

Sandra Gelbrich

Funktionsintegrative Leichtbaustrukturen für Tragwerke im Bauwesen

Sandra Gelbrich

Funktionsintegrative Leichtbaustrukturen
für Tragwerke im Bauwesen



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
CHEMNITZ

Universitätsverlag Chemnitz
2016

Impressum

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Angaben sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Titelgrafik: Sandra Gelbrich
Satz/Layout: Sandra Gelbrich

Technische Universität Chemnitz/Universitätsbibliothek
Universitätsverlag Chemnitz
09107 Chemnitz
<http://www.tu-chemnitz.de/ub/univerlag>

Herstellung und Auslieferung

readbox unipress
Am Hawerkamp 31
48155 Münster

readbox unipress ist eine Marke der
readbox publishing GmbH
Ruhrallee 9
44139 Dortmund
<http://unipress.readbox.net>

ISBN 978-3-96100-005-0

<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-215103>



TECHNISCHE UNIVERSITÄT CHEMNITZ

Funktionsintegrative Leichtbaustrukturen für Tragwerke im Bauwesen

Von der Fakultät für Maschinenbau der
Technischen Universität Chemnitz
genehmigte

HABILITATION

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktoringenieur habilitatus
(Dr.-Ing. habil.)

vorgelegt

Von: Dr.-Ing. Sandra Gelbrich
Geboren am: 14.02.1977 in Karl-Marx-Stadt (Chemnitz)
Vorgelegt am: 04.02.2016
Verteidigt am: 10.11.2016

Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E. h. Prof. Lothar Kroll
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Frank Dahlhaus
Prof. Dr. hab. inż. Adam Niesłony

Chemnitz, den 16.12.2016

Vorwort

*„Doch Forschung strebt und ringt, ermüdend nie,
Nach dem Gesetz, dem Grund, Warum und Wie.“
(Johann Wolfgang von Goethe)*

Meine Habilitation zum Thema „Funktionsintegrative Leichtbaustrukturen für Tragwerke im Bauwesen“ basiert auf den wissenschaftlichen Ergebnissen meiner Tätigkeit als Leiterin des Forschungsbereiches „Leichtbau im Bauwesen (LBW)“ am Institut für Strukturleichtbau der Technischen Universität Chemnitz. Anknüpfend an die Lehren von Professor Frei Otto wurde diese Arbeit inspiriert von vielfältigen Forschungsvorhaben, die grundlagenorientiert und anwendungsnahe von 2009 bis 2016 durchgeführt wurden. Dabei führte insbesondere die fachgebietsübergreifende Zusammenarbeit zum Erfolg. An dieser Stelle möchte ich all denjenigen meinen aufrichtigen Dank aussprechen, die mich auf meinem akademischen Weg begleitet und durch Einbringen von Ideen sowie konstruktiven Diskussionen tatkräftig unterstützt haben.

Bei meinem Habilitationsvater, Herrn Professor Kroll, möchte ich mich für die Betreuung der wissenschaftlichen Arbeit bedanken. Die fachliche Unterstützung und die wertvollen Hinweise trugen entscheidend zum Gelingen des Gesamtwerks bei. Für die Begutachtung der Habilitationsschrift danke ich Herrn Professor Dahlhaus und Herrn Professor Nieslony. Herrn Professor Wolfgang Nendel gilt mein Dank für die Förderung und Hilfe beim Aufbau des Forschungsbereiches LBW sowie für die langjährige freundschaftliche Begleitung.

Mein besonderer Dank gebührt meinen Kollegen Andreas Ehrlich und Henrik Funke für die stets kreative und konstruktive Zusammenarbeit, die wertvollen Fachgespräche und innovativen Ideen, die wir gemeinsam erfolgreich in die Tat umsetzten. Weiterhin möchte ich Herrn Dr. Matthias Pfalz für die interessanten Projekte und vielen realisierten Bauwerke, die wir mit der Firma Fiber-Tech gebaut haben, danken.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei meinem LBW-Forschungsbereichsteam für die Zusammenarbeit und für das sehr hohe Maß an Leistungsbereitschaft. Danke für die Leidenschaft und das Engagement bei der Durchführung von Forschungsprojekten sowie bei der praxisnahen Umsetzung. Meinen allerherzlichsten Dank widme ich Christina Wagenbreth für die Motivation, Gesprächsbereitschaft und mentale Unterstützung. Bei meinen Kollegen des Institutes für Strukturleichtbau der TU Chemnitz bedanke ich mich für die gute Arbeitsatmosphäre und für die fachgebietsübergreifende Zusammenarbeit. Dabei gilt ein großes Dankeschön der labor- und versuchstechnischen Begleitung.

Bei allen beteiligten Projektpartnern und den Fördermittelgebern: Deutsche Forschungsgemeinschaft DFG, Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen AiF, Sächsische Aufbaubank SAB, Projektträger Jülich PTJ und Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe FNR bedanke ich mich für die hervorragende Kooperation sowie für die finanziellen Zuwendungen.

Mein außerordentlicher Dank gilt meinen Eltern, die mir durch ihre Unterstützung und Förderung den akademischen Werdegang ermöglichten. Abschließend bedanke ich mich bei meinem Mann und bei meinen Töchtern, die mich mit viel Geduld und Liebe umgeben haben und mir so den erforderlichen Freiraum für diese Arbeit schafften.

Chemnitz, den 16.12.2016

Sandra Gelbrich

In memoriam Frei Otto (1925-2015)

„Zusammenhänge zwischen Formen, Werkstoff und Technologie zu erkennen, Grenzen zu überschreiten und neue Wege zu gehen, sind für die Weiterentwicklung des Leichtbaus von hohem Stellenwert. Dabei ist die Nutzung des enormen Potentials des Technologiestandortes Sachsen hinsichtlich der Textil- und Leichtbautechnologien Schlüssel für den Erfolg.“

[Frei Otto; Leichtbausymposium Chemnitz 2012]

Bibliographische Beschreibung

Verfasser: Dr.-Ing. Sandra Gelbrich

Thema: „Funktionsintegrierte Leichtbaustrukturen für Tragwerke im Bauwesen“

Art der Arbeit: Habilitation an der Fakultät für Maschinenbau der
Technischen Universität Chemnitz, Institut Strukturleichtbau
Chemnitz, 2016

Umfang: 195 Seiten, 128 Abbildungen, 28 Tabellen, 188 Literaturstellen, 6 Anlagen

Kurzreferat

In den letzten Jahren gewinnt der Leichtbau im Bauwesen im Zuge der Ressourceneinsparung wieder stärker an Bedeutung, denn ohne eine deutliche Steigerung der Effizienz ist zukunftsfähiges Bauen und Wohnen nur schwer zu bewerkstelligen. Optimierte Bauen, im Sinne der Errichtung und Unterhaltung von Bauwerken mit geringem Einsatz an Material, Energie und Fläche über den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes hinweg, bedarf des Leichtbaus in punkto Material, Struktur und Technologie.

In der vorliegenden Arbeit wird ein wissenschaftlicher Überblick zum aktuellen Stand der eigenen Forschungen in Bezug auf funktionsintegrativen Leichtbau im Bauwesen gegeben sowie erweiterte Methoden und Ansätze abgeleitet, die eine Konzeption, Bemessung und Erprobung von neuartigen Hochleistungs-Tragstrukturen in Leichtbauweise gestatten. Dabei steht die Entwicklung leistungs-starker und zugleich multifunktionaler Werkstoffkombinationen und belastungsgerecht dimensionierter Strukturkomponenten unter dem Aspekt der Gewichtsminimalität in Material und Konstruktion im Fokus. Ein breit gefächertes Eigenschaftsprofil für "maßgeschneiderte" Leichtbauanwendungen besitzen textilverstärkte Verbundbauteile, denn sowohl die Fadenarchitektur als auch die Matrix können in weiten Bereichen variiert und an die im Bauwesen vorliegenden komplexen Anforderungen angepasst werden. In der vorliegenden Arbeit werden hierzu vor allem Methoden und Lösungen anhand von Beispielen zu: multifunktionalen Faser-Kunststoff-Verbunden (FKV), funktionsintegrierten faserverstärkten mineralischen Tragelemente und Verbundstrukturen in textildbewehrter Beton-GFK-Hybridbauweise betrachtet. Von zentraler Bedeutung ist dabei die Schaffung von materialtechnischen, konstruktiven und technologischen Grundlagen entlang der gesamten Wertschöpfungskette – von der Leichtbauidee über Demonstrator und Referenzobjekt bis hin zur technologischen Umsetzung zur Überführung der Forschungsergebnisse in die Praxis.

Schlagnworte: Materialleichtbau, Strukturleichtbau, Systemleichtbau, Leichtbauarchitektur, Funktionsintegration, Leichtbautragwerk, faserverstärkte Verbundwerkstoffe, Faser-Kunststoff-Verbund, Faserbeton, Textilbeton, Hybridwerkstoffe, Leichtbau im Bauwesen

Abstract

In the last few years, lightweight construction in the building sector has gained more and more importance in the course of resource saving. Without a significant increase in efficiency, future-oriented construction and resource-conserving living is difficult to achieve. Optimized building, in the sense of the erection and maintenance of buildings with little use of material, energy and surface over the entire life time cycle of a building, requires lightweight design in terms of material, structure and technology.

In this thesis, a scientific overview of the current state of research on function-integrative lightweight construction in architecture is presented. Furthermore, advanced methods and research approaches were developed and applied, that allows the design, dimensioning and testing of novel high-performance supporting structures in lightweight design. The focus is on the development of high-performance, multi-functional material combinations and load-adapted structural elements, under the aspect of weight minimization in material and construction. Textile-reinforced composites have a broad range of material properties for optimized "tailor-made" lightweight design applications, since the thread architecture as well as the matrix can be varied within wide ranges and can adapted to the complex requirements in the building industry.

Within the scope of this thesis, methods and solutions are examined in the field of: multifunctional fiber-reinforced plastics (FRP), function-integrated fiber-reinforced composites with mineral matrix (TRC) and textile-reinforced hybrid composites (BetoTexG: combination of TRC and FRP). In this connection the creation of material, structural and technological foundations along the entire value chain is of central importance: From the lightweight design idea to the demonstrator and reference object, to the technological implementation for the transfer of the research results into practice.

- The future of building industry requires lightweight construction. -

Keywords: Lightweight building materials, lightweight structures, lightweight design, lightweight construction, functional integration, fiber-reinforced composite materials, fiber-reinforced plastics, fiber-reinforced concrete, textile-reinforced concrete, hybrid materials, lightweight design in construction engineering

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 2 | Problemstellung und Zielsetzung | 5 |
| 3 | Stand der Wissenschaft | 9 |
| 3.1 | Definition und Bedeutung | 9 |
| 3.2 | Leichtbau im Bauwesen | 10 |
| 3.2.1 | Tradition und Zukunft | 10 |
| 3.2.2 | Leichtbau des 20. Jahrhunderts | 11 |
| 3.2.3 | Leichtbaukonstruktionen des 21. Jahrhunderts | 14 |
| 3.3 | Materialleichtbau | 15 |
| 3.3.1 | Leichtbauwerkstoffe im Bauwesen | 15 |
| 3.3.2 | Textile Leichtbaustoffe | 17 |
| 3.3.3 | Faser-Kunststoff-Verbunde | 20 |
| 3.3.4 | Textilbeton | 25 |
| 3.4 | Strukturleichtbau | 30 |
| 3.4.1 | Struktur und Tragwerk | 30 |
| 3.4.2 | Klassifizierung von Bauweisen | 32 |
| 3.4.3 | Konstruktionsprinzipien | 33 |
| 3.5 | Systemleichtbau | 35 |
| 3.5.1 | Funktionsintegration | 35 |
| 3.5.2 | Bionisch inspirierte Konstruktionsprinzipien | 36 |
| 3.5.3 | Leichtbaupotentiale im Bauwesen | 38 |
| 4 | Leichtbautragwerke in hybrider Faser/Kunststoff-Verbundbauweise | 41 |
| 4.1 | Integrierte tragende GFK-Sandwich-(ITS)-Schale | 41 |
| 4.1.1 | Materialentwicklung | 42 |
| 4.1.2 | Tragverhalten | 43 |
| 4.1.3 | Materialcharakterisierung | 44 |
| 4.1.4 | Konstruktion der Referenzfassade | 46 |
| 4.1.5 | Integration von Funktionen | 47 |
| 4.1.6 | Fertigungstechnische Umsetzung | 48 |
| 4.1.7 | Statische Berechnung | 51 |
| 4.1.8 | Errichtung des Referenzobjekts „MeTeOr“ | 53 |
| 4.1.9 | Bewertung des Leichtbaugrades | 53 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4.2 | Modulare GFK-Tragwerke in Wabenbauweise..... | 56 |
| 4.2.1 | Formfindung und Tragstruktur..... | 56 |
| 4.2.2 | Materialkombination..... | 58 |
| 4.2.3 | Technologische Umsetzung..... | 58 |
| 4.2.4 | Materialcharakterisierung..... | 61 |
| 4.2.5 | Integration von textilbasierten SHM-und CM-Sensoren..... | 65 |
| 4.2.6 | Krafteinleitungen und Verbindungstechnik..... | 66 |
| 4.2.7 | Referenzobjekt: Interaktive Wabenbrücke Chemnitz..... | 72 |
| 4.2.8 | Ganzheitliche Bewertung der GFK-Wabenbauweise für Leichtbaubrücken..... | 80 |
| 5 | Faserbewehrte Leichtbautragelemente mit mineralischer Matrix..... | 83 |
| 5.1 | Fassadensystem in filigraner Faserbeton-Leichtbauweise..... | 84 |
| 5.1.1 | Materialentwicklung..... | 84 |
| 5.1.2 | Herstellung des Feinbetons..... | 85 |
| 5.1.3 | Materialcharakterisierung..... | 85 |
| 5.1.4 | Schalungssystem..... | 88 |
| 5.1.5 | Befestigungssystem..... | 89 |
| 5.1.6 | Referenzfassade „Poseidon“..... | 91 |
| 5.2 | Textilbewehrte Tragbetonelemente für den Lärmschutz..... | 91 |
| 5.2.1 | Materialsysteme..... | 94 |
| 5.2.2 | Fertigung textilbewehrter Tragbetonplatten..... | 95 |
| 5.2.3 | Kennwertbestimmung..... | 96 |
| 5.2.4 | Technologische Umsetzung..... | 100 |
| 5.2.5 | Referenzobjekt „Textilbewehrte Lärmschutzwand“..... | 101 |
| 5.3 | Textilbewehrte Beton-Schalenelemente..... | 106 |
| 5.3.1 | Werkstoffkomponenten..... | 107 |
| 5.3.2 | Bestimmung der Materialkennwerte..... | 107 |
| 5.3.3 | Formfindung nach dem Vorbild Natur..... | 108 |
| 5.3.4 | Flexible Schalungsformen..... | 109 |
| 5.3.5 | Abstandhalter..... | 111 |
| 5.3.6 | Referenzobjekt: Textilbewehrte Leichtbau-Schalen (TexLeS)..... | 113 |

| | | |
|----------|--|-----|
| 6 | Leichtbaukonstruktion in textildewehrter Hybridbauweise | 119 |
| 6.1 | Entwicklung des Textilbeton/GFK-Hybridwerkstoffs BetoTexG | 119 |
| 6.1.1 | Materialkomposition | 120 |
| 6.1.2 | Herstellung | 122 |
| 6.1.3 | Materialcharakterisierung der Komponenten und des Hybridverbunds | 122 |
| 6.2 | Simulation des Textilbeton-GFK-Hybridwerkstoffs BetoTexG | 126 |
| 6.3 | Befestigungssystem | 128 |
| 6.4 | Referenzobjekt: Concrete-Fiber-Igloo (CoFigloo) | 129 |
| 6.4.1 | Geometrische Abmessungen | 129 |
| 6.4.2 | Formwerkzeug | 130 |
| 6.4.3 | Fertigungstechnologie | 131 |
| 6.4.4 | Montage und Errichtung des Pavillons | 132 |
| 6.5 | Potential der BetoTexG-Bauweise | 133 |
| 7 | Zusammenfassung und Ausblick | 135 |
| 8 | Verzeichnisse | 137 |
| 8.1 | Literaturverzeichnis | 137 |
| 8.2 | Abbildungsverzeichnis | 151 |
| 8.3 | Tabellenverzeichnis | 155 |
| 8.4 | Anlagenverzeichnis | 156 |
| 9 | Anlagen | 157 |

0 Symbolverzeichnis

Lateinische Buchstaben

| Kurzzeichen | Einheit | Bezeichnung |
|-------------|-------------------------|--|
| A | - | Nichtbrennbare Baustoffe nach DIN 4102-1 |
| B | - | Brennbare Baustoffe nach DIN 4102-1 |
| E | GPa | Elastizitätsmodul |
| F | kN | Kraft |
| G | GPa | Schubmodul |
| H | mm | Krümmungshöhe |
| L | cm, m | Plattenlänge |
| L_v | Mm | Stützweite |
| M | kNm | Moment |
| R | MPa | Richtungsabhängige Basisfestigkeiten |
| $R_{u,28}$ | % | Innere Gefügeschädigungen im Betonverbund |
| T | °C | Temperatur |
| S | mm/m | Lineare Schwindung |
| X | - | Expositionsklasse |
| X_p | MPa | 5%-Fraktilwert |
| a | mm | Wabenbreite |
| b | mm | Probenkörperbreite |
| c_v | mm | Betonüberdeckung |
| d | mm, cm | Durchmesser |
| f_c | MPa | Druckfestigkeit (Beton) |
| f_{ct} | MPa | Biegezugfestigkeit (Beton) |
| g | kN/m, kN/m ² | Eigenlast, ständige Last |
| h | mm | Probenkörperhöhe (Materialdicke) |
| l | mm | Probekörperlänge |
| m | kg | Masse |
| m_{28} | g/m ² | Abwitterungsmenge nach 28 Frost-Tau-Wechseln |
| n | Stück | Anzahl der Lagen im Laminat |
| q | kN/m, kN/m ² | Veränderliche Last |
| s | kN/m, kN/m ² | Schneelast |
| t | h | Zeit |
| u | mm | Verschiebung, Durchbiegung |
| u_x | mm | Durchbiegungsbegrenzung (l/x) |
| v | kN/m, kN/m ² | Verkehrslast |
| w | kN/m, kN/m ² | Windlast |
| w_t | mm | Wassereindringtiefe |

Griechische Buchstaben

| Kurzzeichen | Einheit | Bezeichnung |
|----------------|-------------------|------------------------------------|
| α | 10^{-6} K | Thermischer Ausdehnungskoeffizient |
| γ | - | Sicherheitsbeiwert |
| ΔT | K | Temperaturunterschied |
| ε | - | Dehnung |
| λ | W/(mK) | Wärmeleitfähigkeit |
| ν | - | Querkontraktionszahl |
| ρ | kg/m ³ | Dichte |
| σ | MPa | Zug-/Druckspannung |
| τ | MPa | Schubspannung |
| φ | % | Faservolumengehalt |
| $\dot{\gamma}$ | s ⁻¹ | Scherrate |

Indices und Koordinatensysteme

| Index | Bezeichnung |
|---------|------------------------------------|
| b | Biege..., Bruch |
| bem | Bemessungswert |
| BZ | Biegezug |
| c | Beton |
| dyn | dynamisch |
| E | Erstriss |
| f | Biege... |
| max | Maximum |
| m | Mittelwert |
| p | Platte |
| s | Scheibe |
| Sys | System |
| t | Tangential, Zug |
| tex | Textilbeton |
| + | Zug |
| - | Druck |
| | parallel zur Faser |
| ⊥ | senkrecht zur Faser |
| 1, 2, 3 | Faseringepasstes Koordinatensystem |
| x, y, z | Globales Koordinatensystem |

Abkürzungen

| | |
|--------------------------|--|
| ABZ | Allgemeine Bauaufsichtliche Zulassung |
| AR-Glas | Alkaliresistente Glasfasern |
| BetoTexG | Hybridwerkstoff aus Textilbeton und GFK |
| BSt-M | Baustahlbewehrung: Matte |
| BSt-S | Baustahlbewehrung: Stab |
| BÜV | Bau-Überwachungsverein |
| Ca(OH) ₂ | Portlandit |
| CDF | Capillary Suction, De-icing Agent and Freeze-thaw-test |
| CEM | Zement |
| CFK | Carbonfaserverstärkter Kunststoff |
| CIF | Capillary Suction, Internal Damage and Freeze-thaw-test |
| CM | Condition-Monitoring |
| CMT | Cold-Metal-Transfer-Schweißen |
| CoFigloo | Concrete-Fibre-Igloo |
| C-A-H | Calcium Aluminat Hydrat |
| C-S-H | Calcium Silicat Hydrat |
| C-texClip | Positionierhilfe |
| C-texSpacer | Abstandhalter |
| C-texSpacer ⁺ | Kombination aus Positionierhilfe und Abstandhalter |
| EC | Eurocode |
| E-Glas | Aluminoborosilikatglas |
| EP | Epoxidharz |
| EPS | Expandiertes Polystyrol |
| ETFE | Ethylentetrafluorethylen |
| FB | Fachbericht |
| FE | Finite Elemente |
| FEM | Finite Elemente Methode |
| FKV | Faser-Kunststoff-Verbund |
| FM3 | Regellaminat nach DIN 18820: Mischlaminat aus unidirektional aufgebauten Glasfaser-Gelegen sowie Matten |
| FVG | Faservolumengehalt |
| g-Roving | Roving mit duromerer Matrix herausgelöst aus der textilen Bewehrung |
| GFK | Glasfaserverstärkter Kunststoff |
| GZG | Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit |
| GZT | Grenzzustand der Tragfähigkeit |
| IMA | In-Mould-Assembly |
| ITS-Schale | Integrierte tragende Sandwich-Schale |

| | |
|------------------|--|
| KLED | Klassen der Lasteinwirkungsdauer |
| LEED | Leadership in Energy and Environmental Design |
| LSW | Lärmschutzwand |
| M.-% | Masseprozent |
| M2 | Regellaminat nach DIN 18820: Mischlaminat aus quasiisotropen, mattenverstärkten Halbzeugen |
| MAG-KV | Multiaxialgewirk mit Kettfadenversatz |
| MeTeOr | Mensch Technik Organisation |
| MSG | Metallschutzgas-Schweißens |
| MW1 | Regellaminat nach DIN 18820: Mischlaminat |
| P _A | Ausgangspunkt |
| PAN | Polyacrylnitril |
| PCE | Polycarboxylatether |
| PE | Polyethylen |
| PP | Polypropylen |
| PR | Prüfreihe |
| PTFE | Polytetrafluorethylen |
| PU | Polyurethan |
| PVA | Polyvinylalkohol |
| PVDF | Polyvinylidenfluorid |
| SBR | Styrol-Butadien-Copolymer |
| SHM | Structural-Health-Monitoring |
| SLM | Selektives Laserschmelzen |
| SLS | Selektives Lasersintern |
| S _P | Sättigungspunkt |
| St | Stahl |
| TexLeS | Textilbewehrte Leichtbau-Schalen |
| TFP | Tailored Fiber Placement |
| TWB | Temperatur-Wechselbeanspruchung |
| UD | Unidirektional |
| UHPC | Ultrahochfester Beton |
| UP | Ungesättigter Polyester |
| Vol.-% | Volumenprozent |
| w/b | Wasser-Bindemittel-Verhältnis |
| WLG | Wärmeleitfähigkeitsgruppe |
| XPS | Extrudiertes Polystyrol |
| ZIE | Zustimmung im Einzelfall |
| ZrO ₂ | Zirkoniumoxid |

1 Einleitung

Die Architektur des 21. Jahrhunderts ist geprägt von der freien Formfindung und inspiriert von der Natur und der Vielfalt an Materialien und Funktionen. So etwa entstehen organische, aus der Funktion heraus entwickelte Formen sowie biomorphe Gebäudestrukturen, die eine Harmonie von Gebäude und Landschaft in Kombination mit der Zweckmäßigkeit der Architektur zum Ziel haben. Im Zuge der Bestrebungen zum nachhaltigen Bauen (sog. Green Building) rücken ressourceneffiziente Bauweisen in den Fokus. Besondere Vorteile für einen geringen Energieverbrauch während der Errichtung und Nutzung von Gebäuden bieten hier ökologische Baustoffe in Verbindung mit multifunktionalen Strukturkomponenten.

Beim Entwurf von Bauwerken ist der Formfindungsprozess von zentraler Bedeutung, wobei die Gestalt von Gebäuden dem umgebenden Raum, den Gegebenheiten des Bauortes und der Zeit angepasst wird. Dabei werden gegenwärtig die Formfindungsmethoden gegenüber traditionellen, heuristischen Gestaltungsansätzen neu interpretiert. Dafür kommen neue Computerverfahren zur Anwendung, die nicht nur auf statischen, sondern auf frei definierten Gesetzmäßigkeiten basieren. In Bezug auf die Gestaltung sind allerdings material- und technologiebedingte Restriktionen besonders zu berücksichtigen. Die Umsetzung der Formfindungserkenntnisse ist daher wesentlich von der Leistungsfähigkeit der Werkstoffe abhängig, wobei daraus neue Herausforderungen erwachsen. Von hohem Stellenwert sind sowohl die gestalterischen Erfordernisse als auch die Forderung nach Tragfähigkeit, Funktionsimplementierung sowie Ressourcen- und Energieeffizienz.

Die technische Basis dieser modernen Bauwerke bilden i. d. R. konventionelle Baumaterialien wie Stahl, Glas und Stahlbeton. Derartige klassische Konstruktionswerkstoffe stoßen jedoch im Hinblick auf die komplexen Anforderungen der neuen Bauwerksgeneration bezüglich Leichtbaugrad, Designfreiheit, Funktionalität und Effizienz schnell an ihre Grenzen. Innovative Entwürfe können somit von vornherein nicht verwirklicht oder nur mit sehr hohem Ressourcen- und Kostenaufwand in Bauwerke überführt werden. Zur ökologisch und ökonomisch effizienten Umsetzung der neuen Freiformarchitektur sind somit leistungsstarke und zugleich multifunktionale Werkstoffkombinationen sowie Fertigungstechnologien bereitzustellen. Dabei rücken neue Materialverbunde in Leichtbauweise in Kombination mit belastungsgerecht dimensionierten Tragstrukturen und integrierten Funktionen in den Fokus des Leichtbaus im Bauwesen.

Faserverstärkte Verbundwerkstoffe haben sich in vielen technischen Bereichen aufgrund ihrer hervorragenden spezifischen Eigenschaften als Leichtbauwerkstoffe bereits etabliert. Speziell die Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) sind in der Luft- und Raumfahrttechnik, im Fahrzeugbau sowie im Maschinen- und Anlagenbau weit verbreitet. Im Bauwesen kommen erste FKV-Komponenten beispielsweise bei der nachträglichen Verstärkung und Sanierung von Betonbauwerken und in Sekundärbereichen wie Fassade, technische Ausrüstung oder Belichtung zur Anwendung. Der steigende Bedarf an FKV-Strukturen ist nicht zuletzt auf die derzeit hohen Stahlpreise, die angestrebte Reduzierung der Transport- und Montagekosten sowie auf den Wunsch nach besonderer Gestaltungsfreiheit und Multifunktionalität zurückzuführen.

Ausschlaggebend für den Einsatz dieser noch jungen Werkstoffgruppe ist ferner das weite Spektrum der einstellbaren Eigenschaften, das gezielt auf verschiedenste Anforderungen zugeschnitten werden kann. Von besonderem Vorteil der Faserverbundwerkstoffe für Anwendungen im Bauwesen sind u. a. die hohe spezifische Festigkeit und Steifigkeit, die geringe Wärmeausdehnung, die hohe Wärmebeständigkeit und die geringe Korrosionsanfälligkeit. Des Weiteren sind bei glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK) die Eigenschaften, wie die elektrisch und thermisch isolierende Wirkung sowie die gute chemische Beständigkeit, die einfache mechanische Bearbeitung sowie die Integration von Funktionen von großer Bedeutung. Um das hohe Potential der FKV-Struktur als Konstruktionswerkstoff voll auszuschöpfen, ist durch die belastungsgerechte Wahl von Verstärkungsfasertyp, Faseranordnung, Faserorientierung, textiler Fadenarchitektur und polymerem Matrixsystem ein Optimum im Hinblick auf die gewichtsbezogenen Eigenschaften im Bauteil zu erzielen.

Dem Anwendungsspektrum der Faserverbundwerkstoffe in neuen Bauwerken werden dennoch durch teilweise kostenintensive Fertigungsverfahren, hohe Faserhalbzeugpreise und vor allem dem hohen Konstruktions- und Dimensionierungsaufwand Grenzen gesetzt. Der besondere Konstruktionsaufwand resultiert im Wesentlichen aus dem anisotropen Materialverhalten der FKV, das komplexe Anforderungen an allgemeine Gestaltungsregeln stellt. Neue effiziente Lösungsansätze sind daher Garant dafür, das Einsatzgebiet von FKV-Bauteilen auf tragende oder aussteifende Aufgaben zu erweitern.

Der im Bauwesen seit mehr als einem Jahrhundert bekannte Werkstoff Beton bietet für schlanke Schalen, weitgespannte Kuppeln, elegant gevoutete Brücken oder organische Bauten besondere Vorteile hinsichtlich Konturfreiheit und Leichtbaupotential. Diese Betontragwerke blieben aber örtlich oder zeitlich solitär, nicht zuletzt durch den relativ großen Aufwand bei der Herstellung. Der neue Verbundbaustoff „Textilbewehrter Beton“ (Kurzbezeichnung: Textilbeton) hingegen erlaubt neben der freien Formgebung die Herstellung extrem filigraner Leichtbautragwerke, was forschungsseitig an einigen Referenzbeispielen nachgewiesen wird.

Textilbeton besteht i. d. R. aus einer Feinbetonmatrix und belastungsgerechter textilbasierter Bewehrung, die gegenüber Umwelteinflüssen (z. B. Luftfeuchte und Chloride) korrosionsbeständig ist. Die im Stahlbetonbau aufgrund der Korrosionsanfälligkeit notwendigen Betondeckungen können somit erheblich reduziert werden. Lediglich eine geringe Betondeckung von wenigen Millimetern ist notwendig, um die korrosionsfreie Übertragung von Verbundkräften zwischen der druckfesten Feinbetonmatrix und der zugfesten Textilbewehrung sicherzustellen. Damit lassen sich dünnwandige Freiformflächen mit hohem Leichtbaugrad abbilden, die sich neben einem geringen Systemgewicht durch eine hohe Schlankheit auszeichnen.

Zur Etablierung des textilbewehrten Betons als Baustoff für tragende Anwendungen sind aufbauend auf den Ergebnissen der Grundlagenforschungen weiterführende, umfassende Untersuchungen zur vollen Ausschöpfung des Leistungsvermögens des Verbundwerkstoffs durchzuführen, wobei einer belastungsgerechten, gestreckten Anordnung von Textilstrukturen besondere Bedeutung zukommt. Auf Basis der Analysen zum Tragverhalten sind darüber hinaus statische Konzepte zu entwickeln, die den Rechenaufwand bei der Tragwerksbemessung minimieren.

Für die technische Überführung des Textilbetons in Bauwerke müssen ferner reproduzierbare Herstellungstechnologien zur Verfügung gestellt und Voraussetzungen für allgemeingültige Zulassungen geschaffen werden. Hieraus resultiert der besondere Forschungs- und Entwicklungsbedarf bei Anwendung derartiger Leichtbautragwerke im Bauwesen. Wesentliche Erkenntnisse und repräsentative Referenzobjekte hierzu sind Gegenstand dieser Arbeit.

Die neuen Leichtbauwerkstoffe erlauben – im Unterschied zu den klassischen Baustoffen – die hohen Anforderungen an moderne Bauwerke nächster Generation hinsichtlich Leichtbaugrad, Designfreiheit, Funktionsintegration sowie Ressourcen- und Energieeffizienz zu erfüllen. Für ihre Anwendung sind neue belastungs- und funktionsgerechte Lösungsansätze gefragt, die eine Bereitstellung intrinsischer Verbundwerkstoffe durch gezielte Kombination von festigkeits-, form- und funktionsgebenden Materialstrukturen gestatten.

Wesentliches Ziel ist dabei, leichte hochbeanspruchte Konstruktionen und neue Gestaltungsvarianten für filigrane Leichtbautragwerke mit hoher Funktionsintegration zu schaffen und zu etablieren. Von zentraler Bedeutung ist weiterhin die Schaffung von materialtechnischen, konstruktiven und technologischen Grundlagen entlang der gesamten Wertschöpfungskette – von der Leichtbauidee über Demonstratorkomponenten und Referenzobjekt bis hin zur Technologieentwicklung und Überführung in die Praxis (siehe Abb. 1.1). In der vorliegenden Arbeit werden hierzu Methoden und Lösungen anhand von Beispielen zu multifunktionalen Faser-Kunststoff-Verbunden, funktionsintegrierten faserverstärkten mineralischen Verbunden und Verbundstrukturen in textilbewehrter Beton-GFK-Hybridbauweise erarbeitet.

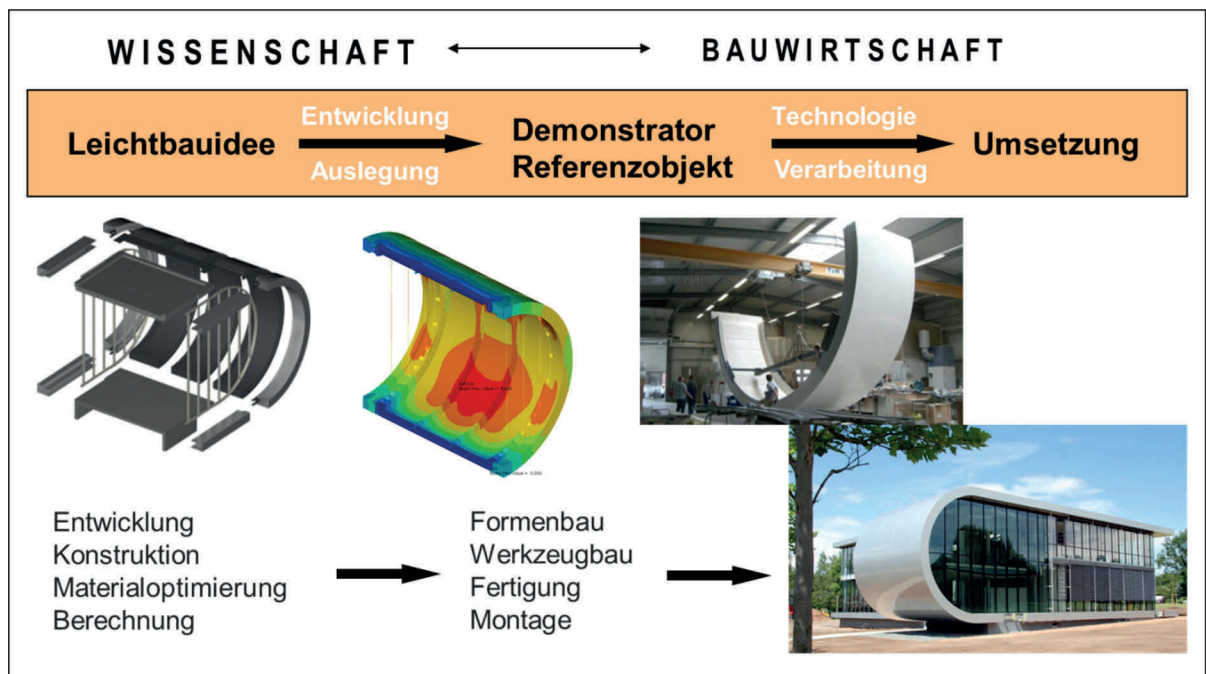


Abb. 1.1: Forschungsergebnisse von der Idee zur Umsetzung (GFK-Fassade des MeTeOr-Gebäudes der Technischen Universität Chemnitz)

2 Problemstellung und Zielsetzung

Der Leichtbau zählt zu den Schlüsseltechnologien vieler Industriebranchen und favorisiert ressourcen- und energieeffiziente Strukturbauteile und Konstruktionen mit belastungs- und funktionsgerechten Eigenschaften. Unabhängig vom Einsatzgebiet besteht der Anspruch des Leichtbaus darin, Systeme zu gestalten und zu entwickeln, die sich infolge Ausnutzung aller Varianten von Tragstrukturen, Werkstoffen und Herstellungstechnologien durch ein geringeres Gewicht bei gleichzeitiger Verbesserung der Eigenschaftscharakteristik und der Erhöhung der Gebrauchsgüte auszeichnen. Entscheidende Voraussetzungen für die Anwendung des Leichtbaus sind hochbelastbare Werkstoffe mit geringer Dichte, innovative filigrane Konstruktionen, die entsprechend der Hauptbelastungsrichtung dimensioniert sind, sowie integrierte intelligente Systeme zur Erfassung von Beanspruchungen.

Das Interesse an der Anwendung von Leichtbauprinzipien im Bauwesen ist im Wesentlichen in den 1960er Jahren aufgekommen. So etwa erkannte der Baumeister Prof. Frei Otto das hohe Potential des Leichtbaus für die Architektur, jedoch auch die Probleme bei der Anwendung in der Baupraxis [Ott82]: „Die Suche nach leichten Konstruktionen ist die Suche nach den Grenzen. Das Entwerfen der leichtest möglichen Konstruktionen ist das Herantasten an das physikalisch und technisch Machbare.“ Bereits damals wurde den Ingenieuren bewusst, dass der Leichtbau im Bauwesen entscheidende Vorteile zur Überbrückung von maximalen Grenzhöhen und Spannweiten bietet und dass durch konstruktiven Strukturleichtbau ein material- und energieeffizientes Bauen umgesetzt werden kann. Durch die fehlenden Hochleistungswerkstoffe war zur damaligen Zeit dem Leichtbau Grenzen gesetzt.

In den letzten Jahren gewinnt der Leichtbau im Bauwesen im Zuge der Ressourceneinsparung wieder stärker an Bedeutung, denn ohne eine deutliche Steigerung der Effizienz ist zukunftsfähiges Bauen und Wohnen nur schwer zu bewerkstelligen. Optimiertes Bauen, im Sinne der Errichtung und Unterhaltung von Bauwerken mit geringem Einsatz an Material, Energie und Fläche über den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes hinweg, bedarf des Leichtbaus in punkto Material, Struktur und Technologie (vgl. [Lem08]). Zudem werden neue Generationen von Bauwerken geschaffen, die stilistisch heterogen sind und keiner bestimmten Ästhetik folgen (siehe [Ree01]).

Die damit verbundene Designfreiheit verlangt somit nach leichtbaugerechten, leistungsstarken Materialien sowie integrativen Verbundbauweisen. Denn mit den klassischen Baustoffen wie z. B. Stahl, Holz, Stahl- oder Spannbeton kann die neue Architektursprache in Kombination mit der geforderten Nachhaltigkeit nur mit hohem Material- und Kostenaufwand umgesetzt werden. Zu weiteren Zielen des Leichtbaus im Bauwesen zählen, neben der Einsparung ökologischer Ressourcen, der Nachhaltigkeit und der freien Gestaltung, die belastungsgerechte Auslegung und die Integration von Funktionen.

Die Entwicklung neuer Hochleistungsverbunde und Technologien zu ihrer Herstellung gehen einher mit hohem Aufwand an Engineering, vor allem bei der Materialentwicklung, Konstruktion und Prüfung. Darüber hinaus werden komplexe Berechnungsalgorithmen zum statischen Nachweis des Tragwerks benötigt. Da es sich hier zumeist um unregelmäßige

Bauprodukte handelt, liegen noch keine genormten Prüfverfahren vor, so dass eine aufwendige Zulassung für jedes Bauobjekt im Einzelfall erfolgen muss. Hieraus resultiert enormes Forschungs- und Entwicklungspotential.

Im Forschungsbereich „Leichtbau im Bauwesen“ wird an der Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung der TU Chemnitz seit mehr als 10 Jahren die Thematik von neuartigen Leichtbaustrukturen in Bauanwendungen behandelt, wobei Hauptaugenmerk auf Materialentwicklung, Formfindung, Strukturauslegung und Technologieoptimierung gerichtet ist. Eine wesentliche Strategie ist dabei das fachübergreifende Denken und die interdisziplinäre Wissensgenerierung mit dem Ziel, die Erkenntnisse über den Leichtbau aus den Bereichen Maschinen- und Anlagenbau, Fahrzeugbau, Sportgerätetechnik, Luft- und Raumfahrttechnik in das zum Teil noch stark konservative Bauwesen zu überführen. Die Verknüpfung der einzelnen Kompetenzen ist schematisch in Abb. 2.1 dargestellt.

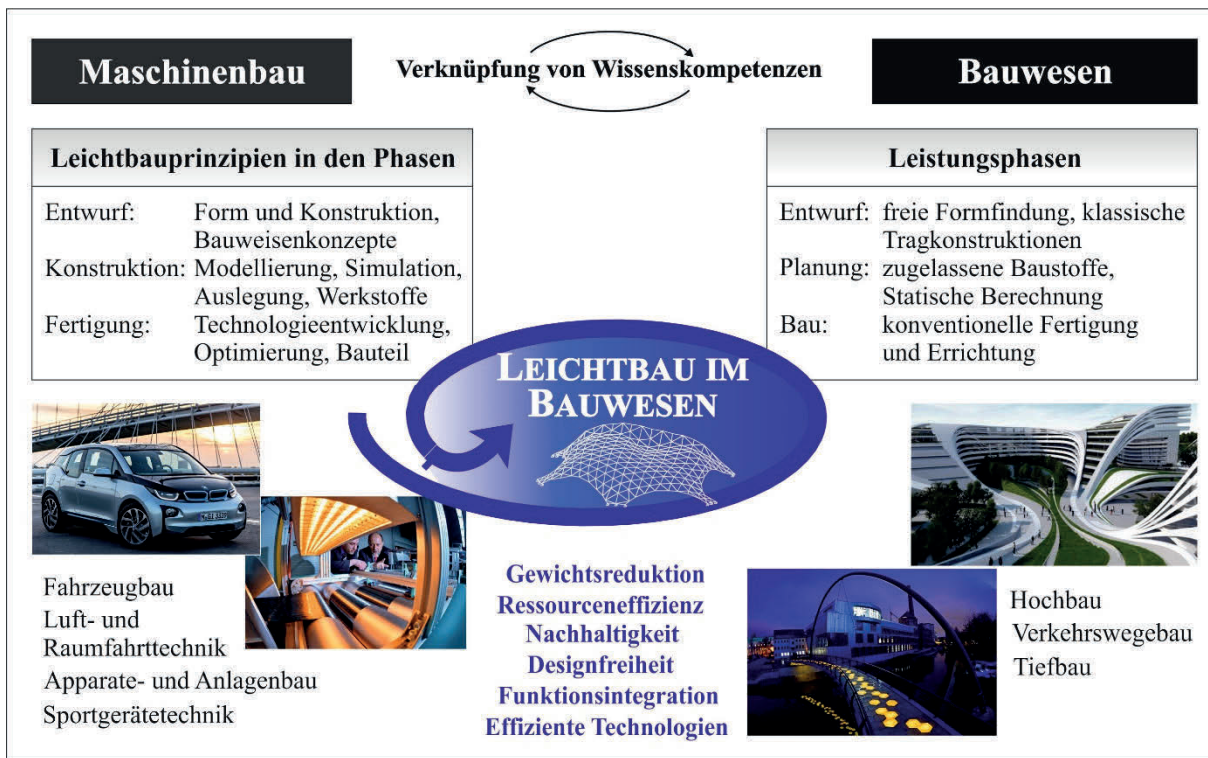


Abb. 2.1: Verknüpfung von Kompetenzen im Leichtbau

In der vorliegenden Arbeit wird ein wissenschaftlicher Überblick zum aktuellen Stand der eigenen Forschungen in Bezug auf funktionsintegrativen Leichtbau im Bauwesen gegeben sowie erweiterte Methoden und Ansätze abgeleitet, die eine Konzeption, Bemessung und Erprobung von neuartigen Hochleistungs-Tragstrukturen in Leichtbauweise gestatten. Dabei steht die Entwicklung leistungsstarker und zugleich multifunktionaler Werkstoffkombinationen und belastungsgerecht dimensionierter Strukturkomponenten unter dem Aspekt der Gewichtsminimalität in Material und Konstruktion im Fokus. Ein breit gefächertes Eigenschaftsprofil für "maßgeschneiderte" Leichtbauanwendungen besitzen textilverstärkte Verbundbauteile, denn sowohl die Fadenarchitektur als auch die Matrix können in weiten Bereichen variiert und an die im Bauwesen vorliegenden komplexen Anforderungen angepasst werden.

Die wissenschaftlich-technische Grundlage dieser Arbeit bilden die im eigenen Forschungsbereich entwickelten faser- und textilverstärkten Leichtbautragwerke mit hoher Funktionsintegration und die zugehörigen neuen Technologien, die anhand von ausgewählten Referenzobjekten analysiert und bewertet werden. Für die konstruktive und technologische Umsetzung der Referenztragwerke werden neuartige Lösungsansätze vorgestellt, welche eine Anwendung der Methoden des Materialleichtbaus, Strukturleichtbaus und Systemleichtbaus beinhalten. Im Vordergrund stehen dabei leichte hochbeanspruchte Konstruktionen und neue Gestaltungsvarianten für filigrane funktionsintegrative Tragwerke und der Erkenntnistransfer der Forschungsergebnisse in die baupraktische Anwendung. Das Hauptanliegen der Arbeit ist ferner, neue Wege für den Leichtbau im Bauwesen der Zukunft zu beschreiten und anhand von repräsentativen Bauwerken nachzuweisen.

3 Stand der Wissenschaft

3.1 Definition und Bedeutung

Der Begriff Leichtbau bezeichnet branchenübergreifend die Entwicklungsstrategien zur Umsetzung technischer Anforderungen und Funktionen durch ein System verringerter oder minimaler Masse. Ziel des Leichtbaus ist neben der Reduzierung des Systemgewichts auch die Gewährleistung der geforderten Zuverlässigkeit und die Steigerung der hieraus resultierenden Material- und Energieeffizienz [Kro13-1]. Dabei sind zum Teil widersprüchliche Anforderungen zu erfüllen, wie z. B. höhere Fahrzeugsicherheit bei gleichzeitiger Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs im Automobilbau, größere Nutzlasten bei geringerem Flugzeuglärm in der Luftfahrttechnik oder aber längere Brückenspannweiten bei höherer Tragfähigkeit im Bauwesen [Dre07].

Die Generierung von Leichtbaustrukturen erfolgt durch die Auswahl neuer oder modifizierter Werkstoffe, die Nutzung alternativer Technologien und die Bereitstellung neuartiger Produktionsmethoden. Zudem wird ein ganzheitlicher Ansatz angestrebt, um ökonomische, ökologische und damit materialeffiziente Leichtbaukonzepte zu entwickeln. Im Fokus stehen vor allem die Ressourcenschonung und damit einhergehend die sukzessive Reduzierung der gesetzlich geforderten Emissionsgrenzen bei gleichzeitiger Verringerung der Herstellungs- und Betriebskosten. Dafür werden durchgängige, geschlossene Prozessketten mit hoher Produktivität, gesteigerter Effizienz und verbesserter Recyclebarkeit benötigt. Die Verringerung von Systemmassen minimiert dabei den Energieaufwand in allen Phasen des Produktlebenszyklus und hilft in vielen Bereichen umweltgerecht vorzugehen (vgl. etwa [Hen11, Nau14, Sch13]).

Der Leichtbau gewinnt in vielen Industriebranchen aus ökonomischen, ökologischen und funktionalen Gründen immer mehr an Bedeutung. So können durch den Leichtbau im Automobilbau, in der Luft- und Raumfahrt sowie im Schienenfahrzeugbau der Kraftstoffverbrauch und die Schadstoffemissionen wesentlich reduziert werden (z. B. in [Kro13-2, Kro12-1, Trö12]). „Je leichter, desto besser“ – Dieses Motto ist treibender Faktor, insbesondere in der Fahrzeugindustrie, wobei dem Leitgedanken „Das richtige Material an der richtigen Stelle zum richtigen Preis“ hoher Stellenwert zukommt (vgl. Abb. 3.1). Vor diesem Hintergrund soll durch neue Materialien, Leichtbaukonzepte und Fügeverfahren eine Gewichtsreduktion erreicht und gleichzeitig die geforderten Eigenschaftswerte (z. B. Steifigkeit, Bruchdehnung sowie statische, dynamische und hochdynamische Festigkeit) eingehalten werden (siehe dazu [Kro14, Sei15, Doe14, Bau14]). Hieraus resultiert der sog. Leichtbaugrad als Verhältnis von Struktureigenschaften zu Gewicht.

Im Maschinenbau lassen sich durch Gewichtsreduktion darüber hinaus eine höhere Dynamik bewegter Maschinenelemente und damit höhere Bearbeitungsgeschwindigkeiten erzielen (siehe etwa [Kro13-1, Iwa14, Nos13]). Demnach sind der Bereich des optimierten Leichtbaus und damit der aus Kostensicht akzeptierbare Leichtbaugrad wesentlich von dem jeweiligen Anwendungsfeld abhängig. So werden beispielsweise pro Kilogramm eingespartes Gewicht in den Branchen: Raumfahrt ca. 50.000 EUR, Luftfahrt ca. 5.000 EUR und Automobilbau ca. 5 EUR als Zusatzkosten toleriert.

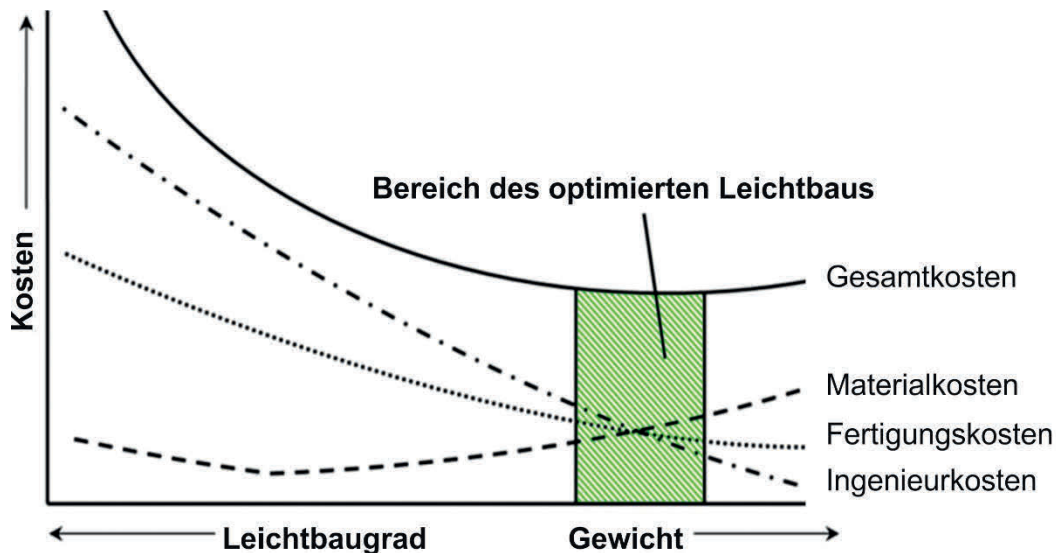


Abb. 3.1: Einflussfaktoren bei der Optimierung von Leichtbaukonstruktionen; in Anlehnung an [Kle05]

3.2 Leichtbau im Bauwesen

3.2.1 Tradition und Zukunft

Die Leichtbauarchitektur hat eine jahrtausendealte Tradition. So zeugen beispielsweise Bilder von Zelten der Nomadenvölker oder von leichten Hängebrücken aus Bambusseilen in China von dem hohen Leichtbaugrad jahrtausendealter Architektur. Insbesondere die transportierbaren, leicht zerlegbaren Zelte, genannt Tipis (Behausung), waren für die nomadische Lebensweise der Menschen der Frühzeit die optimale Bauform. Der Tipi ist ein konisches Zelt mit kreisförmigem Grundriss, dessen Durchmesser zwischen drei und sechs Metern variieren kann, und besteht aus einem Skelett aus dünnen und biegsamen Holzstäben, das mit einer halbrunden Membran bedeckt ist. Ursprünglich aus Fellen oder Häuten, später aus textilen Gelegen, Geweben aus Pflanzenfasern oder aus Tierhaaren hergestellt, waren Zelte leicht auf- und abzubauen, zu transportieren und an die verschiedensten Klimabedingungen anzupassen (siehe Abb. 3.2). Zelte waren viele Jahrtausende die am weitesten verbreiteten Behausungen, bis diese infolge Änderung der Lebensform zur Sesshaftigkeit durch feststehende, schwere und damit meist dauerhaftere Bauten ersetzt wurden.

Mit dem Beginn des 20. Jahrhunderts wurden in der Architektur erste Tendenzen in Richtung Leichtbau ergründet. So konnte beispielsweise die Erforschung von formbildenden Prozessen der Natur für die Entwicklung und Umsetzung von leichten Flächentragwerken genutzt werden. In den letzten Jahren rückt die Leichtbauweise im Zuge des Klimaschutzes und der Ressourceneinsparung immer stärker in den Vordergrund des zum Teil konservativen, von der Massivbauweise geprägten Bauwesens. So kann durch die Verwendung von Leichtbaustoffen, insbesondere von Faser-Kunststoff-Verbunden in Kombination mit belastungsgerecht dimensionierten Konstruktionen, die Reduktion des Eigengewichtes in Struktur und Krafteinleitung erreicht und damit leichter, nachhaltiger, schneller und kostengünstiger gebaut werden.

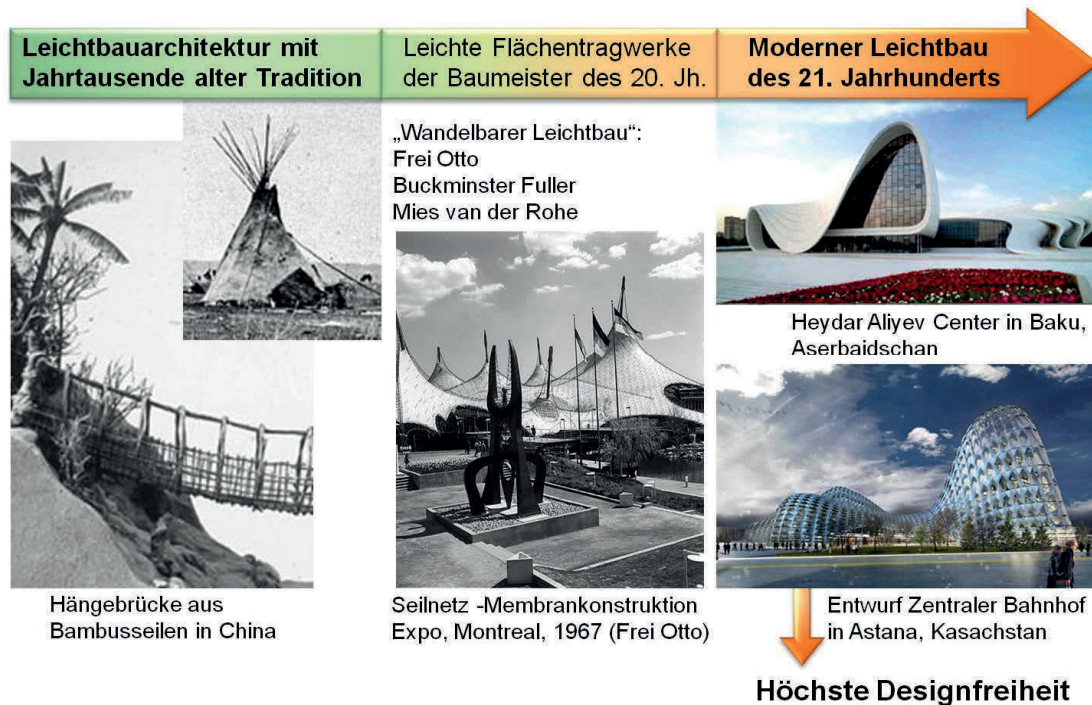


Abb. 3.2: Schematische Darstellung der Entwicklung: Von Tradition und Zukunft der Leichtbauarchitektur

3.2.2 Leichtbau des 20. Jahrhunderts

Anfang des 20. Jahrhunderts wurde das Potential des Leichtbaus von namhaften Baumeistern, wie z. B. Wladimir Grigorjewitsch Schuchow, Richard Buckminster Fuller, Fritz Leonhardt oder Frei Paul Otto, wiederentdeckt. So wandte sich der französische Konstrukteur Jean Prouvé in den 1930er Jahren mit seiner Aussage „...wenn die Flugzeuge zusammengesetzt wären wie die Gebäude, würden sie nicht fliegen“ an Ingenieure, Architekten und alle anderen an der Gestaltung der menschlichen Umwelt beteiligten Konstrukteure. Damit verwies er auf die Notwendigkeit des Leichtbaus sowie die damit verbundenen Möglichkeiten der wirtschaftlichen Vorfertigung und Industrialisierung (vgl. z. B. [Bai04]).

Fritz Leonhardt definierte den Leichtbau als eine notwendige wirtschaftliche und bautechnische Forderung seiner Zeit und erklärt in seinem Aufsatz in der Zeitschrift *Bautechnik* 1940 [Leo40]: „Die verfügbaren wertvollen Stoffe müssen sparsam und zweckmäßig verwendet werden. Beide Forderungen führen im Bauwesen zu hochwertigen Leichtbauweisen, deren Entwicklungen im Brücken- und Hochbau noch in den Anfängen steckt“. Insbesondere fokussiert Leonhardt den Entwicklungsstau im Stahlleichtbau, der im Rückstand im Vergleich zu anderen Bautechniken steht. Zukünftig sollte als Ziel gesetzt werden „...mit einem Bauteil möglichst viele Anforderungen zu befriedigen und vor allem raumabschließende Flächen gleichzeitig zum Tragen heranzuziehen“. Leonhardt nennt als Analogie das Beispiel des Strohhalms, dessen leichtes Zellenrohr bei geringsten Abmessungen eine hohe Tragfähigkeit gewährleistet. Den Flugzeugbau führt er als technischen Vorreiter an, denn hier haben sich neueste Konstruktionen aus biege- und verwindungssteifen dünnwandigen Rohren bereits als tragfähig bewährt (etwa [Web11]). In seinem Lebenswerk konnte Leonhardt zahlreiche Leichtbaukonstruktionen in der Architektur umsetzen und insbesondere in der Bemessung und Berechnung von weitgespannten Konstruktionen und leichten Flächentragwerken eine Vorreiterrolle übernehmen (Abb. 3.3).



Abb. 3.3: Theodor-Heuss-Brücke in Düsseldorf, Planer: F. Leonhardt (Foto: Till Niemann)

Nicht nur in Deutschland, sondern auch weltweit wurden in den 1950er Jahren leichte Flächentragwerke etabliert. Einer der wichtigsten Vertreter der Leichtbauarchitektur in den USA ist der Architekt Richard Buckminster Fuller. Bereits 1930 beschäftigte er sich mit der konstruktiven Umsetzung des ressourceneffizienten Leichtbaus in der Architektur. Fuller war überzeugt, dass in der Entwicklung neuer Technologien in der Bautechnik eine Chance liegt, Armut, Hunger und Kriege für immer zu überwinden – unter der Voraussetzung, dass die Ressourcen optimiert eingesetzt werden (vgl. [Web11]). Ziel seiner Entwicklungen war die Einsparung von Material sowie Übertragung von maximalen Lasten durch wenig Gewicht, so dass Werkstoffe effizient eingesetzt werden sowie die Optimierung der Konstruktion hinsichtlich Geometrie erfolgt. Als einer der Wegbereiter des wandelbaren Leichtbaus entwickelte Fuller weitgespannte zugbeanspruchte Konstruktionen hoher Stabilität. Durch das von ihm erstellte „Tensegrity-Modell“ können nahezu unendliche Weiten leicht überspannt werden.

Der Begriff *Tensegrity* ist aus „tension“ (Zugspannung) und „integrity“ (Integrität, Vollständigkeit) abgeleitet und umfasst ein strapazierfähiges Stabwerk, das aus Druck- und Zugelementen besteht [Edm87]. Die stabförmigen Druckelemente sind dabei voneinander gelöst und berühren sich nicht. Als Zugelemente werden Seile eingesetzt, die mit den Druckstäben verbunden werden können und so ein in sich geschlossenes sphärisches System bilden (vgl. Abb. 3.4, li.). Werden die hervorragenden mechanischen Eigenschaften derartiger Tragwerke gezielt ausgenutzt, so lassen sich mittels „Tensegrity-Modell“ weitgespannte Kuppeln generieren, mit deren zunehmender Größe die Tragkraft überproportional gegenüber dem Eigengewicht wächst [Ful74]. Für die Entwicklung von Leichtbaukonstruktionen sind vor allem Fullers systematische Grundlagenforschungen zu Geometrie und Struktur von Bedeutung, die ihn zu materialminimierten geodätischen Strukturen führten (siehe Abb. 3.4, re.: geodätischer Dom für Expo 1967).



Abb. 3.4: Fullers Tensegrity-Modell (li.); US-Pavillon zur Expo in Montreal 1967 (re.)

Neben Fuller gilt als weiterer Revolutionär des mobilen, ökonomischen Leichtbaus im Bauwesen der in Chemnitz geborene Frei Paul Otto. Bereits in den 1960ern beschäftigte sich Otto mit der Umsetzung des Leichtbaugedankens nach dem Vorbild der Natur. „Mit weniger mehr leisten – das ist die Maxime der Entwicklung in der Natur und in der Technik. Kräftiger und zugleich leichter sein“, kennzeichnet das gemeinsame Prinzip Leichtbau [Ott88]. Durch sparsame Anwendung hochwirksamer Baustoffe und durch Ausnutzung der Trageigenschaften räumlicher Systeme entstehen leichte, bewegliche Bauwerke ohne wesentliches Eigengewicht. Die Konstruktion schrumpft auf das unbedingt Notwendige zusammen“ und folgt der „Ästhetik des Minimalen“ (siehe [Jae05]).

Zeltartige Dachkonstruktionen gehören zu den bekanntesten Bauwerken Frei Ottos. Dabei entwickelte er die optimale Form der leichten Flächentragwerke anhand von Experimenten mit generischen Modellen. Beispielsweise tauchte er Drahtmodelle in Seifenlauge, so dass die Tragkonstruktion aus Draht von einer Seifenhaut mit dem geringstmöglichen Flächeninhalt, einer sog. Minimalfläche, überspannt wurde.

Die Gestaltung von Leichtbaukonstruktionen soll nach den Bauprinzipien der Natur erfolgen. So orientierte sich Otto bei seinen Konstruktionen zumeist an biologischen und physikalischen Entstehungsprozessen, die er „von der Natur abgelauscht“ hatte. „Ziel ist es den Bau mit der Natur in Einklang zu bringen“ [Ott11]. Inspiriert vom Baumeister Natur entstehen natürliche anpassungsfähige, hochfeste Leichtbaukonstruktionen mit minimalem Material- und Energieaufwand bei bestmöglicher Erfüllung der Funktionen, die im Einklang mit der Natur erbaut werden. Otto untersuchte u. a. Kieselalgen, Spinnennetze, Zellen, Knochen, Stämme, Wasserwirbel und Seifenblasen, um für künstliche Konstruktionen brauchbare Gesetzmäßigkeiten abzuschauen. Das Entwerfen leichter Konstruktionen ist das Arbeiten an den Grenzen, das Herantasten an das physikalisch und technisch Machbare [Ott82].

Auf Grundlage seiner Forschungen zu zugbeanspruchten Flächentragwerken entstanden neben den Zeltkonstruktionen weitere elementare Formen wie z. B. der Pneu, Gitterschalen und Seilnetze. Das natürliche Formungsprinzip der Entstehung von zeltartigen Dachkonstruktionen übertrug Otto dann auf die Seilnetze, indem er diese Netze aufhängte, deren Form stabilisierte und sie schließlich umkippte. Auf Basis dieser Modellstatiken entstanden zahlreiche Bauwerke, u. a. die Seilnetz-Membrankonstruktion für die Expo in Montreal 1967; Schirme in Medina 1971 (Abb. 3.5, li.), Membran-Dachkonstruktion des Olympiastadions München (74.800 m² überspannte Fläche, siehe Abb. 3.5, re.).

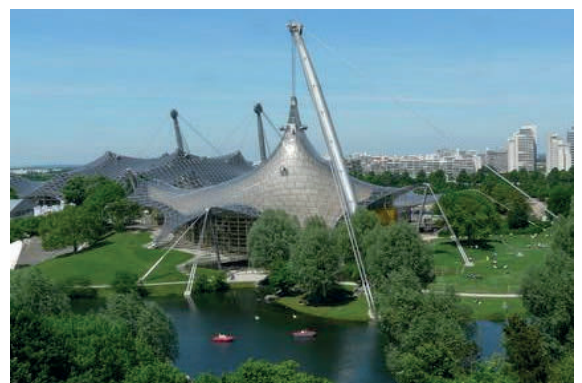


Abb. 3.5: Schirme in Medina 1971 (li.), Dächer des Olympiastadions 1972 (re.)

Frei Ottos Arbeiten im Leichtbau, mit Seilnetzen, Gitterschalen und anderen zugbeanspruchten Konstruktionen machten ihn zu einem der bedeutendsten Architekten des 20. Jahrhunderts sowie zum Wegbereiter des Leichtbaus im Bauwesen.

Bis zu seinem Tod im März 2015 beschäftigte sich Otto mit dem Leichtbau, der insbesondere in der Architektur des 21. Jahrhunderts durch die nachhaltige energieeffiziente und anpassungsfähige Bauweise in Kombination mit dem Wunsch nach freier Formfindung neue Bedeutung erlangt. „Die Zukunft hat schon begonnen. Die Architektur der Zukunft ist mobil, sie ist beweglich, sie muss beweglich sein, da jede Stabilität die Veränderungen, die notwendig sind, wenn es eine Zukunft geben soll, behindert. Der Baustoff darf dabei mit seinen Merkmalen keine Einengung der Formen zulassen. Wir benötigen Formfreiheit der Baustoffe. Formen ergeben sich aus dem Material und der Technik sowie der Technologie. Die dafür gegebenen Möglichkeiten in unserer Region Chemnitz bieten beste Voraussetzungen, einen wesentlichen Beitrag zur Zukunft des Bauens zu leisten...“ [Ott11].

3.2.3 Leichtbaukonstruktionen des 21. Jahrhunderts

Der technische Anspruch des Leichtbaus besteht darin, in den verschiedensten Bereichen Systeme zu gestalten und herzustellen, die sich bei Ausnutzung aller Varianten von Konstruktionen, Werkstoffen und Herstellungstechnologien durch ein reduziertes Gewicht bei gleichzeitiger Erhöhung der Gebrauchsgüte auszeichnen. Entscheidende Voraussetzungen für die breite Anwendung des Leichtbaus sind neben den leichten und hochfesten Werkstoffen die exemplarische Umsetzung innovativer Konstruktionen, die Erfassung des Belastungs- und Beanspruchungszustandes sowie die belastungsgerechte Dimensionierung (vgl. [Bai04]).

Das Entwerfen von Leichtbaukonstruktionen kann grundsätzlich in drei verschiedene Kategorien unterteilt werden: dem Materialleichtbau (auch Stoffleichtbau), dem Strukturleichtbau (auch Formenleichtbau) und dem Systemleichtbau. Diese werden im Allgemeinen auf unterschiedliche Art miteinander kombiniert. Die Substitution von Werkstoffen höherer Dichte durch leichtere Materialien und Werkstoffkombinationen unter Beibehaltung oder Steigerung von Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften wird als *Materialleichtbau* bezeichnet. Dabei erfolgt die Gewichtsreduzierung der Konstruktion durch das verwendete Material.

Beim *Strukturleichtbau* werden Komponenten und Systeme unter Nutzung von neuen Strukturen leichter ausgeführt, was eine Ermittlung und Optimierung der Art, Anzahl und Anordnung der Baugruppen, aus denen die tragende Struktur mit minimalem Gewicht gebildet wird, umfasst. Der *Systemleichtbau* favorisiert die leichtbaugerechte Optimierung der Tragkonstruktion. Dabei wird angestrebt, durch die angepasste Dimensionierung von Komponenten das Funktionsverhalten einer Konstruktion zu verbessern. So entstehen multifunktionale Bauteile und Konstruktionen, die z. B. neben lastabtragenden Eigenschaften weitere Funktionen wie Wärmedämmung, Monitoring etc. vereinigen.

Die Anwendung der Leichtbauprinzipien im Bauwesen ist heute wichtiger denn je. Denn die Bauwerke des 21. Jahrhunderts sind stark von der freien Formfindung, Ressourcen- und Energieeffizienz sowie Funktionsintegration geprägt (vgl. Abb. 3.6). Zudem werden immer größere Spannweiten benötigt, so dass die Gewichtsminimalität entscheidende Voraussetzung für die Umsetzung der Bauwerke ist.

Da hier konventionelle Baumaterialien wie Stahl, Glas oder Stahlbeton an ihre Grenzen stoßen, bedarf es zur ökologisch und ökonomisch effizienten Verwirklichung der nachhaltigen Freiform-Architektur leistungsstarker, multifunktionaler Werkstoffe sowie Fertigungstechnologien und Tragwerks-Überwachungssysteme. Hierfür bieten neue Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde in Leichtbauweise, kombiniert mit belastungsgerecht dimensionierten Tragstrukturen und integrierten Sensoren, entscheidende Vorteile.



Abb. 3.6: Yamuna-Brücke in Waziraba, Indien (li.), Spannbandbrücke in Oberhausen (re.)
(Entwurf: Schlaich, Bergermann & Partner)

3.3 Materialleichtbau

Ziel des Materialleichtbaus ist die Minimierung des Eigengewichtes einer Konstruktion durch den Einsatz von Leichtbaumaterialien, wobei vornehmlich Werkstoffe und Verbunde mit hohen spezifischen mechanischen Eigenschaften zur Anwendung kommen. Dabei wird der für die Bemessung entscheidende Kenngrößenquotient danach festgelegt, ob es sich bei der Dimensionierung eines Bauteils um beispielsweise ein Steifigkeits-, Festigkeits-, Stabilitäts-, Duktilitäts- oder Dämpfungsproblem handelt. Im Allgemeinen müssen sogar mehrere Grenzzustände beachtet werden, was zu einem multikriteriellen Problem führt. Bei Leichtbauwerkstoffen, wie z. B. bei Faser-Kunststoff-Verbunden, spielen bei der Dimensionierung vorhandene Lastkombinationen und Lastkollektive sowie die Lasthistorie und Grenzwerte der pseudoplastischen Deformationen eine wichtige Rolle. Somit ist eine differenzierte Betrachtungsweise der Qualität von Leichtbaustoffen nötig, die nicht allein auf Verhältniszahlen über die Leistungsfähigkeit von Werkstoffen, wie der sog. „Leichtbaukennzahl“ beruht (siehe [Sob07]).

3.3.1 Leichtbauwerkstoffe im Bauwesen

Die Gruppe der Leichtbauwerkstoffe wird branchenübergreifend definiert als Werkstoffe mit vergleichsweise geringer Dichte, wobei die Anforderungen teilweise stark differieren. So erfordert der Einsatz von Leichtbauwerkstoffen im Fahrzeugbau neben der hohen spezifischen Festigkeit und Steifigkeit, ein gutmütiges Crashverhalten, optimale Dämpfungseigenschaften, Verschleiß- und Kriechbeständigkeit, eine kosteneffiziente Fertigung sowie eine gute Reparaturfähigkeit. Von Leichtbauwerkstoffen im Bauwesen wird demgegenüber in erster Linie eine ausreichende statische Tragfähigkeit und Stabilität bei Anwendung in Bauwerken gefordert. Des Weiteren rücken neben der Forderung nach Gewichtsminimalität, weitere mechanische Anforderungen wie dynamische Festigkeit und bauphysikalische Restriktionen wie Wärme-, Schall- und Brandschutz sowie Dauerhaftigkeit in den Fokus (siehe Abb. 3.7).



Abb. 3.7: Übersicht zu Anforderungen an Leichtbauwerkstoffe für den Einsatz in Bauwerken

Für die Umsetzung des ressourceneffizienten Leichtbaus im Bauwesen sind Leichtbauwerkstoffe erforderlich, die nicht nur den Herstellungsprozessen in der Bauindustrie genügen, sondern auch hohes Leichtbaupotential für Tragwerke aufweisen und wirtschaftlich gefertigt werden können (z. B. [Deg09]). So kommen neben Baustoffen mit geringer Dichte auch hochfeste, zumeist anisotrope Werkstoffverbunde in Betracht, die eine besonders filigrane Bauweise gestatten. In Abb. 3.8 werden Leichtbauwerkstoffe nach tragender und nichttragender Funktion unterschieden. Im Hinblick auf nachhaltiges Bauen konnte sich in den letzten Jahren die Holzverbundbauweise durchsetzen. Für Skelettbauten und Fassaden sind Leichtmetalle und Verbunde, ggf. auch in Kombination mit Glas prädestiniert. Aufgrund ihres hohen Potentials bezüglich Leichtbau und Funktionsintegration sind zudem: FKV, Textilbeton und textilbasierte Leichtbaustoffe von besonderem Interesse für tragende Anwendung in künftigen Bauwerken.

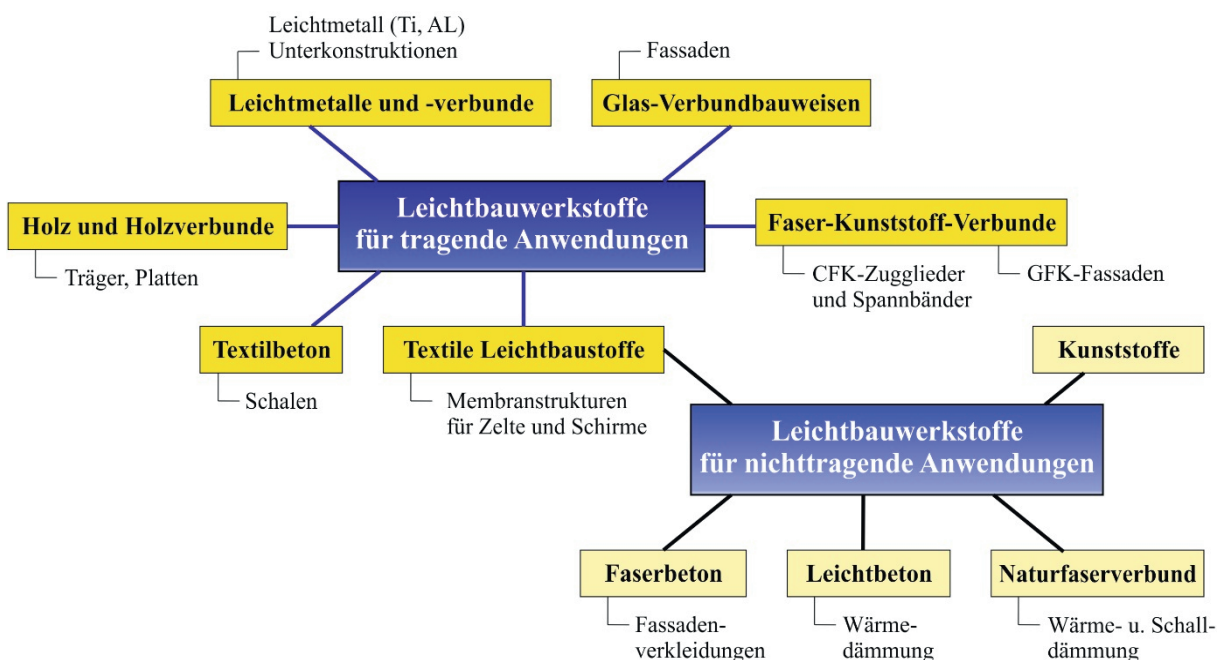


Abb. 3.8: Leichtbaustoffe für tragende und nichttragende Anwendungen im Bauwesen

3.3.2 Textile Leichtbaustoffe

Die Gruppe der textilen Leichtbaustoffe umfasst vorkonfektionierte beschichtete und imprägnierte Technische Textilien, wie z. B. linienförmige Textilien (Garne, Faserrovings usw.) und textile Flächengebilde (Gewebe, Gestricke, Gewirke, Vliesstoffe usw.). Diese werden vorrangig als Halbzeug, Preform oder als Endprodukt in Form von Membranen eingesetzt. Zur Herstellung von textilen Leichtbaustoffen kommt als Fasermaterial eine breite Palette an Werkstoffen mit unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften zum Einsatz, wobei eine grundlegende Klassifizierung nach industriell hergestellten und natürlichen Fasern vorgenommen werden kann. Industriell gefertigte Fasern besitzen zumeist reproduzierbare Eigenschaften, so z. B. hohe Festigkeiten und Steifigkeiten, jedoch sind die zugehörigen Herstellungsprozesse i. d. R. energieintensiv. Demgegenüber weisen Naturfasern eine geringe Dichte auf, lassen sich aus natürlichen Ressourcen gewinnen und können mit geringem Energieaufwand zu Naturfaserhalbzeugen verarbeitet werden. Für Tragwerke sind aufgrund der nicht reproduzierbaren Eigenschaften von Naturfasern nur wenige Anwendungen im Bauwesen bekannt (siehe dazu etwa [Voi13, Köh13]).

Im Vergleich zu den Naturfasern hat die Gruppe der industriell hergestellten Fasern eine weit- aus größere technische Bedeutung. Zu den in technischen Anwendungen am häufigsten eingesetzten Fasern zählen: Glas-, Kohlenstoff- und Aramidfasern, die sehr hohe spezifische Festigkeiten und Steifigkeiten gegenüber Metallen erreichen. Für die Herstellung von Membranen sind zudem Polyester-, Polyamid-, Polyethylen- und Polypropylenfasern von besonderem Interesse (z. B. in [Rie 03]).

Textile Halbzeuge

Bei der Herstellung von FKV-Bauteilen werden für das Verstärkungsgerüst unterschiedliche textile Verfahren angewendet, die je nach Einsatzzweck eine Fertigung von anforderungsgerechten Halbzeugen und Preformen gestatten. Eine Klassifikation der Verstärkungshalbzeuge kann dabei nach dem Imprägnierungsgrad vorgenommen werden: trockene, teilimprägnierte und vollimprägnierte (Prepreg) Faser- oder Textilhalbzeuge.

In der Regel werden textile Halbzeuge und Preformen aus Garnen hergestellt, die aus einer bestimmten Anzahl an kontinuierlichen (Filamentgarn) oder diskontinuierlichen Filamenten (Stapelfaser) bestehen. Als Textilgarne können natürliche oder synthetische Fasern (z. B. Baumwolle, Wolle, Polyester), zumeist gedreht oder gezwirnt, eingesetzt werden. In hochbeanspruchten Faserverbunden kommen am häufigsten ungedrehte Garne (Rovings) bestehend aus annähernd parallel zusammengefassten endlosen Einzelfäden (Monofilamente) zur Anwendung. Die parallel angeordneten Rovings weisen dabei den höchsten Faservolumengehalt und damit sehr hohe Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften bei geringem Gewicht auf [Gel08].

Konventionelle Halbzeuge für hochbelastete FKV-Tragstrukturen werden im Allgemeinen flächig mittels Textiltechnik ausgeführt. Zunehmend kommen auch dreidimensionale Faserhalbzeuge, sog. Spacer-Fabrics wie z. B. Abstandsgewirke und 3D-Gewebe, zum Einsatz, die eine Anpassung der Fadenarchitektur an räumliche Spannungszustände gestatten.

Zu den klassischen flächigen Halbzeugen zählen die Textilstrukturen: Matten, Gewebe, Gelege, Geflechte, Gestricke und Gewirke (vgl. Abb. 3.9) sowie die kombinierten Halbzeuge: Bi- und multiaxial verstärktes Gestrick oder Gewirk und variabelaxial verstärkte textile Halbzeuge: Multiaxialgewirk mit Kettfadenversatz (MAG-KV, Cetex Chemnitz) und Multiaxialgestrick mit Verstärkungsrovings (sog. TFP: Tailored Fiber Placement, IPF Dresden).

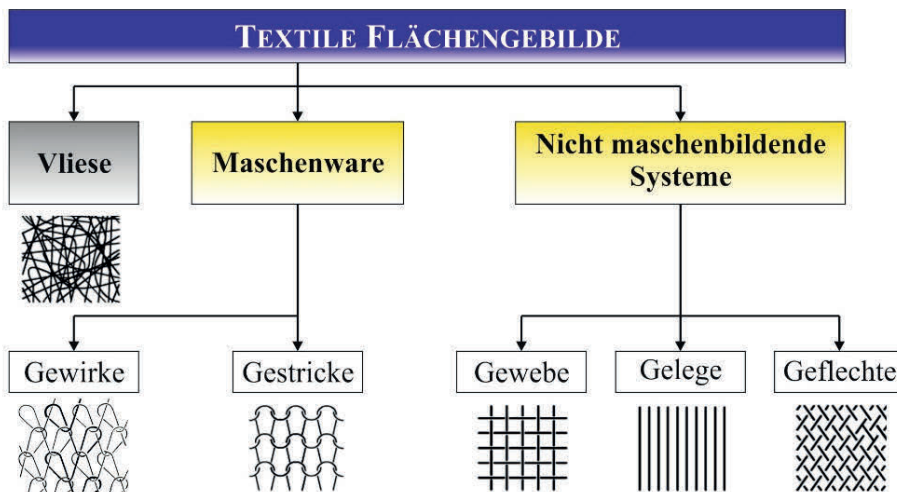


Abb. 3.9: Klassische Textilhalbzeuge [Gel08]

Die Vielfalt an textilen Verfahren erlaubt die Fertigung von Halbzeugen mit einem breiten Spektrum an Struktureigenschaften. So erlaubt etwa die große Variabilität der verschiedenen 2D- und 3D-Verstärkungsarchitekturen eine direkte Anpassung an die Hauptkraftflusslinien nach dem Vorbild der Natur. Die textilen Gebilde sind in verschiedenen Formen am Markt verfügbar und können im Weiteren für die Herstellung von Faserverbundstrukturen gemäß der Bauteilspezifikation konfektioniert, drapiert und imprägniert werden. Unterscheidungsmerkmale sind beispielsweise Bindungsart, Flottierung sowie Flächengewicht oder bei Rovings die Filamentanzahl und die Feinheit des Stranges [Kro07].

Die große Bandbreite der textilen Fertigungsverfahren weist darüber hinaus besondere Vorteile bei Mischbauweisen und bei Funktionsintegration auf, die vor allem in komplexen, hoch beanspruchten Leichtbauteilen des Fahrzeug- und Maschinenbaus, für die Bewehrung schlanker und filigraner Betonbauteile sowie für die Ertüchtigung und Instandsetzung von bestehenden Bauwerken gezielt genutzt werden [Off04]. Zudem lässt sich durch die werkstoffimmanente flexible Anpassung der Verstärkungsstruktur eine definierte Einstellung der Werkstoff- und Struktureigenschaften vornehmen.

Für tragende Anwendungen im konstruktiven Ingenieurbau werden besondere Anforderungen an die verwendeten Textilhalbzeuge gestellt. So stehen bei FKV vorrangig mechanische Eigenschaften wie Zugfestigkeit, Steifigkeit und Stabilität (Knicken, Beulen) im Vordergrund der Bauteilspezifikation, so dass Verbundwerkstoffe mit hohen Faservolumengehalten prädestiniert sind. Bei textilverstärkten Betonen sind zusätzliche Anforderungen im Hinblick auf Alkalibeständigkeit der Textilien und einen vollständig gestreckten Fadenverlauf der Halbzeuge zu erfüllen. Dies kann beispielsweise durch den Einsatz von alkaliresistenten Fasern, wie Carbon oder alkaliresistentem (AR)-Glas in Kombination mit einer zusätzlichen Beschichtung erfolgen, die zudem eine vollständige Faserstreckung erlaubt.

Textile Membranen

Der Begriff „Membran“ stammt aus der Biologie und bezeichnet ein dünnes Häutchen, das trennende und abgrenzende Funktion hat und zur Übertragung von Schwingungen sowie zur Kompensation von Zug- oder Druckänderungen dient. Textile Membranen umfassen i. d. R. dünne und hauptsächlich durch Zugkräfte beanspruchte Materialien, die in Abhängigkeit von der Werkstoffauswahl und der Konstruktion unterschiedliche Funktionen erfüllen, z. B. Trennen, Abgrenzen, Umhüllen, Filtrieren, Lastaufnahme und -verteilung, Wetter-, Schall- und Hitzeschutz (siehe etwa [Bai04, Mül09, Sed10]).

Daraus resultiert ein breites Anwendungsspektrum von Membranen, was insbesondere für das leichtbaugerechte „Textile Bauen“ (mobile Architekturen, Zelte, Geotextilien, Gebäudehüllen) von Bedeutung ist. In den bisherigen Entwicklungen wurde der Fokus auf hohe Zugfestigkeiten und Elastizitätsmoduli bei gleichzeitig niedriger Masse der Membranen gerichtet. Textilmembranen bilden somit auch die Grundlage für eine Vielzahl neuartiger technischer Leichtbaulösungen für den Hochleistungsbereich (vgl. dazu [Che11]).

