

# Industrielle Präzisionsfertigung von Hohlstäben aus hochfestem Feinkornbeton

## Entwicklung einer Herstellungsmethode

Jasmin Tkocz<sup>1\*</sup>, Peter Mark<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Massivbau, Bochum

## Kurzfassung

Der Beitrag beschreibt eine Methode für die Herstellung von Hohlstäben aus hochfestem Feinkornbeton mit integrierter Wärmebehandlung. Der vorgestellte Aufbau der Fertigungszelle mit Temperaturregelung mittels Wasserkreislauf kann in eine industrielle, robotergestützte Serienproduktion eingegliedert werden. Die sofortige Temperaturbeaufschlagung des verwendeten hochfesten Nanodur<sup>®</sup>-Betons innerhalb dieser Herstellungsmethode mit 40 bis 80 °C führt im jungen Betonalter zu deutlich erhöhten Druckfestigkeiten gegenüber Normaltemperaturen. Reduktionen in der 28-Tage Druckfestigkeit erscheinen vertretbar, zumal die Temperaturdifferenz während des Abkühlvorgangs zusammen mit der Wahl der Schalungsmaterialien den Ausschalprozess unterstützen.

Die Entwurfsform in Längsrichtung des Hohlstabs als Druckelement innerhalb eines hybriden Fachwerks mit Kreisringquerschnitt ist unter Verwendung der beschriebenen Fertigungsmethode variabel unter Voraussetzung eines konstanten oder sich nach innen hin verjüngenden Innenradienverlaufes. Form und nötige Bewehrung sind noch in endgültiger Abstimmung, da ein vorzeitiges Versagen im Lasteinleitungsbereich der Hohlzylinder zu niedrigeren Druckfestigkeitsergebnissen führte.

## 1. Einleitung

Mit hochfestem und ultrahochfestem Beton (*engl. (ultra-)high performance concrete ((U)HPC)*) ist ein Hochleistungswerkstoff auf dem Markt, der durch sein dichtes Gefüge und seinen niedrigen w/z-Wert Druckfestigkeiten jenseits von 100 N/mm<sup>2</sup> erreicht und gleichzeitig eine hohe Korrosionsbeständigkeit aufweist [1]. Im Vergleich zum konventionellen Betonbau können höhere Lasten aufgenommen oder aber Material deutlich eingespart werden. Optimierungsstrategien bieten sich an, um dem neuen Werkstoff durch eine gezielte Materialverteilung gerecht zu werden. Somit lösen leichte, filigrane Bauwerke die klassisch massige Betonbauweise zunehmend ab. Mit dem neuen Baustoff und mit sich am Kraftfluss orientierenden, materialreduzierten Formen gilt es die Herstellungsmethode zu hinterfragen und anzupassen. Der gezielte Materialeinsatz erfordert in der Fertigung entsprechend hohe Genauigkeiten.

In diesem Beitrag wird eine Herstellungsmethode für die industrielle Fertigung von Druckelementen aus hochfestem Feinkornbeton entwickelt. Als Beispiel dienen bionisch adaptierte Hohlprofile mit Kreisringquerschnitt eines aus einer Topologieoptimierung überführten hybriden Fachwerkes. Nach dem Vorbild der Automobilindustrie wird auf eine Just-in-time-Serienfertigung abgezielt. Eine Wärmebehandlung soll nicht nur durch eine hohe erzielbare Frühfestigkeit die Ausschallfrist verringern sowie Schwindverkürzungen minimieren [2], sondern auch als Ausschalhilfe für die innere Aussparung (Innenrohr) dienen.

Vorgestellt werden die ersten Schritte, und zwar die konsekutive Optimierungsstrategie der Betonbauteile und die Entwicklung einer prototypischen Fertigungszelle für die serielle Herstellung von Rohrabschnitten mit integrierter Wärmebehandlung. Weiterhin wird der Temperatureinfluss auf die Festigkeitsentwicklung des verwendeten Betons in mehreren Begleitversuchen untersucht.

\*Vortragender Autor: [jasmin.tkocz@rub.de](mailto:jasmin.tkocz@rub.de)

## 2. Herstellungsmethode

Die hier vorgestellte Herstellungsmethode zielt auf eine robotergestützte serielle Präzisionsfertigung von Hohlstäben aus hochfestem Beton ab. Abläufe der Betonfertigteileindustrie, in welcher aus möglichst kurzen Verweilzeiten in der Schalung eine Erhöhung der Wirtschaftlichkeit resultiert, sollen verknüpft werden mit Prozessen aus der Automobilindustrie, in der Roboter und Fertigungsstraßen bereits unabdingbar sind.

### 2.1 Optimierungsgrundlage

Der Hohlstab als herzustellende Form entspringt einer vorgeschalteten Optimierung (vgl. Abbildung 1). Die Entwicklung von leistungsfähigen Materialien erfordert ein Umdenken in der Ausbildung von Tragstrukturen. Die klassische Stahlbetonbauweise mit Normalbeton in prismatischen Schalungen und ihre normgerechte Einhaltung von Vorhaltemaßen führen zu großen Mengen an wenig ausgenutzt verbautem Material. Mithilfe der Topologieoptimierung lassen sich Optimierungspotentiale aufzeigen. Durch die Kontinuumsoptimierung [3] entstehen bei Vorgabe des Entwurfsraumes mit Randbedingungen und Belastung, von Restriktionen und einer angestrebten Materialreduktion als Zielfunktion fachwerkartige Strukturen, die in tatsächlich umsetzbare Fachwerke überführt werden können [4, 5]. Andere Ansätze der Topologieoptimierung wie die Stabwerksoptimierung [6, 7] resultieren demgegenüber direkt in über Knoten verbundene Druck- und Zugstreben.

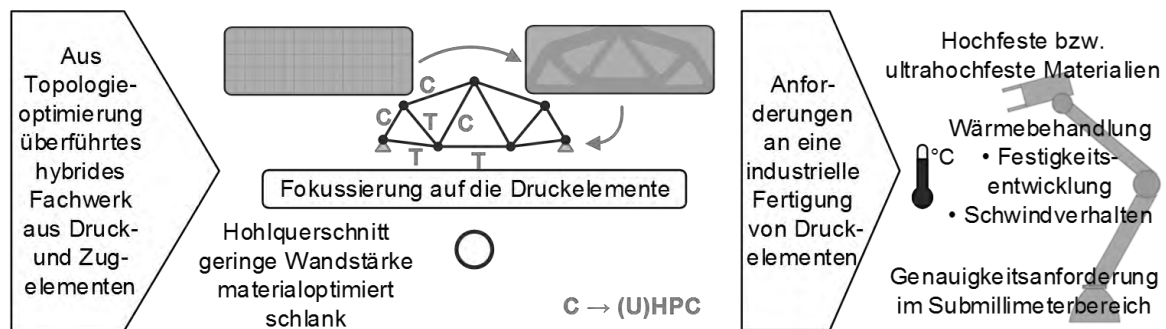


Abbildung 1: Entwicklungsschema der Herstellungsmethode für die industrielle Fertigung von hochfesten Betondruckelementen am Beispiel von Fachwerkstäben

