



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

Institut für Massivbau <http://massivbau.tu-dresden.de>

SILKE SCHEERER, MANFRED CURBACH (HRSG.)

LEICHT BAUEN MIT BETON

**FORSCHUNG IM
SCHWERPUNKTPROGRAMM 1542
FÖRDERPHASE 1**

Flexible GFK-Schalungen zur Herstellung von doppelt gekrümmten Beton-Leichtbauelementen mit stabilisierten Abstandsgewirken

Lothar Kroll
Sandra Gelbrich
Henrik Funke
Andreas Ehrlich
Lars Ulke-Winter
Carolin Petzoldt

Institut für
Strukturleichtbau,
Technische
Universität
Chemnitz

Zur effizienten Fertigung gekrümmter Freiformschalen mit großen Abmessungen wurde ein neuer konstruktiv-technologischer Lösungsansatz in Form eines flexibel formbaren, mehrschichtigen Schalungssystems aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) erarbeitet. Diese GFK-Schalungselemente gestatten unter Ausnutzung ihres anisotropiebedingten Strukturverhaltens eine gezielte Einstellung von definierten Krümmungszuständen. In umfassenden Untersuchungen zum Systemaufbau der entwickelten GFK-Schalungen und Beton-Leichtbauelemente mit stabilisierten Abstandsgewirken wurden repräsentative, gekrümmte Freiformflächen mit verschiedenen Krümmungsradien entworfen, numerisch berechnet, hergestellt sowie die Konturengenauigkeit und die belastungsgerechte Integration der Gewirke verifiziert.

1 Einleitung

Die Erforschung von neuartigen Betonstrukturen mit hohen Leichtbau-Eigenschaften (hohe spezifische Festigkeiten) sowie von textilen Bewehrungen für Sonderanwendungen ist seit einigen Jahren Gegenstand intensiver wissenschaftlicher und anwendungsorientierter Forschungen [1]-[3]. Demgegenüber fehlen geeignete Schalungssysteme zur Umsetzung derartiger leichter Schalentragswerke, wobei besonderer Bedarf an flexibel formbaren, wiederverwendbaren Systemen besteht [4].

Textilverstärkter Beton bietet eine große Variationsbreite und damit Gestaltungsfreiheit zur Anpassung sowohl der Form als auch der textilen Bewehrung an die herrschenden Beanspruchungen (vgl. z. B. [5] und die dort aufgeführten Literaturstellen). Gegenüber Stahlbeton kann darüber hinaus die Korrosionsneigung weitgehend ausgeschlossen werden, so dass eine filigrane Bauweise mit geringen Dicken umsetzbar ist [1], [5]-[7].

Eine wesentliche technologische Zielstellung bei der textilen Verstärkung von Beton-elementen ist die Entwicklung komplexer räumlicher Preform-Strukturen, die aus der Verarbeitung flächiger Gebilde auf Basis einer speziellen Konfektionierung [8] gefertigt werden. Das weichelastische Verhalten der 3D-Textilien kann durch Variation der Parameter wie Steifigkeit, Orientierung und Anhäufungsdichte der Polfäden im weiten Bereich beeinflusst und damit auf die Abformung der festgelegten Krümmungen abgestimmt werden. Obgleich gezielt verformbare textile 3D-Strukturen, wie z. B. Abstandsgewirke zur Verstärkung von Beton-Leichtbauelementen, grundsätzlich vorhanden sind, befinden sich die zugehörigen Schalungselemente zur Ausführung von beliebig gekrümmten Beton-Schalentragswerken erst am Anfang des Entwicklungsstadiums. Derzeit sind Flächentragswerke in ihrer Formbarkeit auf Kuppeln, hyperbolische Paraboloiden und Konoide begrenzt und bei der Herstellung mit einem erheblichen Material- und Montageaufwand verbunden [4], [9], [10]. Auch die mathematische Beschreibung komplexer Freiformflächen und der anisotropen faserverstärkten Kunststoffverbunde gestaltet sich sehr schwierig [11], [12]. Im Bereich der rechnergestützten Visualisierung sind unterschiedliche Verfahren zur Formoptimierung von Oberflächen und deren statisch-konstruktiver Berechnung und Konstruktion entwickelt worden, die allerdings noch nicht technologisch in der Schalungsfertigung ihre Anwendung finden (siehe z. B. [13]). Zu üblichen Schalungstechniken zählen konventionell segmentierte Holz- und Stahlssysteme, pneumatisch gestützte und modellierte Schalungen sowie deren Kombinationen [14]-[16].

Für die Herstellung von doppelt gekrümmten Beton-Leichtbauelementen mit Hilfe flexibler Schalungssysteme aus glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK) stehen eingehende Untersuchungen noch aus. Die hier vorgestellte Forschungsarbeit befasst sich mit der numerischen Berechnung und experimentellen Verifikation von flexiblen, anisotropen GFK-Schalungen sowie der Herstellung von repräsentativen doppelt gekrümmten Beton-Leichtbauelementen mit integrierten stabilisierten Abstandsgewirken.