Für den Einsatz von Membranen in Tragkonstruktionen werden spezifische Anforderungen definiert, die in Abhängigkeit zu den jeweiligen Einsatzbedingungen stehen. Die Einteilung erfolgt nach Schutz-, Dauerbeständigkeits-, Verarbeitungseigenschaften und mechanischen Kennwerten [Ham08]:

- Hohe Zugfestigkeit bei geringer Dehnung und Flächenmasse,
- Hohe Weiterreiß- und Schnittfestigkeit,
- Schwerentflammbarkeit (Baustoffklasse A2, B1 oder B2 nach DIN 4102),
- Hohe Witterungsbeständigkeit (Hagel, Sandsturm und UV-Strahlung),
- Hohe Biobeständigkeit (Schimmel, Mikroben),
- Hohe Dauerbeständigkeit gegen Alterung, Abnutzung, Verschmutzung, Ermüdung,
- Hohe Wasser- und Gasdichtigkeit,
- Sehr gute Kälte- und Wärmestabilität,
- Hohe Knickbeständigkeit,
- Gute Verschweißbarkeit, Vernäbarkeit, Bedruckbarkeit, Anbindung an feste Bauteile,
- Selbstreinigende Oberflächeneigenschaften,
- Gute optische Eigenschaften (Lichtdurchlässigkeit, geringe Vergilbungsneigung, Farbechtheit),
- Gute Recyclingfähigkeit,
- Hoher Lärm- und Wärmeschutz.

Die mechanischen Anforderungen können oft nur dann erfüllt werden, wenn die Membranen im Unterschied zu reinen Folienaufbauten (z. B. pneumatisch vorgespannte Luftkissen aus Ethylentetrafluorethylen(ETFE)-Folie) einen zusätzlich eingebetteten Festigkeitsträger in Form einer Textilverstärkung aufweisen. Diese ist an ihrer Oberfläche verwendungsangepasst behandelt, etwa durch Beschichtung oder Folienkaschierung [Che11].

Membranen für Anwendungen im Bauwesen bestehen i. d. R. aus einem beidseitig beschichteten textilen Festigkeitsträger. Ausgangsfaserstoffe für die lastaufnehmende Textilfläche sind Glas-, Polyester-, Polyamid-, Aramid- und Polyethylenfasern, die in Form von Rovings oder

Filamentgarnen mit verschiedenen Feinheiten zum Einsatz kommen. Bei der Beschichtung des Verstärkungstextils werden zumeist Polyvinylchlorid (PVC), Polyethylen (PE), Fluorkunststoffe (wie Polytetrafluorethylen (PTFE) und Polyvinylidenfluorid (PVDF)), Silikon, Polyurethan (PU) sowie Natur und synthetischer Kautschuk in Pasten-, Dispersions- oder Folienform verwendet. Zudem können Membranen je nach Anforderung zusätzliche (z. B. Acrylat basierte) Oberflächenlackierungen aufweisen. Die zwischen Textil und Beschichtung sowie zwischen Beschichtung und Oberflächenlackierung aufgetragenen Haftvermittler dienen zur Verbesserung der Verbundwirkung (siehe [Che11, Sed10, Mül09]).

In technischen Anwendungen sind als textile Flächengebilde derzeit vorrangig Gewebe im Einsatz, wobei Membranen aus folgenden Materialkombinationen am Markt verfügbar sind:

- PVC beschichtete Polyester-, Polyamid- und Aramidfasergewebe,
- PTFE beschichtete laminierte oder kaschierte Glas-, Aramid- und Polyesterfasergewebe,
- Tetrafluorethylen-Hexafluorpropylen-Vinylidenfluorid beschichtete ETFE-Gewebe,
- Fluorpolymerfilm laminierte Glasgittergewebe,
- Silikon beschichtete Glasfasergewebe,
- Polyurethan beschichtete Polyester- und Glasfasergewebe.

Textilmembranen für Architekturanwendungen können als gespannte, rahmen- oder luftgestützte Konstruktionen ausgeführt sein (siehe Abb. 3.10). Von der Bauweise her wird zwischen ein- und mehrlagigen Konstruktionen unterschieden, wobei sich einlagige Strukturen nur für Bauwerke ohne hohe bauphysikalische Anforderungen eignen. Demgegenüber können mehrlagige Konstruktionen zusätzlich wärmedämmende Funktionen erfüllen.



Abb. 3.10: Pavillon-Melbourne Showgrounds, Australien (Mehler Technologies GmbH)

3.3.3 Faser-Kunststoff-Verbunde

Die faserverstärkten Kunststoffverbunde bestehen grundsätzlich aus den drei Komponenten: Fasern, Matrix und Interface. Dabei sind die Einzelkomponenten derart miteinander zu kombinieren, dass ihre positiven spezifischen Eigenschaften im Verbund voll zum Tragen kommen und dass der richtungsabhängige Strukturaufbau an die äußeren Belastungen optimal angepasst ist. Die faserverstärkten Kunststoffe weisen i. d. R. eine ausgeprägte Anisotropie auf. So etwa unterscheiden sich die Festigkeiten oder Steifigkeiten in und senkrecht zur Faserrichtung um ein Vielfaches (siehe z. B. [Sch05]). In der nachfolgenden Abb. 3.11 wird der prinzipielle Aufbau der FKV dargestellt und die wichtigsten Funktionen der Ausgangskomponenten Verstärkungsfasern und Matrix sowie der zwischenliegenden Grenzschicht benannt.

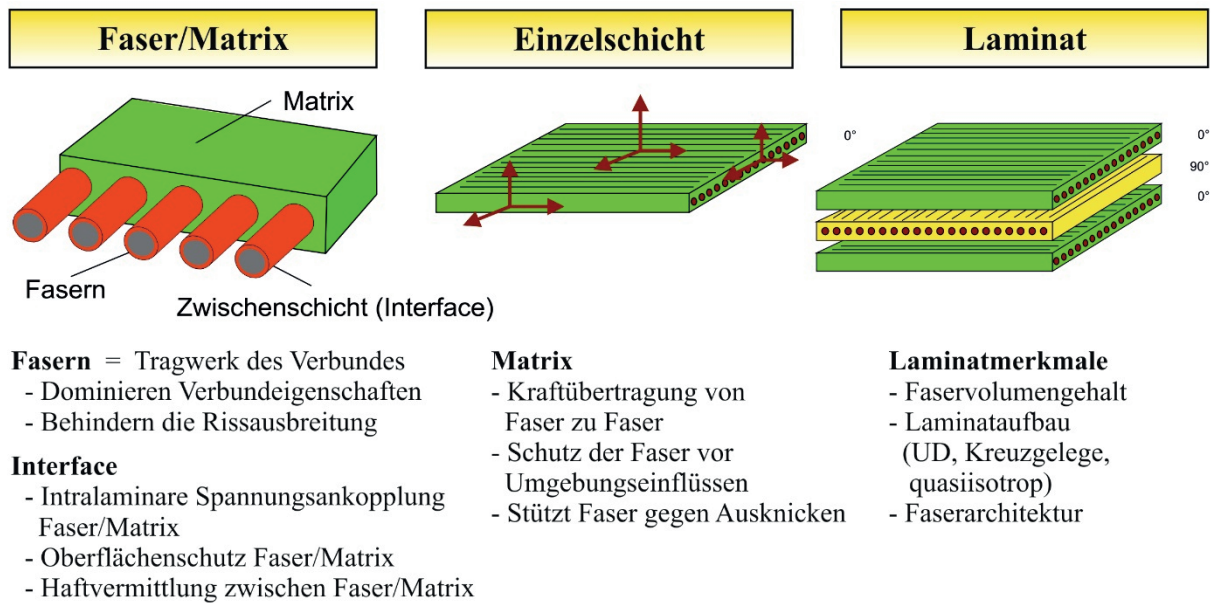


Abb. 3.11: Aufbau Faser-Kunststoff-Verbunde

Bei hochbelasteten FKV sollten die **Fasern** als Festigkeits- und Steifigkeitsträger im Verbund direkt in Richtung der Hauptkraftflusslinien angeordnet sein, womit sie wesentlich für die Lastübertragung verantwortlich sind. Zur vollen Ausnutzung des hohen Festigkeits- und Steifigkeitspotentials der Verstärkungsfasern, muss ferner die Bruchdehnung der **Matrix** viel höher sein als die der Fasern (Faustregel: Matrixbruchdehnung $> 3 \times$ Faserbruchdehnung). Erst damit kann die Matrix eine gleichmäßige Einleitung der Kräfte in die Fasern und den Abbau von Spannungsunstetigkeiten gewährleisten. Die Matrix beeinflusst wesentlich die Verbundeigenschaften senkrecht zur Faser; wie z. B. E_{\perp} , $G_{\#}$, $\nu_{\perp\parallel}$, R_{\perp} , $R_{\perp\parallel}$, $R_{\perp\perp}$. Ferner fixiert die Matrix die Fasern in ihrer geometrischen Anordnung, schützt sie vor Umwelteinflüssen (Feuchtigkeit und Chemikalien) und ist für die Form, Farbe und Oberfläche verantwortlich. Die Einleitung der äußeren Kräfte in die Fasern erfolgt im Allgemeinen über die Matrix, die ferner auch die Überleitung von Kräften zwischen den Fasern übernimmt (vgl. [Köh98, Fle95]).

Eine hohe Faser-Matrix-Haftung im **Interface** (hohe interlaminare Zug- und Schubfestigkeit) gestattet zudem eine Übertragung von hohen Beanspruchungen zwischen beiden Verbundkomponenten [Rid05]. Das Interface besteht dabei aus den Grenzflächen von Verstärkungsfasern und Matrix sowie dem Übergangsbereich und steht maßgeblich für das Wechselwirkungs- und Adhäsionsvermögen der beteiligten Materialkomponenten [Ehr04].

Um das hohe Potential der FKV-Struktur als Konstruktionswerkstoff voll auszuschöpfen, muss durch die belastungsgerechte Wahl der Verstärkungsfasern, der Faseranordnung, der Faserorientierung, der textilen Fadenarchitektur und des polymeren Matrixsystems ein Optimum an gewichtsbezogenen Eigenschaften im Bauteil erzielt werden. Als Verstärkungsfasern kommen dabei hauptsächlich Hochleistungsfasern aus Glas oder Carbon wegen ihrer hohen spezifischen Zugsteifigkeit und -festigkeit zum Einsatz [Gel08]. Weitere Faserarten sind Aramid- und Kunststofffasern. Seit kurzem werden auch verschiedene Naturfasern für Anwendungen beispielsweise im Automobilbereich untersucht und zum Teil bereits in Serienbauteilen integriert (etwa [Rin12, Bür14]).

Großes Potential für Leichtbauanwendung besitzen zudem die für technische Bauteile wiederentdeckten Basaltfasern, die derzeit vorwiegend im Behälter- und Fahrzeugbau verwendet werden. Aufgrund der guten chemischen Beständigkeit und Temperaturfestigkeit sind diese mineralischen Fasern auch für den künftigen Einsatz im Bauwesen bestens prädestiniert. Da jedoch bei Fasern mineralischen Ursprungs die mineralogischen Bestandteile variieren, können auch die Eigenschaften von Basaltfasern in bestimmten Grenzen schwanken, was der breiten Anwendung im Hochleistungsbereich entgegen steht (in [Lin14, Ost14]).

Neben der Verstärkungsfasertypen ist zudem der Anteil der Fasern im Verbund entscheidend, wobei dieser u. a. von der textilen Verstärkungsstruktur abhängig ist. Zur Armierung hochbelasteter FKV-Bauteile werden vorrangig textile Flächengebilde mit unidirektionalen Fasern genutzt, die eine ausgeprägte Anisotropie aufweisen. Weitere häufig verwendete Verstärkungstextilien sind zwei- und dreidimensionale Gewirke sowie Gewebe. Aktuelle Forschungen befassen sich in diesem Themenfeld mit der Entwicklung von effizient hergestellten textilen Halbzeugen mit beanspruchungsangepassten Faserverläufen (z. B. [Nen12, Trö14]).

Zu den typischen polymeren Matrices von FKV-Bauteilen zählen Duromere und Thermoplaste. Bedingt durch ihre positiven Materialeigenschaften sind ungesättigte Polyesterharze, Epoxid-, Vinylester- und Phenolharze sowie Polypropylen, Polyamid und als hochtemperaturbeständige Matrixsysteme z. B. Polyetheretherketone von hohem Stellenwert. Gegenstand von Forschungsvorhaben sind derzeit Harze auf Basis nachwachsender Rohstoffe für FKV-Bauteile z. B. im Bereich von Innenverkleidungen in Fahrzeugen [Bür14].

Für Anwendungen im Bauwesen sind Duroplaste, insbesondere ungesättigte Polyester-, Epoxid- und Phenolharze aufgrund ihrer hohen Alterungsbeständigkeit, Temperaturstabilität und ihrer einfachen Verarbeitung bestens geeignet [Bay 04]. Duroplaste werden durch das Vermischen der beiden Komponenten Harz und Härter verarbeitet und durch Härten vernetzt. Im ungehärteten Zustand zeichnen sich Duroplaste durch eine geringe Viskosität aus, wodurch eine sehr gute Benetzung der Verstärkungsfasern zur Erzielung hoher Verbundfestigkeiten und Steifigkeiten erreicht wird. Im Unterschied dazu führt die hohe Viskosität bei thermoplastischen Kunststoffen zu einer schlechteren Benetzung der Verstärkungsfasern [Gel08].

FKV-Strukturen in Tragwerken unterliegen i. d. R. mehrachsigen Beanspruchungszuständen, so dass für die optimale Werkstoffausnutzung der Laminataufbau belastungsgerecht auszuführen ist. Dafür müssen die Einzellagen eine optimale Faserausrichtung aufweisen, was im Allgemeinen einen unstetigen Schichtaufbau mit hohen Steifigkeitssprüngen entlang der Dicke zur Folge hat [Sch05]. Um dabei schwindungsbedingte Verkrümmungen der Verbunde zu vermeiden, sollte die Anordnung dieser Schichten symmetrisch ausgeführt sein. Zur Reduzierung der kritischen Eigenspannungen kann dagegen ein Schichtaufbau gewählt werden, bei dem benachbarte Einzellagen keine allzu hohen Winkeldifferenzen aufweisen.

Herstellung von FKV-Bauteilen

Die üblichen Herstellungstechnologien für FKV-Elemente reichen von der manuellen Einzelherstellung bis zu automatisierten Fertigungsprozessen. Dabei werden die Verfahren hinsichtlich Bauteildimensionen, Produktformen, den geforderten Bauteileigenschaften sowie Kosten ausgewählt. Für große, flächige Bauteile werden vor allen Pressverfahren eingesetzt [Nau14].

Ein besonders wirtschaftliches Verfahren zur Herstellung thermoplastischer FKV-Strukturen ist die Spritzgießtechnologie, die für die Großserienherstellung von großen und kleinen Bauteilen mit zum Teil komplexer Geometrie zur Anwendung kommt (z. B. in [Kla10, Kro-12-2, Sch12]). Für die kosteneffiziente Herstellung von Endlosprofilen kommt beispielsweise die Pultrusion als kontinuierliches Großserienverfahren zum Einsatz. Ein derartiges Verfahren ist insbesondere für die Produktion von FKV-Profilen für das Bauwesen, wie z. B. GFK-Bewehrungsstäbe, GFK-Profile im Brückenbau, CFK-Bänder, von großem Interesse (etwa [Fre05, Fül04, Gel08]).

Die grundsätzlichen Prozessschritte der verschiedenen Herstellungsverfahren können schematisch zusammengefasst werden und umfassen i. d. R. die Teilprozesse: Imprägnierung der textilen Verstärkungsstruktur mit Matrix, Formgebung sowie bei thermoplastischen Matrices Konsolidierung und bei duroplastischen Matrices Aushärtung (siehe dazu Abb. 3.12).

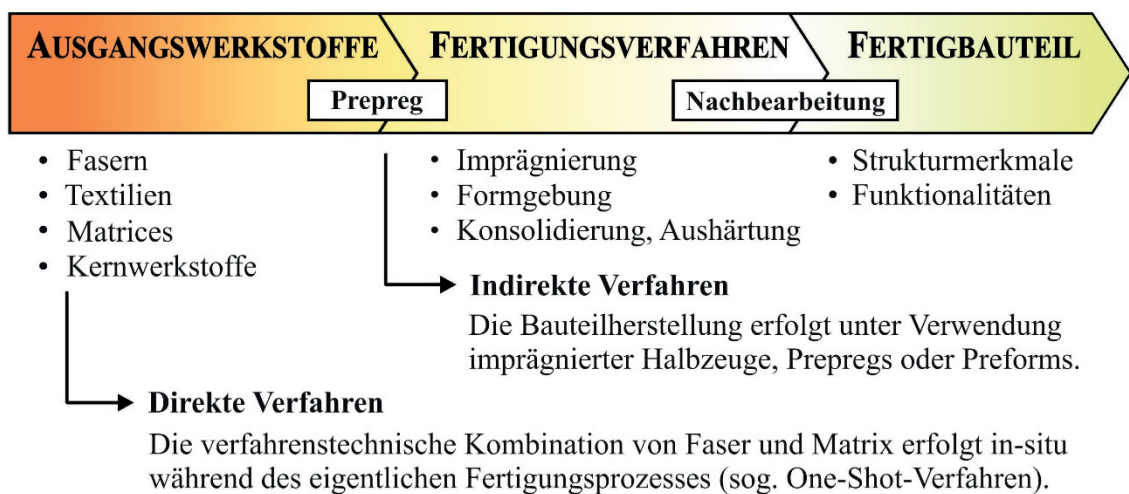


Abb. 3.12: Schematische Prozessschritte bei der Herstellung von FKV-Bauteilen, nach [Gel08]

Detaillierte Angaben zu einzelnen Fertigungsverfahren (vgl. Abb. 3.12) in direkten oder indirekten Verfahren sind z. B. in [Köh 98, Fle99, Ehr04] beschrieben. Je nach Bauteil und Anwendung können bei den meisten Fertigungsverfahren Kerne auf der Basis von Schäumen, Wabenstrukturen oder Balsaholz in die Verbundbauteile integriert und somit Sandwichstrukturen hergestellt werden. Zur Erzielung einer hohen Funktionsintegration in Strukturbauteilen werden Technologien eingesetzt, die auf der Kombination der elementaren Verfahren basieren. Aktuelle Forschungen auf dem Gebiet der FKV konzentrieren sich vor allem auf die Entwicklung und Optimierung von wirtschaftlichen Herstellungsverfahren für funktionale Hybridbauteile sowie auf die Verbesserung der spezifischen Bauteileigenschaften (z. B. [Kro14-1, Kro14-2, Bau14, Dic13, Osi14]).

Anwendungsspektrum

Ausschlaggebend für den zunehmenden Einsatz von FKV ist das weite Spektrum der einstellbaren Eigenschaften, das gezielt auf verschiedenste Anforderungen „maßgeschneidert“ werden kann. Von besonderem Vorteil sind dabei die hohe spezifische Festigkeit und Steifigkeit, geringe Wärmeausdehnung, hohe Wärmebeständigkeit, hohe Zeitstandfestigkeit und Korrosionsbeständigkeit (z. B. [Ehr92, Fle95]). Zudem zeichnen sich insbesondere die glasfaserverstärkten Kunststoffe (GFK) durch gute chemische Beständigkeit, elektrisch und thermisch

isolierende Wirkung, freie Formbarkeit sowie die Integrationsfähigkeit von Funktionselementen aus. Dem Anwendungsspektrum der FKV werden dennoch durch teilweise kostenintensive Fertigungsverfahren, hohe Faserhalbzeugpreise und insbesondere dem hohen Konstruktions- und Dimensionierungsaufwand Grenzen gesetzt. Dieser Konstruktionsaufwand resultiert hauptsächlich aus dem anisotropen Materialverhalten der FKV, das spezielle Anforderungen an allgemeine Gestaltungsregeln stellt. Vor allem bei Krafteinleitungs- und Verbindungselementen werden in Faserverbunde komplizierte Spannungszustände induziert, die einen gesonderten Tragfähigkeitsnachweis erfordern (siehe [Kro11, Sei14]).

FKV-Bauteile werden aufgrund ihrer außerordentlichen Eigenschaften – trotz der komplexen Auslegungsproblematik – zunehmend im Bauwesen eingesetzt, was nicht zuletzt auf die Einsparung von Ressourcen (Baustoffe, Energie während des Baus und der Nutzung), steigende Stahlpreise, die angestrebte Reduzierung der Transport- und Montagekosten sowie auf den Wunsch nach Gestaltungsfreiheit zurückzuführen ist. Dabei sind in Architektur und Bauwesen verschiedene Entwicklungstendenzen zu beobachten. So wird etwa die hohe Designfreiheit des Materials in Form von multifunktionalen Verkleidungselementen bei Fassaden vorteilhaft genutzt [Voi07]. Ein weiteres Einsatzgebiet ist die Verwendung von pultrudierten Profilhalbzeugen aus GFK für neue Brückenbauwerke mit geringer und mittlerer Traglast, wobei hier vor allem kleinere Fußgänger- und Straßenbrücken im Vordergrund stehen (siehe Abb. 3.13). Auch in der Sanierung und nachträglichen Verstärkung von Betonbauwerken kommen FKV-Elemente zum Einsatz, z. B. als CFK-Lamellen zur nachträglichen Ertüchtigung von Bestandsbauwerken (z. B. [Mei09]).



[Fiberline]



[Fiber-Tech Group]

Abb. 3.13: GFK-Brücke bei Moskau (li.); GFK-Fassadenverkleidung des Komplex „The Walbrook“, London (re.)

Insgesamt wird das hohe Potential der Faser-Kunststoff-Verbunde im Bauwesen noch nicht im vollen Umfang genutzt. Gegenwärtig beschränkt sich derzeit die Verwendung von FKV vornehmlich auf nichttragende Sekundärelemente (Einhausungen, Abdeckungen). Gründe sind hier die fehlenden Konstruktions- und Dimensionierungsgrundlagen sowie Prüfvorschriften, die unzureichenden Kenntnisse zum zeitabhängigen Materialverhalten sowie das ungünstige Brandverhalten.

Für einen Durchbruch der FKV-Bauteile bei hochbelasteten Tragwerkstrukturen müssen auf theoretischem und experimentellem Weg die Grundlagen für die Materialentwicklung und die Generierung von fortschrittlichen Funktionsbauweisen in Kombination mit effizienten Leichtbautechnologien geschaffen werden. Zudem sind neue Konstruktionsvorschriften, Berechnungsverfahren und integrierte Mechanismen zur Überwachung der Konstruktion bereitzustellen. Dabei sind in Bezug auf die Konstruktion, Auslegung, Krafteinleitung und

Herstellungstechnologie interdisziplinäre fachübergreifende Ansätze und Lösungen erforderlich. Mit dem Einsatz von FKV in Tragwerken werden die Voraussetzungen für eine neue Architektur geschaffen, die sich durch eine ressourceneffiziente, belastungsgerecht verstärkte und damit filigrane „Leicht-Bauweise“ nach dem Vorbild der Natur auszeichnet.

3.3.4 Textilbeton

Der künstliche Verbundwerkstoff „Textilbeton“ besteht aus einer hochfesten Feinbetonmatrix und einer gegen Umwelteinflüsse (z. B. Luftfeuchte und Chloride) beständigen (nicht-korrosionsanfälligen) textilen Bewehrung. Dabei wird die vergleichsweise geringe Zugfestigkeit des Betons durch zugfeste Bewehrungen, i. d. R. vorkonfektionierte textile Gelege, kompensiert. So können die im Stahlbetonbau erforderlichen Betondeckungen bei der Verwendung von Textilbeton erheblich reduziert werden. Lediglich eine geringe Betondeckung von wenigen Millimetern ist notwendig, um die Übertragung von Verbundkräften zwischen der hochfesten Feinbetonmatrix und der Textilbewehrung sicherzustellen. Damit können erstmals betonbasierte dünnwandige Freiformtragwerke mit hohem Leichtbaugrad errichtet werden, die sich durch ein geringes Systemgewicht und einer hoher Schlankheit auszeichnen.

Verbundkomponente „Beton“

Der Baustoff Beton hat in den vergangenen 100 Jahren wesentlich das gebaute Umfeld geprägt, denn fast überall auf der Welt kann Beton als Baumaterial preisgünstig und in großer Menge hergestellt werden. Gebäude, Verkehrswege und Versorgungssysteme sind ohne bewehrten oder unbewehrten Beton nicht mehr denkbar [Cur09].

Beton ist ein künstliches Gestein und entsteht im Wesentlichen durch Vermischen von Zement, Gesteinszuschlägen und Wasser. Seine Eigenschaften werden maßgeblich durch die Materialeigenschaften der Ausgangsstoffe, das Mischungsverhältnis und die Verarbeitung bestimmt. Durch Zugabe von Zusatzstoffen und Zusatzmitteln können die Verarbeitungsparameter sowie auch physikalische Eigenschaften wie Festigkeit und Dichte wesentlich beeinflusst werden [Sch11-1]. Als preiswerter Massenbaustoff zeichnet sich Beton besonders durch die hohe Druckfestigkeit von bis zu 150 MPa (Ultrahochfeste Betone) aus. Demgegenüber beträgt die Zugfestigkeit i. d. R. nur etwa 10% der Druckfestigkeit, was im konventionellen Betonbau durch eingelegte Stahlbewehrungen kompensiert wird. In vereinfachten Modellen werden sämtliche Betonzugkräfte von der Bewehrung aufgenommen.

Zur Herstellung von Stahlbeton hat sich bis heute die Verwendung von Baustahl durchgesetzt, wobei vorrangig Stahlbewehrungen in Form von Matten (BSt-M) und Stäben (BSt-S) zum Einsatz kommen. Vorteil von Stahlbewehrungen ist die einfache Handhabung und Verarbeitung sowie die hervorragenden mechanischen Eigenschaften (Zug-, Schub- und Biegezugfestigkeit). Nachteilig hingegen wirkt sich die Neigung des Bewehrungsstahls zur Korrosion aus. Dabei reagiert Stahl als legierter Eisenwerkstoff mit Sauerstoff unter der Bildung von Eisen(III)-Oxid-Hydroxid. Diese Korrosionsreaktion induziert eine Abnahme der Zugfestigkeit und eine Volumenzunahme des Stahls, so dass in der Folge Betonabplatzungen hervorgerufen werden. Zum Schutz der Stahlbewehrung im Beton muss daher der Kontakt zu Sauerstoff minimiert werden. Dazu wird der Beton in definierten Schichtdicken (Mindestbetonüberdeckung abhängig von Expositionsklassen, z. B. im Außenbereich ≥ 5 cm) über der Stahlbewehrung

rung aufgebracht, was einer Herstellung von dünnwandigen Bauteilen entgegensteht. Neuartige Entwicklungen im Bereich der Betonbewehrung sehen den Ersatz von Stahlbewehrungen durch textile Bewehrungen vor.

Verbundkomponente „Textile Bewehrung“

Die Integration einer Bewehrung aus technischen Textilien in Betonen erlaubt nicht nur das Eigenschaftsspektrum von bewehrten Betonen deutlich zu erweitern, sondern auch eine neue filigrane Gestaltungsfreiheit von Betonelementen umzusetzen. Dabei können textile Bewehrungen in verschiedenen Formen: als Kurzfasern, Endlosfasern in Form von Flächentextilien sowie als FKV-Halbzeuge eingebracht werden (siehe dazu Abb. 3.14).

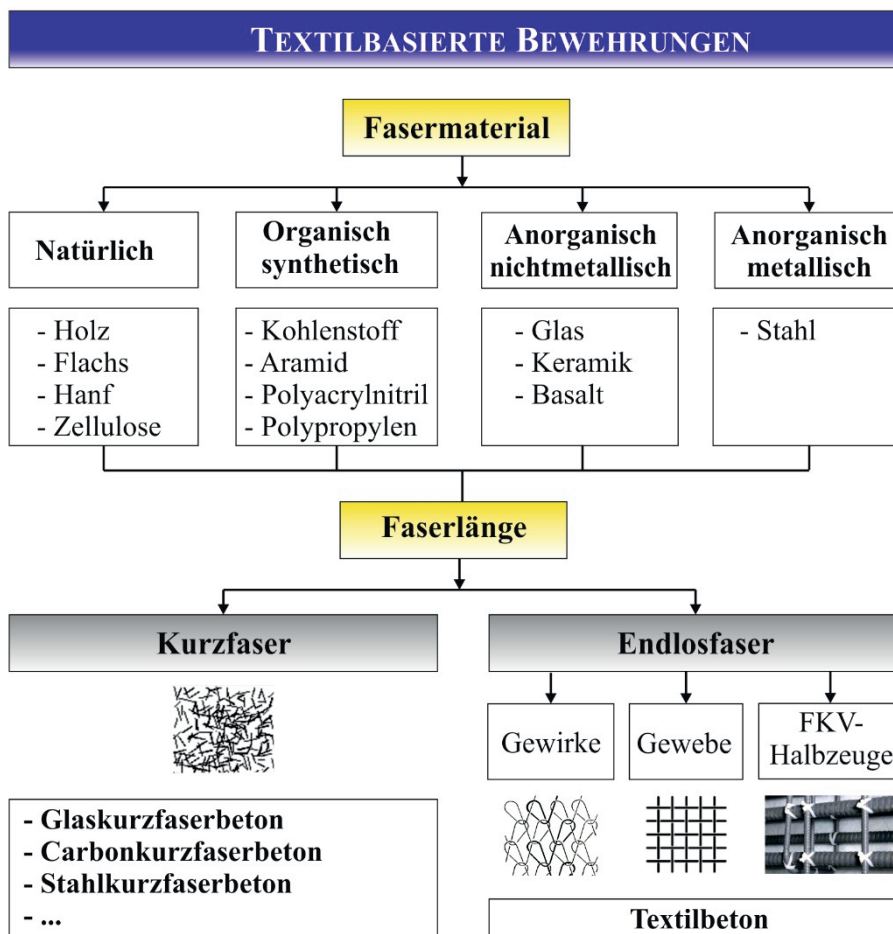


Abb. 3.14: Übersicht zum Einsatz textilbasierter Bewehrungen

Zur textilen Verstärkung von Beton sind generell alle Endlosfasern geeignet, die sich durch ein gutes Verbundverhalten mit der Betonmatrix und eine hohe Zugfestigkeit sowie geringe Bruchdehnung auszeichnen. Dabei sollte der Elastizitätsmodul der Verstärkungsfasern deutlich über dem der Betonmatrix liegen, da ansonsten die Steifigkeit des Bauteils bei Rissbildung extrem reduziert wird. Eine weitere wesentliche Forderung ist, dass die Fasern sowohl chemisch (Alkaliresistenz) als auch physikalisch dauerhaft mit dem mineralischen Matrixsystem verträglich sein müssen. Diesen Anforderungen genügen insbesondere Fasern aus alkali-beständigem Glas (AR-Glasfasern) sowie Carbonfasern, daher werden diese bei der Fertigung von Textilbeton zumeist verwendet [Cur11]. Neue Forschungen zielen auf Basaltfasern für Textilbetonanwendungen ab. Da Basaltfasern teilweise großen Eigenschaftsschwankungen

unterliegen und im Hinblick auf die Alkalibeständigkeit noch nicht systematisch erforscht sind, müssen eingehende Untersuchungen zur Qualifizierung der Basaltfaser für Tragwerke durchgeführt werden. Für Kurzfaserverstärkungen kommen zudem Fasern aus Polypropylen, Polyvinylalkohol und Polyacrylnitril zum Einsatz. Dabei haben sich vor allem Stahlfasern im baupraktischen Anwendungen (stahlfaserbewehrte Sonderbetone) bewährt.

Zur Steigerung der Festigkeit und Steifigkeit von Beton werden Kurzfasern (Faserbeton) verwendet. Für die volle Ausnutzung der hohen mechanischen Eigenschaften von Fasern und Textilien sind vor allem Endlosfasern geeignet, welche die Zugkräfte im Beton weiterleiten. Dies erfolgt beispielsweise durch eine definierte und gerichtete Anordnung der Fasern der textilen Bewehrung in Richtung der vorherrschenden Zugspannungen in der Zugzone; ähnlich wie im Stahlbetonbau. Voraussetzung dafür ist, dass die Textilbewehrung kraftflussangepasst in den Feinbeton integriert werden kann. Aus technologischer Sicht resultieren Anforderungen an die textilen Bewehrungshalbzeuge, wie die Umsetzung offener gitterartiger Strukturen mit ausreichender Verschiebefestigkeit und gleichzeitig guter Drapierbarkeit. Eine definierte Gitterstruktur der Bewehrung wird für eine ausreichende Betondurchlassfähigkeit und so eine vollständigen Betonumhüllung der Rovings benötigt. Hierfür sind Gitteröffnungen prädestiniert, die dem Drei- bis Vierfachen des Größtkorndurchmessers der Betonmatrix entsprechen [Sch11-2]. Insbesondere eignen sich 2-dimensionale Flächengebilde, wie Biaxialgelege oder Drehergewebe sowie 3-dimensionale Abstandsgewirke (siehe dazu Abb. 3.15).



Abb. 3.15: Textilbeton „Vom Filament zum Bauteil“ [Stfi]

Für die Herstellung dünnwandiger, tragfähiger Textilbetonbauteile ist es erforderlich, die zu- meist biegeschlaff gefertigten Flächentextilien derart zu beschichten, dass sie für die Verarbeitung im Beton als stabile Matte vorliegen. Dabei dient die Beschichtung nicht nur zur Versteifung der textilen Bewehrung, sondern auch zur besseren Anbindung von Roving und Feinbeton und damit zur Aktivierung zusätzlicher Tragreserven. Zudem werden durch die Beschichtung die Filamente innerhalb der Rovings über den Rovingquerschnitt gebunden, so dass eine hohe Verbundwirkung erzielt wird. Im Unterschied zu den mit Matrix umschlossenen Randfilamenten beteiligen sich Kernfilamente ohne Beschichtung infolge der geringeren

Reibungskräfte untereinander nur geringfügig am Lastabtrag, wobei die Kernfilamente nur vereinzelt von Hydratationsprodukten des Betons durchdrungen sind.

Als Beschichtungsmittel werden wässrige Polymerdispersionen auf Basis selbstvernetzender carboxylierter Styrol-Butadien-Copolymere (SBR) und höhermolekulare Epoxidharzdispersionen (EP) verwendet [Gao07]. Zudem eignen sich Harzprägnierungen, wobei die Beschichtungen des Textils auf die des Garnmaterials und auf die eingesetzten Zemente abzustimmen sind.

Fertigungstechnologien

Zur Herstellung von Textilbeton sind im Allgemeinen herkömmliche Standardbetone aufgrund ihrer Zusammensetzung in Bezug auf die Korngröße der Gesteinskörnungen sowie ihrer mechanischen und rheologischen Eigenschaften nicht geeignet. Durch die Verwendung von Bewehrungstextilien ist bei Textilbetonen eine Rezepturoptimierung erforderlich. Die Komposition der Feinbetonmischung beruht in erster Linie auf der Anpassung der Kornzusammensetzung des Gesteinszuschlages, wobei i. d. R. Gesteinskörnungen mit einem Durchmesser von 1 bis 2 mm zum Einsatz kommen [Cur09]. Diese vergleichsweise feinen Sande erfordern wiederum hohe Zementleim- oder Zementgehalte, was durch ihre große Benetzungsoberfläche begründet ist. Eine Übersicht zur allgemeinen Zusammensetzung eines Hochleistungsbetons zur Herstellung von Textilbeton ist beispielsweise in der nachfolgenden Abb. 3.16 zusammengestellt.

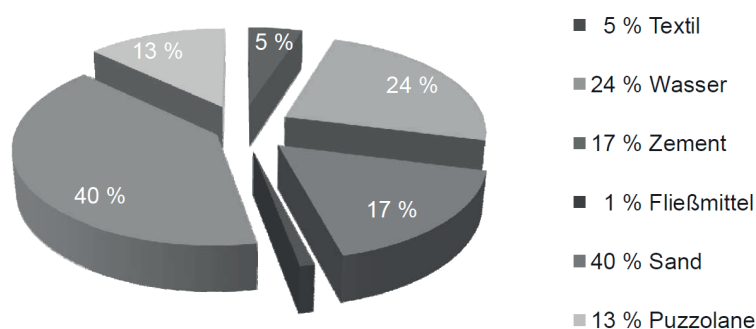


Abb. 3.16: Zusammensetzung von textilibewehrtem Feinbeton in Vol.-% [Che11]

Eine weitere Anforderung an die Betonmatrix mit eingebetteter textiler Bewehrung ist die chemische Verträglichkeit in Bezug auf die eingesetzten Fasern und deren Beschichtungen. Insbesondere bei Bewehrungstextilien aus alkaliresistentem Glas wirkt sich die hohe Alkalität des Betons, die als passiver Korrosionsschutz bei Stahlbewehrungen dient, ungünstig auf die Dauerhaftigkeit des Textilbetonverbundes aus [But08]. Zur Verringerung der Alkalität werden vorzugsweise Komposit- und Hochofenzemente unter Zugabe puzzolanischer Bestandteile eingesetzt. Puzzolane verbessern zudem das Korngefüge sowie die Verarbeitbarkeit der Feinbetonmatrix beim Laminieren, Spritzen oder Gießen.

Für die Herstellung von Textilbeton sind verschiedene Fertigungsverfahren geeignet, die jedoch aufgrund der Materialspezifik auf den jeweiligen Anwendungsfall abzustimmen sind. Die *Laminiertechnologie* ist aus der Herstellung von Faserverbundbauteilen bekannt und wird vorzugsweise bei der Herstellung von Einzelbauteilen mit komplexer Form und großen Abmessungen eingesetzt. Bei diesem händischen Verfahren werden Feinbeton und textile

Bewehrung lagenweise in die Schalung eingebracht bis die Bauteilstärke erreicht ist. Hierzu sind mehrere Arbeitsgänge erforderlich [Mot08]. Beim *Gießverfahren* wird die Textilbewehrung in die Schalung eingelegt und anschließend in einem Arbeitsgang mit dem Beton vergossen. Dabei können 2D-Textilien in Kombination mit Distanzhaltern sowie 3D-Textilien verwendet werden. Eine fließfähige Feinbetonmischung in Verbindung mit einer technologieangepassten glatten Schalung ist die besondere Voraussetzung für dieses Fertigungsverfahren.

Das *Spritzverfahren* von Feinbeton basiert auf einem Niederdrucksystem (bis max. 8 bar), ähnlich wie es zum Aufbringen von Putzen genutzt wird. Der Verfahrensablauf ist dem Laminieren sehr ähnlich. Auch hier werden Feinbeton und Textil abwechselnd in Lagen aufgebracht. Im Unterschied zum Laminieren werden an das Spritzverfahren andere Anforderungen bzgl. Feinbetonmischung gestellt, wobei hier Mischungen gefordert sind, die an vertikalen Flächen haften sowie pump- und spritzbar verarbeitet werden [Mot08]. Ein Sonderverfahren, das speziell zur Herstellung faserbewehrter Rohre, Maste und Pfähle zum Einsatz kommt, ist das *Schleuderverfahren*. Dabei wird der Beton durch schnelles Rotieren um die Längsachse in der Schalung verdichtet. Als Bewehrung kommen vorrangig Kurzfasern und in einzelnen Sonderanwendungen 2D-Textilien zum Einsatz.

Anwendungsfelder

Der besondere Vorteil des neuen Verbundbaustoffs Textilbeton ist die relativ einfache technologische Umsetzung von extrem filigranen Bauteilen mit Freiformflächen. Damit werden Rohstoffe eingespart und nicht zuletzt Umweltbelastungen vermieden. Zudem lässt sich das Gewicht deutlich verringern und so die Transportkosten reduzieren. Die Entwicklung von textilbewehrtem Beton stellt damit eine Erweiterung der bisherigen architektonischen Möglichkeiten dar und bietet die Chance, den Werkstoff Beton in neuen Einsatzbereichen zu etablieren. So kann der als Massivwerkstoff bekannte Beton beispielsweise in dünnwandigen Tragwerken mit organischer Form und hohem Leichtbaupotential angewendet werden.

Die Textilbetonbauweise befindet sich derzeit noch in der Entwicklungsphase, so dass weder allgemein bauaufsichtliche Zulassungen und Normen vorliegen. Für die Überführung in die Baupraxis sind für Textilbeton – sowohl für Anwendungen bei nichttragenden Bauteilen als auch für tragende Elemente – besondere Zulassungen, z. B. Zustimmung im Einzelfall (ZIE), erforderlich. Dies begründet die Beschränkung der Anwendung auf einzelne „Leuchtturmprojekte“ wie z. B. die Fußgängerbrücke in Oschatz oder die Vorhangfassade zur Erweiterung der Versuchshalle des IMB der RWTH Aachen (vgl. Abb. 3.17). Zur Umsetzung einer Serienanwendung von Textilbeton sind weitere Forschungsarbeiten notwendig, die sich mit Entwurfs- und Bemessungsprinzipien, praxisnahen Herstellungsmethoden, einer allgemeinen Bauaufsichtlichen Zulassung, einheitlichen Prüfverfahren und Normierung des Verbundwerkstoffes befassen. Einige Ansätze und Lösungen hierzu werden in der vorliegenden Arbeit vorgestellt und bewertet.



Abb. 3.17: Weltweit erste Brücke aus Textilbeton im Gelände der Landesgartenschau Oschatz (li., [TU Dresden]); Erweiterung der Versuchshalle C, IMB RWTH Aachen (re., [RWTH Aachen])

3.4 Strukturleichtbau

3.4.1 Struktur und Tragwerk

Der Begriff Strukturleichtbau bezeichnet im Allgemeinen die Bauweise, bei der optimale Lastabtragungsmechanismen durch die Werkstoffstruktur und die Formgestaltung konstruktiv umgesetzt werden. Bei dünnwandigen Schalen umfasst dies beispielsweise die Reduzierung von versagenskritischen Biegebeanspruchungen sowie die Generierung von bionisch inspirierten Krafteinleitungen und Verbindungen. Im Bauwesen erfolgt eine differenzierte, werkstoffunabhängige Betrachtung der Bauteile, die zum Tragwerksystem zusammengesetzt werden. Der Strukturleichtbau hat hier die Aufgabe, die vorgegebenen Belastungen mit einem Minimum an Eigengewicht der Konstruktion unter Einhaltung definierter Randbedingungen zu den Auflagerpunkten weiterzuleiten [Sob95]. Somit zielt der Strukturleichtbau auf die Optimierung von Art, Anzahl und Anordnung der Bauteile und der Werkstoffe, aus denen eine tragende Struktur mit minimalem Gewicht gebildet wird. Dies beinhaltet die Lösung eines multikriteriellen Optimierungsproblems, bei dem unterschiedliche Restriktionen hinsichtlich Entwurfsraum, Technologie, Belastung und Werkstoff zu berücksichtigen sind.

Das Tragwerk ist dabei ein Teil eines Bauwerkes, das die erforderliche Tragfunktion übernimmt und so vorrangig die Aufgabe der Aufnahme, Weiterleitung und Abtragung von Lasten sicherstellt. Eine Klassifizierung der Tragwerke in Anlehnung an Polónyi [Pol03] erfolgt hierarchisch nach Geometrie, allgemeiner Tragwirkung, zusammengesetzter Tragwirkung und Beanspruchung (siehe dazu Abb. 3.18).

Der Entwurf von Leichtbautragwerken bedingt deutliche Modifikationen in konventionellen Strukturen von Tragwerken. Dabei haben primär die Festlegungen von Systemgeometrie, Formgebung und Proportionierung der tragenden Strukturen sowie deren Materialaufbau der Forderung nach Gewichtsersparnis zu folgen. Erst sekundär kommen Restriktionen hinsichtlich architektonischer Formenkonzepte, Herstellungstechniken und Gesamtkosten zum Tragen. Grundsätzlich lässt sich der Entwurf gewichtsminimaler Tragsysteme nicht allein auf der Basis einer Kombination von Grundbausteinen wie Stützen, Balken, Bögen, Platten und Scheiben gestalten, sondern erfordert eine leichtbaugerechte Formfindung [Sob95].

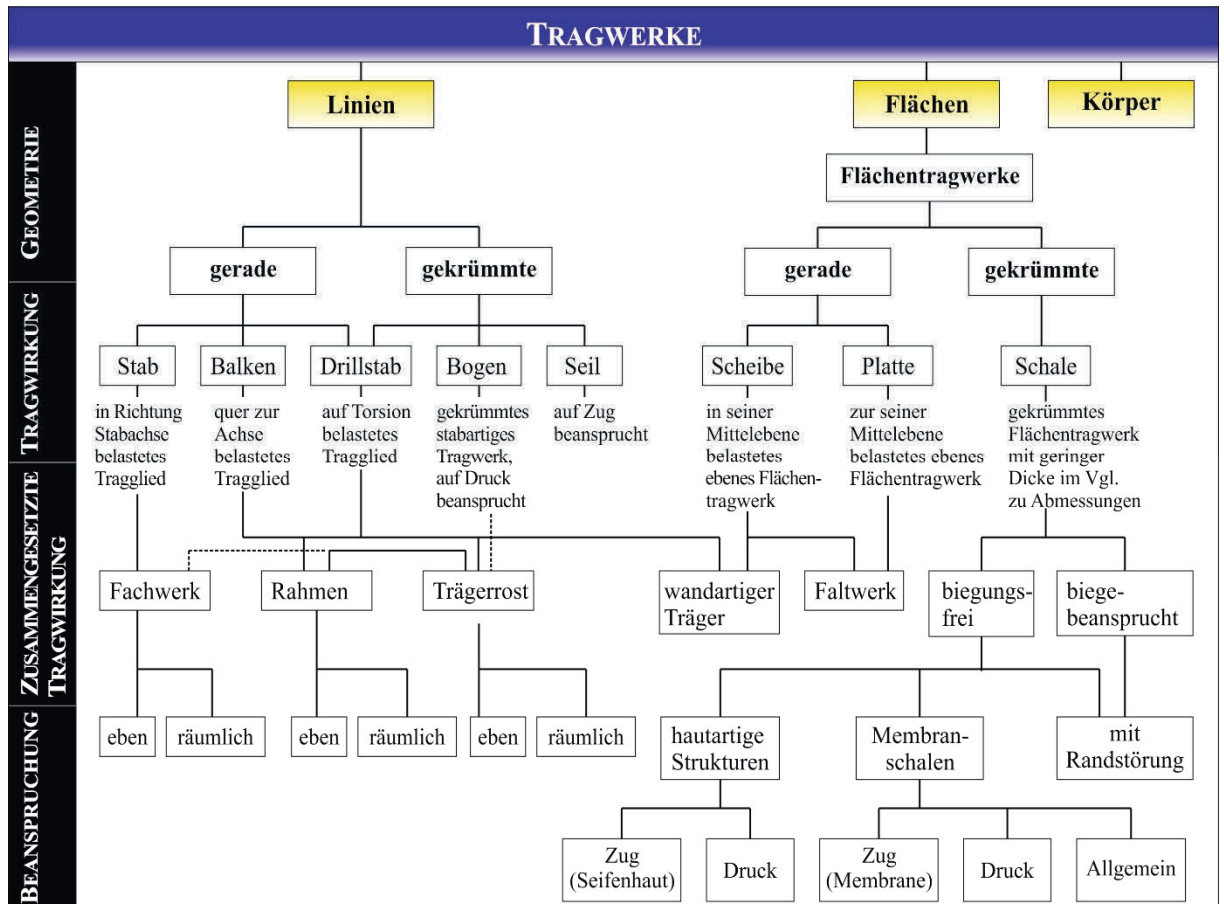


Abb. 3.18: Tragwerksordnung nach Polónyi in [Gen06]

Die Gruppe der Leichtbautragwerke umfasst i. d. R. leichte Flächentragwerke, die in Bezug auf ihre Systemgeometrie in klein- bis mittelgespannte und weitgespannte Konstruktionen untergliedert werden. Bei Konstruktionen mit kleineren bis mittleren Spannweiten zielt der Leichtbau im Allgemeinen auf die Reduktion an eingesetzter Masse und Energie. Damit kann auch den wesentlichen ökologischen Anforderungen Rechnung getragen werden. Bei Konstruktionen mit großen Abmessungen, wie z. B. Brücken großer Spannweite oder bewegten Strukturen, ist die Minimierung des Eigengewichtes ökonomischer Zwang und zumeist auch Voraussetzung für die Errichtung des Bauwerks selbst.

Als Beispiel kann hier der Entwurf einer weitgespannten Brückenkonstruktion über die Meerenge von Gibraltar angeführt werden. Um eine Spannweite von etwa 3.400 m zu überbrücken, wurde in den 1980er Jahren von dem Schweizer Ingenieur Christian Menn eine Spannseil-Hängebrücke in Stahlbauweise konzipiert, jedoch nicht umgesetzt (vgl. Abb. 3.19).

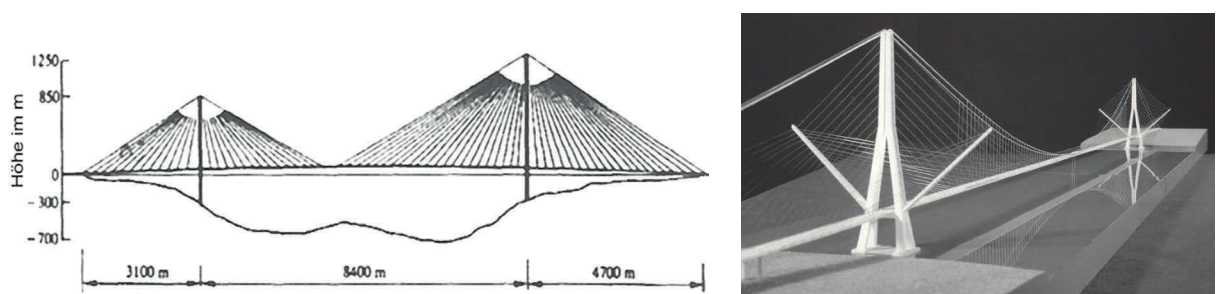


Abb. 3.19: Spannseil-Hängebrücke (Entwurf: Christian Menn; [Mei09])

Der Grund war das hohe Eigengewicht der Hängebrückenkonstruktion aus Stahlspannseilen. Nach MEIER [Mei09] kann aus dem Quotient aus der Eigenlast der Konstruktion und der aufnehmbaren Verkehrslast eine maximale theoretische Grenzspannweite errechnet werden, die die Leistungsfähigkeit eines Werkstoffs angibt. Die theoretische Grenzspannweite bei Stahlseilen liegt bei klassischen Lastannahmen bei etwa 7.700 m. Die praktische Grenze ist jedoch weit darunter, da neben dem statischen Gewicht die Belastungen aus Verkehr und dynamische Windlast beachtet werden müssen [Mei09].

Leichtbaustrukturen hingegen sind prädestiniert für Konstruktionen mit großen Spannweiten. So etwa haben Spannseile aus Carbonfaser verstärktem Kunststoff (CFK) eine extrem hohe Zugfestigkeit und ein geringes Gewicht, so dass die theoretische Grenzspannweite von CFK-Seilen in Hängebrückenkonstruktionen mit ca. 37 km 4fach größer ist als beim Einsatz von Stahlseilen (vgl. dazu Abb. 3.20). Aus heutiger Sicht könnte die CFK-Spannseil-Hängebrücke von Christian Menn mit der Leistungsfähigkeit neuer Leichtbauwerkstoffe umgesetzt werden. 1980 fehlten Verarbeitungstechnologien zur Herstellung und Verankerung von CFK-Seilen.

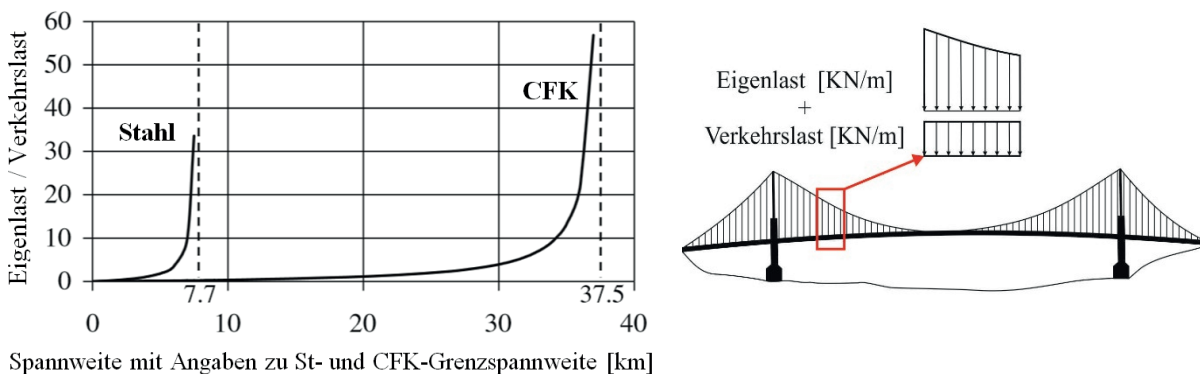


Abb. 3.20: Grenzspannweiten von Stahl- und CFK-Spannseil-Hängebrücken nach [Mei09]

3.4.2 Klassifizierung von Bauweisen

Der Strukturleichtbau favorisiert eine optimale konstruktive Gestaltung und zugehörige Materialauswahl mit dem Ziel, eine gewichtsminimale Tragwerksgeometrie in Kombination mit belastungsgerechter Werkstoffkonstruktion im globalen und lokalen Bereich bereitzustellen. Vor allem für den Kräfteinleitungsbereich sind im Bauwesen neue Fügetechniken und Verbindungselemente zu entwickeln, um eine Reduzierung von derzeit noch zusätzlich eingebrachten Massen zu gewährleisten. Zur Überführung des Leichtbaugedankens in das Bauwesen – wie dieser schon seit einigen Jahren im Maschinen- und Fahrzeugbau Anwendung findet – fehlen bis heute werkstoffübergreifende Konstruktions-, Entwurfs- und Bemessungsgrundlagen. Um die Erkenntnisse und Erfahrungen über „Leichtbauweisen“ aus bereits etablierten Branchen auch im Bauwesen zu nutzen, sind unter Beachtung der bauspezifischen Restriktionen und Zulassungskriterien die vorhandenen grundlegenden Methoden und Ansätze zu modifizieren und ggf. zu erweitern.

Als Bauweise wird im Allgemeinen die Art und Gestalt bezeichnet, in der die einzelnen Werkstoffe geformt, miteinander zu Bauteilen verbunden und zu Tragwerken gefügt werden. Die Einteilung in *Differentialbauweise*, *Integralbauweise*, *Integrierende Bauweise* und *Verbundbauweise* ist Grundlage für ein werkstoffübergreifendes Entwerfen und Konstruieren.

Dabei gestattet die Bauweisenklassifizierung nach Tab. 3.1 eine schnelle Bewertung der statisch-konstruktiven Eigenschaften eines Bauteils sowie der Besonderheiten seines Montage-, Demontage- und auch Rezyklierungsverhaltens.

Tab. 3.1: Übersicht zur Bauweisenklassifizierung; in Anlehnung an [Kle11]

| | |
|-------------------------------|--|
| Differentialbauweise | Strukturbildende Komponenten aus zumeist unterschiedlichen Werkstoffen werden additiv zu einem Gesamtbauteil gefügt → punktuelle Fügeverbindungen (z. B. Schrauben, Nieten, Schweißen) |
| | + Kosteneffizienter Fügevorgang und einfach partielle Reparatur + Gute fail-safe-Qualitäten (dynamisches Sicherheitsverhalten) |
| | - Hohe Spannungskonzentration im Fügebereich (Kerbwirkung) - Erhöhte Bauteilmasse durch Fügeelemente und Materialüberlappung |
| | |
| Integralbauweise | „Verschmelzen“ mehrerer Einzelteile zu einem Einstoff-Bauteil, Minimierung strukturbildener Einzelteile → gleichmäßiger und homogenerer Kraftfluss |
| | + Werkstoffausnutzung auf hohem Niveau, hoher Leichtbaugrad + Geringe Spannungsunstetigkeiten im Bauteil |
| | - Hohe Werkstoff-, Werkzeug- und Maschinenkosten - Ungünstige Schadenstoleranz (Rissausbreitung) - Schlechtes Reparaturverhalten |
| | |
| Integrierende Bauweise | Kontinuierliches Fügen strukturbildener Einzelelemente zum quasi-homogenen Bauteil (Kleben, Schweißen) → Flächige Verteilung der Beanspruchungen |
| | + Partielle Nutzung der Prinzipien von Differential- und Integralbauweise + Relativ homogener Kraftfluss; Minimierung der Rissausbreitung + Integration von Funktionen |
| | - Oberflächenaktivierung der Fügepartner erforderlich |
| | |
| Verbundbauweisen | Verbund verschiedener Werkstoffe oder Materialkonfigurationen zu einem Stück (Mehrstoff-Bauteil) Auswahl und Anordnung der Werkstoffe nach Eigenschaftsprofil und in Abhängigkeit vom Beanspruchungsverlauf Grobe Unterteilung: Allgemeine Verbundbauweise, Faserverbund- und Hybridbauweise, Sandwichbauweise |
| | + Sehr effiziente Gestaltung von tragenden Teilen + Sehr hoher Leichtbaugrad + Optimale Ausnutzung der Werkstoffeigenschaften |
| | - Teilweise hoher Fertigungsaufwand aufgrund der Fügetechnik |
| | |

3.4.3 Konstruktionsprinzipien

Die Umsetzung von Leichtbautragwerke erfordert das Entwerfen und optimale Ausgestalten von tragenden Strukturen für vorgegebene Lasten zumeist unter Beachtung von definierten räumlichen Grenzen oder Konturen [Wie07]. Nach bionischen Grundprinzipien erfolgt dabei die Einsparung von Werkstoff an gering belasteten Stellen, wogegen in lokal hochbelasteten Bereichen Material angehäuft werden soll. Daraus resultieren typische Bauprinzipien etwa für dünnwandige, profilierte *Stabstrukturen*, verrippte, gefächerte und gelochte *Flächentragwerke*.

Bei der konstruktiven Gestaltung und Auslegung von hochbelasteten Leichtbaustrukturen sind vor allem sowohl festigkeits- als auch steifigkeitsbezogene Kriterien zu beachten. Die Anwendung von Leichtbauprinzipien führt oft auf dünnwandige Strukturen, so dass vermehrt Kriterien zum Tragen kommen, die eine ausreichende Steifigkeit der Konstruktion zur Vermeidung von zu großen Deformationen oder zur Verhinderung von Instabilitäten, wie Knicken oder Beulen, fordern [Kle11]. Die Gestaltungsgrundsätze des Leichtbaus lassen sich nach Tab. 3.2 klassifizieren. Somit können beispielsweise: Zug-, Zug-Druck-Schub- und Biege-Torsions-Strukturen unterschieden werden.

Tab. 3.2: Übersicht zu Konstruktionsprinzipien und Strukturen in Anlehnung an [Wie84]

| Strukturen | Konstruktionsprinzipien des Leichtbaus |
|---|--|
| Zug-Strukturen: Seile, Netze, Membranen (hohes Leichtbaupotential) | Vornehmlich Zugbeanspruchungen: Strukturen benötigen nur geringe Biegesteifigkeit, Zugkräfte werden über lange Wege eigengewichtsarm abgeleitet |
| Zug-Druck-Schub-Strukturen: Fachwerke, Faltwerke, Membranschalen, Stäbe (geringeres Leichtbaupotential) | Für Druck- und Schubbeanspruchungen sind zusätzliche Maßnahmen gegen Instabilität notwendig (z. B. durch Profilierung, Segmentierung oder stützende Anbindungen), was oft eine Gewichtszunahme zur Folge hat. Druckkräfte werden über kurze Wege abgeleitet |
| Biege-Torsions-Strukturen: Balken, Rahmen, Schalen, Profile (sehr geringes Leichtbaupotential) | Reduzierung von maximalen Biege- und Torsionsbeanspruchungen durch konstruktive Gestaltung der Tragelemente Lastabtrag durch Biegung bedingt große Querschnittsabmessungen (Steinerscher Anteil) |

Die Konstruktion von Leichtbautragwerken im Bauwesen erfordert eine Entwicklung von Strukturen, die mit minimalem Eigengewicht eine optimale Lastabtragung entlang räumlicher Kräftepfade gestatten. Dafür sind gemäß Tab. 3.2 insbesondere Konstruktionen geeignet, die Lastkombinationen ausschließlich über Zug oder Zug-Druck-Schub abtragen. So etwa sind z. B. Membranen und Seilkonstruktionen allein auf Zug beansprucht, hingegen Schalenkonstruktionen im Bauwesen im Allgemeinen überwiegend druckbelastet. Die Schalen verdanken ihre hohe Tragfähigkeit nicht primär der Werkstofffestigkeit, sondern dessen räumlicher dreidimensionaler Anordnung [Rut02].

Die Wirkungsweise von Form- und Geometrieänderung kann beispielsweise anhand des Tragverhaltens eines Blattes analysiert werden (siehe [Hei96]). Bei dem Versuch das dünne Blatt als ebene Platte auskragen zu lassen, wird der Querschnitt auf Biegung beansprucht. Falls die maximalen Biegespannungen σ_p die Festigkeit seiner Randfasern erreichen, kann die Platte sein Eigengewicht nicht mehr tragen und wird überkritisch verformt (Abb. 3.21 a). Wird demgegenüber das Blatt „senkrecht“ fixiert (Scheibenzustand), so resultiert eine deutlich höhere Tragfähigkeit, da der Steinersche Anteil deutlich erhöht wird. Die maximalen Spannungen der Scheibe σ_s wirken hier mittig auf den Querschnitt (Abb. 3.21 b). In diesem Fall ist eine Scheibenbeanspruchung besser geeignet als eine Plattenbeanspruchung. Für einen oberen Raumabschluss ist allerdings die Scheibenausführung ungeeignet. Bei zylindrischer Krümmung des Blattes lassen sich der Stabilitätsverlust wie im Fall a) vermeiden und eine

hohe Tragfähigkeit in tangentialer Richtung für die Anordnung als Raumabschluss erzielen (Abb. 3.21 c). Die Krümmungshöhe H der Scheibe ist in der Regel größer als die Dicke h der Platte, womit die Spannungen in der Schale (Längs- und Biegespannungen) keine kritischen Werte annehmen. Bei belastungsgerecht geformten Schalen werden die Biegespannungen vernachlässigbar klein gegenüber den Längsspannungen gemäß Schalentheorie (s. [Kro05]).

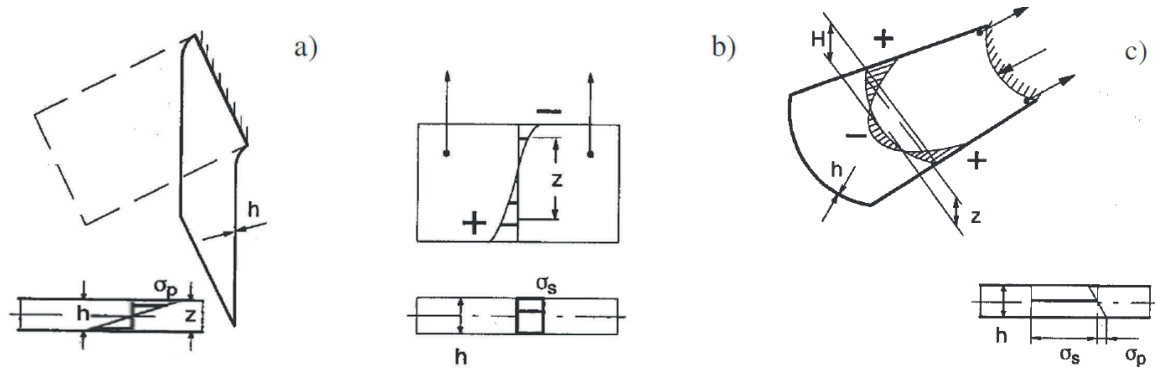


Abb. 3.21: Beanspruchung (a) einer Platte, (b) einer Scheibe, (c) einer oben offenen Zylinderschale [Hei96]

Insgesamt wird das Entwerfen eines Leichtbautragwerkes durch Hinzufügen der entscheidenden Forderung nach Gewichtsminimalität um einen weiteren physikalischen Komplexitätsgrad gesteigert. Dabei ist die geometrische Gestaltung einer Struktur ausschlaggebend für das Ausschöpfen des Leichtbaupotentials. Zur Auslegung einer optimalen Form werden räumliche Kräftepfade beanspruchungsgerecht entworfen und mit geeigneten Werkstoffen belegt, so dass die Reduktion des Eigengewichtes in Struktur und Krafteinleitung resultiert [Sob95]. Von entscheidender Bedeutung sind ferner die konstruktive Umsetzung „gleichmäßiger“ Krafteinleitungen in die Haupttragstruktur, die Vermeidung von kritischen Biegebeanspruchungen, die belastungsangepasste Feingliederung von Strukturen (Rippen, Sandwich, Untergerüste), die Integration gezielter Versteifungen in Hauptbelastungsrichtung (Sicken), die Ausnutzung der Stützwirkung von Krümmungen sowie die konsequente Ausschöpfung der Leichtbauprinzipien. Im Verlauf des Konstruktionsprozesses, der unter anderem stark von Gestaltungs- und Konstruktionsrichtlinien geprägt ist, werden Optimierungsverfahren, wie Form- und Topologieverfahren genutzt, um materialsparend zu entwickeln. Die auf Finite Elemente gestützten Rechenalgorithmen sind inzwischen bei der steigenden Komplexität der Teile unerlässlich geworden.

3.5 Systemleichtbau

3.5.1 Funktionsintegration

Der Systemleichtbau ist eine weitere Stufe zur Gewichtsreduktion von komplexen, aus einzelnen Strukturen zusammengesetzten Systemen. Eine wesentliche Rolle spielt dabei die Funktionsintegration, um beispielsweise neben der reinen Tragfunktion gleichzeitig funktionale Anforderungen wie z. B. Wärme- und Schalldämmung, Klimatisierung, Beleuchtung und solare Energiegewinnung vom Tragsystem zu erfüllen. Bei diesem ganzheitlichen Ansatz, das Systemgewicht zu minimieren, wird das Leichtbautragwerk als gesamtes Gebilde betrachtet. So etwa können durch Funktionsintegration einzelne Komponenten sogar schwerer werden, dennoch führt die Einsparung durch Multifunktionalität zur Minimierung von Gewicht im

gesamten Tragsystem. Der funktionsintegrierende Systemleichtbau ist nicht nur bei Fahrzeugen aufgrund der vom Gesetzgeber vorgegebenen CO₂-Ziele von zentraler Bedeutung [Dre07], sondern auch im Bauwesen erlaubt die Integration von Funktionen in tragende Bauteile entscheidende Vorteile. Daraus lassen sich ökologische und ökonomische Lösungsansätze für Bauwerke der Zukunft ableiten [Sob07].

3.5.2 Bionisch inspirierte Konstruktionsprinzipien

Der Entwurf von multifunktionalen Leichtbaukonstruktionen ist oft Ergebnis von Optimierungsprozessen, woraus Strukturen mit geringem Gewicht und beanspruchungsgerechter Gestaltung resultieren, die oftmals Anforderungen im Hinblick auf sensorische und aktorische Funktionen erfüllen. Zahlreiche Vorbilder für multifunktionale Konstruktionen mit effizientem Materialeinsatz können in der Natur entdeckt werden. Dazu zählt beispielsweise die gezielte vielseitige Nutzung von Hohlräumen in zellularen Strukturen wie in Knochen oder in anisotropen Holzstrukturen. Dabei erfahren derartige Konstruktionen einen laufenden Ab-, Auf- und Umbau und sind gleichzeitig Vorbild für zukunftsweisende adaptive Bauteile. Insbesondere in Knochen erfolgt eine kontinuierliche Anpassung der Struktur an wechselnde Belastungen. Ebenso reagieren Baumstämme in ihrem Wachstum unmittelbar auf die von außen einwirkenden Kräfte [Gle98].

Die Funktionalität und Ästhetik natürlicher Formen und Konstruktionen entdeckte unsere technologisch geprägte Wirtschaftswelt erst in jüngster Zeit. *Von der Natur für die Technik zu lernen* – dies beschreibt der Begriff Bionik, wo jedoch eine direkte Übertragung der Mechanismen und Prozesse der Natur in die Gestaltung ohne den Zwischenschritt der Abstraktion nicht erfolgversprechend ist. Daraus lässt sich eine dreistufige Vorgehensweise: Erforschen, Abstrahieren, Umsetzen ableiten [Nac10].

Bionik ist das Begreifen natürlicher Prinzipien zum besseren Verständnis ähnlicher technischer Fragestellungen für daraus resultierende optimierte Anwendungen [Nac13]. Pioniere auf dem Gebiet der Bionik, die sich entscheidend für die Nutzung des „Vorbildes der Natur“ in der Technik und Wirtschaft einsetzten, waren u. a. Heinrich Hertel, Ingo Rechenberg und Werner Nachtigall. Die Architekten Buckminster Fuller und Frei Otto befassten sich seit den 1950er Jahren mit „Natürlichen Konstruktionen“ und entwickelten dabei Bauwerke, die bis in die heutige Zeit faszinierend sind. Otto hat „Natürliche Konstruktionen“ mit der ästhetischen und funktionalen Form von Gebäuden verknüpft, so dass sie „natürlich“ erscheinen und mit technischer Hilfe ähnliche Aufgaben erfüllen, wie sie in der Natur anzutreffen sind (siehe Abb. 3.22; s. etwa [Ott82], [Ner05]).

Frei Otto erforschte die physikalischen Selbstbildungsprozesse in der Natur und kam zu dem Schluss, dass das Erkennen physikalischer Entstehungsprozesse in der lebenden und nicht lebenden Natur zur optimalen Form von Leichtbautragwerken führt. Die bestmögliche Struktur entsteht dabei zumeist von selbst als Folge physikalischer Selbstbildungsprozesse. In der Folge derartiger gestaltbildender Prozesse entstehen im Experiment unter vorgegebenen Randbedingungen und herrschenden Naturgesetzen bionisch inspirierte Formen und Konstruktionen [Ott88].

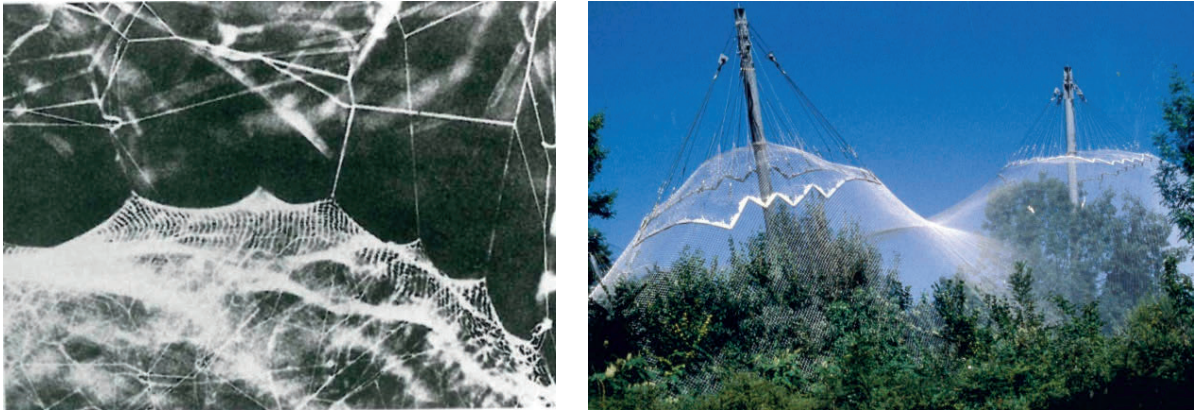


Abb. 3.22: Netz der Zeltspinne *Cartophora* (links) und die daraus abgeleitete Voliere im Tierpark Hellabrunn

Nach Frei Otto sind die Zellen, als Grundbausteine der lebenden Natur, Vorbild der entwickelten Pneus. Diese bestehen aus einer Membran und einer gasförmigen oder fließfähigen Füllung (Luft oder Plasma), wobei ihre Tragfähigkeit allein aus der Tatsache des Innendruckes resultiert [Ott82]. Ein weiteres leistungsfähiges Tragelement aus der Natur sind Fasern. Durch ihre Struktur und die längliche Form nehmen sie ausschließlich Zugkräfte auf. Gemeinsam mit druckbeständigen Tragkomponenten (z. B. Druckstäbe, Stützen) gehören Fasern zu den entscheidenden „Bauteilen“ der Natur. Beispielsweise als Gewebe, Membranen oder Seile werden sie in Kombination mit den Druckelementen zur Generierung von extrem leichten Tragwerken genutzt [Bri84].

Inspiziert von der Leistungsfähigkeit der Leichtbaustrukturen der Natur (z. B. von Meeresalgen, Blättern oder Vögeln) wird derzeit zunehmend der Formfindungs- und Gestaltungsprozess von bionischen Prinzipien bestimmt. Denn entsprechend der Natur ist ebenso in der Architektur der Leichtbau entscheidende Voraussetzung zur Überbrückung von maximalen Spannweiten, zur Umsetzung von höchsten Gebäuden sowie zur Errichtung von Bauwerken mit hoher Funktionsdichte.

In der Natur ist die Funktion zumeist eng mit der Erscheinungsform verknüpft; so etwa locken Blumen durch ihr Aussehen Insekten zur Bestäubung an. Derartige Prinzipien bilden auch wesentliche Ansätze für multifunktionale Gebäudehüllen der Architektur des 21. Jahrhunderts. So entwickelte Knippers nach dem biologischen Vorbild der Paradiesvogelblume funktionsintegrierte Verschattungslamellen *Flectofin®* für Gebäudefassaden, die mit Hilfe eines gelenkfreien und stufenlosen Klappmechanismus verschiedene Lichtsituationen einstellen [Kni12]. Basis für die Entwicklung war der Klapp-Bestäubungsmechanismus der Paradiesvogelblume, der eine reversible elastische Deformation mit hohem biomimetischen Potential zeigt. Diese Lamellen benötigen keine zusätzliche Mechanik und weisen eine sehr hohe Lebensdauer auf. Diese Funktionalität wurde auf eine Verschattungslamelle übertragen, die auf eine externe Kraft durch seitliches Ausweichen infolge Biegedrillknickens reagiert [Nac13]. Das seitlich ausgelenkte Rückgrat führt zu Biegedrillknicken des gesamten Schalenelementes (siehe dazu Abb. 3.23). Die Koppelleffekte des Biegedrillknickens infolge Anisotropie werden neuerdings auch bei Spannmechanismen im Maschinenbau und bei Snowboards in der Sportgerätetechnik gezielt ausgenutzt [Kau14].

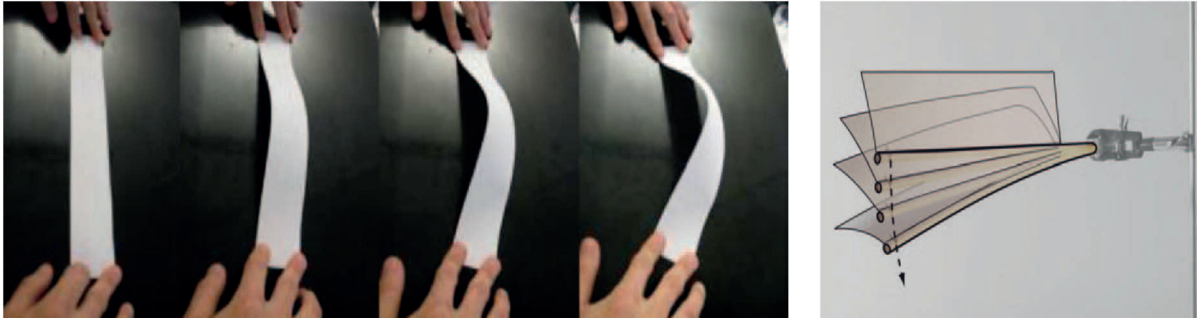


Abb. 3.23: Bewegungsprinzip Flectofin (re.); Abstraktionsschritt Biegedrillknicken (li.) [Nac13]

Die Forschungsergebnisse der patentierten Fassadenverschattungs-Technologie Flectofin wurden an der Fassade des Pavillons der EXPO 2012 in Yeosu in Südkorea umgesetzt (siehe Abb. 3.24). Die Fassade ist dabei aus beweglichen Elementen aufgebaut, die aus bis zu 15 m hohen GFK-Lamellen mit einer Wandstärke von 8 mm mit beidseitigen Versteifungsrippen bestehen. Die Lamellen vollziehen Bewegungen und werden durch eine oben und unten extrinsisch eingeleitete Kraft elastisch deformiert. Weitere Beispiele für die Nutzung natürlicher funktionsintegrierter Konstruktionsprinzipien sind näher in [Nac10] und [Nac13] und den dort aufgeführten Quellen beschrieben.



Abb. 3.24: "One Ocean", EXPO-Pavillon, Korea [soma Architekten]

3.5.3 Leichtbaupotentiale im Bauwesen

Die Umsetzung des Systemleichtbaus im Bauwesen ist auf wenige Objekte beschränkt, was teilweise auf die hohen Kosten für multifunktionale Komponenten und Tragstrukturen sowie auf die gesetzlichen Restriktionen hinsichtlich Zulassung zurückzuführen ist. Großes Marktpotential liegt sowohl in Fassaden mit hoher Funktionsdichte als auch in adaptiven Tragwerken, die gleichzeitig optische, bauphysikalische und tragende Funktionen übernehmen. Dabei weist das energieoptimierte Bauen aufgrund der steigenden Energiepreise, Ressourcenknappheit und zunehmenden Umweltbelastungen einen wachsenden Stellenwert auf. Daher sind Multifunktions-Fassaden mit integrierter Energiegewinnung von zentraler Bedeutung für zukünftige Bauwerke (siehe Abb. 3.25). Ein besonderer Vorteil des Funktionsleichtbaus ist die direkte Integration von Sensorik in tragende Bauteile zur Online-Überwachung. Damit kann nicht nur der Einsatz von bauaufsichtlich nicht zugelassenen Werkstoffen durch die Überwachungsfunktion vereinfacht, sondern auch hohe Sicherheitsbeiwerte reduziert werden, was nicht zuletzt zur Einsparung von Material und Energie führt.

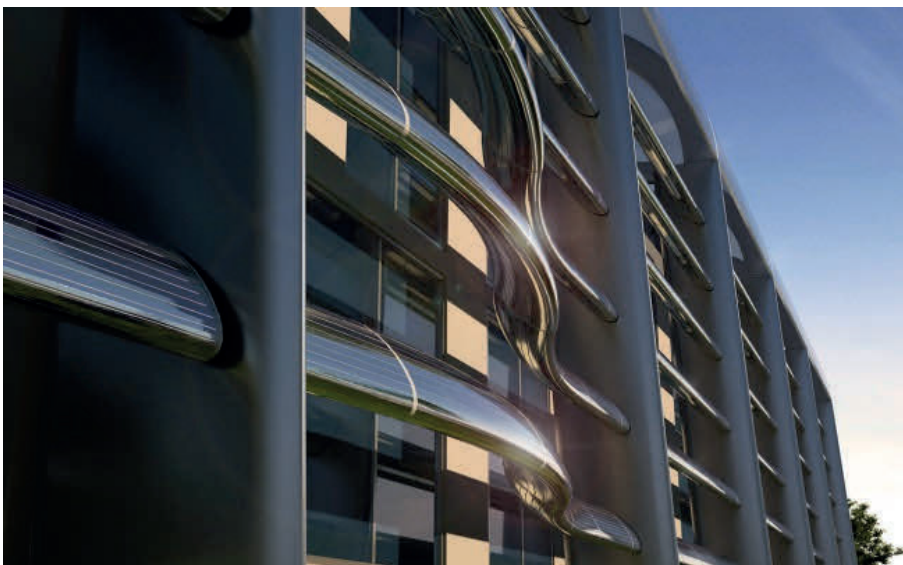


Abb. 3.25: Funktionsintegrierte GFK-Lamellenfassade für die Stadtwerke Rüsselsheim: Integration von Photovoltaik-Elementen in Verschattungslamellen; [Entwurf: Pohl Architekten]

4 Leichtbautragwerke in hybrider Faser/Kunststoff-Verbundbauweise

Die Faser-Kunststoff-Verbunde stellen aufgrund ihrer Materialcharakteristik für das stark konservativ orientierte Bauwesen eine besondere Herausforderung dar. Allerdings gestatten FKV gegenüber konventionellen Baustoffen, wie z. B. Stahl, Beton oder Holz, sowohl die gezielte Anpassung der Einzelkomponenten Fasern und Matrix an die Umgebungsbedingungen als auch die belastungsgerechte Orientierung der Fasern als Steifigkeits- und Festigkeitsträger entlang der Kraftflusslinien. Um dieses intrinsische Verbundverhalten der FKV im Bauwesen voll auszuschöpfen, sind in erster Linie Konstruktions- und Dimensionierungsgrundlagen sowie Prüfvorschriften zu entwickeln und zu etablieren.

Anhand von zwei Referenzobjekten wird die konstruktive und technologische Umsetzung von leichten FKV-Tragwerken mit Hilfe neuartiger Bauweisenkonzepte und Lösungsansätze dargestellt. Im Vordergrund stehen nicht nur hochbeanspruchte Leichtbaukonstruktionen und neue Gestaltungsvarianten für filigrane funktionsintegrative Tragwerke sondern auch der Erkenntnistransfer der Forschungsergebnisse in baupraktische Anwendungen. Am Beispiel des Neubaus des Projektgebäudes MeTeOr (Mensch Technik Organisation) der TU Chemnitz wurde erstmalig die tragende integrierte Sandwichkonstruktion in modularer FKV-Bauweise als orthotrope Halbring-Struktur errichtet.

Im Referenzobjekt „Interaktive Wabenbrücke“ wurden die komplexen statischen und bautechnischen Anforderungen mit Hilfe eines neuartigen Ansatzes leichtbaugerecht erfüllt und zusätzliche Funktionen, wie z. B. individuelle adaptive Beleuchtungen und sensorische Lichtsteuerung, implementiert. Mit der Bereitstellung der neuen GFK-Wabenbauweise wird die Grundlage für Serienanwendungen für Brückentragwerke mit höchstem Leichtbaugrad geschaffen, was ein Alleinstellungsmerkmal im Brückenbau darstellt. Durch die Entwicklung und baupraktische Umsetzung der beiden Referenzobjekte konnte nachgewiesen werden, dass FKV im Bauwesen für tragende und aussteifende Leichtbauwerke prädestiniert sind und ein hohes Potential für Funktionsintegration aufweisen. Die gewonnenen wissenschaftlich-technischen Erkenntnisse zeigen darüber hinaus, dass dem Einsatz von FKV im Bauwesen keine Grenzen gesetzt sind.

4.1 Integrierte tragende GFK-Sandwich-(ITS)-Schale

Im Rahmen von Forschungsarbeiten wurde am Institut für Strukturleichtbau der TU Chemnitz erstmalig eine gekrümmte Fläche im Multi-Material-Design als tragende Fassadenstruktur aus einer GFK-Sandwich-Konstruktion entworfen, rechnerisch nachgewiesen und fertigungstechnisch umgesetzt. Durch die beanspruchungsgerechte Werkstoffkonstruktion und Strukturauslegung dieser unikalen integrierten tragenden GFK-Sandwich-Schale (ITS-Schale) wird das hohe Leichtbaupotential der FKV voll ausgeschöpft. Diese neuartige Leichtbautechnologie in Kombination mit fortschrittlichen Funktionsbauweisen besitzt Pilotcharakter für verwandte Leichtbau-Tragwerke zukünftiger Generation nach dem Vorbild der Natur.

4.1.1 Materialentwicklung

Aufgrund der hervorragenden spezifischen Materialeigenschaften ist glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK) für den Einsatz im Bauwesen prädestiniert. Die Faserorientierung von GFK sollte grundsätzlich für die jeweilige technische Anwendung „maßgeschneidert“ werden, was bei mehrachsigen Belastungen auf sog. multidirektionale Verbunde führt (vgl. Abb. 4.1). Weitere Vorteile bei GFK sind: hohe Festigkeit und Steifigkeit bei niedriger Dichte, Korrosionsbeständigkeit, geringe Wärmeleitfähigkeit und Funktionsintegration. Außerdem ist GFK elektrisch nicht leitend, hat eine hohe Zeitstandfestigkeit und kann ohne Restriktionen frei geformt und gestaltet werden [Nei04]. Als Harzmatrix werden im Bauwesen vornehmlich duromere Systeme wie z. B. Ungesättigte Polyesterharze, Epoxidharze und Polyurethanharze eingesetzt, da diese hitze- und kältebeständig, formbeständig, chemikalienresistent und zu meist schwer entflammbar sind. Weil nach Bauregelliste GFK kein geregeltes Bauprodukt ist, muss beim Einsatz in Bauwerken stets eine Zustimmung im Einzelfall (ZIE) bei der obersten Bauaufsichtsbehörde der Bundesländer beantragt werden, was zwangsläufig einen erhöhten Prüfaufwand nach sich zieht.

