus Strukturdämpfung (Materialdämpfung, Energiedissipation in Bauteilen, Verbindungen und Gründung) und aerodynamischer Dämpfung, die zu berücksichtigen sind. Um den Dämpfungsgrad des reinen Holzmastes zu bestimmen, sprich den Einfluss des elastisch gelagerten Rotors zu eliminieren, hätte dieser demontiert werden müssen. Darauf wurde jedoch verzichtet.

Den größten Anteil an der Dämpfung von Holztragwerken haben i. d. R. die Verbindungen. Im Vergleich dazu ist der Einfluss der Materialdämpfung eher gering. Da der zu untersuchende Mast auf Grund der geklebten Verbindungen (eingeklebte Gewindestangen am Fußpunkt) jedoch relativ steif ist und nur zwei Anschlüsse aufweist (vgl. Abb. 3.336), ist der zu erwartende Dämpfungsgrad ξ gering. Der Dämpfungsgrad eines Systems kann anhand des Logarithmischen Dekrements Λ abgeschätzt werden.

Tabelle 3.61: Abschätzung des Dämpfungsgrades

Dämpfungstyp	**Holz**	**Stahl**
Material	Λ_1 = 0,035	Λ_1 = 0,008
Konstruktion / Verbindungsmittel	Λ_2 = 0,02	Λ_2 = 0,01
Gründung (Sand)	Λ_3 = 0,01	Λ_3 = 0,01
Summe Λ	**∑ Λ = 0,065**	**∑ Λ = 0,028**
geschätzter Dämpfungsgrad	ξ_H ~ 1 %	ξ_{st} ~ 0,4 %

1) Impulsartige Anregung

Die Anlage wurde durch Hammerschläge auf den Mastkopf zum Schwingen angeregt. Abb. 3.337 zeigt die Systemantwort im Zeit- und Frequenzbereich für Anregungen in X- und Y- Richtung.

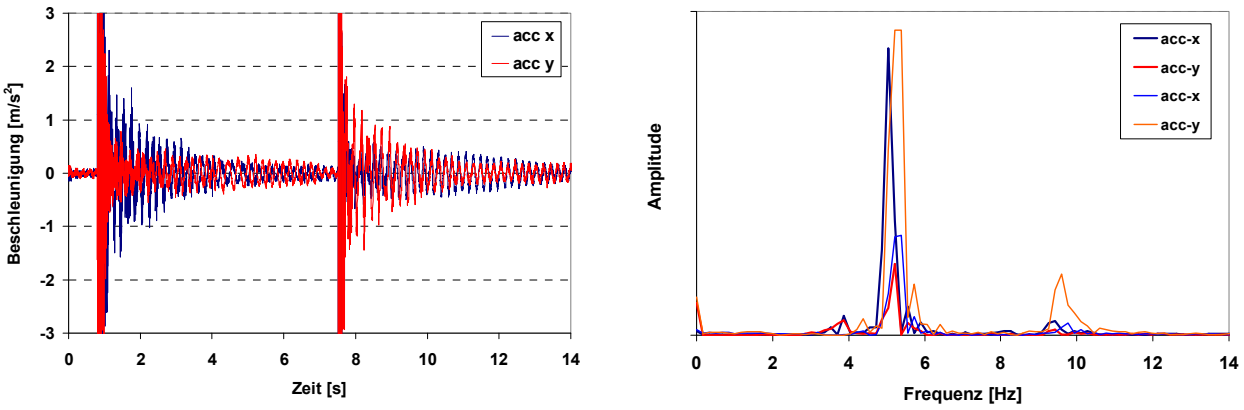


Abb. 3.337: Systemantwort infolge Impulsanregung

Die mittels Hammertests gemessene Eigenschwingung der gesamten Anlage liegt im Bereich von 5,05 Hz und 5,38 Hz. Eine zweite Eigenfrequenz wurde bei ca. 9,5 Hz ermittelt.

2) Ausschwingversuch

Im Ausschwingversuch wurde der Mast mittels eines Seiles ausgelenkt und anschließend durch Kappen der Verbindung in Schwingung versetzt. Das Seil war in einer Höhe von 7,5 m am Mast befestigt. Die Zugkraft im Seil wurde mittels einer zwischengeschalteten Kraftmessdose bestimmt.

Im Versuch wurde der Mastkopf um 17,3 mm ausgelenkt. Die zugehörige Horizontalkraft betrug 4,2 kN. Die im Ausschwingversuch ermittelten dynamischen Eigenschaften der Anlage als auch die daraus abgeleiteten Kennwerte eines äquivalenten Einmassenschwingers sind der Tabelle 3.62 zu entnehmen.

Tabelle 3.62: Ergebnisse des Ausschwingversuchs

Parameter	**Einheit**	**Wert**
Horizontalkraft F_0	kN	4,2
Auslenkung u_0 bei F_0	mm	17,3
Auslenkung nach 1. Oszillation u_1	mm	15,7
Steifigkeit $k = F_0/u_0$	kN/m	243
Biegesteifigkeit EI	kNm^2	33800
Länge des Auslegers l	mm	7500
Eigenfrequenz f	Hz	5,2
Log. Dekrement $\Lambda = \ln(u_0/u_1)$		0,097
Dämpfungsgrad $\xi = \Lambda/2\pi$	%	1,54
Dämpfungskonstante $c = \xi k/(\pi f)$	kNs/m	0,23
äquivalente Masse m (Einmassenschwinger)	kg	227

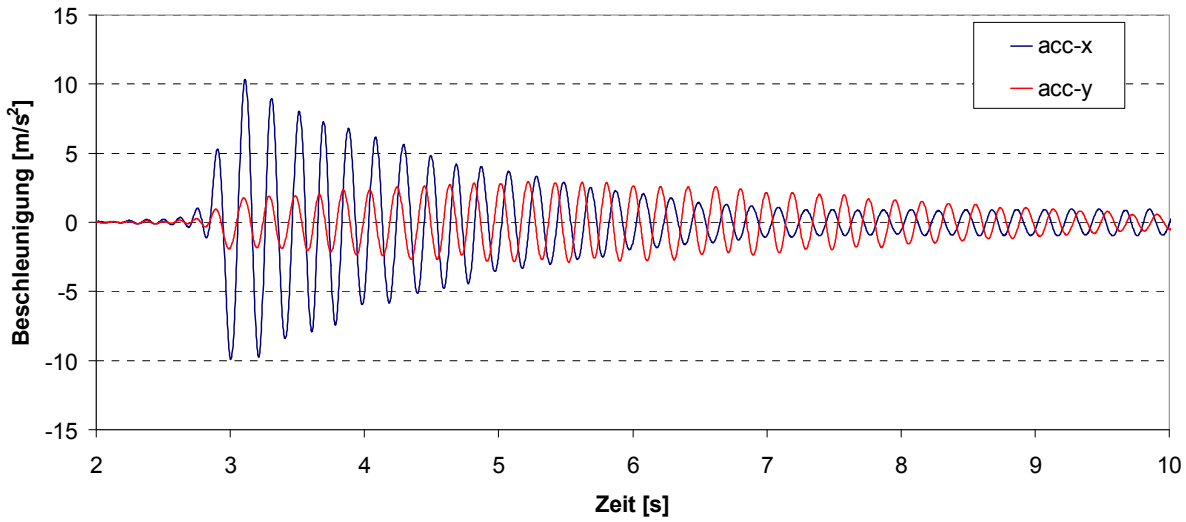


Abb. 3.338: Systemantwort des Ausschwingversuches

Die Konstruktion beginnt zunächst in Richtung der aufgebrachten Kraft zu schwingen. Abb. 3.338 verdeutlicht, dass mit zunehmender Versuchsdauer die Schwingungen in Querrichtung (y) zunehmen. Die Phasenverschiebung zwischen acc-x und acc-y beträgt π/2. Dies bedeutet, dass der Mastkopf beginnt um die Stabachse zu rotieren.

Ein Ausschwingversuch am Rotor selbst (vertikale Auslenkung eines Rotorblattes) hat gezeigt, dass das elastisch gebettete System Eigenfrequenzen bei 3,1 Hz, 5,3 Hz und 10 Hz besitzt.

3) Feldversuch

Zur Ermittlung der Systemantwort infolge Rotation des Rotors wurde die Anlage lastfrei hochgefahren und bis zum Erreichen einer Drehzahl von ca. 240 U/min betrieben. Nach ca. 60 s wurde die Anlage bis zum Stillstand abgebremst und das Ausschwingen der Konstruktion erfasst. Abb. 3.338 zeigt die Systemantwort auf den Feldversuch inkl. Hochfahren, während des Betriebs und beim Abbremsen der Anlage.

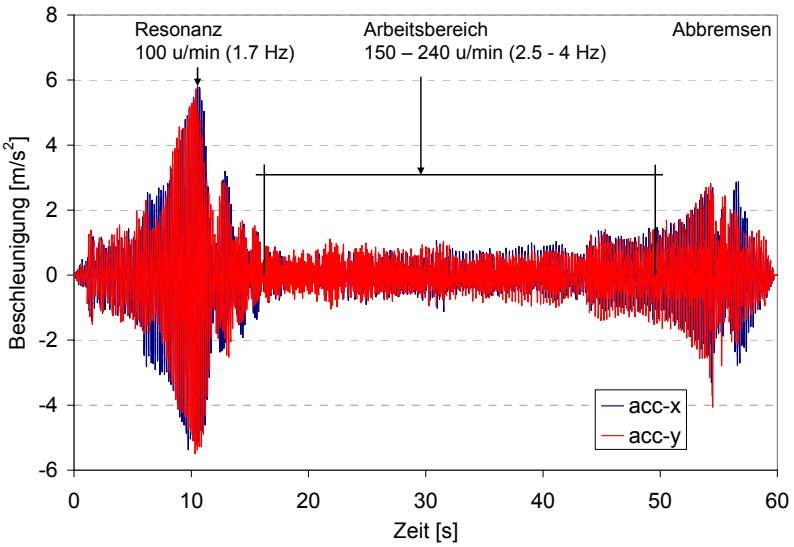


Abb. 3.339: Systemantwort des Feldversuchs

Das Beschleunigungs-Zeit-Diagramm verdeutlicht, dass der Rotor den Resonanzbereich der Anlage beim Hochfahren durchläuft. Im Resonanzfall betrug die maximale Auslenkung des Systems ca. 5 mm. Im Anschluss daran wurden für den Arbeitsbereich kaum nennenswerte Schwingungsamplituden registriert. Analog zum Hochfahren der Anlage ist auch bei deren Abbremsen ein Anstieg der Schwingungsamplitude zu verzeichnen. Dennoch, die Amplituden des röhrenförmigen Holzmastes blieben auch im Resonanzfall auf ein akzeptables Niveau beschränkt und wirkten sich nicht negativ auf die Arbeitsleistung des Rotors aus.

3.8.3.6 Zusammenfassung

Autoren: Andreas Heiduschke (ISH), Petra Kubowitz (IaFB), Yvette Lemke (IaFB)

Inhalt dieses Pilotprojektes war die Entwicklung, Herstellung und der Test von hölzernen Masten für Vertikalwindkraftanlagen. Der Fokus lag auf der Entwicklung eines Mastensystems mit hoher Dauerhaftigkeit und Dauerfestigkeit sowie einer ausreichenden Steifigkeit, um ein nahezu schwingungsfreies und somit problemloses Arbeiten der Turbine in einem weiten Frequenzbereich von 150 bis 300 U/min (2,5 Hz bis 5 Hz) zu gewährleisten. Dies bedeutet, dass bei Windgeschwindigkeit zwischen 8 und 20 m/s keine Resonanzfälle auftreten sollten. Bei Geschwindigkeiten über 20 m/s (72 km/h) bzw. 300 U/min wird die Turbine aus Sicherheitsgründen automatisch abgebremst. Um einen möglichen Resonanzfall zu vermeiden, sollte die erste Eigenfrequenz des Systems etwa 10 % über der max. Erregerfrequenz von 5 Hz, also bei 5,5 Hz, liegen. Allerdings berücksichtigt dies nicht die Anzahl der Rotorblätter. Die drei Rotorblätter erzeugen Erregungsfrequenzen die dreimal so hoch sind wie die des Rotors. Das bedeutet, dass beim Hochfahren der Anlage die erste Eigenfrequenz durchfahren werden muss. Man spricht von einer typischen soft/stiff Auslegung des Turmes.

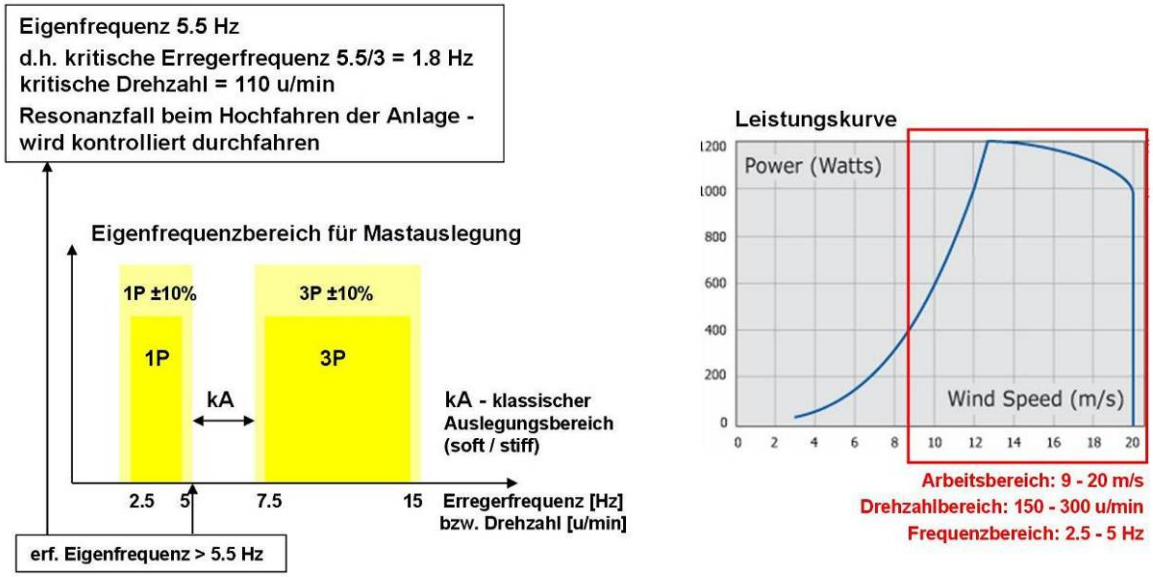


Abb. 3.340: Frequenzbereich für Mastauslegung und Leistungskurve des Rotors

Im Juni 2008 wurde die erste Vertikalachswindkraftanlage mit konischem Holzrohrmast auf einem Versuchsfeld in Cuxhaven errichtet und 2010 auf ein Privatgelände in Wremen umgesetzt. Eine zweite Anlage wurde im Frühjahr 2010 in Chemnitz in Betrieb genommen. Beide Anlagen arbeiten seither problemlos.



Abb. 3.341: Vertikalachswindkraftanlage auf Testfeld in Cuxhaven 2008

Der Prototyp einer Windkraftanlage mit konischem Rohrmast lieferte wertvolle Informationen über das dynamische Verhalten, die Dauerhaftigkeit und die Fertigung von Holztürmen und deren Verbindungen. Der Rotor durchläuft die Resonanzfrequenz bevor er den Arbeitsbereich der Turbine erreicht. Dank des höheren Dämpfungsgrades des Holzes (gegenüber jenem von Stahl) sind die Amplituden im Resonanzbereich gering. Die Eigenfrequenz der Anlage lag bei etwa 5,2 Hz. Für das System wurde eine viskose Dämpfung von etwa 1,5 % ermittelt.

Die Vorteile des Holzmastes sind:

- das geringe Eigengewicht
- die hohe Materialdämpfung
- die hohe Dauerschwingfestigkeit
- die einfache Fertigung konischer Stützen
- der Transport und die schnelle Montage

Im Hinblick auf die Realisierung höherer Holztürme liefern die Prototypen wichtige Berechnungsdaten für die zu entwickelnden numerischen Modelle, die sich anhand der Versuchsdaten validieren lassen.

Neueste Entwicklungen zeigen, dass bereits intensiv an der Realisierung hölzerner Turmkonstruktionen für Horizontalwindkraftanlagen gearbeitet wird [217]. Ähnlich des hier beschriebenen Ansatzes bestehen diese Konstruktionen aus mehreren ebenen Brettsperrholzsegmenten, welche zu konischen Hohlprofilen zusammengefügt werden und wetterseitig mit einer Kunststoffbeschichtung versehen sind.

Für Kleinwindkraftanlagen sind konische Formholzprofilrohre sinnvoll einsetzbar, leider zur Zeit jedoch noch nicht in den erforderlichen Abmessungen herzustellen.

3.8.3.7 Begleitung und Bauüberwachung

Autoren: Petra Kubowitz (IaFB), Andreas Heiduschke (ISH)

Neben der Betreuung im Vorfeld der Errichtung, die sich vorwiegend auf Absprachen mit dem Bauherren, Diskussionen über Möglichkeiten zur Mastfertigung und Klärung von Genehmigungsfragen beliefen, wurde der Aufbau im Jahr 2008 begleitet und in der Folge die Versuche zur Ermittlung des Schwingverhaltens durchgeführt.

2009 wurden am Mast in Cuxhaven vom ISH Probebohrungen vorgenommen, die zeigten, dass im Inneren der Röhre keinerlei farbliche Veränderungen am Holz aufgetreten sind, welche auf einen möglichen Pilzbefall oder Fäule hindeuten könnten. Auch wurden keine optischen Delaminierungserscheinungen am transparenten GFK-Holz Verbund beobachtet.

Unmittelbar vor Ende der Projektlaufzeit begutachtete das IaFB die inzwischen auf ein Privatgelände in Wremen versetzte Windkraftanlage erneut (vgl. Abb. 3.342).



Abb. 3.342: Vertikalachswindkraftanlage in Wremen im August 2010

Dabei fiel auf, dass die im Jahr 2009 eingebrachte Bohrung ungünstigerweise nicht, wie abgesprochen abgedeckt wurde, sondern seit dem Versetzen als Kabeldurchführung genutzt wird (vgl. Abb. 3.343). Zu erkennen ist, dass hier ein Feuchteeintritt in das Mastinnere erfolgt. Ein Foto durch die Bohrung zeigt dementsprechend auch innen am Boden vorhandene Feuchtigkeit (vgl. Abb. 3.344). Dies ist natürlich kritisch zu bewerten. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass das nicht abgedeckte Bohrloch Ursache dieser Feuchteansammlung ist und diese bei sachgerechter Ausführung nicht aufgetreten wäre. Andererseits sind im Gegensatz zum Jahr 2009 jedoch auch Delaminierungserscheinungen erkennbar. Zwar hat sich an keiner Stelle die textile Verstärkung von der Holzoberfläche gelöst, die Epoxidharzmatrix wurde jedoch sichtbar abgebaut, so dass einerseits die Struktur der Glasfasermatten in Erscheinung tritt und die Holzstruktur verdeckt, andererseits auch die Überlappung der Fasermatten sichtbar sind (vgl. ebenfalls Abb. 3.343). Dies ist ein deutlicher optischer Mangel. Die Bewitterungs- bzw. UV-Beständigkeit des verwendeten Faser-Kunststoffverbundes muss zudem angezweifelt und sollte in zukünftigen Projekten weiter untersucht werden.



Abb. 3.343: Blick auf die zweckentfremdete Probebohrung im August 2010



Abb. 3.344: Blick in das Mastinnere im August 2010 – Feuchte am Fußpunkt

3.8.4 Pilotprojekt Hess-Innenhofüberdachung

3.8.4.1 Allgemeines

Autor: Yvette Lemke (IaFB)

Für die Überdachung des Innenhofes auf dem Gelände des Projektpartners Hess Timber GmbH & Co. KG wurde eine „Schirmkonstruktion“ in Holzbauweise geplant, bei der ein gekrümmter, gitterartiger Gurtstapel punktgestützt gelagert wird. Die Eindeckung soll mit liniengelagertem Glas erfolgen. Bei einer Grundfläche von ca. 9 m * 9 m = 81 m² besteht das Schirmdach aus diagonal verlaufenden, jeweils drei übereinander angeordneten, gekrümmten Gurten, die sich orthogonal um eine Gurtstärke höhenversetzt kreuzen. Die Verbindung in den Kreuzungspunkten erfolgt mit einem Bolzen.

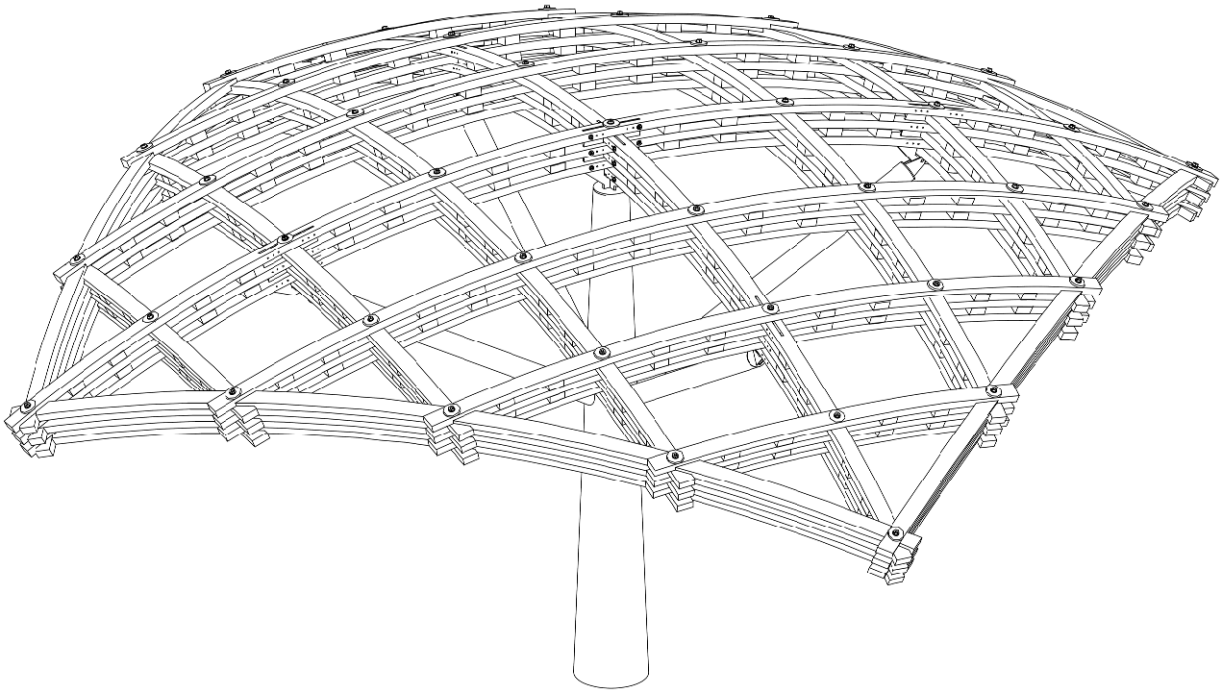


Abb. 3.345: Schirmkonstruktion Innenhofüberdachung ohne Glaseindeckung

An den Stellen, wo es erforderlich ist, werden die Anschlussbereiche durch Patches verstärkt. Für die Erhöhung der Steifigkeit sind außerdem (in den Drittelspunkten der innerhalb der Kreuzungspunkte entstehenden Feldlängen) Zwischenhölzer angeordnet, so dass an diesen Stellen die Gurte miteinander gekoppelt werden. So entsteht ein Trägerrost mit nachgiebigem Verbund. Die Gurte selbst bestehen aus Brettschichtholz und werden in den hochbeanspruchten Bereichen mittels Kunstharzpressholzlamellen verstärkt, so dass dort BSH-KHP-Hybridträger mit hohen Festigkeiten und Steifigkeiten vorliegen. Der Lamellenrost ist auf vier Streben und einer Mittelstütze punktförmig gelagert. Die Aussteifung des Daches erfolgt über die ebenfalls dreiteiligen gekrümmten Randträger. Sie zwingen den Rost in seine Form (Druckstäbe).

Eine Errichtung der Schirmkonstruktion konnte bis Projektende bzw. Erstellung des Abschlussberichtes leider aus finanziellen Gründen nicht erfolgen. Aufgrund der weltweiten Wirtschaftskrise musste der Bauherr und Projektpartner Hess Timber GmbH & Co. KG die Finanzierung zurückziehen. Für die Dacheindeckung gab es ursprünglich eine Zusage für eine kostenneutrale Bereitstellung durch die Firma Evonik Industries AG, so dass eine Eindeckung in Plexiglas vorgesehen war. Leider zog Evonik die Zusage, die Dacheindeckung zur Verfügung zu stellen, Ende Oktober 2009 endgültig zurück. Die Partner beschlossen dennoch, das Projekt – für die kostengünstigere Eindeckungsvariante mit Glas – bis zur Ausführungsreife zu planen. Das IaFB übernahm die Bearbeitung der statischen Fragestellungen mit dem Schwerpunkt der material- und konstruktionsspezifischen Modellierung, in Zusammenarbeit mit dem ISH wurde die Modellierung experimentell überprüft, und die Firma Hess sagte die Werkstattplanung zu.

3.8.4.2 Klärung von Genehmigungsfragen

Autor: Petra Kubowitz (IaFB) mit Anke Schäcke (IaFB), Tilo Birk (ehem. IaFB)

Für die Genehmigungsfähigkeit mussten sowohl Fragen zur Dacheindeckung als auch zur Holzkonstruktion selbst geklärt werden.

Ursprünglich war eine gekrümmte Plexiglasdacheindeckung vorgesehen, die gesponsert werden sollte. Da die Zusage des Sponsorings zurückgenommen wurde und sich die Plexiglaseindeckung damit als zu teuer erwies, wurde im Folgenden mit einer liniengelagerten Glaseindeckung geplant. Diese ist bauaufsichtlich geregelt, Bedenken bezüglich der Genehmigungsfähigkeit bestehen daher diesbezüglich nicht. Für die angedachte Plexiglaseindeckung hätte jedoch sowohl für die Verwendung des gekrümmten Plexiglases selbst als auch für die Befestigung mittels (für Glaseindeckungen zugelassenen) Punkthaltern eine Zustimmung im Einzelfall erwirkt werden müssen. Erste Gespräche mit Herstellern der Punkthalter ergaben, dass dies mit Versuchen und Begutachtung seitens eines darauf spezialisierten Prüfbüros für möglich erachtet wird.

Bezüglich der Holzkonstruktion ist festzustellen, dass mit KHP und den Patches ungeregelte Produkte verwendet werden sollen und zudem die Ausführung und Bemessung der Kreuzungs-, Rand- und Eckknoten nicht geregelt ist. Für KHP-BSH-Hybridträger wurden im Rahmen der Genehmigungsfähigkeit des Pilotprojektes „Fußgängerbrücken“ bereits zahlreiche Versuche durchgeführt (siehe Kap. 3.8.2.2), so dass davon ausgegangen wird, dass diesbezüglich die Genehmigungsfähigkeit erreicht ist. Für die Verwendung der Patches und den Nachweis der Kreuzungs-, Rand- und Eckknoten könnten jedoch zusätzliche Versuche gefordert werden. Erste Einschätzungen liefern die Abscherversuche an drei- und fünfteiligen Scherproben sowie die Biegeversuche an zwei- und dreigurtigen Trägern (vgl. 3.3.2). Kreuzungsknoten wurden jedoch wegen des erheblichen Aufwandes nicht geprüft. Der weitere Untersuchungsrahmen wäre mit Prüfingenieur und Genehmigungsbehörde abzustimmen. Da die Innenhofüberdachung aus o.g. finanziellen Gründen nicht realisiert wurde, wurden die genehmigungsrechtlichen Fragestellungen zurückgestellt.

3.8.4.3 Konstruktionsentwicklung

Autor: Yvette Lemke (IaFB)

Bei der Findung und Entstehung der Konstruktion der Innenhofüberdachung lag die Konzentration in der Entwicklung und Umsetzung von Verbindungsmitteln im Allgemeinen sowie Konzepte zur Verbindung und zum Anschluss von Formholzprofilen im Speziellen. Die im Verlauf von Voruntersuchungen und Variantendiskussionen gefundene Vorzugsvariante mit sich baumartig verzweigender Stützenkonstruktion und trägerrostartiger Rippenkonstruktion als Schirm bietet für diesen Ansatz sehr gute Möglichkeiten.

Konkret lagen die Schwerpunkte der Bearbeitung in der Entwicklung und Umsetzung bzw. Modellierung der folgenden Knotenpunkte:

- Kopfpunkt der Stütze mit Torsionsbeanspruchung: „Stütze-Rost“
- Anschluss der Streben an den Gitterrost: „Strebe-Rost“
- Verbindung der aufgelösten Konstruktion in den Kreuzungspunkten: „Kreuzungsknoten“
- Steifigkeitserhöhung in den Drittelspunkten zwischen den Kreuzungsknoten: „Zwischenknoten“
- Verbindung der Gurte am Rand: „Randknoten“ und „Eckknoten“
- Knotenkonzept für Formholzröhren für den konkreten Fall: durchgehende Hauptstütze mit vier Verzweigungen bzw. Streben: „Stütze-Streben“
- Anschlusslösung für den Fußpunkt der Stütze mit Möglichkeit zur Übertragung von Biegemomenten: „Fußpunkt“

Weiterhin wurde das beanspruchungsgerechte Konstruieren fokussiert. So wurden an Stellen mit maßgebender Anschlusstragfähigkeit die Knotenpunkte mit textilen Verstärkungen ausgeführt und dort wo eine hohe Biegetragfähigkeit erforderlich ist, Hybridbauteile eingesetzt.

Bei den Gurten handelt es sich um BSH aus 3 Lamellen á 27 mm Höhe und 160 mm Breite, so dass ein Querschnitt mit den Maßen Höhe/Breite = h/b = 81mm/160mm entsteht. In den unverstärkten Bereichen bestehen die Gurte aus Brettschichtholz der Festigkeitsklasse GL28h, bei den hochbeanspruchten Hauptdiagonalen werden die oberen und unteren Gurte durch ober- und unterseitig aufgeklebte KHP-Lamellen verstärkt und die Festigkeitsklasse der mittleren Gurte auf GL32h erhöht (siehe Abb. 3.346).

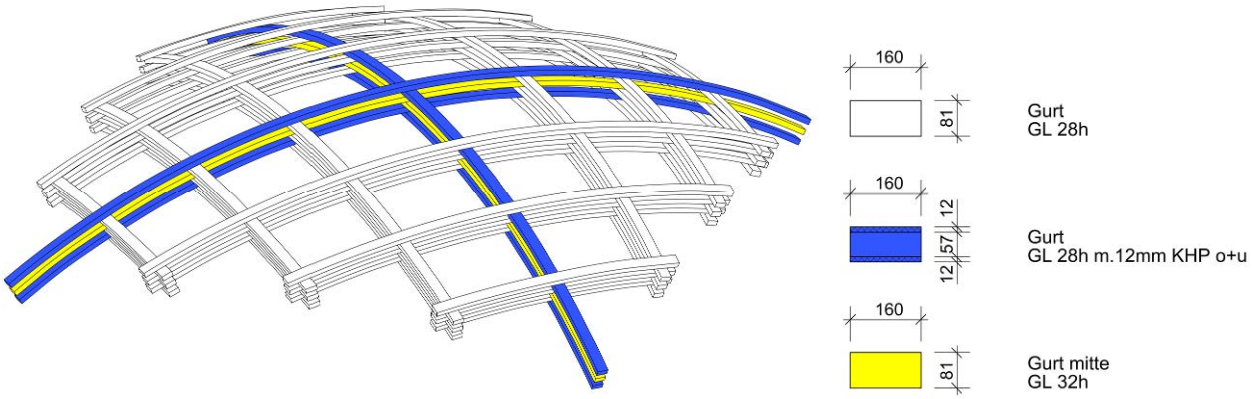


Abb. 3.346: Verstärkungen der Hauptdiagonalen des Gitterrostes der Innenhofüberdachung

Die von der Stütze abgehenden Streben sind Rundvollprofile mit einem Durchmesser von 20 cm aus BSH der Festigkeitsklasse GL28h. Die Stütze wird als konisches Rundhohlprofil, ebenfalls in GL28h mit textiler Umwicklung ausgeführt. Die ursprüngliche Planung sah ein Formholzprofil vor. Dies ist aber aus fertigungstechnischen Gründen in den erforderlichen Geometrien zum Zeitpunkt des Projektendes noch nicht möglich gewesen. Deshalb wurde die Stütze alternativ als Hohlquerschnitt, gefräst aus einem geleimten Kastenprofil, geplant. Die Stütze ist 5,50 m hoch mit einem Außendurchmesser von 700 mm am Fußpunkt und 350 mm am Kopfpunkt, so dass sich gegenüber der Mittelachse ein Winkel von ca. 2° ergibt. Die Wandungsstärke beträgt 110 mm. Die zusätzliche textile Verstärkung aus Glasfasern wird mit einem Winkel von ± 45° um die Stütze geflochten und erhöht so die Festigkeit und Steifigkeit.

Der biege- und torsionssteife Anschluss der Stütze an den Gurtstapelrost erfolgt mit einem Verbindungselement aus Stahl, einem Kreuzblechstück mit Fußplatte. Die Verbindungselemente in den Gurten sind Stabdübel und Passbolzen. In den Stützenkopf erfolgt die Verbindung mit eingeklebten Stahlstäben, Durchmesser d = 12 mm.

Der Anschluss der Streben an den Rost wird als Gelenkbolzenverbindung ausgeführt. Der Bolzendurchmesser beträgt d = 30 mm. Im Gurtträger erfolgt der Anschluss an das eingeschlitzte Verbindungsblech mit Stahldübeln, Durchmesser d = 12 mm. Die Kopfplatte wird mit eingeklebten Stahlstäben d = 12 mm an die Strebe angeschlossen.

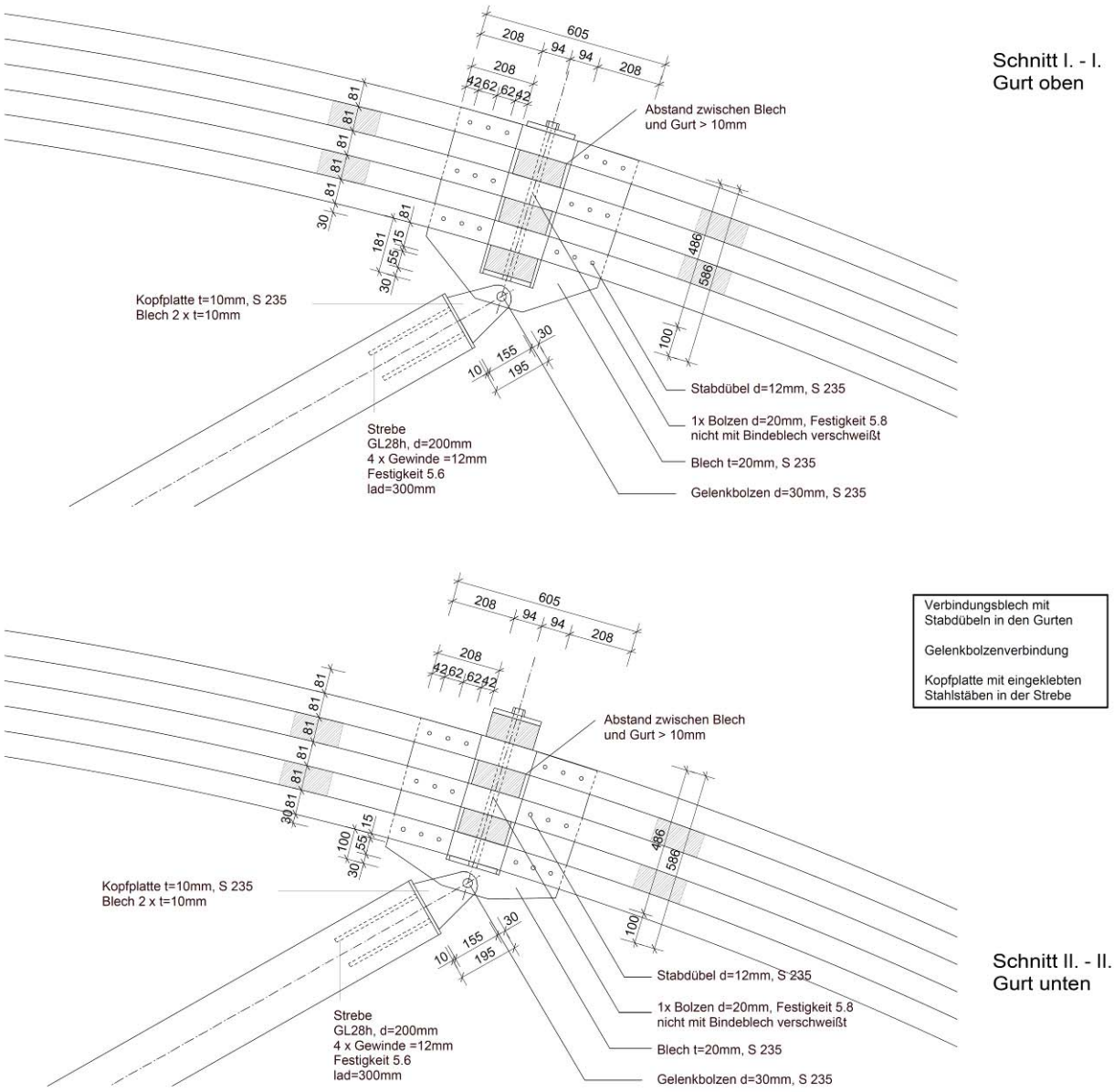


Abb. 3.347: Anschlüsse „Strebe-Rost“

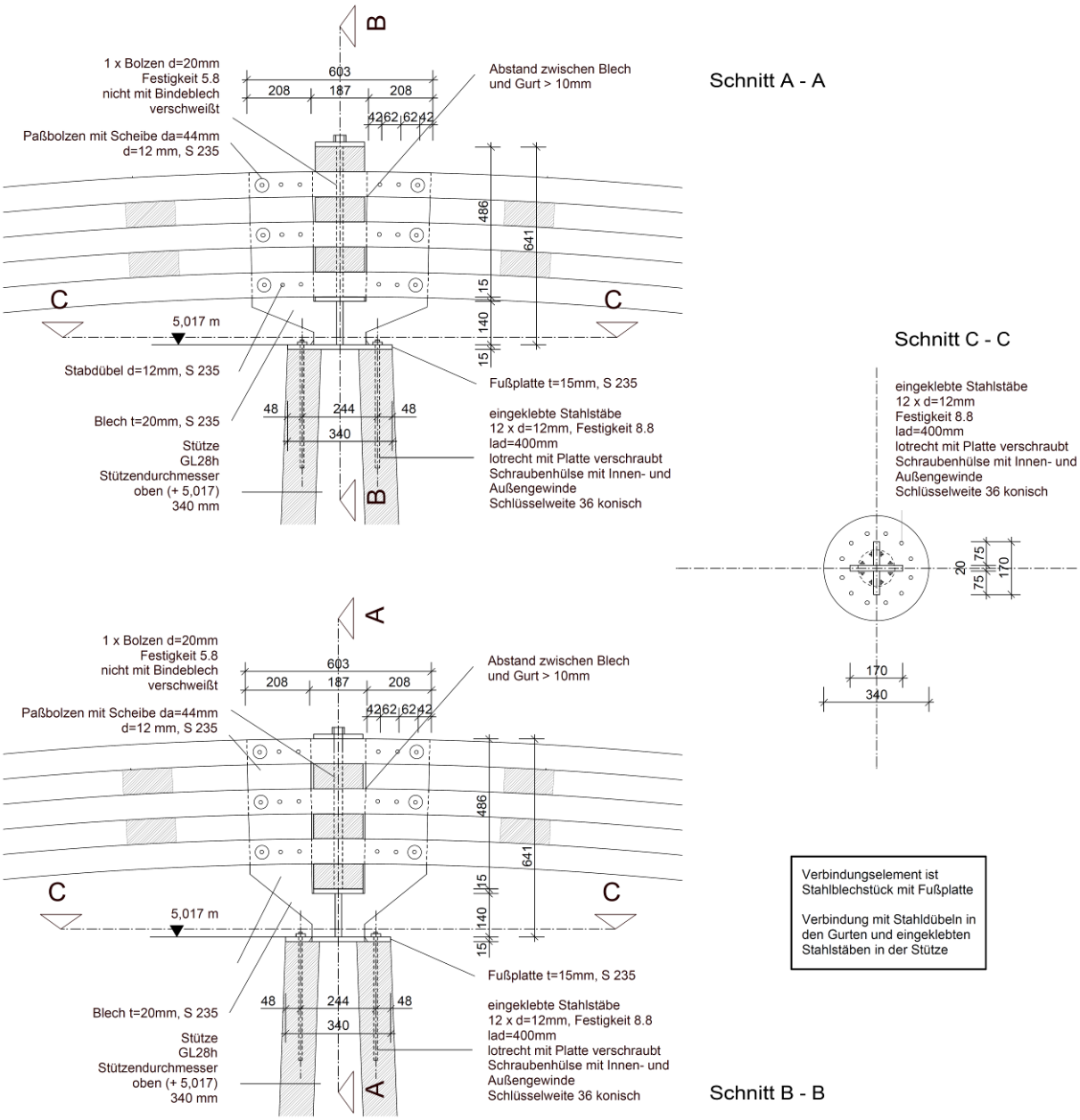


Abb. 3.348: Anschluss „Stütze-Rost“

Die Kreuzungspunkte der Gurte und auch die Rand- und Eckknoten werden jeweils nur mit einem Bolzen verbunden. Die Tragwirkung des Gurtstapelrostes entsteht vor allem aus der Verbundwirkung der Schraubenverbindungen an den Zwischenknoten, daneben auch durch die Verbundwirkung aus der Gelenkbolzenverbindung und durch die Verdrehsteifigkeit der Holzstapelfuge mit Bolzensicherung. Die sich daraus ergebenden Nachweise für das Verbindungsmittel (Stahlnachweise), für die Holzstapelfuge (Druckpressung im Holz, mögliche Zugkraft im Bolzen und Aufnahme der Ausziehkraft des Bolzens über die Unterlegscheibe) und der Nachweis für die Verbindung mit stiftförmigen Verbindungsmitteln werden in 3.7.3.7 „Knoten im Holzstapelrost mit einem Passbolzen als Verbindungsmittel“ ausführlich erläutert.

An den Stellen, wo die Verbindungsmittelsteifigkeit oder Lochleibungsfestigkeit es erforderlich machen, werden die Lochbereiche durch Einkleben von Patches (laminierte Gestricke aus textilen Fasern, siehe auch Abschnitt 3.7.3.5) verstärkt.

Die Randgurte haben mit h/b = 81mm/160mm die gleichen Querschnittsmaße wie die Gurte und sind gegenüber den obersten Gurten um eine halbe Querschnittshöhe nach unten versetzt, so dass in den Überblattungen der Randknoten die Gurte jeweils um 40,5mm ausgeklinkt werden müssen. Die Verbindung des Randknotens erfolgt mit einem Passbolzen der Festigkeit 5.8, Durchmesser d = 20mm.

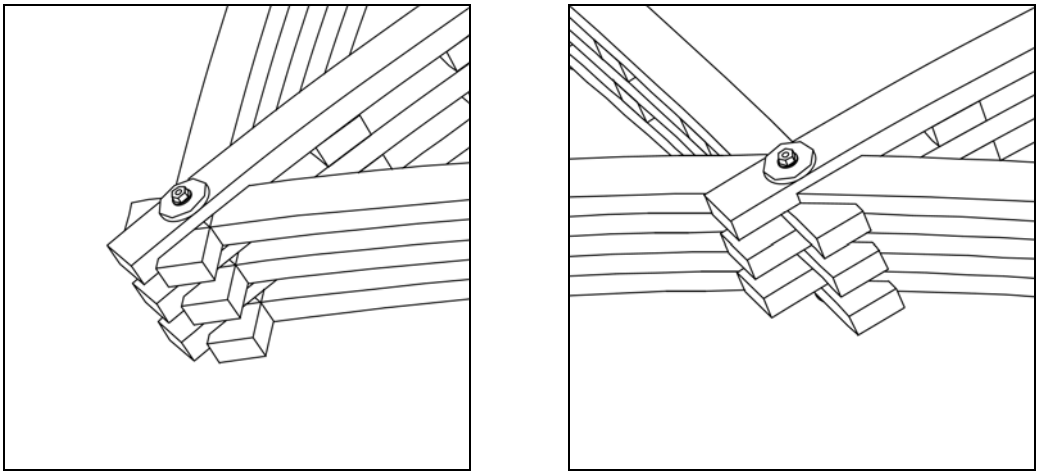


Abb. 3.349: Eckknoten und Randknoten

An den Ecken treffen die Randträger zweier Seiten auf gleicher Höhe orthogonal aufeinander, im Winkel von 45° dazwischen, um eine halbe Querschnittshöhe versetzt, kommt jeweils ein Dachgurt der Hauptdiagonale dazu. Deshalb werden an diesen Stellen sowohl die Randgurte als auch die Dachgurte je um die halbe Querschnittshöhe ausgeklinkt. Der Raum, der zwischen den Gurtlagen entsteht, wird mit einem Zwischenholz der Höhe 40,5mm aufgefüllt. Da hier höhere Belastungen als an den anderen Knoten auftreten, werden die Eckknoten mit einem Bolzen, Durchmesser d = 24mm der Festigkeit 8.8, verbunden.

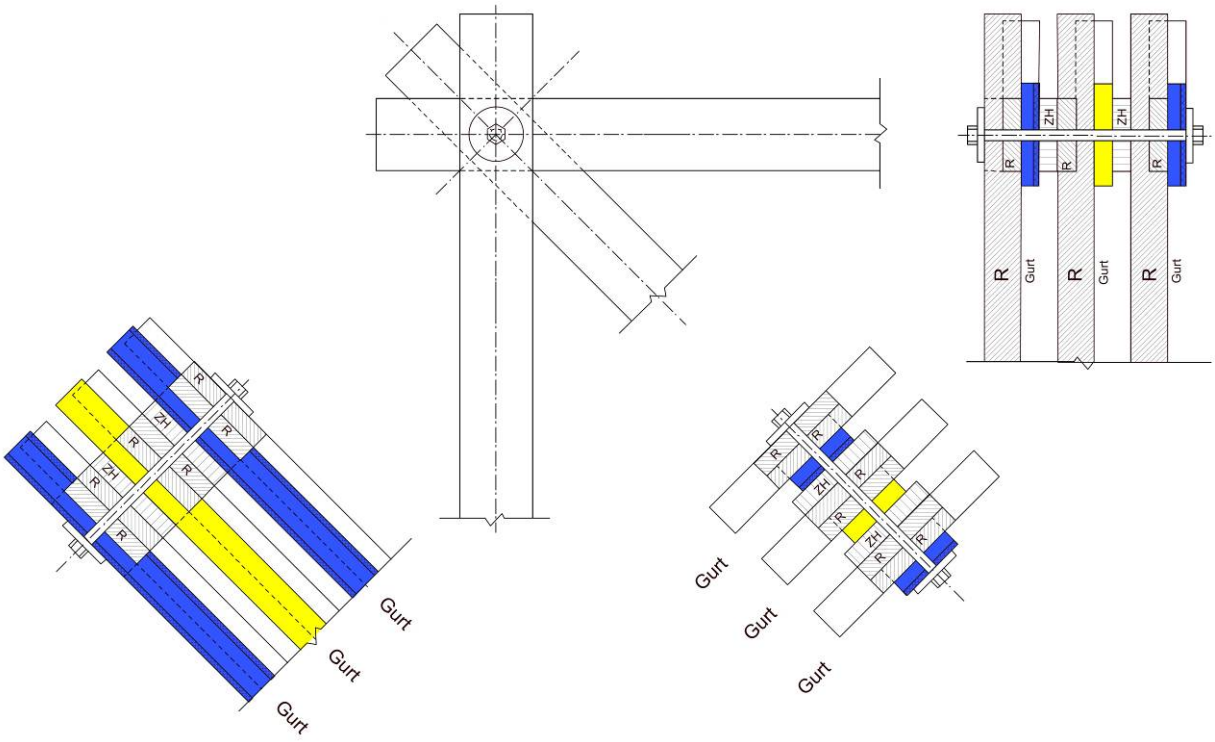


Abb. 3.350: Anschlussdetail des Eckknoten

In den Drittelspunkten zwischen den Kreuzungsknoten, also in den Zwischenknoten, wird der Hohlraum mit Zwischenhölzern der Geometrie b/l/h = 160/160/81 mm gefüllt. Die Verbindung der Gurte untereinander erfolgt mittels unter einem Winkel von 45° schräg eingebohrter Schrauben. Dadurch werden die Gurte an diesen Stellen gekoppelt und auf diese Weise ausreichend steife Verbundträger entwickelt, die die Gesamtsteifigkeit des Daches maßgeblich beeinflussen.

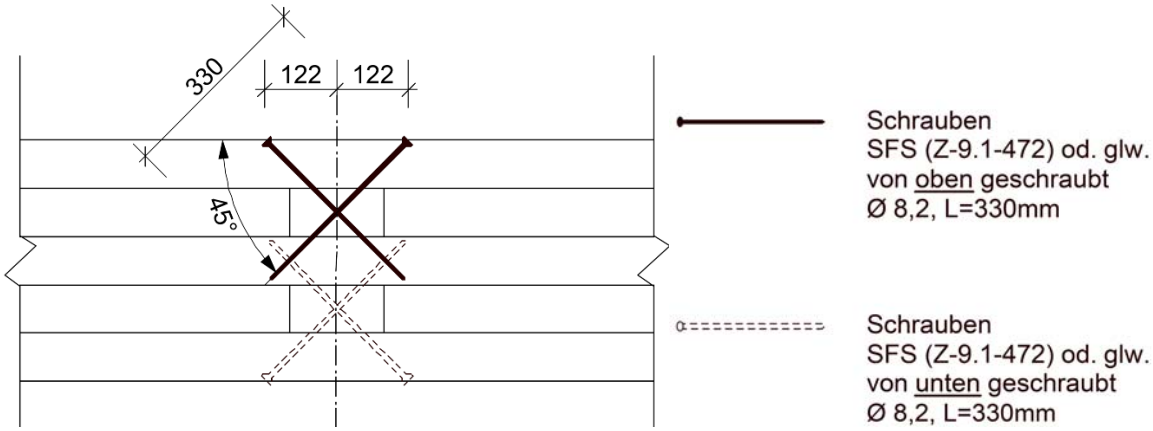


Abb. 3.351: Anschluss „Zwischenknoten“ mit schrägen Schrauben

Die Verbindungsmittelsteifigkeiten sowohl der Kreuzungs- als auch der Zwischenknoten wurden aufwändig durch Stabwerk- und FE-Modelle simuliert und anschließend mittels Versuchen verifiziert (siehe Abschnitt 3.8.4.4).

Der Anschluss der Streben an die Stütze erfolgt durch einen einerseits – da für Formholzröhren bisher nicht angewandten – innovativen, andererseits – da altbekannt – klassischen Stirnversatz. Dazu werden die Streben mit einer Versatztiefe von 8 cm angeschrägt in die Wandung der Stütze gesetzt und mittels Schrauben mit einem Durchmesser von 12 mm und einer Länge von 550 mm (z.B. SPAX-S, Z-9.1-519) gesichert. Zur Stabilisierung des Anschlusses wird ein Füllstück der Holzgüte GL28h mit einer Gesamthöhe von 640 mm während der Fertigung in die Stützenröhre geklebt. Der dadurch entstehende Vollquerschnitt ermöglicht die große Versatztiefe der Streben und lässt Horizontalkräfte, die aus unsymmetrischen Strebennormalkräften resultieren, sicher in die Stütze ableiten.

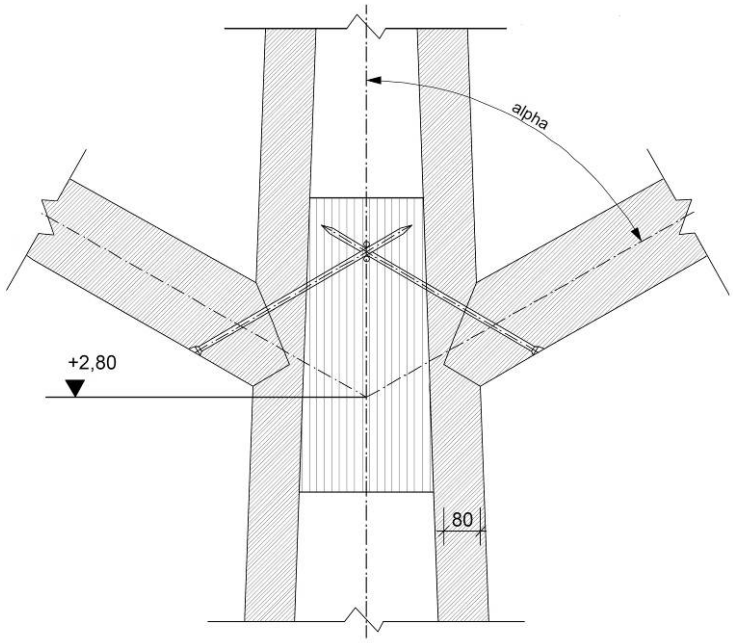


Abb. 3.352: Anschluss Stirnversatz „Stütze-Streben“

Der biegesteife Anschluss des Stützenfußes erfolgt über eine Stahlfußplatte, die mit 20 eingeklebten Stahlstäben an der Stütze befestigt wird. Die Verankerung der Stahlplatte auf dem Fundament kann je nach Ausbildung der Gründung mit Schraubenankern ausgeführt werden.

3.8.4.4 Material- und konstruktionsspezifische Modellierung

Autoren: Petra Kubowitz, Yvette Lemke, Anke Schäcke (alle IaFB)

Bei der Modellierung des Gesamtsystems als Stabwerk entstand ein System mit 4470 Stäben und 2922 Knoten. Dieses komplexe System ergab sich u.a. aus dem Anspruch der Genauigkeit für die Modellierung hinsichtlich der Berücksichtigung der Nachgiebigkeiten. Zusätzlich zur Modellierung des Dachtragwerks als Stabtragwerk wurden einzelne Teilbereiche mit Hilfe von Finiten Elementen modelliert, wobei die Knotenschnittgrößen durch Abbildung der entsprechenden Federsteifigkeiten der Anschlüsse und Verbindungen im Gesamttragwerk ermittelt wurden.

Der beschriebene Dachträgerrost wird aus zusammengesetzten Querschnitten mit nachgiebigem Verbund gebildet. Ziel war, ein Stabwerksmodell zu entwickeln, das die Tragwirkung unter Berücksichtigung der Nachgiebigkeiten der gewählten Verbindungen realitätsnah abbilden kann, wobei zu Beginn des Pilotprojektes weder die Steifigkeiten der Kreuzungsknoten des gekrümmten Gurtstapelrostes noch der Grad der Verbundwirkung der Zwischenknoten bekannt waren. Jeder Gurt wird im Modell als Stabzug abgebildet. Die Darstellung der Verbindung der Gurte untereinander in den Kreuzungs- und Zwischenknoten erfolgt ebenfalls als Stabzug in der Systemachse des Verbindungsmittels und zusätzlich durch eingeführte Bypassstabsysteme, die die Tragwirkung der Verbindung beschreiben. An jedem Kreuzungs-, Zwischen-, Rand- und Eckknoten sowie den Knoten „Stütze-Rost“ und „Strebe-Rost“ wurde entsprechend der Art der Verbindung ein notwendiges komplexes Bypassstabsystem mit zusätzlichen Stäben entwickelt. Im Ergebnis der Modellierung des Gesamtsystems im Stabwerksprogramm RStab der Firma Dlubal entstand so das System mit 4470 Stäben und 2922 Knoten (vgl. Abb. 3.353).

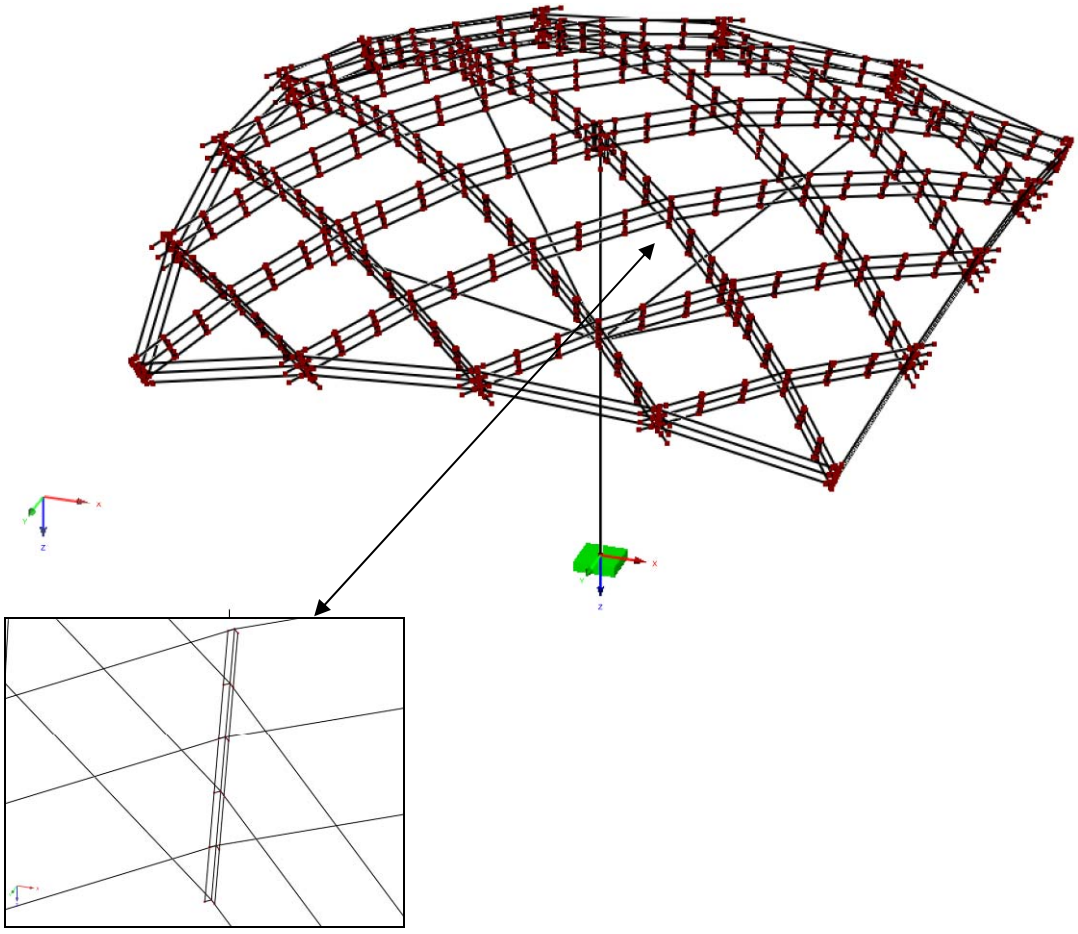


Abb. 3.353: Gesamtsystem Dach im Stabwerksprogramm RStab mit Ausschnitt KK

3.8.4.4.1 Entwicklung des Bypassstabsystems für den Kreuzungsknoten (KK)

Die Tragwirkung der Kreuzungsknoten mit einem Passbolzen als Verbindungsmittel wird beschrieben zum einen durch die Verschiebesteifigkeit aus der Passbolzenverbindung und zum anderen durch die Verdrehsteifigkeit des Holzstapels mit Bolzensicherung im Gurtträgerrost (siehe Kap. 3.7.3.7). Es war gewünscht und erforderlich, im Ergebnis der Stabwerksberechnung Schnittgrößen zu erhalten, deren Einzelanteile sowohl die Verdrehbehinderung durch die Gurte mit dem Verbindungsmittel, als auch die Verschiebesteifigkeit aus der Passbolzenverbindung infolge des Verschiebungsmodul K_{ser} enthalten.

Die Schwierigkeit für die richtige Modellierung entstand, weil sich im Programm RStab an einem Knoten alle abgehenden Stäbe entsprechend ihrer Steifigkeit an der Weiterleitung der Beanspruchung beteiligen. Ein Zuweisen einer Durchgängigkeit (z. B. Biegetragfähigkeit) von zwei Stäben ohne dass die anderen anschließenden Stäbe gelenkig sind, ist nicht möglich. Das führte beim anfänglichen System ohne Bypassstabsystemen zu dem Problem, dass das Verbundsystem des Gurtstapelrostes mit nachgiebigem Verbund nicht richtig abgebildet werden konnte. Auch die Möglichkeit der Anwendung sogenannter Scherengelenke in RStab führte nicht zur Problemlösung. Bei Scherengelenken ist eine zusätzliche Definition von Federn für die anschließenden, jedoch nicht durchgängigen, Stäbe nicht möglich. Im Ergebnis der Modellstudien ist festzustellen, dass zur Berechnung von nachgiebigen Gurtstapeln mit nur einem Passbolzen als Verbindungsmittel, die gängigen Stabwerksprogramme nur bedingt geeignet sind. Für die Modellierung der Verbindung sind geeignete zusätzliche Bypassstabsysteme notwendig, die deren Tragwirkung unter Berücksichtigung realistischer Nachgiebigkeiten beschreiben.

Weniger die Wertermittlung der Dreh- und Verschiebungsfedern als die richtige Abbildung des Schnittgrößenverlaufs mittels Bypasssystem stellte eine große Herausforderung dar, denn die große Schwierigkeit bestand darin, das richtige zusätzliche Stabsystem mit seinen entsprechend richtig angeordneten federbehafteten Knotenverbindungen zu finden.

Vom Beginn der Modellierung bis zur endgültig gefundenen Lösung wurden insgesamt knapp 20 verschiedene Bypasssysteme untersucht. Für das System, welches zum Ende der Untersuchungen als geeignetes erschien, wurden verifizierende Vergleichsuntersuchungen sowohl in Form einer Modellierung in einem FEM-Programm als auch in Form von Versuchen durchgeführt (siehe Kap. 0).

Die Bestimmung des Verschiebungsmoduls wurde nach DIN 1052:2008-12 durchgeführt, und die Ermittlung der Verdrehbehinderung durch die Gurte mit einem Verbindungsmittel wurde anhand von Teilsystemen mit Hilfe des FEM-Programms InfoGraph vorgenommen.

3.8.4.4.2 Darstellung der Modellierung für den Kreuzungsknoten

Um die Tragwirkung eines Kreuzungsknotens mit einem Passbolzen als Verbindungsmittel in einem Stabwerksmodell darzustellen, sind zum einen die Verschiebesteifigkeit aus der Passbolzenverbindung und zum anderen die Verdrehsteifigkeit des Holzstapels mit Bolzensicherung im Gurtträgerrost zu beschreiben.

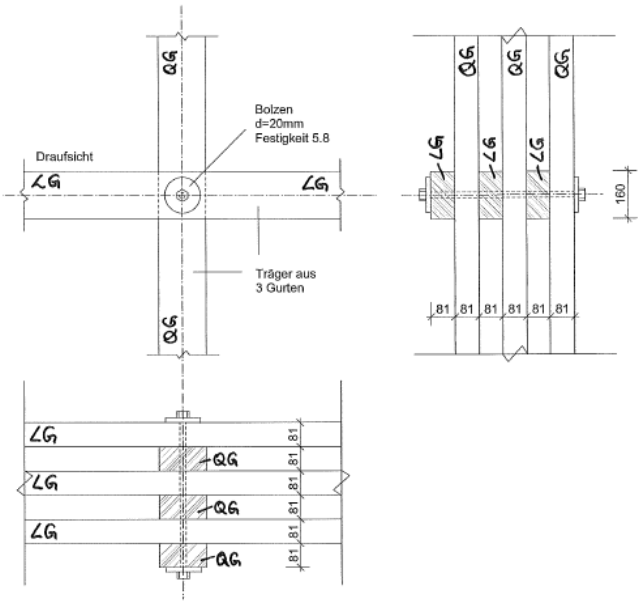


Abb. 3.354: Kreuzungsknoten mit Kennzeichnung Längs- und Quergurt (LG, QG)

Der Passbolzen als Verbindungsmittel weist in jedem Gurt eine Verschiebesteifigkeit (Verschiebungsmodul K_{ser}) auf, sie wird numerisch beschrieben durch eine Normalkraftfeder eines jeden Gurtes. Es existieren zwei Gurtachsen, wie in Abb. 3.354 zu sehen ist. Daher werden zwei Bypassstabsysteme definiert, einer in Längs- und einer in Querrichtung. Damit nur die Schubkräfte des Kreuzungsknotens über diese „stehenden Rahmen“ übertragen werden, sind bis auf den untersten alle „Rahmenstiele“ biegegelenkig und querverschieblich. In der Abb. 3.355 sind die beiden Bypassstabsysteme schematisch dargestellt. Die Stäbe der „Rahmenstiele“ sind so kurz wie möglich und unendlich steif, um deren Stabeinflüsse zu vermindern. Die „Rahmenriegel“ bilden das Verbindungsmittel, den Passbolzen, ab und erhalten dessen Querschnittseigenschaften je betrachteter Richtung.