2 Materialien und Methoden

2.1 Komponenten für glasfaserverstärkten Kunststoff (GFK)

Für die Herstellung der GFK-Schalungen kam das unidirektional verstärkte (UD) Gelege UT-E500 der Firma GURIT Holding AG aus Aluminoborosilikatglas mit einem Flächen­gewicht von 500 g/m² zur Anwendung. Als duroplastische Kunststoffmatrix wurde das Epoxidharz Epilox® T19-27 der Firma LEUNA-Harze GmbH eingesetzt. Aus dem UD-Gelege und dem Epoxidharz wurden durch Handlaminieren unidirektional verstärkte Einzelschichten mit einem Faservolumengehalt von 30 Prozent hergestellt. Innerhalb dieser UD-Einzelschicht wurden die unabhängigen Kennwerte Elastizitätsmodul in Faserrichtung E_1 und quer zur Faserrichtung E_2 , Querkontraktionszahl ν_{12} , Schubmodul G_{12} sowie die linearen thermischen Ausdehnungskoeffizienten $\alpha_{1(20/120)}$ und $\alpha_{2(20/120)}$ zwischen +20 und +120 °C experimentell ermittelt. In Tabelle 1 sind die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen enthalten.

Tabelle 1: Kennwerte der unidirektional verstärkten Einzelschicht

E_1 [GPa]	E_2 [GPa]	ν_{12} [-]	G_{12} [GPa]	$\alpha_{1(20/120)} \cdot 10^{-6}$ [K ⁻¹]	$\alpha_{2(20/120)} \cdot 10^{-6}$ [K ⁻¹]
23,7	6,4	0,3	1,6	7	130

2.2 Einstellung und Ermittlung definierter Krümmungen

Die ermittelten Grundkennwerte der GFK-Verbunde dienen der analytischen und numerischen Berechnung von mehrschichtigen Schalen, die sowohl einen ausgeglichenen symmetrischen als auch einen unsymmetrischen Aufbau aufzeigten. Die GFK-Schalungen mit 50 × 50 cm² Plattengröße wurden aus 11 UD-Einzelschichten mit einer Gesamtstärke von 3,3 mm hergestellt (Bild 1).

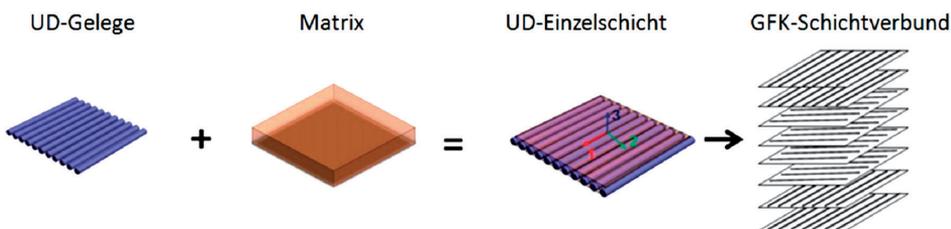


Bild 1: Prozesskette zur Herstellung anisotroper GFK-Schichtverbunde

Im direkten Anschluss an die Fertigung der ebenen GFK-Schalungen erfolgte die Aushärtung der duroplastischen Matrix im Wärmeschrank über einen Zeitraum von sechs Stunden bei einer konstanten Temperatur von 120 °C. Nach der Aushärtung wurden die GFK-Schalungen frei auf Raumtemperatur (20 °C) abgekühlt. Durch diese Temperaturdif-

ferenz von -100 K bildete sich eine schwache Krümmung infolge der fertigungsbedingten Eigenspannungen bei den anisotropen Schichtaufbauten aus (Bild 2). Anschließend konnten durch externes Vorspannen (z. B. Zugbelastung wie in Bild 2) hohe Krümmungen

durch die gezielte Ausnutzung der schichtbedingten Koppeleffekte hervorgerufen werden.

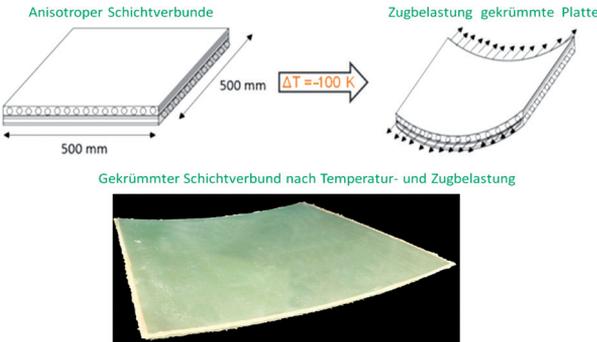


Bild 2: Temperatur- und Zugbelastung anisotroper GFK-Schichtverbunde zur Einstellung definierter Krümmungszustände



Bild 3: Herstellung eines Schalungssegmentes, fertiges vorgekrümmtes Segment und Aufbringen einer Zugbelastung im ABD-Strukturprüfstand [Fotos: Carolin Petzoldt]