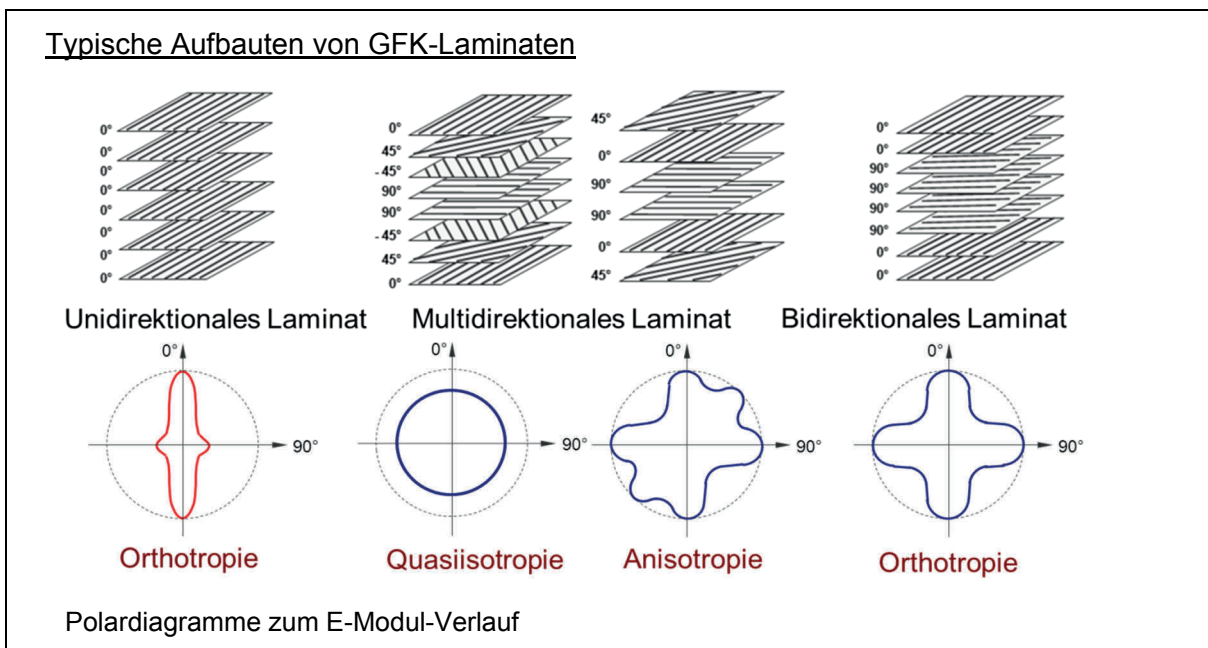


Abb. 4.1: Schematische Darstellung typischer GFK-Aufbauten und zugehöriger E-Modul-Verläufe

Bei der Konstruktion und Bemessung von GFK-Bauteilen ist der materialbedingte aufwendige Planungsprozess zu beachten. Daher ist die Verwendung von sog. Regellaminaten anzustreben. Für die Entwicklung der neuen ITS-Schale wurden GFK-Deckschichten und Flansche aus Regellaminaten nach DIN 18820 und ein Schaumkern aus Hartschaum ausgewählt.

Die Anforderungen an die ITS-Schale resultieren aus der Funktion der Schale als Fassade, die als „Haut“ eines Gebäudes den Innenraum klimatisch nach Außen abtrennt und in der visuellen Wahrnehmung eines Bauwerks eine zentrale Rolle einnimmt. Dabei werden gemäß den Bauregellwerken die verschiedenen Anforderungen: Struktur und Oberflächenqualität, Wärmedämmung und statische Tragfähigkeit kombiniert. Aus den bautechnischen Spezifikationen und der Vordimensionierung folgt als Ergebnis der Materialaufbau bestehend aus zwei etwa

5 mm starken GFK-Deckschichten mit zwischenliegendem Schaumkern der Dicke 212 mm. Hierzu wurden verschiedene Hartschäume untersucht, wobei aufgrund der hervorragenden Materialeigenschaften Polyurethan (PU-Schaum) zum Einsatz kam. Zur Verbindung der Elemente der ITS-Schale wurden die Ränder als Verbindungsflansch mit einem Nut-Feder-System ausgebildet (vgl. Abb. 4.2).

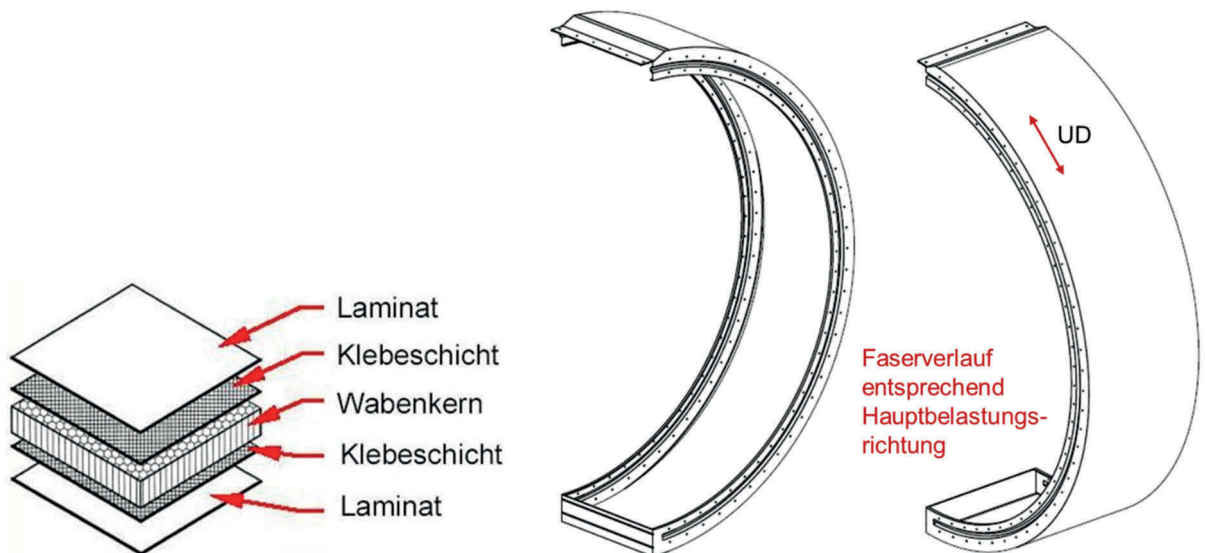


Abb. 4.2: Schematischer Aufbau der ITS-Schale (Mittelmodul)

Die Herstellung der Flansche erfolgte aus Mischlaminaten M2 nach Norm [DIN 18820], die aus dem Mattenteil der Deckschichtlaminare gebildet wurden. Die Sandwich-Deckschichten sind aus FM3-Wickellaminaten aufgebaut worden. Die Anordnung des Laminates bzgl. tangentialer und axialer Richtung des ITS-Schalenelementes beträgt 2:1, wobei die Laminare nach DIN 18820 mit einer Matrix aus ungesättigtem Polyesterharz mit flammhemmenden Zusätzen und unterschiedlichen Glasfaser-Halbzeugen hergestellt wurden.

M2-Laminare umfassen quasiisotrope, mattenverstärkte Halbzeuge mit 30 M.-% Glasanteil. Regellaminare der Gruppe FM3 sind Mischlaminare aus unidirektional aufgebauten Glasfaser-Gelegen sowie Matten. Der Glasanteil des FM3 beträgt 45 M.-%, wobei sie nach DIN 18820 orthotrope Werkstoffeigenschaften aufweisen.

4.1.2 Tragverhalten

Sandwich-Strukturen bestehen in der Regel aus zwei dünnen hochsteifen und hochfesten Deckschichten, die mit einem leichten und zugleich schubsteifen Kern verbunden sind. Dabei sollen durch eine optimale Kombination unterschiedlicher Werkstoffe einerseits ausgewählte mechanische Eigenschaften der Konstruktion erhöht und andererseits weitere Funktionen wie Impactfestigkeit, Wärme- und Schalldämmung integriert werden [Ehr02]. Mit der daraus resultierenden Eigenschaftsvariabilität kann ein breites Spektrum an mechanischen, thermischen und akustischen Eigenschaften abgedeckt werden, was für konträre Anforderungen im Bauwesen besondere Vorteile mit sich bringt. Durch Verwendung eines leichten Kernmaterials ist diese Bauweise äußerst effizient bezüglich Gewicht und Materialeinsatz bei Biegebelastung.

Das Prinzip der Sandwichbauweise basiert im Wesentlichen auf der mechanischen Funktionstrennung zwischen Deckschichten und Sandwichkern. Dabei wird das Tragverhalten von Sandwichkonstruktionen dadurch bestimmt, dass die Deckschichten die hohen Zug- und Druckkräfte aus der Biegebelastung übernehmen und der Sandwichkern die Schubbelastung überträgt (siehe Abb. 4.3). Durch den vergleichsweise sehr leichten schubsteifen Kern wird das Biegeträgheitsmoment stark erhöht. Bei dünnen Deckschichten und hoher Kerndicke ist die Biegesteifigkeit näherungsweise proportional zum Quadrat der Kerndicke.

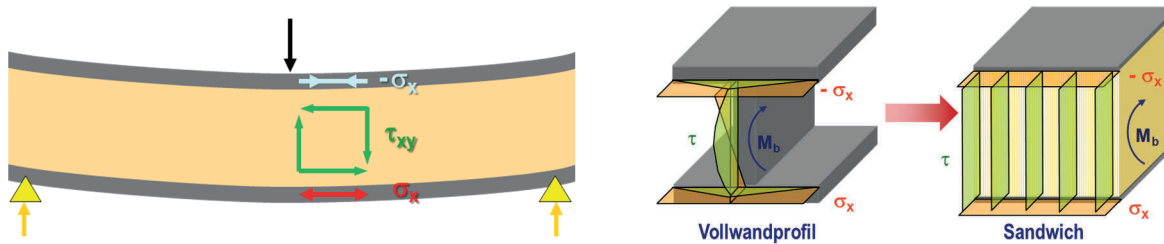


Abb. 4.3: Schematische Darstellung der Spannungen beim Sandwich und Vollwandprofil unter Biegebelastung

Bei der Auslegung von Sandwichstrukturen ist insgesamt zu beachten, dass neben den Eigenschaften der Deckschichten auch die Eigenschaften des Kerns (insbesondere die Schubsteifigkeit und die Druckfestigkeit) maßgebend für die maximale Beanspruchung der Sandwichplatte sind.

4.1.3 Materialcharakterisierung

Der Werkstoffverbund GFK ist nach Bauregelliste kein geregelter Baustoff, zudem liegen derzeit noch keine Allgemeinen Bauaufsichtlichen Zulassungen (ABZ) für die Anwendung von GFK-Sandwichen in tragenden Strukturen vor. Somit müssen für den Einsatz von GFK in Bauwerken Materialuntersuchungen als Grundlage zur Beantragung einer Zustimmung im Einzelfall bei der obersten Bauaufsichtsbehörde durchgeführt werden. Die Verwendung von Regellaminaten nach DIN 18820 gestattet den Verzicht auf die mechanischen Prüfungen zur Bestimmung von Zugfestigkeit, E-Modul und Schubmodul in Richtung der Werkstoffhauptachsen. Daher wurden die mechanischen Kennwerte und Schnittgrößen aus DIN 18820-2, Tabelle 2, 4 und 5 zu Grunde gelegt [DIN 18820]. Bezogen auf die ausgewählten Regellamine FM3 und M2 können folgende Kennwerte als Eingangsgrößen für die Bemessung herangezogen werden; siehe Tab. 4.1. Abminderungsfaktoren wurden nicht berücksichtigt.

Tab. 4.1: Zusammenstellung mechanischer Kennwerte nach DIN 18820

| Regellaminat | Richtung | Laminatdicke [mm] | Bruchkraft [N/mm] | Bruchspannung [MPa] |
|----------------------|----------|-------------------|-------------------|---------------------|
| GF-UP1_FM3 – 9-45 FS | | 5,14 | 1210 | 235 |
| GF-UP1_FM3 – 9-45 FS | ⊥ | 5,14 | 288 | 56 |
| GF-UP1_FM3 – 9-45 FS | 12 | 5,14 | 227 | 50 |
| GF-UP1_M2 – 8-30 FS | isotrop | 8 | 560 | 70 |
| GF-UP1_M2 – 10-30 FS | isotrop | 10 | 700 | 70 |
| GF-UP1_M2 – 12-30 FS | isotrop | 12 | 840 | 70 |

Eine grundlegende Norm für die Untersuchung von Sandwichkonstruktionen aus GFK-Deckschichten und Kernmaterial ist derzeit noch nicht verfügbar. Daher erfolgte die Bestimmung der mechanischen Eigenschaften unter Druck-, Zug- und Schubbeanspruchung nach der Norm DIN EN 14509 „Selbsttragende Sandwich-Elemente mit beidseitigen Metalldeckschichten“ und der darin enthaltenen Prüfnormen (Druckversuch: DIN EN 826, Zugversuch: DIN EN 1607, 4-Punkt-Biegeversuch: DIN 53293; siehe Abb. 4.4). Geprüft wurden verschiedene Hartschäume, wie z. B. expandiertes Polystyrol EPS, extrudiertes Polystyrol XPS und PU-Schaum.

Die Probekörper für Druck- und Zugversuche wurden aus den Hartschäumen (100 mm x 100 mm x 50 mm) gefertigt und an den Lasteinleitungsstellen mit Deckschichten aus GFK verstärkt. Für die Zugversuche wurden zur gleichmäßigen Krafteinleitung und Verstärkung der GFK-Deckschichten Aufleimer aus pultrudierten Profil aufgeklebt (vgl. Abb. 4.4). Für den 4-Punkt-Biegeversuch wurden Hartschaum-Prismen (100 mm x 500 mm x 30 mm) eingesetzt, die beidseitig mit GFK-Deckschichten der Stärke 3 mm verstärkt worden sind (weiterführend in [Ehr11-1]; siehe Abb. 4.4).



Abb. 4.4: Exemplarische Versuchskonfigurationen; Zugversuch (li., mi.), 4-Punkt-Biegeversuch (re.)

Die Zusammenstellung der Prüfergebnisse des favorisierten PU-Schaums ist in Tab. 4.2 angegeben. Dabei erfolgte die Auswertung nach dem Bemessungswert, der sich aus dem Quotienten aus 5% Fraktilwert der Festigkeit und einem werkstoffbezogenen Sicherheitsbeiwert ergibt. Zur Bestimmung des Brandverhaltens erfolgte die Ermittlung der Baustoffklasse nach DIN EN 13501-1, wobei EN ISO 9239-1 zur Anwendung kam. Im Ergebnis wurde von dem GFK-Sandwich eine Baustoffklasse B-s2 d0 erreicht, womit der neue ITS-Verbund als schwer entflammbar gilt (kein brennendes Abtropfen bei Beflammung).

Tab. 4.2: Übersicht zu den Bemessungswerten

| | | Druckfestigkeit | Zugfestigkeit | Schubfestigkeit |
|--------------------|----------------|------------------------|----------------------|------------------------|
| 5% Fraktilwert | X_p | 0,462 MPa | 0,352 MPa | 0,383 MPa |
| Sicherheitsbeiwert | γ_M | 1,15 | 1,30 | 1,17 |
| Bemessungswert | X_p/γ_M | 0,403 MPa | 0,270 MPa | 0,328 MPa |

4.1.4 Konstruktion der Referenzfassade

Zum Nachweis der baupraktischen Umsetzung, der Funktionsfähigkeit und der Nachhaltigkeit wurde die neue integrierte Fassadenstruktur aus GFK-Sandwich als Referenzobjekt in Chemnitz errichtet (siehe Abb. 4.5). Als gestalterisches Kernelement des Projektgebäudes „Mensch-Technik-Organisation“ (MeTeOr) ist die ITS-Fassadenschale im Multi-Material-Design aufgebaut und verweist bereits optisch auf einen neuartigen Gebäudetypus, der eine Mischung aus Labor, Experimentierfeld, Büro, Präsentations-, Lehr- und Forschungsstätte birgt. Die erfolgreiche Planung, Berechnung und Umsetzung einer halbringförmig gestalteten, tragenden Fassadenkonstruktion in neuer GFK-Bauweise konnte durch enge Zusammenarbeit der Forschung (Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung, Forschungsbereich Leichtbau im Bauwesen) und der Industrie (Fiber-Tech Group Chemnitz) an einem Neubau der TU Chemnitz vollzogen werden.



Abb. 4.5: Modell der Referenzfassade mit ITS-Schale am MeTeOr-Gebäude in Chemnitz [ABK-Architekten]

An die Konstruktion der ITS-Schale als zentrales architektonisches Detail des Bauwerks und als "Inspirationsbereich Rundung" wurden hohe Anforderungen hinsichtlich Geometrie, statisches Tragsystem, bauphysikalische Eigenschaften sowie Optik gestellt. Das halbrunde Fassadenelement ist an zwei auskragende Betonplatten angeordnet und spannt von der Boden zur Dachplatte des Gebäudes mit einem Durchmesser von ca. 900 cm und einer Breite von 920 cm (siehe Abb. 4.6). Beidseits ist eine nicht selbsttragende Glasfassade integriert, so dass vom Fassadenteil die Eigen- und Windlasten der Fassade mit aufgenommen werden müssen.

Die ITS-Fassade sollte nach Anforderung der Architekten durch nur vier schmale, vertikal verlaufende Fugen geteilt werden. Horizontale Fugen sind nicht vorgesehen. Die Oberfläche sollte hochglänzend Silber in Autolackqualität ausgeführt werden, so dass sich die umgebende Bebauung, das Grün des Geländes und der Himmel in der lackierten Oberfläche widerspiegeln. Hierdurch stellen sich außergewöhnliche optische Effekte ein.

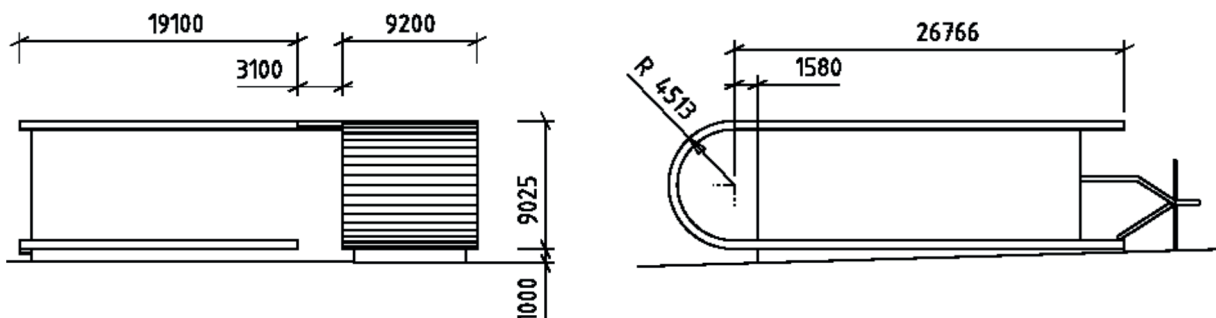


Abb. 4.6: Geometrische Abmessungen (in mm) des MeTeOr-Gebäudes in Chemnitz [Ehr11-4]

Die konstruktive Ausführung der ITS-Fassadenschale beruht auf einer Segmentierung der Rundung in fünf Module (vgl. Abb. 4.7). Die beiden Randmodule wurden in einer Breite von 108 cm hergestellt und die drei Mittelmodule sind jeweils 235 cm breit. Alle Module sind entsprechend des Außenradius 900 cm hoch und 450 cm tief (siehe Anlagen 9.1, Abb. 9.1 und 9.2). Neben den konstruktiven Restriktionen wird die Elementgröße maßgeblich von den fertigungsbedingten und logistischen Restriktionen des Transportes der Module bestimmt.

Die Verbindung der Module untereinander erfolgt über ein spezielles Nut-Feder-System in den Verbindungsflanschen. Das Nut-Feder-System gewährleistet eine ausreichende Schubübertragung und stellt die Passgenauigkeit der Module untereinander sicher. Zwischen den Verbindungsflanschen sind drei umlaufende Dichtungsebenen aus Butylband angeordnet, die durch zweireihige Verschraubungen mit einem Achsmaß von 40 cm vorgespannt werden. Die Module bilden somit im Verbund die halbrunde Fassade als Schalentragwerk, das durch die Rippenverstärkung und den orthotropen Werkstoff optimal an die Belastungen angepasst ist.

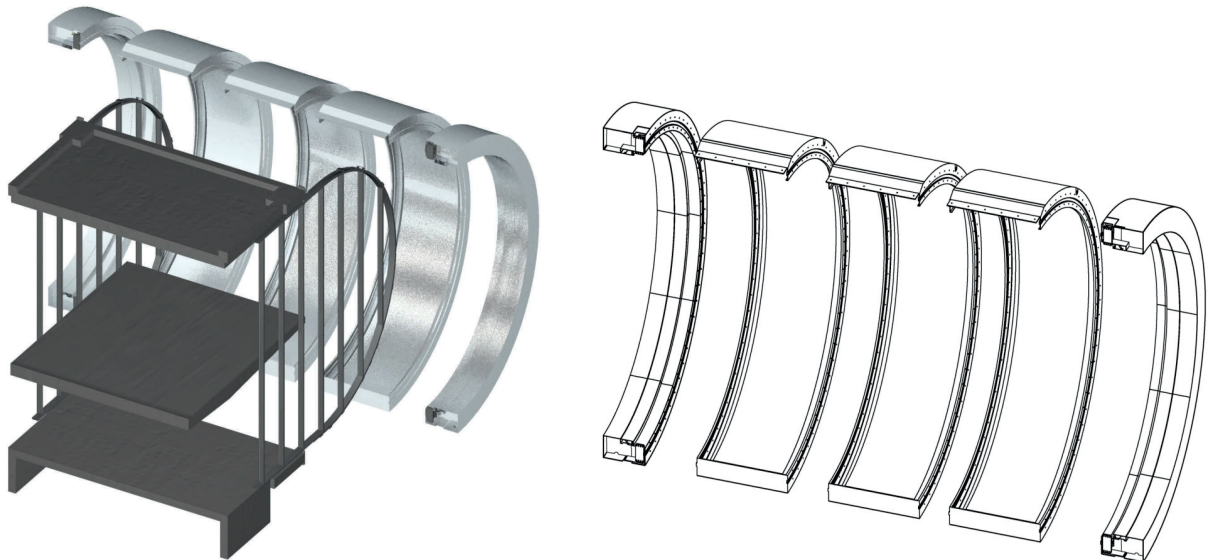


Abb. 4.7: Aufbau (li.) und Aufteilung der Integrierten Tragenden Sandwichschale in Module (re.)

4.1.5 Integration von Funktionen

Durch den Einsatz von Faser-Kunststoff-Verbunden im Bauwesen kann der Vorteil der Gewichts- und damit Ressourcenminimierung mit der Fähigkeit der Integration von Funktionen in der Tragstruktur kombiniert werden. Für die entwickelte ITS-Fassadenschale sollten neben Anforderungen hinsichtlich Geometrie, Optik und Tragfähigkeit sowie Gebrauchstauglichkeit auch die Funktionen Wärmedämmung und Schalldämmung bei variierender Gebäudenutzung integriert werden. Daher wurden Aufbau und Materialeigenschaften des neuen GFK-Sandwiches gezielt angepasst. Zur Gewährleistung einer maximalen Wärmedämmung kam ein Polyurethan-Schaum mit einer Rohdichte von 60 kg/m^3 und einer Wärmeleitfähigkeitsgruppe von WLG 030 nach DIN 4108 ($\lambda = 0,03 \text{ W/(mK)}$) zur Anwendung. Dadurch erfüllt der Schaumkern des GFK-Sandwiches nicht nur die geforderte Tragfunktion, sondern auch den geforderten Wärmeschutz des Fassadenelementes.

Die Anforderungen an die Schalldämmung wurden durch integrierte Akustiklamellen im Innenbereich des gerundeten ITS-Fassadenelementes umgesetzt. Da im MeTeOr-Gebäude Forschungen der TU Chemnitz, Professur Arbeitswissenschaften zu Auswirkungen des Wandels von Technik, Organisation und Mensch untersucht werden, ist die Variabilität und Flexibilität der Raumakustik von besonderer Bedeutung. Dafür erfolgte die Entwicklung und strukturelle Integration von leichten verstellbaren Akustiklamellen an der Innenseite der ITS-Schale. Die GFK-Akustiklamellen schließen direkt an den Fußbodenbereich an und können schallreflektierend (schallhart) und schallabsorbierend (schallweich) eingestellt werden (siehe Abb. 4.8 und weiterführend Anlagen 9.1, Abb. 9.3 und 9.4). Durch die verstellbare GFK-Lamellenverkleidung in Form der Variation der Anstellwinkel soll in künftigen Forschungsprojekten der Einfluss verschiedener akustischer Situationen auf den Mensch getestet werden.

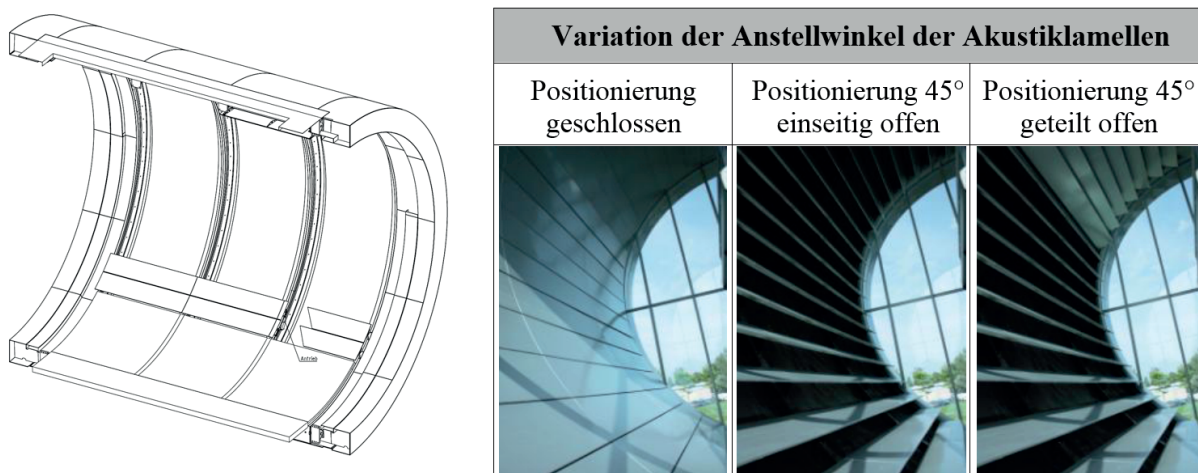


Abb. 4.8: Schematischer Aufbau der Fassadeinnenseite im Akustiklamellen (li.) und Variation der Anstellwinkel der Lamellen zur Anpassung der akustischen Reflexion bzw. Dämpfung

4.1.6 Fertigungstechnische Umsetzung

Zur Fertigung der modularen ITS-Fassade wurde das Laminierverfahren ausgewählt. Hierfür wurden mit Harz vorgetränkte Fasermatten in einschalige offene Formen eingelegt und mit zusätzlichem Harz mittels Handrollen verdichtet. Dieses Verfahren ist bei den hier vorliegenden kleinen Stückzahlen und komplexen Geometrien sowie aufgrund der im Vergleich zu anderen Technologien (Pressverfahren, Wickelverfahren, Pultrusion) geringen Werkzeug- und Anlagenkosten besonders prädestiniert. Durch die Applikation von Gelcoat-Schichten wird ferner die Forderung nach einer hohen Oberflächenqualität erfüllt.

Für eine wirtschaftlich vertretbare Umsetzung der modularen ITS-Fassade bedarf es eines optimierten Formwerkzeugs zur effektiven Fertigung der Module. Dabei wurde ein segmentierter Aufbau mit abnehmbaren Seitenwänden entwickelt, um flexibel auf einer halbkreisförmigen Grundstruktur die Einlegeteile sowohl für die Mittel- als auch Randmodule aufbauen zu können. Zudem enthält die Ausführung keine Entformungsschrägen (siehe Abb. 4.9). Das modulare Werkzeugkonzept besteht aus 170 CNC-gefrästen Einzelteilen und ist auf einer mehrachsiger justierbaren Stahlunterkonstruktion angeordnet. Die Herstellung der einzelnen Segmente erfolgte auf einer 5-Achs-CNC-Fräsmaschine, wobei diese Fertigungsmethode die exakte Umsetzung der CAD-Daten gestattet.

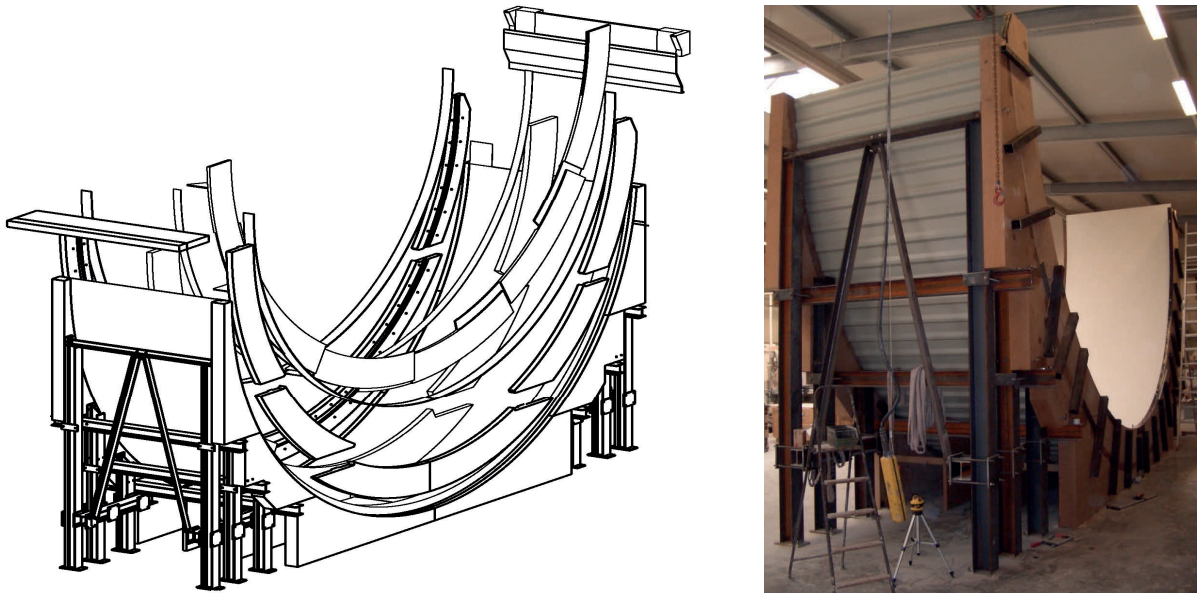


Abb. 4.9: Modulares Werkzeugkonzept und montiertes Formwerkzeug zur Fertigung der ITS-Schale [Ehr11-2]

Mittelmodule

Die Fertigung der ITS-Module erfolgte mittels „Nass-in-Nass“-Laminieretechnologie. Bei der Herstellung der mittig angeordneten drei Mittelmodule wurden GFK-Sandwichstrukturen mit angeformten Seitenflächen laminiert. Die Seitenflächen dienen dabei zur Aufnahme und Positionierung der Dichtungselemente sowie zur Verankerung der Akustiklamellenführungen. Zur Herstellung der Deckschichten des Sandwiches kam ein Regellaminat FM3 der Nennstärke 5,1 mm entsprechend DIN 18820-2 zur Anwendung. Zum Schutz der äußeren Deckschichten wurde im Außenbereich zusätzlich zum Gelcoat eine 4-schichtige Versiegelung aus einem epoxidharzbasierten Primer und Decklacken aus Polyurethanharz aufgebracht. Die im Gebäudeinneren liegenden Flächen wurden mit Reinharz-Topcoat beschichtet. Darüber hinaus wurden die Seitenflächen des Sandwiches durch die Zusammenführung der Deckschichtlamine umlaufend vor äußeren Einflüssen geschützt. Als Schaum für das Sandwich kam PU-Schaum RG 60 zum Einsatz, der in einer Materialstärke von 212 mm aufgetragen wurde.

Für die Verbindungsflansche der Elemente untereinander sowie für die Verstärkungen im Bereich der Anbindungen zum Gebäuderohbau wurde ein Laminat M2 nach DIN 18820 verwendet. Die Verbindungsflansche sind mit einer Stärke von jeweils 10 mm als Nut-Feder-System ausgebildet worden. Zwischen den Flanschen wurden drei durchgehende Dichtungsebenen aus Butyl-Band eingesetzt, wobei die Vorspannung der Dichtungen mittels der doppelreihigen Verschraubung der Flansche erfolgte.

Randmodule

Die Randmodule bilden den äußeren Fassadenabschluss, der gestalterisch als Gesimse umlaufend um das Gebäude fortgesetzt wird. Dafür wurden erhöhte Anforderungen an die Tragfähigkeit gestellt, da von den Randmodulen die Belastungen der Pfosten-Riegel-Konstruktion der halbkreisförmigen Glasfassade aufzunehmen und abzuleiten sind. Zudem werden über die Randmodule die Hauptwindlasten in die Schalenkonstruktion eingeleitet. Tragender Bestandteil der Konstruktion ist ein integrierter geschweißter Stahlkastenträger aus S235, der durch Isolation und Hohlprofilträger aus M2-Laminaten komplettiert wird (vgl. Abb. 4.10).

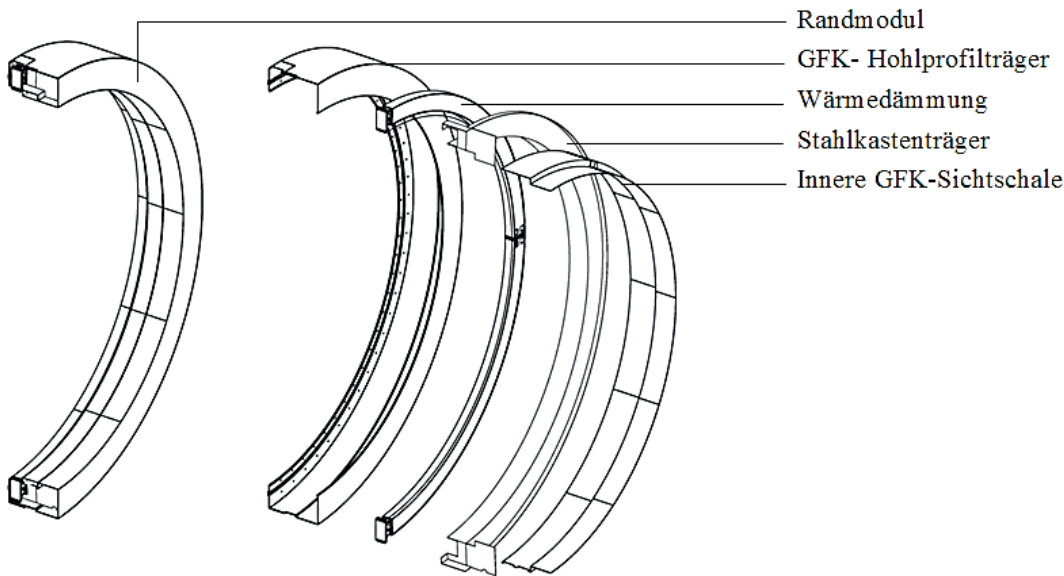


Abb. 4.10: Schematische Darstellung des Aufbaus der Randmodule (Explosionszeichnung)

Die Hohlprofilträger sind mit einem halbkreisförmigen Kastenprofil aus GFK mit Laminaten M2 nach DIN 18820 sowie daraus weitergeführten überlappenden Seitenwangen aus Laminat M2 verkleidet worden. In die GFK-Hohlprofilträger wurde die notwendige Wärmedämmung integriert. Bei der Herstellung des Randmoduls erfolgte bereits im Werkzeug die Montage des Stahlringträgers in die vorab laminierte GFK-Kastenkonstruktion. Der Träger bildete somit die Basis zur Befestigung der inneren Sichtschale, die mittels Dickschichtverklebung mit dem Ringträger verbunden wurde. Die Oberfläche der Randmodule wurde analog zu den Mittelmodulen in Autolackqualität hochglänzend ausgeführt.

Verankerung am Bauwerk

Der Anschluss der modularen ITS-Fassade wurde als Gelenk ausgebildet, wobei die Befestigung der Rand- und Mittelmodule am Bestandsbauwerk über Stahleinbauteile in den Deckenscheiben erfolgte. Die Randmodule wurden über die Flanschverbindungen an den Stahlträgern mit den Stahlinlets der Betonkragdecken des Tragwerks verbunden. Zur kraftschlüssigen Verankerung zum Stahlinlet kamen hochfeste vorgespannte HV-Verschraubungen M20 zum Einsatz. Zur weiteren Anbindung der Pfosten-Riegel-Unterkonstruktion der Glasfassade an die Randmodule wurden U-förmige Adapter vorgesehen, die direkt mit dem Stahlträger der Randmodule verbunden sind.

Zur Befestigung der Mittelmodule am Bestandsbauwerk wurden die Laminatdeckschichten an der Oberseite des GFK-Sandwiches zusammengeführt. Zwischen den Deckschichten sind weitere Regellamine M2 bis zu einer Materialstärke von 15 mm einlaminiert worden, um so den hochbeanspruchten Befestigungsbereich zusätzlich zu verstärken und die Lasteinleitung ins Laminat zu verbessern. Die Befestigung an der oberen Deckenscheibe des Massivbaues erfolgte mit bauaufsichtlich zugelassenen, chemisch abbindenden Verankerungen (Fischer FHB II-AL M16x125/30) sowie Bundhülsen zum Schutz des Laminates und zur Verbesserung der Lochleibung. Die untere Befestigung der Mittelmodule ist mit Ankern (Fischer FAZ II 16/25) an der unteren, im Auflagerbereich verstärkten Deckenscheibe ausgeführt worden (siehe Abb. 4.11).

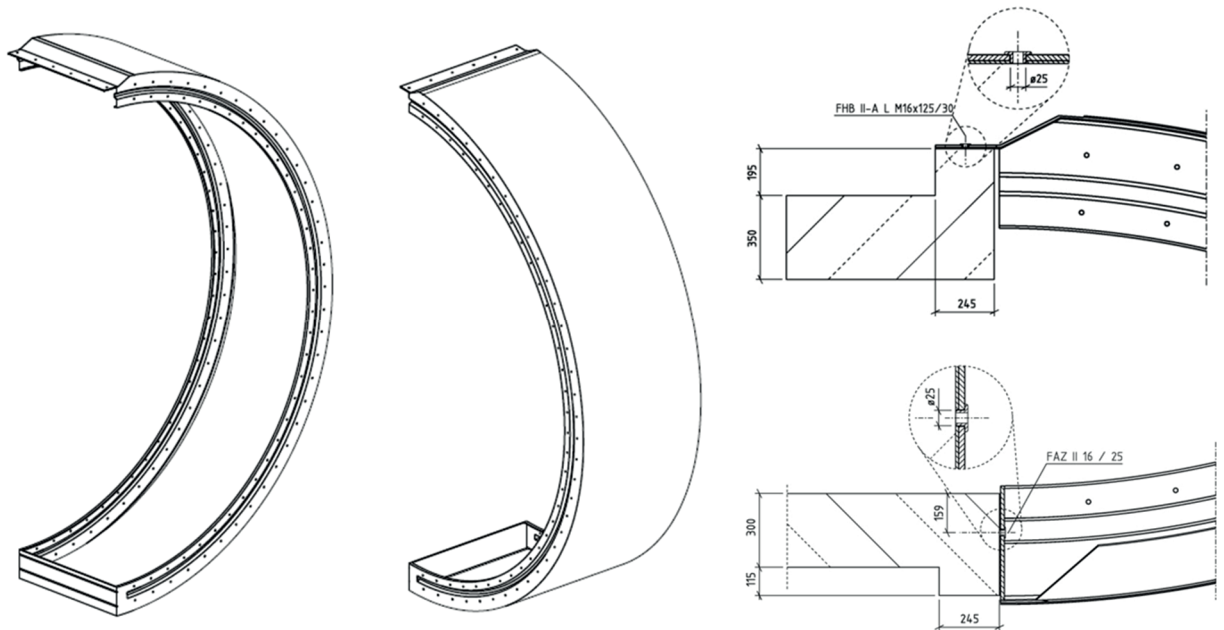


Abb. 4.11: Schematische Darstellung der Befestigung der Mittelmodule am Bauwerk

4.1.7 Statische Berechnung

Die statische Berechnung erfolgte mittels der Methode der Finiten Elemente (FEM), wobei zur Auswertung das Programm Hyperworks zum Einsatz kam. Für die Erstellung des Berechnungsmodells wurden die geometrischen Parameter der CAD-Konstruktion der ITS-Schale mit Rand- und Mittelmodulen sowie Verankerungen übernommen. Der prinzipielle Aufbau des FEM-Modells ist in Abb. 4.12 dargestellt (ca. 1,1 Mio. Elementen, davon 0,4 Mio. Kontaktelemente).

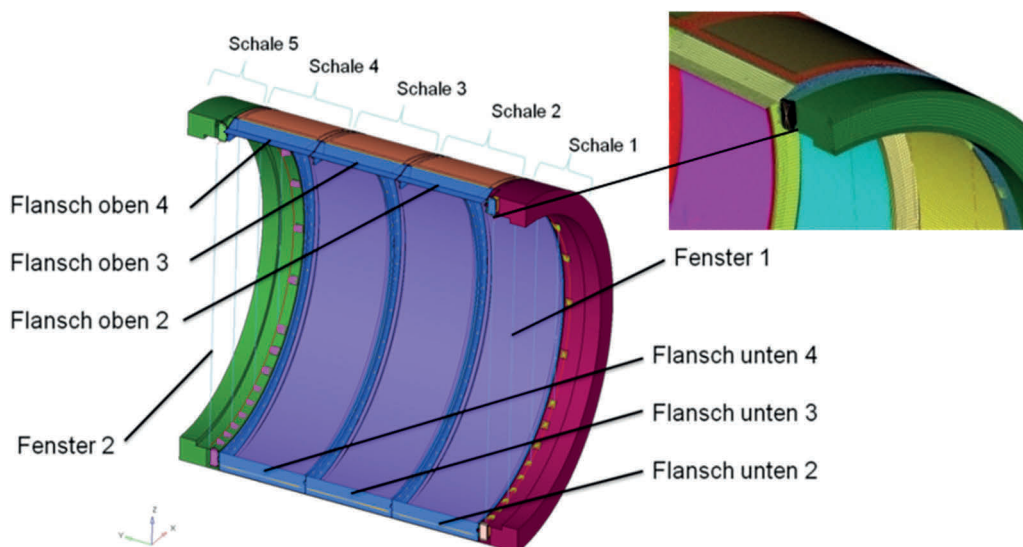


Abb. 4.12: Aufbau des FEM-Modells

Für die statische Berechnung ist die Definition der verschiedenen Lastzustände (Einwirkungen auf das Bauwerk) nach DIN 1055 erforderlich. Zur Bemessung sind dabei verschiedene Lastannahmen getroffen worden (siehe dazu Anlagen 9.1, Abb. 9.5, Abb. 9.6).

Maßgebend für die Berechnung sind zwei Einwirkungskombinationen [DIN1055]:

- Kombination aus Eigenlast, Verkehrslast, Wind- und Schneelast,
- Abgeminderte Kombination mit zusätzlichen Lasten aus einem Temperaturunterschied von 50 K zwischen innerer und äußerer Deckschicht des Traglaminates der Mittelmodule.

Zur Bewertung der Berechnungsergebnisse wurden die Teilsicherheitsbeiwerte nach der BÜV-Empfehlung "Tragende Kunststoffbauteile im Bauwesen" [BÜV] herangezogen. Detaillierte Ausführungen dazu sind in [Ehr11-3] zusammengefasst.

Für die FE-Berechnung wurden die experimentell ermittelten mechanischen Eigenschaften der Werkstoffe verwendet, wobei für die GFK-Regellamine FM3 und M2 die minimal zulässigen Werte nach DIN 18820 als Eingangsdaten dienten und die für Regellamine geltenden Abminderungsbeiwerte berücksichtigt wurden. Der statische Nachweis ist entsprechend der BÜV-Empfehlung „Tragende Kunststoffe im Bauwesen“ nach den Klassen der Lasteinwirkungsdauer (KLED I: ständige Belastung, KLED II: ständige/lange Belastung, KLED III: ständige/kurze Belastung) geführt worden. Dabei erfolgten die Berechnungsabläufe mit den abgeminderten Festigkeits- und Steifigkeitskenngrößen gemäß Anlage 9.1, in den Abb. 9.7 bis Abb. 9.12.

Um die Kriecheinflüsse zur Berechnung der Dehnungen und die Dehnungsbegrenzungen zu berücksichtigen, wurde ein nach DIN 18820 ermittelter Kriechfaktor herangezogen. Die richtungsabhängigen Materialeigenschaften aufgrund der materialbedingten Anisotropie sind auf die Werkstoffhauptachsen bezogen worden. Aufgrund der hohen Komplexität der Kontaktdefinition zwischen den einzelnen Modulen musste eine geometrisch nichtlineare Berechnung durchgeführt werden, die eine sehr hohe Berechnungsdauer zur Folge hat und zudem die Auswertung der Ergebnisse erschwert.

Zur Minimierung des Berechnungsaufwandes wurden statische Vergleichsrechnungen mit dem FEM-Berechnungsprogramm Sofistik durchgeführt. Das Programm ist speziell für die Erstellung von Statiken für das Bauwesen geeignet und erlaubt die Abminderungsfaktoren der Widerstandsgrößen nach BÜV-Empfehlung zu implementieren. Das anisotrope Werkstoffverhalten der Deckschichtlamine des Sandwiches ist durch die Steifigkeitseingabedaten berücksichtigt worden (weiterführend siehe [Ehr11-3]).

Als Ergebnis der statischen Berechnungen wurde die Verformungsanalyse der Gesamtstruktur unter Einwirkung einer Lastkombination aus Eigen-, Verkehrs-, Temperatur-, Wind-, Schneelasten ausgewählt. In Abb. 4.13 ist ein exemplarischer Ergebnisplot dargestellt, woraus ersichtlich ist, dass die ITS-Fassadenschale des MeTeOr-Gebäudes mit der Gesamtverformung von bis zu 10 mm eine hohe, „anisotrope“ Steifigkeit aufweist (weitere Berechnungsergebnisse in Anlage 9.1, Abb. 9.13 und Abb. 9.14). Der Ansatz von physikalisch begründeten Festigkeits- und Versagenskriterien erlaubt ferner sehr hohe Werkstoffausnutzungen [Kro08], die allerdings beim hier notwendigen Festigkeitsnachweis aus baurechtlichen Gründen noch nicht angewendet werden darf.

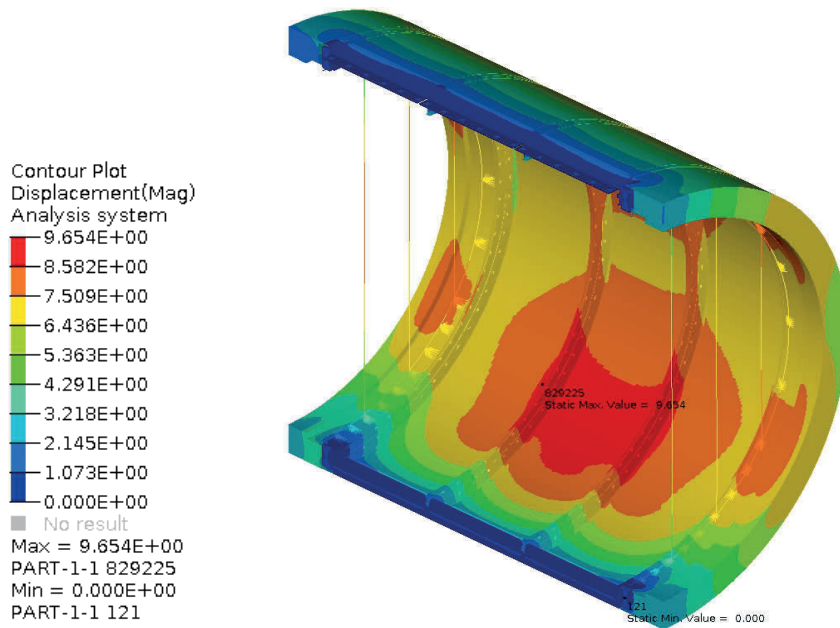


Abb. 4.13: Verformungsanalyse am Gesamtmodell der ITS-Schale für eine ausgewählte Lastkombination aus Eigen-, Verkehrs-, Wind-, Schnee- und Temperaturlasten ($g = 0,5\text{kN/m}^2$; $q = 3\text{ kN/m}^2$; $w = 0,65\text{ kN/m}^2$; $s = 1,47\text{kN/m}^2$; weiterführend in [Ehr11-3])

4.1.8 Errichtung des Referenzobjektes „MeTeOr“

Im Anschluss an die Herstellung der Rand- und Mittelmodule der ITS-Fassadenkonstruktion erfolgte die Endbearbeitung, Transport und Endmontage am Bauwerk. Diese Arbeitsschritte zur Errichtung des Referenzobjektes stellten aufgrund der großen Abmessungen der Schalenelemente besondere Herausforderungen dar. Zum Handling der Bauteile für die weitere Nachbearbeitung und Lackierung in der Fertigungshalle wurde zunächst eine Manipulationsvorrichtung gefertigt, die ein Drehen aus dem Formwerkzeug gestattet (vgl. Abb. 4.14, li.). Dafür wurde ein Trägerkreuz im Schwerpunkt der Schalenelemente angeordnet, das ein kraftfreies Drehen der Bauteile um die Schwereachsen erlaubt. Diese Trägerkreuze wurden neben dem innerbetrieblichen Handling auch für den Transport vom Hersteller zur Baustelle, die Lagesicherung auf den Tiefladern sowie zum Abladen der Teile auf dem Baufeld genutzt (siehe dazu Abb. 4.14, mi. und re.; weiterführend in Anlagen 9.1, Abb. 9.15 bis Abb. 9.17).



Abb. 4.14: Manipulationsvorrichtung (li.), Entformung des Mittelmoduls (mi.), Montage des Mittelmoduls (re.)

Die Verbindung zum Bestandsbauwerk erfolgte mit bauaufsichtlich zugelassenen Schwerlastankern. Dafür wurde eine weitere Handlingsvorrichtung zum Drehen der ca. 2,0 t schweren Randmodule in die Montageposition umgesetzt. Die Randmodule konnten dabei nur von außen montiert werden. Hierzu wurde ein schwenkbarer Haken mit einer Auslage von 1.100 mm gefertigt, der an einen im Schwerpunkt der Randmodule liegenden Längsträger befestigt wurde. Die ca. 1,3 t schweren Mittelmodule wurden zur Montage mit der flexibel innen und außen montierbaren Handlingsvorrichtung in eine Tunnelposition gedreht. Die Tunnelposition gestattet den Einsatz von 2 Kränen zum Schwenken der Module in die hängende Montageposition (vgl. Anlagen 9.1, Abb. 9.16, Abb. 9.17).

4.1.9 Bewertung des Leichtbaugrades

Die konstruktive, statische und praktische Umsetzung der neuartigen ITS-Schale zeigt, dass Faser-Kunststoff-Verbunde im Bauwesen in tragenden Konstruktionen erfolgreich eingesetzt werden können. Darüber hinaus führen sie bei zielgerichtetem Einsatz zu einer wirtschaftlich vertretbaren Verwirklichung außergewöhnlicher Architekturideen in Kombination mit unikalear Funktionsintegration bei hoher Energieeffizienz.

Am Beispiel des Referenzbauwerkes MeTeOr konnten demnach sowohl die hohen gestalterischen Anforderungen umgesetzt als auch die angestrebten Funktionen Wärmedämmung und Schalldämmung als variable Parameter in die neue Faserverbund-Sandwichstruktur integriert werden. Darüber hinaus wurden – aufgrund enormer Gewichtseinsparung durch die neue Leichtbauweise – die Deckenbelastungen der Anschlusskonstruktionen durch das geringe Eigengewicht der Schalenmodule minimiert. So etwa konnte durch die ITS-Fassade im Vergleich zu Stahl 60% an Eigengewicht eingespart werden (siehe Tab. 4.3). Die bereits in die Elemente integrierte Wärmedämmung sorgt durch den hohen Grad der Vorfertigung für kurze Montage- und Nacharbeitszeiten der Schale am Bauwerk. Die bei der Entwicklung und Umsetzung der ITS-Schale gewonnenen Erkenntnisse besitzen Pilotcharakter für verwandte Leichtbau-Tragstrukturen im Bauwesen.

Tab. 4.3: Vgl. von Eigengewicht je Element der MeTeOr-Fassade beim Einsatz von verschiedenen Werkstoffen

| | | GFK-Sandwich | Holz | Stahl | Stahlbeton |
|---------------|-----------|---------------------|-------------|--------------|-------------------|
| Traggerüst | kg | - | 1000 | 2300 | 15000 |
| Fassade | kg | - | 1100 | 900 | 800 |
| Gesamt | kg | 1300 | 2100 | 3200 | 15800 |

Durch die enge Zusammenarbeit von Forschung und Industrie wurde an einem Neubau der TU Chemnitz die o. a. ITS-Schale erstmalig als tragende integrierte Sandwichkonstruktion in modularer Faserverbundbauweise umgesetzt und als gestalterisches Kernelement in Form einer funktionsintegrierten Halbring-Struktur am Projektgebäude MeTeOr errichtet (vgl. Abb. 4.15 und Abb. 4.16, Anlagen 9.1, Abb. 9.18).



Abb. 4.15: MeTeOr-Gebäude der TU Chemnitz mit ITS-Schale



Abb. 4.16: Referenzfassade mit ITS-Schale am MeTeOr-Gebäude der TU Chemnitz

4.2 Modulare GFK-Tragwerke in Wabenbauweise

Die zeitgenössische Architektur ist geprägt von der freien Formfindung in Kombination mit Ressourcen- und Energieeffizienz, Nachhaltigkeit sowie Funktionsintegration. Auch bei Tragstrukturen im Brückenbau ist die Überführung moderner Entwurfsideen in die Praxis wesentlich von der Leistungsfähigkeit der Werkstoffe abhängig. Im Fokus stehen gestalterische Erfordernisse, die Forderung nach hoher Tragfähigkeit, Funktionsimplementierung sowie Effizienz während der Errichtung und im Betrieb. Am Beispiel einer unikalen „Interaktiven Wabenbrücke Chemnitz“ mit multifunktionalen GFK-Strukturkomponenten in Wabenbauweise, die von der Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung gemeinsam mit den Industriepartnern Fiber-Tech Group, Hentschke Bau GmbH und steelconcept GmbH im Rahmen eines Forschungsprojektes entwickelt und erprobt wurde, werden neuartige Brückenkonzepte dargestellt und die technologische Umsetzung von der Idee bis hin zur Realisierung erläutert werden.

4.2.1 Formfindung und Tragstruktur

Modularität ist der Schlüssel zur effizienten Herstellung von Leichtbaustrukturen. Dabei erfolgt die Aufteilung der Trag- oder Hüllstruktur in Bauteile, die als Module, Komponenten oder Bausteine bezeichnet werden. Bei geeigneter Form und Funktion können diese standardisierten Einzelbauteile zusammengefügt werden oder über entsprechende Schnittstellen interagieren. Vorteile einer modularisierten Bauweise im Baukastenprinzip sind der vergleichsweise geringe Aufwand an Werkzeugkosten bei der Herstellung sowie der hohe Vorfertigungsgrad und die Produktivität. Diese Bauart wird häufig auch bei der Entwicklung von multifunktionalen Leichtbau-Strukturkomponenten für Brückentragwerke genutzt.

Der Entwurf von leichtbaugerechten Brückenkonstruktionen basiert i. d. R. auf Optimierungsprozessen zur Formfindung mit dem Ziel, maximale Kräfte mit minimaler Masse zu übertragen. Konstruktionen aus der Natur sind hier oft Vorbilder für Leichtbautragstrukturen, z. B. das Netz der Spinne oder der Aufbau der Kieselalgen.

Für flächige, hochbelastete Tragstrukturen eignen sich Wabenkonstruktionen, wie sie etwa in der Natur bei Wabennestern von Honigbienen vorkommen. Die Struktur der Bienenwabe beinhaltet eine exakte Anordnung aus aneinander gereihten, gleichmäßigen sechseckigen Zellen mit ca. 0,07 mm starken Zellwänden. Von allen denkbaren lückenlos aneinander reihbaren Zellgeometrien weisen sechseckige Formen das beste Verhältnis von Wandmaterial zu Volumen auf und werden in der Technik eingesetzt, etwa um Konstruktionen zu stabilisieren [Deg09]. Dies führt wiederum zur gleichmäßigen Kraftverteilung im Bauteil bei gleichzeitig optimalem Materialeinsatz, was einem hohen Leichtbaugrad entspricht.

Aufgrund der hohen Stabilität der Wabenstruktur sowie dem modularen Aufbau wurde die Wabenbauweise als Grundform zur Umsetzung der hier betrachteten GFK-Tragkomponenten für den Brückenbau ausgewählt. In Kombination mit hochsteifen und festen Deckschichten und der Wabenstruktur als Kernschicht resultiert eine extrem leichte Sandwichkonstruktion aus GFK (vgl. Abb. 4.17).

Die Ermittlung der Wabenelementgröße folgt aus einem Kompromiss zwischen Anzahl der benötigten Einzelwaben je Fläche und dem Flexibilitätsraster der Strukturkomponente in Länge und Breite. Zudem hat die Stärke der Deckschichten als Biegebalken zwischen den Wabenwänden entscheidenden Einfluss auf die Wabengröße und ist maßgebend für die statische Tragfähigkeit der Gesamtstruktur.

Die Einleitung flächiger Lasten in die Wabensandwichstruktur erfolgt im Wesentlichen in die Zug- und Druckgurte der Deckschichten, wobei sich Schubkräfte im Kern ausbilden. Zur Aufnahme der hohen Belastungen wurde eine unidirektionale textile Verstärkung in beiden Deckschichten angeordnet. Um die Schubbeanspruchung optimal aufzunehmen, ist das Laminat der Waben im Kern mit Verstärkungsrichtung $\pm 45^\circ$ ausgeführt worden (vgl. Abb. 4.17).

Für die Bemessung der Einzelwabe erfolgt die Einleitung punktueller Lasten an der ungünstigsten Position im Sandwich, was der mittigen Anordnung im Wabenfeld entspricht. Hierdurch wird die Sandwichhaut – neben der Gesamt-Druckbeanspruchung infolge Sandwichbelastung – zusätzlich auf Biegung beansprucht, womit eine deutliche Erhöhung der Wandstärke in der Deckschicht einhergeht. Der Vergleich der Deckschichtstärken in Abhängigkeit von der Stützweite bei gleichbleibender Flächenlast auf das Wabenmodul gegenüber dem normierten Flächengewicht der gesamten Tragstruktur (siehe Abb. 4.17) hat gezeigt, dass eine Wabekernhöhe von 250 mm und eine Stützweite von 500 mm zu einem Minimum des Flächengewichtes führt (weitere Ausführungen hierzu in [Röh14]).

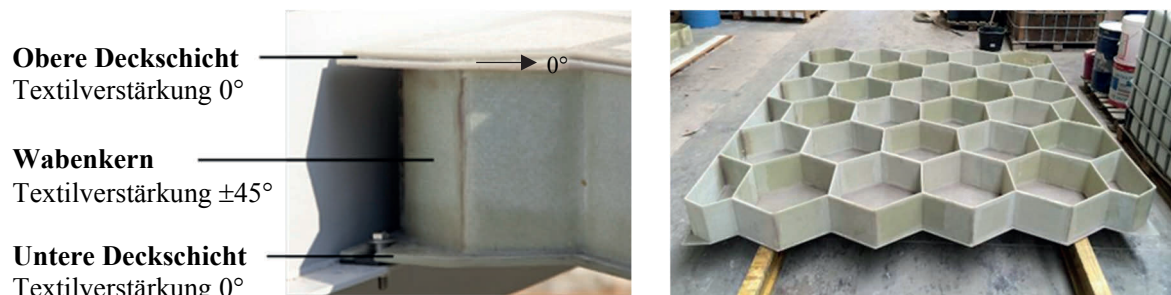


Abb. 4.17: Aufbau des GFK-Wabensandwiches (li.), Wabekern nach Vorbild der Bienenwabe (re.)

4.2.2 Materialkombination

Bei der Materialkombination des GFK-Wabensandwiches des neuen Leichtbau-Brückentragwerks wurde neben den Restriktionen hinsichtlich Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit darauf geachtet, dass die gewünschte Transluzenz der GFK-Deckschichten mit den eingesetzten Standardlaminaten und dem duromeren Harzsystem erreicht wird, um eine Integration von LED-Beleuchtung in die Module zu gewährleisten. GFK ist im Allgemeinen lichtdurchlässig, wobei die Transluzenz mit sinkendem Fasergehalt zwar zunimmt, allerdings das Tragvermögen abnimmt. Dies erfordert eine exakte beanspruchungsgerechte Dimensionierung der GFK-Komponenten unter Beachtung der Anforderung an die Lichtdurchlässigkeit.

Der Aufbau der neuen modularen Wabensandwich-Module erfolgte durch gezielte Kombination von festigkeits-, form- und funktionsgebenden Materialstrukturen aus GFK. Das verwendete Laminat ist ein Standardlaminat nach DIN 18820, sog. Mischlaminat des Typs

GF-UP1-MW1-n-40 (Kurzbezeichnung: MW1, n: Anzahl der Lagen). Die obere Deckschicht besteht dabei aus 21 Lagen MW1 mit einer theoretischen Laminatdicke von 17,2 mm. Entsprechend der Anforderungen an die Modul-Oberfläche können Beschichtungen wie z. B. eine rutschfeste Verschleißschicht integriert werden, die aus einem nachträglich aufgetragenen Harz-Sand-Gemisch aufgebaut ist. Die untere Deckschicht besteht aus 11 Lagen MW1 mit einer Materialstärke von 9,0 mm.

Die GFK-Waben bilden die Kernschicht des Wabensandwiches und werden aus MW1 mit 2 x 5 Lagen und einer theoretischen Laminatstärke von insgesamt 8,0 mm zusammengesetzt. Deckschichten und Kernschicht werden zum GFK-Wabenmodul verklebt (siehe Abb. 4.18).

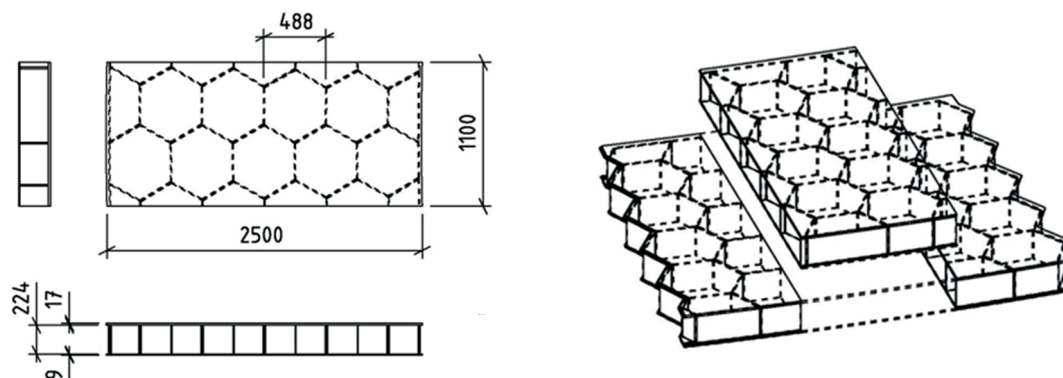


Abb. 4.18: GFK-Wabensandwich-Modul – Aufbau und Geometrie (li.); Isometrie (re.)

4.2.3 Technologische Umsetzung

Die üblichen Herstellungstechnologien für FKV-Bauteile reichen von der manuellen Einzelherstellung (Handlaminat) bis zu automatisierten Fertigungsprozessen (wie z. B. Pressverfahren, Injektionsverfahren und Wickeltechnologie). Dabei werden die Verfahren hinsichtlich Produktformen, Bauteildimensionen, Bauteileigenschaften sowie Kosten ausgewählt. Für die Herstellung ebener Leichtbauträgerstrukturen in Wabenbauweise haben sich nach dem Vergleich der Technologiekonzepte zwei Varianten der Vorfertigung einzelner Waben mit anschließender Verbindung zu einem Wabenkernmodul als besonders vorteilhaft erwiesen: *Laminierverfahren* und *Wickeltechnologie*. Die einzelnen Vorteile dieser Technologien sind vor allem die kostengünstige Serienfertigung mittlerer Losgrößen der Einzelwaben und die Flexibilität hinsichtlich Breite, Länge und Höhe der aus Einzelwaben aufgebauten Sandwichmodule. Unter der Maßgabe der Erzielung eines hohen Vorfertigungsgrades, Modularität und Qualität wurden beide Fertigungsverfahren im Hinblick auf die Erarbeitung von ganzheitlichen Fertigungs- und Werkzeugkonzepten untersucht und bewertet.

Laminierverfahren

Zur Herstellung von komplexen Geometrien, wie der Wabensandwichstruktur für die Leichtbaubrücke, ist die Laminiertechnologie aufgrund der einfachen Handhabung, der Variabilität in der Struktur sowie der Flexibilität in verwendeten Verstärkungshalbzeugen prädestiniert. Insbesondere mit dem Handlaminierverfahren können Bauteile beliebiger Größe mit unterschiedlichen Wandstärken und ggf. Hinterschnidungen hergestellt werden. Der Anteil an Verstärkungsfasern beträgt dabei etwa 40% [Fle 99]. Bei der Fertigung von GFK-Bauteilen mittels Handlaminat werden die Fadenhalbzeuge zumeist als Rovings, Matten oder Gewebe

abgelegt und von Hand mit einer Rolle oder einem Pinsel getränkt. Dabei kommen duroplastische Kunststoffe als Matrixwerkstoffe zur Anwendung, die anfangs in dünnflüssiger Form vorliegen und aufgrund ihrer geringen Viskosität eine sehr gute Benetzung der Fasern gestatten. Faserablage und -benetzung mit dem Matrixwerkstoff erfolgen gleichzeitig mit dem Formgebungsverfahren in einem komplexen Werkzeug, welches aus Holz, Stahl oder Kunststoff besteht. Nach der Verdichtung und Entlüftung erfolgt die Aushärtung der Matrix. Anschließend können Bauteile entformt und nachbearbeitet werden (vgl. Abb. 4.19).

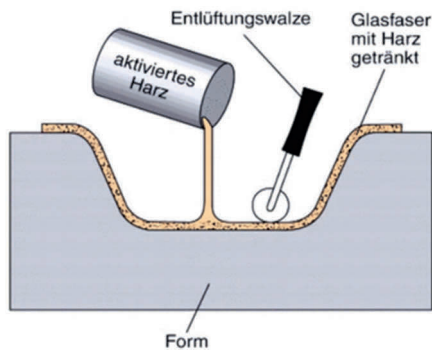


Abb. 4.19: Verfahrensschema Laminieretechnik nach [Mic 90] (li.); Handlaminiertechnik in der Praxis (re.)

Für die Herstellung von Versuchsmustern wurden Werkzeuge in Wabenform entworfen und konstruiert. Aufgrund der hohen Anforderungen an den Formenbau in den Punkten Maßhaltigkeit und Lagegenauigkeit ist als Schalung die mitteldichte Holzfaserverplatte (MDF) verwendet worden. Unter Berücksichtigung der materialtypischen Schwindeneigenschaften von UP-Harz basierten GFK wurden die Formflächen im Hinblick auf die geforderten Abmessungen mittels hochpräziser CNC-Technik bearbeitet. Anschließend erfolgte die Beschichtung der Formen mit einem organischen Lacksystem, um damit die Entformung des Laminates zu vereinfachen, den Verschleiß der Formen zu minimieren und die gewünschte Oberflächengüte der Wabenprofile zu erzielen.

Die Wabenstege aus GFK-Streifen wurden in Form von gestreckten Halbwaren laminiert (siehe Abb. 4.20). Dafür kam Laminat MW1 mit 2 x 5 Lagen und einer Laminatstärke von insgesamt 8,0 mm zum Einsatz. Die Herstellung der Laminare im Versuchsprozess erfolgte nach folgenden Arbeitsschritten:

1. Prüfung der Formoberfläche auf Verunreinigung und Beschädigung,
2. Auftragen eines Trennmittels auf die Formoberfläche,
3. Auftrag einer Deckschicht (Gelcoat),
4. Wiederholter Auftrag der Harzschichten und Einlage der Textilhalbzeuge,
5. Aushärtung und Entformung.

Nach der Herstellung wurden diese GFK-Halbwarenssegmente zu einem flächigen Wabenmodul verklebt. Die Technologie gestattet ein in Dickenrichtung der Wabe Ausformungsschrägen freies Laminat und sichert damit die optimale Verklebung der Halbwaren untereinander zur Übertragung der Schubkräfte im Flächenkern. Die Verklebung der Halbwaren zum Wabengebilde wurde nach Vorbehandlung der Klebeflächen mit angedicktem Reinharz UP1 ausgeführt (Abb. 4.21). Zur Gewährleistung der exakten Höhe des mäanderförmigen Wabenkernes wurde der vormontierte Kern mit einer CNC-gesteuerten Fräse komplett überarbeitet.

Für die Verbindung der Wabenflächen mit den Deckschichten kam die Nass-in-Nass-Technologie zum Einsatz (Abb. 4.22). Dabei wurde der vorgefertigte Wabenkern zunächst in das noch nicht ausgehärtete Laminat der oberen Deckschicht gedrückt. Nach der Aushärtung wurde dieses Modul-Bauteil gewendet und analog in die nasse untere Deckschicht gepresst. Daraus resultierte ein stoffschlüssiger Verbund von Deckschichten und Wabenkörper.



Abb. 4.20: Formwerkzeug (li.), Laminieren im Formwerkzeug (mi., re.)



Abb. 4.21: Fertigung des Kernes in mäanderförmigen Halbwaben (li.), Verklebung der Halbwaben (re.)



Abb. 4.22: GFK-Wabensandwich mit Deckschichten

Wickeltechnologie

Für die exakte Ablage der Verstärkungstextilien auf dem sechseckigen Wickelkern wurde als Alternative zur Laminiervverfahren die Wickeltechnologie untersucht. Die Eigenschaften der mittels Wickelverfahren gefertigten FKV-Bauteile lassen durch die Wahl des Wickelmusters (Radial-, Kreuz- und Polarwicklung) beeinflussen. Als Kernmaterial werden i. d. R. verlorene Kerne (z. B. Schaumstoff) oder wiederverwendbare Kerne (z. B. mehrteilige, zerlegbare FKV-Kerne) eingesetzt. Die Herstellung der GFK-Waben im laborprototypischen Wickelverfahren umfasste zuerst die Konstruktion und Umsetzung des wiederverwendbaren Wickelkerns in sechseckiger Wabengeometrie. Dazu wurde ein Modell gefräst und anschließend mit

GFK-Laminaten abgeformt (Abb. 4.23). Danach erfolgte die Applikation einer einseitigen Deckschicht, um die Fixierung der Waben auf dem Kern zu gewährleisten. Zur Endmontage des zweiteiligen Wickelkerns wurde eine Verklebung von zwei Kernteilen vorgenommen (siehe Abb. 4.23).



Abb. 4.23: Fertigung des Wickelkerns (Modellbau, Abformung, Wabenwickelwerkzeug, Endmontage)

Nach der Fertigung der wiederverwendbaren Kernwerkzeuge wurden die einzelnen GFK-Waben mittels Wickelmaschine hergestellt. Da die Einzelwabe vorrangig durch Querkraftschub belastet wird, bieten hier Lamine mit einem Verstärkungswinkel von $\pm 45^\circ$ die höchste Schubsteifigkeit. Zur Herstellung der Waben erfolgte nach Vorbereitung des Wickelkerns (Einspannung, Trennmittelapplikation) die Tränkung der textilen Matten mit UP-Harz im Tränkbad. Um eine vollständige Faserimprägnierung zu erreichen, wurden Imprägnier- und Benetzungseinheiten vorgeschaltet. Durch kontinuierliche Imprägnierung wurden die Glasfasergelege in $\pm 45^\circ$ -Ausrichtung über den drehbaren Wickelkern angeordnet, anschließend ausgehärtet und entformt (vgl. Abb. 4.24). Die Wickeltechnologie gestattet die parallele Fertigung von beliebig vielen Einzelwaben mit hoher Reproduzierbarkeit und Genauigkeit bei vergleichsweise geringen Halbzeugkosten.

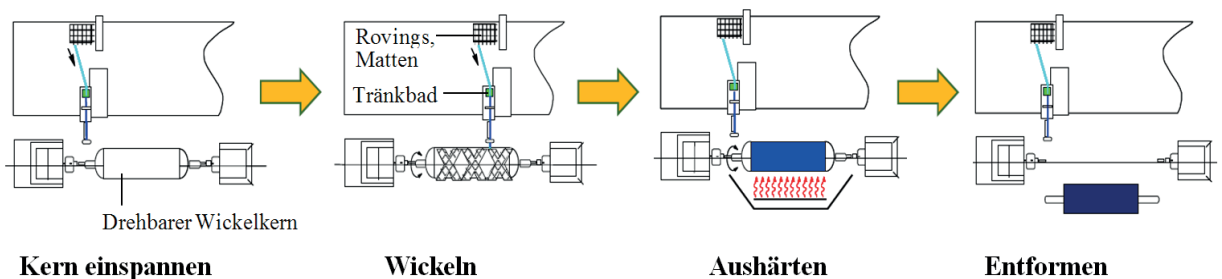


Abb. 4.24: Schema der Wickeltechnologie in Anlehnung an [Mic 90]

Nach der Einzelwabenfertigung wurden diese nach Vorbehandlung der Klebeflächen zu einem flächigen Wabengebilde mit angedicktem Reinharz UP1 verklebt. Zur Sicherstellung der exakten Höhe des Wabenkerns ist der vormontierte Kern komplett überfräst worden. Anschließend erfolgte die Verklebung mit den Deckschichten zum Wabensandwich (Abb. 4.25).

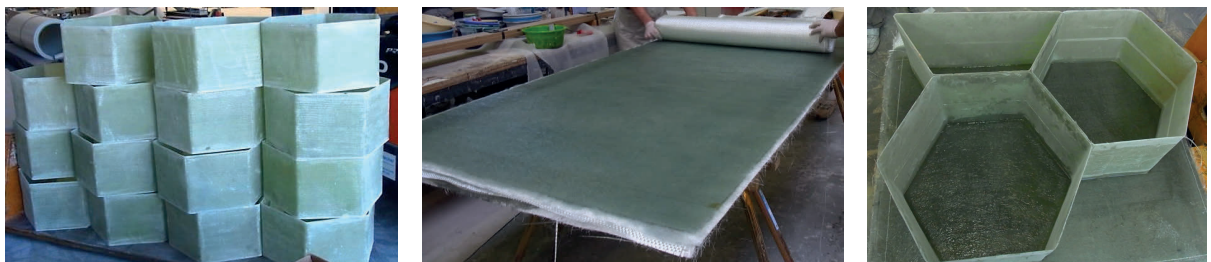


Abb. 4.25: GFK-Einzelwaben (li.); GFK-Deckschichten (mi.); GFK-Wabensandwich (re.)

Aus dem direkten Vergleich der beiden Technologien folgt, dass sowohl das Handlaminierverfahren als auch die Wickeltechnologie zur Fertigung von GFK-Wabensandwich-Modulen geeignet sind. Durch die flexible Anpassung des Formwerkzeuges sowie die vergleichsweise geringen Herstellungskosten ist das Handlaminierverfahren zur Produktion großformatiger Module mit veränderlicher Geometrie besser geeignet.

Im Wickelverfahren hingegen können sehr hochwertige FKV-Bauteile hergestellt werden, die höhere Faservolumenanteile zulassen und die exakte Anordnung von Fasern, Geweben oder Gelegen unter gleichmäßiger Fadenspannung erlauben. Aufgrund der Automatisierung ist das Wickelverfahren für die Mittel- und Großserien besonders wirtschaftlich.

Im Ergebnis der umfangreichen Technologieversuche wird das Wickelverfahren für Wabenelemente mit gleicher Geometrie und hohem Reproduktionsgrad favorisiert. Die Laminier-technologie hingegen kommt bei unterschiedlichen Wabenabmessungen und variierenden Dicken aufgrund der hohen Flexibilität der Formwerkzeuge zum Einsatz.

4.2.4 Materialcharakterisierung

Nach der Herstellung der Module wurden die mechanischen Eigenschaften bestimmt. Da das GFK-Wabensandwich als Flächentragwerk zugelassen wird, sind die ständigen und veränderlichen Einwirkungen: Belastungen aus Eigengewicht, Wind-, Schnee- und Eislasten sowie Verkehrslasten nach Eurocode 1 oder DIN 1055-4 für die Bemessung heranzuziehen. Zur Charakterisierung des aus Regellaminaten nach DIN 18820-2 aufgebauten GFK-Wabensandwiches wurden Untersuchungen zum Nachweis der mechanischen Kennwerte durchgeführt. Dabei erfolgte die Bestimmung der:

- Zugeigenschaften der Lamine GF-UP1-MW1-11-40 der unteren Deckschicht,
- Biegeeigenschaften der Lamine GF-UP1-MW1-21-40 der oberen Deckschicht,
- Durchbiegung der oberen Deckschicht einer montierten Einzelwabe unter punktförmiger Belastung von 10 kN mit einer Aufstandsfläche von 100 mm x 100 mm,
- 3Punkt-Biegeeigenschaften am Wabenmodul 2.500 mm x 1.100 mm ($L_V = 2.400$ mm).

Eine ausführliche Beschreibung und Auswertung der Versuchsreihen ist in [Röh14] zusammenfassend dargestellt.

Bestimmung der Zugeigenschaften am Laminat GF-UP1-MW1-11-40

Die Prüfung der Zugfestigkeit erfolgte nach DIN EN ISO 527-4 [EN527-4], wobei für die bessere statistische Absicherung der Ergebnisse die Versuche an mindestens 10 Probekörpern durchgeführt worden sind. Als Prüfeinrichtung kam die Universalprüfmaschine Zwick/Roell (Z1464) mit einer Kraftmessdose von 50 kN und pneumatischen Spannbacken zum Einsatz. Die Prüfgeschwindigkeit betrug 1 mm/min und der Zug-E-Modul wurde im Dehnungsbereich zwischen 0,05% und 0,25% ermittelt. In Tab. 4.4 sind die Ergebnisse der Zugprüfungen aufgeführt. Alle geprüften Lamine erfüllten die Eigenschaften nach DIN 18820 Teil 2.

Tab. 4.4: Zugeigenschaften des Laminats GF-UP1-MW1-11-40

| | | b [mm] | h [mm] | E_t [MPa] | F_m [N] | σ_m [MPa] | ε_m [%] |
|----------------|----|------------------|------------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| Mittelwert | MW | 9,19 | 8,23 | 13630 | 14130 | 186,9 | 2,7 |
| 5%-Fraktilwert | Xp | | | 12824 | | 174 | |

Bestimmung der Biegeeigenschaften am Laminat GF-UP1-MW1-21-40

Die Biegeeigenschaften wurden nach DIN EN ISO 14125 im Dreipunkt-Verfahren ebenfalls an mindestens 10 Probekörpern entsprechend Tabellen A1 und A2 nach DIN EN ISO 14125 mit den Abmaßen 340 mm x 20 mm x 17 mm sowie einer Stützweite von 272 mm bestimmt. Die Versuche erfolgten mittels Universalprüfmaschine Z 100 mit 3-Punkt-Biegeprüfvorrichtung und Kraftmessdose 100 kN. Der Biege-E-Modul wurde im Bereich der Randfaserdehnung von 0,05% bis 0,25% ermittelt. Die Prüfgeschwindigkeit wurde auf 7 mm/min festgelegt. Tab. 4.5 enthält die Prüfergebnisse der Biegeeigenschaften. Die geprüften Laminat-erfüllten die Eigenschaften entsprechend DIN 18820 Teil 2.

Tab. 4.5: Biegeeigenschaften des Laminats GF-UP1-MW1-21-40

| | | l [mm] | b [mm] | h [mm] | F_m [N] | σ_f [MPa] | E_f [MPa] | ε_{fm} [%] |
|----------------|----|------------------|------------------|------------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| Mittelwert | MW | 272 | 16,96 | 29,05 | 6741,9 | 329 | 15249 | 2,47 |
| 5%-Fraktilwert | Xp | | | | | 295 | 13845 | |

Verhalten der Einzelwabe unter Punktlast

Die Untersuchung des GFK-Wabensandwiches als Einzelwabe unter punktförmiger Belastung erfolgte an mindestens 3 Einzelwaben mit verklebter oberer Deckschicht aus GF-UP1-MW1-21-40. Nach Eurocode 1, Teil 2: Einwirkungen auf Tragwerke [EN1991] ist bei veränderlichen Einwirkungen auf Flächentragwerke eine charakteristische Einzellast von 10 kN mit einer Seitenlänge der quadratischen Aufstandsfläche von 100 mm vorgesehen. Die Versuche wurden an der Prüfeinrichtung ToniNorm (Prüfrahmen: 20 kN) von ToniTechnik ausgeführt, wobei die Verformungen mittels mechanischen Wegaufnehmers bestimmt wurden (vgl. Abb. 4.26). Zur Einordnung der Prüfergebnisse wurde eine Vergleichsrechnung mittels FE-Analyse durchgeführt. Tab. 4.6 enthält die Ergebnisse aus den Versuchen der Einzelwabe unter punktförmigen Belastungen (10 kN und 15 kN) mit einem Prüfstempel von 100 mm x 100 mm.

Tab. 4.6: Prüf- und FE-Ergebnisse unter Einzellast 10 kN und 15 kN

| | F [kN] | u [mm] | u_m [mm] | F [kN] | u [mm] | u_m [mm] |
|---------------|------------------|------------------|------------------------------|------------------|------------------|------------------------------|
| Probe 1 | 10 | 5,0 | 5,26 | 15 | 7,80 | 7,94 |
| Probe 2 | 10 | 5,26 | | 15 | 7,91 | |
| Probe 3 | 10 | 5,53 | | 15 | 8,10 | |
| FE-Berechnung | 10 | | 4,94 | 15 | | 7,41 |

Rechnerisch wurde unter der punktförmigen Belastung (10 kN) eine Verformung in Wabenmitte von 4,94 mm ermittelt (vgl. Abb. 4.26). Der Rechenwert zeigt eine gute Übereinstimmung mit den experimentell aufgenommenen Messwerten von 5,26 mm (siehe Tab. 4.6). Die experimentellen Untersuchungen bei einer Lasterhöhung auf 15 kN zeigten ein linear-elastisches Verhalten der Probekörper.

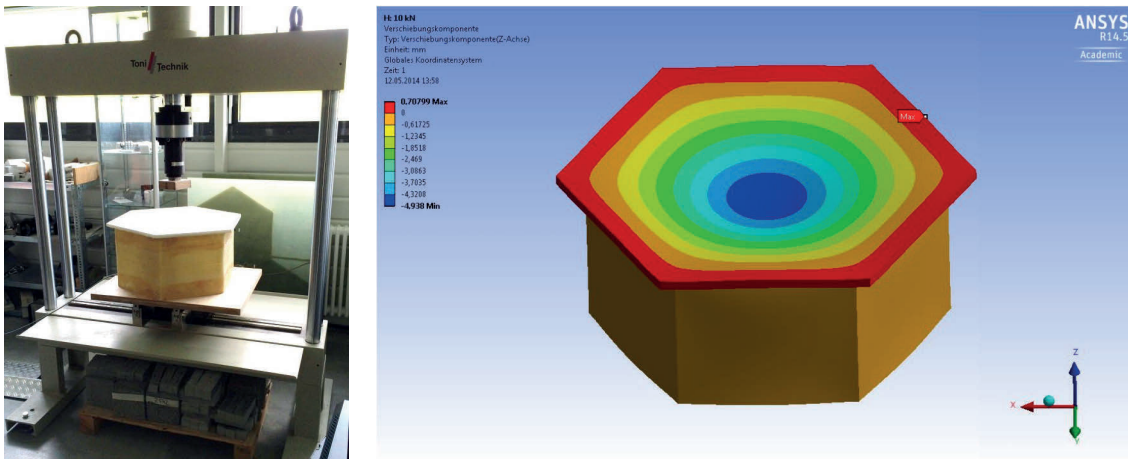


Abb. 4.26: GFK-Einzelwabe unter punktförmiger Belastung (10 kN), Versuch (li.); FE-Simulation (re.)