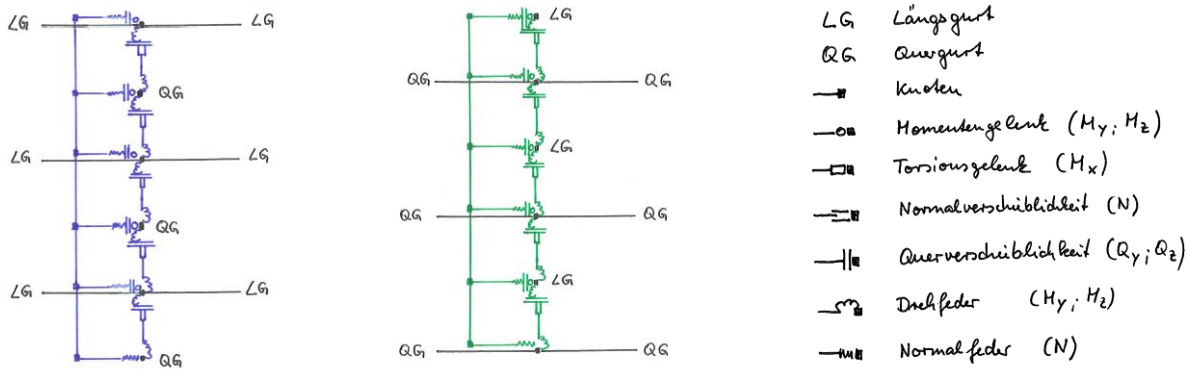


Abb. 3.355: Darstellung der Bypassstabsysteme für den Kreuzungsknoten

In der Holzstapelfuge zwischen den Gurten bestehen mehrere Kraftübertragungsmechanismen. In der Fuge selbst können nur Druckkräfte übertragen werden. Zugkräfte sind ausgeschlossen. Zur Sicherung der Fuge muss der Passbolzen daher als Zugstab ausgebildet werden. Das Kurzschließen der Bolzenzugkraft erfolgt über Unterlegscheiben auf den oberen bzw. unteren Gurt. Gesucht sind die maximale Druckpressung im Holz senkrecht zur Faser, die mögliche Zugkraft im Bolzen und die Aufnahme der Ausziehkraft des Bolzens über die Unterlegscheibe als Flächenpressung auf den oberen bzw. den unteren Gurt.

Die Stabknoten liegen in der Schwerachse der Gurte, daher müssen die Trageigenschaften der Fuge durch die fünf übereinanderliegenden Stäbe in der Schwerachse der Verbindung dargestellt werden. Die Übertragung von Querkräften ist in diesem Stabzug ausgeschlossen (Abb. 3.355). Die Eigenschaft der Nachgiebigkeit des Holzstapels senkrecht zur Faser wird den fünf Stäben in der Systemachse der Verbindung zugewiesen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Holzstapel aus sechs Gurten durch fünf Stäbe abgebildet wird.

Stablängskraftfeder

$$F_{ux} = \frac{E_{90} \cdot A}{l} \tag{3.239}$$

Die Längskraftfeder der sechs Gurte entspricht der Längskraftfeder der fünf Stäbe.

$$\frac{E_1 \cdot A}{l_1} = \frac{E_2 \cdot A}{l_2} \tag{3.240}$$

mit

$l_1 = 6\ h$ und (3.241)

$l_2 = 5\ h$ (3.242)

h Gurthöhe

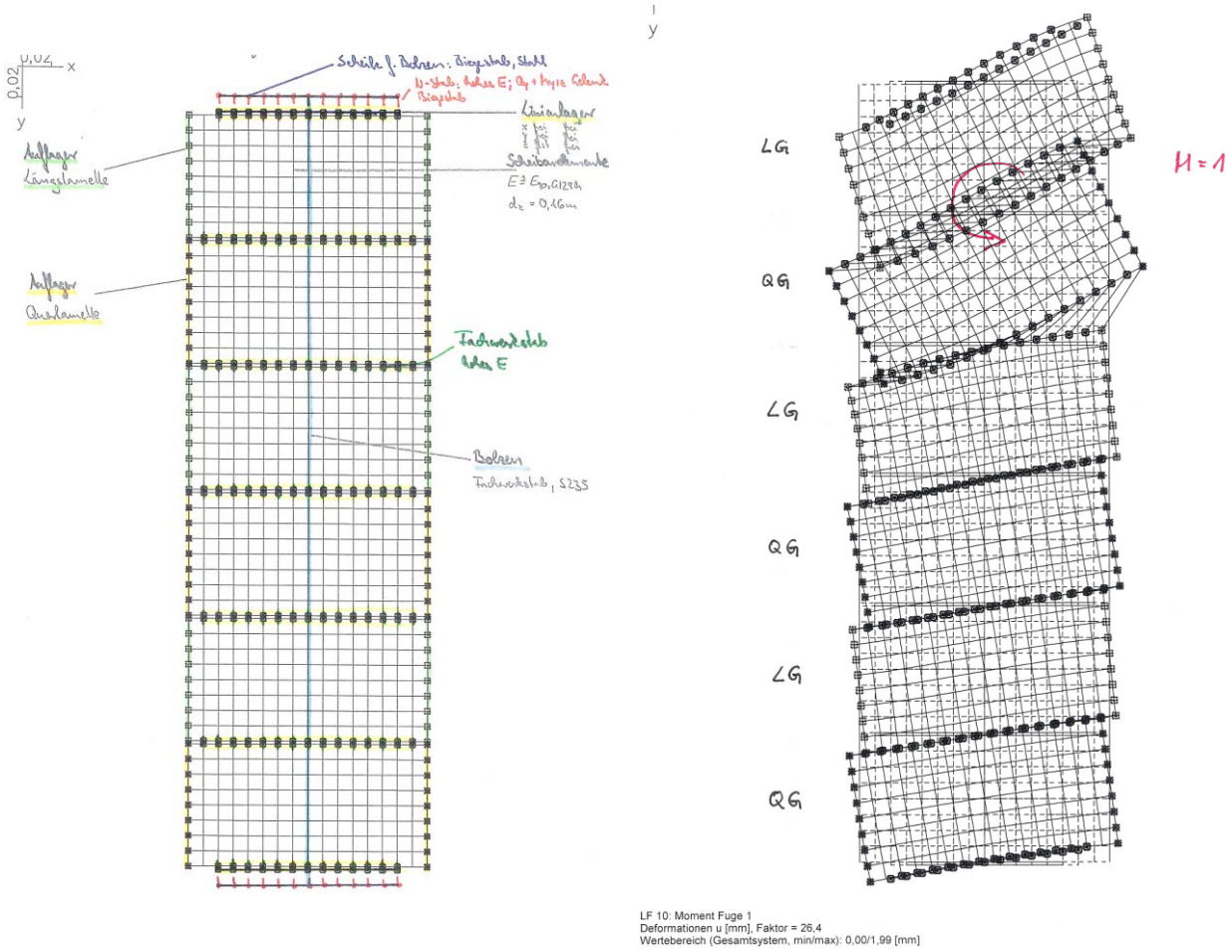
$E_1 = E_{90}$

damit sind die Materialkennwerte im Stabwerksprogramm wie folgt zu berücksichtigen:

$$E_2 = E_1 \cdot \frac{5}{6} = E_{90} \cdot \frac{5}{6} \tag{3.243}$$

$$G_2 = G_1 \cdot \frac{5}{6} = G \cdot \frac{5}{6} \tag{3.244}$$

Die Verdrehsteifigkeit des Holzstapels mit Bolzensicherung im Gurtträgerrost muss durch ein Ersatzsystem zuvor ermittelt werden und kann dann als spezifische Drehfedern jeweils am Stabanfang und Stabende im Stabzug definiert werden. Das Ergebnis der Stabwerksberechnung am gesamten Dach liefert für den Stabzug die Schnittgrößen N, My und Mz, mit denen sich die Holzstapelfuge nachweisen lässt. Der Nachweis des Knotens im Holzstapelrost mit einem Passbolzen als Verbindungsmittel wird im Abschn. 3.7.3.7 vorgestellt.



FEM System | Deformationen unter Einheitsmoment

Abb. 3.356: FEM Teiltragsystem KK Gurtstapel mit Bolzensicherung

Um die Verdrehsteifigkeit des Holzstapels mit Bolzensicherung numerisch zu ermitteln, sind beim Einsatz von Finiten Element Methoden vorzugsweise sogenannte Volumenelemente zu verwenden. Da den meisten Ingenieurbüros nicht die Möglichkeit der Anwendung von Volumenelementen in FEM Programmen zu Verfügung steht, wurde die Ermittlung der spezifischen Drehfedern unter Anwendung eines zweidimensionalen FEM Programms untersucht. Für die Darstellung des Teiltragsystems, getrennt in Längs- bzw. Querrichtung, sind dazu Programme geeignet, in denen Scheibenelemente und Stäbe kombiniert werden können.

In der Abb. 3.356 ist das gewählte System mit dem Programm InfoGraph dargestellt. Die Elementeigenschaften und Festhaltungen sind der Abb. 3.356 zu entnehmen. Die Federkonstanten der Festhaltungen (F_{ux}, F_{uy}, F_{uz}, $F_{\varphi x}$, $F_{\varphi y}$, $F_{\varphi z}$) wurden an einem vergleichbaren Ersatzstab für jede Auflagerbedingung ermittelt. Beim Kreuzungsknoten ist ein Kragarm als Ersatzstabsystem zur Bestimmung der Auflagerbedingungen geeignet. Die Länge wurde vom Stützen- zum Strebenauflager am Gesamtsystem abgeschätzt. Die Festhaltungen am Teiltragsystem des Gurtstapels sind anschließend in Linienlager umgerechnet worden.

Um dieses Teiltragsystem des Gurtstapels zu testen, wurde exemplarisch in der ersten Fuge von oben ein Einheitsmoment in Form einer Linienlast auf das System aufgebracht. In der Abb. 3.356 ist am Verformungsbild gut zu erkennen, wie und mit welchen Anteilen sich die unteren Gurte an der oben aufgebrachten Beanspruchung beteiligen.

Anhand dieses Teiltragsystems sind nun die Drehfederkonstanten für den Stabzug im Gesamtstabwerksmodell zu ermitteln. Die Abb. 3.357 zeigt den Gurtstapel im Kreuzungsknoten und den entsprechenden Stabzug im Stabwerksmodell. Zur Ermittlung der Drehfederkonstanten der fünf Fugen ist eine Vielzahl von Teiltragsystemen zu bilden (siehe Abb. 3.358), wobei das Gurtstapelsystem in jeder Fuge „aufgetrennt“ wird. Das heißt z. B. zur Bestimmung der Drehfedern 1,2 und 2,1 wird das System an der Fuge 1 geteilt und es entstehen zwei neue Teilsysteme, an die jeweils die Einheitslasten M_u bzw. M_o (Moment als Linienkraft umgerechnet) angetragen werden. Aus dem Ergebnis der Knotenverschiebungen u [mm] am Lastangriff und der dadurch ablesbaren Verdrehung des Gurtscheibenrandes lässt sich die Drehfederkonstante für das Teilsystem ermitteln. Die Drehfederkonstante $F_{2,1}$ bestimmt sich aus dem zweiten Teilsystem mit dem Einheitsmoment M_o. Alle übrigen Drehfederkonstanten werden entsprechend ermittelt. Zum Schluss werden die Werte der Drehfedern in den Stabzug des Gesamtstabwerksmodells vom Dachtragwerk übertragen.

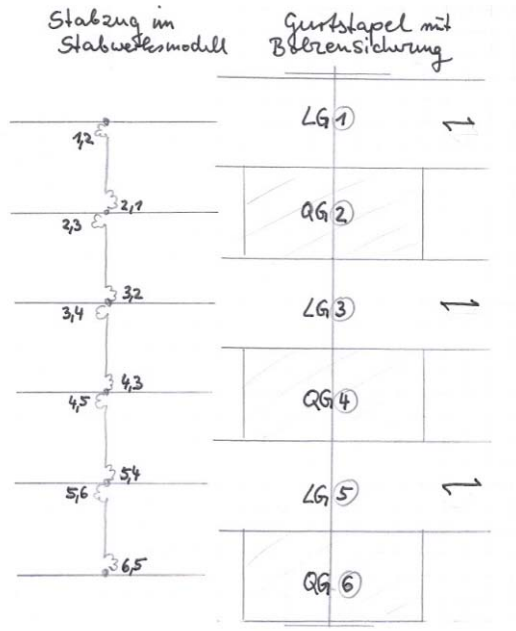


Abb. 3.357: Gurtstapel im KK mit entsprechendem Stabzug im Stabwerksmodell

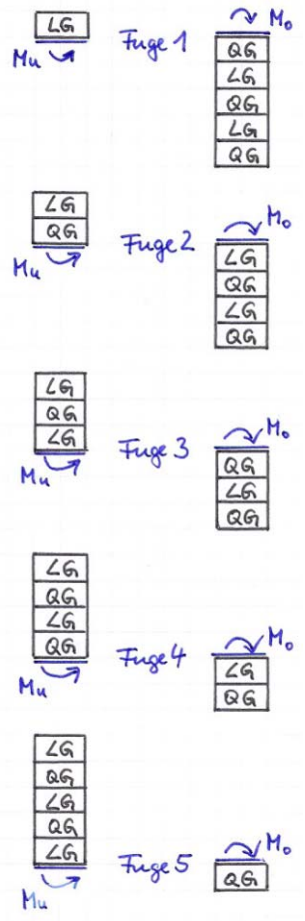


Abb. 3.358: Schema der Teilsystembildung zur Ermittlung der Drehfedern je Holzfuge

Die beschriebene Methode zur Ermittlung der Drehfederkonstanten für den Kreuzungsknoten in Längs- und Querrichtung stellt eine geeignete Abschätzung der Verdrehsteifigkeit eines Gurtstapelrostes mit Bolzensicherung dar. Die Gurtstapel im Rand- und Eckknoten sowie an den Knoten „Stütze-Rost“ und „Strebe-Rost“ wurden analog modelliert. Entsprechend der Art der Verbindung wurden auch hier notwendige komplexe Bypassstabsysteme mit zusätzlichen Stäben ergänzt.

3.8.4.4.3 Entwicklung und Verifizierung der Modellierung des Zwischenknotens

Im Zuge der Versuchsauswertung von Biege- und Abscherversuchen (siehe auch Kapitel 0) wurde die vorgenommene RStab-Modellierung einer eingehenden Prüfung unterzogen. Einerseits lieferten die Versuche wichtige Daten bzgl. der angesetzten Verbindungsmittelsteifigkeiten, andererseits konnte zusätzlich die Güte der vorgenommenen Modellierung überprüft werden. Dazu wurden die Versuchsträger der 3-Punkt-Biegeprüfung einerseits mittels des Stabwerksprogramms RStab (analog zum Gesamtdachsystem) und andererseits mittels eines FEM-Moduls des Programms Infograph modelliert und die Verformungen sowie daraus rückgerechneten Steifigkeiten miteinander sowie mit den Versuchsergebnissen verglichen. Dabei ergab sich folgendes Bild:

Modellierung im Tragwerksprogramm RSTAB:

Durch die für die Stabwerkmodellierung gewünschte Trennung der Nachgiebigkeitsanteile infolge des Verschiebungsmoduls K_{ser}, teilweiser Biegung des Verbindungsmittels selbst und Verdrehbehinderung durch Gurte bzw. Zwischenhölzer mit Verbindungsmitteln entstand ein komplexes Bypassstabsystem. Die völlige Trennung der Einzelanteile ist insofern schwierig, als dass die einzelnen Stäbe natürlich mindestens statisch bestimmt gelagert sein müssen – also jeweils mindestens eine eigentlich unerwünschte Festhaltung bzw. Einspannung erhalten müs-

sen, um freie Verschiebungen bzw. Verdrehungen des gesamten Bypassstabsystems zu verhindern. Der systematische Vergleich verschiedener Bypassmodellierungen für den Versuchsträger mit unterschiedlichen Verbindungen zeigte deutliche Unterschiede und die jeweiligen Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Modellierungen (vgl. Tabelle 3.63 bis Tabelle 3.66).

Modellierung im FEM-Programm Infograph:

Der Prüfträger wurde als ebenes System abgebildet. Dabei sind die Gurte und Zwischenhölzer FEM-Scheibenelemente und die Bolzen mit Bolzenscheibe bzw. die Schrauben und die Fugenstäbe 3-D-Stabelemente mit ihren jeweiligen Eigenschaften. Dadurch lassen sich die Biegung des Verbindungsmittels selbst und die Verdrehbehinderung durch Gurte bzw. Zwischenhölzer mit Verbindungsmittel gut beschreiben. Die Nachgiebigkeitsanteile infolge des Verschiebungsmoduls K_{ser} werden über die Höhe der Hölzer linienförmig verteilt angesetzt. Jedoch wird hinterfragt, ob diese Darstellung dem realen Tragverhalten genügend Rechnung trägt. (Um die zweiachsige Tragwirkung und das Verhalten des Systems im Raum besser abbilden zu können, benötigt man sogenannte Volumenelemente beim Einsatz der Finite Element Methoden. Da dazu keine Software vorlag, musste im Rahmen des Projektes darauf verzichtet werden.)

Auswertung:

In Tabelle 3.63 ist der Vergleich der gewählten Bypassstabsysteme für den Zwischenknoten mit schrägen Schrauben am Beispiel des aus drei Einzelgurten bestehenden Prüfträgers 1 (siehe Abb. 3.359) dargestellt. Die Ergebnisse (N- und M-Schnittkraftlinien und Verformungsbilder) aus den drei Stabwerksberechnungen zum Prüfträger 1 (Modell a1, Modell a2 und Modell b) und die Darstellung der Verbundwirkung der Zwischenknoten sind der Tabelle 3.64 zu entnehmen. In Tabelle 3.65 sind die Auswertungen der RStab-Berechnungen für das Modell b und das Infographmodell für den Prüfträger 1 mit unterschiedlichen Verbindungsmitteln zusammengefasst. Abschließend wird in Tabelle 3.66 der Vergleich der gemessenen Versuchswerte mit der RStab-Berechnung für das Modell b (Verformungen in Feldmitte) dargestellt.

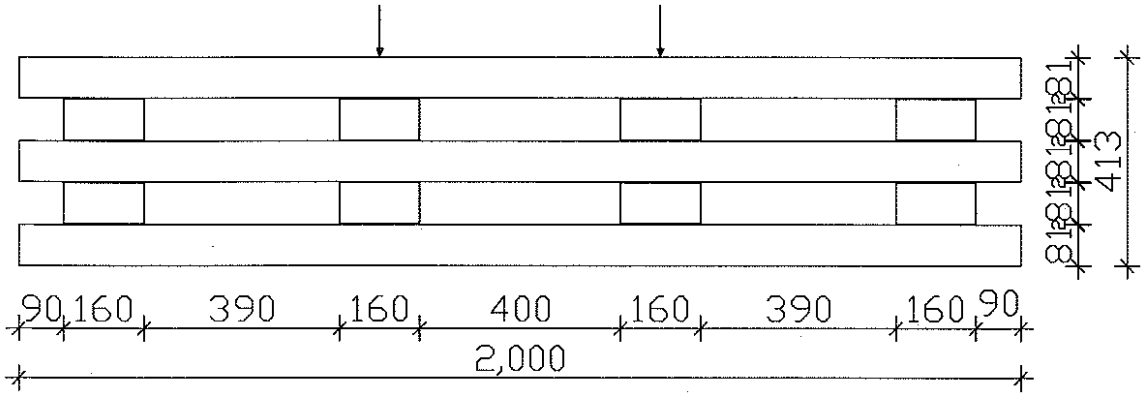


Abb. 3.359: Prüfträger 1, Verbundträger aus drei Gurten und zwei Zwischenknoten

Zu Tabelle 3.63 und Tabelle 3.64:

Die Modelle a1 und b der RStab-Berechnung zeigen obere und untere Grenzwerte im Vergleich zu dem Infographmodell und den Ergebnissen aus den Versuchen. Wegen der unzureichenden Abbildung der Verbundwirkung treten bei Modell a1 in den Gurten keine Normalkräfte, dafür große Biegemomente auf. Die Bypassstäbe, die die Schrauben simulieren, bekommen daher auch keine Schnittgrößen, und die Gesamtverformung ist groß und zeigt ebenfalls die fehlende Verbundwirkung. Bei Modell b hingegen zeigt sich eine starke Verbundwirkung. Die Gesamtverformung ist klein, die Biegemomente in den Gurten ebenfalls, dafür treten im oberen Gurt große Druck- und im unteren große Zugkräfte auf. Modell a2 liegt sowohl bzgl. der Verformungen als auch der Schnittgrößen zwischen den beiden anderen Modellen, problematisch ist hier jedoch die ungleiche Verteilung der Biegemomente und Verformungen auf die Gurte, weshalb dieses Modell trotz der sonstigen Vorteile nicht weiterverfolgt wurde.

Tabelle 3.63: Modellierungsvergleich am Prüfträger 1 für den Zwischenknoten

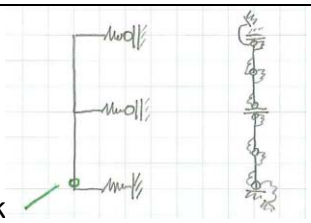
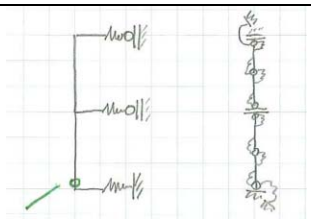
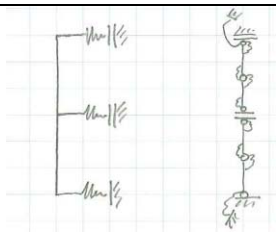
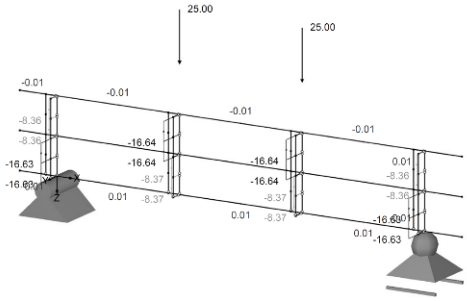
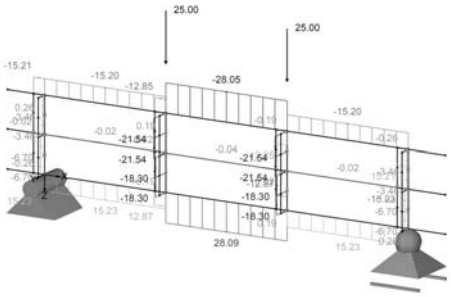
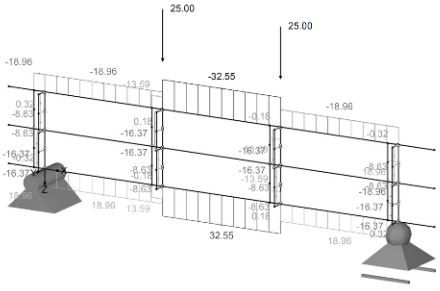
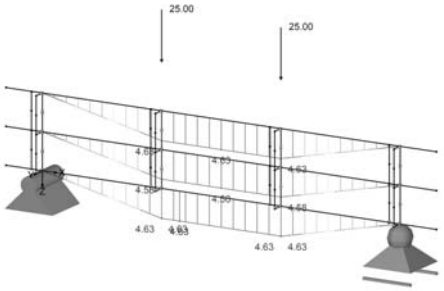
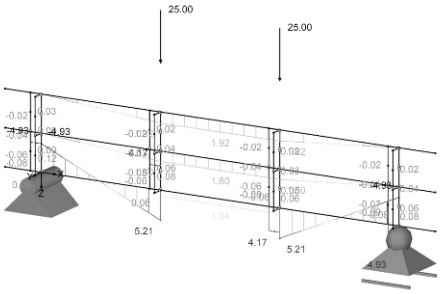
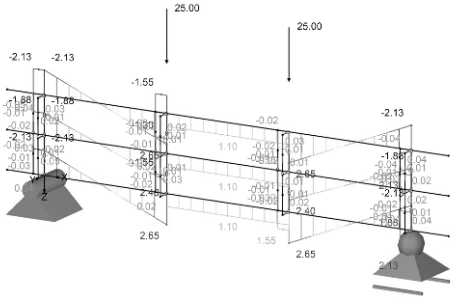
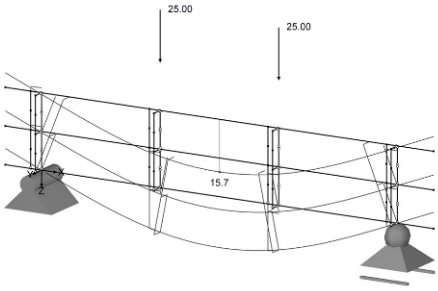
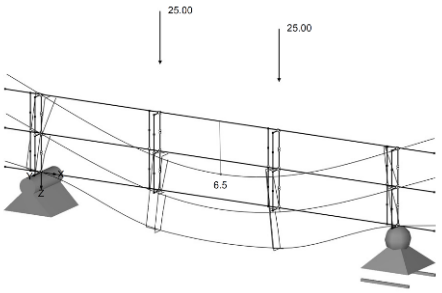
Modell a1	mit diesem Gelenk  altes System a1
Modell a2	ohne dieses Gelenk  altes System a2
Modell b	biegestarrer Anschluss  neues System b

Tabelle 3.64: Vergleich der Ergebnisse für Modell a1, a2 und b am Prüfträger 1 für den ZK

Normalkraft N [kN] a1 – alt N = 0 kein Verbund	
Normalkraft N [kN] a2 – alt N_{oben}: Druck N_{unten}: Zug Verbund	
Normalkraft N [kN] b – neu N_{oben}: Druck N_{unten}: Zug Verbund	

Biegemoment M [kNm] a1 – alt	 volle Momente ($M_i = M_{ges}/3$), kein Verbund $EI_{ges} = 3\ EI_i$
Biegemoment M [kNm] a2 – alt M_{oben}: klein M_{mitte}: klein M_{unten}: groß	 Momente sehr unterschiedlich
Biegemoment M [kNm] b – neu	 Momente ähnlich, Verbund durch kleinere Momente erkennbar, Sprünge im Verlauf wenig sinnvoll
Verformung w [mm] a1 – alt	 kein Verbund, Einzeldurchbiegung der Gurte
Verformung w [mm] a2 – alt	 Verbundwirkung vorhanden, unterer Gurt verformt sich jedoch deutlich anders

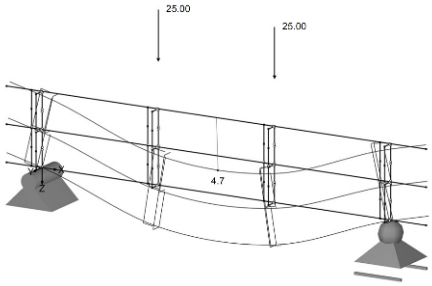
Verformung w [mm] b – neu	 Verbundwirkung vorhanden, gemeinsame Verformung, Verformung sehr gering

Tabelle 3.65: Vergleich der Ergebnisse zu unterschiedl. Verbindungen des ZK am Prüfträger 1 anhand RStab-Modell b und Infograph

	A Schrauben	B Bolzen	E geklebt	W weich
u_{RSTAB} [mm] (Feldmitte)	4,7 mm	9,5 mm	2,3 mm	15,7 mm
EI_{ef}	8,636 * 10^{11} Nmm²	4,273 * 10^{11} Nmm²	17,648 * 10^{11} Nmm²	2,585 * 10^{11} Nmm²
„Weichheit“ γ	0,40	0,11	1 (per Definition)	0 (per Definition)
„Bolzenstab“ M, V (Rstab)	V_y = 18,96 kN (M_z = 2,13 kNm)	V_y = 11,39 kN M_z = 0,96 kNm	V_y = 20,72 kN (M_z = 2,16kNm)	(V_y = 0,14 kN) (M_z = 0,10 kNm)
„E_{90}-Stab“ M, N (Rstab)	M_y = 0 kNm N = - 16,4 kN	M_y = 0 kNm N = -17 4 kN	M_y = 0 kNm N = -16,4 kN	M_y = 0 kNm N = -16,4 kN
$u_{Infograph}$ [mm] (Feldmitte)	7,23 mm	14,47 mm	2,06 mm	15,81 mm
EI_{ef}	5,614 * 10^{11} Nmm²	2,805 * 10^{11} Nmm²	19,704 * 10^{11} Nmm²	2,567 * 10^{11} Nmm²
„Weichheit“ γ	0,18	0,01	1 (per Definition)	0 (per Definition)
„Bolzenstab“ M, V (Infograph)	V_y = 9,21 kN M_z nicht vorh.	V_y = 1,26 kN M_z = 0,04 kNm	V_y = 19,70 kN M_z = 0,14 kNm	V_y = 0,00 kN M_z = 0,00 kNm
„E_{90}-Stab“ M, N (Infograph)	M_z schwer ablesbar N = -13,64 kN	M_z schwer ablesbar N = -18,06 kN	M_z = 1,215 kNm N = -17,69 kN	M_z schwer ablesbar N = -16,60 kN
Bolzenzugkraft N_B	M_z = 0,41 kNm N_B = -3,39 kN aus Schrauben	N_B = 0,00 kN	N_B = 5,10kN	N_B = 0,00 kN

Zu Tabelle 3.65:

Hier sind die Auswertungen der RStab-Berechnungen für das Modell b im Vergleich zum Infographmodell für den Prüfträger 1 mit jeweils unterschiedlichen Verbindungsmitteln zusammengestellt. Die Modellierung des Prüfträgers 1 mit geklebter (starrer) Fuge bzw. keinem Verbindungsmittel (weiche Fuge) zeigt sowohl im RSTAB- als auch im Infograph-Modell übereinstimmende Verformungen, so dass auf diese Weise die obere und untere Grenze der Verbundwirkung beschrieben werden kann.

Das Infograph-Modell zeigt für die Bolzenverbindung kaum und für die Schraubenverbindung zu geringe Verbundwirkung im Vergleich zu den Ergebnissen aus den Versuchen. Das RStab-Modell bildet eine zu große Verbundwirkung für die Bolzen- und Schraubenverbindung ab.

Auch die Modellierung des Prüfträger 2 (siehe Abb. 3.360) mit geklebter (starrer) Fuge bzw. keinem Verbindungsmittel (weiche Fuge) am Trägerrand zeigen sowohl im RStab- als auch im Infograph-Modell übereinstimmende Verformungen, so dass so die obere und untere Grenze der Verbundwirkung beschrieben werden kann.

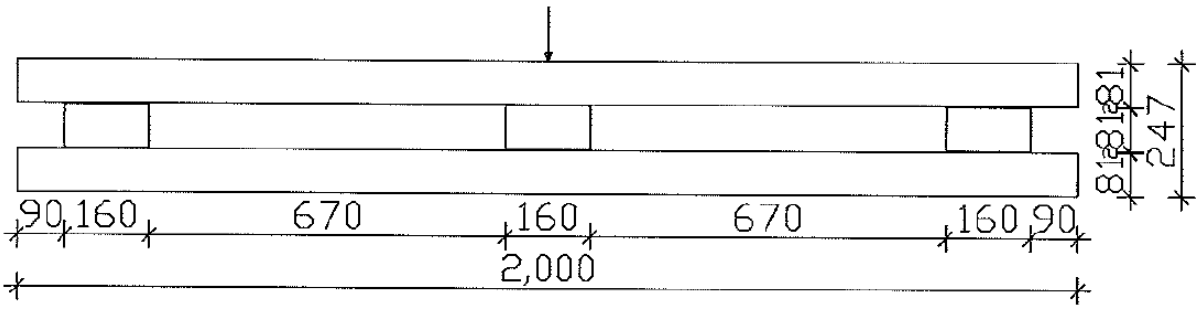


Abb. 3.360: Prüfträger 2, aus 3-Punkt-Biegeversuch mit losem Abstandsholz in Trägermitte und Verbindungsmitteln im Trägerrandknoten

Die Durchbiegungen sind im Infograph-Modell bei der Schrauben- und Bolzenverbindung geringfügig größer als im RStab-Modell. Bei der Auswertung der Schnittgrößen beider Abbildungssysteme (also für Prüfträger 1 und Prüfträger 2) lassen sich die Schubkräfte bei allen Verbindungsarten in ähnlicher Größenordnung ablesen. Die Erfassung der Druckkräfte in der Verbundfuge ist in Infograph gut, jedoch in RStab zu gering.

In den durchgeführten Biegeversuchen an nachgiebig verbundenen Trägern aus zwei und drei Gurten (siehe Kap. 3.3.2.2) wurden Verformungen in Feldmitte gemessen. Die Ergebnisse der Abscherversuche an drei- und fünfteiligen Scherproben (siehe Kap. 3.3.2.3) dienten dabei vorwiegend der Steifigkeitsermittlung eines einzelnen Knotenpunktes. In den Berechnungsmodellen (RSTAB) sind die in Biege- bzw. Abscherversuchen ermittelten Steifigkeiten angesetzt worden. Die Biegesteifigkeiten wurden aus den Biegeversuchen übernommen, bei den Verschiebungsmoduln waren unterschiedliche Versuche zu berücksichtigen. Dies waren:

Schrauben: unverstärkt, 3-teilige Scherprobe: 38.000 N/mm
verstärkt, 3-teilige Scherprobe: 33.000 N/mm

Die kleineren Werte bei verstärkten Proben erscheinen nicht sinnvoll. Sie waren wahrscheinlich durch Vorbohren mit zu großem Durchmesser bedingt und wurden im Folgenden nicht weiter berücksichtigt.

Bolzen: unverstärkt, 3-teilige Scherprobe: 18.000 N/mm
verstärkt, 3-teilige Scherprobe: 38.000 N/mm

In Tabelle 3.66 ist abschließend der Vergleich der Versuchswerte (Verformungen in Feldmitte) der einzelnen Proben mit den jeweiligen Berechnungsergebnissen aus der RStab-Berechnung für das Modell b zusammengefasst. Im Ergebnis zeigt sich, dass die Träger mit dem Verbindungsmittel „schräge Schrauben“ im Modell größere rechnerische Durchbiegungen aufweisen als in den Versuchen gemessen wurden. Das heißt, sie sind im Berechnungsmodell tendenziell zu weich formuliert. Dieser Effekt verstärkt sich bei den Proben unter Verwendung von verstärkten Gurten (Gurte mit KHP-Lamellen, vgl. Proben K S10-1 und K S10-2). Für den Bolzen als Verbindungsmittel in den Knoten der Träger liegen die rechnerisch ermittelten Verformungen der unverstärkten und der verstärkten Gurte sehr nahe an den gemessenen Verformungen in den Versuchen (vgl. Proben Fi B24-1 und Fi B24-2, K B24-1 und K B24-2). Die Grenzwertbetrachtung zu den geklebten Verbindungen (steif) in den Knoten der Träger (Probe Fi Leim) wird rechnerisch tendenziell zu steif abgebildet und liefert daher eine kleinere Durchbiegung als im Versuch.

Tabelle 3.66: Vergleich der Verformung in Feldmitte aus den Versuchswerten mit denen im RStab-Modell b ermittelten Werten

Probe	Kraft [kN]	Versuch Verformung lt. IWA [mm]	Versuch Verformung lt. vic [mm]	RSTAB max. Verformung [mm]	RSTAB Verformung unten [mm]	RSTAB $_{max}$ / vic	In RSTAB angesetzter Verschiebungsmodul K_{ser}
2gurtige Prüfträger							
Fi S10-1	16	3,12	3,60	3,92	3,73	109 %	38.000 N/mm
Fi S10-2	16 24	3,24 5,05	3,55 5,32	4,00 6,00	3,82 5,72	113 %	38.000 N/mm
Fi B24-1	16	5,43	5,95	5,93	5,76	100 %	18.000 N/mm
Fi B24-2	16	5,66	5,97	5,71	5,52	96 %	18.000 N/mm
Fi Leim	16	2,74	2,67	2,44	2,26	91 %	keine Feder, starr
K B24-1	16 24 40	3,12 5,04 8,90	4,03 6,04 10,06	4,00 6,00 10,00	3,82 5,73 9,55	99 %	38.000 N/mm
K B24-2	16 24 32	2,89 4,45 6,09	3,59 5,39 7,19	4,03 6,05 8,07	3,86 5,79 7,72	112 %	38.000 N/mm
K S10-1	16 24 40	2,23 3,45 5,90	2,61 3,92 6,54	3,16 4,75 7,91	2,99 4,49 7,49	121 %	33.000 N/mm
K S10-2	16 24 40	2,29 3,63 6,25	2,61 3,91 6,51	3,17 4,75 7,92	2,99 4,48 7,47	121 %	33.000 N/mm
3gurtige Prüfträger							
Fi3 B24	16 24 40	4,04 6,26 10,41	4,32 6,49 10,81	3,71 5,56 9,27	3,40 5,11 8,51	86 %	18.000 N/mm
K3 B24	24 40 60	4,17 7,03 10,33	4,64 7,73 11,60	4,24 7,07 10,60	3,80 6,33 9,49	91 %	38.000 N/mm

Zusammenfassung:

Für die Modellierung des Zwischenknotens im Pilotprojekt Hess-Innenhofüberdachung wurde letztlich das Modell b gewählt, da dieses die Verbundwirkung am besten erfasst. Die notwendigen Eingaben für den Verschiebungsmodul K_{ser} der verwendeten schrägen Schrauben als Verbindungsmittel wurden der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung entnommen. Für die Schnittgrößen der „Bolzenstäbe“ aus dem Bypassstabsystem und damit der Bemessung der gewählten Verbindungsmittel liegt dies auf der sicheren Seite, da die größten Momente und Querkräfte in den „Bolzenstäben“ entstehen. Für die Bemessung der Gurte – sowohl im Grenzzustand der Tragfähigkeit als auch im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit – wurde darauf geachtet, die Ausnutzung unterhalb von etwa 80% zu halten, da die Gefahr besteht, dass Modell b die Verbundwirkung zu stark abbildet und die Momente und Verformungen der Gurte daher nicht auf der sicheren Seite liegen (die Normalkräfte hingegen sind auf der sicheren Seite, haben jedoch untergeordneten Einfluss auf die Auslastung). Der optische Nachteil des an jedem (Zwischen-)Knoten springenden Momentenverlaufes wurde in Kauf genommen (zum qualitativen Vergleich wurde hier das alte Modell a1 herangezogen). Die entstehenden großen Momente in den „Bolzenstäben“ sind jedoch fiktiv. Für die Bemessung der Schrauben wurden diese nicht herangezogen, da die schrägen Schrauben nur axial belastet werden. Für die Bemessung der Bolzen in den Kreuzungsknoten liegen sie auf der sicheren Seite, unterscheiden sich jedoch nur unwesentlich von Modell a1, so dass nicht die Gefahr bestand, die Bolzen zu ungünstig zu behandeln.

3.8.4.4.4 Fazit

Wie beschrieben ist eine der Wirklichkeit nahe kommende Modellierung sehr aufwändig. Das Ziel, mit der Modellierung exakte Schnittgrößen für sämtliche Einflüsse wie die Verdrehbehinderung durch die Bolzensicherung und die Verschiebesteifigkeit infolge des Verschiebungsmoduls K_{ser} zu erhalten, konnte nicht vollständig umgesetzt werden. Zwangsläufig treten Unterschiede zwischen Modell und Realität auf. So bestand beispielsweise das bereits angesprochene Problem, im Bypasssystem mindestens eine eigentlich unerwünschte Festhaltung bzw. Einspannung vorzusehen, um ein stabiles Gesamtsystem zu erhalten.

Die vorgestellte Lösung (Modell b) ermöglicht die Bemessung der Holzbauteile und Verbindungen mit ausreichender Sicherheit. Da der Vergleich mit den Versuchen zeigte, dass das Modell die Verbundwirkung bei Schraubenverbindungen teilweise zu stark abbildet (Abweichungen von 20 %, vgl. Tabelle 3.66), wurde bei der Bemessung der Holzbauteile darauf geachtet, die Auslastung unter 80 % zu halten.

3.8.4.5 Versuche

Autoren: Petra Kubowitz (IaFB), Robert Putzer (ISH), Rensteph Thompson (Hess)

3.8.4.5.1 Biegeträger und Abscherversuche

Autor: Petra Kubowitz (IaFB)

Zur Ermittlung realistischer Steifigkeitskennwerte der nachgiebig verbundenen Dachkonstruktion mit teilweise verstärkten Knotenpunkten und teilweise verstärkten Diagonalgurten sowie zur Überprüfung und Optimierung der vorgenommenen Modellierung wurden verschiedene Versuche an kleinen Bauteilen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Versuche sind natürlich nicht nur für das Pilotprojekt selbst relevant sondern grundsätzlich auf nachgiebig verbundene Bauteile mit verstärkten Verbindungen übertragbar. Wegen der Vielzahl der diesbezüglich durchgeführten Versuche wurden diese einem eigenen Arbeitspaket zugeordnet und sind in Kap. 3.3.2 beschrieben. Für Modellierung und Bemessung der Schirmkonstruktion sind folgende Versuche relevant:

- Abscherversuche an drei- und fünfteiligen Scherproben (siehe Kap. 3.3.2.3)
  Ergebnisse der dreiteiligen Prüfkörper in Kap 3.3.2.3.4)
  Ergebnisse der fünfteiligen Prüfkörper in Kap. 3.3.2.3.5

- Biegeversuche an nachgiebig verbundenen Trägern aus zwei und drei Gurten (siehe Kap. 3.3.2.2)
  Ergebnisse der Biegeprüfungen in Kap. 3.3.2.2.3

Die Ergebnisse der Abscherversuche dienten dabei vorwiegend der Steifigkeitsermittlung eines einzelnen Knotenpunktes. So wurde die Steifigkeit für die Zwischenknoten mit schrägen Schrauben an unverstärkten und mit KHP verstärkten Proben ermittelt. Die Steifigkeit für die Kreuzungsknoten mit Passbolzen wurde an unverstärkten Proben, an mit Patches verstärkten Verbindungsbereichen und an mit KHP verstärkten Proben ermittelt. Damit konnten für alle Knotenpunkte der Dachkonstruktion Federn errechnet werden, um die Nachgiebigkeit zu simulieren.

Die Ergebnisse der Biegeversuche an zwei- und dreigurtigen Trägern wurden vor allem zur Überprüfung der Modellierung genutzt (vgl. Kap. 3.8.4.4 und 3.8.4.4.3). Die Nachgiebigkeiten der einzelnen Knoten flossen hier natürlich ein.

3.8.4.5.2 Versuchskörper für die Überdachung „Hess-Schirm“

Autor: Jan Fandler (Hess)

Zur Untersuchung des Tragverhaltens der Dachtragstruktur wurden im Vorfeld bereits Materialproben angefertigt, deren Anschlüsse im Tragverhalten geprüft wurden. Nunmehr wurde zur Untersuchung des Tragverhaltens des Tragrostes des Daches ein Ausschnitt der Tragkonstruktion gewählt.

Zur Prüfung war ein gekrümmter Biegeträger aus drei Gurten für einen Zwei-Punkt-Biegeversuch herzustellen. Aufgrund des Versuchsaufbaus war somit ein dreigurtiger Träger mit 4 Kreuzungsknotenpunkten (2 Knoten zur Auflagerung und 2 Knoten zur Lasteinleitung) sowie acht weiteren Zwischenknoten anzufertigen.

Die Anfertigung des Bogenbinders erfolgte gemäß der zuvor angefertigten Skizze des IaFB. Um den gewünschten, gebogen verleimten Aufbau aus drei Brettschichtholzbindern zu erzielen, wurden die jeweils 81 mm hohen Querschnitte aus je drei Lamellen keilgezinkter Lärche der Festigkeitsklasse GL28h verleimt.

Da die Gurte jeweils im Abstand von 81mm zueinander liegen, wurden bei der Verleimung im Formpressbett Zwischenlagen mit Trockenfugen, zu je einer Gesamtstärke von 81 mm, eingelegt, so dass die verleimten Gurte formgenau hergestellt werden konnten und später ein eigenspannungsfreier Zusammenbau der Knoten ermöglicht wurde.



Abb. 3.361: Dreigurtiger Bogenbinder für Versuchszwecke

Bei Umsetzung solch einer Bauweise des Trägerrostes wäre es durch die Anordnung der Zwischenlagen möglich, diese ebenfalls aus je 3 Lamellen zu verleimen und somit wirtschaftlich und exakt die Gurte der zweiten Tragrichtung (bei Annahme gleicher Bauteilkrümmung) des Tragrostes herzustellen.



Abb. 3.362: Draufsicht Kreuzungsknoten

3.8.4.5.3 Bauteilversuch Diagonalträger im Hess-Schirm

Autor: Robert Putzger (ISH)

An einem Ausschnitt der Dachkonstruktion, einem etwas verkürzten Diagonalträger mit den vorgesehenen Gurten, Kreuzungs- und Zwischenknoten, wurde ein Biegeversuch mit verschiedenen Laststufen durchgeführt. Die Last wurde mittels einer 1 m langen Stahltraverse von der Prüfmaschine auf den Probekörper geleitet, damit entspricht der Versuch einem 4-Punkt-Biegeversuch. Auf Grund der großen Trägerlänge musste der Unterbau der zur Verfügung stehenden Prüfmaschine mittels zweier von Hess gefertigter BSH-Träger (18x36 cm) auf 5,5 m Länge vergrößert werden.

Die Verformung wurde in Probekörpermitte mit IWAs sowie zusätzlich über die gesamte Probekörperlänge mit Hilfe eines optischen Messsystems Vic3D bestimmt (vgl. Abb. 3.364). Grundsätzlich ist bei der Interpretation der Ergebnisse der Verformungsmessungen, insbesondere der Vorzeichen der Messwerte, darauf zu achten, dass in der Versuchseinrichtung die Lasteinleitung in Trägermitte das unverschiebliche Widerlager darstellt. Während des Versuches fährt der Unterbau nach oben und drückt so an den Auflagern am Rand gegen den Biegeträger.

Abb. 3.363 zeigt das Kraft-Wegaufnehmer-Diagramm des Hess-Binders. Die IWA 11, 21 und 31 (lila, blau und orange) zeigen die vertikale Verformung in der Mitte des Binders. Die IWA 41 und 51 (rot und grün) zeigen die horizontale Verformung des Binders auf der linken Seite. In magenta ist der Traversenweg dargestellt.

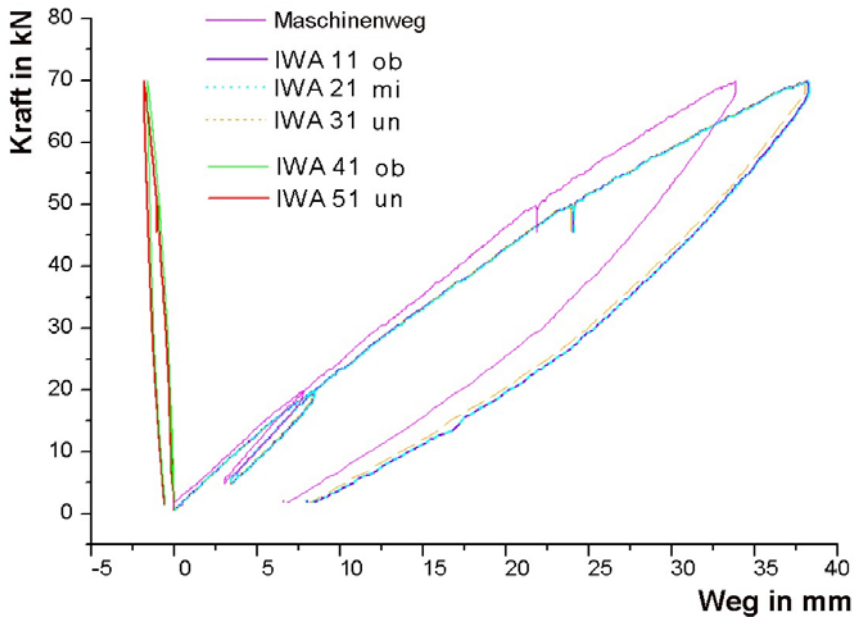


Abb. 3.363: Kraft-Weg-Diagramm des Binders (Hess-Schirm)

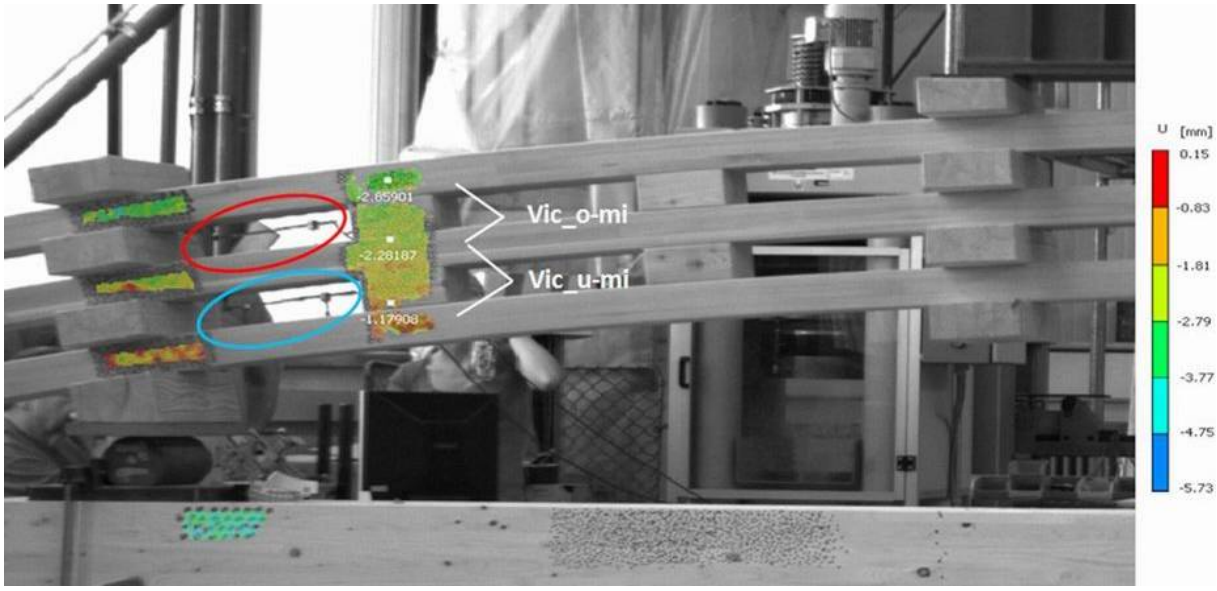


Abb. 3.364: Verformungsmessung mittels VIC und horizontalen ISA (farbige Kreise)

Abb. 3.364 zeigt die Verformungsanalyse (Verschiebung in horizontaler Richtung) mit Vic3D an der linken Seite des Hess-Binders bei F_{max}. Im roten Kreis ist der obere Wegaufnehmer (IWA41) zu sehen, im blauen Kreis der untere Wegaufnehmer (IWA51). *Vic_o-mi* ist die relative Verschiebung des Binders analog zum oberen Wegaufnehmer und entspricht der Differenz der Verformungswerte des oberen und des mittleren Punktes. *Vic_u-mi* ist die relative Verschiebung des Binders analog zum unteren Wegaufnehmer und entspricht der Differenz der Verformungswerte des mittleren und des unteren Punktes.

In Tabelle 3.67 sind die Werte der Wegaufnehmer mit den Werten der Verformungsanalyse Vic3D vergleichend dargestellt. Die roten Zahlen entsprechen den Differenzen beider Messverfahren.

Tabelle 3.67: Vergleich der Relativverschiebung (U) von IWA und Vic3D; linke Seite des Binders

Kraft von max F	[kN]	IWA 41 oben (rot) [mm]	IWA 51 unten (blau) [mm]	VIC – Verformungsanalyse [mm] Linke Trägerhälfte oben-Mitte	unten-Mitte	Diff IWA-VIC oben [mm]	unten [mm]
0 %	0						
25 %	17	0,2	0,3	0,2	0,2	**0,0**	**0,1**
50 %	36	0,6	0,6	0,6	0,7	**0,0**	**-0,1**
75 %	52	1,0	1,1	0,8	0,8	**0,2**	**0,3**
100 %	70	1,6	1,8	0,8	0,9	**0,8**	**0,9**

Entsprechende Bezeichnungen siehe Tabelle 3.41



Abb. 3.365: Bestimmung der vertikalen Durchbiegung V mittels Verformungsanalyse Vic3D

Abb. 3.365 zeigt die Ermittlung der Durchbiegung (vertikale Verschiebung) des Binders mittels Verformungsanalyse Vic3D. Hinter dem Balken in Höhe der drei Punkte sind die Wegaufnehmer angebracht (IWA 31=unterer Wegaufnehmer, IWA 21=mittlerer Wegaufnehmer, IWA 11=oberer Wegaufnehmer). Die drei Verformungswerte wurden analog zu den Werten der Wegaufnehmer ermittelt. Um die absolute Verschiebung ermitteln zu können, wurden die Verformungswerte mit einem Referenzpunkt am unteren Balken verrechnet. Die Differenzwerte *Ref-Vic_u_mi_o* wurden zum Vergleich beider Messverfahren jeweils dem unteren, mittleren und oberen Wegaufnehmer zugeordnet.

In Tabelle 3.68 sind die Werte der Wegaufnehmer mit den Werten der Verformungsanalyse Vic3D vergleichend dargestellt. Die roten Zahlen entsprechen den Differenzen beider Messverfahren.

Tabelle 3.68: Vergleich der absoluten Durchbiegung (V) von IWA und Vic3D Mitte des Binders

Kraft von max F	[kN]	IWA 31 unten [mm]	IWA 21 Mitte [mm]	IWA 11 oben [mm]	Ref VIC – Verformungsanalyse Ref [mm]	unten [mm]	Mitte [mm]	oben [mm]	Diff IWA-VIC IWA 31 [mm]	IWA 21 [mm]	IWA 11 [mm]
0 %	0										
25 %	17	7,60	7,57	7,56	-8,15	7,09	7,06	7,02	**0,51**	**0,51**	**0,54**
50 %	36	16,08	16,18	16,12	-16,08	14,7	14,71	14,64	**1,38**	**1,47**	**1,48**
75 %	52	25,37	25,52	25,47	-24,42	23,58	23,57	23,47	**1,79**	**1,95**	**2,00**
100 %	70	37,95	38,22	38,15	-33,27	33,31	33,28	33,19	**4,64**	**4,94**	**4,96**

IWA 31/21/11: unterer/mittlerer/oberer Wegaufnehmer (vgl. Abb. 3.363)
Ref VIC: Referenzpunkt am unteren Balken (vgl. Abb. 3.365)
Ref-VIC un/mi/ob Differenz der Verformungswerte aus unterem/mittlerem/oberem und Ref-Punkt (vgl. Abb. 3.365)
Diff IWA-VIC: Differenz beider Messverfahren

3.9 Entscheidungsorientierte Umweltleistungsmessung – Ökobilanzierung

3.9.1 Allgemeines

Autor: Christian Manthey (BU)

Die Ökobilanzierung ist im Vergleich zu den Ingenieurwissenschaften oder der BWL im Allgemeinen eine noch recht junge Teildisziplin, die fachübergreifend anwendbar ist. Um Umweltauswirkungen von Produkten, Dienstleistungen oder auch Unternehmen beurteilen zu können, wurde Ende des 20. Jahrhunderts die Methode der Ökobilanzierung entwickelt. Das Europäischen Komitee für Normung (CEN) veröffentlichte erstmalig 1997 das dabei anzuwendende Verfahren in der Norm EN ISO 14040 und fügte in den Folgejahren drei weitere Normen (EN ISO 14041, 14042 und 14043) hinzu. Im Jahr 2006 wurde die Normenreihe in den überarbeiteten Fassungen auf die Versionen DIN EN ISO 14040 (Grundsätze und Rahmenbedingungen) [71] und DIN EN ISO 14044 (Anforderungen und Anleitungen) [72] reduziert. Für die Übernahme der Norm auf nationaler Ebene sind die jeweiligen Normungsinstitute verantwortlich, in Deutschland ist dies der "Normenausschuss Grundlagen des Umweltschutzes (NAGUS)" im Deutschen Institut für Normung (DIN).

Es gibt zwei wesentliche Herangehensweisen an eine Ökobilanz. Zum einen kann auf die "potentiellen Umweltauswirkungen eines spezifischen Produktsystems" fokussiert werden, zum anderen können durch vergleichende Studien die Umweltauswirkungen von möglichen (zukünftigen) Änderungen zwischen alternativen Produktsystemen untersucht werden. [71] Für das Arbeitspaket der Ökobilanzierung wurde ein Hybridansatz dieser beiden Herangehensweisen verfolgt, es sollten sowohl die potentiellen Auswirkungen der Untersuchungsobjekte untersucht werden als auch unterschiedliche Alternativen miteinander verglichen werden. Dabei standen während des Projektes vor allem zwei Objekte im Mittelpunkt: Zum einen die (bewehrten) Formholzprofile (Kapitel 3.9.3) und zum anderen das Pilotprojekt „Fußgängerbrücken“ mit dem Bau der Brücken am Hummelweg, Henzesteg und Bäkepark (Kapitel 3.9.2), die eine detaillierte Betrachtung und Analyse der Umweltleistung erfahren haben. Darüber hinaus wurden weitere Untersuchungsobjekte untersucht, die in Kapitel 3.9.4 zusammengefasst werden.

Um mit Hilfe der Ökobilanzierung die Umweltleistung von bestimmten Untersuchungsobjekten (im Projekt von verschiedenen Produkten) über deren gesamten Lebenszyklus abzubilden, ist es zunächst notwendig, sämtliche von der Produktion bis zur Entsorgung des Objekts anfallenden Stoff- und Energieströme als physikalische Größen zu erfassen. Grundsätzlich ist bei einer Ökobilanz der gesamte Lebensweg "von der Wiege bis zur Bahre" ("Cradle-to-grave") eines Produktes zu betrachten. Man unterscheidet die drei Lebenszyklusphasen Produktion, Nutzung und End of Life (Entsorgung, Wiederverwendung und/oder Recycling). Dabei werden sämtliche Teilschritte "von der Rohstoffgewinnung und -erzeugung über die Energieerzeugung und Materialherstellung bis zur Anwendung, Abfallbehandlung und endgültigen Beseitigung" [72] in die Bilanzierung mit einbezogen. Abweichend davon kann die Methodik der Ökobilanz auch nur auf gewisse Teilaspekte eines Lebenszyklus angewandt werden. So findet man Studien, die lediglich die Produktionsphase, also die Bilanz "von der Wiege bis zum Werkstor" ("Cradle-to-gate") erstellen. Diese dürfen im Sinne der Norm jedoch nicht als Ökobilanzstudien bezeichnet werden, zusätzlich wird eine ausführliche Begründung für die Durchführung einer solchen Studie gefordert. Abb. 3.366 veranschaulicht den Ablauf der während der einzelnen Lebenszyklusphasen anfallenden Rohstoffbedarfe, Energieverbrauche und anfallenden Emissionen sowie deren indirekte Wirkung auf die Umwelt (externe Effekte).

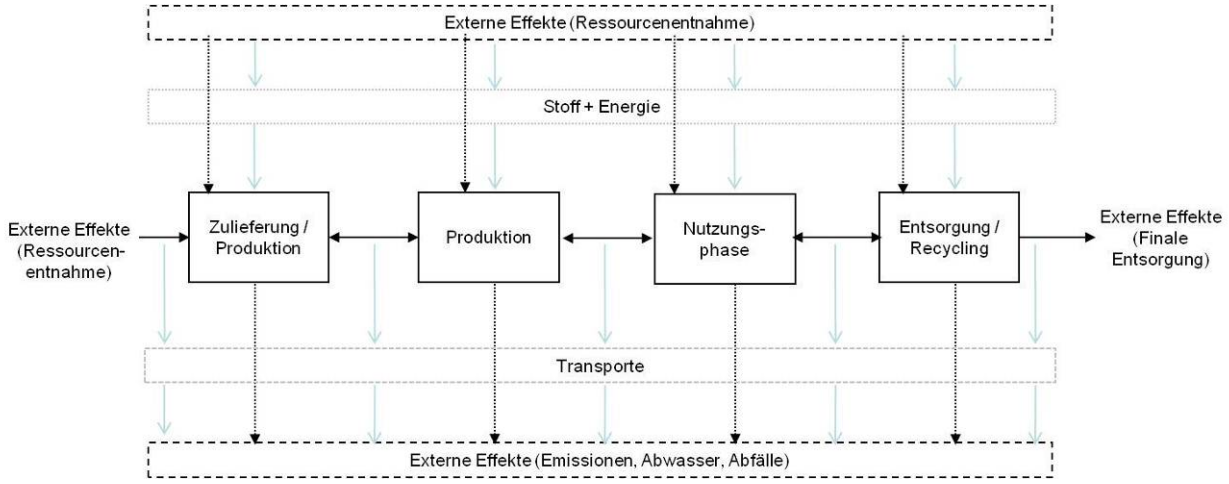


Abb. 3.366: Lebenszyklusphasen und externe Effekte

Die in der sogenannten Sachbilanz gesammelten Daten der Stoff- und Energieverbrauche müssen dann hinsichtlich ihrer potentiellen ökologischen Folgen (z.B. Erderwärmungspotential, Ressourcenverbrauch u.a.) bewertet werden. Eine derzeit in der öffentlichen Diskussion vielzitierte Sonderform der vereinfachten Ökobilanz ist der sogenannte CO_2-Fußabdruck (engl. Carbon Footprint). Dieser bildet alle im Verlaufe des Produktlebenszyklus verursachten CO_2-Emissionen ab, die z.B. durch den Energieverbrauch bei der Produktion, während der Nutzungsphase und durch die Entsorgungsprozesse entstehen. Diese sogenannte eindimensionale Methode bildet jedoch nur potentielle Umweltauswirkungen (externe Effekte) hinsichtlich des potentiellen Beitrags zur Erderwärmung (gemessen in der verursachten Menge CO_2) ab. Für eine genauere Betrachtung der potentiellen Umweltauswirkungen müssen auch andere sogenannte Wirkungskategorien untersucht werden. Dies geschieht im Teilschritt der Wirkungsabschätzung, die weiter unten näher erläutert wird. Darin werden die verbrauchten Stoff- und Energiemengen bzw. die direkt oder indirekt verursachten Emissionen nach verschiedenen Berechnungsverfahren (Wirkungsabschätzungsmethoden) potentiellen Umweltauswirkungen in einem definierten Satz von Wirkungskategorien zugeteilt. Es existieren verschiedene Verfahren der Wirkungsabschätzung, denen unterschiedliche Herangehensweisen zu Grunde liegen. Neben dem oben beschriebenen Carbon footprint ist an dieser Stelle die am "Centrum voor Milieukunde“ in Leiden (Niederlande) entwickelte CML-Methodik [290] zu nennen, die im Verlauf des Projekts zum Einsatz kam.

Sachbilanz und Wirkungsabschätzung werden umrahmt von zwei weiteren Schritten. Das Verfahren gliedert sich - in Anlehnung an in die Norm - demnach in vier Schritte:

1. Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmens
2. Sachbilanz
3. Wirkungsabschätzung
4. Auswertung

Diese Teilschritte sind iterativ durchzuführen und können im Laufe des Verfahrens erweitert bzw. angepasst werden. Sie werden nachfolgend in Unterkapiteln einzeln näher erläutert und finden sich auch in den Detailberichten zu den Brücken und den Profilen wieder.