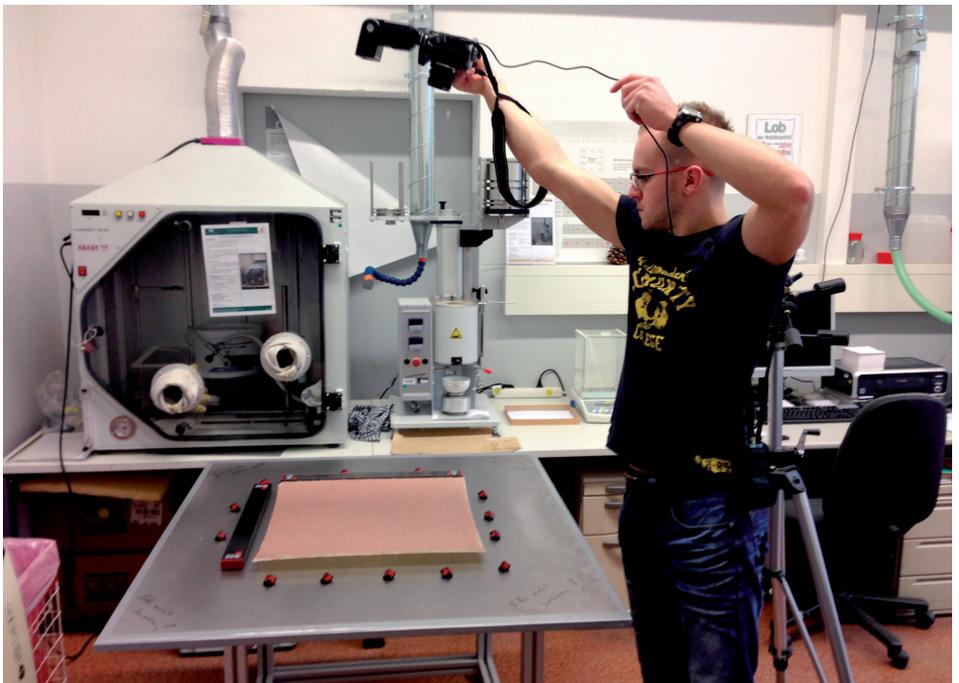
Die Berechnungen der anisotropiebedingten Koppeleffekte wurden mit ABAQUS 6.9 analytisch mit der klassischen Laminattheorie und der Scherdeformationstheorie 1. Ordnung durchgeführt. Zur experimentellen Verifikation der vorausgerechneten anisotropen Koppeleffekte wurden ausgewählte GFK-Schalungssegmente hergestellt und auf dem institutseigenen Strukturprüfstand mit der ABD-Einspannovruchtung getestet (siehe Bild 3).

Die Ergebnisse dienen im Weiteren der Ermittlung von funktionalen Zusammenhängen zwischen Krümmungen sowie Prozess- und Geometrieparametern. Hierauf aufbauend erfolgte die Analyse und Identifikation von einfach und doppelt gekrümmten Grundformen, durch deren Kombination eine größtmögliche Variantenanzahl für definierte Freiformflächen vorlag.

Die experimentelle Validierung der Krümmungen erfolgten unter Verwendung der optischen Formänderungsanalysensysteme ARGUS und ARAMIS der Firma GOM (Bild 4).

Bild 4: Versuchsaufbau des optischen Formänderungsanalysensystems ARGUS mit gekrümmter GFK-Schichtverbundplatte mit codierten Messmarken

[Foto: Carolin Petzoldt]



2.3 Polymergebundene Stabilisierung von 3D-Gewirken zur Integration in Beton

Für die Herstellung der textilverstärkten Concretelemente ist das biegeeweiche textile 3D-Gewirke „SitGrid“ der Firma V. Fraas Solutions in Textile GmbH verwendet worden. Das Gewirke besteht aus alkaliresistentem Glas (AR-Glas) mit einer Feinheit von 2400 tex (1 tex entspricht 1 g pro 1000 m) in Kett- und in Schussrichtung (Bild 5). Dieses wurde auf den Schalungselementen abgelegt, um so die Krümmungen formgenau abzubilden und in einem weiteren Arbeitsgang zu stabilisieren. Für die Stabilisierung kamen duroplastische und thermoplastische Harzsysteme zum Einsatz. Die Applikation der Harzsysteme erfolgte mittels Sprühen oder Walzen bzw. unter gezielter Ausnutzung der Kapillarkwirkung der Polfäden auf die vorgekrümmten 3D-Gewirke. Mit Hilfe der Fourier-Transformations-Infrarotspektroskopie mit abgeschwächter Totalreflexion (ATR-FTIR) konnte die Wirkung der Polfäden zum kapillaren Saugen erforscht werden.

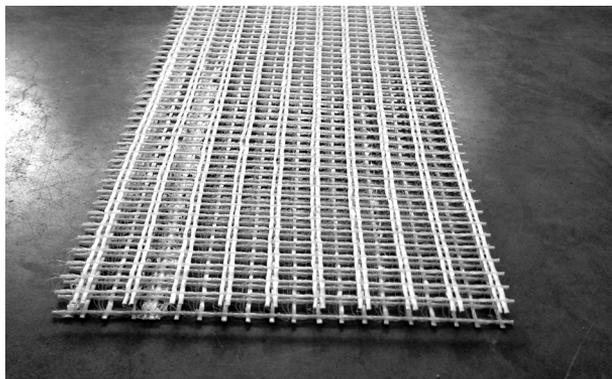


Bild 5: 3D-Gewirke SitGrid

[Foto: Henrik Funke]

2.4 Fertigungsversuche GFK-Schalung/Beton-Leichtbauelemente

Bei den Fertigungsversuchen GFK-Schalung/Beton-Leichtbauelemente wurden ausgewählte repräsentative, doppelt gekrümmte Freiformflächen mit verschiedenen Krümmungsradien hergestellt. Die Einstellung der Krümmungen erfolgte über das neuartige flexible GFK-Schalungselement, wobei diese Schalung wiederverwendbar zur Einstellung weiterer Krümmungszustände geeignet ist. Die grundsätzliche Vorgehensweise bei der Durchführung der Fertigungsversuche umfasste die Herstellung der flexiblen Schalung mit Referenz- oder Vorspannkrümmung. Im Anschluss an die Schalungsherstellung ist die Positionierung der Abstandhalter (Bild 6) an die Bewehrung und die Einbringung, Fixierung und Stabilisierung des Abstandsgewirkes vorgenommen worden. Nach der Positionierung und Stabilisierung der textilen 3D-Verstärkungsstruktur erfolgte das Auftragen des Feinbetons, wobei auf die angepasste Betonrezeptur aus Tabelle 2 zurückgegriffen wurde.