Dreipunkt-Biegeversuche an großformatigen Wabenmodulen

Zur Charakterisierung des Leichtbauwabenmoduls wurden großformatige Komponenten mit einer Länge von 2,50 m und einer Breite von 1,10 m hergestellt (vgl. Abb. 4.27). Die Durchführung der Versuche erfolgte mit Hilfe eines eigens entwickelten, instrumentierten Prüfrahmens (Lastbereich ± 50 kN). Entsprechend Eurocode 1 liegt für Flächentragwerke in Anwendung als Brückenkonstruktion die charakteristische Verkehrslast bei $5,0 \text{ kN/m}^2$. Mit dem Teilsicherheitsbeiwert von 1,5 ergibt sich eine Bemessungslast von $7,5 \text{ kN/m}^2$. Dieser Wert entspricht bei einem Auflagerabstand von 2.400 mm einem maximalen Biegemoment von $M = 5,4 \text{ kNm}$. Im Dreipunkt-Biegeversuch wurde diese Momentenbelastung mit einer Einzelast von 9,0 kN erreicht. Die Prüflasten für den Dreipunkt-Biegeversuch wurden somit auf 10,0 kN und in weiteren Versuchen mit Berücksichtigung des materialspezifischen Sicherheitsbeiwerts von 1,5 auf 15,0 kN festgelegt. Dabei ist der Kraftverlauf in Abhängigkeit von der Zeit bei einer Prüfgeschwindigkeit von 200 N/s gemessen worden (Prüfaufbau Abb. 4.27).

Aus den Ergebnissen des Dreipunkt-Biegeversuches folgt, dass für die Belastungen von 10 und 15 kN das großformatige GFK-Wabenmodul die resultierenden Beanspruchungen ohne lokale und globale Schädigungen von Fasern, Textil oder Verbund aufnimmt (dazu siehe Anlagen 9.2, Abb. 9.19 und Abb. 9.20).



Abb. 4.27: Biegeversuch am großformatigen Probekörper

4.2.5 Integration von textilbasierten SHM- und CM-Sensoren

Die kontinuierliche Überwachung und die Analyse von Komponenten aus FKV sind sowohl aus Sicherheitsgründen als auch aus Sicht des wirtschaftlichen Betriebs von hohem Stellenwert. Dazu erfolgte die Entwicklung geeigneter Structural-Health-Monitoring (SHM)- sowie Condition-Monitoring (CM)-Systeme, die eine umfassende Aussage über die Beschaffenheit einer FKV-Struktur erlauben und so ein funktionelles oder strukturelles Versagen der Bauteilstruktur vermeiden. Nach aktueller Recherche sind keine SHM- sowie CM-Systeme am Markt verfügbar, die für die Integration in GFK-Brückenelemente geeignet sind und die strukturmechanischen Belastungen (statisch und dynamisch) detektieren und damit versagenskritische Belastungen anzeigen.

An der Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung der TU Chemnitz wurden zur Überwachung von FKV-Strukturen textilbasierte Sticksensoren entwickelt und in verschiedenen Anwendungen getestet (weiterführend in [Els08, Els09, Gel09, Ulb11]). Derartige FKV-integrierte Sticksensoren sind hinsichtlich der besonderen Anforderungen bei der Überwachung von Brückenelementen aus glasfaserverstärkten Kunststoffen angepasst worden.

Die neuen textilbasierten Sticksensoren zur Detektion von Dehnungen unter statischen und dynamischen Lasten bestehen aus Sensordraht, der mittels Sticktechnologie auf ein textiles Trägermaterial (z. B. Glasfaservlies) appliziert wird. Die Geometrie der gestickten Sensoren ist durch den Fertigungsprozess des Stickens weitgehend frei wählbar, wobei Sensordrahtmaterial, -durchmesser und die zu stickende Sensorlänge auf die Messaufgabe angepasst werden. Da der Sticksensor direkt auf das Verstärkungstextil aufgebracht wird, entfällt der teilweise aufwändige Zwischenschritt einer exakten Positionierung und Endkonfektionierung.

Die Überwachungselektronik zur Erfassung von Schwingungen basiert auf einer dreizügigen Auslegung, wobei mittels des dreiteiligen Sticksensors verschiedene Belastungsrichtungen im GFK-Modul in der Fläche erfasst werden können. Der Sticksensor besteht aus drei Einzelsensoren, die jeweils in 0°, 45°- und 90°-Richtung angeordnet sind. Mit einer Auswerteeinheit lassen sich in den drei Einzelsensoren unabhängig voneinander Dehnungen messen, analysieren (mit jeweils einer Fast-Fourier-Transformation) und bewerten.

Nach umfangreichen Testreihen ergab die Analyse der neuen Sticksensoren eine gute Reproduzierbarkeit des elektrischen Widerstandes von $120 \Omega \pm 1\%$ bei konstanter Dehnempfindlichkeit unter Verwendung von Glasfaservlies als Stickgrund. Die Widerstandskennlinien für unterschiedliche Temperaturen entsprechen dem Werkstoff des Drahtmaterials Konstantan und sind über einen großen Temperaturbereich (-20°C bis 80°C) konstant. Ausgehend von dem definierten Anforderungsprofil und den ermittelten Kenndaten zur Charakterisierung des gestickten Dehnungssensors für die GFK-Wabenbrücke ist die in Abb. 4.28 angegebene Einbauempfehlung für SHM- und CM-Systeme auf Basis sticktechnologisch hergestellter Dehnungssensoren erarbeitet worden (Details hierzu siehe [Röh14]).

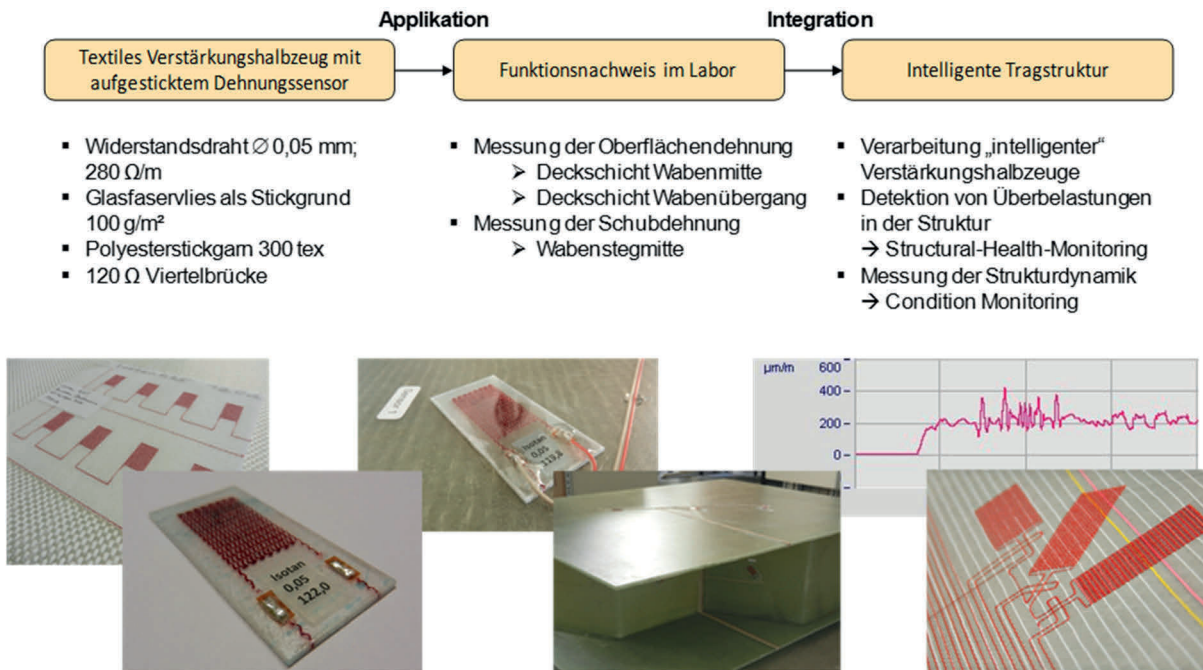


Abb. 4.28: Einbauempfehlung für sticktechnologisch hergestellte Dehnungssensoren für SHM- und CM-Systeme für Anwendungen in FKV-Tragwerken [Röh14]

4.2.6 Krafteinleitungen und Verbindungstechnik

Für die Kombination von modularen GFK-Wabensandwichstrukturen zu leichten Tragwerken sowie für die Anbindung der Module und Kraftweiterleitung in die Unterkonstruktion müssen faserverbundgerechte Verbindungstechniken bereitgestellt werden. Obgleich für isotrope Werkstoffe, wie beispielsweise für Metalle, bereits eine Vielzahl geeigneter Lösungen im Bereich der Fügetechnik vorliegen und diese seit Jahrzehnten im Bauwesen eingesetzt werden, stellt die starke Anisotropie faserverstärkter Kunststoffe zusätzliche komplexe Anforderungen an die Verbindungstechnik.

Die Verwendung der aus dem Stahlbau bekannten Fügetechniken wie z. B. Bolzen, Nieten oder Verschraubungen zur form- bzw. kraftschlüssigen Verbindung von tragenden FKV-Komponenten ist nach dem Stand der Technik bekannt (vgl. etwa [Ehr02, Lei06, Hel06]). Entsprechend strukturmechanischen Maßstäben sind diese Fügeverfahren als „nicht fasergerecht“ einzustufen, da die kräfteführenden Fasern im Bereich der in die FKV-Bauteile eingebrachten Bohrungen oder Materialaufspreizungen durchtrennt werden und so zu sehr hohen Kerbspannungsspitzen führen. Insbesondere im Brückenbau, wo hohe Anforderungen hinsichtlich Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit gestellt werden, bedarf es an leistungsfähigen Fügeverbindungen, die eine Ausschöpfung des hohen Leichtbaupotentials in Bezug auf die Festigkeiten der FKV gestatten.

Für die Entwicklung angepasster Lösungen zur Fügung von tragenden FKV-Bauteilen im Bauwesen ist eine werkstoff- und kraftflussgerechte Auslegung der Krafteinleitungselemente und Verbindungstechnik ohne Schädigung der Verstärkungsfasern von besonderer Bedeutung. Vertiefende Untersuchungen zur fasergerechten Fügeverbindungen und deren Anwendung sind beispielsweise in [Gel08] und darin aufgeführten Literaturstellen enthalten.

Entwicklung einer leichtbaugerechten Verbindungstechnologie für GFK-Wabenmodule

Zur Verbindung von GFK-Wabenmodulen sowie zur Krafeinleitung in die Unterkonstruktion wurde eine material- und beanspruchungsgerechte Verbindungslösung für die Werkstoffpaarungen GFK/GFK und GFK/Stahl erarbeitet, fertigungstechnisch umgesetzt und untersucht. Dabei sind bei der Fügung unterschiedlicher Materialien (GFK-Wabenmodule und Stahltragwerk) insbesondere der notwendige Korrosionsschutz und die Kompensation der verschiedenen Wärmeausdehnungskoeffizienten zu beachten.

Basierend auf den Anforderungen wurde eine hochfeste lösbare Verbindung entwickelt, die relativ einfach und schnell montiert werden kann und zusätzlich Toleranzen in Bezug auf die Unterkonstruktion ausgleicht. Die Lösung ist eine formschlüssige zweiteilige Steckverbindung, die durch fasergerechte Integration der Krafeinleitungselemente während der Herstellung (im sog. In-Mould-Assembly(IMA)-Verfahren) und nachträglicher Fügung auf der Baustelle hoch belastbar ist. Entscheidender Vorteil des IMA-Verfahrens ist, dass die Fügstellen bereits im nicht ausgehärteten Bauteil während des Urformprozess vorgesehen und somit ohne Schädigung des Faserverlaufes eingebracht werden. Dies erfordert zwar eine erhöhte Maßgenauigkeit und die Einhaltung der Fertigungstoleranzen zur Positionierung der Fügeteile, jedoch resultieren deutlich höhere strukturmechanische Eigenschaften im Einbauzustand.

Entwurf von Krafeinleitungselementen

Als fasergerechte Krafeinleitungselemente wurden Steckverbinder entwickelt, die aus zwei Teilen bestehen und rückseitig jeweils mit einer festgelegten Anzahl metallischer Stifte, sog. Spikes, bestückt sind. Durch die „C-Spike“-Schwalbenschwanzverbindung resultiert ein einfach zu lösendes Verbindungssystem zwischen den GFK-Modulen und der Unterkonstruktion (vgl. Abb. 4.29).

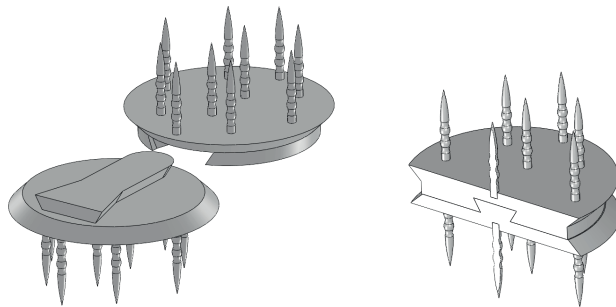


Abb. 4.29: C-Spike-Schwalbenschwanz-Krafeinleitungselemente; 3D-Visualisierung

Die neuen C-Spike-Krafeinleitungselemente werden direkt im Laminierprozess in den Faser-verbund integriert, wodurch keine lokale Schädigung des Laminates im Bereich der Fügestelle entsteht. Die Orientierung der Fasern der textilen Verstärkungsstrukturen erfolgt dabei kraftflussgerecht um die einzelnen Spikes (siehe Abb. 4.30). Diese Faserumleitung bewirkt bzgl. der versagenskritischen Schubspannungen im Bereich der Fügezone eine fasergerechte Ableitung der einwirkenden Kräfte, was eine gleichmäßigere Beanspruchung der C-Spike-Fügstellen bei Belastung der Gesamtstruktur zur Folge hat.

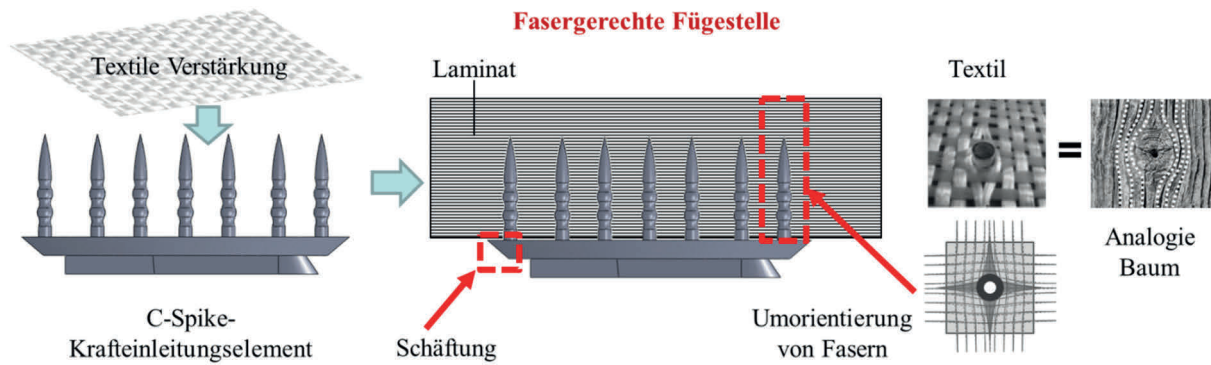


Abb. 4.30: „C-Spike“-Krafteinleitungselement und Integration im GFK-Laminat

Die Geometrie der C-Spike-Krafteinleitungselemente wurde in zahlreichen Versuchen hinsichtlich Größe der Elemente, Anzahl, Anordnung und Ausführung der Spikes und Verfahren der Integration in GFK-Laminat optimiert. Die Fügestelle sollte dabei eine großflächige Verteilung der Lasten gestatten und versagenskritische Schubspannungen im Fugebereich minimieren. Mit einem Durchmesser der Krafteinleitungselemente von 44 mm konnte eine bestmögliche Krafteinleitung in die Wabenmodule sichergestellt werden.

Die Anzahl, Anordnung und geometrische Gestaltung der Spikes ist primär abhängig von der Beanspruchung und von der Art der Integration der Krafteinleitungselemente. Ausgehend von einer maximalen axialen Zugbeanspruchung sollten die Spikes einen hohen Formschluss-Anteil aufweisen und zusätzlich stoffschlüssig durch Anwendung der Klebtechnologie mit dem GFK verbunden werden. Um einen hohen Formschluss zu gewährleisten, wurden verschiedene Spike-Formen entwickelt und in ihrer Anzahl und Anordnung variiert. Dabei betrug die Anzahl der Spikes pro Krafteinleitungselement min. 20 und max. 76. In der folgenden Übersicht (Abb. 4.31) ist eine Auswahl an untersuchten Spike-Formen dargestellt.

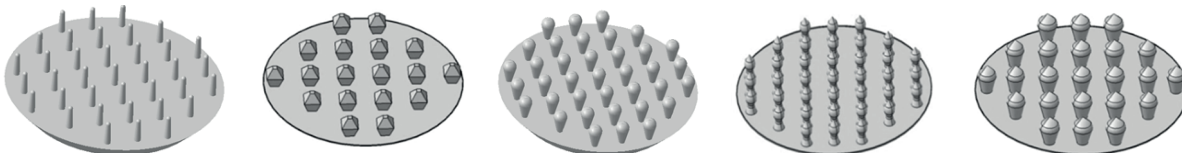


Abb. 4.31: Spike-Form (von li. nach re.) Stift, Pyramide, Konus, Konus mit Spitze 1, Konus mit Spitze 2

Herstellungstechnologien von C-Spike-Elementen

Für die fertigungstechnische Umsetzung der C-Spike-Krafteinleitungselemente wurden verschiedene Herstellungsverfahren untersucht und auf Eignung getestet. Zur Anwendung kam sowohl das selektive Lasersintern (SLS) als auch das Cold-Metal-Transfer-Schweißen (CMT).

Selektives Lasersintern

Das aus dem Bereich des Rapid Prototyping bekannte SLS-Verfahren ist eine Technologie zur Herstellung von dreidimensionalen Bauteilen, die basierend auf CAD-Daten schichtweise aus einem pulverförmigen Grundstoffwerkstoff aufgebaut werden. Als Ausgangswerkstoffe kommen beschichtete Formsande, Kunststoffe sowie Metall- oder Keramikpulver zum Einsatz. Eine auf der SLS-Grundtechnologie beruhende Variante ist das selektive Laserschmelzen (SLM), wobei hier vorzugsweise Metallpulver verarbeitet werden. SLM bietet den

Vorteil, dass durch vollständiges Aufschmelzen des metallischen Pulverwerkstoffes auf die Verwendung zusätzlicher Bindemittel verzichtet werden kann. Daraus resultieren makromechanisch nahezu gleiche Eigenschaften wie bei dem metallischen Grundwerkstoff. Zur Umsetzung der C-Spike-Verbinder wurde Titan-Pulver verwendet, wobei aufgrund der sehr rauen Oberfläche eine Nachbearbeitung der Oberfläche erforderlich ist.

Cold-Metal-Transfer-Schweißen

CMT-Schweißen ist eine Variante des Metallschutzgas-Schweißens (MSG) und zählt zu den Lichtbogenschweißverfahren. Durch die Kombination pulsierender Schweißströme mit einem prozessgesteuerten hochfrequent schwingenden Schweißdraht, lassen sich mit dem CMT-Schweißen unterschiedliche Formen und Qualitäten erzielen, die vom Schweißzusatz abhängig sind. Zur Fertigung der C-Spikes wurden die CMT-Prozessparameter derart modifiziert, dass verschieden geformte Pins auf einen Trägerwerkstoff positionsgenau aufgebracht werden konnten. In Abb. 4.32 ist ein repräsentativer C-Spike-Verbinder mit zylindrischen Spike-Formen ($d = 1,6 \text{ mm}$) und kugelförmigen Köpfen ($d = 2,0 \text{ mm}$) dargestellt.

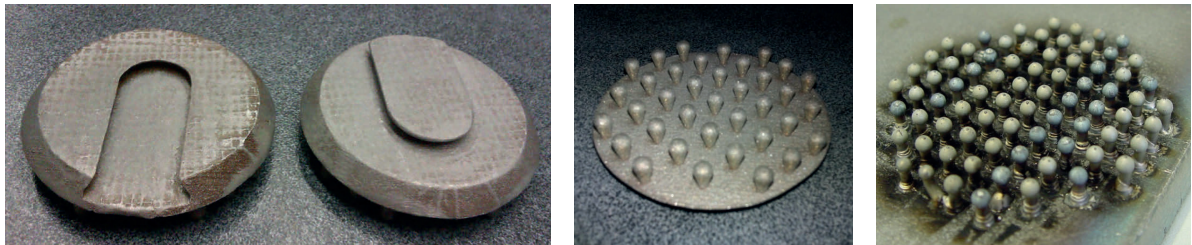


Abb. 4.32: C-Spike-Verbinder mit Schwalbenschwanzkontur (li.), SLM-Spikes mit Konuskopf (mi.), CMT-Spikes mit kugelförmigem Kopf (re.)

Bestimmung der Zugfestigkeit der C-Spike-Verbindung

Zur Verifikation des Einflusses von der Geometrie der C-Spike-Krafteinleitungselemente hinsichtlich Anzahl, Anordnung und Ausführung der Spikes sowie Herstellungsverfahren und Integration Verbinder in GFK-Laminat wurden umfangreiche Zugversuche durchgeführt.

Für die experimentelle Ermittlung der Verbindungsfestigkeit der Spike-Verbinder wurden Prüfkörper aus glasfaserverstärktem duromeren Harzsystem mit einem Lagenaufbau nach DIN 18820 im Handlaminierverfahren hergestellt. Zur Steigerung des Faservolumengehaltes sind die Prüfkörper nach dem Handlaminieren Vakuum verdichtet worden.

Laminataufbau für Prüfkörper 170 mm x 60 mm

450 g/m² Wirrfasermatte
 580 g/m² UD-Gewebe
 300 g/m² Wirrfasermatte
 580 g/m² UD-Gewebe
 300 g/m² Wirrfasermatte
 580 g/m² UD-Gewebe
 450 g/m² Wirrfasermatte

Harz-Härter-System

Polyesterharz
 Epoxidharz

Nach der Herstellung der Proben erfolgte die Bestimmung der Zugfestigkeit der C-Spike-Verbindung in Anlehnung an DIN EN ISO 527 (Prüfgeschwindigkeit 5 mm/min, siehe Anlagen 9.2, Abb. 9.21). Eine Auswahl von repräsentativen Ergebnissen ist in Tab. 4.7 dargestellt.

Tab. 4.7: Prüfergebnisse der Zugversuche von ausgewählten C-Spike-Verbindungen

| PR | Form der C-Spikes | Anzahl der Spikes | Herstellung | F [kN] |
|-----------|--------------------------------|-------------------|-------------|--------------|
| 1 | Stifte (sandgestrahlt) | 37 | SLM | 17,50 |
| 2 | Pyramiden (eckig; klein) | 37 | SLM | 19,85 |
| 3 | Konus (mit Spitze) | 37 | SLM | 21,88 |
| 4 | Konus | 53 | SLM | 24,53 |
| 5 | Pyramiden (eckig; groß) | 18 | SLM | 21,40 |
| 6 | Konus mit Spitze (groß) | 23 | SLM | 22,35 |
| 7 | Konus mit Spitze (klein) | 37 | SLM | 23,20 |
| 8 | Konus | 76 | CMT | 51,30 |
| 9 | Konus | 20 | CMT | 25,00 |
| 10 | Konus | 37 | CMT | 38,00 |
| 11 | Kleerverbindung (Araldid 2015) | - | - | 30,13 |
| 12 | Schraubverbindung | - | - | 19,05 |

Die favorisierten Formen des C-Spike-Verbinders sind fett markiert.

Im Ergebnis der Versuchsreihen konnte ein deutlicher Einfluss der unterschiedlichen Geometrien, Anordnungen und Herstellungsarten der Spikes auf die Verbindungsfestigkeit nachgewiesen werden. Im Vergleich zu stiftförmigen Spike (Prüfreihe PR1) und Pyramiden-Spikes (PR 2, 5) wurden mit Konus-Spikes (PR 4, 6, 7) tendenziell höhere Festigkeiten erreicht. Die Größe der Spikes ist dabei zu begrenzen, da sich das Laminierverhalten mit zunehmenden Abmessungen verschlechtert. Im Allgemeinen zeigten CMT-geschweißte Spikes sowie große konusförmige Spikes mit Spitze die besten Laminiereigenschaften.

Nach Auswertung der Versuche konnten bei CMT-geschweißten Verbindungen wesentlich höhere Festigkeiten als bei SML-hergestellten Verbindern nachgewiesen werden. Der Vergleich der Festigkeiten in Abhängigkeit von der Spikeanzahl zeigt, dass mit steigender Zahl der Spikes die Zugfestigkeit deutlich zunimmt. Hierzu sind vor allem die Prüfreihe 8 (76 Pins), 9 (20 Pins) und 10 (37 Pins) zu beachten. Die Maximalkraft pro Spike ist bei Prüfreihe 10 mit ca. 1 kN am größten. Ein Kompromiss zwischen maximaler Zugbelastung und Fertigungsaufwand ergibt demnach für die weitere Nutzung der C-Spike-Verbindung, dass die Anordnung von 37 Pins zielführend ist. Zur Übertragung höherer Kräfte werden CMT-geschweißte Elemente mit 76 Konus-Spikes empfohlen.

FE-Analyse der C-Spike-Verbindung

Ausgehend von der Geometrie der CMT-geschweißten Spikes wurde zur Optimierung ein parametrisches FE-Modell erstellt. Damit konnte eine einfache und schnelle Änderung der Geometrie sowie Anordnung der Spikes und somit eine Optimierung des Verbinders zeiteffizient umgesetzt werden. Die Parameterzuweisungen erfolgten in Form von interaktiven Gleichungen, wobei die Anzahl an Entwurfsparametern zur schnelleren Geometrieerzeugung reduziert worden ist. Die Definition der Randbedingungen ist analog zum experimentellen Versuchsaufbau vorgenommen worden, wobei die Probenunterseite fest eingespannt wurde.

Die GFK-Platte mit integrierten C-Spike-Verbindern wurde im oberen Einspannbereich mit einer definierten Verschiebung in Richtung x beaufschlagt (keine Verschiebung in y- und z-Richtung, Abb. 4.33 mi.). Die Netzgenerierung erfolgte über Tetraeder-Elemente, wobei eine

verfeinerte Netzgeometrie im Bereich der Spikes ausgewählt wurde (Abb. 4.33 re.). Als Eingangsgrößen dienten die Laminatkennwerte entsprechend dem Aufbau nach DIN 18820-2.

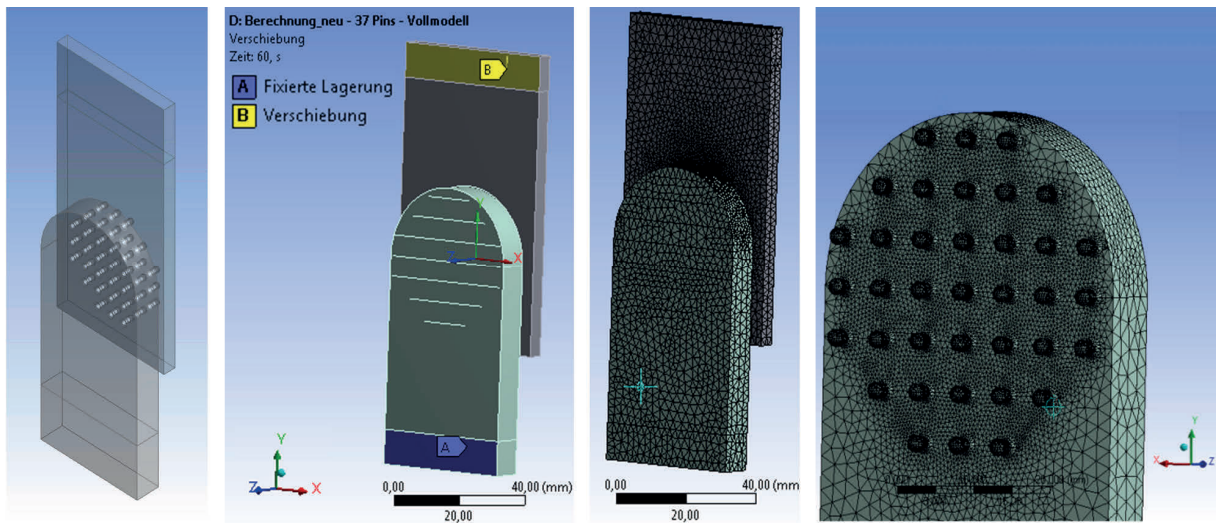


Abb. 4.33: FE-Modell, Geometrie als isometrische Ansicht (li.), Randbedingungen (mi.), Vernetzung (re.)

Der Vergleich der Ergebnisse aus Simulation und experimenteller Untersuchung zeigte, dass in Bezug auf die maximalen Zugkräfte und Verformungen nur sehr geringe Abweichungen vorliegen (Tab. 4.8). Diese Differenzen sind im Wesentlichen auf schwankende Materialparameter bei der Fertigung von GFK-Proben mit integrierten Krafteinleitungselementen sowie auf Ungenauigkeiten hinsichtlich Geometrie und Anordnung der Spikes zurückzuführen.

Tab. 4.8: Vergleich der experimentellen und FE-Ergebnisse

| PR | Zugkraft beim Versagen [kN] | | Verformung beim Versagen [mm] | |
|----|-----------------------------|------------|-------------------------------|------------|
| | Simulation | Experiment | Simulation | Experiment |
| 8 | 47,1 | 51,3 | 2,50 | 2,22 |
| 10 | 38,7 | 38,0 | 1,50 | 1,64 |

Die Ergebnisse der FE-Analysen sind als „verformte“ Modelle inklusive Spannungsverteilungen (von Mises) exemplarisch in Abb. 4.34 und Abb. 4.34 dargestellt. Im Vergleich der C-Spike-Verbindungen mit 76 Spikes (Abb. 4.34) und der Probe mit 37 Spikes (Abb. 4.35) ist zu erkennen, dass sich die Verbindungslaschen in der Prüfreihe 8 aufgrund ihrer höheren Anzahl an Spikes gegenüber Prüfreihe 10 weniger verformen. Aufgrund derartiger Biegeeffekte, die zum mehr oder weniger ausgeprägtem „S-Schlag“ führen, wird die Festigkeit des Laminats mit der Erhöhung der Anzahl an Spikes besser ausgenutzt (Details hierzu siehe [Röh14]).

Insgesamt ist die C-Spike-Technologie eine leichtbaugerechte Verbindung zur Fügung von GFK-Tragstrukturen (GFK/GFK oder GFK/Metall), die eine Übertragung von hohen Zugkräften entlang der Kraftflusslinien ohne Zerstörung der Fasern gestattet. Der Vergleich mit den Ergebnissen der Finiten Elemente Analyse bestätigt die experimentell ermittelten Werte, sodass mit der Simulation der Verbindung eine gute Prognose über das Tragverhalten der Verbindung durchgeführt werden kann. Dadurch können je nach Art der Konstruktion und Höhe der Belastung C-Spike-Krafteinleitungselemente für den jeweiligen Anwendungsfall optimiert werden.

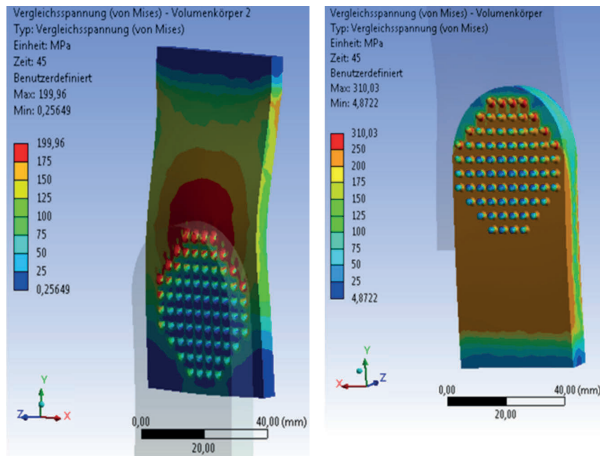
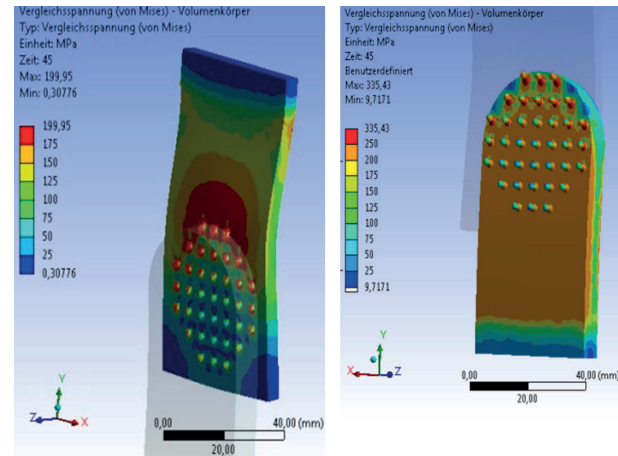
FE-Berechnung 76 Pins Vollmodell**FE-Berechnung 37 Pins Vollmodell**

Abb. 4.34: FE-Modell, PR8 (76 CMT-Konus-Spikes); obere Lasche (li.), untere Lasche (re.)
 Abb. 4.35: FE-Modell, PR10 (37 CMT-Konus-Spikes); obere Lasche (li.), untere Lasche (re.)

4.2.7 Referenzobjekt: Interaktive Wabenbrücke Chemnitz

Die Validierung der Forschungsergebnisse und Überführung der neuen leichtbaugerechten Konzeptstruktur in GFK-Sandwich-Wabenbauweise in die Praxis erfolgte am Referenzobjekt „Interaktive Wabenbrücke Chemnitz“. Dabei wurde durch die Kombination von materialorientierter Formgebung (bionisches Design), belastungsgerecht ausgeführter Tragkonstruktion sowie Ressourcen- und energieeffizienten Bauweisen der Leichtbaugedanke „Minimaler Materialeinsatz bei maximaler Spannweite“ zielorientiert umgesetzt. So etwa ist der Materialleichtbau durch die Verwendung von GFK, der Strukturleichtbau durch Einsatz von dünnwandigen aneinandergereihten Waben als Grundform für Brückentragelemente sowie Systemleichtbau durch zusätzliche Integration von Funktionen (Sensorik und Beleuchtung) ausgeführt worden.

Im Fokus der Referenz im Maßstab 1:1 stand der Nachweis der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit von GFK-basierten, modular aufgebauten Wabensandwichkonstruktion für kleine bis mittlere Brückenspannweiten (10 bis 50 m) für Fußgänger- und Radwegbrücken. Vom Entwurf über die Planung, Berechnung und Fertigung bis hin zur Errichtung wurden neue Methoden und Konzepte zur Umsetzung der Interaktiven Wabenbrücke entwickelt und angewendet. Da der Verbundwerkstoff GFK kein Baustoff nach Bauregelliste ist, war es für den Einsatz von GFK in tragenden Strukturen erforderlich, eine Zustimmung im Einzelfall (ZIE) beim Landesamt für Bautechnik des Freistaates Sachsen zu beantragen.

Entwurf und Konstruktion

Die Entwurfsidee der Interaktiven Wabenbrücke stammt von den Beier.Steiner Architekten und Ingenieure, deren Umsetzung als einhüftige Bogenbrücke mit GFK-Tragkonstruktion als Gehweg erfolgte. Errichtet wurde das neue Brückenbauwerk als Fußgängerüberquerung des Flusses Chemnitz im Bereich der Rochlitzer Straße 15 in Chemnitz (siehe dazu Anlagen 9.2, Abb. 9.22 und Abb. 9.23). Die neue Brücke dient als Anbindung der restaurierten Haasefabrik (heutige Produktionshalle und Firmensitz der Babysmile Fotografie GmbH&Co.KG) auf der Rochlitzer Straße an die Schloßstraße und verbindet den Firmensitz mit dem geplanten Betriebskindergarten.

Das Brücken-Haupttragwerk besteht aus einem in Köcherfundamente eingespannten Rohrbogen mit der Stützweite von 32,14 m, an dem die Gehbahnträger mittels zweier Hängerpaare in den Drittelpunkten der Gehwegkonstruktion angehängen wurden. Die stählerne Unterkonstruktion der Gehbahn, die ein im Grund- und Aufriss gekrümmten Trägerrost aus zwei torsionssteifen Hauptträgern und sieben torsionssteifen Querträgern umfasst, wurde an den massiven Widerlagern eingespannt. Die Grundrisskrümmung in der Mittelachse der Gehbahn beträgt 25 m, die Nutzbreite der Gehbahn 2,50 m (vgl. Abb. 4.36). Die Gehbahn besteht aus 13 GFK-Sandwich-Wabenmodulen, die das Sekundärtragwerk bilden und mit einer Stützweite von 2,50 m sowie einer Länge von 1,30 m und 2,60 m zwischen den Hauptträgern liegen.

Jedes Wabenmodul liegt einzeln auf den Verbindungsblechen auf, die an beiden Kastenhauptträgern des Brückentragwerkes angeschweißt sind. Die Wabenmodule sind zudem gegen Abheben sowie gegen längsseitiges Verschieben derart gelagert, dass Temperaturdehnungen vom Stahltragwerk nicht auf den Gehweg übertragen werden. Da die Waben untereinander nur durch elastische Fugen miteinander verbunden sind, treten auch in Längsrichtung keine thermischen Spannungen zwischen den einzelnen Modulen auf (detaillierte Ausführungen dazu siehe [Ehr14]).

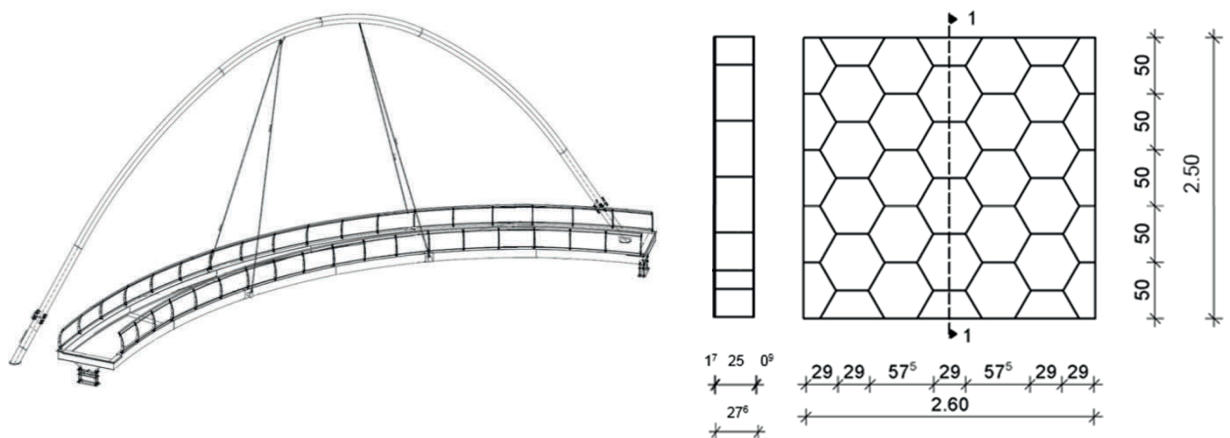


Abb. 4.36: Übersicht des Stahltragwerks der Wabenbrücke (li.), Geometrie der Wabenmodule (re.)

Dimensionierung der Wabenmodule und statische Berechnung

Als Eingangsdaten für Dimensionierung und statische Berechnung des Brückenüberbaus aus GFK-Wabensandwich-Modulen wurden die mechanischen Kennwerte für tragende Lamine nach DIN 18820 Teil 2 sowie die eigens ermittelten Materialdaten herangezogen. Weitere Grundlagen der statischen Berechnung sind die gültigen Normen: DIN 18820 Teil 1-4, DIN EN 1991-2 [EC1], DIN-Fachbericht 101, BÜV-Richtlinie „Tragende Kunststoffbauteile im Bauwesen“. Für die Simulation und Auslegung kam die Methode der Finiten-Elemente zur Anwendung. Auf Basis des neuen Modul-Gesamtkonzeptes wurden die Verifikation des Laminataufbaus (Pre-Design), Berechnung und Optimierung sowie die Anpassung der Gesamtkonstruktion an den Laminataufbau (Re-Design) durchgeführt.

Die Bemessung erfolgte nach Grenzzustand der Tragfähigkeit GZT (Festigkeitsnachweise für Lamine der Deckschichten und Wabenstege) und Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit GZG (Verformungen in Einzelwabe und Wabenmodul). Für die Berechnungen im GZT erfolgten Widerstandsbemessung und Definition der Einflussfaktoren nach BÜV-Empfehlung

für getemperte faserverstärkte Kunststoffe der Klasse MW1 [BÜV]. Zudem wurden E-Module und Spannungen der DIN 18820-2 entnommen und nach BÜV-Richtlinie abgemindert. Der Stand dieser Richtlinie begründet das sehr hohe Niveau materialbedingter Abminderungen für Temperatur, Medieneinfluss und Alterung. Um das hohe Leichtbaupotential der FKV für Anwendungen im Bauwesen besser erschließen zu können, sollte eine Neufassung der Abminderungsbeiwerte erfolgen. Denn materialtechnische und technologische Fortschritte der letzten Jahre sind noch nicht ausreichend in die vorhandenen Richtlinien eingeflossen.

Die Ermittlung der Bemessungswerte der Laminat-Widerstände im GZG wurde ebenfalls nach den BÜV-Empfehlungen durchgeführt. Ziel dieser Berechnung war die Durchbiegungsbegrenzung für die Einzelwabe und für das gesamte Wabenmodul $u_{200} \leq l/200$ nachzuweisen. Die strukturelle Dimensionierung der Wabenmodule erfolgte mittels FEM-Software ANSYS 14 Workbench und die anschließende statische Bemessung mit der Statik-Software Sofistik, die eine schnelle und effiziente Berechnung der Lastfallkombinationen gestattet. Die prinzipielle Konfiguration des Berechnungstools beinhaltet: Materialdefinition, parametrische Geometrierstellung und Berechnungskomponenten für Grenzzustand der Tragfähigkeit und Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit sowie Optimierungsalgorithmus (siehe dazu Anlagen 9.2, Abb. 9.24).

Die Materialeigenschaften (Dichte, E-Modul, Schubmodul, Querkontraktionszahl, thermischer Ausdehnungskoeffizient) wurden gemäß dem Aufbau der Wabenmodule jeweils für die obere und untere Deckschicht sowie die Wabenstege als Eingangsdaten festgelegt. Die Geometrie der Wabenmodule besteht im Modell aus vier Tragkomponenten: obere und untere Deckschicht, Wabenkern und Modulumfang (siehe dazu Abb. 4.37).

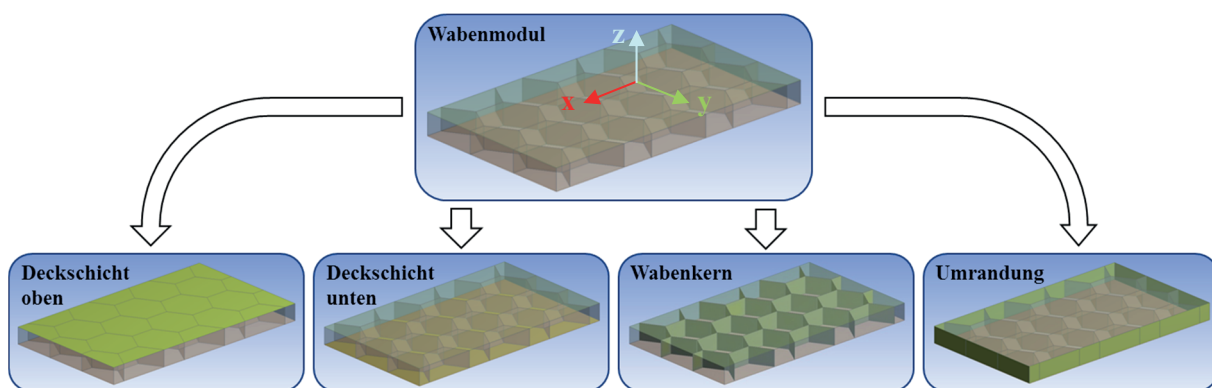


Abb. 4.37: Schematische Darstellung des geometrischen Aufbaus des Wabenmoduls

Die Lagerung des Wabenmoduls wurde über die beiden unteren Kanten ausgeführt (auf denen das Modul in der Einbausituation aufliegt), wobei die vordere Längskante in x-, y- und z-Richtung und die hintere Längskante nur in z-Richtung fest eingespannt ist. Die Diskretisierung erfolgte mit Hilfe von Schalenelementen, denen eine definierte Dicke entsprechend der verwendeten Laminatstärke zugewiesen wurde. Die auf das Wabenmodul einwirkende Belastung nach [EC1, DIN-FB, BÜV] setzt sich zusammen aus dem Eigengewicht, einer charakteristischen Verkehrslast, einer definierten Einzellast sowie einer Temperaturbelastung (vgl. Abb. 4.38). Die mechanischen Belastungen sind in negative z-Richtung ausgerichtet, wobei das Eigengewicht auf den gesamten Körper, die Verkehrslast von 5 kN/m^2 auf die obere

Deckschicht und die Einzellast von 5 kN in Wabenfeldmitte ebenfalls auf die obere Deckschicht wirkt (siehe dazu Abb. 4.38 und weiterführende Details in Anlagen 9.2, Abb.9.25).

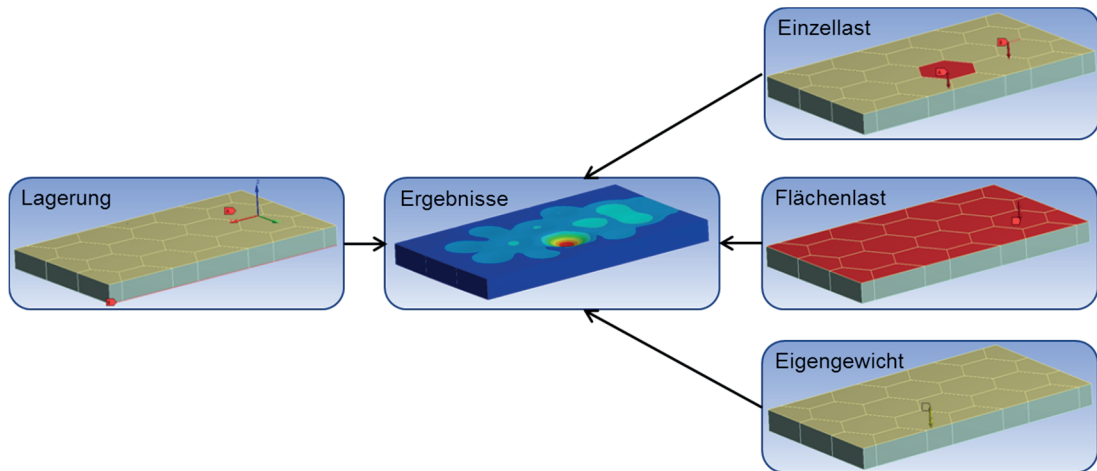


Abb. 4.38: Schematische Darstellung der Lagerung, der Belastungsarten und der FE-Ergebnisse

Für die Bewertung nach GZT wurde neben der maximalen Zug- und Druckspannung die maximale Schubspannung herangezogen. Für den GZG wurde die Verschiebung in z-Richtung ($u_{200} \leq l/200$) ausgewertet. Die Ergebnisse zur Auswertung von Grenzzustand der Tragfähigkeit und Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit sind in Anlagen 9.2, Abb.9.26 zusammenfassend dargestellt.

Die statische Bemessung des Wabenmoduls mit dem FEM-Programm Ansys und der Statik-Software Sofistik hat im Ergebnis gezeigt, dass sowohl der Grenzzustand der Tragfähigkeit als auch der Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit eingehalten wurden. In Abb. 4.39 ist das FE-Modell mit maßgebender Lastkombination dargestellt (Details siehe [Rud15-1, Rud15-2]).

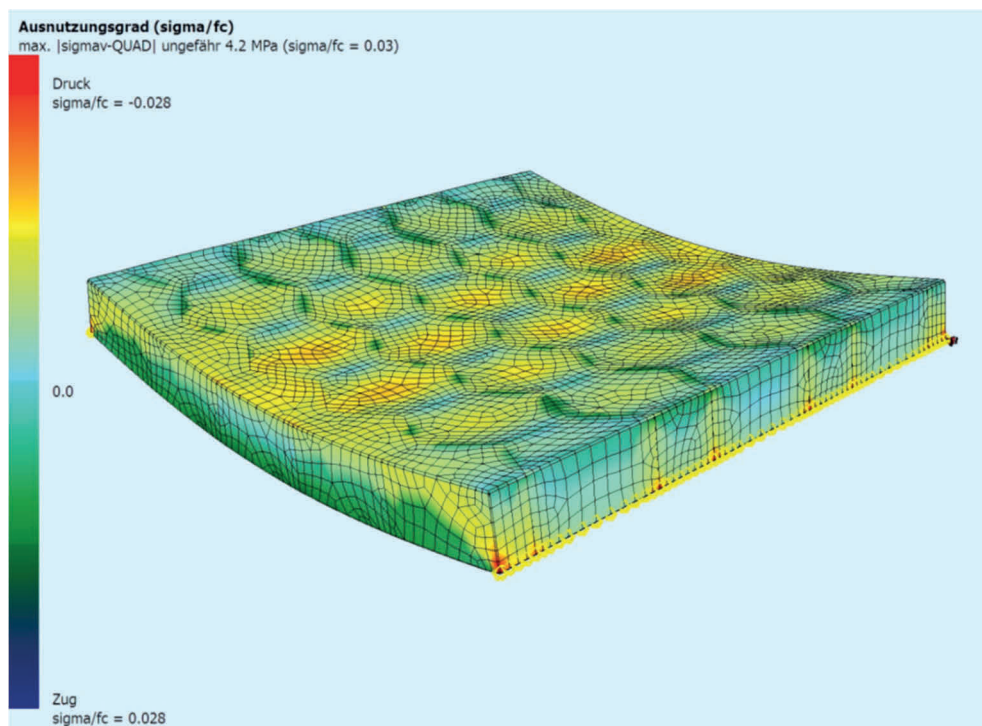


Abb. 4.39: Darstellung des Ausnutzungsgrads des Brückenwabenmoduls

Weitere Ausführungen zur statischen Berechnung der Interaktiven Wabenbrücke sind in der Genehmigungsstatik [Sch14] dargestellt. In der gleichen Literaturstelle werden die für das Stahltragwerk notwendigen Standsicherheitsnachweise dargelegt.

Herstellung der GFK-Wabensandwich-Module

Der Aufbau der Wabensandwich-Module entspricht Regellaminaten nach DIN 18820, wobei Mischlaminat des Typs GF-UP1-MW1-n-40 mit folgendem Aufbau eingesetzt wurden:

- Deckschicht oben: 21 Lagen MW1 mit rutschfester Verschleißschicht (Harz-Sand-Gemisch),
- Deckschicht unten: 11 Lagen Laminat MW1,
- Wabenkern: 2 x 5 Lagen MW1.

Die als Referenzobjekt vorgesehene Brückenkonstruktion weist in horizontaler Richtung einen Radius von 25 m sowie zusätzlich in der vertikalen Achse einen Krümmungsradius von 175 m auf. Daraus resultierte eine besondere Herausforderung an den Formenbau für den wabenförmigen Kern. Die Einzelwaben haben, wie in Abb. 4.40 (li.) dargestellt, entlang des Querschnittes unterschiedliche Abmessungen; innere Waben sind gestaucht und äußere gestreckt ($a=a(r)$, $a_2>a_1$).

Die Herstellung der GFK-Waben mittels Wickeltechnologie führt aufgrund der unterschiedlichen Wabengeometrie ($a=a(r)$) zu einem hohen Aufwand bei der Fertigung und zu hohen Kosten bei den verschiedenen Wickelkernen, so dass hierfür das klassische Laminierverfahren bevorzugt wurde. Um den Formenbau auf ein Minimum zu begrenzen wurden drei verschiedene Halbwaben-Profilformen konstruiert, aus denen alle Wabenmodule gefertigt werden können (siehe farblich gekennzeichnete mäanderförmige Halbwaben in Abb. 4.40, re. und die Explosionszeichnung in Abb. 4.41, li.).

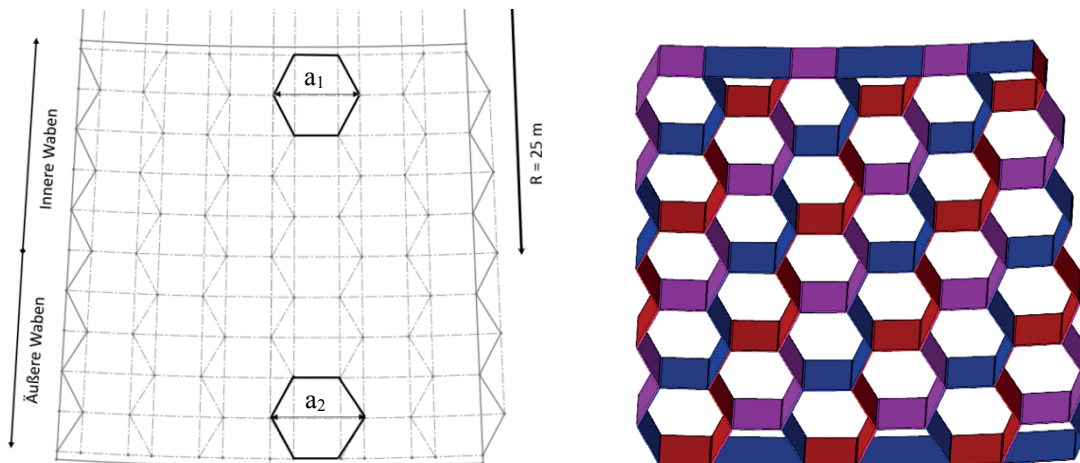


Abb. 4.40: Schematische Wabenanordnung eines GFK-Brückenmoduls (li.), Formenbaugesamtheit (re.)

Zur Herstellung eines kompletten Wabenmoduls ($6,7\text{ m}^2$) wurden 13 Laminatstreifen mittels der drei flexibel einsetzbaren Halbwaben-Formwerkzeugen laminiert, nach Aushärtung in der Montagelehre gezielt kombiniert und in jeweils unterschiedlichen Längen zum Wabenkern stoffschlüssig zusammengefügt (Abb. 4.41, re.). Zur genauen Zuordnung im Montageprozess ist in den Werkzeugen eine Kennzeichnung eingefräst, die eine eindeutige Identifizierung der Laminatstreifen nach dem Beschnitt gestattet. Nachdem der Wabenkern des Moduls gefertigt wurde, erfolgte die Verklebung mit der oberen Deckschicht.

Zur Applikation der unteren Deckschicht wurde anschließend die Egalisierung des Wabenmoduls in der CNC-Fräse vorgenommen (siehe Abb. 4.42, li.). Mit dem Auftrag der unteren Deckschicht im Nass-in-Nass-Verfahren entsteht ein flächiges Wabensandwich, was zur Umsetzung der geforderten Rutschfestigkeitsklasse R11 auf der oberen Deckschicht mit einer Verschleißschicht aus Quarzsand und Harz versehen wurde (vgl. Abb. 4.42, re.).

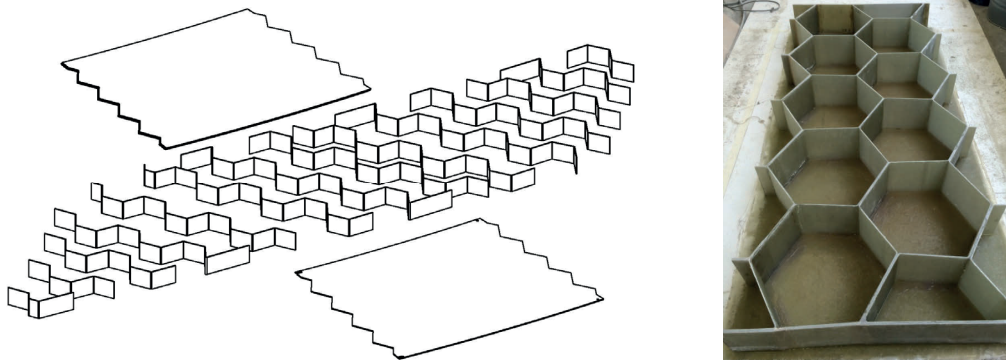


Abb. 4.41: Bestandteile der Module aus Halbwaben (li.), Montagelehre zur Verklebung der Laminatstreifen (re.)

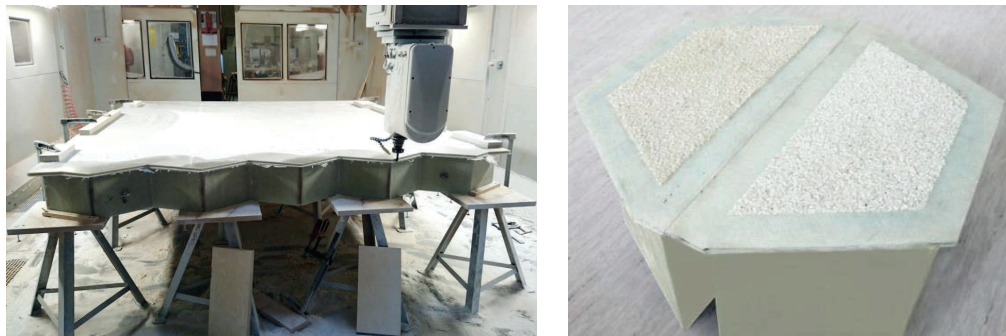


Abb. 4.42: CNC-Beschnitt des Wabenmoduls (li.), Applikation der Verschleißschicht auf der Einzelwabe (re.)

Integration von Sensorik zur Steuerung der Beleuchtung

Mit der Entwicklung des neuen SHM-/CM-Systems auf Basis textiler Sticktechnologie kann eine zuverlässige, richtungsabhängige Detektion von Dehnungen und Stauchungen in FKV-Tragstrukturen durch Integration der neuen Sensorik gewährleistet werden (siehe auch Abs. 4.2.5). Infolge der Anforderungen an die Referenzbrücke hinsichtlich interaktiver Beleuchtung des Gehweges wurde weiterführend ein integrales Sensorsystem konzipiert und umgesetzt, dass die Position von Fußgängern auf den GFK-Brückenelementen detektiert und Schaltfunktionen für die automatische Beleuchtung der Brücke steuert.

Zur Beleuchtung wurden in die GFK-Wabenstruktur umlaufende LED-Elemente eingebaut, die durch die transluzenten Deckschichten der Wabenmodule hindurchscheinen und neben einer gleichmäßigen Beleuchtung in Kombination mit der neuen Sensorik interaktiv verschiedene Lichtszenarien gestatten. Vor dem Einbau der Lichtkörper in die Wabenelemente der Referenzbrücke wurde in Testmodulen die Funktionsfähigkeit nachgewiesen (Abb. 4.43, li.).

Das neue integrale Sensorsystem basiert auf gestickten Sensorantennen, die spiralförmig auf Glasfaservlies appliziert und während der Fertigung der Brückenelemente in die Deckstruktur einlaminiert werden (vgl. Abb. 4.43, re.). Die Antennen bestehen aus isolierter Kupferlitze

und sind über ein kaskadiertes Signalverarbeitungssystem und eine angeschlossene Auswerteelektronik segmentweise verbunden (Abb. 4.44, li. und Abb. 4.44, mi.).

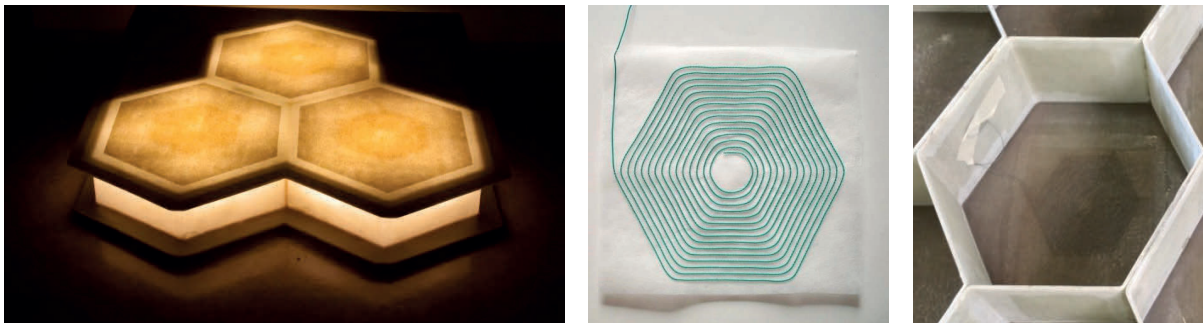


Abb. 4.43: GFK-Waben mit integrierter Sensorik und Beleuchtung im Testmodul (li.), Spiralförmig gestickter Sensor vor (mi.) und nach der Einbettung in die GFK-Deckschicht (re.)

Das über den Antennen des Flächensensors aufgebaute elektromagnetische Feld, das eine Rückkopplung bei Änderung des elektrischen Widerstandes und der Dielektrizität erlaubt, wird über die Elektronik örtlich begrenzt. Beim Betreten des sensorintegrierten Brückensegments ändern sich der Widerstand und die Dielektrizität im Sensorfeld, was die Feldcharakteristik des Sensors bewirkt und eine Schaltfunktion der Elektroneinheit auslöst. Diese gibt ein Signal an die Steuerung und somit erfolgt die Einschaltung der Beleuchtung.

Die Integration der spiralförmig gestickten Sensoren erfolgte in den GFK-Wabenelementen der Referenzbrücke in definierten Abständen, wobei diese während der Fertigung der Elemente an der Unterseite der oberen Deckschicht appliziert wurden (vgl. Abb. 4.44, li.). Nach der Fertigstellung der Brückenmodule fand der Einbau der LED-Beleuchtungselemente (Abb. 4.44, re.) statt. Dazu wurden die Wabenmodule an der Unterseite angebohrt, die vorkonfektionierten LED-Segmente integriert und durch GFK-Abdeckungen verschlossen.



Abb. 4.44: Brückenelement mit kaskadierten Antennen (li.), Wabensegment mit integriertem Sensor und Verarbeitungselektronik (mi.), LED-Beleuchtungsschirm (re.)

Baupraktische Umsetzung

Für die Entwicklung der modularen GFK-Strukturkomponenten in Wabenbauweise sind umfassende theoretische und experimentelle Untersuchungen hinsichtlich neuer Materialien, Tragkonstruktionen, Verbindungstechnologien und statischer Bemessungen sowie Herstellungstechnologien vorgenommen worden. Zur Überführung der wissenschaftlichen Ergebnisse in die Baupraxis ist es den Forschungspartnern TU Chemnitz, Fiber-Tech Group, steelconcept GmbH, Hentschke Bau GmbH und Ingenieurbüro Schulze&Rank gelungen, ein Referenzmodell im Maßstab 1:1 in Chemnitz umzusetzen.

Dabei wurde folgender Ablauf der Montage- und Herstellungsschritte gewählt:

1. Gründung für Gehbahnkonstruktion und Bogen,
2. Einbindung der Bogenendteile in Fundamentköcher (Betonage),
3. Bogenmontage, Verschweißen der Montagestöße,
4. Montage Überbau in einem Stück mit Kranunterstützung (Abb. 4.45, li.),
5. Einbau der Hänger,
6. Verankerung des Überbaus auf den Widerlagern,
7. Einbau der GFK-Wabenmodule und Geländer (Abb. 4.45, re.),
8. Anschluss der Kabel und Steuerung für interaktive Beleuchtung,
9. Herstellung des Gehwegabschlusses und Fertigstellung (Abb. 4.46, Abb. 4.47).



Abb. 4.45: Montage Überbau [Baby Smile Fotografie GmbH&Co.KG] (li.), Einbau der GFK-Wabenmodule (re.)



Abb. 4.46: Interaktive Wabenbrücke Chemnitz bei Tag [Baby Smile Fotografie GmbH & Co. KG]



Abb. 4.47: Interaktive Wabenbrücke Chemnitz bei Nacht mit Beleuchtung [Hendrik Schmidt]

4.2.7 Ganzheitliche Bewertung der GFK-Wabenbauweise für Leichtbaubrücken

Die Entwicklung und praktische Umsetzung der neuartigen GFK-Wabenbauweise bestätigt, dass FKV im Bauwesen grundsätzlich für tragende und aussteifende Leichtbauwerke prädestiniert sind. Neben der wirtschaftlichen Errichtung von leichten Bauwerken können zudem innovative Architekturideen in Kombination mit Funktionsintegration und Energieeffizienz in die Praxis überführt werden. So wurden am Beispiel des Referenzbauwerkes „Interaktive Wabenbrücke“ die statischen und bautechnischen Anforderungen leichtbaugerecht umgesetzt und zusätzlich architektonische Highlights, z. B. durch die Integration einer adaptiven Beleuchtung und durch den frei geformten Brückenverlauf, geschaffen. Infolge der Gewichtseinsparungen in Kombination mit einem hohen Grad an Vorfertigung der Brückenelemente konnten kurze Montagezeiten erreicht werden. Dies ist insbesondere für den Aufbau von Brücken über Bahnstrecken von großem Interesse, da lange Errichtungszeiten zur Sperrung der Bahnstrecke entfallen. Die Montage vor Ort kann dabei aufgrund des geringen Strukturgewichtes mit mobilen Kränen erfolgen.

Die sehr guten mechanischen und bauphysikalischen Eigenschaften faserverstärkter Kunststoffe geben neue Impulse für die zukünftige Entwicklung von Ingenieurtragwerken und bieten für den Bau kompletter Tragwerke viele Vorteile. Dabei weisen FKV i. d. R. eine sehr hohe Tragfähigkeit bei vergleichsweise geringem Gewicht auf. FKV-Tragwerke sind zudem sehr resistent gegen Umwelteinflüsse, viele aggressive Substanzen, wie z. B. Tausalze, sowie altern bei lastgerechter Auslegung und Fertigung in sehr geringem Maße. Untersuchungen dynamisch belasteter Lamine in Zeiträumen von über 30 Jahren haben keine negativen Veränderungen in den Laminaten gezeigt [Hön99].

Die FKV-Komponenten weisen aufgrund ihres geringen Instandhaltungsaufwands vor allem für langlebige Brückentragwerke Vorteile auf. So etwa werden die laufenden Betriebskosten durch den Wegfall von Korrosionsschutzmaßnahmen sowie sonstiger Pflegemaßnahmen im Bereich des Fahrbahnbelages erheblich reduziert. Während bei klassischen Brückenkonstruktionen nach [Meh10] in 100 Jahren Instandhaltungskosten von etwa 60 bis 90% der Neubaukosten anfallen, wird bei GFK-Tragstrukturen im Brückenbau mit einer Wartungsfreiheit von etwa 60 Jahren gerechnet.

Insgesamt bieten sich FKV-Tragwerke für zukünftige Generationen von Bauwerken mit hoher Tragfähigkeit, Funktionsintegration und Haltbarkeit bei minimalem Instandhaltungsaufwand an. Ausgewählte Visionen und Leichtbaustudien zu freigeformten organischen Brücken mit Funktionsintegration sind in den nachfolgenden Abb. 4.48 und Abb. 4.49 dargestellt.



Abb. 4.48: Vision zur CFK-Brücke der Zukunft (Entwurf Brücke für Chemnitz: Göran Pohl, Pohl Architekten)



Abb. 4.49: Vision „Crystal Bridge“ für den Wettbewerb „Nine Elms to Pimlico Bridge“, London (Entwurf: Cox Architecture Pty Ltd)

5 Faserbewehrte Leichtbauelemente mit mineralischer Matrix

Mineralisch basierte Baustoffe besitzen sehr hohe mechanische Druckeigenschaften und in Kombination mit Stahlbewehrungen sehr hohe Zug- und Biegeeigenschaften. Stahlbetonbauwerke werden oft in Fertigteilbauweise errichtet, wobei die Architektur aufgrund der Materialspezifik massiv ist und i. d. R. ebene und eckige Erscheinungsformen bedingt. Vor dem Hintergrund knapper werdender natürlicher Ressourcen ist der minimale Einsatz von Material und Energie Intension des heutigen und zukünftigen Bauens. Mit neuen faser- und textilverstärkten mineralischen Werkstoffverbunden in Kombination mit einer kraftflussgerechten Gestaltung nach dem Prinzip „form follows force“ wird die Filigranität und Leichtigkeit des Betonbaus umgesetzt. Voraussetzung dabei ist die gezielte Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften der Komponenten Beton (Komposition hochfester Feinbetone führt zur Aufnahme höchster Druckkräfte, Zugabe von Kurzfasern führt zur Steigerung der Duktilität) und der textilen Verstärkung (angepasste Beschichtung bewirkt Erhöhung der Verbundfestigkeit) in Kombination mit der kraftflussgerechten Anordnung des Verstärkungstextils im Bauteil.

Die leichtbaugerechte Anwendung von Faser- und Textilbeton führt neben der Generierung einer filigranen Freiformarchitektur zu einer Reduktion des Eigengewichts der Bauteile und damit zu Einsparungen bei der Herstellung von Stahl, Zement und Zuschlagstoffen. Weitere Vorteile von textilbewehrtem Beton sind:

- Sehr hohe Tragfähigkeit (bezogen auf Schichtdicke), daher geeignet für Neubauten und Verstärkung bestehender Bauwerke [Cur09],
- Hohe Steifigkeit des Bauteils und geringe Durchbiegung,
- Dauerhaftigkeit (dichte Betonmatrix, korrosionsbeständige Bewehrungstextilien),
- Flexibilität textiler Bewehrungen führt zu Freiformbarkeit [Cur08],
- Gutmütiges Rissverhalten (hohe Dichte an unterkritischen Feinrissen [Sch11-1]).

Analog zu FKV-Tragwerken fehlen auch für die Anwendung von faser- oder textilverstärkten Leichtbetonelementen Grundlagen zu allgemeingültigen Berechnungsvorschriften, serienreifen Herstellungstechnologien und genormten Prüfverfahren. Vor allem im Hinblick auf den Einsatz von hochfesten Betonen der neuen Generation oder von neuartigen Bewehrungstextilien besteht besonderer Forschungsbedarf.

Aufbauend auf dem Stand der Wissenschaft (siehe Kapitel 3) werden derzeit ein Schwerpunktprogramm der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG-SPP 1542 "Leicht Bauen mit Beton: Grundlagen für das Bauen der Zukunft mit bionischen und mathematischen Entwurfsprinzipien" und das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Programms „Zwanzig20“ geförderte Projekt „C³ - Carbon Concrete Composite“ sowie eine Vielzahl von verschiedenen anwendungsorientierten Projekten durchgeführt. In den folgenden Kapiteln wird ein Überblick über die konstruktive und technologische Umsetzung von Faser- und textilbewehrten Betonbauelementen in Leichtbauweise mit Hilfe neuartiger Konzepte und Lösungsansätze dargestellt. Im Vordergrund stehen nicht nur hochbeanspruchte Leichtbaukonstruktionen für dünnwandige freigeformte Tragstrukturen sondern auch der Erkenntnistransfer der Forschungsergebnisse in baupraktische Anwendungen.

5.1 Fassadensystem in filigraner Faserbeton-Leichtbauweise

Die Fassade eines Gebäudes muss zunehmend höhere Anforderungen hinsichtlich Wärmeschutz, Schallschutz, Wetterbeständigkeit sowie Sonnenschutz übernehmen. Der Wunsch nach zusätzlicher Multifunktionalität im Hinblick auf Erzeugung, Speicherung und Weiterleitung von Energie sowie aktive Steuerungselemente zur energieeffizienten Einstellung der Belichtung führt zur Entwicklung neuer Materialverbunde im Multi-Material-Design. Vor allem zur Erfüllung dieser teilweise konträren Ansprüche ist die gezielte Integration der Faserverstärkungen im langzeitbeständigen und nicht brennbaren Baustoff Beton von zentraler Bedeutung [Gel10].

Die Anwendung von faserverstärkten Architekturbetonen gestattet die baupraktische Herstellung dünnwandiger, sowohl ebener als auch gekrümmter Fassadenelemente mit hohem Leichtbaugrad und höchsten Designansprüchen hinsichtlich der Oberflächenqualität. Mit der Entwicklung eines Fassadensystems in filigraner Faserbeton-Leichtbauweise wurden forschungsseitig die materialtechnischen, konstruktiven und technologischen Grundlagen zur Anwendung erarbeitet. Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wurde der Fokus auf die Materialentwicklung, Konstruktion eines Schalungssystems, Herstellungstechnologie und Verankerungssystem gerichtet.

5.1.1 Materialentwicklung

Faserbeton ist ein zementgebundener Materialmix, der aus Feinbeton und Kurzfasern besteht. Durch die Faserverstärkung kann u. a. eine Verbesserung der Schwindrissneigung, Biegezug- und Zugfestigkeit, Duktilität sowie Bruch- und Rissverhalten erreicht werden. Im Bereich der faserbewehrten Betone finden i. d. R. AR-Glas- oder Carbonfasern Anwendung. Dabei beträgt die Faserlänge zwischen 6 und 50 mm. Der maximale Faservolumengehalt wird durch die Verarbeitungstechnologie des Faserbetons begrenzt, da die Plastizität des Betons mit steigendem Faservolumengehalt erheblich abnimmt. Bei der Herstellung eines gießfähigen Betons ist der Fasergehalt auf 2,5 Vol.-% limitiert. Etwas höhere Faservolumengehalte können beispielsweise mit dem Spritzverfahren verarbeitet werden.

Die Rezepturenentwicklung der Betonmatrix für die neuen Fassadenelemente beruhte auf den definierten Anforderungen an den Beton bezüglich der Farbe und Oberflächenbeschaffenheit, Formgestaltung der Fassadenelemente, Fertigungstechnologie und statischen Restriktionen. Die qualitative Zusammensetzung des Feinbetons ist in Anlagen 9.3, Tab. 9.1 aufgeführt. Als Bindemittel kam neben weißem Portlandzement ein amorphes Alumosilikat als Puzzolan zum Einsatz. Dolomitsand mit einer Korngröße von 0 bis 1 mm und Dolomitmehl, mit einer mittleren Korngröße von 70 μm wurden als Gesteinskörnung oder Füller zugegeben. Der entwickelte Feinbeton wurde mit integralen alkaliresistenten Glaskurzfasern modifiziert, so dass Sedimentationserscheinungen des Frischbetons und Schwindrissneigung im Festbeton verringert wurden. Die alkaliresistenten (AR)-Glasfasern besitzen durchschnittlich 16 M.-% ZrO_2 , eine Faserlänge von 12 mm und ein Längengewicht von 45 tex. Zusätzlich erfolgte die Zugabe eines Hochleistungsfließmittels mit einem Polycarboxylatether-Anteil (PCE) von 30 M.-%, so dass die rheologischen Eigenschaften auf die Gießformgebung eingestellt werden konnten. Der Wasserbindemittelwert betrug 0,36.

5.1.2 Herstellung des Feinbetons

Die Komponenten der Mischung wurden zur Herstellung des glasfasermodifizierten Feinbetons mit dem Intensivmischer verarbeitet (Mischer R05T der Fa. Eirich, Mischparameter siehe Tab. 5.1). Dabei hatte der Mischvorgang einen entscheidenden Einfluss auf die Homogenität des Frischbetons und damit auch auf die Festbetoneigenschaften. Glasfasern erschwerten, bedingt durch ihre morphologischen Eigenschaften, die Herstellung eines homogenen Frischbetons. Zur Vermeidung der sog. Igelbildung wurden die Scherkräfte, die vom rotierenden Mischwerkzeug auf den Frischbeton übertragen werden, durch das Intensivmischprinzip in Kombination mit dem integrierten Wirbler (Stift- oder Sternwirblern) erhöht. Die Gesamtmischzeit betrug insgesamt 5 min.

Tab. 5.1: Mischparameter zur Herstellung des Feinbetons

| | Komponente | Mischprinzip | Mischleistung [%] | Mischzeit [s] |
|----|-------------------------------|--------------|-------------------|---------------|
| 1. | Bindemittel + Gesteinskörnung | Gegenlauf | 15 | 60 |
| 2. | 75 % vom Zugabewasser | Gleichlauf | 50 | 90 |
| 3. | Hochleistungsfließmittel | Gleichlauf | 50 | 60 |
| 4. | Restwasser | Gleichlauf | 50 | 30 |
| 5. | AR-Glaskurzfasern | Gleichlauf | 60 | 60 |

5.1.3 Materialcharakterisierung

Die Ermittlung der Frischbetoneigenschaften erfolgte nach DIN EN 12350. Luftgehalt und Rohdichte des Frischbetons wurden in Anlehnung an DIN 18555-2 mittels Luftgehaltsprüfer bestimmt. Zur Einstellung des Fließverhaltens der Feinbetonmatrix an die gewünschte Gießformgebung ist eine rheologische Optimierung durch Anpassung des Fließmittelgehalts im Rheometer durchgeführt worden. Ziel dabei war die Bestimmung von Fließkurven des Frischbetons unter Verwendung variierender Fließmittelgehalte mit dem Rheometer (Thermo Scientific HAAKE MARS III, Abb. 5.1, li.). Als Messgröße wurde das Drehmoment bei einer Scherrate von 10 s^{-1} in Abhängigkeit zum Fließmittelgehalt ermittelt (siehe [Fun14-2]).

Zur Untersuchung der Festbetoneigenschaften sind die Probekörper 28 Tage „trocken“ nach DIN EN 12390-2 gelagert worden. Die Druckfestigkeit wurde an Würfeln mit einer Kantenlänge von 150 mm nach DIN EN 12390-3 auf der Druckprüfmaschine (ToniNorm, Lastrahmen 3.000 kN) bestimmt (siehe dazu Abb. 5.1, mi.). Die Ermittlung der 3-Punkt-Biegezugfestigkeit erfolgte an Probekörpern mit den Abmessungen von 225 mm x 50 mm x 15 mm (l x b x h), in Anlehnung an DIN EN 12390-5 mit der Zugprüfmaschine (ToniNorm, Prüfraumen 20 kN, Abb. 5.1, re.). Als Stützweite wurde 200 mm und als Belastungsgeschwindigkeit 100 N/s eingestellt.

Zur Validierung der Dauerhaftigkeit des faserbewehrten Feinbetons sind 28 Frost-Tau-Wechsel in der Klimatrube (Schleibinger) durchgeführt und die Abwitterung (CDF-Test) und innere Gefügeschädigung (CIF-Test) in Anlehnung an die RILEM-Empfehlungen [RILEM117] bestimmt worden (vgl. Abb. 5.2). Darüber hinaus wurde die Wassereindringtiefe ermittelt.



Abb. 5.1: Bestimmung der Fließeigenschaften von Frischbetonen im Rheometer HAAKE MARS III (li.), Ermittlung der Druckfestigkeit (mi.), Ermittlung der 3-Punkt-Biegezugfestigkeit (re.)



Abb. 5.2: CDF und CIF-Test zur Bestimmung der Frost- u. Frost-Tau-Wechselbeständigkeit in der Klimakammer

Rheologische Eigenschaften

Zur Bestimmung des optimalen Fließmittelgehalts im Feinbeton wurden die Versuche im Rheometer durchgeführt und ausgewertet. Abb. 5.3 zeigt das Drehmoment als Funktion des Fließmittelgehalts bei einer Scherrate von 10 s^{-1} . Das Drehmoment nimmt dabei bis zu einem Fließmittelgehalt von 3,5 M.-% aufgrund der zunehmenden elektrosterischen Stabilisierung der Feinpartikel (z. B. Zementpartikel, Mikrosilika) ab. Somit liegt die vollständige Stabilisierung der fein verteilten Teilchen (Sättigungspunkt S_p) bei etwa 3,5 M.-% Fließmittelgehalt vor. Eine Erhöhung des Fließmittelgehalts über den Sättigungspunkt hinaus resultiert in der Zunahme des Drehmoments, was indirekt zur Steigerung der dynamischen Viskosität führt, jedoch abhängig vom Verflüssiger selbst ist. Darüber hinaus wird das Drehmoment durch die Zunahme der Verkettung der Haupt- und Seitenketten der sterischen PCE erhöht.

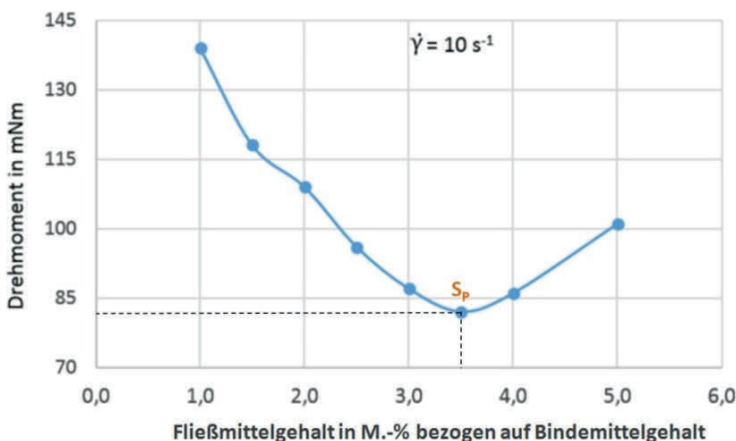


Abb. 5.3: Rheologische Optimierung, Drehmoment in Abhängigkeit des Fließmittelgehalts

Frisch- und Festbetoneigenschaften

Die Frisch- und Festbetoneigenschaften sind in Tab. 5.2 zusammenfassend dargestellt. Der Nachweis der Verarbeitbarkeit im Gießverfahren wurde durch das ermittelte hohe Ausbreitmaß von 650 mm erbracht. Somit liegt ein Frischbeton mit hoher Fließfähigkeit vor (Ausbreitmaß F6). Mit dem sog. Luftgehaltsprüfer wurden im Frischbeton Luftgehalte von 2,0 Vol.-% und eine geometrische Rohdichte von 2,28 g/cm³ ermittelt.

Die Gesamtschwindverformung, die mit einer 1 m langen Schwindrinne (Schleibinger) gemessen wurde, betrug 0,91 mm/m. Diese vergleichsweise hohe Gesamtschwindverformung ist mit dem hohen Bindemittelgehalt und der damit einhergehenden großen chemischen Schwindung zu begründen. Zudem erhöhte sich aufgrund des geringen Wasser-Bindemittel-Wertes die autogene Schwindung. Das Trocknungsschwinden konnte durch 2 Tage Nachbehandlung der Betonelemente in Form von Befeuchtung und Schutz vor Zugluft praktisch ausgeschlossen werden. Insgesamt führte die hohe Schwindverformung zu keiner Schwindrissbildung im Festbeton und ist somit bzgl. Versagen unkritisch.

Die charakteristische Druckfestigkeit nach 28 Tagen betrug 104,1 MPa, wobei nach 24 h dieser Wert bereits bei 38 MPa lag. Somit ist eine Entformung der Betonelemente nach einem Tag möglich. Anhand des kleinen Variationskoeffizienten von 1,1% konnte auf eine homogene Mikrostruktur im Festbeton geschlossen werden. Die 3-Punkt-Biegezugfestigkeit betrug 19,5 MPa und liegt damit weit über den Werten der klassischen Betone.

Tab. 5.2: Frisch- und Festbetoneigenschaften des glasfasermodifizierten Feinbetons nach 28 Tagen

| Eigenschaft | Frischbeton | Festbeton |
|----------------------------|------------------------|------------------------|
| Geometrische Rohdichte | 2,28 g/cm ³ | 2,21 g/cm ³ |
| Ausbreitmaß | 650 mm | - |
| Luftgehalt | 2,0 Vol.-% | - |
| Lineare Schwindung* | 0,91 mm/m* | |
| Druckfestigkeit | - | 104,1 MPa |
| 3-Punkt-Biegezugfestigkeit | - | 19,5 MPa |

* Messung mittels Schwindrinne (1 m Länge)

Dauerhaftigkeit

Die Ergebnisse der Dauerhaftigkeitsuntersuchungen im CDF-Test bestätigen eine sehr geringe Abwitterungsmenge nach 28 Frost-Tau-Wechseln von durchschnittlich 113 g/m². Aus der Ermittlung des dynamischen E-Moduls gemäß der Ultraschalllaufzeit folgt nach 28 Frost-Tau-Wechseln, dass ein intakter Verbund ohne innere Gefügeschädigungen $R_{u,28} = 100\%$ vorliegt. Zudem wurde eine geringe Wassereindringtiefe von 11 mm gemessen (Tab. 5.3). Die experimentellen Ergebnisse lassen auf eine sehr hohe Dauerhaftigkeit der neuen Faserbetonmischung für Fassadensysteme in filigraner Leichtbauweise schließen (s. auch [Fun-14-3]).