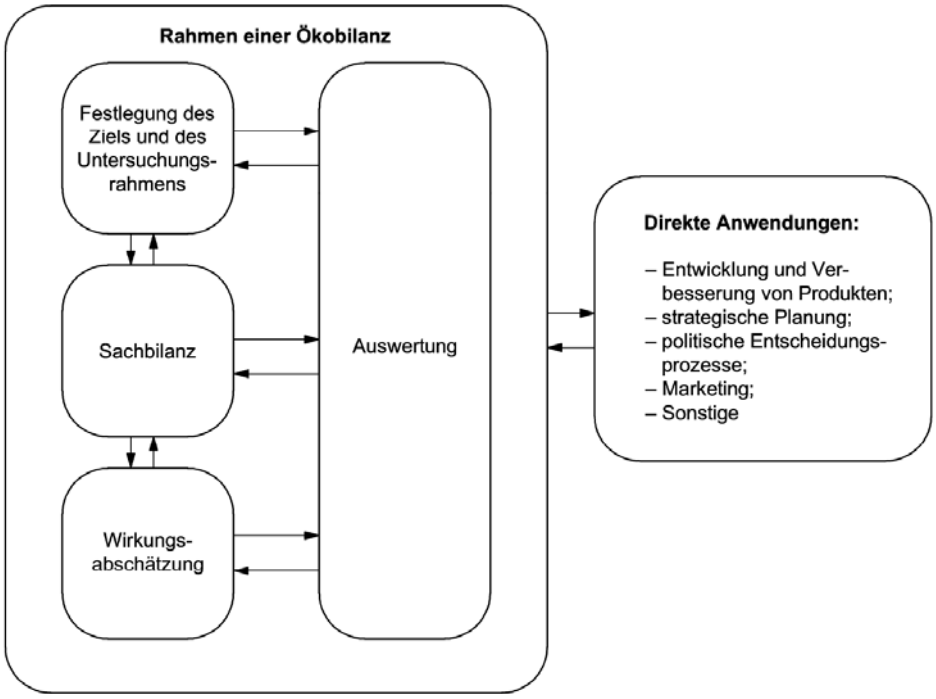


Abb. 3.367: Phasen der Ökobilanzierung [71]

3.9.1.1 Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmens

Für das Ziel der Studie sind die beabsichtigte Anwendung, die Gründe für die Durchführung der Studie und die angesprochene Zielgruppe eindeutig festzulegen. Weiterhin ist eine Aussage zu treffen, ob die Ergebnisse in zur Veröffentlichung vorgesehenen vergleichenden Aussagen vorgesehen sind. Der Untersuchungsrahmen umfasst mehrere Kriterien:

3.9.1.1.1 Funktion und funktionelle Einheit

Für die späteren Ergebnisse hinsichtlich der vom Produkt ausgehenden Umweltauswirkungen ist eine eindeutige und messbare Bezugsgröße zu definieren, auf die die Ergebnisse bezogen werden können. Hierzu dient die funktionelle Einheit. Bei Vergleichen zwischen unterschiedlichen Systemen ist eventuell eine entsprechende Referenzflussgröße zu definieren, die den Funktionen der Funktionellen Einheit zu entsprechen hat und so eine angemessene Vergleichsbasis sicherstellt.

3.9.1.1.2 Systemgrenze

In Übereinstimmung mit den definierten Zielen der Studie ist festzulegen, welche Prozessmodule im Rahmen der Ökobilanz erfasst werden. Werden Lebenswegabschnitte, bestimmte Prozesse, Inputs oder Outputs nicht mit in die Untersuchung einbezogen, so muss dies zusammen mit den entsprechenden Auswirkungen dokumentiert und begründet werden. [72] Bei der Erfassung der Daten sind die Abschneidekriterien eindeutig zu beschreiben und ihre Auswirkungen auf das Gesamtergebnis abzuschätzen. Als wesentliche zu kombinierende Kriterien werden Masse, Energie, und Umweltrelevanz genannt. Dazu ist der Beitrag eines bestimmten Inputs bzw. Outputs zur Gesamtmasse, zum Gesamtenergieverbrauch und zur umweltrelevanten Auswirkung zu untersuchen. Liegen die ermittelten Beiträge jeweils unterhalb einer zu definierenden Grenze (z.B. prozentuale Einflussnahme auf die Kriterien in Bezug auf das gesamte Produktionssystem), können die Input- und Outputgrößen aus der Betrachtung heraus genommen werden.

3.9.1.1.3 Wirkungsabschätzungsmethoden

Unter dem Aspekt der Systemgrenze sind auch die Grenzen bei der Abschätzung der Umwelteinwirkungen zu umreißen, d.h. das gewählte Verfahren der Wirkungsabschätzung ist anzuge-

ben. Dabei sind Wirkungskategorien, Wirkungsindikatoren und Charakterisierungsmodell zu benennen.

3.9.1.1.4 Datentypen und -quellen

Grundsätzlich ist es möglich, Daten selbst zu erheben oder auf bereits vorhandene Daten aus anderen Quellen zurückzugreifen, woraus in der Praxis eine Mischung aus gemessenen, errechneten oder geschätzten Daten entstehen kann. Hinsichtlich der Datenqualität müssen Anforderungen festgelegt sein, dabei zu berücksichtigende Kriterien sind in der DIN EN ISO 14044 [72] im Detail beschrieben.

3.9.1.1.5 Vergleiche zwischen Systemen

Bei einem geplanten Vergleich zwischen Systemen muss die Definition des Untersuchungsrahmens die Vergleichbarkeit der Systeme sicherstellen, d.h. sämtliche Kriterien sind auf die zu vergleichenden Systeme in analoger Form anzuwenden. Davon abweichende Ausnahmen sind zu dokumentieren. Ist die Studie zur Veröffentlichung vorgesehen, muss eine kritische Prüfung durch interessierte Kreise durchgeführt werden. Dazu muss innerhalb des Untersuchungsrahmens festgelegt sein, wer diese kritische Prüfung durchführt, wie diese Prüfung erfolgt und welchen Grad an Sachkenntnis die prüfende Instanz hat.

3.9.1.2 Sachbilanz

Die Ermittlung der Sachbilanz, insbesondere die Datensammlung für die input- und outputseitigen Stoff- und Energieflüsse ist als der wohl aufwändigste Schritt der Ökobilanzierung anzusehen. [291] Nachdem im vorherigen Schritt die produktspezifischen Zusammenhänge geklärt und ein Grundverständnis für die Prozessabläufe hergestellt wurde, konnte mit der genaueren Untersuchung der Teilschritte begonnen werden. Für die Untersuchungsobjekte waren bereits für die verschiedenen Phasen des Lebenszyklus die durchzuführenden Produktionsprozesse und deren Teilschritte geklärt, nun mussten die Stoff- und Energieflüsse für diese Teilschritte der Lebenszyklusphasen bilanziert, d.h. für jeden Prozessschritt detailliert aufgelistet werden. So wurden die Grundvoraussetzungen für die Bewertung der Stoff- und Energieflüsse im Rahmen des nächsten Schritts, der Wirkungsabschätzung sichergestellt. Die Grundregel der Datenerhebung "Messen - Berechnen - Schätzen" [71] sollte dabei als Reihenfolge der Priorität beachtet werden, d.h. wann immer es möglich war, sollten eigene Messungen für Produktionsprozesse durchgeführt werden. Sollte eine Messung der Stoff- und Energieflüsse nicht in Frage kommen, so wurde als zweitbeste Lösung die (literaturgestützte) Berechnung und als dritte und letzte Alternative eine Schätzung der benötigten Werte durchgeführt. In der Praxis stellte sich sehr schnell heraus, dass die Messung der notwendigen Daten zum einen schwer durchführbar und zum anderen auch als nicht immer zielführend anzusehen war. Die Durchführbarkeit war schwer machbar, da Bauteile entweder bereits produziert waren (z.T. durch den etwas späteren Einstieg der BU in das Projekt) oder in absehbarer Zeit nicht wieder produziert werden sollten. Vor allem standen aber auch organisatorische und damit finanzielle Hürden einer solchen Erhebung entgegen, die einem Aufwand-Nutzen-Vergleich nur schwer hätten Stand halten können. Eine solche "individuelle" oder auch standortspezifische Messung hätte aber auch den Nachteil mit sich gebracht, dass generelle Aussagen über die Eigenschaften der Umweltleistungsmessung nur schwer hätten eingeschätzt werden können. So war es in vielerlei Hinsicht von Vorteil, dass auf die umfangreiche Datenbank "ecoinvent" des "Swiss Centre for Life cycle Inventories" (www.ecoinvent.ch) zurückgegriffen werden konnte. Hier konnten für den europäischen Raum anerkannte, allgemeingültige Datensätze für zahlreiche Produkte und Prozesse als Referenz dienen und auf die projektspezifischen Bedürfnisse angepasst werden. Die Datenbank stellte sich im Laufe des Projekts als wesentliche Datenquelle heraus und wurde somit zur Grundlage für die Umweltleistungsmessung aller Untersuchungsobjekte.

3.9.1.3 Wirkungsabschätzung

Es existiert eine Vielzahl von Wirkungsabschätzungsmethoden, die für diesen Schritt jeweils eigene Bewertungsverfahren zu Grunde legen. Zu Beginn der Projektphase wurde auf Grund seiner einfachen Auswertungsmöglichkeiten noch der eindimensionale "Eco-indicator99" für die vorläufige Bewertung der Umweltauswirkungen genutzt, der sämtliche Umweltauswirkungen in einer einzigen Zahl ausdrückt. Die wesentlichen Einflussgrößen der Untersuchungsobjekte konnten so bereits identifiziert werden. Für die weitere Untersuchung war es jedoch von Interesse, aktuellere und genauere Daten im Rahmen der Wirkungsabschätzung zu produzieren. Daher wurde auf mehrdimensionale Methoden fokussiert und die CML Methodik als wissenschaftlich anerkannte und etablierte Methodik ausgewählt. Durch die Mehrdimensionalität dieser Methode konnte auch die DIN EN ISO 14044 Konformität gewährleistet werden, die nach der Entscheidung für eine kritische Prüfung in Anlehnung an die Norm ebenfalls zwingend gefordert war. Die CML-Methode liefert ein breites Spektrum an möglichen Indikatoren, daher wurden in Anlehnung an die Regeln für Umweltproduktdeklarationen (Product Category Rules, PCR) für Holzwerkstoffe [294] und für Baumetalle [295] ein Indikatorsatz ausgewählt, der aktuell und auch zukünftig Vergleiche mit anderen zertifizierten Bauprodukten ermöglicht. Der in den genannten Regeln geforderte Indikatorsatz beinhaltet neben den Kennzahlen zum regenerativen und fossilen Primärenergieverbrauch [MJ] die Kennzahlen Erderwärmungspotential [CO2 eq], Versauerungspotential [SO2 eq], Eutrophierungspotential [PO4], Ozonabbaupotential [R11 eq], Sommersmogpotential [Ethen eq]. Auf Anraten der externen Gutachter (Peer Review) wurde zusätzlich der Indikator zum abiotischen Ressourcenabbau [kg Sb eq] hinzugefügt.

Es lag auch hier wieder in der Natur der Ökobilanzierung, dass sämtliche in den Vorketten der Inputstoffe anfallenden Ressourcenverbräuche zu bilanzieren waren und somit eine nur schwer zu handhabende Zahl von Stoff- und Energieflüssen in Betracht zu ziehen war. Da die Prozesse und Produkte bis auf die elementarste Ebene zu untersuchen und zu bilanzieren sind und diese Stoffe und Elemente dann in ihren spezifischen Größenordnungen jeweils einer bestimmten oder mehreren Wirkungskategorien zuzuordnen sind, und in diesen dann noch mit elementspezifischen bzw. stoffspezifischen Gewichtungsfaktoren zu einem Ergebnis zusammenzuführen sind (vgl. Beispiel zur Berechnung der CO_2-Äquivalente weiter unten), wurde eine softwaregestützte Berechnung der Ergebnisse im Rahmen der Wirkungsabschätzung gewählt. Daher wurde frühzeitig die Anschaffung einer aktuellen Software mit aktualisierten Berechnungssetups für die einzelnen Wirkungsabschätzungsmethoden beschlossen. Die Entscheidung bei der Wahl der Software fiel auf die Software SimaPro (die neben einer Reihe von aktuellen Berechnungssetups auch die preisgünstigste Alternative darstellte). So wurde sichergestellt, dass die zahlreichen und fehleranfälligen Berechnungsschritte automatisiert durchgeführt werden konnten.

Für Ökobilanzstudien ist nach der Norm bereits bei der Definition des Ziels und Untersuchungsrahmens das gewählte Verfahren der Wirkungsabschätzung anzugeben. Dabei sind Wirkungskategorien, Wirkungsindikatoren und Charakterisierungsmodell zu benennen. In den nachfolgenden Untersuchungen werden in Anlehnung an die derzeitige Praxis die potentiellen Auswirkungen für die folgenden Wirkungskategorien und Indikatoren berechnet:

- Regenerativer Primärenergieverbrauch [MJ] (EE, Verbrauch Erneuerbarer Energien)
- Fossiler Primärenergieverbrauch [MJ] (NRE, Nicht Regenerativer Energieverbrauch)
- Erderwärmungspotential [CO_2 eq] (GWP, Global Warming Potential)
- Versauerungspotential [SO_2 eq] (AD, Acidification Potential)
- Eutrophierungspotential [PO_4] (EP, Eutrophication Potential)
- Ozonabbaupotential [R11 eq] (ODP, Ozone Layer Depletion Potential)
- Sommersmogpotential [Ethen eq] (POCP, Photochemical Oxidation Potential)
- Abiotischer Ressourcenabbau [kg Sb eq] (ADP, Abiotic Depletion Potential)

Die beiden erstgenannten Indikatoren zum Energieverbrauch werden mit Hilfe des "Cumulative Energy Demand", einer Zusammenführung mehrerer Herangehensweisen zur Berechnung der Methode zum Kumulierten Energieaufwand, berechnet. Die Berechnung der restlichen Indikato-

ren beruht auf der an der Universität Leiden entwickelten CML-Methode, die sich an dem in der Norm geforderten Ablauf orientiert. Dieser Ablauf der Wirkungsabschätzung nach Norm ist in Abb. 3.368 zusammengefasst.



Abb. 3.368: Bestandteile der Wirkungsabschätzung nach DIN EN ISO 14040 [71]

Für die im ersten Schritt geforderte Auswahl geeigneter Wirkungskategorien, über die der mögliche Schaden für die Umwelt darzustellen ist, liefern die bereits genannten Regeln für Umweltproduktdeklarationen Empfehlungen, die einen bestimmten Satz definierter Wirkungsindikatoren definieren. Auch bei der Auswahl eines geeigneten Modells muss die Wahl der Wirkungsabschätzungsmethode benannt werden (z.B. CML Methode, Ökologische Knappheit, etc.), die ein wissenschaftlich fundiertes Berechnungsverfahren zu Grunde legt. Bei der Anwendung dieses Berechnungsverfahrens werden die Bestandteile der Sachbilanz (Energie, Emissionen, etc.) den einzelnen Wirkungskategorien (z.B. Beitrag zum Treibhauseffekt) zugeordnet, in denen sie einen Schadensbeitrag leisten könnten. Das über die gewählte Methode definierte Charakterisierungsmodell beschreibt eben diese Berechnungsverfahren, mit dem dieser potentielle Schaden ermittelt und über einen Wirkungsindikator (z.B. kg CO_2-Äquivalente, [kg CO_2eq]) ausgedrückt werden kann. Verschiede Stoffe gehen dabei mit unterschiedlicher Gewichtung in das Ergebnis ein. So hat z.B. 1 kg Methan (CH_4) die 25fache Wirkung im Vergleich zu 1 kg $C0_2$ und geht dementsprechend auch mit der 25fachen Gewichtung in die Berechnung des Wirkungsindikators ein. Für eine angenommene Sachbilanz, die 1 kg CO_2 und 1 kg CH_4 auflistet, wären für die Wirkungskategorie "Beitrag zum Treibhauseffekt" entsprechend 26 kg CO_2eq als Ergebnis zu berechnen. Nach analogem Schema werden in anderen Wirkungskategorien (z.B. Versauerungspotential, Eutrophierungspotential, etc.) für andere Stoffe und Emissionen ebenfalls entsprechende Wirkungsindikatoren ([kg SO_2eg], [kg PO_4eq]) berechnet. Der so erhaltene Satz von Wirkungsindikatorwerten stellt das Ergebnis der Wirkungsabschätzung dar und versucht, die potentiellen Umweltauswirkungen des Untersuchungsobjekts in Zahlen auszudrücken. Laut Norm ist ausdrücklich darauf hinzuweisen, dass dies "keine Voraussagen über Auswirkungen auf die Wirkungsendpunkte, Schwellenwertüberschreitungen, Sicherheitsspannen oder Risiken machen" kann [72], der tatsächlich verursachte Schaden damit also nicht beziffert werden kann.

Als optionaler Bestandteil der Wirkungsabschätzung kann u.a. eine so genannte Normalisierung der Ergebnisse der einzelnen Wirkungskategorien vorgenommen werden. Dabei wird die absolute Menge in Bezug gebracht zu einer emittierten Menge der gleichen Kategorie, die über einen gewissen Zeitraum in einer bestimmten Region (z.B. im Jahr 1995 in Westeuropa) emittiert worden ist. Der so erhaltene Index kann zwar immer noch keine Aussagen darüber liefern, wie groß die verursachten Umweltauswirkungen wirklich sind oder wo der meiste Schaden entstehen könnte, er ermöglicht es jedoch, Aussagen zu treffen, wie groß der Beitrag zu der jeweiligen Wirkungskategorie ist, und erlaubt Vergleiche, in welchen Wirkungskategorien dieser relative Beitrag am größten ist.

3.9.1.4 Auswertung

Anhand der kurzen Ausführungen in der Norm zur letzten Phase der Ökobilanzierung, der Phase der Auswertung, sollen die hier auftretenden Möglichkeiten und Einschränkungen anhand einiger Zitate verdeutlicht werden.

"Die Auswertungsphase sollte Ergebnisse liefern, die mit dem festgelegten Ziel und Untersuchungsrahmen übereinstimmen und die zur Ableitung von Schlussfolgerungen, Erläuterung von Einschränkungen und zum Aussprechen von Empfehlungen dienen." [72] Hier sind vor allem die Leistungstreiber zu nennen, also diejenigen Bauteile, Stoffe oder auch Lebenszyklusphasen, die die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung maßgeblich beeinflussen. Aufgabe ist es demnach, diejenigen Input- und Outputgrößen herauszustellen, die die Umweltleistung des Untersuchungsobjekts am stärksten negativ beeinflussen, und somit für weitere Entwicklungen das ökologische Optimierungspotential des Produkts aufzuzeigen. Gleichfalls können so auch die relevanten Wirkungskategorien identifiziert werden, also die Bereiche, in denen mit den größten Umweltauswirkungen zu rechnen ist.

"Die Auswertung ist auch dazu vorgesehen, in Übereinstimmung mit der Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens der Studie eine leicht verständliche, vollständige und in sich schlüssige Darstellung der Ergebnisse einer Ökobilanz zu liefern." [72] Dies ist auch vor dem Hintergrund zu sehen, dass die Ergebnisse einer Ökobilanz insbesondere auch zur "Information von Entscheidungsträgern in Industrie, Regierungs- oder Nichtregierungsorganisationen (z. B. bei der strategischen Planung, Prioritätensetzung, Produkt- oder Prozessentwicklung oder entsprechenden Neuentwicklung)" gedacht ist [72], und somit in möglichst aggregierter Form Ergebnisse liefern sollten. Dies ist jedoch nicht immer umsetzbar wie weiter unten beschrieben wird (Stichworte Mehrdimensionalität und Unsicherheiten). Der klassische Konflikt zwischen Aggregation von Daten und dem damit zwangsläufig einhergehenden Informationsverlust zeigt sich insbesondere beim Thema Unsicherheiten. Die Notwendigkeit, die Ergebnisse mehrerer (sieben) Wirkungsindikatoren gleichzeitig zu betrachten, erschwert eine "einfache" Form der Ergebnisdarstellung umso mehr.

Die Analyse hinsichtlich der Umweltauswirkungen eignet sich jedoch nicht nur dazu, "produktintern", d.h. für ein betrachtetes Objekt allein, die Leistungstreiber und entscheidenden Phasen des Lebenszyklus zu identifizieren, sondern auch für einen Vergleich zwischen verschiedenen Konstruktionslösungen. Ein solcher Alternativenvergleich ist grundsätzlich nicht trivial. Besondere Herausforderungen entstehen vor allem in Bezug auf Mehrdimensionalität und Unsicherheiten in folgender Weise:

- Wirkungskategorien / Wirkungsindikatoren: Entsprechend der Idee der Normung existiert nicht eine einzige mögliche Wirkungsabschätzungsmethode, die als Standard definiert werden könnte, sondern eine Reihe von verschiedenen Methoden, aus denen eine geeignete gewählt und die zur Auswertung der Ergebnisse herangezogen werden muss. Je nach Wirkungsabschätzungsmethode können hier unterschiedliche Wirkungskategorien und Indikatoren (unterschiedlich) berechnet und ausgewertet werden. Bereits die Wahl der Methode kann also das Ergebnis beeinflussen. Doch diese Wahlmöglichkeit ist nicht der Ökobilanzierung inhärent, auch in der klassischen Investitionsbewertung hat der Entscheider eine Wahlmöglichkeit zwischen verschiedenen Verfahren, z.B. Kapitalwertmethode, Interner Zinssatz etc.

- Im vorliegenden Fall des in Anlehnung an die Regeln für Produktkategorien für Bauwerke [70] gewählten Indikatorsatzes, der auf Basis der Wirkungsabschätzungsmethode CML berechnet wurde, wurden acht verschiedene Kategorien und deren Wirkungsindikatoren ausgewertet. Dabei kann der Fall eintreten, dass beim Vergleich zweier alternativer Produkte die Ökobilanzen in jeweils vier Kategorien für das eine und in den vier anderen Kategorien für das andere Produkt sprechen. So muss beim Vergleich zweier oder mehrerer Produkte nicht zwangsläufig ein eindeutiges Ergebnis für eine dominante Alternative sprechen.
- Lebenszyklusphasen: Innerhalb der Wirkungskategorien sind wiederum verschiedene Phasen des Lebenszyklus von unterschiedlich großem Einfluss und müssen analysiert werden. In den Phasen wiederum sind Teilprozesse zum Teil von größerem, zum Teil von geringerem Einfluss. So kann der Einsatz eines bestimmten Stoffes in einer Kategorie große Auswirkungen auf die Umwelt verursachen, in einer anderen Kategorie keinen Schaden anrichten. Klare Aussagen hinsichtlich der schädlichsten Stoffe zu machen, wird dadurch weiterhin erschwert.
- Insbesondere die unsicheren Lebenszyklusphasen der Nutzung und des End-of-Life können nur mit Hilfe von Annahmen analysiert werden. Folglich gibt es für diese Phasen auch mehrere mögliche Ergebnisse in Abhängigkeit der Anzahl der betrachteten, auf den Annahmen basierenden Szenarien.
- Verschieden Szenarien müssen auch berechnet werden, wenn sich für ein Produkt verschiedene Alternativen hinsichtlich eines möglichen Stoffes (z.B. verschiedene Harze) ergeben.
- Während der Produktionsprozesse kann es auch zu unterschiedlichen Lösungsmöglichkeiten kommen. So können für einen Prozessschritt mehrere Verfahren (z.B. bei der textilen Bewehrung) mit unterschiedlichen Eigenschaften hinsichtlich der Umweltleistung in Betracht gezogen werden. Auch die Leistungsfähigkeit (funktionelle Einheit) kann dadurch variieren, was einen Vergleich der Alternativen wiederum erschwert.
- Auch können verschiedene Eingangsgrößen stark variieren, d.h. von Unsicherheiten betroffen sein. Es werden daher keine punktuellen Werte oder einfache Zahlenwerte als Ergebnis der Wirkungskategorien ermittelt, sondern eigentlich Schwankungsbreiten, in denen sich das Ergebnis aufhalten kann, und ein dazugehöriger Mittelwert. Dieser Mittelwert wird dann als Ausgangsbasis für die Auswertung der Ökobilanz herangezogen, die Schwankungsbreiten werden in den meisten Fällen nicht kommuniziert.
- Transportwege sind zum Teil nur schwer abschätzbar. Diese sind im Grunde individuell für jedes Produkt zu betrachten, können aber für die gesamte Vorkette nur schwer zurückverfolgt werden. Hier ist eine Mittelung (z.B. wie in der ecoinvent Datenbank gelöst) empfehlenswert.
- Die Lebensdauer eines Produkts und damit der eigentlich anzusetzende Betrachtungszeitraum einer Studie ist nicht genau vorhersehbar. Sie stellen jedoch wichtige Aspekte der Untersuchung dar und müssen bei vergleichenden Ökobilanzen für mehrere Produkte abgeschätzt werden.

Folglich können nicht immer genaue Zahlenwerten bei der Ökobilanzierung im Mittelpunkt stehen, sondern vielmehr Tendenzen. Diese Tendenzen werden im weiteren Verlauf des Berichts dazu genutzt, einen direkten Vergleich zweier oder mehrerer vergleichbarer Alternativen auf Basis einer gleichen funktionellen Einheit anzustellen. Dies konnte nur unter Annahmen bestimmter Voraussetzungen (Lebensdauer, Instandhaltungsmaßnahmen, Entsorgung zum Ende des Lebenszyklus) durchgeführt werden, weshalb in einigen Fällen mehrere Szenarien für die Auswertung durchgespielt werden müssen. So ist z.B. für die Untersuchung der Brücken die Lebensdauer der Bohlen nicht exakt vorhersehbar, weshalb auf Basis bisheriger Erhebungen zur Instandhaltung von Fuß- und Radwegbücken realitätsnahe Abschätzungen getroffen wurden. Diesen Durchschnittswerten werden Worst-Case- und Best-Case-Szenarien gegenübergestellt. Diese Verfahrensweise ermöglicht zum einen eine realistische Abschätzung des mögli-

chen Ergebnisspektrums und zum anderen damit auch eine Einschätzung, ob die unterschiedlichen Größenordnungen der Parameter in Bezug auf das Gesamtergebnis überhaupt von relevantem Einfluss sind. Ist letzteres nicht der Fall, kann auf eine detailliertere Analyse dieser Teilaspekte verzichtet werden.

3.9.2 Ökobilanz Brücken
Autor: Christian Manthey (BU)

3.9.2.1 Ziel und Untersuchungsrahmen

Im Rahmen der Studie sollten die Unterschiede der potentiellen Umweltwirkungen dreier in wesentlichen Funktionen vergleichbarer Varianten von Geh- und Radwegbrücken unterschiedlicher Konstruktionslösungen untersucht werden: a) eine Brücke in herkömmlicher Holzbauweise (Holzbrücke Hummelweg), b) eine aus dem Forschungsvorhaben hervorgegangene Brücke aus einer Hochleitungsholzkonstruktion (Pilotprojekt HHT-Brücke Henzesteg) und c) eine Brücke mit einem aus einer Stahlkonstruktion bestehenden Überbau (Stahlbrücke Bäkepark). Es ist zunächst festzuhalten, dass der Vergleich dieser Brücken keine generellen Rückschlüsse zum Vergleich zwischen Stahl- und Holzkonstruktionen erlaubt, sondern in erster Linie die spezifischen Konstruktionen bilanziert. Als funktionelle Einheit wurde eine Brücke mit einer Lebensdauer von 40 Jahren definiert. Die Lebensdauer der Stahlbrücke wurde in Anlehnung an die Ablöserichtlinie [298] mit 80 Jahren angesetzt, wobei eine Erneuerung des Korrosionsschutzes während dieser Zeit anzunehmen ist.

Die unterschiedlichen Geländer der Brücken werden in den Vergleich nicht mit einbezogen, da diese zum einen nicht im Fokus des Forschungsvorhabens liegen und zum anderen auch willkürlich gewählt bzw. zwischen den Konstruktionen theoretisch auch ausgetauscht werden könnten. Ästhetische Gründe, die z.B. auch gegen einen solchen Tausch sprechen könnten, werden in dieser vergleichenden Untersuchung grundsätzlich außer Acht gelassen.

Die Dimension der Brücken wird nach Bauplanung auf folgende Werten ausgelegt:

- Brückenklasse: Geh- und Radwegbrücke, p = 5,0 kN/m²
- Stützweite (Länge): 7,25 Meter
- Breite zwischen den Geländern: 2,50 Meter
- Brückenfläche: 18,1 m²

Laut Ausführungsplanung der Brücke Bäkepark sind eine Länge von 7,56 m und eine Breite von 2,95 m vorgesehen.[1] Zu Vergleichszwecken wird diese Brücke daher auf die Größe der Vergleichsobjekte Brücke Hummelweg und Brücke Henzesteg herunter skaliert, da diese jeweils eine Länge von 7,25 m und eine Breite von 2,50 m haben. Die Bauteile der Brücke Bäkepark werden für die Modellierung auf die Vergleichsgröße angepasst. Für die Länge des Trägers bedeutete dies eine Multiplikation mit dem Faktor 7,25/7,56 = 0,96, für die Breite der Brücke, d.h. die Länge der Querrohre ergibt sich der Faktor 2,50/2,95 = 0,86. Eine Neuberechnung der Tragfähigkeit hat dabei nicht stattgefunden.

Eine gesonderte Betrachtung finden die im Projekt untersuchten holzbasierten Werkstoffe bzw. die Bauteile, die nach einer besonderen Behandlung oder Verarbeitung in den Konstruktionen verwendet werden. Daher sind die holzbasierten Werkstoffe Kunstharzpressholz (KHP) und das thermisch modifizierte Holz (engl. Thermally Modified Timber, kurz: TMT) von besonderem Interesse und werden im Zuge der Analyse der Brücke Henzesteg näher analysiert.

[1] Die Ausführungsplanung umfasst detaillierte Bauteilbeschreibungen, Querschnitte und weitere grundlegende Planungen der Brücke und ist ersichtlich im Dokument ST-01a-Bäkepark.

Die während der Lebenszeit anfallenden Instandhaltungsmaßnahmen (z.B. Wechsel des Bohlenbelags) werden ebenfalls mit berücksichtigt. Zum Ende des Lebenszyklus werden in dem der Untersuchung zu Grunde liegenden Modell die Stahlbauteile einem Recycling und die Holzbauteile einer energetischen Nutzung in einem Blockheizkraftwerk mit Kraft-Wärme-Kopplung zugeführt. Somit kann im Sinne der Norm von einer vollständigen Lebenszyklusanalyse (Produktion, Nutzung, Entsorgung) gesprochen werden.

3.9.2.2 Erstellung einer Sachbilanz (Input-Output-Bilanz)

Zunächst werden an dieser Stelle die Zusammensetzungen der drei Brücken übersichtsartig aufgelistet (Produktionsphase). Die einzelnen Bestandteile oder "Baugruppen"[2] der Brücken bilden so die Grundlage für die Bewertung der potentiellen Umwelteinwirkungen im darauf folgenden Schritt der Wirkungsabschätzung. Basis für die Zusammensetzung der Brücken ist die Ausführungsplanung der jeweiligen Brücken.

Die in den Tabellen Tabelle 3.69, Tabelle 3.70 und Tabelle 3.71 genannten Bauteile beschreiben die Produktionsphasen der Brücken und bilden die Grundlage für die Modellierung des Lebenszyklus der Brücke. Die dazugehörigen detaillierten Beschreibungen der einzelnen Bauteile können dem Anhang entnommen werden. Die darin aufgelisteten Baugruppen sowie die für die Modellierung in der Software SimaPro verwendeten Datensätze sind ebenfalls in ihrer Zusammensetzung dokumentiert.

Tabelle 3.69: Produktionsphase: Zusammensetzung Brücke Hummelweg

Materialien/Baugruppen			Gesamtgewicht	
Biegeträger, kesseldruckimprägniert, Hummelweg	2	p*	1.004,96	kg
Querträger einzeln Hummelweg	5	p	165,85	kg
1 Satz Belegbohlen Hummelweg, kesseldruckimprägniert	1	p	854,29	kg
Beton für Fundament	6,27	m³	14.954	kg
Edelstahlbleche für Stahlsockel	185	kg	185,00	kg
T-Bleche Hummelweg	10	p	61,80	kg
Bolzen für Träger Hummelweg	1	p	17,40	kg
Distanzstücke für Biegeträger Hummelweg	1	p	22,22	kg
Schrauben für Bohlen Hummelweg	1	p	15,60	kg
Gesamtgewicht Brücke Hummelweg (ohne Beton)**:			**2.327,12**	**kg**

Tabelle 3.70: Produktionsphase : Zusammensetzung der Brücke Henzesteg

Materialien/Baugruppen			Gesamtgewicht	
1 Biegeträger Henzesteg (BSH+KHP)	2	p*	778,50	kg
1 Querträger Henzesteg (BSH+KHP)	5	p	182,05	kg
1 Satz Belegbohlen Henzesteg	1	p	1.332,84	kg
Betonfundament	4,82	m³	11.448	kg
Edelstahlbleche für Stahlsockel	185	kg	185,00	kg
T-Blech Henzesteg	10	p	44,80	kg
Verbindungsbolzen Träger	1	p	17,4	kg
Verbindungsschrauben für Bohlen	1	p	17,2	kg
Gesamtgewicht Brücke Henzesteg (ohne Beton)**			**2.557,79**	**kg**

[2] Dies ist die gängige Bezeichnung für mehrere, zu einer übergeordneten Gruppe zusammengefasste Bauteile in der Software SimaPro, die auch im Laufe des Dokuments verwendet wird.

Tabelle 3.71: Produktionsphase: Zusammensetzung der Brücke Hummelweg

Materialien/Baugruppen			Gesamtgewicht	
Träger Bäkepark	3	p	1.311,51	kg
Rohr Bäkepark	6	p	123,93	kg
1 Satz Belegbohlen, kesseldruckimprägniert, Bäkepark	1	p	789,07	kg
Beton für Fundament	4,28	m3	10.207,80	kg
Edelstahlblech, gewalzt, deutscher Mix 2009	279,48	kg	279,48	kg
Bolzen Träger Bäkepark	1	p	1,44	kg
Schrauben für Bohlen Bäkepark	1	p	7,02	kg
Gesamtgewicht Brücke Bäkepark (ohne Beton)**			**2.512,45**	**kg**

* p steht für "pieces" (engl.), also die Anzahl der Baugruppen, die als Teil der Brücken bilanziert werden. Diese Bezeichnung entspricht der Schreibweise in SimaPro

** Das Gesamtgewicht der Brücke wurde ohne den Beton berechnet, da dieser getrennt angeliefert wird und somit eine gesonderte Berechnung des Transportweges nötig ist (Nutzungsphase).

Zusätzlich zur Produktionsphase sind in Anlehnung an Abb. 3.366 auch die Aufwände der Nutzungsphase und der Entsorgungsphase (End-of-Life) in die Sachbilanz mit aufzunehmen.

- Für die Nutzungsphase ist als wesentlicher Punkt die Instandhaltung zu bilanzieren, im vorliegenden Fall also der vorzusehende Wechsel des Bohlenbelags. Für die Brücke am Hummelweg sind zusätzlich dazu auch der Wechsel der Sperrholzverkleidung sowie zwei Erneuerungen des Anstriches dieser Sperrholzverkleidung zu bilanzieren, für die Brücke am Bäkepark eine Erneuerung des Korrosionsschutzes. Auch die Montage der Brücke (Einheben der Bauteile per Kran) sowie die Transporte (ca. 600 km vom Produktionsstandort Firma Hess zum Brückenstandort in Berlin) sind zu berücksichtigen.
- Für die Entsorgung der Holzbauteile der Brücken wird die durch die Verbrennung der Holzbauteile zurückgewonnene Energie am Ende des Lebenszyklus "gutgeschrieben", also als positiver Effekt bilanziert. Auch das Recyclingpotential der Stahlbauteile wird berücksichtigt, da diese als Eisenschrott fast vollständig wieder dem Produktionskreislauf von Stahl zugeführt werden können.

Einen Überblick über die drei modellierten Brücken und deren Lebenszyklen sowie die dabei bilanzierten Materialien, bzw. Szenarien, die in die Berechnung der Wirkungsabschätzung Eingang gefunden haben, gibt noch einmal Abb. 3.369:



Abb. 3.369: Übersicht Sachbilanz Lebenszyklus der drei Brücken

3.9.2.3 Wirkungsabschätzung und Identifizierung von Leistungstreibern

Die Wirkungsabschätzung wird im Folgenden für unter 3.9.1.3 genannte Wirkungsindikatoren dargestellt. Dazu erfolgt zunächst eine Gegenüberstellung des Ressourcenverbrauchs wobei zwischen nicht regenerativen Energieträgern (NRE) und erneuerbaren Energieträgern (EE) unterschieden wird. Dazu werden die Ergebnisse in den Wirkungskategorien der CML-Methode präsentiert. Zunächst werden die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung für den gesamten Lebenszyklus (Produktion, Nutzung und Entsorgungsphase) dargestellt. Dabei wird auf die so genannten Standardszenarien zurückgegriffen, d.h. es wird von einer Lebensdauer von 15 Jahren für jeglichen Bohlenbelag ausgegangen. Somit sind zwei Wechsel des Bohlenbelags über die Lebensdauer von 40 Jahren vorgesehen, die mit in die Bewertung einfließen. Da für die Stahlbrücke eine längere Lebensdauer (80 Jahre) vorgesehen ist, wird im weiteren Verlauf jeweils nur die Hälfte der Auswirkungen für den Vergleich mit den Holzbrücken mit einer Lebensdauer von 40 Jahren herangezogen. Auf den Ergebnissen der kompletten Lebenszyklusuntersuchung aufbauend werden die im Rahmen des Projekts wichtigsten Bauteile und Lebenszyklusphasen nach und nach im Detail untersucht.

3.9.2.3.1 Vergleich des gesamten Lebenszyklus (40 Jahre Lebensdauer) der drei Brücken

Abb. 3.370 zeigt den Ressourcenverbrauch in Megawattstunden [MWh] über den gesamten Lebenszyklus der drei Brücken. Auf der linken Seite zeigen sich für alle drei Brücken negative Beträge, also positive Auswirkungen in der Kategorie NRE. Somit sind für alle Brücken insgesamt Einsparpotentiale für fossile Energieträger zu erwarten. Diese können durch die Verbrennung von Holzbauteilen (also auch der während des Lebenszyklus ausgewechselten Bohlen) und die dadurch ermöglichte Substitution fossiler Energieträger zu Stande kommen (dies wird weiter unten noch näher erläutert). Das größte Einsparpotential zeigt die Brücke in herkömmlicher Holzbauweise (Hummelweg), das geringste die Stahlbrücke (Bäkepark).

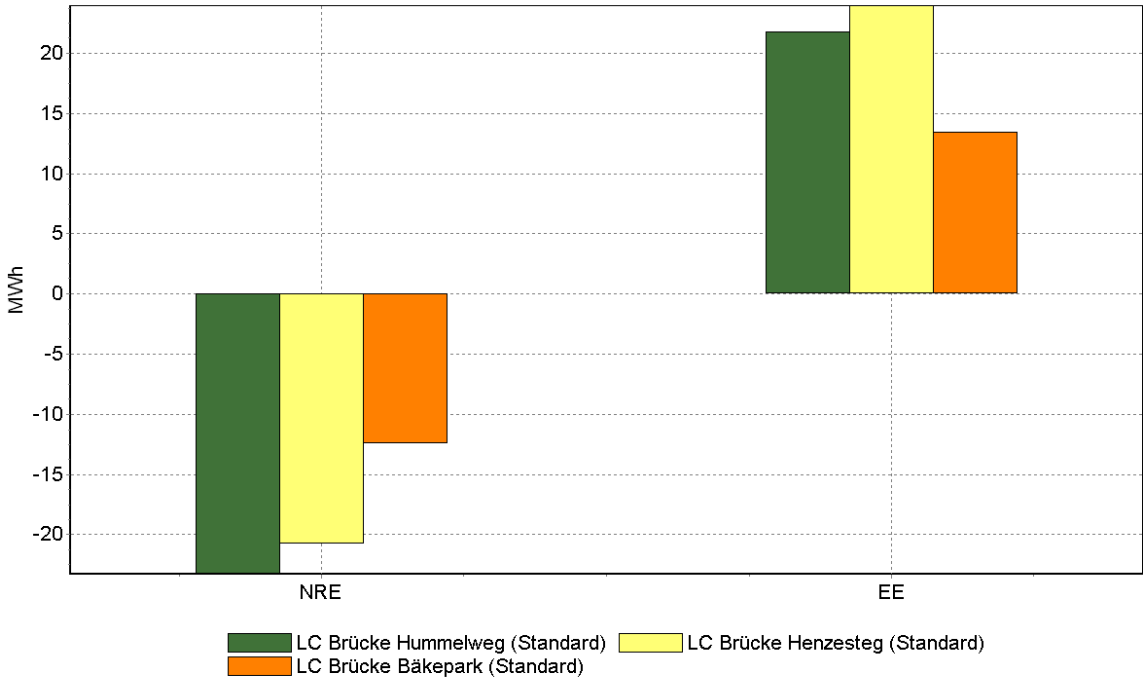


Abb. 3.370: Ressourcenverbauch: Lebenszyklus der drei Brücken (Standardszenario)

In der Kategorie EE zählt auch das eingesetzte Holz als Verbrauch erneuerbarer Energieträger, was die erhöhten Werte für die Holzbrücken erklärt - hier ist auch das Tragwerk aus Holz. Die Werte innerhalb dieser Kategorie sind im Falle des als Material eingesetzten Holzes nicht als direkter Verbrauch zu interpretieren, sondern vielmehr als Inanspruchnahme von gespeicherten Energiereserven zu verstehen, die über den Brennwert angerechnet werden. Daher zeigt auch die HHT-Brücke noch höhere Werte als die Brücke in gewöhnlicher Holzbauweise, da für das KHP ein zusätzlicher Verbrauch an Holz (Furnierholzlagen) berechnet werden muss.

Die Auswertung mit Hilfe der CML-Methode zeigt folgende Ergebnisse:

Tabelle 3.72: CML Werte gesamter Lebenszyklus der drei Brücken

Wirkungskategorie	Einheit	Hummelweg	Henzesteg	Bäkepark
ADP	kg Sb	-43,60	-39,82	-22,91
AP	kg SO2	7,10	6,85	6,74
EP	kg PO4	1,63	1,63	1,33
GWP	kg CO2	-4.988	-4.793	-2.871
ODP	kg CFC	-6,87E-04	-7,62E-04	-3,78E-04
POCP	kg C2H4	0,232	0,747	0,399

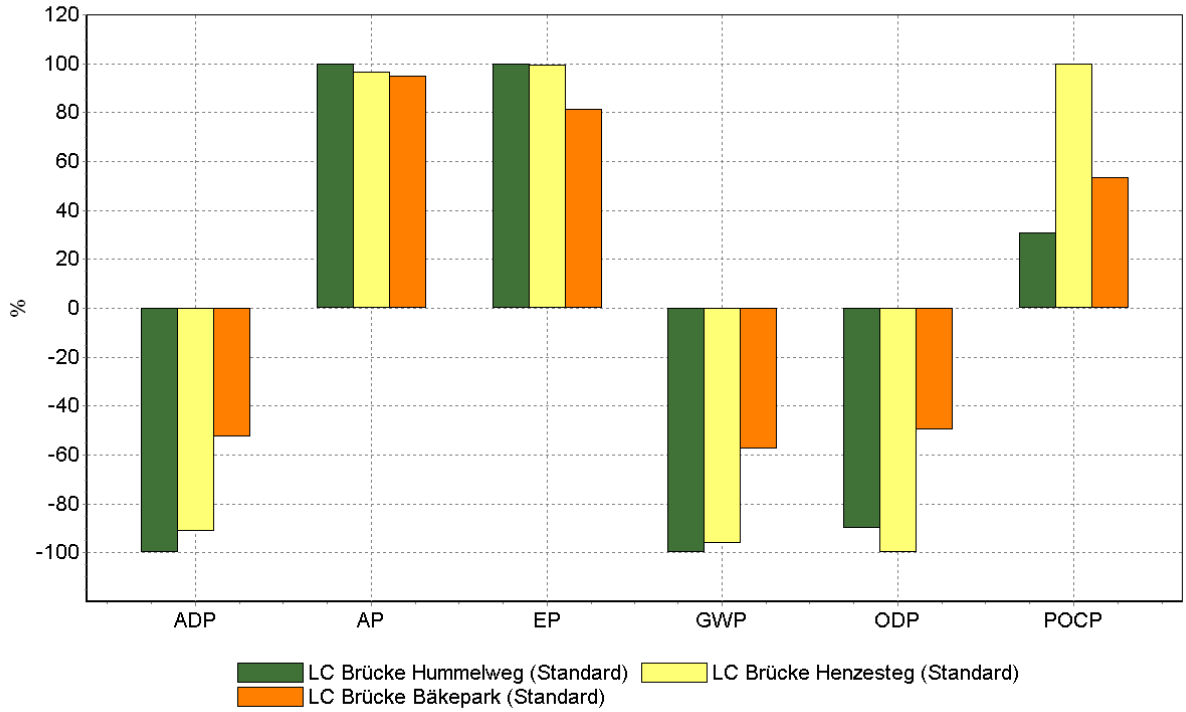


Abb. 3.371: CML: Lebenszyklus der drei Brücken (Standardszenario)

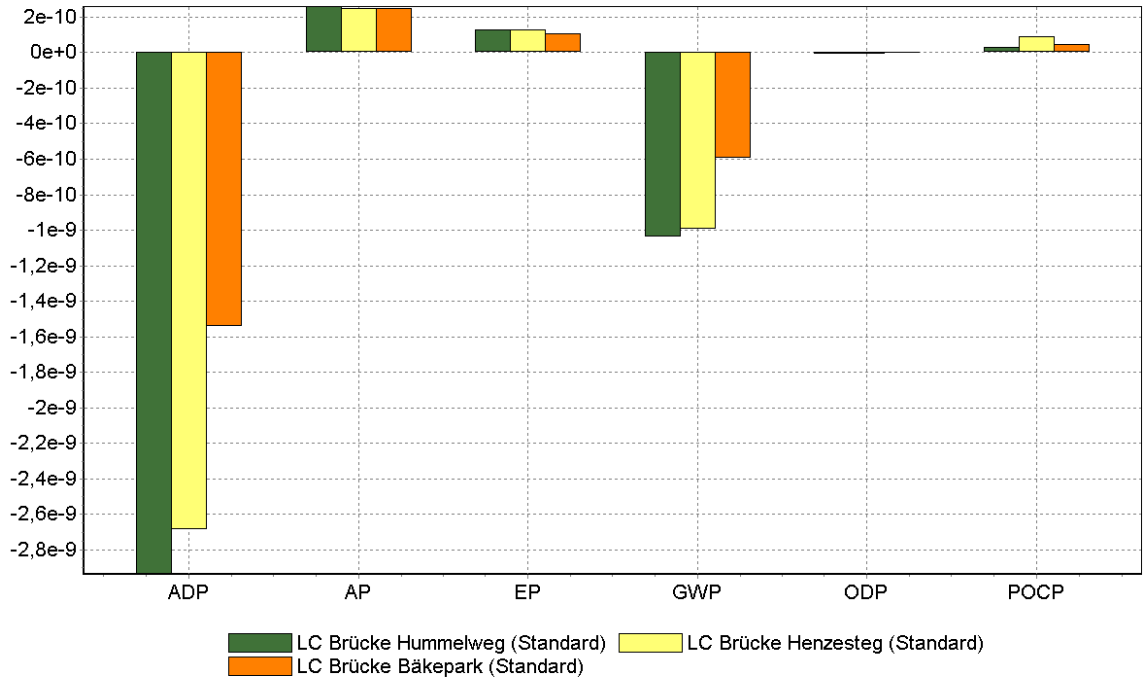


Abb. 3.372: CML: Lebenszyklus der drei Brücken (Standardszenario) - normalisiert

Zunächst bedarf die Form der Darstellung in Abb. 3.371 einer Erklärung: Da hier sechs unterschiedliche Kategorien mit ihren unterschiedlichen Einheiten darzustellen sind, werden nicht absolute sondern relative Werte in der jeweiligen Kategorie dargestellt. Der jeweils größte Be-

trag in einer Wirkungskategorie wird auf 100% skaliert, die Werte der beiden anderen Brücken werden entsprechend geringer dargestellt. Die absoluten Werte sind in Tabelle 3.72 dargestellt.

So ist im Vergleich der drei Brücken in der Kategorie GWP für die Brücke Hummelweg mit dem größten Einsparpotential zu rechnen, für die Brücke am Bäkepark mit dem geringsten. In den Kategorien AP und EP dagegen ist für die Holzbrücken mit mehr Emissionen zu rechnen als für die Stahlbrücke. Hier sind vor allem die bei der Verbrennung von Holz entstehenden Emissionen als typische Verursacher anzuführen. [297] Bemerkenswert aus Projektsicht sind die Ergebnisse in den Kategorien ODP und POCP. Hier zeigt die Brücke am Henzesteg das größte Einsparpotential (ODP) bzw. das größte Belastungspotential. Eine genauere Analyse der größten Einflussgrößen in den einzelnen Kategorien bedarf der nun folgenden detaillierten Betrachtung der drei Brücken im Einzelnen.

3.9.2.3.2 Analyse Lebenszyklus Brücke Hummelweg

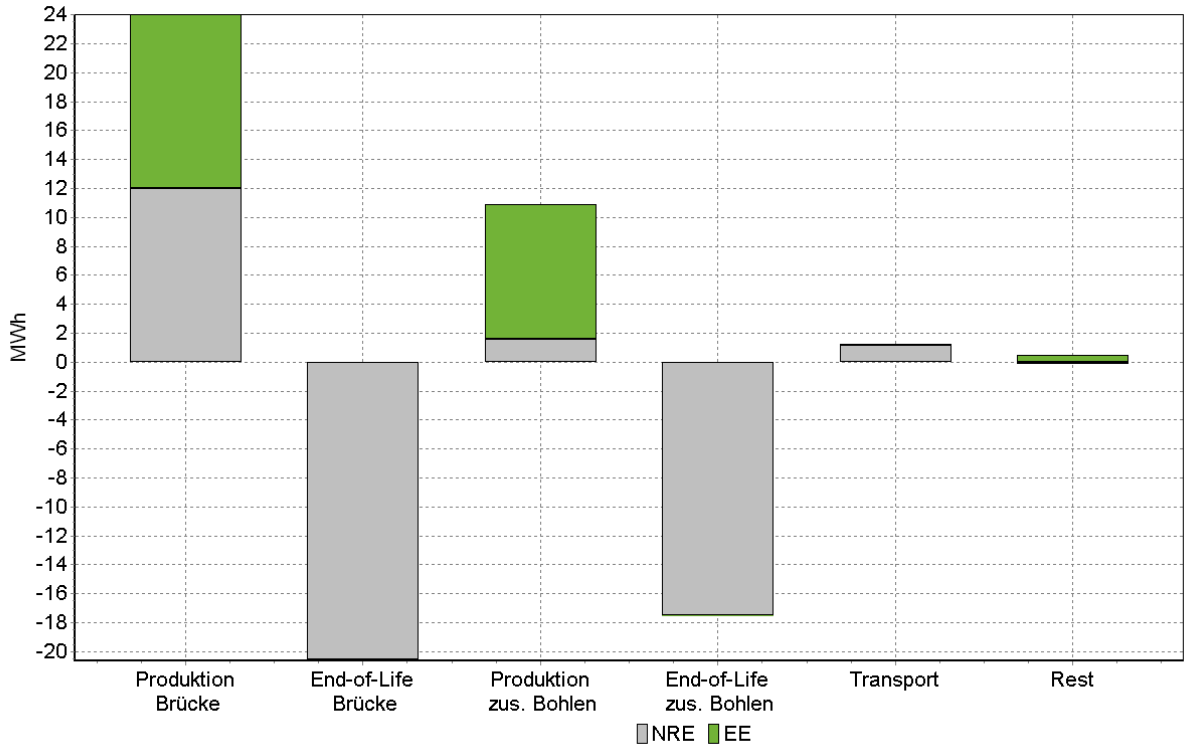


Abb. 3.373: Ressourcenverbauch: Lebenszyklus Brücke Hummelweg (Standardszenario)

Tabelle 3.73: Ressourcenverbrauch: Lebenszyklus Brücke Hummelweg (Standardszenario)

	Einheit	Total	Produktion Brücke	End-of-Life Brücke	Produktion zus. Bohlen	End-of-Life zus. Bohlen	Transport	Rest
NRE	MJ	-84.219	43.272	-74.111	5.725	-62.954	4.327	-478
EE	MJ	78.423	43.189	-162	33.614	-78	45	1.815

In der obigen Darstellung ist für die Lebenszyklusphasen Produktion und End-of-Life der Ressourcenverbrauch zweigeteilt dargestellt, in grau die nicht erneuerbaren (NRE) und in grün die erneuerbaren Energieträger. Aus den während der Nutzungsphase bilanzierten Aufkommen ist der Transport inkl. der Krannutzung (die, wie der detaillierten Sachbilanzierung zu entnehmen ist, zu wesentlichen Teilen auch durch den zurückzulegenden Anfahrtsweg bestimmt ist) zur

gesonderten Betrachtung herausgelöst worden, die anderen Posten sind unter der Rubrik "Rest" zusammengefasst worden. Es zeigt sich eindeutig, dass - wie bereits weiter oben angedeutet - die Gutschriften in der Kategorie NRE vollständig der Lebenszyklusphase End-of-Life zuzuordnen sind. Dabei sind nach Abb. 3.373 zu fast gleichen Teilen das Verbrennungsszenario für die gesamte Holzbrücke selbst (inkl. des ursprünglichen Bohlenbelags) sowie das Verbrennungsszenario für die zusätzlich anfallenden Bohlen durch den zweimaligen Wechsel des Bohlenbelags zu nennen.

Der Verbrauch entsteht vor allem während der Produktionsphase der Brücke. Für die relativ hohen Aufkommen erneuerbarer Energieträger ist an dieser Stelle noch einmal darauf hinzuweisen, dass auch die Verwendung von Holz mit in die Bilanzierung einfließt und daher hier einen entsprechend großen Einfluss nimmt. Der für die Holzbrücken recht hohe Transportweg von über 600 km sowie die weiteren Transporte zum Ende des Lebenszyklus zeigen einen merkbaren Einfluss, zeigen im Vergleich zur Produktionsphase jedoch einen relativ geringen Anteil am Gesamtergebnis (ca. 10%). Aufgrund des dominanten Einflusses der Produktionsphase, in der fast sämtliche Emissionen negativer Umweltauswirkungen zu erwarten sind, erfolgt weiter unten eine differenzierte Betrachtung der Produktionsphase.

Zu den gleichen Ergebnissen gelangt man, wenn man die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung mit Hilfe der CML Methode betrachtet: Auch hier zeigt sich die Produktionsphase als Verursacher der Umweltauswirkungen und die End-of-Life Phase als Quelle der Gutschriften. Lediglich in der Kategorie GWP wird bereits etwas differenzierter dargestellt, dass nicht nur die Substitution der fossilen Energieträger für Gutschriften sorgt, sondern auch die Verwendung des Holzes, dass zu seiner Verbrennung noch CO_2 speichert. So tritt hier die Produktion der Bohlen als größter Beitrag zur Kategorie GWP auf, während die Produktionsphase der Brücke, in der ebenfalls große Mengen Holz eingesetzt werden, die grundsätzlich auch CO_2 gespeichert haben, ohne Gutschriften dargestellt werden. Der Grund dafür liegt in der CO_2-intensiven Herstellung des Fundaments, das ebenfalls der Produktionsphase zugerechnet ist. Dies wird später in der Analyse der Produktionsphase genauer beleuchtet, auch eine Untersuchung der Tragwerke erfolgt an gesonderter Stelle. Zunächst sollen jedoch noch die Lebenszyklen der beiden Vergleichsobjekte (HHT-Brücke, Stahlbrücke) untersucht werden.

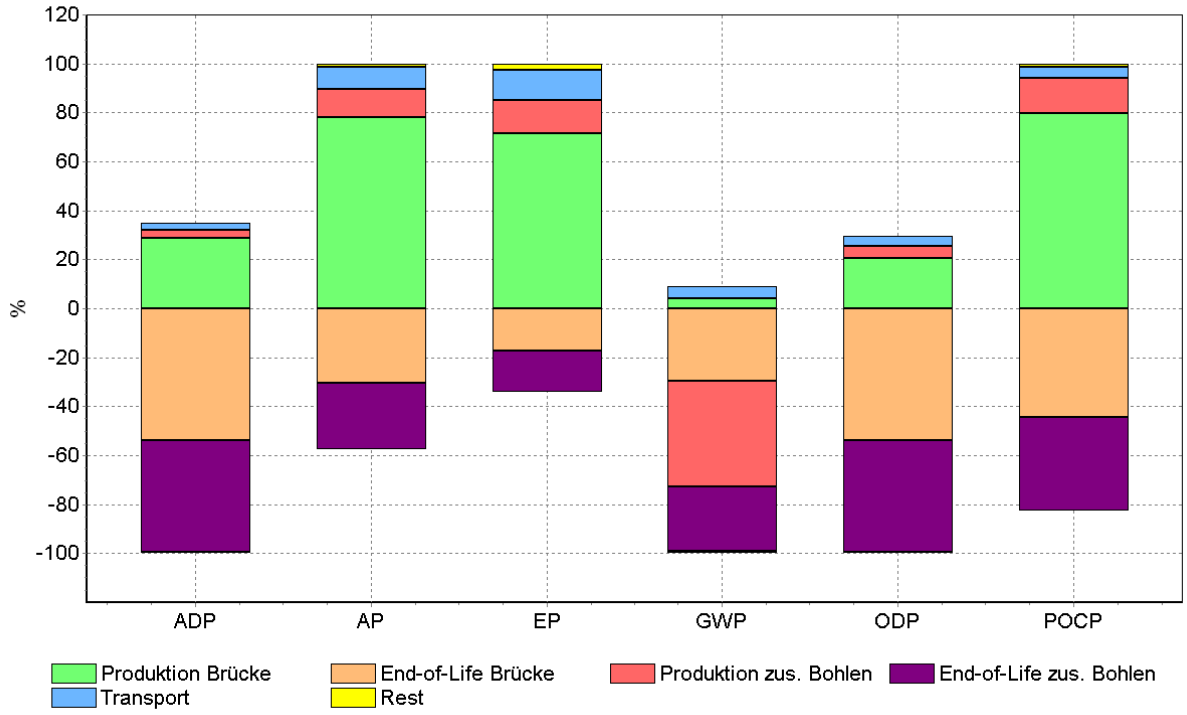


Abb. 3.374: CML: Lebenszyklus Brücke Hummelweg (Standardszenario)

Tabelle 3.74: CML: Lebenszyklus Brücke Hummelweg (Standardszenario)

	Einheit	Total	Produktion Brücke	End-of-Life Brücke	Produktion zus. Bohlen	End-of-Life zus. Bohlen	Transport	Rest
ADP	kg Sb	-43,73	19,28	-36,10	2,28	-30,75	1,88	-0,33
AP	kg SO2	7,20	13,23	-5,16	1,94	-4,55	1,50	0,23
EP	kg PO4	1,65	1,79	-0,43	0,33	-0,42	0,32	0,06
GWP	kg CO2	-4.977	225	-1.626	-2.354	-1.426	264	-60
ODP	kg CFC	-6,78E-04	1,99E-04	-5,18E-04	4,65E-05	-4,42E-04	4,03E-05	-4,36E-06
POCP	kg C2H4	0,182	0,826	-0,461	0,148	-0,393	0,047	0,016

3.9.2.3.3 Analyse Lebenszyklus Brücke Henzesteg

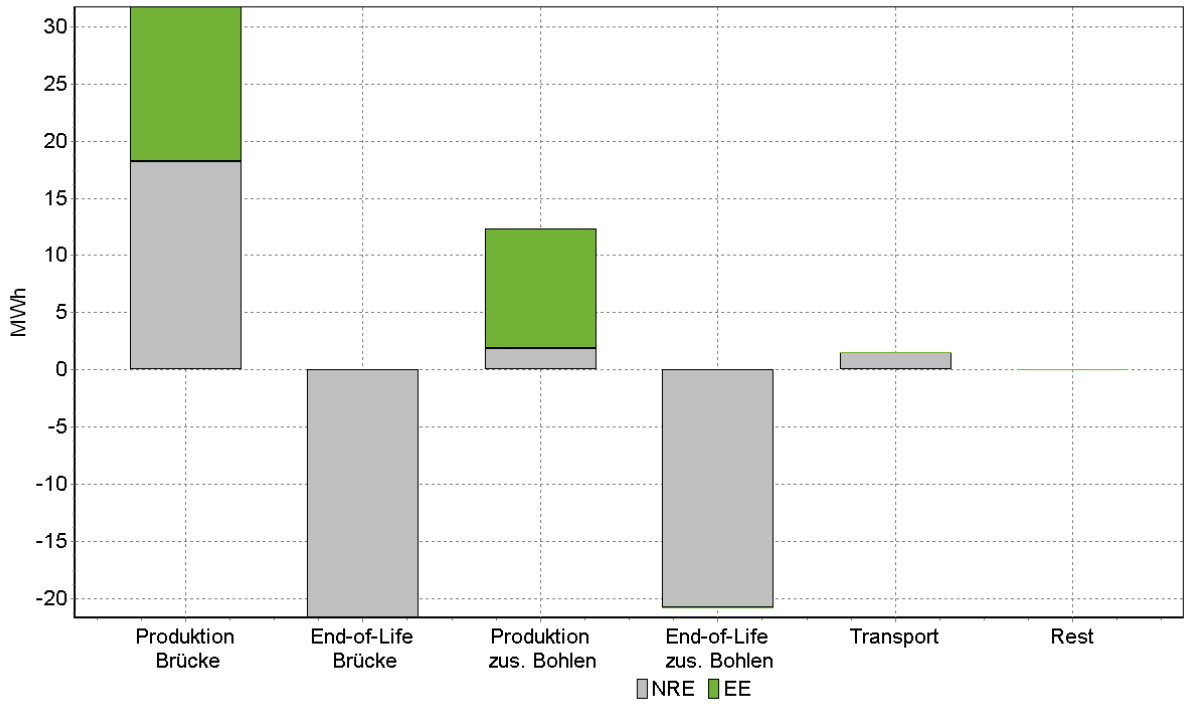


Abb. 3.375: Ressourcenverbrauch: Lebenszyklus Brücke Henzesteg (Standardszenario)

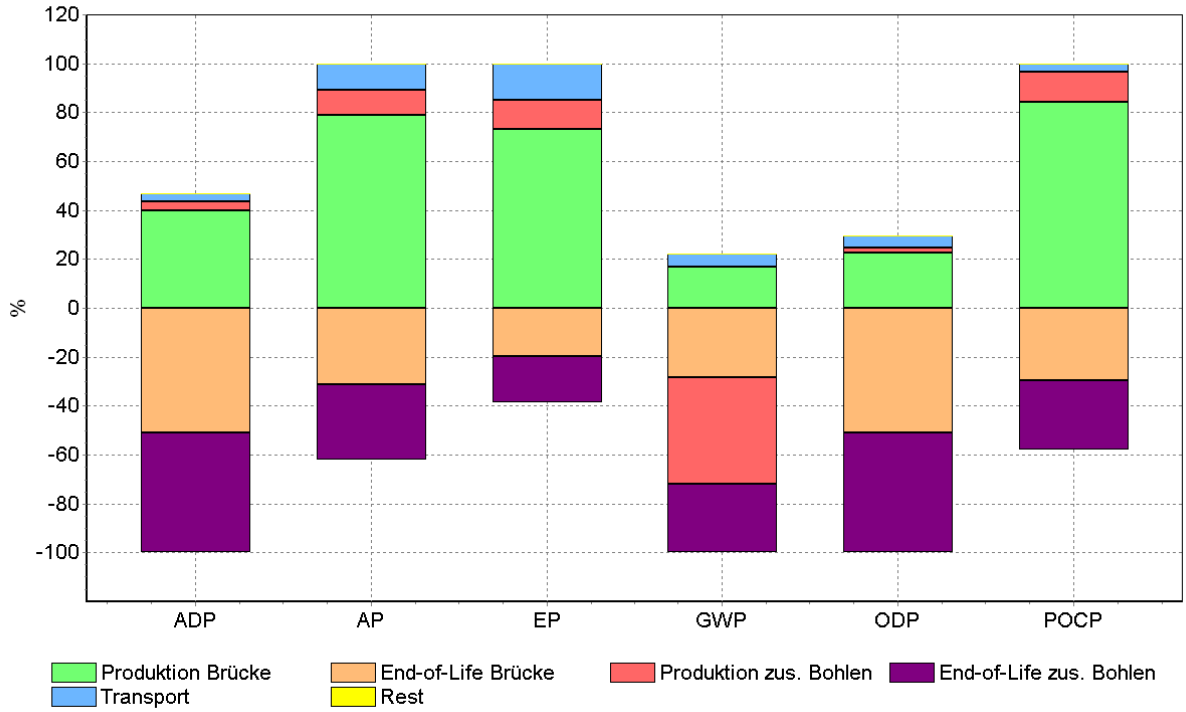


Abb. 3.376: CML: Lebenszyklus Brücke Henzesteg (Standardszenario)

Tabelle 3.75: Ressourcenverbrauch Lebenszyklus Henzesteg

	Einheit	Total	Produktion Brücke	End-of-Life Brücke	Produktion zus. Bohlen	End-of-Life zus. Bohlen	Transport	Rest
NRE	MJ	-75.065	65.561	-78.001	6.752	-74.897	5.520	0
EE	MJ	86.217	48.786	-155	37.619	-94	60	0

Tabelle 3.76: CML: Lebenszyklus Henzesteg

	Einheit	Total	Produktion Brücke	End-of-Life Brücke	Produktion zus. Bohlen	End-of-Life zus. Bohlen	Transport	Rest
ADP	kg Sb	-39,80	29,64	-38,02	2,76	-36,58	2,40	0,00
AP	kg SO2	6,69	13,94	-5,52	1,82	-5,42	1,87	0,00
EP	kg PO4	1,64	1,95	-0,52	0,32	-0,51	0,40	0,00
GWP	kg CO2	-4.769	1.040	-1.753	-2.663	-1.728	334	0
ODP	kg CFC	-7,54E-04	2,41E-04	-5,46E-04	2,46E-05	-5,26E-04	5,17E-05	0,00E+00
POCP	kg C2H4	0,697	1,393	-0,487	0,201	-0,468	0,059	0,000

Die Analyse des Lebenszyklus der Brücke Henzesteg zeigt die gleichen Verhältnisse wie die Holzbrücke am Hummelweg, wobei die absoluten Werte zum Teil deutlich über den entsprechenden Werten der vorherigen Brücke liegen. Dies wird weiter unten noch genauer analysiert. Unter der Rubrik "Rest" fällt auf, dass die Werte hier allesamt bei Null liegen. Dies ist durch die

Tatsache zu erklären, dass, im Gegensatz zu den anderen beiden Brücken, keine weiteren Instandhaltungsmaßnahmen eingeplant sind und somit auch keine zusätzlichen Aufwände zu bilanzieren sind.

