

# Entwicklung neuartiger Verbindungen für komplexe Stab-, Flächen- und Raumtragelemente aus UHPFRC | Development of novel jointing systems for complex beam surface and spatial elements made of UHPFRC

- ▶ Lukas Ledderose<sup>1</sup>, Sven Lehmborg<sup>2</sup>, Franz Wirth<sup>1</sup>, Harald Kloft<sup>1</sup>, Harald Budelmann<sup>2</sup>
- ▶ <sup>1</sup> Institut für Tragwerksentwurf, TU Braunschweig
- ▶ <sup>2</sup> Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig

## 1 Erste Förderperiode

### 1.1 Einleitung

Das Institut für Tragwerksentwurf (ITE) und das Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) der TU Braunschweig bearbeiteten in der ersten Förderperiode des SPP 1542 „Leicht Bauen mit Beton“ gemeinsam das Teilprojekt „Entwicklung neuartiger Verbindungen für geometrisch komplexe Flächen- und Stabwerkselemente aus UHPC“. Schwerpunkt waren umfangreiche Untersuchungen zu geometrisch komplexen und hochpräzise hergestellte trocken gefügten Stoßverbindungen für dünnwandige UHPC-Bauteile zur Übertragung von Druck-, Biege- und Scherkräften. Zur Verbesserung der Zugtragfähigkeit und des Nachbruchverhaltens wurde im Forschungsprojekt stahlfaserverstärkter ultrahochfester Beton (UHPFRC) verwendet. Die einzelnen Arbeitspakete waren entsprechend der Expertisen der beiden Institute aufgeteilt. Während sich das ITE insbesondere mit der Entwicklung der Bauteil- und Fugegeometrien sowie dem Schalungsbaus befasste, lagen Planung und Umsetzung der experimentellen und numerischen Material- und Bauteiluntersuchungen in der Verantwortung des iBMB.

Die neuartigen Fügungen wurden mithilfe nichtlinearer numerischer Analysen und durch

## 1 First funding period

### 1.1 Introduction

The Institute of Structural Design (ITE) and the Institute of Building Materials, Concrete Structures and Fire Safety (iBMB) of the Technical University of Braunschweig worked together in the first funding period of the SPP 1542 “Concrete Light” on the subproject “Development of novel jointing systems for complex beam surface and spatial elements made of UHPFRC”. The focus was on extensive investigations of geometrically complex and high-precision dry-jointed connections for thin-walled UHPC components for the transmission of compressive, bending and shear forces. Steel fibre reinforced ultra-high performance concrete (UHPFRC) was used in the research project to improve the tensile strength and post fracture behaviour. The individual work packages were divided according to the expertise of the two institutes. While the ITE was particularly concerned with the development of the component and joint geometries as well as the formwork construction, the iBMB was responsible for the planning and implementation of the experimental and numerical material and element analyses.

The novel joints were developed by means of non-linear numerical analyses and experi-

experimentelle Untersuchungen entwickelt. Dabei konnten auch Erfahrungen bei der Herstellung von dünnwandigen Bauteilen aus UHPFRC sowie der numerischen Optimierung von Bauteilen gewonnen werden. Insbesondere das Tragverhalten kraftflussoptimierter biegesteifer Knotenelemente aus UHPFRC wurde detailliert untersucht. Die gestellten Ziele wurden mit dem Ende der ersten Förderperiode erreicht. Die Ergebnisse wurden u. a. in [1]–[3] publiziert. Außerdem wurden die jeweiligen Ergebnisse bei den regelmäßigen Arbeitstreffen im SPP vorgestellt und diskutiert. In Ergänzung zu den Publikationen werden die Forschungsergebnisse der ersten Antragsphase im Folgenden zusammenfassend dargestellt. Eine ausführliche Darstellung ist in [4] enthalten.

**1.2 Materialeigenschaften des UHPFRC und der Einfluss auf den Designprozess (iBMB)**

Die in der ersten Förderperiode verwendete UHPFRC-Rezeptur FK1-2,5, s. Tabelle 1, wurde aus der Referenzmischung M2Q der Universität Kassel [5] für die Anwendung bei dünnwandigen Bauteilgeometrien am iBMB weiterentwickelt.

Entwicklungskriterien waren die zu gewährleistenden, selbstnivellierenden und selbstentlüftenden Eigenschaften der Betonmatrix bei gleichzeitig hohen Druck- und Zugfestigkeiten. Der Einsatz von Mikrostahtfasern, die ein gutes Nachbruchverhalten des spröden UHPC sicherstellen, machte es möglich, auf konventionelle

mental investigations. Thereby, experiences in the production of thin-walled elements made of UHPFRC as well as in the numerical optimization could be gained also. In particular, the load-bearing behaviour of force-flow-optimized bending-resistant node elements made of UHPFRC was investigated in detail. The set goals were achieved at the end of the first funding period. The results were published in [1]–[3]. Furthermore, the relevant results were presented and discussed at the regular SPP’s working meetings. In addition to the publications, the research results of the first funding period are summarized in the following. A detailed report is included in [4].

**1.2 Material properties of the UHPFRC and their influence on the design process (iBMB)**

The UHPFRC mix design FK1-2,5 used in the first funding period, see Table 1, was refined from the reference compound M2Q of the University of Kassel [5] for the application on thin-walled component geometries at the iBMB.

The criteria for the development were the required self-levelling and self-deaerating properties of the concrete matrix in combination with high compressive and tensile strengths. The use of micro steel fibres, which ensure good post-cracking behaviour of the brittle UHPC, made it possible to dispense with conventional reinforcement. This also allowed the use of prestressing systems without additional built-in

Ausgangsstoffe   Components	Anteil   Portion in [kg/m³]
Zement   Cement CEM I 52,5 R HS-NA	595
Mikrosilica   Microsilica	69
Quarzmehl I   Quartz powder I	314
Quarzmehl II   Quartz powder II	119
Quarzsand   Quartz sand	1029
Mikro-Stahldrahtfasern   Micro steel wire fibres STRATEC Weidacon (2,5 Vol.-%; d / l = 0,15 / 11 mm)	192
Fließmittel   Superplasticizer	40
Wasser   Water	156

**Tabelle 1:** Ausgangsstoffe für den UHPFRC FK1-2,5 für Bauteilversuche | **Table 1:** Mix design for the UHPFRC FK1-2,5 for component tests

Kennwerte   Material properties	Mittelwerte   Mean values
Zylinderdruckfestigkeit   Cylinder compressive strength <sup>1</sup>	151 MPa
Einachsige Zugfestigkeit   Uniaxial tensile strength <sup>1</sup>	10 MPa
Biegezugfestigkeit   Bending tensile strength <sup>2</sup>	25 MPa
Elastizitätsmodul   Modulus of elasticity <sup>3</sup>	46,7 GPa
Querdehnzahl   Poisson's ratio	0,18

<sup>1</sup> Zylinder | Cylinder  $d/h = 80/160$  mm, <sup>2</sup> Prisma | Prism  $b/h/l = 40/40/160$  mm, <sup>3</sup> Zylinder | Cylinder  $d/h = 150/300$  mm

**Tabelle 2:** Materialkennwerte des UHPFRC FK1-2,5 | **Table 2:** Material properties of UHPFRC FK1-2,5

Bewehrung zu verzichten. Auch der Einsatz von Vorspannsystemen ohne zusätzliche Stahleinbauteile konnte damit realisiert werden. Zur Designoptimierung der Bauteilgeometrien wurden mittels numerischer Analyse Mittelwerte aus Materialprüfungen verwendet, die in Tabelle 2 dargestellt sind. Die Kennwerte wurden anhand von Prüfungen nach Norm [6]–[8] ermittelt.

### 1.3 Passgenaue druckbeanspruchte Verbindungen für trocken gestoßene, dünnwandige Rohrprofile aus UHPFRC (ITE)

In [1] wurden die Vorteile der Verwendung leichter, dünnwandiger Rohrquerschnitte bereits beschrieben. Insbesondere können hier die hohe Tragfähigkeit bei geringem Materialeinsatz und die günstigen Eigenschaften bezüglich Torsions- und Knickwiderstand genannt werden. Die Untersuchungen wurden an UHPFRC-Referenzrohren mit einem Außendurchmesser von 100 mm und einer Wandstärke von 15 mm durchgeführt. Trotz der geringen Querschnittsabmessungen wies der Rohrquerschnitt eine rechnerische Normalkrafttraglast von 604 kN auf. Entscheidend für die Herstellung von Stabtragwerken aus solchen Rohrquerschnitten ist jedoch die Ausbildung der Stöße und der Knotenfüugungen, um eine einfache Montage auf der Baustelle zu erreichen.

Im ersten Arbeitspaket wurden passgenaue, trocken gefügte Stoßverbindungen für die UHPFRC-Rohre entwickelt. Ein wesentliches Ziel dabei war es, eine hohe mechanische Effizienz durch Erhöhung der Präzision und geometrischen

steel components. For design optimization of the component geometries, mean values from numerical analyses based on material tests were used, see table 2. The characteristic values were determined on the basis of tests according to standards [6]–[8].

### 1.3 Precisely fitting, compression-stressed joints for dry-jointed, thin-walled tube profiles made of UHPFRC (ITE)

In [1], the advantages of using light, thin-walled tube cross-sections have already been described. In particular, the high load-bearing capacity with low material consumption and the good properties regarding torsional and buckling resistance can be mentioned here. The investigations were carried out on UHPFRC reference tubes with an outer diameter of 100 mm and a wall thickness of 15 mm. Despite the small cross-sectional dimensions, the tube cross-section showed a calculated axial load-bearing capacity of 604 kN. However, the decisive factor for the erection of truss structures made of bars with tubular cross-sections is the design of the joints and nodal connections in order to achieve simple assembly on the construction site.

In the first work package, accurately fitting, dry-jointed butt connections for the UHPFRC tubes were developed. A major goal was to achieve high mechanical efficiency by increasing the precision and geometric complexity in the joining area. For this purpose, different joining strategies, which are particularly known from steel and wood construction, were first analyzed. It was also considered that the tubes

Komplexität im Fügebereich zu erreichen. Hierzu wurden zunächst unterschiedliche Fügestrategien, die insbesondere aus dem Stahl- und Holzbau bekannt sind, analysiert. Dabei wurde berücksichtigt, dass die Rohre im Fügebereich aufgedickt ausgebildet werden können. Die anschließende Auswertung der entwickelten Fügeformen orientierte sich an drei Hauptkriterien:

- Kraftübertragung: Druck, Zug (im Montagezustand), Querkraft/Moment, Torsion,
- Herstellbarkeit: Gießen, Fräsen, Sägen, Schleifen, Wasserstrahlschneiden,
- Fügerichtung und Montage: axial, quer, schräg, radial.

Bild 1 zeigt eine Auswahl der möglichen Stoßverbindungen, die als 3D-Modelle entworfen wurden.

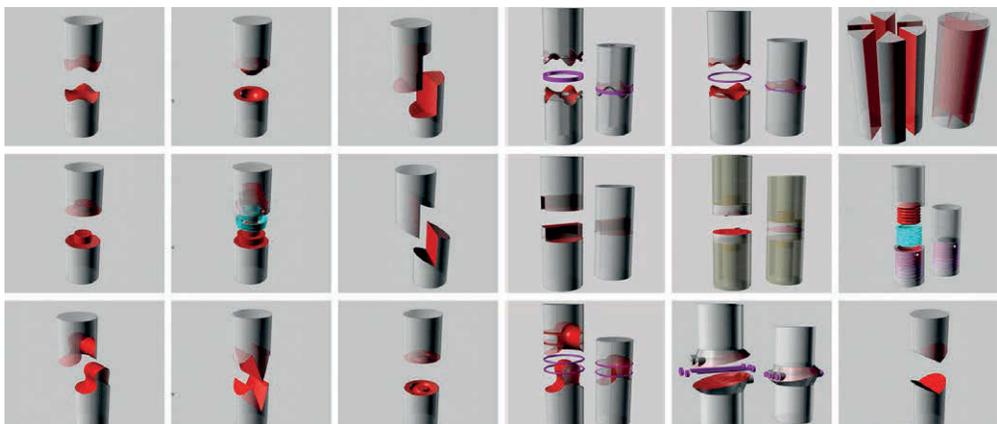
Eine wichtige Zielstellung bei der Entwicklung passgenauer Trockenstöße war die Vermeidung von Verfüll- oder Verpressfugen und von Stahleinbauteilen. Zudem sollten die Rohre mittels innen verlaufender Spannelemente axial vorgespannt werden können. Für die Herstellung solcher trockenen Fügungen stehen heute zwei Verfahren zur Verfügung. Zuerst sei das Kontaktverfahren (*Match Casting*) [9] zu nennen, bei dem ein Anschlussbauteil gegen ein bereits vorhandenes Bauteil betoniert wird. Ein Nachteil hierbei ist

can be thickened in the joining area. The subsequent evaluation of the developed jointing designs was based on three main criteria:

- Force transmission: compression, tension (in assembly state), shear force/moment, torsion;
- Production: casting, milling, sawing, grinding, water jet cutting;
- Joining direction and assembly: axial, transverse, angled, radial.

Fig. 1 shows a selection of possible joints designed as 3D models.

An important objective in the development of the precisely fitting dry joints was the avoidance of backfilling or grouting as well as steel components. In addition, it also had to be possible to pretension the tubes axially by using internally running tensioning elements. Today, two methods are used to produce such dry joints. The first is the contact method (*match casting*) [9], in which a connecting element is concreted against an existing element. A disadvantage is the high manufacturing effort. Furthermore, it is not possible to prefabricate the components to be joined independently and to assemble them at a different location. A second possibility is the CNC-controlled regrinding of oversized concrete parts, as it was applied for the Wildbrücke [10] or for a modular UHPC truss construction developed by Henze [11]. The method of regrinding



**Bild 1:** Typologische Entwicklung trocken gefügter Stoßverbindungen von rohrförmigen Stäben | **Fig. 1:** Typological development of dry joints for tubular elements

der hohe Fertigungsaufwand. Zudem ist es nicht möglich, die zu fügenden Bauteile unabhängig vorzufertigen und an einem anderen Ort zu montieren. Eine zweite Möglichkeit ist das CNC-gesteuerte Nachschleifen von mit Übergröße hergestellten Betonteilen, wie es bei der Wildbrücke [10] oder bei einer von Henze entwickelten modularen UHPC-Fachwerkkonstruktion [11] angewandt wurde. Die Methode des Nachschleifens kommt prinzipiell für die Fügung der UHPFRC-Rohre in Betracht, beinhaltet aber aufgrund der nötigen Diamant-Schleif- und Fräswerkzeuge geometrische Einschränkungen hinsichtlich der Kontaktflächen. Zudem fordert das Nachschleifen wegen der hohen Festigkeit von UHPC einen erheblichen Zeit- und Arbeitsaufwand.

Aufgrund der zuvor genannten Nachteile wurde für die passgenaue trockene Stoßfügung der UHPFRC-Rohre ein neues Herstellungsverfahren entwickelt, nämlich der auf der CNC-Technik basierende *Ultra-Präzisions-Schalungsbau*. Da der Formenbau mittels CNC-Technik hochpräzise ist und UHPC aufgrund seiner Feinkörnigkeit komplexe Geometrien exakt abformen kann, wurden für die zu entwickelnden Fügeprinzipien folgende Ziele definiert:

1. Fügungen als Trockenstöße sollen mithilfe hochpräziser Schalungen so exakt gefertigt werden, dass auf Einbauteile und eine Nachbearbeitung des Betons verzichtet werden kann.
2. Biegebeanspruchte Knoten sollen über präzise hergestellte Trockenstöße direkt an die Stäbe angeschlossen werden können.

can be considered in principle for the joining of UHPFRC tubes, but it has geometric limitations regarding the contact surfaces due to the required diamond grinding and milling tools. In addition, due to the high strength of UHPC, regrinding requires considerable time and effort.

Due to the above mentioned disadvantages, a new manufacturing process was developed for the precise dry jointing of UHPFRC tubes, namely *ultra-precision formwork construction* based on CNC technology. As the formwork construction by means of CNC technology is highly precise and UHPC is able to adopt complex geometries exactly due to its fine grain size, the following objectives were defined for the joining principles to be developed:

1. Dry joints are to be produced with the help of high-precision formwork so precisely that there is no need for built-in parts and no need to post-process the concrete.
2. Nodes that are exposed to bending stresses should be connected directly to the tubes with precisely manufactured dry joints.

With regard to the above mentioned criteria, selected dry joints were investigated numerically and experimentally in detail [2], see Fig. 2.

For the initial verification of the connections designed on the computer, they were 3D printed in plaster. In further analytical investigations and subsequent tests of tubes, the cross-sectional areas of the examined joint geometries were



**Bild 2:** Realisierung von trocken gefügten Stoßverbindungen für rohrförmige Stäbe; links: 3D-Modell, Mitte: Überprüfen der digitalen Daten durch 3D-Gipsdrucke, rechts: UHPFRC-Probekörper | **Fig. 2:** Manufacturing of dry joints for tubular elements; left: 3D model; middle: verification of digital data by 3D plaster prints; right: produced UHPFRC specimen

Mit Blick auf die o. g. Kriterien wurden in der weiteren Bearbeitung ausgewählte trocken gefügte Stoßverbindungen numerisch und versuchs-technisch detailliert untersucht [2], Bild 2.

Zur ersten Überprüfung der am Rechner entworfenen Verbindungen wurden diese im 3D-Druckverfahren in Gips hergestellt. In den weiteren analytischen Untersuchungen und späteren Bauteilversuchen wurden die Querschnittsflächen der untersuchten Stoßgeometrien im jeweiligen Stoßbereich innenseitig verstärkt, um die lokalen Spannungen zu reduzieren. Die Geometrien der Stoßflächen wurden iterativ durch lineare FEM-Berechnungen verbessert, um eine dem umgestoßenen Rohr nahekommende Traglast zu erreichen. In den anschließenden Bauteilversuchen zeigte sich, dass der Kraftüberleitungsbereich vom Rohr auf den Vollquerschnitt im Stoßbereich maßgebend wird, weshalb im folgenden Schritt das Versagen in diesem Bereich detailliert untersucht wurde. Als rotationssymmetrische Schnittgeometrien für diesen Bereich wurden Zylinder-, Halbkreis-, Katenoiden- und Ellipsengeometrien miteinander verglichen (Bild 3).

Während die FEM-Berechnungen jeweils auf deutlich frühzeitiges Versagen im Kraftüberleitungsbereich hinwiesen, erreichten die Probekörper in den Druckversuchen höhere Traglasten mit einem Versagen am Kraftüberleitungsbereich zum ungestörten Rohrquerschnitt. Auch bei nicht linear-elastischer Berechnung war dies tendenziell noch der Fall. Die Abweichungen sind vermutlich auf die Mitwirkung der Fasern im UHPFRC zurückzuführen

reinforced on the inside in the respective joint area in order to reduce local stresses. The geometries of the joint surfaces were iteratively improved by linear FEM calculations to achieve a load-bearing capacities close to that of jointless tubes. The subsequent element tests showed that the force transfer area from the tubular to the solid cross-section becomes decisive in the joint area, which is why the failure in this area was investigated in detail in the following step. As rotationally symmetrical section geometries for this area, cylindrical, semi-circular, catenoid and elliptical geometries were compared (Fig. 3).

While the FEM calculations in each case pointed to clearly early failure in the force transfer area, the test specimens in the compression tests achieved higher loads with a failure in the force transfer area next to the homogenous tube cross-section. Even with non-linear-elastic calculations, this was still the case. The deviations are probably due to the involvement of the fibres in the UHPFRC, which apparently could not be properly reflected in the material models used. In the numerical model, the maximum load of the components was already reached when the first micro cracks appeared, whereas in the test, a considerably more ductile behaviour due to the formation of microcracks could be observed.