Neben weißem Portlandzement vom Typ 52,5 R enthielt der verwendete Feinbeton ein amorphes Alumosilikat als puzzolanisches Bindemittel (Tabelle 2). Als Gesteinskörnung bzw. Füller wurden Dolomitsand mit einer Korngröße von 0–1 mm und Dolomitmehl mit einer mittleren Korngröße von 70 µm verwendet. Die alkaliresistenten Glaskurzfasern waren 12 mm lang und hatten ein Längengewicht von 45 tex. Das mit der MC Bauchemie entwickelte Hochleistungsfließmittel

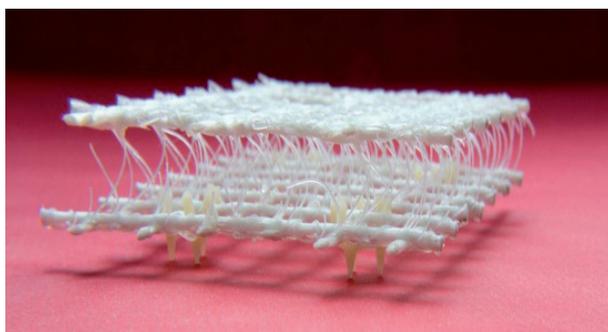
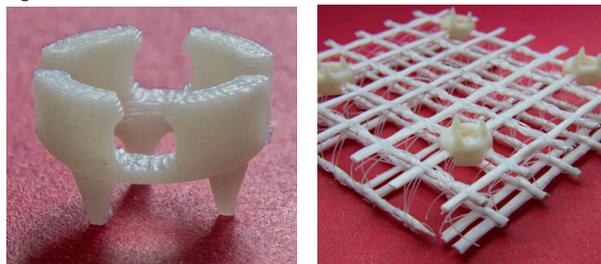


Bild 6: Entwickelte textile Abstandhalter für kraftflussgerechte Integration von Abstandsgewirken in Feinbeton

[Fotos: Carolin Petzoldt]

HF UltraFlow hatte einen Polycarboxylatether-Anteil (PCE) von 38 M.-%. Der Wasserbindemittelwert betrug 0,37.

Tabelle 2: Qualitative und quantitative Zusammensetzung der Feinbetons

Komponente	Anteil in kg/m ³
Weißzement CEM I 52,5 R	500
Amorphes Alumosilikat	150
Dolomitsand 0/1	1270
Dolomitfüller (x50 = 70 µm)	150
Wasser	240
AR-Glaskurzfasern (12 mm, integral)	18
Hochleistungsfließmittel HF UltraFlow	10

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Theoretische und experimentelle Verifikation von Hauptkrümmungen

Die theoretischen Hauptkrümmungen (Berechnungsansätze siehe [13]) eines asymmetrischen Schichtaufbaus mit 0°- und 90°-Faseranteil ($90_n/0_m$) sind exemplarisch für zwei Belastungsfälle in Abhängigkeit des 0°-Faseranteils in Bild 7 dargestellt. Die Krümmungen nahmen mit steigendem 0°-Faseranteil und damit zunehmender Anisotropie sowohl um die 1- als auch um die 2-Achse zu (Bild 7).

Die höchste Anisotropie war bei einem relativen 0°-Anteil von ca. 50 Prozent vorhanden, wodurch sich um beide Achsen die größte Krümmung einstellte (Bild 7 und Bild 8). Eine

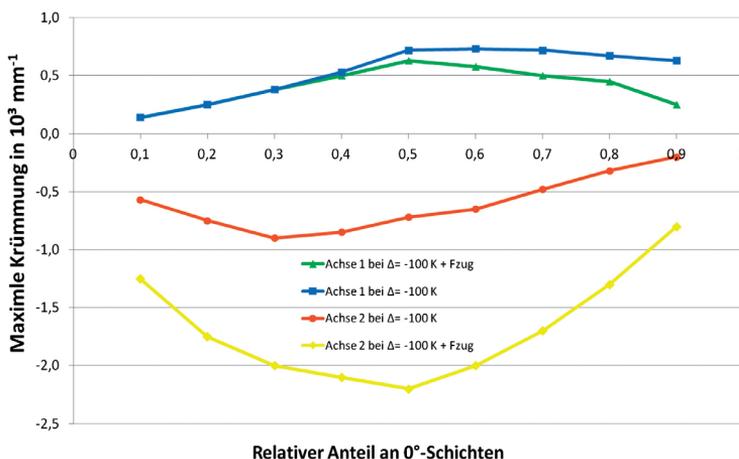


Bild 7: Theoretische Hauptkrümmungen eines asymmetrischen Schichtaufbaus ($90_n/0_m$) in Abhängigkeit vom Anteil der 0°-Schichten bei reiner Temperaturbelastung ($\Delta T = -100$ K) und überlagerter Temperatur- und Zugbelastung

weitere Erhöhung des 0°-Faseranteils bewirkte eine Abnahme der Krümmung, da sich die Anisotropie des GFK-Schichtverbundes verringerte (Bild 7). Mit einer Zugbelastung durch externe Vorspannkkräfte zeigte sich eine Zunahme der Krümmungen um die 2-Achse, wobei gleichzeitig die Krümmungen um die 1-Achse aufgrund der Zugkraftbeanspruchung in diese Achse einer Reduzierung unterlagen.