Die Möglichkeiten der praktischen Umsetzung derartiger Topologieoptimierungsergebnisse sind vielfältig von einer einfachen Bewehrungsoptimierung über die Anpassung des Querschnitts beispielsweise als optimiertes I-Profil bis hin zur Ausbildung eines hybriden Fachwerkes aus Druck- und Zugelementen (vgl. [8]). Letzteres wird für diesen Beitrag weiter verfolgt. Die Hybridität besteht in dem Einsatz von unterschiedlichen, beanspruchungsgerechten Hochleistungswerkstoffen für Zug und Druck, das heißt zur Fertigung von Zugelementen aus hochzugfesten Materialien wie hochfestem Stahl oder Carbon und von Druckelementen aus hochdruckfesten Betonen. Während die Zugelemente sowie die Knotenausbildung [9] zunächst ausgeklammert bleiben, liegt der Fokus dieses Beitrags auf den Betondruckelementen. Im Zuge des Optimierungsgedankens ist auch auf dieser Ebene Einsparpotential eingeschlossen. Für schlanke Druckelemente gilt es, das Optimum aus Material- und Stabilitätsversagen zu bestimmen. Die Eulersche Knickformel ergibt sich zu Gleichung (1), während der optimale Trägheitsmomentenverlauf in Längsrichtung  $x$  für einen beidseitig gelenkig gelagerten Stab größter Knickfestigkeit bei gegebenem Materialaufwand gemäß [10] Gleichung (2) zu entnehmen ist.  $I_0$  bezeichnet dabei das Trägheitsmoment in Querschnittsmitte.

$$\frac{Pl^2}{EI_0} = \frac{3\pi^2}{4} \quad (1)$$

$$I(x) = I_0 \left[ 1 - \frac{2}{\pi} (\arcsin(x) - x\sqrt{1-x^2}) \right]^4 \quad (2)$$

Dieser Verlauf gilt für sogenannte ähnliche Querschnitte, welche durch die Formulierung des Trägheitsmomentes als Produkt aus Querschnittsabmessung und einem Faktor gekennzeichnet sind und wird in weiteren Untersuchungen als erste Näherung weiterverwendet.

Die de facto optimale Querschnittsform für Druckelemente ohne Berücksichtigung fertigungstechnischer Mindestwandstärken bildet ein konkaver Querschnitt, der einem dreistrahligen Stern ähnelt [11]. Dahinter reiht sich der Kreisring als konvexer Hohlquerschnitt ein. Auch aus der Natur gilt nach dem Vorbild von Grashalmen oder Bambus [12] die Ringform als knickfester leistungsfähiger Querschnitt. Das Verlegen von Bewehrung beim Einsatz von Stahlbeton ist in dieser Form aus praktischer Sicht umsetzbar. Wird die Querschnittsform des Kreisringes festgelegt, ist der aus dem Trägheitsmoment errechenbare Radienverlauf in Längsrichtung stets nicht eindeutig bestimmt. Innen- und Außenradius sowie Wandstärke können in jedem Punkt variieren. Die Formulierung des Trägheitsmomentes mithilfe zweier Parameter, von denen jeweils einer konstant (const.) bleibt während der andere variiert (var.), gelingt mit den Kombinationen Außenradius  $R$  und Innenradius  $r$  bzw. mittlerem Radius  $R_m$  und Wandstärke  $t$ . Dies führt wiederum zu vier Entwurfsformen für die Längsrichtung gemäß Abbildung 2.

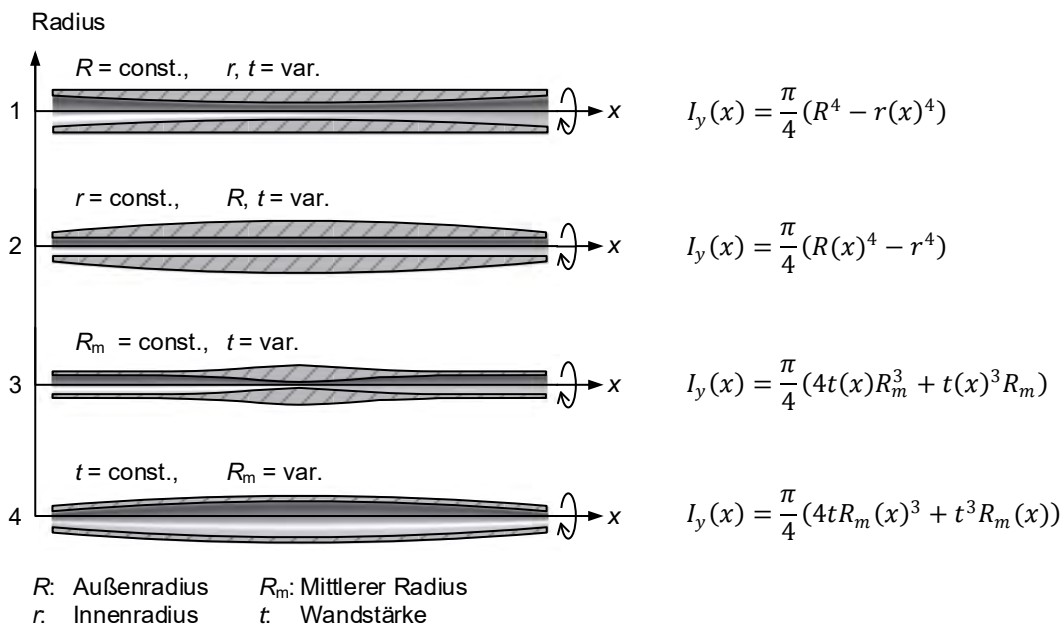


Abbildung 2: Entwurfsformen für longitudinale Radienverläufe auf Basis des Trägheitsmomentes  $I_y(x)$

Die hier vorgestellte Herstellungsmethode für Druckstäbe kann prinzipiell auf die Entwurfsformen 1 bis 3 übertragen werden. Aufgrund des sich nach außen hin verjüngenden Innenradius der Entwurfsform 4 ist das Ausschalen einer vorgesehenen wiederverwendbaren Innenschalung nicht möglich. Die äußere Form des Stabes kann beliebige Formen annehmen, da die Außenschalung zweigeteilt ausgebildet wird. Je nach Variante erhöht sich allerdings der Herstellungsaufwand und z. B. CNC-Geräte werden erforderlich.

## 2.2 Fertigungszelle

Innerhalb der Fertigungsmethode ist eine Wärmebehandlung des Betons vorgesehen, die in mehrfacher Hinsicht genutzt wird. Zum einen wird das Ausschalen durch eine höhere erreichbare Frühfestigkeit zu einem früheren Zeitpunkt ermöglicht und infolge dessen eine schnellere Taktung erreicht, die die Wirtschaftlichkeit der Fertigung maximiert. Weiterhin kann aus der Temperaturerhöhung eine größere Temperaturdifferenz genutzt werden, durch die unter Ausnutzung thermischer Dehnung bei Abkühlung das Entfernen der Innenschalung erleichtert wird. Zuletzt begünstigt eine Wärmebehandlung das Schwindverhalten [13, 1].

