

Non-Standard Fügeprinzipien für leichte Bauteile aus UHPFRC

Trotz der enormen Entwicklungen in der digitalen Planung und Fertigung wird unser Denken im Bauwesen immer noch vom Standard der industriellen Fertigung geprägt. Die aus Stahl und Holz produzierten Profile und Halbzeuge, ebenso wie die marktüblichen Schalungssysteme für Betonbauteile, implizieren eine möglichst einfache Geometrie und Fügung. Demzufolge sind heutige Tragkonstruktionen meistens aus biegebeanspruchten, masseintensiven Bauteilen zusammengesetzt. Leichte formaktive Tragwerke, wie beispielsweise die 1972 erbaute Lufthansa Wartungshalle V am Frankfurter Flughafen, sind dagegen kaum noch zu finden. In Zukunft wird dem effizienten Einsatz von Material und Energie eine entscheidende Bedeutung für die Umsetzung einer nachhaltigen Bauwirtschaft zukommen. Statt Komplexität auf Kosten erhöhter Massen zu vermeiden, wird es zukünftig vielmehr darum gehen, Material durch strukturelle Effizienz einzusparen. Die Chance hierzu liegt in der Zusammenführung der neuesten Entwicklungen im Bereich der Materialtechnologie mit denen der digitalen Planung und Fertigung. Ziel muss es sein, für high-tech-Werkstoffe – wie ultrahochfestem Stahlfaserbeton (UHPFRC) – dem Material angemessene Non-Standard Fügeprinzipien zu entwickeln, die trotz gesteigerter Komplexität wirtschaftlich zu fertigen sind. Hier setzt der vorliegende Beitrag an und zeigt aktuelle Forschungsergebnisse zu innovativen Fügeprinzipien für leichte Bauteile aus UHPFRC.

1 Einleitung

Schon die Römer kannten den Zusammenhang von Material und Form und verstanden es, die statisch sinnvolle Formgebung zur Lenkung der Kräfte zu nutzen. Die mangelnde Zugfestigkeit des Natursteins wurde durch die ideale Form des Bogens als rein druckbeanspruchte Konstruktion für die Herstellung von Brücken und Viadukten eingesetzt. Eine weitere Errungenschaft der römischen Epoche ist die Herstellung von künstlichen Werkstoffen aus Gesteinsbrocken unter Zuhilfenahme von Kalkmörtel als Bindemittel. Der sogenannte „Römerbeton“ (lat. *opus caementitium*) zeichnete sich durch gute Druckfestigkeiten und die Möglichkeit zur individuellen Formbarkeit aus. Das Pantheon in Rom ist eines der bedeutendsten Bauwerke römischer Architektur und vereint Material und Form auf bestmögliche Weise (Bild 1).

Im Zuge der Industrialisierung wurden neue künstliche Materialien wie Gusseisen, Stahl und Stahlbeton entwickelt. Im Unterschied zu den Baumaterialien der Antike zeichnen sich die heutigen Hochleistungswerkstoffe Stahl

Non-standard principles for joining lightweight members made from UHPFRC

Despite the enormous developments in digital design and fabrication methods our thinking in the construction industry is still dominated by the standard of industrial production. The profiles and semi-manufactured parts made from steel and wood as well as the on the market available formwork systems for concrete structures imply the simplest possible geometry and addition. Consequently, today's load-bearing structures are usually composed of bending stress mass-intensive components. Lightweight form-active structures such as built in 1972 Lufthansa Maintenance Hall V at Frankfurt airport, however, are hard to find. In the future, the efficient use of materials and energy will have a crucial importance for the implementation of sustainable construction. Instead of avoiding complexity at the cost of increased masses, the goal for the future will be to save mass by using structural efficiency. The opportunity for this lies in the combination of the latest developments in material technology with the digital planning and production. The aim for high-tech materials such as ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC) must be to develop material appropriate non-standard joint principles that are produced economically despite increased complexity. This is where the present contribution starts showing the current research results for innovative principles for joining lightweight members from UHPFRC.

und Stahlbeton durch eine definierte Zugfestigkeit aus, wodurch man nicht mehr auf die ideale Formgebung zur Lenkung der Kräfte angewiesen ist. Die Kraftaufnahme kann stattdessen über die Biegezugfestigkeit des Materi-



Bild 1 Kuppel des Pantheons in Rom [Foto KLOFT]
Dome of the Pantheon in Rome



Bild 2 Standard im Stahlbau und Stahlbetonfertigteilbau: Fügen von Halbzügen (Profilen) aus industrieller Produktion [Foto KLOFT]
Standard in steel and precast concrete construction: joining of semi-manufactured parts (profiles) of industrial production

als erfolgen. Dies wirkt sich natürlich auf die Formgebung und die Fügeprinzipien aus. Heute ist es industrieller Standard, Bauteile mit gleichbleibenden Querschnitten als Stützen, Platten und Scheiben zu fertigen und möglichst einfach zu fügen (Bild 2). Die Abstimmung der Formgebung auf die industriellen Herstellungsprozesse geht häufig einher mit der Zunahme der Bauteilmassen. In letzter Konsequenz ist uns Ingenieuren durch die Standardisierung der industriellen Fertigung die materialsparende Denkweise der Vergangenheit wie auch die Fähigkeit zur Suche nach strukturell effizienten Formen größtenteils abhandengekommen.

In jüngster Zeit sind zwei interessante Entwicklungen zu beobachten, welche neue Chancen bieten, Material und Form – auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten – in unseren industriellen Fertigungsprozessen wieder zusammenzubringen: Dies sind einerseits die Entwicklungen in der Betontechnologie, insbesondere die Steigerung der Festigkeiten zu ultrahochfesten Betonen (UHPC), und andererseits die zunehmende Beherrschung geometrischer Komplexität durch die Möglichkeiten digitaler Planung und CNC-gesteuerter Fertigung. Im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms 1542 „Leicht Bauen mit Beton“ wird am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) und am Institut für Tragwerksentwurf (ITE) der TU Braunschweig das Teilprojekt mit dem Thema „Entwicklung neuartiger Verbindungen für geometrisch komplexe Flächen- und Stabwerkelemente aus UHPC“ bearbeitet. Ziel des Vorhabens ist es, die neuesten Erkenntnisse im Bereich von UHPC mit den Möglichkeiten der CNC-gesteuerten Fertigungstechnik für Formenbau und Nachbearbeitung zusammenzubringen und innovative Leichtbaustrukturen aus Beton zu entwickeln [1]. Die im Beitrag vorgestellten Untersuchungen wurden im Rahmen dieses Forschungsvorhabens durchgeführt. Zur Verbesserung der Zugtragfähigkeit im Nachbruchverhalten wird im Forschungsprojekt stahlfaserverstärkter ultrahochfester Beton (UHPFRC) verwendet.

2 Grundlagen für eine struktureffiziente Formgebung

2.1 Digital Workflow

Als „Digital Workflow“ werden Produktionsprozesse bezeichnet, bei denen Bauteile von der Planung bis zur Fer-



Bild 3 Nationalstadion Peking „Vogelnest“ [Foto KLOFT]
Beijing National Stadium “Bird’s Nest”

tigung in einem digital kontrollierten Prozess hergestellt werden. Diese Entwicklung hat in den letzten Jahren im Bereich des Bauwesens vor allem zu einer gesteigerten Komplexität geführt, deren strukturelle Logik dabei nicht immer mit der architektonischen Form verbunden ist [2] (Bild 3). Vor allem im Betonbau ist festzustellen, dass die Chancen zur freien Formbarkeit des Materials durch den Einsatz „digitaler Werkzeuge“ bisher wenig genutzt wurden.