Based on these observations, the material model used was further refined during the first funding period. Furthermore, the results of the investigations have shown that the method of local material deposition presented by Mattheck [12] can also be helpful for the ge-

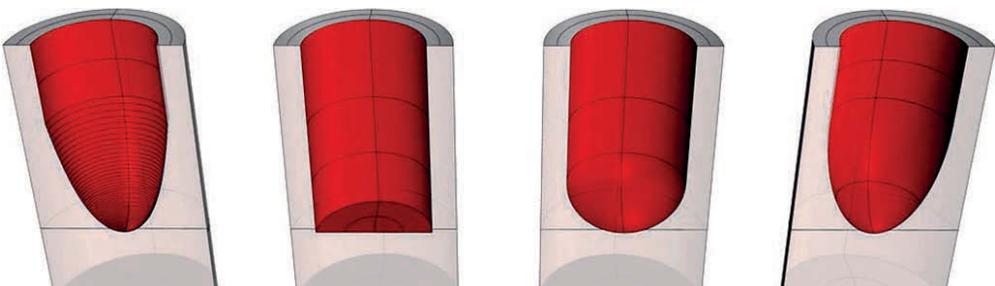


Bild 3: Geometrien der Kraftüberleitungsbereiche | Fig. 3: Geometries of the load transfer areas

ren, die in den verwendeten Materialmodellen offenbar nicht angemessen abgebildet werden konnte. Im numerischen Modell wurde die maximale Traglast der Bauteile bereits beim Auftreten erster Mikrorisse erreicht, während im Versuch ein erheblich duktileres Verhalten bei der Entstehung von Mikrorissen beobachtet werden konnte.

Auf Grundlage dieser Beobachtungen wurde das verwendete Materialmodell im Verlauf der ersten Förderperiode weiter angepasst. Die Untersuchungsergebnisse haben ferner gezeigt, dass die von Mattheck [12] vorgestellte Methode der lokalen Anlagerung von Material zur Verringerung von Spannungen in baumartigen Bauteilen auch für die geometrische Auslegung von UHPFRC-Bauteilen hilfreich sein kann.

Die untersuchten trocken gefügten Stoßverbindungen aus UHPFRC mit innenseitiger Querschnittsaufdickung sind auch bei kleinen Imperfektionen der Oberfläche in der Lage, bis zu 85 % der maximalen Traglast des ungestörten UHPFRC-Rohres zu übertragen. Bild 4 zeigt im Vergleich der FEM-Simulationen, dass sich durch eine symmetrische Aufdickung nach innen und außen die Spannungsverteilung gleichmäßig verteilen lässt.

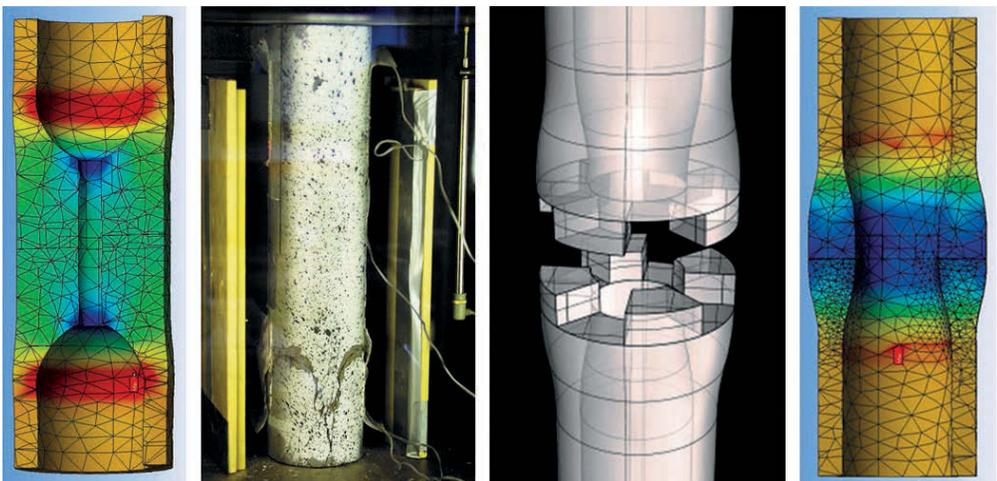
ometric design of UHPFRC elements to reduce stresses in tree-like structures.

The investigated dry-jointed UHPFRC butt joints with thickened internal cross-section are able to transfer up to 85% of the maximum load even with small imperfections of the surface. Fig. 4 shows in the comparison of the FEM simulations that the stress distribution can be allocated evenly by a symmetrical thickening of the cross-section inwards and outwards.

The findings from the development of the tubular joints were transferred to the development of bending-resistant node elements.

#### 1.4 Bending-resistant node elements made of UHPFRC tubes for deflection of forces in frame structures (ITE/iBMB)

The development of the geometry of these node elements was inspired by Maillart's reinforced concrete frame construction of the train station in Chiasso [13], which was already described by Bletzinger [14] as a lightweight construction in which "force and form are in an ideal relationship". The load assumptions were derived from the load capacities of the thin-walled UHPFRC reference tubes to be connected. As in the develop-



**Bild 4:** Untersuchung von Stoßverbindungen mit unterschiedlichem Kräfteinleitungsbereich: innenseitige Aufdickung (links); symmetrische Aufdickung (rechts) | **Fig. 4:** Investigation of dry joints with different load introduction areas: inner thickening (left); symmetric thickening (right)

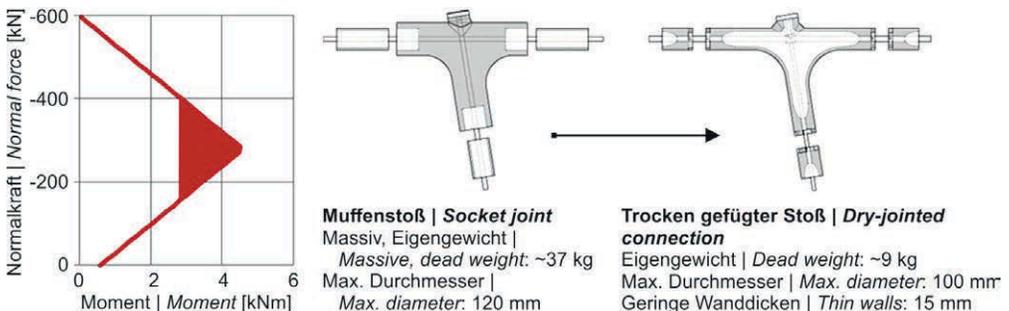
Die Erkenntnisse aus der Entwicklung der Rohr-  
stöße wurden in die Entwicklung biegesteifer  
Knotenelemente überführt.

**1.4 Biegesteife Knotenelemente aus UHPFRC-  
Rohren zur Umlenkung von Kräften in Stab-  
tragwerken (ITE/iBMB)**

Die Entwicklung der Geometrie dieser Knoten-  
elemente wurde durch die von Maillart entwi-  
ckelte Stahlbetonstabwerkkonstruktion des  
Bahnhofs in Chiasso [13] inspiriert, welche  
bereits von Bletzinger [14] als eine Leichtbau-  
konstruktion beschrieben wurde, bei der „Kraft  
und Form in einer idealen Beziehung stehen“. Die  
Lastannahmen wurden aus den Tragfähigkeiten  
der anzuschließenden dünnwandigen UHPFRC-  
Referenzrohre abgeleitet. Wie bei der Entwick-  
lung von passgenauen, trocken gefügten Stoß-  
verbindungen wurden auch hier UHPFRC-Rohre  
mit einem Durchmesser von 100 mm und einer  
Wandstärke von 15 mm eingesetzt. Der Rohr-  
querschnitt wies bei linear-elastischer Berech-  
nung die in Bild 5 (links) dargestellte Momen-  
ten-Drucknormalkraft-Tragfähigkeit auf. Die  
Versuchsreihen am iBMB an diesem leichten  
Rohrquerschnitt mit einem Eigengewicht von  
nur 10 kg/m zeigen, dass die Materialdruckfest-  
igkeit von 151 MPa und somit auch eine Nor-  
malkrafttragfähigkeit von über 600 kN erreicht  
werden können. Daraus abgeleitet erschien die  
folgende Beanspruchungskombination auch  
für die Knoten realisierbar:  $M = 3,5$  kNm bei  
 $N = -250$  kN (Druckkraft). Diese Beanspru-

ment of precisely fitting dry-jointed butt joints,  
UHPFRC tubes with a diameter of 100 mm and  
a wall thickness of 15 mm were used. The mo-  
ment-normal force load-bearing capacity the  
tube cross-section based on linear-elastic calcula-  
tion is shown in Fig. 5 (left). The test series on  
the iBMB on this lightweight tube cross-section  
with a dead weight of only 10 kg/m showed that  
the material compressive strength of 151 MPa  
and thus also a normal force bearing capacity  
of more than 600 kN could be achieved. Derived  
from this, the following stress combination  
seemed to be realizable for the nodes as well:  
 $M = 3.5$  kNm at  $N = -250$  kN (compressive force).  
This stress combination served as a basis for  
the design of the component geometry as well  
as for the dimensioning and geometric optimi-  
zation of the node element at the ITE.

In order to make optimum use of the material  
properties of the UHPFRC in the developed def-  
lection-resistant node element, it was always  
subjected to compressive stress by means of a  
systematic prestressing in the connected tubes.  
The prestressing was carried out using strands  
guided in the tubes, which were anchored in the  
respective end nodes. In the first testing step,  
the connection type of a socket joint between  
tube and node was investigated (Fig. 5, middle).  
Assuming a tensile strength of 10 MPa for the  
UHPFRC, a socket wall thickness of 10 mm was  
required for the transmission of moments and  
normal forces from the beam. This led to unsuit-  
able results due to the heavy weight and the high



**Bild 5:** Linear-elastische Momenten-Normalkraft-Interaktion des Rohrquerschnittes (links) und Entwicklung eines organischen Knotens mit Vorspannung und Muffenstoß (Mitte) bzw. gewichtsoptimiert mit präzise trocken gefügtem Stoß (rechts) | **Fig. 5:** Linear-elastic moment-normal force interaction of the pipe cross-section (left) and organic node development: with preload and socket joint (centre) as well as weight-optimized with precisely dry-jointed connection (right)

chungskombination diente im Weiteren als Grundlage für den Entwurf der Bauteilgeometrie sowie für die Bemessung und geometrischen Optimierung des Knotenelements am ITE.

Um die Materialeigenschaften des UHPFRC in dem entwickelten biegesteifen Knotenelement optimal ausnutzen zu können, wurde dieser mittels einer planmäßigen Vorspannung in den angeschlossenen Rohren stets auf Druck beansprucht. Die Vorspannung erfolgte über in den Rohren geführte Spannlitzen, welche in den jeweiligen Endknoten verankert wurden. Im ersten Versuchsschritt wurde der Anschlusstyp einer Muffenverbindung zwischen Rohr und Knoten untersucht (Bild 5, Mitte). Bei Annahme einer Zugfestigkeit des UHPFRCs von 10 MPa ergab sich eine erforderliche Muffenwanddicke von 10 mm für die Übertragung der Momente und Normalkräfte aus dem Stab. Dies führte aufgrund des hohen Gewichts und der hohen Anforderung an die Passgenauigkeit von Muffenverbindungen hinsichtlich der Rohrtragfähigkeit zu unzureichenden Ergebnissen.

Im Weiteren wurde am ITE die Idee verfolgt, den Stoß aus dem unmittelbaren Knotenbereich heraus in die Stabstrecke zu verlagern, wodurch Knoten und Stoß separat gestaltet werden könnten. Das führte zu einer deutlich leichteren und schlankeren Knotengeometrie (Bild 5, rechts). Die Wanddicke im Knoten konnte so auf 15 mm begrenzt werden. Dieser Knoten wurde anschließend numerisch genauer untersucht, wobei sich zeigte, dass zum Erreichen der gewünschten Biegetragfähigkeit die Form des Knotens geometrisch noch optimiert werden musste. Zusätzlich wurde die Kerbanfälligkeit unter Biegebeanspruchung bereits durch Hermerschmidt/Budelmann [15] am iBMB festgestellt. In weiteren Optimierungsschritten wurden daher die Ausrundungsradien der Schenkel vergrößert. Die dadurch ebenfalls gewonnene, verbesserte Steifigkeit des Knotens erhöhte zusätzlich die Momententragfähigkeit. Ebenfalls wurden am Auflager für die Spannlitze (Bild 5, rechts) durch eine Querschnittsvergrößerung im Winkel von 45° die hohen lokalen Drucknormalkräfte weitergeleitet, um eine zu große

demands on the accuracy of fit of socket joints with regard to the tube load-bearing capacity.

Subsequently, the idea was pursued at the ITE to shift the joint from the immediate joint area into the beam section, which would enable the separate design of nodes and joints. This led to a significantly lighter and slimmer joint geometry (Fig. 5, right). The wall thickness in the node could thus be limited to 15 mm. This node was then examined numerically in more detail, which showed that the shape of the node still had to be optimized geometrically to achieve the desired bending load-bearing capacity. In addition, the notch susceptibility under bending stress was already determined by Hermerschmidt/Budelmann [15] at the iBMB. In further optimization steps, the rounding radii of the legs were therefore increased. The resulting improved stiffness of the node additionally increased the moment capacity. Also, at the support for the prestressing strands (Fig. 5, right), the high local compressive forces were transferred by enlarging the cross-section at an angle of 45° in order to prevent an excessive compression of the cross-section there. This improved node allowed the absorption of a higher bending moment combined with a lower weight. For the production of the test body at the ITE, the outer formwork of the node was made of wax and the inner hollow body of polystyrene using the method of *ultra-precision formwork construction* and concreted with the UHPFRC formula FK1-2,5 developed at the iBMB.

After the production of the optimized node element at the ITE, its load-bearing capacity was tested in a combined compression-bending test at the iBMB, see [4], [16]. The normal force was introduced using threaded rods before the test and kept basically constant during the test by a set of disc springs. The force of the press was applied to the upper support. The lower right support in the compression testing machine was designed to be horizontally displaceable using plastic slide bearings (Fig. 6, left) in order to allow the legs to move. By means of the measured movements and the recalculation of the spring stiffnesses, the absorbed rod moments in the range of 0.2 to

Stauchung des Querschnitts an dieser Stelle zu verhindern. Der weiterentwickelte Knoten ermöglichte die Aufnahme eines größeren Biegemomentes bei geringerem Gewicht. Zur Herstellung des Versuchskörpers am ITE wurde die Außenschalung der Knotenform aus Wachs und der innere Hohlkörper aus Polystyrol mit der Methode des *Ultra-Präzisions-Schalungsbaus* erstellt und mit der am iBMB entwickelten UHPFRC-Rezeptur FK1-2,5 ausbetoniert.

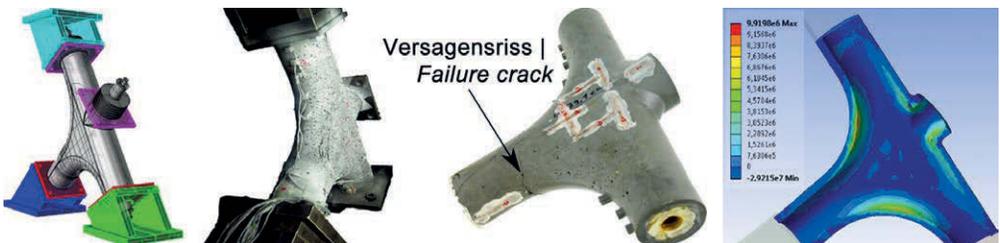
Im Anschluss an die Herstellung des optimierten Knotenelementes am ITE wurde dieses in einem kombinierten Druck-/Biegeversuch am iBMB auf seine Tragfähigkeit hin überprüft, s. [4], [16]. Dabei wurde die Normalkraft vor dem Versuch über Gewindestangen definiert eingeleitet und über Tellerfederpakete während des Versuchs weitgehend konstant gehalten. Die Pressenkraft wurde am oberen Auflager eingeleitet. Das untere rechte Auflager in der Druckprüfmaschine wurde mittels Kunststoffgleitlagern horizontal verschieblich ausgeführt (Bild 6, links), um eine Bewegung der Schenkel zu ermöglichen. Über die gemessenen Bewegungen konnten über die Nachrechnung der Federsteifigkeiten die aufgenommenen Stabendmomente im Bereich von 0,2 bis 1,1 kNm bei beginnender Rissbildung berechnet werden. Die Drucknormalkraft in den Stäben betrug zwischen 60 und 180 kN, was einer Querschnittsausnutzung von 8 bis 26 % der Druckfestigkeit entspricht.

Das Versagen fand bei einer Lasthöhe von 38 kN statt. Die experimentellen Ergebnisse des Knotenversuchs haben gezeigt, dass die mittels FEM-Berechnung ermittelten Traglasten, wie be-

1.1 kNm with beginning crack formation could be calculated. The normal compressive force in the legs was between 60 and 180 kN, which corresponds to a use of the bearing cross-section of 8 to 26% of their compression strength.

The failure occurred at a load of 38 kN. The experimental results of the node test showed that the loads determined by FEM calculation were exceeded, as was already the case with the butt joints. The evaluation of the strain gauges and the optical deformation measurement showed a local exceeding of the tensile strength of the UHPFRC, which however had no influence on the load-bearing capacity due to the very fine crack distribution. The failure was ultimately caused by a bending crack in combination with a shear force failure below the rounding of the node (Fig. 6). In the tests performed at the iBMB it could be shown that the bending load-bearing capacity of the developed node is higher than that of the connected tube cross-sections. The high load-bearing capacity was achieved by the node's outstanding ductile behaviour. Due to the high fibre content, no abrupt drop of the load in the critical state of the load-bearing capacity took place.

To verify the results obtained in this first experiment, further node elements of the same design were produced at the ITE and tested at the iBMB during the last phase of the first funding period. The measured values were compared to the FEM calculations and served to adapt and optimize the UHPFRC material model. The investigation of the node showed that the numerical optimization of the cross-section geometry was effective.



**Bild 6:** Knotentest in Druckprüfmaschine; v. l. n. r.: Schema Versuchsaufbau, Prüfaufbau mit DMS und Punktmuster für optische Messung, Knoten nach dem Versuch mit Versagensriss am Ausrundungsbeginn, numerische Simulation (hier: Hauptzugspannungen beim letzten Lastschritt) | **Fig. 6:** Node test in a compression testing machine; f.l.t.r.: schematic test setup; sample with strain gauges and dot patterns for optical measurement; node after test with failure crack at the beginning of the rounding; FE simulation (here: main tensile stresses at last load step)

reits bei den Stoßverbindungen, überschritten wurden. Die Auswertung der Dehnmessstreifen und der optischen Verformungsmessung zeigten eine lokale Überschreitung der Zugfestigkeit des UHPFRC, die jedoch aufgrund der sehr feinen Rissverteilung keinen Einfluss auf die Tragfähigkeit hatte. Das Versagen wurde letztlich durch einen Biegeriss in Kombination mit einem Querkraftversagen unterhalb der Ausrundung des Knotens ausgelöst (Bild 6). In den am iBMB durchgeführten Versuchen konnte gezeigt werden, dass die Biegetragfähigkeit des entwickelten Knotens höher als die der angeschlossenen Rohrquerschnitte ist. Die hohe Traglast erreichte der Knoten dabei durch sein ausgeprägt duktilen Verhalten. Aufgrund des hohen Fasergehaltes fand kein schlagartiges Abfallen der Last im Grenzzustand der Tragfähigkeit statt.

Zur Verifizierung der in diesem ersten Versuch ermittelten Ergebnisse wurden in der letzten Phase der ersten Förderperiode weitere Knotenelemente der gleichen Bauart am ITE hergestellt und am iBMB geprüft. Die Messwerte wurden den FEM-Berechnungen gegenübergestellt und dienten zur Anpassung und Optimierung des UHPFRC-Materialmodells. Die Knotenuntersuchung ergab, dass die numerische Optimierung der Querschnittsgeometrie zielführend war. Daher wurde auf weitere experimentelle Betrachtungen unterschiedlicher Eck- und Endknoten verzichtet, da diese letztendlich Modifikationen des untersuchten Knotens darstellten. In den weiteren Untersuchungen hat sich herausgestellt, dass eine weiterführende kraftflussorientierte Topologieoptimierung zur besseren Performance des beschriebenen Knotenelementes zielführender war als die Entwicklung neuer Knotentypen.