Ein etwas anderes Bild ergibt sich für die nun folgende Analyse des Lebenszyklus der Stahlbrücke.

3.9.2.3.4 Analyse Lebenszyklus Brücke Bäkepark

Hier entstehen die Gutschriften fast ausschließlich durch die Verbrennung der zusätzlichen Bohlen, bzw. in der Kategorie GWP auch durch die Produktionsphase der zusätzlichen Bohlen. Die durch das Stahlrecycling entstehenden Gutschriften (End-of-Life Brücke) sind demgegenüber mit maximal 20% an der Gesamtgutschrift der jeweiligen Kategorie beteiligt. (Abb. 3.377).

Die Auswertung des Ressourcenverbrauchs in Abb. 3.379 zeigt ebenfalls ein leicht verändertes Bild, auch hier sind die Gutschriften im Wesentlichen für die zusätzlichen Bohlen zu verzeichnen. Die Produktion zeigt einen erhöhten Verbrauch nicht erneuerbarer Ressourcen und im Gegenzug dazu weniger Verbrauch bei den erneuerbaren Energieträgern. Letzteres kommt durch den verringerten Einsatz von Holz zu Stande.

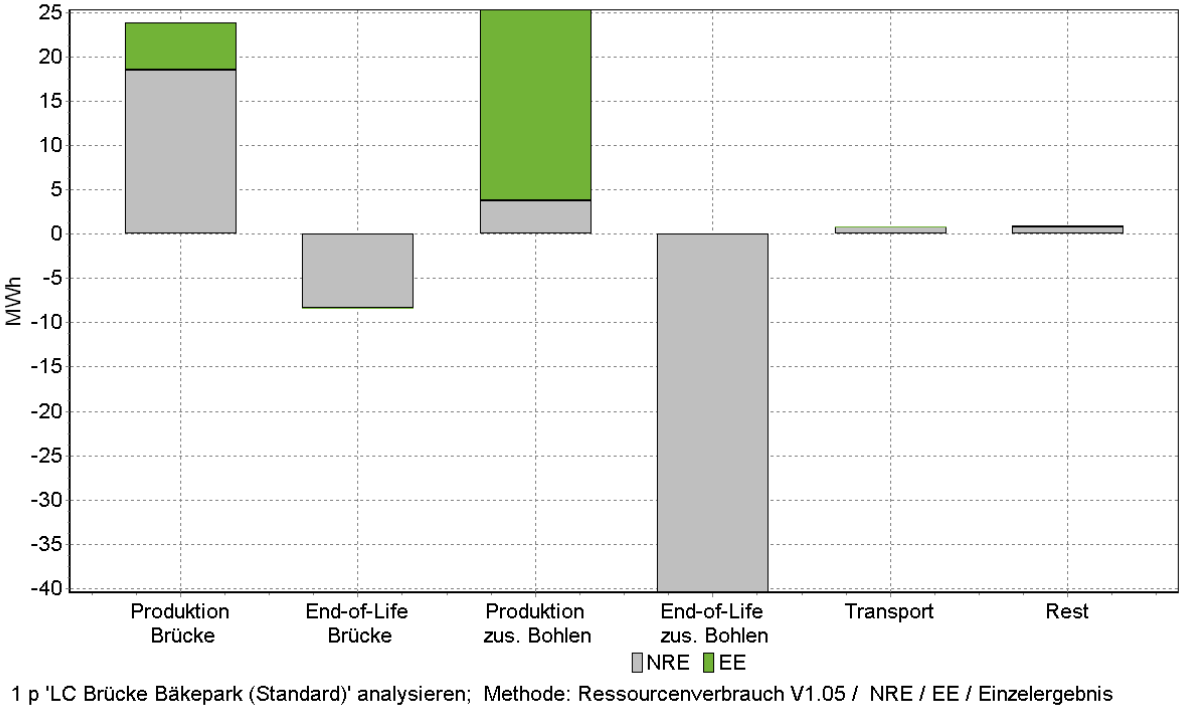


Abb. 3.377: Ressourcenverbrauch: Lebenszyklus Brücke Bäkepark (Standardszenario)

Für die Analyse der Stahlbrücke ist noch einmal darauf hinzuweisen, dass auf Grund der höheren Lebensdauer nur der halbe Lebenszyklus bilanziert wird. Entsprechend ist jeweils nur die Hälfte der zu erwartenden Auswirkungen von Produktion, Nutzung und End-of-Life Grundlage für die Darstellung in den Tabellen und Abbildungen.

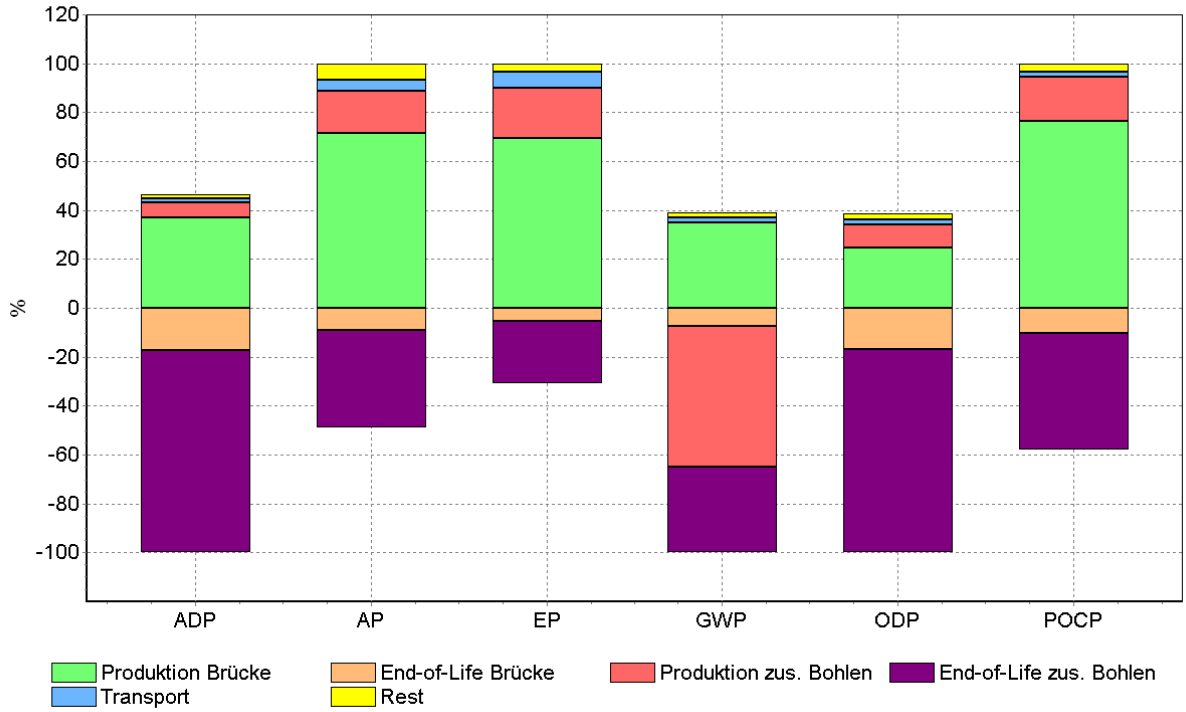


Abb. 3.378: CML Lebenszyklus Brücke Bäkepark (Standardszenario)

Als Hauptverursacher der Emissionen werden nachfolgend die drei Produktionsphasen betrachtet:

3.9.2.3.5 Analyse der Produktionsphasen

Analyse der Produktionsphase Brücke Hummelweg

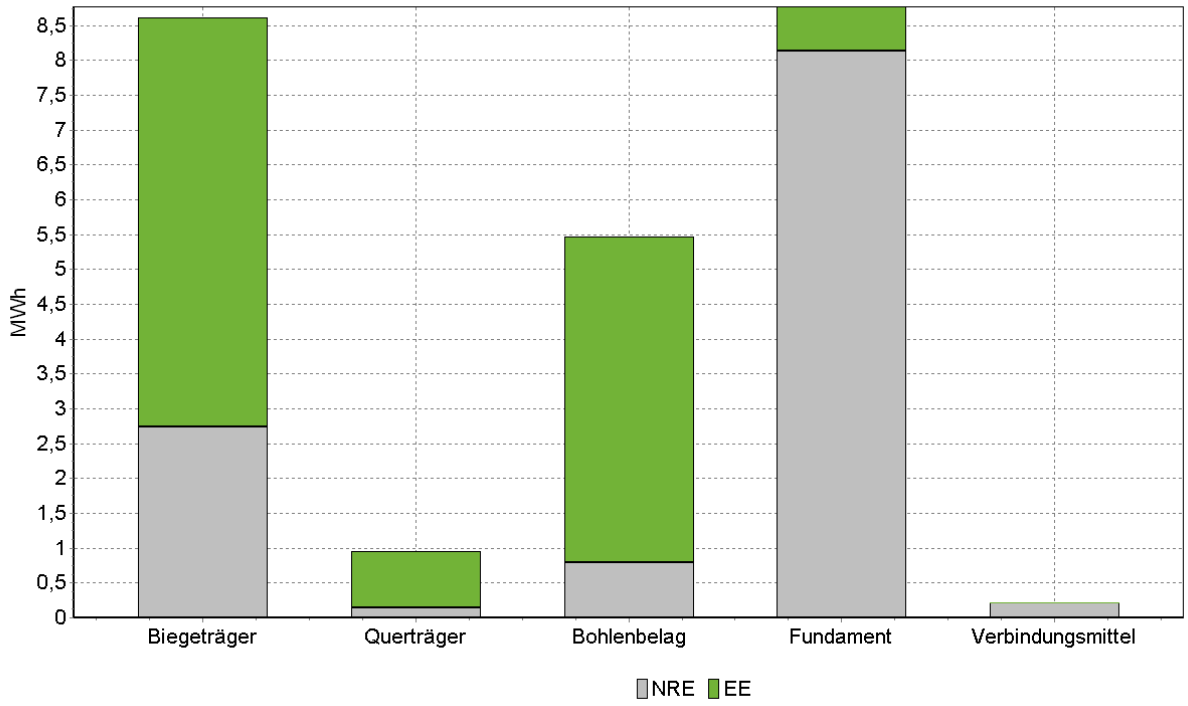


Abb. 3.379: Ressourcenverbrauch: Produktionsphase Brücke Hummelweg

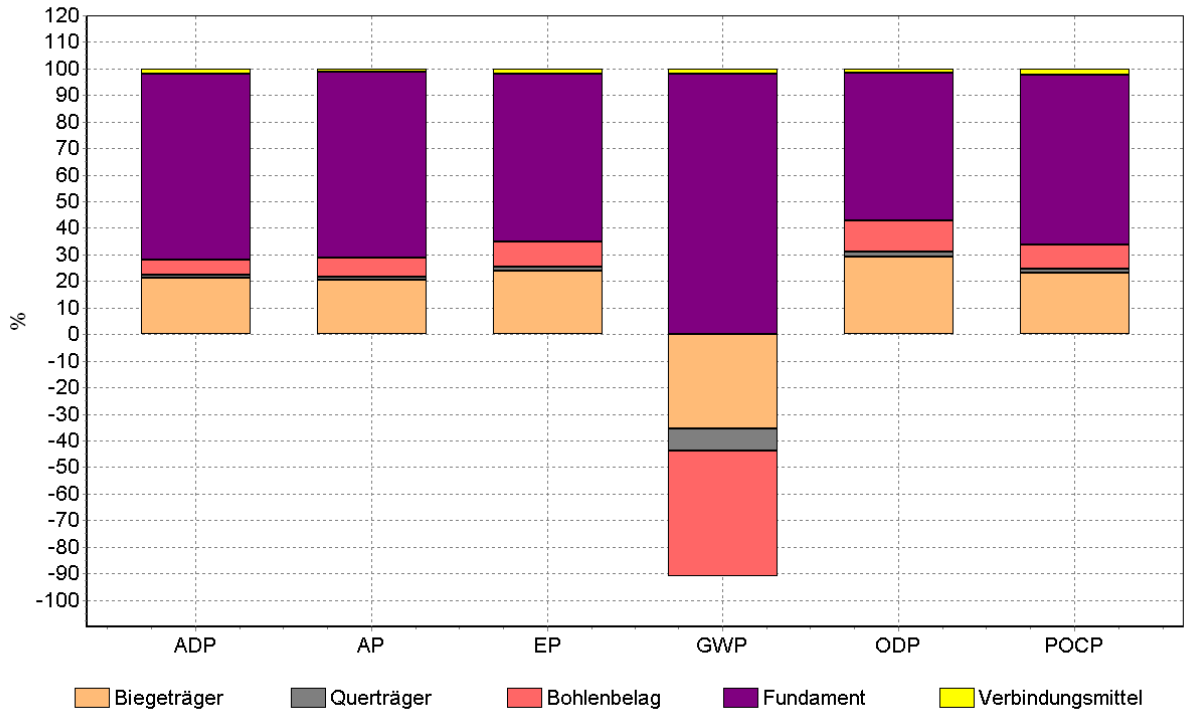


Abb. 3.380: CML: Produktionsphase Brücke Hummelweg

Analyse der Produktionsphase Brücke Henzesteg

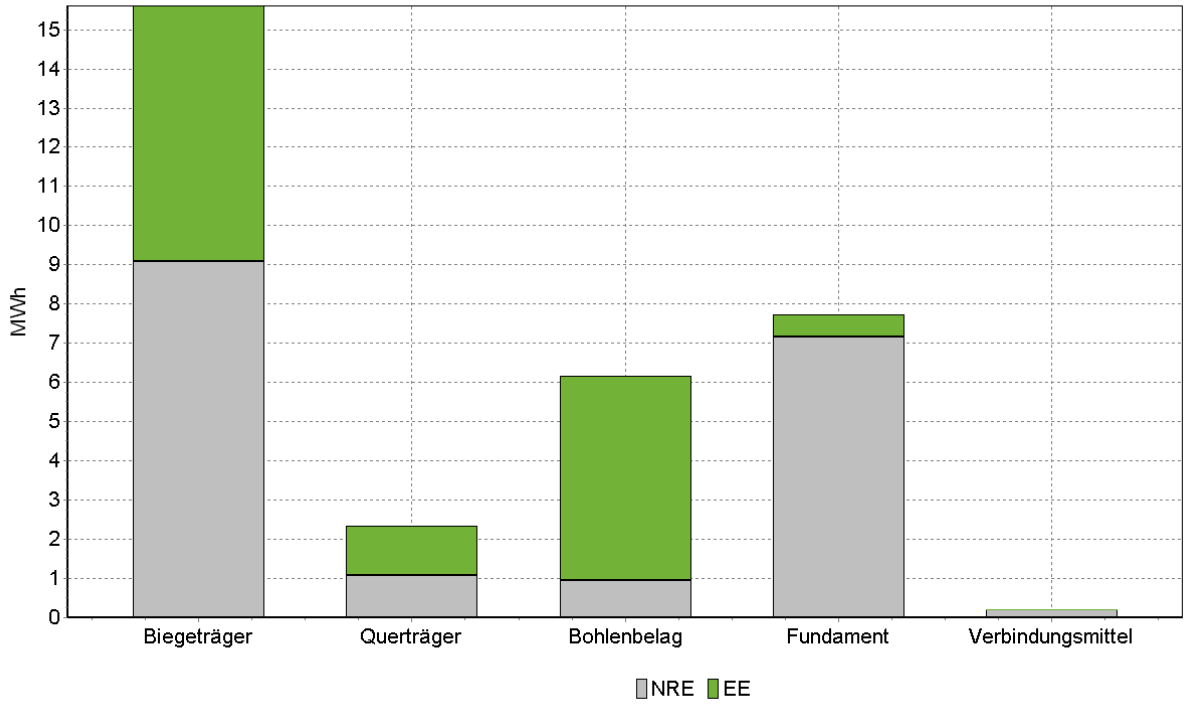


Abb. 3.381: Ressourcenverbrauch Produktionsphase Brücke Henzesteg

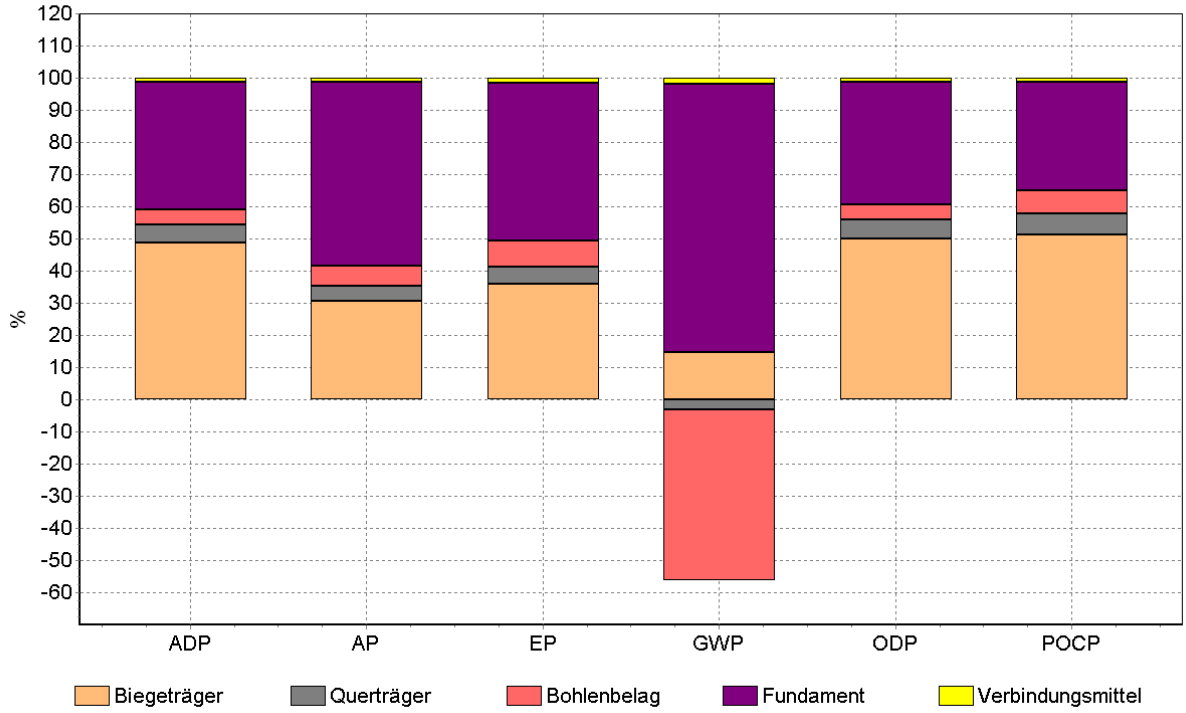


Abb. 3.382: CML: Produktionsphase Brücke Henzesteg

Analyse der Produktionsphase Brücke Bäkepark

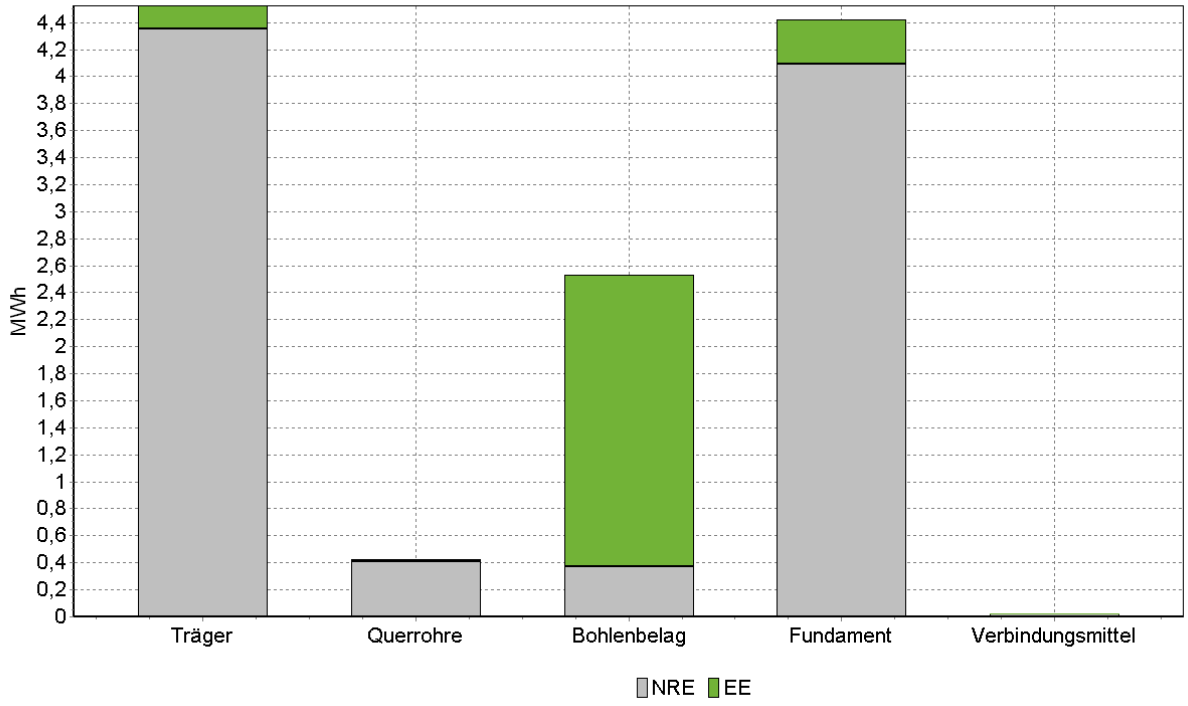


Abb. 3.383: Ressourcenverbrauch Produktionsphase Brücke Bäkepark

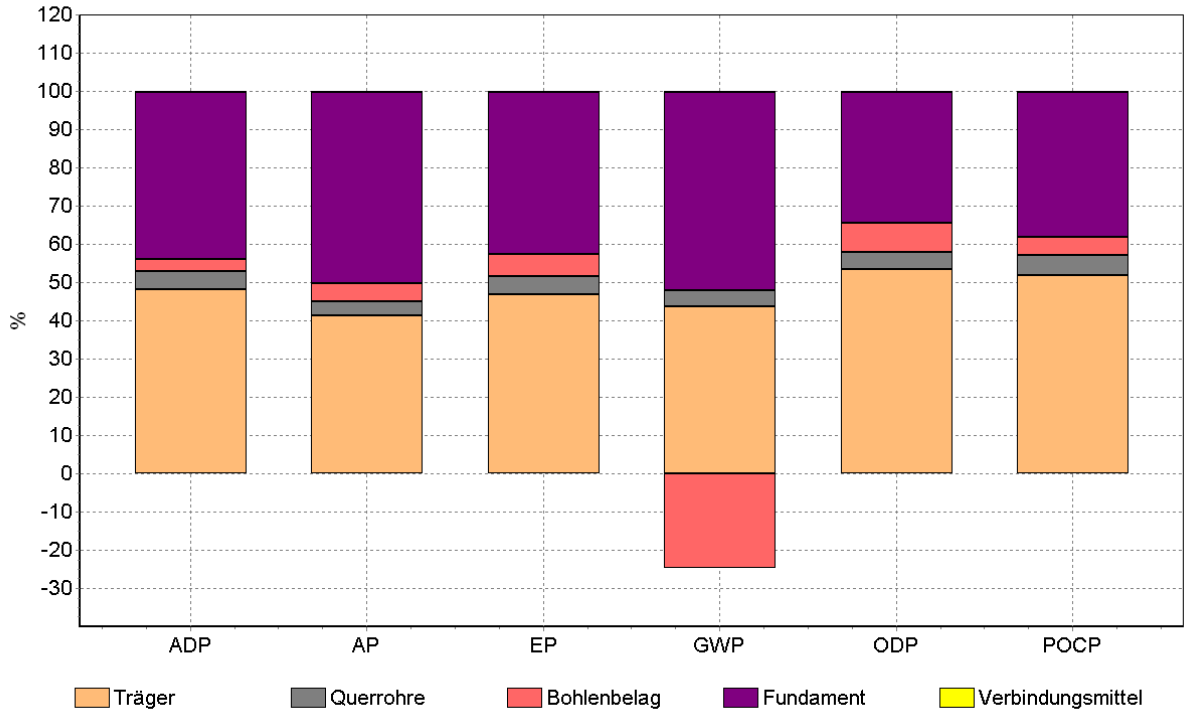


Abb. 3.384: CML: Produktionsphase Brücke Bäkepark

Für alle drei Brücken zeigt sich eindeutig, dass zum einen das Fundament als wesentlicher Treiber der Umweltauswirkungen anzusehen ist. Neben dem Beton ist hier auch der Einsatz von Edelstahl (Sockel für die Lagerung auf dem Fundament) als Ursache für die negativen Auswirkungen zu nennen (nicht in der Grafik zu erkennen). Daneben stehen an erster Stelle die Biegeträger und z.T. auch die Bohlen als ergebnisbestimmende Komponenten.

Da für die vorliegende Untersuchung im Rahmen des Projekts die Tragwerke sowie die Bohlen. Beide von entscheidenden Bedeutung sind, werden diese nachfolgend noch einmal eingehender untersucht.

3.9.2.3.6 Vergleich der Lebenszyklen der Tragwerkskonstruktion

Als Tragwerke werden in die nun folgenden Vergleiche die Kombination aus Biegeträgern, Querträgern und die für die Verbindung dieser Komponenten anfallenden Verbindungsmittel mit einbezogen.

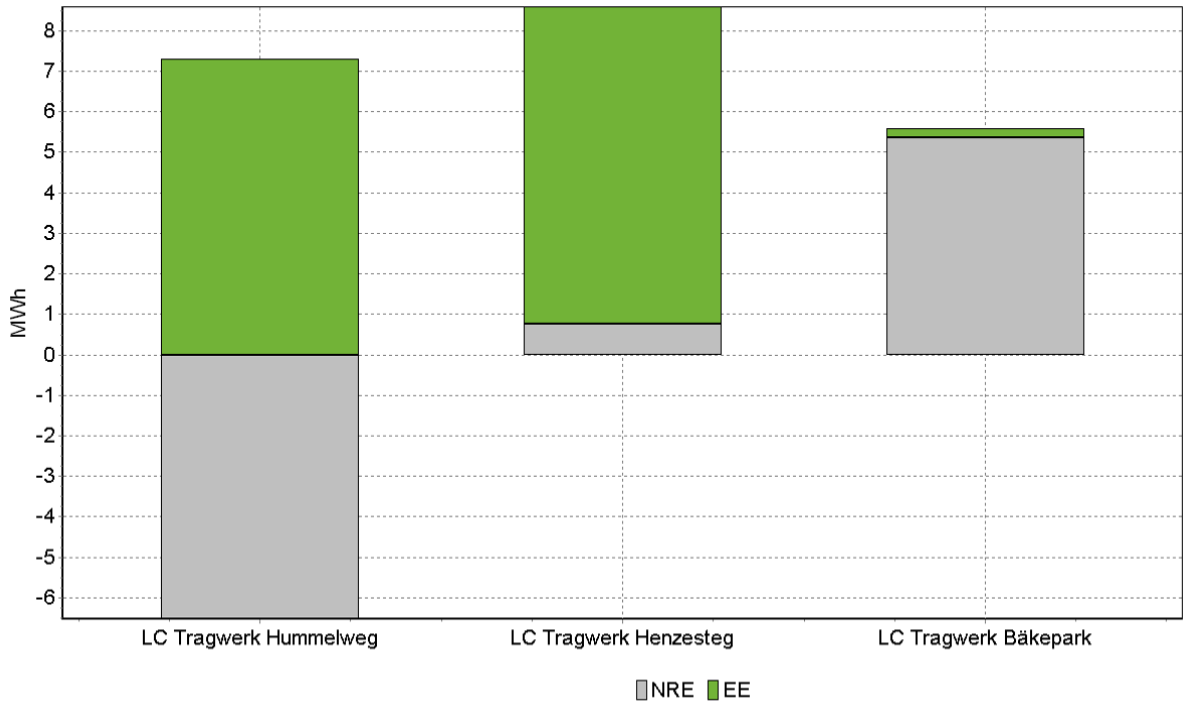


Abb. 3.385: Ressourcenverbrauch: Lebenszyklusvergleich der Tragwerke

Tabelle 3.77: Ressourcenverbrauch: Lebenszyklusvergleich der Tragwerke

	Einheit	LC Tragwerk Hummelweg	LC Tragwerk Henzesteg	LC Tragwerk Bäkepark
NRE	MJ	-23.481	2.693	19.286
EE	MJ	26.304	28.220	793

Der Lebenszyklus des Tragwerks der Brücke Hummelweg zeigt eine in etwa ausgeglichene Energiebilanz, betrachtet man das Verhältnis von eingesetzter erneuerbarer Energieträger und potentiell zurück zu gewinnender Energie, bzw. eingesparter Energie auf fossiler Basis. Die Tragwerke der beiden anderen Brücken unterscheiden sich hier deutlich, wobei die Holzbrücke am Henzesteg noch einen leicht höheren Einsatz erneuerbarer Energieträger vorweist und im Gesamtergebnis keine Gutschriften mehr erzeugt, sondern noch einen zusätzlichen Aufwand nicht erneuerbarer Energieträger von fast 1 MWh aufweist. Die mehr als fünffache Menge wird

laut den Berechnungen potentiell für das Stahlkonstrukt des Tragwerks der Brücke am Bäkepark aufzuwenden sein, während der Einsatz erneuerbarer Energieträger hier kaum ins Gewicht fällt. Auch die Analyse mit Hilfe der CML-Methode kommt zu ähnlichen Ergebnissen. In vier der sechs Kategorien schneidet die Stahlbrücke am schlechtesten, die Holzbrücke in herkömmlicher Bauweise am besten ab. In den drei Kategorien ADP, GWP und ODP kann auch die Brücke am Henzesteg insgesamt noch Gutschriften erzielen.

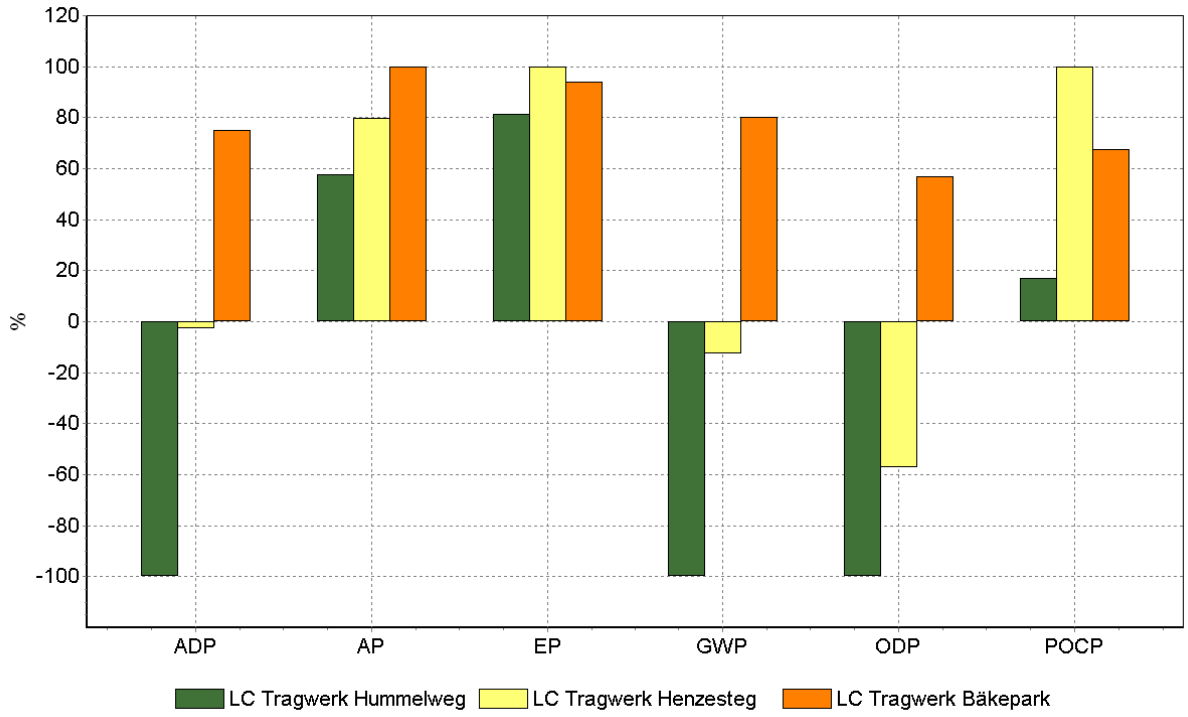


Abb. 3.386: CML: Lebenszyklusvergleich der Tragwerke

Tabelle 3.78: CML Lebenszyklusvergleich der Tragwerke

	Einheit	LC Tragwerk Hummelweg	LC Tragwerk Henzesteg	LC Tragwerk Bäkepark
ADP	kg Sb	-12,49	-0,34	9,39
AP	kg SO2	3,12	4,32	5,42
EP	kg PO4	0,71	0,88	0,83
GWP	kg CO2	-1.490	-187	1.191
ODP	kg CFC	-1,94E-04	-1,11E-04	1,10E-04
POCP	kg C2H4	0,114	0,672	0,454

Insbesondere die Kategorien POCP und EP sollen noch einmal kritisch betrachtet werden, da hier die meisten Einflüsse von der HHT Brücke zu erwarten sind. Da die Hauptursachen wie bereits zuvor gesehen in der Produktionsphase der Träger zu finden sind, werden diese für die nähere Untersuchung herangezogen. (Da dieser Vergleich wieder unter Einbeziehung der Lebensdauer und der Anzahl der verwendeten Träger geschehen muss, ergibt sich ein Vergleich von 2:1,5 von Holz- zu Stahlträgern.) Es ergibt sich für den Lebenszyklusvergleich zunächst fast das gleiche Bild wie zuvor für die Betrachtung des Lebenszyklus des gesamten Tragwerks. Nur in der Kategorie EP ist in dieser Betrachtung auch das Stahltragwerk das mit den höchsten potentiellen negativen Umweltauswirkungen.

3.9.2.3.7 Vergleich der Lebenszyklen der Biegeträger

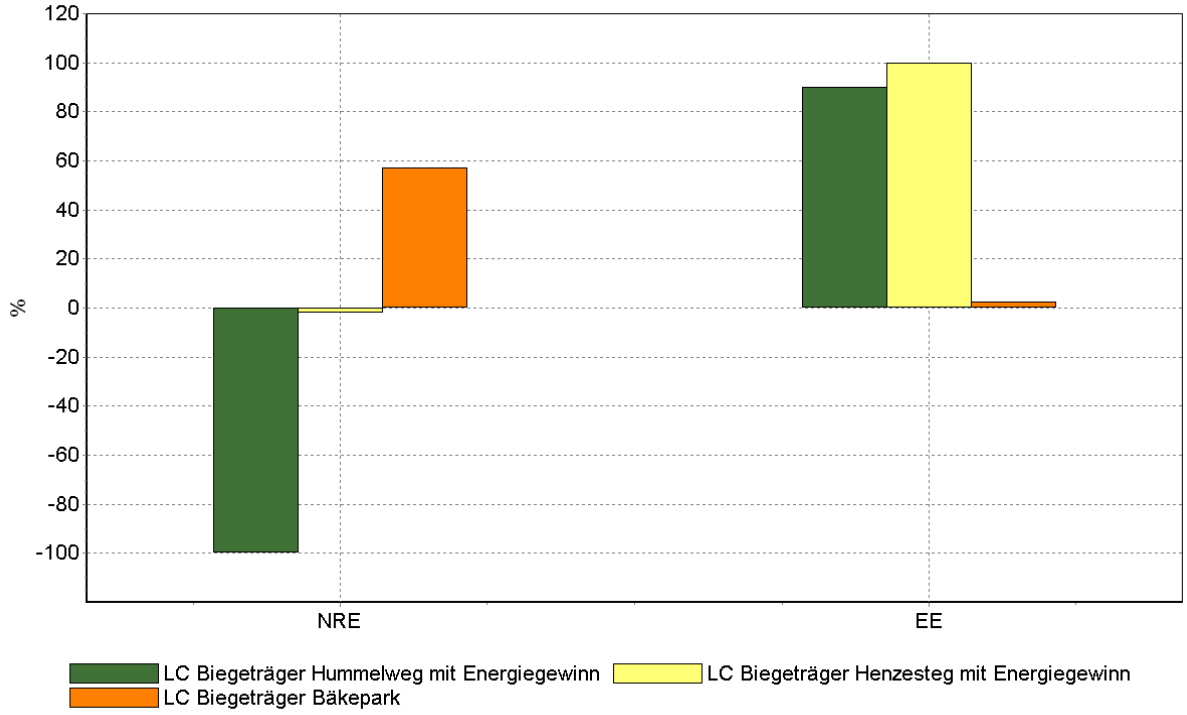


Abb. 3.387: Ressourcenverbrauch: Vergleich LC Biegeträger (2 Holzträger vs. 1,5 Stahlträger)

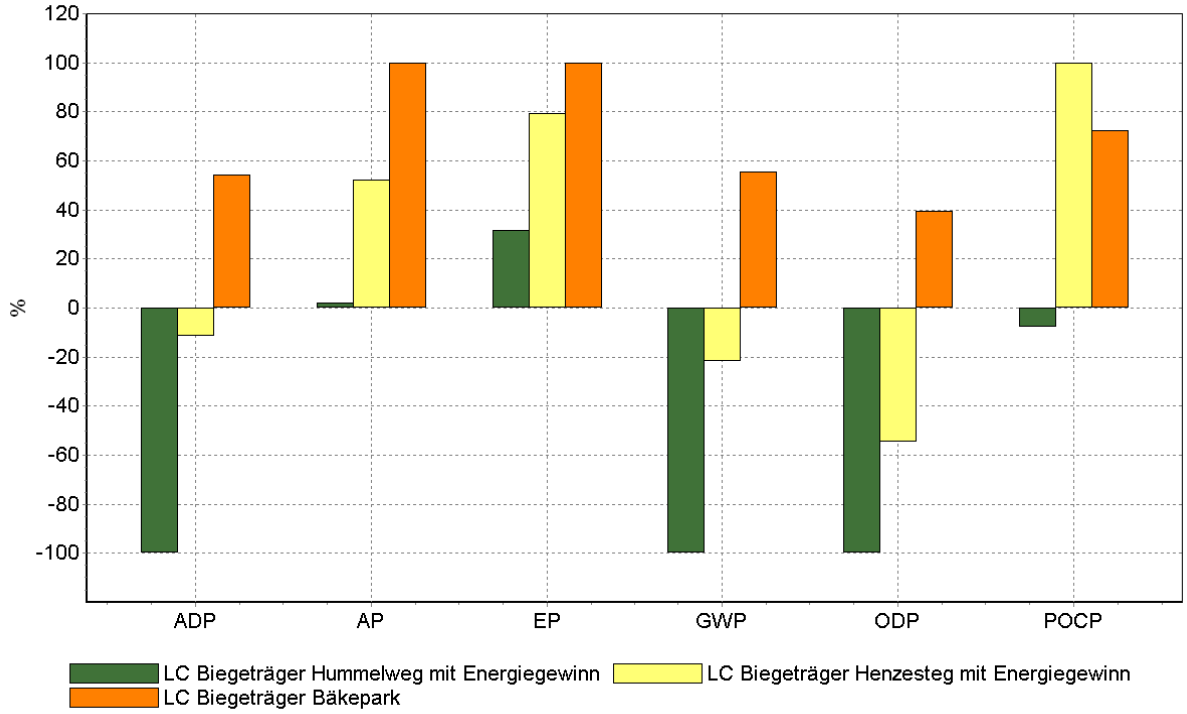


Abb. 3.388: CML: Vergleich Lebenszyklus der Biegeträger (2 Holzträger vs. 1,5 Stahlträger)

Der Lebenszyklus eines HHT-Biegeträgers wird hier über ein Flussdiagramm noch einmal genauer analysiert. Die Dicke der Flussbalken zeigt den relativen Anteil des Bestandteils am Gesamtergebnis an, das absolute Teilergebnis in der Kategorie POCP ist ebenfalls mit angegeben (hier in Bezug auf einen Biegeträger). Die hierarchische Darstellung zeigt auf der rechten Seite die Gutschriften durch den Energiegewinn bei der Verbrennung des Holzes, auf der linken Seite die negativen Auswirkungen durch den Produktionsprozess. Verfolgt man den letztgenannten Strang weiter nach unten so zeigt sich vor allem die Produktion des KHP und hier speziell der massive Einsatz von Phenolharz (auf 1m³ KHP kommen ca. 600 kg Harzgemisch) als Hauptverursacher der potentiellen Schäden.

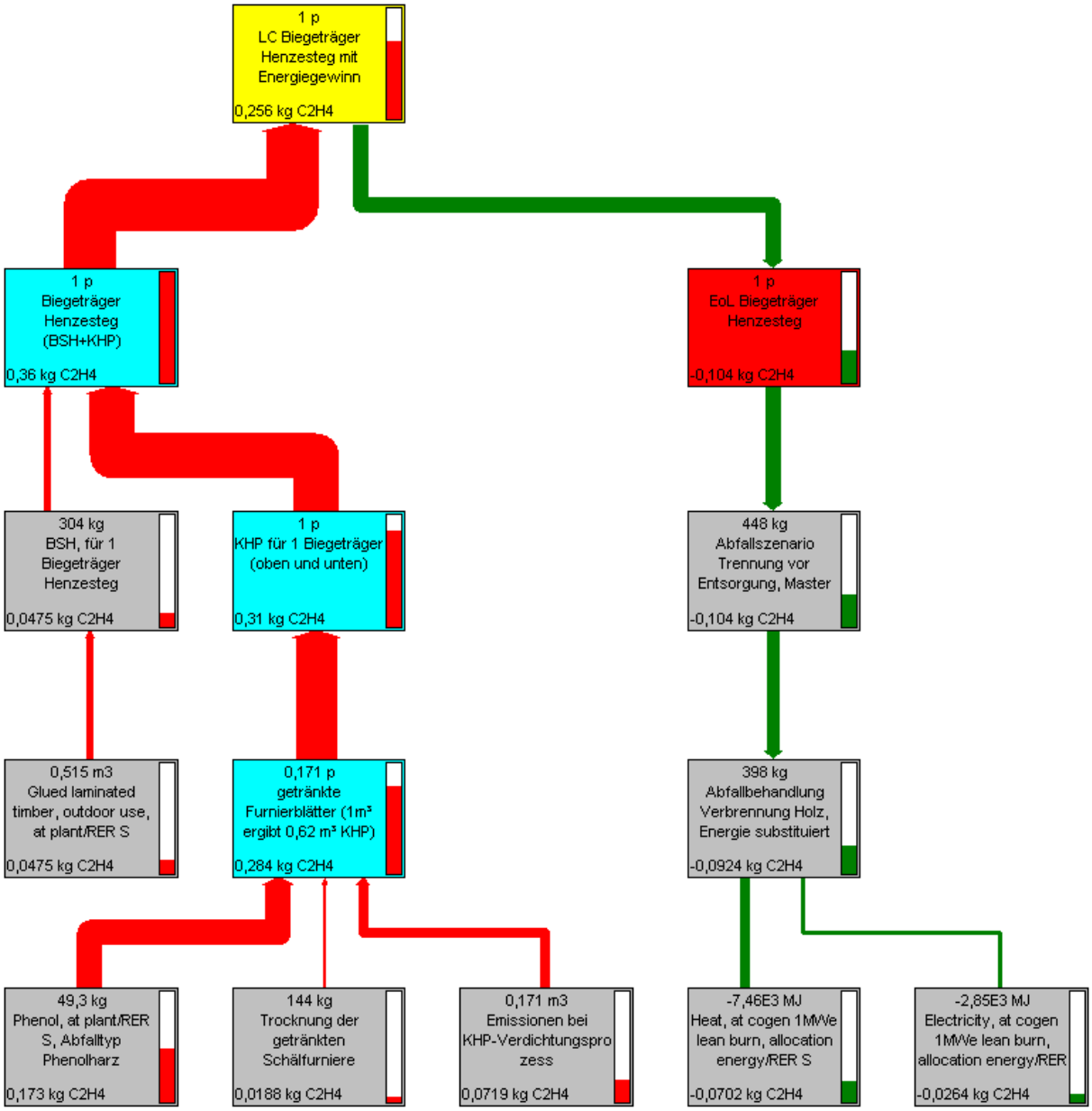


Abb. 3.389: Flussdiagramm Lebenszyklus HHT-Biegeträger, CML Kategorie POCP

Auch für die anderen Kategorien ergibt sich ein ähnliches Bild, stellvertretend ist an dieser Stelle noch einmal die gleiche Darstellung für die Kategorie EP angeführt. Auch hier zeigen sich das KHP und insbesondere das Phenol als Hauptverursacher der zu erwartenden Umweltschäden:

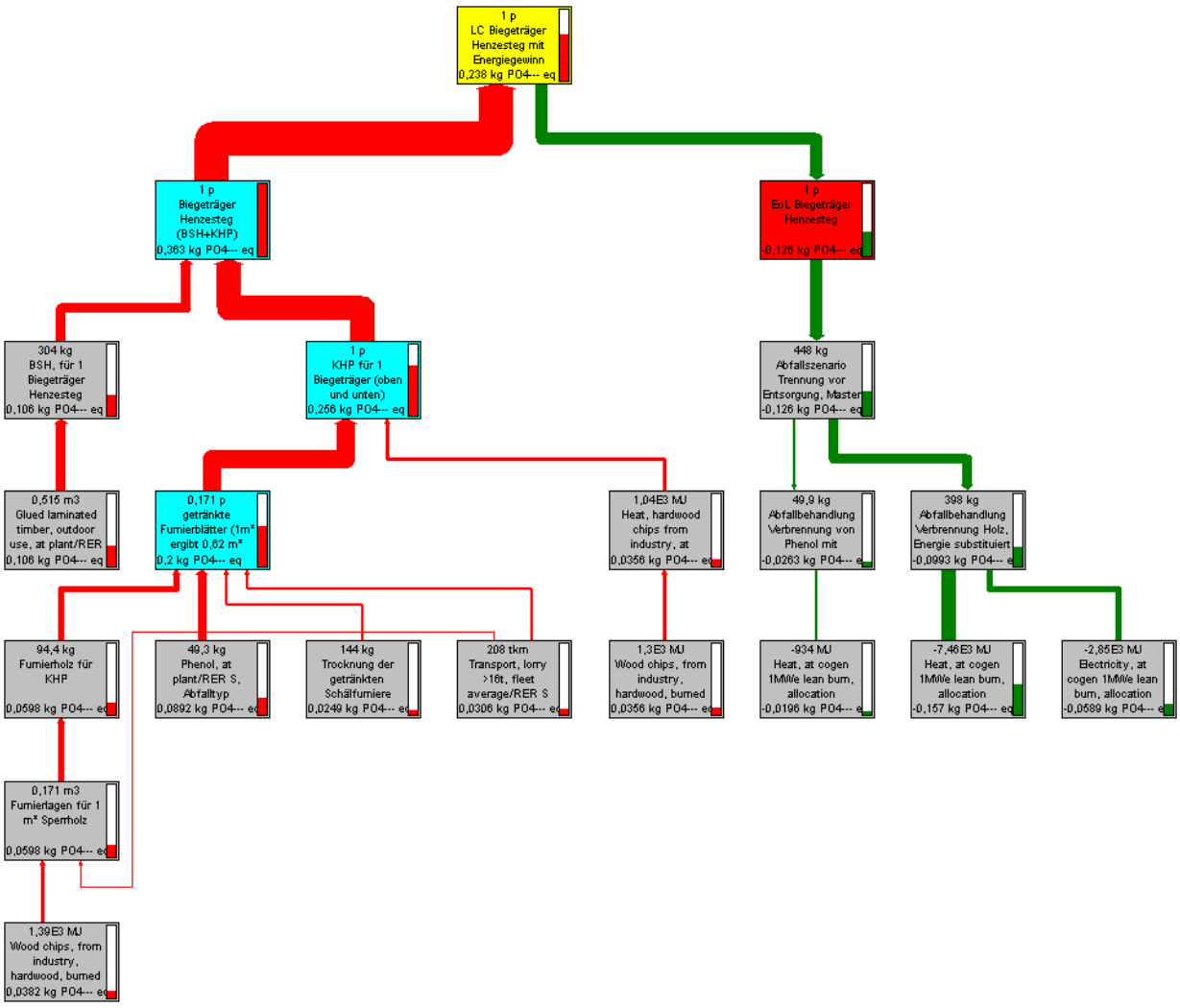


Abb. 3.390: Flussdiagramm Lebenszyklus HHT-Biegeträger, CML Kategorie POCP

Die größten zu erwartenden Schäden entstehen also während der KHP Herstellung und hier bereits vor dem Verdichtungsprozess bei der Herstellung der getränkten Furnierblätter, wie die nachfolgenden Tabellen noch einmal verdeutlichen.

Tabelle 3.79: Ressourcenverbrauch bei KHP Herstellung für 1 Biegeträger

	Einheit	Total	harzgetränkte Furnierblätter (Vor Verdichtung)	Strom (Hydraulik) bei Verdichtungsprozess	Gasverbrauch bei Verdichtungsprozess	Holzverbrauch für Wärme bei Verdichtungsprozess
NRE	MJ	522	425	22	72	3
EE	MJ	204	160	1	0	43

Tabelle 3.80: CML: KHP Herstellung für 1 Biegeträger

	Einheit	Total	harzgetränkte Furnierblätter (Vor Verdich-tung)	Strom (Hydrau-lik) bei Verdich-tungsprozess	Gasverbrauch bei Verdich-tungsprozess	Holzverbrauch für Wärme bei Verdichtungs-prozess
ADP	kg Sb	6,36	4,65	0,44	1,25	0,02
AP	kg SO2	1,51	1,20	0,08	0,13	0,11
EP	kg PO4	0,26	0,20	0,01	0,01	0,04
GWP	kg CO2	485	270	60	151	5
ODP	kg CFC	5,17E-05	2,94E-05	2,26E-06	1,98E-05	2,92E-07
POCP	kg C2H4	0,310	0,284	0,004	0,016	0,006

3.9.2.3.8 Bohlenvergleich: Herkömmliche Bohle - Hybridbohle mit TMT

Der Vergleich der Bohlen muss etwas genauer betrachtet werden. Das Ziel der Hybridbohle war eine Verlängerung der Lebensdauer. Die bisherigen Betrachtungen haben gezeigt, dass die Ergebnisse im Wesentlichen durch die Gutschriften am Ende des Lebenszyklus beeinflusst werden, d.h. je mehr Holz am Ende des Betrachtungszeitraums zur Verfügung steht, desto besser fällt die entsprechende Bilanz aus, da das Holz als Ersatz für fossile Brennstoffe dienen kann. Die Verhältnisse für den Lebenszyklus der Hybridbohlen zeigt noch einmal die nachfolgende Abb. 3.391.

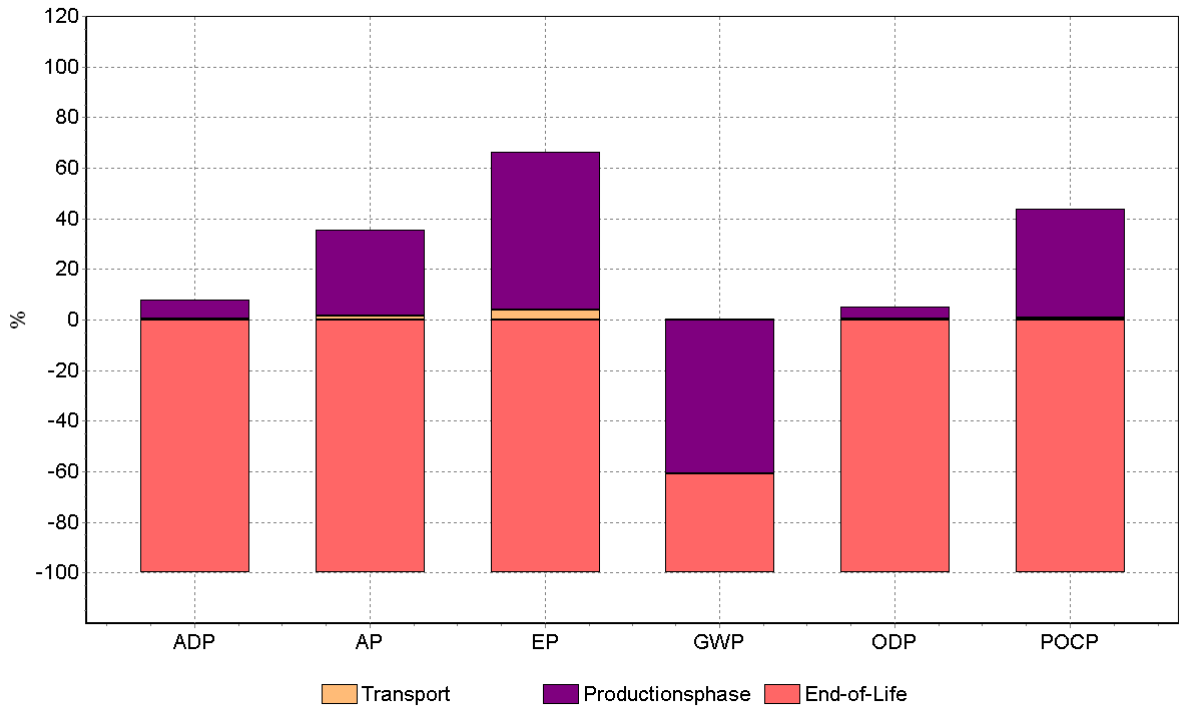


Abb. 3.391: CML Lebenszyklus Hybridbohle

Beim geplanten Vergleich der Bohlen würde also eine verkürzte Lebensdauer durch das erhöhte Holzaufkommen für eine Verbrennung zu einem besseren Ergebnis führen. Da dies jedoch einer anzustrebenden effizienten Nutzung der Ressourcen widerspricht, müssen andere Wege für

den Vergleich gefunden werden. Da sich die Produktion von TMT im Vergleich zur Produktion von normalem getrockneten Holz jedoch nicht wesentlich bzw. nur hinsichtlich der Intensität des Trockenvorgangs unterscheidet, ist der gesteigerte Energieverbrauch als wesentliche Einflussgröße für die Bilanzierung herangezogen worden. Bei wie bisher angenommener gleicher Lebensdauer der Bohlen führt dies zwangsläufig zu einem schlechteren Ergebnis der TMT Bohle, da auch das Imprägnieren der Bohle keinen großen Einfluss auf das Ergebnis genommen hat. Geht man jedoch von einer längeren Lebensdauer der Hybridbohle aus, so kann man einen ersten Vergleich auf Basis der Energiebilanz, also des bisher verwandten Ressourcenverbrauchs anstellen. Die beiden nachfolgenden Abbildungen sollen das Potential der Bohlen aufzeigen, indem der beste Fall einer Lebensdauer von 20 Jahren für die Hybridbohle und der schlechteste Fall für die normale Bohle miteinander verglichen werden. Dabei wird lediglich die Betrachtung der Produktionsphase inklusive des Transports herangezogen:

Tabelle 3.81: Ressourcenverbrauch: Vergleich Szenarien für Bohlen

	Einheit	Hybridbohle (20 Jahre)	Herkömmliche Bohle (10 Jahre)
NRE	MJ	7.041	11.816
EE	MJ	37.623	67.234

Der oben stehende Vergleich kann lediglich als erste Annäherung verstanden werden und stellt keinesfalls belastbare Ergebnisse dar. Da in der Literatur zur Ökobilanzierung von Thermoholz bisher kaum genaue und belastbare Ergebnisse vorliegen, muss mit bis dato vorliegenden Herstellerangaben argumentiert werden, dass lediglich ein zusätzlicher Energieaufwand von ca. 20% gegenüber herkömmlich getrocknetem Holz anfällt. Auf dieser Basis lässt sich sehr schnell schließen, dass eine Verdoppelung der Lebensdauer zu einer positiveren Bilanz für das Thermoholz führen muss.

3.9.2.4 Entscheidungsorientierter Alternativenvergleich

3.9.2.4.1 Grundsätzlich

Es zeigt sich, dass die Tragwerkkonstruktionen aus Holz den Lösungen aus Stahl im vorliegenden Fall aus ökologischer Perspektive grundsätzlich vorzuziehen sind. Unter den getroffenen Annahmen spricht die Ökobilanz für eine herkömmliche Bauweise aus Holz, jedoch haben die Bauweisen auf HHT-Basis in jedem Fall das Potential, als umweltfreundlichere, im Sinne der Nachhaltigkeit vorzuziehende Alternativen zu Vergleichsbauweisen aus beispielsweise Stahl dienen zu können. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn herkömmliche Holzbauweisen an ihre Grenzen stoßen.

Es zeigt sich, dass vor allem die Entsorgungsphase für die Vorteilhaftigkeit des nachwachsenden Rohstoffes Holz durch die Möglichkeit der Einsparung von fossilen Ressourcen verantwortlich ist. Daher muss füreine entsprechende fachgerechte Entsorgung bzw. Nutzung am Ende des Lebenszyklus Sorge getragen werden. Weitere Möglichkeiten zur stofflichen Nutzung des Holzes sind durchaus gegeben, wurden hier aber nicht weiter betrachtet. Eine solche stoffliche Nutzung des Holzes ist jedoch durchaus vorstellbar und könnte die Bilanz der Holzbrücken weiter verbessern.

Die Produktionsphase dagegen ist als die wesentliche Quelle der potentiellen negativen Umweltauswirkungen ausgemacht, hier wäre das Optimierungspotential für weitere ökologische Verbesserungen zu suchen.

3.9.2.4.2 KHP

Bei der Verwendung von KHP muss mit relativ hohen Auswirklungen auf die Umwelt gerechnet werden. Die Verwendung großer Mengen von Phenolharz und zu geringerem Anteil auch der während der Produktion anfallende zusätzliche Energiebedarf haben das Potential, relativ großen negativen Einfluss auf die Umwelt in verschiedensten Kategorien zu verursachen. Dennoch hat die Konstruktionslösung mit KHP gegenüber dem Tragwerk aus Stahl in der vorliegenden Fallstudie eine insgesamt bessere Bilanz. Zudem ist zu beachten, dass die HHT-Konstruktion grundsätzlich noch weiter reduziert, also mit weniger Materialaufwand erstellt werden könnte, wenn statt der sehr konservativen linear-elastischen Rechnung neuere Ansätze mit plastifizierter Druckzone und gerissener Zugzone verfolgt werden, die die Tragfähigkeit realistischer abbilden (vgl. Kap. 3.8.2.3), was zu weiteren Einsparungen und einer besseren Bilanz führen wird. Auch sei darauf hingewiesen, dass die höhere Dauerhaftigkeit des KHP, welche durch Freibewitterungsversuche bestätigt wurde (vgl. Kap. 3.2.7.3sowie 3.2.6.2), hier nicht berücksichtigt wurde, da noch keine Erfahrungen über die angesetzte Nutzungsdauer von 40 Jahren vorliegen. Natürlich würde auch dies die Ökobilanz verbessern. Darüber hinaus stellt die Abmessung des KHP im vorliegenden Fall eine besondere Ausnahme dar, d.h. die Produktion bietet weiteres Optimierungspotential was Materialeffizienz und Energieeinsatz betrifft.

3.9.2.4.3 TMT

Für das TMT ist nach bisherigem Stand keine eindeutige Zahlenangabe hinsichtlich der ökologischen Leistung zu treffen. Geht man jedoch von einer längeren Lebensdauer aus, sind hier durchaus positive Effekte im Vergleich mit gewöhnlichen Hölzern zu erwarten.

3.9.3 Ökobilanz Formholzprofile
Autor: Christian Manthey (BU)

3.9.3.1 Ziel und Untersuchungsrahmen

Um Potenziale oder aber auch ökologische Schwachstellen der Formholzprofile im Vergleich mit anderen Baustoffen darstellen zu können, wurde ein Variantenvergleich am Beispiel einer zentrisch gedrückten Stütze erstellt. Grundlage für die Berechnung ist eine 2,5 m lange Stütze, die beidseitig gelenkig gelagert sein und eine Traglast R_d von ca. 380 kN aufweisen soll. Diese Traglast ist somit die funktionale Einheit des Variantenvergleiches, der die Bauteile im Sinne einer Lebenszyklusanalyse während der Produktions-, Nutzungs- und Entsorgungsphase (bei einer Lebensdauer von 50 Jahren) untersucht. Für die bewehrte Betonstütze ist festzuhalten, dass diese in der vorliegenden Dimension durchaus größere Lasten tragen könnte (ca. 640 kN). Eine geringere Abmessung war jedoch auf Grund von einzuhaltenden bautechnischen Vorgaben - vor allem wegen der Mindestbewehrung für runde Stützen und der Mindestbetondeckung - nicht möglich. Weitere Eigenschaften wie z.B. der Feuerwiderstand flossen in diesen Vergleich nicht mit ein.