Dabei ist gerade die Ausnutzung der geometrischen Steifigkeit durch Krümmung und Faltung der entscheidende Vorteil von frei geformten Konstruktionen im Hinblick auf die Entwicklung ressourceneffizienter Tragstrukturen. Als Grund hierfür wird häufig die mangelnde Wirtschaftlichkeit angeführt. Dies zu ändern und strukturelle Effizienz wirtschaftlich umzusetzen, wird eine der wesentlichen Aufgaben in Zukunft sein. Dem konstruktiven Detail und der Fügung kommt hierbei eine Schlüsselrolle zu. War es in der „vordigitalen Zeit“ Standard, eine große Stückzahl möglichst gleicher Elemente herzustellen und mit einfachen Details zu verbinden, um wirtschaftlich zu bauen, stellen Wirtschaftlichkeit und Individualität heute keinen Widerspruch mehr dar.

2.2 Stand der Entwicklung von UHPFRC

UHPFRC soll Stahl und Holz als Werkstoffe für Leichtbaukonstruktionen nicht ersetzen, sondern vielmehr ergänzen. Während die Herstellung geometrisch komplexer Stahl- und Holzkonstruktionen in der Regel durch Umformen, spanende Bearbeitung und Zusammenbau von industriell gefertigten Halbzügen erfolgt, bietet sich für UHPFRC durch dessen gute Formbarkeit bei gleichzeitig hoher Festigkeit die Chance, neue Anwendungsgebiete für leichte und effiziente Konstruktionen zu erschließen.

Für die baupraktische Anwendung von UHPC wurden durch die Forschungsarbeiten im DFG-Schwerpunktprogramm 1182 – „Nachhaltiges Bauen mit ultra-hochfestem

Beton“ die Grundlagen geschaffen, welche die Herstellung von Fertigteilen aus diesem leistungsfähigen Werkstoff ermöglichen. Die Fügung auf der Baustelle stellt jedoch eine weitere große Herausforderung dar. Der Hauptanteil der heute üblichen Verbindungen von stabförmigen Betonfertigteilen beruht auf der Überführung des Betonbaus in den Stahlbau durch Verwendung von Stahleinbauteilen. Beispielhaft können hier die Stützenschuhsysteme der Firma Peikko [3] genannt werden. Eine weitere Verbindungsmöglichkeit stellt die Herstellung von Verfüll- oder Verpressfugen dar. Hierbei werden die Bauteile verkürzt hergestellt und mittels eines Mörtel-, Beton-, oder Epoxidvergusssystems miteinander verbunden. Nachteilig bei dieser Verbindungsmethode sind die Aushärtungszeiten sowie die Einhaltung der Qualitätsanforderungen des Verfüllmaterials bei wechselnden klimatischen Bedingungen auf der Baustelle. Aufgrund dieser Nachteile und der Intention, möglichst auf Stahleinbauteile zu verzichten, zielen die vorgestellten Forschungsarbeiten auf die Verwendung einer trockenen Fügung ab, bei der die Bauteile durch Spannelemente zusammengepresst werden. Für die Herstellung einer trockenen Fügung – auch „Trockenfuge“ genannt – werden heute generell zwei Verfahren angewendet. Das Kontaktverfahren [4] (Match Casting), bei dem für die Betonierung eines Verbindungsbauteils alle anschließenden Bauteile bereits vorhanden sein müssen. Neben dem hohen Aufwand ist es mit diesem Verfahren nicht möglich, einzelne Bauteile an unterschiedlichen Orten in einer beliebigen Reihenfolge herzustellen. Eine weitere Möglichkeit zur Herstellung von Trockenfugen stellt das CNC-gesteuerte Nachschleifen von mit Überlängen hergestellten Betonteilen dar, wie es bei der Wildbrücke [5] oder bei einer von HENZE entwickelten modularen UHPC-Fachwerkkonstruktion [6] angewandt wurde.

Die Methode des Nachschleifens kommt prinzipiell für die Herstellung komplexer Fügungstechniken in Betracht, beinhaltet aber aufgrund der einsetzbaren Schleif- und Fräswerkzeuge geometrische Einschränkungen. Zudem stellt das Nachschleifen wegen der hohen Festigkeit von UHPC einen erheblichen Arbeitsaufwand dar und widerspricht den Möglichkeiten des Werkstoffes Beton, wie sie im Antrag zum DFG-Schwerpunktprogramm 1542 [7] hervorgehoben werden: „Beton ist vor seiner Erhärtung plastisch bis flüssig und kann nahezu jede Form im Erstarrungsprozess konservieren“. Da die Formgestaltungsmöglichkeit von Schalungsmaterial mittels CNC-Technik hochpräzise ist und UHPC aufgrund seiner Feinkörnigkeit sogar Fingerabdrücke auf einer Schalhaut abformen kann, wurden für die zu entwickelnden Fügeprinzipien folgende Postulate erhoben:

1. Fügungen als Trockenstöße sollen mithilfe hochpräziser Schalungen so exakt gefertigt werden, dass auf Einbauteile und eine Nachbearbeitung des Betons verzichtet werden kann.
2. Für biegebeanspruchte Knoten sollen die Anschlussgeometrien an den Enden durch eingelegte und präzise gefertigte Schalungselemente hergestellt werden,

sodass Stäbe direkt mit dem Knoten über Trockenstöße angeschlossen werden können.

2.3 Materialeigenschaften des UHPFRC und der Einfluss auf den Designprozess

Die im Forschungsprojekt verwendete UHPFRC Rezeptur FK1-2,5 (Tab. 1) wurde aus der Referenzzmischung M2Q der Universität Kassel [8] für die Verwendung bei dünnwandigen Bauteilgeometrien am iBMB weiterentwickelt.

Entwicklungskriterien waren die zu gewährleistenden, selbstnivellierenden und selbstentlüftenden Eigenschaften bei gleichzeitig hohen Druck- und Zugfestigkeiten. Der Einsatz von Stahlfasern, welche ein gutes Nachbruchverhalten des spröden UHPCs sicherstellen, macht es möglich, auf konventionelle Bewehrung zu verzichten. Auch der Einsatz von Vorspannsystemen ohne zusätzliche Stahleinbauteile kann damit realisiert werden. Es handelt sich bei den vorgestellten Arbeiten um Grundlagenforschung, sodass zur Designoptimierung der Bauteilgeometrien mittels numerischer Analyse Mittelwerte aus Materialprüfungen verwendet werden, welche in der Tab. 2 dargestellt sind. Diese wurden anhand von Normprüfungen ermittelt.

Die Ergebnisse am iBMB von HERMERSCHMIDT [9] zur Kerbempfindlichkeit haben gezeigt, dass für Ausrundungsradien größer als 5 cm kein Einfluss der Kerbwirkung auf den UHPFRC FK1-2,5 mehr festzustellen ist. Des Weiteren bestätigte sich der für homogene Baustoffe bereits bekannte Zusammenhang des Einflusses von

Tab. 1 Ausgangsstoffe UHPFRC FK1-2,5
Base material of UHPFRC FK1-2,5

Ausgangsstoff	Masse [kg/m ³]
Zement CEM I 52,5 R HS-NA	595
Mikrosilica	69
Quarzmehl I	314
Quarzmehl II	119
Quarzsand	1029
Mikrostahlfasern 2,5 Vol.-% (d/l = 0,15/90 mm)	192
Fließmittel	40
Wasser	156

Tab. 2 Materialkennwerte UHPFRC FK1-2,5
Material parameters UHPFRC FK1-2,5

	Mittelwert
Druckfestigkeit	151 MPa
Einachsige Zugfestigkeit	10 MPa
Biegezugfestigkeit	25 MPa
Elastizitätsmodul	46,7 GPa
Querdehnzahl	0,18

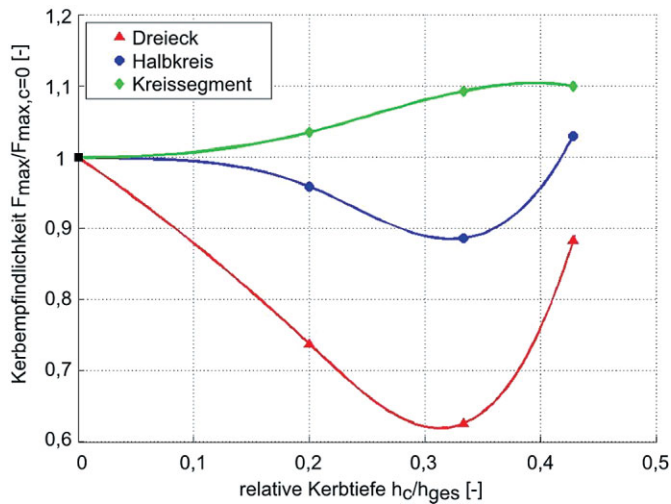


Bild 4 Kerbspfindlichkeit in Abhängigkeit von der Kerbgeometrie des UHPFRC FK1-2,5
Notch sensitivity related to the geometry of the notch

Kerbtiefe h_c zur Bauteilhöhe h_{ges} für den verwendeten UHPFRC (Bild 4).

