

ANSCHLUSSPROJEKTE

Wiederverwendbare flexible GFK-Schalungen zur Herstellung von doppelt gekrümmten Beton-Leichtbauelementen | Re-usable and flexible GFRP formwork for the production of double curved concrete lightweight elements

- ▶ Carolin Petzoldt, Christian Müller, Henrik Funke, Sandra Gelbrich, Lothar Kroll
- ▶ Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung (SLK), TU Chemnitz

1 Ausgangsfragen

Für die Herstellung großformatiger dünnwandiger Schalenträgerwerke bedarf es geeigneter Schalungssysteme, die eine frei geformte Geometrie, eine erhöhte Wiederverwendbarkeit sowie eine glatte Sichtbetonqualität der Elemente ohne Fehlstellen (Architekturbeton) in Kombination mit einer hohen Produktivität gestatten [1]. Derzeit ist die Herstellung frei geformter Beton-Leichtbauelemente sowohl mit einem erheblichen Material- und Montageaufwand als auch Kostenaufwand verbunden [2]–[4]. Zu üblichen Schalungstechniken zählen konventionell segmentierte Holz- und Stahlssysteme, pneumatisch gestützte und modellierte Schalungen sowie deren Kombinationen. Für einfach verformbare Schalungssysteme sind dazu einige Patente angemeldet worden, z. B. [5]–[7]. Aktuelle Forschungen (wie bspw. [8]–[11]) beschäftigen sich weiterhin mit flexiblen Schalungssystemen, die über zahlreiche einstellbare Aktuatoren frei formbare Flächen mit zumeist polymeren Schalhäuten erzeugen.

Zur kosteneffizienten Herstellung von einfach und doppelt gekrümmten Fassadenelementen mit definierter Änderung des Krümmungsradius ist demnach ein flexibles Schalungssystem erforderlich, welches die wiederholte Nutzung der Schalung für Elemente mit ähnlichen Krümmungen erlaubt. Hierfür werden die erarbeiteten Grundlagen und Erkenntnisse aus den beiden SPP-Projekten der TU Chemnitz (siehe S. 436 ff. und S. 452 ff.) innerhalb der Förderpha-

1 Initial objective

For the production of large-size concrete shell structures with thin walls, it is necessary to provide formwork systems, which permit freely formed geometries, enhanced reusability and smooth, fair-faced concrete quality of the elements without defects (architectural concrete) in combination with high productivity [1]. Currently, the production of lightweight, free-formed concrete elements is characterized by high material and installation efforts as well as costs [2]–[4]. Common formwork techniques include segmented systems made of wood or steel, pneumatically supported and modelled formworks as well as combinations thereof. There are some pending patents on simply deformable formwork systems, e.g. [5]–[7]. Furthermore, recent research activities encompass flexible formwork systems, which generate free-form areas with the help of numerous adjustable actuators and polymer membranes [8]–[11].

A cost-efficient production of single and double curved façade elements with defined curvature radius variation requires a flexible formwork system, which allows the re-use for elements with similar curvatures. Therefore, the fundamentals and results concerning the anisotropic material behaviour of multilayer GFRP frameworks, which were achieved in two projects of TU Chemnitz during the two funding phases of the DFG-SPP 1542 “Concrete light” (see p. 436 and 452 et seq.). Thus, a flexible adjustment of

sen des DFG-SPP 1542 „Leicht Bauen mit Beton“ zum anisotropiebedingten Materialverhalten mehrschichtiger GFK-Schalungen herangezogen, um eine flexible Einstellung von Flächen mit verschiedenen Krümmungszuständen unter Anpassung des GFK-Laminataufbaus bzgl. definierter Biegesteifigkeiten zu erreichen. Die Ergebnisse der Teilprojekte konnten das besondere Potential von flexiblen GFK-Elementen zur Herstellung von Fassadenelementen mit kleinen und großen Krümmungen aufzeigen. Ziel des Erkenntnistransfers ist nun die Überführung der wissenschaftlichen Ergebnisse in industriell anwendbare Lösungen, indem ein flexibles und wiederverwendbares Schalungssystem aus GFK-Elementen entsteht, das die effiziente Herstellung von Beton-Leichtbauelementen mit verschiedenen Krümmungszuständen gestattet.

