

J. Kirnbauer, D. Bozsaky, E. Bölcskey, K. Deix, J. Wolfsgruber, W. Becker, L. Schönberger (Hrg.): "Tagungsband Teil 1 "Internationales Symposium Eventmaterials - Materialtechnologie & Eventinnovationen""; TU Wien, Institut für Hochbau und Technologie, Forschungsbereich für Baustofflehre, Werkstofftechnologie und Brandsicherheit E206-1, Wien, 2012, ISBN: 978-3-900576-06-6; 153 S.

## **UHPC ALS SPRITZBETON ZUR HERSTELLUNG VON LUFTIG-LEICHTEN SKULPTUREN UND SCHALENTRAGWERKEN**

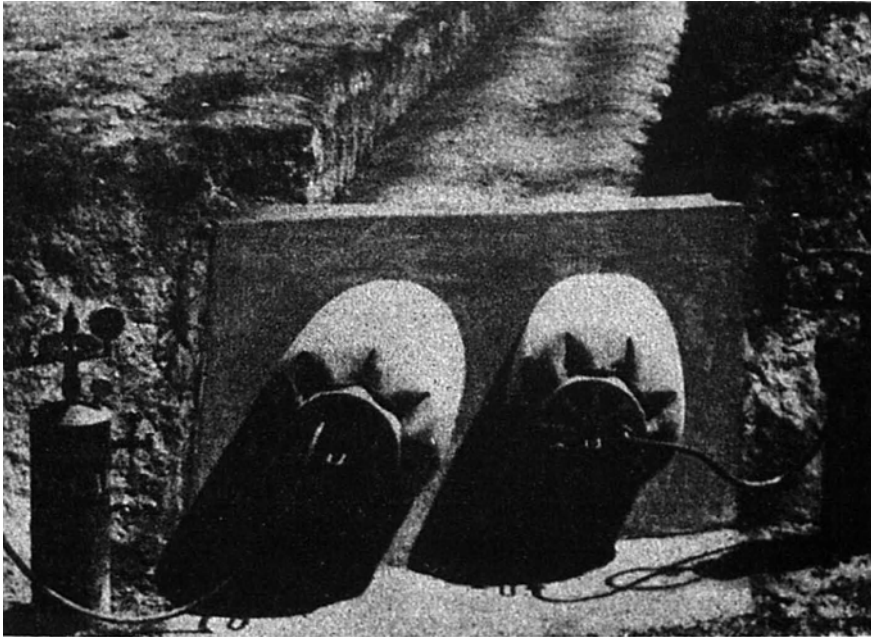
### **1 Einleitung**

Als UHPC (eng. **Ultra High Performance Concrete**) bezeichnet man einen Beton mit einer Druckfestigkeit weit über der höchsten genormten Festigkeitsklasse C100/115. Im deutschsprachigen Raum wird UHPC oft auch UHLB (**Ultra-Hochleistungs**beton) oder einfach nur UHFB (**Ultra-Hochfest**beton) genannt. Durch die spezielle Zusammensetzung erreicht dieser Beton nicht nur extreme (Druck-)festigkeiten, sondern bietet auch einen hervorragenden Widerstand gegen chemische und physikalische Beanspruchungen. Schalenartige Tragwerke eignen sich sehr gut, um die Druckfestigkeit dieses Betons auszunützen. Allerdings ist der Aufwand für die Schalung von Flächentragwerken sehr groß, so dass sich hier aufblasbare, pneumatische Schalungen oder aber auch segelartige, aufgespannte Membranen als Alternative anbieten. Derartige Schalung lassen sich schnell und kostengünstig herstellen und sind – im Falle von Pneus - auch wieder verwendbar. Die relativ geringe Last der nur dünnen Betonschicht kann von solchen Konstruktionen leicht getragen werden. Aufgebracht wird der UHPC am einfachsten durch spritzen. So lassen sich schnell und günstig ansprechende Skulpturen und ganze Tragwerke realisieren.

### **2 Pneumatisch gestützte Schalungen**

#### **2.1 Historische Entwicklung**

Die Idee, pneumatisch gestützte Schalungen zu verwenden, ist nicht neu. Als erste bekannte Veröffentlichung zur Anwendung dieses Prinzips gilt eine Veröffentlichung aus dem Jahre 1938. Darin wird die Anwendung eines von *der Societa Anonima Canalizzazioni Acquedotti Fognature* entwickelten Systems zur Herstellung von Rohrleitungen mit Hilfe luftgefüllter, vulkanisierter Gewebeschläuche beschrieben [1]. Dabei wurden aufgeblasene Schläuche auf eine bereits betonierte Sohle aufgelegt und im Graben einbetoniert (Abbildung 1). Nach dem Erhärten des Betons wurden die Schläuche entfernt. Dieses Verfahren wird auch heute noch im Betonrohrleitungsbau sinngemäß angewendet.