Tab. 5.3: Ergebnisse der Dauerhaftigkeitsuntersuchungen

| Untersuchung | Ergebnis |
|---------------------|------------------------------|
| CDF-Test | $m_{28} = 113 \text{ g/m}^2$ |
| | $R_{u,28} = 100\%$ |
| Wassereindringtiefe | $w_t = 11 \text{ mm}$ |

5.1.4 Schalungssystem

Die technologische Umsetzung des neuen Fassadensystems bedarf einer leistungsfähigen Schalung, die eine freigeformte Geometrie, eine erhöhte Wiederverwendbarkeit sowie eine glatte Sichtbetonqualität der Elemente ohne Fehlstellen (Architekturbeton) in Kombination mit einer hohen Produktivität gestattet. Weitere Anforderungen an das Schalungssystem zur Umsetzung freigeformter Faserbetonelemente resultieren aus fertigungsbedingten Restriktionen bezüglich der hierfür ausgewählten Formgebungstechnologie Gießen. Hieraus resultiert ein modularer zweiteiliger Aufbau (Positiv- und Negativform) mit integrierten Funktions- und Halteelementen.

Nach dem Stand der Technik ist eine Vielzahl an Systemschalungen für Sichtbeton verfügbar, wobei die aus Stahl oder Holz bestehenden Rahmen und Trägerschalungen unter Verwendung verschiedener Schalhäute eingesetzt werden. Bei Fertigbetonelementen mit hohem Wiederholungsgrad sind Schalungen aus GFK prädestiniert, die insbesondere bei freigeformten Fassadenelementen gegenüber klassischen Systemen Vorteile hinsichtlich Formenvariabilität, Oberflächenqualität und Wiederverwendbarkeit (Einsatzzahl je nach Ausführung: > 100) aufweisen. Aus diesem Grund wurden zur Herstellung der neuen filigranen Faserbeton-Fassadenelemente GFK-Schalungskörper konstruiert, bemessen und gefertigt (s. [Fun14-4]).

Maßgeblich für den konstruktiven Aufbau des GFK-Laminats der Schalungselemente waren der Betondruck sowie die Belastung während der Verarbeitung (Verdichtung). Die Fertigung wurde mittels Laminier Technologie durchgeführt. Bei der Konzeption der Formen kam der Schalhauttextur eine besondere Rolle zu, da diese die Oberflächenbeschaffenheit des Architekturbetons entscheidend bestimmt. Aufgrund der erheblichen Auswirkung des kapillaren Saugverhaltens der Formen auf die Helligkeit der Betonelemente wurde hierfür eine nicht saugende Schalhaut ausgewählt. Um den Anforderungen an glatte und auch einheitlich helle Sichtflächen zu genügen, sind nichtsaugende und strukturfreie Schalhauttypen, basierend auf einem Gelcoat bei GFK-Formen, verwendet worden (Abb. 5.4, li.). Zur Gewährleistung einer nahezu porenfreien Sichtbetonoberfläche wurde während der Gießfertigung die GFK-Schalung in eine fast senkrechte Position gekippt (siehe Abb. 5.4, re.).

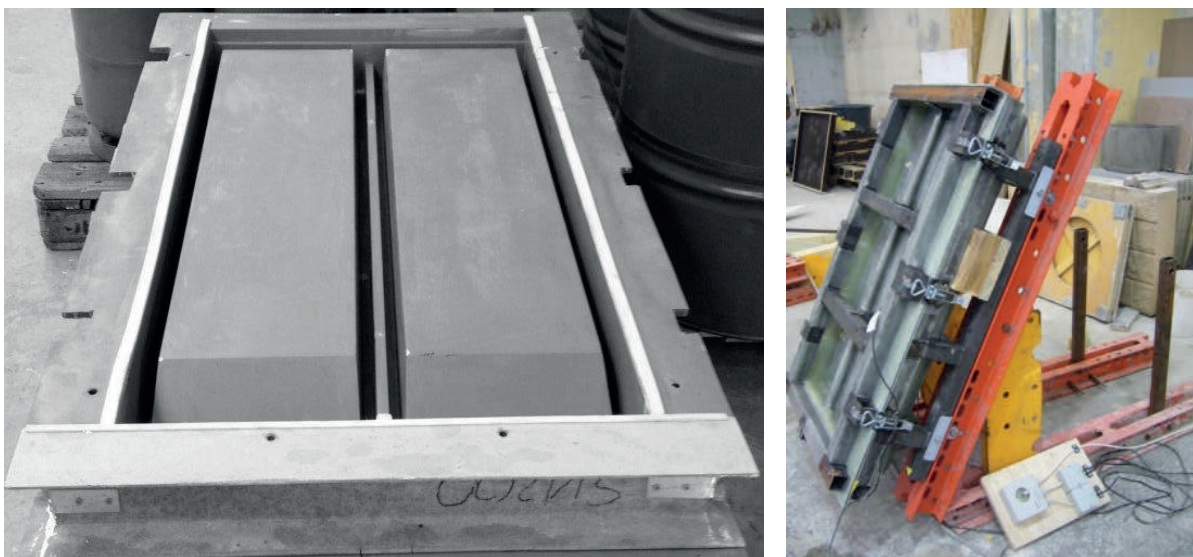


Abb. 5.4: GFK-Schalungselement ohne Rückwand (li.), GFK-Schalung geschlossen und gekippt (re.)

5.1.5 Befestigungssystem

Für die Anbindung der Fassadenelemente am Bestandsbauwerk sind bauaufsichtlich zugelassene, zumeist metallische Verankerungssysteme verfügbar. Derartige Systeme in Form von einfach montierbaren Fassadenankern gestatten eine Fixierung ebener Betonplatten mit definierter Mindestdicke. Die mehrteiligen Anker-Systeme bestehen z. B. aus einem Oberteil mit höhenjustierbarer Gewindestange, einem in der Fassadenplatte einbetonierten Unterteil und einer Abstandsschraube für die Justierung des Wandabstandes.

Aufgrund der im Vergleich zu Standard-Fassadenplattensystemen geringen Wandstärke sowie der besonderen Geometrie der neuen filigranen Faserbeton-Fassadenelemente von 13 bis max. 25 mm konnte kein zugelassenes Standardbefestigungssystem verwendet werden. Daher wurde ein eigenes, an die Randbedingungen angepasstes Verankerungssystem für die neuen Faserbeton-Leichtbauelemente entwickelt. Der Aufbau des Verankerungssystems umfasst Befestigungen im Fassadenelement, die mit Innengewindeankern des Typs M8 ausgebildet wurden und aus einer Hülse mit durchgehendem Gewinde, einer angepressten Scheibe sowie einer Abdichtkappe bestehen (vgl. Abb. 5.5). Die Integration der Befestigungspunkte in die GFK-Schalung erfolgte vor dem Betonieren, wobei die Abdichtkappe das Eindringen von Frischbeton in das Insert während des Betongießprozesses verhindert (Details siehe [Fun14-1]).

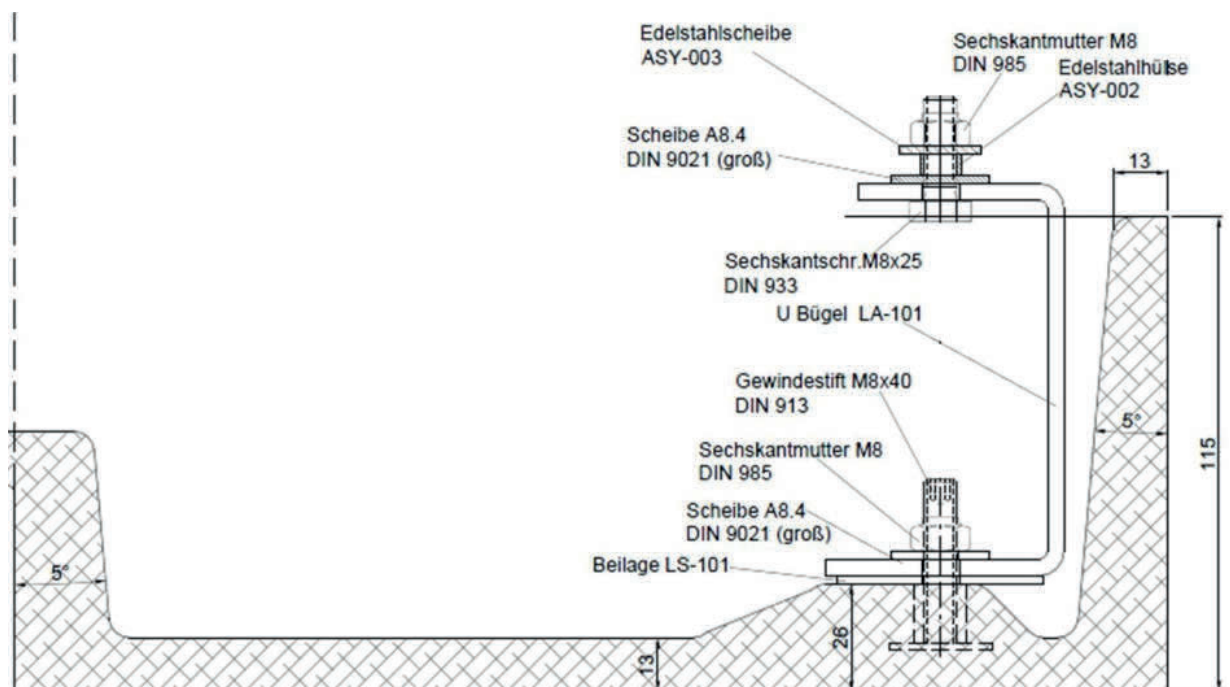


Abb. 5.5: Schematischer Aufbau der Befestigungspunkte im Fassadenelement

Für die Auslegung der benötigten quantitativen Befestigungspunkte der Fassadenelemente wurden Auszugsversuche an Musterplatten (20 cm x 20 cm) im Labormaßstab durchgeführt. Dabei wurden die Platten in Anlehnung an [ETAG] in 0°, 45°- und 90°-Richtung (out-of-plane-, mixed-, in-plane-Belastung) auf Zug mittels Universalprüfmaschine belastet (vgl. Abb. 5.6).

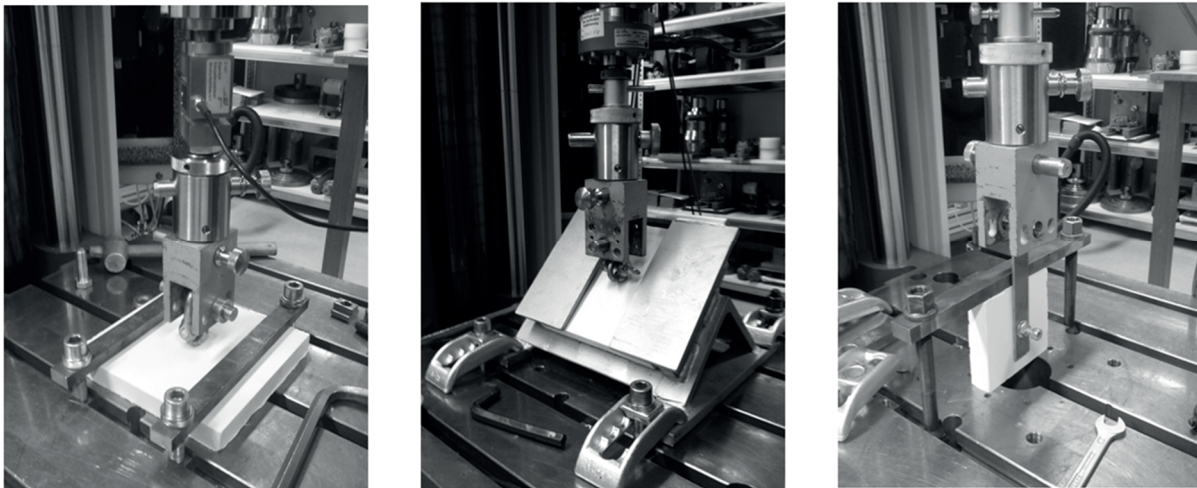


Abb. 5.6: Versuchsaufbau zu Auszugsversuchen in 0°, 45°- und 90°-Richtung

Die Versuchsergebnisse sind in Tab. 5.4 als Mittelwerte der Auszugskraft in Abhängigkeit von der Auszugsrichtung aufgeführt. Die höchste Auszugskraft von 12,4 kN wurde in 90°-Zugrichtung gemessen. In 0°- und 45°-Zugrichtung waren die Auszugskräfte annähernd gleich groß (7,9 kN bzw. 7,7 kN).

Basierend auf den Auszugsversuchen wurden je nach Elementlänge vier oder sechs Befestigungsanker in den Fassadenelementen eingesetzt (siehe Abb. 5.7). Dabei tragen die oberen Befestigungen das Eigengewicht der Elemente und nehmen darüber hinaus Windsoglasten auf. Die mittleren und unteren Befestigungsanker werden dagegen größtenteils auf Windsog beansprucht.

Tab. 5.4: Ergebnisse der Auszugsversuche und schematische Darstellung der Belastungsrichtungen

| Versuchsaufbau | Auszugskraft [kN] | $F_{max} = 7,8 \text{ kN}$ | $F_{max} = 7,7 \text{ kN}$ | $F_{max} = 12,4 \text{ kN}$ |
|----------------|-------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| 0°-Richtung | 7,9 | | | |
| 45°-Richtung | 7,7 | | | |
| 90°-Richtung | 12,4 | | | |

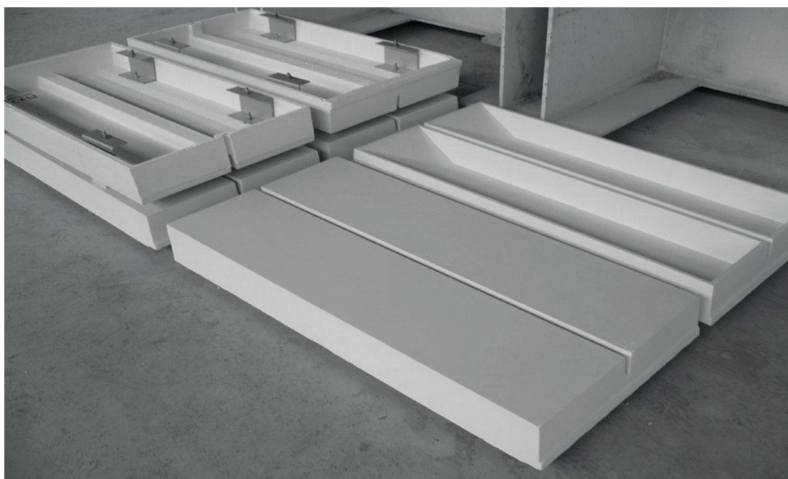


Abb. 5.7: Beispiele der Fassadenelemente mit Befestigungsankern

5.1.6 Referenzfassade „Poseidon“

Innerhalb der Revitalisierung des Poseidon-Gebäudes als Firmensitz der ING-DiBa-Firmengruppe in Frankfurt a. M. sollte eine energetisch optimierte Fassade für ein nachhaltiges Bauen technologisch umgesetzt werden (siehe Abb. 5.8). Angestrebt wurde dabei eine Zertifizierung als Green Building *Gold* nach LEED (Leadership in Energy and Environmental Design). Im Zuge der Neugestaltung der Fassade ist das Hauptaugenmerk auf den effizienten Austausch der Aluminiumelemente des Bestandsbauwerkes durch neue dünnwandige Betonfertigteile gerichtet worden. Die Betonfassade sollte dabei aus einem hochfesten dauerhaften Architekturbeton bestehen, der neben den hohen mechanischen Anforderungen eine reinweiße Farbe und perfekte Oberflächenqualität hinsichtlich homogener Farbgebung sowie Porenfreiheit aufweist. Der Einsatz des neu entwickelten Fassadensystems in filigraner Faserbeton-Leichtbauweise ist für derartige Anwendung prädestiniert, so dass für die Revitalisierung ca. 13.800 m² weiße Fassadenfläche bestehend aus etwa 12.200 Elementen durch den Forschungspartner Hentschke Bau errichtet wurden (Tab. 5.5).



Abb. 5.8: Fassadenelemente an Poseidon-Gebäude in Frankfurt a. M.

Tab. 5.5: Daten des Referenzobjektes

| Technische Kenndaten | |
|----------------------|--|
| Elemente | 12.200 Stück |
| Elementvarianten | 270 Stück |
| Bauteilstärken | 13 mm in der Fläche 26 mm an statisch relevanten Punkten |
| Bauteilgeometrie | Min. Länge: 0,19 m Max. Länge: 4,22 m Min. Breite: 0,12 m Max. Breite: 0,61 m |

Da der entwickelte faserverstärkte Feinbeton zur Herstellung der Fassadenelemente von den Bestimmungen der DIN EN 206-1 und der DIN 1045-2 abweicht und damit bauordnungsrechtlich nicht geregelt ist, war die Beantragung einer Zustimmung im Einzelfall (ZIE) bei der obersten Bauaufsichtsbehörde des Bundeslandes zwingend notwendig. Das entwickelte Befestigungssystem der filigranen Betonelemente ist zudem nicht in der DIN 18516-5 sowie der dort zitierten DIN 18516-3 enthalten, so dass für das Befestigungssystem die bauordnungsrechtlichen Verwendbarkeitsnachweise als ZIE zu erbringen waren.

Für die Herstellung der Vielzahl an Fassadenelementen im Betonfertigteilwerk wurden GFK-Schalungen für 270 unterschiedliche Elementtypen mit verschiedenen Abmessungen gefertigt. Dies führte zu einer erheblichen Reduktion des quantitativen Formenbaus durch gezielte Einstellung des Erhärtungsvorgangs der fasermodifizierten Feinbetonmatrix. Denn bereits nach einem Tag konnte eine Druckfestigkeit der Elemente von 38 MPa erreicht werden, was eine Entformung nach weniger als 24 Stunden gestattete.

Durch eine geschlossene Prozesskette: von der Vorbereitung der Schalung, über die Herstellung der Betonmischung, die Gießformgebung (Betoniervorgang und Verdichtung), dem Entschalungsprozess bis hin zur Nachbehandlung der Betonteile konnten pro Fertigungstag etwa 50 Fassadenelemente hergestellt werden (siehe Anlagen 9.3, Abb. 9.27, Abb. 9.28, Abb. 9.29). Für den sicheren Transport auf die Baustelle wurden die Betonelemente auf speziellen Gestellen befestigt und auf der Baustelle an die Bestandsfassade angebracht (Anlagen 9.3, Abb. 9.30; detaillierte Beschreibung siehe [Fun14-3]).

Im Rahmen dieser Arbeit diente die beschriebene ganzheitliche Entwicklung eines neuen faserverstärkten Architekturbetons zur Fassadengestaltung im Zuge der Revitalisierung des Poseidon-Hauses (siehe Abb. 5.9). Dabei konnte aufgezeigt werden, dass die entwickelten faserverstärkten Betonelemente eine optimale Oberflächenqualität, eine hohe Festigkeit und eine gute Dauerhaftigkeit erfüllen. Zudem wurde eine komplexe Fertigungskette zur technologischen Umsetzung der neuen Fassadenelemente in filigraner Faserbeton-Leichtbauweise geschaffen, die eine effektive Umsetzung qualitativ hochwertiger Beton-Fertigelemente gestattet. Hieraus resultieren komplex geformte Fassadenbauteile mit Hinterschneidungen in einer Wandstärke von 13 bis 25 mm, die durch ein neues formintegriertes Befestigungssystem am Bestandsbauwerk verankert werden. Die Überführung der Entwicklung in die Praxis ist in Zusammenarbeit der Professur SLK mit den Industriepartnern Hentschke Bau GmbH und Fiber-Tech Group am Beispiel des neu benannten Hochhauses „LEO“ in Frankfurt a. M. erfolgreich durchgeführt worden (vgl. Abb. 5.9).

Der Einsatz von neuartigen faserverstärkten anorganisch-nichtmetallischen Hochleistungswerkstoffen erlaubt dünnwandige, einfach und doppelt gekrümmte Freiformflächen im Bauwesen mit hohem Leichtbaugrad baupraktisch umzusetzen. Die Architekten und Planer können damit neue Designpotentiale erschließen, besonders im Hinblick auf den derzeit wachsenden Bedarf an organisch geformten Bauwerken.



Abb. 5.9: Neu entwickelte Fassadenelemente des Hochhauses „LEO“ in Frankfurt a. M.

5.2 Textilbewehrte Tragbetonelemente für den Lärmschutz

Die ständig zunehmende Verkehrsdichte auf Straßen und Schienenwegen führt zu steigender Geräuschemission und wirkt sich so negativ auf Mensch und Umwelt aus. Somit sind Schallschutzmaßnahmen zur Reduktion des Verkehrslärms heute wichtiger denn je. Die Ansprüche an derartige Lärmschutzsysteme, z. B. für Bundesstraßen, Autobahnen oder Bahnstrecken, sind sehr komplex und beinhalten Restriktionen hinsichtlich Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Funktionalität. Neben den akustischen und mechanischen Anforderungen sowie Dauerhaftigkeit rücken zudem wirtschaftliche und ökologische Aspekte in den Fokus. Darüber hinaus ist die Einsparung von Ressourcen (insbesondere Material und Energie) von besonderer Bedeutung. Vor allem die Materialeinsparung führt nicht nur zu Gewichtsreduktion und Minimierung der Herstellungskosten, sondern auch zur Senkung von Transportkosten und Montageaufwand.

In Deutschland werden etwa 50% der Lärmschutzwände aus Beton errichtet, die zumeist aus einer Tragschicht aus Stahlbeton und ein- oder beidseitig angeordneten schallabsorbierenden Vorsatzschalen aus Leichtbeton bestehen. Aufgrund der erforderlichen Betondeckung infolge passiven Korrosionsschutzes des Bewehrungsstahls betragen übliche Materialstärken von Tragbetonschichten ca. 12 bis 15 cm. Die Anwendung von Faser- und Textilbeton bietet hier hohes Potential zur Gewichtsreduktion, Dauerhaftigkeit und Nachhaltigkeit. Im Vergleich von kurzfaserver- und endlosfaserbewehrtem Beton (Textilbeton) können bei gleichem Faservolumengehalt mit textiler Bewehrung höhere maximale Zug- und Biegezugfestigkeiten erreicht werden, da die Textilbewehrung als 2D-Gitter oder 3D-Matte kraftflussgerecht in den Feinbeton integriert werden kann (Abb. 5.10). Aufgrund der vergleichsweise hohen Biegezugfestigkeiten und der o. a. Vorteile ist für den hier betrachteten Anwendungsfall Tragbetonplatte für Lärmschutzwände der Einsatz von Textilbeton anderen bewehrten Betonen zu bevorzugen. Das wesentliche Ziel bei der Entwicklung und Umsetzung des textilbewehrten Lärmschutzsystems war die Reduktion der Tragbetonplattendicke von 12 cm auf max. 6 cm.

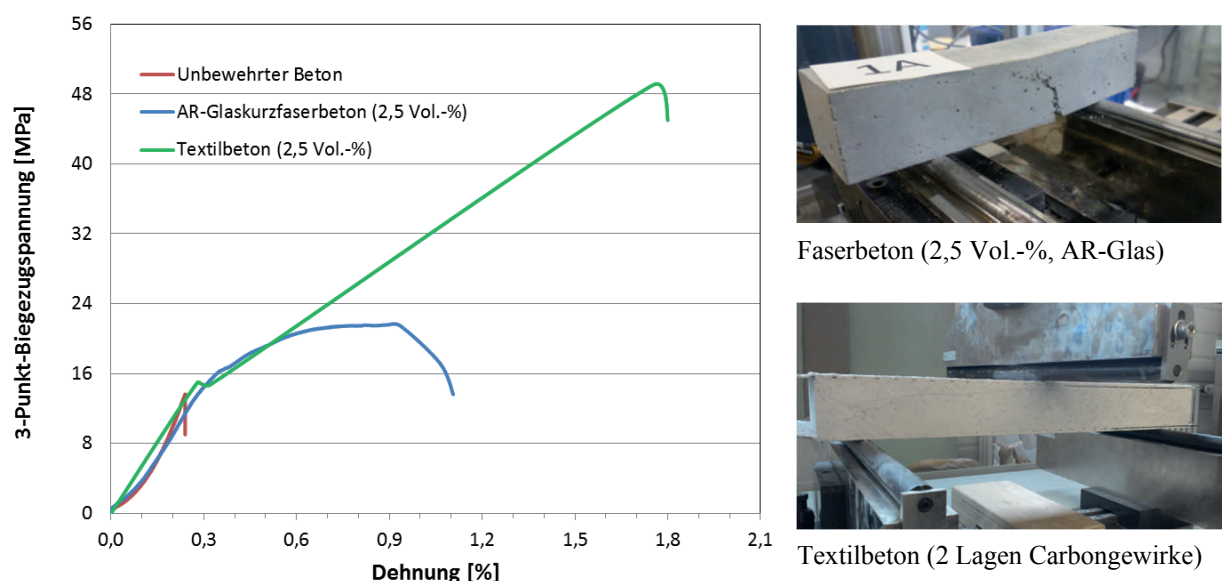


Abb. 5.10: Spannungs-Dehnungs-Diagramm von unbewehrten und bewehrten Betonen (li.), Darstellung der 3-Punkt-Biegezugprüfung von Faserbeton und Textilbeton (re.)

5.2.1 Materialsysteme

Der klassische Aufbau von Tragbetonplatten umfasst im Allgemeinen ein Betonfertigelement mit integrierten Stahlbewehrungen in Form von Stäben oder Matten. Dabei werden die jeweiligen Plattendicken nach statischen und dynamischen Belastungen sowie nach den Anforderungen aus den Expositionsklassen (Einwirkungen auf den Beton aus verschiedenen Umweltbedingungen infolge Umgebung und Nutzung) bemessen. Die Anwendung von Textilbeton als Alternative zu Stahlbeton ist im Bereich der Tragelemente für den Verkehrswegebau von besonderem Interesse, da hier die Einwirkungen auf den Beton und Beanspruchung infolge Frost, Taumittel, Chloride, chemischen und mechanischen Angriff sehr hoch sind. Aufgrund des passiven Korrosionsschutzes des Bewehrungsstahls durch Umhüllung mit Beton resultieren hohe Betonüberdeckungen. Werden Stahlbewehrungen durch korrosionsbeständige textile Gitterstrukturen substituiert, so lassen sich dünnwandige textilbewehrte Tragelemente mit geringen Betonüberdeckungen und reduzierten Betonmengen herstellen. Für die neuen textilbewehrten Tragbetonelemente für Lärmschutzwand wurde eigens eine hochfeste Feinbetonmatrix entwickelt und als Bewehrung ein biaxiales 2D-Gewirk in zweilagiger Ausführung basierend auf statischen Vorbemessungen ausgewählt (vgl. Abb. 5.11).

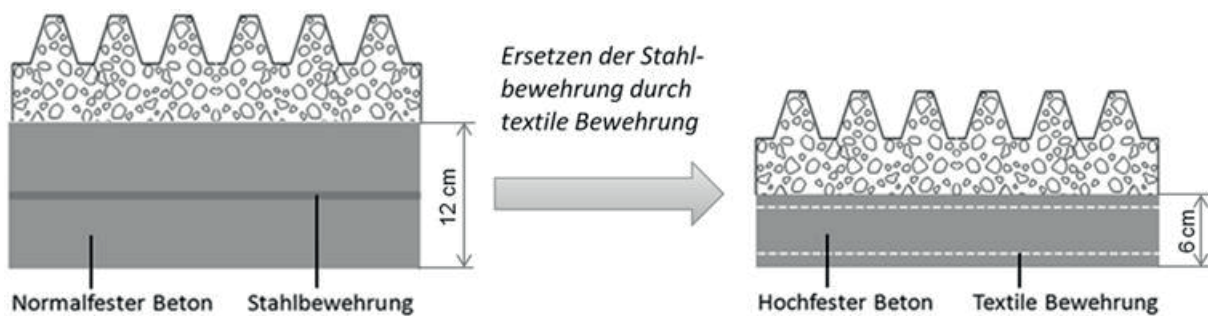


Abb. 5.11: Schematischer Aufbau einer Lärmschutzwand mit Tragplatte aus Stahlbeton (li.) und Textilbeton (re.)

Hochfeste Feinbetonmatrix

Die Rezepturenentwicklung der Feinbetonmatrix für die textilbewehrte Tragbetonplatte resultiert aus der Kombination der Anforderungen: Fließfähigkeit und Textildurchdringung, Verbund zwischen Beton und Filamenten des Textils, Formgebungstechnologie sowie Festigkeit und Dauerhaftigkeit. Hierauf aufbauend wurde ein hochfester Feinbeton mit reduzierter Alkalität und an die Verarbeitungstechnologie Gießen angepassten rheologischen Eigenschaften entwickelt, der kurze Ausschalzeiten gestattet. Die Zusammensetzung ist in den Anlagen 9.4, Tab. 9.2 dargestellt. Als Bindemittel wurde Portlandzement vom Typ CEM I mit einem Portlandzementklinkergehalt von 95 bis 100 M.-% verwendet, so dass max. 5 M.-% erstarrungsregelnde Nebenbestandteile enthalten sind. Durch gezielte Zugabe an Puzzolanen (Silica Fume, Flugaschen) werden somit reproduzierbare Eigenschaften im Beton gewährleistet. Um kurze Ausschalzeiten sicherzustellen, wurde ferner ein CEM I mit einer Festigkeitsklasse von 52,5 und hoher Anfangsfestigkeit ausgewählt. Als Gesteinskörnung kamen Sande mit einer max. Korngröße von 2 mm zum Einsatz. Zusätzlich erfolgte die Zugabe eines Hochleistungsfließmittels, so dass die rheologischen Eigenschaften gezielt an die Anforderungen der Gießtechnologie angepasst werden konnten. Zur Steigerung der Erstrissfestigkeit sowie zur Kompensation der Schwindneigung des Betons wurden Kurzfasern (AR-Glas) eingebracht. Der Wasser-Bindemittel-Wert betrug dabei 0.38, was zu einem niedrigviskosen Frischbeton führte.

Textile Bewehrung

Zur Aufnahme und Weiterleitung der hohen Zugkräfte im Textilbeton müssen die textilen Bewehrungsstrukturen neben einer hohen Festigkeit und Steifigkeit auch eine hohe Resistenz gegenüber alkalischem Angriff und damit Langzeitstabilität aufweisen. Eine hohe Verbundfestigkeit erfordert ferner eine gestreckte und positionspräzise Einbettung der voraus berechneten textilen Bewehrungen. Insbesondere bei der Herstellung von textilbewehrten Schalen ist die geforderte Krümmung der Textilstruktur auf die benötigte Steifigkeit anzupassen.

Für den Anwendungsfall Tragbetonplatte wurden verschiedene 2D- und 3D-biaxiale Gewirke mit verschiedenen geometrischen Abmessungen aus AR-Glas und Carbon untersucht (siehe Tab. 5.6). Um eine hohe Verbundfestigkeit zwischen Textil und Betonmatrix zu erreichen, sind verschiedene epoxidharzbasierte Beschichtungen ohne und mit mineralischen Additiven auf die Bewehrungsstruktur appliziert und anschließend die Verarbeitbarkeit sowie das Verbundverhalten getestet worden.

Tab. 5.6: Halbzeuge und Geometrie der untersuchten textilen Verstärkungsstrukturen

| Textilart | Rovings [tex] | Typ | Geometrie in mm | Beschichtungssystem | | |
|----------------------|---------------|------------|-----------------------------|---------------------|--|---------------------------------------|
| | | | | | | |
| 2D-Gewirke Carbon | Carbon 3300 | 2D-biaxial | 10 x 18 | Epoxid- harz | Epoxid- harz und Sand (Korn- größe: 0/1) | Epoxid- harz und Silica Fume |
| | Carbon 3300 | 2D-biaxial | 30 x 30 | | | |
| 2D-Gewirke Glas | AR-Glas 1200 | 2D-biaxial | 20 x 20 | | | |
| | AR-Glas 2400 | 2D-biaxial | 20 x 20 | | | |
| 3D-Gewirke Glas | AR-Glas 1200 | 3D-biaxial | 20 x 20 x 5 20 x 20 x 10 | | | |
| | AR-Glas 2400 | 3D-biaxial | 20 x 20 x 5 20 x 20 x 10 | | | |

5.2.2 Fertigung textilbewehrter Tragbetonplatten

Bei der Herstellung der textilbewehrten Tragbetonplatten wurden verschiedene 2D- und 3D-Gewirke in variierender Anzahl und Position in die Feinbetonmatrix (Zusammensetzung siehe Anlagen 9.4, Tab. 9.2) integriert. Zur Verarbeitung der Feinbetonkomponenten kam ein Intensivmischer (Eirich R05T) zum Einsatz. Eine Übersicht zu optimierten Mischparametern ist in Tab. 5.7 zusammengestellt. Die fertigungstechnische Umsetzung erfolgte in Form von Platten (500 mm x 500 mm) unter Variation der Technologie im Handlaminierverfahren und als Gießformgebung. Dabei wurden die Versuchsergebnisse der ausgewählten Technologien hinsichtlich Praxistauglichkeit validiert.

Tab. 5.7: Getestete Mischparameter zur Herstellung des Feinbetons für die Tragbetonplatte

| | Komponentenzugabe | Mischprinzip | Mischleistung [%] | Mischzeit [s] |
|----|---------------------------------|--------------|-------------------|---------------|
| 1. | Bindemittel und Gesteinskörnung | Gegenlauf | 15 | 60 |
| 2. | 75 % vom Zugabewasser | Gleichlauf | 35 | 90 |
| 3. | Verflüssiger | Gleichlauf | 35 | 60 |
| 4. | Restwasser | Gleichlauf | 40 | 30 |
| 5. | AR-Glaskurzfasern | Gleichlauf | 60 | 60 |

5.2.3 Kennwertbestimmung

Feinbeton

Die Ermittlung der Frischbetoneigenschaften wurde nach DIN EN 12350 und die Bestimmung der Festbetoneigenschaften nach DIN EN 12390 (wie in Abschnitt 5.1.3 beschrieben) durchgeführt. Die Probenlagerung erfolgte im Umgebungsklima „trocken“ (Trockenlagerung nach DIN EN 12390-2, Anhang NA). Eine Zusammenstellung der Frisch- und Festbetoneigenschaften ist in Tab. 5.8 dargestellt.

Tab. 5.8: Ermittelte Frisch- und Festbetoneigenschaften der Feinbetonmatrix

| Eigenschaft | Frischbeton | Festbeton nach 28 Tagen |
|--------------------------------|------------------------|-------------------------|
| Geometrische Rohdichte | 2,37 g/cm ³ | 2,31 g/cm ³ |
| Ausbreitmaß | 640 mm | - |
| Luftgehalt | 2,70 Vol.-% | - |
| Lineare Schwindung* | 0,51 mm/m | |
| Druckfestigkeit | - | 81,0 MPa |
| 3-Punkt-Biegezugfestigkeit | - | 9,3 MPa |
| Dynamischer E-Modul | - | 35,0 GPa |
| Mittl. Abwitterung (CDF-Test)) | - | 912 g/m ² |

* Messung mittels Schwindrinne (1 m Länge)

Anhand der ermittelten Frischbetoneigenschaften konnte eine gute Verarbeitbarkeit im Gießverfahren mit optimaler Fließfähigkeit (Ausbreitmaß 640 mm) nachgewiesen werden. Bereits einen Tag nach der Herstellung hat der reine Beton eine vergleichsweise hohe Druckfestigkeit von 25 MPa erreicht. Die Festbetoneigenschaften nach 28 Tagen zeigen, dass ein hochfester Feinbeton mit einer mittleren Druckfestigkeit von 81 MPa und einer Biegezugfestigkeit von 9,3 MPa vorliegt. Insbesondere die höhere Biegezugfestigkeit führt zur Steigerung der Erst- und Rissspannung bei den textilbewehrten Platten. Die Gesamtschwindverformung von 0,51 mm/m gilt als unkritisch und resultiert vornehmlich aus dem hohen Anteil an Silica Fume (10 M.-% v. Zement) und der damit verbundenen reduzierten chemischen Schwindung. Weiterhin wurde eine ausgezeichnete Frost-Tausalz-Beständigkeit (Expositionsklasse XF4) nachgewiesen.

Getränkter Faserroving

Zur Bestimmung der Zugfestigkeit und Bruchdehnung von getränkten Faserrovings (herausgelöst aus der textilen Bewehrungskomponente bestehend aus Roving und duromerer Matrix, Kurzbezeichnung: g-Rovings) wurden Zugversuche durchgeführt. Einspannlänge der g-Rovings und Prüfgeschwindigkeit betragen jeweils 50 mm bzw. 1 mm/min. Mit einer Vorspannkraft von 100 N wurde der g-Roving vor dem Beginn des Belastungsversuchs gestreckt. Die Verformungsmessung erfolgte mittels Laser (Dehnungsmessung an der Probe mittels Laser-Extensometer). Aus den Zugversuchen an Carbonrovings (3.300 tex) folgt eine gemittelte Zugfestigkeit von 1.242 MPa bei einer mittleren Bruchdehnung von 1,3%. Bei g-Glasrovings (AR-Glasroving, 2.400 tex) wurde eine gemittelte Zugfestigkeit von 754 MPa (Bruchdehnung 1,8%) gemessen. Der Verlauf des Spannungs-Dehnungs-Diagramms ist exemplarisch in den Anlagen 9.4, Abb. 9.31 dargestellt.

Verbund Feinbeton-Roving

Zur Bestimmung des Verbundverhaltens erfolgten Faserauszugsversuche an eingebetteten g-Rovings. Dazu wurden getränkte AR-Glas- oder Carbonrovings ohne und mit Coatingsystemen in die Feinbetonmatrix eingelegt. Die mit Beschichtung und Matrix präparierten g-Rovings wurden 28 Tage nach der Implikation in Frischbeton mit einer axialen Zugbeanspruchung bis zum Versagen belastet. Die Messung ist mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 10 mm/min durchgeführt worden (Abb. 5.12).



Abb. 5.12: Einbettung der g-Rovings in die Spannform (li., mi.); Faserauszugsversuch (re.)

Die wesentlichen Ergebnisse der Faserauszugsversuche der eingebetteten g-Rovings sind in Tab. 5.9 zusammengefasst. Bei allen Versuchen wurde nachgewiesen, dass die Applikation einer epoxidharzbasierten Beschichtung auf die g-Rovings zu einer wesentlichen Erhöhung der Faserauszugskraft führt und damit die Verbundfestigkeit maßgeblich beeinflusst. So etwa konnte bei beschichteten AR-Glasrovings eine 5fach höhere max. Auszugskraft im Vergleich zu unbeschichteten AR-Glasrovings erreicht werden, so dass beim Auszugsversuch sogar ein Rovingversagen im Einspannbereich zu beobachten war. Dies deutet auf einen hervorragenden Verbund (Feinbeton-Beschichtung-Roving) hin. Auch bei Carbonrovings resultiert durch die Epoxidharzbeschichtung eine starke Erhöhung der Auszugskraft von durchschnittlich 205 N auf 480 N. Das Versagen der CF-Proben erfolgte allerdings durch Grenzschicht-Delaminationen, so dass zur vollen Nutzung des Festigkeitspotentials eine weitere Verbesserung der Beschichtung notwendig ist.

Tab. 5.9: Max. Faserauszugskraft eingebetteter g-Rovings

| Roving | Beschichtung | Auszugskraft [N] |
|---------|-----------------------|------------------|
| AR-Glas | ohne | 100 |
| | Epoxidharz (10 M.-%*) | 490 |
| Carbon | ohne | 205 |
| | Epoxidharz (8 M.-%*) | 480 |

* Ergebnisse aus TGA
(Thermogravimetrische Analyse)

Zur Erhöhung der Verbundfestigkeit von Feinbeton und Verstärkungsfasern wurden die Carbonrovings mit eigens entwickelten Coatingsystemen beschichtet. Dabei sind die epoxidharzbasierten Coatings zusätzlich mit Sand (Korngröße 0/1) oder Silica Fume beschichtet worden. Lichtmikroskopische Aufnahmen der beschichteten Carbonrovings sind in den Anlagen 9.4, Abb. 9.32 bis Abb. 9.34 dargestellt.

Aufgrund der verschiedenen Beschichtungen resultierte bei allen drei Coatingsystemen eine größere effektive Anbindungsfläche zur Betonmatrix, wodurch die Verbundfestigkeit erhöht wurde. Weiterhin sind bei allen verwendeten Systemen deutlich weniger Defekte durch Delamination im Randbereich vorhanden, als bei den g-Rovings ohne Coatingsystem.






Ein zusätzlicher positiver Aspekt ist ferner, dass die aufgebrachte Beschichtung die Carbonrovings vor abrasiver Belastung durch Gesteinskörnungen während des Misch- und Verarbeitungsprozesses schützt.

Zur Bestätigung der Verbundwirkung von Feinbeton/Coatingsystem/Bewehrungstextil wurden weiterführende Faserauszugsversuche mit den neuen Coatingsystemen durchgeführt und die Ergebnisse in den Anlagen 9.4, Tab. 9.3 gegenübergestellt. Beim System 1, bestehend aus Carbonroving und Epoxidharzbeschichtung (8 M.-% EP), wurde eine maximale Auszugskraft von 0,91 kN gemessen, wobei der g-Roving mit Erreichen der Maximalzugkraft vollständig aus der Betonmatrix gezogen wurde. Bei dem Coatingsystem 2 (8 M.-% EP, Silica Fume) konnte die Auszugskraft auf 2,12 kN erhöht werden, wobei der g-Roving ebenfalls vollständig aus der Matrix ausgezogen wurde. Trotz der hohen Auszugskraft ist dennoch die max. Zugfestigkeit des Carbonrovings nicht voll ausgeschöpft worden. System 3 umfasst eine zusätzliche Applikation von Epoxidharzcoating und System 4 Epoxidharz mit appliziertem Sand 0/1. Sowohl beim System 3 als auch System 4 wurde die max. Zugkraft von 3,32 kN bzw. 3,47 kN infolge Zugversagen des Rovings erreicht. Die max. Zugkraft konnte somit durch die Coatingsysteme 3 und 4 um den Faktor 4 gesteigert und das hohe Potential der Textilbewehrungen in vollem Umfang genutzt werden (Versuchsergebnisse in Anlagen 9.4, Tab. 9.3).

Textilbewehrte Tragbetonplatte

Nach Herstellung der Probekörper im Plattenformat 500 mm x 500 mm x 10 mm und 28 Tage Lagerung erfolgten Festigkeitsprüfungen in Anlehnung DIN EN 12390. Druck- und 3-Punkt-Biegezugfestigkeit wurden nach DIN EN 12390 Teil 4 bzw. Teil 5 geprüft. Als Probengeometrie wurde ein Verhältnis von Stützweite zu Probenhöhe von ≥ 7 gewählt, wodurch vornehmlich Biegebeanspruchung in den Proben herrschte und so der Einfluss der Schubspannung infolge Dickwandigkeit (etwa gemäß Timoshenko [Tim34]) reduziert wurde. Bei diesem Verhältnis betrug die Verringerung der Biegezugfestigkeit ca. 5% (vgl. [Wes93]). Die Ergebnisse der 3-Punkt-Biegezug-, Zug- und Druckfestigkeitsuntersuchungen sind zusammenfassend in Tab. 5.10 dargestellt (weiterführend s. [Fun15-2]).

Tab. 5.10: Druck-, 3-Punkt-Biegezug- und Zugfestigkeit des untersuchten Textilbetons

| Aufbau d = 10 mm | Bewehrung | Bewehrungsgrad [Vol.-%] | DF [MPa] | 3PBF [MPa] | ZF [MPa] |
|---|---|------------------------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|
|  | 2D-Gewirke, AR-Glas 2400 tex 10 mm x 10 mm Maschenweite | 4 | 210 | 38 | 17 |
|  | 2D-Gewirke, Carbon 3300 tex 10 mm x 18 mm Maschenweite | 6 | 240 | 77 | 36 |
|  | 2D-Gewirke, AR-Glas 2400 tex 20 mm x 20 mm Maschenweite | 6 | 350 | 53 | 23 |
|  | 2D-Gewirke, Carbon 3300 tex 10 mm x 18 mm Maschenweite | 9 | 390 | 94 | 44 |
|  | 3D-AR-Glas 2400 tex mit 20 mm x 20 mm Maschenweite 5 mm Abstand | 4 | 170 | 26 | 12 |

DF: Druckfestigkeit, 3PBF: 3-Punkt-Biegezugfestigkeit, ZF: Zugfestigkeit

Im Vergleich der mechanischen Kennwerte sind die höchsten Festigkeiten erwartungsgemäß beim Verbund aus Feinbeton und beschichteten Carbongewirken erzielt worden. Bei den Proben mit zwei und drei Carbon-Textillagen wurden gegenüber den entsprechenden Proben mit 2D-AR-Glas um den Faktor 2 höhere Werte von Biegezug- und Zugfestigkeit erreicht. Bei der Druckfestigkeit betrug der Unterschied zwischen Carbon und AR-Glas lediglich 10%.

Das Spannungs-Dehnungsdiagramm des 3-Punkt-Biegezugversuchs einer Textilbetonprobe mit drei Lagen Carbongewirke ist exemplarisch in Abb. 5.13 dargestellt. Hinsichtlich des Bruchverhaltens können drei Bereiche eingeteilt werden: (I) Pre-Cracking, (II) Post-Cracking, (III) Versagen. Pre-Cracking kennzeichnet das Verhalten im ungerissenen Zustand, welches fast ausschließlich von der Steifigkeit des noch ungeschädigten Feinbetons bestimmt wird. Im anschließenden Post-Cracking-Bereich entstehen Mikro- und anschließend auch Makrorisse im Beton, die aufgrund der Bewehrung i. d. R. geringe Rissbreiten aufweisen ($< 0,1$ mm). Bei weiterer Steigerung der Belastung folgt ein Versagen der Probe im Bereich III. Die maximale Biegezugfestigkeit der Betonprobe mit 3 Lagen g-Carbon-Gewirken von 94 MPa ist im Vergleich zu üblichen Biegezugfestigkeiten von ca. 80 MPa als hoch zu bewerten (vgl. [Gre07]).

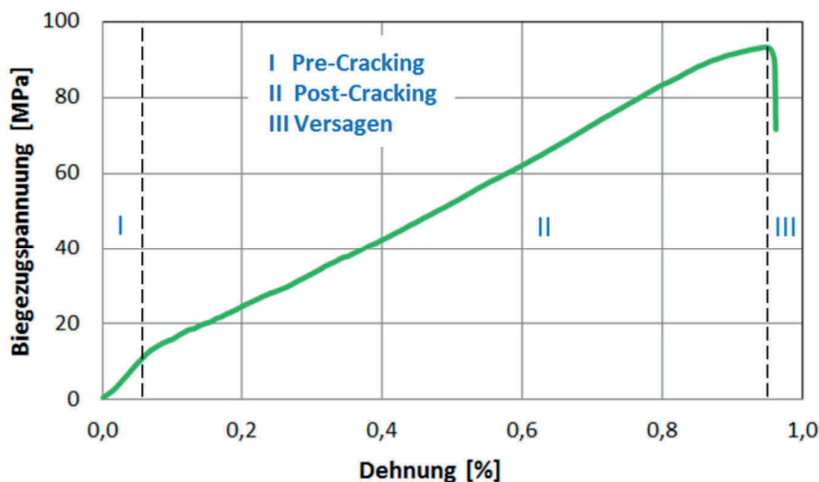


Abb. 5.13: Repräsentatives Spannungs-Dehnungsdiagramm des 3-Punkt-Biegezugversuchs

Der Spannungs-Dehnungs-Verlauf des Zugversuchs einer Textilbetonprobe mit drei Lagen Carbongewirke ist exemplarisch in der Abb. 5.14 dargestellt, wobei ebenfalls die Bereiche Pre-Cracking, Post-Cracking und Versagen festgestellt werden konnten.

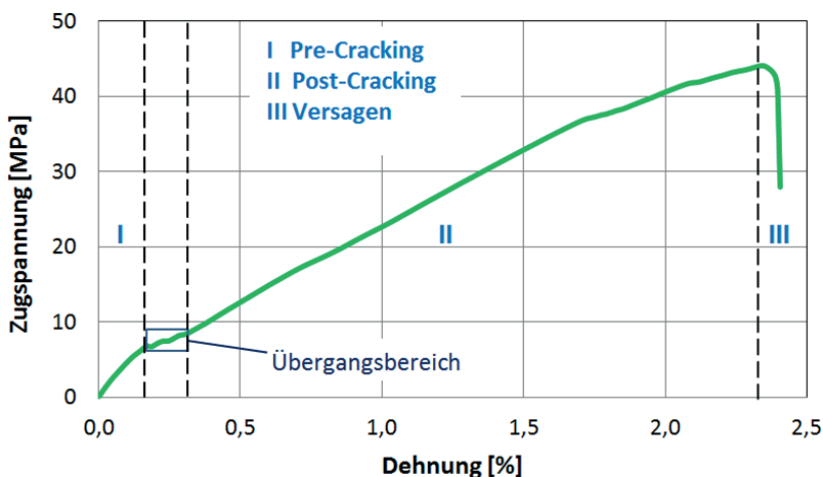


Abb. 5.14: Repräsentatives Spannungs-Dehnungsdiagramm des Zugversuchs

Im Vergleich zum Biegezugversuch zeigte sich jedoch im Kurvenverlauf ein Unterschied beim Übergang vom ungerissenen zum gerissenen Zustand. Zwischen dem Pre-Cracking und dem Post-Cracking stellte sich dabei ein Übergangsbereich ein, der durch einen alternierenden Kraftabfall infolge der Bildung von Makrorissen im Beton gekennzeichnet ist. Bei den untersuchten Proben konnte ein kürzerer und insbesondere weniger stark ausgeprägter Übergangsbereich, als in den meisten Literaturstellen angegeben, nachgewiesen werden (vgl. [Jes04] und darin zitierte Quellen). Dieser Verlauf deutet auf einen sehr guten Verbund zwischen dem hier untersuchten Feinbeton und beschichteter g-Carbon-Bewehrung hin.

5.2.4 Technologische Umsetzung

Für die technologische Umsetzung der in dieser Arbeit entwickelten textilbewehrten Tragbonelemente wurden die Formgebungstechnologien Laminieren und Gießen im Hinblick auf ihre Eignung untersucht. Bereits während der ersten Verarbeitungsversuche konnte festgestellt werden, dass bei der laminierten Textilbetonprobe eine erhebliche Ondulation des Textilhalbzeuges beim Betonierprozess eintrat. Die Ondulation der Fasern führte ferner zur Abweichung der Orientierung in Bezug auf die vorgegebene kraftflussgerechte Anordnung in der Betonmatrix, was zu einer erheblichen Verringerung der Plattenfestigkeit führte (siehe Tab. 5.11). Die Technologie Gießformgebung ist daher für eine positionsgenaue und reproduzierbare Integration des Textilhalbzeuges besser geeignet. So konnte im Laborformat während und nach der Verarbeitung ein vollständig gestreckter Verlauf von Kett- und Schussfäden umgesetzt werden, woraus eine belastungsgerechte Aufnahme von Spannungen resultierte.

Tab. 5.11: Ergebnisse der 3-Punkt-Biegezugversuche mit verschiedenen Formgebungstechnologien

| Bewehrung | | Laminieren | Gießen |
|---|-----------------------------------|------------|--------|
| 2 Lagen | 2D Carbongitter | 41 MPa | 77 MPa |
| 3 Lagen | 3300 tex, 10 x 18 mm ² | 53 MPa | 94 MPa |
| Lage der Bewehrung nach Betonierprozess | | | |

Bei der Überführung des Labormaßstabs in die Praxis wurde beobachtet, dass unter Verwendung der Betongießtechnologie ab einer Plattengröße von etwa 500 mm x 500 mm kein gestreckter Verlauf von Kett- und Schussfäden des Textilhalbzeuges mehr sichergestellt werden kann. Daher ist eine Fixiereinrichtung entwickelt worden, die eine ondulationsfreie Implikation der Textilhalbzeuge während der Herstellung der textilbewehrten Platten gewährleistet. Für die Konstruktion einer geeigneten Vorspannform wurden diverse Konzepte analysiert, wobei der Fokus auf der Umsetzbarkeit in der Praxis lag. Die entwickelte Vorspannform umfasste im Labormaßstab eine Betoniergrundfläche von 500 mm x 500 mm und ist modular aufgebaut, so dass über höhenvariable GFK-Seitenteile textilbewehrte Platten mit einer Stärke von 1 cm bis 9 cm hergestellt werden konnten (Abb. 5.15). Aufgrund der vergleichsweise hohen Vorspannkräfte kam für die Fertigung der Spannformen Edelstahl zum Einsatz.

Die technologische Umsetzung im Laborformat beruhte auf den wesentlichen Arbeitsschritten: Vorbereitung der Vorspannform, Integration und Vorspannen des 1. Textilhalbzeuges, Montage der Seitenteile, Integration und Vorspannen des 2. Textilhalbzeuges und Gießen des Frischbetons (s. Abb. 5.16). Nach der Erhärtung konnte nach einem Tag ausgeschalt werden.

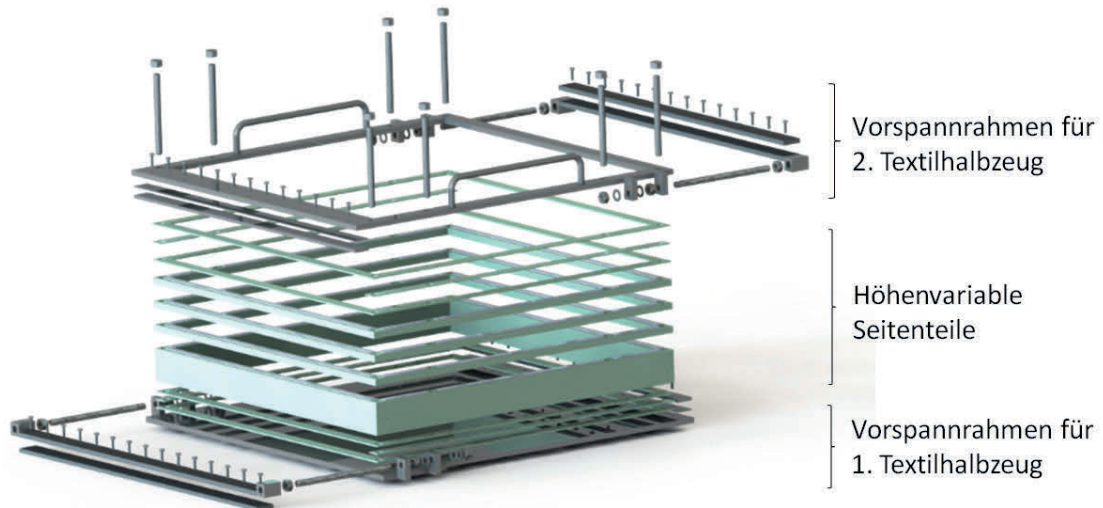


Abb. 5.15: Explosionszeichnung der Vorspannform im Laborformat



Abb. 5.16: Prozesskette zur Herstellung von textilbewehrten Tragplatten im Laborformat (500 mm x 500 mm)

In den Laborversuchen wurde nachgewiesen, dass die entwickelte Vorspanneinrichtung eine ondulationsfreie Einbettung der Textilhalbzeuge während der Herstellung der textilbewehrten Platten gestattet, so dass das hohe Festigkeits- und Steifigkeitspotential der Textilverstärkung voll zum Tragen kommt. Zur praxisnahen Herstellung der Tragplatten wurden anschließend Großversuche im Betonwerk durchgeführt.

5.2.5 Referenzobjekt „Textilbewehrte Lärmschutzwand“

Beton-Lärmschutzwände bestehen in der Regel aus einer Stahlbeton-Tragplatte und ein- oder beidseitig angeordneten, schallabsorbierenden Vorsatzschalen aus Leichtbeton. Dabei wird die Tragbetonplatte in klassischer Stahlbetonbauweise entsprechend den mechanischen Anforderungen sowie Dauerhaftigkeit mit einer Materialstärke von 12 bis 15 cm hergestellt. Das neue Lärmschutzsystem ist aus einer textilbewehrten Tragbetonplatte mit einer oder zwei Absorberschichten aufgebaut. Durch beanspruchungsgerechte Integration von mehreren Lagen Carbon-Bewehrung kann die Stahlbewehrung ersetzt werden, was zu einer schlanken Bauweise führt.

Bemessung

Für die Bemessung der neuen textilbewehrten Lärmschutzwand wurden die statischen Anforderungen an klassische Stahlbetonsysteme zugrunde gelegt. In Zusammenarbeit mit der Hans Graf Bauunternehmungen GmbH & Co.KG erfolgte die Definition von geometrischen und statischen Kennwerten nach Vorgabe von Standard-Lärmschutzsystemen. Anhand des Bemessungswertes Windlast (Flächenlast) wurde zunächst eine adäquate Einzellast berechnet, um aus den Parametern Plattenlänge, Breite, Stützweite (siehe Tab. 9.4 in Anlage 9.4) und der Einzellast die geforderte 3-Punkt-Biegezugspannung in Abhängigkeit der Plattendicke zu ermitteln (siehe Abb. 5.17).

Basierend auf der klassischen Stahlbetonvariante wurde die einwirkende Biegespannung bei einer Plattendicke von 12 cm als Ausgangssituation im Punkt P_A ausgewählt (vgl. Abb. 5.17). Die Bemessung erfolgte für zwei verschiedene Tragplattensysteme: System 1 mit einer Plattenlänge von $L_{\text{Sys1}} = 600$ cm und System 2 mit $L_{\text{Sys2}} = 400$ cm, bei einer Plattenbreite von jeweils 100 cm. Der Bemessungswert der Biegezugspannung wurde anhand der bestimmten Materialkennwerte der Betonproben für beide Systeme auf etwa $\sigma_{\text{BZ}} = 8$ MPa festgelegt (σ_{BZ} = Erstriss unter Biegebelastung; Bemessung im ungerissenen Bereich). Hieraus resultiert für die textilbewehrten Betonplatten für System 1 eine minimale Plattendicke von $h_{\text{Sys1}} = 8$ cm und für System 2 von $h_{\text{Sys2}} = 6$ cm. Bei einer Bemessung im gerissenen Zustand können prinzipiell auch geringere Plattenstärken umgesetzt werden. Diese sind jedoch fertigungs-technisch nur mit erhöhtem Schalungsaufwand und somit weniger kosteneffizient herzustellen.

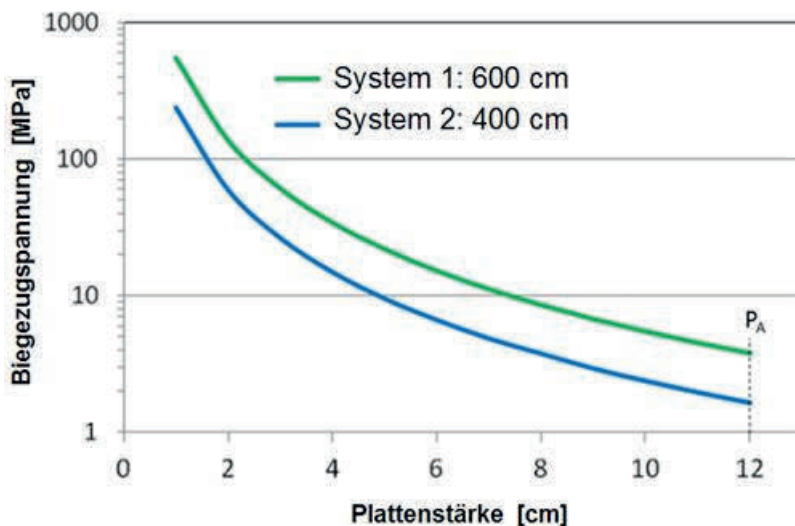


Abb. 5.17: Geforderte theoretische 3-Punkt-Biegezugspannung in Abhängigkeit von Plattendicken

Fertigung

Im Rahmen der herstellungstechnischen Umsetzung wurden Referenzplatten mit den Maßen von 6,00 m x 1,00 m x 0,08 m und 4,00 m x 1,00 m x 0,06 m im Betonfertigteilwerk hergestellt. Auf Basis der labortechnischen Vorversuche wurden 2 Lagen Carbonbewehrung in die definierte Feinbetonmischung integriert und mittels Vorspanneinrichtung fixiert. Anschließend erfolgte der Verguss mit Feinbeton. In Abb. 5.18 ist eine Auswahl an Arbeitsschritten der technologischen Prozesskette zur Fertigung der Referenzplatten dargestellt.



Abb. 5.18: Herstellung der textilbewehrten Referenzplatten im Betonwerk

Bestimmung der 3-Punkt-Biegezugfestigkeit

Zur Bestimmung des Biegezugverhaltens wurden die Betonplatten in Balkensegmente geteilt. Die visuelle Begutachtung zeigte, dass die Kett- und Schussfäden in den hergestellten textilbewehrten Referenzplatten durch das Vorspannen der Textilhalbzeuge ondulationsfrei und positionsgenau in der Feinbetonmatrix integriert wurden (dazu Anlagen 9.4, Abb. 9.35). Somit ist die Voraussetzung für reproduzierbare und vergleichbare Ergebnisse gegeben. Exemplarisch für alle untersuchten Plattensysteme ist in Abb. 5.19 das Spannungs-Dehnungs-Diagramm von drei Textilbetonproben mit einer Plattendicke von $h = 6$ cm dargestellt. Dabei verweisen alle drei Proben auf einen annähernd gleichen qualitativen und quantitativen Kurvenverlauf mit hohen Endwerten, was auf eine reproduzierbare und hohe Kraftübertragung zwischen Textilverstärkung und Beton schließen lässt (Abb. 5.19).

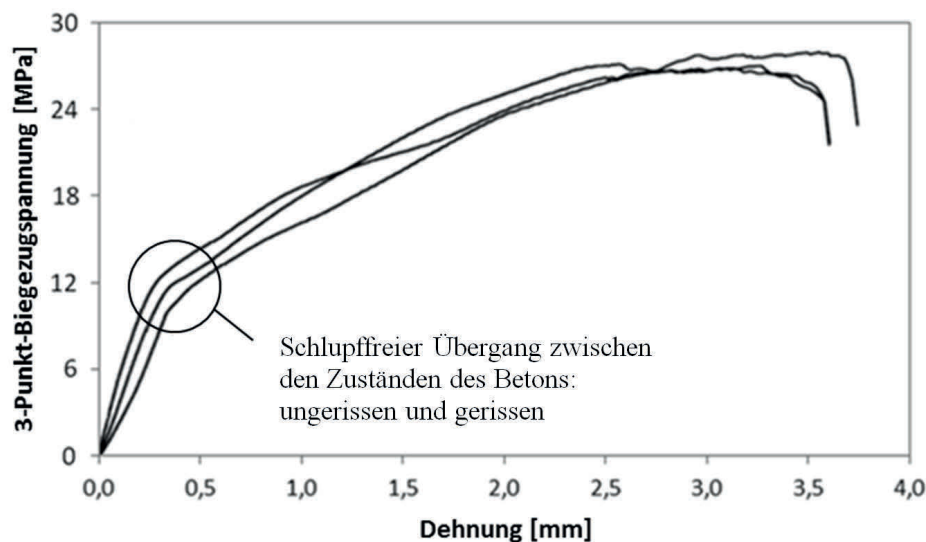


Abb. 5.19: Spannungs-Dehnungs-Diagramm von Textilbetonplatten mit 6 cm Plattenstärke

Durch das Vorspannen der Textilbewehrung in Kombination mit der Zugabe von Kurzfasern in die Betonmischung konnte eine schlupffreie lineare Spannungszunahme während der Makrorissbildung im Beton erreicht werden (siehe Abb. 5.19). Somit wurden die Biegezugspannungen kontinuierlich vom Beton auf die Textilbewehrung übertragen, woraus eine geringe Rissinitiierung im Beton und eine hohe Dauerhaftigkeit resultiert. Die Dosierung der Kurzfasern lag dabei über dem kritischen Faservolumengehalt, so dass die Fasern Zugkräfte nach der Rissbildung im Beton aufnehmen konnten. Damit stellen die Kurzfasern eine Art von „Brückenelementen“ während der Rissentstehung und der vollständigen Einleitung der Kräfte in die gestreckte Textilbewehrung dar.

Nach der Untersuchung der textilbewehrten Tragbetonplatten wurden die Ergebnisse in einem theoretischen Vergleich den Werten aus der Bemessung gegenübergestellt, um so grundsätzliche Tendenzen hinsichtlich Tragverhalten und Plattenstärke abzuleiten. Die Bemessung basierte dabei auf Grundlagen der Stahlbetonberechnung (Bestimmung des Bewehrungsgrades in der Zugzone), da noch keine einheitlichen Standards zur Textilbetonbemessung vorliegen. Ausgangspunkt der Bemessung war der maßgebende Lastfall Windlast, der u. a. abhängig von der Plattenlänge ist. So wurde für das Lärmschutzsystem 1 mit einem Bemessungswert der Windlast von $w_{\text{Sys1}} = 2,4 \text{ kN/m}^2$ und für das System 2 mit verringerten $w_{\text{Sys2}} = 2,3 \text{ kN/m}^2$ gerechnet. Des Weiteren wurde davon ausgegangen, dass sich die Textilbewehrung in der Zugzone im maximalen Abstand zur neutralen Faser befindet, wobei die Betonüberdeckung in der Berechnung keine Berücksichtigung fand. Die Teilsicherheitsbeiwerte wurden für diese tendenzielle Gegenüberstellung ebenfalls vernachlässigt.

Für die zwei ausgewählten Systeme mit den Plattenlängen ($L_{\text{Sys1}} = 6,0 \text{ m}$; $L_{\text{Sys2}} = 4,0 \text{ m}$) sind die theoretischen max. Biegezugspannungen, die als Bemessungswerte definiert werden, in Abhängigkeit von der Plattendicke in Abb. 5.20 aufgeführt und den Biegezugfestigkeiten aus den experimentellen Untersuchungen (Laborplatten mit Stützweiten von 0,5 m) gegenübergestellt. Sowohl bei System 1 als auch bei System 2 sind die Bemessungswerte bei allen Plattenstärken geringer als die im Labor gemessenen Biegezugfestigkeiten.

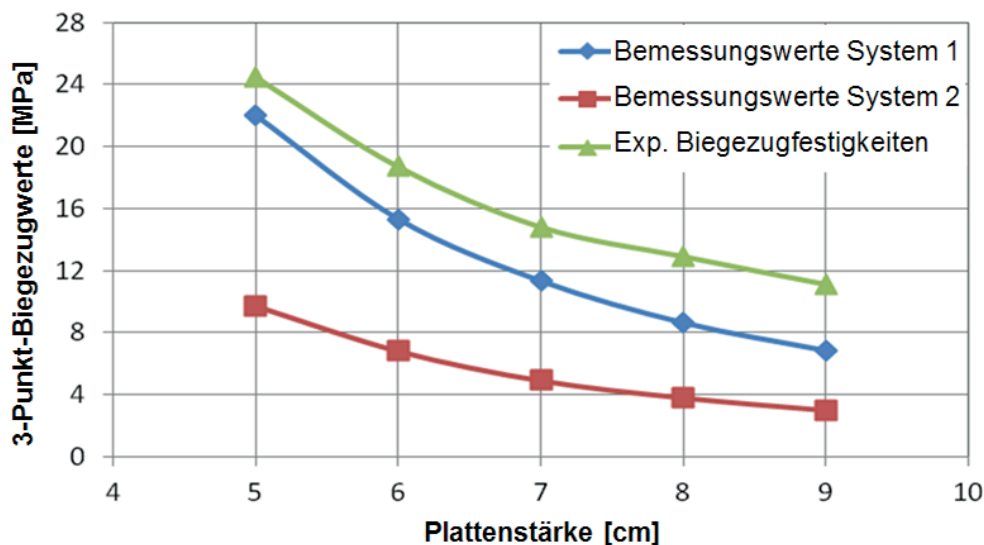


Abb. 5.20: Vergleich von den Bemessungswerten mit den experimentellen Biegezugfestigkeiten

Bei der Bemessung von tragenden Bauteilen sind die Unsicherheiten auf der Seite der Einwirkungen bekannt und werden als Teilsicherheitsbeiwerte unabhängig von der verwendeten Betonfestigkeitsklasse definiert. Für den neuen Verbundwerkstoff „Textilbeton“ stehen die erforderlichen Teilsicherheitsbeiwerte für den Tragwiderstand, die neben der Streuung der Materialkennwerte auch die Ungenauigkeiten in den Ingenieurmodellen beinhalten, normativ noch nicht zur Verfügung.

Die Bemessung von textilbewehrten Tragbetonplatten wird von HEGGER in [Heg11] nach einem Sicherheitskonzept in Anlehnung an DIN 1055-100 [DIN1055-100] und Eurocode [EC2010] vorgenommen. Dabei werden die Unsicherheiten auf der Einwirkungsseite durch die Teilsicherheitsbeiwerte nach DIN 1055-100 sowie die Unsicherheiten auf der Widerstandsseite für Textilbeton mit einem Teilsicherheitsbeiwert von 1,5 erfasst. Unter Betrachtung des nach HEGGER vorgeschlagenen Teilsicherheitsbeiwertes $\gamma_{\text{Tex}} = 1,5$ konnte bei System 1 die Plattenstärke von 12 cm auf 8 cm reduziert werden. Bei dem Plattensystem 2 wurde unter Berücksichtigung des Teilsicherheitsbeiwertes eine Verringerung der Plattenstärke von 12 cm auf 5 cm erreicht (vgl. Tab. 5.12). Dabei ist die Bemessung für den gerissenen Zustand durchgeführt worden.

Erfolgt eine Bemessung für den ungerissenen Zustand, so ist als Obergrenze nach Abb. 5.19 die maximale Biegezugspannung bis zum Erstriss von $\sigma_{\text{BZ, E}} = 8 \text{ MPa}$ anzusetzen. Somit kann eine Reduzierung der Plattenstärke des Systems 1 auf 9 cm und des Systems 2 auf 6 cm durch Integration von 2 Lagen Carbonbewehrung erfolgen. Daraus resultiert eine Minimierung des Gewichts und damit der Transportkosten der Tragbetonplatte.

Tab. 5.12: Bemessungswerte und exp. Biegezugfestigkeiten mit Teilsicherheitsbeiwert nach HEGGER

| | | h=5 cm | h=6 cm | h=7 cm | h=8 cm | h=9 cm |
|--|--------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Faservolumengehalt | Vol.-% | 0,97 | 0,81 | 0,70 | 0,61 | 0,54 |
| Bemessungswerte System 1 | MPa | 22,0 | 15,3 | 11,3 | 8,6 | 6,8 |
| Bemessungswerte System 2 | MPa | 9,7 | 6,8 | 4,9 | 3,8 | 3,0 |
| Exp. Biegezugfestigkeit | MPa | 24,5 | 18,7 | 14,8 | 12,9 | 11,2 |
| Exp. Biegezugfestigkeit mit Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{\text{Tex}}=1,5$ | MPa | 16,3 | 12,5 | 9,9 | 8,6 | 7,5 |
| Erstrissspannung | MPa | 8,0 | | | | |

Referenzplatte: Tragbeton mit Absorberschicht

Für die Überführung der Forschungsergebnisse in die Praxis wurden Textilbeton-Tragplatten der Größe 6,00 m x 1,00 m x 0,08 m mit einseitig angeordnetem Absorber gefertigt. Dabei besteht die Tragplatte aus Textilbeton mit 2 Lagen Carbongitter-Bewehrung und die Schallabsorptionsschicht aus Mehrkornbeton mit Leichtzuschlag (u. a. Blähton, Lava, Blähschiefer) mit profilierter Betonoberfläche.

Basierend auf den Erfahrungen bei der konzeptionellen Entwicklung der Vorspannform im Labormaßstab wurde ein Schalungssystem im Prototypenmaßstab entwickelt und umgesetzt. Zur Steigerung der Effizienz bei der Fertigung wurde das „Frisch-in-Frisch“-Gießverfahren als schalungsintegrierte Formgebungstechnologie ausgewählt, wobei zuerst die Tragbetonplatte mit den Bewehrungstextilien hergestellt und danach die Absorberschicht gefertigt

wurde (siehe Anlage 9.4, Abb. 9.36). Dazu können die Textilhalbzeuge in der Vorrichtung über Spannrollen fixiert und anschließend über Spannsysteme vorgespannt werden (vgl. Anlage 9.4, Abb. 9.37). Die geplante Prozesskette zur Fertigung der neuen textilbasierten Lärmschutzplatten mit der entwickelten Vorspannform sieht nach dem Betonieren der Tragbetonplatte die Montage einer Abdeckung vor, sodass das Schalungssystem in die horizontale Position gedreht werden kann. Im Anschluss wird die äußere Schalplatte demontiert und die Absorberformschale angebracht, um den Frischbeton zu applizieren (siehe Anlage 9.4, Abb. 9.38). Ein signifikanter Vorteil dieser multifunktionalen Form liegt in den geringen Material- und Montagekosten im Vergleich zu zwei separaten Formen und in der Fügetechnologie „Frisch-in-Frisch“ zwischen Trag- und Absorberbeton (weiterführende Details in [Fun15-4]).

Der Einsatz von textilbewehrtem Beton als Tragplatte in Lärmschutzwänden hat insgesamt gezeigt, dass gegenüber der konventionellen Stahlbetonbauweise durch Carbon-Bewehrung sowohl der Materialeinsatz als auch das Gewicht reduziert werden kann, was auf ressourceneffiziente und nachhaltige Bauweisen führt. Durch kraftflussgerechte und ondulationsfreie Implikation der Textilhalbzeuge in die Betonmatrix ist eine Fertigung von Textilbeton-Tragplatten mit stark verringerter Plattendicke baupraktisch umsetzbar. Zudem wurden eine hohe Nachrissfestigkeit, geringe Kriech- und Schwindverformung, geringe Rissempfindlichkeit, hohe Frost-Taumittel-Beständigkeit (XF 4) und in Kombination mit dem entwickelten Absorber ausgezeichnete akustische Eigenschaften nachgewiesen (siehe [Fun15-4]).



Abb. 5.21: Probekörper von textilbewehrten Leichtbeton-Lärmschutzwänden; Prototyp-LSW

5.3 Textilbewehrte Beton-Schalenelemente

Der innovative Verbundwerkstoff „Textilbeton“ bietet im Vergleich zu den klassischen Werkstoffen in Massivbauweisen hohes Leichtbaupotential und erschließt somit neue Anwendungsgebiete, die auf filigrane Strukturbauteile abzielen. Durch die Verwendung von korrosionsbeständigen Bewehrungstextilien, etwa aus alkaliresistentem Glas oder Carbon, können die Betondeckungen minimiert und extrem schlanke Betonbauteile dauerhaft und nachhaltig umgesetzt werden. Für eine Erweiterung des Anwendungsspektrums von textilbewehrten Platten zu filigranen flächenaktiven 3D-Tragstrukturen, wie z. B. einfach und doppelt gekrümmte Schalen mit Mehrfachfunktionen, sind im Hinblick auf Materialkomposition und Herstellungstechnologie neue Denkansätze erforderlich. So etwa sind Schalungssysteme zu entwickeln, die eine Formgebung der Bewehrungstextilien sowie die anschließende Betonage des gekrümmten Bauteils bei definierter Lage der Bewehrung gestatten.

Freigeformte Schalen weisen aufgrund ihrer Krümmung zahlreiche Besonderheiten hinsichtlich Formfindung, Lastabtrag und Herstellung auf [Sch11]. Bereits in den 1930er Jahren wurden Schalenkonstruktionen beispielsweise aus Stahlbeton von den Architekten Felix Candela [Fab63] und Heinz Isler [Ram02] technologisch vorangebracht. Dabei resultierten Strukturformen, die ein besonders günstiges Tragverhalten aufweisen und als sog. Regelflächen, wie hyperbolische Paraboloiden, Konoide und Rotationshyperboloide, in den 1960er Jahren vielfältige Anwendung fanden. Infolge der Korrosionsproblematik der Stahlbewehrung in filigranen Bauelementen sind derartige Schalenformen heute nicht mehr umsetzbar. Hier bietet Textilbeton viel Potential für materialeffiziente Leichtbauelemente, um derartige Schalensysteme mit geringen Bauteildicken herzustellen.

Am Beispiel der Entwicklung von neuen dünnwandigen Textilbetonschalen wird die komplette Wertschöpfungskette von der Materialkomposition über die Formoptimierung und Herstellung bis hin zur Errichtung der Referenzpavillons aufgezeigt.

5.3.1 Werkstoffkomponenten

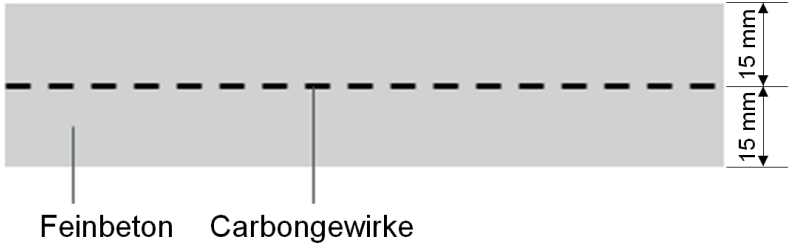
Der Aufbau der gekrümmten Textilbetonelemente wurde basierend auf Vorversuchen und einer statischen Bemessung definiert, wobei der Fokus auf einer hochfesten Feinbetonmatrix mit einer Lage belastungsgerecht integrierter Carbonbewehrung lag. Dafür kam ein biaxiales 2D-Gewirk mit 1200 tex (Gitteröffnungsweite: 20 mm x 20 mm) mit einer Epoxidharzbeschichtung zum Einsatz. Auf Basis der Rezeptentwicklung der Feinbetonmatrix für ebene Tragstrukturen erfolgte die Komposition der Mischung (siehe Anlagen 9.5, Tab. 9.5). Die Rezeptur der Betonmatrix musste dabei komplexen Anforderungen wie: Farbe und Oberflächenbeschaffenheit, Formgestaltung, Fertigungstechnologie und statische Lastannahmen erfüllen.

Als Bindemittel kam neben weißem Portlandzement ein amorphes Alumosilikat als Puzzolan zum Einsatz, wobei Dolomitsand mit einer Korngröße von 0 bis 3 mm als Gesteinskörnung zugegeben wurde. Der entwickelte Feinbeton wurde mit integralen, alkaliresistenten Glasurfasern modifiziert, um Sedimentationserscheinungen des Frischbetons und Schwindrisse im Festbeton zu verringern. Ferner erfolgte die Zugabe von Zusatzmitteln zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit. Als Formgebungstechnologie sollte das Laminier- oder das Betonspritzverfahren angewendet werden, so dass der Beton thixotrop eingestellt wurde.

5.3.2 Bestimmung der Materialkennwerte

Die Verarbeitung der Ausgangsstoffe erfolgte im Intensivmischer und die Ermittlung der Frischbetoneigenschaften wurde nach DIN EN 12350 durchgeführt (siehe Kap. 5.1.3). Für die Untersuchung der Festbetoneigenschaften sind die Probekörper 28 Tage „trocken“ nach DIN EN 12390-2 gelagert worden. Die Druckfestigkeit wurde an Würfeln mit einer Kantenlänge von 150 mm nach DIN EN 12390-3 bestimmt. Die Ermittlung der 3-Punkt-Biegezugfestigkeit erfolgte an Probekörpern mit den Abmessungen von 225 mm x 50 mm x 15 mm in Anlehnung an DIN EN 12390-5 (vgl. Kap. 5.1.3). Die Ergebnisse der Materialcharakterisierung sind in Tab. 5.13 zusammengefasst (weiterführende Ergebnisse siehe [Gel13-1]).

Tab. 5.13: Frischbetoneigenschaften der Matrix und Festbetoneigenschaften der textilverstärkten Betonproben

| Eigenschaften | Frischbeton | Festbeton nach 28 Tagen |
|----------------------------|---|-------------------------|
| | Feinbeton, Biaxiales 2D-Gewirk (1200 tex, 20 mm x 20 mm)  | |
| Faservolumengehalt | 0,3 Vol.-% | |
| Geometrische Rohdichte | 2,29 g/cm ³ | 2,24 g/cm ³ |
| Ausbreitmaß | 600 mm | - |
| Luftgehalt | 4,0 Vol.-% | - |
| Lineare Schwindung* | 0,83 mm/m* | |
| Druckfestigkeit | - | 144,82 MPa |
| 3-Punkt-Biegezugfestigkeit | - | 17,97 MPa |

* Messung mittels Schwindrinne (1 m Länge)

5.3.3 Formfindung nach dem Vorbild Natur

Für die effiziente Fertigung gekrümmter Textilbeton-Schalbauwerke ist die technologieorientierte Formfindung von besonderer Bedeutung. Um einen vergleichsweise geringen Aufwand an Werkzeugkosten bei der Herstellung sowie einen hohen Vorfertigungsgrad zu erreichen, stehen modularisierte Bauweisen im Vordergrund der Entwicklungen. Bei geeigneter segmentierter Form und Funktion können standardisierte Einzelbauteile zusammengefügt werden und in der Gesamtheit als Tragwerk, z. B. Schalenkonstruktion, wirken.

Viele biologische Konstruktionen basieren auf dem Schalen-Bauprinzip und führen auf besonders effektive und leichte Tragwerke. Dies umfasst Elemente, die mit wenig Materialeinsatz formstabil, statisch optimiert und multifunktional sind und sich durch Wachstumsprozesse aufbauen und vergrößern lassen. Beispiele sind etwa Schalen von Muscheln oder Seeigeln, sowie Flächentragwerke bei Blättern (siehe auch Details in [Nac13]).

Zur technologischen Umsetzung eines organisch geformten Textilbeton-Tragwerks gemäß dem Lehrmeister Natur wurden im Rahmen dieser Arbeit – inspiriert von Blütenblatt-Strukturen – modulare doppelt gekrümmte Überdachungselemente entwickelt. Der Entwurf der modularisierten Schalenkonstruktion basiert auf Optimierungsprozessen zur Formfindung mit dem Ziel, maximale Kräfte über definierte Spannweiten mit minimaler Masse zu übertragen. Für eine ressourceneffiziente Herstellung der dünnwandigen Schalenelemente wurde eine rotationssymmetrische Grundform entwickelt. Nach dem Fertigungsprozess konnten die 3D-geformten rotationssymmetrischen Einzelelemente form- und stoffschlüssig gefügt werden und ergaben verschiedene Tragwerksformen; siehe dazu Ausführungsbeispiele in Abb. 5.22.

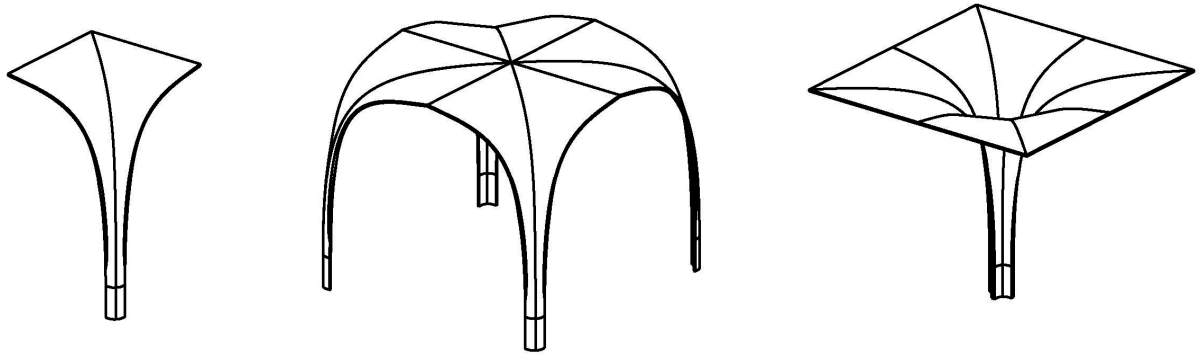


Abb. 5.22: Entwurf des Einzelements und Ausführungsbeispiele zu modularen Tragwerken (Bsp. Pavillon)

5.3.4 Flexible Schalungsformen

Bei der Herstellung von Betonelementen dominieren die üblichen Schalungstechniken wie beispielsweise konventionell segmentierte Holz- und Stahlsysteme, pneumatisch gestützte und modellierte Schalungen sowie deren Verknüpfung [Gru09]. So kombinierte ISLER (vgl. z. B. [Ram02]) zur Herstellung von großformatigen Schalenbauwerken wiederverwendbare, gekrümmte Bögen aus Brettschichtholz auf leichten Lehrgerüsten mit Latten und Spanplatten. Aufblasbare Schalungen sind mit und ohne Vorspannung von SOBEK [Sob87] erprobt worden. Nachteil dieser Bauweisen ist, dass die Schalungskonstruktionen nur für gleiche geometrische Formen wiederverwendet werden können.

Die Fertigung von großformatigen gekrümmten Betonelementen gestaltet sich i. d. R. schwierig und ist oft mit sehr hohen Kosten verbunden. Eine Lösung hierfür bieten modulare Schalungssysteme, die verschiedene Formen und Krümmungen gestatten, flexibel und wiederverwendbar sind und eine hohe Sichtbetonqualität gewährleisten.