3 Passgenaue druckbeanspruchte Trockenstoßverbindungen für dünnwandige Rohre aus UHPFRC

3.1 Geometrische Formfindung des Trockenstoßes

Dünnwandige Rohre stellen besonders leichte Querschnitte dar, welche gegenüber anderen Profilen mit geringem Materialeinsatz eine hohe Torsionssteifigkeit und Knickstabilität erreichen. Um die Traglasten bzw. Prüfkraft der Rohre für die Untersuchungen nicht unnötig hoch anzusetzen, wurden die Abmessungen des UHPFRC-Referenzrohres auf einen Außendurchmesser von 100 mm und eine Wandungsdicke von 15 mm festgelegt. Trotz seiner relativ geringen Abmessung weist das Rohr eine rechnerische Normalkrafttraglast von 604 kN auf. Um zu untersuchen, wie Fügeprinzipien im Betonbau

für Stabwerke mit Kreisquerschnitten geometrisch ausformuliert werden können, wurden zunächst neben den beschränkt vorhandenen Betonfügungen die des Stahl- und Holzbaus analysiert.

Die Auswertung wurde für die vielfachen technischen Möglichkeiten des Fügens vorgenommen und orientiert sich für die anschließende typologische Entwicklung von eigenen Verbindungstypen an drei Hauptkriterien:

- **Hauptkraftübertragung:** Druck, Zug (Montagezustand), Querkraft/Moment, Torsion
- **Herstellbarkeit:** Gießen, Fräsen, Sägen, Schleifen, Wasserstrahlschneiden
- **Fügerichtung und Montage:** Axial, Quer, Schräg, Radial.

Bild 5 zeigt einen Auszug der vielfältigen entwickelten Konstruktionsprinzipien für Stoßverbindungen von Stäben. In enger Zusammenarbeit der beiden beteiligten Institute iBMB und ITE wird auf Basis des erklärten Forschungsziels eine Selektion von drei Stoßverbindungstypen für den druckbeanspruchten Trockenstoß getroffen. Die verschiedenen Typen tragen den unterschiedlichen Anforderungen bei der Montage eines möglichen Stabtragwerks Rechnung. Die in Bild 6 dargestellten Stoßserien A, B und C zeigen einen Zwischenstand der entwickelten und optimierten, trockenen Stoßverbindungen.

Aufgrund der enormen Vielzahl von neuen und traditionellen Verbindungsgeometrien dienten Holzbauverbindungen [10] als Vorbild für diese Serien. Serie A (Bild 6 links) stellt die Anpassung des Kreuzzapfenstoßes im Beton dar und kann nur in axialer Richtung gefügt werden. Die Serie B (Bild 6 Mitte) entsteht aus der Adaption des Schwalbenschwanzblattstoßes und kann nur quer zur Kraftübertragungsrichtung (einaxial) gefügt werden. Obwohl diese Verbindung aufgrund der komplexeren Geometrie als ungünstiger angesehen wird, bietet sie den Vorteil, dass Zugkräfte im Montagezustand aufgenommen

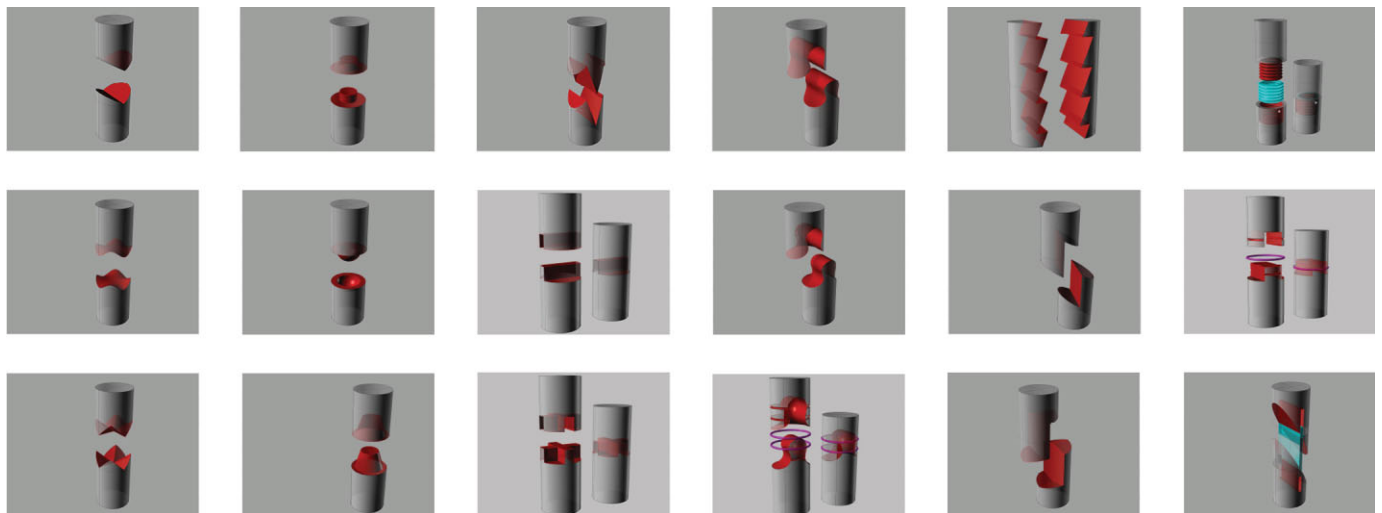


Bild 5 Typologische Entwicklung von neuartigen Konstruktionsprinzipien für trockene Stoßverbindungen von rohrförmigen Stäben
Typological development of novel design principles for dry-joints of pipe-shaped members

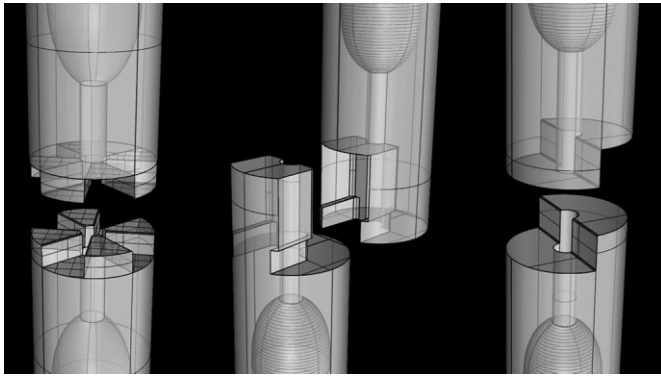


Bild 6 Stoßserien A (links), B (Mitte) und C (rechts) nach erster rechnerischer Optimierung
Joint series A (left), B (center) and C (right) after the first computational optimization

werden können. Die Serie C (Bild 6 rechts) wurde aus der Verbindung des einfachen Blattstoßes generiert, wie dieser neben dem Holzbau auch im Stahlbau Anwendung findet.