## **1.5 Linienförmige, trocken gefügte Stoßverbindungen zur passgenauen Fügung von segmentierten UHPFRC-Schalenbauteilen**

### **1.5.1 Formfindung und Dimensionierung der Fugegeometrie (ITE)**

Schalen aus Fertigteilen sind nicht neu, bereits 1942 wurde mit der Dywidag-Kreiszylinderschale [17] in Deutschland damit begonnen. Aus

Therefore, further experimental considerations of different corner and end nodes were omitted, since these only represented modifications of the examined node. Further investigations have shown that a further force flow oriented topology optimization for a better performance of the described node element was more useful than the development of new node types.

## **1.5 Linear dry-jointed butt joints for precise joining of segmented UHPFRC shell elements**

### **1.5.1 Form finding and dimensioning of the joint geometry (ITE)**

Shells made of prefabricated segments are not a novelty; the Dywidag circular cylinder shell [17] was already being used in Germany in 1942. For mostly economic reasons, however, its distribution remained limited and mainly restricted to the Soviet Union and Eastern Europe. One example is the segmented armocement shell developed in the USSR [17]. In Germany, the prefabrication of shells was only considered reasonable if the shell could be assembled from as few elements as possible [18]. One example is the glass-fibre reinforced shell developed by Jörg Schlaich in 1976 in Stuttgart, which was built from prefabricated segments produced on site [19]. Cement-based filling mortars were used to join the segments of such prefabricated segmented shells, [20].

The investigations carried out in this project on tubular components and their joints showed that it is possible to join elements made of UHPFRC dry by means of geometrically precise and mechanically efficient joints. These findings were also used for the second part of the work program, namely the joining of planar elements. The aim here was also to create the requirements for the construction of two-dimensional structures and shells made of segmented precast elements and to join the elements dry without the use of filling mortar or additional steel components.

In the first step, analogous to the procedure for the tubes, geometric joining principles were de-

meist wirtschaftlichen Gesichtspunkten blieb die Verbreitung aber gering und hauptsächlich auf die Sowjetunion und Osteuropa beschränkt. Ein Beispiel ist die in der UdSSR entwickelte segmentierte Armozementschale [17]. In Deutschland wurde die Vorfertigung von Schalen nur dann als sinnvoll erachtet, wenn die Schale aus möglichst wenigen Elementen zusammengesetzt werden konnte [18]. Ein Beispiel ist die 1976 von Jörg Schlaich entwickelte glasfaserverstärkte Schale in Stuttgart, welche aus vor Ort hergestellten Fertigteilsegmenten errichtet wurde [19]. Es kamen für solche Segmentschalen aus Fertigteilen zementbasierte Verfüllmörtel zur Fügung der Segmente zum Einsatz, [20].

Die in diesem Projekt durchgeführten Untersuchungen an stabförmigen Bauteilen und ihren Verbindungen zeigten, dass es möglich ist, Bauteile aus UHPFRC mittels geometrisch präziser und mechanisch leistungsfähiger Stöße trocken zu fügen. Diese Erkenntnisse wurden auch für den zweiten Teil des Arbeitsprogramms, nämlich die Fügung flächiger Elemente, genutzt. Ziel war es auch hier, die Voraussetzungen zum Bau von flächigen Bauten und Schalen aus segmentierten Fertigteilen zu schaffen und die Segmente ohne Verfüllmörtel oder zusätzliche Stahlreinbauteile trocken zu stoßen.

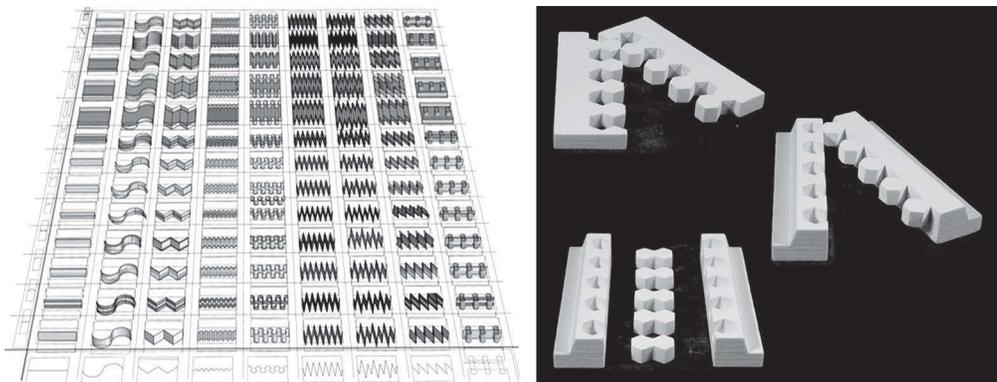
Im ersten Schritt wurden, analog zum Vorgehen bei den Stäben, geometrische Fügeprinzipien

entwickelt, welche sich in der jeweiligen Form und Kräfteverteilung unterscheiden. Wie in Fig. 7 dargestellt, lassen sich eine Vielzahl von dreidimensionalen Fügegeometrien durch Kombination von vertikalen und horizontalen Schnitten im Fügebereich erzeugen. In der darauffolgenden Phase wurden die Fügearten hinsichtlich ihrer Eignung für unterschiedliche Fügerichtungen sowie ihrer grundsätzlichen Fähigkeit, Kräfte für normale sowie begrenzte Biege- und Querkraft zu übertragen, bewertet.

Eignende Fügearten wurden als 3D-Druckmodelle aus Gips erstellt und auf ihre Funktionalität getestet. Eine Auswahl von Zahnverbindungen ist in Fig. 7 (rechts) dargestellt. Solche quer zur Schalenfläche her einbaufähigen Verbindungen ermöglichen die Übertragung von Druck- und auch Zugkräften durch Verriegelung. Das Beispiel in der Mitte von Fig. 7 (rechts) zeigt, wie eine Verdickung ebenfalls zur Erzielung einer gewissen Momentenlastkapazität im Fügebereich genutzt werden kann. Die untere rechte Abbildung zeigt, wie das Einbauen solcher Verbindungen vor Ort durch separate, präzise gefertigte UHPFRC-Einlagen erleichtert werden kann.

### 1.5.2 Experimentelle Untersuchungen zum Lasttragverhalten von trockenverleimten Zahnverbindungen (iBMB)

Um das Lasttragverhalten von trockenverleimten Zahnverbindungen von Schalensegmenten mit einer Plattenstärke von nur 15 mm zu untersuchen, wurden sieben verschiedene Testspecimen hergestellt. Das Verhältnis von Zahnhöhe zu Zahn-



**Bild 7:** Herleitung geometrischer Fügungsmöglichkeiten (links) und ausgewählte Verzahnungsgeometrie als 3D-Druck (rechts, von oben nach unten: flache Verbindung, aufgeweitete Verbindung mit Zug- und Druckzone, fügungsoptimierte Verbindung mit zusätzlichen UHPFRC-Passstücken) | **Fig. 7:** Derivation of the geometric joining possibilities (left) and selected gearing geometries as 3D prints (right, from up to down: flat connection, expanded connection with tension and compression zone, joint-optimized connection with additional UHPFRC inlays)

entwickelt, welche sich durch den jeweiligen Form- und Kraftschluss unterscheiden. Wie in Bild 7 dargestellt, kann durch das Zusammenführen von vertikalen und horizontalen Schnittführungen im Stoßbereich eine Vielzahl an dreidimensionalen Fügegeometrien hergeleitet werden. Im folgenden Schritt wurden die Verbindungstypen auf ihre Fügbarkeit in unterschiedlichen Fügungsrichtungen und die grundsätzliche Fähigkeit zur Kraftübertragung für Normalkraft, sowie begrenzt Biegung und Querkraft, beurteilt.

Geeignet erscheinende Fügertypen wurden als physische Modelle im 3D-Druckverfahren in Gips hergestellt und auf ihre Funktionalität hin überprüft. Eine Auswahl schwalbenschwanzartiger Verbindungen zeigt Bild 7 (rechts). Solche quer zur Schalenebene fügbaren Verbindungen erlauben die Übertragung von Druck- und auch Zugkräften durch eine Verzahnung der Elemente. Das mittlere Beispiel in Bild 7 (rechts) verdeutlicht, wie mit einer Aufdickung auch der Hebelarm für eine gewisse Momententragfähigkeit im Stoßbereich erreicht werden kann. Im rechten unteren Bild wird gezeigt, wie die Fügbarkeit auf der Baustelle durch separate passgenaue UHPFRC-Passstücke erleichtert werden kann.

### 1.5.2 Experimentelle Untersuchungen zum Tragverhalten trocken gestoßener Zahnverbindungen (iBMB)

Zur Überprüfung der Tragfähigkeit trockener Verzahnungen von Schalensegmenten von nur

width and the angle of the teeth were varied in each case. Fig. 8 (left) shows the test specimen with a tooth width of 4 cm and a tooth depth of 2 cm. The UHPFRC test specimens produced were manufactured with a tolerance of  $\pm 0.05$  mm and a conical angle of  $2^\circ$  perpendicular to the surface, so that the teeth fitted into each other almost slidingly. By applying pressure from the outside, the teeth could be pressed together to create a form-fit connection (2<sup>nd</sup> image in Fig. 8). In order to investigate the influence of the compression on the teeth (micro-crack formation) and to check the production-related fibre orientation in the teeth, parts of the samples were visualized in the computer tomograph (CT) of the iBMB. The results are displayed in detail on the right side of Fig. 8. The evaluation has shown that a homogeneous fibre penetration of the tooth area is achieved. The joining of the teeth under pressure is successful in the central area of the sample without damage, but crack formation cannot be excluded in the edge zone of short tooth sections. When designing the tothing, it must therefore be ensured that it always ends on a full tooth in the edge region.

In the further progress, different plane, jointed plate cut-outs were tested at the iBMB for their load-bearing capacity under axial pressure as well as in four-point bending tensile tests and in shear tests [21]. It could be determined that good load-bearing capacities can be achieved in pure compression tests with all tooth bar connections. In the flexural tensile tests, how-



**Bild 8:** Flächige UHPFRC-Verbindung; v. l. n. r.: Proben mit Zähnen, Detail Verzahnung nach Fügen durch Zusammenpressen mit 5 kN, Prüfung auf Fehlstellen im CT mit erkennbarer Rissbildung im unteren linken Viertelzahn, visualisierte 3D-Faserverteilung des UHPFRC im Zahnbereich | **Fig. 8:** Flat UHPFRC connection; f.l.t.r.: test specimen with teeth, detail of tothing after joining by pressing together with 5 kN, check for defects via CT with visible crack formation in the lower left quarter of the tooth, visualized 3D fibre distribution of the UHPFRC in the tooth region

15 mm Plattendicke wurden insgesamt sieben verschiedene Typen von Versuchskörpern hergestellt, wobei das Verhältnis von Zapfenhöhe zu Zapfenbreite sowie der Winkel der Zapfen jeweils variiert wurden. Bild 8 (links) zeigt den Versuchskörper mit einer Zapfenbreite von 4 cm und einer Zapfentiefe von 2 cm. Die so hergestellten UHPFRC-Versuchskörper wurden mit einer Toleranz von  $\pm 0,05$  mm und einem senkrecht zur Fläche konischen Winkel von  $2^\circ$  gefertigt, sodass die Verzahnungen nahezu gleitend ineinanderpassten. Durch von außen aufgebrachtem Druck konnte die Verzahnung zusammengepresst werden, um eine formschlüssige Verbindung zu schaffen (2. Teilbild von links in Bild 8). Um den Einfluss des Zusammenpressens auf die Verzahnungen (Mikrorissbildung) zu untersuchen und die herstellungsbedingte Faserorientierung in den Zähnen zu überprüfen, wurden Teile der Versuchskörper im Computertomografen (CT) des iBMB visualisiert. Die Ergebnisse der CT-Untersuchung sind auszugsweise rechts in Bild 8 dargestellt. Die Auswertung hat ergeben, dass eine homogene Faserdurchsetzung des Zahnbereichs gelingt. Das Fügen der Verzahnung unter Druck gelingt im Zentralbereich der Probe schadensfrei, im Randbereich kurzer Zahnausschnitte kann eine Rissbildung aber nicht ausgeschlossen werden. Bei der Ausbildung der Verzahnung sollte deshalb darauf geachtet werden, dass diese im Randbereich immer auf einem Vollzahn endet.

Im weiteren Verlauf der ersten Förderperiode wurden am iBMB unterschiedliche ebene, gefügte Plattenausschnitte unter axialem Druck sowie im Vierpunkt-Biegezugversuch und in Scherversuchen auf ihre Tragfähigkeit geprüft [21]. Es konnte festgestellt werden, dass im reinen Druckversuch mit allen Zahnleistenverbindungen gute Tragfähigkeiten erreicht werden können. Bei den Biegezugversuchen zeigte sich jedoch, dass ein Neigungswinkel der Zähne quer zur Platte zwischen  $10^\circ$  und  $20^\circ$  für die Übertragung der Zugkräfte am besten geeignet ist. Durch die zusätzliche Aufdoppelung des Querschnittes war es sogar möglich, die Tragfähigkeit der nicht gestoßenen Referenzplatte zu erreichen. Dabei konnten neben monolithi-

ever, it was found that an angle of inclination of the teeth transverse to the plate between  $10^\circ$  and  $20^\circ$  is best qualified for the transmission of tensile forces. By additionally doubling the cross-section, it was even possible to achieve the load-bearing capacity of the non-jointed reference plate. In addition to monolithic teeth, UHPFRC inlays could also be integrated. The shear force bearing capacity of the inlays also reaches that of the monolithic tooth connection. Therefore, the inlays are well suited for joining geometrically complex elements.

The most load-bearing combinations of tooth length to tooth width and tooth angle determined in test series served as a basis for the further development of this connection type. By comparing the load-bearing capacity with the internal forces determined on the undisturbed model structure, it has been pre-dimensioned and optimized. The determination of internal forces was carried out with the help of the methods developed in SPP 1542 by Bletzinger at Technical University of Munich (e.g. [22] and p. 18 et seq. in this book), which are implemented in the program Carat++. With these methods, it is also possible to optimize the sectioning of shell elements.

## 2 Second funding period

### 2.1 Introduction

In the second funding period, the two institutes collaborated on the subproject *“From Structural Joining to Lightweight Structures: Hybrid, dry-fit beam, surface and spacial structures made of UHPFRC”*. The main focus of the investigations was to transfer the novel joints for UHPFRC elements developed in the first project phase into high-performance lightweight beam, plate and spacial load-bearing elements. The declared aim was to increase the load-bearing capacity of elements and structures by a smart coupling of individual modularly designed beam and planar elements to hybrid, interacting load-bearing elements and systems. By combining dry-jointed beams with shear-resistant, flat or curved

schen Zähnen auch Passstücke aus UHPFRC verwendet werden. Die Querkrafttragfähigkeit der Passstücke erreicht dabei ebenfalls die der monolithischen Zahnleistenverbindung. Daher eignen sich die Passstücke besonders gut für geometrisch komplexe Fügebauteile.

Die in Versuchsreihen ermittelten tragfähigsten Kombinationen von Zahnlänge zu Zahnbreite sowie Zahnwinkel dienten als Grundlage für die Weiterentwicklung dieses Verbindungstyps. Durch Vergleich der Tragfähigkeit mit den am ungestörten Modelltragwerk ermittelten Schnittgrößen erfolgt seine Vordimensionierung und Optimierung. Die Ermittlung der Schnittgrößen erfolgte mit Hilfe der im SPP 1542 von Bletzinger an der TU München entwickelten Methoden (z. B. [22] und S. 18 ff. in diesem Buch), welche im Programm Carat++ implementiert sind. Mit diesen Methoden ist es zudem möglich, die Schnittführungen von Schalelementen zu optimieren.

## 2 Zweite Förderperiode

### 2.1 Einleitung

In der zweiten Förderperiode wurde von den beiden Instituten das Teilprojekt „Von der Bauteilfübung zu leichten Tragwerken: Hybride, trocken gefügte Stab-, Flächen- und Raumtragelemente aus UHPFRC“ bearbeitet. Schwerpunkt der Untersuchungen war es, die in der ersten Projektphase entwickelten neuartigen Verbindungen für UHPFRC-Bauteile in leistungsfähige leichte Stab-, Flächen- und Raumtragelemente zu überführen. Erklärtes Ziel war die Steigerung der Traglasten von Bauteilen und Tragwerken durch intelligente Kopplung einzelner modular aufgebauter Stab- und Flächenelemente zu hybriden, zusammenwirkenden Tragelementen und -systemen. Durch Kombination von trocken gestoßenen Stäben mit schubfest verbundenen, ebenen oder gekrümmten Flächenelementen sollte so die Realisierbarkeit einer Vielzahl baupraktisch relevanter Tragwerkstypen von überwiegend biegebeanspruchten Tragwerken hin zu formoptimierten Schalen nachgewiesen

planar elements, the feasibility of a variety of structural types relevant to building practice was to be demonstrated, ranging from predominantly bending-stressed structures to form optimized shells. The basic principles of the first funding period were retained:

- Use of UHPFRC to improve tensile strength and post-breaking behaviour,
- Precisely fitting dry butt joints and
- Efficient material utilization through systematic pretensioning.

Since not all conceivable combinations of beams and planes could be investigated in their geometric diversity in this research project, three cases relevant to building practice were selected from the possible load-bearing element combinations:

- Joining of beam and planar elements to form an uniaxial prestressed T-beam element [23],
- Joining of beam and a planar element to an orthogonal, biaxial prestressed planar structure (section of a coffered ceiling) [24] and
- Joining of beam and planar elements to curved spatial structures [25].

### 2.2 Modular, dry-jointed T-beam element

#### 2.2.1 Idea und material (ITE/iBMB)

By combining planar surface and linear beam elements, a uniaxial tensioned T-beam structure was developed at ITE (Fig. 9) which represents a section of a uniaxial tensioned load-bearing system. The six plate elements were joined to the beam by toothed bar connections. The beams and plates were connected to each other with the UHPFRC inlays already developed.

For the production of modular, thin-walled, joined UHPFRC components, a commercially available, easily processible ready-mixed concrete product with self-levelling properties was used in the 2<sup>nd</sup> funding period due to the required concrete quantities and better availability (Table 3). The mean material properties of the UHPFRC ND-2,5 determined at the iBMB are

werden. Die Grundlagen der ersten Förderperiode wurden dabei beibehalten:

- Verwendung von UHPFRC zur Verbesserung der Zugtragfähigkeit und des Nachbruchverhaltens,
- Passgenaue Trockenstoßverbindungen sowie
- Effiziente Materialausnutzung durch planmäßige Vorspannung.

Da in diesem Forschungsprojekt nicht alle denkbaren Kombinationsmöglichkeiten von Stäben und Flächen in ihrer geometrischen Vielfalt untersucht werden konnten, wurden für die Arbeiten exemplarisch drei für die Baupraxis relevante Fälle aus den möglichen Tragelementkombinationen ausgewählt:

- Fügung von Stab- und Flächenelementen zu einem einachsigen vorgespannten Plattenbalkenelement [23],
- Fügung von Stab- und Flächenelementen zu einem orthogonalen, zweiachsigen vorgespannten Flächentragwerk (Ausschnitt eines Gitterrostes) [24] und
- Fügung von Stab- und Flächenelementen zu gekrümmten Raumtragwerken [25].

## 2.2 Modulares, trocken gefügtes Plattenbalkenelement

### 2.2.1 Idee und Material (ITE/iBMB)

Durch Zusammenführung von ebenen Flächen- und linienförmigen Balkenelementen wurde am ITE ein zusammenwirkendes Bauteil in Form eines einachsigen gespannten Plattenbalkens entwickelt (Bild 9), der einen Ausschnitt aus einem einachsigen spannenden Tragsystem darstellt. Die sechs Plattenelemente wurden mittels Zahnleistenverbindungen mit dem Balken zusammengefügt. Untereinander wurden Balken und Platten mit den bereits untersuchten UHPFRC-Passstücken verbunden.