3.9.3.2 Erstellung einer Sachbilanz (Input-Output-Bilanz)

Die für die Produktion der Formholzprofile anfallenden Stoff- und Energieflüsse wurden während des Projekts in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern erhoben. Die folgenden Daten fassen die Produktionsphase bis zur Erstellung eines unbewehrten Formholzprofils zusammen und bilden weiterhin den Startpunkt für die Wirkungsabschätzung im nächsten Kapitel (eine detailliertere Beschreibung befindet sich in Anlage A2: Ökobilanz für faserbewehrte Formholzprofile):

Tabelle 3.82: Sachbilanz Formholzprofil (HHT)

Sachbilanz: 1 Formholzprofil a 2,5 Länge (HHT)	23	kg
Material		
Holzbedarf (Input) für 1 Formholzprofil	0,085	m3
Harzbedarf	0,41	kg
Energie (elektrisch) für Sägen, Hobeln, Leimen	3	kWh
Energie für Hydraulik (elektrisch) bei Verdichtung	1,6	kWh
Wärmebedarf bei Verdichtungsprozess:		
Gasverbrauch *	141	MJ
Holzverbrauch *	74	MJ
Dämpfprozess vor Verformung	21	kWh
Verformungsprozess (berechnet)	7	kWh
Transportaufwand (Dehonit, Hess, TU Dresden) **	18,6	tkm
Holzabfall	15,2	kg

* Die Werte werden für ein Vergleichsszenario des Formholzprofils später noch variiert; die Wärmeproduktion für die Verdichtung der im Formholzprofil verbauten Lamellen erfolgt in diesem Vergleichsszenario vollständig auf Holzbasis, also 215 MJ holzbasiert Wärmeenergie

**Dieser Wert wird für das Vergleichsszenario auf 5 tkm herabgesetzt (entspricht in etwa dem Transportaufwand bei der normalen Holzproduktion)

Ausgehend von der obigen Sachbilanz sind für die Herstellung eines faserbewehrten Formholzprofils weitere Prozessschritte notwendig. Die dazu im Projekt untersuchten Verfahren zur Bewehrung haben alle gemein, dass dabei lediglich die Inputs Epoxidharz, Fasermaterial und elektrische Energie für das Aufbringen der Faser-Harz-Matrix auf das Formholzprofil zum Einsatz kommen. Nachfolgend ist die Zusammensetzung der glasfaserbewehrten Formholzprofile angeführt:

Tabelle 3.83: Sachbilanz Baugruppe Formholzprofil mit verschiedenen Bewehrungsverfahren

	Wickeln	Flechten	Strickschlauch
Formholzprofil a 2,5 Länge	23 kg	23 kg	23 kg
Epoxidharz	1,6 kg	1,9 kg	1,75 kg
Glasfaser	1,8 kg	1,65 kg	1,75 kg
Prozesse			
Energie, elektrisch	9 kWh	12,5 kWh	30 kWh

Da für die Nutzungsphase sowie die Entsorgungsphase zum jetzigen Zeitpunkt noch keine genauen Werte vorliegen können, sind für die weitere Modellierung des Lebenszyklus Annahmen zu treffen. Zunächst wird, um die Auswirkungen des Transports der Bauteile abschätzen zu können, eine Entfernung von 50 km angesetzt, die vor der Montage der Stütze zurückzulegen ist. Die Montage selbst erfolgt in Handarbeit, benötigt also keine weiteren Stoff- und Energieflüsse. Die Instandhaltung der Formholzprofile ist nach bisheriger Einschätzung mit keinem oder nur wenig Aufwand verbunden. Allenfalls könnte ein erneuter Anstrich, die Erneuerung der Matrix auf der Oberfläche des Formholzprofils, erfolgen. Daher wurde, nach Einschätzung des ISH, ein Anstrich mit ca. 50 g/m² bilanziert. Für den Anstrich vor Ort ist nach gängiger Ökobilanzpraxis auch die Anfahrt des dafür eingesetzten Personals zu bilanzieren, hierfür wurde eine Strecke von geschätzten 50 km jeweils für An- und Abfahrt angesetzt.

Auch die Entsorgungsphase basiert vollständig auf Annahmen. Um zum Ende des Lebenszyklus die im Holz gespeicherte Energie nutzbar machen zu können, muss nach einem erneuten

Transport (50 km) die Harz-Fasermatrix vom Holz getrennt werden. Da bisher keine bekannte Technik zur Verfügung steht, wurde als erster Schätzwert der Verbrauch einer maschinellen Holzzerkleinerung genutzt. Die Faser-Harzmatrix wird der Müllverbrennung zugeführt, das Holz wird wie bei der Ökobilanzierung der Brücken ohne weitere stoffliche Nutzung einer KWK-Anlage zur Verbrennung zugeführt. Durch die bei der Verbrennung freiwerdende Energie können fossile Energieträger eingespart werden, was wiederum zu Gutschriften im Sinne der Ökobilanz führt. Neben den bei der Verbrennung freiwerdenden Emissionen werden daher pro kg Holz Wärmeenergie (5,2 kWh) und elektrische Energie (1,99 kWh) erzeugt und dem Formholzprofil am Ende seines Lebenszyklus zugerechnet (vgl. Anlage A2: Ökobilanz für faserbewehrte Formholzprofile). Der Lebenszyklus eines mit Glasfaser bewehrten Formholzprofils ist nachfolgend noch einmal zusammengefasst:

Tabelle 3.84: Übersicht Lebenszyklus Formholzprofil

Lebenszyklus:			
LC Formholzprofil, gewickelt			
Produktionsphase:			
Formholzprofil, Glasfaser, gewickelt	1	(siehe oben)	
Nutzungsphase:			
Transport, LKW 3.5-16t	1,3	tkm	Beispieltransport 50 km
Anstrich Epoxidharz für 1m² Profil worst case (50g/m²)	2,2	m²	
Transport, Auto, für Anstrich	100	pkm	Personenkilometer
End-of-Life:			
"Holzzerkleinerung" (Trennvorgang Matrix-Holz)	10	kg	
Abfall-/Entsorgungsszenario			
Transport	1,3	tkm	
Verbrennung mit Energiegewinn in KWK			

Für die Vergleichsobjekte aus Beton bzw. Stahl ist die Sachbilanz nachfolgend zusammengefasst. Auf Basis der Berechnungen durch die Projektpartner ISH und IaFB sind die Vergleichsbauteile wie folgt zusammengesetzt:

Tabelle 3.85: Übersicht Lebenszyklus Betonsäule

Lebenszyklus:			
LC Betonsäule			
Produktionsphase			
Beton	105,15	kg	
Armierungsstahl	13,74	kg	
Nutzungsphase:			
Transport, LKW 3.5-16t	6	tkm	Beispieltransport 50 km * 119kg
End-of-Life:			
Transport, LKW 3.5-16t	6	tkm	
Entsorgungsszenario für Betonsäule*			

*Für das Entsorgungsszenario wird angenommen, dass der recycelte Beton als Ersatz für Füllstoffe wie Kies erneut bei der Betonproduktion zum Einsatz kommen kann.

Tabelle 3.86: Übersicht Lebenszyklus Stahlrohr

Lebenszyklus Stahlrohr			
Produktionsphase:			
Stahlrohr	30	kg	
Nutzungsphase:			
Transport, LKW 3.5-16t	1,5	tkm	Beispieltransport 50 km * 30 kg
Abfall-/Entsorgungsszenario:			
Transport, LKW 3.5-16t	1,5	tkm	
Stahlrecycling*			

*Der Stahl kann nach dem bereits bei der Ökobilanz Brücken beschriebenen Szenario nach Hauke (2009) [293] zu 90% wieder recycelt werden.

Die dargestellten Lebenszyklen sind in Anlage A2: „Ökobilanz für faserbewehrte Formholzprofile“ noch genauer erläutert. Sie bilden die Basis für den Vergleich mit dem Lebenszyklus des Formholzprofils im nun folgenden Kapitel, das zunächst die Auswirkungen der Produktionsphase des Formholzprofils etwas genauer betrachtet und im Anschluss daran auch die Ergebnisse der Vergleichsbauteile darstellt.

3.9.3.3 Wirkungsabschätzung und Identifizierung von Leistungstreibern

Die zuvor dargestellten Sachbilanzen bilden die Basis für den Vergleich mit dem Lebenszyklus des Formholzprofils im nun folgenden Kapitel, das zunächst die Auswirkungen der Produktionsphase des Formholzprofils etwas genauer betrachtet und im Anschluss daran auch die Ergebnisse der Vergleichsbauteile darstellt. Es wird der schon zuvor bei der Analyse der Brücken eingesetzte Indikatorsatz genutzt, um die potentiellen Auswirkungen abzuschätzen: zuerst wird der Ressourcenverbrauch untersucht und im zweiten Schritt die Wirkungskategorien der CML-Methode.

Der Ablauf der nun folgenden Analyse soll zunächst übersichtsartig dargestellt werden, um das Vorgehen transparenter und die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung besser nachvollziehbar zu machen. Es wird wie folgt vorgegangen:

- Einleitend wird die Produktionsphase der Formholzprofile genauer betrachtet. Hier geht es zunächst darum, die Produktion der unbewehrten Formholzprofile etwas genauer zu untersuchen, da hinsichtlich der benötigten Wärmeenergie für die Verdichtung des Holzes zwischen der vollständigen Versorgung auf Holzbasis (wie in der ecoinvent Datenbank) und der zusätzlichen Nutzung fossiler Ressourcen (z.B. Gas wie im Projekt HHT) zu unterscheiden ist.
- Anschließend werden kurz die verschiedenen Möglichkeiten der textilen Verstärkung untersucht. Hier werden die im Projektverlauf untersuchten Wickelverfahren, Flechtverfahren sowie das Strickschlauchverfahren miteinander vergleichen.
- Nach der Beschreibung und Analyse des Produktionsverfahrens wird abschließend der Lebenszyklus eines per Wickelverfahren mit Glasfasern bewehrten Formholzprofils analysiert und mit den Lebenszyklen vergleichbarer Alternativen aus Beton und Stahl verglichen. Alle Alternativen sollen als Stütze fungieren, der Lebenszyklus dieser Alternativen wird, basierend auf den unter 3.9.3.1 und 3.9.3.2 dokumentierten Annahmen, vergleichend untersucht.
- Am Ende soll noch kurz der mögliche Einfluss der Verwendung verschiedener Fasern (Aramidfaser, Kohlefaser, Glasfaser) bei der Bewehrung erörtert werden.

3.9.3.3.1 Analyse der Produktionsphase des unbewehrten Formholzprofils (HHT)

Die Wirkungsabschätzung des reinen, unbewehrten Formholzprofils wird zunächst über den Ressourcenverbrauch vorgenommen (vgl. Abb. 3.392). Es zeigt sich, dass der Ressourcenverbrauch hauptsächlich auf der Seite der erneuerbaren Energieträger und hier vor allem durch den Holzverbrauch allein verursacht wird. Dies ist im Falle des als Material eingesetzten Holzes (Unterpunkt "Holz", im Diagramm in grün) nicht als direkter Verbrauch zu interpretieren, sondern vielmehr als Inanspruchnahme von gespeicherten Energiereserven zu verstehen, die über den Brennwert angerechnet werden. Anders im Unterpunkt Wärmezufuhr, holzbasiert (lila). Hier wurde das Holz bereits verbrannt und energetisch genutzt. Zwar werden beide als regenerative Energieträger in der Kategorie EE zusammengefasst, das energetische Potential des bisher stofflich eingesetzten Holzes ist jedoch noch erhalten und kann (im Gegensatz zum für die Wärmezufuhr genutzten Holz) am Ende des Lebenszyklus noch genutzt werden. Tabelle 3.88 listet diese und andere Posten in einer genaueren Aufschlüsselung des erneuerbaren Energieverbrauchs noch einmal auf. In Analogie dazu ist in Tabelle 3.89 der Verbrauch nicht erneuerbarer Ressourcen detailliert dargestellt. Wie auch die Abbildung verdeutlicht, wird der Verbrauch nicht erneuerbarer Energieträger durch mehrere Sachbilanzposten verursacht. Die Wärmezufuhr bei der Verdichtung und der Verbrauch elektrischer Energie sind hier die größten Verursacher. Dass auch die Bereitstellung des Holzes einen merkbaren Verbrauch verursacht, ist damit zu erklären, dass bei der Verarbeitung des Baumes zu verarbeitungsfähigem Holz Energie verbraucht wird und z.B. die zuvor anfallenden Transporte z.B. des Baumstamms mit in diese Bilanz einfließen. Letzteres ist eine mögliche Ursache des Wertes in der Unterkategorie Rohöl (hier nicht weiter aufgeschlüsselt). In der Abbildung ebenfalls zu erkennen ist, dass neben Holz nur noch der Klebstoff Resorcinharz als direkter stofflicher Input in die Produktion des Formholzprofils einfließt und die Interpretation dieser Ergebnisse auch vor dem Hintergrund der Massenverhältnisse erfolgen muss: Das Holz hat mit über 20 kg im Vergleich zum Harz mit weniger als einem halben Kilogramm ein deutliches Übergewicht, was sich dementsprechend auch auf die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung auswirkt. Auch der Transport (hellblau) nimmt merkbaren Einfluss. Dieser wird u.a. auch durch die zu überwindenden Strecken der weit voneinander entfernten Projektpartner (zu berechnen waren hier ca. 600 km) verursacht, d.h. es gäbe hier sicherlich Optimierungspotential für eine zukünftige Produktion.

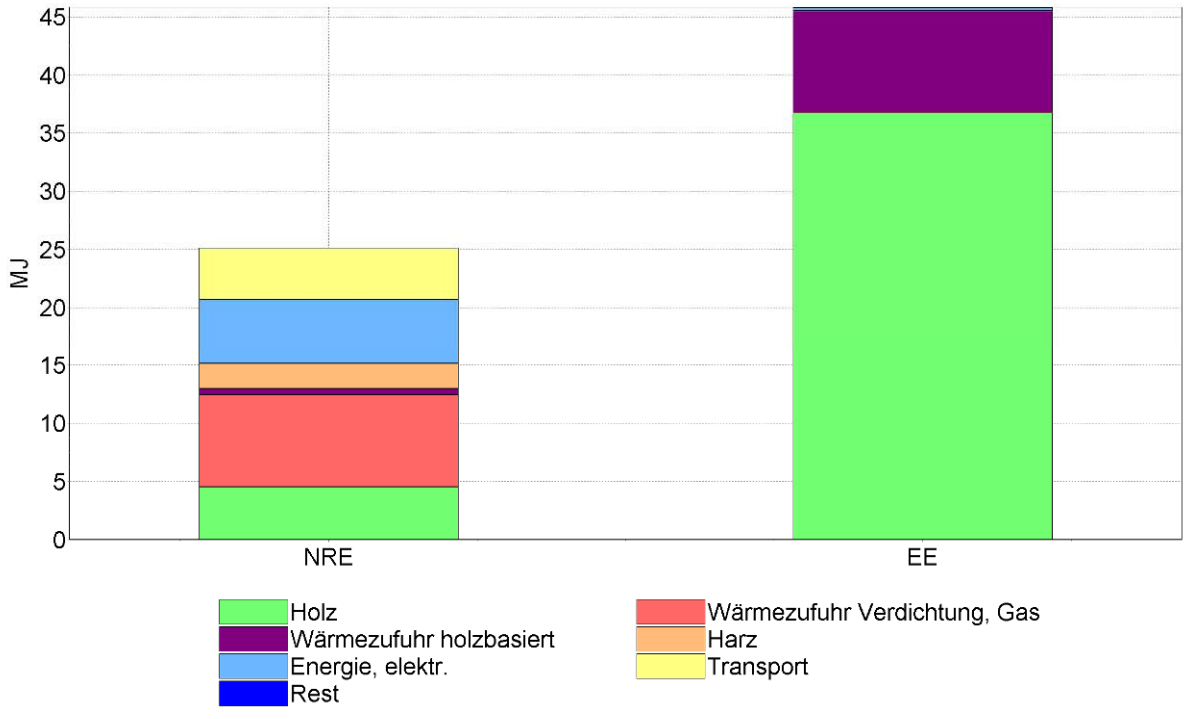


Abb. 3.392: Ressourcenverbrauch Produktion Formholzprofil

Tabelle 3.87: Ressourcenverbrauch Produktion Formholzprofil

	Einheit	Total	Holz	Wärmezufuhr, Verdichtung, Gasbasiert	Wärmezufuhr, Verdichtung holzbasiert	Harz (Kleb stoff)	Energie, elektrisch	Transport
NRE	MJ	25,15	4,55	7,92	0,51	2,14	5,59	4,44
EE	MJ	45,83	36,75	0,03	8,70	0,03	0,25	0,08

Tabelle 3.88: Aufschlüsselung Ressourcenverbrauch EE in Unterkategorien

Unterkategorie	Einheit	Total	Holz	Wärmezufuhr holzbasiert	Andere
Energie, Brennwert, in Biomasse	MJ	45,34	36,60	8,64	0,10
Energie, Brennwert, in Biomasse, Primärwald	MJ	0,00	0,00	0,00	0,00
Energie, kinetisch (wind), umgewandelt	MJ	0,11	0,02	0,00	0,10
Energie, solar, umgewandelt	MJ	0,00	0,00	0,00	0,00
Energie, Wasserkraft, umgewandelt	MJ	0,37	0,13	0,06	0,18
Gesamt	MJ	45,83	36,75	8,70	0,38

Tabelle 3.89: Aufschlüsselung Ressourcenverbrauch NRE in Unterkategorien

Stoff	Einheit	Total	Holz	Wärme-zufuhr, Gas	Wärme-zufuhr, Holz	Harz (Kleb stoff)	Energie, elektrisch	Transport
Gesamt	MJ	25,15	4,55	7,92	0,51	2,14	5,59	4,44
Braunkohle	MJ	2,23	0,40	0,04	0,03	0,05	1,65	0,05
Steinkohle	MJ	2,40	0,54	0,08	0,05	0,12	1,45	0,16
Gas (Nebenprodukt aus Bergbau)	MJ	0,06	0,01	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00
Gas, natürliches Vorkommen	MJ	9,90	0,53	7,63	0,04	0,80	0,58	0,32
Rohöl	MJ	6,94	2,04	0,06	0,09	1,00	0,18	3,57
Uran	MJ	3,62	1,02	0,10	0,30	0,16	1,70	0,33

Nach der Betrachtung des Ressourcenverbrauchs folgt nun noch die Wirkungsabschätzung mit Hilfe der CML-Methode (vgl. Abb. 3.393): Hier ist der Einfluss des Transports (gelb) noch etwas markanter, bis zu 40% (Wirkungskategorie EP) der potentiellen Auswirkungen können im Projektszenario durch den Transport verursacht werden (daher wird in der weiteren Untersuchung im zweiten Szenario der Transportaufwand etwas reduziert). In der Wirkungskategorie GWP sind die Gutschriften für die Verwendung des Holzes (grün) besonders markant. Diese entstehen durch die Aufnahme von CO_2 während der Wachstumsphase des Holzes. Bei einer vollständigen Lebenszyklusbetrachtung entfallen diese Gutschriften wieder, da das Holz am Ende des Produktlebenszyklus verbrannt wird und das gespeicherte CO_2 als Emissionen wieder freigesetzt wird. Die durch die Verbrennung von Gas erzeugte Wärmezufuhr führt zu merklichen Beiträgen zur Kategorie ADP und ODP während die holzbasierte Wärmeproduktion in den Kategorien AP und EP Schadpotential aufweist. Die absoluten Werte der Emissionen in den einzelnen Wirkungskategorien können Tabelle 3.90 entnommen werden.

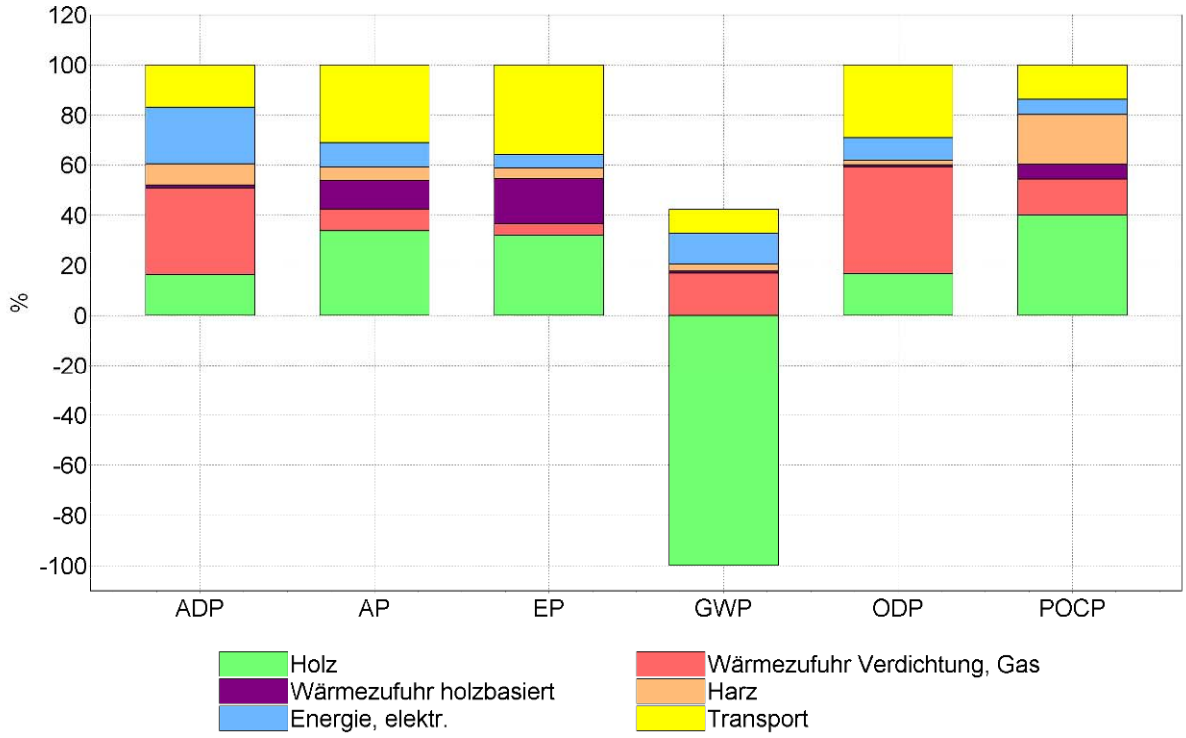


Abb. 3.393: CML: Produktionsphase Formholzprofil

Abb. 3.394 setzt noch einmal die durch die Produktion des Formholzprofils indirekt verursachten Emissionen in Bezug zu den Emissionen, die im gesamten Westeuropäischen Raum in der jeweiligen Kategorie in einem Jahr verursacht werden (Normalisierung). Der relative Beitrag ist demnach zu den Kategorien ADP und GWP am größten, im Vergleich dazu ist in den vier anderen Kategorien nur der Beitrag in der Kategorie AP relativ hoch, in der Kategorie ODP dagegen ist er kaum erkennbar. Es ist darauf hinzuweisen, dass dies keine Aussage über die Wichtigkeit der Kategorien liefert und auch nicht die Frage klärt, ob die verursachten Emissionen in einer bestimmten Kategorie mit größerer Wahrscheinlichkeit einen Schaden anrichten könnten als in anderen Kategorien. Es liefert lediglich eine Referenzgröße für die Emissionen in einer Region, in diesem Fall Westeuropa im Jahr 1995. Über das Schadpotential innerhalb einer Kategorie wird damit aber keine Aussage getroffen.

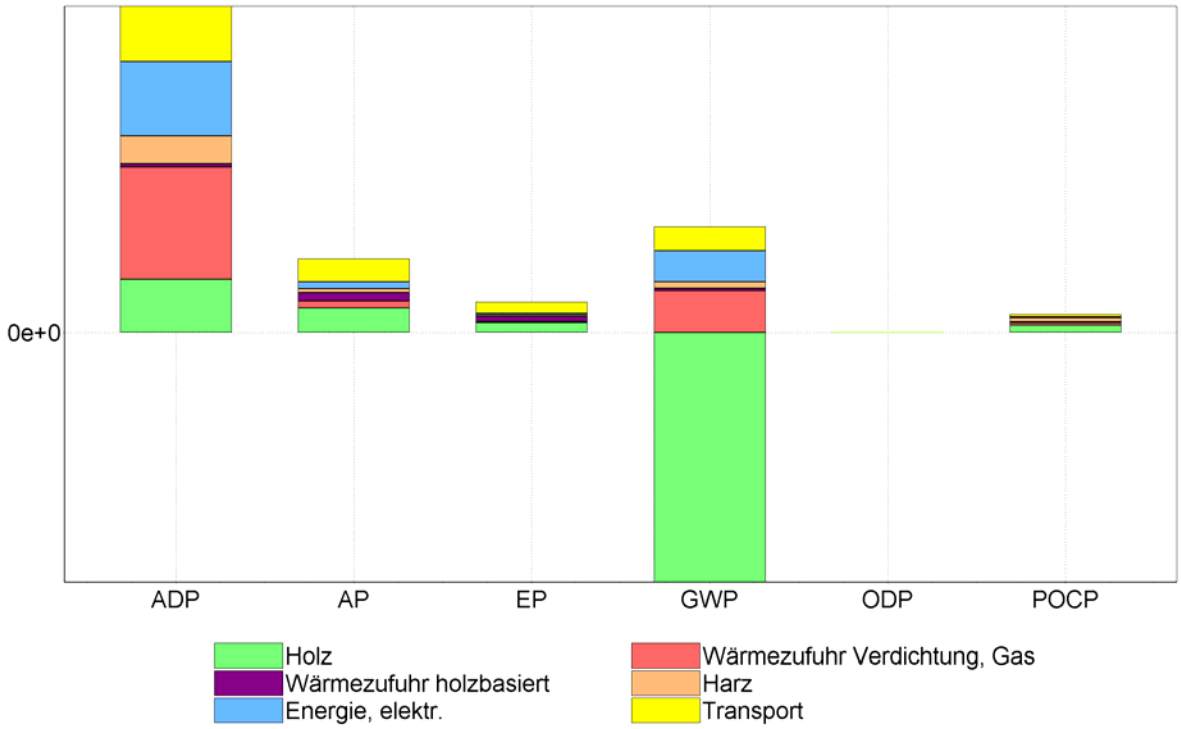


Abb. 3.394: CML: Produktionsphase Formholzprofil normalisiert

3.9.3.3.2 Analyse Produktionsphase unbewehrtes Formholzprofils (Vergleichsszenario)

In Anlehnung an die Praxis der ecoinvent Datenbank, die für die Trocknung des Holzes in der holzverarbeitenden Industrie eine reine Versorgung mit Holzfeuerung zu Grunde legt [296], wird ein zweites Szenario modelliert, in dem die Wärmezufuhr vollständig auf der Verbrennung von Holz basiert. Zusätzlich wird der Transportaufwand reduziert auf 5 tkm pro Formholzprofil was bei einem Gewicht von ca. 25 kg einer Transportdistanz von ca. 200 km pro Profil entsprechen würde. Die veränderten Stoff- und Energieflüsse führen zu der unter Tabelle 3.82 angedeuteten Veränderung in der Sachbilanz, die wiederum eine veränderte Wirkungsabschätzung nach sich zieht. Diese Veränderungen in den einzelnen Wirkungskategorien der Wirkungsabschätzung des Formholzprofils sollen im Folgenden kurz dargestellt und den Werten für die bisherige Produktion, wie sie im Verlaufe des Projekts HHT stattgefunden hat (im weiteren Verlauf kurz als "Formholzprofil HHT" bezeichnet) gegenübergestellt werden.

Tabelle 3.90 offenbart somit ein erstes Minderungspotential, das bei einer zukünftig angedachten Produktion der Formholzprofile als durchaus realistisch bzw. umsetzbar eingestuft werden kann (Verminderung des Transportaufwands, Wärmeversorgung mit Holz).

Tabelle 3.90: CML: Formholzprofil (HHT) und Vergleichsszenario

	Einheit	Formholzprofil (HHT)	Formholzprofil (Vergleichsszenario)	Differenz	Differenz in %
ADP	kg Sb	0,255	0,138	0,117	46%
AP	kg SO2	0,107	0,084	0,023	22%
EP	kg PO4	0,020	0,017	0,003	15%
GWP	kg CO2	-36,599	-51,314	14,715	40%
ODP	kg CFC	3,31E-06	1,24E-06	2,07E-06	63%
POCP	kg C2H4	0,0081	0,0065	0,002	20%

Auch der Verbrauch fossiler Ressourcen kann verringert werden. Durch die Verringerung des Transports und den Wegfall des Gasverbrauchs (beides Verbraucher fossiler Energieträger) sinkt der Wert für NRE um 10 MJ für ein Profil und verschiebt sich durch den erhöhten Holzbedarf durch die Verbrennung bei der Wärmeproduktion erwartungsgemäß etwas mehr in Richtung EE.

Tabelle 3.91: Ressourcenverbrauch Vergleich Produktion Formholzprofil

Formholzprofil		Total	Holz	Wärmezufuhr Verdichtung, Gas	Wärmezufuhr holzbasiert	Harz	Energie, elektr.	Transport
HHT								
NRE	MJ	578	105	182	12	49	129	102
EE	MJ	1.054	845	1	200	1	6	2
Vergleichsszenario								
NRE	MJ	332	105	-	23	49	129	27
EE	MJ	1.231	845	-	379	1	6	0

Es zeigt sich auch hier bereits ein erhebliches Verbesserungspotential. Dennoch werden für die weiteren Untersuchungen die bisher vorliegenden Bedingungen herangezogen, d.h. die Profile wie bisher de facto vorliegend analysiert. Im nächsten Schritt wird nun die Bewehrung mit Glasfaser untersucht.

3.9.3.3.3 Vergleich verschiedener Bewehrungsverfahren (textile Verstärkung der Formholzprofile)

Mit den in Tabelle 3.83 dargestellten Sachbilanzen werden zusätzlich zur Produktion der Formholzprofile nun auch die verschiedenen Bewehrungsverfahren mit in die Untersuchung einbezogen. Es stehen drei verschiedenen Verfahren zur Auswahl. Tabelle 3.92 fasst den Ressourcenverbrauch bei der Produktion zusammen:

Tabelle 3.92: Ressourcenverbrauch: Vergleich Bewehrungsverfahren

		Formholzprofile, Glas, gewickelt (Standard)	Formholzprofile, Glas, geflochten	Formholzprofile, Glas, Schlauchgestrick
NRE	MJ	971	1.043	1.219
EE	MJ	1.064	1.066	1.075

Das Wickelverfahren liefert hier die besten Werte, das Schlauchgestrick schneidet am schlechtesten ab. Erwähnenswert ist der deutliche Zuwachs an Verbrauch in der Kategorie NRE. Die Verwendung von Harz, Faser und der elektrischen Energie führt hier fast zu einer Verdopplung des Ressourcenverbrauchs im Vergleich zum unbewehrten Formholzprofil.

Die Werte der CML Methode zeigen hinsichtlich der Reihenfolge das gleiche Bild (Tabelle 3.93).

Tabelle 3.93: CML: Vergleich Bewehrungsverfahren

	Einheit	Formholzprofile, Glas, gewickelt	Formholzprofile, Glas, geflochten	Formholzprofile, Glas, Schlauchgestrick
ADP	kg Sb	0,428	0,460	0,537
AP	kg SO2	0,208	0,221	0,233
EP	kg PO4	0,033	0,035	0,036
GWP	kg CO2	-15,293	-11,399	-0,704
ODP	kg CFC	3,89E-06	3,95E-06	4,40E-06
POCP	kg C2H4	0,0115	0,0119	0,0125

Die genauere Betrachtung der Teilbeiträge in den einzelnen Kategorien erfolgt in Zusammenhang mit der Analyse des gesamten Lebenszyklus der Formholzprofile:

3.9.3.3.4 Lebenszyklusanalyse des faserbewehrten Formholzprofils

Die nachfolgenden Untersuchungen fassen die Ergebnisse der Produktion des Szenarios Produktion Formholzprofil (HHT) und die auf der Sachbilanz (Tabelle 3.84) basierenden Ergebnisse zusammen. Abb. 3.395 zeigt so den Ressourcenverbrauchs über den gesamten Lebenszyklus.

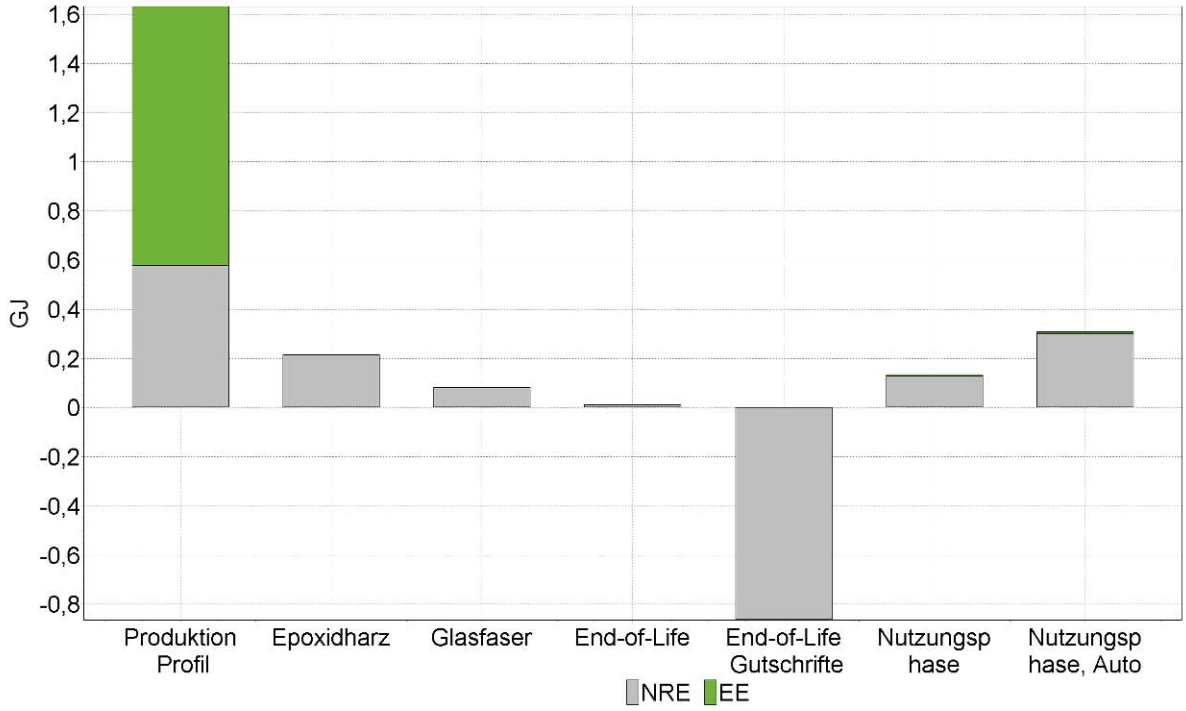


Abb. 3.395: Ressourcenverbrauch: Lebenszyklus Formholzprofil, Glasfaser, gewickelt

In der Abbildung dominiert für die Produktionsphase zunächst die Kategorie EE (grün), d.h. nach Abb. 3.392 vor allem das im Holz gespeicherte Energiepotential. Dieses kann dann in Gutschriften für die End-of-Life Phase durch die Rückgewinnung von Energie umgesetzt werden. Deutlichen Einfluss nimmt für den nicht regenerativen Energieverbrauch auch die Nutzungsphase mit den darin anfallenden Transportaufwänden. Eine interessante Relation der Ergebnisse bietet hier die Kategorie "Nutzungsphase, Auto", die den nicht regenerativen Energieverbrauch für 100 km PKW-Nutzung bilanziert und zu einem beträchtlichen Teil das Gesamtergebnis beeinflusst. Tabelle 3.94 fasst die Ergebnisse in Zahlen zusammen.

Tabelle 3.94: Ressourcenverbrauch: Lebenszyklus Formholzprofil, Glasfaser, gewickelt

	Einheit	Total	Produktion Holzprofil	Epoxid-harz	Glas-faser	End-of-Life	End-of-Life Gutschriften	Nutzungs-phase	Nutzungs-phase, Auto
NRE	MJ	450	578	214	81	11	-864	130	301
EE	MJ	1.072	1.054	2	3	0	-1	5	8
Summe	MJ	1.522	1.632	216	83	12	-865	135	309

Für die Bewertung des Lebenszyklus mit Hilfe der CML Methode zeigt Abb. 3.396 ebenso einen deutlichen Einfluss auf das Gesamtergebnis. Dennoch ist auch hier die Produktionsphase mit der Herstellung des Profils (grün) und dem dabei anfallenden Einsatz von Epoxidharz (orange)

und Glasfaser (rot) als wesentliche Einflussgröße zu benennen. Das für das Holz in der Beschreibung zu Abb. 3.395 erwähnte Energiepotential kann in dieser Abbildung mit den Gutschriften in der Kategorie GWP verglichen werden, hier führt das gespeicherte CO_2 zu Gutschriften durch die Produktion des Profils. Die Möglichkeit zum Ersatz fossiler Brennstoffe durch die Verbrennung des Holzes am Ende des Lebenszyklus (End-of-Life Gutschriften, hellblau) sorgen ebenfalls für positive Effekte. Dass bei dieser Verbrennung des Holzes aber auch wieder Emissionen frei werden, verdeutlichen die negativen Effekte des End-of-Life Szenarios (lila). Unter anderem die im Holz gespeicherten Mengen an CO_2 werden hier wieder freigesetzt.

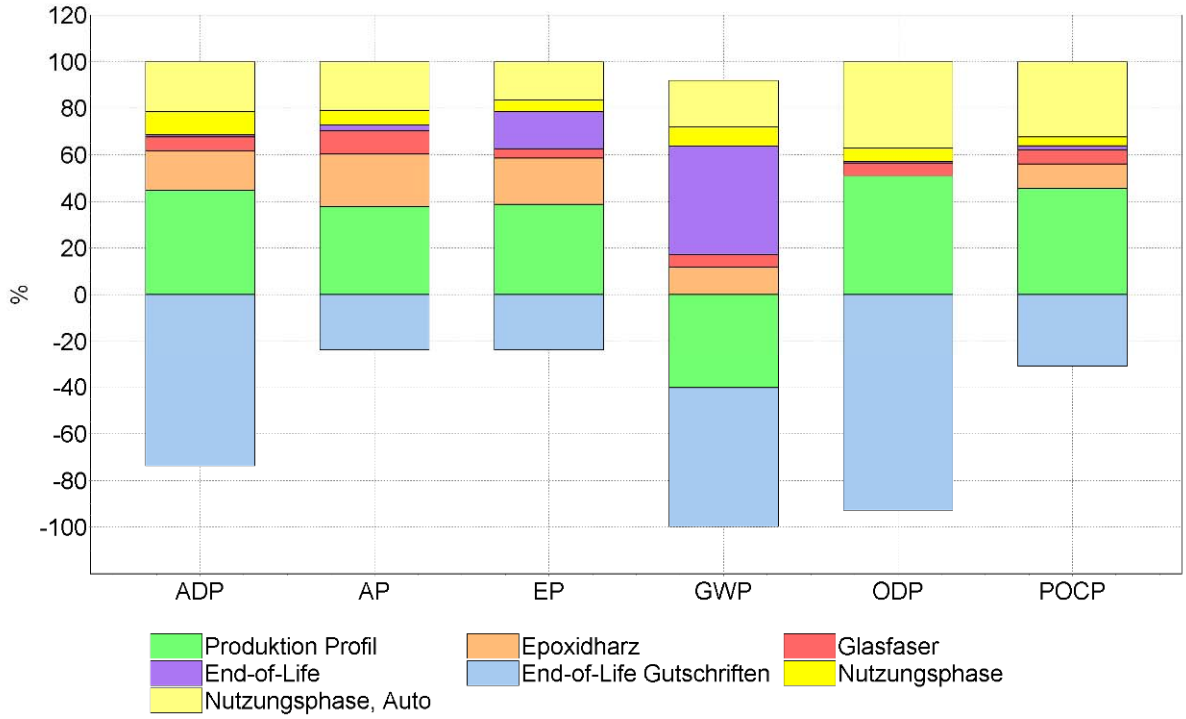


Abb. 3.396: CML: Lebenszyklus Formholzprofil, Glasfaser, gewickelt

Tabelle 3.95: CML: Lebenszyklusphase Formholzprofil, Glasfaser, gewickelt

	Einheit	Total	Produktion Profil	Epoxid-harz	Glasfaser	End-of-Life	EoL Gut-schriften	Nutzungs-phase
ADP	kg Sb	0,148	0,255	0,095	0,035	0,005	-0,421	0,179
AP	kg SO2	0,217	0,107	0,065	0,028	0,008	-0,068	0,078
EP	kg PO4	0,040	0,020	0,010	0,002	0,008	-0,012	0,011
GWP	kg CO2	-7,267	-36,599	10,682	4,744	42,094	-53,910	25,721
ODP	kg CFC	4,60E-07	3,31E-06	2,01E-09	3,57E-07	4,90E-08	-6,04E-06	0,000
POCP	kg C2H4	0,0123	0,0081	0,002	0,0011	0,0003	-0,006	0,006

Diese Annahmen und Werte werden auch im nun folgenden Vergleich der verschiedenen Alternativen zu Grunde gelegt.

3.9.3.3.5 Vergleich der Lebenszyklen der verschiedenen Alternativen

Wie sich die Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse der Vergleichsobjekte aus Stahl bzw. Beton zusammensetzen, zeigen Abb. 3.397 und Abb. 3.398. Im Gegensatz zur Produktion des Formholzprofils fallen hier kaum erneuerbare Energieträger ins Gewicht sondern vor allem die nicht erneuerbaren der Kategorie NRE.

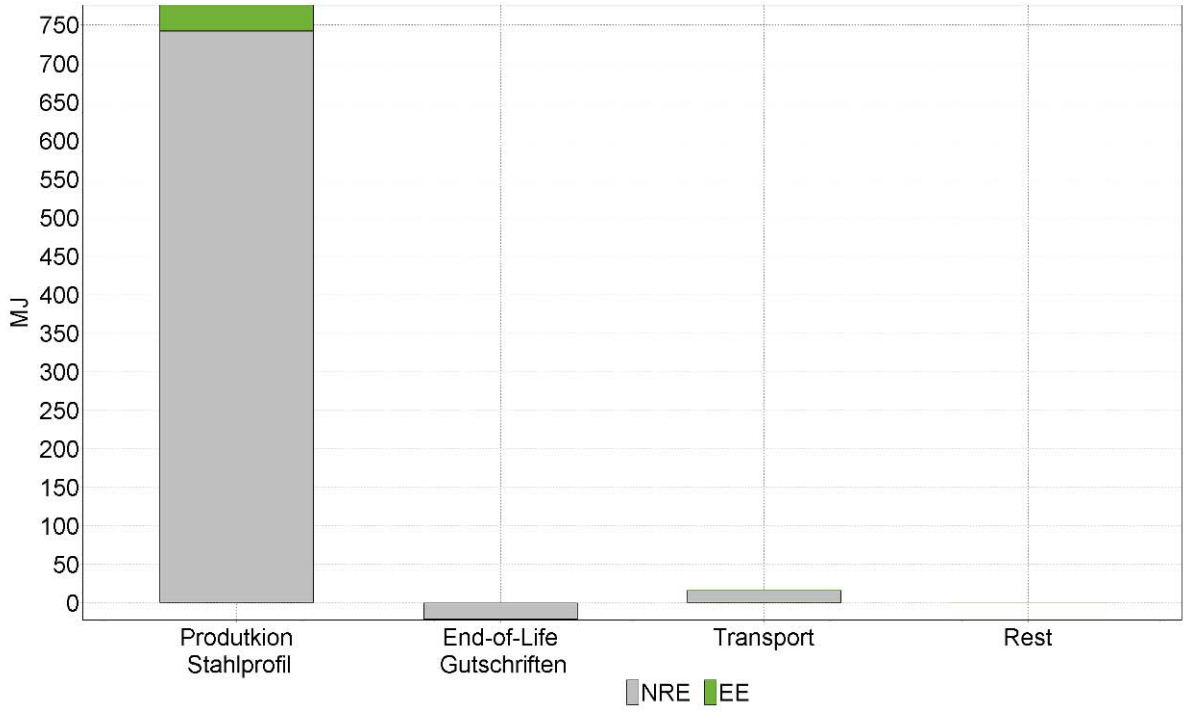


Abb. 3.397: Ressourcenverbrauch: Lebenszyklus Stahlrohr

Für das Stahlrohr ist vor allem die Produktionsphase als Treiber des vor allem nicht regenerativen Energieverbrauchs (NRE) anzusehen. Die Gutschriften durch das mögliche Recycling am Ende der Nutzungsdauer fallen dabei nur wenig ins Gewicht und werden durch den insgesamt anfallenden Transportaufwand wieder aufgehoben.

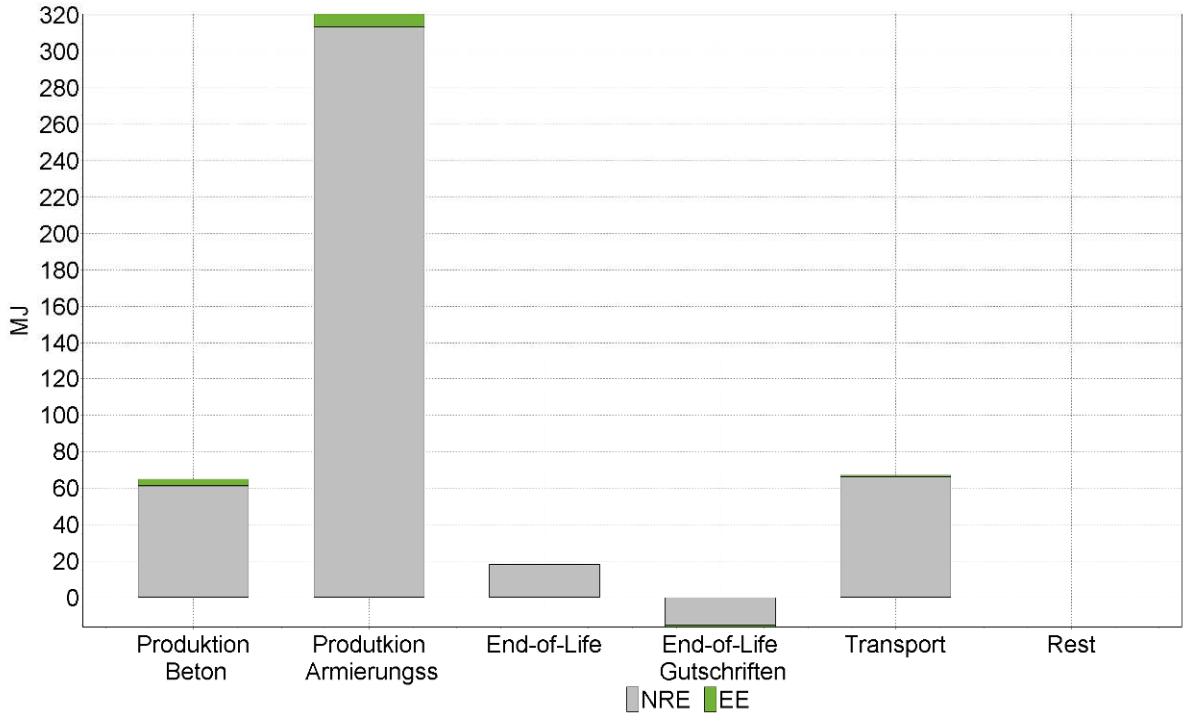


Abb. 3.398: Ressourcenverbrauch: Lebenszyklus Betonsäule

Der Beton selber hat weniger Einfluss auf das Ergebnis sondern vielmehr die Produktion des Bewehrungsstahls. Im Gegensatz zum zuvor gesehenen Stahlrohr ist durch das höhere Gewicht auch ein größerer Einfluss des Transports erkennbar.

Abb. 3.399 zeigt vergleichend den Ressourcenverbrauch der vier verschiedenen Alternativen über den gesamten Lebenszyklus. Die zuvor beschriebenen Beton- und Stahlstützen werden mit den zwei Produktionsvarianten der Formholzprofile (Varianten "HHT" und "Vergleichsszenario") gegenübergestellt. Die holzbasierten Produkte zeigen darin einen deutlich geringeren Verbrauch von nicht erneuerbaren Ressourcen als die Stahlsäule. Im Vergleich zur Betonsäule wird in den betrachteten Szenarien der entscheidende Einfluss der Art der Produktion bzw. der Annahmen verdeutlicht. Wird wie im Vergleichsszenario beschrieben produziert, so sind deutlich weniger nicht erneuerbare Ressourcen als für die Produktion der Betonsäule notwendig. Wird wie im HHT-Projekt produziert, so liegen diese Verbräuche sogar knapp über denen der Betonsäule. Allerdings ist besonders bei einem so geringen Unterschied noch einmal auf die getroffenen Annahmen und deren Einfluss zu verweisen. Allein die Verringerung des angenommenen Transportaufwands kann hier zu einer Verschiebung des Ergebnisses führen.

Der Verbrauch erneuerbarer Energien (EE) liegt durch die bereits erörterte Verwendung des Rohstoffes Holz für die Formholzprofile besonders hoch. Da es sich jedoch um erneuerbare Ressourcen handelt, ist der Verbrauch in dieser Kategorie im Sinne der Nachhaltigkeit als weniger kritisch bzw. als neutral anzusehen.

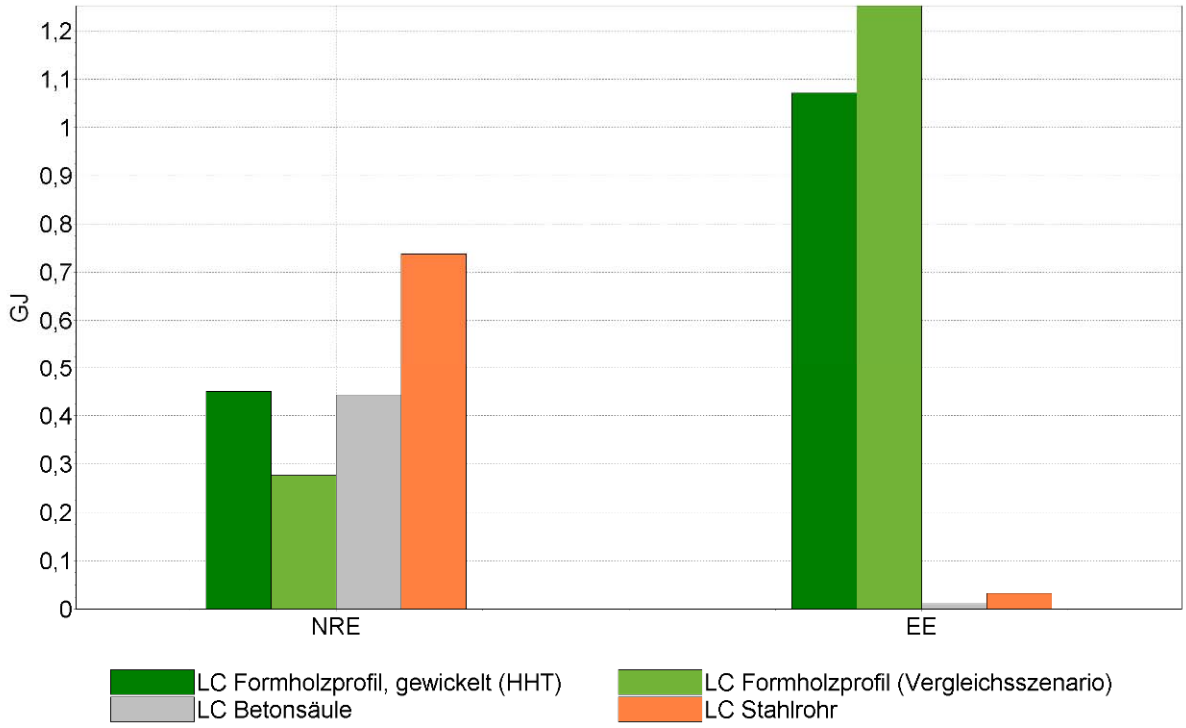


Abb. 3.399: Ressourcenverbrauch: Vergleich Lebenszyklen der 4 Varianten

Der Vergleich der vier Varianten wird nun auch mit Hilfe der CML Methode analysiert. Abb. 3.400 zeigt die Ergebnisse der vergleichenden Wirkungsabschätzung.

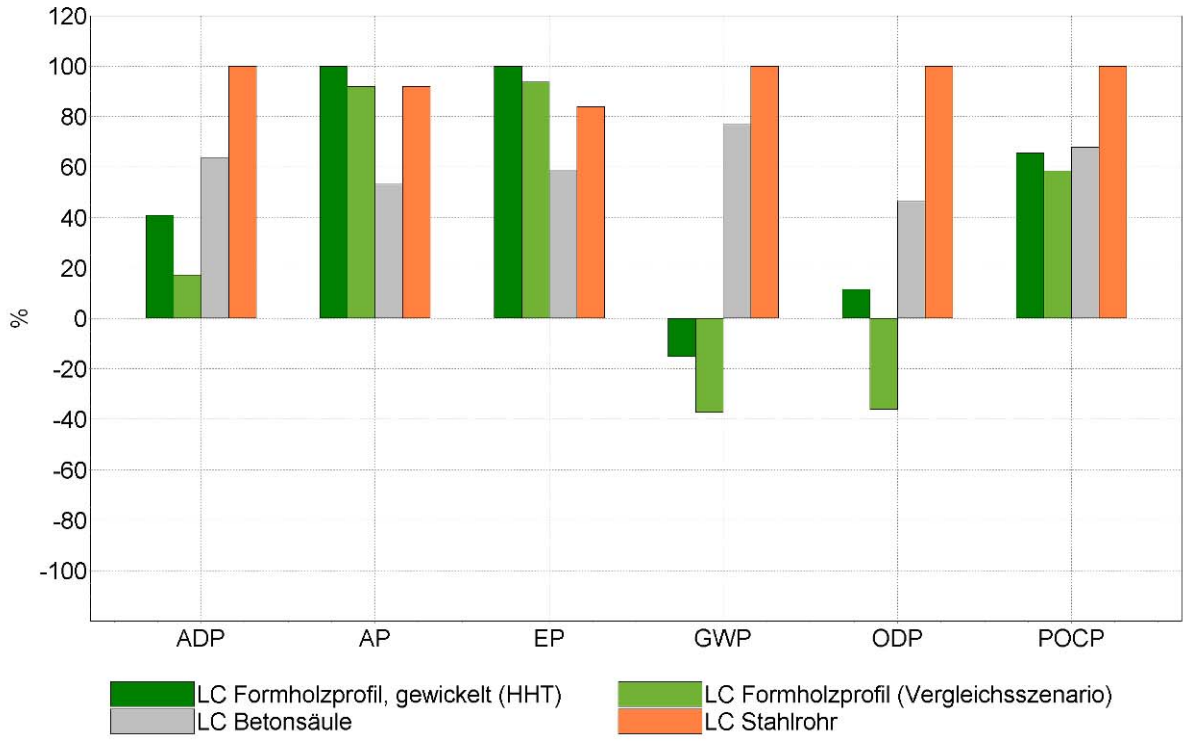


Abb. 3.400: CML: Vergleich der Lebenszyklen der 4 Varianten

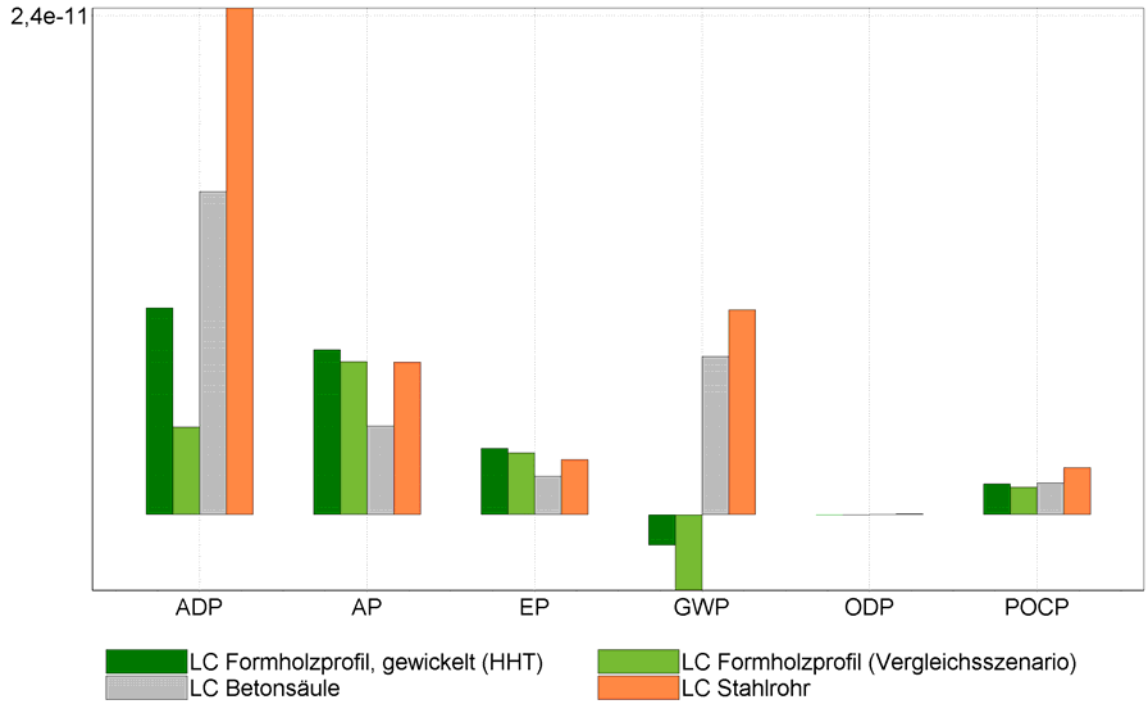


Abb. 3.401: CML: Vergleich der Lebenszyklen der 4 Varianten - normalisiert

Hier zeigen sich im Vergleich zu den Lösungen aus Stahl und Beton in drei der Kategorien (ADP, GWP,ODP) deutlich weniger zu erwartende Auswirkungen für die Formholzprofile, auch in der Kategorie POCP sind für die Profile, etwas weniger deutlich, geringere Auswirkungen zu erwarten. Die Kategorien AP und EP sind klassischerweise Kategorien, in denen bei der Ver-

wendung von Holz mit vermehrten Auswirkungen zu rechnen ist [297], sie können daher als negative Nebeneffekte der Einsparung von nicht erneuerbaren Ressourcen interpretiert werden.

Die Tabelle 3.96 und Tabelle 3.97 fassen die absoluten Werte des Lebenszyklusvergleichs noch einmal zusammen.

Tabelle 3.96: Ressourcenverbrauch: Vergleich der vier Lebenszyklen

	Einheit	LC Formholzprofil, gewickelt (HHT)	LC Formholzprofil (Vergleichsszenario)	LC Betonsäule	LC Stahlrohr
NRE	MJ	450	277	443	737
EE	MJ	1.072	1.253	11	33

Tabelle 3.97: CML: Vergleich der vier Lebenszyklen

	Einheit	LC Formholzprofil, gewickelt (HHT)	LC Formholzprofil (Vergleichsszenario)	LC Betonsäule	LC Stahlrohr
ADP	kg Sb	0,148	0,062	0,231	0,361
AP	kg SO2	0,217	0,200	0,116	0,200
EP	kg PO4	0,040	0,037	0,023	0,033
GWP	kg CO2	-7,267	-17,670	36,454	47,375
ODP	kg CFC	4,60E-07	-1,45E-06	1,85E-06	3,99E-06
POCP	kg C2H4	0,012	0,011	0,013	0,019

3.9.3.3.6 Vergleich verschiedener Fasern

Abschließend soll noch ein kurzer Einblick gegeben werden, wie durch die Wahl verschiedener Fasern das Ergebnis beeinflusst werden kann. In den vorangegangenen Untersuchungen wurden stets Glasfasern bilanziert, für die belastbare Daten aus der ecoinvent Datenbank verwendet werden konnten. Als Alternativen für die Bewehrung soll nun noch der Vergleich mit Aramidfasern und Kohlefasern erfolgen. Allerdings konnten für diese Fasern keine vergleichbaren Daten in der ecoinvent Datenbank oder der Literatur gefunden werden, weshalb auf Daten der IDEMAT Datenbank zurückgegriffen werden musste. Die darin enthaltenen Daten sind weniger nachvollziehbar und nicht hinreichend umfangreich, um einen direkten Vergleich zu den Daten der ecoinvent Datenbank zu erlauben. Die im folgenden Vergleich verwendeten Ergebnisse der IDEMAT Datenbank für die Glasfaser weichen daher von bisherigen Ergebnissen für die Glasfaser aus der ecoinvent Datenbank ab. Dieser Vergleich beruht ausschließlich auf den Daten der IDEMAT Datenbank, womit sichergestellt ist, dass für sämtliche Daten die gleiche Bezugsbasis (Systemgrenzen) gilt.

Daher kann es an dieser Stelle lediglich um einen kurzen Vergleich der Relationen der potentiellen Auswirkungen der verschiedenen Fasern untereinander gehen, nicht um die tatsächlichen Werte für die Abschätzung der Auswirkungen. Abb. 3.402 zeigt die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung mit Hilfe der CML Methode für die Produktionsphase, die wie vorher gesehen von wesentlicher Bedeutung für die Ergebnisse des gesamten Lebenszyklus ist.

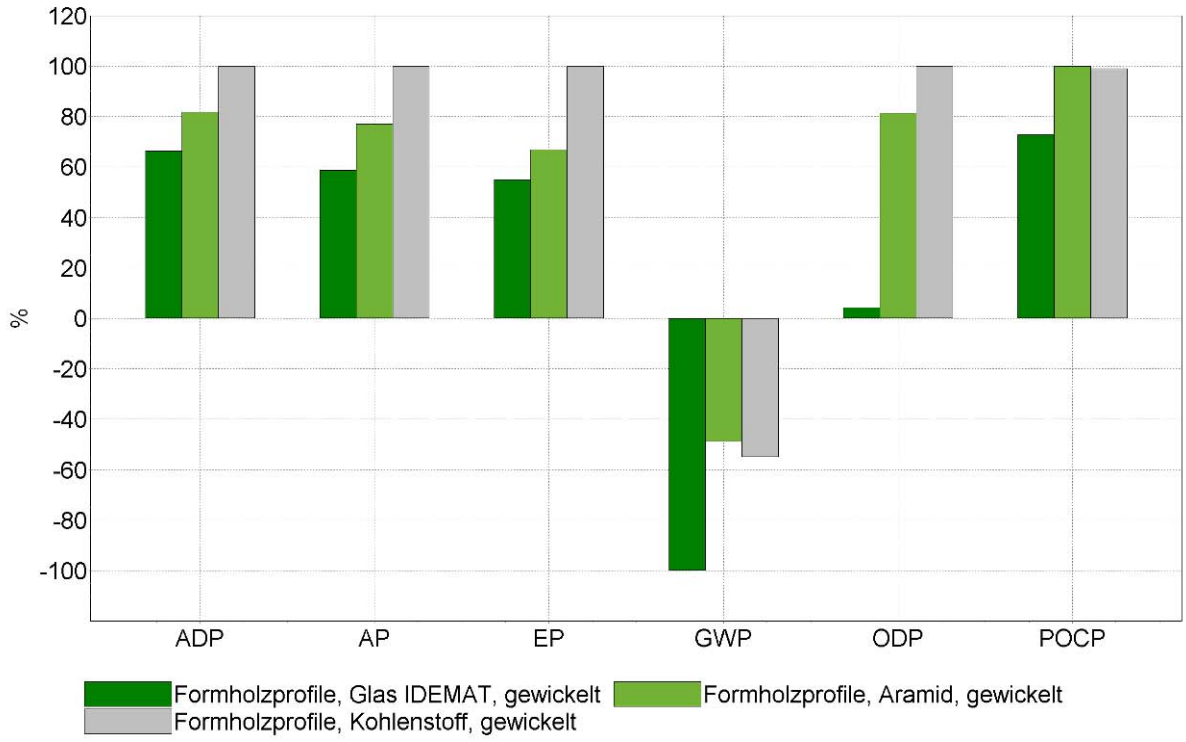


Abb. 3.402: Vergleich der Formholzprofile mit verschiedenen Fasern

Es zeigt sich hier deutlich, dass für die Glasfaser die wenigsten Umweltauswirkungen zu erwarten sind und für die Kohlefaser die größten. Es muss jedoch auch noch darauf hingewiesen werden, dass bei dieser Untersuchung auch die Leistungsfähigkeit der verschiedenen Profile außer Acht gelassen wurde, d.h. die Funktionelle Einheit für die Vergleichsobjekte hier nicht dieselbe sein muss, d.h. die potentiell größeren Umweltbelastungen auch mit mehr oder weniger Leistungsfähigkeit (Belastbarkeit der Formholzprofile) einhergehen können.