3.2 Design und numerische Simulationen im Kraftüberleitungsbereich

Zur Erstellung der dreidimensionalen Geometrien wird das CAD-Programm **Rinoceros®** verwendet. Hiermit lassen sich neben konventionellen auch parametergesteuerte Geometrien erstellen, welche direkt an das für die FEM-Berechnung verwendete Programm **Ansys® Workbench** sowie CNC-Steuerungsprogramme als Ausgabedateien übergeben werden können. Die drei entwickelten geometrischen Stoßverbindungstypen (Bild 6) werden bezüglich ihrer Traglast im überdrückten/vorgespannten Zustand – N (Q/M) iterativ am Rechner optimiert. Um dem Anspruch der Leichtigkeit gerecht zu werden, soll dies durch eine Geometrie bei minimalem Materialaufwand erfolgen [1].

Es wird davon ausgegangen, dass die Stoßfläche aufgrund von Imperfektionen in der Herstellung eine Schwachstelle darstellt und somit nicht die Maximalspannungen des UHPFRC erträgt. Um diesem entgegenzuwirken, wird die Stoßfläche aufgeweitet: Durch die Vergrößerung der Fläche wird eine Verringerung der Spannungen in der Kontaktfläche erwirkt. Die ersten Geometrien der Stoßflächen werden so weit geometrisch optimiert und iterativ berechnet, bis die Stoßflächen mindestens eine dem Rohr entsprechende Traglast aufweisen. Im folgenden Schritt wird das Versagen im Kraftüberleitungsbereich vom Rohr auf Vollquerschnitt näher untersucht. Ziel ist es, durch eine geometrische Ausformulierung des Kraftüberleitungsbereichs auch hier die volle Traglast des Rohres auf den Vollquerschnitt des Stoßes zu übertragen. Als Referenzgeometrie (Bild 7) werden die anfänglich verwendete Zylindergeometrie sowie eine Halbkreisgeometrie verwendet. Zusätzlich wird die Katenoide (die auf Druck belastete Kettenlinie) als mathematisches Idealmodell eines

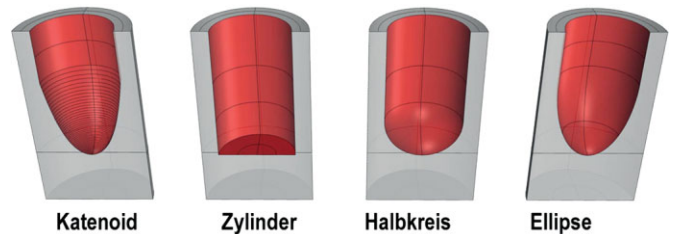


Bild 7 Geometrien der Krafteinleitungsbereiche
Geometries of the force transmission area

„Bogens mit gleichmäßiger Massenverteilung“ [11] und eine Ellipsengeometrie verwendet. Die vier Geometrien werden mittels CAD-Programmen erstellt und anschließend im FEM-Programm bezüglich ihrer Traglast und Verformung untersucht.

Wie erwartet, erreichen die Katenoide und die Ellipse hohe rechnerische Traglasten von etwa 70 % des Rohrquerschnitts. Die Halbkreis- und Zylinderform erreichen nur etwa 25 % bzw. 10 %. Zur Validierung der Berechnungen werden die zu untersuchenden Krafteinleitungsbereiche als Versuchskörper hergestellt und axial auf Druck wegge-regelt bis zum Versagen belastet.

Die Ergebnisse der ersten der insgesamt vier Versuchsreihen sind in Bild 8 für die unterschiedlichen Geometrien dargestellt. Alle Probekörper erreichen im Versuch annähernd gleich hohe axiale Traglasten. Die Katenoide erreichte im Mittel aus drei Versuchen ca. 92 % der rechnerischen Rohrtraglast, der Zylinder ca. 90 %, die Ellipse ca. 88 % und die Halbkreisgeometrie 86 %. Die Abweichungen der Traglasten zwischen der Berechnung und dem Versuch lassen sich auf die verwendete linearelastische FEM-Berechnung mit dem in **Ansys® Workbench** implementierten Betonmodell zurückführen. Als Abbruchkriterium wird die axiale mittlere Zugtragfähigkeit des UHPFRC von 10 MPa angesetzt. Wie in Bild 9 links dargestellt, erreicht die Zylinderprobe im Bereich der Öff-

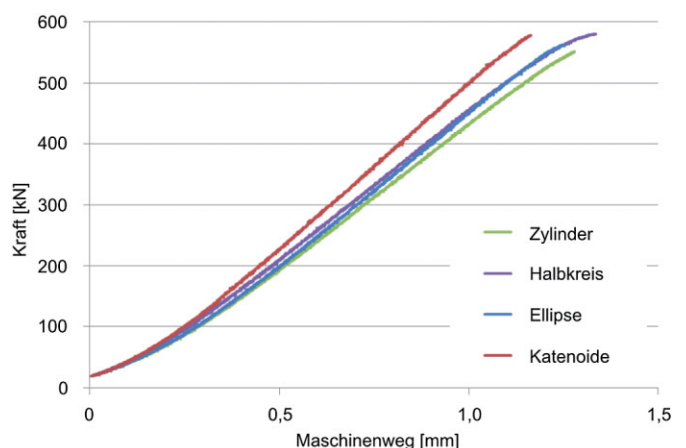


Bild 8 Kraft-Weg-Diagramm der UHPFRC-Rohre mit verschiedenen Übergangsgeometrien im Krafteinleitungsbereich zum Vollquerschnitt (Versuchsserie 1)
Force-displacement diagram of the UHPFRC pipes with different geometries in the force transmission area (test series 1)

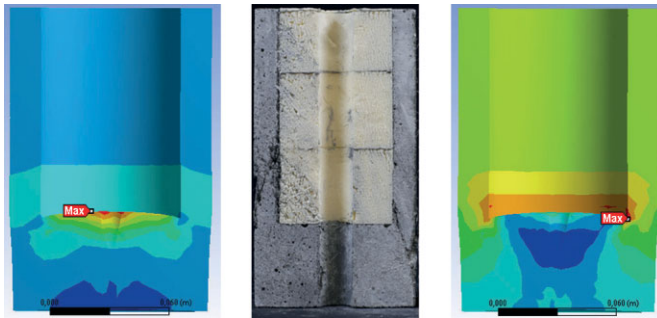


Bild 9 Max. Hauptspannungen (links), Bruchbild Probe (Mitte), Maximale Schubspannungen (rechts) (Zylindergeometrien)
Max. principal stresses (left), fracture sample (center), Maximum shear stresses (right) (cylinder geometry)

nung zur Spannglieddurchführung die maximale Zugspannung des UHPFRC. Anders als in der Berechnung tritt das Versagen im Versuch aber nicht im Kernbereich als Zugversagen des UHPFRC auf, sondern im Bereich der Lastumlenkung vom Rohrquerschnitt auf den Vollquerschnitt (Bild 9 Mitte und rechts).

Die Versuchskörper der anderen Geometrien zeigen ein ähnliches Versagen im Übergangsbereich der Krafteinleitung. Numerische Untersuchungen der Traglast von UHPFRC im Bereich komplexer Spannungsverteilungen sollten deshalb das nichtlineare Materialverhalten berücksichtigen. Für die Analyse möglicher Versagensorte ist die lineare Analyse aber ausreichend, vgl. auch Abschn. 3.4.

3.3 Herstellung der Stoßversuchskörper

Da es sich bei den entworfenen Stoßverbindungen um exakt herzustellende komplexe Geometrien handelt, sind für die Herstellung der Schalung traditionelle manuelle Verfahren wenig geeignet. Die Herstellung dieser Schalungen ist in einem wirtschaftlichen Rahmen nur durch die Verwendung von CNC-gesteuerten additiven oder subtraktiven Formgebungsverfahren möglich. Mit der hier verwendeten CNC-Fräse wird eine Oberflächentoleranz von $\pm 0,05$ mm erreicht.