In Bild 9 sind die theoretischen und experimentell verifizierten Hauptkrümmungen des asymmetrischen Schichtaufbaus ($90_n/0_m$) in Abhängigkeit von dem 0°-Schichtenanteil bei reiner Temperaturbelastung ($\Delta T = -100$ K)

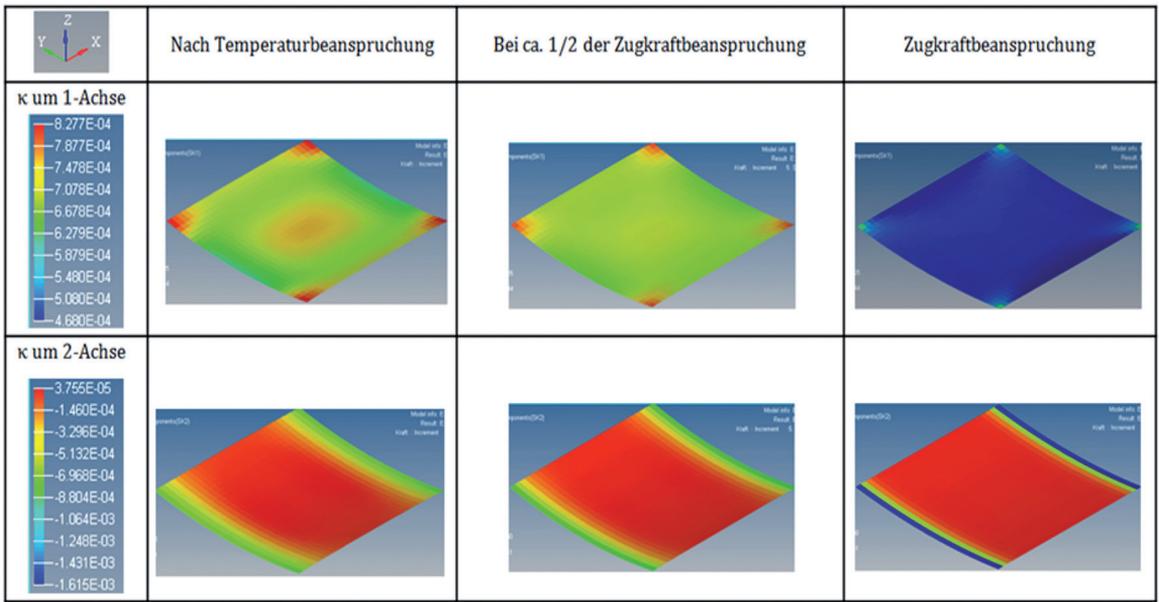


Bild 8: Theoretische Hauptkrümmungen des asymmetrischen Schichtaufbaus ($90_{\beta}/0_{\theta}$) bei reiner Temperaturbelastung ($\Delta T = -100$ K) und überlagerter Temperatur- und Zugbelastung

dargestellt. Die experimentell bestimmten Hauptkrümmungen um die 1-Achse stimmten qualitativ und annähernd auch quantitativ mit den berechneten Hauptkrümmungen überein (Bild 9). Die geringen quantitativen Differenzen zwischen den berechneten und experimentell verifizierten Hauptkrümmungen um die 1-Achse können auf chemisch-physikalische Reaktionen der duroplastischen Matrix zurückgeführt werden, welche bei den Berechnungen aufgrund der Komplexität nur unzureichend mit einbezogen werden konnten. Dazu zählten neben dem chemischen Schwinden auch Quolleigenspannungen infolge erhöhter Wasseraufnahme in bzw. zwischen die Molekülketten der duroplastischen Matrix. Dabei wirkten die Quolleigenspannungen der thermischen Ausdehnung entgegen, wodurch sich folglich eine Reduzierung der theoretischen Hauptkrümmung zeigte. Zudem erhöhten langsames Abkühlen die Relaxations- und Kriechvorgänge der duroplastischen Matrixsysteme [17].

Demgegenüber wiesen die berechneten und die experimentell verifizierten Hauptkrümmungen um die 2-Achse erhebliche Unterschiede auf. Aufgrund des hier vorliegenden Stabilitätsproblems (Verzweigungsproblems) setzt sich in der Realität allerdings auch nur eine der Hauptkrümmungen, in diesem Fall die Krümmung um die 1-Achse, durch.

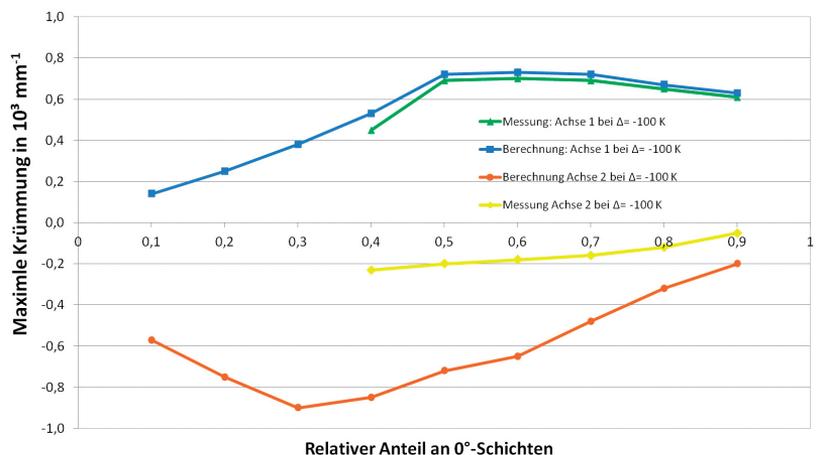


Bild 9: Vergleich der berechneten und experimentell verifizierten Hauptkrümmungen bei $\Delta T = -100$ K