**Abbildung 1: Herstellung von zwei Rohrleitungen mit pneumatisch gestützten Schalungen [1]**

Es wird dem Amerikaner *Wallace Neff* nachgesagt, dass er der erste war, der dünne Betonschalen auf pneumatisch gestützten Schalungen herzustellen versuchte [2]. Nach anfänglichen Schwierigkeiten wurde ihm 1942 das Patent in den USA zugeteilt und noch im gleichen Jahr eine Schale mit 45m Spannweite errichtet. Dabei wurde die Bewehrung mit speziellen Abstandhaltern auf die aufgeblasene Membrane montiert und der Beton durch kontinuierliches Spritzen in mehreren Lagen aufgebracht. Es wurden weltweit nach seinem Verfahren über 1200 Schalen errichtet.

Ein als „Domecrete“ bezeichnetes Verfahren wurde in Israel zur Herstellung preiswerter Wohnungen (Abbildung 2) häufig verwendet [3]. Es wurde von *Haim Heifetz* entwickelt [4]



**Abbildung 2: Nach dem "Domcrete"-Verfahren errichtete Siedlung [5]**

Eine weitere Möglichkeit bietet das Aufbringen von Kunststoffschäumen auf die Membrane, die einerseits die Membrane versteifend und gleichzeitig auch als Wärmedämmung wirken.

In diesem Fall wird an der Innenseite gearbeitet. Die Kunststoffschicht verbindet sich fest mit der Membrane und diese verbleibt dann üblicherweise als Abdichtung auf der Schale. In die Kunststoffschicht werden die Halterungen für die Bewehrung eingearbeitet. Nach der Montage der Bewehrung wird wiederum der Beton in mehreren Lagen aufgespritzt. Der Überdruck in der Schale ist sehr gering und für die Arbeiter unbedenklich. In den USA wurden auf diese Weise mehrere hundert Schalen mit Spannweiten bis über 100m hergestellt. Die Bauzeiten konnten extrem kurz gehalten werden, da alle Arbeiten im witterungsgeschützten Innenbereich der Schale ausgeführt werden konnten.



**Abbildung 3: Eine durch Kunststoffschäume stabilisierte Schalung während der Spritzbetonarbeiten [6]**

Eine etwas andere Art der Herstellung stellt die 1965 von *D. Bini* entwickelte Methode dar [7]. Dabei wird die Schalungsmembrane eben ausgelegt und entlang ihres Umfangs am Fundament verankert. Danach wird auf der Membrane eine spezielle Bewehrung verlegt und ein mit einem Abbindeverzögerer behandelter Beton aufgebracht und mit einer zweiten Membrane abgedeckt. Diese wird ebenfalls entlang des Fundaments verankert. Danach wird durch Einblasen von Luft die gesamte Konstruktion hochgedrückt und in Form gebracht. Da dabei die Bewehrungsstäbe länger werden müssen, ist eine Spezialbewehrung erforderlich (Abbildung 4). Ein Ausziehen der geraden Bewehrungsstäbe aus den Spiralstäben gewährleistet dies. Durch diese Spezialbewehrung und die erforderlichen Gleitmechanismen ist dieses Verfahren aber nur für beispielsweise rotationssymmetrische Kugel- oder Ellipsenformen geeignet.

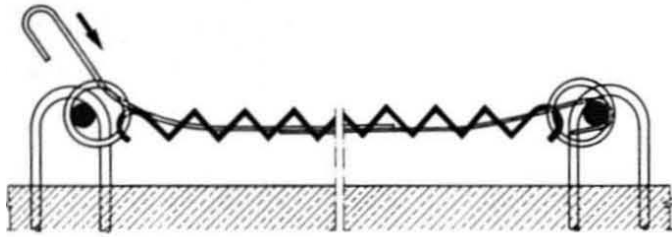


Abbildung 4: Prinzip der Spezialbewehrung für die Herstellung von Bini-Schalen [6]

## 2.2 Formfindung für Betonschalen

Abgesehen von rotationssymmetrischen Schalen ist es kaum möglich, die Schalenform „händisch“ zu erarbeiten. Die Begründung liegt darin, dass nicht nur eine räumlich gekrümmte Fläche zu definieren ist, sondern dass diese Fläche gleichzeitig eine Gleichgewichtsfigur mit definierten Eigenschaften sein muss. Meist wird gefordert, dass diese Figur ausschließlich eine Druckbeanspruchung erfährt. Deshalb greift man beim Entwurf auf Modelle zurück, die experimenteller Natur oder computergestützte Simulationsmodelle sein können.

Die experimentellen Methoden lassen sich im Wesentlichen in drei Gruppen einteilen: Hängemodelle, Fließformen und pneumatisch gebildete Formen.

Die Hängemodelle beruhen auf dem Gedanken der Umkehrform. Eine unter einer bestimmten Belastung nur auf Zug beanspruchte Konstruktion steht bei Umkehr der Lasttrichtung ausschließlich unter einer Druckbeanspruchung. Soll nun eine Form gefunden werden, die unter Eigengewichtsbelastung unter Druckbeanspruchung steht, genügt es, die Form einer auf dem Kopf stehenden, zugbeanspruchten Konstruktion zu ermitteln.