Zur Herstellung gekrümmter Textilbeton-Freiformschalen mit großen Abmessungen wurde ein neuer konstruktiv-technologischer Lösungsansatz in Form eines flexibel formbaren, mehrschichtigen Schalungssystems aus GFK entwickelt. Die Forschungsarbeiten konzentrierten sich auf die rechnerische und experimentelle Ermittlung verschiedener Krümmungszustände von unterschiedlichen mehrschichtigen GFK-Laminaten. Die Einstellung der definierten Krümmungen erfolgte dabei indirekt über die anisotropiebedingten Koppeleffekte des unsymmetrischen GFK-Mehrschichtverbundes (siehe Abb. 5.23) und über die direkte Formgebung während des Laminierens [Fun15-1, Gel14-2]. Diese komplizierten Koppeleffekte erlauben infolge mechanischer und thermischer Lasten sowohl bei ebenen als auch gekrümmten Laminaten die Krümmungszustände zu verändern (siehe hierzu [Kro05] und die dort aufgeführten Literaturstellen).

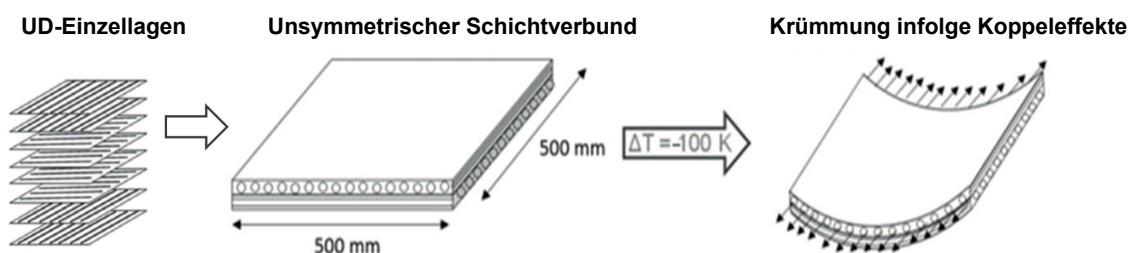


Abb. 5.23: Repräsentativer Krümmungszustand eines unsymmetrischen Schichtverbundes infolge Temperatur- und Zugbelastung

In Abhängigkeit von den geforderten Krümmungsradien der GFK-Schalungen wurden verschiedene Strategien verfolgt.

1. Große bis mittlere Krümmungsradien (siehe Abb. 5.24 und Anlage 9.5, Abb. 9.39)
 - Fertigung der Laminats mit definiertem, unsymmetrischem Lagenaufbau in ebener Form
 - Einstellung der Krümmung über Steuerung der Abkühlung während der Herstellung,
 - Applikation einer zusätzlichen Vorspannung zur Feinabstimmung der Krümmung.
2. Kleine Krümmungsradien
 - Fertigung der GFK-Schalungen mit definiertem Lagenaufbau in gekrümmter Form
 - Einstellung des Radius durch direkte Formgebung während des Laminierens,
 - Variation des Radius durch Applikation einer zusätzlichen Vorspannung.

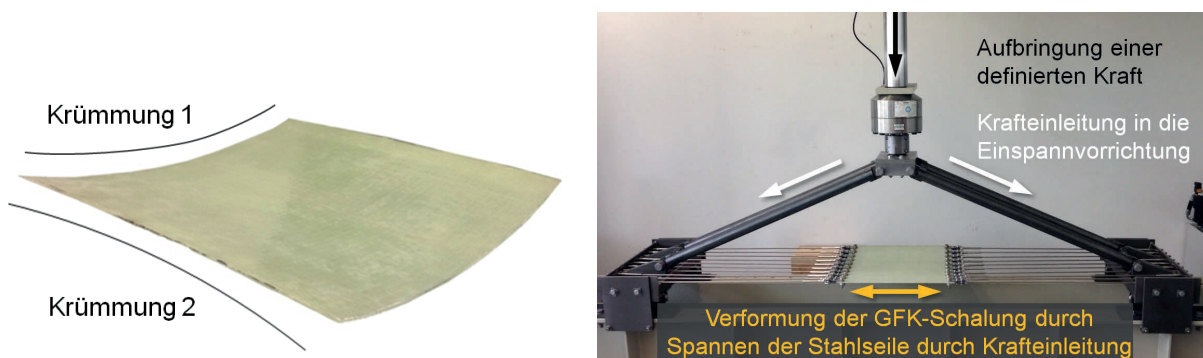


Abb. 5.24: Unsymmetrisches GFK-Laminat nach der Herstellung (li.), Zugbelastung eines unsymmetrischen Laminats zur Einstellung definierter Krümmungen in der Einspannvorrichtung (re.)

Unter Ausnutzung des anisotropiebedingten Strukturverhaltens können definierte Krümmungszustände an GFK-Elementen mit unsymmetrischem Lagenaufbau gezielt konfiguriert werden. Die Einstellung der anisotropen Koppelleffekte wurde analytisch mit Hilfe der erweiterten Laminattheorie sowie numerisch mittels der Finite-Elemente-Methode vorausberechnet, wobei eine gute Übereinstimmung der jeweiligen Ergebnisse für repräsentative GFK-Proben nachgewiesen werden konnte (s. [Fun14-7]).

In umfassenden Versuchsstudien zum Systemaufbau der entwickelten GFK-Schalungen und daraus gefertigter Beton-Leichtbauelemente mit integrierten Bewehrungstextilien wurden Freiformflächen mit verschiedenen Krümmungen entworfen, berechnet und hergestellt. Dabei konnte in Bezug auf die Umsetzung definierter Krümmungsradien eine hohe Konturengenauigkeit nachgewiesen und eine belastungsgerechte Integration der Gewirke verifiziert werden (vgl. Abb. 5.25; weiterführend siehe etwa [Gel15-2, Gel15-1, Gel14-3, Gel13-2]).



Abb. 5.25: Fertigungsversuche zum Systemaufbau von GFK-Schalungen für Beton-Leichtbauschalen

Auf Basis der theoretischen und experimentellen Untersuchungen wurde ein flexibel formbares, mehrschichtiges Schalungssystem aus GFK entwickelt, welches durch Anpassung des Schichtenaufbaus zur Fertigung der modularen Textilbeton-Schalenelemente genutzt wurde. Neben der werkstoffimmanenten Einstellung unterschiedlicher Krümmungszustände erlauben die GFK-Schalungen eine exzellente Betonqualität in höchster Sichtbetonklasse zu erreichen.

Zur Herstellung des Referenzpavillons (s. Abb. 5.22) wurde als Schalungssystem ein Formwerkzeug konstruiert, das aus einer flexiblen mehrschichtigen GFK-Form mit Seitenrändern und einer Stahlunterkonstruktion besteht. Die Gewährleistung einer gleichmäßigen Betonüberdeckung erfolgte durch Einbau eines Rakelsystems, wobei dadurch die Feinbetonmatrix schichtenweise abgezogen und somit ausgeglichen werden konnte (Abb. 5.26; [Fun15-3]).

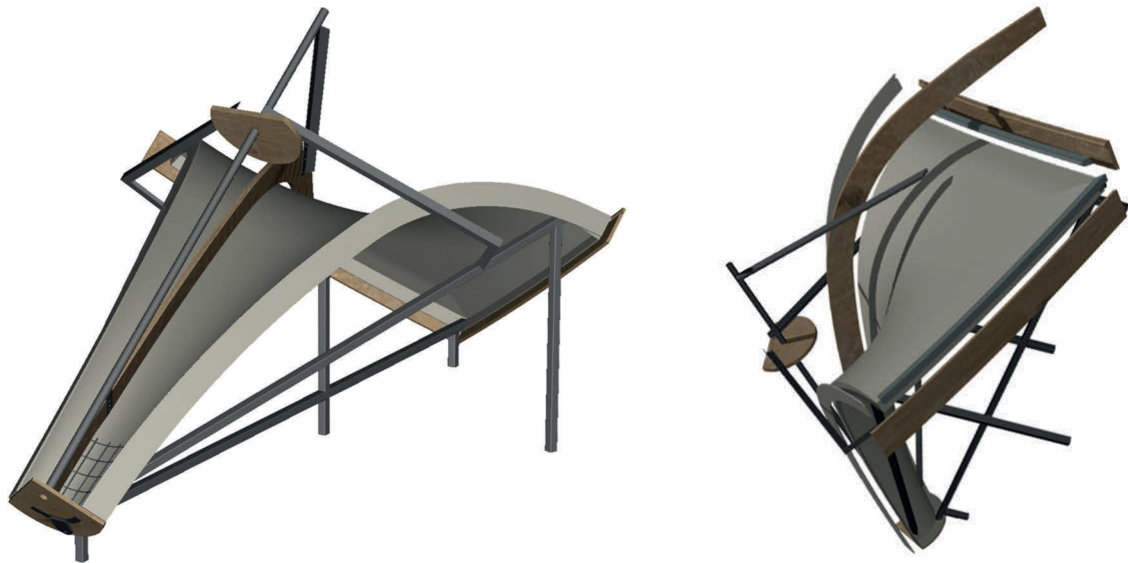


Abb. 5.26: GFK-Formwerkzeug mit Rakelsystem

5.3.5 Abstandhalter

Die aus dem Stahlbetonbau bekannten Abstandhalter dienen zur Gewährleistung eines definierten Abstandes von der Bewehrung zur Schalung, wobei für Stahlbewehrungen i. d. R. 30 bis 50 mm Betonüberdeckung festgelegt wird. Abstandhalter sind sog. Massenprodukte und werden zumeist aus Kunststoff oder Faserzement hergestellt. Aufgrund der unterschiedlichen Durchmesser von Stahlbewehrungen ($d = 6$ bis 30 mm) im Vergleich zu den neuen textilbasierten Bewehrungsstrukturen ($d < 3$ mm) sowie der deutlich geringeren Betonüberdeckung beim Textilbeton ($c_v = 2$ bis 5 mm) gegenüber Stahlbeton ($c_v = 15$ bis 50 mm) sind klassische Abstandhaltersysteme aus dem Stahlbetonbau für textilbewehrte Bauelemente nicht geeignet. Für die positionsgerechte Integration von textilen Bewehrungen in die Betonmatrix sowie zur Lagesicherung textiler Strukturen im Betonbauteil wurden verschiedene kunststoffbasierte Abstandhalter auf Basis der in nachfolgender Tabelle zusammengefassten Anforderungen entwickelt (siehe Tab. 5.14).

Die belastungsgerechte Integration der textilen Bewehrung unter den geforderten Randbedingungen setzt die Bereitstellung von zwei verschiedenen Varianten von kunststoffbasierten Positionierhilfen voraus. Dabei dient der entwickelte „C-texClip“ zur Fixierung der textilen Bewehrung während der Betonage mit einem definierten Abstand zur Schalung (s. Abb. 5.27).

Der „C-texSpacer“ wurde als Distanzhalter für textile Bewehrungsgitter geschaffen, um zwei Bewehrungslagen entsprechend der Belastungen mit einem definierten Abstand zueinander in der Schalung anzuordnen. Zudem kann eine Kombination aus beiden Varianten als „C-texSpacer⁺“ ausgeführt werden (siehe Abb. 5.28).

Tab. 5.14: Anforderungen an Abstandhalter für Textilbeton

| Merkmal | Anforderung |
|--------------------------|---|
| Betonüberdeckung | 2 bis 5 mm |
| Material | Kunststoff |
| Geometrie | Geringes Volumen, geringe Komplexität, flexibel anpassbar |
| Bauteildicke Textilbeton | 10 bis 50 mm |
| Bewehrungstextil | 2D-Gitter und 3D-Gitterstrukturen aus Carbon-, AR-Glas-, Basaltrovings mit Beschichtung (800 bis 3300 tex) |
| Funktion | Positionierung der Bewehrungstextilien im Betonverbund, Umsetzung definierter Betondeckungen, Vermeidung von Fehlstellen im Betonverbund, Keine Schädigung der Fasern oder Rovings, Gewährleistung eines definierten Abstandes zwischen Textilien |
| Sichtbetonqualität | Keine Sichtbarkeit der Abstandhalter an der Betonoberfläche |
| Handhabbarkeit | Leichte Montage, einfache Handhabung |
| Verarbeitung | Preiswerte Fertigung in Großserie (z. B. Spritzguss) |



Abb. 5.27: C-texClip zur Fixierung der textilen Bewehrung (Modelle, Prototypen, Versuchsmuster im Beton)



Abb. 5.28: C-texSpacer als Distanzhalter zwischen textilen Bewehrungsgittern (li.), C-texSpacer⁺ als Positioniereinheit und Distanzhilfe (re.)

Die eigens für Textilbeton entwickelten Positionierhilfen und Distanzhalter C-texClip, C-texSpacer und C-texSpacer⁺ wurden mittels 3D-Druckverfahren (Laser-Stereolithographie und Laser-Sinter-Verfahren) hergestellt und anschließend getestet. Aus den umfassenden Betonierversuchen folgt, dass für eine ausreichende Positionierung der Bewehrungstextilien in der Schalung eine Anordnung von mindestens neun Positionierhilfen pro m² benötigt wird. Für eine Serienproduktion der neuen Abstandhalter wird das Spritzgießverfahren empfohlen, was eine wirtschaftlich effiziente Herstellung gewährleistet. Um die Kosten der komplexen Spritzgießwerkzeuge zu reduzieren, wurde das „C-tex“-Abstandssystem konstruktiv als

modularer Aufbau mit Einlegern modifiziert (siehe dazu Abb. 5.29). Somit können in einem Werkzeug der C-texClip und das Zwischenstück spritzgegossen werden. Die Kombination aus C-texClip, Zwischenstück und einem weiteren C-texClip bildet dann den neuen C-texSpacer⁺, der in verschiedenen Höhen modular zusammengesetzt werden kann (Abb. 5.30).

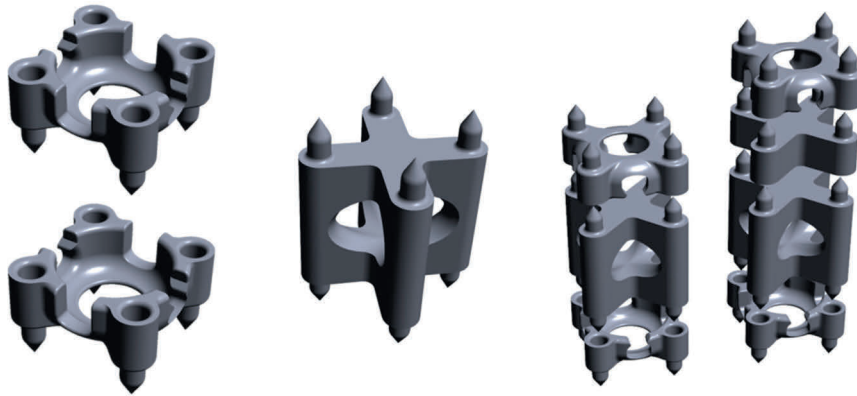


Abb. 5.29: Modell des modularen C-texClip, Zwischenstück und Aufbauvarianten des C-texSpacer⁺

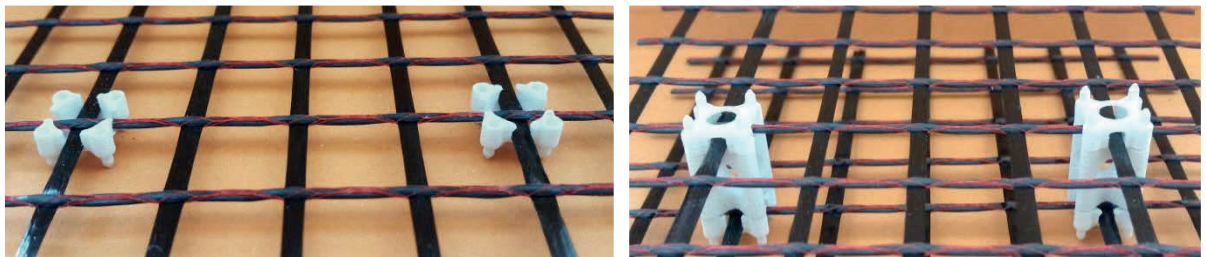


Abb. 5.30: Integration des modularen C-texClip (li.) und des C-texSpacer⁺ (re.) im Bewehrungstextil

5.3.6 Referenzobjekt: Textilbewehrte Leichtbau-Schalen (TexLeS)

Zur Überführung der entwickelten textilbewehrten Beton-Schalenelemente in die Praxis wurden an der TU Chemnitz auf dem Campus-Gelände „TexLeS“-Forschungspavillons errichtet. Diese modularen Flächentragwerke bestehen aus jeweils vier rotationssymmetrischen Einzelementen, welche durch Verklebung in Kombination mit einer Nut-Feder-Verbindung miteinander verbunden werden. Dabei bilden die vier Einzelemente einen für sich frei stehenden Pavillon mit den Abmessungen 3,90 m x 3,90 m x 3,20 m (Breite x Länge x Höhe) und einer Schalendicke von max. 40 mm. Am Standort wurden zwei Pavillons als Überdachungskonstruktion für den Sportplatz aneinander gereiht. Die Befestigung auf dem Fundament erfolgte über integrierte Einbauteile aus Edelstahl in den Fußsegmenten (siehe dazu Anlage 9.5: Abb. 9.40 und Abb. 9.41).

Bemessung und Standsicherheitsnachweis

Die Bemessung wurde nach Grenzzustand der Tragfähigkeit GZT (Festigkeitsnachweis) und Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit GZG (zulässige Verschiebung) durchgeführt. Die erforderlichen Materialkennwerte für die Berechnung wurden experimentell bestimmt, wobei ein hochfester Beton C100/115 ausgewählt worden ist. Der entsprechende E-Modul des Betons wurde dabei gemäß DIN EN 1992 abgemindert. Für die FE-Simulation erfolgte die Diskretisierung des Pavillons über gleichmäßig verteilte Quad-Elemente, die über Federelemente mit einer definierten Federsteifigkeit gelagert sind (siehe Abb. 5.31).

Für die Ermittlung der Bemessungswerte auf der Widerstandsseite im GZT wurde ein Teilsicherheitsbeiwert von $\gamma_c = 1,5$ aus der DIN EN 1992-1-1 [EN1992 NA] verwendet. Somit resultiert als Bemessungswert der Druckfestigkeit ein Maximalwert von 56,7 MPa. Als Bemessungswert der Zugfestigkeit wurde nach Absprache mit der Landesstelle für Bautechnik der Landesdirektion Sachsen ein Wert von 5 MPa festgelegt, um die notwendige Sicherheit, die sich aus der Einbettung textiler Carbongelege in den Beton ergibt, zu gewährleisten. Die Durchbiegungsbeschränkung ist anhand der geometrischen Abmessungen des Pavillons nach den Vorgaben der DIN EN 1992-1-1 ($u = 1/500$) auf einen Maximalwert von $u_{500} = 7,8$ mm begrenzt.

Nach der Ermittlung der Bemessungswerte sowie der Zusammenstellung der maßgebenden Lastfälle und Einwirkungskombinationen erfolgten die Nachweise entsprechend GZT und GZG. Dabei wurde im GZT eine maximale Zugspannung von 4,46 MPa nachgewiesen, die in Feldmitte und in den Fußbereichen auftritt (siehe Abb. 5.31 re.). Die maximale Druckspannung wird in der Mitte der Einzelemente beobachtet, ist jedoch mit einem Wert von 4,71 MPa weit unter der ertragbaren Druckspannung von 56,7 MPa (Abb. 5.32 li.). Die Auswertung des GZG ergibt bei ungünstigster Lastkombination eine maximale Verschiebung von 2,07 mm, so dass auch diese Forderung erfüllt ist (vgl. Abb. 5.32 re.). Ausführliche Beschreibungen zu diesen Berechnungen und Nachweisen sind in [Rud14] enthalten.

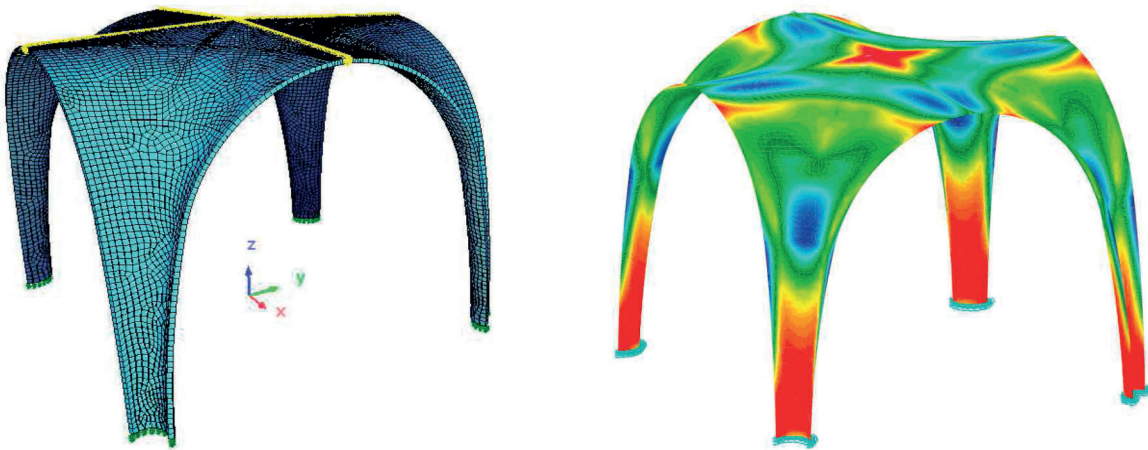


Abb. 5.31: FE-Netz (li.), Auswertung gemäß GZT: Hauptzugspannungen beim maßgeblichen Lastfall (re.); vgl. [Rud14]

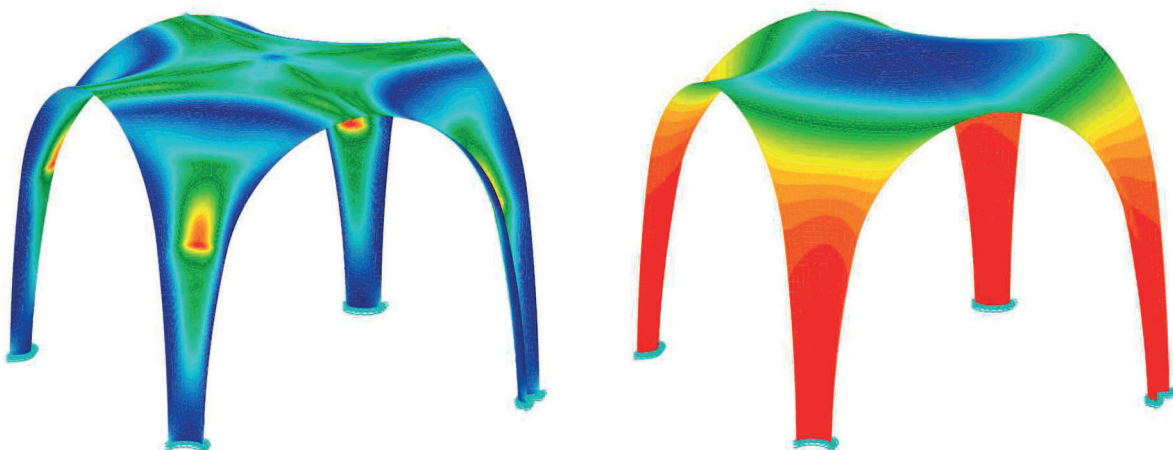


Abb. 5.32: GZT: Hauptdruckspannungen beim maßgeblichen Lastfall (li.), GZG: Verschiebung in z-Richtung (re.), vgl. [Rud14]

Herstellung der TexLeS-Pavillon-Elemente

Die textilbewehrten Schalelemente des Pavillons wurden aus einem weißen, schalungsglattem Architekturbeton mit einer Lage Carbonbewehrung hergestellt. Dazu ist eine neue flexible GFK-Schalung mit Rakelsystem entwickelt und gefertigt worden. In einem ersten Arbeitsschritt wurde das mit Harz beschichtete Carbongitter in die Form eingelegt und vorgeformt. Nach der Aushärtung der vorgeformten Bewehrung erfolgte die lagenweise Betonage in einem zweiten Arbeitsschritt (siehe Abb. 5.33). Dabei wurden die neuen Positionierhilfen „CtexClip“ zur belastungsgerechten Integration und Lagefixierung der textilen Bewehrung eingesetzt. Nach der Erhärtung der Einzelemente erfolgte der Probeaufbau des Pavillons in der Fertigungshalle, wobei die Elemente über die Nut-Feder-Verbindung verklebt wurden (siehe Abb. 5.33, re.); weiterführende Details sind in [Gel15-1] beschrieben.



Abb. 5.33: GFK-Schalung (li.), Betonage eines Einzelementes in GFK-Schalung (mi.), Probeaufbau (re.)

Integration einer textilbasierten Sensorik

Zur Überwachung der „TexLeS“-Referenzpavillons wurden neu entwickelte textilbasierte Dehnungssensoren für mineralische Matrixsysteme während der Fertigung in die Einzelemente im spannungskritischen Fußbereich integriert [Ulb11]. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf der direkten Bestimmung von Dehnungen im Textilbeton nach Errichtung der Pavillons über das kapazitive Messverfahren. Die Dehnungssensoren wurden textiltechnologisch hergestellt, wobei das Drahtmaterial auf einen Stickuntergrund aus wasserlöslichem Vlies im Stickverfahren positionsgenau appliziert wurde. Zur Stabilisierung und Verbesserung der Beständigkeit des textilbasierten Drahtsensors im alkalischen Milieu des Betons erfolgte die Beschichtung mit EP-Harz (vgl. Abb. 5.34); siehe [Hei15].

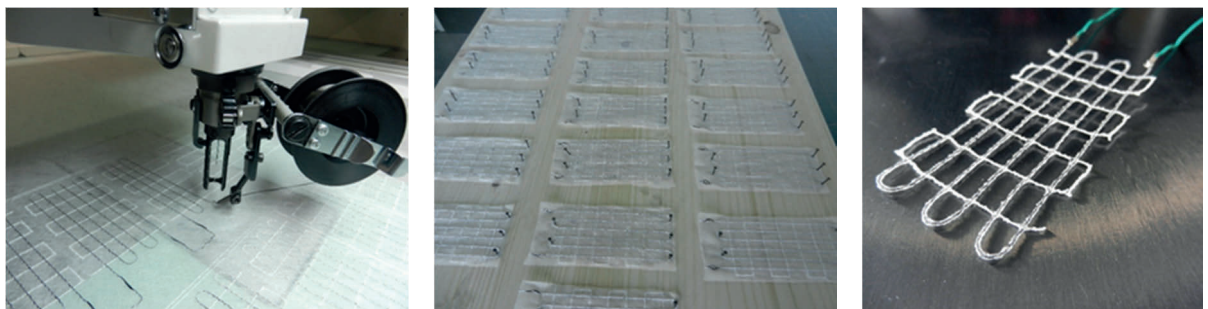


Abb. 5.34: Stickprozess Sensor (li.), gestickte Dehnungssensoren (mi.), Sensor mit entferntem PVA-Vlies (re.)

Eine weitere Anwendung der sticktechnologisch hergestellten Sensoren war die Abbildung eines Touchsensors in Form einer Hand, der zur Bedienung der in die Pavillonelemente integrierten LED-Beleuchtung dient. Dafür wurden die Sensoren in eine GFK-Platte einlaminiert

und anschließend in die Textilbetonschale eingebettet. Nach der Errichtung und Inbetriebnahme des Pavillons lassen sich durch die integrierten Sticksensoren mit angepasster Steuerung verschiedene Lichtszenarien einstellen und aktiv regeln. Das System basiert auf Elektroden und Antennen, die ein räumlich begrenztes elektromagnetisches Feld aufbauen, wodurch bei Berührung des Schalelements die Veränderung des Feldes registriert und durch Rückkopplung in der kaskadierten Signalverarbeitungselektronik ein Schaltsignal erzeugt wird (vgl. Abb. 5.35).

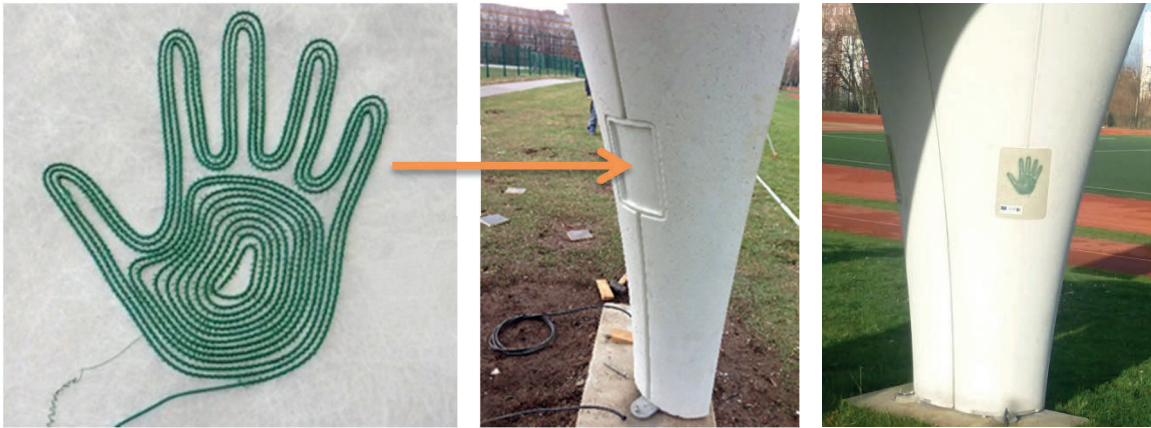


Abb. 5.35: Sticktechnologisch hergestellter Touchsensor (li.), Pavillonelement mit Aussparung für die GFK-Touchsensorplatte (mi.) und Pavillonelement mit integriertem Touchsensor (re.)

Nach der Fertigung aller Einzelelemente erfolgte die Errichtung des Gesamtbauwerks am Standort Campusgelände der TU Chemnitz im Bereich des Sportplatzes (siehe dazu Abb. 5.36 und Anlage 9.5, Abb. 9.42, 9.43, 9.44).



Abb. 5.36: Textilbeton-Pavillons auf dem Campusgelände der TU Chemnitz im Bereich des Sportplatzes

Die entwickelten dünnwandigen Textilbetonschalen zeichnen sich durch eine hohe Beständigkeit gegenüber Witterungseinflüssen (Dauerhaftigkeit), hohe Oberflächenqualität und hohe Tragfähigkeit aus. Durch ihre freie Formbarkeit ist diese Bauweise im besonderen Maße für filigrane Leichtbauschalen geeignet. Aufgrund der Verwendung von Leichtbaustoffen in Kombination mit belastungsgerechten textilen Verstärkungsstrukturen folgt so eine Schalenbauweise, die eine Einsparung von Materialressourcen und eine Reduktion des Eigengewichtes gestattet. Die zusätzliche Integration von einer interaktiven Beleuchtungsfunktion erlaubt ferner das Potential der neuen Textilbetonbauweise hinsichtlich Funktionalisierung auszuerschöpfen (siehe Abb. 5.37, Abb. 5.38).



Abb. 5.37: Textilbeton-Pavillons auf dem Campusgelände der TU Chemnitz mit integrierter Beleuchtung



Abb. 5.38: Textilbeton-Pavillons auf dem Campusgelände der TU Chemnitz mit integrierter Beleuchtung

6 Leichtbaukonstruktion in textilbewehrter Hybridbauweise

Zur ökologisch und ökonomisch effizienten Umsetzung von Freiform-Architekturbauwerken im Hoch- und Ingenieurbau bedarf es leistungsstarker und zugleich multifunktionaler Werkstoffkombinationen, Verbindungssysteme sowie Fertigungstechnologien. Gewichtsminimalität in Struktur und Material ist hier Grundvoraussetzung für die Generierung maximaler Elementgrößen und Spannweiten. Für besonders filigrane und hochbelastete Leichtbautragwerke mit minimalen Wandstärken von 1 bis 2 cm rücken innovative Multimaterial-Bauweisen mit Mehrfachfunktionen in den Fokus. Im Vordergrund eines derartigen sog. Multimaterial-Designs steht die „Richtige Anordnung des richtigen Werkstoffes“ gemäß den vorgegebenen Bauteilanforderungen. Hierbei werden unterschiedliche Werkstoffe und verschiedene Bauweisen unter Berücksichtigung der Integration von funktionalen Effekten aufeinander abgestimmt. Analoge Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der Hybridwerkstoffe konzentrieren sich derzeit vorrangig auf den Automobilbau und die Luft- und Raumfahrttechnik.

Nachhaltiges material- und energieeffizientes Bauen in Kombination mit der freien Gestaltung sind bei der Planung und Errichtung von Bauwerken heute wichtiger denn je. Hier sind neue innovative Lösungsansätze gefragt, die eine Erarbeitung implizierter Hybridwerkstoffe durch gezielte Kombination von festigkeits-, form- und funktionsgebenden Materialkomponenten erfordern. Ziel ist es, leichte hochbeanspruchte Konstruktionen und neue Gestaltungsvarianten speziell für filigrane Tragwerke mit hoher Funktionsdichte zu entwickeln und umzusetzen. Ein außergewöhnlich breit gefächertes Eigenschaftsprofil für diese "maßgeschneiderten" Leichtbauanwendungen besitzen textilverstärkte Hybridstrukturen, denn sowohl die textile Fadenarchitektur als auch die Matrixart und -zusammensetzung können in weiten Bereichen variiert und unter der Bedingung der maximalen Gewichtsreduktion an komplexe Anforderungen angepasst werden.

Ein hohes Potential zur Herstellung von funktionsintegrierenden Hochleistungs-Hybridwerkstoffen bietet die Kombination klassischer Baumaterialien wie z. B. Holz, Beton oder Stahl mit Faser-Kunststoff-Verbunden. Für die entsprechende Anwendung in der Praxis fehlen allerdings noch die Grundlagen hinsichtlich Materialverhalten, Bemessung und Fertigung. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Entwicklung und Umsetzung eines neuen Multimaterial-Werkstoffs aus Textilbeton und GFK (BetoTexG) vorgestellt.

6.1 Entwicklung des Textilbeton/GFK-Hybridwerkstoffs BetoTexG

Die Anwendung von anorganisch-nichtmetallischen Hochleistungswerkstoffen gestattet die Fertigung leichter dünnwandiger Freiformelemente im Bauwesen, wobei der Textilbeton dafür besondere Vorteile bietet (siehe etwa [Bra06, Mum10, Sch04]). Mit Textilbeton kann nach dem aktuellen Stand der Technik eine maximale Zugfestigkeit von bis zu 45 MPa (gerissener Zustand) bei Materialstärken von ≥ 25 mm erreicht werden. Für filigranere Leichtbaustrukturen mit geringeren Materialdicken sind zusätzliche Verstärkungsstrukturen notwendig. Die zweite Komponente des BetoTexG ist der FKV, der sich im besonderen Maße durch eine hohe spezifische Zugfestigkeit und Steifigkeit auszeichnet und somit als Zugverstärkung für den Beton hervorragend geeignet ist. Vor allem glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK)

besitzen neben der hohen Variabilität hinsichtlich eines belastungsgerechten Materialaufbaus auch eine hohe Festigkeit und Steifigkeit, gute Korrosionsbeständigkeit, freie Formbarkeit sowie Multifunktionalität. Zur Anwendung von FKV-Betonbewehrung wurden in den letzten Jahren verschiedene Forschungsarbeiten durchgeführt, wobei der Fokus auf dem Ersatz der Stahlbewehrung durch GFK- und CFK-Verstärkungsstrukturen in Form von partiell eingebetteten Stäben und Gittern lag (siehe in [Als98, Raf08, Wu06, Cev11, Fül04]). Die Ergebnisse der zahlreichen Untersuchungen zeigen, dass grundsätzlich die Verstärkung von Betonteilen mit FKV-Elementen zu einer lokalen Erhöhung der Trageigenschaften führt.

Für eine weitere Steigerung der mechanischen Leichtbaueigenschaften erfolgte die Entwicklung eines hochbelastbaren Hybridwerkstoffs, bei dem zielgerichtet der textilbewehrte Beton mit dem GFK ganzflächig kombiniert wurde. Ziel war dabei die Bereitstellung einer ressourceneffizienten Hybridbauweise für Anwendungen in Schalentragerwerken (siehe etwa in [Gel14-1, Fun14-5, Fun13-2]). Die neue BetoTexG-Bauweise sollte die Vorteile der beiden Grundkomponenten Textilbeton und GFK ausschöpfen und gleichzeitig die Nachteile der Einzelwerkstoffe im Verbund vermeiden.

6.1.1 Materialkomposition

Die Verbundwerkstoffe Textilbeton und GFK unterscheiden sich erheblich in ihren Materialeigenschaften, wie z. B. Dichte, Festigkeit, Steifigkeit, Brand- und Temperaturverhalten, Verarbeitbarkeit und Oberflächenbeschaffenheit. Somit umfasste die anforderungsgerechte Materialentwicklung eine komplizierte Optimierung der beiden Ausgangswerkstoffe Textilbeton und GFK. Der Fokus lag dabei auf der Anpassung der verschiedenen mechanischen und bauphysikalischen Eigenschaften der Verbunde aneinander. Die Angleichung der Komponenten konnte jedoch aufgrund der stark verschiedenen Materialstruktur nur im begrenzten Maße durchgeführt werden, so dass zur Erhöhung der Verbundfestigkeit sowie zur thermischen Entkopplung beider Materialien zwischen Textilbeton und GFK ein Interlayer integriert werden musste.

Hybridkomponente 1: Textilbeton

Für die Zusammensetzung des Ausgangswerkstoffs Textilbeton wurde ein hochfester Feinbeton mit einer Lage textiler Bewehrung entwickelt. Die Erstellung der Rezeptur des Feinbetons erfolgte auf Basis der mechanischen Anforderungen (z. B. Druck- und Biegezugfestigkeit), bauphysikalischen Restriktionen (z. B. thermische Ausdehnung, Wasserundurchlässigkeit, Schwindung) sowie Forderungen hinsichtlich Dauerhaftigkeit, Oberflächenqualität, Verarbeitbarkeit und Rheologie. Zudem sollte eine gute Anbindung zwischen Betonmatrix und Textilverstärkung gewährleistet werden.

Die qualitative und quantitative Zusammensetzung der entwickelten Feinbetonrezeptur ist in Tab. 9.6 (Anlage 9.6) zusammengefasst. Neben Portlandzement vom Typ 52,5 R wurde ein hoher Gehalt an Puzzolanen (Steinkohlefeinstflugasche, Silica Fume) als Bindemittel eingesetzt, der zur Erhöhung der Dauerhaftigkeit beiträgt und eine verbesserte Anbindung zwischen Textil und Betonmatrix im Vergleich zu reinem Portlandzement sicherstellt. Die Zugabe von AR-Glasfasern diente zur Verbesserung von Schwindrissneigung, Duktilität und Rissverhalten. Die Verarbeitungseigenschaften des Betons wurden über einen elektrosterischen

Stabilisator optimiert (Hochleistungsfließmittel auf Polycarboxylatether-Basis, PCE-Anteil 30 M.-%). Der Wasserbindemittelwert wurde entsprechend der Verarbeitung im Spritzverfahren auf $w/b = 0,32$ eingestellt, was zu einem niedrigviskosen, selbstverdichtenden Frischbeton führt.

Als textile Bewehrungsstruktur ist ein biaxiales Kettengewirk aus alkaliresistenten Glasfasern mit 2400 tex verwendet worden. Die Maschenweite des Gewirkes umfasste minimal 10 mm x 10 mm, wobei das Textil mit einer Beschichtung von mind. 10 M.-% imprägniert wurde. Durch Integration einer Lage AR-Glasgewirke in Beton beträgt der resultierende Bewehrungsgrad etwa 4,1 Vol.-% bei einer Materialdicke der Textilbetonschicht von 5 mm [Fun13-3]. Als alternative Bewehrungen können auch biaxiale Gewirke aus Carbonrovings mit einer Mindestmaschenbreite von 10 mm x 10 mm eingesetzt werden. Vorteile von Carbongewirken im Vergleich zu AR-Glasgewirken sind die höhere Dauerhaftigkeit im alkalischen Milieu sowie die höhere Zugfestigkeit bei gleichem Längengewicht (weitere Informationen s. [Pet15]).

Hybridkomponente 2: GFK

Zur Verstärkung der Komponente Textilbeton wurde ein Laminat aus vier Lagen biaxialen Gewebe aus Aluminoborosilikatglas (E-Glas) mit einem Flächengewicht von 580 g/m² und Polyesterharz als Matrix in einer Materialdicke von 3 mm aufgebaut. Zur Fertigung des GFK-Laminats kam das Handlaminierverfahren zur Anwendung. Um den Widerstand gegen elastische Verformung zu erhöhen, wurde das Laminat mit einem Faservolumengehalt von etwa 60 M.-% hergestellt. Der mittlere Biegemodul des Laminats lag bei 19 GPa (vgl. auch [Fun13-4]).

Zwischenschicht des Hybrides: Interlayer

Der Materialaufbau der Komponenten des BetoTexG wurde bezüglich der mechanischen Eigenschaften aufeinander abgestimmt, was eine Erhöhung der Steifigkeit des GFK-Laminats erfordert. Da jedoch der Widerstand gegen elastische Verformung von GFK ($E_{\text{GFK}} = 19$ GPa) im Vergleich zum Textilbeton ($E_{\text{Tex}} = 39$ GPa) nur etwa 50% beträgt, war die Applikation einer Zwischenschicht (Interlayer) unumgänglich. Darüber hinaus sind die thermischen Längenausdehnungskoeffizienten von Textilbeton und GFK unterschiedlich, so dass eine thermische Entkopplung von Textilbeton und GFK erforderlich ist.

Auf Basis von zahlreichen Vorversuchen wurden zur Steigerung der Verbundfestigkeit ein epoxidharzbasiertes System und zur thermischen Entkopplung ein Polyester-Wabenvlies als Interlayer ausgewählt. Folgender Materialaufbau ist für die Herstellung des BetoTexG-Hybridmaterials festgelegt worden: 5 mm Textilbeton mit einer Lage AR-Glasgewirke, 1 mm Interlayer und 3 mm GFK-Laminat (Abb. 6.1).

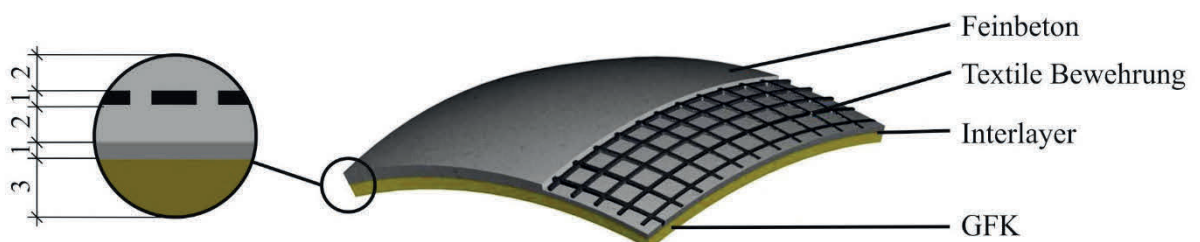


Abb. 6.1: Schematischer Aufbau der Textilbeton-GFK-Hybridbauweise (BetoTexG, Angaben in mm)

6.1.2 Herstellung

Umfangreiche Versuche zur Herstellung von BetoTexG zeigten, dass die Prozessabfolge (Fertigung des GFK-Elements im Laminierverfahren mit anschließender Applikation des Interlayers und darauffolgender Betonage des Textilbetons), die keine zusätzliche Schalung erfordert, im Hinblick auf hohe mechanische Eigenschaften und Qualität der Elementoberfläche modifiziert werden musste (Details in [Fun12-1]). Da in späteren baupraktischen Anwendungen der Beton die Sichtfläche der Hybridelemente bilden soll, wurde die Betonage der Betonsichtfläche auf der schalungszugewandten Seite ausgeführt. Somit umfasst die Technologie zur Herstellung von BetoTexG-Elementen ein ganzheitliches Konzept aus Betonspritzverfahren, Interlayer-Applikation und GFK-Laminierertechnologie (vgl. dazu auch Tab. 6.1).

Tab. 6.1: Technologische Prozesskette zur Herstellung von BetoTexG

| Abfolge | Komponente | Technologie |
|---------|-------------------|-------------|
| 1. | Feinbeton | Spritzen |
| 2. | Textile Bewehrung | Einlegen |
| 3. | Feinbeton | Spritzen |
| 4. | Interlayer | Applikation |
| 5. | GFK | Laminieren |

6.1.3 Materialcharakterisierung der Komponenten und des Hybridverbundes

Eigenschaften der Komponente Textilbeton

Die Herstellung und Lagerung der Probekörper für die Festigkeitsprüfungen des Festbetons erfolgte in Anlehnung an DIN EN 12390-2. Die Druck- und 3-Punkt-Biegezugfestigkeit wurde nach DIN EN 12390-4 bzw. -5 und die geometrische Rohdichte nach DIN EN 12390-7 bestimmt. Die Ergebnisse der Eigenschaften des Textilbetons sind im Alter von 28 Tagen als charakteristische Werte des Festbetons in Tab. 6.2 zusammengefasst. Dabei wurden in Bezug auf die mechanischen Eigenschaften eine sehr hohe Druckfestigkeit, ein hoher E-Modul sowie vergleichsweise hohe Biegezug- und Zugfestigkeitskennwerte ermittelt (siehe dazu Tab. 6.2).

Für die Dauerhaftigkeit der Textilbewehrung aus alkaliresistentem Glas ist eine verringerte Basizität des Feinbetons von entscheidender Bedeutung, die durch Zugabe von Flugasche und Silica Fume erreicht werden kann. Im Feinbeton reagieren Steinkohlefeinstflugasche und Silica Fume mit dem freien Portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) puzzolanisch zu C-S-H- und C-A-H-Phasen, wodurch der Portlanditgehalt auf 2,8 M.-% begrenzt ist. Im Vergleich zu reinem Portlandzement, der einen Portlanditgehalt von etwa 8 M.-% aufweist, umfasst dies eine Reduktion um 65% und führt damit zu einer Verminderung des pH-Wertes. Demnach wird die Glaskorrosion von AR-Glasrovings infolge des Laugenangriffes reduziert und so die Abnahme der Zugfestigkeit der Glasfilamente als Funktion der Zeit verringert (siehe [Fun12-2]).

Die Schwindverformung von 0,80 mm/m nach 28 Tagen ist bei Betrachtung des hohen Bindemittelgehaltes (730 kg/m^3) sowie des hohen Anteils an Silica Fume (10 M.-% vom Zement) in Verbindung mit der hohen Festigkeit des Festbetons vergleichsweise gering. Nach 7 Tagen liegt die Schwindverformung bereits bei 0,72 mm/m und nähert sich asymptotisch dem Wert

0,80 mm/m an. Das Abklingen der Schwindverformung steht im unmittelbaren Zusammenhang mit der Druckfestigkeitssteigerung (vgl. Anlagen 9.6, Abb. 9.46). Bereits sieben Tage nach Herstellung sind 110 MPa und damit etwa 90% der 28-Tage-Festigkeit von 119 MPa erreicht, so dass die für die Festigkeitserhöhung bestimmenden Hydratationsreaktionen der C-S-H- und C-A-H-Phasen bereits fast vollständig abgelaufen ist. Zudem ist die Abnahme der Schwindverformung nach sieben Tagen zu beobachten, was auf das Ende des autogenen Schwindens bedingt durch die abgeschlossene C-S-H- und C-A-H-Phasenbildung hindeutet. Nach sieben Tagen hat nur noch das Trocknungsschwinden (rein physikalische Austrocknung des Zementsteins) entscheidenden Einfluss auf die Schwindverformung.

Tab. 6.2: Festbetoneigenschaften im Alter von 28 Tagen

| Eigenschaften | Nach 28 Tagen |
|---------------------------------------|------------------------|
| Geometrische Rohdichte | 2,17 g/cm ³ |
| Druckfestigkeit | 119,00 MPa |
| 3-Punkt-Biegezugfestigkeit | 14,10 MPa |
| Zugfestigkeit | 5,10 MPa |
| E-Modul (Druckversuch) | 39,00 GPa |
| Lineare Schwindung (1 m Schwindrinne) | 0,80 mm/m |
| Portlanditgehalt (Thermogravimetrie) | 2,80 M.-% |

Mechanische Eigenschaften von Textilbeton-GFK-Hybridelementen

Der neue Hybridwerkstoff BetoTexG verfügt mit seiner vergleichsweise geringen Rohdichte von 1,65 g/cm³ über ein hohes Leichtbaupotential, was insbesondere bei der Umsetzung von filigranen, gekrümmten Tragstrukturen im Bauwesen von hohem Stellenwert ist. Das Tragverhalten derartiger Strukturen wird im Wesentlichen durch die Festigkeit in Kombination mit der Dauerhaftigkeit des Materialverbundes bestimmt.

Die Zug- und 3-Punkt-Biegezugfestigkeit des BetoTexG wurde an 28 Tage alten Probekörpern mit den Abmessungen 220 mm x 50 mm x 9 mm [l x b x h] bestimmt. Bei dem hier vorliegenden Verhältnis von Probenstützweite zu Probenhöhe $l : h = 22$ sind die geprüften Proben vornehmlich auf Biegung beansprucht (siehe dazu [Wes93]).

Zur Beurteilung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens von BetoTexG unter Biegebeanspruchung wurden zwei reziproke Anordnungen gewählt: GFK im Zugbereich (1) und Textilbeton im Zugbereich (2). In den Versuchsreihen konnte nachgewiesen werden, dass die Kombination von Textilbeton und GFK insgesamt zu einer wesentlichen Steigerung der Zug- und 3-Punkt-Biegezugfestigkeit führt, wobei die Maximalwerte abhängig vom verwendeten Interlayer sind. Bei Anordnung von GFK in der Zugzone konnte eine maximale Biegezugfestigkeit von über 160 MPa erreicht werden. Eine derart hohe Biegezugfestigkeit konnte hier durch die Applikation eines Interlayers auf Epoxidharzbasis erzielt werden.

Das Spannungs-Dehnungs-Verhalten des Hybridwerkstoffs BetoTexG wird durch die unterschiedlichen Materialeigenschaften der Grundkomponenten Textilbeton und GFK bestimmt. Infolge Einleitung einer Belastung kommt es beim Überschreiten der Bruchdehnung von

Beton (ca. 0,1%) zu einer Delamination von Beton und GFK (vgl. Abb. 6.2, li.). Je höher der E-Modul des GFK ist, desto höher sind die Spannung und damit die Festigkeit bei der erreichten Bruchdehnung von Beton.

Befindet sich demgegenüber der Textilbeton in der Zugzone und GFK im Druckbereich, dann kann unter Verwendung des ausgewählten Epoxidharz-Interlayers eine Biegezugfestigkeit von maximal 100 MPa erreicht werden. Dabei ist die Interfacefestigkeit zwischen GFK und Textilbeton entsprechend hoch, so dass selbst bei hohen Verformungen keine Delamination initiiert wird (Abb. 6.2, re.).

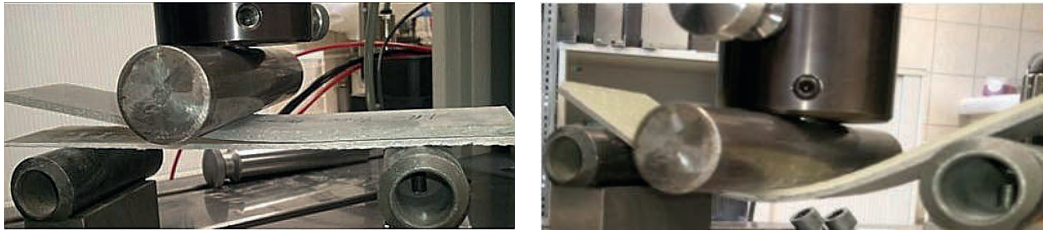


Abb. 6.2: Repräsentative 3-Punkt-Biegeversuche: Textilbeton im Zugbereich (li.), GFK im Druckbereich (re.)

Der Spannungs-Dehnungs-Verlauf eines exemplarisch durchgeführten 3-Punkt-Biegeversuchs von BetoTexG (GFK im Zugbereich, Textilbeton im Druckbereich) unter Verwendung des favorisierten Interlayers aus Epoxidharz und Wabenvlies ist in Abb. 6.3 dargestellt. Aus diesem Verlauf geht hervor, dass ein annähernd linearer Spannungs-Dehnungs-Verlauf bis zum Erreichen der Maximalspannung bei etwa 130 MPa vorliegt. Dadurch konnte im Vergleich zur reinen Basiskomponente Textilbeton infolge der Kombination mit GFK eine um nahezu 10fach höhere Biegezugspannung erzielt werden.

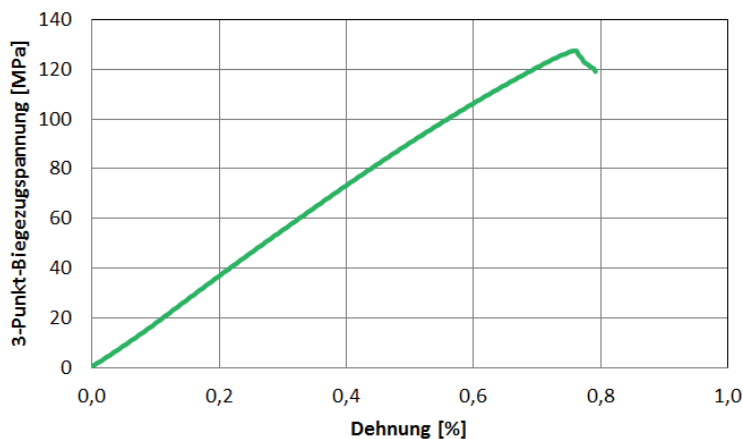


Abb. 6.3: Exemplarischer Spannungs-Dehnungs-Verlauf eines Biegeversuchs von BetoTexG mit dem entwickelten Interlayer Epoxidharz und Wabenvlies

In weiterführenden Zugversuchen wurde für den neuen Textilbeton-GFK-Verbund BetoTexG nachgewiesen, dass durch Applikation eines Epoxidharzbasierten Interlayers maximale Zugfestigkeiten von bis zu 200 MPa erreicht werden. In Abb. 6.4 ist exemplarisch das Spannungs-Dehnungs-Diagramm eines derartigen Verbundes mit dem entwickelten Interlayer „Epoxidharz und Wabenvlies“ dargestellt. Bis zum Erreichen der in diesem Beispiel erzielten Maximalzugkraft von 165 MPa ist ein linearer Verlauf zu beobachten, danach kommt es zum schlagartigen Versagen. Eine Zusammenstellung der mechanischen Eigenschaften des Hybridwerkstoffs BetoTexG erfolgt in Tab. 6.3.

Tab. 6.3: Eigenschaften des BetoTexG Hybridwerkstoffs mit Interlayer aus Epoxidharz und Wabenvlies

| Eigenschaften | Nach 28 Tagen |
|----------------------------|------------------------|
| Geometrische Rohdichte | 1,65 g/cm ³ |
| Druckfestigkeit | 350 MPa |
| 3-Punkt-Biegezugfestigkeit | 125 MPa |
| Zugfestigkeit | 165 MPa |

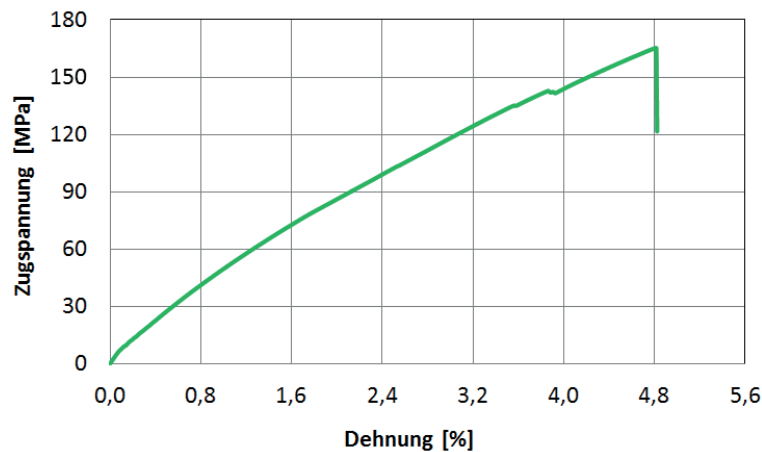


Abb. 6.4: Exemplarischer Spannung-Dehnungs-Verlauf eines Zugversuchs von BetoTexG mit dem entwickelten Interlayer Epoxidharz und Wabenvlies

Mechanische Eigenschaften unter Temperaturbeanspruchung

Zur Validierung der Dauerhaftigkeit wurde der BetoTexG Hybridwerkstoff einer Temperaturwechselbeanspruchung (TWB) ausgesetzt und die mechanischen Eigenschaften vor und nach der thermischen Belastung ermittelt. Die TWB umfasste zehn Zyklen von $-20^{\circ}\text{C} \rightarrow +80^{\circ}\text{C} \rightarrow -20^{\circ}\text{C}$ über einen Zeitraum von jeweils 24 Stunden je Zyklus.

In Abb. 6.5 sind die Zugfestigkeiten der Hybrid-Proben mit selektierten Interlayern vor und nach der TWB dargestellt. Bei nahezu allen getesteten Interlayer-Typen kommt es zu einem schlagartigen Versagen des Textilbeton-GFK-Verbundes, was mit einer Delaminierung zwischen Textilbeton und GFK einhergeht. Zudem bilden sich bei allen Interlayern mit Laststeigerung viele kleine Risse im Beton, wobei die Rissbreiten infolge der textilen Bewehrung und der hohen Verbundfestigkeit zwischen Textilbeton und GFK sehr gering sind ($w < 0,1 \text{ mm}$). Die höchste Zugfestigkeit von 210 MPa vor der TWB wird mit dem Interlayer „Epoxidharz 2“ erreicht, wogegen die Zugfestigkeit nach der TWB um 36% auf 135 MPa abnimmt. Diese Abnahme ist im Wesentlichen auf die induzierten Eigenspannungen im Grenzschichtbereich infolge vollkommener Haftung der Einzellagen zurückzuführen. Beim Einsatz des Interlayers „Wabenvlies“ beträgt die Zugfestigkeit vor der TWB 95 MPa. Dieser vergleichsweise geringe Wert entspricht jedoch demjenigen nach der TWB, was auf die flexible Verbindung von Textilbeton und GFK durch die Zwischenschicht „Wabenvlies“ hindeutet.

Insgesamt führte die Kombination der Interlayer „Epoxidharz 2“ und „Wabenvlies“ zum Kompromiss zwischen hoher Verbundfestigkeit und gewünschter Flexibilität. So etwa wurde für eine thermisch unbelastete Probe des „EP2-Wabenvlies“-Systems eine maximale Verbundfestigkeit von 165 MPa und nach der TWB von 160 MPa erreicht (siehe Abb. 6.5).

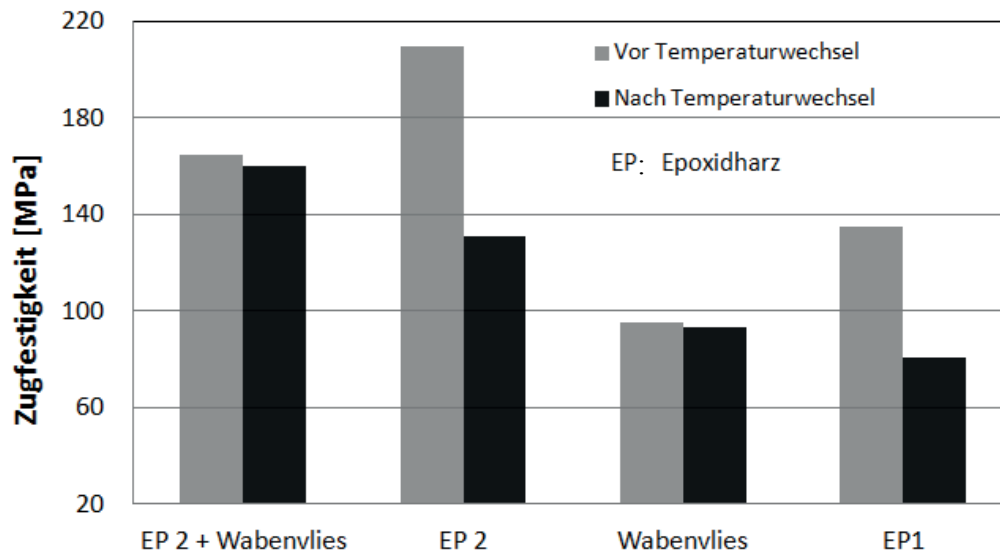


Abb. 6.5: Zugfestigkeiten vor und nach der TWB mit verschiedenen Interlayern

6.2 FE-Simulation des Textilbeton-GFK-Hybridwerkstoffs BetoTexG

Die numerische Simulation erlaubt die Eigenspannungszustände der untersuchten Materialschichten im Verbund zu analysieren. Für die Modellierung und Simulation des strukturellen Verbundverhaltens unter Temperaturbelastung von BetoTexG wurde das FE-Programm Abaqus genutzt. Zur makromechanischen Analyse des Verbundes wurde ein linearelastisches Materialverhalten vorausgesetzt. Die entsprechenden Eingangsdaten, die in eigenen experimentellen Untersuchungen [Pet15] ermittelt und einschlägigen Literaturquellen (z.B. [Kro92], [Ehr02]) entnommen wurden, sind in Tab. 6.4 enthalten.

Tab. 6.4: Eigenschaften der Hauptkomponenten des BetoTexG

| | ρ | E_1 | E_2 | E_3 | ν_{12} | ν_{13} | ν_{23} | G_{12} | G_{13} | G_{23} | α_1 | α_2 | α_3 |
|-----------------------|----------------------|--------|-------|-------|------------|------------|------------|----------|----------|----------|-----------------------|------------|------------|
| | [g/cm ³] | [MPa] | | | | | | [MPa] | | | [10 ⁻⁶ /K] | | |
| Textilbeton | 2,20 | 40.000 | | | 0,19 | | | 16.807 | | | 8 | | |
| Interlayer (EP+Vlies) | 1,20 | 3.000 | | | 0,35 | | | 1.111 | | | 70 | | |
| GFK | 1,75 | 21.500 | 6.000 | | 0,07 | 0,28 | 2.600 | 1.500 | | 22 | | 46 | |

Temperaturbelastung

Die prinzipiellen Beanspruchungen des BetoTexG unter Temperaturbelastung wurden mit Hilfe der FE-Simulation für die zwei Zustände: Winter (-40°C) und Sommer (60°C) berechnet. Als spannungsfreier Referenzzustand ist die Raumtemperatur bei der Fertigung von 20°C gewählt worden. Ferner wird vorausgesetzt, dass kein Wärmetransport mehr stattfindet und die Verbundschichten insgesamt die Temperatur -40°C ($\Delta T = -60$ K) oder 60°C ($\Delta T = +40$ K) aufweist. Das Modell für die Simulation wurde in Anlehnung an den vorgegebenen Aufbau (5 mm Textilbeton, 1 mm Interlayer, 3 mm GFK) generiert, wobei alle Verbundkomponenten mit Volumenelementen vom Typ C3D20 (Volumenelement mit hoher Genauigkeit aus 20 Knoten und quadratischer Ansatzfunktion) vernetzt worden sind. Die simulierte BetoTexG-Probe (50 mm x 50 mm x 9 mm) wurde unter Nutzung der doppelten Symmetrie als „Viertelmodell“ berechnet.

Die max. Hauptspannungen für die beiden Temperaturzustände sind in der Abb. 6.6 dargestellt. Daraus folgt, dass für den Lastfall Winter aufgrund der höheren Temperaturdifferenz von $\Delta T = -60$ K höhere max. Zugspannungen als im Sommer resultieren. Die höchsten Spannungen im Winterzustand treten insbesondere an den freien Rändern auf, wobei die jeweiligen Unstetigkeiten zur Mitte des Verbundes hin relativ schnell abklingen. Durch weitere Optimierung des Interlayers (Werkstoffart und Schichtdicke) lassen sich vor allem versagenskritische Eigenspannungen wirkungsvoll reduzieren. Insbesondere durch Anpassung des Faservolumengehaltes, des Lagenaufbaus sowie durch Verwendung von alternativen Verstärkungsfasern kann das mechanische Verbundverhalten im Hinblick auf die Temperaturbelastung positiv beeinflusst werden (siehe etwa [Pet15]).

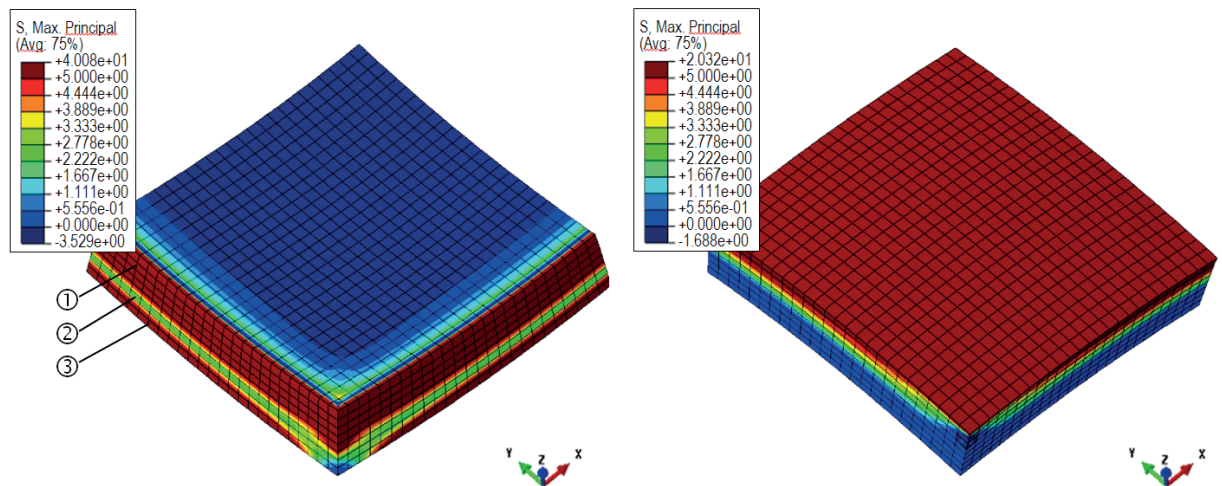


Abb. 6.6: FE-Modell BetoTexG, Zugspannungen infolge Temperatur im Winter (li.), Sommer (re.) (Textilbeton ①, Interlayer ②, GFK ③)

Biegezugbelastung

Für die Simulation des 3-Punkt-Biegeversuchs wurde analog zum Modell unter Temperaturbelastung ein idealer Verbund der orthotropen Einzelschichten mit linearelastischem Materialverhalten vorausgesetzt (experimentell ermittelte Materialdaten siehe Tab. 6.4). Hierzu sind ebenfalls Volumen-Elemente vom Typ C3D20 verwendet und ein Viertel des Versuchsaufbaus modelliert worden, wodurch die Berechnungszeit drastisch reduziert werden konnte. Die Abmessungen des Probekörpers betragen: 250 mm x 50 mm x 9 mm. Als repräsentative Belastung wurde eine Gebrauchslast von 1.000 N ausgewählt, die bei einem Auflagerabstand von 220 mm mittig aufgebracht wurde.

Die berechneten max. Hauptspannungen sind in Abb. 6.7 für das „Viertelmodell“ dargestellt. Dabei sind die unterschiedlichen Bereiche des BetoTexG-Hybridwerkstoffs zu erkennen (siehe auch Abb. 6.2): Krafteinleitungsbereich ① (Krafteinleitung mittels Rundstab), Oberschicht aus Textilbeton unter Druckbeanspruchung ② (dunkelblauer Bereich), nahezu spannungsfreier Interlayer ③ (mittelblauer Bereich) und stark beanspruchte GFK-Schicht ④ (roter Bereich). Anhand der FE-Simulation konnte gezeigt werden, dass die Aufbringung einer für den Gebrauchszustand repräsentativen Last von 1.000 N zu hohen Zugspannungen in der GFK-Schicht führt.

Weiterführend wurde die Abhängigkeit von der Dicke des Interlayers auf die mechanischen Spannungen und Verschiebungen simuliert. Insgesamt konnte mit steigender Interlayerhöhe eine Reduktion der Spannungen im Beton festgestellt werden, wobei der Einfluss relativ gering ist. Um dennoch die versagenskritischen Spannungen entscheidend zu reduzieren, sollte daher neben der Anpassung der Interlayerhöhe auch die Werkstoffart der Zwischenschicht optimal eingestellt werden (siehe [Gel14_4], [Pet15]).

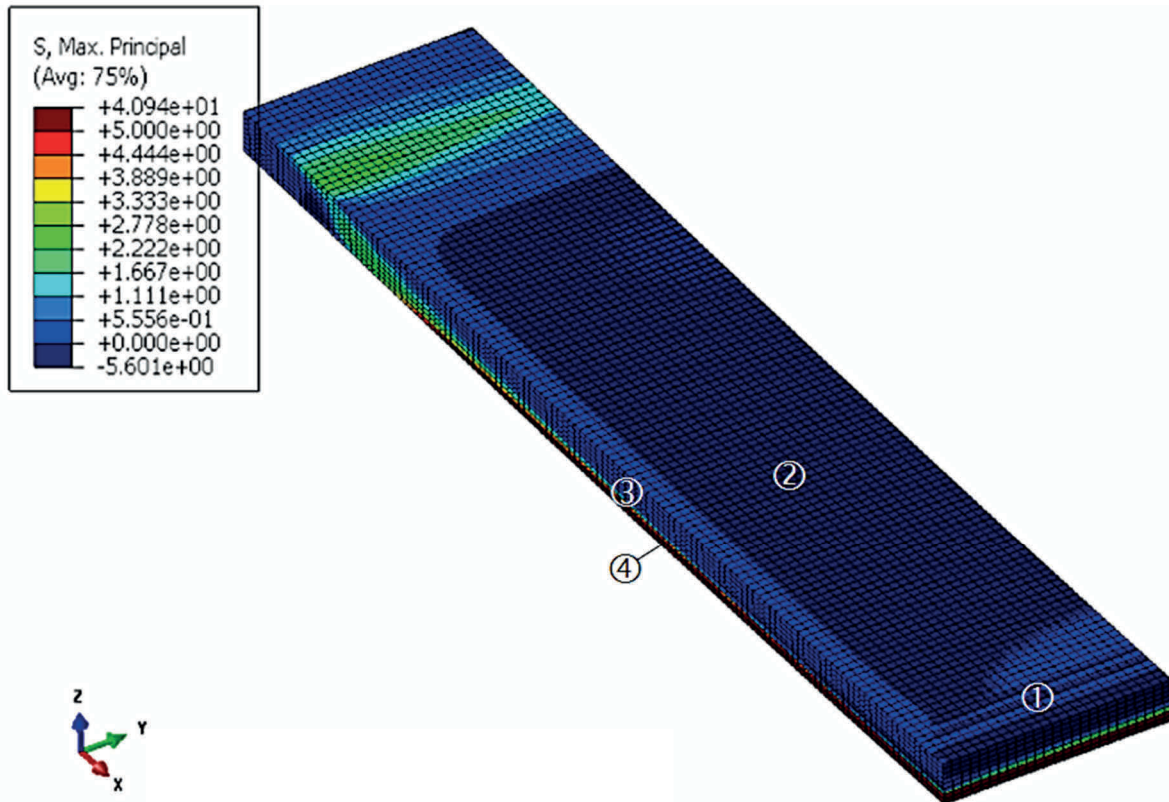


Abb. 6.7: FE-Viertelmodell des BetoTexG-Verbundes und max. Hauptspannungen infolge der 3-Punkt-Biegebelastung

6.3 Befestigungssystem

Die Anforderungen an Befestigungssysteme für doppelt gekrümmte Tragelemente in Fassaden oder Gebäudehüllen sind im Vergleich zu ebenen Systemen deutlich komplexer. So etwa besteht bei freigeformten Elementen die Notwendigkeit der räumlichen Einstellbarkeit des Gesamtsystems, wohingegen an ebenen Systemen nur eine Einstellung in vertikaler und senkrechter Richtung erforderlich ist.

In der Regel wird eine Einteilung in zwei Arten von Befestigungssystemen vorgenommen: Linienlagerungen und Punktlagerungen. Die konstruktive Gestaltung von Linienlagerungen ist auf doppelt gekrümmte Fassadensysteme nicht übertragbar, da z. B. der Ausgleich von Produktions- und Montagetoleranzen ein Problem darstellt. Punkthalterungen sind demgegenüber konstruktiv besser auf die Anforderungen freigeformter Elemente zu adaptieren. Bei projiziert viereckigen Formen werden zumeist vier unabhängige Punkthalterungen verwendet, die zum Ausgleich der Wärmedehnungen als Fest- und Loslager ausgeführt werden. Dabei ist die bauliche Ausbildung der Lagerungen auf die notwendigen Einstell- und Ausgleichsmöglichkeiten der Befestigungspunkte abzustimmen.

Für die Befestigung von freigeformten Textilbeton-GFK-Hybridelementen wurde ein neuartiges Befestigungssystem entwickelt, das mehrachsige Einstellmöglichkeiten mit der Ausbildung statisch unterschiedlich wirkender Lagerungen kombiniert. In Abb. 6.8 ist eine Übersicht des Multiachs-Systems am Beispiel eines kombinierten Befestigungspunktes für zwei Hybridelemente dargestellt (weiterführend siehe Anlage 9.6, Abb. 9.47).

Das neue Multiachs-System besteht aus den Komponenten: Halteteller, Spanscheibe, Ausgleichskugel und Grundplatten mit Verbinder, wobei der Halteteller im Interlayer an den Hybridelementen angeordnet wird und durch die überlamierte GFK-Schicht verankert ist. Der Ausgleich in Richtung der Krümmungsnormale erfolgt über das Gewinde im Schaft des Tellers. Die Haltekugel mit zweiachsigem Spiel in der Ebene senkrecht zur Flächennormale gestattet gemeinsam mit dem Halteteller einen Toleranzausgleich in allen Raumrichtungen, wobei die Fixierung der Flächenausrichtung von den Spanscheiben sichergestellt wird. Ferner kann durch die Variation der Vorspannung in diesen Scheiben die Ausbildung als Los- oder Festlager vorgenommen werden. Die Grundplatten sind zur Aufnahme der Ausgleichskugel mit Untermaß kegelförmig ausgefräst und werden mit dem baulichen Untergrund verbunden (Abb. 6.8, re.). Durch diese Konstruktion wird durch Vorspannung der Verbindungsschraube die Klemmkraft der Ausgleichskugel angepasst.

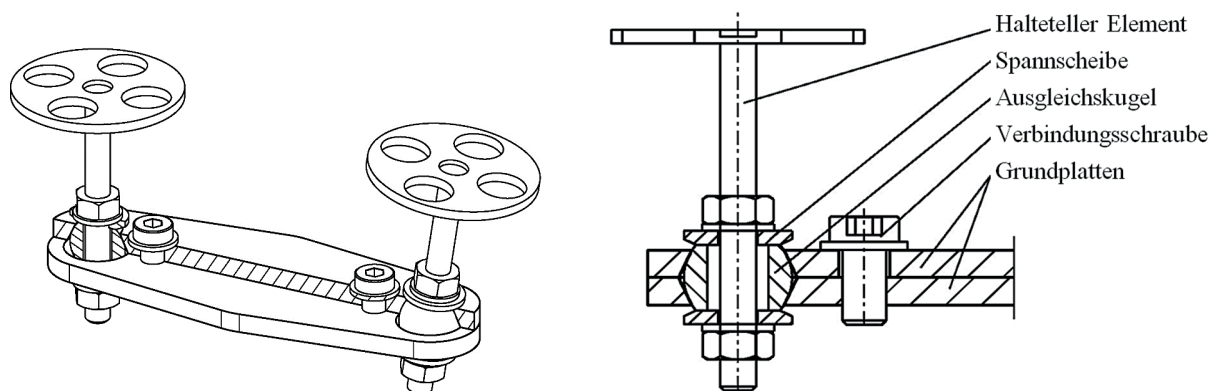


Abb. 6.8: Schematische Darstellung des neuen Befestigungssystems „Multiachs“ (li.) und Detailzeichnung der entwickelten Punkthalterung (re.)

6.4 Referenzobjekt: Concrete-Fiber-Igloo (CoFigloo)

6.4.1 Geometrische Abmessungen

Zur Überführung der wissenschaftlichen Ergebnisse der Entwicklung des Textilbeton-GFK-Hybridwerkstoffs BetoTexG in die praktische Umsetzung wurde als Referenzobjekt ein filigraner Forschungspavillon (CoFigloo) in Schalenbauweise mit den Abmessungen 5,10 m x 5,10 m und einer Höhe von 2,80 m gefertigt und errichtet. Um einen sicheren Stand für den modularen Pavillon zu gewährleisten, ist eine Unterkonstruktion bestehend aus einem Stahlgestell gefertigt worden. Daran wurden die Fassadenteile punktuell mit multiaxialen Einstellmöglichkeiten mit der Unterkonstruktion verankert (siehe Abb. 6.9).

Die Schalen des CoFigloo bestehen aus: Textilbeton (5 mm, Feinbetonmatrix mit integriertem einlagigen AR-Glasgewirk), Interlayer (1 mm, Epoxidharz und Polyester-Wabenvlies) sowie GFK-Handlaminat (3 mm, UP-Harz mit E-Glasverstärkung). Die Grundform des Pavillons ist

ein Ellipsoid, der mit drei gleichmäßigen Ausschnitten versehen ist. Das Modell des Ellipsoids wurde zum Nachweis der Tragfähigkeit (GZT) und Nachweis der Gebrauchstauglichkeit (GZG) in das Statik-Programm Sophistik implementiert und auf Basis der experimentell ermittelten Materialdaten bemessen (weiterführend siehe [Gel12-1]).

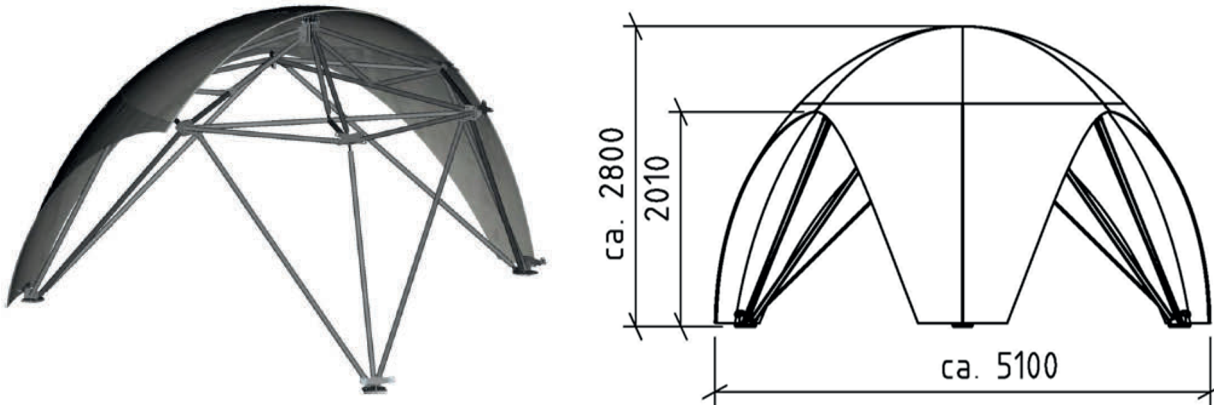


Abb. 6.9: Entwurf des Forschungspavillons CoFigloo (Darstellung teilweise ohne Verkleidung; li. und Gesamtdarstellung mit Abmessungen; re.)

6.4.2 Formwerkzeug

Zur fertigungstechnischen Umsetzung der Elemente des Forschungspavillons CoFigloo waren verschiedene Formwerkzeuge erforderlich, die eine Herstellung im Betonspritzverfahren mit anschließendem Laminierprozess gestatten. Aus der im CAD-Programm Rhinoceros (Rhino) modellierten Struktur des Pavillons wurden die benötigten Formenwerkzeuge unter der Maßgabe eines geringen Konstruktions- und Herstellungsaufwandes abgeleitet. Dazu ist die Pavillongeometrie derart angepasst worden, dass alle Elemente mit nur drei Formwerkzeugen gefertigt werden können. Mehrteilige demontierbare Abstellkanten gewährleisteten ferner eine hinterschnittfreie Entformung der Pavillonelemente. Die Lage der Befestigungspunkte wurde auf Basis des CAD-Modells über sog. Leerhülsen als Positionierhilfen direkt in das Formenwerkzeug übertragen, da eine spätere exakte Detektion der Befestigungspunkte im gekrümmten Bauteil relativ schwierig ist.

Das komplexe Werkzeugkonzept mit den definierten drei Formen ist in Abb. 6.10 als Explosionszeichnung dargestellt. Aus diesem 3D-Entwurf wurden mittels der Rhino-Software die Fräsprogramme zur Fertigung der Formen (Werkzeuggrundkörper und Abstellkanten) erstellt. Dabei konnte der 3D-Entwurf durch die exakte Abstimmung der Software-Schnittstellen für die Überführung in das Fräsprogramm ohne weitere Zwischenschritte verwendet werden.

Im nächsten Schritt wurden auf der CNC-Fräse die Formen erstellt. Als Grundmaterial kamen 40 mm starke MDF-Holzwerkstoffplatten zum Einsatz, die vorab zu einem kompakten Fräsblock verklebt wurden. Dem Fräsvorgang auf der CNC-Maschine schlossen sich ein händisches Glätten der negativen Bauteiloberfläche und eine mehrschichtige Versiegelung sowie Harz-Beschichtung der Formwerkzeuge an. MDF-Werkstoffe haben sich für Formenwerkzeuge zur Herstellung von Sichtelementen als guter Kompromiss zwischen den Kriterien Materialpreis, Oberflächenqualität des Sichtbetons, Bearbeitungszeit in der Fräsmaschine und Standzeit des Formwerkzeuges (bis zu 50 Entformungen) erwiesen.

Mit den gefertigten Formenwerkzeugen wurde eine qualitativ hochwertige Herstellung der BetoTexG-Elemente in reproduzierbarer Sichtbetonqualität umgesetzt.

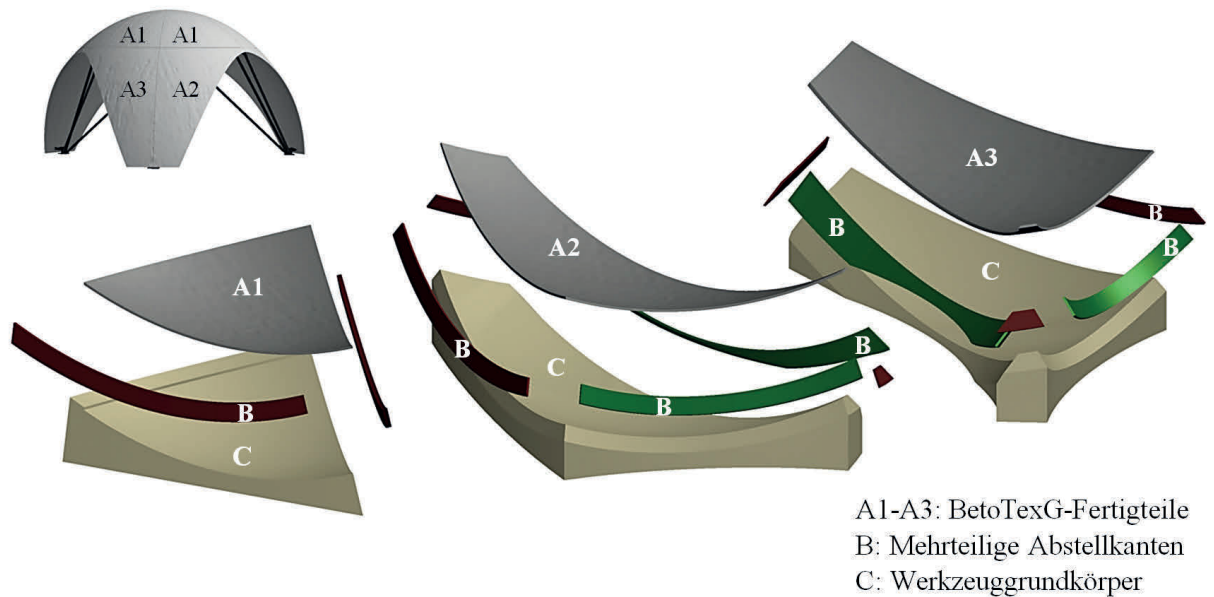


Abb. 6.10: Explosionszeichnung des modularen Werkzeugsystems mit zugehörigen BetoTexG-Fertigteilen

6.4.3 Fertigungstechnologie

Zur Fertigung des Textilbeton-GFK-Hybridpavillons CoFigloo kam ein ganzheitliches Technologiekonzept zum Einsatz, was auf die verschiedensten Geometrien, Oberflächenstrukturen und Anwendungen zu adaptieren ist. Dabei müssen jedoch die verschiedenen Verarbeitungs- und Aushärtezeiten der Hauptkomponenten des neuen BetoTexG-Hybridwerkstoffs berücksichtigt werden. Die Fertigung von BetoTexG beruht grundsätzlich auf den drei Stufen: (1) Herstellung der Textilbetonkomponente in der Schalung, (2) Applikation des Interlayers, (3) Aufbringen der GFK-Komponente (siehe Abb. 6.11).