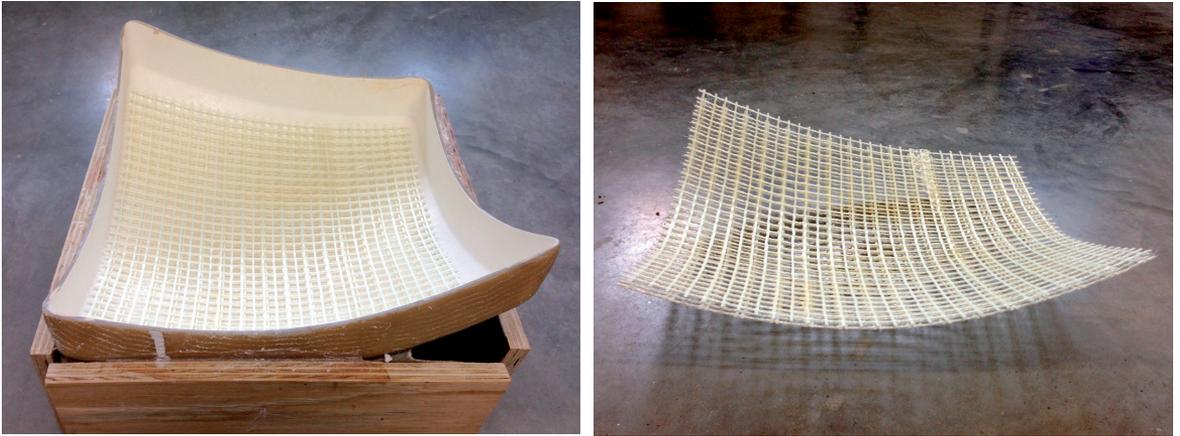


Bild 10: Polymergebundene Stabilisierung von 3D-Gewirk; zu sehen sind ein mit duroplastischem Harzsystem gecoatetes, biegeweiches 3D-Gewirke und ein stabilisiertes 3D-Gewirke. [Fotos: Carolin Petzoldt]

3.2 Polymergebundene Stabilisierung von 3D-Gewirken

Mit der textiltechnischen und -technologischen Einflussnahme in Form von Coating mit einem duroplastischen Harzsystem wurde die Anpassung der mechanischen Eigenschaften auf die Formenvielfalt und Drapierung vorgenommen, wodurch eine exakte Konturanpassung erreicht werden konnte (Bild 10). Die Rückverformung betrug weniger als 5 Prozent einen Tag nach der Stabilisierung, sodass eine exakte Abbildung der Krümmungszustände sichergestellt war.

Bei weiterführenden Fertigungsstudien wurde das Ziel verfolgt, eine zusätzliche Stabilisierung mit einem kaltaushärtenden Harzsystem durch gezielte Ausnutzung der Kapillarwirkung der Abstandsfäden zu erreichen. Allerdings konnte aufgrund der unzureichenden Kapillarwirkung der Abstandsfäden keine Steifigkeitssteigerung der 3D-Gewirke nachgewiesen werden (Bild 11).

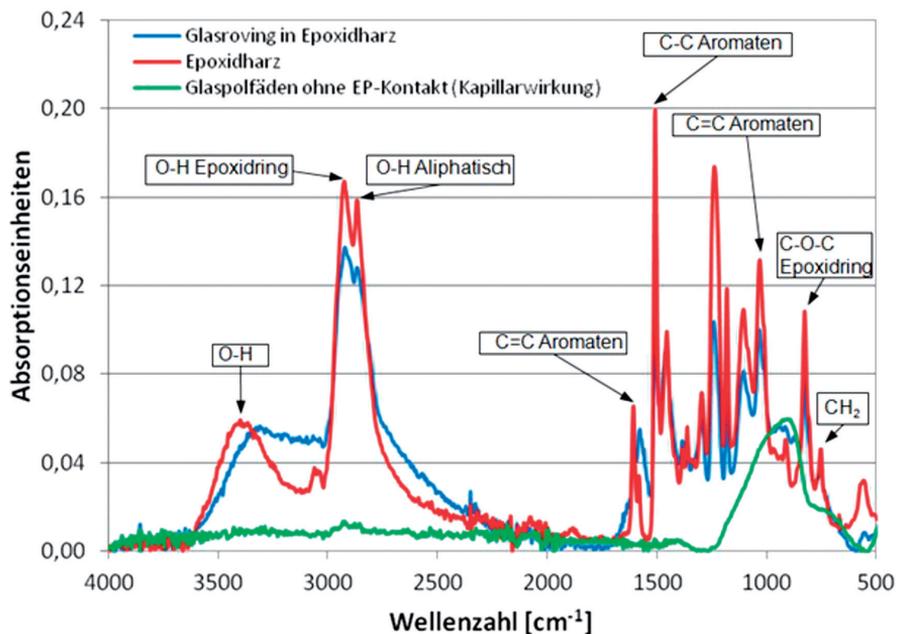


Bild 11: FOURIER-Transformations-Infrarotspektroskopie mit abgeschwächter Totalreflexion zur Validierung der polymergebundenen Stabilisierung von 3D-Gewirk

3.3 Fertigungsversuche Beton-Leichtbauelemente

Die Frisch- und die Festbetoneigenschaften nach 28 Tagen sind in Tabelle 3 enthalten. Mit dem Luftgehaltsprüfer wurden im Frischbeton ein Luftgehalt von 2,5 Vol.-% und eine geometrische Rohdichte von 2,28 g/cm³ ermittelt. Die mittels Schwindrinne bestimmte Gesamtschwindverformung betrug 0,71 mm/m. Die Druckfestigkeit betrug 109,3 MPa, wobei diese bereits nach 24 Stunden bei 33 MPa lag. Die 3-Punkt-Biegezugfestigkeit betrug 14,74 MPa. Der Feinbeton zeigte eine hohe Dauerhaftigkeit auf, was anhand des bestandenen CDF-Tests (nach RILEM Empfehlung TC 117-FDC) mit einer mittleren Abwitterung $m_{28} = 1172 \text{ g/m}^2$ und dem relativen dynamischen E-Modul von $R_{u28} = 100 \%$ nach 28 Frost-Tausalz-Wechseln validiert worden ist.