Schwerpunkt des hier vorgestellten DFG-Erkentnistransferprojekts ist die Entwicklung einer industriell anwendbaren Systemschalung mit gekoppelter Bauteilvermessung (Kamerasystem) zur Herstellung von dünnwandigen Faser- und Textilbetonfertigelementen mit integrierten Krafteinleitungselementen. Die Systemschalung, bestehend aus einer GFK-Schalhaut mit definiertem Lagenaufbau und steuerbarer Unterkonstruktion, soll hierbei über ein neu zu entwickelndes Programmsystem flexibel einstellbar sein und folglich doppelt gekrümmte Oberflächen erzeugen.

2 Anwendungspartner

Der für die Umsetzung der Projektidee erforderliche Austausch zwischen Wissenschaft und Praxis erfolgt durch Kooperation mit den industriellen Anwendungspartnern FIBER-TECH Group und Betonwerk Schuster GmbH. Die Schwerpunkte der Unternehmen sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

surfaces with varying curvature states is possible by adaption of the GFRP laminate structure with regard to the bending stiffness. The results of the previous projects were able to show the special potential of flexible GFRP elements for the production of façade elements with small and large curvatures. The aim of the knowledge transfer is to transfer the scientific results into industrially applicable solutions, by creating a flexible and re-usable formwork system made of GFRP elements, which allows the efficient production of lightweight concrete elements with different curvature states.

Focus of the here presented DFG knowledge transfer project is the development of a system formwork with coupled component measurement (camera system) for the production of thin-walled prefabricated fibre and textile reinforced concrete elements with integrated force transmission elements. The system formwork, consisting of a GFRP formwork skin with defined layer structure and a controllable supporting construction, is to be flexibly adjustable via a newly developed program system and will consequently be able to produce double curved surfaces.

2 Application partners

The exchange between science and practice required for the implementation of the project idea takes place through cooperation with the industrial application partners FIBER-TECH Group and Betonwerk Schuster GmbH. The priorities of the companies are summarised in Table 1.

| | FIBER-TECH Group | Betonwerk Schuster GmbH |
|---|--|---|
| Relevante Geschäftsfelder und Kernkompetenzen Relevant business areas and core competencies | Konstruktion, Herstellung und Montage großformatiger Produkte aus Faserverbunden (GFK, CFK, NFK) Design, manufacture and assembly of large-format fibre composites products (GFRP, CFRP, NFRP) | Individuelle Betonfertigteile für Hoch- und Tiefbau, Lärmschutz- und Schachtsysteme aus Beton Individual precast concrete members for structural and civil engineering, noise protection and shaft systems made of concrete |
| Wesentliches Projektziel Main project goal | Angebotsweiterung für komplexe wiederverwendbare GFK-Schalungssysteme Extension of the range for complex reusable GFRP formwork systems | Einführung einer effizienten, flexiblen und wiederverwendbaren Schalungstechnologie im Unternehmen Introduction of efficient, flexible and reusable formwork technology in the company |
| Projektaufgaben Project tasks | Herstellung des steuerbaren GFK-Schalungssystems Production of the controllable GFRP formwork system | Test, Anpassung und Anwendung des GFK-Schalungssystems zur Herstellung von Fertigelementen Test, adaptation and application of the GFRP formwork system for the production of prefabricated elements |

Tabelle 1: Schwerpunkte der beteiligten Unternehmen | **Table 1:** Main focus of the companies involved

3 Zielsetzung und Lösungsansatz

Das neue flexible GFK-Schalungssystem als integraler Bestandteil des Transferprojektes dient zur Umsetzung präzise gefertigter Filigranelemente aus textilbewehrtem Beton mit einer hohen Sichtbetonqualität. Die Integrationselemente (Krafteinleitungen und Bewehrungen) im Textilbeton-Fertigteil sollen bereits in der Schalung positionsgenau angeordnet werden, so dass bei einer Montage der Fertigteile an der Fassade ein exaktes Fugenbild resultiert. Zur Umsetzung der hohen qualitativen Anforderungen an komplex gestaltete Fassaden wird ein optisches Kamerasystem in den Herstellungsprozess integriert, welches die exakte Positionierung von Integrationselementen sowie die Fertigung der definierten Krümmungen auf der Schalung überwacht (siehe Bild 1). Mit Hilfe einer Rückkopplung zwischen theoretischen und realen Krümmungen wird eine on-time Nachjustierung der Schalung oder der zu produzierenden Elemente integriert. Hierbei sollen nicht nur die gestalterisch wichtigen Fassadenstrukturen exakt umgesetzt werden, sondern auch Toleranzen im Millimeterbereich, damit letztlich eine einfachere Montage erfolgreich durchgeführt werden kann.