Abb. 6.11: Fertigungsschritte der Elemente des BetoTexG-Hybridpavillons CoFigloo

Bei der Herstellung der Textilbetonschicht wurde der Feinbeton durch eine materialangepasste Spritztechnologie unter Verwendung eines eigens entwickelten Premixes aufgebracht. Die Zusammensetzung des Premixes erfolgte nach den Anforderungen hinsichtlich Festigkeit, Alkalität, Farbe und Verarbeitbarkeit. Besonderes Augenmerk war auf eine hohe Oberflächenqualität zu richten. Das eingebettete biaxiale 2D-Gewirk wurde in Bezug auf die

Übertragung maximaler Zugkräfte textiltechnisch optimiert, wobei nach der Herstellung des Glasfasergewirkes eine Imprägnierung mit Styrol-Butadien-Copolymerisat im Walzenverfahren durchgeführt wurde.

Entscheidend für ein positives Bauteilverhalten ist der gestreckte Verlauf der lastaufnehmenden Rovings im textilen Halbzeug, um einen unmittelbaren Lastabtrag im Textilbeton zu erreichen. Daher wurde eine formangepasste Beschichtung des Gewirkes vor der Integration in den Beton appliziert.

Der entwickelte Interlayer aus Epoxidharz und Polyester-Wabenvlies wurde 24 Stunden nach dem Betonieren aufgebracht, womit einerseits eine hohe Haftung und ein dauerhafter Verbund zwischen Textilbeton und GFK gewährleistet wird und andererseits eine ausreichende Flexibilität zwischen den Schichten zur Vermeidung von Rissen im Beton entsteht. Nach der Aushärtung des Interlayers wurden 4 Lagen Glasgewebe mit ungesättigtem Polyesterharz auf die Zwischenschicht im Handlaminierverfahren aufgetragen. Der GFK-Verbund trägt darüber hinaus wesentlich zur Erhöhung der Zug- und Biegezugfestigkeit bei.

Zur Online-Überwachung der Verbundschalen bieten sich im besonderen Maße die bereits in Kapitel 4 und 5 beschriebenen textilbasierten Sticksensoren an, die direkt in den Materialverbund integriert werden. Anhand der Dehnungsmessungen lassen sich kritische Spannungs- und Verzerrungszustände derartiger Verbundschalen erfassen.

6.4.4 Montage und Errichtung des Pavillons

Die Errichtung des BetoTexG-Pavillons CoFigloo erfolgte auf dem Technologie-Campus der TU Chemnitz. In einem ersten Arbeitsschritt wurde die Fundamentierung ausgeführt, wobei hier Fertigfundamente zum Einsatz kamen. Anschließend wurde die modulare Stahlunterkonstruktion aufgestellt und die punktuellen Multiachs-Befestigungselemente montiert. Dabei kamen verschiedene Arten des entwickelten Punkthaltesystems zur Anwendung und wurden in Bezug auf die Kombinationsvarianten an den Stoßpunkten der Einzelflächen untersucht (siehe Anlagen 9.6, Abb. 9.47). Am Scheitelpunkt, an dem die projiziert dreieckigen Dachelemente gefügt werden, sind 2-fach- und 4-fach-Halter angeordnet worden. Nach der Montage der Befestigungspunkte erfolgte der Einbau der Pavillonelemente mit anschließender Justierung.

Der fertige Forschungspavillon CoFigloo wird bereits seit Oktober 2011 zu umfassenden Tests unter Praxisbedingungen genutzt (siehe Abb. 6.12 und weiterführend Anlagen 9.6, Abb. 9.49). Im Vordergrund stehen Untersuchungen zum Materialverhalten unter extremen Witterungsbedingungen, wie etwa Untersuchungen zum Tieftemperaturverhalten unter Schnee und Eis im Winter sowie Verhalten bei hohen Temperaturen im Sommer. Zur Beurteilung des Materialverhaltens werden visuelle Betrachtungen durchgeführt und im Schadensfall bei der Detektion von Rissen (Rissöffnungsweite $\geq 1\text{mm}$) Proben entnommen, die anschließend experimentell untersucht und bewertet werden. Des Weiteren erfolgt die Verwendung integrierter Sticksensorik zur Bestimmung des Dehnungsverhaltens unter Temperaturbeanspruchung, womit das Langzeitverhalten des Pavillons unter realen Umgebungsbedingungen beurteilt werden kann.



Abb. 6.12: Forschungspavillon CoFigloo auf dem Technologie-Campus der TU Chemnitz

6.5 Potential der BetoTexG-Bauweise

Die werkstoffgerechte Kombination von textilverstärktem Beton und glasfaserverstärktem Kunststoff erlaubt einen neuen Hochleistungshybridwerkstoff BetoTexG für die nächste Generation von Leichtbaukonstruktionen für Bauanwendungen bereitzustellen, der die Vorteile beider Werkstoffe in Bezug auf die hohe mechanische Festigkeit, Dauerhaftigkeit, Gestaltungsfreiheit und kosteneffiziente Fertigung synergetisch zusammenführt. Durch die Applikation eines Interlayers bestehend aus Epoxidharz und Wabenvlies wurden neben der hohen Biegezug- und Zugfestigkeit im Verbund die notwendige Flexibilität im Hinblick auf die Kompensation von Spannungsunstetigkeiten über die Schichtdicke sowie eine hohe Dauerhaftigkeit erzielt.

Der eigens entwickelte BetoTexG verfügt – vor allem aufgrund seiner hohen Zugfestigkeit bei vergleichsweise geringer Dichte und hoher Formflexibilität – über ein sehr hohes Potential für Anwendungen in filigranen Leichtbautragwerken. Insbesondere bei leichten Schalenbauweisen kommen diese Vorteile voll zum Tragen. Im Vergleich des klassischen Betons, der relativ neuen Baustoffe: Textilbeton und ultrahochfester Beton (UHPC) lassen sich mit dem im Rahmen der Arbeit entwickelten Hybridwerkstoff BetoTexG die mit Abstand höchsten Zugfestigkeiten erreichen (vgl. Abb. 6.13). Die besonderen Leichtbaueigenschaften des BetoTexG gestatten neue organisch geformte Innen- und Außenhüllen für Bauwerke zu errichten, die mit derzeit bekannten Baustoffen kaum umgesetzt werden können.

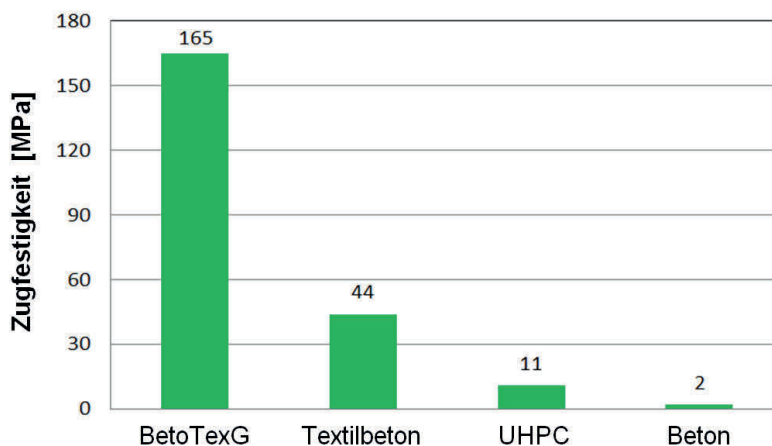


Abb. 6.13: Vergleich der Zugfestigkeiten von BetoTexG mit den Zugkennwerten derzeit bekannter Baustoffe

7 Zusammenfassung und Ausblick

Der Leichtbau im Bauwesen gewinnt in den letzten Jahren immer stärker an Bedeutung, denn nicht nur die Gewichtsreduktion bei Tragstrukturen, sondern auch die Rohstoffeinsparung während der Herstellung der Bauwerke sowie die daraus resultierenden wirtschaftlichen Aspekte sind gegenüber klassischen Massivbauweisen von entscheidendem Vorteil. Weitere Vorzüge des Leichtbaus ergeben sich unmittelbar für den Nutzer, indem neben der Nutzflächenmaximierung ein rascher Baufortschritt gewährleistet wird. Hauptanspruch des Leichtbaus ist der Entwurf, die Konstruktion und die Umsetzung von Tragwerken, die sich infolge Ausnutzung unterschiedlicher Varianten von Werkstoffen, Strukturen und Fertigungstechnologien durch ein geringeres Gewicht bei gleichzeitiger Beibehaltung oder sogar Erhöhung der Gebrauchsgüte auszeichnen. Außerdem bestehen beim intelligenten Leichtbau besondere Forderungen im Hinblick auf Funktionalisierung und Designfreiheit, wobei durch Integration von verschiedenen Elektroniksystemen der Kreativität keine Grenzen gesetzt sind. Für Anwendungen im Leichtbau sind hochfeste und hochsteife Verbunde mit geringer Dichte, belastungsgerechte filigrane Tragkonstruktionen sowie materialintegrierte Sensoren bereitzustellen. Die Forschungsarbeiten für derartige integrative Leichtbausysteme im Bauwesen befinden sich noch im Entwicklungsstadium.

In der vorliegenden Arbeit wurde zunächst ein wissenschaftlicher Überblick zum aktuellen Stand derartiger funktionsintegrativer Leichtbaustrukturen für tragende Anwendungen im Bauwesen gegeben. Dabei wurde der Fokus auf eigene Entwicklungen im Bereich multifunktionaler Werkstoffkombinationen und belastungsgerechter Strukturkomponenten bei hohem Leichtbaugrad gerichtet. Durch die Nutzung der Expertise aus verschiedenen Fachrichtungen, wie z. B. Maschinenbau, Fahrzeugbau sowie Luft- und Raumfahrttechnik konnten neue interdisziplinäre Ansätze generiert und anhand von Referenzbauwerken analysiert und getestet werden. Dazu zählen vor allem die im Forschungsbereich „Leichtbau im Bauwesen“ an der Professur SLK der TU Chemnitz entwickelten textilverstärkten und funktionsintegrierten Leichtbautragwerke.

Zur Erarbeitung der neuen Lösungen kamen erweiterte Methoden des Materialleichtbaus, Strukturleichtbaus und Systemleichtbaus zur Anwendung. Das Hauptaugenmerk lag auf leichten hochbeanspruchten Konstruktionen und neuen Gestaltungsvarianten für filigrane Tragwerke mit hoher Funktionsdichte sowie auf der Überführung der Forschungsergebnisse in baupraktische Anwendungen. Zu den besonderen Referenzobjekten mit den jeweiligen Alleinstellungsmerkmalen hinsichtlich Leichtbau und Funktionsintegration zählen: Integrierte tragende GFK-Sandwich-(ITS)-Schale, modulares GFK-Brückentragwerk in Wabenbauweise, Fassadensystem in filigraner Faserbeton-Leichtbauweise, Textilbewehrte Tragbetonelemente für den Lärmschutz, Textilbewehrte Beton-Schalenelemente (TexLeS) und Leichtbaukonstruktion in textilbewehrter Hybridbauweise (BetoTexG). Mit diesen Referenzobjekten wurden repräsentativ neue Wege für den Leichtbau im Bauwesen beschritten. Dabei basieren die eigens entwickelten Leichtbaustrukturen für Tragwerke des Bauwesens auf "maßgeschneiderten" textilverstärkten Verbundwerkstoffen. Im Rahmen der Arbeit konnte das hohe Potential dieser Werkstoffgruppe in Bezug auf hohe spezifische Festigkeit, Steifigkeit und

Dauerhaftigkeit sowie ressourceneffiziente Herstellung, Funktionsintegration und belastungsgerechte Gestaltung ausgeschöpft werden. Für die Überführung der faserverbundbasierten Leichtbauweise in die Baupraxis fehlen allerdings noch die gesetzlichen Vorschriften, die eine bauaufsichtliche Zulassung dieser neuen Werkstoffgruppe gestatten. So etwa werden neue Normen und Prüfverfahren zwingend benötigt, die auf Basis der Erkenntnisse aus der Forschung, Praxiserfahrungen und Referenzobjekten zu erarbeiten sind. Darauf aufbauend müssen dann Baugenehmigungsverfahren für Leichtbautragwerke im Hinblick auf Nachweisführung, Prüfverfahren und Zulassungsprozess deutlich vereinfacht werden (siehe dazu Abb. 7.1). Weiterhin sollten die fehlenden Langzeiterfahrungen durch bauteilintegriertes Monitoring kompensiert werden. Zudem lassen sich durch eine strukturintegrierte Überwachung die hohen Sicherheitsbeiwerte, insbesondere bei Faser-Kunststoff-Bauteilen, erheblich reduzieren.

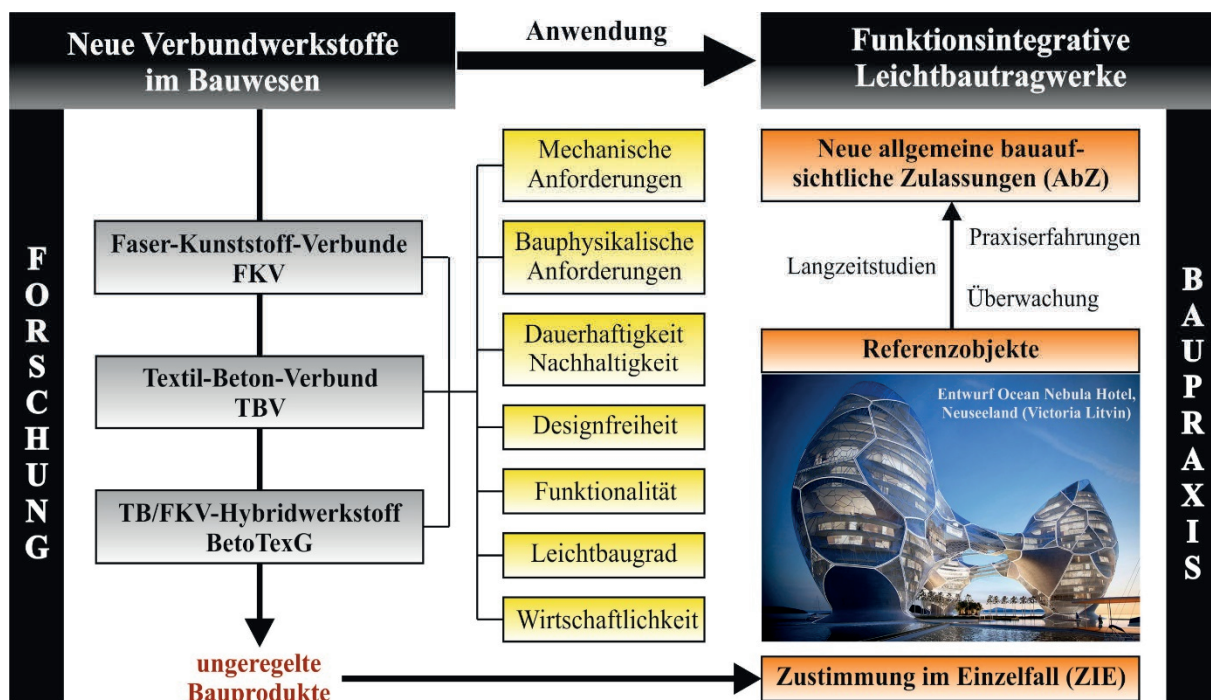


Abb. 7. 1: Schematische Zukunftsanalyse des Leichtbaus im Bauwesen

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten neuen Lösungsansätze zur Errichtung funktionsintegrativer Leichtbaustrukturen im Bauwesen sind Wegbereiter für neue Anwendungen von FKV-Tragstrukturen, textilbewehrten Betonfertigteilen und Textilbeton-GFK-Hybrid-elementen (BetoTexG) im Tragwerksbau. Darüber hinaus leisten die erarbeiteten material-technischen, konstruktiven und technologischen Grundlagen einen signifikanten Beitrag zur wirtschaftlichen Herstellung von hochbeanspruchten komplexen Leichtbausystemen mit hoher Leistungs- und Funktionsdichte. Die Bereitstellung derartiger neuer Referenzobjekte im Maßstab 1:1 ist dabei der Garant dafür, den noch ausstehenden Durchbruch für den kommerziellen Einsatz von FKV und Textilbeton sowie BetoTexG im Bauwesen zu vollziehen. Mit dieser Forschungsarbeit wurden wesentliche Grundlagen für die Anwendung des intelligenten Leichtbaus im Bauwesen geschaffen und durch eigene Referenzen ein beispielgebender Weg für funktionsintegrativen Leichtbau aufgezeigt.

– Die Baukunst der Zukunft bedarf des Leichtbaus –

8 Verzeichnisse

8.1 Literaturverzeichnis

- [Als98] *Alsayed, S. H.*: Flexural behaviour of concrete beams reinforced with GFRP bars. *Cement and Concrete Composites* 20. 1998, S. 1-11.
- [Bai04] *Baier, V.B.*: Leichtbau mit Membranen - Neue Entwicklungen, Materialien, Konstruktionen. In: *ESSENER UNIKATE* 23/2004, 2004
- [Bau14] *Bauer, M.; Wallasch, R.; Tirschmann, R.; Spieler, M.; Nendel, W.; Kroll, L.*: MEFORM 2014. Production and processing of clad materials and metal matrix composites. Freiberg: TU Bergakad. 2014, S. 231-237
- [Bay04] *Bayer, V.; Ruth, J.*: Faserverstärkte Kunststoffe im Bauwesen. Beitrag zum 7. Informationstag des IKI der Bauhaus Universität Weimar, 2004
- [Ber09] *Bergmeister, K; u.a.*: Verankerungs- und Befestigungstechnik für Fassaden. In: *Beton-Kalender. Konstruktiver Hochbau. Aktuelle Massivbaunormen. Jahrgang 98*, Ernst&Sohn 2009
- [Bra06] *Bramshuber, W.*: State-of-the-Art report of RILEM Technical Committee TC 201-TRC 'Textile Reinforced Concrete'. Bagnex: RILEM Publ 2006.
- [Bra10] *Bramshuber, W.; u.a.*: Textile Reinforced Concrete (2nd Int. Conference of Textile Reinforced Concrete (ICTRC). Proceedings of the International RILEM Conference on Material Science (MatSci). Vol. 1). Bagnex : RILEM Publ. s.a.r.l, 2010, S. 353-364
- [Bri84] *Brinkmann, G.*: Leicht und Weit. Ergebnisse aus dem Sonderforschungsbereich 64. Weitgespannte Flächentragwerke. Selbstverlag Universität Stuttgart 1984
- [Bür14] *Bürgermeister, S.; Buschbeck, S.; Reinhardt, M.; Rinberg, R.*: Naturfaserverstärkte (Bio-) Kunststoffe - Nachhaltige Innovationen bei Verbundwerkstoffen. In: *Tagungsband Verbundwerkstoffe*. Jena: Conventus Congressmanagement & Marketing. 2013, S.64-68
- [But08] *Butler, M.*: Zur Dauerhaftigkeit von Verbundwerkstoffen aus zementgebundenen Matrices und alkaliresistenten Glasfaser-Multifilamentgarnen. Techn. Univ. Dresden. Fak. Bauingenieurwesen. 2009
- [Cev11] *Cevik, A.*: Modeling strength enhancement of FRP confined concrete cylinders using soft computing. *Expert Systems with Applications* 38. 2011, S. 5662–5673.
- [Che11] *Cherif, C.*: *Textile Werkstoffe für den Leichtbau. Techniken - Verfahren - Materialien - Eigenschaften*. Springer Berlin 2011
- [Cur08] *Curbach, M.; u.a.*: Textilbewehrter Beton – Innovativ! Leicht! Formbar! In: *BetonWerk International* 11. 2008, S. 62-65
- [Cur09] *Curbach, M.; Jesse, F.*: Verstärken mit Textilbeton. In: *Beton-Kalender 2010-Teil 1*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. 2010, S. 457-565

- [Cur11] *Curbach, M.; u.a.*: Verstärken mit Textilbeton – Weg von der Vision zur Anwendung. In: Der Prüferingenieur 39. 2011, S. 32-44
- [Dre07] *Drechsler, K.; u.a.*: Leichtbau. Entwicklung, Bedeutung und Disziplin. In: Themenheft Forschung Nr. 3. Universität Stuttgart 2007
- [Deg09] *Degischer, H.-P., Lüftl, S.*: Leichtbau. Prinzipien, Werkstoffauswahl und Fertigungsvarianten. Wiley-VCH Weinheim 2009
- [DFG09] *DFG_SPP1542*: Antrag an die DFG auf Einrichtung eines Schwerpunktprogramms Leicht Bauen mit Beton: Grundlagen für das Bauen der Zukunft mit bionischen und mathematischen Entwurfsprinzipien. Dresden 2010
- [Dic13] *Dickert, M.; Kroll, L.; Nossol, P.; Tröltzsch, J.; Ziegmann, G.*: Entwicklung von Prozessen zur Bauteilfertigung. In: Leichtbau mit Textilverstärkung für Serienanwendungen. Auerbach: Verlag Wissenschaftliche Scripte 2013
- [Doe14] *Doerffel, C.; Vogel, T.; Spieler, M.; Nendel, W.; Kroll, L.*: Integrierter Prozess für ein Hybridbauteil aus Polypropylen. In: Fachzeitschrift Kunststoffe Nr. 11. 2014, S. 48-52
- [Edm87] *Edmondson, A. C.*: A Fuller explanation. The synergetic geometry of R. Buckminster Fuller. Birkhäuser Boston 1987
- [Ehl12] *Ehlig, D.; Schladitz, F.; Frenzel, M.; Curbach, M.*: Textilbeton – Ausgeführte Projekte im Überblick. Beton- und Stahlbetonbau 107. 2012, S. 777-785
- [Ehr92] *Ehrenstein, G. W.*: Faserverbund-Kunststoffe. Werkstoffe, Verarbeitung, Eigenschaften. Hanser München 2006
- [Ehr02] *Ehrenstein, G. W.*: Mit Kunststoffen konstruieren. München: Hanser 2007
- [Ehr04] *Ehrenstein, G. W.*: Handbuch Kunststoff-Verbindungstechnik. Hanser München 2004
- [Ehr11-1] *Ehrlich, A.*: Prüfbericht MeTeOr – ITS-Schale, PUR-Schaum, Chemnitz, 2011
- [Ehr11-2] *Ehrlich, A.; Gelbrich, S.; Kroll, L.; Müller, S.*: Faserverbunde in der Architektur: Referenzgebäude MeTeOr. DGM-Tagung: Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde. Chemnitz 2011
- [Ehr11-3] *Ehrlich, A.; Demmig, S.; Müller, S.; Kroll, L.*: Beitrag zur statischen Berechnung MeTeOr-Projekthaus der Technischen Universität Chemnitz: Nachweis GFK-Fassadenteil. Chemnitz 2011
- [Ehr11-4] *Ehrlich, A., Gelbrich, S.*: Organisch geformte Fassaden in Leichtbauweise. Tagungsband zum 10. Bautechnik-Forum. Chemnitz 2011
- [Ehr14] *Ehrlich, A.; Gelbrich, S.*: Leichtbauwabenbrücke für Chemnitz. 13. Bautechnik-Forum. Chemnitz 2014, S. 109-128
- [Ehr15] *Ehrlich, A.; Gelbrich, S.; Rudolph, E.; Röhrkohl, M.; Kroll, L.; Heinrich, M.; Leibelt, J.; Schindler, E.*: Interaktive Wabenbrücke in Chemnitz. In: Zeitschrift Brückenbau Ausgabe 6 . Verlagsgruppe Wiederspahn. 2014

- [Els08] *Elsner, H.; Heinrich, M.; Zopf, H.*: Gestickte Sensoren für Hochleistungs-Faserverbundkunststoffe. VDI-Wissensforum Kunststofftechnik für Sensoren und Aktoren. Fürth 2008
- [Els09] *Elsner, H.; Kroll, L.*: Strukturelle Integration von Sensorsystemen in Leichtbauverbundstrukturen im Massenfertigungsverfahren. In: Krenkel, W. (Hrsg.): Verbundwerkstoffe, 17. Symposium Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde. Weinheim: WILEY-VCH Verlag 2009, S. 608-614
- [Fab63] *Faber, C.*: Candela, the shell builder. New York: Reinhold Pub. Corp. 1963
- [Fle 95] *Flemming, M.; Ziegmann, G.; Roth, S.*: Faserverbundbauweisen. Fasern und Matrices. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag 1995
- [Fle96] *Flemming M.; Ziegmann, G.; Roth, S.*: Faserverbundbauweisen. Halbzeuge und Bauweisen. Berlin, u.a: Springer Verlag 1996
- [Fle99] *Flemming, M.; Roth S.*: Faserverbundbauweisen – Fertigungsverfahren mit duroplastischer Matrix. Berlin: Springer 1999
- [Fre05] *Freger, G. E.; Kestelman, V. N.; Freger, D. G.*: Braiding Pultrusion Technology: For Advanced Structural Composites. McGraw - Hill Engineering Reference, 2005
- [Ful74] *Fuller, R. Buckminster*: Konkrete Utopie. Die Krise der Menschheit und ihre Chance zu überleben. Econ Verlag GmbH 1974
- [Fül04] *Füllsack-Köditz, R.*: Verbundverhalten von GFK-Bewehrungsstäben und Rissentwicklung in GFK-stabbewehrten Betonteilen. Weimar: IKI; Univ.-Verl. 2004
- [Fun12-1] *Funke, H.; Gelbrich, S.; Ehrlich, A.*: Entwicklung eines neuen Hybridwerkstoffes aus textilbewehrtem Beton und glasfaserverstärktem Kunststoff. In: Tagungsband 18. Band 2 Ibausil. Weimar: 2012, S. 219-226.
- [Fun12-2] *Funke, H.; Gelbrich, S.; Ehrlich, A.*: Organisch geformtes Fassadensystem aus Faser-Kunststoff-Verbund und Textilbeton. In: Tagungsband Tagung Bauchemie. Schweiz 2012, S. 150-155.
- [Fun13-1] *Funke, H.; Gelbrich, S.; Ehrlich, A.*: A new hybrid material of textile reinforced concrete and glass fibre reinforced plastic for lightweight structures in civil engineering. In: Wanner, A.; Weidenmann K. (Hrsg.): 19. Symposium Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde. 2013, S. 290-296
- [Fun13-2] *Funke, H.; Gelbrich, S.; Kroll,L.*: A New Hybrid Material of Textile Reinforced Concrete and Glass Fibre Reinforced Plastic. Journal of Materials Science Research Volume 2 No. 3. 2013, S. 96-102
- [Fun13-3] *Funke, H.; Gelbrich, S.; Ehrlich, A.*: Development of a new hybrid material of textile reinforced concrete and glass fibre reinforced plastic. In: Procedia Materials Science. Materials Science Engineering, Symposium B6 - Hybrid Structures. Volume 2, 2013, S. 103-110

- [Fun13-4] *Funke, H.; Gelbrich, S.; Ehrlich, A.*: Ein neuer Hybridwerkstoff aus Textilbeton und glasfaserverstärktem Kunststoff für Leichtbaustrukturen im Bauwesen. In: Tagungsband Tagung Bauchemie. Schweiz 2012, S. 68 -73.
- [Fun14-1] *Funke, H.; Gelbrich, S.; Ehrlich, A.; Kroll, L.*: A Fiber-Reinforced Architectural Concrete for the Newly Designed Façade of the Poseidon Building in Frankfurt am Main. *Journal of Materials Science Research*. Volume 3. 2014, S. 33-39
- [Fun14-2] *Funke, H.; Gelbrich, S.; Ehrlich, A.; Kroll, L.*: Rheological and mechanical development of a fiber-reinforced concrete for an application in civil engineering. *SOJ Materials Science & Engineering*. Volume 2, 2014, S. 1-4
- [Fun14-3] *Funke, H.; Gelbrich, S.; A.; Kroll, L.*: Entwicklung eines glasfasermodifizierten Architekturbetons für die Fassadengestaltung des Poseidon-Hauses in Frankfurt a. M. In: Breitenbücher, R.; Mark, P.: Beiträge zur 1. DAfStb-Jahrestagung mit 54. Forschungskolloquium. Ruhr-Universität Bochum 2013, S. 29-34.
- [Fun14-4] *Funke, H.; Ehrlich, A.; Gelbrich, S.; Kretschmar, D.*: Freigeformte Fassaden in Architekturbeton. Beitrag zum Tagungsband: 12. Bautechnik-Forum. Chemnitz 2013, S. 123-142.
- [Fun14-5] *Funke, H.; Gelbrich, S.; Ehrlich, A.*: Formation of a new hybrid material of textile reinforced concrete and glass fibre reinforced plastic. *Proceedings of the Fourth Vol. 1. International fib Congress*. Mumbai 2014
- [Fun14-6] *Funke, H.; Gelbrich, S.; Ehrlich, A.*: Textile reinforced concrete and glass fiber reinforced plastic - A new hybrid material for lightweight structures in civil engineering. *CIC2014 - The 1st Concrete Innovation Conference*. Norwegen 2014, S. 38
- [Fun14-7] *Funke, H.; Gelbrich, S.; Ehrlich, A.; Ulke-Winter, L.; Kroll, L.*: Unsymmetrical Fibre-Reinforced Plastics for the Production of Curved Textile Reinforced Concrete Elements. In: *Open Journal of Composite Materials*. 2014, S. 191-200
- [Fun15-1] *Funke, H.; Gelbrich, S.; Ehrlich, A.; Ulke-Winter, L.; Kroll, L.*: Anisotropic fibre-reinforced plastics as formworks for single and double-curved textile reinforced concrete. In: *Journal of Materials Science Research*. Volume 4 No. 1. 2015, S. 36-45
- [Fun15-2] *Funke, H.; Gelbrich, S.*: Noise barriers using a lightweight, textile-based construction method. In: *Concrete Plant International*, 2015, S. 146-150
- [Fun15-3] *Funke, H.; Gelbrich, S.; Ulke-Winter, L.; Kroll, L.; Petzoldt, C.*: An application of asymmetrical glass fibre-reinforced plastics for the manufacture of curved fibre reinforced concrete. In: *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology*. Volume 4. 2015, S. 732-740
- [Fun15-4] *Funke, H.; Gelbrich, S.*: Lärmschutz in textildbewehrter Leichtbausweise - Wissenschaftliche Grundlagen und baupraktische Umsetzung. In: *BWI BetonWerk International Ausgabe 1*. 2015, S. 152-155
- [Gao07] *GAO, S.-L.; u.a.*: Nanostructured coatings of glass fibers: Improvement of alkali resistance and mechanical properties. In: *Acta Materialia* 55. 2007, S. 1043-1052

- [Gel08] *Gelbrich, S.*: Beitrag zur Entwicklung von Krafteinleitungselementen für hochbeanspruchte Faserverbund-Zugstreben. In: Schriftenreihe Strukturleichtbau Band 12, TU Chemnitz 2008
- [Gel09] *Gelbrich, S.; Mäder, E.; Plonka, R.*: Material integrated textile sensors in lightweight structures. In: Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure. Proceedings of the 4th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure. Zürich 2009, S. 329-350
- [Gel10] *Gelbrich, S.; Pfalz, M.*: Organisch geformte Hybridstrukturen mit belastungsgerechter Faserverstärkung. Von der Natur lernen: (R)Evolution in der Entwicklung technischer Systeme für den Apparate- und Anlagenbau. Frankfurt/M. 2010
- [Gel12-1] *Gelbrich, S.; Funke, H.; Ehrlich, A.*: Fertigung eines Pavillons aus dünnwandigen gekrümmten Textilbetonschalen. In: Tagungsband 18. Ibausil Band 2. Weimar 2012, S. 554-560
- [Gel12-2] *Gelbrich, S.; Funke, H.; Ehrlich, A.; Kroll, L.*: Organisch geformter Hybridwerkstoff aus textilbewehrtem Beton und glasfaserverstärktem Kunststoff. In: 4. Anwendertagung "Textilbeton in Theorie und Praxis". Dresden 2012
- [Gel13-1] *Gelbrich, S.; Funke, H.; Ehrlich, A.; Petzold, C.; Kroll, L.*: Prüfbericht zur Erlangung einer Zulassung im Einzelfall für Textilbetonpavillons. In: Prüfgegenstand: Textilbeton für Überdachungen für Atomino e.V. Chemnitz 2013
- [Gel13-2] *Gelbrich, S.; Funke, H.; Ehrlich, A.; Petzold, C.; Kroll, L.*: Flexible GFK-Schalen zur Herstellung von gekrümmten Textilbeton-Leichtbauelementen. In: 5. Anwendertagung Textilbeton. Friedrichshafen 2013
- [Gel13-3] *Gelbrich, S.; Lange, R.; Kroll, L.*: Sensor zur Bestimmung der Restfeuchte in zementbasierten Konstruktionen. In: Poster zur Tagung Werkstoffprüfung: Fortschritte in der Werkstoffprüfung für Forschung und Praxis. Neu-Ulm 2013
- [Gel14-1] *Gelbrich, S.; Funke, H.; Kroll, L.*: Development of new hybrid lightweight material: TRC-GFRP composite material for free-form surfaces. In: Proceedings of 7th international Conference on Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites in Civil Engineering. Canada 2014, S. 190
- [Gel14-2] *Gelbrich, S.; Ehrlich, A.; Petzoldt, C.; Kroll, L.*: Flexible fibre reinforced plastic-formworks for the production of curved textile reinforced concrete. In: Proceedings of 7th international Conference on Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites in Civil Engineering. Canada 2014, S. 101
- [Gel14-3] *Gelbrich, S.; Kroll, L.; Funke, H.; Ehrlich, A.; Ulke-Winter, L.; Petzoldt, C.*: Flexible GFK-Schalungen zur Herstellung von doppelt gekrümmten Beton-Leichtbauelementen mit stabilisierten Abstandsgewirken. In: Leicht Bauen mit Beton – Forschung im Schwerpunktprogramm 1542 Förderphase 1. Dresden 2014, S. 198-207
- [Gel14-4] *Gelbrich, S.*: Textilbewehrte Leichtbauschalen. Ergebnisbroschüre zum Chemnitzer LeichtBAU-Forum. Chemnitz 2014

- [Gel15-1] *Gelbrich, S.; Ehrlich, A.; Petzold, C.*: Integration von freigeformten textilen Bewehrungen zur Herstellung dünnwandiger Betonschalen. In: Tagungsband 19. Ibausil Band 1. Weimar 2015, S. 1295-1300
- [Gel15-2] *Gelbrich, S.; Petzold, C., Röhrkohl, M.; Müller, C.; Freund, J.; Kroll, L.*: Textile reinforced lightweight shells. In: 20th Symposium on Composites. Materials Science Forum Vols 825-826 Part 1. 2015, S. 319-327
- [Gen06] *Genzel, E.*: Zur Geschichte der Konstruktion und der Bemessung von Tragwerken des Hochbaus aus faserverstärkten Kunststoffen 1950-1980. Bauhaus-Universität Weimar 2006
- [Gle98] *Gleich, A.v.*: Bionik. Ökologische Technik nach dem Vorbild der Natur. Teubener Verlag Stuttgart 1998
- [Gre07] *Greiner, S.*: Zum Tragverhalten von Schalen aus ultrahochfestem Faserfeinkornbeton (UHFFB). Z. In: Beton- und Stahlbetonbau Volume 100. 2005, S. 77-80
- [Gru09] *Grupp, P.*: Schalungs-Atlas. Schalungssysteme und Einsatz in der Praxis. VBT Verlag Bau u. Technik 2009
- [Ham08] *Hamsen, K.-H.*: Theorie und Praxis der Textilbeschichtung - Polyvinylchlorid als Beschichtungsrohstoff. In: Proceedings. Praxisseminar Textilbeschichtung. Mönchengladbach und Dormagen: 2008
- [Heg11] *Hegger, J.; Will, N.; Schneider, M.*: Textilbeton: Tragverhalten – Bemessung – Sicherheit. In: Textilbeton in Theorie und Praxis. Tagungsband zum 6. Kolloquium zu textilbewehrten Tragwerken (CTRS6). TU Dresden 2011, S. 269 – 284
- [Hei96] *Heinle, E.; Schlaich, J.*: Kuppeln aller Zeiten-aller Kulturen. Deutsche Verlags-Anstalt Stuttgart 1996
- [Hei15] *Heinrich, M., Gelbrich, S.; Bauer, A; Röhrkohl, M.; Kroll, L.*: Novel Strain Gauge Sensor made by Embroidery Technology for Integration in Concrete. SMAR 2015. Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures. Antalya 2015
- [Hel06] *Helms, O.*: Konstruktion und technologische Umsetzung von hochbeanspruchten Lasteinleitungssystemen für innovative Leichtbaustrukturen in Faserverbundbauweise. Dissertation, TU Dresden 2006
- [Hen11] *Henning, F.; Moeller, E.*: Handbuch Leichtbau: Methoden, Werkstoffe, Fertigung. München und Wien: Carl Hanser Verlag, 2011
- [Hön99] *Hönninger, H.; Friebe, G.; Schmarje, W.S.*: Werkstoffuntersuchungen zum Lebensdauernachweis von GFK-Antennenträgern auf Fernsehtürmen. In: 2. Internationale AVK-TV Fachtagung für faserverstärkte Kunststoffe und duroplastische Formmassen. Baden-Baden 1999
- [Huf08] *Hufenbach, W.; Adam, F.; Werner, J.*: Mit Leichtigkeit zur mehr Effizienz. In: Workshop des RGM-Metall-Netzwerkes innerhalb des BMWi-Impulsprogrammes „NeMat“ Phase 2. Glaubitz 2008

- [Iwa14] *Iwan, S.; Klärner, M.; Kroll, L.*: Elastische und dynamische Eigenschaften von Faserverbunden aus Vlieshalbzeugen. In: Tagungsband 14. Chemnitzer Textiltechnik-Tagung: Mehrwert durch Textiltechnik. Chemnitz 2014, S. 191-198
- [Jae05] *Jaeger, F.*: Ingenieurporträt. Frei Otto. Architekt, Konstrukteur und Visionär, Förderer der Leichtbauweise. In: deutsche Bauzeitung, 139. Jg., Nr. 6. 2005, S. 72-77
- [Jes04] *Jesse, F.*: Tragverhalten von Filamentgarnen in zementgebundener Matrix. Dissertation, 2004
- [Kau14] *Kaufmann, J.*: Beitrag zu anisotropiebedingten Koppelleffekten bei rotationsymmetrischen mehrschichtigen Faserverbundbauteilen. Dissertation, TU Chemnitz 2014
- [Kla10] *Klaus, W.; Helbig, F.; Kroll, L.*: Leichtbau bald in Großserie? Textilverstärkte Spritzgussteile. In: Kunststoffe. 100, Nr. 3, 2010, S. 106-108
- [Kle11] *Klein, B.*: Leichtbau-Konstruktion. Berechnungsgrundlagen und Gestaltung. Wiesbaden Springer 2011
- [Kle05] *Klein, B.*: Leichtbau-Konstruktion. Vieweg Verlag 2005
- [Kna09] *Knacker, K.*: Innovation durch Adaption. Formfindung bei Herzog & de Meuron. Z. Artefakt. In: Zeitschrift für junge Kunstgeschichte und Kunst Nr.6 2009
- [Kni12] *Knippers, J.; Scheible, F.; Oppe, M.; Jungjohann, H.*: Bio-inspired Kinetic GFRP-façade for the Thematic Pavilion of the EXPO 2012 in Yeosu. Proceedings of the IASS-APCS-Symposium on 21-24 May. Seoul, Korea 2012
- [Köh98] *Köhler E.; Bergner A.*: Faserverbundkonstruktion. Schriftenreihe Faserverbundkonstruktion. TU Chemnitz 1998
- [Köh13] *Köhler, C.*: Biobased plastics for exterior facades. In: Bioplastics Magazine Vol. 8, 2013, S. 12-14
- [Kol12] *Kolshorn, K.-U.; Kroll, L.; Seidlitz, H.; Ulke-Winter, L.; Müller, S.; Czech, A.; Hoyer, K.-H.; Grothaus, R.*: Erste CFK-Kupplung für Schienenfahrzeuge. In: Lightweight Design. Nr. 5, 2012, S. 38-43
- [Kro92] *Kroll, L.*: Zur Auslegung mehrschichtiger anisotroper Faserverbundstrukturen. Dissertation, TU Clausthal 1992
- [Kro05] *Kroll, L.*: Berechnung und technische Nutzung von anisotropiebedingten Werkstoff - und Struktureffekten für multifunktionale Leichtbauanwendungen. Habilitationsschrift, TU Dresden 2005
- [Kro07] *Kroll, L.; Nendel, W.*: Konstruktion und Fertigung textilverstärkter Hochleistungskomponenten in Hybridbauweise. Kolloquium: 50 Jahre Cetex. Chemnitz 2007
- [Kro08] *Kroll, L.; Czech, A.; Müller, S.*: Zuverlässige Festigkeitsanalyse von Faserverbundbauteilen durch Anwendung bruchmodebezogener Versagenskriterien und automatisierter Auswertemethoden. In: 13th International Conference Polymeric Materials. Halle (Saale) 2008

- [Kro12-1] *Kroll, L.; Endig, A.*: Textile Reinforced Hybrid Structures for Lightweight Applications. Kolloquium: Wrought Magnesium Alloys: Resource-efficient Production and Applications. Freiberg 2012
- [Kro12-2] *Kroll, L.; Kaufmann, J.; Schramm, N.*: Großseriennahe Fertigungsverfahren für hochbelastete thermoplastische Leichtbaustrukturen. In: MATERIALICA München 2012
- [Kro13-1] *Kroll, L.; Schramm, N.*: Ressourceneffiziente Prozessketten für den Strukturleichtbau. In: Tagungsband 11. Freiburger Polymertag - Flexible Verbundmaterialien mit thermoplastischen Beschichtungssystemen. Freiberg 2013
- [Kro13-2] *Kroll, L.; Kaufmann, J.; Gerstenberger, C.*: Faserverbundwerkstoffe - Einsatz moderner Materialien im Lokomotivbau. DMG-Fachsymposium: Lokomotiven - die ressourceneffiziente Fertigung und kostenoptimierte Wartung. Chemnitz 2013
- [Kro14-1] *Kroll, L.; Tröltzsch, J.*: Funktionsgerechte Halbzeuge für Hochleistungsbauteile in Großserie im Bundesexzellenzcluster MERGE. In: Faszination Leichtbau – Konzepte, Werkstoffe, Technologien Braunschweig. IST Niedersachsen 2014, S. 161-166
- [Kro14-2] *Kroll, L.; Schramm, N.; Nendel, W.*: Merge Technologies for Multifunctional Lightweight Structures, Federal Cluster of Excellence “MERGE”. In: International Conference & Exhibition on Thermoplastic Composites (ITHEC). Bremen 2014
- [Lei06] *Leiser, J.*: Beitrag zu innovativen Verbindungstechniken für Hochleistungsverbundwerkstoffe. Schriftenreihe Strukturleichtbau, Dissertation, TU Chemnitz 2006
- [Lem08] *Lemken, Thomas*: Alte Orte, neuer Glanz – ressourceneffizientes Bauen und Wohnen im Bestand. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH 2008
- [Leo40] *Leonhardt, F.*: Leichtbau - eine Forderung unserer Zeit. Anregungen für den Hoch - und Brückenbau. In: Die Bautechnik 18 Nr. 36/37, 1940, S.413-423
- [Lin14] *Lindner, M.; Gelbrich, S.; Kroll, L.*: Basaltfasern im Bauwesen - Überblick zum Stand der aktuellen Forschungen. Cluster-Treff/Basaltfaser-Forum. Basalt und Bau - Dimensionierung, Planung, Einsatz von Verstärkungsfasern. Spalt 2014
- [Meh10] *Mehlhorn, G.*: Handbuch Brücken: Entwerfen, Konstruieren, Berechnen, Bauen und Erhalten. Springer 2010
- [Mei09] *Meier, U.*: CFK-Zugglieder im Bauingenieurwesen und in der Architektur. In: Tagungsband zur Tagung Composites in Architecture. Weimar 2009
- [Mic90] *Michaeli, W.; Wegener, M.*: Einführung in die Technologie der Faserverbundwerkstoffe. München: Carl Hanser Verlag 1990
- [Mot08] *Mott, R.; Brameshuber, W.*: Serielle Einzelfertigung (Stückfertigung) von Bauteilen aus textilbewehrtem Beton. Aachen: Institut für Bauforschung 2008, S. 137

- [Mül09] *Müller, J.*: Membran-Bau-Material. In: Umriss. Zeitschrift für Baukultur 9 Nr. 2, 2009
- [Mum10] *Mumenya, S.; Tait, R.; Alexander, M.*: Mechanical behaviour of Textile Concrete under accelerated ageing conditions *Cement & Concrete Composites* 32. 2010, S. 580-588.
- [Nac10] *Nachtigall, W.*: Bionik als Wissenschaft. Erkennen, Abstrahieren, Umsetzen. Springer Berlin 2010
- [Nac13] *Nachtigall, W.; Pohl, G.*: Bau-Bionik. Natur - Analogien - Technik, Springer Berlin 2013
- [Nau14] *Naumann, M. D.; Meyer, M.; Nendel, W.; Kroll, L.*: Leichtbautechnologien für den Fahrzeugbau in Großserie. In: 7. Chemnitzer Karosseriekolloquium Effiziente Flexibilisierung im Karosseriebau: 2014, S. 93-102
- [Nei04] *Neitzel, M.; Mitschang, P.*: Handbuch der Verbundwerkstoffe - Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung. Carl Hanser München 2004
- [Nen12] *Nendel, S.; Kroll, L.; Grünert, J.; Heinrich, H.-J.*: Energie- und Ressourcenschonende Herstellung von unidirektionalen thermoplastischen UD-Halbzeugen und ihre Verarbeitung. In: Tagungsband 13. Chemnitzer Textiltechnik-Tagung: Wertschöpfungspotenzial Textiltechnik. Chemnitz 2012, S. 297-303
- [Nes13] *Nestler, D.; Jung, H.; Wielage, B.; Nendel, S.; Tröltzsch, J.; Kroll, L.*: Innovative Hochleistungs-Hybridlaminat mit variablen Faserkomponenten. In: 19. Symposium Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde. 2013, S. 272-277
- [Ner05] *Nerdinger, W.*: Frei Otto, Das Gesamtwerk: Leicht bauen, Natürlich gestalten. Zur Ausstellung der TU München in der Pinakothek der Moderne, 2005
- [Nos13] *Nossol, P.; Czech, A.; Kroll, L.*: Experimental investigation of dynamic behaviour of thermoplastic fibre reinforced laminates. In: *Composites Theory and Practice*. Publisher: Polish Society of Composite Materials Publishing Services Nr 2. 2013, S. 128-134
- [Off04] *Offermann, P.; Engler, Th.; Gries, Th.; Roye, A.*: Technische Textilien zur Bewehrung von Betonbauteilen. In: *Beton- und Stahlbetonbau*. 99. Nr. 6, 2004, S. 437-443
- [Ott11] *Otto, F., P.*: Architektur – Für wen? Leichtbausymposium Chemnitz. Chemnitz 2011
- [Ott88] *Otto, F., P.*: Form – Form-Kraft-Masse. IL 22, Stuttgart 1988
- [Ott82] *Otto, F., P., Barthel, R.; Burkhardt, B.*: Natürliche Konstruktionen Formen und Konstruktionen in Natur und Technik und Prozesse ihrer Entstehung. Verlag Dva Stuttgart 1982
- [Osi14] *Osiecki, T.; Seidlitz, H.; Gerstenberger, C.; Kroll, L.; Scholz, P.*: Customized Metal/Composite Hybrids for Automotive Applications. In: Tagungsband AutoMetForm/SFU 2014. New Materials for Vehicle Components. Freiberg 2014, S. 29-36

- [Ost14] *Osterroth, C.; Gogoladze, G:* Erfahrungen und Perspektiven mit Basaltfasern in Bauanwendungen. Cluster-Treff/Basaltfaser-Forum. Basalt und Bau - Dimensionierung, Planung, Einsatz von Verstärkungsfasern. Spalt 2014
- [Pet15] *Petzoldt, C., Röhrkohl, M.; Müller, C.; Konzak, T.; Freund, J.; Gelbrich, S.; Müller, A.; Ashrafi, M.; Hauke, J.:* Textilbewehrte Leichtbauschalen in ressourceneffizienter Beton-GFK-Verbundbauweise für organisch geformte Innen- und Außenhüllen von Bauwerken – TexLes. In: Abschlussbericht zum ESF-Förderprojekt Nachwuchsforschergruppe der Sächsischen Aufbaubank. Chemnitz 2015
- [Pol03] *Polónyi, S.; Walochnik, W.:* Architektur und Tragwerk. Ernst und Sohn Berlin 2003
- [Raf08] *Rafi, M.; u.a.:* Aspects of behaviour of CFRP reinforced concrete beams in bending, *Constructions and Building Materials* 22. 2008, S. 277-285
- [Ram02] *Ramm, E.; Schunck, E. (EDS.):* Heinz Isler, Schalen, 3rd ed., 2002
- [Ree01] *Van der Ree, P.:* Organische Architektur. Stuttgart 2001
- [Rid05] *Ridzewski, J.:* Konzepte zur Gestaltung rohrförmiger CFK-Aluminium-Hybrid-Verbunde. Dissertation, TU Clausthal 2005
- [Rin12] *Rinberg, R.:* Technologieentwicklung zur Herstellung von naturfaserverstärkten Bauteilen in Leichtbauweise unter Einsatz von Ganzpflanzenrohstoffen. Dissertation, TU Chemnitz 2012
- [Röh14] *Röhrkohl, M.; Ehrlich, A., Rudolph, E.; Gelbrich, S.:* Neue leichtbaugerechte Strukturkomponenten und Verarbeitungstechnologien für Anwendungen in Tragwerken. In: Abschlussbericht zum Verbundförderprojekt der Sächsischen Aufbaubank. Chemnitz 2014
- [Rud14] *Rudolph, E.; Ehrlich, A.:* Errichtung eines Pavillons in Textilbetonbauweise auf dem Sportplatz der TU Chemnitz. Standsicherheitsnachweis. Chemnitz 2014
- [Rud15-1] *Rudolph, E.; Ehrlich, A.; Gelbrich, S.; Röhrkohl, M.; Kroll, L.:* Support Structures in Lightweight Design for the Construction of Resource Efficient Bridges. In: 20th Symposium on Composites. Materials Science Forum Vols 825-826 Part 2, 2015, S. 699-706
- [Rud15-2] *Rudolph, E.; Ehrlich, A.; Gelbrich, S.; Röhrkohl, M.; Kroll, L.:* Function integrated arch bridge in a resource-efficient lightweight design. 20th International Conference on Composite Materials (ICCM20). Copenhagen 2015
- [Rut02] *Ruth, J.; Noack, T.:* Werkzeuge zum Entwerfen und Konstruieren leichter Flächentragwerke. In: Tagungsband 5. Informationstag des IKI, Weimar 2002
- [Sch04] *Schneider, H.; Bergmann, I.; Schätzke, C.:* Lightweight concrete structures. Detail (7/8). 2004, S.844-854
- [Sch05] *Schürmann, H.:* Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden. Springer Berlin 2005

- [Sch11-1] *Schladitz, F.*: Torsionstragverhalten von textilbetonverstärkten Stahlbetonbauteilen. Dissertation, TU Dresden 2011
- [Sch11-2] *Schätzke, C.; Schneider, H. N.; Joachim, T.; Feldmann, M.; Pak, D.; Geßler, A.; Hegger, J.; Scholzen, A.*: Doppelt gekrümmte Schalen und Gitterschalen aus Textilbeton. Textilbeton in Theorie und Praxis. In: Tagungsband zum 6. Kolloquium zu textilbewehrten Tragwerken (CTRS6). TU Dresden 2011, S. 315-328
- [Sch12] *Schreiter, M.; Meyer, M.; Kroll, L.*: Integrative Spritzgießtechnologien für textilverstärkte Hochleistungsbauteile. In: 12. Schwarzheider Kunststoffkolloquium. Schwarzheide 2012
- [Sch13] *Scholz, S.; Cherif, C.; Kroll, L.*: Entwicklung großserientauglicher Fertigungstechnologien für komplexe Faserkunststoffverbundbauteile. In: Tagungsband 13. Chemnitzer Textiltechnik-Tagung: Wertschöpfungspotenzial Textiltechnik. Chemnitz 2012, S. 17-28
- [Sch14] *Schmidt, T.; Ehrlich, A.; Rudolph, E.*: Errichtung einer Leichtbauwabenbrücke über die Chemnitz im Bereich Haasefabrik in Chemnitz. Genehmigungsstatik. ARGE Leichtbauwabenbrücke Chemnitz, Chemnitz 2014
- [Sed10] *Sedlbauer, K.*: Textilien im Bau - bauphysikalische Anforderungen an den konstruktiven Membranbau. In: Proceedings. Bayern Innovativ Kooperationsforum, Textilien für Bau und Architektur. Miesbach 2010
- [Sei14] *Seidlitz, H.; Kroll, L.*: Hochfeste Mischbauweisen mit thermoplastischen Faserverbunden und Metallen. In: Joining Plastics - Fügen von Kunststoffen 8 2014, S. 106-111
- [Sei15] *Seidlitz, H.; Gerstenberger, C.; Osiecki, T.; Simon, S.; Kroll, L.*: High-performance lightweight structures with Fiber Reinforced Thermoplastics and Structured Metal Thin Sheets. Journal of Materials Science Research. Volume 4, No. 1, 2015, S. 28-35
- [Sob87] *Sobek, W.*: Auf pneumatisch gestützten Schalungen hergestellte Betonschalen. Aus den Arbeiten des Instituts für Massivbau. Dissertation. Stuttgart 1987
- [Sob95] *Sobek, W.*: Zum Entwerfen im Leichtbau, Bauingenieur 70. 1995, S. 323-32
- [Sob07] *Sobek, W; u.a.*: Leichtbau. - Entwerfen im Leichtbau. In: Themenheft Forschung Nr. 3, Universität Stuttgart 2007
- [Tim34] *Timoshenko, S.*: Theory of elasticity. McGraw-HillBook Comp. Inc., New York 1934, S. 95-104
- [Trö12] *Tröltzsch, J.; Helbig, F.; Kroll, L.*: Textilverstärkte Bauteile für die Großserie. Z. MM-Maschinenmarkt: Composites World. 118 Nr. 11, 2012, S. 22-23
- [Trö14] *Tröltzsch, J.; Kroll, L.*: Funktionsgerechte Halbzeuge für Hochleistungsbauteile in Großserie im Bundesexzellenzcluster MERGE. In: Faszination Leichtbau – Konzepte, Werkstoffe, Technologien. IST Niedersachsen, Braunschweig 2014, S. 161-166

- [Ulbr11] *Ulbricht, J.; Gelbrich, S.; Kroll, L.; Elsner, H.; Elflein, F.:* Material integrated textile sensors in lightweight structures for applications in civil engineering. In: Proceedings of SMAR 2011: First Middle East Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures. Dubai 2011, S. 48
- [Voi07] *Voigt, P.:* Die Pionierphase des Bauens mit glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK), 1942 bis 1980. Dissertation. Bauhaus-Universität Weimar 2007
- [Voi13] *Voigt, P.; Krombholz, A.; Werner, P.; et al.:* Biobased sandwich system for applications in architecture; In: Sustainable buildings – Construction products & technologies. Collection of full papers : Proceedings of the International Sustainable Building Conference, Graz University of Technology Graz 2013
- [Web11] *Weber, C.:* Fritz Leonhardt. „Leichtbau - eine Forderung unserer Zeit. Anregungen für den Hoch - und Brückenbau.“ Zur Einführung baukonstruktiver Prinzipien im Leichtbau in den 1930er - und 1940er – Jahren. KIT Scientific Publishing, Karlsruhe 2011
- [Wie84] *Wiedemann, J.:* Gewichts- und kostenorientierte Zielmodelle, Einsatzkriterien, Konstruktionsprinzipien und Probleme des Leichtbaus. Vortrag. Technische Akademie Esslingen 1984
- [Wei04] *Weinert, K.; Kempmann, C.:* Gewindefertigung in faserverstärkten Kunststoffen. In: Kunststoffe, 94. Nr. 7, 2004
- [Wes93] *Wesche, K.:* Baustoffe für tragende Bauteile. Bd. 2. Beton, Mauerwerk (nichtmetallisch-anorganische Stoffe): Herstellung, Eigenschaften, Verwendung, Dauerhaftigkeit / unter Mitarb. von Peter Schubert. Bauverlag Wiesbaden; Berlin 1993
- [Wie07] *Wiedemann, J.:* Leichtbau. Elemente und Konstruktion; 3. Springer Berlin 2007
- [Wu06] *Wu, G.; Lü, Z.; Wu, Z.:* Strength and ductility of concrete cylinders confined with FRP composites, *Constructions and Building Materials* 20 (2006), S. 134-148.

Normen

- [EN527-4] *Norm DIN EN ISO 527 Teil 4: Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 4: Prüfbedingungen für isotrop und anisotrop faserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe. Deutsche Fassung EN ISO 527-4: 1997*
- [EN 826] *Norm DIN EN 826: Wärmedämmstoffe für das Bauwesen - Bestimmung des Verhaltens bei Druckbeanspruchung. Deutsche Fassung EN 826: 2013*
- [EN923] *Norm DIN EN 923: Klebstoffe - Benennungen und Definitionen. Deutsche Fassung EN 923:2005+A1: 2008*
- [EN 1607] *Norm DIN EN 1607: Wärmedämmstoffe für das Bauwesen - Bestimmung der Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene. Deutsche Fassung EN 1607: 2013*
- [EN1990] *Norm DIN EN 1990, EUROCODE: Grundlagen der Tragwerksplanung. Deutsche Fassung EN 1990: 2010*
- [EN1991] *Norm DIN EN 1991-1-5, Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-5: Allgemeine Einwirkungen – Temperatureinwirkungen. Deutsche Fassung EN 1991-1-5:2003 + AC: 2009*
- [EN1992 NA] *Norm DIN EN 1992-1-1/NA: 2013-04 Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau. Deutsche Fassung EN 1999-1-1/NA: 2013*
- [EN1992] *Norm DIN EN 1992, Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken. Deutsche Fassung EN 1992: 2011*
- [EN13501] *Norm DIN EN 13501-1: Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten - Teil 1: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten. Deutsche Fassung EN 13501-1: 2007*
- [EN14125] *Norm DIN EN ISO 14125: Faserverstärkte Kunststoffe - Bestimmung der Biegeeigenschaften. Deutsche Fassung EN ISO 14125:1998 + AC:2002 + A1: 2011*
- [EN14509] *Norm DIN EN 14509: Selbsttragende Sandwich-Elemente mit beidseitigen Metalldeckschichten - Werkmäßig hergestellte Produkte – Spezifikationen. Deutsche Fassung EN 14509: 2013*
- [EN14125] *Norm DIN EN ISO 14125: Faserverstärkte Kunststoffe - Bestimmung der Biegeeigenschaften. Deutsche Fassung EN 14125: 2011*
- [DIN1055-1] *Norm DIN 1055: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1: Wichten und Flächenlasten von Baustoffen, Bauteilen und Lagerstoffen. 2002*
- [DIN1055-100] *Norm DIN 1055-100: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 100: Grundlagen der Tragwerksplanung, Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln. 2001*
- [DIN 8593] *Norm DIN 8593-08: Fertigungsverfahren Fügen, Teil 08 - Kleben; Einordnung, Unterteilung, Begriffe. 2003*

-
- [DIN18820] *NORM DIN 18820 Teil 1-4: Lamine aus textilglasverstärkten ungesättigten Polyester- und Phenacrylatharzen für tragende Bauteile (GF-UP, GF-PHA); Aufbau, Herstellung und Eigenschaften.* 1991
- [DIN 53293] *Norm DIN 53293: Prüfung von Kernverbunden; Biegeversuch.* 1982
- [DIN FB] *Norm DIN-Fachbericht 101: Einwirkungen auf Brücken.* 2009
- [BÜV] *Bau-Überwachungsverein e.V.: BÜV-Empfehlung: Tragende Kunststoffbauteile im Bauwesen [TKB] - Entwurf, Bemessung und Konstruktion.* 2010
- [ETAG] *Leitlinie für die europäische technische Zulassung ETAG 034: Bausätze für Außenwandbekleidungen Teil 1 und 2.* Österreichisches Institut für Bautechnik: 2012
- [RILEM117] *Material and Structure; RILEM; RILEM TC 117-FDC: Draft Recommendations for Test Methods for the Freeze-Thaw-Resistance of Concrete Slab Test and Cube Test.* 1996

8.2 Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abb. 1.1: Forschungsergebnisse von der Idee zur Umsetzung (GFK-Fassade, MeTeOr-Gebäude)..... | 3 |
| Abb. 2.1: Verknüpfung von Kompetenzen im Leichtbau..... | 6 |
| Abb. 3.1: Einflussfaktoren bei der Optimierung von Leichtbaukonstruktionen..... | 10 |
| Abb. 3.2: Schematische Darstellung der Entwicklung: Von Tradition und Zukunft der Leichtbauarchitektur..... | 11 |
| Abb. 3.3: Theodor-Heuss-Brücke in Düsseldorf, Planer: F. Leonhardt (Foto: Till Niermann)..... | 12 |
| Abb. 3.4: Fullers Tensegrity-Modell (li.); US-Pavillon zur Expo in Montreal 1967 (re.)..... | 12 |
| Abb. 3.5: Schirme in Medina 1971 (li.), Dächer des Olympiastadions 1972 (re.)..... | 13 |
| Abb. 3.6: Yamuna-Brücke in Waziraba, Indien (li.), Spannbandbrücke in Oberhausen (re.) (Entwurf: Schlaich, Bergermann & Partner)..... | 15 |
| Abb. 3.7: Übersicht zu Anforderungen an Leichtbauwerkstoffe für den Einsatz in Bauwerken..... | 16 |
| Abb. 3.8: Leichtbaustoffe für tragende und nichttragende Anwendungen im Bauwesen | 16 |
| Abb. 3.9: Klassische Textilhalbzeuge [Gel08]..... | 18 |
| Abb. 3.10: Pavillon-Melbourne Showgrounds, Australien (Mehler Technologies GmbH)..... | 20 |
| Abb. 3.11: Aufbau Faser-Kunststoff-Verbunde..... | 21 |
| Abb. 3.12: Schematische Prozessschritte bei der Herstellung von FKV-Bauteilen, nach [Gel08]..... | 23 |
| Abb. 3.13: GFK-Brücke bei Moskau (li.); GFK-Fassadenverkleidung des Komplex „The Walbrook“, London (re.)..... | 24 |
| Abb. 3.14: Übersicht zum Einsatz textilbasierter Bewehrungen..... | 26 |
| Abb. 3.15: Textilbeton „Vom Filament zum Bauteil“ [Stfi]..... | 27 |
| Abb. 3.16: Zusammensetzung von textilbewehrtem Feinbeton in Vol.-% [Che11]..... | 30 |
| Abb. 3.17: Weltweit erste Brücke aus Textilbeton im Gelände der Landesgartenschau Oschatz (li.); Erweiterung der Versuchshalle C, IMB RWTH Aachen (re.) | 30 |
| Abb. 3.18: Tragwerksordnung nach Polónyi in [Gen06]..... | 31 |
| Abb. 3.19: Spannseil-Hängebrücke (Entwurf: Christian Menn; [Mei09])..... | 31 |
| Abb. 3.20: Grenzspannweiten von Stahl- und CKF-Spannseil-Hängebrücken nach [Mei09]..... | 32 |
| Abb. 3.21: Beanspruchung (a) einer Platte, (b) einer Scheibe, (c) einer oben offenen Zylinderschale [Hei96]..... | 35 |
| Abb. 3.22: Netz der Zeltspinnne Cartophora (links) und die daraus abgeleitete Voliere im Tierpark Hellabrunn..... | 37 |
| Abb. 3.23: Bewegungsprinzip Flectofin (re.); Abstraktionsschritt Biegedrillknicken (li.) [Nac13] | 38 |
| Abb. 3.24: “One Ocean“, EXPO-Pavillon, Korea [soma Architekten]..... | 38 |
| Abb. 3.25: Funktionsintegrierte GFK-Lamellenfassade für die Stadtwerke Rüsselsheim: Integration von Photovoltaik-Elementen in Verschattungslamellen; [Pohl Architekten]..... | 39 |
| Abb. 4.1: Schematische Darstellung typ. GFK-Aufbauten und zugehöriger E-Modul-Verläufe..... | 42 |
| Abb. 4.2: Schematischer Aufbau der ITS-Schale (Mittelmodul)..... | 43 |
| Abb. 4.3: Schematische Darstellung der Spannungen beim Sandwich und Vollwandprofil unter Biegebelastung | 44 |
| Abb. 4.4: Exemplarische Versuchskonfigurationen; Zugversuch (li.), 4-Punkt-Biegeversuch (re.)..... | 45 |
| Abb. 4.5: Modell der Referenzfassade mit ITS-Schale am MeTeOr-Gebäude in Chemnitz..... | 46 |
| Abb. 4.6: Geometrische Abmessungen des MeTeOr-Gebäudes in Chemnitz [Ehr11-4] | 46 |
| Abb. 4.7: Aufbau und Aufteilung der Integrierten Tragenden Sandwichschale in Module..... | 47 |

| | |
|---|----|
| Abb. 4.8: Schematischer Aufbau der Fassadeninnenseite im Akustiklamellen (li.) und Variation der Anstellwinkel der Lamellen zur Anpassung der akustischen Reflexion bzw. Dämpfung | 48 |
| Abb. 4.9: Modulares Werkzeugkonzept und montiertes Formwerkzeug zur Fertigung der ITS-Schale [Ehr11-2]..... | 49 |
| Abb. 4.10: Schematische Darstellung des Aufbaus der Randmodule (Explosionszeichnung)..... | 50 |
| Abb. 4.11: Schematische Darstellung der Befestigung der Mittelmodule am Bauwerk..... | 51 |
| Abb. 4.12: Aufbau des FEM-Modells..... | 51 |
| Abb. 4.13: Verformungsanalyse am Gesamtmodell der ITS-Schale für eine ausgewählte Lastkombination aus Eigen-, Verkehrs-, Wind-, Schnee- und Temperaturlasten ($g = 0,5\text{kN/m}^2$; $q = 3\text{ kN/m}^2$; $w = 0,65\text{ kN/m}^2$; $s = 1,47\text{kN/m}^2$; weiterführend in [Ehr11-3])..... | 53 |
| Abb. 4.14: Manipulationsvorrichtung (li.), Entformung des Mittelmoduls (mi.), Montage des Mittelmoduls (re.)..... | 53 |
| Abb. 4.15: MeTeOr-Gebäude der TU Chemnitz mit ITS-Schale..... | 55 |
| Abb. 4.16: Referenzfassade mit ITS-Schale am MeTeOr-Gebäude der TU Chemnitz..... | 55 |
| Abb. 4.17: Aufbau des GFK-Wabensandwiches (li.), Wabenkern nach Vorbild der Bienenwabe (re.)..... | 57 |
| Abb. 4.18: GFK-Wabensandwich-Modul – Aufbau und Geometrie (li.); Isometrie (re.)..... | 58 |
| Abb. 4.19: Verfahrensschema Laminiertechnologie (li.); Handlaminiieren in der Praxis (re.)..... | 59 |
| Abb. 4.20: Formwerkzeug (li.), Laminiieren im Formwerkzeug (mi., re.)..... | 60 |
| Abb. 4.21: Fertigung des Kernes in mäanderförmigen Halbwaben (li.), Verklebung der GFK-Halbwaben (re.)..... | 60 |
| Abb. 4.22: GFK-Wabensandwich mit Deckschichten..... | 60 |
| Abb. 4.23: Fertigung des Wickelkerns (Modellbau, Abformung, Wabenwickelwerkzeug, Endmontage)..... | 61 |
| Abb. 4.24: Schema der Wickeltechnologie in Anlehnung an [Mic 90]..... | 61 |
| Abb. 4.25: GFK-Einzelwaben (li.); GFK-Deckschichten (mi.); GFK-Wabensandwich (re.)..... | 61 |
| Abb. 4.26: GFK-Einzelwabe unter punktförmiger Belastung (10 kN), Versuch (li.); FE-Simulation (re.)..... | 64 |
| Abb. 4.27: Biegeversuch am großformatigen Probekörper..... | 64 |
| Abb. 4.28: Einbauempfehlung für sticktechnologisch hergestellte Dehnungssensoren für SHM- und CM-Systeme für Anwendungen in FKV-Tragwerken [Röh14]..... | 66 |
| Abb. 4.29: C-Spike-Schwalbenschwanz-Krafteinleitungselemente; 3D-Visualisierung..... | 67 |
| Abb. 4.30: „C-Spike“-Krafteinleitungselement und Integration im GFK-Laminat..... | 68 |
| Abb. 4.31: Spike-Form (von li. nach re.) Stift, Pyramide, Konus, Konus mit Spitze 1, Konus mit Spitze 2..... | 68 |
| Abb. 4.32: C-Spike-Verbinder mit Schwalbenschwanzkontur (li.), SLM-Spikes mit Konuskopf (mi.), CMT-Spikes mit kugelförmigem Kopf (re.)..... | 69 |
| Abb. 4.33: FE-Modell, Geometrie als isometrische Ansicht (li.), Randbedingungen (mi.), Vernetzung (re.)..... | 71 |
| Abb. 4.34: FE-Modell, PR8 (76 CMT-Konus-Spikes)..... | 72 |
| Abb. 4.35: FE-Modell, PR10 (37 CMT-Konus-Spikes)..... | 72 |
| Abb. 4.36: Übersicht des Stahltragwerks der Wabenbrücke (li.), Geometrie der Wabenmodule (re.)..... | 73 |
| Abb. 4.37: Schematische Darstellung des geometrischen Aufbaus des Wabenmoduls..... | 74 |
| Abb. 4.38: Schematische Darstellung der Lagerung, der Belastungsarten und der FE-Ergebnisse..... | 75 |
| Abb. 4.39: Darstellung des Ausnutzungsgrads des Brückenwabenmoduls..... | 75 |

| | |
|---|-----|
| Abb. 4.40: Schematische Wabenanordnung eines GFK-Brückenmoduls (li.), Formenbaugeometrie (re.)..... | 76 |
| Abb. 4.41: Bestandteile der Module aus Halbwaben (li.), Montagelehre zur Verklebung der Laminatstreifen (re.)..... | 77 |
| Abb. 4.42: CNC-Beschnitt des Wabenmoduls (li.), Applikation der Verschleißschicht auf der Einzelwabe..... | 77 |
| Abb. 4.43: GFK-Waben mit integrierter Sensorik und Beleuchtung im Testmodul (li.), Spiralförmig gestickter Sensor vor (mi.) und nach der Einbettung in die GFK-Deckschicht (re.)..... | 78 |
| Abb. 4.44: Brückenelement mit kaskadierten Antennen (li.), Wabensegment mit integriertem Sensor und Verarbeitungselektronik (mi.), LED-Beleuchtungsschirm (re.)..... | 78 |
| Abb. 4.45: Montage Überbau [Baby Smile Fotografie GmbH&Co.KG] (li.), Einbau der GFK- Wabenmodule (re.)..... | 79 |
| Abb. 4.46: Interaktive Wabenbrücke Chemnitz bei Tag [Baby Smile Fotografie GmbH& Co.KG]..... | 79 |
| Abb. 4.47: Interaktive Wabenbrücke Chemnitz bei Nacht mit Beleuchtung [Hendrik Schmidt]..... | 80 |
| Abb. 4.48: Vision zur CFK-Brücke der Zukunft (Entwurf Brücke Chemnitz: Pohl Architekten)..... | 81 |
| Abb. 4.49: Vision „Crystal Bridge“ für den Wettbewerb „Nine Elms to Pimlico Bridge“, London (Entwurf: Cox Architecture Pty Ltd)..... | 81 |
| Abb. 5.1: Bestimmung der Fließeigenschaften von Frischbetonen im Rheometer HAAKE MARS III (li.), Ermittlung der Druckfestigkeit (mi.), Ermittlung der 3-Punkt-Biegezugfestigkeit (re.)..... | 86 |
| Abb. 5.2: CDF und CIF-Test zur Bestimmung der Frost- u. Frost-Tau-Wechselbeständigkeit in der Klimakammer | 86 |
| Abb. 5.3: Rheologische Optimierung, Drehmoment in Abhängigkeit des Fließmittelgehalts..... | 86 |
| Abb. 5.4: GFK-Schalungselement ohne Rückwand (li.), GFK-Schalung geschlossen und gekippt (re.)..... | 88 |
| Abb. 5.5: Schematischer Aufbau der Befestigungspunkte im Fassadenelement | 89 |
| Abb. 5.6: Versuchsaufbau zu Auszugsversuchen in 0°, 45°- und 90°-Richtung..... | 90 |
| Abb. 5.7: Beispiele der Fassadenelemente mit Befestigungsankern..... | 90 |
| Abb. 5.8: Fassadenelemente an Poseidon-Gebäude in Frankfurt a. M. | 91 |
| Abb. 5.9: Neu entwickelte Fassadenelemente des Hochhauses „LEO“ in Frankfurt a. M. | 92 |
| Abb. 5.10: Spannungs-Dehnungs-Diagramm von unbewehrten und bewehrten Betonen (li.), Darstellung der 3-Punkt-Biegezugprüfung von Faserbeton und Textilbeton (re.)..... | 93 |
| Abb. 5.11: Schematischer Aufbau einer Lärmschutzwand mit Tragplatte aus Stahlbeton (li.) und Textilbeton (re.) | 94 |
| Abb. 5.12: Einbettung der g-Rovings in die Spannform (li., mi.); Faserauszugsversuch (re.) | 97 |
| Abb. 5.13: Repräsentatives Spannungs-Dehnungsdiagramm des 3-Punkt-Biegezugversuchs | 99 |
| Abb. 5.14: Repräsentatives Spannungs-Dehnungsdiagramm des Zugversuchs..... | 99 |
| Abb. 5.15: Explosionszeichnung der Vorspannform im Laborformat..... | 101 |
| Abb. 5.16: Prozesskette zur Herstellung von textilbewehrten Tragplatten im Laborformat (500 mm x 500 mm)..... | 101 |
| Abb. 5.17: Geforderte theoretische 3-Punkt-Biegezugspannung in Abhängigkeit v. Plattendicken ... | 102 |
| Abb. 5.18: Herstellung der textilbewehrten Referenzplatten im Betonwerk | 103 |
| Abb. 5.19: Spannungs-Dehnungs-Diagramm von Textilbetonplatten mit 6 cm Plattenstärke | 104 |
| Abb. 5.20: Vergleich von den Bemessungswerten mit den experimentellen Biegezugfestigkeiten | 104 |
| Abb. 5.21: Probekörper von textilbewehrten Leichtbeton-Lärmschutzwänden; Prototyp-LSW | 106 |

| | |
|--|-----|
| Abb. 5.22: Entwurf des Einzelements und Ausführungsbeispiele zu modularen Tragwerken (Bsp. Pavillon) | 109 |
| Abb. 5.23: Repräsentativer Krümmungszustand eines unsymmetrischen Schichtverbundes infolge Temperatur- und Zugbelastung | 109 |
| Abb. 5.24: Unsymmetrisches GFK-Laminat nach der Herstellung (li.), Zugbelastung eines unsymmetrischen Laminats zur Einstellung definierter Krümmungen in der Einspannvorrichtung (re.) | 110 |
| Abb. 5.25: Fertigungsversuche zum Systemaufbau von GFK-Schalungen für Beton-Leichtbau- schalen | 110 |
| Abb. 5.26: GFK-Formwerkzeug mit Rakelsystem | 111 |
| Abb. 5.27: C-texClip zur Fixierung der textilen Bewehrung (Modelle, Prototypen, Versuchsmuster im Beton) | 112 |
| Abb. 5.28: C-texSpacer als Distanzhalter zwischen textilen Bewehrungsgittern (li.), C-texSpacer+ als Positioniereinheit und Distanzhilfe (re.) | 112 |
| Abb. 5.29: Modell des modularen C-texClip, Zwischenstück und Aufbauvarianten des C-texSpacer+ | 113 |
| Abb. 5.30: Integration des modularen C-texClip (li.) und des C-texSpacer+ (re.) im Bewehrungstextil | 113 |
| Abb. 5.31: FE-Netz (li.), Auswertung gemäß GZT: Hauptzugspannungen beim maßgeblichen Lastfall (re.); vgl. [Rud14] | 114 |
| Abb. 5.32: GZT: Hauptdruckspannungen beim maßgeblichen Lastfall (li.), GZG: Verschiebung in z-Richtung (re.), vgl. [Rud14] | 114 |
| Abb. 5.33: GFK-Schalung (li.), Betonage eines Einzelementes in GFK-Schalung (mi.), Probeaufbau (re.) | 115 |
| Abb. 5.34: Stickprozess Sensor (li.), gestickte Dehnungssensoren (mi.), Sensor mit entferntem PVA-Vlies (re.) | 115 |
| Abb. 5.35: Sticktechnologisch hergestellter Touchsensor (li.), Pavillonelement mit Aussparung für die GFK-Touchsensorplatte (mi.) und Pavillonelement mit integriertem Touchsensor (re.) | 116 |
| Abb. 5.36: Textilbeton-Pavillons aus dem Campusgelände der TU Chemnitz im Bereich des Sportplatzes | 116 |
| Abb. 5.37: Textilbeton-Pavillons auf dem Campusgelände der TU Chemnitz mit integrierter Beleuchtung | 117 |
| Abb. 5.38: Textilbeton-Pavillons auf dem Campusgelände der TU Chemnitz mit integrierter Beleuchtung | 117 |
| Abb. 6.1: Schematischer Aufbau der Textilbeton-GFK-Hybridbauweise (BetoTexG, Angaben in mm) | 121 |
| Abb. 6.2: Repräsentative 3-Punkt-Biegeversuche: Textilbeton im Zugbereich (li.), GFK im Zugbereich (re.) | 124 |
| Abb. 6.3: Exemplarischer Spannung-Dehnungs-Verlauf eines Biegeversuchs von BetoTexG mit dem entwickelten Interlayer Epoxidharz und Wabenvlies | 124 |
| Abb. 6.4: Exemplarischer Spannung-Dehnungs-Verlauf eines Zugversuchs von BetoTexG mit dem entwickelten Interlayer Epoxidharz und Wabenvlies | 125 |
| Abb. 6.5: Zugfestigkeiten vor und nach der TWB mit verschiedenen Interlayern | 126 |
| Abb. 6.6: FE-Modell BetoTexG, Zugspannungen infolge Temperatur im Winter (li.), Sommer (re.), (Textilbeton 1, Interlayer 2, GFK 3) | 127 |
| Abb. 6.7: FE-Modell des BetoTexG-Verbundes, Spannungen infolge 3-Punkt-Biegeversuch | 128 |

| | |
|--|-----|
| Abb. 6.8: Schematische Darstellung des neuen Befestigungssystems mit mehraxialen Einstellmöglichkeiten (li.), Detail der entwickelten Punkthalterung (re.) | 129 |
| Abb. 6.9: Entwurf des Forschungspavillons CoFigloo (Darstellung teilw. O. Verkleidung) (li.), Zeichnung (re.)..... | 130 |
| Abb. 6.10: Schematische Darstellung des modularen Werkzeugkonzepts der 3 Formenwerkzeuge .. | 131 |
| Abb. 6.11: Fertigung der Elemente des BetoTexG-Hybridpavillons CoFigloo..... | 131 |
| Abb. 6.12: Forschungspavillon CoFigloo auf dem Technologie-Campus der TU Chemnitz..... | 133 |
| Abb. 6.13: Vergleich der Zugfestigkeiten verschiedener Betonbaustoffe | 133 |
| Abb. 7.1: Zukunft des Leichtbaus im Bauwesen | 136 |

8.3 Tabellenverzeichnis

| | |
|--|-----|
| Tab. 3.1: Übersicht zur Bauweisenklassifizierung; in Anlehnung an [Kle11]..... | 33 |
| Tab. 3.2: Übersicht zu Konstruktionsprinzipien und Strukturen in Anlehnung an [Wie84]..... | 34 |
| Tab. 4.1: Zusammenstellung mechanischer Kennwerte nach DIN 18820..... | 44 |
| Tab. 4.2: Übersicht zu den Bemessungswerten..... | 45 |
| Tab. 4.3: Vgl. von Eigengewicht je Element der MeTeOr-Fassade beim Einsatz von verschiedenen Werkstoffen..... | 54 |
| Tab. 4.4: Zugeigenschaften des Laminats GF-UP1-MW1-11-40..... | 62 |
| Tab. 4.5: Biegeeigenschaften des Laminats GF-UP1-MW1-21-40..... | 63 |
| Tab. 4.6: Prüf- und FE-Ergebnisse unter Einzellast 10 kN und 15 kN..... | 63 |
| Tab. 4.7: Prüfergebnisse der Zugversuche von ausgewählten C-Spike-Verbindungen..... | 70 |
| Tab. 4.8: Vergleich der experimentellen und FE-Ergebnisse..... | 71 |
| Tab. 5.1: Mischparameter zur Herstellung des Feinbetons..... | 85 |
| Tab. 5.2: Frisch- und Festbetoneigenschaften des glasfasernmodifizierten Feinbetons nach 28 Tagen | 87 |
| Tab. 5.3: Ergebnisse der Dauerhaftigkeitsuntersuchungen..... | 87 |
| Tab. 5.4: Ergebnisse der Auszugsversuche und schematische Darstellung der Belastungsrichtungen | 90 |
| Tab. 5.5: Daten des Referenzobjektes..... | 91 |
| Tab. 5.6: Halbzeuge und Geometrie der untersuchten textilen Verstärkungsstrukturen..... | 95 |
| Tab. 5.7: Getestete Mischparameter zur Herstellung des Feinbetons für die Tragbetonplatte..... | 95 |
| Tab. 5.8: Ermittelte Frisch- und Festbetoneigenschaften der Feinbetonmatrix..... | 96 |
| Tab. 5.9: Max. Faserauszugskraft eingebetteter g-Rovings..... | 97 |
| Tab. 5.10: Druck-, 3-Punkt-Biegezug- und Zugfestigkeit des untersuchten Textilbetons..... | 98 |
| Tab. 5.11: Ergebnisse 3-Punkt-Biegezugversuche mit verschiedenen Formgebungstechnologien..... | 100 |
| Tab. 5.12: Bemessungswerte und exp. Biegezugfestigkeiten mit Teilsicherheitsbeiwert nach HEGGER..... | 105 |
| Tab. 5.13: Frischbetoneigenschaften der Matrix und Festbetoneigenschaften der textilverstärkten Betonproben..... | 108 |
| Tab. 5.14: Anforderungen an Abstandhalter für Textilbeton..... | 112 |
| Tab. 6.1: Technologische Prozesskette zur Herstellung von BetoTexG..... | 122 |
| Tab. 6.2: Festbetoneigenschaften im Alter von 28 Tagen..... | 123 |
| Tab. 6.3: Eigenschaften des BetoTexG Hybridwerkstoffs mit Interlayer aus Epoxidharz und Wabenvlies..... | 125 |
| Tab. 6.4: Eigenschaften der Hauptkomponenten des BetoTexG..... | 126 |

8.4 Anlagenverzeichnis

| | |
|--|-----|
| Anlage 9.1: Integrierte tragende GFK-Sandwich-(ITS)-Schale..... | 157 |
| Anlage 9.2: Modulare GFK-Tragstrukturen in Wabenbauweise..... | 163 |
| Anlage 9.3: Fassadensystem in filigraner Faserbeton-Leichtbauweise..... | 167 |
| Anlage 9.4: Textilbewehrte Tragbetonelemente für den Lärmschutz..... | 169 |
| Anlage 9.5: Textilbewehrte gekrümmte Tragelemente..... | 172 |
| Anlage 9.6: Leichtbaukonstruktion in textilbewehrter Hybridbauweise..... | 175 |

9 Anlagen

9.1 Integrierte tragende GFK-Sandwich-(ITS)-Schale

Konstruktion der Schalenmodule und Integrationselementen

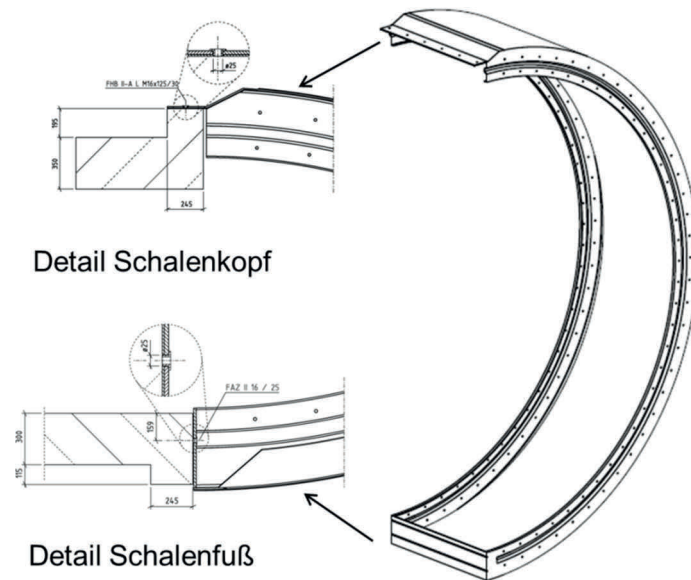


Abb. 9.1: Detail Mittelmodul

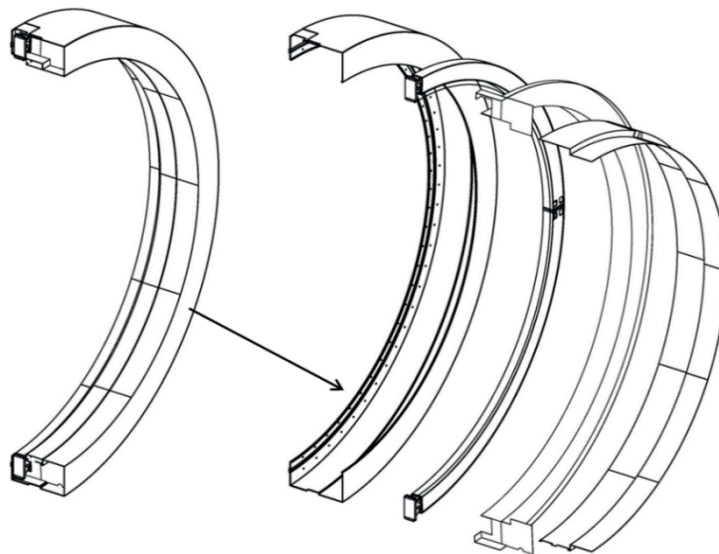


Abb. 9.2: Detail Randmodul mit innenliegenden Stahlträgern zur Aufnahme der Glasfassade



Abb. 9.3: ITS-Fassade mit integrierten Akustiklamellen

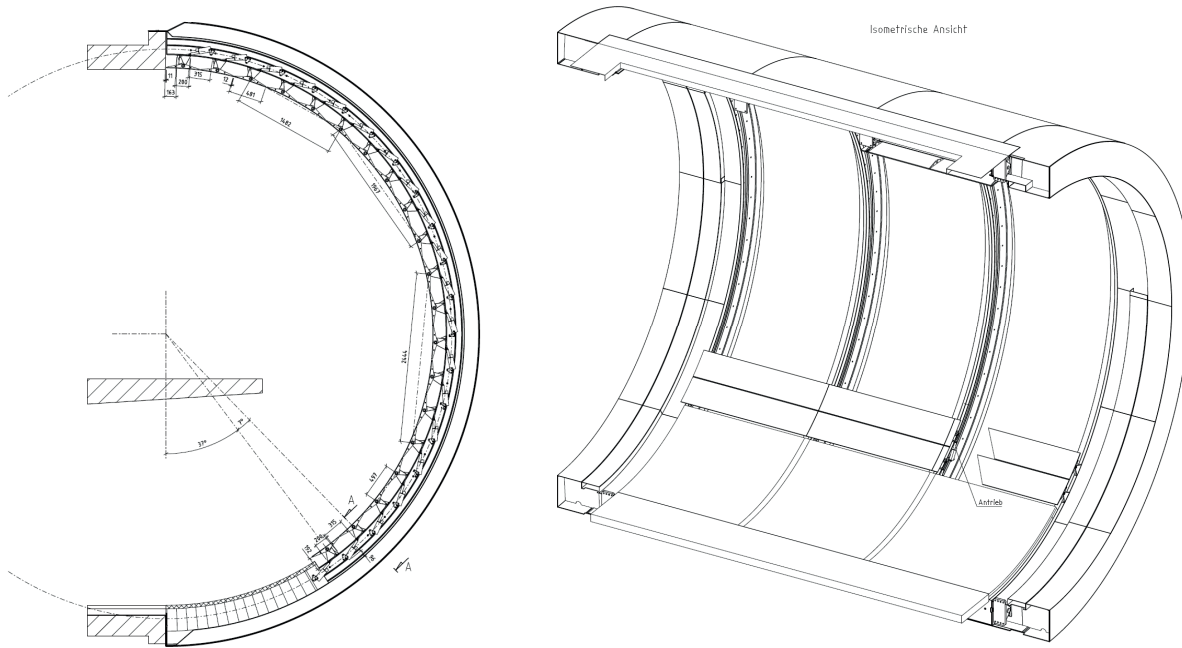


Abb. 9.4: ITS-Fassade mit integrierten Akustiklamellen: Schnitt (li.) und isometrische Ansicht (re.)