3.9.3.4 Entscheidungsorientierter Alternativenvergleich (Auswertung)

Im vorangegangenen sind bereits einige der Ergebnisse des Alternativenvergleichs vorweggenommen worden, werden an dieser Stelle aber noch einmal kurz zusammenfasst:

- Als wichtigste Treiber der Umweltleistung des Formholzprofils sind die Verdichtung des Holzes, die Verwendung des Epoxidharzes sowie die anfallenden Transporte zu sehen. Diese verursachen große Teile der zu erwartenden negativen Umweltauswirkungen. Positive Effekte können dagegen am Ende des Lebenszyklus erzielt werden, wenn das Holz einer sinnvollen energetischen Nutzung zugeführt wird. Letzteres hat insbesondere in den Kategorien des Ressourcenverbrauchs und GWP großen Einfluss auf die Ergebnisse.
- Von größter Bedeutung für die Ergebnisse der Ökobilanz der Formholzprofile ist die Produktionsphase. Für eine ökologische Optimierung des Produkts ist auf Basis der bisherigen Annahmen vor allem hier anzusetzen. Potentielle Ansatzpunkte sind die Bereitstellung der Wärmeenergie bei der Verdichtung sowie eine Verringerung des notwendigen Transportaufwands, der durch die bisherige Konstellation der Fertigungskette noch besonders groß erscheint.
- Geht man von einer optimierten Produktion aus, haben die bewehrten Formholzprofile über den gesamten Lebenszyklus betrachtet in jedem Fall das Potential, als umweltfreundlichere, im Sinne der Nachhaltigkeit vorzuziehende Alternative zu den Vergleichsprodukten dienen zu können. Doch auch die noch nicht optimierten, im bisherigen Pro-

jektverlauf produzierten Formholzprofile halten einem ökologischen Vergleich mit den anderen Konstruktionslösungen in jedem Falle stand, zeigen jedoch auch mit den bisher noch in der Entwicklungsphase steckenden Produktionsverfahren schon Potentiale einer ökologisch vorteilhaften Alternative zu den bisher im Einsatz befindlichen Baustoffen aus Stahl und Beton.

3.9.4 Andere Arbeiten zur Umweltleistungsmessung

Neben den zuvor dokumentierten Untersuchungsschwerpunkten Formholzprofile und Brücken wurden ebenfalls Arbeiten in Verbindung mit den erstellten Merkblättern und zur Gestaltung verschiedener Verbindungslösungen vorgenommen. Die Ergebnisse zu den Merkblättern sind den HHT-Merkblättern in Anlage A4 zu entnehmen, an dieser Stelle sollen daher lediglich die Untersuchungsergebnisse der verschiedenen Verbindungen erläutert werden.

Untersuchungsgegenstand war die Umweltleistungsmessung der Produktionsphase für verschiedene Gelenkverbindungen. Zur genaueren Definition der Zusammensetzung wird an dieser Stelle auf Kap.3.3.1 verwiesen. Es bleibt festzuhalten, dass die vorliegende Untersuchung lediglich die Tendenzen der verschiedenen Ausführungen der Verbindungen anzeigen kann. Ein Vergleich im Sinne der Ökobilanzierung verbietet sich hier aufgrund der unterschiedlichen Leistungsfähigkeit der Verbindungen. Der Test eben dieser Leistungsfähigkeit wurde in Kap. 3.3.1 von den Projektpartnern durchgeführt und variiert je nach Ausführung, was jeweils zu einer anderen Funktionellen Einheit und somit bereits zum Wegfall der Vergleichbarkeit führt (vgl. Abb. 3.265). Zudem wurden die hier mit „neue Ringe“ bezeichneten Verstärkungen (Patches aus MLG mit Epoxidharzmatrix) in diesen frühen Versuchen nicht getestet sondern erst im Laufe des Projektes entwickelt und in anderen Verbindungen eingesetzt, so dass diesbezüglich nicht nur die Traglast sondern auch die Geometrie von den anderen Verbindungen abweicht. Um letzteres auszugleichen, wurden die Werte für die Patches („neue Ringe“) mit dem Faktor 2,64 auf die Geometrie der alten „Jojos“ hochskaliert. Dennoch werden hier die Ergebnisse nebeneinander gestellt, um einen ersten Überblick über die potentiellen Umweltauswirkungen und die möglichen Quellen von Auswirkungen zu geben. Abb. 3.403 zeigt zunächst die Auswirkungen im Bereich des Ressourcenverbrauchs, die für alle Verbindungen vor allem im Bereich der Kategorie NRE zu finden sind. Die zu vernachlässigenden Werte in der Kategorie EE sind hier durch die Anteile regenerativer Energie im Bereich des deutschen Strommixes zu sehen. Es gilt hier. Je größer der Wert für NRE, desto größer auch der Wert in der Kategorie NRE.

Tabelle 3.98: Sachbilanzen: Verbindungen

		GW	GFK	JOJO	GFK + Gelege	JOJO + Gelege	Neue Ringe
Glasfaser	[kg]	0,18	0,67	0,56	0,80	0,69	0,13
Epoxidharz	[kg]	0,20	0,37	0,42	0,52	0,57	0,30

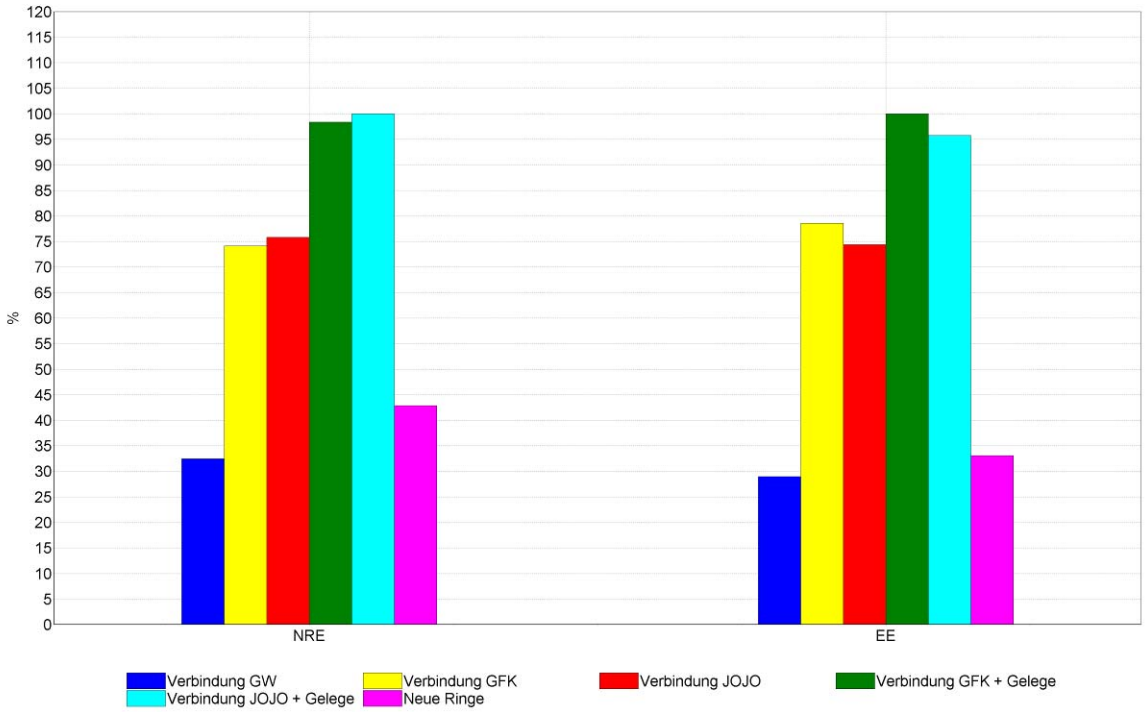


Abb. 3.403: Ressourcenverbrauch verschiedener Verbindungen

Die Werte für den Ressourcenverbrauch können als guter eindimensionaler Indikator für die potentiellen Umweltauswirkungen dienen, sie werden in Tabelle 3.99 noch einmal als absolute Werte dargestellt.

Tabelle 3.99: Ressourcenverbrauch: Verbindungen

	Einheit	Verbindung GW	Verbindung GFK	Verbindung JOJO	Verbindung GFK + Gelege	Verbindung JOJO + Gelege	Neue Ringe
NRE	MJ	34,75	79,32	81,12	105,20	106,96	17,19
EE	MJ	0,56	1,53	1,45	1,95	1,86	0,24

Zusätzlich werden noch die Werte der Wirkungsabschätzung mit Hilfe der CML Methode präsentiert.

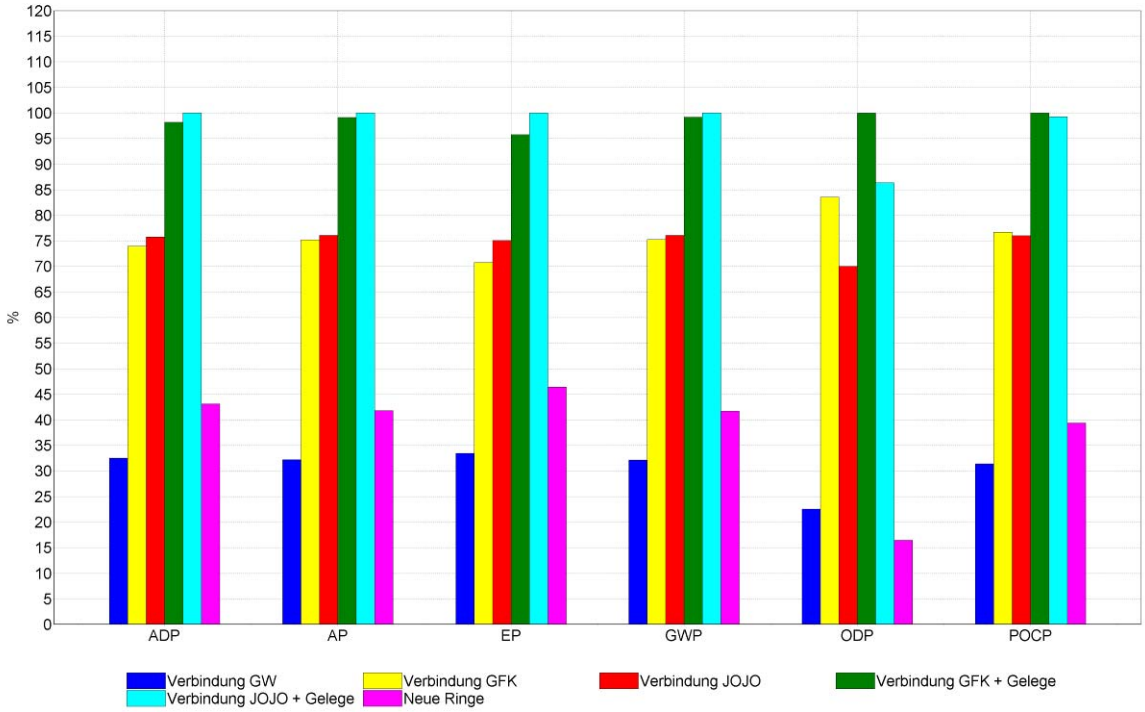


Abb. 3.404: CML: Verbindungen (mit unterschiedlichen Funktionellen Einheiten)

Tabelle 3.100: CML: Verbindungen (mit unterschiedlichen Funktionellen Einheiten)

Wirkungskategorie	Einheit	GW	GFK	JOJO	GFK + Gelege	JOJO + Gelege	Neue Ringe
ADP	kg Sb	0,0154	0,0349	0,0358	0,0464	0,0472	0,0203
AP	kg SO2	0,0109	0,0255	0,0258	0,0336	0,0339	0,0142
EP	kg PO4	0,0015	0,0032	0,0034	0,0043	0,0045	0,0021
GWP	kg CO2	1,81	4,23	4,28	5,58	5,62	2,35
ODP	kg CFC	3,59E-08	1,33E-07	1,12E-07	1,59E-07	1,38E-07	2,61E-08
POCP	kg C2H4	0,0003	0,0008	0,0008	0,0011	0,0011	0,0004

4 Verwertung und Verbreitung der Ergebnisse

4.1 Allgemeines

Autor: Yvette Lemke (IaFB)

Die umfassende Verwertung sowie Verbreitung der Projektergebnisse und damit ihre schnelle Einführung in die Baupraxis war ein zentrales Anliegen des Vorhabens und deshalb als separates Arbeitspaket (AP 9) Arbeitsbestandteil jedes Projektpartners.

Neben den von jedem Partner eigenverantwortlich durchgeführten Arbeiten (siehe 4.2ff) wurden auch gemeinsam im Konsortium folgende Veröffentlichungs- bzw. Verbreitungsbestrebungen durchgeführt:

Unter dem Aktenzeichen 102008004091.6 erfolgte am 07. Januar 2008 durch die Verbundpartner die Patentanmeldung beim Deutschen Patent- Markenamt (DPMA) „Verbundträger für hohe mechanische Belastungen und Verfahren zur Herstellung solcher Träger“ für die im Projekt entwickelten Hybridträger aus Kunstharzpressholz und konventionellem Voll- bzw. Brettschichtholz. Nach einer ersten Prüfung durch das DPMA wurde eine Patenterteilung nicht in Aussicht gestellt, da bereits Patenschutz in Japan und den USA auf einige ähnliche Verfahren zur Biegeverstärkung mit Holzwerkstoffen und glasfaserverstärkten Kunstoffen besteht. Nach einer intensiven Prüfung der Ablehnung durch die Projektpartner wurde entschieden, mit einer Entgegnung der Antragsteller das Patentverfahren fortzusetzen. Der wichtigste Grund hierfür war, dass die genannten Verfahren zwar alle in ähnlicher Art und Weise zu einer Verstärkung der Bauteile führen, aber nicht die der KHP-Beschichtung immanente Schutzfunktion beinhalten. Nach Rücksprache mit dem beauftragten Patentanwalt wurde die Entgegnung zum 16.01.2009 ausgefertigt und verschickt. Hauptargument war, dass durch die Ausführung einer Verstärkung mit KHP nicht nur die Tragfähigkeit und Steifigkeit gesteigert wird, sondern auch die Dauerhaftigkeit, womit eine Vereinigung von Verstärkungs- und Schutzfunktion vorliegt, was bei den angeführten anderen Patenten nicht der Fall ist. Auf eine Erweiterung des beantragten Patentschutzes über das nationale Patent hinaus wurde dabei verzichtet. Dies führte zu einer Patenterteilung am 16.07.2009 durch Veröffentlichung im Patentblatt unter der Dokumentidentifikation DE102008004091A1 (siehe dazu www.patent-de.com/20090716/DE102008004091A1.html).

Für den kunstharzpressholzverstärkten BSH-Träger und seine Einsatzmöglichkeiten im Brückenbau hat das Konsortium die aktuellen Ergebnisse der Forschungstätigkeit zusammengefasst und in einem Artikel (Heiduschke, Haller, Hamann, Birk, Untergutsch, Thompson: „DVW-reinforced timber beams for a short span pedestrian bridge“) zur „10th World Conference on Timber Engineering“ 2008 in Miyazaki/Japan vorgestellt.

Im Rahmen der Poster Session der 11th WCTE 2009 in Trentino/Italien wurden die zusammengefassten Ergebnisse und Erfahrungen zum Pilotprojekt Vertikalachswindkraftanlage als Beitrag „Tubular timber poles for small wind turbines“ (Heiduschke, Kubowitz, Hamann, Thompson, Haller) vorgestellt.

4.2 Team Wissenschaft

4.2.1 ISH

Autor: Robert Putzger (ISH)

Im Rahmen der Verbreitung der Forschungsergebnisse wurden vom ISH während der Projektlaufzeit 10 Publikationen in referierten Fachzeitschriften und 16 Konferenzbeiträge veröffentlicht. Des Weiteren wurden vom ISH 12 Messeauftritte betreut und somit die Forschungsergebnisse einem breiten Fachpublikum präsentiert. Die Liste der Publikationen, Konferenz- und Messepräsentationen ist den nachstehenden Tabelle 4.1, Tabelle 4.2 und Tabelle 4.3 zu entnehmen.

Tabelle 4.1: Publikationen und Zeitschriften

Jahr	Autoren	Titel	Publikation
2010	Cabrero J. M., Heiduschke A., Haller P.	Analytical assessment of the load carrying capacity of axially loaded wooden reinforced tubes	*Composite Structures* 92, pp. 2955-2965
	Heiduschke A., Haller P.	Fiber-Reinforced Plastic-Confined Wood Profiles Under Axial Compression	*Structural Engineering International* Vol. 20(3) pp. 246-253(8)
	Gilka-Bötzow A., Heiduschke A., Haller P.	Zur Abbrandrate von Holz in Abhängigkeit der Rohdichte	*European Journal of Wood and Wood Products* April 2010
	Kasal B., Heiduschke A.	The Use of High-Strength Composites in the Reinforcement of Timber	*Advanced Materials Research* Vol. 133-134, pp. 941-946
	Putzger R., Matheas J., Haller P.	Gemessene Quellungsdrücke von Fichtenholz und Fichtenpressholz in Wasser und Salzlösungen	*holztechnologie* 51 (2010) 5, S. 50-52
2009	Heiduschke A., Haller P.	Zum Tragverhalten gewickelter Formholzrohre unter axialem Druck	*Bauingenieur* 84 (6), S. 262-269
	Heiduschke A, Kasal B., Haller P.	Shake table tests of small- and full-scale laminated timber frames with moment connections	*Bulletin of Earthquake Engineering* Vol. 7(1), pp. 323-339
	Putzger R., Haller P.	Charakterisierung der Verbundfestigkeit von textilbewehrtem Holz unter Berücksichtigung von Witterungsfaktoren.	*Zukunft Holz – Statusbericht der Hochschule Biberach* S. 693-698
2008	Heiduschke A., Trümper W., Haller P., Cherif C.	Monitoring von Holzkonstruktionen mittels Carbonfaser-Sensoren	*Bauingenieur* 82 (11), S. 468-472
2007	Robert P., Haller P.	Holz-Textil-Verbunde unter Witterungseinflüssen. Wie dauerhaft sind textilbewehrte Holzverklebungen?	*Adhäsion* Heft 5 2007, S. 35-39

Tabelle 4.2: Konferenzbeiträge und Vorträge

Jahr	Autoren	Titel	Publikation
2010	Heiduschke A., Haller P.	Load-Carrying Behavior of Fiber Reinforced Wood Profiles	*11th World Conf. on Timber Engineering (WCTE)* 442, Trento (Italy)
	Heiduschke A., Kubowitz P., Hamann M., Thompson R., Haller P.	Tubular Timber Poles for Small Wind Turbines	*11th World Conf. on Timber Engineering (WCTE)* *72*, Trento (Italy)
	Cabrero J. M., Heiduschke A., Haller P.	Parametric Analysis of Composite Reinforced Wood Tubes under Axial Compression	*11th World Conf. on Timber Engineering (WCTE)* 467, Trento (Italy)
	Kasal B., Heiduschke A., Pospisil S., Urushadze S.	Shake Table Tests of Three - Story Spatial Timber Frame with Moment Connections	*11th World Conf. on Timber Engineering (WCTE)* 817, Trento (Italy)
	Cabrero J. M., Heiduschke A. , Haller P.	Numerical and Experimental Investigation on Wooden Profiles with Fiber Confinement	*IV European Conference on Computational Mechanics (ECCM),* Paris (France)
	Haller P.	Von Fasern und Fäden – Textile Bewehrungen im Holzbau	*Innovation Day 2010*, Swiss Texnet - Das textile Innovationsnetzwerk Dübendorf (Schweiz)
2009	Manthey Ch., Guenther E., Heiduschke A., Haller P., Heistermann T	Structural, economic and environmental performance of fibre reinforced wood profiles vs. solutions made of steel and concrete	*COST Action C25* Sustainability of Constructions. Integrated Approach to Lifetime Structural Engineering, Timisoara (Romania)

	Cabrero J.M., Heiduschke A., Haller P.	Design and Analysis of Structural Wood Profiles Reinforced with Composite Fibers	*15th International Conference on Composite Structures (ICCS15),* Porto (Portugal)
	Haller P.	Baukonstruktionen aus der Natur-neue Techniken im Umgang mit natürlichen Wuchsformen	*9. Holzbauforum* Leipzig (Deutschland)
2008	Mikolášek D., Heiduschke A., Brožovský J.	Semi-rigid dowel-type connections with circular fastener placement - experiment vs numerical analysis	*International Conference 70 Years of FCE STU*, Bratislava (Slovakia)
	Mikolášek D., Heiduschke A., Brožovský J.	Glasfaserverstärkte Gelenkbolzenverbindungen – Experiment und numerische Analyse	*Juniorstav 2008, Stavební mechanika* Brno (Tschechische Republik)
	Mikolášek D., Heiduschke A., Brožovský J.	Zum Tragverhalten von Stabdübelverbindungen mit eingeschlitzten Glasfaserblechen – Experiment und numerische Analyse	*Modelování V Mechanice* Ostrava (Tschechische Republik)
	Heiduschke A., Cabrero J. M., Manthey C., Haller P., Guenther E.	Mechanical Behavior and Life Cycle Assessment of Fibre-Reinforced Timber Profiles	*COST Action C25* Sustainability of Constructions. Integrated Approach to Lifetime Structural Engineering, Dresden (Deutschland)
	Putzger R., Haller P.	Bond strength and durability of textile reinforced wood	*COST Action C25* Sustainability of Constructions. Dresden (Deutschland)
	Heiduschke A, Haller P.	Performance of composite-reinforced timber joints using single dowel-type fasteners	*10th World Conf. on Timber Engineering (WCTE)* Miyazaki (Japan)
	Heiduschke A., Haller P., Hamann M., Birk T., Untergutsch A.	DVW-reinforced timber beams for a short span pedestrian bridge	*10th World Conf. on Timber Engineering (WCTE)* Miyazaki (Japan)

Tabelle 4.3: Präsentationen und Messeauftritte

Jahr	Präsentation	Ort
2010	*United Nations Economic Commission for Europe (UNECE)* Timber Committee 68th session	Genf (Schweiz)
	Composites Europe Europäische Fachmesse für Verbundwerkstoffe, Technologie und Anwendungen	Essen (Deutschland)
2009	*Holz Innovativ* 6. Internationalen Symposium (Bayern Innovativ)	Rosenheim (Deutschland)
	41. Fortbildungskurs der Schweizerischen Arbeitsgemeinschaft für Holzforschung SAH	Weinfelden (Schweiz)
	IHF 2009 15. Internationale Holzbauforum	Garmisch-Partenkirchen (Deutschland)
	Techtextil 2009 Internationale Fachmesse für technische Textilien und Vliesstoffe	Frankfurt (Deutschland)
2009, 2008	*MATERIALICA* Internationale Fachmesse für Werkstoffanwendungen, Oberflächen und Product Engineering	München (Deutschland)
2008	4. BMBF-Forum für Nachhaltigkeit	Leipzig (Deutschland)
2008, 2007	*JEC Composites Show*	Paris (Frankreich)
2007	*LIGNA 2007* Weltmesse für Forst- und Holzwirtschaft	Hannover (Deutschland)
	Woche der Umwelt 2007 Präsentation beim Bundespräsidenten im Park von Schloss Bellevue	Berlin (Deutschland)

Neben der gezielten Ansprache des Fachpublikums auf Messen berichteten in großem Umfang die Print-, Fernseh- und Rundfunkmedien öffentlichkeitswirksam über die Projektergebnisse. Die Sächsische Zeitung veröffentlichte u.a. folgende Artikel:

- „Formbar wie Gummi, stark wie Stahl“, SZ, Ausgabe Wissen, 22.03.2007
- „Die Kraft des Rohres“, SZ, Ausgabe Wirtschaft, 03.03.2010

Im Fernsehen wurde das Thema Formholz in folgenden Sendungen vorgestellt:

- ZDF Drehscheibe vom 11.03.2008,
- Bayrischen Rundfunk - Faszination Wissen vom 16.11.2008
- MDR - Einfach Genial vom 18.11.2008

Des Weiteren konnte im Deutschlandradio in der Sendung Forschung aktuell vom 14.04.2010 einem breiten Publikum über aktuelle Forschungsergebnisse berichtet werden. Neben der eigentlichen Ausstrahlung können sämtliche Film-, Ton- und Print-Beiträge auch ausführlich im Internet auf den Webseiten der jeweiligen Medienunternehmen abgerufen werden und stehen damit auch nach der Ausstrahlung jederzeit als Informationsquelle zur Verfügung.

Das Umweltmagazin im ZDF (ZDF.Umwelt) wird im Frühjahr 2011 einen Filmbeitrag über Formholzprofile bzw. eine Pilotwindkraftanlage mit einem Hochleistungsholzmast, welche in Chemnitz steht, senden.

- Schutzrechte und Patente

Die im Projekt erzielten Forschungsergebnisse führten zur Erstellung einer Erfindungsmeldung. Im Ergebnis erfolgte unter dem Titel „Verbundträger für hohe mechanische Belastungen und Verfahren zur Herstellung solcher Träger“ am 7.1.08 eine Anmeldung zum Patent (Aktenzeichen: DE 10 20008 004 091.6).

- Internetauftritt und Webseiten

Das Projekt hat im Internet auf entsprechenden Fachseiten seine Plattform. Projektträger, -partner aber insbesondere auch Forschungsziele und -ergebnisse kommen hier zur Darstellung. Ausgewählte Plattformen sind:

  - Innovationszentrum Holz – Sachsen, TMT / TexWood
  - TU-Dresden, Institut für Stahl- und Holzbau und Lehrstuhl für Betriebliche Umweltökonomie
  - BMBF-Förderschwerpunkt "Nachhaltige Waldwirtschaft"
  - IKU-Innovationspreis, Preisträger 2009, Kategorie 3/2

- Auszeichnungen und Preise

Das Konzept faser- und textilbewehrter Formholzprofile stößt in Fachkreisen auf ein äußerst positives Echo. Das zeigt sich insbesondere in der Verleihung des Innovationspreises für Klima und Umwelt (IKU) 2009 durch das Bundesumweltministerium und den Bundesverband der Deutschen Industrie (BDI).

Bundesumweltminister Dr. Norbert Röttgen und BDI-Hauptgeschäftsführer Dr. Werner Schnappauf verleihen Innovationspreise für Klima und Umwelt
Presseinformation vom 11.02.2010 (Berlin):

„*Zum ersten Mal wurden heute in Berlin deutsche Unternehmen und Forschungseinrichtungen mit dem Innovationspreis für Klima und Umwelt (IKU) ausgezeichnet. Gemeinsam prämieren das Bundesumweltministerium und der Bundesverband der Deutschen Industrie e.V. (BDI) Innovationen, die Wirtschaftlichkeit sowie Klima- und Umweltschutz vorbildlich vereinen. Eine zehnköpfige Jury unter dem Vorsitz von Prof. Dr. Klaus Töpfer wählte die sechs Preisträger aus. Die wissenschaftliche Bewertung erfolgte durch das Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI in Karlsruhe.*

Gesucht wurden Technologien, Techniken, Verfahren und Prozesse sowie Produkte, Dienstleistungen und Geschäftsmodelle, die Klima und Umwelt schützen sowie zu Beschäftigung und

Wachstum in Deutschland beitragen. Das Bundesumweltministerium und der BDI wollen mit der Preisverleihung herausragende Leistungen in diesem Bereich hervorheben, um das Engagement der deutschen Industrie beim Klima-, Umwelt- und Ressourcenschutz zu würdigen und zu stärken. Insgesamt waren 145 Bewerbungen von Unternehmen und Forschungseinrichtungen für den ersten IKU eingegangen. Der Preis wird mit Förderung der Klimaschutzinitiative des BMU in insgesamt fünf mit jeweils 25.000 Euro dotierten Kategorien vergeben:

Im Bereich „Umweltfreundliche Technologien" gab es gleich zwei Preisträger: Die Dr.-Ing. Werner Neu Verfahrenstechnik GmbH erforschte ein energiesparendes und wirtschaftliches Polymerverarbeitungsverfahren zur Herstellung von Kunststoffteilen; Prof. Dr.-Ing. Peer Haller von der Technischen Universität Dresden entwickelte ein Fertigungsverfahren für faser- und textilbewehrte Formholzprofile."

Basierend auf den Forschungsergebnissen des HHT Projektes wurden, bereits während dessen Laufzeit, verschiedene, weiterführende Forschungsprojekte beantragt (siehe nachstehende Tabelle). Vier Projektanträge sind bereits genehmigt und werden zurzeit bearbeitet. Drei weitere Anträge befinden sich in der Begutachtungsphase.

Tabelle 4.4: Wissenschaftliche Anschlussprojekte an das HHT Projekt (beantragte sowie bereits genehmigte Forschungsvorhaben)

Thema	Finanzierung	Laufzeit
Entwicklung eines Rohrfördersystems auf Basis naturfaserverstärkter Grundkomponenten für den Transport aggressiver Medien	BMWi/AiF KF 0038503PK8	07/08 – 12/10
Eingegossene Betonknotenverbindungen für Stab- und Fachwerkkonstruktionen	BMWi/AiF KF 2132402WZ9	11/09 – 12/11
Erweiterung der Anlagen und Technologieentwicklung zur Formholzherstellung	SAB 13874/2397	11/09 – 08/12
High-performance composite-reinforced earthquake resistant buildings with self-aligning capabilities	FP7 - SEVENTH FRAMEWORK PROGRAMME - SEISMIC ENGINEERING RESEARCH Transnational Access Grant Agreement No. 227887	02/10 – 08/11

Beantragte Forschungsvorhaben		
LCA Analyse von Holzbauweisen	DBU Promotionsstipendium	beantragt 3 Jahre
Untersuchung des thermo-hygrischen Verhaltens von Holz	DFG Paketantrag	Beantragung läuft, 3 Jahre
COST FP0904, Thermo-hydro-mechanical behaviour of wood	EU Projekt	4 Jahre

Besonders hervorzuheben ist das von der Sächsischen Aufbaubank (SAB) finanzierte Projekt: „Erweiterung der Anlagen und Technologieentwicklung zur Formholzherstellung". Dabei handelt es sich um die Erweiterung der bereits im HHT Projekt genutzten Formholzpresse. Ziel des Projektes ist die Serienfertigung von 3m langen Profilquerschnitten verschiedener Querschnittsformen und Durchmesser. Diese maschinell gefertigten Segmente lassen sich durch die im HHT Projekt entwickelten und untersuchten Keilzinkenverbindung (siehe AP 4.3 Untersuchungen zur Tragfähigkeit von Rohrverbindungen) zu Endlosprofilen verbinden. Diese Halbzeuge bzw. Baugruppen sind Grundlage für Realisierung verschiedenster Tragwerke und Anlagen. Hinsichtlich der Vermarktung und des Einsatzes der Profile ist deren maschinelle Herstellung unabdingbar, da die manuelle Fertigung der Profile (beispielsweise bei den Sindelfinger Holzringen) auf kleine Stückzahlen begrenzt ist. Diese Einschränkung ist derzeit noch ein wesentlicher Nachteil des Formholzes im Vergleich zu etablierten Profilquerschnitten aus Stahl und Kunststoff.

4.2.2 ITM

Autor: Wolfgang Trümper (ITM)

Der Nutzen der Projektergebnisse besteht in der Erweiterung der technisch-technologischen Möglichkeiten zur stricktechnischen Realisierung von anforderungsgerechten, endkonturnahen textilen Verstärkungsstrukturen. Durch den beispielhaften Einsatz der textilen Strukturen für die Verstärkung von Holzbauteilen wird zudem ein weiteres Anwendungsfeld für derartige innovative Produkte erschlossen. Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen das große Potenzial von Mehrlagengestricken (MLG) zur Minimierung des Aufwands bei der Herstellung von Faserverbundbauteilen durch den Einsatz von während der Herstellung an die Endkontur angepassten textilen Halbzeugen.

Aus den grundlegenden Untersuchungen zur Einbringung von Sensorfasern in die textilen Strukturen während der Fertigung und der anschließenden erfolgreichen Funktionsüberprüfung in Biegeversuchen ergeben sich vielversprechende Ansätze für die Überwachung z. B. von versagensrelevanten Bauteilen in Holzkonstruktionen. Die Ergebnisse zeigen aber auch, dass für die Umsetzung und Validierung von industrietauglichen Messsystemen auf Basis von Sensorfasern, wie Kohlenstofffasern, noch ein erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht.

Die im Rahmen der Projektbearbeitung erzielten Ergebnisse, insbesondere aus dem Bereich der Textiltechnik, wurden und werden auf einschlägigen Fachmessen auf denen das ITM als Aussteller auftritt, präsentiert, z. B. auf den Messen mtex – Chemnitz 2010 oder techtextil – Frankfurt 2011. Die Ergebnisse dienen weiterhin für die zielgerichtete Beratung von Firmen zu den Themen Entwicklung und Umsetzung von textilen Halbzeugen und Faserverbundbauteilen auf Basis von Mehrlagengestricken. Drüber hinaus sind die Ergebnisse fester Bestandteil im Rahmen der studentischen Ausbildung am ITM. Auf der Homepage des ITM werden die Ergebnisse der Projektbearbeitung in geeigneter Weise dargestellt.

Während der Projektlaufzeit sind folgende Veröffentlichungen der Projektergebnisse entstanden:

- Trümper, W.; Diestel, O.; Cherif, Ch.: Hochleistungsholztragwerke und Entwicklung textilbewehrter 3D-Formholzteile für den Leichtbau. ITB Jahresbericht (2008), S. 34-35
- Weser, Th.; Trümper, W.; Diestel, O.; Cherif, Ch.; Wehsener, J.; Heiduschke, A.; Haller, P. Entwicklung textiler Halbzeuge für den Einsatz als Verstärkungsstrukturen im Holzbau. 47. Chemiefasertagung Dornbirn, Österreich, 17.-19.09.2008
- Weser, Th.; Schade, M.; Trümper, W.; Abounaim, Md.; Paul, Chr.; Diestel, O.; Cherif, Ch.; Wehsener, J.; Heiduschke, A.; Haller, P. Entwicklung textiler Verstärkungsstrukturen für den Holzbau – Funktionsintegration. 12. Reichenbacher Symposiums „Technische Textilien“, 14.11.2008
- Heiduschke, A.; Trümper, W.; Haller, P.; Cherif, C.: Monitoring von Holzkonstruktionen mittels Carbonfaser-Sensoren. In: Bauingenieur 83 (2008) 11, Springer-VDI-Verlag, Bielefeld, S. 468 – 472, ISSN 0005-6650
- Trümper, W.; Abounaim, Md.; Heiduschke, A.; Haller, P.; Cherif, C.: Überwachung von Holzkonstruktionen mittels Carbonfaser-Sensoren, ITB Jahresbericht 2008
- Weser, Th.; Trümper, W.; Abounaim, Md.; Diestel, O.; Cherif, Ch.; Wehsener, J.; Heiduschke, A.; Haller, P. Textile Verstärkungsstrukturen für Holzkonstruktionen; Techtextil 2009, Frankfurt
- Trümper, W.; Diestel, O.; Cherif, Ch.: Gestricke, die schlauch- oder hohlkörperförmig ausgebildet sind, und Verfahren zu deren Herstellung. Patentanmeldung Az: 10 2009 026 894.4-26, 04.06.2010

4.2.3 ILK

Autor: Mike Thieme (ILK)

Ein wesentlicher Ausgangspunkt des Projektes ist die Erschließung neuartiger Einsatzgebiete für Holzwertstoffe in Hochleistungsanwendungen. Die im Vorhaben entwickelten Technologien und Werkstoffe besitzen dabei ein hohes Vermarktungspotential. Dazu muss eine werkstoffangepasste Modellierung und Simulation des Strukturverhaltens über den aktuellen Stand der Forschung hinaus für eine ressourceneffiziente und abgesicherte Dimensionierung gesichert werden.

Der modulartige Aufbau des innerhalb dieses Projektes erarbeiteten ganzheitlichen Modellierungskonzeptes bietet dabei ein großes Potential für einen sicheren Umgang mit derartigen Hochleistungsholztragwerken und deren Weiterentwicklung und Variationsvielfalt. Mit den entwickelnden Konstruktions- und Simulationshilfen ist es den Anwendern möglich, mit einem hohen Maß an Flexibilität und Innovation auf die voranschreitende Globalisierung im Bauwesen zu reagieren. Auf dieser Grundlage lassen sich neue Dimensionierungsstrategien auf weitere Materialien und Werkstoffkombinationen erweitern und neue Einsatzgebiete erschließen. Die mit den neuartigen Modellierungsansätzen erreichbare Modellsicherheit und Auslegungsvielfalt gestattet eine Festigung der Wettbewerbsfähigkeit dieses ökologisch hochwertigen Werkstoffes gegenüber anderen baupraktischen Materialien.

Die erarbeiteten Werkstoffmodelle für Holz-Textil-Verbunde werden bei Fachtagungen, Seminaren, Vorträgen, technischen Beratungen und Weiterbildungsveranstaltungen vorgestellt sowie in Fachzeitschriften publiziert. Dem Anwender werden sie, in entsprechend aufbereiteter Form, in einem einfachen Auslegungsprogramm zur Verfügung gestellt. Ferner ist auch an die Übernahme der Ergebnisse aus den Grundlagenuntersuchungen theoretischer und experimenteller Art in das Lehrangebot der Studienrichtung Leichtbau an der Technischen Universität Dresden gedacht.

4.2.4 BU

Autor: Christian Manthey (BU)

4.2.4.1 Gehaltene Vorträge:

Christian Manthey: Ökobilanzierung von Hochleistungsholztragwerken. Vortrag im Rahmen Ökobilanzwerkstatt in Goslar am 16. und 17. Juni 2008

Christian Manthey: Designing a new building material based on wood by means of environmental life cycle costing. Vortrag im Rahmen des SETAC Europe 15th LCA Case Studies Symposium in Paris am 23.01.2009

4.2.4.2 Publikationen

Heiduschke, A., Cabrero, J., Manthey, C., Haller, P., Guenther, E: Mechanical Behavior and Life Cycle Assessment of Fibre-Reinforced Timber Profiles. In: Braganca, L.; Koukkari, H.; Blok, R. a. o. (eds.): Sustainability of Constructions. Integrated Approach to Life-time Structural Engineering. COST Action C25. Proceedings of Seminar, Dresden 6, 7 October 2008.

Manthey, C., Guenther, E, P.; Heiduschke, A., Haller, Heistermann, T.; Veljkovic, M.; Hajek, P.: Structural, economic and environmental performance of fibre reinforced wood profiles vs. solutions made of steel and concrete. In: Braganca, L.; Koukkari, H.; Blok, R.; Gervasio, H.; Veljkovic, M.; Plewako, Z.; Landolfo, R.; Ungureanu, V.; Silva, L.S. (eds.): Sustainability of Constructions. Integrated Approach to Life-time Structural Engineering. Workshop Proceedings. Timisoara, 23.-24.10.2009.

Manthey, C., Guenther, E.: Environmental Life Cycle Costing. In: Das Wirtschaftsstudium, 38. Jg. (2009), H. 7/09.

Manthey, C., Guenther, E.: Societal Life Cycle Costing. In: Das Wirtschaftsstudium, 38. Jg. (2009), H. 8-9/09

4.2.4.3 Geplante Publikationen

Manthey, C., Guenther, E, (Hrsg.), Gnauck, C., Herausforderungen ökologisch-ökonomischer Leistungsmessung: Literaturanalyse und Praxistest im Bereich Holz- und Brückenbau, erreichbar über den Hochschulserver der TU Dresden, Beginn 2011

Manthey, C., Guenther, E, Vergleichende Ökobilanz dreier Rad- und Gehwegbrücken nach DIN EN ISO 14044. (erreichbar über den Hochschulserver der TU Dresden, Beginn 2011

Manthey, C., Guenther, E,: Ökobilanz für Formholzprofile und vergleichbare Stützen aus Stahl und Stahlbeton nach DIN EN ISO 14044. (erreichbar über den Hochschulserver der TU Dresden, Beginn 2011

Manthey, C., Guenther, E, (Hrsg.), Gnauck, C.: Uncertainties in LCA: a content analysis of LCA studies for wood based products. Eingereicht im International Journal for Life Cycle Assessment, 2011

Manthey, C., Guenther, E.: Life Cycle Assessment for reinforced wood profiles, Journal for Cleaner Production, 2011

4.2.4.4 Zur Verwertung der Ergebnisse

Die erstellten Ökobilanzen werden im Endergebnis (nach Peer Review) in einem Standard vorliegen, der internationalen Vergleichen standhält und somit gute Chancen hat, in der "LCA Community", insbesondere im Bereich LCA für Holzprodukte, Aufmerksamkeit zu erlangen. Auch über diesen Weg können die neuartigen Lösungen Verbreitung finden. Die Ergebnisse zeigen Stärken und Schwächen und somit das ökologische Optimierungspotential für die weitere Entwicklung auf. Um die Vergleichbarkeit mit anderen Produkten aus dem Baubereich auch für die nähere Zukunft sicherzustellen, wurden dabei die Regeln für Produktdeklarationen als derzeitiger Standard eingehalten.

Für die Arbeit des Lehrstuhls können die Erfahrungen im Zusammenhang mit dem Peer Review der Ökobilanzen von Bedeutung. Durch die Zusammenarbeit mit international anerkannten Experten konnte das Detailwissen im Bereich der Ökobilanzierung nach der internationalen Norm verfeinert und vertieft werden. Für die weitere Arbeit des Lehrstuhls stellen die Erfahrungen im Umgang mit der Ökobilanzsoftware SimaPro sowie der Ecoinvent-Datenbank ein deutlicher Zugewinn an Expertenwissen dar, der für die weitere Forschungsarbeit von Bedeutung ist. Auch daraus ergeben sich insbesondere hinsichtlich des Schwerpunkts Unsicherheiten in LCA neue Forschungsmöglichkeiten. Diese können, über den Bausektor hinaus als wertvoll eingestuft werden.

Der Fallstudienstudiencharakter der durchgeführten Arbeit bietet zudem die Möglichkeit, das in der Lehre behandelte Theorie der Ökobilanzierung anhand von Praxisbeispielen anschaulich darzustellen und zu vermitteln.

4.2.5 GWT

Autor: Grit Herrmann (GWT)

Fülle und Qualität der erwarteten Forschungsergebnisse im Verbundprojekt bedurften einer zielführenden Planung hinsichtlich der Ergebnisvermittlung, dem Technologie- und Wissenstransfer sowie der medialen Kommunikation innerhalb der Projektlaufzeit. Das Projekt strebte den zügigen Transfer von Ergebnissen in die Ingenieurholzbaupraxis an. Mit diesem Ziel hat die GWT an der konzeptionellen und organisatorischen Umsetzung von verschiedenen Maßnahmen auf fachlicher, baupraktischer und medialer Ebene gearbeitet, um diese mit den Projektpartnern zu realisieren.

Im Maßnahmenpaket zur fachlichen, baupraktischen und medialen Wissensvermittlung und zur Verdeutlichung des Ergebnisfortschritts wurden mit Projektbeginn verschiedene Ansätze des Technologietransfers als sinnvoll eruiert und vorgestellt. Der Maßnahmenkomplex umfasste:

- Gezielte Vorstellung der Projektergebnisse auf Fachtagungen und Messen
- Arbeit über und mit Fach- und Branchenverbänden
- Einbringung der Ergebnisse in Normenausschüsse
- Erarbeitung von Leitfäden, Richtlinien, Seminarangeboten, Anwendungshilfen
- Wissenstransfer in Netzwerken

Um dem grundlegenden Ansatz des Projektes, der wirtschaftlichen Umsetzung der Vorhabenergebnisse aus Sicht der praktischen Anwendung und deren schnelle, generelle Nutzung in der Praxis, Rechnung zu tragen, sind Teile des Maßnahmenkomplex in Abhängigkeit des Projektverlaufs neu gefasst worden, um diese an die Ergebnisse der Arbeiten und Notwendigkeiten im Projekt anzupassen. Aufgrund des hohen Anspruchs der Forschungsergebnisse war es notwendig die Arbeit zur Vorstellung der Forschungsergebnisse auf Fachmessen und Symposien zu verstärken, im gleichen Maße wurde Wert auf eine zeitgemäße mediale Kommunikation und den Wissenstransfer über geeignete Netzwerke gelegt. Zur Verbesserung der Bedingungen bei der Verwertung der Forschungsergebnisse ist zusätzlich auf die Realisierung von Schutzrechtsansprüchen große Bedeutung gelegt worden. Des Weiteren wurde dem Kontakt zu klein- und mittelständigen Unternehmen, im späteren Projektverlauf auch größeren Unternehmen eine größere Bedeutung beigemessen. Bei Gesprächen mit der Industrie wurden die Ergebnisse des Projektes vermittelt und die Marktresonanz dazu aufgenommen.

In Auswertung der Erkenntnisse des Institutes für Stahl- und Holzbau wurde die Arbeit mit Fach- und Branchenverbänden im Verlauf des Projektes als zeitintensiv und wenig zielführend verworfen. Der hohe Projektanspruch konnte nur langsam in die zumeist konventionellen Strukturen der Verbände hineingetragen werden. Das Einbringen der Ergebnisse in Normenausschüssen sowie vorbereitende Maßnahmen zur Einführung waren aufgrund des Standes der Forschungsergebnisse sowie der Reife der industriellen Umsetzung der Herstellungstechnologie und Produkte noch nicht möglich.

Gezielte Vorstellung von Ergebnissen auf Fachtagungen und Symposien:

Während der gesamten Projektlaufzeit ist kontinuierlich an der Vorstellung des Projektes auf Fachtagungen, Symposien und Messen gearbeitet worden. Es wurden durchschnittlich drei Veranstaltungen pro Jahr besucht, auf welchen das Projekt mit folgenden Zielen vertreten wurde:

- Informationen an den Markt zum erreichten Stand der Forschung
- Erfassung des Marktinteresses, Marktbestätigung, -akzeptanz, -nachfrage
- Eruieren weiterer Anwendungsfelder

Vom 3. bis 5. April 2007 präsentierte die GWT in Kooperation mit dem Institut für Stahl und Holzbau der TU Dresden Forschungsergebnisse aus dem Bereich Materialforschung im Holzbau auf der JEC Composites Show in Paris.

Vom 14. bis 18. Mai 2007 folge auf dem Forschungsgemeinschaftsstand der LIGNA, Weltmesse für Forst- und Holzwirtschaft, in Hannover eine weitere Präsentation.

Den Messe-Abschluss des Projektjahres 2007 bildete die 10. International Fachmesse für Werkstoffanwendungen, Oberflächen und Product Engineering, MATERIALICA 2007, vom 16. bis 18. Oktober in München.

Im gleichen Jahr nahm das Projekt an weiteren öffentlichkeitswirksamen interdisziplinären Veranstaltungen teil. Als der damalige Bundespräsident Horst Köhler die besten Unternehmen und Institutionen zur Präsentation innovativer Umweltschutztechnologien und -projekte am 5. und 6. Juni 2007 zur Woche der Umwelt in den Park von Schloss Bellevue nach Berlin einlud, war das HHT Verbundprojekt mit der Vorstellung seiner Ergebnisse vertreten.

Im Jahr 2008 wurden die Ergebnisse der Traglastversuche an Gelenkbolzen-Verbindungen und KHP verstärkten Brettschichtholzträgern auf der 10. World Conference on Timber Engineering 2008 in Miyazaki, Japan vorgestellt. In Ergebnis dieser Konferenz kam es zur Veröffentlichung von zwei Beiträgen im Tagungsband zur Konferenz.

Die JEC Gruppe bot 2008 das Innovationsthema „Treffen mit Innovation weltweit“ dar, unter anderem mit der JEC Composite Show Paris vom 1. bis 3. April 2008, an der wiederum Vertreter des HHT Projektes teilnahmen.

Eine wichtige Gelegenheit im dritten Projektjahr die Ergebnisse aus der Forschungs- und Entwicklungsarbeit des Projektes dem interessierten Fachpublikum vorzustellen, war die MATERIALICA 2008 in München, vom 14. bis 16. Oktober 2008. Auch diese Möglichkeit der öffentlichkeitswirksamen Ergebnisverbreitung wurde durch das Projekt genutzt und das Teilprojekt Faserbewährte Formholzstützen sowie weiterführende Informationsmaterialien und Mustern auf der Messe ausgestellt.

Auch das 4. BMBF-Forum für Nachhaltigkeit, vom 8. bis 10. Mai 2008 in Leipzig diente den Wissenschaftlern und ihren Partnern zu Vorstellung ihrer innovativen Ideen und aktuellen Ergebnissen. Im Rahmen einer Objektpräsentation wurden Poster und Musterstücke ausgestellt.

Am 1. und 2. April 2009 wurden die Ideen und Forschungsergebnisse zur Weiterentwicklung des Materials Holz und deren positive Auswirkungen im Ingenieurholzbau auf der Bayern Innovativ in Rosenheim ein weiteres Mal der Öffentlichkeit vorgestellt.

Zur Verbreitung der Ergebnisse wurde 2009 auch der 41. Fortbildungskurs der Schweizerischen Arbeitsgemeinschaft für Holzforschung SAH, am 27. Oktober 2009 in Weinfelden genutzt sowie das 15. INTERNATIONALE HOLZBAU-FORUM, IHF 2009 in Garmisch-Partenkirchen vom 2. bis 4. Dezember 2009.

Zusammenfassend – es sind für alle Vorstellungen des Projektes auf Messen, Poster erarbeitet und zur anschaulichen und öffentlichkeitwirksamen Darstellung der Forschungsergebnisse zusammen mit Musterstücken präsentiert worden. Zur weiteren Ausreichung von Informationen dienten Flyer und die Patentfibel.

Im Ergebnis der Messebesuche konnten die angestrebten Ziele gut umgesetzt werden. Es kam zu einer Vielzahl von herauszustellenden Fachgesprächen mit Vertretern der Industrie, die eine praxisorientierte Verbindung bezüglich der Anwendung der Forschungsergebnisse erlaubte.

Die Besucher-Fachgruppen zeigten Interesse an möglichen Produktlösungen, Variationen dieser und Technologien des HHT-Projektes, aber hinterfragten auch die technologischen und wirtschaftlichen Ansätze zur Herstellung der Produkte bzw. Anwendung der Technologien.

Die folgende Zusammenstellung gibt eine Übersicht über wiederkehrende Fragestellungen und Interessen verschiedener Fachgruppen und Branchen mit denen das Projekt während seiner Laufzeit konfrontiert wurde.

Fachgruppen, Branchen
Grund der Kontaktaufnahme
Möbelindustrie, Einrichtungslösungen
Diese Branche hat insbesondere Interesse an neuartigen Materialien oder Ersatzmaterialien. Fragestellungen der Besucher beziehen sich auf die Leistungsfähigkeit technischer Profile aus verdichteten Hölzern als Verbundwerkstoff (Composite) sowie auf die Stärke der möglichen Beeinflussung, insbesondere Reduktion, der Abmaße des Hochleistungsholzes. Vorstellbar wäre eine Zusammenarbeit auf dem Gebiet formbarer Platten zur Schalenherstellung in der Innenarchitektur. Damit ließen sich oberflächenfertige Schalenelemente für den Innenausbau herstellen.
Zulieferindustrie (Automotiv, Verkehr, Bau)
Auch diese Branche hat Interesse an Materialien mit neuen Eigenschaften. Im Fokus des Interesses steht Formholz mit Potential für Verkleidungen, Abdeckungen oder Schutzwände und vielversprechenden Eigenschaften z.B. zur Geräuschpegelsenkung oder verminderten Schwingungseigenschaften. Diskutiert wurde des Weiteren die Anwendung der Formholztechnologie für die Herstellung von Lenkrädern. Diskussionsinhalte sind dabei die verwendeten Leime und die mögliche Fertigungsgenauigkeit. Insbesondere in der Automotiv Industrie ist die Anzahl der Zulieferfirmen am Markt sehr groß, welche bereits eine entsprechend breite Produktpalette bieten. Von besonderer Wichtigkeit ist in diesem Zusammenhang das Aufzeigen von entsprechenden Anwendungsmöglichkeiten aufbauend auf den Projektergebnisse.
Sportartikelhersteller
Die Branche ist stetig auf der Materialsuche für neue Designmöglichkeiten bei Sportgeräten.
Architektur und Design
Wichtig für die Design-Branche sind Möglichkeiten für Frei-Formungsprozesse und die Möglichkeiten der Beeinflussung der Abmaße. Dabei steht die Reduktion von Abmaßen im Mittelpunkt des Interesses. In der Architektur sind ausführliche Materialwerte zur Bewertung der Leistungsfähigkeit der Holzkonstruktionen von Bedeutung. Hochleistungsholztragwerke könnten bei mehrgeschossigen Holzbauten/Wohnbauten eingesetzt werden.
Industrie
Es gibt Interesse, Tragwerkkonstruktionen für neuartige Tragwerkkonzepte zu nutzen, z.B. den Bau von Anhängern (Firma Cargobull). Der Bereich Fenster- und Türenbau sieht Potential für verdichtetes Holz in Verbindung mit funktionellen Faser-Materialien. Von Interesse ist die Leistungsfähigkeit des Verbundholzes in Verbindung mit funktionellen Faser-Materialien, ebenso wie die Beherrschung der Klebeprozesse auf der Faser-Harz-Seite. Ein mögliches Gebiet für den Einsatz faserverstärkter Holzkonstruktionen ist der Ersatz von Stahlrahmen in Türen, um die Kälteleitung vom Türrahmen auf das Türblatt zu mindern. Im Bootsbau gibt es Interesse an Faserverbundstoffen und Hochleistungswickelverbünden für Masten. Von Seiten der Industrie besteht zudem häufiges Interesse an der Maschinen- und Herstellungstechnologie. Weitere industrielle Einsatzgebiete sind deckende Beschichtungssysteme mit großer Dauerhaftigkeit für die Außenanwendung. Dafür ist die Beschichtungstechnologie der Formholzrohre als Schutz vor Feuchtigkeit von Interesse. Auch Fachverständige im Turmbau und Messebau sehen Potentiale für Hochleistungsholztragwerke.

In der Auswertung der zahlreichen Branchengespräche muss grundsätzlich festgehalten werden, dass im Fokus des Interesses der Industrie neben den Potentialen der Produkte und Technologien im Markt immer wirtschaftliche, technologische und auch operative Interessen, wie die umfangreiche Einsetzbarkeit von Produkten oder Produktionstechnologien, neben Liefertreue und -umfang, stehen. In den verschiedenen Stadien des Projektes konnte industriellen Interessenten dieses nicht gewährleistet werden und somit gestaltete sich die fortführende Zusammenarbeit mit industriellen Partnern schwierig.

Als besonderes Hindernis bei der Einbringung neuer Technologien in die Baubranche erweist sich zudem das Fehlen von Bauzulassungen. Die Anwendung neuartiger Technologien wird in der Bauindustrie ohne Bauzulassung gescheut.

Darin liegt wiederum weiteres Forschungspotential. Es ist anstrebenswert die innovativen Ergebnisse des HHT-Projektes bezüglich der Produkte und Technologien im Hinblick auf die technologische und wirtschaftliche Machbarkeit und deren Umsetzung in Pilotprojekten weiter voranzutreiben.

Schutzrechtsarbeit

Im dritten Projektjahr führte der Stand der erzielten praxisrelevanten Forschungsergebnisse zur Prüfung ihrer Patentierbarkeit, Neuheit und erfinderischer Höhe. Im Ergebnis dieser Prüfung erfolgte unter dem Titel „Verbundträger für hohe mechanische Belastungen und Verfahren zur Herstellung solcher Träger“ am 16. Juli 2009 unter dem Aktenzeichen DE102008004091A1 (http://www.patent-de.com/20090716/DE102008004091A1.html) die Erteilung eines Patentes. Schutzrechtsinhaber sind die TUD, Hess und der IaFB e.V. anteilmäßig. Die beteiligten Projektmitarbeiter aus dem HHT-Projekt sind jeweils Arbeitnehmererfinder entspr. § 42 ArbNErfG. So wurde zusammen mit dem bereits vorhandenen Verfahrenspatent zur Holzumformung ein weiterer Schritt zum Aufbau einer Patentfamilie getan und somit Bedingungen und Attraktivität für eine Verwertung verbessert.

Wissens- und Technologie Transfer

Um den anwendungsspezifischen Einsatz der entwickelten Hochleistungsholztragwerke zu forcieren und das gezielte Marktinteresse an den Ergebnissen des Projektes zu eruieren, wurden durch die GWT Firmenkontakte aufgenommen, um diese für weiterführende Gespräche diesbezüglich zu nutzen.

Dabei handelte es sich vornehmlich um deutsche Unternehmen, aber auch Unternehmen aus der Schweiz. Es wurden Unternehmen der Holzbaubranche, aber auch der Bau- und Textilbranche oder der Zulieferindustrie besucht. Während der Firmengespräche wurden die wirtschaftlichen und ökologischen Aspekte des Einsatzes der entwickelten Technologien und/oder Tragwerkskonstruktionen kommuniziert und deren Potentiale im Markt erörtert.

Die folgende Übersicht zeigt eine Auswahl der wichtigsten Branchenkontakte und eine Zusammenfassung der Reaktionen auf den Ergebnisstand des HHT-Projektes bezüglich der Produkte und Technologien.

Branche
Firma
Gesprächsergebnis
Holzverarbeitende Produktion
Firma Pollmeier, Rietberg
Pollmeier ist vornehmlich ein Anbieter von Schnittholz, Holzplatten oder Dielen. Die Firma hat kein Interesse an Formholztechnologien oder anderen Produkt- und Technologieergebnissen aus HHT.

KHT Klausner Holz Thüringen GmbH, Ebersdorf
KHT Klausner Holz ist ein Sägewerk. Der Zugang zu ressourcenschonender, nachhaltiger Verwendung von Holz war in der Firma nicht verankert.
DWH Deutsche Werkstätten Hellerau, Dresden
Die Hellerauer Werkstätten haben durchaus Interesse an Produktneuentwicklungen, jedoch selbst kein Entwicklungsinteresse oder -kapazität, um an den Ergebnisstand des Projektes anzuknüpfen. Die Firma arbeitet ausschließlich mit fertigen Produktlösungen. Es wird eingeschätzt, dass den Produkten des Projektes die Marktreife fehlt. Problematisch wird auch der Einsatz nicht geprüfter Produkte gesehen.
K+W Formholztechnik GmbH, Plüderhausen
K+W Formholztechnologie ist ein Formholzhersteller und bietet verschiedene Veredlungsstufen. Die Firma nutzt bereits eine andere Technologie zur Formholzherstellung und hat darüber hinaus kein Interesse und keine Kapazität in eine zweite Technologieform zu investieren, welche zudem weiterentwickelt werden muss.
Sonnholz Päckert + Laube GmbH, Sondershausen
Sonnholz war ein Hersteller von Garten- und Wohnmöbeln und Lieferant von Holzprodukten im Eigenheimbau. Der Aufbau und die Weiterentwicklung einer zweiten Technologie als Herstellungsprozess erachtete die Firma aus wirtschaftlichen Gründen als nicht möglich.
Zulieferindustrie
Sindelfinger Holzringe, Sindelfingen
Die Firma Sindelfinger Holzringe produziert und vertreibt Holzringe. Sie hat als Zulieferer Interesse an der Herstellung und dem Vertrieb neuer Produkte. Zum Zeitpunkt der Gespräche wurden keine potentiellen Auftraggeber für die Produkte des Projektes gesehen. Die Möglichkeit eine zweite Herstellungstechnologie neben der bereits genutzten zu etablieren wird aus wirtschaftlichen Gründen abgelehnt.
Alcan Airex AG, Sins (Schweiz)
Die Airex AG ist führender Hersteller von Kernmaterialien für Sandwichkonstruktionen. Die Firma ist auf den Einsatz von Balsa konzentriert. Die Anwendungsbereiche des Hochleistungsholzes sind im gegenwärtigen Entwicklungsstadium des Projektes nicht ausreichend ausgeprägt. Der Einsatz von Balsa in Verbindung mit den Produkten des Projektes kann derzeit nicht herausgestellt werden.
PD Glasseiden Oschatz, Oschatz
PD Glasseiden blickt auf eine langjährige Tradition in der Glasfaserherstellung und -verarbeitung. Die Produktausprägung des Projektes wurde als unzureichend eingeschätzt. Die Anwendungsbereiche sind der Firma im gegenwärtigen Stadium, insbesondere durch fehlende Verbindungstechnologien, zu begrenzt.
Collano AG, Sempach-Station (Schweiz)
Collano ist ein kompetenter Partner für geklebte Verbindungen aller Art. Die im Projekt dargestellten Technologien werden als interessant eingestuft. Im gegenwärtigen Entwicklungsstadium fehlen dem Projekt jedoch Anwendungsbereiche und Produkte.
Architektur und Design
Deon AG, Luzern (Schweiz)
Die Deon AG ist ein Architekturbüro. Der Werkstoff Holz wird gern genutzt und verarbeitet. Für den Einsatz von Produkten oder Techniken in Entwurfsplanungen ist eine bauliche Zulassung entscheidendes Kriterium. Zudem muss die Bereitstellung entsprechen-

der Liefermengen bei Entwurfsgewinn gewährleistet sein. Diese Voraussetzungen sind bei den Produkten des HHT-Projektes nicht erfüllt.
Holzveredlung
Thermoholz Spreewald GmbH, Lübbenau
THS produziert auf der Grundlage der BICOS-Technologie, Thermoholz. Die Technologie der Hochleistungsholztragwerke wird als interessant eingeschätzt, die Weiterveredlung der Produkte jedoch als schwierig. Die Firma ist auf die Produktion des eigenen Thermoholzes forciert und hat kein Interesse an einer zweiten Technologie als Prozess.
Deutsche Holzveredlung Schmeing oHG (Dehonit), Kirchhundem
Die Deutsche Holzveredelung ist einer der größten Hersteller von Kunstharzpressholz. Die Firma bewertet die Projektergebnisse als interessant. Im Vordergrund steht der Verkauf der eigenen, bewährten Veredlung. Aufgrund fehlender Marktausprägung der Hochleistungsholztragwerke und kapazitiven Gründen besteht kein Interesse an einer Technologieentwicklung.
Baubranche
Remmers Baustofftechnik, Löhningen
Remmers Baustofftechnik nutzt ca. 400 Produktsysteme für den Holz- und Bautenschutz - vom Keller bis zum Dach. Die Firma ist auf den Einkauf fertiger Produkte ausgerichtet. Zudem müssen die Produkte alle Kriterien des Brandschutzes und hinsichtlich der Witterungsbeständigkeit erfüllen sowie eine Einzelbauzulassung haben.
Maschinenbau
Hörmann Rawema GmbH, Chemnitz
Die Firma Hörmann ist ein Dienstleiter im Bereich Anlagenrealisierung. Die Firma hat keinen Markt für den Vertrieb von Maschinen zur Herstellung von Hochleistungsholztragwerken gesehen. Es gibt damit auch kein Interesse an einer Technologieentwicklung.

Als Marktfazit musste erkannt werden, dass es der entwickelten Hochleistungsholztechnologie derzeit noch an Technologie- und Marktreife fehlt. Entwicklungsinteresse oder der Wille zur Weiterveredlung der vorhandenen Produkte und Technologie war aufgrund fehlender Kapazitäten bei den Firmen nicht vorhanden.

Mit dem Ziel, die Marktreife der Projektergebnisse zu erörtern und mögliche Schritte zur Verwertung der Erkenntnisse über das Projektende hinaus zu diskutieren, traf sich die GWT mit Vertretern der Projektpartner, führender Institute der TU-Dresden und der TUD AG im Mai und Juni 2010 zu einem HHT–Expertenworkshop. Im Verlauf des Treffens wurden der aktuelle Forschungsstand des Projektes und die technische und wirtschaftliche Reife der Innovation aufgezeigt. Im Ergebnis des Treffens war die Technologiereife und Produktspezifik in der gegenwärtigen Entwicklungsphase nicht ausreichend darstellbar, um die Überführung des Projektes in ein Industrieprojekt bzw. Vermarktungsprojekt zu stützen.

Die hohe Innovation der Forschungsergebnisse bedarf der wissenschaftlichen Technologieweiterentwicklung. Technologiereife, Produktausprägung sowie Herstellungsprozess können für den Einsatz in der Produktion weiterentwickelt werden. Dabei sollte die mögliche Weiterverwertung der Ergebnisse außerhalb der Holzbranche auf nicht tragende Bauteile oder Technologie-Dienstleistungen untersucht werden.

Das Projekt liefert gute geistige Grundlagen und die Voraussetzung, Ideen der Hochleistungsholz-Technologie in die Praxis zu tragen. Das Konzept faser- und textilbewehrter Formholzprofile stößt in Fachkreisen und der Industrie auf ein äußerst positives Echo. Das zeigt sich insbe-

sondere in der Verleihung des Innovationspreises für Klima und Umwelt (IKU) durch das Bundesumweltministerium und den Bundesverband der Deutschen Industrie (BDI).