3 Goals and solution approach

The new flexible GFRP formwork system as an integral part of the transfer project serves to implement precisely manufactured filigree elements made of textile reinforced concrete with a high quality of exposed concrete. The integration elements (force transmission and reinforcements) in the precast textile reinforced concrete part should already be positioned accurately in the formwork so that an exact joint pattern results when the prefabricated parts are installed on the façade. To implement the high quality requirements for complex façades, an optical camera system is integrated into the manufacturing process, which monitors the exact positioning of integration elements as well as the production of the defined curvatures on the formwork skin (see Fig. 1). By means of a feedback between theoretical and real curvatures, an on-time readjustment of the formwork or the produced elements is integrated. Here, not only the facade structures, which are important in terms of design, are to be implemented exactly, but also tolerances in the millimetre range, so that finally an easier installation can be carried out successfully.

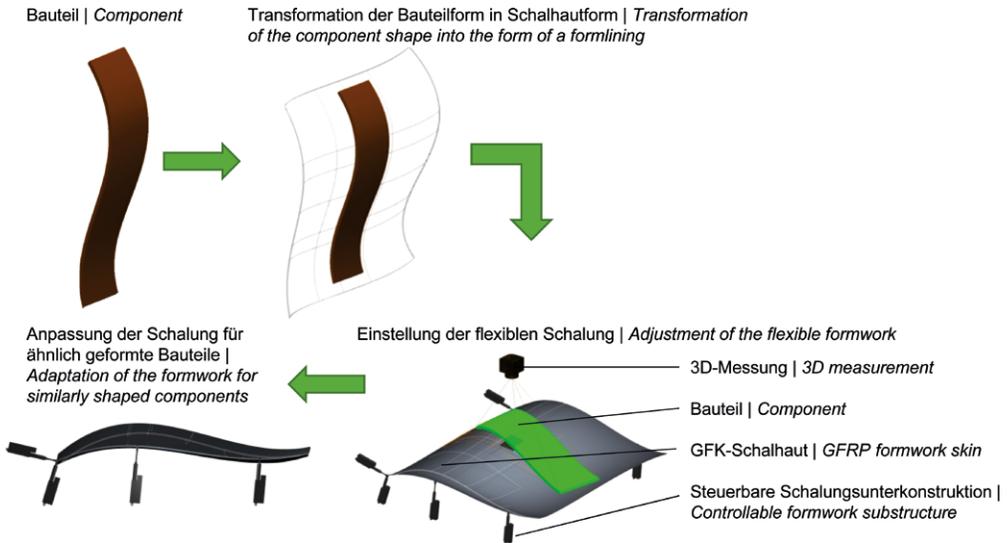


Bild 1: Schematische Darstellung der Funktionalität der flexiblen GFRP-Schalung | **Fig. 1:** Schematic representation of the functionality of the flexible GFRP-formwork | Source: Carolin Petzoldt

Die anzuwendenden Krafteinleitungselemente dienen der direkten Einleitung von konzentrierten Kräften in die dünnwandigen Beton-Leichtbauelemente. Hierfür sollen die in der zweiten Förderphase des SPP entwickelten metallischen Fraktal-Inserts eingesetzt werden, um eine gleichmäßige Krafteinleitung in die Textilbewehrung aus 3D-Gewirken sicherzustellen. Dazu sind die Fraktal-Inserts derart konstruktiv gestaltet, dass die Steifigkeit und Festigkeit im lokalen Bereich auf die Materialpaarung Metall/Textilverstärkung abgestimmt ist.

Die hierzu durchgeführten Untersuchungen sowie erweiterten Berechnungs- und Optimierungsverfahren führten zur Adaption von Geometrie-, Werkstoff- und Fertigungsparametern für die ausgewählten Belastungen und Textilverstärkungen. Im Ergebnis der Entwicklung und Erprobung von bionisch inspirierten Krafteinleitungen lässt sich die Anzahl der Verankerungspunkte verringern, wodurch der Zeit- und Montageaufwand drastisch reduziert und gleichzeitig das vorliegende Leichtbaupotential der Textilverstärkungen voll ausgeschöpft werden kann.

The applied force application elements act as direct transmissions for concentrated forces in the thin-walled lightweight concrete elements. For this purpose, the metallic fractal inserts developed in the second funding phase of the SPP are to be used in order to ensure a uniform transmission of forces into the textile reinforcement of 3D knitted fabrics. For this purpose, the fractal inserts are constructively designed in a manner that matches the local deformations of the material pairing metal/textile.