Für die Versuchskörper der Krafteinleitungsbereiche sowie der Stoßverbindungen besteht die Schalung des Kernes aus einem in einzelnen Lagen CNC gefrästen Styrodur (XPS) mit Silikonüberzug. Der Styrodurkern mit einem Durchmesser von 70 mm dient zur Formgebung des Kraftüberleitungsbereichs vom Rohr- auf den breiteren Stoßquerschnitt (Bild 10 links) und kann ausreichend genau gefräst werden. Für die Stoßverbindungen, welche eine sehr hohe Anforderung an die Genauigkeit der Schalung erfordern, wird als Schalungsmaterial für den Stirnbereich bzw. die Stoßfläche ein hartes Polyoxymethylen (POM) gewählt, welches sich im CNC-Fräsvorgang sehr gut und exakt bearbeiten lässt (Bild 11). Auch während des Betonierens bleibt POM formstabil.

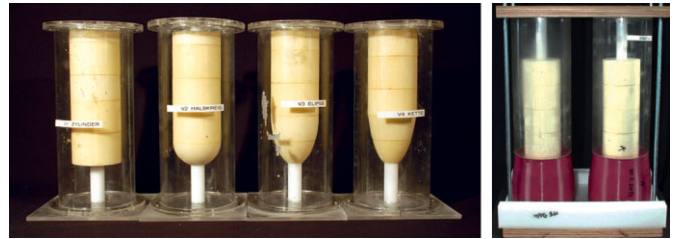


Bild 10 Versuchskörper: zusammengesetzte Schalungen für Krafteinleitungsbereiche (links) und Stoßbereiche einschl. Schalungsteile aus FDM (Fused Deposition Modeling) (rechts)
Specimens: assembled formwork for force transmission areas (left) and joints (including formwork parts of FDM) (right)



Bild 11 Stirnplattenschalung aus CNC gefrästem Polyoxymethylen (POM) zur Formung des Trockenstoßbereichs
CNC milled face plate formwork from polyoxymethylene (POM) forming of the dry joint contact area

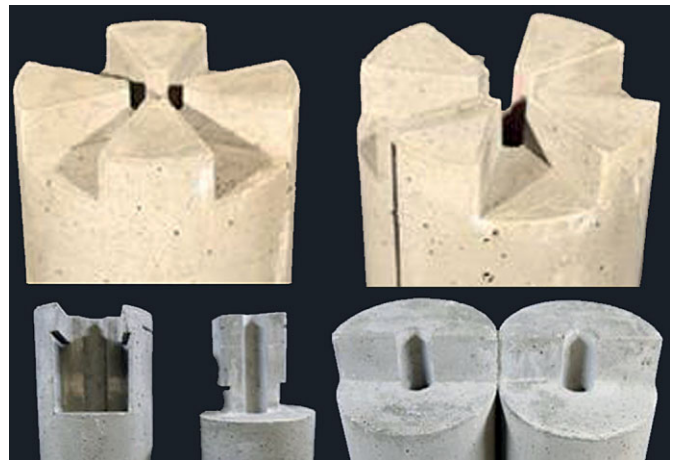


Bild 12 Probekörper der Serie A (oben), B (links unten) und C (rechts unten)
Specimens of series A (top), B (bottom left) and C (bottom right)

Für die Stöße ist ein Baukastenprinzip möglich, bei dem es für jeden Stoßflächentyp ein entsprechendes Baukasten-Schalungselement gibt, mit welchem der entsprechende Stoß hergestellt werden kann. Die Außenhülle der Schalung besteht aus einem Acrylrohr mit einem Innendurchmesser von 100 mm und einer Wandungsstärke von etwa 5 mm. Zur Fixierung und exakten lotrechten Ausrichtung der einzelnen Schalungskomponenten dienen M8 Gewindestangen, welche die gefräste POM-Stirnplatte mit der gefrästen Kopfplatte aus Brettschichtholz verbindet (Bild 10 rechts). Aus den optimierten Stoßseriengeometrien A/B/C (Bild 6) werden mithilfe dieser Schalungen die entsprechenden UHPFRC-Probekörper der Serien für die Prüfung hergestellt (Bild 12).

3.4 Gegenüberstellung von numerischen Untersuchungen und Bauteilversuchen

Da die Kettenliniengeometrie für den Krafteinleitungsbereich die tragfähigste Geometrie darstellt, wird diese für alle Stoßversuchskörper verwendet. Analog zu den Krafteinleitungsbereichen wird auch bei den geprüften Stoßserien A/B/C festgestellt, dass die rechnerisch ermittelten Traglasten deutlich unterhalb der im Versuch bestimmten liegen (Tab. 3).

Die zu erwartenden Versagensorte im Bereich der maximalen Schubspannung, resp. Lastumlenkung, können aber gut bestimmt werden. Das lässt erwarten, dass die von MATTHECK [12] vorgestellte Methode zur lokalen Anlagerung von Material zur Verringerung von Spannungen in baumartigen Bauteilen auch für die geometrische Auslegung von UHPFRC-Bauteilen hilfreich sein kann. Hierzu wird jeweils der Bereich der maximalen Schubspannung im Bauteil ermittelt. Anschließend erfolgt die geometrische Optimierung im CAD-Programm. Eine solche

manuelle Optimierung soll als Grundlage für automatisiert-kraftgesteuerte Formgebungprozesse herangezogen werden. Bild 13 links zeigt die errechneten maximalen Schubspannungen mit den geprüften Probekörpern der Stoßserien A8 (Zapfenstoß mit 10 mm langen Zähnen) im Vergleich zum geprüften Probekörper (Bild 13 rechts). Das Versagen stellt sich wie prognostiziert im Bereich der maximalen Schubspannung im unteren Drittelpunkt der Versuchskörper ein.

Die bisher durchgeführten Berechnungen und Versuche zeigen das Potenzial der passgenau hergestellten Trockenstoßverbindungen aus UHPFRC. Selbst bei geringfügigen Imperfektionen der Oberfläche ist die Stoßfläche der Serie A in der Lage, 85 % der maximalen Traglast des ungestörten UHPFRC-Rohres weiterzuleiten (Tab. 3). Die Herausforderung der weiteren Optimierung des Stoßes zum Übertragen der vollen Rohrtragfähigkeit liegt, außer in der Ausbildung der Stoßfläche, vor allem in der Ausbildung des Krafteinleitungsbereichs. Zur Vermeidung der auftretenden hohen Schubspannungen, welche maßgeb-

Tab. 3 Versuchsergebnisse Serie A (gemittelt aus je drei Versuchen)
Experimental results series A (averaged from 3 experiments each)

Prüfkörper	Traglast rechnerisch	Traglast Versuch (Mittelwert)	Traglast Rechnung/ Versuch	Traglast Versuch/ ideal. Rohr
A6 Zapfenstoß Lang	420 kN	512 kN	82 %	85 %
A8 Zinnenstoß Kurz	430 kN	511 kN	84 %	85 %
B5 Schwalbenschw.	294 kN	453 kN	64 %	75 %
C4 Blattstoß	310 kN	505 kN	61 %	84 %