Tabelle 3: Frisch- und Festbetoneigenschaften nach 28 Tagen

	Frischbeton	Festbeton
Geometrische Rohdichte	2,32 g/cm ³	2,24 g/cm ³
Luftgehalt	2,5 Vol.-%	-
Lineares Schwinden	0,71 mm/m	-
Druckfestigkeit	-	109,3 MPa
3-Punkt-Biegezugfestigkeit	-	14,74 MPa

Bei den Fertigungsversuchen waren die Sicherstellung der gleichmäßigen Betonschichtdicke, eine einheitlich gute Oberflächenqualität, die ausreichende Stabilität der GFK-Schalung sowie die Vermeidung von kritischen Rissen, sowohl im Beton als auch im Schalungssystem, bei guten Ausschalungseigenschaften von besonderer Bedeutung. Diese Eigenschaften konnten im Rahmen der Fertigungsversuche umgesetzt werden (Bild 12).

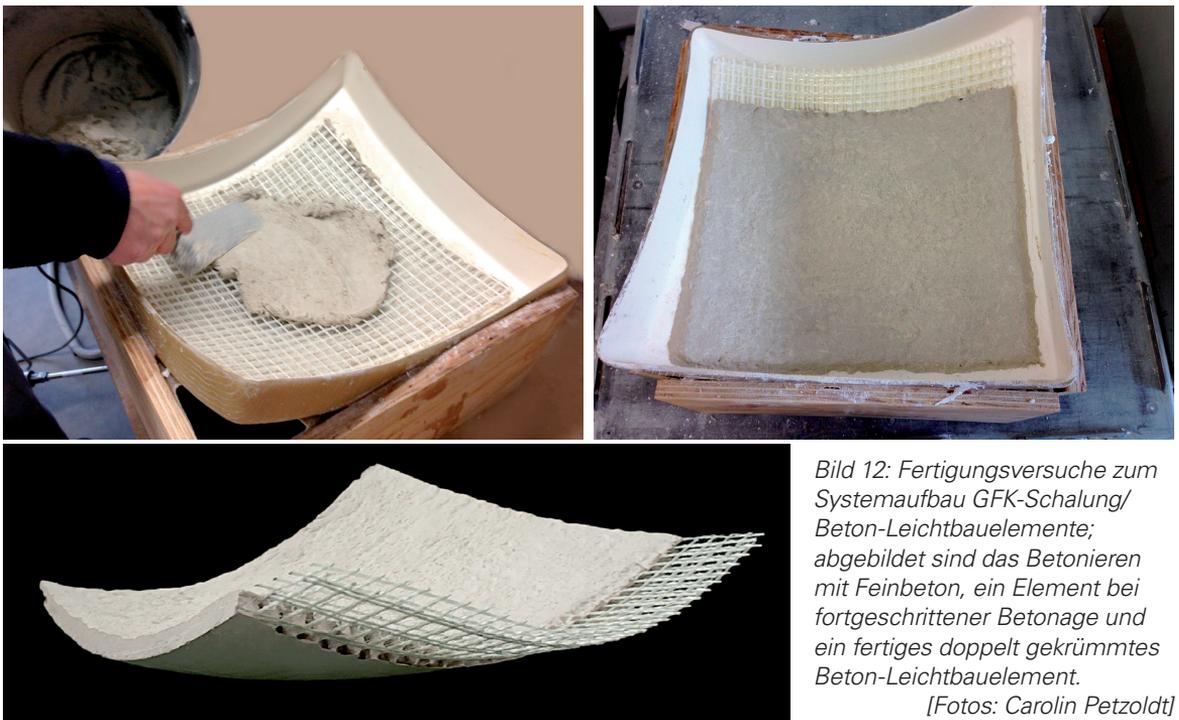


Bild 12: Fertigungsversuche zum Systemaufbau GFK-Schalung/Beton-Leichtbauelemente; abgebildet sind das Betonieren mit Feinbeton, ein Element bei fortgeschrittener Betonage und ein fertiges doppelt gekrümmtes Beton-Leichtbauelement.