The investigations carried out as well as extended calculation and optimization procedures led to the adaptation of geometry, material and production parameters for the selected loads and textile reinforcements. As a result of the development and testing of bionically inspired force transmission elements, the number of anchoring points can be reduced, which drastically reduces the time and assembly costs, while simultaneously taking full advantage of the existing lightweight construction potential of textile reinforcements.

Ein weiterer Fokus des Transferprojektes ist auf die Datenverarbeitung vom entwurfsspezifischen Volumenmodell über ein Linienmodell der GFK-Schalhaut bis zur Übergabe an die steuerbare Unterkonstruktion gerichtet. Da bei den unterschiedlichen Arbeitsschritten des Herstellungsprozesses, wie z. B. dem Design der Fassadenelemente und der Form der Schalhautoberfläche, verschiedene Modellarten benötigt werden, ist eine detailgetreue Übergabe der Daten unbedingt notwendig. Ferner erfordert die Einstellung der Schalhautoberfläche über die steuerbare Unterkonstruktion eine Umrechnung der Modellierungsdaten sowohl nach simulierten als auch experimentell verifizierten Vorgaben. Auf Grundlage dessen wird ein Programmsystem entwickelt, das die schnelle und effiziente Anwendung der Systemschalung gestattet.

Das SLK der TU Chemnitz übernimmt hierbei die Dimensionierung der GFK-Schalungshaut sowie die Entwicklung des intelligenten Steuer- und Regelsystems. Die Aufgaben zur Konstruktion und Validierung der steuerbaren Unterkonstruktion sind am Forschungsbereich Leichtbau im Bauwesen (LBW) angesiedelt. Zudem erfolgt die fertigungstechnische Umsetzung und experimentelle Verifikation inkl. optischer Vermessung und Nachjustierung zum Systemaufbau GFK-Schalung/Beton-Leichtbauelement sowie die Umsetzung eines Prototyps in Form einer flexiblen mehrschichtigen GFK-Schalung mit Herstellung repräsentativer Hüllelemente für Infrastrukturen (Verkehrsweegelemente, Betonverkleidungen etc.) durch die Industriepartner FIBER-TECH Group und Betonwerk Schuster GmbH.

Die Erfolgskriterien für das Projekt sind:

- Übertragung der Forschungsergebnisse in die Praxis,
- Validierung der gezielten Einstellung definierter Krümmungen im großen Maßstab,
- Nachweis der Reproduzierbarkeit.

Mögliche Rückwirkungen auf die Wissenschaft sind die wissenschaftlichen Fragestellungen, die sich aus den Resultaten des Verfahrens

Another focus of the transfer project is the data processing which includes the whole path from the design-specific volume model via a line model of the GFRP formwork skin to the controllable substructure. Since different model types are required in the various steps of the manufacturing process, such as the design of the façade elements and the shape of the formwork surface, a detailed data transfer is essential. Furthermore, the adjustment of the formwork surface via the controllable substructure requires a conversion of the modelling data both according to simulated and experimentally verified specifications. Based on this, a program system is being developed which allows the fast and efficient use of the system formwork.

At SLK of TU Chemnitz, the researchers are responsible for the dimensioning of the GFRP formlining as well as for the development of the intelligent control and regulation system. The tasks with regard to the construction and validation of the controllable substructure are carried out at research department Lightweight Constructions in Civil Engineering (LBW). The industrial partners FIBER-TECH Group and Betonwerk Schuster GmbH carry out the technical implementation and experimental verification (including optical measurement and readjustment to the system structure fiberglass formwork/concrete lightweight element) as well as the implementation of a prototype. The prototype includes a flexible multilayer GFRP formwork and the production of representative envelope elements for infrastructures (road construction elements, concrete claddings, etc.).

The success criteria for the project are:

- transfer of research results into practice,
- validation of the specific setting of defined curvatures on a large scale and
- verification of the reproducibility.

Possible feedback effects on science are the scientific questions that arise from the results of the process from concrete spraying, optical measurement and readjustment of the GFRP formwork, for example:

aus Betonspritzten, optischer Vermessung und Nachjustierung der GFK-Schalung ergeben, beispielsweise:

- Wie stark ändert sich die eingestellte Krümmung durch den Frischbetondruck, der wiederum abhängig von der Dicke und Dichte der Betonschicht ist?
- Wie kann man diese Abweichungen vorausberechnen und vorab einstellen, sodass eine Nachjustierung nicht notwendig ist?
- Wie kann die Dimensionierung der Schalung optimiert werden?
- How much does the adjusted curvature change due to the fresh concrete pressure, which in turn depends on the thickness and density of the concrete layer?
- How can these deviations be calculated and adjusted in advance so that readjustment is not necessary?
- How can the dimensioning of the formwork be optimized?