Für die Herstellung modularer, dünnwandiger, gefügter UHPFRC-Bauteile wurde in der zweiten Förderperiode aufgrund der benötigten Betonmengen und besseren Verfügbarkeit auf

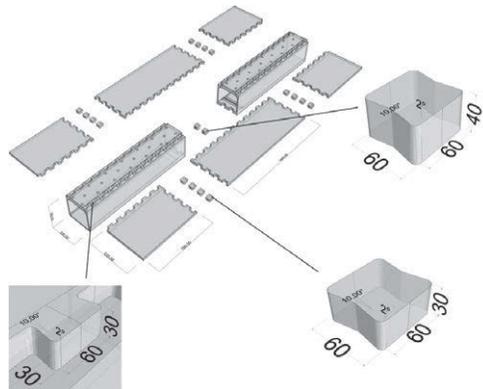


Bild 9: Fügeprinzipien für den UHPFRC-Plattenbalken mit UHPFRC-Passstücken und Zahnleistenverbindungen | Fig. 9: Joining system for UHPFRC T-beam with UHPFRC inlays and tooth joints

shown in Table 4. For dimensioning and calculation of the individual elements, the mean values from the standard tests were used.

### 2.2.2 Production of modular T-beams (ITE/iBMB)

As the modular design of the dry-jointed T-beam required exact element dimensions, with even slight deviations of the individual elements disabling the assembly of the entire structure, great importance had to be attached to dimensional accuracy in the design of the formwork and its production. To meet this requirement, some preliminary tests with CNC-milled polyurethane panels made of obomodulan® of different densities were carried out and evaluated at ITE.

The different formworks as well as the geometries of the concrete components were scanned with optical measuring technology in cooperation with the company GOM and compared with the digital models. The evaluation of these preliminary tests showed that obomodulan® with a density of 700 kg/m<sup>3</sup> is perfectly suited for the production of the formwork for the individual slab beam components. Further reasons for this are the mechanical properties of obomodulan®, which allow to provide joining techniques for the individual formwork components such as Rampa® sleeves, internal threads and fitting grooves. In addition, the material has a fine,

Ausgangsstoffe   Components	Anteil   Portion in [kg/m <sup>3</sup> ]
NANODUR® Compound 5941 Grau   Grey	1.100
Halterner Quarzsand H33   Halterner quartz sand H33	1.012
Mikro-Stahldrahtfasern   Micro Steel Wire Fibres STRATEC Weidacon (2,5 Vol.-%; d / l = 0,18 / 11 mm)	192
Fließmittel   Superplasticizer GRACE ADVA® Flow 375	21
Schwindreduzierer   Shrinkage reducer GRACE Eclipse® Floor	7
Wasser   Water	159

**Tabelle 3:** Ausgangsstoffe für den UHPFRC ND-2,5 für Bauteilversuche | **Table 3:** Mix design for the UHPFRC ND-2,5 for component tests

Kennwerte   Material properties	Mittelwerte   Mean values
Zylinderdruckfestigkeit   Cylinder compressive strength <sup>1</sup>	138 MPa
Einachsige Zugfestigkeit   Uniaxial tensile strength <sup>1</sup>	9 MPa
Biegezugfestigkeit   Bending tensile strength <sup>2</sup>	17 MPa
Elastizitätsmodul   Modulus of elasticity <sup>3</sup>	49,2 GPa

<sup>1</sup> Zylinder | Cylinder d / h = 80 / 160 mm, <sup>2</sup> Prisma | Prism b / h / l = 40 / 40 / 160 mm, <sup>3</sup> Zylinder | Cylinder d / h = 150 / 300 mm

**Tabelle 4:** Materialkennwerte des UHPFRC ND-2,5 | **Table 4:** Material properties of UHPFRC ND-2,5

ein kommerzielles Produkt als Fertigmischung zurückgegriffen, welches selbstnivellierende Eigenschaften besitzt und sich einfach verarbeiten lässt (Tabelle 3). Die am iBMB ermittelten mittleren Materialkennwerte des UHPFRC ND-2,5 sind in Tab. 4 dargestellt. Für die Dimensionierung und Bemessung der einzelnen Bauteile wurden die Mittelwerte aus den Standardversuchen verwendet.

### 2.2.2 Herstellung modularer Plattenbalken (ITE/iBMB)

Da die modulare Bauweise des trocken gefügten Plattenbalkens exakte Elementabmessungen erforderte, wobei schon geringe Abweichungen der einzelnen Bauteile das Fügen zu einer Gesamtstruktur unmöglich machen, musste bei dem Konzept der Schalung und deren Herstellung großer Wert auf die Maßgenauigkeit gelegt werden. Um dem gerecht zu werden, wurden am ITE einige Vorversuche mit CNC-gefrästen Polyurethanplatten aus obomodulan® verschiedener Dichten durchgeführt und ausgewertet.

Die verschiedenen Schalungen sowie die Geometrien der Betonbauteile wurden in Koopera-

closed-pore structure, can be used multiple times, and is easily machinable. Therefore, the entire formwork for the T-beam was manufactured from obomodulan® panels using a 3-axis CNC milling machine.

As the T-beam was designed in a modular way, only one-half of the beam formwork had to be produced for the entire length of the T-beam. This meant that two casting cycles were required to produce a complete beam. After manufacturing the individual formwork parts and joining them to the complete beam formwork, the two halves of the beam were concreted at the iBMB. The concreting concept of the beams was that the concreting should be done standing, because all toothed strips had to be formwork facing sides and the thickness of the beams should also remain within a permissible tolerance. For the production of the six single plates, three different double-faced formworks were milled from obomodulan® plates.

For the beams, all sides should be formwork-facing sides in order to meet the high accuracy requirements, although this made concreting considerably more complex. Except

tion des ITE mit der Firma GOM mit optischer Messtechnik erfasst und mit den digitalen Modellen verglichen. Die Auswertung dieser Vorversuche hat ergeben, dass sich obomodulan® mit einer Dichte von  $700 \text{ kg/m}^3$  hervorragend für die Erstellung der Schalung für die einzelnen Plattenbalkenkomponenten eignet. Weitere Gründe hierfür sind die mechanischen Eigenschaften des obomodulan®, welche es ermöglichen, Verbindungstechniken für die einzelnen Schalungsteile wie Rampa®-Muffen, Innengewinde und Passnuten vorzusehen. Zusätzlich besitzt das Material eine feine, geschlossensporige Struktur, es kann mehrmalig verwendet werden und ist gut zerspanbar. Daher wurde die gesamte Schalung des Plattenbalkens aus obomodulan®-Platten mithilfe einer 3-Achs-CNC-Fräsmaschine hergestellt.

Da der herzustellende Plattenbalken modular aufgebaut war, wurde lediglich eine Hälfte der Balkenschalung für die gesamte Länge des Plattenbalkens gefertigt. Es waren somit zwei Betonagen notwendig, um einen kompletten Balken herzustellen. Nach Herstellung der einzelnen Schalungsteile und deren Fügung zu einer Balkenschalung wurden die beiden Balkenhälften am iBMB betoniert. Das Betonaagekonzept der Platten sah vor, dass stehend betoniert werden sollte, da alle Zahnleisten Schalseiten sein mussten und die Dicke der Platte ebenfalls in einer zulässigen Toleranz bleiben sollte. Für die Herstellung der sechs Einzelplatten wurden demnach drei verschiedene, jeweils zweihäuptige Schalungen aus obomodulan®-Platten gefräst.

Beim Balken sollten möglichst alle Seiten Schalseiten sein, um den hohen Genauigkeitsansprüchen gerecht zu werden, was die Betonaage jedoch erheblich erschwerte. Bis auf eine kleine Einfüllöffnung am späteren Auflager des Plattenbalkens waren alle innen- und außenliegenden Betonseiten Schalseiten. In Bild 10 ist die fertige und zum Teil bereits ausgeschaltete Hälfte des Balkens dargestellt. Trotz des Versuches der Entlüftung über ein Schrägstellen der Schalung hat die aufsteigende Luft in den oberen ca. 5 mm des Querschnittes zu deutlichen Verdichtungsporen geführt (Bild 11). Die



Bild 10: Gegossener Balken in der Schalung | Fig. 10: Cast beam in formwork

for a small filling opening at the later support of the T-beam, all inner and outer concrete sides were formwork-facing sides. Fig. 10 shows the finished and partly already stripped half of the beam. Despite the attempt to vent the air by inclining the formwork, the rising air in the upper approx. 5 mm of the cross-section led to significant compaction pores (Fig. 11). The upper side of the cast later became the bottom side of the beam. During the joining of the T-beam section at the iBMB, the individual parts could be moved, put together, and joined by hand. The inlays were driven into the underside of the plate beam using a plastic hammer with no damage to the structure (Fig. 11).

### 2.2.3 Experimental investigations on the load-bearing behaviour of dry-jointed T-beams (iBMB)

In total, tests were carried out on three dry-jointed T-beams (in the following: PB). Each hollow box-shaped PB was 3.0 m long and 1.3 m wide, had a height of 35 cm and a width of 33 cm. The wall thickness for PB1 and PB2 was



Bild 11: Fügung mit UHPFRC-Passstücken auf der Unterseite des Plattenbalkens in der Zugzone | Fig. 11: Joining with UHPFRC inlays under the T-beam in the tension zone

Betonieroberseite bildete später die Balkenuntersicht. Während des Zusammenfügens des Plattenbalkenquerschnitts am iBMB konnten die Einzelteile per Hand bewegt, zusammengesteckt und gefügt werden. Die Passstücke wurden auf der Unterseite des Plattenbalkens mit einem Kunststoffhammer ohne Schädigung der Struktur eingeschlagen (Bild 11).

### 2.2.3 Experimentelle Untersuchungen zum Tragverhalten an trocken gestoßenen Plattenbalken (iBMB)

Insgesamt wurden Versuche an drei trocken gestoßenen Plattenbalken (PB) durchgeführt. Jeder PB war 3,0 m lang und insgesamt 1,3 m breit. Jedes hohlkastenförmige Balkenelement hatte eine Höhe von 35 cm und eine Breite von 33 cm. Die Wandstärke bei PB1 und PB2 betrug 1,5 cm und wurde bei PB3 auf 2,5 cm erhöht. Die an den oberen Längskanten des Balkens aufgesetzten Platten hatten eine Dicke von 3,0 cm und eine Breite von 53,5 cm bei einer Länge von 144 bzw. 78 cm (Bild 9). Die horizontale Vorspannung im Balken wurde mit einem eigens konfektionierten Carbonstab mit einer Zugfestigkeit von 1,8 MN realisiert, der am Spannanker (Bild 12) mit 24 M16-Schrauben per Drehmomentschlüssel definiert vorgespannt wurde. Die Vorspannung verlief in der halben Höhe des Balkenelements und folglich außerhalb der Schwerachse des kompletten Plattenbalkens, wodurch ein der äußeren Belastung und dem Eigengewicht entgegenwirkendes Moment entstand. Die vertikale Lasteinleitung erfolgte im 4-Punkt-Biegeversuch in den Drittelpunkten über Lasttraversen gleichzeitig auf Balken- und Plattenelemente (Bild 12). Die Probekörper waren gelenkig

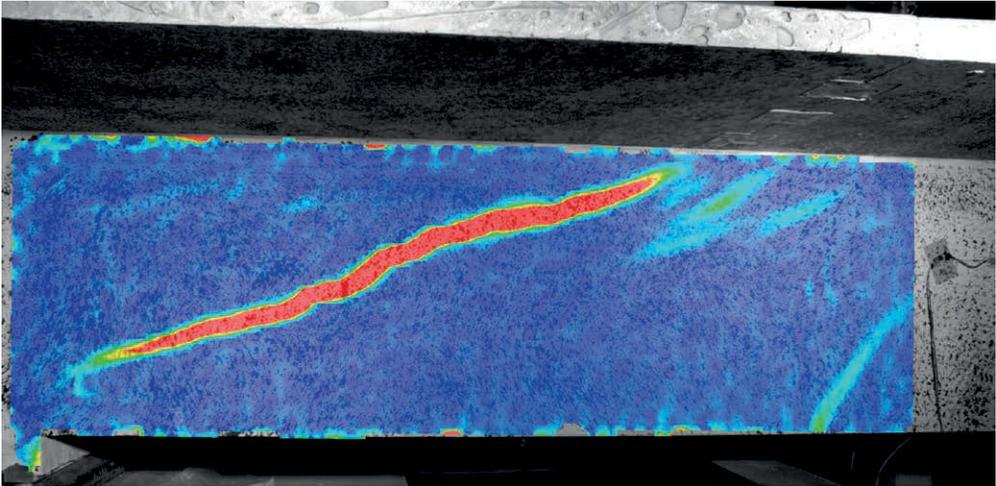
1.5 cm and was increased to 2.5 cm for PB3. The panels placed on the upper longitudinal edges of the beam had a thickness of 3.0 cm and a width of 53.5 cm with a length of 144 and 78 cm respectively (compare Fig. 9). The horizontal prestressing in the beam was realized with a specifically produced carbon rod with a tensile strength of 1.8 MN, which was pretensioned at the tension anchor (Fig. 12) with 24 pcs. M16-bolts by using a torque wrench. The pretensioning took place at half the height of the beam element and thereby outside the centre of gravity of the complete T-beam, resulting in a moment that counteracted the external load and the dead weight. In the 4-point bending test, the vertical load was applied simultaneously to the beam and plate elements at the one-third points by traverses (Fig. 12). The test specimens were articulated and preloaded with 27% or, in the case of PB3, 22% of the cylinder compressive strength in relation to the beam cross-sectional area in order to achieve a high bending load capacity.

The dimensioning of the elements was carried out with the aim of generating the failure beyond the joining areas. PB1 showed a shear force failure (Fig. 13) in the web. Due to a non-optimal fibre distribution, only a single large shear crack under approx. 23° was formed. The picture also shows an opening bending crack in the lower right corner, indicating an imminent failure of the tensile zone. In order to avoid another shear force failure due to the thin wall thickness, PB2 was strengthened by a carbon fibre fabric in the shear force area (Fig. 12), and in PB3 the wall thickness was increased in the webs and in the tensile zone. As a result, the load on PB2 and PB3 raised by 9% and a failure of the UHPFRC inlays in the tensile zone was achieved. In addition, PB3 showed a compression failure of the web and a significantly stiffer overall load-bearing behaviour due to the larger cross-section (Fig. 14).

The planning of the tests involved the checks for normal force, bending and shear force of all cross-sectional sub-areas with the same external load. The geometry of the test specimens had been designed accordingly. Therefore, after the exclusion of the shear force failure in the



**Bild 12:** Versuchsaufbau; dargestellt ist der mit CF-Gelege verstärkte Plattenbalken PB2 | **Fig. 12:** Test setup; here: T-beam PB2 strengthened with CF-sheets



**Bild 13:** Mittels Photogrammetrie sichtbar gemachte Verformungen des Steges von PB1, blau: Bereich ohne Zugverformung, rot: Zugdehnungen | **Fig. 13:** Photogrammetric measured deformations on the web of PB1, blue: area without tensile deformations, red: tensile strains

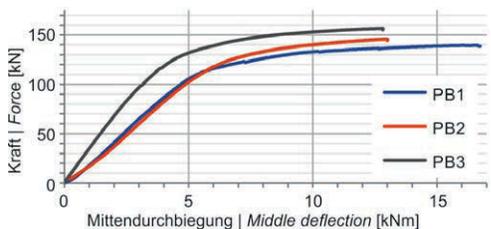
gelagert und mit 27 % bzw. bei PB3 mit 22 % der Zylinderdruckfestigkeit bezogen auf die Balkenquerschnittsfläche vorgespannt, um eine hohe Biegetragfähigkeit zu erreichen.

Die Dimensionierung der Bauteile erfolgte mit dem Ziel, das Versagen außerhalb der Fügstellen zu erzeugen. PB1 zeigte ein Querkraftversagen (Bild 13) im Steg. Aufgrund einer nicht optimalen Faserverteilung bildete sich dabei nur ein einzelner großer Schubriss unter ca. 23° aus. Im Bild ist ebenfalls ein sich öffnender Biegeriss rechts unten zu erkennen, der ein baldiges Versagen der Zugzone andeutet. Um aufgrund der dünnen Wandstärke ein erneutes Querkraftversagen zu vermeiden, wurde PB2 mit einem Kohlefasergelege im Querkraftbereich verstärkt (Bild 12) und bei PB3 die Dicke der Wandung in den Stegen und in der Zugzone erhöht. Dies führte dazu, dass bei PB2 und PB3 die Last um 9 % gesteigert werden konnte und ein Versagen der UHPFRC-Passstücke in der Zugzone erzeugt wurde. Zusätzlich kam es bei PB3 zu einem Druckversagen des Stegs und aufgrund des größeren Querschnittes zu einem deutlich steiferen Gesamttragverhalten (Bild 14).

Bei der Versuchsplanung waren die Nachweise für Normalkraft, Biegung und Querkraft aller

web (Fig. 13), the load capacity for PB2 and PB3 could be increased only slightly. For PB2 and PB3, the UHPFRC inlays failed in the tension zone with an opening of the joint in the middle of the beam. Both the beginning of the opening of the joint and the opening of the shear force crack in PB1 were characterized by a strong increase of the deflections (Fig. 14). Since the inlays of PB3 were taken over from PB2, the maximum tensile force in the now enlarged tensile zone could not be completely transmitted through the joint and PB3 failed without a bending crack in the beam. It would therefore have been possible to further increase the load capacity by thickening the joint area once again.

The results of the plate beam tests have shown that it is possible to produce high-performance



**Bild 14:** Kraft-Durchbiegungsdiagramm für 4-Punkt-Biegeversuche an UHPFRC-Plattenbalken | **Fig. 14:** Force deflection curve for 4-point bending tests on UHPFRC T-beams

Querschnittsteilbereiche mit derselben äußeren Belastung durchgeführt und die Probekörper geometrisch entsprechend ausgelegt worden. Es konnte daher nach dem Ausschließen des Querkraftversagens im Steg (Bild 13) die Traglast bei PB2 und PB3 nur noch geringfügig gesteigert werden. Bei PB2 und PB3 kam es zu einem Versagen der UHPFRC-Passstücke in der Zugzone und der Öffnung der Stoßfuge in Balkenmitte. Sowohl der Beginn des Öffnens der Stoßfuge sowie das Aufgehen des Querkrafttrisses bei PB1 sind durch eine starke Zunahme der Durchbiegungen gekennzeichnet (Bild 14). Da bei PB3 die Passstücke von PB2 übernommen wurden, konnte die maximale Zugkraft in der nun vergrößerten Zugzone nicht vollständig über die Fügung übertragen werden und PB3 versagte ohne einen Biege- riss im Balken. Es wäre somit möglich gewesen, durch eine nochmalige Aufdickung des Stoßbe- reichs die Traglast weiter zu steigern.

Die Ergebnisse der PB-Tests haben gezeigt, dass die Herstellung von leistungsfähigen Bauteilen aus modularen Bauelementen mit einer gerin- gen Wanddicke von 15 mm möglich ist. Der Faserverteilung kommt dabei eine große Bedeu- tung zu. Der Anschluss der Platten an den Balken durch neuartige Zahnleistenverbindungen hat sich als eine sehr effektive Bauweise erwiesen. Die UHPFRC-Passstücke und Zahnleistenverbin- dungen wurden durch den Fügeprozess nur sehr gering beansprucht und konnten nach dem Ver- such wieder problemlos demontiert werden. Für die Prüfung von PB2 wurden beispielsweise die Plattenelemente von PB1 wiederverwendet. Mit UHPFRC-Passstücken und einer lokalen Aufdik- kung war es möglich, die gesamte Kraft des un- gestörten Querschnittes zu übertragen. Daher empfiehlt sich eine solche Aufdickung besonders an hoch querkraft- und biegebelasteten sowie geometrisch komplexen Fugstellen.