Der Aufbau der Fertigungszelle ist schematisch in Abbildung 3 rechts dargestellt, links davon ein Foto von einem umgesetzten Praxisbeispiel der thermischen Regulierung innerhalb eines Versuchs in der Konstruktionsteilprüfung des Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau (KIBKON) der Ruhr-Universität Bochum. Ein regelbarer Wasserkreislauf wird von einer Pumpe betrieben, während die gewärmte Schalung aus energetischen Effizienzgründen gedämmt wird. Aufgrund der gewählten Hohlquerschnittsform kann die Wärmebehandlung theoretisch außen- und innenseitig angewandt werden. Die hier abgebildete Beheizung der Innenschalung über die innere Wasserleitung kann um weitere Leitungen zum Beheizen der Außenschalung erweitert werden. Die Temperatur wird im Vorlauf gezielt gesteuert, während im Rücklauf ein ständiges Monitoring stattfindet. Dieses umfasst die Messung sowohl der Wassertemperatur zur Wärmebehandlung als auch der Wärme im Frischbeton über Temperaturfühler, sodass die Eigenwärme im Bauteil berücksichtigt wird. Es entsteht ein thermisch stationärer Zustand aus Eigen- und Fremdwärmeanteilen, der minimale Eigenspannungen im Querschnitt während des thermisch unterstützten Erhärtens erzeugt. Leicht zeitversetzt kann dadurch ein optimaler Verlauf der Wärmeentwicklung gesteuert werden. Für Vorgänge innerhalb der Fertigung, wie das Einfüllen des Betons, das Ausschalen sowie das erneute Zusammensetzen der Schalung können automatisierte Vorgänge wie Roboterfertigung genutzt werden.

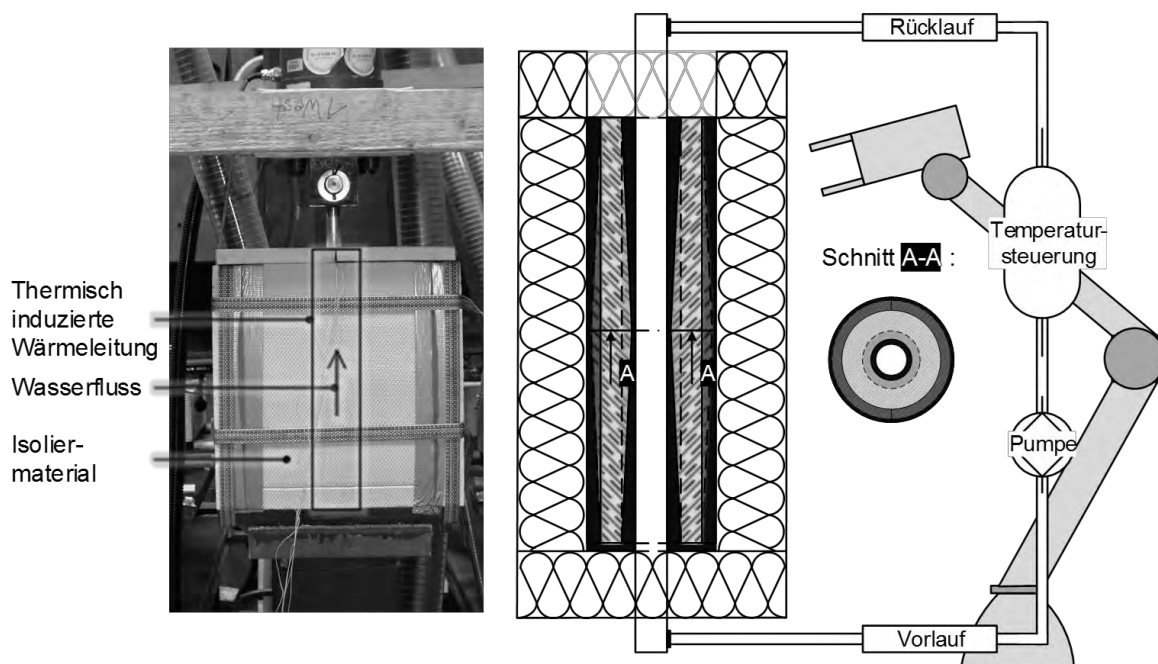


Abbildung 3: Schema der Fertigungszelle (rechts) und Beispiel für eine praktische Umsetzung (links)

## 3. Wärmebehandlung

Die in der oben beschriebenen Herstellungsmethode enthaltene Beaufschlagung der Betonelemente mit erhöhter Temperatur bewirkt Veränderungen der Frisch- sowie Festbetoneigenschaften

besonders im frühen Betonalter, aber auch in Langzeitsicht. Für Normalbetone ist eine Wärmebehandlung keinesfalls neu (vgl. [14]), zumal sie bereits seit 1989 als Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) formuliert und überarbeitet worden ist [15]. Die Effekte erhöhter Temperaturen im Vergleich zur Herstellung unter Raumtemperaturen hinsichtlich der Druckfestigkeit sind ein Anstieg im jungen Betonalter bei Einbußen in der Endfestigkeit [16]. Die selbstverdichtende Eigenschaft des verwendeten Betons (vgl. 3.1.2) hat keinen Einfluss auf diese qualitative Auswirkung der Wärmebehandlung [17]. Die Hochdruckfestigkeit bereits ohne Wärmebehandlung schränkt diesen Effekt ebenfalls nicht ein, wie Untersuchungen an ultrahochfesten [2, 18, 19] und hochfesten [20] Betonen zeigen. Dennoch kann nicht pauschalisiert werden, dass eine Wärmebehandlung nach vorgegebenem Schema für alle hochfesten Betonzusammensetzungen dieselben positiven Effekte herbeiführt. Die Möglichkeiten der Behandlung können variiert werden hinsichtlich des zeitlichen Verlaufs, der Intensität oder der Dauer der Temperaturbeaufschlagung. Weiterhin spielen die Bestandteile der Betonzusammensetzung eine entscheidende Rolle. Die Wärmebehandlung ist somit auf Zumahlstoffe und Zementbasis abzustimmen. Während sie die puzzolanische Reaktion des bei ultrahochfesten Betonen oftmals für einen verbesserten Verbund zwischen Zementstein und Gesteinskörnung eingesetzten Silikastaubs beschleunigt [1], ist für hüttensandhaltige Mischungen eine längere Vorlagerzeit vor der Wärmebehandlung oder eine erweiterte Dauer einzuräumen, um die optimale Druckfestigkeit zu erzielen [21]. Somit stellt das vorliegende Versuchsprogramm die Untersuchung des Einflusses der Wärmebehandlung auf die Druckfestigkeitsentwicklung einer spezifischen Mischungszusammensetzung eines sogenannten hochfesten Nanodur<sup>®</sup>-Betons [22] (vgl. 3.1.2) dar.