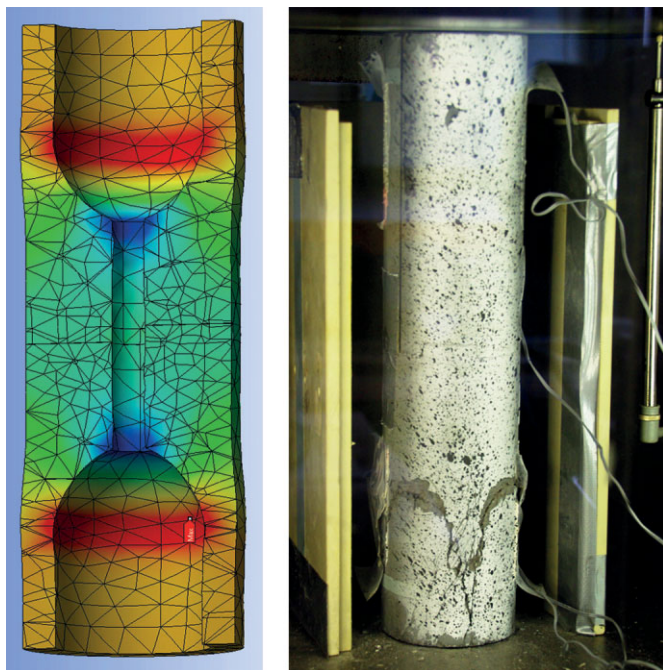


Bild 13 Maximale Schubspannungen Stoßserie A8 (links) im Vergleich zu den geprüften Versuchskörpern (rechts)
Maximum shear stresses of the jointing series A8 (left) compared to the tested specimens (right)

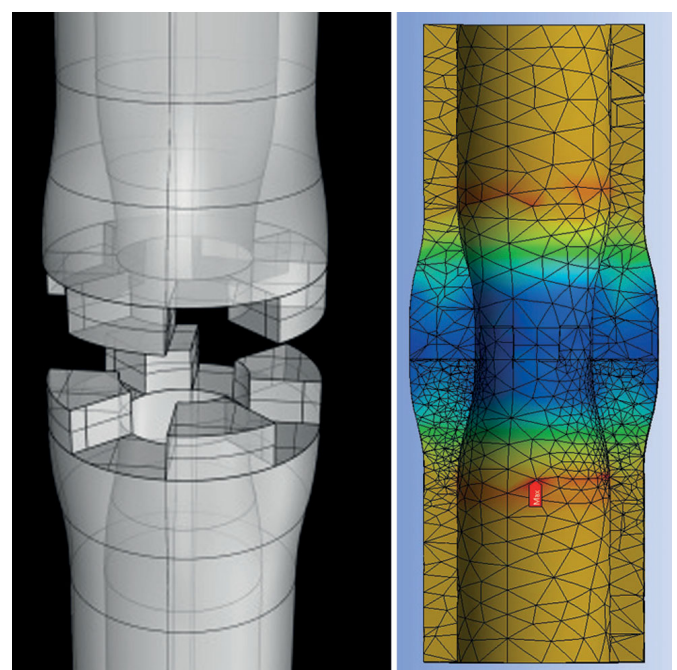


Bild 14 Stoßserie A12 mit symmetrischer Aufweitung CAD Zeichnung (links)/ Maximale Schubspannungen (rechts)
Jointing series A12 with symmetrical widening CAD Drawing (left)/ Maximum shear stresses (right)

lich für das Versagen verantwortlich sind, wird in einem weiteren Optimierungsschritt der Querschnitt der Serie A als symmetrische Aufdickung erstellt.

Bild 14 zeigt, dass sich durch diese symmetrische Aufdickung im Vergleich zur asymmetrischen Aufdickung (Bild 13) die entstehenden Schubspannungen in der FEM-Simulation deutlich verringern lassen. Die Erkenntnisse, welche durch die Entwicklung, Optimierung und Prüfung der hier gezeigten Stoßverbindungen gewonnen werden, bilden die Grundlagen zur weiterführenden Entwicklung eines leichten biegesteifen Knotens aus UHPFRC.

4 Knotenelemente für Stabwerke

4.1 Biegesteife Knotenelemente zur Umlenkung von Kräften

UHPFRC weist außer einer hohen Druckfestigkeit eine hohe Biegetragfähigkeit auf. Ziel ist es, diese im Tragwerk zu nutzen. Die bisher untersuchten Stab- und Stoßgeometrien haben gezeigt, dass neben Normalkraft auch Biegung übertragen werden kann. Deren Nutzung im Stabtragwerk benötigt einen Knoten, welcher in der Lage ist, hohe Normalkräfte und Biegemomente zu übertragen. Der im Projekt entwickelte Knotentyp bietet die Möglichkeit, die vorher untersuchten Elemente Stab und Stoß zu verbinden. Indem der Stoß nicht im stark biegebeanspruchten Knotenbereich angeordnet wird, kann der Knoten ungeschwächt ausgeführt und der Stoß auf gute Fügbarkeit, Normalkraft- und Biegetragfähigkeit optimiert werden.

4.2 Randbedingungen für das Knotenelement

Der untersuchte rohrförmige Stabquerschnitt weist bei linear-elastischer Berechnung die in Bild 15 dargestellte Momenten/Drucknormalkraft Tragfähigkeit auf. Die optimale Beanspruchungskombination ergibt sich zu: $M = 3,5 \text{ kNm}$ bei $N = -250 \text{ kN}$. Der Querschnitt erreicht diese Werte bei einem Eigengewicht von 10 kg/m . Diese Beanspruchungskombination sollte also auch im Knotenelement übertragen werden können (Bild 16).

Der entworfene biegesteife Knoten soll mittels einer planmäßigen Vorspannung in den angeschlossenen Rohren stets auf Druck beansprucht werden. Die notwendige Vorspannung erfolgt über in den Rohren geführte Spannlitzen, welche in den jeweiligen Endknoten verankert werden.

Im ersten Schritt wird der Anschlusstyp einer Muffenverbindung zwischen Rohr und Knoten untersucht (Bild 17 links). Durch die Vorgabe einer Zugfestigkeit von 10 MPa ergibt sich eine erforderliche Muffenwanddicke von 10 mm für die Übertragung der Momente und Normalkräfte aus dem Stab. Das hohe Gewicht, der hohe Einfluss der Passgenauigkeit einer Muffenverbindung auf die

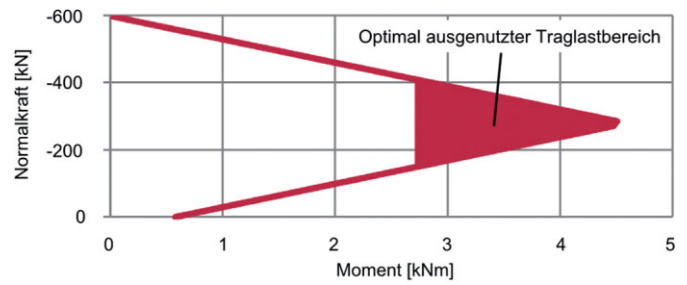


Bild 15 Linearelastische Momenten/Normalkraft Interaktion vom verwendeten Rohrquerschnitt
Linear-elastic moment/axial force interaction of the pipe cross-sections used

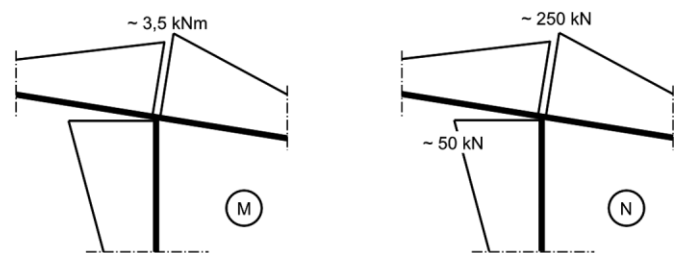
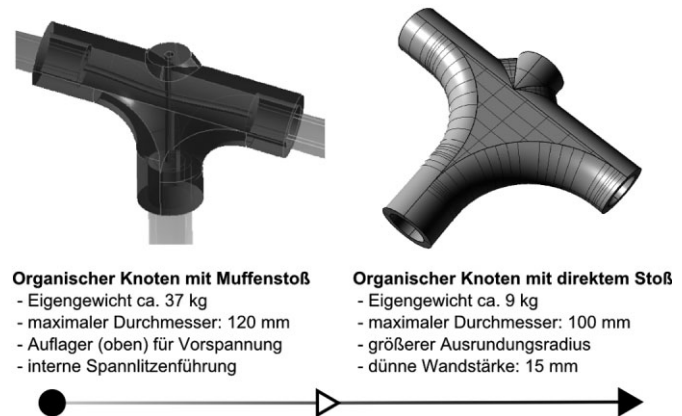