## 2.3 Modularer, trocken gefügter Gitterrost

### 2.3.1 Formfindung und Dimensionierung des Gitterrostes (ITE/iBMB)

Das Ziel dieses Arbeitspakets war die Überfüh- rung der Erkenntnisse aus der Planung, Herstel-

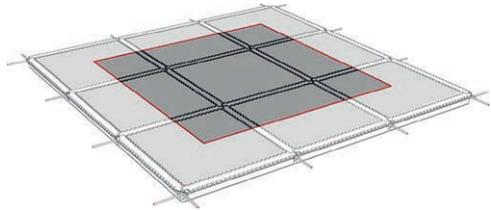
components from modular elements with a low wall thickness of 15 mm. Fibre distribution is of great importance in this process. The connec- tion of the plates to the beam by means of novel toothed bar joints has proven to be a very effec- tive construction method. The UHPFRC fitting pieces and toothed bar joints were subjected to very little stress during the joining process and could be disassembled without any problems after the test. For the testing of PB2, for ex- ample, the plate elements of PB1 were reused. With UHPFRC inlays and a local thickening it was possible to transmit the entire force of the undisturbed cross-section. Such a thickening is therefore particularly recommended for joints subject to high lateral force and bending loads as well as geometrically complex joints.

## 2.3 Modular, dry-jointed coffered ceiling

### 2.3.1 Design process and dimensioning of the coffered ceiling (ITE/iBMB)

The aim of this work package was to transfer the findings from the design, production and testing of the T-beam by orthogonal transfor- mation into a biaxial prestressed coffered ceil- ing with UHPFRC plate elements also joined in a shear-resistant manner [23]. The integrat- ed beams were joined orthogonally, with the joints being made at the crossing points of the beams. The shear-resistant integration of plate elements into the plane biaxial tensioned sup- porting structure gave the hybrid structure in- creased stiffness and allowed material-efficient construction. The biaxial prestressing allowed thin UHPFRC plates to be used as infill panels. The load assumptions defined by the iBMB as a basis for the development of the joints and elements were again selected for a reference structure in multi-storey buildings. The panel element dimensions were based on the max- imum transport sizes for road transport. The section of the structure shown in red in Fig. 15 was examined, whereby the element length was limited to approx. 1.5 m for handling considera- tions. The schematic sketch shows the structure of the framework with the segmentation lines serving as a starting point for the investigation.

lung und Prüfung des Plattenbalkens durch orthogonale Transformation in einen zweiachsig vorgespannten Gitterrost mit ebenfalls schubfest gefügten Plattenelementen aus UHPFRC [23]. Die integrierten Balken wurden orthogonal gefügt, wobei die Fügungen in den Kreuzungspunkten der Balken erfolgten. Durch die schubsteife Integration von Plattenelementen in das ebene zweiachsig gespannte Tragwerk erhielt das so entstehende Hybridtragwerk eine höhere Steifigkeit und konnte materialeffizient hergestellt werden. Durch die zweiachsige Vorspannung war es möglich, dünne UHPFRC-Platten als Ausfachungen der Flächen zu verwenden. Die vom iBMB definierten Lastannahmen als Grundlage für die Entwicklung der Fügungen und Bauteile wurden wiederum für ein Referenztragwerk im Geschosshochbau gewählt. Die Plattenelementabmessungen orientierten sich an den maximalen Transportgrößen für den Straßentransport. Es wurde der in Bild 15 rot gekennzeichnete Tragwerksausschnitt untersucht, wobei aus Handhabungsgründen die Elementlänge auf ca. 1,5 m begrenzt wurde. Die Prinzipskizze zeigt den grundlegenden Aufbau des stabwerkintegrierten Flächentragwerks mit den Fügekanten als Ausgangspunkt für die Untersuchung.

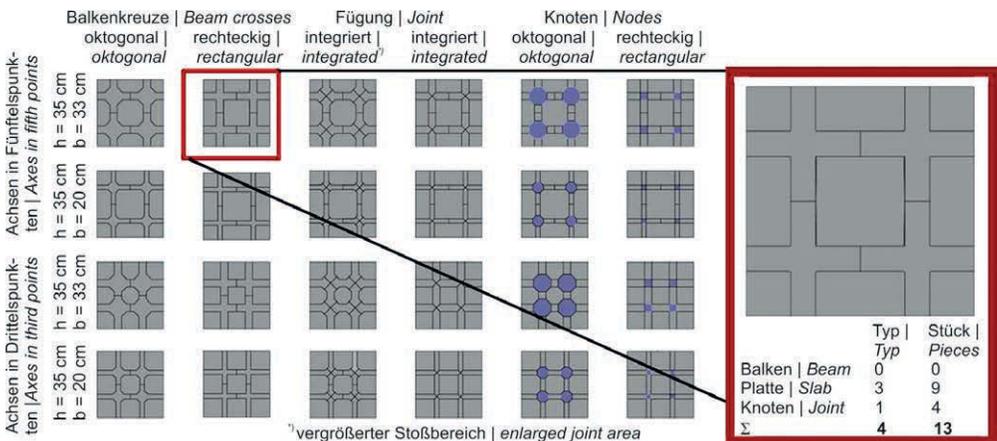


**Bild 15:** Prinzipskizze des zweiachsigen orthogonalen Tragsystems als ebenes Flächentragwerk im Gesamtsystem; die rote Markierung zeigt den gewählten Tragwerksausschnitt | **Fig. 15:** Principle sketch of the two-axis orthogonal load-bearing system as a planar surface supporting structure in the overall system; the red marking shows the selected supporting structure section

For the determination of the shape of the coffered ceiling, different parameters were identified at ITE and recombined to a matrix of possible solutions (Fig. 16, left). These were in particular the definition of the position and the shaping of the inner corners of the crossing beams, the possible arrangement of additional nodes (marked in violet) and the degree of modularization of the overall construction into its individual elements. Finally, the lowest total number of types required and the number of components were decisive for the choice of the system (Fig. 16, right). The basic cross-sections of the selected system were based on the previously designed and tested T-beams.

Für die Formfindung des Gitterrosts wurden am ITE verschiedene Parameter identifiziert und zu einer Matrix möglicher Lösungen kom-

The selected coffered ceiling consists of four modular carrier segments (cross-modules) and nine plate components, which are joined



**Bild 16:** Matrix der möglichen und des gewählten Systems des Gitterrosts | **Fig. 16:** Matrix of possible and the chosen system of coffered ceiling

biniert (Bild 16, links). Dies waren insbesondere die Definition der Lage und die Ausformung der Innenecken der sich kreuzenden Balken, die mögliche Anordnung zusätzlicher Knoten (violett markiert) und der Grad der Modularisierung der Gesamtkonstruktion in ihre einzelnen Segmente. Die geringste Gesamtzahl der benötigten Typen und die Anzahl der Komponenten waren schließlich ausschlaggebend für die Wahl des Systems (Bild 16, rechts). Die grundlegenden Querschnitte des gewählten Systems orientierten sich an dem zuvor entworfenen und geprüften Plattenbalken.

Der gewählte Gitterrost besteht aus vier modularen Trägersegmenten (Kreuzmodulen) und neun Plattenkomponenten, die über Zahnleistenverbindungen miteinander verbunden sind. Er stellt einen Querschnitt eines biaxial gespannten Tragsystems dar. Die Gesamtabmessung des Profils beträgt  $300 \times 300$  cm. Die Hohlbalken haben eine Größe von  $35 \times 25$  cm und Wandstärken von 2,5 cm (Seitenwände) bzw. 5 cm (Deckplatte). Alle Platten haben eine Dicke von 3 cm. Bild 17 (oben) zeigt den montierten Gitterrost aus UHPFRC-Bauteilen, bei dem die Platten und die Kreuzmodule trocken gefügt und vorgespannt wurden.

### 2.3.2 Schalungsbau- und Fertigungskonzept (ITE)

Die komplexe Produktion der einzelnen Betonfertigteile wurde durch den *digital workflow* ermöglicht. Dieser wurde im Rahmen des Projektes entwickelt und besteht im Wesentlichen aus der digitalen Planung mit 3D-CAD-Modellen, deren FEM-Berechnung, der entsprechenden Überarbeitung der digitalen Modelle und der nachfolgenden Generierung und Modifikation von Datensätzen für die CNC-gesteuerte Fertigung. Die Umsetzung der neuartigen Bauweise erfordert eine äußerst präzise Herstellung der einzelnen Komponenten. Die geforderte Maßhaltigkeit der Bauteile wurde durch den konsequenten Einsatz dieser präzisen CNC-gesteuerten Fertigungsprozesse mit Fertigungstoleranzen im Zehntelmillimeterbereich erreicht, die den Anforderungen des Maschinenbaus entsprechen.

by toothed bar connections. It represents a cross-section of a biaxial tensioned bearing structure. The overall dimensions of the profile are  $300 \times 300$  cm. The hollow beams have a size of  $35 \times 25$  cm and wall thicknesses of 2.5 cm (side walls) and 5 cm (top plate). All plates have a thickness of 3 cm. Fig. 17 (above) shows the assembled coffer ceiling made of UHPFRC elements, in which the plates and the cross-modules were dry-jointed and prestressed.

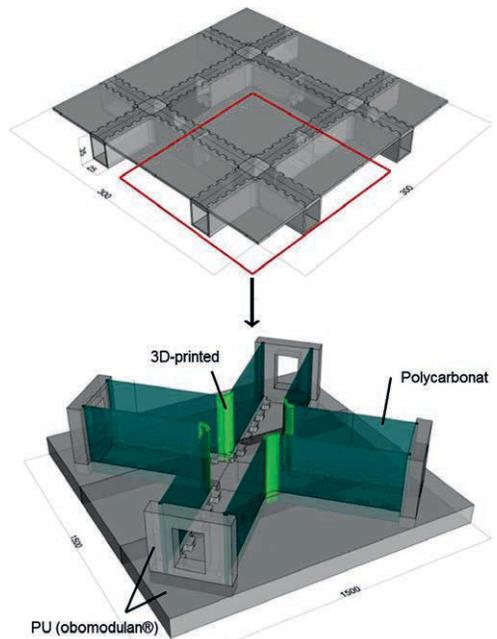


Bild 17: Ausschnitt (oben) und Schalungskonzept des Kreuzmoduls (unten) | Fig. 17: Section (top) and concept of the cross-module (bottom)

### 2.3.2 Formwork construction and manufacturing concept (ITE)

The complex production of the individual pre-cast concrete elements was made possible by the *digital workflow*. This was developed within the framework of the research project and essentially consists of digital planning with 3D CAD models, their FEM calculation, the corresponding revision of the digital models and the subsequent generation and modification of data sets for CNC-controlled production. The

Zur Herstellung der Komponenten wurden vergleichend zwei subtraktive Fertigungsverfahren eingesetzt. Zum einen wurden die Schalungssegmente der Träger aus PU-Plattenmaterial gefertigt, das in 3-Achs-Bearbeitungszentren gefräst wurde. Zum anderen wurden die Geometrien der Platten mit dem 5-Achs-Wasserstrahlschneideverfahren aus zuvor gegossenen Rohlingen geschnitten. Darüber hinaus wurden die Schalungssegmente für die gerundeten Innenkanten der vier Kreuzmodule mit der FDM-Technologie (*Fused Deposition Modeling*) im 3D-Druck hergestellt.

### 2.3.3 Schalungskonstruktion für die Kreuzmodule (ITE/iBMB)

Die Herstellung der Schalung für die Kreuzmodule des Gitterrostes basierte auf den Erfahrungen des zuvor hergestellten Plattenbalkens. Bewährte Methoden und Technologien wurden beibehalten, z. B. die CNC-gefräste Grundplatte mit den Zahnleistenverbindungen und das Konzept des mit Schaumstoff beschichteten, modular aufgebauten Kerns, um diesen nach dem Betonieren und Schwinden des UHPFRC leicht entfernen zu können. Die vier Kreuzmodule wurden am iBMB nacheinander in derselben Schalung gegossen (Bild 17, unten), welche am ITE entwickelt und hergestellt worden war. Sie bestand aus vier verschiedenen Komponentengruppen:

- Die 150 × 150 × 10 cm große Grundplatte bestand aus drei kleineren PU-Platten à 50 × 50 × 10 cm, die verklebt und überfräst wurden. Alle Konturen, wie z. B. die Zahnkonturen und die Schlitze für die Seitenwände, wurden CNC-gefräst. Das gewählte Material war obomodulan® mit einer Dichte von 700 kg/m<sup>3</sup>. Unter der Grundplatte war eine Unterkonstruktion aus Aluminiumprofilen montiert. Sie verfügte über vier Räder für die notwendige Mobilität der Schalung sowie vier Hebeböcken, die zum Ausgleich und zur Fixierung der Schalung beim Betonieren benötigt wurden (Bild 19, a).
- Für die Wandsegmente der Schalung wurden drei verschiedene Materialien und Produktionsverfahren eingesetzt. Die vier Stirnplatten wurden aus dem gleichen Material wie die Grund-

implementation of the novel design requires an extremely precise production of the individual components. The required dimensional accuracy of the components was achieved by the consistent use of these precise CNC-controlled production processes with machining tolerances in the range of tenths of a millimetre, which meet the requirements of mechanical engineering.

For the production of the components, two subtractive manufacturing processes were used for comparison. On the one hand, the formwork segments of the beams were manufactured from PU plate material, which was milled in 3-axis machining centres. On the other hand, the geometries of the panels were cut from previously cast blanks using the 5-axis water jet cutting process. In addition, the formwork segments for the rounded inner edges of the four cross-modules were 3D printed using *Fused Deposition Modelling* (FDM) technology.

### 2.3.3 Formwork construction for the cross-modules (ITE/iBMB)

The production of the formwork for the cross-modules of the coffered ceiling was based on the experience of the previously produced T-beam. Many proven methods and technologies were retained, in particular the CNC-milled base plate with the toothed bar joints and the concept of a modular core coated with foam to allow easy removal after concreting and shrinkage of the UHPFRC. The four cross-modules were cast consecutively at the iBMB in one formwork (Fig. 17, bottom), which had been developed and manufactured at ITE. It consisted of four different component groups:

- The 150 × 150 × 10 cm large base plate consisted of three smaller PU plates of 150 × 50 × 10 cm each, which were glued and milled over. All contours, such as the tooth contours and the slots for the sidewalls, were CNC-milled. The chosen material was obomodulan® with a density of 700 kg/m<sup>3</sup>. Under the base plate, a substructure of aluminium profiles was mounted. It had four wheels for the necessary mobility of the formwork as well as four lifting jacks, which

platte CNC-gefräst. Sie verfügten über Schlitzte, die die Seitenplatten in Position hielten. Diese Seitenplatten bestanden aus transparentem Polycarbonat und wurden mit einer Plattensäge geschnitten. Ihre Maßgenauigkeit konnte geringer sein als die der CNC-gefertigten Komponenten, da sie während des Montageprozesses in den Nuten der Grundplatte eingestellt werden konnten.

- Die Schalungssegmente für die gerundeten Innenkanten wurden mit einer Wandstärke von 1,6 mm und einer Fülldichte von nur 20 % gedruckt. In dieses weitmaschige Raster wurden je zwei stabilisierende Stahlstäbe eingeklebt.
- Die vierte Komponentengruppe wurde benötigt, um die gesamte Schalungskonstruktion zu versteifen und exakt auszurichten. Um die Seitenwände in der richtigen Position zu halten, wurden horizontale Kniehebelklemmen verwendet. Sie waren schnell und einfach zu bedienen. Um die gewünschten rechten Winkel zwischen der Grundplatte und den Endplatten einzustellen, konnten diagonale Streben zwischen den oberen Ecken der Endplatten und der Grundplatte angezogen werden.

Die wesentlichen Verbesserungen gegenüber der Schalung der Plattenbalken sind in Bild 18 (a-d) dargestellt:

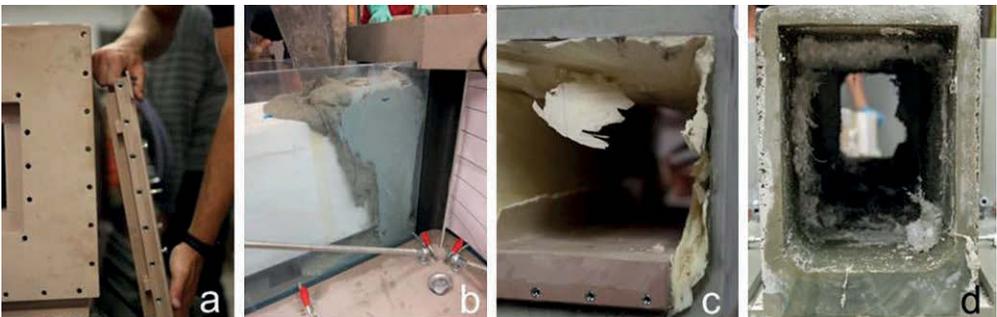
- Horizontale Kniehebelspanner (b) anstelle von Verschraubungen (a),
- Transparente Seitenwände aus Polycarbonat (b) anstelle von PU-Platten (a),
- Oberseite ohne obere Abdeckung (b),

were needed to balance and fix the formwork during concreting (Fig. 19, a).

- Three different materials and production processes were used for the formwork wall components. The four front plates were CNC-milled from the same material as the base plate. They had slots that held the side plates in position. These side panels were made of transparent polycarbonate and were cut with a panel saw. Their dimensional accuracy could be less than that of the CNC-machined components because they could be adjusted in the slots of the base plate during the assembly process.
- The formwork components for the rounded inner edges were 3D printed with a wall thickness of 1.6 mm and a filling density of only 20%. Two stabilizing steel rods were glued into each of these wide-meshed grids.
- The fourth group of components was needed to stiffen and precisely align the entire formwork construction. Horizontal toggle clamps were used to hold the sidewalls in the correct position. They were quick and easy to operate. To set the desired right angles between the base plate and the end plates, diagonal braces could be tightened between the top corners of the end plates and the base plate.

The main improvements compared to the formwork for the T-beams are shown in Fig. 18 (a-d):

- Horizontal toggle clamps (b) instead of screw connections (a);
- Transparent polycarbonate side panels (b) instead of PU panels (a);



**Bild 18:** Wesentliche Verbesserungen an den Verbindungen zwischen den Komponenten der Schalung (a, b) und dem Kern (c, d) | **Fig. 18:** Main improvements concerning the connections between the components of the formwork (a, b) and the core (c, d)

- 3D-Druckteile (schwarz) für die Innenecken (b),
- Kern aus Massivholz und einer Beschichtung aus Styropor® (d) anstelle eines Kerns aus geschraubten PU-Platten und einer Beschichtung aus Styrodur® (c),
- „Schmelzen“ des Styropors® mit Aceton (d) anstatt Schneiden des Styrodurs® mit einer Drahtsäge, um den Kern zu entfernen (c).

- Top side without top cover (b);
- 3D printed parts (black) for the inner edges (b);
- Core of solid wood and a coating of Styropor® (d) instead of a core of screwed PU panels and a coating of Styrodur® (c);
- “Melting” the Styropor® with acetone (d) instead of cutting the Styrodur® with a wire saw to remove the core (c).