### 3.1 Versuchsprogramm

Das gewählte Versuchsprogramm deckt die Untersuchung mehrerer Einflüsse auf die Druckfestigkeit des Betons ab. Neben dem Prüfalter, anhand dessen die zeitliche Entwicklung der Druckfestigkeit analysiert werden kann, wird die Probenform, der zeitliche Ablauf der Wärmebehandlung sowie die maximale Behandlungstemperatur variiert (vgl. Abbildung 4). Die einzelnen Variationen werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

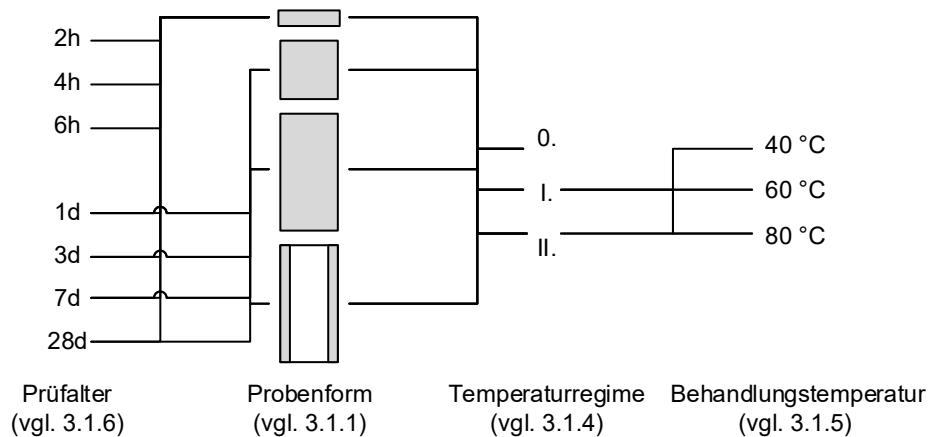


Abbildung 4: Schema des Versuchsprogramms

#### 3.1.1 Probenform

Die äußere Form der verwendeten Probekörper variiert zwischen drei normierten Vollkörpern (Prisma: 4 cm x 4 cm x 16 cm, Würfel: Kantenlänge 15 cm, Zylinder: Höhe 30 cm, Durchmesser 15 cm) sowie eine Hohlzylinderform, deren Geometrie der geplanten Anwendung innerhalb der Serienfertigung angepasst ist. Anhand dieser Form wird nicht nur die Druckfestigkeit unter verschiedenen Temperaturszenarien untersucht, sondern auch das Schalungskonzept für die

vorgestellte Herstellungsmethode praktisch getestet. Der Vollzylinder dient als Vergleich zur Ermittlung des Einflusses hohler und voller Strukturen hinsichtlich der Druckfestigkeit unter verschiedenen Wärmebehandlungsszenarien. Ergänzt werden die Würfel- sowie Prismenform, die wiederum einen kleineren Maßstab abdecken. Darüber hinaus erfolgt die Druckfestigkeitsprüfung der Prismen anhand der aus einer vorgeschalteten Drei-Punkt-Biegezugprüfung entstehenden Prismenhälften gemäß DIN EN 196-1 [23], sodass zusätzlich die Auswirkung auf die Biegezugfestigkeit analysiert werden kann. Die gemittelte Bruchlast der beiden Körperhälften aus der Druckprüfung dividiert durch die Größe der Belastungsfläche von  $40 \times 40 \text{ mm}^2$  kann bei Einhaltung vorgegebener Toleranzen der Einzelwerte als Mittelwert angegeben werden.

### 3.1.2 Beton

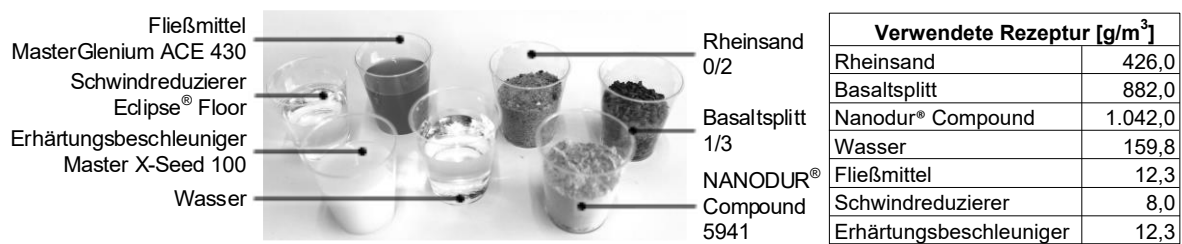


Abbildung 5: Mischungsbestandteile und Massenanteile je  $\text{m}^3$  der Betonzusammensetzung

Bei dem verwendeten hochfesten Beton handelt es sich um eine Zusammensetzung auf Basis des Dyckerhoff NANODUR® Compound 5941 mit Basaltsplitt, Sand und Zusatzmitteln (vgl. Abbildung 5). Die Bindemittelvormischung Dyckerhoff NANODUR® Compound 5941 besteht zu 59 % aus Dyckerhoff Premiumzement NANODUR® CEM II/B-S 52,5 R sowie zu 41 % aus Quarzmehl und enthält auf der Mikrodur-Technologie basierende nanostrukturierte synthetische Kieselsäuren [24]. Zur Herstellung einer hochfesten Betongrobkornmischung wird Basaltsplitt mit einer Körnung von 1/3 mm sowie Rheinsand mit 0/2 mm-Körnung beigefügt. Zugewetzt werden Fließmittel MasterGlenium ACE 430, Schwindreduzierer Eclipse® Floor und Erhärtungsbeschleuniger Master X-Seed 100.

Die Zusammensetzung kann in einem konventionellen Betonmischer aufbereitet werden. Nach Wasserzugabe ähnelt die Konsistenz der feuchtem Grobsandes. Erst die anschließende gleichzeitige Zugabe der Zusatzmittel bewirkt einen Umschlagpunkt von einem nicht bindigen zu einem zähflüssigen, honigartigen Gemisch, welches sich weit bis in schmale Bereiche ausbreitet (vgl. [25, 26]). Es wird ein Setzfließmaß von  $840 \pm 20 \text{ mm}$  bei einer Fließzeit  $t_{500}$  von  $18 \pm 2 \text{ s}$  erreicht. Das Einbringen in die Schalung kann bei kleinen Abmessungen mit Messbechern, aber auch aus größeren Behältern erfolgen. Der Beton ist selbstnivellierend und selbstentlüftend, wobei eine langsame Steiggeschwindigkeit zu empfehlen ist, um das Aufsteigen der Luftbläschen zu gewährleisten. Durch rasche Hautbildung an der Oberfläche ist die Verarbeitbarkeitsdauer eingeschränkt und darüber hinaus besonderer Wert auf die Nachbehandlung zu legen.

### 3.1.3 Schalung

Die Auswahl des Schalungsmaterials erfolgt im Hinblick auf die geplante Anwendung der Serienfertigung von wärmebehandelten Betondruckelementen. Stahlschalungen sind in vielerlei Hinsicht leistungsfähiger als andere Materialien wie beispielsweise Holz. Sie ermöglichen eine vielfach höhere Einsatzhäufigkeit bei deutlich reduziertem Nachbearbeitungsaufwand. Die erforderliche Präzision ist mit Stahlschalungen ohne weiteres einzuhalten und die hohe Steifigkeit von Stahl kann bereits bei geringen Wandstärken den Frischbetondruck fließfähiger, selbstverdichtender Betone aufnehmen.