[Fotos: Carolin Petzoldt]

4 Schlussfolgerung

Innerhalb dieses Forschungsprojektes wurde ein flexibel formbares, mehrschichtiges Schalungssystem aus glasfaserverstärktem Kunststoff erarbeitet, welches unter Ausnutzung des anisotropiebedingten Strukturverhaltens eine gezielte Einstellung von definierten Krümmungszuständen gestattet. Die Einstellung der anisotropiebedingten Koppelwirkungen wurde analytisch mit Hilfe der erweiterten Laminattheorie sowie numerisch mittels der Finite-Elemente-Methode vorausberechnet, wobei eine gute Übereinstimmung der jeweiligen berechneten und experimentell untersuchten Ergebnisse für die repräsentativen Flächentragwerke nachgewiesen werden konnte. Durch Versuche an den eigens hergestellten textilverstärkten Beton-Leichtbauelementen ist eine experimentelle Verifikation dieser intrinsischen Koppelphänomene vorgenommen worden. Auf Basis der erzielten Ergebnisse können optimale Schichtaufbauten für baurelevante Krümmungszustände und deren Variationsbereiche festgelegt werden. Neben der effizienten Fertigung von gekrümmten Beton-Leichtbauelementen zeichnen sich die GFK-Schalungen durch die Umsetzung exzellenter Betonqualitäten in höchster Sichtbetonklasse aus, was zur Generierung neuer Architekturformen und Generationen von Bauwerken beiträgt. Die dabei intensiv durchgeführten numerischen, technologischen und experimentellen Untersuchungen zeigen, dass die Kombination von Beton und stabilisierten Abstandsgewirken die Umsetzung einfach und doppelt gekrümmter, mehrachsig beanspruchbarer Flächentragwerke gestattet. Darüber hinaus erlaubt die flexible GFK-Schalungsbauweise zum einen die ortsunabhängige Umsetzung von Freiformflächen gemäß dem Prinzip *form follows force* und führt zum anderen aufgrund der angepassten textilen Bewehrung zu dünnwandigen und damit extrem leichten Beton-Schalentragwerken.

Literaturverzeichnis

- [1] CURBACH, M.; MICHLER, H.; WEILAND, S.; JESSE, D.: Textilbewehrter Beton – Innovativ! Leicht! Formbar! BetonWerk International 11 (2008), Heft 5, S. 62–72.
- [2] BRAMESHUBER, W.: Selbstverdichtender Beton. Schriftenreihe Spezialbetone, Bd. 5. Düsseldorf: Verlag Bau und Technik, 2004.
- [3] GREINER, S.: Zum Tragverhalten von Schalen aus ultrahochfestem Faserfeinkornbeton (UHFFB). Beton- und Stahlbetonbau 100 (2007), Heft 9, S. 77–80.
- [4] HOFSTADLER, C.: Schararbeiten. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008.
- [5] CURBACH, M.; JESSE, F.: Verstärken mit Textilbeton. In: BERGMEISTER, K.; FINGERLOOS, F.; WÖRNER, J.-D. (Hrsg.): Betonkalender 2010, Teil 1, Abschn. VII. Berlin: Ernst & Sohn, S. 457–565, 2009.
- [6] 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 3 (2014), Heft 3, S. 33–39.
- [7] FUNKE, H.; GELBRICH, S.; KROLL, L.: A New Hybrid Material of Textile Reinforced Concrete and Glass Fibre Reinforced Plastic. Journal of Materials Science Research 2 (2013), Heft 3, S. 96–102.

- [8] CURBACH, M.; ORTLEPP, S.; BRÜCKNER, A.; KRATZ, M.; OFFERMANN, P.; ENGLER, T.: Entwicklung einer großformatigen, dünnwandigen, textilbewehrten Fassadenplatte. Beton- und Stahlbetonbau 98 (2003), Heft 6, S. 345–350.
- [9] HERZOG, T.; MORO, J. L.: Gespräch mit FELIX CANDELA. Arcus 18: Zum Werk von FELIX CANDELA – Die Kunst der leichten Schalen. Köln: Verlagsgesellschaft Rudolph Müller, 1992, S. 10–22.
- [10] PREISINGER, C.; HARRER, J.; RESSL, C.; KOLLEGGER, J.: Stahlbetonschalen ohne Schalung – ein neuer Weg im Schalenbau. Beton- und Stahlbetonbau 100 (2005), Heft 1, S. 31–38.
- [11] KROLL, L.: Berechnung und technische Nutzung von anisotropiebedingten Werkstoff- und Struktureffekten für multifunktionale Leichtbauanwendungen. Habilitationsschrift, TU Dresden, 2005.
- [12] KAUFMANN, J.: Beitrag zu anisotropiebedingten Koppelleffekten bei rotationssymmetrischen mehrschichtigen Faserverbundbauteilen. Promotionsschrift, TU Chemnitz, 2014.
- [13] DALLINGER, S.; PARDATSCHER, H.; KOLLEGGER, J.: Zweifach gekrümmte Schalen aus Betonfertigteilen. Forschung & Entwicklung für Zement und Beton. (2009), Heft 5, S. 32–33.
- [14] DE 3500153 A1: Pneumatische Schalung. Patent von J. SCHLAICH & R. BERGERMANN, 10.07.1986.
- [15] DE 3841579 A1: Schalung für großformatige gekrümmte Stahlbetonfertigteile. Patent von W. Zapf KG, 13.06.1990.
- [16] EP 0 238 168 A1: Verfahren und Vorrichtung zum Formen von gebogenen Sektionen aus Beton. Patenterteilung, H. VIDAL, 23.09.1987.
- [17] SCHÜRMMANN, H.: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden, Berlin: Springer Verlag, 2007.

Flexible GFK-Schalungen zur Herstellung von doppelt gekrümmten Beton-Leichtbauelementen mit stabilisierten Abstandsgewirken

Projektleiter

Prof. Dr.-Ing. habil. Lothar Kroll
Dr.-Ing. Sandra Gelbrich

Projektbearbeiter

Dipl.-Ing. Henrik L. Funke
Dipl.-Ing. Andreas Ehrlich
Dipl.-Ing. Lars Ulke-Winter
Dipl.-Ing. Carolin Petzoldt

Projektlaufzeit

09/2011 – 08/2014

Web

<http://www.leichtbau.tu-chemnitz.de>