2.3.4 Fertigungskonzept der Kreuzmodule (ITE)

2.3.4 Manufacturing concept of the cross-modules (ITE)

Bild 19 (a–d) veranschaulicht den Herstellungsprozess eines der vier Kreuzmodule. Wie in (a) dargestellt, wurde der Holzkern auf der CNC-gefrästen Grundplatte aus PU-Plattenmaterial positioniert. Der Kern bestand aus zwei Balkenstummeln, die von einer Gewindestange zu einem kontinuierlichen Balken verpresst wurden. Diese Konstruktion bot die Möglichkeit, den Kern innerhalb des gegossenen Kreuzmoduls zu demontieren und die Segmente separat herauszuziehen (a). Nach dem exakten Ausrichten der Stirnseiten der Träger in den Endplatten wurde der Holzkern allumseitig mit einer

Fig. 19 (a)–(d) illustrates the manufacturing process of one of the four cross-modules. As shown in (a), the wooden core was positioned on the CNC-milled base plate made of PU sheet material. The core consisted of two beam stubs, which were pressed together by a threaded rod to form a continuous beam. This construction offered the possibility to disassemble the core inside the cast cross-module and to extract the segments separately (a). After the end plates of the beams had been precisely aligned, the wooden core was wrapped on all sides with a 40 mm thick layer of Styropor® (b). After insert-

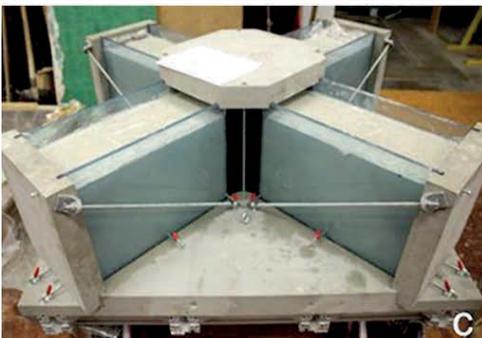
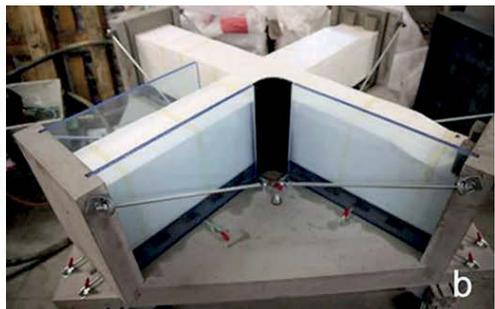


Bild 19: Herstellung eines Kreuzmoduls | Fig. 19: Manufacturing of a cross-module

40 mm dicken Schicht Styropor® eingehüllt (b). Nach dem Einsetzen und Spannen der Wände aus Polycarbonat und den 3D-gedruckten Innenecken wurde die gesamte Schalung durch diagonale Streben stabilisiert und mit einer oberen Nutplatte (c) zusammengepresst. Da die Schalung ohne obere Abdeckung konzipiert wurde, musste sie während der Betonage horizontal ausgerichtet und fixiert werden, um eine konstante Dicke der Deckschicht (die später die Unterseite des Kreuzmoduls bildet) zu erreichen. Innerhalb von 48 Stunden war der Beton soweit ausgehärtet, um die Seitenwände und den Kern durch Schmelzen der Styropor®-Schicht mit Aceton entfernen, den Holzkern ausziehen und anschließend das Kreuzmodul aus der Grundplatte heben zu können (d).

### 2.3.5 Fertigungskonzept der Platten (ITE)

Im Gegensatz zu den bisherigen Produktionstechniken für Platten mit Zahnleistenverbindungen wurde ein neues Verfahren gesucht, um den gesamten Produktionsprozess zu rationalisieren. Die direkte Herstellung der Geometrie aus gefrästen obomodular®-Platten war zwar ein sehr erfolgreicher Ansatz, um präzise Betonbauteile zu produzieren. Jedoch erforderte insbesondere die große zentrale Platte (130 × 130 cm) in Überdenken des Produktionsprozesses. Es werden im Folgenden die wesentlichen Gründe erläutert, warum das Schalungskonzept der kleineren Platten des zuvor gegossenen Plattenbalkens nicht auf die Produktion der zentralen Platte des Gitterrostes übertragen werden konnte: Bei einer stehenden, zweihäufigen Schalung, wie sie im Falle des Plattenbalkens verwendet wurde, würde die aufsteigende Luft zu deutlicher Porenbildung im oberen Bereich des Plattenquerschnitts führen, und die gesamte obere Zahnleiste wäre unbrauchbar. Auch das Betonieren der Schalung, wenn sie horizontal ohne obere Abdeckung ausgerichtet ist, würde zu unzureichenden Ergebnissen führen. Wie mehrere Versuche im Rahmen des Forschungsvorhabens gezeigt haben, führt das Schwinden in der horizontal ausgerichteten Schalung zu einer Verformung der Bauteile sowie zu einem Absinken der Stahlfasern in der UHPC-Matrix bis zum Boden der Schalung.

ing and tensioning the polycarbonate walls and the 3D-printed inner edges, the entire formwork was stabilized by diagonal struts and pressed together with an upper grooved panel (c). Since the formwork was designed without a top cover, it had to be aligned and fixed horizontally during concreting to guarantee a constant thickness of the top layer (which later forms the bottom of the cross-module). Within 48 hours, the concrete had hardened enough to remove the side walls and core by melting the Styropor® coating with acetone, pulling out the wooden core and then lifting the cross-module out of the base plate (d).

### 2.3.5 Manufacturing concept of the plates (ITE)

In contrast to the previous production techniques for plates with toothed bar connections, a new method was sought to streamline the entire production process. The direct production of the geometry from milled obomodular® panels was a very successful approach to produce precise concrete components. However, especially the large central slab (130 × 130 cm) required a rethinking of the production process. In the following, the main reasons are explained why the formwork concept of the smaller plates of the previously cast T-beam could not be transferred to the production of the central plate of the coffered ceiling: With an upstanding, double-sided formwork, as used in the case of the T-beam, the rising air would lead to the accumulation of significant pores in the upper part of the cross-section, and the entire upper toothed bar would be damaged. Also, concreting the formwork when aligned horizontally without top cover, would lead to insufficient results. As several tests carried out within the research project have shown, shrinkage in the horizontally aligned formwork leads to deformation of the elements and to a sinking of the steel fibres in the UHPC matrix down to the bottom of the formwork.

Therefore, two alternative subtractive production methods were investigated: 5-axis CNC milling and 5-axis water jet cutting of raw UHPFRC plates. To investigate the suitability of CNC milling of UHPFRC, different diamond tools and

Daher wurden alternativ zwei subtraktive Produktionsmethoden untersucht: das 5-Achs-CNC-Fräsen und das 5-Achs-Wasserstrahlschneiden von Rohplatten aus UHPFRC. Zur Untersuchung der Eignung des CNC-FräSENS von UHPFRC wurden verschiedene Diamantwerkzeuge und Schneidparameter getestet (Bild 20, links). Während das Fräsen der Zahngeometrien zu einem übermäßigen Verschleiß der Fräswerkzeuge geführt hatte, konnten durch das Schneiden von Rohplatten mit einer 5-Achs-Wasserstrahlschneidanlage (Bild 20, rechts) gute Ergebnisse erzielt werden. Im Gegensatz zum CNC-Fräsen mit seiner einfachen Umwandlung des digitalen Modells in die realen Geometrien ist das Verfahren des Wasserstrahlschneidens wegen der notwendigen Annäherung an die optimalen Schneidparameter komplexer. Insbesondere die konische Form des Schneidstrahls, die je nach Plattenmaterial und Schnitttiefe variiert, war zu berücksichtigen. Das Produktionsverfahren des Wasserstrahlschneidens diente nach Untersuchung der Schneidparameter zur Realisierung aller benötigten Platten für den Gitterrost.

### 2.3.6 Experimentelle Untersuchungen zum Tragverhalten am trocken gestoßenen Gitterrost (iBMB)

Nach der erfolgreichen Herstellung der vier Module wurden diese direkt auf dem Prüffeld am iBMB zum finalen Gitterrost mit einer Grundfläche von  $3 \times 3$  m montiert und vorgespannt. Bild 21 illustriert den Testaufbau: Die gesamte Konstruktion wurde durch vier Spannglieder

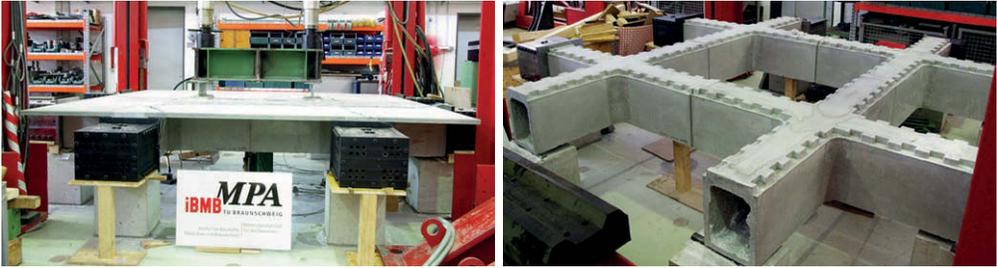
cutting parameters were tested (Fig. 20, left). While the milling of the tooth geometries had led to excessive wear of the milling tools, good results could be achieved by cutting raw plates with a 5-axis waterjet cutting system (Fig. 20, right). In contrast to CNC milling with its simple conversion of the digital model into the real geometries, the waterjet cutting process is more complex due to the necessary approximation to the optimal cutting parameters. In particular, the conical shape of the waterjet, which varies depending on the plate material and cutting depth, had to be taken into account. After investigating the cutting parameters, the production process of waterjet cutting was used to realize all required plates for the coffered ceiling.

### 2.3.6 Experimental investigations on the load-bearing behaviour of the dry-jointed coffered ceiling (iBMB)

After the successful production of the four modules, they were mounted and prestressed directly on the test field at the iBMB to form the final coffered ceiling with a footprint of  $3 \times 3$  m. Fig. 21 illustrates the test setup: The entire construction was prestressed by four tendons. The vertical load was applied by two pressure cylinders. The load was applied to the one-third points of the middle plate via a steel beam. Subsequently, the load was distributed transversely to two thirds of the plate by a transverse beam. Eight tilting bearings at the ends of each cross-module transferred the compressive force into the supports. The test focused on the performance of the toothed bar connections and their ability to transmit shear and bending



**Bild 20:** CNC-Fräsen (links) und Wasserstrahlschneiden von UHPFRC-Platten mit 30 mm Dicke (rechts) | **Fig. 20:** CNC milling (left) and waterjet cutting of UHPFRC-plates of 30 mm thickness (right)



**Bild 21:** Prüfung des Gitterrostes; links: während des Aufbaus und rechts fertiger Prüfaufbau | **Fig. 21:** Test of the coffered ceiling; during construction (left) and finished test set-up (right)

vorgespannt. Die vertikale Belastung erfolgte über zwei Druckzylinder. Über einen Stahlträger wurde die Last auf die Drittelpunkte der mittleren Platte aufgebracht. Nachfolgend wurde die Last durch eine Quertraverse auf zwei Drittel der Platte quer verteilt. Acht Kipplager an den Enden jedes Kreuzmoduls leiteten die Druckkraft in die Auflager ab. Im Fokus der Prüfung standen die Leistungsfähigkeit der Zahnleistenverbindungen und deren Fähigkeit zur Übertragung von Scher- und Biegemomenten sowie die Tragfähigkeit der gesamten Konstruktion.

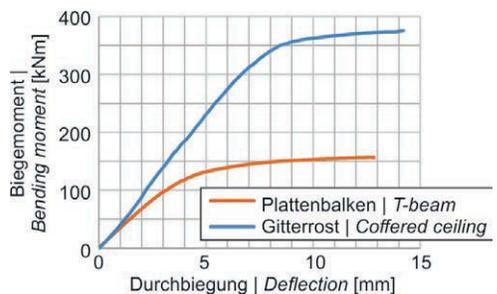
Die Vorspannung des Gitterrostes wurde in Anlehnung an die Plattenbalkenversuche mit 17 % der maximalen Druckfestigkeit in der halben Höhe des Hohlkastenquerschnittes aufgebracht und erzeugte somit ein der äußeren Belastung und dem Eigengewicht entgegenwirkendes Moment. Der Gitterrost erreichte gegenüber dem einachsigen Plattenbalken ein steiferes Tragverhalten und eine mehr als doppelt so hohe Versagenslast (Bild 22). Das Versagen des Gitterrostes wurde durch das Aufreißen der Platte unter der Lasteinleitung sowie das Lösen einzelner Zahnleistenverbindungen ausgelöst, siehe Bild 23. Es versagten teilweise, wie zuvor beim Plattenbalken auch, die UHPFRC-Passstücke in der Zugzone beim Öffnen der Stoßfugen.

Die erfolgreiche Prüfung eines modularen, trocken gefügten Gitterrostes zeigt die hohen Tragreserven einer mehraxialen Konstruktion gegenüber dem einachsigen gespannten Plattenbalken. Es konnte ebenfalls gezeigt werden, dass modulare Bauteile mit einer Wandstärke von größtenteils 25 mm hergestellt und trocken

moments as well as the load-bearing capacity of the entire structure.

The prestressing of the coffered ceiling was applied at 17% of the maximum compressive strength at half the height of the box section in accordance with the T-beam tests, thus generating a moment counteracting the external load and the dead weight. Compared to the uniaxial T-beam, the coffered ceiling achieved a stiffer load-bearing behaviour and a failure load more than twice as high (Fig. 22). The failure of the coffered ceiling was caused by the rupture of the plate under the load introduction and the loosening of individual dry joints, see Fig. 23. As before with the T-beam, the UHPFRC inlays in the tension zone partially failed when opening the butt joints.

The successful testing of a modular, dry-jointed coffered ceiling shows the high load-bearing capacity of a multi-axial construction compared to the uniaxial tensioned T-beam. It could also be



**Bild 22:** Kraft-Durchbiegungsdiagramm für Biegeversuche an UHPFRC-Gitterrost im Vergleich mit dem Plattenbalkentest | **Fig. 22:** Force-deflection curves for bending test on UHPFRC coffered ceiling in comparison to the T-beam test



**Bild 23:** Rissbild in der zentralen Platte (links) und Lösen der Zahnleistenverbindung (rechts) | **Fig. 23:** Crack pattern in the central plate (left) and loosening of the dry joints (right)

zu einem mehrachsig wirkenden Tragsystem gefügt werden können. Die Verbindung einzelner UHPFRC-Module erfolgte dabei durch neuartige Zahnleistenverbindungen. Die UHPFRC-Passstücke und Zahnleistenverbindungen wurden durch den Fügeprozess nur sehr gering beansprucht und konnten nach dem Versuch wieder problemlos demontiert werden.

## 2.4 Übertragung der Fügeprinzipien auf Schalensegmente

### 2.4.1 Forschungsansatz (ITE)

Nach der Entwicklung, Herstellung und Prüfung der Stab- und Flächenelemente des einachsig vorgespannten Plattenbalkenelements und des orthogonalen, zweiachsig vorgespannten Flächentragwerks (Ausschnitt eines Gitterrostes) wurden in einem abschließenden Schritt die Fügegeometrien für gekrümmte Raumtragwerke überführt [25]. Als praxisnahes Anwendungsbeispiel wurde hierfür ein Schalentragwerk aus trocken gefügten UHPFRC-Fertigteilen zur Überdachung einer Halle entwickelt. Ziel für die Formfindung der Schale mit der Software RhinoVAULT war es, ein möglichst effizientes Tragwerk zu entwickeln, das in Bezug auf den Herstellungs- und Montageaufwand herkömmlichen Systemen entsprach, dabei aber weniger Material benötigt. Die Optimierung der Schalendicke wurde unter Berücksichtigung verschiedener Lastfallkombinationen aus maximalen Haupt- und Schubspannungen mit dem Finite-Elemente-Programm ANSYS durchgeführt.

shown that modular elements with a wall thickness of mostly 25 mm can be manufactured and dry-jointed to form a multi-axial load-bearing system. The connection of individual UHPFRC modules was achieved by means of novel toothed bar connections. The UHPFRC inlays and toothed bar connections were exposed to very little stress during the joining process and could be easily disassembled after the test.

## 2.4 Transferring the joining principles to shell segments

### 2.4.1 Research approach (ITE)

After the development, production and testing of the uniaxial, prestressed T-beam and the orthogonal, biaxial prestressed planar structure (section of a coffered ceiling), the joining geometries for curved spatial structures were transferred in a final step [25]. As a practical application example, a shell structure made of prefabricated dry-jointed UHPFRC elements was developed for the roofing of a hall. The goal for the form finding of the shell using the software RhinoVAULT was to develop a highly efficient structure, which was comparable to conventional systems in terms of manufacturing and assembly effort, but required less material. The optimization of the shell thickness was carried out with the finite element program ANSYS considering different load case combinations of maximum principal and shear stresses.

Since the shell was to be composed of several prefabricated UHPFRC elements and should be transportable by trucks, a reasonable positioning of the joints and a maximum dimension of the shell elements of max.  $2.5 \times 13$  m had to be provided. Furthermore, the shell was to be assembled without falsework in order to keep the assembly effort at the construction site as low as possible. In order to be able to assemble the elements without the use of supports, the shell had to be self-supporting and stable at every step of the assembly. To ensure this, the assembly procedure was developed in accordance with annular layered domes and Catalan vaults [26]. Fig. 24 shows a 3D printed plaster

Da die Schale aus mehreren UHPFRC-Fertigteilen zusammengesetzt und mit LKW transportierbar sein sollte, musste eine sinnvolle Anordnung der Fugestellen und eine maximale Abmessung der Schalensegmente von max.  $2,5 \times 13$  m vorgesehen werden. Weiterhin sollte die Schale ohne Lehrgerüst montiert werden, um den Montageaufwand auf der Baustelle so gering wie möglich zu halten. Damit die Fertigteile stützenfrei zusammengefügt werden können, musste die Schale sich in jedem Schritt der Montage selbst tragen und stabil stehen. Um dies zu gewährleisten, wurde der Montageablauf in Anlehnung an Ringschichtkuppeln und katalanische Gewölbe [26] entwickelt. Bild 24 zeigt ein 3D-gedrucktes Gipsmodell des Schalentragerwerks mit dem Fugenbild der Segmentierung.



Bild 24: 3D-gedrucktes Gipsmodell des Schalentragerwerks | Fig. 24: 3D-printed plaster model of the shell structure

model of the shell structure with the segmentation joint pattern.

#### 2.4.2 Fügegeometrien der Schalensegmente (ITE)

Eine besondere Herausforderung an die Fügung stellte die zweifache Krümmung der Schale dar. Eine einfache Übertragung der zuvor verwendeten Schwalbenschwanzverbindungen auf die Schale war hier nicht möglich. Diese ließe sich nicht fügen, da aufgrund der Krümmung der Schale die Flanken der Schwalbenschwänze nicht mehr den gleichen Winkel zur Fügerichtung haben wie zuvor und sich auch der Winkel zwischen den Flanken und der Fügerichtung von einem Schwalbenschwanz zum nächsten ändert, wie es Bild 25 illustriert. Eine Möglichkeit, diesem Problem zu begegnen, wäre die Flankenneigung nicht entsprechend der Krümmung der Schale zu verändern, sondern sie mit dem gleichen Winkel zur Fügerichtung beizubehalten. Dies führt aber besonders bei jenen Elementen, deren Rand um einen großen Winkel gekrümmt ist, zu einer ungewünschten Querschnittserhöhung, da die Flankenhöhe stark zunimmt.

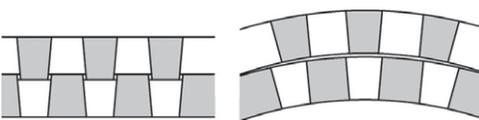


Bild 25: Vertikalschnitt durch gerade (links) und gekrümmte Segmente (rechts) | Fig. 25: Vertical section through straight (left) and curved segments (right)

#### 2.4.2 Joining geometries of the shell segments (ITE)

The double curvature of the shell posed a particular challenge to the segmentation. A simple transfer of the previously used tooth joints to the shell was not possible here. This could not possibly be joined, since due to the curvature of the shell the flanks of the teeth no longer have the same angle to the joining direction and also the angle between the flanks and the joining direction changes from one tooth to the next, as illustrated in Fig. 25. One way to overcome this problem would be not to change the flank tilt according to the curvature of the shell, but to keep it at the same angle to the joining direction. However, this leads to an undesired increase in cross-section, especially for those elements where the edge is curved by a large angle, because here the height of the flanks increases strongly.