Um die wichtigen Ergebnisse des Projektes zur Marktreife überführen zu können und weitere Antworten auf die Anforderungen der Industrie bei der Formholzherstellung zu finden ist eine weiterführende Projektstufe erforderlich und zielführend.

Medienarbeit – Presse-/Öffentlichkeitsarbeit, Wissenstransfer über Netzwerke

Die mediale Kommunikation zur Bekanntmachung und Vorstellung des HHT Projektes und zur Verbreitung der dem Projekt zugrundeliegenden Idee des Hochleistungsholzes wurde durch die Nutzung unterschiedlichster zeitgemäßer Medien vorangetrieben.

Das Projekt oder Teilprojekte wurden und werden im Internet präsentiert. In einem ersten Schritt wurde das HHT Projekt 2008 in den Internetauftritt „Nachhaltige Waldwirtschaft“ integriert. Weitere Internet-Präsentationen folgten im Verlauf des Projektes auf den Plattformen „Innovationszentrum Holz - Sachsen, TMT / TexWood“ einer projektorientierten Technologieplattform, „GWT Forschung + Innovation“, „Dresden Forscht. Starke Bilder aus Forschung und Entwicklung“ und „IKU Der Innovationspreis für Klima und Umwelt“. Darüber hinaus präsentieren die Technische Universität Dresden, Fakultät Wirtschaftswissenschaften, Professur für betriebliche Umweltökonomie und das Institut für angewandte Forschung im Bauwesen (IaFB) Veröffentlichungen zum Projekt auf den Internetseiten der Hochschule und des Institutes.

Für Fragen zu den Inhalten der Internet-Präsentationen oder für nähere Informationen zum Projekt können die Projektpartner kontaktiert werden.

Zusammenfassung der Links:

Nachhaltige Waldwirtschaft
http://www.nachhaltige-waldwirtschaft.de/index.php?id=290&tx_kufprojects_pi1[showUid]=127&cHash=941e2f1fe9

Informationszentrum Holz – Sachsen, TMT / TexWood
http://www.tmt-texwood.de/Projekte.htm

GWT Forschung + Innovation
http://www.gwtonline.de/gwt/aktuelles/detail/article/formholz-fest-wie-stahl-stabil-wie-kunststoff-und-beton/

Dresden Forscht
http://www.dresden-forscht.de/index.php?id=186

IKU-Innovationspreis, Preisträger 2009
http://www.iku-innovationspreis.de/preistraeger-09/kategorie-3-2/

Technische Universität Dresden, Fakultät Wirtschaftswissenschaften, Professur für betriebliche Umweltökonomie und das Institut für angewandte Forschung
http://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_wirtschaftswissenschaften/bwl/bu/forschung/projekte/hht/

Institut für angewandte Forschung im Bauwesen (IaFB)
http://iafb.de/hochleistungsholztragwerke

Daneben wurden in umfangreichem Maße zur fachlichen und medialen Kommunikation sowie öffentlichkeitswirksamen Verdeutlichung der Projektergebnisse die Print- und Fernsehmedien mit den Zeitungsveröffentlichungen „Formbar wie Gummi, stark wie Stahl“, Sächsische Zeitung, Ausgabe Wissen, 22.03.2007 und „Die Kraft des Rohres“, Sächsische Zeitung, Ausgabe Wirtschaft, 03.03.2010 sowie dem Beitrag „Formbares Holz“ in der ZDF Drehscheibe vom 11.03.2008, 12:15 Uhr im Bayrischen Rundfunk, Faszination Wissen vom 16.11.2008, 21:40 Uhr und im MDR, Einfach Genial vom 18.11.2008, 19:50 Uhr in Rundfunk und Fernsehen genutzt.

Weitere Veröffentlichungen erfolgten im Dresdner Transferbrief 03/07 in der Rubrik Mit Visionen zu neuen Werkstoffen und dem Artikel „Formholzprofile und Schalen mit textiler Bewehrung“ vom 12.10.2007.

4.3 Team Tragwerke und Architektur

Autor: Yvette Lemke (IaFB)

Neben der Mitarbeit an dem gemeinsamen Patentantrag und den Veröffentlichungen im Konsortium (siehe Kap. 4.1) war die Hauptaufgabe des IaFB hinsichtlich der Verwertung und Verbreitung der Projektergebnisse deren baupraktische Aufbereitung.

Aus den Ergebnissen der Konstruktionsuntersuchungen wurden konstruktionsbezogene Bemessungsverfahren und Anwendungsrichtlinien für Tragwerksplaner und Architekten zusammengestellt und übersichtliche Verfahren zur Bemessung von Konstruktionen aus Hochleistungsholz entwickelt. Weiterhin erfolgte die Erstellung baupraktischer Anwendungsrichtlinien für Hochleistungsholz.

Es wurden Merkblätter, Praxisempfehlungen sowie Kurzdokumentationen erstellt, die dem späteren Anwender die neuen Konstruktionen und Materialien vorstellen, nötige Kennwerte sowie Verarbeitungshinweise geben und Anwendungsbeispiele zeigen. Zudem werden Anwendungsempfehlungen ausgesprochen und Literaturquellen genannt. Grundsätzlich enthalten die Merkblätter die Themenkomplexe „Material“, die Praxisemppfehlungen sind unterteilt in „Bemessungsverfahren“, „Bemessungsvorschläge“ sowie „Konstruktion und Technologie“, die Kurzdokumentationen informieren über die Pilotprojekte.

Die Webseite des IaFB wurde im letzten Quartal des Jahres 2009 grundlegend überarbeitet und das Forschungsprojekt Hochleistungsholztragwerke (www.iafb.de/hochleistungsholztragwerke) eingepflegt. Neben einer kurzen Projektbeschreibung von Basis- und Zusatzprojekt werden auch die Pilotprojekte vorgestellt. Es ist angedacht, die erzielten Projektergebnisse zeitnah auf der entsprechenden Seite zusammengefasst darzustellen und Merkblätter, Praxisempfehlungen, Kurzdokumentationen sowie Bemessungsvorschriften den interessierten Fachkreisen zu Verfügung zu stellen.

Das Team Tragwerke geht davon aus, dass gerade die praxisorientierten Merkblätter, Anwendungsrichtlinien und Bemessungsverfahren zukünftigen Anwendern die Möglichkeiten des Bauens mit Hochleistungstragwerken aufzeigen und das nötige Werkzeug ihrer rechnerischen Beherrschbarkeit zur Verfügung stellen, so dass die Projektergebnisse dadurch – kombiniert mit den Veröffentlichungen aller Projektpartner – Eingang in die Bauwelt finden.

Die durch den Bruchversuch des KHP-BSH-Hybridträgers (vgl. Kap. 3.8.2.5) erhaltenen Erkenntnisse bezüglich der Verformungen sowie der geeigneten Auswertung verschiedener Messverfahren wurden in dem Artikel „Experimentell-Analytische Zusammenführung und Modell-Abbildung beim Monitoring von Brücken“ veröffentlicht und auf dem 5. Symposium „Experimentelle Untersuchungen von Baukonstruktionen“ in Dresden 11.09.2009 vorgestellt. Auch zukünftig werden die Ergebnisse des HHT-Projektes dem Fachpublikum durch Vorträge vorgestellt werden.

Gerade für die Hybridbauteile – wie KHP-BSH-Hybridträgern und bewehrte Formholzstützen – sowie für die verstärkten Verbindungen wird großes Anwendungspotential gesehen. Dazu sollten allerdings neuartige Bemessungsverfahren wie beispielsweise der Ansatz von plastifizierten Druckzonen und gerissenen Zugzonen angewendet und die gute Dauerhaftigkeit durch weitere Langzeitversuche belegt werden, um die im Bereich Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit vorhandenen Potentiale auch nutzen zu können.

4.4 Team Wirtschaft

Autor: Rensteph Thompson (Hess)

Das Forschungsprojekt „Hochleistungsholztragwerke“ begann ungefähr ein Jahr nach Neugründung der Firma Hess Timber (damals Hess-Wohnwerk) und war somit die erste Teilnahme an einem Forschungsvorhaben in der noch jungen Firmengeschichte.

Es war damals bereits das Bestreben von Hess Timber mit Hilfe von innovativen Holzprodukten, in einem kleinen Marktbereich der Architektur- und Sonderbauten, aktiv zu werden. Die Entwicklung von innovativen Holzprodukten auch in Kombination mit Verbundmaterialien auf Kunststoffbasis, passte somit sehr gut zur Firmenausrichtung, ebenso wie etwa der Produktbereich der Formholzprofile im Bauwesen.

In der ersten Projektphase wurde eine solide Ausgangsbasis erschaffen. Dazu zählte die Ausarbeitung des „state of the art“ - Berichtes in Teamarbeit, sowie Workshops und Videokonferenzen zum Abgleich der Wissensstände. Bereits in dieser Phase konnten wichtige Erkenntnisse zu neuen Materialien und Holzarten gewonnen werden. Mit diesem Wissen ging es in die Produktionsphase von Probe- bzw. Prüfbauteilen, die in enger Rücksprache mit den Projektpartnern hergestellt wurden.

Die Verwendung von neuen Baumaterialien und Holzarten in der Produktion, die oft als Verbundbauteile hergestellt werden mussten, erforderte einen verhältnismäßig hohen Aufwand an Arbeitsvorbereitung. Insbesondere die Mitarbeiter in der Produktion benötigten sehr detaillierte Arbeitsanweisungen, damit auch alle geforderten Bedingungen eingehalten werden konnten. Dies ist aber ein völlig normaler Prozess, wenn bisher unbekannte Arbeitsweisen ausgeführt werden müssen.

Während der Produktion von Probekörpern wurde im Unternehmen auch immer die Wirtschaftlichkeit im Hinblick auf zukünftige Produktchancen am Markt hinterfragt. Hier gab es durchaus unterschiedliche Sichtweisen zwischen den Partnern. Dies ist dadurch zu erklären, dass aus unternehmerischer Sicht eher kurzfristige Produktlösungen interessant sind als langfristige Produktvarianten, deren Wirtschaftlichkeit zum aktuellen Zeitpunkt nicht eindeutig geklärt ist.

Neben der Herstellung von Probekörpern spielen auch die Pilotprojekte eine wichtige Rolle. Bereits zu Projektbeginn standen mehrere Optionen, wie z.B. die Henzestegbrücke in Berlin zur Auswahl. Leider konnte die Brücke am Schluss, trotz intensiver Betreuung seitens aller Projektpartner nicht gebaut werden. Hierfür gab es sicherlich mehrere Gründe, jedoch ist es sehr schade, dass dieses Projekt in der Projektlaufzeit nicht ausgeführt wurde. Weiterhin konnte auch ein weiteres Pilotprojekt, die Hess-Innenhofüberdachung, aus Kostengründen nicht realisiert werden. Im Gegenzug dazu konnte aber eine Vertikal-Windkraftanlage in relativ kurzer Zeit umgesetzt werden.

Insgesamt war das Forschungsprojekt ein wichtiger Beitrag für den Holzbau, der in Zusammenarbeit mit engagierten Projektpartnern erarbeitet wurde.

Es wird jedoch schwer sein, die Produkte, wie z.B. die mit Kunstharzpressholz (KHP) verstärkten Träger wirtschaftlich herstellen zu können, da das Grundmaterial KHP sehr teuer ist und hier nicht davon ausgegangen werden kann, dass sich mittelfristig wirtschaftlichere Produktionstechnologien für KHP ergeben. Es kommt hinzu, dass die Höhenreduzierung eines KHP-Trägers gegenüber einem Brettschichtholzträgers so gering ist, dass sich auch hier kaum Bauvorhaben finden lassen werden, wo dieser Vorteil von Nutzen wäre.

Bei den Formholzröhren ist eine wirtschaftliche Lösung ebenfalls schwierig. Hier ist zwar das Grundmaterial relativ günstig, aber die hohe Anzahl der verschiedenen Herstellprozesse erzeugt mit aktueller Produktionstechnologie zu hohe Kosten. Ein erster Weg in die richtige Richtung ist sicherlich die mit Unterstützung von Prof. Haller gebaute Testanlage zur Herstellung der Formholzröhren mit einer max. Rohrlänge von 150cm.

Weitere Produktentwicklungen im Bereich der Anschlusstechnik, wie etwa die Gestricke, können für Sonderprojekte interessant sein. Jedoch können diese Lösungen nur dann am Markt genutzt werden, wenn die entsprechenden bauaufsichtlichen Zulassungen vorliegen. Bis zur Erteilung einer Zulassung vergehen aber mindestens 2-5 Jahre, so dass auch hier eine kurzfristige Markteinführung unwahrscheinlich erscheint.

Literaturverzeichnis

Normen

[1] DIN 1052: 2004-08 – Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken. Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau.

[2] DIN 1052: 2008-12 – Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken. Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau

[3] DIN 1074: 1991-05 – Holzbrücken

[4] DIN 1074 Entwurf: 2005-02 – Holzbrücken

[5] DIN 1074: 2006-09 – Holzbrücken

[6] DIN 1995-1-1 EC 5: 2005-12 – Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - T1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau

[7] DIN EN 1995-1-1 EC 5: 2008-09 – Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung

[8] DIN 1995-2 EC 5: 2006-02 – Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 2 Brücken

[9] DIN 4074-1: 2003-06 – Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit - T1 Nadelschnittholz

[10] DIN 4074-1: 2008-12 – Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit - T1 Nadelschnittholz

[11] DIN 4074-5: 2003-06 – Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit - T5 Laubschnittholz

[12] DIN 4074-5: 2008-12 – Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit - T5 Laubschnittholz

[13] DIN 68364: 2003-05 – Kennwerte von Holzarten - Rohdichte, Elastizitätsmodul und Festigkeiten

[14] DIN EN 408: 2004-08 – Holzbauwerke - Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz - Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften

[15] DIN EN 301: 1992-08 – Klebstoffe für tragende Holzbauteile - Phenoplaste und Aminoplaste - Klassifizierung und Leistungsanforderungen

[16] DIN EN 301 E : 2001-11 – Klebstoffe für tragende Holzbauteile - Phenoplaste und Aminoplaste - Klassifizierung und Leistungsanforderungen

[17] DIN EN 301 E : 2006-09 – Klebstoffe für tragende Holzbauteile - Phenoplaste und Aminoplaste – Klassifizierung und Leistungsanforderungen

[18] DIN EN 336: 2003-09 – Bauholz für tragende Zwecke - Maße, zulässige Abweichungen

[19] DIN EN 1194: 1999-05 – Holzbauwerke - Brettschichtholz - Festigkeitsklassen und Bestimmung charakteristischer Werte

[20] DIN EN 14080: 2009-09 – Holzbauwerke - Brettschichtholz, Anforderungen

[21] DIN EN 14081: 2006-03 – Holzbauwerke - Nach Festigkeit sortiertes Bauholz für tragende Zwecke mit rechteckigem Querschnitt - T1: Allgemeine Anforderungen

[22] DIN EN 1058: 1996-04 – Holzwerkstoffe - Bestimmung der charakteristischen Werte der mech. Eigenschaften und der Rohdichte

[23] DIN EN 1058: 2010-04 – Holzwerkstoffe - Bestimmung der charakteristischen 5-%-Quantilwerte und der charakteristischen Mittelwerte

[24] DIN EN 1176: 2003-07 – Spielplatzgeräte - Normenpaket: Teil 1-7

[25] DIN EN 1176: 2008-08 – Spielplatzgeräte - Normenpaket: Teil 1-7

[26] DIN EN 13986: 2005-03 – Holzwerkstoffe zur Verwendung im Bauwesen - Eigenschaften, Bewertung der Konformität und Kennzeichnung

[27] DIN EN 14279: 2005-02 – Furnierschichtholz (LVL) - Definitionen, Klassifizierung und Spezifikationen

[28] DIN EN 14279: 2009-07 – Furnierschichtholz (LVL) - Definitionen, Klassifizierung und Spezifikationen

[29] DIN EN 14374: 2005-02 – Holzbauwerke - Furnierschichtholz für tragende Zwecke - Anforderungen

[30] DIN EN 385: 2003-03 – Keilzinkenverbindungen im Bauholz - Leistungsanforderungen und Mindestanforderungen an die Herstellung

[31] DIN EN 385: 2007-11 – Keilzinkenverbindungen im Bauholz - Leistungsanforderungen und Mindestanforderungen an die Herstellung

[32] DIN EN 386: 2002-04 – Brettschichtholz - Leistungsanforderungen und Mindestanforderungen an die Herstellung

[33] DIN EN 387: 2002-04 – Brettschichtholz - Universal-Keilzinkenverbindungen - Leistungsanforderungen und Mindestanforderungen an die Herstellung

[34] DIN EN 390: 1995-03 – Brettschichtholz - Maße - Grenzabmaße

[35] DIN EN 912: 2001-01 – Holzverbindungsmittel - Spezifikationen für Dübel besonderer Bauart

[36] DIN 976-1: 1995-02 – Gewindebolzen - T1 Metrisches Festsitzgewinde MFS

[37] DIN 976-1: 2002-12 – Gewindebolzen - Teil 1: Metrisches Gewinde

[38] DIN EN 113: 1996-11 – Holzschutzmittel - Prüfverfahren für die Bestimmung der Grenze der Wirksamkeit gegen Moderfäule und andere erdbewohnende Mikroorganismen

[39] DIN EN 113-A1: 2004-04 – Holzschutzmittel - Prüfverfahren zur Bestimmung der vorbeugenden Wirksamkeit gegen holzzerstörende Basidiomyceten, Bestimmung der Grenze der Wirksamkeit

[40] DIN EN 335-1: 1992-09 – Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten - Definition der Gefährdungsklassen für einen biologischen Befall; Teil 1 Allgemeines.

[41] DIN EN 335-1: 2006-10 – Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten - Definition der Gefährdungsklassen für einen biologischen Befall; Teil 1 Allgemeines

[42] DIN EN 335-2: 1992-10 – Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten - Definition der Gefährdungsklassen für einen biologischen Befall; Teil 2 Anwendung bei Vollholz

[43] DIN EN 335-2: 2006-10 – Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten - Definition der Gefährdungsklassen für einen biologischen Befall; Teil 2 Anwendung bei Vollholz

[44] DIN EN 335-3: 1995-09 – Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten - Definition der Gefährdungsklassen für einen biologischen Befall; Teil 3 Anwendung bei Holzwerkstoffen

[45] DIN EN 350-1: 1994-10 – Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten - Natürliche Dauerhaftigkeit von Vollholz - Teil 1: Grundsätze für die Prüfung und Klassifikation der natürlichen Dauerhaftigkeit von Holz

[46] DIN EN 350-2: 1994-10 – Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten - Natürliche Dauerhaftigkeit von Vollholz - Teil 2: Leitfaden für die natürliche Dauerhaftigkeit und Tränkbarkeit von ausgewählten Holzarten von besonderer Bedeutung in Europa

[47] DIN EN 351: 2005-08 – Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten - Mit Holzschutzmitteln behandeltes Vollholz - T1 Klassifizierung der Schutzmitteleindringung und -aufnahme

[48] DIN EN 351: 2007-10 – Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten - Mit Holzschutzmitteln behandeltes Vollholz - T1 Klassifizierung der Schutzmitteleindringung und -aufnahme

[49] DIN EN 460: 1994-10 – Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten - Natürliche Dauerhaftigkeit von Vollholz - Leitfaden für die Anforderungen an die Dauerhaftigkeit von Holz für die Anwendung in den Gefährdungsklassen

[50] DIN V ENV 807: 2001-12 – Holzschutzmittel - Prüfverfahren für die Bestimmung der Grenze der Wirksamkeit gegen Moderfäule und andere erdbewohnende Mikroorganismen

[51] DIN 68800: 1990-04 Holzschutz – Vorbeugender chemischer Holzschutz

[52] DIN EN 84:1997-05 Holzschutzmittel – Beschleunigte Alterung von behandeltem Holz vor biologischen Prüfungen - Auswaschbeanspruchung

[53] DIN EN 113:1996-11 Holzschutzmittel – Prüfverfahren zur Bestimmung der vorbeugenden Wirksamkeit gegen holzzerstörende Basidiomyceten – Bestimmung der Grenze der Wirksamkeit

[54] DIN EN 335-1:2006-10 Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten – Definition der Gebrauchsklassen –Teil 1: Allgemeines

[55] DIN EN 350-1:1994-10 Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten – Natürliche Dauerhaftigkeit von Vollholz – Teil 1: Grundsätze für die Prüfung und Klassifikation der natürlichen Dauerhaftigkeit von Holz

[56] DIN EN 350-2:1994-10 Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten – Natürliche Dauerhaftigkeit von Vollholz – Teil 2: Leitfaden für die natürliche Dauerhaftigkeit und Tränkbarkeit von ausgewählten Holzarten von besonderer Bedeutung in Europa

[57] DIN EN 460:1994-10 Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten – Natürliche Dauerhaftigkeit von Vollholz – Leitfaden für die Anforderungen an die Dauerhaftigkeit von Holz für die Anwendung in den Gefährdungsklassen

[58] E DIN 68800-1:2009-11 Holzschutz – Teil 1: Allgemeines

[59] E DIN CEN/TS 15083-1:2005-10 Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten – Bestimmung der natürlichen Dauerhaftigkeit von Vollholz gegen holzzerstörende Pilze – Prüfverfahren – Teil 1: Basidiomyceten

[60] DIN V ENV 1156: 1999-03 Holzwerkstoffe - Bestimmung von Zeitstandsfestigkeit und Kriechzahl

[61] DIN 68364: 2003-05 Kennwerte von Holzarten – Rohdichte, Elastizitätsmodul und Festigkeiten

[62] DIN EN 385:2001: Keilzinkenverbindungen in Bauholz - Leistungsanforderungen und Mindestanforderungen an die Herstellung

[63] DIN EN 387:2002: Universal-Keilzinkenverbindungen (Brettschichtholz) Leistungsanforderungen und Mindestanforderungen an die Herstellung

[64] DIN EN 391:2001: Delamierungsprüfungen von Klebstofffugen (Brettschichtholz)

[65] DIN EN 408:2003: Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz - Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften

[66] DIN EN 383:1993 „Timber structures. Test methods. Determination of embedding strength and foundation values for dowel type fasteners". German Version EN 383

[67] DIN 52186:1978-06: Prüfung von Holz – Biegeversuch, Beuth Verlag, Berlin, 1978.

[68] DIN EN 12512:2001 Holzbauwerke – Prüfverfahren. Zyklische Prüfungen von Anschlüssen mit mechanischen Verbindungsmittel

[69] DIN 52192:1979 Prüfung von Holz: Druckversuch quer zur Faser

[70] DIN EN 15804:2008-04 - Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltdeklarationen für Produkte - Regeln für Produktkategorien

[71] DIN EN ISO 14040:2006-10 - Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen

[72] DIN EN ISO 14044:2006-10 - Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen

[73] DIN Fachbericht 101: 2009-03 Einwirkungen auf Brücken

[74] Liste zugelassener Klebstoffe für tragende Anwendungen im Holzbau. Stand 03-01-06 (pdf der MPA Stuttgart)

Veröffentlichungen, Berichte, Bibliograpgien, Merkblätter, etc.

[75] Raknes, E.: Leime; in: Holzbauwerke nach EUROCODE 5, Bemessung und Baustoffe. STEP 1, S. A12/1 – A12/9; Informationsdienst Holz, Fachverlag Holz, 1995

[76] Haller, P.; Wehsener, J.: Entwicklung innovativer Verbindungen aus Pressholz und Glasfaserarmierung für den Ingenieurholzbau. Forschungsbericht - AiF-Nr. 11164 B/1. Fraunhofer IRB-Verlag. 2003

[77] Haller, P.; Wehsener, J.; Heiduschke, A.: Elektrische und mechanische Untersuchungen an textilverstärktem Kunstharzpressholz. Abschlussbericht ABB-Projekt. TU Dresden. 2003

[78] IHD – Merkblatt: Verwendbarkeit thermisch modifizierter Hölzer für tragende und aussteifende Bauteile, August 2006

[79] Haller, P.; Buchelt, B.: Studie Verdichtetes Holz, TU Dresden

[80] Haller, P.; Wehsener, J.: Festigkeitsuntersuchungen an Fichtenpressholz (FPH) In: Holz als Roh- und Werkstoff. 62 (2004) Nr. 6. S. 352-354

[81] Papka, S. D., Kyriakides, S.: Biaxial crushing of honeycombs – Part I: Experiments. International Journal of Solids and Structures 36 (1999) 4367-4396.

[82] Papka, S. D., Kyriakides, S.: Biaxial crushing of honeycombs – Part II: Analyses. International Journal of Solids and Structures 36 (1999) 4397-4423.

[83] Accoya Brochure, deutsch

[84] Bariska, M.: Skript Holzkunde – Holzchemie. ETH Zürich, Professur für Holzwissenschaften.

[85] Erprobung eines Acetylierungsverfahrens für heimische Holzarten und Holzprodukte – Bericht zum DBU Projekt-AZ 08244

[86] Übersichtsbericht – Acetyliertes Holz - Naturwissenschaftliche und technologische Grundlagen, materialtechnische und ökonomische Möglichkeiten und Grenzen, aktueller Stand der Umsetzung. Institut für Holzbiologie und Holztechnologie der Georg-August-Universität Göttingen. 2001

[87] Rowell, R.; Tillman, A.M.; Simonson R.: A Simplified Procedure for the Acetylation of Hardwood and Softwood Flakes for Flakeboard Produktion. Journal of Wood Chemistry and Technology. 6 (3) (1986) pp. 427-448

[88] Rowell, R.: Chemical Modification. In: Burley, E.; Evans, J.; Youngquist, J. (Ed.) Encyclopedia of Forest Sciences – Volume 3. Elsevier Academic Press. 2004

[89] Rowell, R.: Chemical Modification of Agricultural Fibers for Property Enhanced Composites. In: Olese, O.; Rexen, F.; Larsen, J. (Ed.) Research in industrial application of non food crops, I: Plant Fibres. (1995)

[90] Rowell, R.: Chemical Modification of Wood. In: Rowell, R. (Ed.) Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites. (1995) CRC PRESS, Boca Raton, London, New York Washington (2005)

[91] Rowell, R.: Chemical Modification of Wood. Forest Products Abstracts, (6)1983 pp. 363-382

[92] Rowell, R.: Chemical Modification of Wood. In: Hon, D.; Shiraishi, N.: (Eds.). Wood and cellulosic chemistry. New York: Marcel Dekker, Inc.; 1991: 703–756. Chapter 15.

[93] Vick, C.B.; Rowell, R.: Adhesive bonding of acetylated wood. International Journal of Adhesion and Adhesives, 10 (4) 1990. pp. 263-272

[94] Mahlberg, R.; Paajanen, L.; Nurmi, A.; Kivistö, K.; Koskela, K.; Rowell, R.: Effect of chemical modification of wood on the mechanical and adhesion properties. Holz als Roh- und Werkstoff. 59 (2001) pp. 319-326

[95] Inoue, M.; Norimoto, M.; Tanahashi, M.; Rowell, R.: Steam or Heat Fixation of Compressed Wood. Wood and Fiber Science. 25 (3) (1993) pp. 224-235

[96] Rowell, R.; Lange, S.; McSweeny, J.; Davis, M.: Modifikation Of Wood Fiber Using Steam. Proceedings of the 6. Pacific Rim Bio-Based Composites Symposium. Portland. USA. 2002 pp. 606-615

[97] Rowell, R.; Lange, S.; Todd, T.; Das, S.; Saha, A.K.; Choudhury, P.K.; Inoue, M.: Steam Stabilization of Jute-based Composites. Proceedings of the 5. International Conference on Woodfiber-Plastic Composites. Madison. USA 1999.

[98] Rowell, R.; Kawai, S.; Inoue, M.: Dimensionally Stabilized, very low Density Fiberboard. Wood and Fiber Science. 27 (4) (1993) p. 428-436

[99] Yuhe, Ch.; Muehl J.: Factors of affecting the spring back of compressed Paulownia wood. Journal of Forestry Research. 10 (3) (1999)

[100] Rowell, R.; Lange, S.; Davis, M.: Steam Stabilization Of Aspen Fiberboards. Proceedings of the 5. Pacific Rim Bio-Based Composites Symposium. Canberra. Australien. 2000 pp. 425-438

[101] Frese, M.; Blaß, H. J.: The influence of the grading method on the finger joint bending strength of beech. CIB W18 Meeting 39, Florence, Italy, August 2006

[102] Frese, M.; Blaß, H. J.: Die Biegefestigkeit von Keilzinkenverbindungen aus Brettern der Buche (Fagus silvatica L.). In: Holz als Roh- und Werkstoff (64) (2006) Springer-Verlag. Pp. 433-443

[103] Aicher, S.; Radovic, B.: Untersuchungen zum Einfluß der Keilzinkengeometrie auf die Zugfestigkeit keilgezinkter Brettschichtholz-Lamellen. In: Holz als Roh- und Werkstoff (57) (1999) Springer-Verlag. Pp. 1-11

[104] Haller, P.; Birk, T.: Produktinnovation mit Formvollholz – Konstruktionselemente für den Holzbau, Gestaltungs- und Anwendungsmöglichkeiten, Bearbeitungsanforderungen. In: Tagungsband, 5. WZM-Fachseminar, Dresden, Deutschland, 2002

[105] Haller, P.; Birk, T.: Produktinnovation mit Formvollholz – Konstruktionselemente für den Holzbau, Gestaltungs- und Anwendungsmöglichkeiten, Bearbeitungsanforderungen. In: Tagungsband, 5. WZM-Fachseminar, Dresden, Deutschland, 2002

[106] Haller, P.; Birk, T.; Offermann, P.; Ünal, A.: Verbindungskonzept für textilverstärkte Formvollholzprofile - Entwicklung, Fertigung und Prüfung. In: Proceedings, 11. Internationale Chemnitzer Tagung -Stoffliche Verwertung nachwachsender Rohstoffe, Chemnitz., Deutschland, 2004.

[107] Haller, P.; Ziegler, S.: From Tree Trunk to Tube: How to improve the efficiency of wood in two steps. In: Proceedings, Third International Conference of the ESWM 2004, Vila Real, Portugal, 2004

[108] Haller, P.: From Tree Trunk to Tube or the Quadrature of the Circle. In: Proceedings, COST C12: Improvement of building's structural quality by new technologies, Innsbruck, Austria, 2005

[109] Haller, P.: Vom Baum zum Bau oder die Quadratur des Kreises. In: Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden. 53 (2004) Nr. 1-2, S. 100 - 104

[110] Haller, P.: Formholzprofile und textilbewehrter Beton - Ein neuer Verbundquerschnitt. In: Beton und Stahlbetonbau 99 (2004) Nr. 6, S. 488 – 489

[111] Cabi, L.: Stütze aus Formholz. Forschungsbericht. TU Dresden. Institut für Stahl- und Holzbau. 2006

[112] Haller, P.; Birk, T.; Offermann, P.; Ünal, A.: Verbindungskonzept für textilverstärkte Formvollholzprofile - Entwicklung, Fertigung und Prüfung. In: Proceedings, 11. Internationale Chemnitzer Tagung - Stoffliche Verwertung nachwachsender Rohstoffe, Chemnitz., Deutschland, 2004

[113] Weaver, P. M.: Design of laminated composite cylindrical shells under axial compression. Composite Part B (31). 2000. p. 669-679

[114] Weaver, P. M.: The effect of extension/twist anisotropy on compression buckling in cylindrical shells. Composite Part B (34). 2003. p. 251-260

[115] Viergeschossiges Bauwerk im Bauwerk, aus Holz, Stahl und Beton. Runde Stützen, Holz-Beton-Verbund-Decken, Verleimte Bögen. Bauen mit Holz. 11/1992. S. 898-902

[116] Palitzsch, B.: Durchführung einer Machbarkeitsstudie aus ökonomischer, ökologischer und technischer Perspektive für Formholzprofile. Diplomarbeit TU Dresden. Institut für Stahl- und Holzbau. 2004

[117] Natterer, J.; Hoefft, M.: Zum Tragverhalten von Holz-Beton-Verbundkonstruktionen. Forschungsbericht CERS Nr. 1345. EPFL Lausanne. 1987

[118] Kenel, A.: Zur Berechnung von Holz/Beton-Verbundkonstruktionen. Entwicklung und Vergleich verschiedener Berechnungsmethoden. Forschungsbericht 115/42 EMPA Dübendorf. Schweiz. 2000

[119] Schmidt, J.; Thiele, R.: Wirtschaftliche Bemessung von Holz-Estrich-Verbunddecken bei konstantem Sicherheitsniveau. In: 10. Dresdner Baustatik-Seminar. Neue Bauweisen – Trends in Statik und Dynamik. S. 511-517. Dresden, Deutschland. 2006

[120] Bathon, L. A.; Bletz, O.: Holz-Beton-Verbundsystem mit eingeklebten HBV-Schubverbindern. Bautechnik 82 (2005), Heft 5. S. 322-325

[121] Döhrer, A.; Rautenstrauch, K.: Hybridbrücken mit blockverleimtem BSH. Bautechnik 83 (2006), Heft 6. S. 394-401

[122] Bathon, L. A.; Bletz, O.: Holz-Beton-Verbundbrüvke in Kayl/Luxemburg. Bauen mit Holz 12/2006. S. 22-27

[123] Bathon, L. A.; Bletz, O.: Konstruktionsansätze für weitgespannte Decken sowie Brücken in HBV-Verbundbauweise. Bautechnik 83 (2006), Heft 6. S. 435-439

[124] Kenel. A.: Zur Berechnung von Holz/Beton-Verbundkonstruktionen. Bericht 115/42. EMPA Dübendorf, Schweiz. Forschungs- und Arbeitsbericht, Abteilung 115, Holz. 03-2000

[125] Tempel, M.: Holz-Beton-Verbunddecken in der Sanierung. Diplomarbeit. TU Dresden, Institut für Baukonstruktionen und Holzbau. 1995

[126] Blaß, H. J.: Trag- und Verformungsverhalten von Verbundbauteilen aus Brettschichtholz unter Verwendung von Faserverstärkten Kunststoffen. Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben F-98/02

[127] Blaß, H. J.; Romani, M.: Tragfähigkeitsuntersuchungen an Verbundträgern aus BS-Holz und Faserverbundkunststoff-Lamellen. Holz als Roh- und Werkstoff 59 (2001). S. 364-373

[128] Romani, M.; Blaß, H. J.: Design model for FRP reinforced glulam beams. CIB W18 Meeting 34, Venice, Italy, August 2001

[129] Blaß, H. J.; Schmid, M.: Verbundträger aus Brettschichtholz mit Verstärkungen aus Faserverbundkunststoffen. Bauingenieur 80 (2005). S. 268-276

[130] Romani, M.; Blaß, H. J.: Reinforcement of glulam beams with FRP reinforcement. Karlsruhe. Deutschland, 2000

[131] Gentile, C.: Flexural Strengthening of Timber Bridge Beams using FRP. Master-Thesis. University of Manitoba. Winnipeg. Canada. 2000

[132] Gentile, C.; Svecova; D.; Rizkalla, S.: Timber Beams Strengthened with GFRP Bars: Development and Applications. Journal of Composites for Construction (6) 2002.

[133] Wada, H,; Masuda, K.; Kawasaki, E.; Ishitani, K.: Strength Properties of Composite Laminated Wood Composed of Z-S Treated Steel an Sugi (Crytomeria japonica) Fingerjointed Lumber. Vol. 46, No 1, p. 25-31

[134] Schober, K. U.; Franke, S.; Rautenstrauch, K.: In-Situ Strengthening of Timber Structures with CFRP, CIB W18 Meeting 39, Florence, Italy, August 2006

[135] Dagher, H.; Abdel-Magid, B.; Ritter, M.; Iyer, S. - GRP Prestressing of Wood Decks. In: Kempner Jr., L.; Brown, C.B., ed(s). Building to last: Proceedings of Structures Congress XV; 1997 April 13-16; Portland, OR. New York, NY: American Society of Civil Engineers; Vol. 1: 585-589.

[136] Faserverstärktes BS-Holz am Beispiel der Lagerhalle der Firma Bürli im schweizerischen St. Erhard. Bauen mit Holz 2/2000. S. 26-29

[137] Martin, Z. A.; Stith, J. K.; Tingley, D. A.: Strength and stiffness performance of FRP reinforced White oak. poster 53, p. 1-5. In: Proceedings of 6th World Conference on Timber Engineering, Whistler Resort, Canada, 2000

[138] Tingley, D.; Gilham, P.; Kent, S.: Long Term Load Performance of FRP Reinforced Glulam Bridge Girders. National conference on wood transportation structures. 1996

[139] Brody, J.; Richard, A.; Sebesta, K.; Wallace, K.; Hong, Y.; Anido, R. L.; Davids, W.; Landis, E.: FRP-Wood-Concrete Composite Bridge Griders. In.: Proceedings of Structures Congress 2000 -Advanced Technologies in Structural Engineering. Philadelphia, USA.

[140] Chen; C.-J.: Mechanical behavior of fiberglass reinforced timber joints. In: Proceedings of 6th World Conference on Timber Engineering, Whistler Resort, Canada, 2000. p. 12-1…8

[141] Birk, T.; Haller, P.: Textile Verstärkung von Holzbauteilen. In: 1. Fachkolloquium Textilbeton. RWTH Aachen, 2001, S. 293–304

[142] Haller, P; Birk, T.; Putzger, R.: Physikalische und mechanische Untersuchungen an textilbewehrtem Holz und Holzbauteilen. Technische Universität Dresden: Eigenverlag, 2002 – Arbeitsbericht des SFB 528, S. 283-322

[143] Haller, P.; Birk, T.: Der Einsatz von multiaxialen Nähgewirken und Biaxialgestricken zur Verstärkung von Holzkonstruktionen. In: Curbach, M.; Hegger, J. (Editor). 2. Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS2). Dresden. 2003. S. 235-246

[144] Hufenbach, W.; Kroll, L.; Langkamp, A.; Lepper, M.; Werdermann, B.: Theoretical and Experimental Stress Concentration Analysis of Multilayered Textile-Wood Composites with Inserts. In: Curbach, M.; Hegger, J. (Editor). 2. Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS2). Dresden. 2003. p. 259-271

[145] Offermann, P.; Ünal, A.; Engler, T.: Modellierung und fertigungsgerechte Entwicklung von Verstärkungsgestricken für Holz-Textil-Kunststoffverbunde. In: Curbach, M.; Hegger, J. (Editor). 2. Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS2). Dresden. 2003. S. 225-234

[146] Haller, P.; Birk, T.: Research and application of stitch bonded and knitted technical textiles in wood constructions. In: Proceedings, 12. Techtextil-Symposium, Frankfurt/M., Deutschland, 2003

[147] Echavarra, C.; Haller, P.; Salenikovich, A.: Analytical study of a pin–loaded hole in elastic orthotropic plates. In: Composites Structures. Volume 79, Issue 1, June 2007, Pages 107-112

[148] Cebulla, H.; Offermann, P.; Diestel, O.: Fully fashioned biaxial weft knitted fabrics. In: AUTEX Journal, Volume 2, No. 1 , March 2002

[149] Cebulla, H.: Formgerechte zwei- und dreidimensionale Mehrlagengestricke mit biaxialer Verstärkung - Entwicklung von Maschine, Technologie und Produkten. Dissertation. Technische Universität Dresden, TUDpress. 2005

[150] Haller, P.; Birk, T.; Offermann, P.; Cebulla, H.: Fully fashioned biaxial weft knitted and stitch bonded textile reinforcement for wood connections. In: Composites Part B: Engineering, Volume 37, Issues 4-5, June-July 2006, Pages 278-285

[151] Haller, P.; Kasal, B.; Pospisil, I.; Jirovsky, M; Drdacky, M.; Heiduschke, A.: 2002. Shake table tests of laminated timber frames with fiber reinforced joints. In: Proceedings of 12th European Conference of Earthquake Engineering. Elsevier Science, Ltd. London. September 2002

[152] Kasal, B.; Fiber-Reinforced Laminated Timber Frames under Earthquake Loads. In: Curbach, M.; Hegger, J. (Editor). 2. Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS2). Dresden. 2003. p. 273-282

[153] Heiduschke, A.; Haller, P.; Kasal, B.: Zum Tragverhalten textilbewehrtverdichteter Rahmenecken unter zyklischer Beanspruchung. In: Bautechnik, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 2004 (in press)

[154] Haller, P.; Kasal, B.; Heiduschke, A.: Heavy timber laminated frames with composite material reinforced beam-to-column connections under earthquake loads. In: Proceedings, 8th World Conference on Timber Engineering, Lahti, Finland, 2004. Volume 2. 383 - 388.

[155] Heiduschke, A.; Haller, P.; Kasal B.: Moment Resisting Timber Frames with Densified and Reinforced Beam-To-Column Connections under Seismic Loads. In: Proceedings, COST C12: Improvement of building's structural quality by new technologies, Innsbruck, Austria, 2005.

[156] Lejten, M.; Cruz, H.M.; Ceccotti, A.; Rodd, P.D.; , Werner, H.; Virdi, K.S.: Physical and mechanical properties of densified veneer wood (DVW) for structural applications. Final report. FOREST Project MA2B-CT91-0033. University of Technology Delft. Delft. The Nederlands. 1994

[157] Blaß, H.J.; Schmidt, M.; Werner, H.: Verstärkung von Verbindungen. In: Bauen mit Holz. Heft 9. 2001.

[158] Blaß, H..J.; Schmid, M; Litze, H; Wagner, B.: Nail plate reinforce d joints with dowel-type fasteners. paper 8.6.4. p. 1-8. In: Proceedings of 6th World Conference on Timber Engineering, Whistler Resort, Canada, 2000

[159] Belchior-Gaspard, P.; Colling, F.; Siebert, W.: Karlsruher Forschung im Ingenieurholzbau 1987 – Teil 3. Bauen mit Holz 8/87. S. 504-509

[160] Hallström, S.: Glass fibre reinforced holes in laminated timber beams. Wood Science and Technology 30 (1996) p. 323-337

[161] Hallström, S.; Grenestedt, L.: Failure analysis reinforced with of laminated timber beams glass fibre composites. Wood Science and Technology 31 (1997) p. 17-34

[162] Falconet, D.; Bourban, P.-E.; Pandita, S.; Manson J-A.E; Verpoest, I.: Fracture toughness of weft-knitted fabric composites. Composites: Part B. 33 (2002) p. 575-588

[163] Wilde, D.: Thermoplaste mit gestrickten Verstärkungsfasern. Optimierung von Werkstoff- und Prozesseigenschaften. Dissertation. TU Clausthal-Zellerfeld. Papierflieger-Verlag. Clausthal-Zellerfeld. 2003

[164] SIKA CarboDur-Lamelle - Technisches Merkblatt

[165] Prüfbericht 229002 „Prüfung der Dauerhaftigkeit eines Handelssortimentes alpiner Lärche gegen holzzerstörende Basidiomyceten“, Entwicklungs- und Prüflabor Holztechnologie GmbH (EPH) Dresden, 08.10.2009, Bearbeiterin: Katharina Plaschkies (unveröffentlicht)

[166] Nachtrag zum Auftrag 229002: „Feuchte der Prüfkörper vor dem Sterilisieren“, Entwicklungs- und Prüflabor Holztechnologie GmbH (EPH) Dresden, 17.11.2009, Bearbeiterin: Katharina Plaschkies (unveröffentlicht)

[167] Prüfbericht 229028 „Prüfung der Dauerhaftigkeit eines Handelssortimentes alpiner Lärche gegen holzzerstörende Basidiomyceten“, Entwicklungs- und Prüflabor Holztechnologie GmbH (EPH) Dresden, 22.06.2010, Bearbeiterin: Katharina Plaschkies (unveröffentlicht)

[168] Ulrike Augusta: „Untersuchung der natürlichen Dauerhaftigkeit wirtschaftlich bedeutender Holzarten bei verschiedener Beanspruchung im Außenbereich“, Dissertation Universität Hamburg, Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften, Department Biologie, 2007

[169] Notburga Gierlinger, Dominique Jacques, Manfred Schwanninger, Rubert Wimmer, Luc E. Paques: „Heartwood extractives and lignin content of different larch species (Latrix sp.) and relationship to brown-rot decay-resistance”, 30.09.2003, Trees (2004)

[170] Notburga Gierlinger, Dominique Jacques, Michael Grabner, Rubert Wimmer, Manfred Schwanninger, Philippe Rozenberg, Luc E. Paques: „Colour of larch heartwood and relationships to extractives and brown-rot decay resistance”, 16.08.2003, Trees (2004)

[171] Notburga Gierliger, Rupert Wimmer: “Radial Distribution of Heartwood Extractives and lignin in mature European Larch”, Wood and Fiber Science, Volume 36(3), 2004, pp. 387–394

[172] Dr. Gerald Koch, Mathias Rehbein, Marie-Therese Lenz: „Natürliche Dauerhaftigkeit Sibirischer Lärche. Untersuchung mehrerer Herkunftsgebiete – Inhaltsstoffe ursächlich für unterschiedliche Dauerhaftigkeit“, Holz-Zentralblatt Nr.22, Juni 2007

[173] Rapp, A. O.; Augusta, U: „Dauerhaftigkeit in den Gefährdungsklassen unter besonderer Berücksichtigung von Lärchen- und Douglasien Kernholz“, Beitrag zur 22. Holzschutz-Tagung der DGfH am 17. und 18. Oktober 2000

[174] Internetseite http://www.bfafh.de/inst4/44/Synonym_Pilz.htm Namen und Synonyme einiger holzzerstörender Holzarten (ergänzt)

[175] Merkblatt „Verwendung von BS-Holz aus Lärche“, Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V., Stand März 2007

[176] Versuchsbericht Auftrags-Nr. 139 007 „Bestimmung der Kriechzahl in Anlehnung an ENV 1156 an Kunstharzpressholz“, Institut für Holztechnologie Dresden gemeinnützige GmbH, 22.10.2009, Bearbeiter: Jürgen Bonigut

[177] Versuchsbericht Auftrags-Nr. 139 013 „Bestimmung der Kriechzahl in Anlehnung an ENV 1156 an Kunstharzpressholz“, Institut für Holztechnologie Dresden gemeinnützige GmbH, 24.11.2009, Bearbeiter: Jürgen Bonigut

[178] STEP 1: Holzbauwerke nach Eurocode 5 – Bemessung und Baustoffe. Informationsdienst Holz, Fachverlag Holz, Düsseldorf, 1995

[179] STEP 3: Holzbauwerke nach Eurocode 5 – Grundlagen, Entwicklungen, Ergänzungen, Informationsdienst Holz, Fachverlag Holz, Düsseldorf 1995

[180] Niemz, P.: Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe. DRW-Verlag Weinbrenner GmbH & Co., Leinfelden-Echterdingen, 1993

[181] Gressel, P.: Kriechverhalten von Holz- und Holzwerkstoffen – Auswirkungen auf den Formänderungsnachweis, in Ehlbeck, J.; Steck, G. (Hrsg): Ingenieurholzbau in Forschung und Praxis. Bruderverlag, Karlsruhe, 1982

[182] Gressel, P.: Zur Vorhersage des langfristigen Formänderungsverhaltens aus Kurz-Kriechversuchen, in Holz als Roh- und Werkstoff 42 (1984, Heft Nr. 8), S. 293-301, Springer-Verlag, 1984

[183] Rautenstrauch, K.: Untersuchungen zur Beurteilung des Kriechverhaltens von Biegeträgern. Institut für Bautechnik und Holzbau der Universität Hannover, Mitteilung Nr. 7, Hannover, 1989 (Dissertation an der Universität Hannover)

[184] Moorkamp, W.: Zum Kriechverhalten hölzerner Biegeträger und Druckstäbe im Wechselklima – Untersuchungen auf der Grundlage von Langzeitversuchen unter baupraktischen Bedingungen. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 4, Nr. 185, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 2002 (Dissertation an der Universität Hannover)

[185] Borchert, K.: Zeit- und Temperaturabhängiges Systemverhalten von Klebebewehrung. 100. Jahrgang Beton- und Stahlbetonbau, zum 45. Forschungskolloquim des DafStb, Wien, 2005

[186] Habenicht, G.: Kleben: Grundlagen, Technologien, Anwendungen. 5., erweiterte und aktualisierte Auflage. Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York, 2006

[187] Rutter, D.: Bestimmung des mechanischen Verhaltens von Klebstoffen im Zugscherversuch unter Kurz- und Langzeitbeanspruchung. Fortschritts-Berichte VDI, Reihe 5, Nr. 193, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1990 (Dissertation an der Universität Gesamthochschule Paderborn)

[188] Versuchsbericht Auftrags-Nr. 130 014 „Bestimmung der Kriechzahl in Anlehnung an ENV 1156 von Lärchenholz, Fichtenholz sowie Kunstharzpressholz“, Institut für Holztechnologie Dresden gemeinnützige GmbH, 23.08.2009, Bearbeiter: Jürgen Bonigut

[189] Nachträge zu den IHD-Versuchsberichten 139 013 & 130 014 (2 Seiten mit Einzelwerten der Kriechprüfungen sowie der Bestimmung der maximalen Bruchlaststen)

[190] Glos, P.: Zur Modellierung des Festigkeitsverhaltens von Bauholz bei Druck- Zug- und Biegebeanspruchung. SFB 96. Laboratorium für den konstruktiven Ingenieurbau der Technischen Universität München. Berichte zur Zuverlässigkeitstheorie der Bauwerke, Heft 61. München, 1981

[191] Schatz, T.: Beitrag zur vereinfachten Biegebemessung von KVK-bewehrten Holzträgern. In: Bautechnik 81 (2004), Heft 3, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 2004

[192] ICC ES Legacy Report on the 1997 Uniform Building Code, the 2000 International Building Code, The BOCA National Building Code/1999 and the 1999 Standard Building Code. Division: 06_wood and plastics. Diversified Wood Resources, dba American Laminators, dba Duco-Lam: Fiber-reinforced Plastic (FiRP) reinforced glued-laminated wood beams. PFC-5100, reissued 2003

[193] Romani, M.; Blaß, H. J.: Design Model for FRP reinforced glulam beams. International Council for Research and Innovation in Building and Construction, Working Commission W18 – Timber Structures., meeting thirty-four. CIB-W18/34-12-3. Venedig, 2001

[194] Schmerbach, S.: Ein Berechnungsmodell für die Bemessung von nachveredelten Nadel- und Laubhölzern mit eingeklebter Biegezugbewehrung aus Spannstahl oder Kohlenstofffasern. Reviewed paper in: Bauingenieur Band 83, März 2008. Springer VDI Verlag, Düsseldorf 2008

[195] Blaß, H. J.; Romani; M.: Trag- und Verformungsverhalten von Verbundträgern aus Brettschichtholz und faerverstärkten Kunststoffen: Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abteilung Ingenieurholzbau, Universität Fridericiana Karlsruhe, 2000

[196] IaFB e. V.: state oft he art zum BMBF-Vorhaben 0330722A-C Hochleistungsholztragwerke – HHT.2007

[197] Werner, H.: Stiftverbindungen – Spalteffekte und Verstärkungsmaßnahmen, Holzbauwerke nach Eurocode 5, Grundlagen Entwicklungen Ergänzungen Step 3, S.9/1-9/29, Informationsdienst Holz, Fachverlag Holz, 1995

[198] Haller, P.; Birk, T.: Der Einsatz von multiaxialen Nähgewirken und Biaxialgestricken zur Verstärkung von Holzkonstruktionen. In: Curbach, M.; Hegger, J. (Editor). 2. Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS2). TU Dresden. 2003. S. 235-246

[199] Weise, M.: Traglastuntersuchungen an nachgiebig verbundenen Bauteilen mit verstärkten Knotenpunkten am Beispiel einer Gitterrostkonstruktion, Diplomarbeit unveröffentlicht, TU Dresden, 2010

[200] Johansen, K.W.: Theory of timber connections. International Association of Bridge and Structural Engineering. Publication No. 9:249-262. Bern, Schweiz, 1949

[201] Steck, Günther: Euro-Holzbau, Bd. 1, Grundlagen, Werner Verlag, 1997

[202] Weise, M.: Entwurf und Berechnung zwei- und dreidimensionaler Knotenlösungen für Holztragwerke aus Hohlprofilen am Beispiel der Pilotprojekte HESS Innenhofüberdachung und Fachwerk Neutronenleiterhalle, Große Belegarbeit unveröffentlicht, TU Dresden, 2009

[203] Birk, T: „ Zusammenfassung des Standes der Technik und der Forschung zu Beginn der Bearbeitung des Verbundprojekts HHT – Hochleistungsholztragwerke“ (State of the art report); IaFB e.V.; 03/2007 (1)

[204] Blaß, H. J.; Schmid, M.; Werner, H. : Verstärkung von Verbindungen; in: Bauen mit Holz, Heft 9/ 2001 (2)

[205] Blaß, H. J.; Schmid, M.; Litze, H.; Wagner, B.: Nail plate reinforced joints with dowel-type fasteners (3)

[206] Heiduchke, A.: Zugprüfung an verstärkten Gelenkbolzenverbindungen, TU Dresden (4)

[207] Heiduchke, A.: Lochleibungsversuche an Gelenkbolzenverbindungen, TU Dresden (5)

[208] IaFB e.V.: Variantenuntersuchung zu Anschlüssen von Fachwerkstäben; (\Technische Unterlagen \AP06\ AP62 TechnischeUnterlage_VariantendiskussionAnschlüsse_Bi27+ - Zusammenfassung.doc (6)

[209] Leijten, Ad.J.M.; Cruz, H.M.; Ceccotti, A.; Rodd, P.D.; Werner, H.; Virdi, K.S.: Physical and mechanical properties of densified veneer wood (dvw) for structural applications. Final report. Forest Projekt MA2B-CT91-0033. University of Technology Delft. Delft, the Netherlands. 1994 (7)

[210] Schmid, M.; Thauraud, M.: Verbindungsmittel in Fichten- und Kiefernholz; Bauen mit Holz, Heft 11/2005

[211] Haller, P.: Vom Baum zum Bau oder die Quadratur des Kreises, Fachaufsatz, 2004

[212] Bericht zu den Grundlagenuntersuchungen für den Einsatz von Kunstharzpressholz (KHP) und themisch modifiziertem Holz (TMT) für das Bauvorhaben Ersatzneubau der Fußgängerbrücke Henzesteg über den Fließgraben (BW 18011). KRONE Ingenieurbüro GmbH, Berlin, 2009

[213] Überwachungsbericht zum „Gütezeichen TMT“, Entwicklungs- und Prüflabor Holztechnologie GmbH, Bestimmung von mechanischen und physikalischen Kennwerten sowie Bewertung der Dauerhaftigkeit von thermisch modifizierter Buche und Esche. THS Spreewald GmbH, 2008

[214] Brischke, C.; Koch, S. et al.: Surface properties of thermally treated wood – wear, abrasion and hardness. European Conference on Wood Modification. Göttingen 2005

[215] Augusta, U.: Untersuchung der natürlichen Dauerhaftigkeit wirtschaftlich bedeutender Holzarten bei verschiedener Beanspruchung im Außenbereich. Dissertation, Universität Hamburg, 2007

[216] Gierlinger, N.; Wimmer, R.: Radial distribution of heartwood extractives and lignin in mature European larch. In: Wood and Fiber Science 36 (3) 2004, S. 387-394

[217] L. Bathon, O. Betz-Mühlhofer, J Schmidt, M. Weil. Der Strom kommt aus dem Holzturm. In: Bauen mit Holz. Bruderverlag, 11/2010.

[218] Sennewald, R. Der Einsturz der Eissporthalle in Bad-Reichenhall – Wie hätte er verhindert werden können? Fachtagung Bauwerksdiagnose 08, BAM Berlin, Februar 2008.

[219] Heiduschke, A., Haller. P. and Kasal, B. Zum Tragverhalten textilbewehrt-verdichteter Holz-Rahmenecken unter zyklischer Beanspruchung. In: Bautechnik 81, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, Heft 8: 658-661, 2004.

[220] Starke, E; Landgraf, J., Pfeifer, G.; Roscher, K. U.: Integrierte Sensornetzwerke in Faserverbundwerkstoffen. In: Tagungsband „ITG/GMA-Fachtagung Sensoren und Messsysteme“ Freiburg, S. 329-332, ISBN 3-8007-2939-3, 2006.

[221] Kunadt. A., Starke, E., Pfeifer, G., Cherif, Ch.: Messtechnische Eigenschaften von Dehnungssensoren aus Kohlenstoff-Filamentgarn in einem Verbundwerkstoff. In: tm-Technisches Messen 77 (2010) Heft 2, S.113-120, DOI 10.1524 /teme.2010.0014

[222] Heiduschke, A., Trümper, W., Haller, P., Cherif, C.: Monitoring von Holzkonstruktionen mittels Sensorfasern. In: Bauingenieur 83 (2008) Heft 10, S. 468-472, ISSN: 0005-6650

[223] M. Gude: Zum nichtlinearen Deformationsverhalten multistabiler Mehrschichtverbunde mit unsymmetrischem Strukturaufbau. Dissertation, TU Dresden, 2000

[224] Kroll, L.: Zur Auslegung mehrschichtiger anisotroper Faserverbundstrukturen. Dissertation, TU Clausthal 1992

[225] H. Altenbach, J. Altenbach, K. Naumenko: Ebene Flächentragwerke, Grundlagen der Modellierung und Berechnung von Scheiben und Platten Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York, 1998

[226] Langkamp, A.: Bruchmodebezogene Versagensmodelle für faser- und textilverstärkte Basisverbunde mit polymeren, keramischen sowie metallischen Matrices. Dissertation, TU Dresden 2002

[227] Cuntze, R.G.; Freund, A.: The predictive capability of failure mode concept-based strength criteria for multidirectional laminates. Composite Science and Technology 64 (2004), S. 343-377

[228] Cuntze, R.G.: The predictive capability of failure mode concept-based strength criteria for multidirectional laminates – part B. Composite Science and Technology 64 (2004), S. 487-516

[229] A. Puck: Festigkeitsanalyse von Faser-Matrix-Laminaten, Modelle für die Praxis, Carl Hansen Verlag, München 1996

[230] Lemaitre, J.: How to use damage mechanics. Nuclear Engineering and Design, 80 (1984), S. 233-245

[231] Böhm, R.: Bruchmodebezogene Beschreibung des Degradationsverhaltens textilverstärkter Verbundwerkstoffe. Dissertation, Technische Universität Dresden, 2008

[232] Knops, M.: Sukzessives Bruchgeschehen in Faserverbundlaminaten Dissertation, RWTH Aachen 2003

[233] Grüber, B.: Beitrag zur Strukturanalyse von anisotropen Schichtverbunden mit elastischen Einschlüssen und Bolzen. Dissertation, Technische Universität Dresden, 2004

[234] Lepper, M.: Kerbspannungsanalyse anisotroper Mehrschichtverbunde mit symmetrischem und unsymmetrischem Strukturaufbau. Dissertation, TU Clausthal, 1999

[235] Hufenbach, W.; Grüber, B.; Kroll, L.; Lepper, M.; Zhou, B.: Stress concentration analysis of fibre-reinforced multilayered composites with pin-loaded holes. Composites Science and Technology 67, 2007, 1439-1450

[236] Merkblatt „Kunstharzpressholz“ Dehonit, Firma Deutsche Holzveredelung Schmeing oHG, 57399 Kirchhunden, www.dehonit.com, Stand Juni 2003

[237] Merkblatt „Thermoholz aus dem Spreewald“, Firma Thermoholz Spreewald GmbH, 032222 Lübbenau, Stand April 2007

[238] Merkblatt „ThemoWood“ (Trademark), Finnish ThermoWood Association, 00171 Helsinki Finnland, www.thermowoood.fi, Stand Dezember 2004

[239] Merkblatt „Beständigkeit der Farbtöne von TMT“, Institut für Holztechnologie Dresden gGmbH, 01217 Dresden, Ausgabe April 2007

[240] Blaß, H. J.; Fellmoser, P.: Druckrohrleitungen aus Holz. Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau 3, Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen, Universität Karlsruhe, 2006

[241] Lache, M.: Abbrandgeschwindigkeit von Vollholz, Brettschichtholz und Holzwerkstoffen. Forschungsbericht, Informationszentrum Raum und Bau der Fraunhofer-Gesellschaft: Bd. 2484, Stuttgart: IRB-Verl., 1992

[242] Vorreiter, L.: Holztechnologisches Handbuch, Verlag Fromme & Co, Wien, 1949

[243] Haller, P.; Wehsener, J.: Festigkeitsuntersuchung an Fichtenpressholz (FPH). In: Holz als Roh- und Werkstoff. 62: 452-454, 2004

[244] Niemz, P.: Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe, DRW Verlag, Leinfelden, 1993

[245] Hartl, H.: Feuerwiderstand von Holz und Holzwerkstoffen. Holzbauwerke nach EC5, STEP 1, Fachverlag Holz, Düsseldorf, Eds. Blaß, H.J., Goerlacher, R. and Steck, G., A13/1-13/7, 1995

[246] Simitses G.J. Buckling of moderately thick laminated cylindrical shells: a review. Composites Part B 27B:581-587, 1996.

[247] Moser K. Faser-Kunststoff-Verbund. Düsseldorf VDI Verlag, 1992.

[248] Michaeli, W., Huybrechts, D., Wegener, M. Dimensionieren mit Faserverbundwerkstoffen. Einführung und praktische Hilfen. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1994.

[249] Jakobi, R. Zur Spannungs-, Verformungs- und Bruchanalyse an dickwandigen, rohrförmigen Bauteilen aus Faser-Kunststoff-Verbunden, VDI Fortschrittberichte Reihe 5(126), 1987.

[250] Weaver, P.M. Design of laminated composite shells und axial compression. Composites Part B: engineering 31:669-679, 2000.

[251] EUROCOMP – Design Code and Handbook. Structural Design of Polymer Composites. Ed. J.L. Clarke, E&FN SPON, London, 1996

[252] Tsai, S.W. Theory of composites design. Dayton: Think Composites, 1992.

[253] Timoshenko, S.P., Gere J.M. Theory of Elastic Stability, 2nd edition. New York: McGraw-Hill, 1961

[254] Dharmarajan, S., McCutchen, H. Shear coefficients for orthotropic beams. Journal of Composite Materials, 7:530, 1973.

[255] Godoy, L.A. Thin-walled structures with structural imperfections. Elsevier Science Ldt., New York, 1996

[256] Blaß, H.J., Schmid, M. Querzugfestigkeit von Holz und Brettschichtholz. Holz als Roh- und Werkstoff 58:456-466, 2001

[257] Tsai, S.W., Wu, E.M. A General Theory of Strength for Anisotropic Materials. Journal of Composite Materials, Vol(5), 1971.

[258] Cabrero Ballarin, J.M. Wooden Reinforced Tubes – Development of analytical and numerical models. Interner Bericht, Inst. für Stahl- und Holzbau, TU Dresden, 2008.

[259] Lignola, G.P., Porta A. Manfredi G., Cosenza E. Unified theory for confinement of RC solid and hollow circular columns. Composites Part B 39:1151-1160, 2008

[260] Fiberline Composites, A/S. Fiberline Design Manual. 2nd edition, 2003

[261] Bodig, J., Jayne, B.A. Mechanics of Wood and Wood Composites. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1982.

[262] Haller, P. Vom Baum zum Bau oder die Quadratur des Kreises; Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden. (53) Heft 1-2, S. 100-104. 2004.

[263] Blaß HJ., Romani M. and Schmid M. “Optimierung von Verbundträgern aus Brettschichtholz mit Verstärkungen aus Faserverbundkunststoffen”, *Forschungsbericht der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine*, Karlsruhe, Germany, 2003.

[264] Tingley DA. and Gai C. “FRP reinforced glulam performance: A case study of the lighthouse bridge*”, Proceedings of 5th WCTE.* Montreux, Switzerland, 1998.

[265] Frese M. and Blaß HJ. “Bending strength of combined beech-spruce glulam”, *CIB W18 Meeting,* CIB W18/40-12-6, Bled, Slovenia, 2007.

[266] Braun MO. and Moody RC. “Bending strength of small glulam beams with a laminated-veneer tension lamination”, *Forest Products Journal*, 1977, pp. 46-51.

[267] Leijten AJM. “Physical and mechanical properties of densified veneer wood (dvw) for structural applications”, *Forrest Project No. MA2BEAM-TO-COLUMNT91-0033*, Final Report, TU-Delft, Netherlands, August, 1994.

[268] Hau E. Windkraftanlagen. Springer Verlag, 2003.