Neben diesen Aspekten sind zusätzlich die geplante Wärmebehandlung sowie der begleitende Ausschalhilfeffekt zu berücksichtigen. Dies stellt disparate Anforderungen an die Eigenschaften des

Schalungsmaterials. Ein ähnlicher thermischer Ausdehnungskoeffizient von Schalung und Beton ist zu wählen, um Zwangsspannungen bei der Erwärmung und Abkühlung während der Temperaturbehandlung zu vermeiden. Für die Ausschalhilfe ist ein größerer Ausdehnungskoeffizient der Innenschalung vorzuziehen, damit sich der Innenkörper bei Abkühlung stärker verengt als der umgebende Beton. Zweifelsohne wird der Betonqualität die höhere Wichtung zugeschrieben, sodass mit Stahl ein Schalungsmaterial infrage kommt, das ähnliche Wärmedehnungseigenschaften aufweist wie Beton. Dennoch muss dadurch nicht zwangsläufig auf die Ausschalhilfe verzichtet werden. Aufgrund verschiedener thermischen Eigenschaften der Materialien Beton und Stahl, im Wesentlichen die Wärmeleitfähigkeit, aber auch die spezifische Wärmekapazität sowie die Rohdichte, kommt es zu einer schnelleren Abkühlung des Stahls, während im Beton die Wärme über einen längeren Zeitraum gespeichert wird. Dies wirkt sich positiv auf das Entfernen der Zylinderinnenschalung aus. Dieses Phänomen würde auf die Außenschalung übertragen erneut zu ungewollten Zwangsspannungen führen. Jedoch wird dem entgegengewirkt, indem die Außenschalung unmittelbar zu Beginn der Abkühlphase entfernt wird.

Bei den Stahlaußenschalungen handelt es sich um bekannte mehrteilige Dreifachprismen-, diagonal zweigeteilte Würfel- sowie aus Seitenhälften und Boden bestehende, dreiteilige Zylinderschalungen. Um einen Hohlzylinder herzustellen und dem Aspekt einer Serienfertigung gerecht zu werden ohne der Wirtschaftlichkeit halber auf verlorene Schalungen zurückzugreifen, wird die Innenschalung als Stahlrohr ausgebildet. Neben der Ausnutzung der thermischen Verformungen des schneller erkaltenden Stahls soll die Geometrie das Ausschalen erleichtern. Das Stahlrohr wird in Querrichtung halbiert und konisch mit sich zur Mitte hin verjüngendem Querschnitt entworfen, sodass eine maximale bzw. minimale Wandstärke des resultierenden Betonkörpers von 1,5 cm in Querschnittsmitte und 1,0 cm am Querschnittsrand erreicht wird. Im Bereich des kleineren Schalungsdurchmessers befinden sich innenseitig Stahllaschen für den Ausschalprozess. Ein dünner Kunststoffring am Boden der Zylinderaußenschalung gewährleistet eine mittige Lage der Innenschalung während des Betoniervorgangs (vgl. Abbildung 6).



Abbildung 6: Schalungsaufbau des Hohlzylinders; links: Foto, rechts: Modell

### 3.1.4 Temperaturregime

Drei Wärmebehandlungsszenarien (siehe Abbildung 7) werden angewandt, um eine Aussage über die Auswirkung auf die Druckfestigkeitsentwicklung zu treffen: Das Temperaturregime 0. stellt mit einer Lagerung der Körper bei 20 °C und 65 % Luftfeuchte nach dem Ausschalen bis zur Prüfung die Referenzbehandlung dar. Das Temperaturregime I. bildet die näherungsweise für die Serienfertigung vorgesehene Behandlung ab, bei der der Frischbeton unmittelbar beim Einfüllen in die vorgewärmte Schalung für einen Zeitraum von 24 Stunden einer erhöhten Temperatur ausgesetzt ist. Tatsächlich

besteht hier noch der Unterschied zwischen zugeführter und tatsächlicher Betontemperatur. Letztere soll konstant sein, hier ist es zunächst noch die zugeführte Temperatur. Anschließend lagert der ausgeschaltete Körper bis zum Prüftag unter Referenzbedingungen. Die Möglichkeit, dass die Wärmebehandlung für den verwendeten Beton aufgrund der enthaltenen synthetischen Kieselsäure nicht die für konventionelle Betone bekannten Vorteile mit sich führt, wird die Versuchsreihe um ein weiteres Temperaturregime II. ergänzt, bei dem die Wärmebehandlung bei entsprechender Temperatur mit einer Verzögerung von vier Stunden einsetzt, das heißt, wenn der Beton bereits teilerhärtet ist und eine gewisse Anfangsfestigkeit besitzt. Das Ende der Wärmebehandlung wird gemeinsam mit dem Ende aus Temperaturregime I. gewählt.

Somit können folgende Erwartungen der Wärmebehandlungsszenarien I. und II. formuliert werden:  
I. Durch die erhöhte Temperatur während der Erhärtung wird die Phasenbildung angeregt, sodass die anfängliche Festigkeit höher sein sollte als unter Referenzbehandlung 0.. Demgegenüber sind Einbußen in der Endfestigkeit bzw. der 28-Tage-Festigkeit zu erwarten.  
II. Die verzögerte Wärmebehandlung bewirkt eine ungestörte anfängliche Hydratation sowie eine anschließend durch die Temperatur beschleunigte, sodass in diesem Szenario eine höhere 28-Tage-Festigkeit gegenüber 0. und I. erreicht werden sollte. Lediglich während der ersten vier bis sechs Stunden unterliegt die Festigkeit dem Szenario I., da sich 0. und II. während der ersten vier Stunden gleichen.

Im Hinblick auf die Serienfertigung wird damit bewusst ein Szenario gewählt, das hinsichtlich der Endfestigkeit nicht dem Optimum entspricht. Es bleibt schließlich abzuwägen, in welchem Verhältnis der Ausschaleffekt zu den zu erwartenden relativen Festigkeitsreduktionen steht.

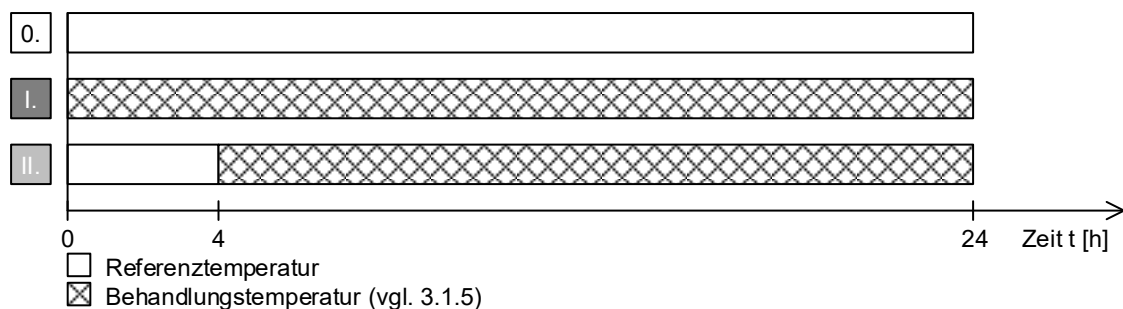


Abbildung 7: Zeitlicher Ablauf der Temperaturregime 0., I. und II.