These joining problems only occur if the segments are joined perpendicular to the shell plane or parallel to the intersection of the two segments. However, a joining perpendicular to the sectional plane is possible. For the transmission of the shear forces perpendicular to the shell plane, additional shoulders have been added to the sides of the teeth. In order to ensure that the segments could be pressed into each other force-locked, all surfaces of the joint that

Diese Fügeprobleme treten jedoch nur dann auf, wenn die Bauteile senkrecht zur Schalenebene bzw. parallel zur Schnittfläche der beiden Bauteile gefügt werden. Eine Fügung senkrecht zur Schnittfläche ist hingegen möglich. Für die Übertragung der Querkräfte senkrecht zur Schalenebene wurden zusätzliche Ausbuchtungen seitlich an den Fügezapfen angeordnet. Um zu gewährleisten, dass die Segmente kraftschlüssig ineinander gepresst werden konnten, wurden sämtliche Flächen der Fügung, die parallel zur Fügerichtung verlaufen, um einen Winkel von 2° geneigt. Diese Fügegeometrie, wie sie Bild 26 zeigt, wurde in verschiedenen Ausführungen an realen Modellen auf ihre Fügbarkeit hin getestet und optimiert. Auch wenn die entwickelten und hergestellten Fügegeometrien für gekrümmte Raumtragwerke nicht auf ihre mechanische Leistungsfähigkeit hin überprüft wurden, so kann dennoch aufgrund ihrer Ähnlichkeit mit den zuvor getesteten ebenen Plattenverbindungen in Bezug auf Geometrie und anzunehmendem Lastfluss in verbautem Zustand davon ausgegangen werden, dass deren rationale Herstellbarkeit und Verwendbarkeit gegeben ist.

**2.5 Überlegungen zum rechnerischen Nachweis dünnwandiger Bauteile aus UHPFRC (iBMB)**

Für die Nachweise von dünnwandigen Bauteilen müssen Maßstabeffekte hinsichtlich der an Standardprüfkörpern gewonnenen Festigkeitswerte berücksichtigt werden [21]. Zur Ableitung von Materialparametern, um Traglasten analytisch oder numerisch zu bestimmen, hat sich der Ansatz des Versagenskriteriums nach Mohr/Coulomb, Gl. (1), als zielführend herausgestellt [16]. Durch das Modell kann bestimmt werden, ob sich ein Versagen durch Scherbruch oder ein Überschreiten der Druckfestigkeit einstellt. Die Berechnung der Scherspannung  $\tau_u$  der Bruchehüllenden erfolgt mit Gl. (1). Darin geben  $\mu$  den Reibbeiwert,  $\sigma_n$  die Normalspannung senkrecht zur Fügestelle und  $c$  die innere Reibung des Materials an.

$$\tau_u = \mu \cdot \sigma_n + c \tag{1}$$

are parallel to the joining direction were inclined by an angle of 2°. This joint geometry, as shown in Fig. 26, was tested and optimized in various designs on physical models with regard to its connectivity. Even though the developed and manufactured joining geometries for curved spatial structures have not been tested for their mechanical performance, it can be assumed that their rational producibility and usability is given due to their similarity to the previously tested flat panel joints with regard to geometry and assumed stress distribution in the installed state.

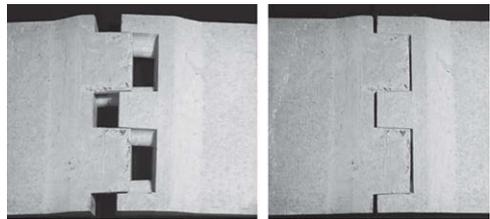


Bild 26: Zahnverbindung von Schalensegmenten vor (links) und nach dem Fügen (rechts) | Fig. 26: Tooth joint of shell segments before (left) and after joining (right)

**2.5 Considerations for the mathematical verification of thin-walled elements made from UHPFRC (iBMB)**

For the verification of thin-walled components, scale effects must be considered with regard to the strength values obtained on standard test specimens [21]. For the derivation of material parameters to determine loads analytically or numerically, the approach of the failure criterion according to Mohr/Coulomb, Eq. (1), has proven to be appropriate [16]. The model can be used to determine whether failure occurs due to shear fracture or whether the compressive strength is exceeded. The shear stress  $\tau_u$  of the failure envelope is calculated using Eq. (1), in which  $\mu$  indicates the coefficient of friction,  $\sigma_n$  the normal stress perpendicular to the joint and  $c$  the internal friction of the material.

$$\tau_u = \mu \cdot \sigma_n + c \tag{1}$$

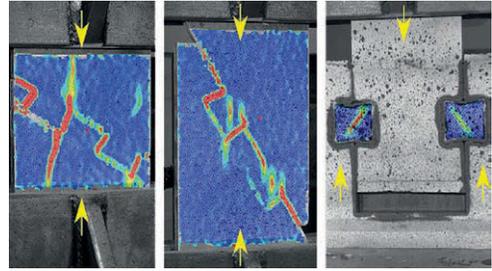
Pure shear strength can be determined in shear tests on prisms (4 × 4 × 16 cm) and beams (15 × 15 × 50 cm) according to Bažant/Pfeiffer

In Scherversuchen an Prismen ( $4 \times 4 \times 16$  cm) und Balken ( $15 \times 15 \times 50$  cm) nach Bažant/Pfeiffer [27], [21] und in Plattendruckversuchen mit Fügewinkeln von  $90^\circ$  kann die reine Scherfestigkeit bestimmt werden, s. Bild 27, rechts.

Wie im Bild 27 gezeigt wird, kann die sich einstellende Festigkeit für Neigungswinkel der Fügefläche zwischen  $15^\circ$  und  $45^\circ$  höher erwartet werden, da im realen Bauteil durch die seitliche Querdehnungsbehinderung ein Aufspalten des Querschnittes verhindert wird. Um dies zu berücksichtigen, werden die auf dem Mohrschen Spannungskreis aufgetragenen gemessenen Scherfestigkeiten nachträglich in Richtung der Bruchgeraden korrigiert (s. Pfeile in Bild 28). Die Platten mit einem Fügewinkel von  $60^\circ$  zeigen einen reinen Scherbruch in der Fügestelle (Bild 27, Mitte), somit kann hier die maximale Scherfestigkeit der Plattenfügung erreicht werden.

Mit der so gewonnenen Beschreibung der Materialfestigkeit können die Bauteile dimensioniert werden. Allerdings ist darin noch nicht die effektive Faserwirksamkeit  $k_{f,eff}$  enthalten. Eine exakte Beschreibung der Festigkeit muss unter Berücksichtigung der lokalen Faserorientierung und -menge sowie des Fasergehalts im versagensrelevanten Querschnitt geführt werden, da der Einfluss der Fasern vor allem für dünne Bauteile bei Biegung und Querkraft nicht vernachlässigt werden kann [28]. Zur Bestimmung der Orientierungsfaktoren gibt es bereits fortgeschrittene Berechnungsmethoden, wie z. B. in [29] dargelegt. Der in diesem Projekt mit Hilfe des Mikro-Computertomographen (Mikro-CT) ausgewertete Faserorientierungsbeiwert  $\eta_i$  (Gl. (2)) einer Einzelfaser wird vereinfacht nach Frettlöhr [30] ermittelt und hat sich als ausreichend genau herausgestellt. Die Anzahl der Fasern  $n_f$  in einem Schnittbild sowie der Faserneigungswinkel  $\varphi_i$  bzw. die Breite der beiden Ellipsenhauptachsen  $d_{f,i}$  und  $d_{f1,i}$  einer Faser werden dafür ausgewertet (Bild 29) und über den Versagensbereich gemittelt.

$$\eta_i = \frac{1}{n_f} \cdot \sum_i^{n_f} \cos \varphi_i = \frac{1}{n_f} \cdot \sum_i^{n_f} \frac{d_{f,i}}{d_{f1,i}} \quad (2)$$



**Bild 27:** Rissbildung nach Erreichen der Traglast bei Scherversuchen mit Zahnleistenverbindungen unter  $30^\circ$  (links),  $60^\circ$  (Mitte) und mit UHPFRC-Passstücken unter  $90^\circ$  (rechts); gelbe Pfeile zeigen die Belastungsrichtung | **Fig. 27:** Cracking after reaching the ultimate load in shear tests on tooth joints under  $30^\circ$  (left),  $60^\circ$  (middle) and with UHPFRC inlays under  $90^\circ$  (right); yellow arrows show loading direction

[27], [21] and in plate compression tests with joining angles of  $90^\circ$ , see Fig. 27, right.

As shown in Fig. 27, the strength that can be expected for angles of inclination of the contact surface between  $15^\circ$  and  $45^\circ$  can be expected to be higher, since in the real element the lateral transverse strain restraint prevents splitting of the cross-section. To take this into account, the measured shear strengths plotted on the Mohr-Coulomb circle are subsequently corrected in the direction of the fracture line (see arrows in Fig. 28). The plates with a joining angle of  $60^\circ$  show a pure shear fracture in the joint (Fig. 27, middle), thus the maximum shear strength of the plate joint can be achieved here.

With the description of the material strength resulting from that, the elements can be dimensioned. However, the actual fibre effectiveness  $k_{f,eff}$  is not yet included. An exact description of the strength must be carried out under consideration of the local fibre orientation and quantity as well as the fibre content in the failure-relevant cross-section, since the influence of the fibres cannot be neglected, especially for thin elements under bending and shear forces [28]. There are already advanced calculation methods for determining the orientation factors, as e.g. described in [29]. The fibre orientation coefficient  $\eta_i$  (Eq. (2)) of a single fibre, which was evaluated in this project with the help of a micro computer tomograph (micro CT), was determined in a simplified way according to Frettlöhr

Versagenskriterium nach Mohr/Coulomb | *Mohr/Coulomb failure criterion*

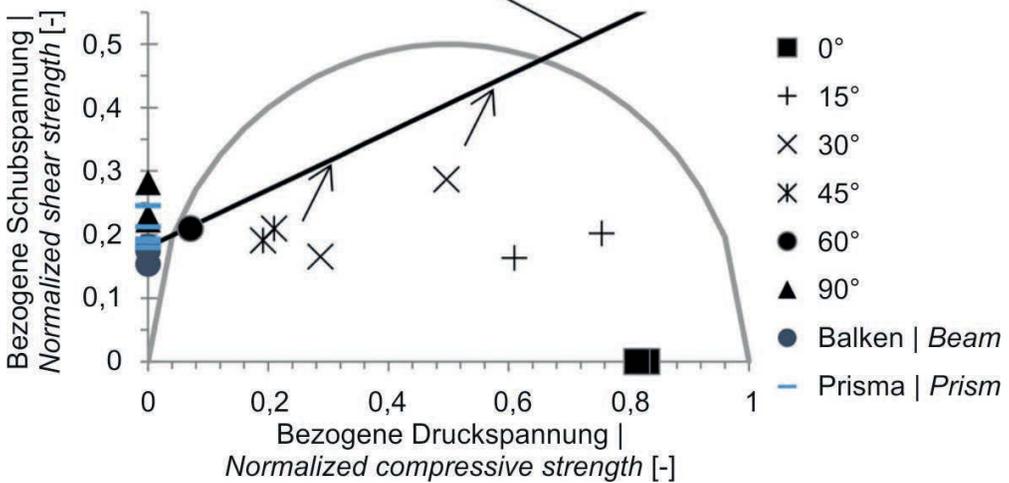


Bild 28: Querkraftversuche dargestellt im Mohrschen Spannungskreis mit Bruchhüllender (bezogen auf die Zylinderdruckfestigkeit) | Fig. 28: Shear tests in Mohr-Coulomb circle with failure envelope (normalized to cylindrical compressive strength)

Der somit ermittelte Faserorientierungsbeiwert wird verwendet, um die effektive Faserwirksamkeit  $k_{f,eff}$  zu beschreiben, welche anschließend im Nachweisformat für Biegung und Querkraft eingesetzt wird. Links in Bild 29 ist zu sehen, dass die lokale Faserverteilung und -orientierung sehr stark schwankt, was dazu führt, dass die entstehenden Rissbreiten und die Anzahl der Risse in den durchgeführten Biegezug- und Querkraftversuchen die Tragfähigkeit stark beeinflussen [23].

### 3 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms SPP 1542 „Leicht Bauen mit Beton“ wurden in einer Kooperation des Instituts für Tragwerksentwurf (ITE) und des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) an der Technischen Universität Braunschweig neuartige Trockenstoßverbindungen aus UHPFRC entwickelt. Hierfür wurden geometrische Fügeprinzipien für Stab- und Flächenelemente auf ihre Herstellbarkeit, Fügbarkeit und Leistungsfähigkeit hin untersucht. Basierend auf den entwickelten Fügeprinzipien wurden anschließend einachsige und zweiachsige gespannte Tragsysteme

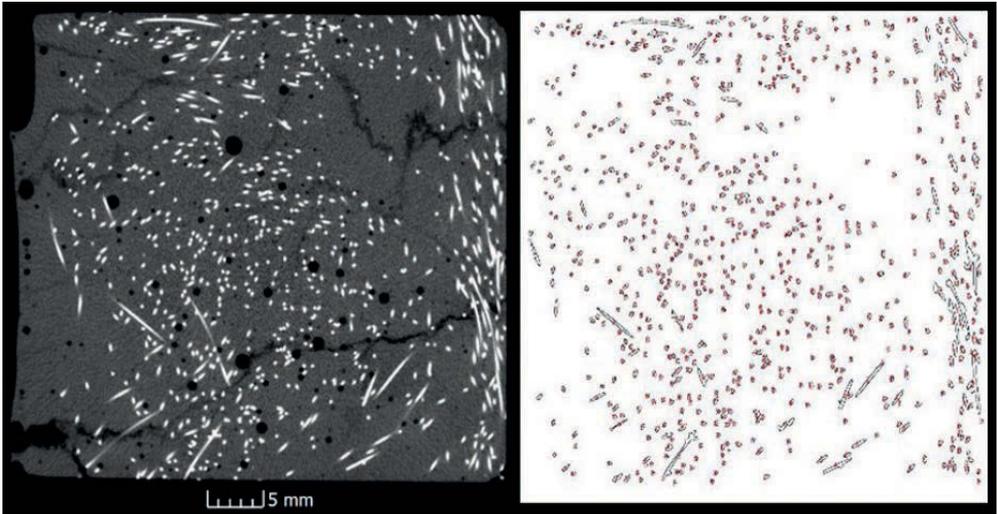
[30] and has proven to be sufficiently accurate. The number of fibres  $n_f$  in a sectional image as well as the fibre orientation angle  $\varphi_i$ , respectively the width of the two ellipse main axes  $d_{f,i}$  and  $d_{f,i,1}$  of a fibre were evaluated for this purpose (Fig. 29) and averaged over the area of the failure.

$$n_i = \frac{1}{n_f} \cdot \sum_i^{n_f} \cos \varphi_i = \frac{1}{n_f} \cdot \sum_i^{n_f} \frac{d_{f,i}}{d_{f,i,1}} \quad (2)$$

The fibre orientation coefficient thus determined was used to describe the effective fibre efficiency  $k_{f,eff}$ , which was then used in the verification model for bending and shear force. On the left side of Fig. 29, it can be seen that the local fibre distribution and orientation fluctuates very strongly, which means that the crack widths and the number of cracks in the bending tensile and shear load tests performed strongly influence the load-bearing capacity [23].

### 3 Conclusion and outlook

Within the framework of the DFG Priority Programme SPP 1542 “Concrete Light”, novel dry joints made of UHPFRC were developed in a cooperation of the Institute for Structural De-



**Bild 29:** Schnittbild durch ein querkraftgeprüftes UHPFRC-Prisma ( $4 \times 4 \times 16$  cm) am Versagensriss mittels Mikro-CT (links) und Analyse der Faserorientierung im Schnitt (rechts) | **Fig. 29:** Section through shear tested UHPFRC prism ( $4 \times 4 \times 16$  cm) at failure crack with micro CT (left) and analysis of fibre orientation in section (right)

me realisiert und im Großversuch geprüft. Mögliche Ansätze für einen rechnerischen Nachweis von gefügten, dünnwandigen Bauteilen aus UHPFRC wurden erarbeitet.

Die durchgeführten Untersuchungen und Versuche zeigen, dass es möglich ist, Bauteile aus UHPFRC unter Nutzung der Möglichkeiten der digitalen Planung sowie CNC-gesteuerter Fertigungstechnik für den Formenbau für den innovativen Leichtbau herzustellen. Mittels kraftflussoptimierter Stab- und Flächenelemente können leichte Module wie Platten und Hohlprofile aus UHPFRC zu effizienten Tragwerken verbunden werden. Denkbar ist ein modulares Konstruktionsprinzip in Fertigteilbauweise, welches vielseitige Vorteile gegenüber konventionellen Konstruktionen aus Normalbeton bietet. So verringern struktureffiziente Tragwerke nicht nur das Eigengewicht, sondern gewährleisten auch eine optimale Materialausnutzung in ressourcenschonenden Gesamtsystemen. Der in diesem Buch auf S. 676 ff. vorgestellte und in Zusammenarbeit aller an dieses Schwerpunktprogramm beteiligten Institute der TU Braunschweig entwickelte und gebaute Demonstrator *uni-con<sup>2</sup>* veranschaulicht diese neu errungenen Möglichkeiten für den konstruktiven Hochbau.

sign (ITE) and the Institute of Building Materials, Concrete Structures and Fire Safety (iBMB) at the Technical University of Braunschweig. For this purpose, geometric joining principles for beams and planar elements were investigated with regard to producibility, joinability and performance. Based on the developed joining principles, uniaxial and biaxial load-bearing structures were then realized and tested in full-scale experiments. Possible approaches for a mathematical verification of joined thin-walled elements made of UHPFRC were developed.

The investigations and tests carried out showed that it is possible to produce elements from UHPFRC using the potential of digital planning as well as CNC-controlled production technology for the realization of formwork for innovative lightweight constructions. By means of force-flow-optimized beam and planar elements, lightweight modules such as plates and hollow sections made of UHPFRC can be connected to create efficient load-bearing structures. A modular design principle in precast construction is possible, which offers many advantages over conventional constructions made of normal concrete. Thus, structurally efficient load-bearing structures not only reduce

Die Umsetzung der neuartigen Bauweise, nämlich Betonfertigbauteile aus trocken gefügten Segmenten zusammensetzen, fordert auf unterschiedlichen Ebenen ein Umdenken in der konventionellen Baupraxis. Die neuen Ansätze betreffen sowohl den digitalen Bereich der Fertigungskette, wie etwa die Parametrisierung der Fügegeometrien, die automatisierte Generierung von Datensätzen für die CNC-Bearbeitung und die Bemessung als auch die fertigungstechnische Seite. Im Vergleich zu herkömmlichen Konstruktionsverfahren wird nicht die Form, sondern der Prozess definiert, das Designergebnis ist somit formoffen. In diesem *Formgenerierungsprozess* werden die einzelnen Bauteile zu seriellen Unikaten, bei deren Herstellung nicht die Form wiederholt wird, sondern der Design- und Fertigungsprozess. Durch die Zusammenführung der entwickelten neuartigen Verbindungen für geometrische komplexe Stab- und Flächentragwerke aus UHPFRC mit den Möglichkeiten des *digital workflow* wird es in Zukunft möglich werden, ganze Tragwerke einschließlich Ihrer Bauteile nach dem Prinzip *form follows force* zu optimieren. So wird es möglich, vom klassischen Betonbau der Vergangenheit zur Filigranität und Leichtigkeit des Betonbaus der Zukunft zu gelangen.

## Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Projekts Nr. 198251365 innerhalb des Schwerpunktprogramms SPP 1542.

the dead weight, but also ensure optimal material utilization in resource-saving load-bearing systems. The *uni-con*<sup>2</sup> demonstrator presented in this book on page 676 et seq. and developed and built in cooperation with all institutes of the TU Braunschweig participating in this Priority Programme illustrates these newly achieved possibilities for structural building construction.