Lastannahmen für statische Bemessung und Abminderungsfaktoren

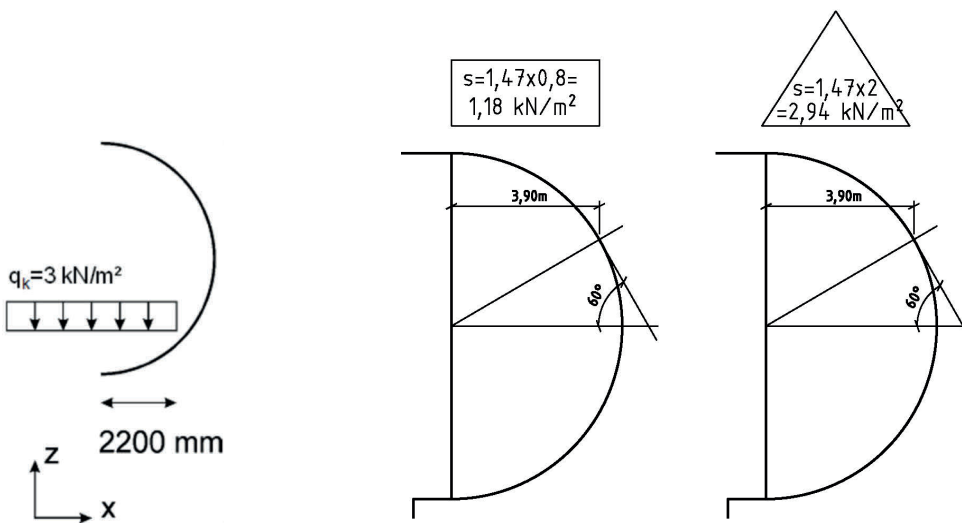


Abb. 9.5: Lastannahmen hinsichtlich Verkehrslast (li.); Schnee- und Eislasten (re.)

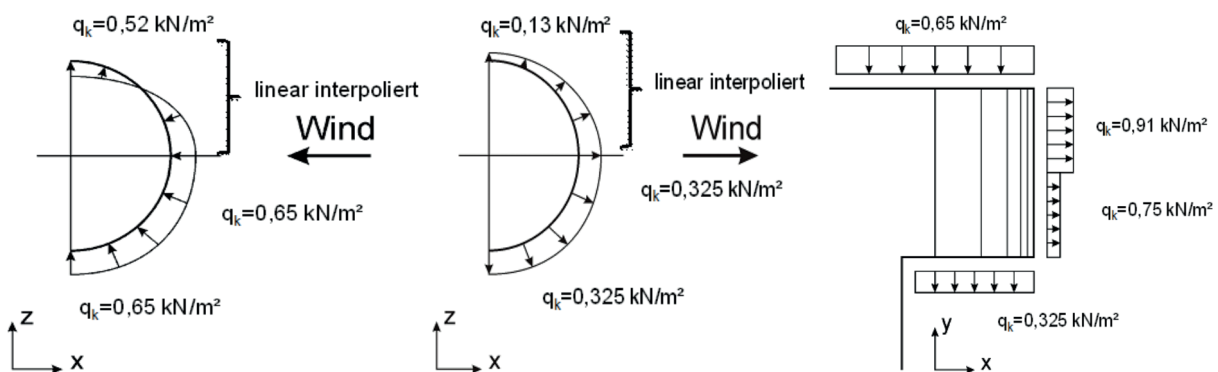


Abb. 9.6: Lastannahmen hinsichtlich Windlast

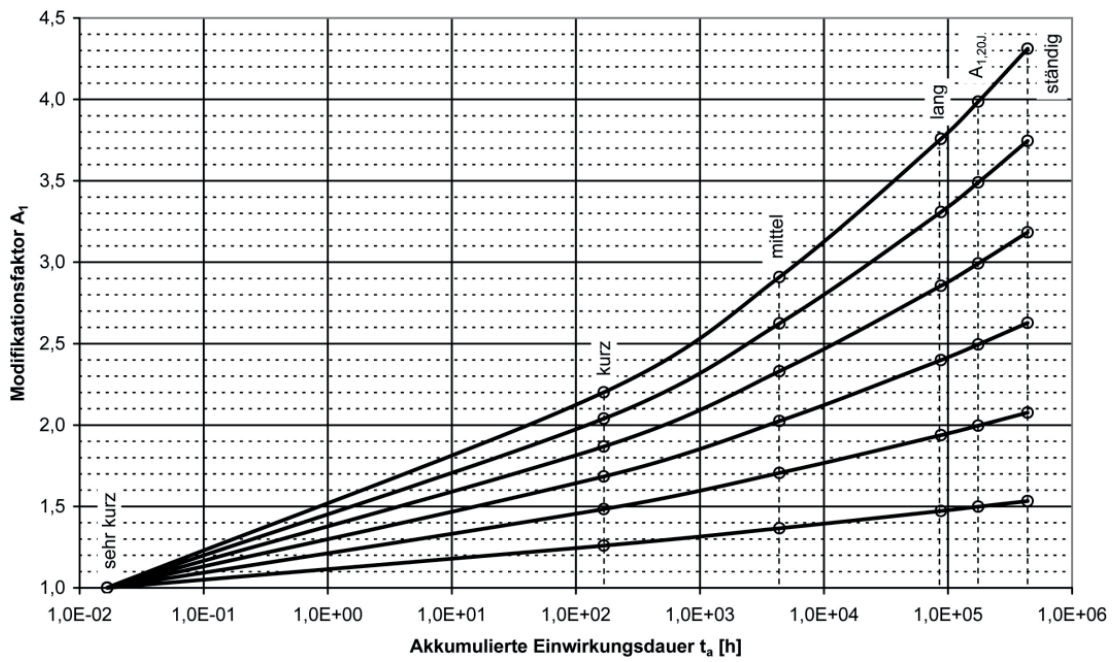


Abb. 9.7: Abminderung der Werkstoffkenngrößen; Lastdauer

| | | | | | | |
|--|----------------|-------|-------|------|------|------|
| Materialtyp | A_1^t | | | | | |
| Wirrfaserlaminat <i>M</i> | 1,6 | | | | | |
| Mischlaminat <i>MW</i> | 2,0 - δ | | | | | |
| Wickellaminat <i>FM</i> parallel zur Wickelrichtung | 1,8 - δ | | | | | |
| Wickellaminat <i>FM</i> senkrecht zur Wickelrichtung | FM 1 | FM 2 | FM 3 | FM 4 | FM 5 | FM 6 |
| mit $\epsilon_z > 0,2\%$ | 1,8 | 2,15 | 2,75 | 1,7 | 2,0 | 2,4 |
| Wickellaminat <i>FMU</i> parallel zur Wickelrichtung | 1,8 - δ | | | | | |
| Wickellaminat <i>FMU</i> senkrecht zur Wickelrichtung | FMU 1 | FMU 2 | FMU 3 | | | |
| | 1,9 | 1,7 | 1,6 | | | |
| Pultrusionsprofile <i>P</i> parallel zur Pultrusionsrichtung | 1,8 - δ | | | | | |
| Pultrusionsprofile <i>P</i> senkrecht zur Pultrusionsrichtung | 2,0 | | | | | |
| Pultrusionsprofile <i>P</i> parallel zur Pultrusionsrichtung mit $\epsilon_z > 0,2\%$ | 2,0 | | | | | |
| Pultrusionsprofile <i>P</i> senkrecht zur Pultrusionsrichtung mit $\epsilon_z > 0,2\%$ | 3,0 | | | | | |

δ Glasmassenanteil

ϵ_z Dehnung bei Zugbeanspruchung senkrecht zur Wickelrichtung

Abb. 9.8: Abminderung der Werkstoffkenngrößen; Einflussfaktoren für FKV infolge Belastungsdauer

| Medienklasse ²⁾ | A_2^t, A_2^E, A_2^D | | Einfluss |
|----------------------------|-----------------------|-------------|--|
| | getempert | ungetempert | |
| I | 1,0 | 1,0 | ohne Einfluss, z.B. trockene Güter, Innenklima |
| II | 1,1 | 1,2 | sehr geringer Einfluß ¹⁾ , natürliche Witterung, <30 °C |
| III | 1,3 | 1,4 | geringer Einfluß ¹⁾ , starke UV-Belastung, 30 - 40 °C |

1) Definition gemäß DIN 18820

2) Beschreibung der Medienklasse siehe DIN 18820-3

Abb. 9.9: Abminderung der Werkstoffkenngrößen; Einflussfaktoren für FKV infolge Medieneinfluss

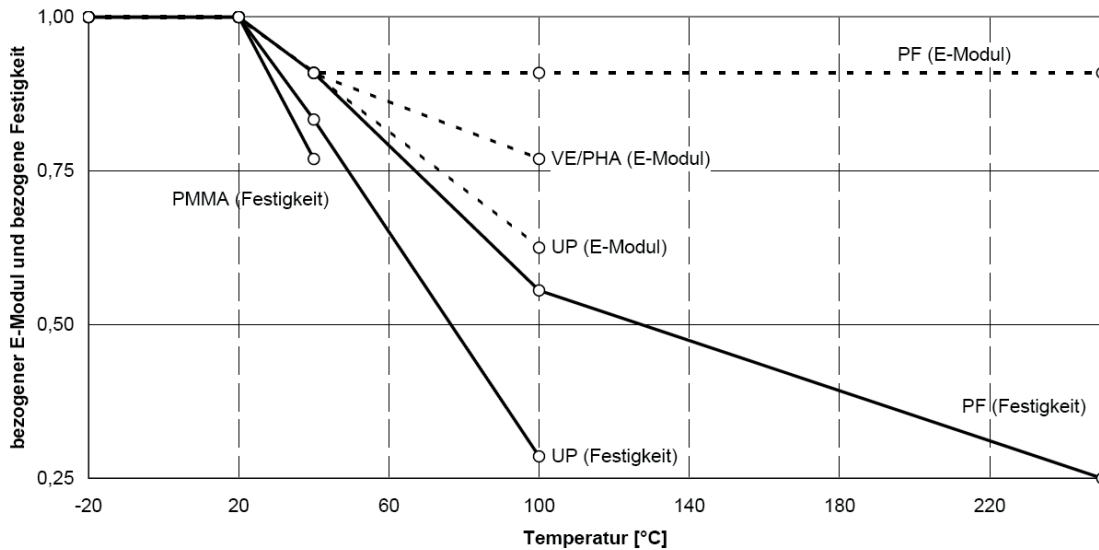


Abb. 9.10: Abminderung der Werkstoffkenngrößen; Temperatur

| | unverstärkte und faserverstärkte Duroplaste | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|---|-----|------|------------------|----|------|---|-----|------|------------------|-----|-----|------|
| | UP Ungesättigtes Polyesterharz | | | EP Epoxidharz | | | VE (PHA) Vinylesterharz, Phenacrylatharz | | | PF Phenolharz | | | |
| °C | ≤ 20 | 40 | 100* | ≤ 20 | 40 | 100* | ≤ 20 | 40 | 100* | ≤ 20 | 40 | 100 | 250* |
| A ^f (Festigkeit) | 1,0 | 1,2 | 3,5 | 1,0 | -- | -- | 1,0 | -- | -- | 1,0 | 1,1 | 1,8 | 4,0 |
| A ^E (E-Modul) | 1,0 | 1,1 | 1,6 | 1,0 | -- | -- | 1,0 | 1,1 | 1,3 | 1,0 | 1,0 | 1,1 | 1,1 |
| A ^D (Dehngrenze) | 1,0 | | | | | | | | | | | | |

Abb. 9.11: Abminderung der Werkstoffkenngrößen; Einflussfaktoren für FKV infolge Temperatureinfluss

| Ermittlung von Modifikationsfaktoren A1, A2, A3, Gamma-M, für die Bemessungswerte des Widerstandes unter Berücksichtigung der Lasteinwirkungsdauer (ta): | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--|---------------------|--------------|--|---------------------|--------------|--|---------------------|--------------|--|---------------------|--------------|---------------|-----|
| Norm-Laminattyp: FM3 | Anzahl der Schichten n: 9 | | | theor.Laminatdicke t[m]: 5,13 | | | Glasvolumenanteil VG: 0,29032258 | | | Glas-Massenanteil PSI: 0,45 | | | PU-Schaum | |
| T=0,253+0,142 x lg(ta) | Gamma M: 2,00 | | | 0,953985 | | | Gamma M: 2,00 | | | 0,577229 | | | Gamma M: 2,00 | 2,0 |
| Lasteinwirkungsdauer KLED | ständige Belastung (50 Jahre) | | | lange Belastung (10 Jahre) | | | mittel Belastung (6 Monate) | | | kurze Belastung (1 Woche) | | | 0,6 | |
| | Haupttrichtung | Faser senkrecht 90° | | Haupttrichtung | Faser senkrecht 90° | | Haupttrichtung | Faser senkrecht 90° | | Haupttrichtung | Faser senkrecht 90° | | | x |
| Tabellenwerte nach BÜV: | Faser II | Faser 90° | epsilon>0,2% | Faser II | Faser 90° | epsilon>0,2% | Faser II | Faser 90° | epsilon>0,2% | Faser II | Faser 90° | epsilon>0,2% | x | |
| Tabellenwerte A1 Festigkeit: | 1,35 | 2,75 | 3,90 | 1,35 | 2,75 | 3,90 | 1,35 | 2,75 | 3,90 | 1,35 | 2,75 | 3,90 | 2,1 | |
| A1 Festigkeit nach (KLED): | 1,37 | 2,90 | 4,19 | 1,33 | 2,62 | 3,66 | 1,26 | 2,18 | 2,85 | 1,19 | 1,79 | 2,19 | 2,1 | |
| Tabellenwerte A1 E/D für N: | 1,30 | xxx | xxx | 1,30 | xxx | xxx | 1,30 | xxx | xxx | 1,30 | xxx | xxx | 4,4 | |
| Tabellenwerte A1 E/D für B: | 1,40 | xxx | xxx | 1,40 | xxx | xxx | 1,40 | xxx | xxx | 1,40 | xxx | xxx | 3,4 | |
| Tabellenwerte A1 E/D BÜV: | xxx | 2,55 | 3,65 | xxx | 2,55 | 3,65 | xxx | 2,55 | 3,65 | xxx | 2,55 | 3,65 | 1,2 | |
| A1 E-Modul N nach KLED: | 1,32 | 2,68 | 3,91 | 1,28 | 2,44 | 3,44 | 1,22 | 2,05 | 2,71 | 1,16 | 1,72 | 2,11 | 1,2 | |
| A1 E-Modul B nach KLED: | 1,43 | 2,68 | 3,91 | 1,38 | 2,44 | 3,44 | 1,30 | 2,05 | 2,71 | 1,21 | 1,72 | 2,11 | 1,1 | |
| A2 Festig./E-Mod./Dehn.: | 1,2 | xxx | xxx | 1,2 | xxx | xxx | 1,2 | xxx | xxx | 1,2 | xxx | xxx | 1,1 | |
| Tabellenwert A3 Festigkeit: | 1,58 | xxx | xxx | 1,58 | xxx | xxx | 1,58 | xxx | xxx | 1,58 | xxx | xxx | 1,1 | |
| Tabellenwert A3 E-Modul: | 1,18 | xxx | xxx | 1,18 | xxx | xxx | 1,18 | xxx | xxx | 1,18 | xxx | xxx | 1,2 | |
| A - mod für Festigkeitswerte: | 5,20 | 11,01 | 15,90 | 5,05 | 9,95 | 13,89 | 4,78 | 8,26 | 10,80 | 4,51 | 6,80 | 8,32 | 5,5 | |
| A - mod E-Modul Zug/Druck: | 1,87 | 3,80 | 5,54 | 1,82 | 3,46 | 9,74 | 1,73 | 2,91 | 3,83 | 1,65 | 2,43 | 2,99 | 2,8 | |
| A - mod E-Modul Biegung: | 2,02 | 3,80 | 5,54 | 1,95 | 3,46 | 9,74 | 1,83 | 2,91 | 3,83 | 1,72 | 2,43 | 2,99 | 5,8 | |
| Hinweis zur Abminderung A-mod: | alle Festigkeitswerte A-mod x Gamma M-fach | | | alle Festigkeitswerte A-mod x Gamma M-fach | | | alle Festigkeitswerte A-mod x Gamma M-fach | | | alle Festigkeitswerte A-mod x Gamma M-fach | | | 4,9 | |
| Zusammenstellung der Zug- und Biege-E-Moduln sowie Schnittgrößen/abgeleitete Spannungen für das o.g.Laminat nach Norm, Tab 4 und 5 der DIN 18820: | | | | | | | | | | | | | | |
| E-Modul für Zug nach Tab. 4 ungetemp: | 16038 | 8514 | 8514 | 16038 | 8514 | 8514 | 16038 | 8514 | 8514 | 16038 | 8514 | 8514 | 0,45 | |
| E-Modul Biegung nach Tab. 4 ungetemp: | 12726 | 8442 | 8442 | 12726 | 8442 | 8442 | 12726 | 8442 | 8442 | 12726 | 8442 | 8442 | 0,35 | |
| E-Modul Zug mit 0,8 x A-mod: | 6873 | 1615 | 1107 | 7055 | 1969 | 699 | 7405 | 2341 | 1777 | 7788 | 2802 | 2278 | 8,0 | |
| E-Modul Biegung 0,8 x A-mod: | 5044 | 1602 | 1098 | 5216 | 1953 | 693 | 5550 | 2321 | 1762 | 5921 | 2778 | 2259 | 5,0 | |
| G-modul Zug = E/2,6 für mue=0,3: | 1940 | 616 | 422 | 2006 | 751 | 267 | 2135 | 893 | 678 | 2277 | 1069 | 869 | 1,6 | |
| zul.Bruchkraft N je Breite [N/mm]: | 1210 | 288 | 288 | 1210 | 288 | 288 | 1210 | 288 | 288 | 1210 | 288 | 288 | 0,2 | |
| zul.Bruchkraft A-mod [KN/m]: | 232,62 | 26,17 | 18,11 | 239,65 | 28,93 | 20,73 | 253,31 | 34,88 | 26,66 | 268,34 | 42,36 | 34,62 | x | |
| Bruchspannung N [N/mm²]: | 235,87 | 56,14 | 56,14 | 235,87 | 56,14 | 56,14 | 235,87 | 56,14 | 56,14 | 235,87 | 56,14 | 56,14 | x | |
| Bruchspannung A-mod [N/mm²]: | 45,34 | 5,10 | 3,53 | 46,72 | 5,64 | 4,04 | 49,38 | 6,80 | 5,20 | 52,31 | 8,26 | 6,75 | x | |
| Bruchmom. je Breite (Nm/m) *Vg: | 292 | 107 | 107 | 292 | 107 | 107 | 292 | 107 | 107 | 292 | 107 | 107 | x | |
| zul.Bruchmom. A-mod [Nm/m]: | 193,36 | 33,49 | 23,18 | 199,20 | 37,03 | 26,53 | 210,56 | 44,64 | 34,12 | 223,05 | 54,20 | 44,31 | x | |
| Bruchspannung M [N/mm²]: | 229,31 | 84,03 | 84,03 | 229,31 | 84,03 | 84,03 | 229,31 | 84,03 | 84,03 | 229,31 | 84,03 | 84,03 | x | |
| Bruchspannung A-mod [N/mm²]: | 44,08 | 7,64 | 5,28 | 45,42 | 8,44 | 6,05 | 48,01 | 10,18 | 7,78 | 50,85 | 12,36 | 10,10 | x | |
| Schubfestigkeit [N/mm²] A-mod: | 9,61 | Fabel.-Wert | 50 | 9,90 | xxx | xxx | 10,47 | xxx | xxx | 11,09 | xxx | xxx | 0,1 | |
| Interlam.Festig. [N/mm²] A-mod: | 1,54 | Fabel.-Wert: | 8 | 1,58 | xxx | xxx | 1,67 | xxx | xxx | 1,77 | xxx | xxx | 0,9 | |
| Lochleibung [N/mm²] A-mod: | 28,84 | Fabel.-Wert: | 150 | 29,71 | xxx | xxx | 31,40 | xxx | xxx | 33,27 | xxx | xxx | x | |
| Tabellenwerte für Kriechen: | phi II | 0,35 | phi 90° | 1,60 | C-Wert 1: | 1,25 | C-Wert 2: | 1,30 | Faktor Y=II: | 2,19 | FaktorX=90°: | 3,82 | x | |
| Hinweis zu den Tabellenwerten der E-Moduli nach DIN 18820: bei diesen Angaben handelt es sich um Mittelwerte, als 5%-Quantile ist der 0,8-fache Wert angesetzt worden; K-Modul=E/1,2 für | | | | | | | | | | | | | | |

Abb. 9.12: Abminderung der Werkstoffkenngrößen zusammengefasst

Berechnungsergebnisse der statischen Bemessung

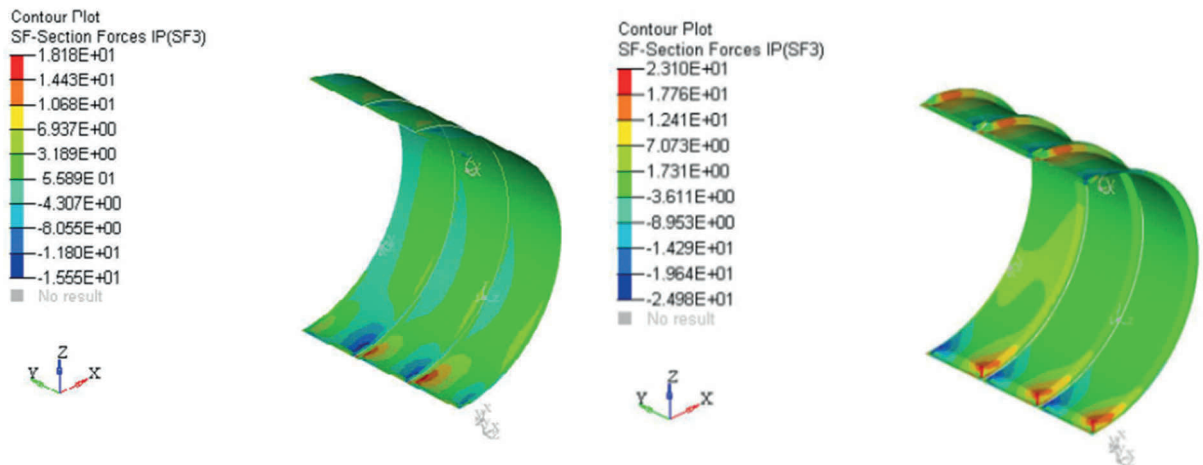


Abb. 9.13: Spannungs- und Dehnungsberechnung der Deckschichten nach FEM

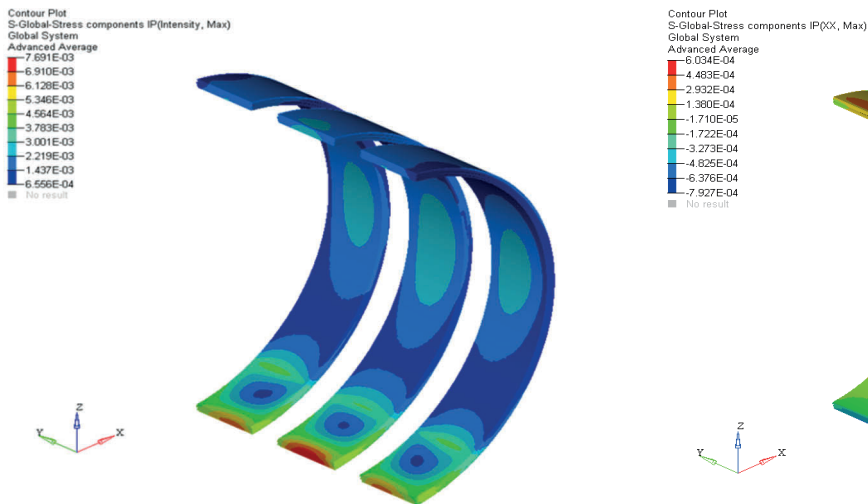


Abb. 9.14: Schubkraftverläufe im Kern nach FEM

Errichtung des Referenzobjektes ITS-Fassade am MeTeOr-Gebäude

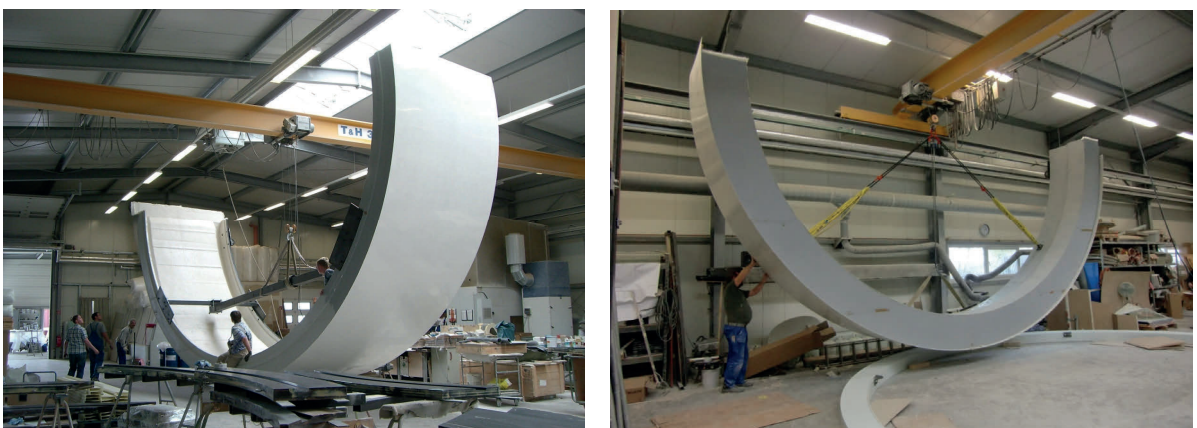


Abb. 9.15: Rohteile nach der Entformung; Mittelmodul (li.), Randmodul (re.)



Abb. 9.16: Montage Module; Manipulationsvorrichtung (li.), Randmodul (mi.), Mittelmodul (re.)



Abb. 9.17: Montage Mittelmodule (li.), Fertigstellung Montageprozess ITS-Fassade (re.)



Abb. 9.18: Impressionen MeTeOr-Gebäude (ITS-Schale außen und Innenansichten) [TU Chemnitz]

9.2 Modulare GFK-Tragstrukturen in Wabenbauweise

Ergebnisse aus den Dreipunkt-Biegeversuchen an großformatigen Prüfkörpern

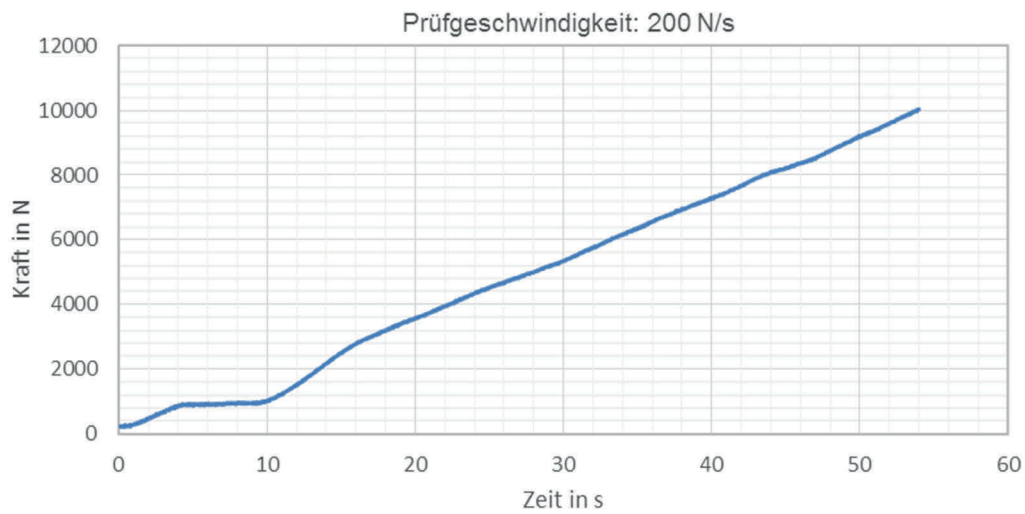


Abb. 9.19: Kraft-Zeit-Diagramm für eine Belastung von 10 kN (Prüfgeschwindigkeit 200 N/s)

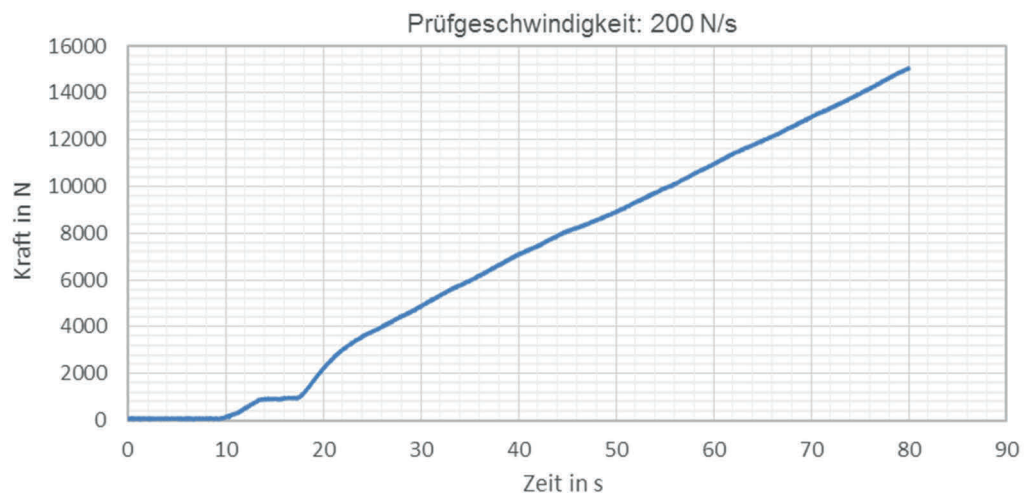


Abb. 9.20: Kraft-Zeit-Diagramm für eine Belastung von 15 kN (Prüfgeschwindigkeit 200 N/s)

Bestimmung der Verbindungsfestigkeit der „C-Spike“-Verbindung

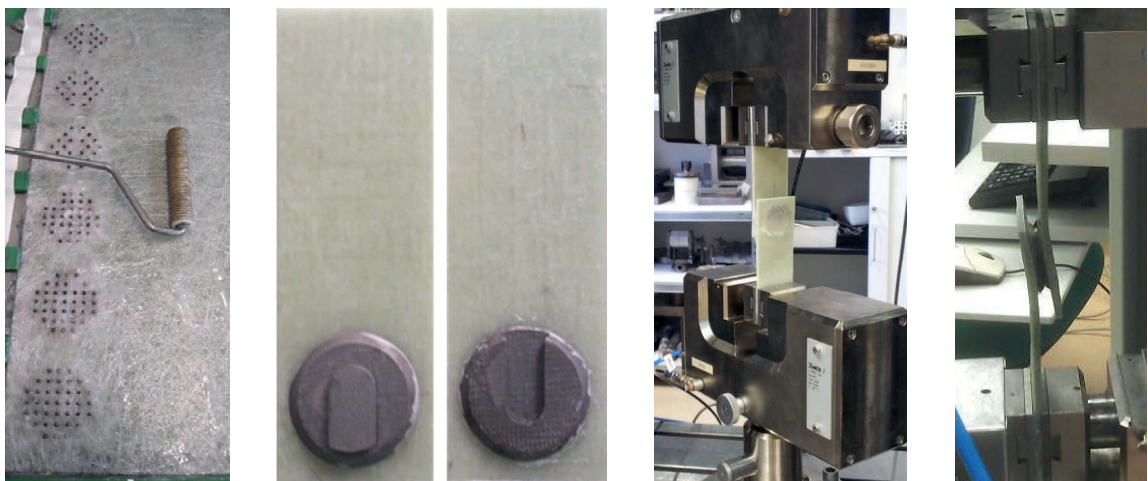


Abb. 9.21: Probenherstellung (li.), „C-Spike“-Proben (2. v. li.), Zugprüfung (2. v. re., re.)

Referenzobjekt: Interaktive Wabenbrücke Chemnitz

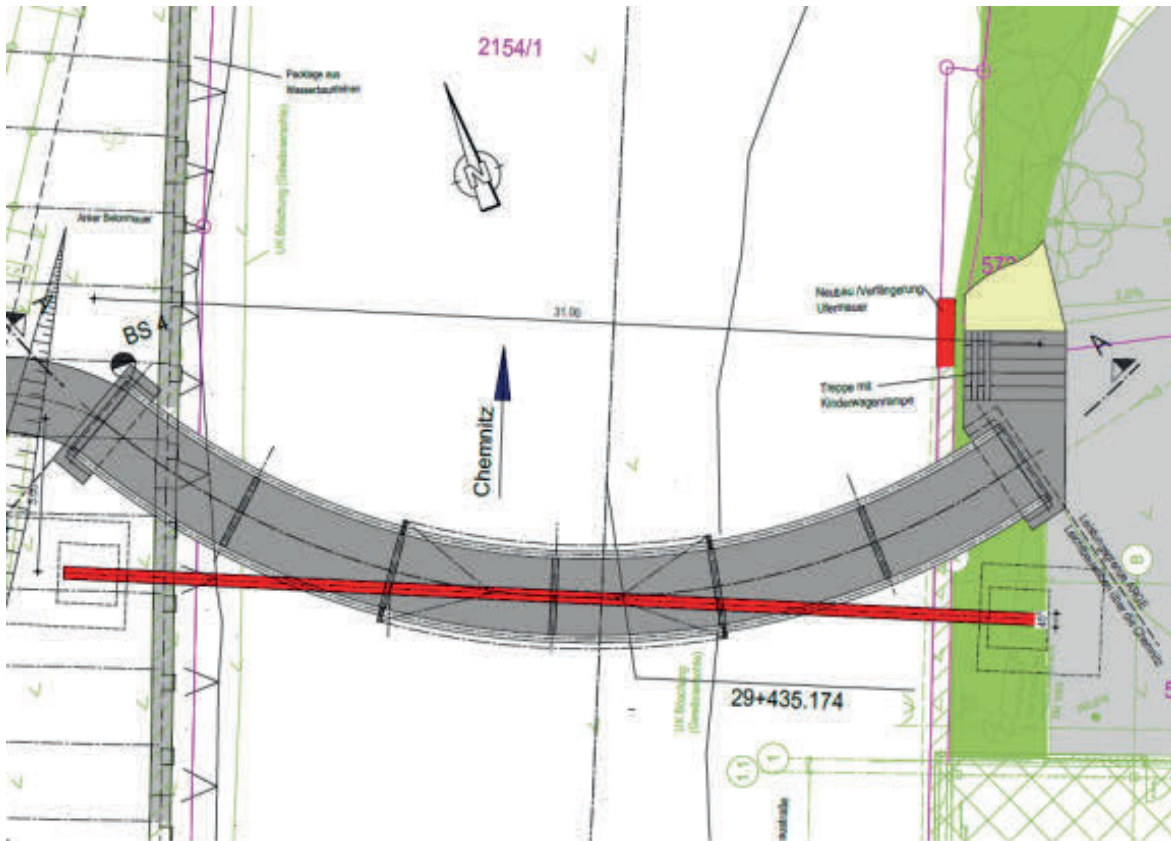


Abb. 9.22: Grundriss Wabenbrücke

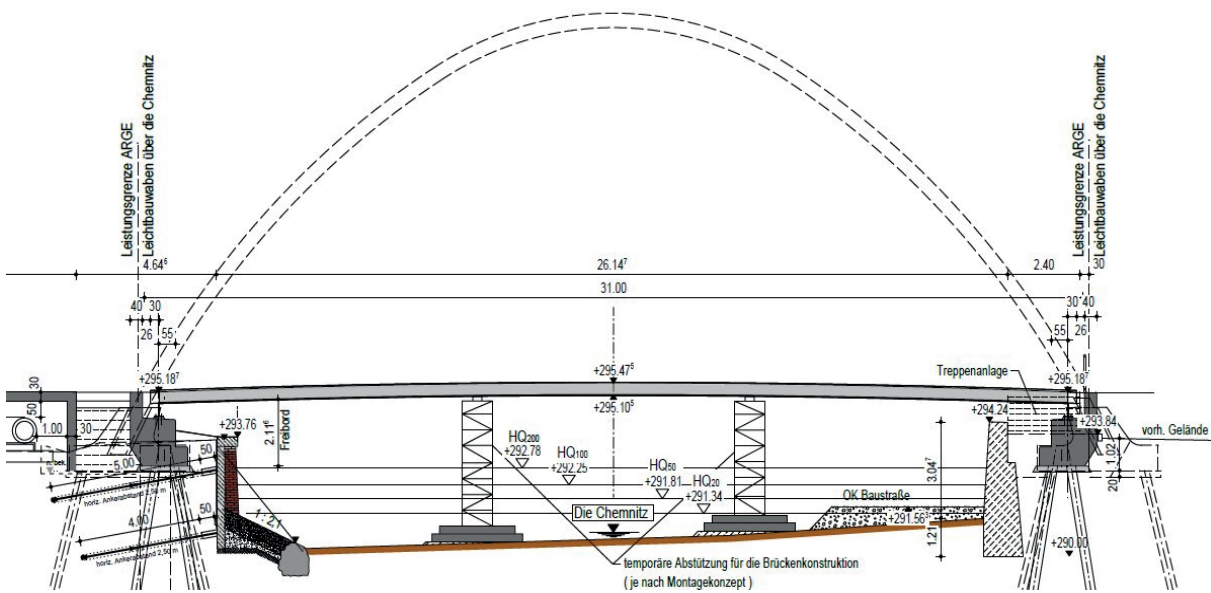


Abb. 9.23: Übersicht Wabenbrücke ohne Darstellung der Hänger [Schulze & Rank]

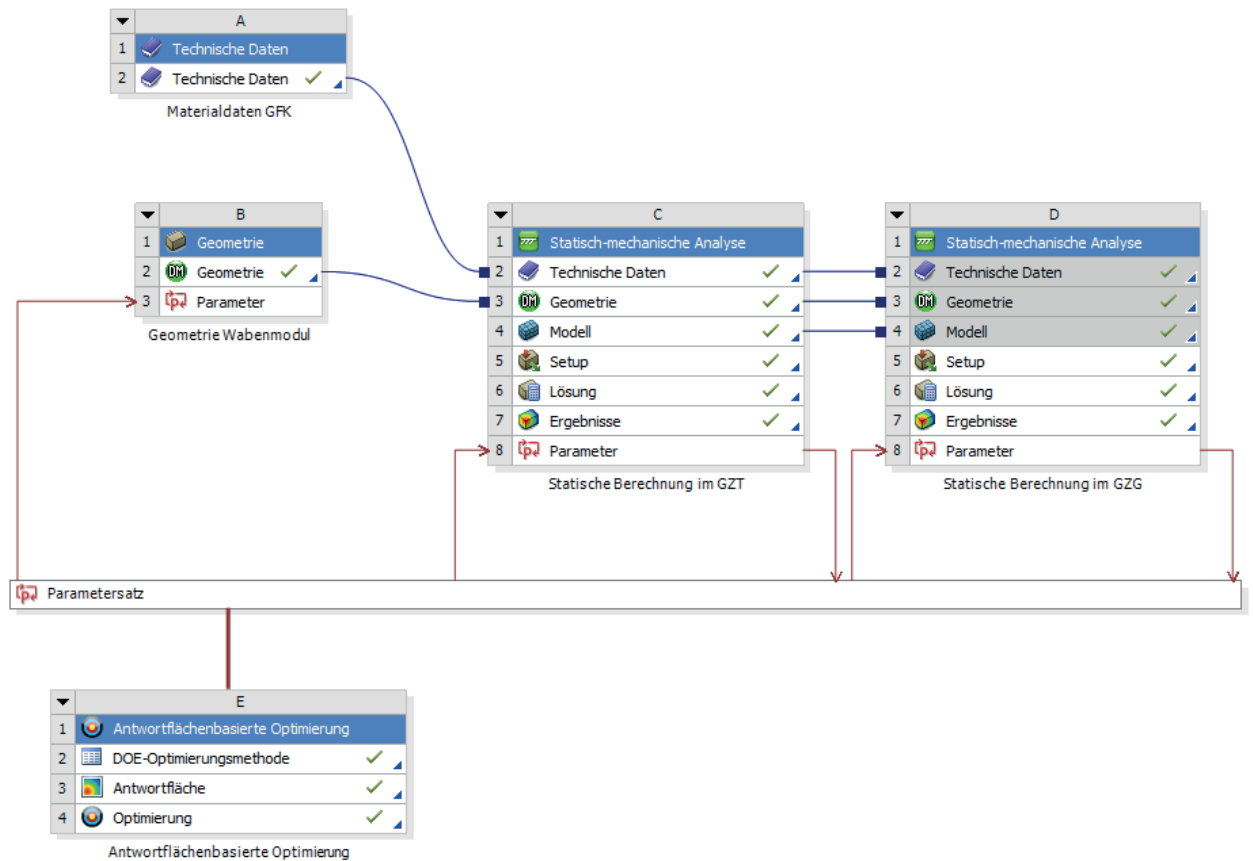
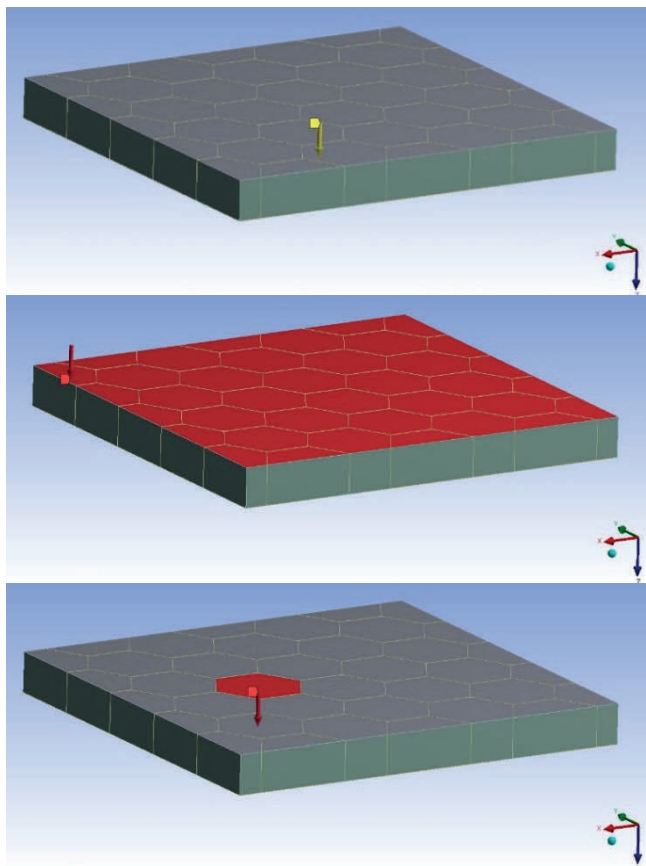


Abb. 9.24: Projektschema des Berechnungstools zur Dimensionierung der Wabenmodule

**Eigengewicht**

Grenzzustand der Tragfähigkeit:

Sicherheitsfaktor 1,35

Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit:

Sicherheitsfaktor 1,00

Verkehrslast (5 kN/m²)

Grenzzustand der Tragfähigkeit:

Sicherheitsfaktor 1,50

Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit:

Sicherheitsfaktor 1,00

Einzellast (5 kN)

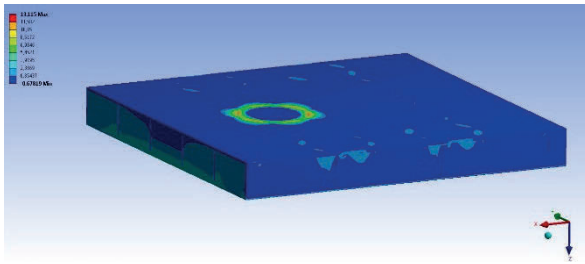
Grenzzustand der Tragfähigkeit:

Sicherheitsfaktor 1,50

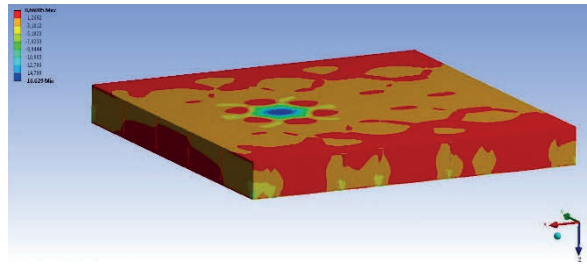
Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit:

Sicherheitsfaktor 1,00

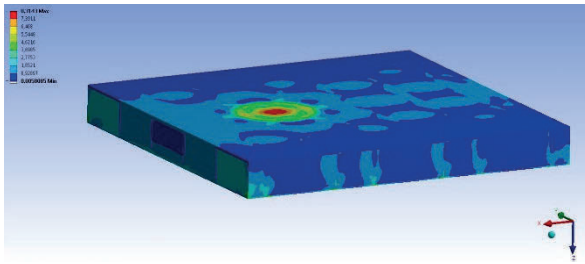
Abb. 9.25: Belastung des Wabenmoduls und Sicherheitsfaktor (Eigengewicht, Verkehrslast und Einzellast)



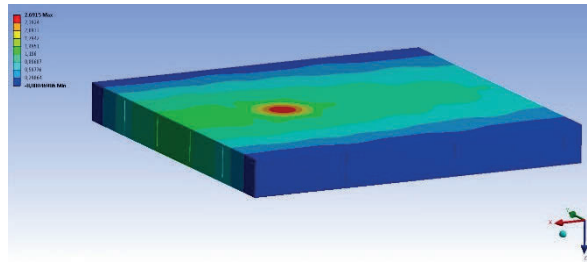
Maximale Zugspannung
Grenzzustand der Tragfähigkeit



Maximale Druckspannung
Grenzzustand der Tragfähigkeit



Maximale Schubspannung
Grenzzustand der Tragfähigkeit



Verschiebung in Z-Richtung
Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

Abb. 9.26: Ergebnisse für die Grenzzustände der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit

9.3 Fassadensystem in filigraner Faserbeton-Leichtbauweise

Materialentwicklung

Tab. 9.1: Qualitative Zusammensetzung des Architekturbetons

| Komponente | Erläuterung |
|---|---|
| Weißzement CEM I 52,5 R | Weißzement mit hoher Frühfestigkeit |
| Amorphes Alumosilikat | Puzzolan zur Erhöhung der mechanischen Festigkeit und Dauerhaftigkeit sowie als Aufheller |
| Dolomitsand 0/1 | Weißer Gesteinskörnung |
| Dolomitmehl ($x_{50} = 70 \mu\text{m}$) | Füller zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit von Frischbeton und als weißes Farbpigment |
| Integrale AR-Glaskurzfasern (12 mm) | Bewehrung für Feinbetonmatrix |
| Wasser | Zum „Anmachen“ des Betons |
| Hochleistungsfließmittel (30 M.-% PCE) | Elektrosterischer Stabilisator |

Referenzobjekt



Abb. 9.27: Auftrag Trennmittel in Schalung (li.), Eingabe Komponenten in Mischer (mi.), Gießformgebung (re.)



Abb. 9.28: Senkrechte Produktion (li.), Verdichtung mit Außenrüttlern (mi.), Vorbereitung Entschalung (re.)



Abb. 9.29: Entschalung: Demontage Formrückwand (li.), Entformung Betonelement (re.)



Abb. 9.30: Gestell für Transport der Elemente auf die Baustelle (re., mi.), Montage auf der Baustelle (re.)

9.4 Textilbewehrte Tragbetonelemente für den Lärmschutz

Materialentwicklung

Tab. 9.2: Qualitative und quantitative Zusammensetzung der hochfesten Feinbetonmatrix

| Komponente | Erläuterung | Volumenspezifische Masse [kg/m ³] |
|--|--|---|
| Zement CEM I 52,5 R | Zement mit hoher Frühfestigkeit | 450 |
| Steinkohlefeinstflugasche (x ₅₀ = 4 µm) | Puzzolane zur Erhöhung der mechanischen Festigkeit sowie Dauerhaftigkeit | 150 |
| Silica Fume Suspension (50 M.-% FG) | | 90 |
| Sand 0/2 | Gesteinskörnung | 310 |
| Sand 0/1 | Feine Gesteinskörnung | 900 |
| Dolomitmehl (x ₅₀ = 70 µm) | Füller | 190 |
| Integrale AR-Glaskurzfaser (12 mm) | Bewehrung für Feinbetonmatrix | 14 |
| Hochleistungsfließmittel (30 M.-% PCE) | Elektrosterischer Stabilisator | 15 |
| Wasser | Zum „Anmachen“ des Betons | 165 |

Materialcharakterisierung

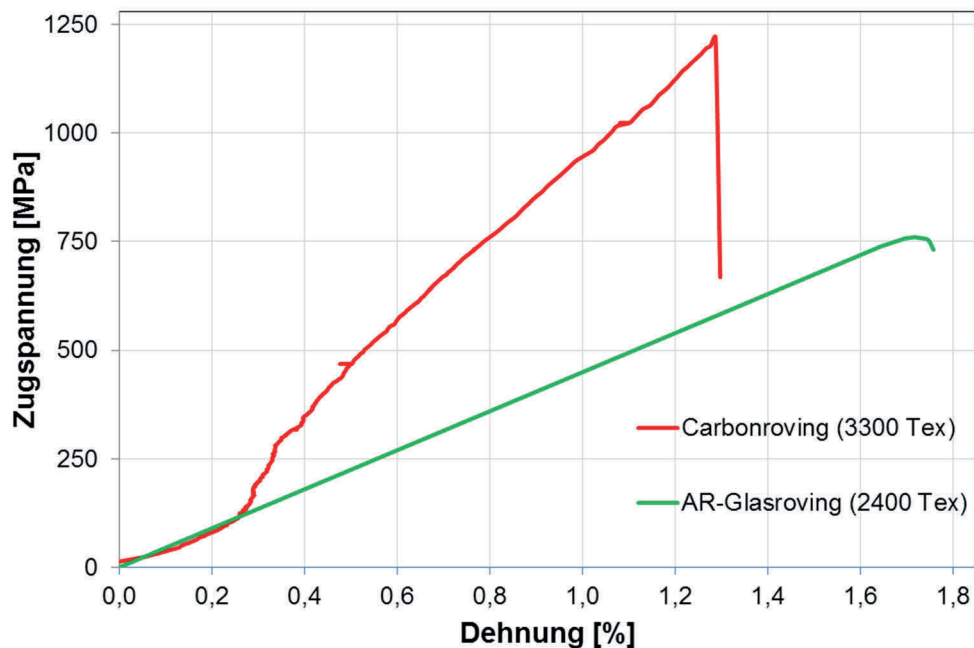


Abb. 9.31: Spannungs-Dehnungsverlauf von Carbon- und AR-Glasrovings

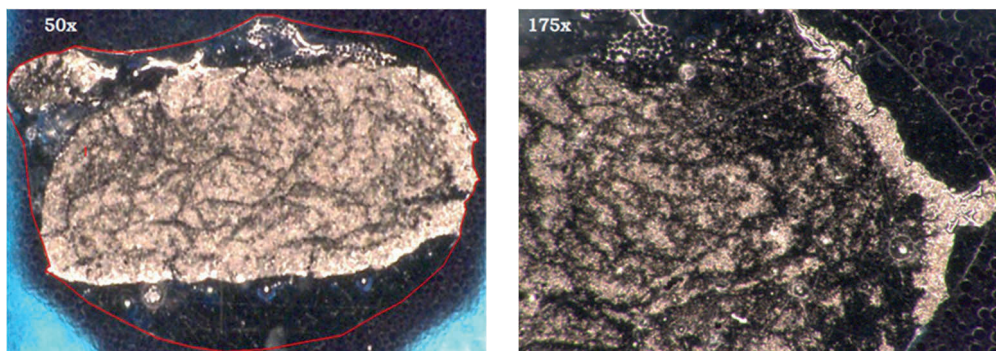


Abb. 9.32: Lichtmikroskopische Aufnahmen eines Carbonrovings mit Coating-System Epoxidharz

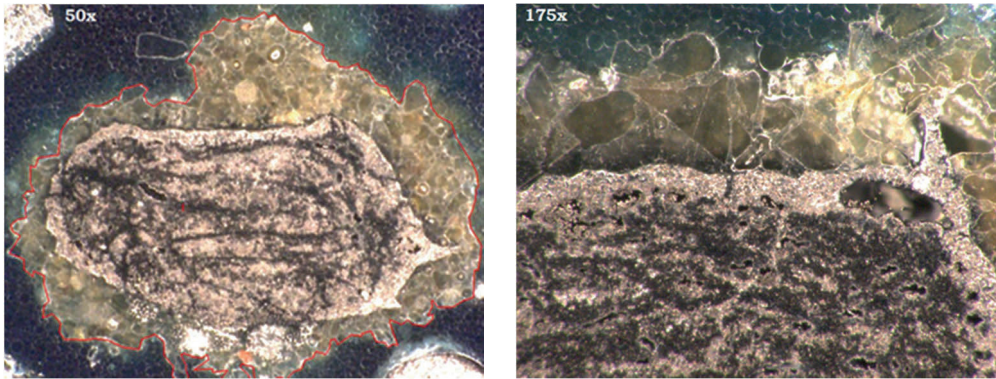


Abb. 9.33: Lichtmikroskopische Aufnahmen eines Carbonrovings mit Coating-System Epoxidharz und Sand 0/1

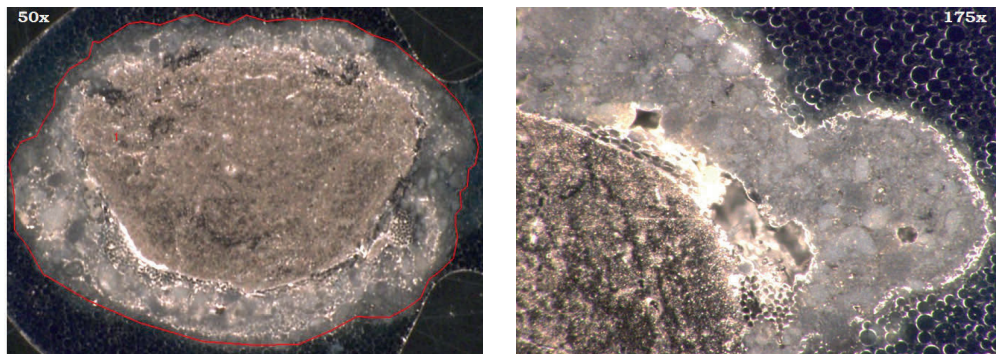


Abb. 9.34: Lichtmikroskopische Aufnahmen eines Carbonrovings mit Coating-System Epoxidharz und Mikrosilika

Tab. 9.3: Ergebnisse der Faserauszugsversuche in Feinbeton eingebetteter beschichteter Carbonrovings

| | Coatingsystem 1 | Coatingsystem 2 | Coatingsystem 3 | Coatingsystem 4 |
|--------------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Bestandteile der Beschichtung | Epoxidharz 2 8 M.-% * | Epoxidharz 2 8 M.-% * | Epoxidharz 2 8 M.-% * | Epoxidharz 2 8 M.-% * |
| | | Epoxidharz 3 15 M.-% | Epoxidharz 3 15 M.-% | Epoxidharz 3 15 M.-% |
| | | Silica Fume | | Sand 0/1 |
| Auszugskraft | 0,91 kN | 2,12 kN | 3,32 kN | 3,47 kN |
| Versagensart | Roving wird ausgezogen | Roving wird ausgezogen | Zugversagen des Rovings | Zugversagen des Rovings |

Tab. 9.4: Anforderungen an die neue Lärmschutzwand

| | System 1 | System 2 |
|-------------------------|------------------------|------------------------|
| Plattenlänge | 6,00 m | 4,00 m |
| Plattenbreite | 4,00 m | 4,00 m |
| Stützweite | 5,67 m | 3,67 m |
| Plattendicke | 0,05 bis 0,12 m | 0,05 bis 0,12 m |
| Bemessungswert Windlast | 2,30 kN/m ² | 2,40 kN/m ² |

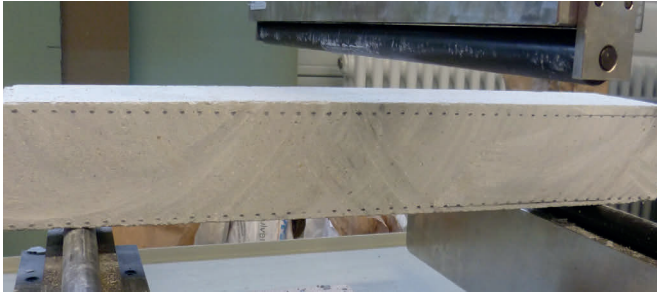


Abb. 9.35: Textilbewehrte Platte im Querschnitt im 3-Punkt-Biegezugversuch

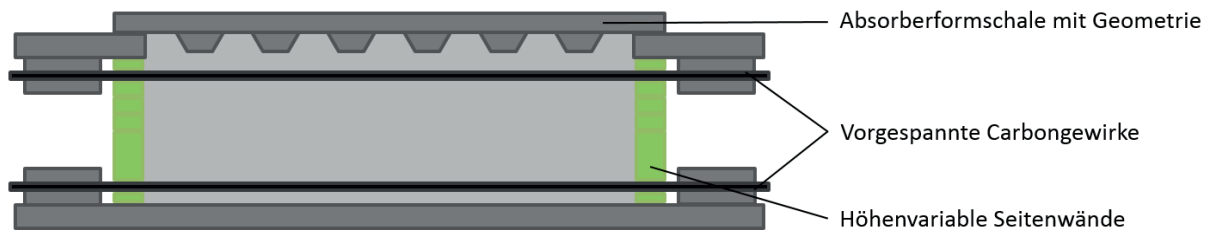


Abb. 9.36: Schematischer Aufbau der multifunktionalen und höhenvariablen Form zur Herstellung textilbewehrter Leichtbeton-Lärmschutzwände

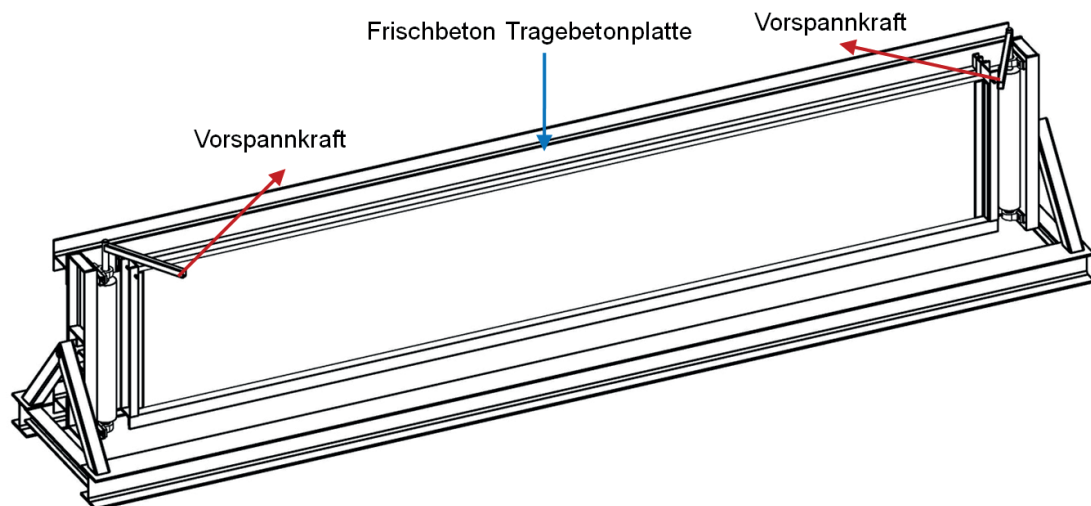


Abb. 9.37: Vorspannen der textilen Halbzeuge und anschließende Gießformgebung

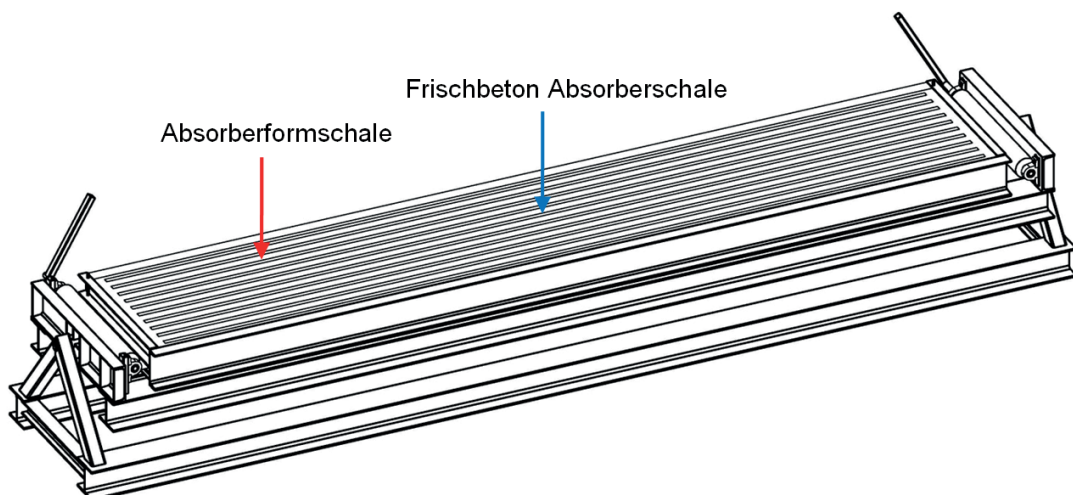


Abb. 9.38: Drehung der Schalung in horizontale Position und anschließende Montage der Absorberformschale

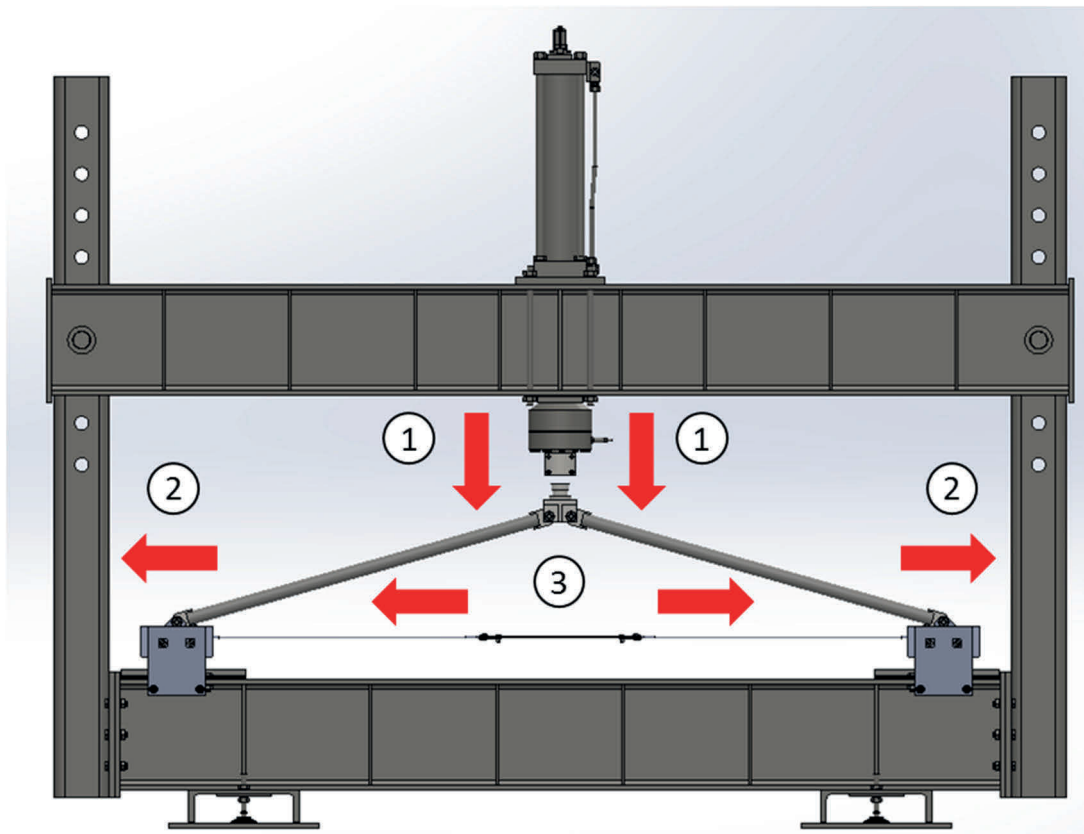
9.5 Textilbewehrte gekrümmte Tragelemente

Materialentwicklung

Tab. 9.5: Qualitative und quantitative Zusammensetzung der hochfesten Feinbetonmatrix

| Komponente | Erläuterung | Volumenspezifische Masse in kg/m ³ |
|---|--|---|
| Weißzement CEM I 52,5 R | Weißzement mit hoher Festigkeit | 530,0 |
| Amorphes Alumosilikat: Centrlit NC Powder | Puzzolan zur Erhöhung der Festigkeit und Dauerhaftigkeit | 120,0 |
| Dolomitsand Saxogran 1/3 | Gesteinskörnung | 330,0 |
| Dolomitsand Saxogran 0/1 | Feine Gesteinskörnung | 900,0 |
| EasyFlow III | Fließmittel | 150,0 |
| Alkali resistente Kurzfasern Cem FIL® 62.4 45tex (12 mm) | Bewehrung für Feinbetonmatrix | 17,0 |
| Wasser | Zum „Anmachen“ des Betons | 255,0 |
| MC Centrament Retard 310 | Verzögerer | 1,1 |
| MC-PowerFlow 3102 | Betonverflüssiger | 6,6 |

Flexible Schalung



- ① Krafteinleitung vom Hydraulikzylinder in die Einspannvorrichtung
- ② Winkelabhängige Kraftübertragung auf die Schlitten mittels Koppelstangen
- ③ Krafteinleitung in die GFK-Schalungen durch Edelstahlseile

Abb. 9.39: ABD-Einspannvorrichtung zur experimentellen Verifikation der Berechnungsmethoden; Aufbau und Funktionsweise

Referenzobjekt: Textilbeton-Pavillon TexLeS

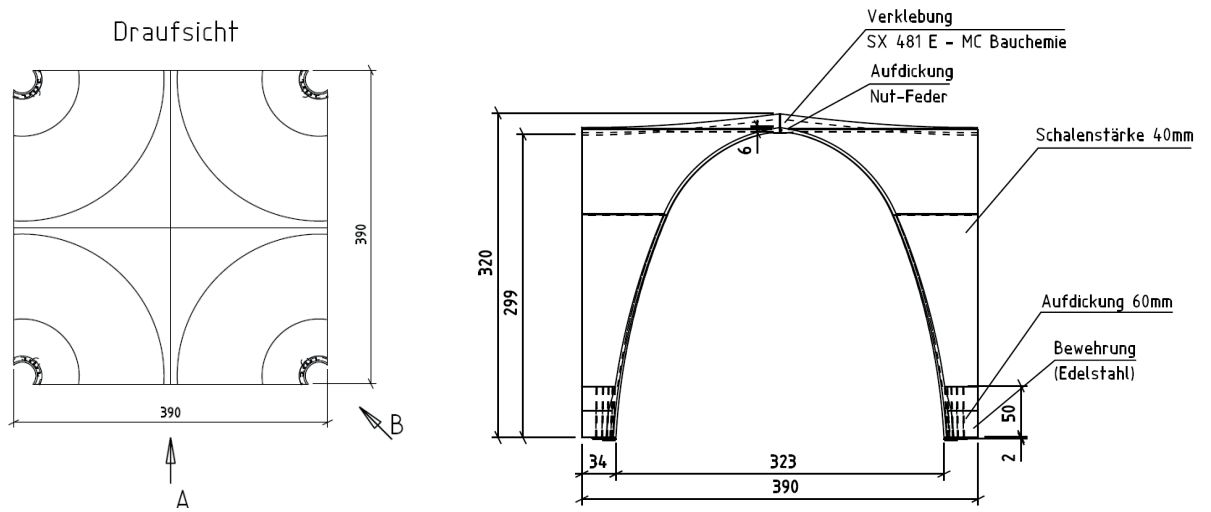


Abb. 9.40: Zeichnung der Textilbeton-Pavillons „TexLeS“ (Draufsicht, Schnitt)

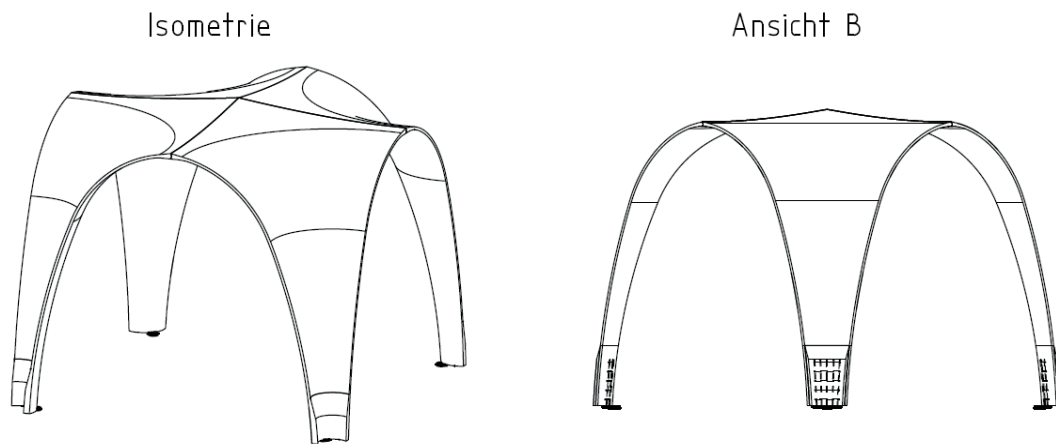


Abb. 9.41: Zeichnung der Textilbeton-Pavillons „TexLeS“ (Ansichten)



Abb. 9.42: Errichtung der Textilbeton-Pavillons „TexLeS“ auf dem Campusgelände der TU Chemnitz



Abb. 9.43: Errichtung der Textilbeton-Pavillons „TexLeS“ auf dem Campusgelände der TU Chemnitz



Abb. 9.44: Textilbeton-Pavillons „TexLeS“ auf dem Campusgelände der TU Chemnitz



Abb. 9.45: Textilbeton-Pavillons auf dem Campusgelände der TU Chemnitz mit Beleuchtung

9.6 Leichtbaukonstruktion in textildewehrter Hybridbauweise

Materialentwicklung

Tab. 9.6: Qualitative und quantitative Zusammensetzung der Feinbetonrezeptur

| | Volumenspez. Masse [kg/m ³] |
|---|---|
| CEM I 52,5 R (Weißzement) | 500 |
| Steinkohlefeinstflugasche | 180 |
| Silica Fume (agglomeriertes Pulver) | 50 |
| Quarzsand 0/1 | 1180 |
| Quarzmehl (x50 = 21 µm) | 180 |
| AR-Glasfasern (integrale Kurzfasern, 12 mm) | 4 |
| Elektrosterischer Stabilisator | 25 |
| Wasser | 210 |

Materialcharakterisierung

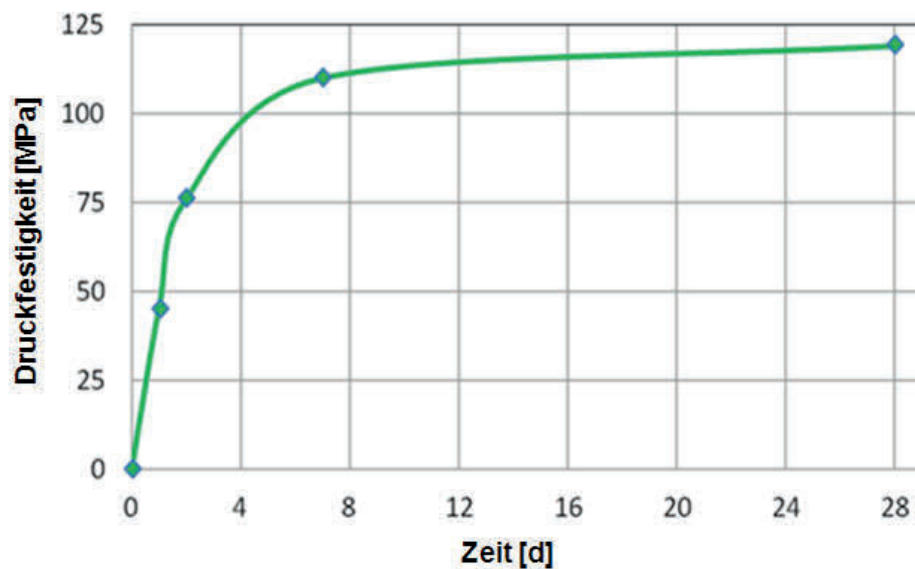


Abb. 9.46: Druckfestigkeit in Abhängigkeit von der Zeit

Befestigungssystem

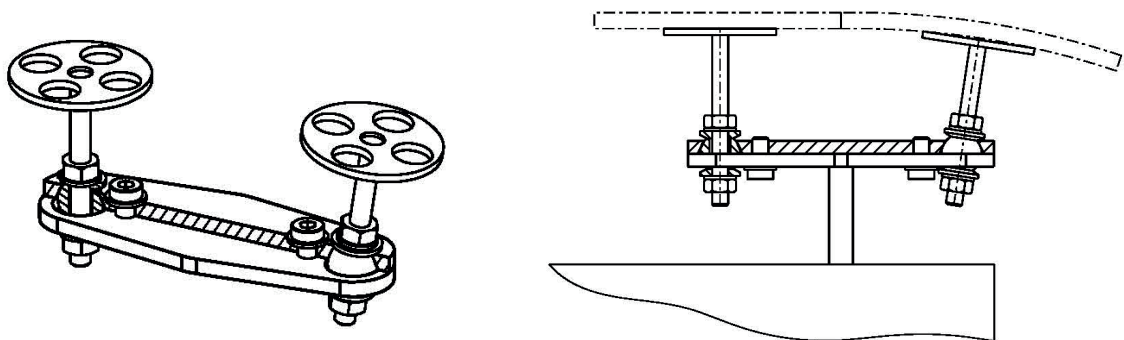


Abb. 9.47: Eigens entwickeltes punktuellcs Multiachs-Befestigungssystem

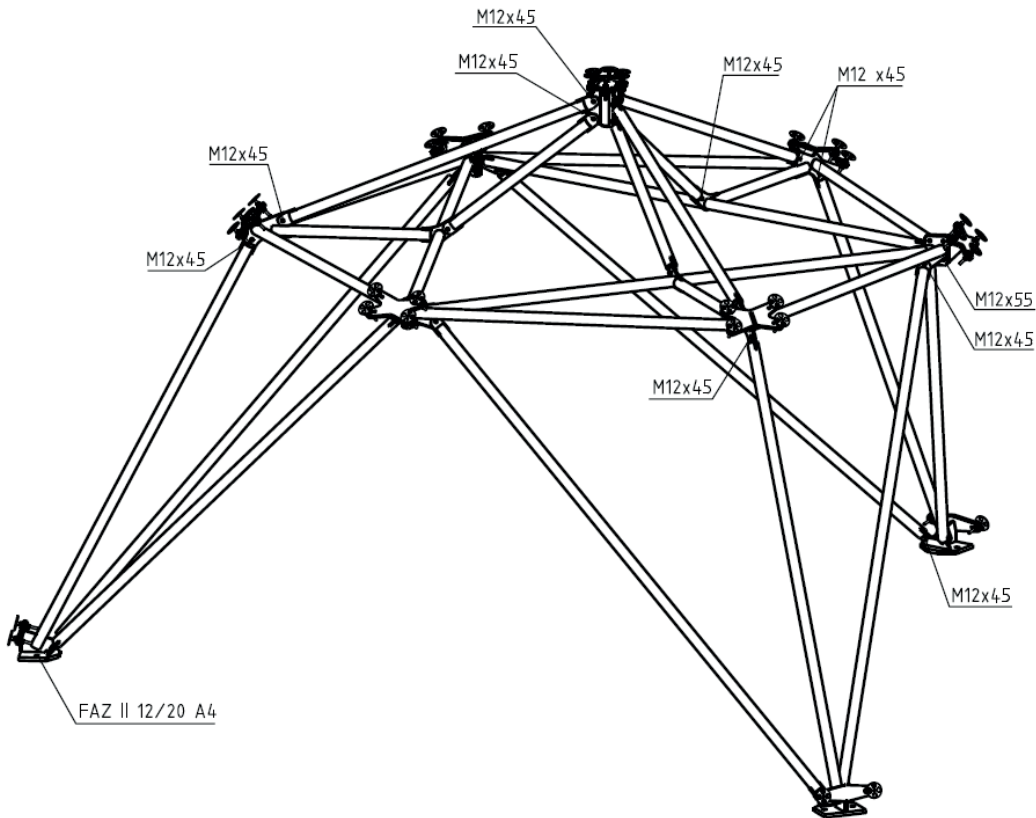


Abb. 9.48: Isometrische Ansicht der Unterkonstruktion des Forschungspavillons CoFigloo



Abb. 9.49: Fertiggestellter Forschungspavillon CoFigloo

Kurzvita

Dr.-Ing. habil. Sandra Gelbrich (geb. Müller)

Geboren am 14.02.1977 in Karl-Marx-Stadt

Verheiratet; 2 Töchter

- 1995 - 2001 Studium Bauingenieurwesen, Bauhaus-Universität Weimar
Abschluss: Diplom-Ingenieur (Dipl.-Ing.)
- 2001 - 2002 Planungsingenieur, Fa. Wieland Bauservice GmbH, Rossau
- 2002 - 2007 Wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Professur Konstruktion im Allgemeinen Maschinenbau der Technischen Universität Chemnitz
- 05/2008 Promotion zum Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
„Beitrag zur Entwicklung von Krafteinleitungselementen für hochbeanspruchte Faserverbund-Zugstreben im Bauwesen“ (magna cum laude)
- 12/2008 Ernennung zur „Akademischen Rätin“ (befristete Verbeamtung bis 04/2015)
- Seit 2001 Nebenberuflicher Dozent für Baustoffkunde an der Handwerkskammer Chemnitz
- Seit 2004 Vorstand des Bautechnik-Forums Chemnitz (jährlich stattfindende Tagung)
- Seit 2009 Leiterin des Forschungsbereiches „Leichtbau im Bauwesen“ an der Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung der TU Chemnitz
- Seit 2010 Leitung der jährlich stattfindenden Tagung „LeichtBAU-Forum Chemnitz“
- Seit 2012 Leitung des Steinbeis-Innovationszentrums FiberCrete in Chemnitz
- Seit 2012 Lehrbeauftragte für die Vorlesung „Grundzüge des Leichtbaus“ an der Fakultät für Maschinenbau der TU Chemnitz
- Seit 2012 Lehrbeauftragte für die Vorlesung „Bionik im Leichtbau“ (Master Leichtbau) an der Fakultät für Maschinenbau der TU Chemnitz
- Seit 2012 Leitung des DFG-Projektes „Flexible mehrschichtige GFK-Schalungen zur Herstellung von doppelt gekrümmten Beton-Leichtbauelementen mit stabilisierten Abstandsgewirken“ (1. + 2. Phase) im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms 1542: Leicht Bauen mit Beton
- Seit 2014 Mitglied der Studienkommission Wirtschaftsingenieurwesen an der TU Chemnitz
- 2012-2016 Initiierung und Leitung der ESF-Nachwuchsforschergruppe: TexLeS – Textilbewehrte Leichtbauschalen in ressourceneffizienter Beton-GFK-Verbundbauweise für organisch geformte Innen- und Außenhüllen von Bauwerken
- 2012-2016 Erarbeitung der Habilitationsschrift zum Thema „Funktionsintegrierte Leichtbaustrukturen für Tragwerke im Bauwesen“
- 11/2016 Habilitation zum Doktor-Ingenieur habilitiert (Dr.-Ing. habil.)

Forschungsschwerpunkte:

Faser- und textilverstärkte Verbundwerkstoffe mit polymerer und mineralischer Matrix,
Hybride Werkstoffverbunde, funktionsintegrierter Strukturleichtbau im Bauwesen

Publikationen (2016):

88 Veröffentlichungen und 6 Patente