### 3.1.5 Behandlungstemperatur

Während der zeitliche Verlauf der Wärmebehandlung variiert (vgl. 3.1.4), wird der Einfluss der vorgesehenen Maximaltemperatur untersucht. Neben der Referenztemperatur von 20 °C in 0. werden die Szenarien I. und II. in drei Serien unter den Temperaturstufen 40, 60 und 80 °C durchgeführt. Für alle drei Ziele der Wärmebehandlung wird qualitativ von einem größeren positiven Effekt ausgegangen, je höher die Maximaltemperatur ist. Eine höhere Maximaltemperatur vergrößert die Temperaturdifferenz und damit die Dehnungsdifferenz, durch die das Ausschalen möglich wird. Weiterhin vergrößert sich mit steigender Temperatur die eingetragene Energie, mit der die Hydratation beschleunigt wird. Für unter 40 bis 85 °C behandelten Normalbeton wird dieser Effekt in [16] beschrieben. Auch das Schwinden wird durch eine Wärmebehandlung zum größten Teil vorweggenommen [13, 1]. Die quantitativen Auswirkungen werden mit den vorgestellten Versuchen ermittelt, wobei die Verformungskenngrößen der zeitabhängigen Schwindverformungen hier noch nicht behandelt sind.

### 3.1.6 Prüfalter

Die Druckfestigkeitsentwicklung der Körper wird mit der Auswahl verschiedener Prüfalter untersucht. Da die größten Entwicklungen hinsichtlich der Erhärtung in den ersten sieben Tagen stattfinden, werden alle Proben nach einem, drei sowie sieben Tagen geprüft. Stichprobenartig wird



außerdem die 28-Tage Druckfestigkeit getestet, um den Langzeiteffekt der unterschiedlichen Temperaturregime und Behandlungstemperaturen aufzuzeigen. Ergänzend wird die frühe Entwicklung der Biegezugfestigkeit sowie der Druckfestigkeit anhand von Prismen nach zwei, vier und sechs Stunden untersucht, um ein früheres Ausschalen zu evaluieren.

### **3.2 Durchführung**

Die Versuchsdurchführung erfolgte in den Versuchshallen KIBKON sowie im Labor des Lehrstuhls für Verkehrswegebau an der Ruhr-Universität Bochum. Die Prismen wurden an einer elektro-mechanischen 250 kN-Prüfmaschine weggeregelt mit einer Geschwindigkeit von 0,3 mm/min auf ihre Biegezug- und mit 0,5 mm/min auf ihre Druckfestigkeit hin geprüft. Die Druckfestigkeit der weiteren Körper der 40 °C-Serie nach 1, 3 und 7 Tagen und der 80 °C-Serie nach 28 Tagen wurden an einer servohydraulischen 5000 kN- bzw. 20.000 kN-Prüfmaschine getestet, die übrigen an einer 4000 kN Prüfmaschine. Die Geschwindigkeit der weggeregelten Belastung betrug an der 5000 kN-Prüfmaschine 1 mm/min, ansonsten 0,5 mm/min.

Die Prismen sowie Würfel werden für die Prüfung so positioniert, dass schalungsglatte Flächen auf die Lasteinleitungsapparaturen treffen. Die schalungsoffene Oberseite der Zylinder und Hohlzylinder wird nach dem Ausschalen geschliffen, sodass ebenfalls eine gleichmäßige Lasteinleitung ohne Spannungsspitzen gewährleistet wird.

### **3.3 Ergebnisse**

#### **3.3.1 Druckfestigkeitsentwicklung**

Der Einfluss der Temperaturbehandlung auf die Druckfestigkeitsentwicklung von Prismen ist in Abbildung 8 dargestellt. Besonders die Frühfestigkeit wird nicht nur von dem Temperaturregime sondern auch von der Behandlungstemperatur beeinflusst. So weist beispielsweise ein unter 40 °C unmittelbar nach der Betonage wärmebehandelter Körper (I.) nach 2 Stunden eine mittlere Druckfestigkeit von 3,5 N/mm<sup>2</sup>, unter 60 °C von 9,4 N/mm<sup>2</sup> und unter 80 °C von 34,7 N/mm<sup>2</sup> auf, während der unter Referenzbedingungen gelagerte Körper noch nicht prüfbar ist. Auch nach 4 und 6 Stunden tritt eine derartige Steigerung mit wachsender Behandlungstemperatur auf. Das Temperaturregime II. wird ab einem Betonalter von 6 Stunden aufgeführt, da die Wärmebehandlung erst nach 4 Stunden einsetzt. Zu diesem Zeitpunkt beträgt die Dauer der Temperaturbeaufschlagung somit 2 Stunden. Diese führt bereits zu einer deutlichen Festigkeitssteigerung im Vergleich zu Regime 0. von knapp 120 % unter 40 °C, 360 % unter 60 °C und gut 600 % unter 80 °C. Nach 1, 3 und 7 Tagen ist der Trend der Festigkeitsentwicklung vergleichbar. Es ist eine Festigkeitssteigerung unter Temperaturregime I. gegenüber 0. bei 40, 60 und 80 °C festzustellen, wobei das Maximum unter 60 °C erreicht wird. Temperaturregime II. ruft eine weitere Steigerung hervor mit einem Optimum ebenfalls unter 60 °C. Ein Ausreißer ist nach 7 Tagen zu erwähnen, wo bei Referenzlagerung eine höhere Festigkeit erzielt wird als eine sofortige Temperaturbehandlung (I.). Nach 28 Tagen tritt dieser Effekt erneut größtenteils ein. Aufgrund teilweise rückläufiger Festigkeiten ist eine größere Datenbasis zur genaueren Analyse erforderlich.

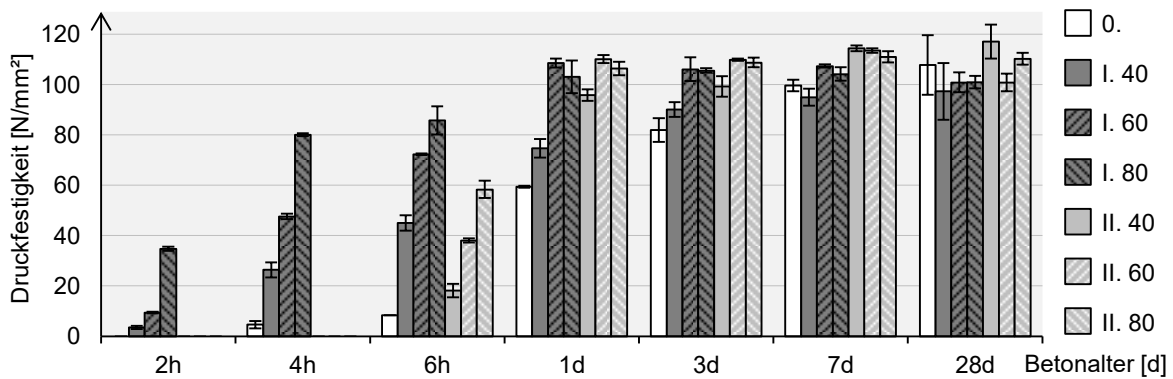


Abbildung 8: Druckfestigkeitsentwicklung anhand von Prismen (Mittelwerte mit Standardabweichung)