Bild 16 Statische Anforderung an das Knotenelement im Rahmentragwerk anhand der Tragfähigkeit der untersuchten Stabgeometrie
Statically needed carrying capacity of the node element in the support framework based on the investigated pipe geometry



Organischer Knoten mit Muffenstoß
- Eigengewicht ca. 37 kg
- maximaler Durchmesser: 120 mm
- Auflager (oben) für Vorspannung
- interne Spannlitzenführung

Organischer Knoten mit direktem Stoß
- Eigengewicht ca. 9 kg
- maximaler Durchmesser: 100 mm
- größerer Ausrundungsradius
- dünne Wandstärke: 15 mm

Bild 17 Knotenentwicklung: organischer Knoten mit Vorspannung und Muffenstoß (links), gewichtsoptimierter organischer Knoten mit direktem Stoß (rechts)
Development of nodes (left: organic node with pre-tension and muffle joint, right: weight optimized organic node with direct joint)

Tragfähigkeit sowie ästhetische Defizite eines solchen Knotens führen zu dessen Verwerfen mit der dann verfolgten Idee, den Stoß aus dem unmittelbaren Knotenbereich heraus zu verlagern (Bild 17 rechts). Dadurch kann die Knotengeometrie deutlich schlanker ausgeführt werden. Außerdem wird die Wanddicke auf 15 mm reduziert und der Ausrundungsradius der Schenkel vergrößert, um ein größeres Biegemoment abtragen zu können. Die Auflagerfläche für die vertikalen Spannlitzen auf der Oberseite des Knotens (Bild 17 rechts) wird durch eine Verbreiterung des Querschnitts unter 45° auf dem Knoten ab-

gesetzt. Beim Entwurf des Knotens stand als Ziel ein leichter Knoten mit der Wandstärke des gewählten Rohrquerschnitts im Vordergrund. Dieser bedarf nun hinsichtlich seiner Tragfähigkeit und Herstellbarkeit der weiteren Untersuchung und Optimierung.

4.3 Herstellung der Knotenversuchskörper

Die Knoten dienen der Kraftumlenkung im Tragwerk. Da es sich je nach Lage und Belastung im Tragwerk um optimierte Bauteile handelt, unterliegen sie einer erhöhten Variation in Form und Gestalt. Aus diesem Grund ist eine Wiederverwendbarkeit der Schalungen, wie bei den Stoßflächen, nicht gegeben. Um einen vertretbaren Erstellungsaufwand der Knotenschalungen sicherzustellen, werden geringere Anforderungen an die Maßhaltigkeit der Knotenaußenwände angenommen (etwa $\pm 0,5$ mm im Vergleich zu $\pm 0,05$ mm im Stoßbereich). Durch diese geringeren Anforderungen können schneller zu bearbeitende Schalungsmaterialien wie Polystyrol oder Wachs verwendet werden. Besonders Wachs, wie es bereits durch GRAMAZIO und KOHLER im Tailorcrete Projekt für Betonchalungen verwendet wird [13], stellt eine nachhaltige und umweltschonende Alternative zu mit GFK beschichtetem Polystyrol dar. Deshalb wird für die Außenschalung der Knoten ein am ITE entwickeltes Verfahren aus Wachs herangezogen (Bild 18).

Der Innenkern wird, wie bereits bei den Versuchskörpern der Stöße, aus Polystyrol in zwei Halbschalen gefräst, in welche die Spannglieder eingelegt werden. Anschließend wird der Innenkern mit den Spanngliedern an den Acrylglas (PMMA)-Stirnplatten in die Schalung eingesetzt (Bild 19). Alternativ zu den PMMA-Stirnplatten für den

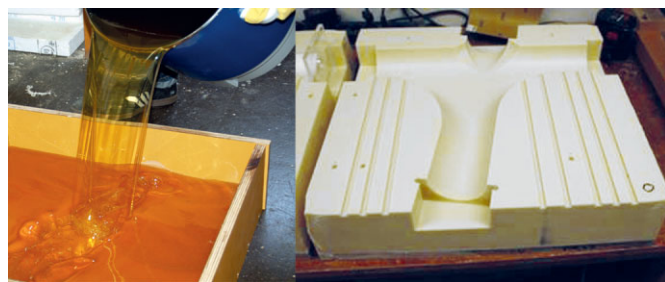


Bild 18 Außenschalung des Knotens bestehend aus Wachs
Outer formwork of the node made out of wax

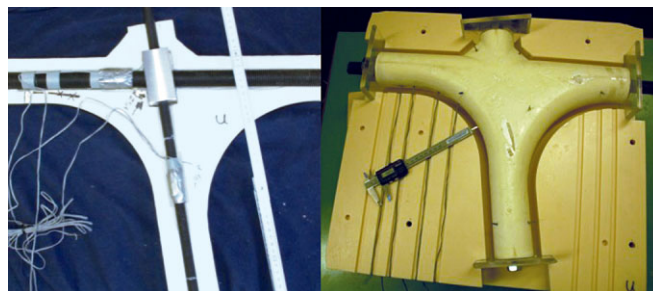


Bild 19 Polystyrol Innenkern mit Spanngliedern (links) und in Außenschalung (rechts)
Polystyrene inner core with tendons (left) and in outer formwork (right)

Versuchsknoten können für die spätere Ausführung in einem Stabwerk an dieser Stelle die gefrästen POM-Stirnplatten zur Erzeugung der Stoßflächen eingesetzt werden. Während des Betonierens wird die Schalung langsam aufgerichtet, sodass über die Einfüllöffnung sowie die in die Schalung integrierten Öffnungen ein Entlüften des UHPFRC gewährleistet ist (Bild 20). Aufgrund der hydrophoben Eigenschaften von Wachs kann bei der Betonierung weitgehend auf Trennmittel verzichtet werden. Der fertige UHPFRC-Knoten (Bild 21) wiegt bei einer Wanddicke von 15 mm nur etwa 9 kg.

4.4 Geplante Bauteilversuche der Knoten

Die Versuchsreihen an einem Rohrquerschnitt mit einer Länge von 415 mm zeigen, dass die Materialdruckfestig-

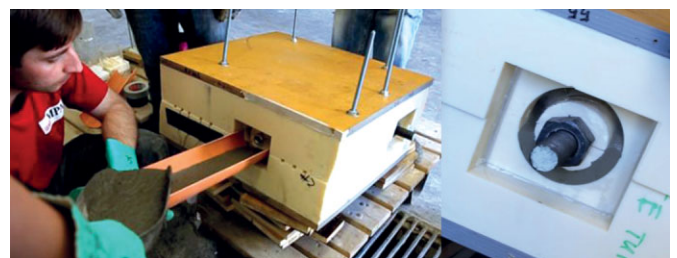


Bild 20 Betonierung des Knotens (links) und optische Kontrolle der Steighöhe (rechts)
Concreting of the node (left) and visual inspection of the filling level (right)



Bild 21 Ausschalen des Knotens (links) und leichter UHPFRC-Knoten (rechts)
Stripping of the node (left) and light UHPFRC node (right)