To answer these questions, further basic research is necessary.

Um diese Fragen zu beantworten, ist weitere Grundlagenforschung notwendig.

Literatur | References

- [1] Hofstadler, C.: Schalarbeiten. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008
- [2] Curbach, M.; Michler, H.; Weiland, S.; Jesse, D.: Textilbewehrter Beton – Innovativ! Leicht! Formbar! BetonWerk International 11 (2008) 5, S. 62–72
- [3] Herzog, T.; Moro, J. L.: Gespräch mit Felix Candela. In: Arcus 18: Zum Werk von Felix Candela – Die Kunst der leichten Schalen. Köln: Verlagsgesellschaft Rudolph Müller, 1992, S. 10 ff.
- [4] Preisinger, C.; Harrer, J.; Ressler, C.; Kollegger, J.: Stahlbetonschalen ohne Schalung – ein neuer Weg im Schalenbau. Beton- und Stahlbetonbau 100 (2005) 1, S. 31–38
- [5] DE 3500153 A1: Pneumatische Schalung. Schlaich, J.; Bergermann, R. (07/1986)
- [6] DE 3841579 A1: Schalung für großformatige gekrümmte Stahlbetonfertigteile. Werner Zapf KG. Zapf, W. (13.06.1990)
- [7] EP 0 238 168 A1: Verfahren und Vorrichtung zum Formen von gebogenen Sektionen aus Beton. Vidal, H.; Muelas-Medrano, S. (23.09.1987)
- [8] Michel, M.: Electronic controlled adaptive formwork for freeform concrete walls and shells. In: Müller, H. S.; Haist, M.; Acosta, F. (Hrsg.): Proc. of the 9th fib Int. PhD Symp. in Civil Engineering, 22.–25.07.2012 am KIT Karlsruhe, Karlsruhe: KIT Scientific Publ., 2012, S. 281–289
- [9] Michel, M.; Knaack, U.: Grundlagen zur Entwicklung adaptiver Schalungssysteme für frei geformte Betonbauteile. In: Scheerer, S.; Curbach, M. (Hrsg.): Leicht Bauen mit Beton – Forschung im Schwerpunktprogramm 1542, Förderphase 1, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2014, S. 186–197 – <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-171637>
- [10] Schipper, H. R.: Double-curved precast concrete elements. Diss., TU Delft, 2015
- [11] Raun, C.; Kirkegaard, P. H.: Adaptive mould – A cost-effective mould system linking design and manufacturing of double-curved GFRP panels. In: Proc. of the 17th Int. Congress of the GRCA – GRC 2015, 19.–21.04.2015 in Dubai (VAE), 2015, 7 S. – <https://www.grca.online/about-grca/previous-grca-congress/grca-2015-congress-radison-blu-dubai>

Projektdaten | Project data

Allgemeine Angaben | General information

Wiederverwendbare flexible GFK-Schalungen zur Herstellung von doppelt gekrümmten Beton-Leichtbauelementen

Re-usable and flexible GFRP formwork for the production of double curved concrete lightweight elements

| | |
|---|--|
| Antragsteller 1 Applicant 1: | Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. h. c. Dr. h. c. Prof. Lothar Kroll |
| Kontakt Contact: | +49 371 531 231 20 slk@mb.tu-chemnitz.de www.leichtbau.tu-chemnitz.de |
| Antragstellerin 2 Applicant 2: | Prof. Dr.-Ing. habil. Sandra Gelbrich |
| Kontakt Contact: | +49 371 531 321 92 sandra.gelbrich@mb.chemnitz.de www.leichtbau.tu-chemnitz.de |
| DFG-Projektnummer DFG Project number: | 390296555 |
| Adresse Address: | TU Chemnitz, Fakultät für Maschinenbau, Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung, 09107 Chemnitz |
| Förderer Funding: | Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) / Erkenntnistransferprojekt Knowledge Transfer Project |
| Förderzeitraum Funding period: | 01.01.2018–31.12.2019 |
| Team Team: | Christian Müller Henrik Funke Lars Ulke-Winter |
| Partner Partners: | FIBER-TECH Group, Chemnitz Betonwerk Schuster GmbH, Cunewalde |