The implementation of the novel construction method, namely to assemble prefabricated concrete structures from dry-jointed elements, requires a new thinking of conventional construction practice on various levels. The new approaches affect both the digital part of the production chain, such as the parameterization of the joining geometries, the automated generation of data sets for CNC processing and design, and the production engineering side. In comparison to conventional engineering methods, it is not the shape but the process that is defined, and the design result is thus open to shape. In this *shape generation process*, the individual elements become series of unique parts. In their production, it is not the shape that is repetitive, but the design and manufacturing process. The combination of the developed novel connections for geometrically complex beam and shell structures made of UHPFRC with the possibilities of *digital workflow* will make it possible in the future to optimize entire structures including their components according to the principle *form follows force*. Thus, it will be possible to move from the classical concrete construction of the past to the filigree and lightness of the concrete construction of the future.

## Acknowledgement

The authors would like to thank the German Research Foundation (DFG) for funding project no. 198251365 within the Priority Programme SPP 1542.

## Literatur | References

- [1] Mainka, J.; Lehmborg, S.; Budelmann, H.; Kloft, H.: Non-Standard Fügeprinzipien für leichte Bauteile aus UHPFRC. Beton- und Stahlbetonbau 108 (2013), S. 763–773
- [2] Lehmborg, S.; Budelmann, H.: Entwicklung von dünnwandigen Stabwerksknoten aus ultrahochfestem faserverstärkten Beton. In: Breitenbücher, R.; Mark, P. (Hrsg.): Beiträge zur 1. DAFStb-Jahrestagung mit 54. Forschungskolloquium in Bochum, 07./08.11.2013, Ruhr-Universität Bochum, 2013, S. 47–52
- [3] Mainka, J.; Neudecker, S.; Müller, C.; Ledderose, L.; Hermerschmidt, W.: Development of new jointing systems for lightweight UHPC structures. In: Müller, H. S.; Haist, M.; Acosta, F. (Hrsg.): Proc. of the 9th Int. PhD Symp. in Civil Engineering, Karlsruhe Institute of Technology (KIT), 22.–25.07.2012 in Karlsruhe, Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2012, S. 341–348
- [4] Lehmborg, S.; Mainka, J.; Ledderose, L.; Budelmann, H.; Kloft, H.: Neuartige Verbindungen für geometrisch komplexe Flächen- und Stabwerkelemente aus UHPFRC. 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. 122–139 – <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-171431>
- [5] Fehling, M.; Schmidt, T.; Teichmann, K.; Bunje, K.; Bornemann, R.; Middendorf, B.: Entwicklung, Dauerhaftigkeit und Berechnung Ultrahochfester Betone (UHPC). Forschungsbericht zum Projekt DFG FE 497/1-1, erschienen in: Schmidt, M.; Fehling, E. (Hrsg.): Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Heft 1, Kassel: kassel university press, 2005
- [6] DIN EN 12390-3:2009-07: Prüfung von Festbeton – Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern; Deutsche Fassung EN 12390-3:2009.
- [7] DIN EN 12390-6:2010-09: Prüfung von Festbeton – Teil 6: Spaltzugfestigkeit von Probekörpern; Deutsche Fassung EN 12390-6:2009.
- [8] DIN EN 12390-5:2009-07: Prüfung von Festbeton – Teil 5: Biegezugfestigkeit von Probekörpern; Deutsche Fassung EN 12390-5:2009.
- [9] Oettel, V.; Empelmann, M.: Feinprofilierter UHPFRC-Trockenfugen für Segmentbauteile. Beton- und Stahlbetonbau 108 (2013) 7, S. 487–495
- [10] Zimmermann, W.; Sparowitz, L.: Vorgespannte Fertigteile aus Ultrahochfestem Faserbeton. Beton- und Stahlbetonbau 107 (2012) 3, S. 192–200
- [11] Henze, S.: Entwicklung und Beschreibung des Tragverhaltens einer modularen Fachwerkkonstruktion aus Hochleistungsbeton. Diss., Universität Leipzig, 2009
- [12] Mattheck, C.: Design in der Natur – Der Baum als Lehrmeister. Freiburg: Rombach, 2006
- [13] Billington, D. P.: Robert Maillart und die Kunst des Stahlbetonbaus. Zürich: Artemis, 1990
- [14] Bletzinger, K.-U.: Zur statischen Optimierung von Tragwerksformen. In: Natürliche Konstruktionen, Mitteilungen des SFB 230, Heft 1 (1988), Institut für leichte Flächentragwerke, Universität Stuttgart, 145–152
- [15] Hermerschmidt, W.; Budelmann, H.: Kerbempfindlichkeit von ultrahochfestem Beton. iBMB Kurzberichte aus der Forschung, TU Braunschweig, 2012 – <http://www.ibmb.tu-braunschweig.de/docpool/reports/KaF-2012-12.pdf>
- [16] Lehmborg, S.: Herstellung und Eigenschaften von dünnwandigen, trocken gefügten Bauteilen aus ultrahochfestem faserverstärkten Feinkornbeton. Diss., TU Braunschweig, 2018
- [17] Rudolf, M.: Die Kunst der leichten Schalen – zum Werk von Felix Candela. Köln: Arcus, 1992
- [18] Polonyi, S.: Schalen in Beton und Kunststoff: Entwurf – Bemessung – Ausführung. Berlin: Bauverlag, 1970
- [19] Schlaich, J.; Sobek, W.: Suitable shell shapes. Concrete International 8 (1986)1, S. 41–45
- [20] Sobek, W.: On Design and Construction of Concrete Shells. Cement 43 (1991)11, S. 23–27
- [21] Lehmborg, S.; Ledderose, L.; Wirth, F.; Budelmann, H.; Kloft, H.: Von der Bauteilfügung zu leichten Flächentragwerken: Trocken gefügte Flächenelemente aus UHPFRC. Beton- und Stahlbetonbau 111 (2016) 12, S. 806–815
- [22] Breitenberger, M.; Wüchner, R.; Bletzinger, K.-U.: Entwurf und Berechnung von gekrümmten Betonfertigteilebauteilen CAD-basierter Verfahren. Beton- und Stahlbetonbau 108 (2013) 11, S. 783–791
- [23] Lehmborg, S.; Ledderose, L.; Wirth, F.; Budelmann, H.; Kloft, H.: From Jointing Systems to Light-Weight Structures: Hybrid, dry-fit beam, surface and spatial structures made of UHPFRC. In: KIVI (Hrsg.): Future Visions – Proc. of the IASS Annual Symp. 2015, 17.–20.08.2015 in Amsterdam (Niederlande), Beitrag Nr. IASS2015-417738, publiziert auf USB-Stick: 8 S.
- [24] Ledderose, L.; Lehmborg, S.; Wirth, F.; Budelmann, H.; Kloft, H.: From digital design to precise production: Dry-jointed coffered ceiling made of UHPFRC-components. In: Bögle, A.; Grohmann, M. (Hrsg.): Interfaces: architecture, engineering, science – Proc. of the IASS Annual Symp. 2017, 25.–28.09.2017 in Hamburg, Hamburg: HCU und IASS, 2017, Book of Abstracts: S. 124, Langfassung auf USB-Stick: Beitrag Nr. 9194, 8 S.
- [25] Stratemeier, B.: Entwurf, Bemessung, Optimierung und Bau eines trocken gestoßen Schalentragwerks aus UHPFRC. Masterarbeit, TU Braunschweig, 2016
- [26] Block, P.; Rippmann, M.: Das katalanische Gewölbe. Ein Konstruktionsprinzip mit Geschichte und Zukunft. Detail 5 (2013), S. 528–536
- [27] Bažant, Z. P.; Pfeiffer, P. A.: Shear fracture tests of concrete. Materials and Structures 19 (1986), S. 111–121

[28] Bonzel, J.; Schmidt, M.: Verteilung und Orientierung von Stahlfasern im Beton und ihr Einfluß auf die Eigenschaften von Stahlfaserbeton. *Betontechnische Berichte* (1984/85), S. 73–116

[29] Wille, K.; Tue, N. V.; Parra-Montesinos, G. J.: Fiber distribution and orientation in UHPFRC beams and their effect on backward analysis. *Materials and Structures* 47 (2014), S. 1825–1838

[30] Frettlöhr, B.: Bemessung von Bauteilen aus ultrahochfestem Faserfeinkornbeton (UHFFB). Diss., Universität Stuttgart, 2011

## Bildnachweise | Picture credits

- Bilder | Pictures 1 [1], 2, 3/4 [1], 5 (rechts), 7, 9 [7]; 9/10 [21], 15–20 [24]: Lukas Ledderose
  - Bilder | Pictures 5 (links), 6 [1], 11–14 [21], 21–23, 27–29 [21]: Sven Lehmborg
  - Bilder | Pictures 6 [1], 8: Jeldrik Mainka
  - Bilder | Pictures 24–26 [25]: Bernhard Stratemeier
- Bereits publizierte Bilder wurden teilweise für den Bericht modifiziert. | Previously published images were partly modified for the report.

## Projektdaten | Project data

### Allgemeine Angaben | General information

Entwicklung neuartiger Verbindungen für geometrisch komplexe Flächen- und Stabwerkselemente aus UHPC (Phase I)

Von der Bauteilfüugung zu leichten Tragwerken: Hybride, trocken gefügte Stab-, Flächen- und Raumtragelemente aus UHPFRC (Phase II)

Development of novel connections for geometrically complex surface and framework elements from UHPC (1<sup>st</sup> phase)

From joints to lightweight structures: Hybrid, dry-jointed bar, plane and three-dimensional structures made of UHPFRC (2<sup>nd</sup> phase)

Antragsteller 1   Applicant 1:	Prof. Dr.-Ing. Harald Budelmann Institutsleiter   Head of the institute
DFG-Geschäftszeichen   DFG reference number:	BU 730/18-1/2 (Projektnummer   Project number: 198251365)
Adresse   Address:	TU Braunschweig, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB), Beethovenstr. 52, 38106 Braunschweig
Kontakt   Contact:	+49 531 391 5405   h.budelmann@ibmb.tu-bs.de   www.ibmb.tu-braunschweig.de/index.php/fachgebiet-fgbs.html
Antragsteller 2   Applicant 2:	Prof. Dr.-Ing. Harald Kloft Institutsleiter   Head of the institute
DFG-Geschäftszeichen   DFG reference number:	KL 2119/1-1/2 (Projektnummer   Project number: 198251365)
Adresse   Address:	TU Braunschweig, Institut für Tragwerksentwurf (ITE), Pockelsstraße 4, 38106 Braunschweig
Kontakt   Contact:	+49 531 391 3571   h.kloft@tu-braunschweig.de   www.ite.tu-bs.de
Berichts-/Förderzeitraum   Reporting/funding period:	Förderphase I   Funding period I: 10/2011–10/2014 Förderphase II   Funding period II: 12/2014–11/2017
Team   Team:	Lukas Ledderose (ITE, 10/2011–11/2017) Jeldrik Mainka (ITE, 10/2011–10/2014) Franz Wirth (ITE, 12/2014–11/2017) Stefan Neudecker (ITE, 10/2011–10/2014) Sven Lehmborg (iBMB, 05/2011–11/2017) Wibke Hermerschmidt (iBMB, 10/2011–05/2012) Reinhard Nothnagel (iBMB, 10/2011–12/2011)

## Projektbezogene Publikationen | Project related publications

- Mainka, J.; Neudecker, S.; Müller, C.; Ledderose, L.; Hermerschmidt, W.: Development of new jointing systems for lightweight UHPC structures. In: Müller, H. S.; Haist, M.; Acosta, F. (Hrsg.): Proc. of the 9<sup>th</sup> fib Int. PhD Symp. in Civil Engineering, 22.–25.07.2012 in Karlsruhe, Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2012, S. 341–348
- Mainska, J.; Lehmborg, S.; Budelmann, H.; Kloft, H.: Non-Standard Fügeprinzipien für leichte Bauteile aus UHPFRC. Beton- und Stahlbetonbau 108 (2013) 11, S. 763–773
- Lehmborg, S.; Budelmann, H.: Entwicklung von dünnwandigen Stabwerksknoten aus ultrahochfestem faserverstärkten Beton. In: Breitenbücher, R.; Mark, P. (Hrsg.): Beiträge zur 1. DAFStb-Jahrestagung mit 54. Forschungskolloquium in Bochum, 07./08.11.2013, Ruhr-Universität Bochum, 2013, S. 47–52
- Lehmborg, S.; Ledderose, L.; Mainska, J.; Budelmann, H.; Kloft, H.: Non-Standard Joints for lightweight modular spatial and shell structures made from UHPFRC. In: Brasil, R. und Pauletti, R. (Hrsg.): Shells, Membranes and Spatial Structures: Footprints – Proc. of the IASS-SLTE 2014 Symp., 15.–19.09.2014 in Brasilia (Brasilien), 2014, 9 S.
- Lehmborg, S.; Mainska, J.; Ledderose, L.; Budelmann, H.; Kloft, H.: Neuartige Verbindungen für geometrisch komplexe Flächen- und Stabwerkelemente aus UHPFRC. 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. 122–139 – <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-171431>
- Lehmborg, S.; Ledderose, L.; Wirth, F.; Budelmann, H.; Kloft, H.: From Jointing Systems to Light-Weight Structures: Hybrid, dry-fit beam, surface and spatial structures made of UHPFRC. In: KIVI (Hrsg.): Future Visions – Proc. of the IASS Annual Symp. 2015, 17.–20.08.2015 in Amsterdam (Niederlande), Beitrag Nr. IASS2015-417738, publiziert auf USB-Stick: 8 S.
- Lehmborg, S.; Ledderose, L.; Wirth, F.; Budelmann, H.; Kloft, H.: Von der Bauteilfugung zu leichten Tragwerken: Trocken gefügte Flächenelemente aus UHPFRC. Beton- und Stahlbetonbau 111 (2016) 12, S. 806–815
- Budelmann, H.; Lehmborg, S.: Von der Küchenarbeitsplatte zum leichten Tragwerk – Was kann ultrahochfester faserverstärkter Feinkornbeton? In: Scheerer, S.; van Stipriaan, U. (Hrsg.): Festschrift zu Ehren von Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2016, S. 90–103 – [https://tu-dresden.de/bu/bauingenieurwesen/imb/forschung/publikationen/jahrbuch\\_Monographien/MC60](https://tu-dresden.de/bu/bauingenieurwesen/imb/forschung/publikationen/jahrbuch_Monographien/MC60)
- Lehmborg, S.; Budelmann, H.: Modulare, dünnwandige Plattenbalken aus UHPFRC mit Non-Standard Fügungen. Kurzberichte aus der Forschung, 2016, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig – <http://www.ibmb.tu-braunschweig.de/docpool/reports/KaF-2016-11.pdf>
- Ledderose, L.; Lehmborg, S.; Wirth, F.; Budelmann, H.; Kloft, H.: From digital design to precise production: Dry-jointed coffered ceiling made of UHPFRC-components. In: Bögle, A.; Grohmann, M. (Hrsg.): Interfaces: architecture.engineering.science – Proc. of the IASS Annual Symp. 2017, 25.–28.09.2017 in Hamburg, Hamburg: HCU & IASS, 2017, Beitrag Nr. 9194, Book of Abstracts: S. 124, Langfassung digital: 8 S.

## Qualifikation wissenschaftlichen Nachwuchses im Rahmen des Projektes | Qualification of young academics within the framework of the project

### Dissertation | Dissertation

- Lehmborg, S.: Herstellung und Eigenschaften von dünnwandigen, trocken gefügten Bauteilen aus ultrahochfestem faserverstärkten Feinkornbeton. iBMB, 2018

### Studienarbeiten | Student's research projects

- Flaum, A.: Ein Blick auf das Wirken des Schweizer Bauingenieur Maillart am Beispiel des Lagerhausvordaches in Chiasso. Studienarbeit, iBMB, 2012
- Al-Falah, S.: Mechanisches Verhalten von dünnwandigen Bauteilen aus ultrahochfestem faserverstärkten Beton. Bachelorarbeit, iBMB, 2013
- Günes, E.: Ermittlung der Bruchenergie bei ultrahochfestem Beton. Studienarbeit, iBMB, 2013
- Mützel, M.: Dünnwandige Querschnitte aus vorgespanntem faserbewehrten ultrahochfesten Beton. Studienarbeit, iBMB, 2013
- Le Vo Phuong, T.: Faserbetoneigenschaften im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit. Bachelorarbeit, iBMB, 2014
- Wagner, N.: Wirksamkeit von kurzen Mikrostaalfasern bei ultrahochfestem faserverstärkten Beton. Masterarbeit, iBMB, 2015
- Baumgarten, V.: Tragverhalten eines dünnwandigen biegesteifen Knotens aus UHPFRC. Studienarbeit, iBMB, 2016
- Peters, A.: Wirksamkeit von kurzen Mikrostaalfasern bei ultrahochfestem faserverstärkten Feinkornbeton. Masterarbeit, iBMB, 2016

- Stratemeier, B.: Entwurf, Bemessung, Optimierung und Bau eines trocken gestoßenen Schalentragerwerks aus UHPFRC. Masterarbeit, ITE, 2016

### Folgeprojekte | Follow-up projects

- Non-Waste-Wachsschalungen: Neuartige Präzisions-Schalungen aus 100 % recycelbaren Industrie-Wachsen zur Herstellung von geometrisch komplexen Beton-Bauteilen | Non-Waste-Wax-Formwork: Novel precise formwork-technology on basis of 100% recyclable industrial wax for the fabrication of geometrically complex concrete elements

Antragsteller   Applicants:	Prof. Dr.-Ing. Harald Kloft und Prof. Dr.-Ing. Klaus Dröder (TU Braunschweig, Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF))
Förderer   Funding:	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)   SPP 1542, Phase II
Laufzeit   Period:	01.12.2014–30.11.2016
Partner   Partner:	B+S Engineering, Rheine

- Modulares und vollautomatisiertes Fertigungsverfahren für frei geformte Betonschalungen im Hochbau auf Basis von technischen Wachsen; Verfahrensentwicklung, Analyse und Versuche zur Fertigungsverfahren für frei geformte Betonschalungen im Hochbau auf Basis von technischen Wachsen | Modular and fully automated production process for free formed concrete formwork in building construction based on technical waxes; process development, analysis and tests of the production process for free formed concrete formwork in building construction based on technical wax

Antragsteller   Applicant:	Prof. Dr.-Ing. Harald Kloft
Förderer   Funding:	Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM)
Laufzeit   Period:	01.04.2017–31.12.2018
Partner   Partner:	B+S Engineering, Rheine

- Innovative Non-Waste-Wachsschalungen für die Herstellung von hochpräzisen Maschinengestellen aus UHPC | Innovative non-waste wax moulds for the production of high-precision UHPC machine racks

Antragsteller   Applicant:	Prof. Dr.-Ing. Harald Kloft
Förderer   Funding:	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)
Laufzeit   Period:	01.01.2018–31.12.2019
Partner   Partners:	Sudholt-Wasemann GmbH, Herzebrock-Clarholz Dyckerhoff GmbH, Wilhelm Dyckerhoff Institut, Wiesbaden

- Grundlegende Untersuchungen zur robotergestützten magnetischen Verteilung und Ausrichtung von Mikro-stahlfasern in dünnwandigen UHPFRC-Bauteilen | Basic investigations on the robot-aided magnetic distribution and alignment of micro steel fibres in thin-walled UHPFRC components

Antragsteller   Applicant:	Prof. Dr.-Ing. Harald Kloft
Förderer   Funding:	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)
Laufzeit   Period:	01.01.2019–28.02.2021

### Sonstige Aktivitäten | Special activities

- Organisation des SPP-Jahrestreffens in Braunschweig im November 2012 | Organization of the SPP annual meeting in Braunschweig, November 2012
- Herstellung des Demonstrators uni-con<sup>2</sup> (in Kooperation mit dem Projektteam Empelmann), SPP-1542-interner Wettbewerb, 02/2017 | Production of the demonstrator uni-con<sup>2</sup> (in cooperation with the project team Empelmann), SPP 1542 internal competition, 02/2017