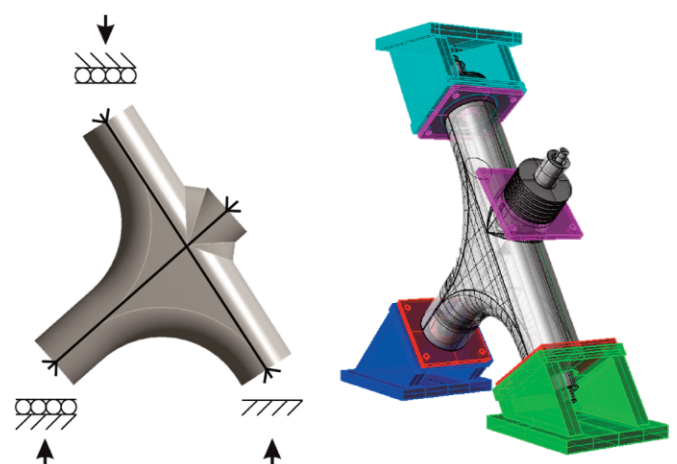


Bild 22 Versuchsaufbau der Knotenprüfung in der Druckprüfmaschine, schematisch mit konstanter Vorspannung (links) und Ansicht mit Auflagern (rechts) [L. LEDDEROSE]
Experimental set-up of the test node in the compression test machine, schematically with constant pre-tension (left) and with supports (right)

keit von 151 MPa bei dünnwandigen Rohren erreicht werden kann. Im Anschluss an die Herstellung des ersten Knotenelements soll dieses in einem Druckversuch auf seine Biegetragfähigkeit überprüft werden. Dabei wird die Normalkraft über Gewindestangen eingeleitet und mittels Tellerfederpaketen konstant gehalten. Wie in Bild 22 links dargestellt, werden die beiden linken Auflager in der Druckprüfmaschine horizontal verschieblich ausgeführt, um eine Verdrehung der Schenkel zu ermöglichen. Die konstant gehaltene Normalkraft, welche über Dehnmessstreifen auf den Gewindestäben kontrolliert wird, soll sicherstellen, dass die Biegetragfähigkeit des Knotens unter definierter Normalkraft geprüft wird.

5 Zusammenfassung und Ausblick

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 Stoß- und Knotenelemente können leichte Hohlprofile aus UHPFRC zu leichten und effizienten Stabtragwerken verbunden werden. Denkbar ist ein modulares Konstruktionsprinzip in Fertigteilbauweise, welches vielseitige Vorteile gegenüber konventionellen Konstruktionen aus Normalbeton bietet. Die Leichtigkeit von Tragwerken lässt sich gezielt steuern, indem nur dort UHPFRC eingesetzt wird, wo dieser auch zum Lastabtrag benötigt wird. Struktureffiziente Tragwerke verringern nicht nur das Eigengewicht, sondern gewährleisten eine optimale Materialausnutzung in ressourcenschonenden Gesamtsystemen. Die entwickelte manuelle Prozesskette zur Optimie-

rung von UHPFRC-Bauteilen wird in den „Digital Workflow“ überführt, welcher zukünftig den parametergesteuerten Formgebungsprozess automatisiert. 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 [1].

Im Weiteren konzentriert sich die Forschung darauf, die Erfahrungen aus den Stabwerkelementen in die Entwicklung von geometrisch komplexen Fügungen von Flächen- und Schalenelementen zu übertragen. Durch die Zusammenführung der entwickelten neuartigen Verbindungen und Knotenelemente für geometrisch 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 [7].

Dank

Der besondere Dank der Autoren gilt den im Forschungsteam mitarbeitenden Kollegen LUKAS LEDDEROSE, STEFAN NEUDECKER und CHRISTOPH MÜLLER, den Mitarbeitern des iMBB, der TU Braunschweig sowie der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Schwerpunktprogramms SPP1542 „Leicht Bauen mit Beton“.

Literatur

- [1] BUDELMANN, H.; KLOFT, H.: *DFG Forschungsantrag – Entwicklungen neuartiger Verbindungen für geometrisch komplexe Flächen und Stabtragwerke*. Braunschweig, 2011.
- [2] KLOFT, H.: *Logic and Form – From Isler Shells to Non Standard Structures*. *Journal of the International Association of Shell and Spatial Structures (IASS)*. 2011, pp. 191–199.
- [3] „<http://www.peikko.de/>“, Peikko, 29.05.2013. [Online].
- [4] OETTEL, V.; EMPELMANN, M.: *Feinprofilierter UHPFRC-Trockenfugen für Segmentbauteile*. *Beton- und Stahlbetonbau* 108 (2013), Heft 7, S. 487–495.
- [5] ZIMMERMANN, W.; SPAROWITZ, L.: *Vorgespannte Fertigteile aus Ultrahochfestem Faserbeton*. *Beton- und Stahlbetonbau* 107 (2012), Heft 3, S. 192–200.
- [6] HENZE, S.: *Entwicklung und Beschreibung des Tragverhaltens einer modularen Fachwerkkonstruktion aus Hochleistungsbeton*. Dissertation, Leipzig, 2009.
- [7] CURBACH, M.; HAMM, C.; SCHLAICH, M.; SCHNELLENBACH-HELD, M.; SOBEK, W.; WEISS, G.: *Antrag an die DFG auf Einrichtung eines Schwerpunktprogramms „Leicht Bauen mit Beton“*. 2009.
- [8] FEHLING, E.; SCHMIDT, M.; TEICHMANN, T.; BUNJE, K.; BORNEMANN, R.; MIDDENDORF, B.: *Entwicklung, Dauerhaftigkeit und Berechnung Ultrahochfester Betone (UHPC)*. Universität Kassel: Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, 2003.
- [9] HERMERSCHMIDT, W.; BUDELMANN, H.: *Kerbempfindlichkeit von ultrahochfestem Beton*. iMBB Kurzberichte aus der Forschung, <http://www.ibmb.tu-braunschweig.de/docpool/reports/KaF-2012-12.pdf>, TU Braunschweig, 2012.
- [10] GRAUBNER, W.: *Holzverbindungen. Gegenüberstellung japanischer und europäischer Lösungen*. Stuttgart: Deutsche Verlags-Anstalt, 1990.
- [11] KURRER, K.-E.: *Geschichte der Baustatik*. Berlin: Ernst & Sohn Verlag für Architektur, 2003.
- [12] MATTHECK, C.: *Design in der Natur – Der Baum als Lehrmeister*. Freiburg: Rombach, 2006.
- [13] GRAMAZIO, F.; KOHLER, M.; MIRJAN, A.; OESTERLE, S.; VANSSTEENKISTE, A.: [holcimfoundation.org/Architecture & Digital Fabrication](http://www.holcimfoundation.org/Architecture%20Digital%20Fabrication), ETH Zurich, [Online]. Available: <http://www.holcimfoundation.org/Portals/1/docs/A12/A12in1CH/A12GLin1CH-posterhigh.pdf>. [Zugriff am 04.06.2013].

Autoren



Dipl.-Ing. Jeldrik Mainka
Technische Universität Braunschweig
Institut für Tragwerksentwurf ITE
Pockelsstraße 4
38106 Braunschweig
jeldrik.mainka@tu-braunschweig.de



Dipl.-Ing. Sven Lehmborg
Technische Universität Braunschweig
Institut für Baustoffe, Massivbau
und Brandschutz
(iBMB) – Fachgebiet Baustoffe
Beethovenstraße 52
38106 Braunschweig
s.lehmborg@ibmb.tu-bs.de



Prof. Dr.-Ing. Harald Budelmann
Technische Universität Braunschweig
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brand-
schutz (iBMB) – Fachgebiet Baustoffe
Beethovenstraße 52
38106 Braunschweig
h.budelmann@ibmb.tu-bs.de



Prof. Dr.-Ing. Harald Kloft
Technische Universität Braunschweig
Institut für Tragwerksentwurf ITE
Pockelsstraße 4
38106 Braunschweig
h.kloft@tu-braunschweig.de