Der Einfluss der Temperaturregime I. und II. gegenüber 0. auf die Druckfestigkeitsentwicklung der übrigen Körper wird in diesem Beitrag nur im Hinblick auf die Behandlungstemperatur von 40 °C ausgewertet, da Teilergebnisse der Temperaturserien unter 60 und 80 °C aktuell noch ausstehen. Es handelt sich bei den in Abbildung 9 dargestellten Ergebnissen um Einzelwerte, die bekannten Streuungen hinsichtlich Werkstoff und Prüfeinflüssen unterliegen. Würfel und Zylinder verhalten sich analog zu den oben ausgewerteten Prismen. Die Behandlung unter Temperatureinfluss bewirkt eine leichte Steigerung der Druckfestigkeit nach bis zu 7 Tagen. Nach 28 Tagen weisen die referenzgelagerten Körper jedoch höhere Festigkeiten auf. Die Werte der Hohlzylinder spiegeln demgegenüber nicht den reinen Temperatureinfluss wider, was sich durch das deutlich niedrigere erreichte Spannungsniveau sowie durch den variierenden Säulenverlauf abzeichnet. Fehlende Bewehrung und geometrische Ungenauigkeiten können Gründe für diese nicht ausgenutzte Betondruckfestigkeit sein, zum einen aufgrund der auftretenden Umlenkkräfte gemäß der sanduhrförmigen Innenschalungsgeometrie und zum anderen wegen sich konzentrierender Spannungen im Lasteinleitungsbereich analog zur Stützenkopfproblematik. Die Versagensbilder in Abbildung 10 weisen auf Letzteres hin. Hierzu werden entsprechende Versuche folgen.

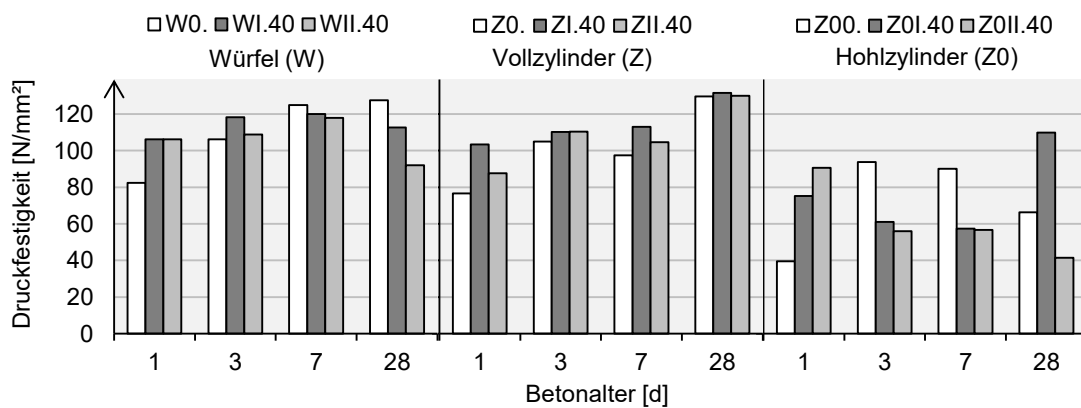


Abbildung 9: Druckfestigkeitsentwicklung anhand von Würfeln (W), Zylindern (Z) und Hohlzylindern (ZO) unter Temperaturregime 0., I. und II. bei 40 °C (Einzelwerte)

### 3.3.2 Versagensbilder

Das Versagen der Körper erfolgt typisch für hochfeste unbewehrte Betone spröde, bei den Voll- sowie Hohlzylindern mit größerer Schlankheit gegenüber den Würfeln darüber hinaus teils explosionsartig. Typische Versagensbilder sind in Abbildung 10 zusammengefasst. In etwa der Hälfte der Prüfungen zerfielen Vollzylinder in viele Bruchstücke oder es zeichnete sich das oberflächennahe Abspalten von Schollen nach Erreichen der Bruchlast ab ähnlich dem Versagen nahezu aller Würfel.

Demgegenüber weisen die Hohlzylinder über den Umfang gleichmäßig verteilte Längsrisse auf, die in vielen Fällen zu einem Kollaps des gesamten Körpers führten. Andernfalls bildete sich im Bereich der Lasteinleitung eine abgespaltene Bruchkronen.

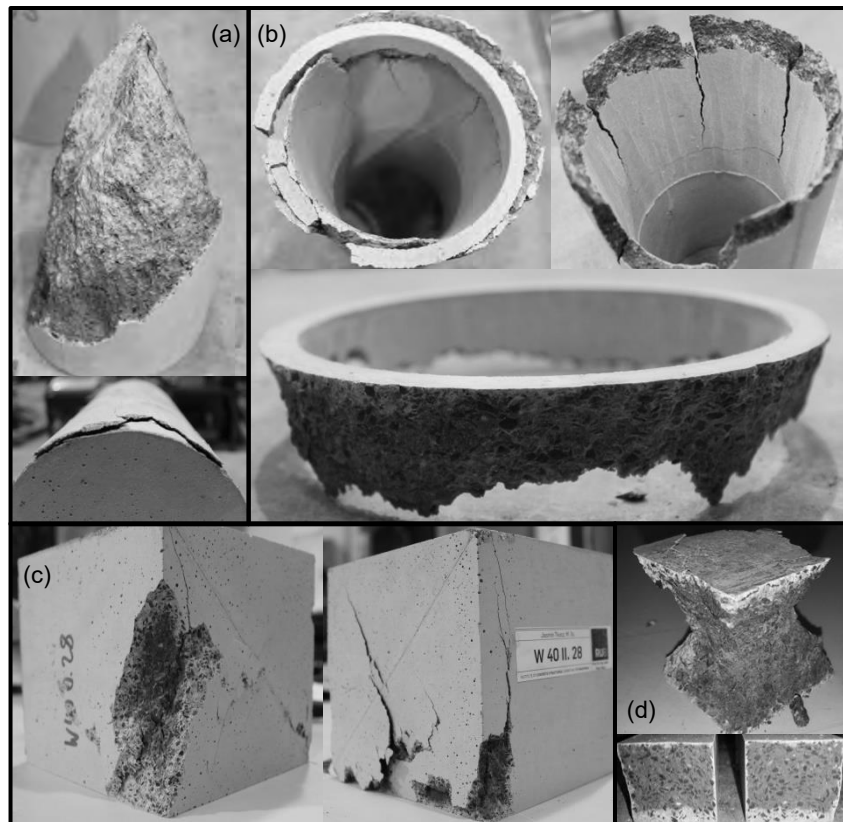


Abbildung 10: Typische Versagensbilder von Vollzylinder (a), Hohlzylinder (b), Würfel (c) und Prisma (d)

#### 4. Schlussfolgerungen

Wärmebehandelte, hochfeste Betone können in einem industriellen Herstellungsprozess mit Seriencharakter integriert werden. Ziel ist es dabei, möglichst schnell Ausschalen zu können, um viele, wenig unterschiedliche modulare Einzelbauteile in kurzer Zeit zu erzeugen.