[269] Petersen, C. Dynamik der Baukonstruktionen. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft, Braunschweig/Wiesbaden, Germany, 1996.

[270] Halasz, R. and Scheer, C. „Holbau-Taschenbuch“ Band 1, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, Germany, 1986.

[271] „Eislaufstadion in Grefrath“. *bauen mit holz*, 8/71, pp. 382-385, 1971.

[272] Leijten, A. J. M., Ruxton, S., Prion, H. and Lam, F. “The tube connection in seismic active areas”. *Proceedings of 8th WCTE*, Lahti, Finland, Vol. 3: 433-336, 2004.

[273] Haller P. and Birk T. “Tailor made textile reinforcements for Timber Connection” *Proceedings of 9th WCTE*, Portland, USA, 2006.

[274] Haller P., Birk T. Offermann P. and Cebulla H. “Fully fashioned biaxial weft knitted and stitch bonded textile reinforcements for wood connections”. *Composites Part B: Engineering.* Vol. 37, Issues 4-5: 278-285, 2006.

[275] Bergmann, H. W. Konstruktionsgrundlagen für Faserverbundbauteile, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1992.

[276] Bodig, J. and Jayne, B.A. (1982) „Mechanics of Wood and Wood Composites“. Van Nostrand Reinhold Company, New York.

[277] Fiberline Composites A/S (2003). “Fiberline Design Manual”. 2nd edition. www.fiberline.com

[278] SAS IP, Inc. (2007) „ANSYS 11.0. Release 11.0 Documentation for ANSYS“. Online documentation.

[279] Tsai, S.W. (1992) “Theory of composites design”. Think Composites.

[280] Cabrero J. M., Heiduschke A., Haller P. Analytical assessment of the load carrying capacity of axially loaded wooden reinforced tubes. *Composite Structures*. 92, pp. 2955-2965, 2010.

[281] Natterer J., Herzog T., Volz M. Holzbau Atlas. Zweite Auflage, Verlag Rudolf Müller, Köln, 1996.

[282] Piao C., Shupe T.F., Hse C.Y. Mechanical properties of small-scale wood-laminated composite poles, Wood and Fiber Science, Vol 36(4), pp. 536-546, 2004

[283] EP 1390181 - Patentschrift – Profil aus Holz und Verfahren zu seiner Herstellung, 2006.

[284] Haller P. Concepts for textile reinforcements for timber structures. Material and Structures. 40:107-118, 2007.

[285] Putzger R., Haller P. Wie dauerhaft sind textilbewehrte Holzverklebungen? - Holz-Textil-Verbunde unter Witterungseinflüssen. In: adhäsion KLEBEN & DICHTEN, Vieweg + Teubner, 05/07, S. 35–39, 2007.

[286] Tabiei and Simitses G.J. Imperfection sensitivity of axially loaded, moderately thick, composite shells. In: Failure Mechanics in Advanced Polymeric Composites. Eds. Kardomateas and Rajapakse, AMD Vol.196 ASME, pp. 173-186, 1994.

[287] L. Bathon, O. Betz-Mühlhofer, J Schmidt, M. Weil. Der Strom kommt aus dem Holzturm. In: Bauen mit Holz. Bruderverlag, 11/2010

[288] Sonderforschungsbereich SFB 639 "Textilverstärkte Verbundkomponenten für funktionsintegrierende Mischbauweisen bei komplexen Leichtbauanwendungen“ TU Dressden.

[289] Verein Deutscher Ingenieure (VDI), Kumulierter Energieaufwand: Begriffe Definitionen, Berechnungsmethoden, Düsseldorf, 1997

[290] Guinée, J., Handbook on Life Cycle Assessment. Operational Guide to Life Cycle Assessment, Dordrecht, 2002

[291] Baumann, H., Tillman, A., The Hitchhiker's Guide to LCA - An Orientation in life cycle assessment methodology and Application, Lund, 2004

[292] Guenther, E.; Manthey, C. (Hrsg.), Gnauck, C.: Herausforderungen ökologisch-ökonomischer Leistungsmessung. Literaturanalyse und Praxistest im Bereich Holz- und Brückenbau, 2010

[293] Hauke, B., Zur Ressourceneffizienz und Ökobilanzierung von Baustahl in geschlossenen industriellen Kreisläufen. Bauingenieur, 84(8), 2009

[294] Institut Bauen und Umwelt (IBU) (Hrsg.), Regeln für Umwelt-Produktdeklarationen - Holzwerkstoffe, 2009

[295] Institut Bauen und Umwelt (IBU) (Hrsg.), Regeln für Umwelt-Produktdeklarationen - Baumetalle, 2009

[296] Werner, F., Althaus H.-J., Künniger T., Richter K. and Jungbluth N., Life Cycle Inventories of Wood as Fuel and Construction Material. Final report ecoinvent data v2.0 No. 9. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH, 2007

[297] Werner, F., Richter, K., Wooden Building Products in Comparative LCA, A Literature Review, International Journal of Life Cycle Assessment, 12(7), 2007

[298] Bundesminister für Verkehr (Hrsg.): Richtlinien für die Berechnung der Ablösebeiträge der Erhaltungskosten für Brücken und sonstige Ingenieurbauwerke - Ablöserichtlinien 1980, Ausgabe 1988 (1988)

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1: In den Schnittmengen wird Holz zu Hochleistungsholz 17
Abb. 1.2: Partner im Verbundprojekt 19
Abb. 1.3: Schematische Darstellung der Herstellungsschritte von Formholzprofilen 35
Abb. 1.4: Systematisierung der Verfahren zur textilen Flächenbildung 39
Abb. 1.5: Systematisierung der Matrixsysteme 42
Abb. 1.6: Mögliche Durchbildung für einen FRP-verstärkten Holz-Beton-Verbund-Plattenbalkenquerschnitt und Auswirkungen auf das Tragverhalten nach [139] . 44
Abb. 1.7: Trägeraufbau zu Tabelle 1.2; Dübelgruppe konventionell und Einzeldübel 46
Abb. 3.1: Prozess zur Herstellung geformter Holzprofile aus Kant- und Rundholz 71
Abb. 3.2: Darstellung Schäftungsprobe 72
Abb. 3.3: Übersicht der verschiedenen Schäftungsproben 73
Abb. 3.4: Versuchsaufbau in Analogie zur Keilzinkenprüfung nach EN 408 73
Abb. 3.5: Schäftungsprobe in der Biegeprüfmaschine 74
Abb. 3.6: Probekörper nach dem Biegeversuch 75
Abb. 3.7: Draufsicht Rohrschäftung mit geringer Kreisformabweichung aus Pappelholz ... 76
Abb. 3.8: Zusammengesetzte geschäftete Rohrsegmente mit geringer Kreisformabweichung aus Pappelholz 76
Abb. 3.9: Draufsicht Rohrschäftung mit hoher Kreisformabweichung aus Fichtenholz 76
Abb. 3.10: Zusammengesetzte geschäftete Rohrsegmente mit hoher Kreisformabweichung aus Fichtenholz 76
Abb. 3.11: Schlitzfräsung der Rohrzinkung 77
Abb. 3.12: Zinkenfräsung der Rohrzinkung 77
Abb. 3.13: Verklebung der Rohrzinkung aus Fichtenholz 77
Abb. 3.14: Verpressung der Rohrzinkung aus Fichtenholz 77
Abb. 3.15: Vergrößerte Querschnitte von KHP 79
Abb. 3.16: Eigenschaften von TMT (ThermoWood [238]) 80
Abb. 3.17: MLG mit thermoplastischen Fäden (Hersteller ITM) 81
Abb. 3.18: Verbunduntersuchungen an Fichtenholzbrettchen und Commingling-Garnen 82
Abb. 3.19: Trägerquerschnitt aus BSH-Lärche mit KHP-Decklamellen 82
Abb. 3.20: Masseänderung der Probekörper während der künstlichen Bewitterung 83
Abb. 3.21: Detailansicht des rot markierten Probekörpers aus Abb. 3.19 während der künstlichen Bewitterung 83
Abb. 3.22: Verformung des KHP- (oben) und der BSH-Lamellen (unten) 84
Abb. 3.23: Delamination der Leimfuge im BSH der Lärche 84
Abb. 3.24: Masse der Probekörper während Exposition (Bewitterungsdauer: 1400 Stunden) 85
Abb. 3.25: Probekörper nach 744 h Exposition: Ansichten von Oberseiten aus TMT, Unterseiten aus Lärche, Querschnitten (links: Resorcin- / rechts PU-Leimfuge). 85

Abb. 3.26: Probekörper nach 1230 h Exposition: Ansichten von Oberseiten aus TMT, Unterseiten und aus Lärche, Querschnitten (links: Resorcin- / rechts PU-Leimfuge) 86

Abb. 3.27: Probekörper nach 1344 h Exposition: Ansichten von Querschnitt und Längsschnitt (links: Resorcin- / rechts PU-Leimfuge) sowie der Delamination einer PU-Leimfuge 87

Abb. 3.28: Formen der Pressholzplatten zu Rohren in Sindelfingen (links) Pilotanlagen zum Holzformen in Chemnitz (rechts) 88

Abb. 3.29: Probekörper aus Fichte und KHP mit verschiedenen Tränkungsgraden (Ansicht und Querschnitt) zur künstlichen Bewitterung im Klimaschrank 89

Abb. 3.30: Masseänderung von KHP A740-1 (vollgetr.) nach 1000 h Feuchtebeanspruchung 90

Abb. 3.31: Masseänderung von KHP (vollgetr., Herstellerbezeichnung unbekannt) nach 1000 h Feuchtebeanspruchung 90

Abb. 3.32: Masseänderung von Fichte unbehandelt (Referenz) nach 800 h Feuchtebeanspruchung 91

Abb. 3.33: Masseänderung von KHP A740-1 (halbgetr., Herstellerbezeichnung unbekannt) nach 800 h Feuchtebeanspruchung 91

Abb. 3.34: Verbundquerschnitte aus TMT-Esche und Lärche (links), TMT-Esche und Fichte (Mitte) sowie Fichte-BSH mit KHP-Decklamellen (rechts) vor der Bewitterung... 92

Abb. 3.35: Verbundquerschnitte aus TMT-Esche und Lärche (links), TMT-Esche und Fichte (Mitte) sowie Fichte-BSH mit KHP-Decklamellen (rechts) nach der Bewitterung 93

Abb. 3.36: Detailaufnahmen von Formholzrohr Nr. 1 (unverstärkt und unbehandelt) ca. aller zwei Monate in der Freibewitterung aufgenommen 96

Abb. 3.37: Masse und Geometriedaten der Formholzrohre im Verlauf der Freibewitterung 97

Abb. 3.38: Delaminierungs-probe Fichte/KHP (KHP nicht getränkt) 98

Abb. 3.39: Probe mit delaminierter Klebfuge in der KHP-Lamelle (KHP nicht getränkt) 98

Abb. 3.40: Delaminierungsprobe Fichte/KHP (KHP getränkt) 99

Abb. 3.41: Delaminierungsprobe aus Fichtenholz mit TMT-Esche 100

Abb. 3.42: Angelieferte verdichtete Lamellen aus Fichtenholz von Dehonit 100

Abb. 3.43: Stabverleimung des verdichteten Fichtenholzes zu Platten 100

Abb. 3.44: Stirnansicht Delaminierungs-probe aus verdichtetem Fichtenholz 101

Abb. 3.45: Seitenansicht Delaminierungs-probe aus verdichtetem Fichtenholz 101

Abb. 3.46: Aufbau der Bohlen, Längs- und Querträger der HHT-Brücke 106

Abb. 3.47: Probekörper mit Decklamelle aus KHP vollgetränkt (A740-1) und Referenzprobe mit BSH-Fichte ohne Decklamelle 107

Abb. 3.48: Bewitterungsbeginn der Hybridträger 107

Abb. 3.49: 3 Monate Freibewitterung 108

Abb. 3.50: 4 Monate Freibewitterung 108

Abb. 3.51: 11 Monate Freibewitterung 109

Abb. 3.52: **20 Monate** Freibewitterung, Querschnitt im Detail 109

Abb. 3.53: **34 Monate Freibewitterung,** Ansicht von oben im Detail 110

Abb. 3.54: Verbundbohlen aus TMT und Fichtenholz in der Freibewitterung 111
Abb. 3.55: Querschnitte aus TMT und Lärche zu Beginn und nach 26 Monaten Bewitterung 111
Abb. 3.56: Verbundquerschnitte im Detail nach 26 Monaten Freibewitterung mit PU (links) und Resorcin (rechts) Leimfuge 112
Abb. 3.57: Biegeprüfung von Verbundbohlen aus TMT und Lärche mit Resorcin Leimfuge 112
Abb. 3.58: Versuchseinrichtung mit Probekörper (BxDxL: 20x10x25 mm³) im Wasserbad 114
Abb. 3.59 Quellungsdruck in Radialrichtung in Wasser von Holzproben verschiedener Rohdichten 115
Abb. 3.60 Quellungsdruck in Tangential-Richtung von Holzproben verschiedener Rohdichten 115
Abb. 3.61: Versuchseinrichtung und Ergebnisse der untersuchten Serien 116
Abb. 3.62 Biegefestigkeiten in Abhängigkeit von der Rohdichte 117
Abb. 3.63 Bruchbild ausgewählter Biegeprüfkörper aus vollständig und unvollständig getränktem KHP 117
Abb. 3.64 Druckfestigkeiten in Abhängigkeit von der Rohdichte 119
Abb. 3.65: Versuchseinrichtung und Probekörper für die Kriechversuche (Fotos: ISH) 120
Abb. 3.66: Statisches System für die Kriechversuche 121
Abb. 3.67: Kriechzahlen von KHP, Fichte und Lärche – Versuchswerte 122
Abb. 3.68: Kriechzahlen von Fichte in NKL 1, Hochrechnung auf 20 Jahre 129
Abb. 3.69: Kriechzahlen für KHP25% in NKL 1 – Hochrechnung auf 20 Jahre nach den ersten Versuchen 131
Abb. 3.70: Kriechzahlen für $KHP_{25\%}$ in NKL 2 – Hochrechnung auf 20 Jahre 132
Abb. 3.71: Kriechzahlen für $KHP_{15\%}$ in NKL 1 – Hochrechnung auf 20 Jahre 133
Abb. 3.72: Kriechzahlen für KHP, Fichte und Lärche – Hochrechnung auf 100 Jahre 134
Abb. 3.73: Probenrahmen vor Brandversuch 138
Abb. 3.74: Querschnitt mit Holzkohleschicht und Abbrandgrenze 138
Abb. 3.75: Einheits-Temperaturzeitkurve 139
Abb. 3.76 a) erste Bräunung nach 50 s; b) auffälliges Herausquetschen von Material bei hochverdichtetem Holz nach 3:47 min c) Entzündung nach 4:48 min; d) Weißglühen nach 14:06 min; e) Auflösungserscheinung nach 23:14 min 139
Abb. 3.77: Rohdichte-Abbrandrate-Diagramm 140
Abb. 3.78: Rückverformung der Pressholzprobe nach Brandbelastung 141
Abb. 3.79: Versuchseinrichtung zur Bestimmung des Feuerwiderstandes eines Rohres 142
Abb. 3.80: Links: Horizontaler Schnitt; Anordnung des Formholzrohrs im Prüfofen Rechts: Vertikaler Schnitt; Höhenanordnung der Temperaturmessfühler im Rohr 142
Abb. 3.81: Brandversuch eines Formholzrohres mit CFK-Bewehrung 143
Abb. 3.82: Zeit-Weg-Diagramm der Stauchung der Formholzrohrstütze 144
Abb. 3.83: Zeit Temperaturmessungen in der Formholzrohrstütze 144

Abb. 3.84: Geräte zur Bestimmung der Holzfeuchte (links: Mikrowellenmessgerät MOIST 20, rechts: kapazitives Messgerät GT..) 145
Abb. 3.85: Lochleibungsprüfung 148
Abb. 3.86: Aufbau und Einbringen der Jojo-Gestricke 149
Abb. 3.87: Lochleibungsfestigkeit f_{h0}, Traglast F_{max}, Verschiebungsmodul K_{ser} 150
Abb. 3.88: Kraft-Verformungsbeziehung einiger ausgewählter Verbindungen 151
Abb. 3.89: Versagensformen: (a) Referenz und OC - Schubversagen; (b) JOJO – Überschreiten der Lochleibungsfestigkeit; (c) IC – Delaminierung zwischen Holz und GFK-Scheibe; (d) IC+UD – Delaminierung zwischen Holz und GFK-Teller + Zugversagen der UD-Schicht 151
Abb. 3.90: Versagensformen: (a) 1xPP – Schubbruch in Holz und GFK; (b) und (c) IC+UD_tube – plastische Verformung des Rohrbolzens 152
Abb. 3.91: Überlagerung der Versuchsergebnisse 153
Abb. 3.92: Freistehender Schirm nach den Entwürfen von 'atelier pk' (Quelle: IaFB) 154
Abb. 3.93: Draufsicht Gitterrostkonstruktion 155
Abb. 3.94: Verbindung mit parallel zueinander angeordneten Schrauben (links) und gekreuzt angeordneten Schrauben (rechts) 156
Abb. 3.95: a) Scherkörper aus Fichte; b) Buche; c) Fichteprobe lamelliert mit KHP 156
Abb. 3.96: Last-Verschiebungs-Kurven von Scherverbindungen mit Schrägverschraubung 158
Abb. 3.97: links: Hybridlamelle aus BSH (57mm) und KHP (2x12 mm) rechts: BSH-Lamelle 159
Abb. 3.98: Übersicht und Kennzeichnung der 2-lamelligen Versuchsträger 160
Abb. 3.99: Aufbau der 2-lamelligen unverstärkten Versuchsträger 160
Abb. 3.100: VBM: Vollgewindeschraube, Passbolzen; rechts: Schraubenbild 161
Abb. 3.101: Aufbau der KHP-verstärkten Versuchsträger 162
Abb. 3.102: Patches - links: Gestalt der Kunststoffteller; rechts: Einleimung der Teller 162
Abb. 3.103: Anordnung der Patches 162
Abb. 3.104: Aufbau des unverstärkten 3-lamelligen Versuchsträgers 'Fi3-B24' 163
Abb. 3.105: Aufbau des verstärkten Versuchsträgers 'K3-B24' 164
Abb. 3.106: Verbindungseinheit der Sonderprobe 'K64-S8' 164
Abb. 3.107: Aufbau der Sonderprobe 'K64-S8' 164
Abb. 3.108: Versuchsträger 'K3-B24' in der Prüfanlage 165
Abb. 3.109: Kraft-Verschiebungs-Kurven für 'K-S10-1' und 'K-S10-2' 166
Abb. 3.110: 'K-S10-1' - Verformungsunterschiede zw. oberer und unterer Lamelle 166
Abb. 3.111: 'K-S10-2'- Ablösen der unteren KHP-Lamelle vom BSH 167
Abb. 3.112: Kraft-Verschiebungs-Kurve für 'Fi3-B24' 167
Abb. 3.113: Schubverformung der Lamellenlagen 168
Abb. 3.114: Kraft-Verschiebungs-Kurven für 'K3-B24' 168
Abb. 3.115: Biegezugversagen der KHP-Schicht 168

Abb. 3.116: Kraft-Verschiebungs-Kurven für Sonderprobe 'K64-S8' 169
Abb. 3.117: Verformung der Sonderprobe 'K64-S8' 169
Abb. 3.118: Kraft-Verschiebungs-Kurven ausgewählter Proben 171
Abb. 3.119: Kraft-Verschiebungs-Kurven von Träger mit und ohne KHP 172
Abb. 3.120: Zusammenfassung 2-lamellige Versuchsträger 172
Abb. 3.121: Last-Verformungs-Kurven der 3-lamelligen Versuchsträger 173
Abb. 3.122: Aufbau der dreiteiligen unverstärkten Scherproben 174
Abb. 3.123: Aufbau der dreiteiligen verstärkten Scherproben 174
Abb. 3.124: Aufbau der fünfteiligen nicht verstärkten Scherproben 176
Abb. 3.125: Aufbau der verstärkten fünfteiligen Scherproben 176
Abb. 3.126: Versuchsaufbau Druck-Scherversuch 178
Abb. 3.127: Last-Verformungs-Kurven der nicht verstärkten dreiteiligen Scherproben 178
Abb. 3.128: Last-Verformungs-Kurven der verstärkten dreiteiligen Scherproben 179
Abb. 3.129: Probe 'KA- B24-2' 179
Abb. 3.130: Verformungen in Bolzen und GFK-Patch 179
Abb. 3.131: Last-Verformungs-Kurven der unverstärkten fünfteiligen Scherproben 180
Abb. 3.132: Last-Verformungs-Kurven der verstärkten fünfteiligen Scherproben 180
Abb. 3.133: Schematische Darstellung von Mehrlagengestricken (MLG) a) Querschnitt, b) kreisringförmiges MLG 183
Abb. 3.134: Kreisringförmiges Mehrlagengestrick a) Schema, b) umgesetztes Gestrick 183
Abb. 3.135: Schema der Verteilung der Schussfäden a) gleichmäßig entlang einer Linie, b) stochastisch 185
Abb. 3.136: Konstruktive Abzugsmodifkationen a) Ausgangssituation; b) einzeln steuerbare Segmente (breit); c) einzeln steuerbare Segmente (schmal) 186
Abb. 3.137: Tangential verstärktes Schlauchgestrick 188
Abb. 3.138: Bindungsschema zur Herstellung tangential verstärkter Schlauchgestricke 189
Abb. 3.139: Arbeitsstelle der Flachstrickmaschine a) Ausgangsituation zur Herstellung von MLG, b) modifiziert zur Herstellung von schlauchförmigen MLG 191
Abb. 3.140: a) Einbausituation an FSM nach Modifikation; Kettfadenbleche und Fadenführer für Maschen- und Schussfadensysteme; b) flachgestrickte Schlauchstruktur mit biaxialer Verstärkung 192
Abb. 3.141: Verbindungsbereich zwischen den biaxialen Flächen a) nur Maschenfaden; b) überlappendes Gestrick; c) umlaufender Verstärkungsfaden als Fanghenkel eingebunden 193
Abb. 3.142: Schematische Darstellung der Verstärkungsfadenanordnung in radialer Richtung a) angestrebt; b) prinzipbedingte ungleichmäßige Verteilung; c) prinzipbedingt reduzierte Fadendichte 195
Abb. 3.143: Schematische Darstellung von 3D-Verstärkungsstrukturen mit umlaufendem Schussfaden 196
Abb. 3.144: Aufbau und Funktionsweise ILK-5-Achsen-Wickelmaschine 197
Abb. 3.145: Vorstudien zur Umsetzung des Wickelverbundsystems und der Fadenablage 198

Abb. 3.146: Aufbringen und Aushärten der Matrix-Grundierung aus Epoxidharz 199
Abb. 3.147: Herstellung der Wickelverbünde auf der ILK-5-Achsen-Wickelmaschine 199
Abb. 3.148: Aufbau und Funktionsweise ILK-Flechtmaschine 201
Abb. 3.149: Herstellung der textilen Verstärkung mit dem ILK-Flechtrad 201
Abb. 3.150: Trockene Verstärkungslage beim Flechtverfahren bzw. Rundstrickschlauch ... 202
Abb. 3.151: Vorversuche mit vorkonfektionierten ITM-Gestrickschläuchen 203
Abb. 3.152: Nachträgliche Harzimprägnierung auf der Wickelmaschine 204
Abb. 3.153: Herstellen von Proben mit ringförmigen MLG im Handlaminierverfahren für die Prüfung der Lochleibungsfestigkeit (links); Bauteildetail nach der Prüfung (rechts) 206
Abb. 3.154: RTM-Werkzeug: a) CAD-Querschnittsdarstellung; b) mit MLG bestückt 208
Abb. 3.155: Patches aus ringförmigen MLG, verschiedene Versuchsstadien a) 4 Steiger, 2 bar Druck; b) 6 Steiger, 1 bar Druck; c) 6 Steiger, 0,5 bar Druck 209
Abb. 3.156: spezifische Festigkeiten und Steifigkeiten verschiedener Werkstoffe 211
Abb. 3.157: Formholzprofile mit Kohlefaserwicklung (Foto: L. Sprenger) 212
Abb. 3.158: (a) Flechten und (b) Wickeln der Formholzrohre am ILK und (c) Rohr mit Schlauchgestrick vom ITM der TU Dresden 214
Abb. 3.159: (a) Formholzrohre inkl. Detailansicht (b) eines unbewehrten Rohres und verschiedener mit (c) E-Glas-, (d) Kohle- (e) Kohle-Aramidfasern bewehrter Rohre 215
Abb. 3.160: Versuchsaufbau zur Prüfung eines CFK-Formholzrohres sowie Probengeometrie inkl. Anordnung der Messtechnik 220
Abb. 3.161: Kraft-Verschiebungs-Kurven verschiedener Stützen 224
Abb. 3.162: Bruchbilder der Formholzrohre: (a) in Segmente gespaltene Referenzprobe, (b) gestauchte Probe GFK85 inkl. Detail A (c) lokale Stauchung des Holzes und der CFK-Wicklung (d) Stauchung des Verbundquerschnitts am Zinkengrund 225
Abb. 3.163: Querschnittsverformungen bei verschiedenen Laststufen REF und GFK85 226
Abb. 3.164: Spannungs-Dehnungs-Kurven in Axial- und Umfangsrichtung der Profile 227
Abb. 3.165: Rohrverformungen infolge Laststeigerung (REF und GFK) 229
Abb. 3.166: Verformungen geschädigter Rohrsegmente bei verschiedenen Laststufen (positives Vorz. bei Ausbauchung) 230
Abb. 3.167: Maximale Druckspannung der Formholzstützen als Funktion der Schlankheit - Experiment und Berechnung 231
Abb. 3.168: Wicklung der 5 m langen Formholzrohre bei SGL Carbon 232
Abb. 3.169: Querschnitt und Eckdetail eines Hohlkastens im Vergleich zum Rohrprofil 234
Abb. 3.170: Hohlkastenprofil im Druckversuch (bewehrt und unbewehrt, Höhe: 3,8 m) 235
Abb. 3.171: Hohlkastenprofile vor/nach Druckversuch (unbewehrt und CFK45-bewehrt, Probenlänge 3,8 m) 235
Abb. 3.172: CFK-Rohr mit Specklemuster für optische Verformungsmessung und IWA 236
Abb. 3.173: Bestimmung der vertikalen Durchbiegung V mittels Verformungsanalyse Vic3D 236
Abb. 3.174: Kraft-Weg-Diagramm des CFK-Rohres 237

Abb. 3.175: Kohlefaserverstärkter Hohlkasten aus Fichtenholz mit aufgetragenem Specklemuster für optische Verformungsmessung 238
Abb. 3.176: Kraft-Weg-Diagramm des CFK-Hohlkastens 239
Abb. 3.177: Bestimmung der vertikalen Durchbiegung V mittels Verformungsanalyse Vic3D 239
Abb. 3.178: Versuchsaufbau 241
Abb. 3.179: Anordnung der Messinstrumente 242
Abb. 3.180: Einspannung des Formholzrohres mittels Polymerbeton 243
Abb. 3.181: Moment-Verzerrungs-Kurven der verschiedenen Proben (DMS 2, 4, 6, 8) 243
Abb. 3.182: Torsionsbeanspruchter Kreisquerschnitt 244
Abb. 3.183: Schichtaufbau, Materialparameter und Ingenieurkonstanten für das CFK-verstärkte Rohrprofil sowie Verzerrungen und Spannungen bei Bruchlast (AlfaLam.nl) 246
Abb. 3.184: Bruchbilder der Torsionsproben 247
Abb. 3.185: Verdrehung (θ in rad) bzw. Verzerrungen (ε_{xy} in %) des Formholzrohres 248
Abb. 3.186: Druckversuch an Rohr-Knoten-Verbindung mit Kammnägeln – Versuchsaufbau, Nagelbild (UN_150_2o) und Bruchbild der Probe UN_276_1 251
Abb. 3.187: Kraft-Verformungsverhalten der Rohr-Knoten-Verbindung 253
Abb. 3.188: geschäftete und keilgezinkte Verbindungen von Formholzrohren 253
Abb. 3.189: Kraft-Dehnungsbeziehung der keilgezinkten CFK745-Probe und Bruchbild 254
Abb. 3.190: einbetoniertes CFK-Formholzrohr 255
Abb. 3.191: Entwurf des Hess-Schirmes 256
Abb. 3.192: Versuchsaufbau – 4 Punkt-Biegung 263
Abb. 3.193: KHPn_1R_7 – Schäftung Fichte-KHP 264
Abb. 3.194: Effektiver E-Modul und Biegetragfähigkeit 265
Abb. 3.195: Last-Verformungs-Beziehung 265
Abb. 3.196: GL32 – Zugversagen des Fichteleimholzes 266
Abb. 3.197: KHPn_1R_1 – Schubversagen am Auflager 266
Abb. 3.198: KHPi_1R_1- Zugversagen der Fichte und des KHP 266
Abb. 3.199: KHPi_2R_1 – Zugversagen der Schäftung im KHP 266
Abb. 3.200: Kohlenstofffasermessbrücke - SFB 639 [288] 267
Abb. 3.201: Biegebalken: a) Anordnung der Sensoren (schematisch); b) Versuchsaufbau Biegeversuch 268
Abb. 3.202: Proben mit unterschiedlicher Anordnung der Kohlefasersensoren a) auf der Oberfläche des Biegebalkens (ES 7); b) Sensoren unter ein Zwischenlammelle (ES 9) 269
Abb. 3.203: Dehnungs-Zeit-Diagramme für die Proben ES7 (a) und ES9 (b) bei Stufenbelastung 270
Abb. 3.204: Dehnungs-Zeit-Diagramme für die Proben ES7 und ES9 bei Belastung bis zum Bruch 270
Abb. 3.205: Träger ES7 und ES9 nach dem Bruch 271

Abb. 3.206: Varianten zur Kontaktierung von Kohlenstofffasern a) Umwickeln von Metalldrähten; b) Steckverbindung; c) Lüsterklemme 272
Abb. 3.207: Messungen an unbelasteten Holzbalken mit Kohlenstofffaser-Sensoren a) über mehrere Tage, b) über einen Tag, parallel Aufzeichnung der Temperatur 273
Abb. 3.208: Applizierung der Fasersensoren auf Brückenträger a) in die in Lamellen integrierte Nuten zur Aufnahme der Sensoren, b) Kontaktierungsstellen der Sensoren nach Fertigstellung des Trägers 274
Abb. 3.209: Brückenträger während der Biegeprüfung 274
Abb. 3.210: Belastungsregime für den Träger und Dehnung des Kohlenstofffasersensors während der Biegeprüfung 275
Abb. 3.211: Anordnung der Messsensoren am Querschnitt in Trägermitte 275
Abb. 3.212: Biegeprüfung nach Abb. 3.210:, Dehnung über der Zeit ermittelt an DMS und Kohlenstofffasersensor 276
Abb. 3.213: Detail der Abb. 3.210:, Dehnung über der Zeit ermittelt an DMS und Kohlenstofffasersensor 277
Abb. 3.214: MLG mit integrierten Kohlenstofffasern als Sensorfäden 278
Abb. 3.215: Biaxialgestrick mit integrierter Kohlenstofffaser 279
Abb. 3.216: Applizierung der textilen Strukturen mit integrierten Messfasern 280
Abb. 3.217: Integration der Messfasern in die textile Struktur 281
Abb. 3.218: Messeinrichtung ARAMIS 2D / Messauswertung Tritops 281
Abb. 3.219: Vorbereitung der Prüfkörper und des optischen Messsystems 281
Abb. 3.220: Versuchsaufbau 282
Abb. 3.221: Ankopplung der Messfasern 283
Abb. 3.222: Charakteristisches Versagensmuster 283
Abb. 3.223: Optische Visualisierung der Versagensgrenzflächen 283
Abb. 3.224: Charakteristische Längs- und Querdehnungsfelder bei 79,8 kN 284
Abb. 3.225: Vergleich von Tragwerksverhalten und Messsignal (V-4) 285
Abb. 3.226: Darstellung mehrerer Signalausprägungen als verschmiertes Messsignal (V-4) 286
Abb. 3.227: Vergleich von Tragwerksverhalten und Messsignal (V-3) 286
Abb. 3.228: Verteilung der Längsdehnungen bei Laststufe 43 (70,1 kN) 287
Abb. 3.229: Auflösen von Textilverbunden in äquivalente Basisschichten 288
Abb. 3.230: Interaktion der werkstoffgerechten Modelle für Holz-Textil-Verbunde 289
Abb. 3.231: Globales und faserangepasstes Koordinatensystem 291
Abb. 3.232: Schnittkräfte und -momente am Plattenelement 292
Abb. 3.233: Definition der Schichtdicken und Lage der Laminate 293
Abb. 3.234: Auswirkung der Parameter β_j und r_j auf die Schädigungsevolution 297
Abb. 3.235: Auswirkung der Parameter β_j, κ_j und η_j auf die Schädigungsevolution 298
Abb. 3.236: Einsatz unterschiedlicher Degradationsmodell 298
Abb. 3.237: Excel-Screenshot der Eingabemaske des analytischen Berechnungstools 299

Abb. 3.238: Vergleich der Ergebnisse schubstarrer und schubweicher Plattentheorie 300
Abb. 3.239: Verifikation des Berechnungsmodells für den unverstärkten Biegeträger 301
Abb. 3.240: Verifikation des Berechnungsmodells für den KHP-verstärkten Biegeträger 301
Abb. 3.241: Modellierung des Versagensverhaltens eines KHP-verstärkten Biegeträgers .. 302
Abb. 3.242: Verteilung der Einzelschichtspannungen bei M = 54,6 kNm 303
Abb. 3.243: Verteilung der Einzelschichtspannungen bei M = 114,6 kNm 304
Abb. 3.244: Verteilung der Einzelschichtspannungen bei M = 117,6 kNm 304
Abb. 3.245: Verifikation des Berechnungsmodells für unverstärkte Formholzröhren 306
Abb. 3.246: Verifikation des Berechnungsmodells für textilverstärkte Formholzröhren 307
Abb. 3.247: Konforme Abbildung der ζ -Ebene in die ς-Ebene 309
Abb. 3.248: Zerlegung des Plattenproblems mittels Superpositionsprinzip 310
Abb. 3.249: Ausschnitt mit partieller, sinusförmiger Normalkraftbelastung am Kerbrand 311
Abb. 3.250: geprüfter Anschluss (IC+UD_tube) und vernetztes Anschlussdetail 312
Abb. 3.251: Verformtes Stahlrohr der Probe (IC+DU_tube) und verformtes FE-Modell bei 4 mm Verschiebung 313
Abb. 3.252: Kraft-Verschiebungs-Kurven: Versuch vs. Simulation 313
Abb. 3.253: Hauptspannungen S1 und S3 für Stahlrohr und GFK-Scheibe 314
Abb. 3.254: Statisches System 314
Abb. 3.255: Querschnitte des Fachwerkes am Auflager 315
Abb. 3.256: vernetzter Fachwerkknoten und Trägersegment mit Gurt, Diagonale und Zugstange 315
Abb. 3.257: Durchbiegung und Auflagerverschiebung des Fachwerkträgers 316
Abb. 3.258: Hauptspannungen S1 der Bolzenverbindung an Zugstange und Auflager 316
Abb. 3.259: Hauptspannungen S1 und S3 für GFK Scheibe 317
Abb. 3.260: 1. Knick- und Beulform 317
Abb. 3.261: Kraft-Schlankheits Beziehung für unverstärkte (REF) und GFK-verstärkte Rohre - Versuche vs. Simulation 319
Abb. 3.262: Versagensniveaus im Holz bzw. der FVK-Bewehrung (rechter Bildteil) 320
Abb. 3.263: Spannungs-Dehnungslinien für Bauholz nach Glos [190] 322
Abb. 3.264: BSH-KHP-Hybridquerschnitt 323
Abb. 3.265: Lochleibungsfestigkeiten, Traglasten und Verschiebungsmoduln [206] 335
Abb. 3.266: Verstärkte Kreuzungsknoten in den Achsen N/4 und N/22 im 3. Pilotprojekt 338
Abb. 3.267: Isometrie Verstärkung der Gurte in den Mittelachsen N und 13 im 3. Pilotprojekt 338
Abb. 3.268: Querschnitt eines KHP-BSH-Hybridträgers 341
Abb. 3.269: Querschnitt einer Hybridbohle aus TMT-Esche und Lärche 342
Abb. 3.270: a) beidseitig verstärkter Querschnitt b) einseitig verstärkter Querschnitt 343
Abb. 3.271: Geometrie und Spannungen des einseitig verstärkten Querschnitts 344
Abb. 3.272: Geometrie und Spannungen des einseitig verstärkten Querschnitts 345

Abb. 3.273: bilineares Spannungs-Dehnungs-Verhalten 347
Abb. 3.274: Geometrie und Spannungen des einseitig verstärkten Querschnitts 347
Abb. 3.275: Hybridträgerstück der Länge dx 350
Abb. 3.276: Geometrie und Spannungen des einseitig verstärkten Querschnitts 350
Abb. 3.277: Geometrie und Spannungen des einseitig verstärkten Querschnitts 353
Abb. 3.278: Geometrie und Spannungen des einseitig verstärkten Querschnitts 355
Abb. 3.279: Erstes Blatt der Exceldatei zur Bemessung von Hybridbauteilen 358
Abb. 3.280: Iterationsblatt der Exceldatei zur Bemessung von Hybridbauteilen 359
Abb. 3.281: Holzausbeute bezogen auf das Rundholz und Biegesteifigkeit EI verschiedener Querschnittstechnologien [211] 362
Abb. 3.282: Schema der Formholzherstellung 363
Abb. 3.283: Stabdübelverbindung mit Verstärkungen aus (a) Holzwerkstoffplatten (b) Nageldübeln und (c) Patches (FKV) 364
Abb. 3.284: Ausführung einer stiftförmigen Verbindung mit eingeklebtem Patch, (a) Patch, (b) Einleimung des Patch und (c) Eingeklebtes Patch im Bauteil 365
Abb. 3.285: Ansicht der Klebefuge mit möglicher Rückverankerung aus FKV 367
Abb. 3.286: Isometrien – Einzelteile eines punktgestützten Holzstapelrostes 369
Abb. 3.287: Knoten im Holzstapelrost mit einem Gelenkbolzen als Verbindungsmittel 370
Abb. 3.288: KK Kreuzungsknoten mit einem Passbolzen 371
Abb. 3.289: Versagensarten einer (a) zwei-, (b) vier- und (c) sechsschnittigen Stiftverbindung 372
Abb. 3.290: Versagensarten einer 5-schnittigen Stiftverbindung 374
Abb. 3.291: Aufteilung der Verbindung in zweischnittige Verbindungen I, II, ...und Ia, IIa,… 375
Abb. 3.292: Schubkräfte je Scherfuge und Bestimmung des Kraft-Faser-Winkels α 376
Abb. 3.293: Programm Kreuzungsknoten, Eingabewerte für Scherfuge I 377
Abb. 3.294: Programm Kreuzungsknoten, Bemessungswerte für Scherfuge I 378
Abb. 3.295: Programm Kreuzungsknoten, Bemessungswert $R_{Stift,d}$ 378
Abb. 3.296: Versagensfall Bolzenschiefstellung, einschnittige Verbindung in Scherfuge I ... 379
Abb. 3.297: Programm Kreuzungsknoten, Nachweise 380
Abb. 3.298: Kräfte in der Holzstapelfuge mit Bolzensicherung 381
Abb. 3.299: Holzstapelfuge mit Bolzensicherung – Schnittgrößenermittlung senkrecht zur Fuge 384
Abb. 3.300: biegesteife Variante eines Anschlusses von vier Streben an eine Hohlstütze .. 386
Abb. 3.301: fast gelenkige Variante eines Anschlusses von vier Streben an eine Hohlstütze 387
Abb. 3.302: Beispiel der Ausbildung eines sog. Betonknotens aus [202] 388
Abb. 3.303: System Holz – Fachwerkbinder aus [202] 388
Abb. 3.304: Schematische Darstellung des Holz–Fachwerkbinders mit Kennzeichnung der exemplarisch untersuchten Anschlussknoten aus [202] 389
Abb. 3.305: Ausbildung der Anschlussknoten 1 bis 3 aus [202] 390

Abb. 3.306: Pilotprojekt: Hess-Innenhofüberdachung, Anschluss Streben an Stütze als Betonknoten ... 392
Abb. 3.307: Längs- und Querschnitt der Fuß- und Radwegbrücke („HHT-Brücke“) ... 399
Abb. 3.308: Hauptträger und Bohlen ... 399
Abb. 3.309: Längs- und Querschnitt der Fuß- und Radwegbrücke „Holzbrücke“ ... 400
Abb. 3.310: Längsansicht und Querschnitt der Fuß- und Radwegbrücke „Stahlbrücke“ ... 401
Abb. 3.311: Bauteile des Überbaus der Fuß- und Radwegbrücke „HHT-Brücke“ ... 403
Abb. 3.312: Hybridträger im Bruchversuch ... 405
Abb. 3.313: Ansicht der Brücke Variante 1 ... 406
Abb. 3.314: Brückenquerschnitt Variante 1 (Maße in cm) ... 407
Abb. 3.315: Ansicht der Brücke Variante 2 ... 407
Abb. 3.316: Brückenquerschnitt Variante 2 (Maße in mm) ... 408
Abb. 3.317: Versuchsaufbau der 4-Punkt-Biegeprüfung ... 408
Abb. 3.318: Be- und Endlastungsstufen der Biegeprüfung ... 409
Abb. 3.319: Kraft-Durchbiegungs-Diagramm ... 410
Abb. 3.320: Durchbiegungen und Längsdehnungen vor dem Versagen der Probe ... 410
Abb. 3.321: Dehnungs-Zeit- und Kraft-Dehnungs-Diagramm ... 411
Abb. 3.322: Bruchbild des Verbundträgers – Zugversagen in Trägermitte ... 411
Abb. 3.323: Aufzeichnung lokaler Minimalrohdichten der Brettlamellen ... 412
Abb. 3.324: Nutführung in den Brettlamellen ... 413
Abb. 3.325: Lamellenverklebung des Prüfträgers im Formpressbett ... 413
Abb. 3.326: Grob-Egalisierung der Oberfläche vor dem Hobeln der Seitenflächen ... 414
Abb. 3.327: Fertig gehobelter Prüfträger mit seitlich ausgeleiteten Messfasern ... 414
Abb. 3.328: MARC-Twister-1000-T, links: mit Stahlmast, rechts: Prototyp mit Holzmast ... 417
Abb. 3.329: Aufsichten Holzprofilrohrfuß (A) und -kopf (B), Ansicht Mast ... 418
Abb. 3.330: röhrenförmiger Holzmast – Blick von unten (nach GFK-Bewehrung, incl. eingeklebten Verbindungen 12x Ø16 mm) und CAD-Zeichnung vom Querschnitt und der Einspannung ... 419
Abb. 3.331: links: Verbindung des Mastes mit dem Maschinenteil, rechts: Fuß des armierten Holzmastes mit 12 herausstehenden Gewindestangen vor der Verankerung im Fundament ... 420
Abb. 3.332: Bearbeitung Segment auf CNC-Portalbearbeitungsmaschine ... 421
Abb. 3.333: Fußpunkt der bearbeiteten Segmente ... 421
Abb. 3.334: Verleimung der Segmente zum konischen Rohr ... 421
Abb. 3.335: Innenansicht fertig verleimtes Rohr ... 421
Abb. 3.336: Anschlüsse des Holzmastes um Rotor und Fundament ... 422
Abb. 3.337: Systemantwort infolge Impulsanregung ... 423
Abb. 3.338: Systemantwort des Ausschwingversuches ... 424
Abb. 3.339: Systemantwort des Feldversuchs ... 425

Abb. 3.340: Frequenzbereich für Mastauslegung und Leistungskurve des Rotors 426
Abb. 3.341: Vertikalachswindkraftanlage auf Testfeld in Cuxhaven 2008 426
Abb. 3.342: Vertikalachswindkraftanlage in Wremen im August 2010 428
Abb. 3.343: Blick auf die zweckentfremdete Probebohrung im August 2010 429
Abb. 3.344: Blick in das Mastinnere im August 2010 – Feuchte am Fußpunkt 429
Abb. 3.345: Schirmkonstruktion Innenhofüberdachung ohne Glaseindeckung 430
Abb. 3.346: Verstärkungen der Hauptdiagonalen des Gitterrostes der Innenhofüberdachung 432
Abb. 3.347: Anschlüsse „Strebe-Rost“ 433
Abb. 3.348: Anschluss „Stütze-Rost“ 434
Abb. 3.349: Eckknoten und Randknoten 435
Abb. 3.350: Anschlussdetail des Eckknoten 435
Abb. 3.351: Anschluss „Zwischenknoten“ mit schrägen Schrauben 436
Abb. 3.352: Anschluss Stirnversatz „Stütze-Streben“ 436
Abb. 3.353: Gesamtsystem Dach im Stabwerksprogramm RStab mit Ausschnitt KK 437
Abb. 3.354: Kreuzungsknoten mit Kennzeichnung Längs- und Quergurt (LG, QG) 439
Abb. 3.355: Darstellung der Bypassstabsysteme für den Kreuzungsknoten 439
Abb. 3.356: FEM Teiltragsystem KK Gurtstapel mit Bolzensicherung 441
Abb. 3.357: Gurtstapel im KK mit entsprechendem Stabzug im Stabwerksmodell 442
Abb. 3.358: Schema der Teilsystembildung zur Ermittlung der Drehfedern je Holzfuge 443
Abb. 3.359: Prüfträger 1, Verbundträger aus drei Gurten und zwei Zwischenknoten 444
Abb. 3.360: Prüfträger 2, aus 3-Punkt-Biegeversuch mit losem Abstandsholz in Trägermitte und Verbindungsmitteln im Trägerrandknoten 448
Abb. 3.361: Dreigurtiger Bogenbinder für Versuchszwecke 451
Abb. 3.362: Draufsicht Kreuzungsknoten 452
Abb. 3.363: Kraft-Weg-Diagramm des Binders (Hess-Schirm) 453
Abb. 3.364: Verformungsmessung mittels VIC und horizontalen ISA (farbige Kreise) 453
Abb. 3.365: Bestimmung der vertikalen Durchbiegung V mittels Verformungsanalyse Vic3D 454
Abb. 3.366: Lebenszyklusphasen und externe Effekte 456
Abb. 3.367: Phasen der Ökobilanzierung [71] 457
Abb. 3.368: Bestandteile der Wirkungsabschätzung nach DIN EN ISO 14040 [71] 460
Abb. 3.369: Übersicht Sachbilanz Lebenszyklus der drei Brücken 466
Abb. 3.370: Ressourcenverbauch: Lebenszyklus der drei Brücken (Standardszenario) 467
Abb. 3.371: CML: Lebenszyklus der drei Brücken (Standardszenario) 468
Abb. 3.372: CML: Lebenszyklus der drei Brücken (Standardszenario) - normalisiert 468
Abb. 3.373: Ressourcenverbauch: Lebenszyklus Brücke Hummelweg (Standardszenario) 469
Abb. 3.374: CML: Lebenszyklus Brücke Hummelweg (Standardszenario) 470

Abb. 3.375: Ressourcenverbrauch: Lebenszyklus Brücke Henzesteg (Standardszenario) .. 471
Abb. 3.376: CML: Lebenszyklus Brücke Henzesteg (Standardszenario) 472
Abb. 3.377: Ressourcenverbrauch: Lebenszyklus Brücke Bäkepark (Standardszenario) 473
Abb. 3.378: CML Lebenszyklus Brücke Bäkepark (Standardszenario) 474
Abb. 3.379: Ressourcenverbrauch: Produktionsphase Brücke Hummelweg 475
Abb. 3.380: CML: Produktionsphase Brücke Hummelweg 475
Abb. 3.381: Ressourcenverbrauch Produktionsphase Brücke Henzesteg 476
Abb. 3.382: CML: Produktionsphase Brücke Henzesteg 476
Abb. 3.383: Ressourcenverbrauch Produktionsphase Brücke Bäkepark 477
Abb. 3.384: CML: Produktionsphase Brücke Bäkepark 477
Abb. 3.385: Ressourcenverbrauch: Lebenszyklusvergleich der Tragwerke 478
Abb. 3.386: CML: Lebenszyklusvergleich der Tragwerke 479
Abb. 3.387: Ressourcenverbrauch: Vergleich LC Biegeträger (2 Holzträger vs. 1,5 Stahlträger) 480
Abb. 3.388: CML: Vergleich Lebenszyklus der Biegeträger (2 Holzträger vs. 1,5 Stahlträger) 480
Abb. 3.389: Flussdiagramm Lebenszyklus HHT-Biegeträger, CML Kategorie POCP 481
Abb. 3.390: Flussdiagramm Lebenszyklus HHT-Biegeträger, CML Kategorie POCP 482
Abb. 3.391: CML Lebenszyklus Hybridbohle 483
Abb. 3.392: Ressourcenverbrauch Produktion Formholzprofil 489
Abb. 3.393: CML: Produktionsphase Formholzprofil 491
Abb. 3.394: CML: Produktionsphase Formholzprofil normalisiert 492
Abb. 3.395: Ressourcenverbrauch: Lebenszyklus Formholzprofil, Glasfaser, gewickelt 494
Abb. 3.396: CML: Lebenszyklus Formholzprofil, Glasfaser, gewickelt 495
Abb. 3.397: Ressourcenverbrauch: Lebenszyklus Stahlrohr 496
Abb. 3.398: Ressourcenverbrauch: Lebenszyklus Betonsäule 496
Abb. 3.399: Ressourcenverbrauch: Vergleich Lebenszyklen der 4 Varianten 497
Abb. 3.400: CML: Vergleich der Lebenszyklen der 4 Varianten 498
Abb. 3.401: CML: Vergleich der Lebenszyklen der 4 Varianten - normalisiert 498
Abb. 3.402: Vergleich der Formholzprofile mit verschiedenen Fasern 500
Abb. 3.403: Ressourcenverbrauch verschiedener Verbindungen 502
Abb. 3.404: CML: Verbindungen (mit unterschiedlichen Funktionellen Einheiten) 503

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.1: Mögliche Eigenschaftsänderungen von Holz zu Hochleistungsholz 17
Tabelle 1.2: Tragverhalten unterschiedlicher Stabdübelanschlüsse mit und ohne textile Verstärkung 46
Tabelle 3.1: Zusammenstellung der Versuchsergebnisse 74
Tabelle 3.2: Mechanische Eigenschaften ausgewählter KHP-Qualitäten (Dehonit [236]) 79
Tabelle 3.3: Zusammensetzung des Mehrlagengestrickes (MLG-Variante 1, Hersteller ITM)81
Tabelle 3.4: Masse- und Geometrieänderung ausgewählter Probekörper aus KHP und Fichte vor und nach 980 h künstlicher Bewitterung im Klimaschrank 89
Tabelle 3.5: Masseänderung der Probekörper aus KHP (vollgetränkt) vor und nach künstlicher Bewitterung im Klimaschrank bzw. Lagerung im Wasserbad..... 90
Tabelle 3.6: Masse- und Geometrieänderung ausgewählter Probekörper nach künstlicher Bewitterung im Klimaschrank oder Wasserlagerung..... 92
Tabelle 3.7: Oberflächenbehandlungen der Formholzrohre für die Freibewitterung..... 94
Tabelle 3.8: Unverstärkte und verstärkte Formholzrohre (Nr. 2, 3 und 6) in der Freibewitterung 95
Tabelle 3.9: Dauerhaftigkeit der untersuchten alpinen Lärche (zweite Prüfung)..... 104
Tabelle 3.10: Holzfeuchte der Verbundquerschnitte getrennt nach TMT und Lärche..... 113
Tabelle 3.11: Ergebnisse der Biegeversuche nach DIN 52186..... 118
Tabelle 3.12: Ergebnisse der Druckversuche nach DIN 52185 119
Tabelle 3.13: Kriechzahlen für Fichte und Lärche in NKL 1 (2. Versuchsreihe)..... 130
Tabelle 3.14: Kriechzahlen für $KHP_{25\%}$ in NKL 1 und NKL 2 (1. Versuchsreihe)..... 131
Tabelle 3.15: Kriechzahlen für $KHP_{25\%}$ und $KHP_{15\%}$ in NKL 1 (1. und 2. Versuchsreihe) 131
Tabelle 3.16: Abbrandraten von Holz..... 137
Tabelle 3.17: Zusammenfassung der Scherversuche..... 157
Tabelle 3.18: Lamellenübersicht mit Bezeichnungen..... 159
Tabelle 3.19: Unverstärkte 2-lamellige Versuchsträger 161
Tabelle 3.20: Probekörper der verstärkten 2-lamelligen Versuchsträger 163
Tabelle 3.21: Probenumfang der 3-lamelligen Proben und Sonderprobe 163
Tabelle 3.22: Kennwerte der 2-lamelligen Biegeträger aus BSH 170
Tabelle 3.23: Kennwerte der Versuchsreihen mit Hybridlamellen..... 171
Tabelle 3.24: Kennwerte der Sonderprobe 173
Tabelle 3.25: Kennwerte der 3-lamelligen Träger 173
Tabelle 3.26: Probenumfang dreiteiliger Scherkörper..... 175
Tabelle 3.27: Probenumfang fünfteiliger Scherkörper..... 177
Tabelle 3.28: Versuchsergebnisse dreiteiliger Proben je Scherfläche 180
Tabelle 3.29: Versuchsergebnisse dreiteiliger Proben..... 181
Tabelle 3.30: Materialeigenschaften der textilen Ausgangsmaterialien 184

Tabelle 3.31: Ergebnisse der textilphysikalischen Untersuchungen an ringförmigen Gestricken 187
Tabelle 3.32: Ergebnisse der textilphysikalischen Untersuchungen an Schlauchgestricken .. 190
Tabelle 3.33: Prozessdaten für Wickelverfahren 200
Tabelle 3.34: Prozessdaten für Flechtverfahren 203
Tabelle 3.35: Prozessdaten für Strickschlauchverfahren 205
Tabelle 3.36: Vor- und Nachteile von Holz und FVK 210
Tabelle 3.37: Materialeigenschaften von Pressholz und FVK 219
Tabelle 3.38: Testmatrix und Versuchsergebnisse 222
Tabelle 3.39: Ingenieurkonstanten verschiedener Materialien 228
Tabelle 3.40: Bruchlasten bewehrter und unbewehrter Hohlkastenprofile 234
Tabelle 3.41: Vergleich der mit IWA und Vic3D gemessen Verformungen (BSH-Rohrmitte).. 237
Tabelle 3.42: Vergleich der mit IWA und Vic3D gemessenen Verformungen (Auflager-Rohrmitte) 238
Tabelle 3.43: Vergleich der mit IWA und Vic3D gemessenen Verformungen (Auflager-Mitte) 240
Tabelle 3.44: Querschnittsformen 240
Tabelle 3.45: Zusammenfassung der Torsionsversuche 245
Tabelle 3.46: Kennwerte der untersuchten Materialien für den Variantenvergleich 249
Tabelle 3.47: Variantenvergleich der Stützen 250
Tabelle 3.48: Testmatrix und Versuchsergebnisse der Nagelverbindungen 252
Tabelle 3.49: Materialeigenschaften und Standardabweichung von Fichte und KHP 263
Tabelle 3.50: Abmessungen und Materialkenndaten der Testbalken 264
Tabelle 3.51: Materialkennwerte der Kohlenstofffaser, der Matrix und des Holzes [222] 269
Tabelle 3.52: Textilphysikalische Kennwerte Patch-Kohlenstofffasersensoren 279
Tabelle 3.53: Übersicht der Applizierungsvarianten 280
Tabelle 3.54: Bruchmodenüberblick für Faserverbunde nach CUNTZE 296
Tabelle 3.55: Modellparameter* für Biegeträgerberechnung (entsprechend Kap. 3.5.6) 300
Tabelle 3.56: Modellparameter* für Formholzröhrenberechnung entsprechend Versuch am ISH 305
Tabelle 3.57: Holzvergütungsmaßnahmen 333
Tabelle 3.58: Versagensarten einer zweischnittigen Verbindung von Bauteilen aus Holz / HW 373
Tabelle 3.59: Querschnittswerte der Fachwerkstäbe für Variante 1 und 2 389
Tabelle 3.60: Vergleich verschiedener Trägerausführungen gleicher Breite (b = 20 cm) 404
Tabelle 3.61: Abschätzung des Dämpfungsgrades 423
Tabelle 3.62: Ergebnisse des Ausschwingversuchs 424
Tabelle 3.63: Modellierungsvergleich am Prüfträger 1 für den Zwischenknoten 445
Tabelle 3.64: Vergleich der Ergebnisse für Modell a1, a2 und b am Prüfträger 1 für den ZK . 445

Tabelle 3.65: Vergleich der Ergebnisse zu unterschiedl. Verbindungen des ZK am Prüfträger 1 anhand RStab-Modell b und Infograph 447
Tabelle 3.66: Vergleich der Verformung in Feldmitte aus den Versuchswerten mit denen im RStab-Modell b ermittelten Werten 449
Tabelle 3.67: Vergleich der Relativverschiebung (U) von IWA und Vic3D; linke Seite des Binders 454
Tabelle 3.68: Vergleich der absoluten Durchbiegung (V) von IWA und Vic3D Mitte des Binders. 454
Tabelle 3.69: Produktionsphase: Zusammensetzung Brücke Hummelweg 464
Tabelle 3.70: Produktionsphase : Zusammensetzung der Brücke Henzesteg 464
Tabelle 3.71: Produktionsphase: Zusammensetzung der Brücke Hummelweg 465
Tabelle 3.72: CML Werte gesamter Lebenszyklus der drei Brücken 467
Tabelle 3.73: Ressourcenverbrauch: Lebenszyklus Brücke Hummelweg (Standardszenario) 469
Tabelle 3.74: CML: Lebenszyklus Brücke Hummelweg (Standardszenario) 471
Tabelle 3.75: Ressourcenverbrauch Lebenszyklus Henzesteg 472
Tabelle 3.76: CML: Lebenszyklus Henzesteg 472
Tabelle 3.77: Ressourcenverbrauch: Lebenszyklusvergleich der Tragwerke 478
Tabelle 3.78: CML Lebenszyklusvergleich der Tragwerke 479
Tabelle 3.79: Ressourcenverbrauch bei KHP Herstellung für 1 Biegeträger 482
Tabelle 3.80: CML: KHP Herstellung für 1 Biegeträger 483
Tabelle 3.81: Ressourcenverbrauch: Vergleich Szenarien für Bohlen 484
Tabelle 3.82: Sachbilanz Formholzprofil (HHT) 486
Tabelle 3.83: Sachbilanz Baugruppe Formholzprofil mit verschiedenen Bewehrungsverfahren 486
Tabelle 3.84: Übersicht Lebenszyklus Formholzprofil 487
Tabelle 3.85: Übersicht Lebenszyklus Betonsäule 487
Tabelle 3.86: Übersicht Lebenszyklus Stahlrohr 488
Tabelle 3.87: Ressourcenverbrauch Produktion Formholzprofil 490
Tabelle 3.88: Aufschlüsselung Ressourcenverbrauch EE in Unterkategorien 490
Tabelle 3.89: Aufschlüsselung Ressourcenverbrauch NRE in Unterkategorien 490
Tabelle 3.90: CML: Formholzprofil (HHT) und Vergleichsszenario 492
Tabelle 3.91: Ressourcenverbrauch Vergleich Produktion Formholzprofil 493
Tabelle 3.92: Ressourcenverbrauch: Vergleich Bewehrungsverfahren 493
Tabelle 3.93: CML: Vergleich Bewehrungsverfahren 493
Tabelle 3.94: Ressourcenverbrauch: Lebenszyklus Formholzprofil, Glasfaser, gewickelt 494
Tabelle 3.95: CML: Lebenszyklusphase Formholzprofil, Glasfaser, gewickelt 495
Tabelle 3.96: Ressourcenverbrauch: Vergleich der vier Lebenszyklen 499
Tabelle 3.97: CML: Vergleich der vier Lebenszyklen 499
Tabelle 3.98: Sachbilanzen: Verbindungen 501

Tabelle 3.99: Ressourcenverbrauch: Verbindungen 502
Tabelle 3.100: CML: Verbindungen (mit unterschiedlichen Funktionellen Einheiten)..... 503
Tabelle 4.1: Publikationen und Zeitschriften..... 505
Tabelle 4.2: Konferenzbeiträge und Vorträge..... 505
Tabelle 4.3: Präsentationen und Messeauftritte 506
Tabelle 4.4: Wissenschaftliche Anschlussprojekte an das HHT Projekt (beantragte sowie bereits genehmigte Forschungsvorhaben) 508

Zum vorliegenden Abschlussbericht wurden folgende Anlagen erstellt, die auf beiliegender CD enthalten sind.

Anlage A1: Vergleichende Ökobilanz für drei Geh- und Radwegbrücken
Autor: Christian Manthey (BU)

Anlage A2: Ökobilanz für faserbewehrte Formholzprofile
Autor: Christian Manthey (BU)

Anlage A3: Bewehrungsplan für Torsionsprobekörper aus Stahlbeton
Autor: Robert Putzger (ISH)

Anlage A4: HHT-Merkblätter Material

Titel	Autor
Glasfasern	Tilo Birk (ehem. IaFB)
Aramidfasern	Tilo Birk (ehem. IaFB)
Kohlenstofffasern	Tilo Birk (ehem. IaFB)
Matrixsysteme	Tilo Birk (ehem. IaFB)
Textile Flächenbildung	Tilo Birk (ehem. IaFB)
Faserkunststoffverbunde (FKV)	Anke Schäcke (IaFB)
Verdichtetes Holz	Tilo Birk (ehem. IaFB)
Kunstharzpressholz (KHP)	Andrea Untergutsch (IaFB)
Thermisch modifiziertes Holz	Yvette Lemke (IaFB)
Formholz	Yvette Lemke (IaFB)
Ökobilanzierung	Christian Manthey (BU)

Anlage A5: HHT-Praxisempfehlungen

Titel	Autor
Textile Verstärkungen	Anke Schäcke (IaFB)
Hybridbauteile	Petra Kubowitz (IaFB)
Formholzrohre	Yvette Lemke (IaFB)
Mehrschnittige Verbindungen mit stiftförmigen VM	Anke Schäcke (IaFB)
Stiftverbindungen mit Zwischenschichten	Anke Schäcke (IaFB)
Stiftverbindungen mit Verstärkungen aus HWP	Anke Schäcke (IaFB)
Stiftverbindungen mit Verstärkungen aus Nagelplatten	Anke Schäcke (IaFB)
Stiftverbindungen mit Verstärkungen aus FKV	Anke Schäcke (IaFB)
Knoten im Holzstapelrost mit Passbolzen als VM	Anke Schäcke (IaFB)

Anlage A6: HHT-Kurzdokumentationen

Titel	Autor
Pilotprojekt Fußgängerbrücken	Andrea Untergutsch (IaFB)
Pilotprojekt Vertikalachswindkraftanlage	Andrea Untergutsch (IaFB)
Pilotprojekt Hess-Innenhofüberdachung	Yvette Lemke (IaFB)

Anlage A7: Programme und Beispielrechnungen
Anlagen 7.01 bis 7.09 (Excelprogramme und Anwendungsbeispiele)
Autoren: Petra Kubowitz (IaFB), Anke Schäcke (IaFB), Mike Thieme (ILK)

Anlage A8: Fotodokumentation Formholz
Autor: Robert Putzger (ISH)

Die Fotodukumentation der Formholzrohre (Anlage A8) ist zusätzlich im Folgenden abgedruckt.

Anlage A8: Fotodokumentation Formholzrohre



Formholzrohre im Wald
(Fotograf: Lothar Sprenger)



Formholzrohre in einer Sandgrube
(Fotograf: Lothar Sprenger)



Verstärkung eines 4,80 m langen Formholzrohres bei SGL Carbon mit Hilfe einer CFK-Wicklung (Fotograf: Lothar Sprenger)

Bundesumweltminister Dr. Norbert Röttgen und BDI-Hauptgeschäftsführer Dr. Werner Schnappauf verleihen Innovationspreise für Klima und Umwelt
Presseinformation vom 11.02.2010 (Berlin)



Innovationspreis für Klima und Umwelt - Preisträger 2009
(aus der Presseinformation vom 11.02.2010)