Es zeigt sich für den verwendeten Feinkornbeton Nanodur<sup>®</sup>, dass bei Wärmebehandlung von 40 bis 60 °C bereits nach zwei Stunden messbare Druckfestigkeiten erreicht werden, also sehr kurze Herstellungszeiträume möglich werden. Die so gefertigten Hohlzylinder ohne Bewehrungszugabe verhalten sich spröde im Druckversuch und erreichen aufgrund fehlender Bewehrung im Lasteinleitungsbereich und Umlenkwirkungen aus der gewählten Geometrie mit Doppelkeilform nur Anteile der tatsächlich möglichen Druckfestigkeit. Hier laufen zurzeit weitere Entwicklungen zur Verbesserung.

Mit dem vorgestellten Konzept kann ein Umstieg von einer Vor-Ort Herstellung mit massigen, geometrisch ungenauen Vollquerschnitten in eine von Vorfertigung dominierte Präzisionsherstellung gelingen, die leichte, dauerhafte Tragwerke vorsieht, welche in kurzen Zeiträumen auf der Baustelle nur noch zu assemblieren sind.

Um die Herstellungsmethode weiterführend zu evaluieren, sollen analog zu den Druckfestigkeitsstudien Schwinduntersuchungen angestellt werden. Darüber hinaus ist eine Vermessung mittels Laser geplant, die der Serienfertigung automatisiert nachgeschaltet werden soll.

## Danksagung

Der Dyckerhoff GmbH, namentlich Herrn Dipl.-Ing. Thomas Deuse, sei für die Unterstützung der Forschungsarbeit durch die Zurverfügungstellung von Nanodur®-Material gedankt.

## Literatur

- [1] Schmidt, M. et al.: Sachstandsbericht Ultrahochfester Beton, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (Hrsg.), Beuth Verlag, Heft 561, Berlin, 2008
- [2] Fehling, E.; Bunje, K.: Ultra-Hochleistungsbeton – Grundlagen der Konstruktion und Bemessung. In: Schmidt, M.; Fehling, E. (Hrsg.): Ultra-Hochfester Beton, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Heft 2, Kassel University Press, Kassel, 2003
- [3] Bendsøe, M. P.; Kikuchi, N.: Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 71, Heft 2, 1988
- [4] Putke, T.; Mark, P.: Fachwerkmodellbildung mit topologischen Optimierungsverfahren, Beton- und Stahlbetonbau 109, Heft 9, 2014
- [5] Putke, T.; Bergmeister, K.; Mark, P.: Wirtschaftliches Konstruieren und Bewehren. In: Bergmeister, K.; Fingerloos, F.; Wörner, J.-D. (Hrsg.): Betonkalender 2016, Ernst & Sohn, Berlin, 2016
- [6] Ali, M. A.; White, R. N.: Automatic Generation of Truss Model for Optimal Design of Reinforced Concrete Structures, ACI Structural Journal 98, Heft 4, 2001
- [7] Achtziger, W.: Truss topology optimization including bar properties different for tension and compression, Structural Optimization 12, Heft 1, 1996
- [8] Gaganelis G. et al.: Konsekutive Wandlung massiger Betonstrukturen in topologisch optimierte Fachwerke, Festschrift anlässlich des 60. Geburtstages von Herrn Prof. Breitenbücher, 2017
- [9] Smarslik, M.; Tkocz, J.; Mark, P.: Topology optimization in building construction, Proc. of the 2016 Symposium of ASES, Serbia, 2016
- [10] Blasius, H.: Träger kleinster Durchbiegung und Stäbe größter Knickfestigkeit bei gegebenem Materialverbrauch, Zeitschrift für Mathematik und Physik – Organ für angewandte Mathematik, Heft 62, 1914
- [11] Schmidt, A. et al.: Formvariationen von Druckgliedern, Beton- und Stahlbetonbau 108, Heft 11, 2013
- [12] Busse, D.; Empelmann, M.: Tragverhalten dünnwandiger Betonhohlbauteile aus hochfestem Feinkornbeton, Bautechnik 92, Heft 1, 2015
- [13] Philip, U.; Dehn, F.; Schreiter, P.: Temperatureinfluss auf die Phasen- und Gefügebildung von UHPC, Ultrahochfester Beton, Bauwerk Verlag, Berlin, 2003
- [14] Sylla, H. M.: Reaktionen im Zementstein durch Wärmebehandlung, beton 38, Heft 11, 1988
- [15] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb): Wärmebehandlung von Beton, DAfStb-Richtlinie, Beuth Verlag, Berlin, 2012
- [16] Grübl, P.; Weigler, H.; Karl, S.: Beton. Arten, Herstellung und Eigenschaften, Ernst & Sohn, Berlin, 2001
- [17] Stegmaier, M.: Eigenschaften von wärmebehandeltem Selbstverdichtenden Beton, Dissertation, Stuttgart, 2005
- [18] Selleng, C. et al.: Einflussgrößen auf die Wirksamkeit einer Wärmebehandlung von Ultrahochfestem Beton (UHFB), Beton- und Stahlbetonbau 112, Heft 1, 2017
- [19] Müller, S.: Zur Auslegung von innovativen Betonkollektorelementen für solarthermische Parabolrinnenkraftwerke, Dissertation, Kaiserslautern, 2016
- [20] Neck, U.: Auswirkungen der Wärmebehandlung auf Festigkeit und Dauerhaftigkeit von Beton, beton 38, Heft 12, 1988
- [21] Heinz, D.; Urbonas, L.; Gerlicher, T.: Effect of Heat Treatment Method on the Properties of UHPC. In: Schmidt, M.; et al. (Hrsg.): Proc. of Hipermat 2012 – 3<sup>rd</sup> Int. Symp. on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Heft 19, Kassel University Press, Kassel, 2012
- [22] Produktdatenblatt „Dyckerhoff Nanodur® Compound 5941“, Dyckerhoff AG, Produktmarketing, Wiesbaden, 2013
- [23] DIN EN 196-1:2016-11: Prüfverfahren für Zement - Teil 1: Bestimmung der Festigkeit
- [24] Deuse, T.; Hornung, D.; Martin Möllmann, M.: Von der Mikrodur- zur Nanodur-Technologie - Normzement zur praxismgerechten Herstellung von UHPC, BFT International 75, Heft 5, Bauverlag BV, 2009
- [25] Forman, P. et al.: Light concrete shells for parabolic trough collectors – Conceptual design, prototype and proof of accuracy, Solar Energy, Heft 111, 2015
- [26] Forman, P. et al.: Parabolschalen aus Hochleistungsbeton als Solarkollektoren, Beton- und Stahlbetonbau 111, Heft 12, 2016