Der Umgang mit Fließmodellen ist etwas umständlicher. Man geht davon aus, dass sich spezielle Wachs- oder Kunststoffplatten bei Erwärmung durch das Eigengewicht in eine neue Gleichgewichtsform hineinhängen. Es wird angenommen, dass sich bei entsprechender Wahl der viskoplastischen Eigenschaften der Modellbauwerkstoffe ein relativ homogener Spannungszustand im Modell einstellt. Die so erhaltene Form kann wieder umgedreht werden und es ergibt sich eine unter Eigengewicht auf Druck beanspruchte Konstruktion.

Bei den pneumatisch gebildeten Formen werden beispielsweise dünne Gummihäute durch Luft- und/oder Flüssigkeitsdruck in eine neue Form gebracht. Bei geeigneter Wahl des Modellbauwerkstoffes kann dabei ein relativ homogener Spannungszustand in der Haut erzielt werden. Es ist aber prinzipiell nicht möglich, genauere Aussagen über den Spannungsverlauf in der Fläche zu machen. Durch die Arbeit mit Seifenhäuten kann man dieses Problem umgehen. Die Eigenschaften der Seifenhautfilme garantieren ein vollkommen homogenes Spannungsbild in der aufgespannten Fläche. Mit den pneumatisch

verformten Membranen lässt sich im Modell sehr einfach arbeiten, ihre Anwendung ist deshalb weit verbreitet. Da eine Druckbelastung aber stets senkrecht zur Oberfläche wirkt, ergeben sich bei stark aus der Horizontalen verformten Häuten deutliche Abweichungen zwischen der Lastrichtung aus Druck- und der aus Eigengewichtsbelastung. Die Methode findet bei der Formfindung von Betonschalen hier ihre Grenzen [6].

Die computergestützten Formfindungsmethoden lassen sich in zwei Hauptgruppen einteilen: indirekte Methoden (Deformationsmethoden) und direkte Methoden.

Die indirekten oder Deformationsmethoden stellen eine numerische Simulation der experimentellen Methoden dar. Es wird dabei jeweils eine vorgegebene Ausgangsform durch Aufbringen einer Belastung so lange verformt, bis die sich einstellende Geometrie auch die übrigen Entwurfsanforderungen erfüllt. Durch die Art der Belastung und durch die Materialeigenschaften, die der zu verformenden Struktur gegeben sind, lassen sich Hängemodelle, Fließformen und pneumatisch vorgespannte Formen berechnen. Die am häufigsten verwendete Deformationsmethode beruht auf der Methode der Finiten Elemente in der geometrisch nichtlinearen Formulierung. Ähnlich wie bei den experimentellen Methoden lässt sich bei den indirekten Methoden ein nicht vollständig befriedigendes Endergebnis einer Berechnung nur durch Änderung der Vorgabedaten und anschließende Neuberechnung, also auf indirektem Weg, verbessern. Dabei ist es sehr schwierig, teilweise auch unmöglich, bestimmte Spannungszustände in der Struktur zu erzeugen. Ein Beispiel hierfür ist die Aufgabe, eine Betonschale mit konstanten Spannungen unter Eigengewicht durch Verformen einer Gummihaut zu berechnen. Zwar lässt sich auch hier durch Zuschalten eines Steueralgorithmus die Ergebnisqualität verbessern, die indirekten Methoden sind allerdings vom Ansatz her zur Lösung derartiger Probleme nicht geeignet und deshalb den direkten Methoden weit unterlegen.

Die direkten Methoden erlauben die Berechnung einer Struktur, die, bei gegebenen geometrischen Randbedingungen, unter dem Formfindungslastfall einen vorgegebenen Spannungszustand besitzt. Sie erzielen damit eine Form mit dem gewünschten Spannungszustand auf direktem Weg. Die Ausgangsform im üblichen Sinn ist unbekannt oder ohne Belang, da sie lediglich als durch Überlegungen zur numerischen Stabilität bedingter »Startwert« für die Berechnung vorgegeben werden muss und daher manchmal physikalisch nicht zulässig zu sein braucht (z. B. Verstoß gegen die Gleichgewichtsbedingungen).

Die bekanntesten der direkten Methoden sind:

- Die Kraftdichtemethode-,

- Die numerische Lösung des die Membranschale beschreibenden Differentialgleichungssystems;
- Indirekte Methoden in Kombination mit einer Optimierungsstrategie.

Während bei den Deformationsmethoden stets eine Lösung bestimmbar ist, eine (die) zulässige Ausgangsform ist ja bekannt, kann bei den direkten Methoden über die Existenz einer Lösung zunächst keine Aussage gemacht werden: Man kann sich sehr leicht einen Formfindungslastfall und einen vorgegebenen »gewünschten« Spannungszustand vorstellen, die durch keine Geometrie vereinbar sind. Umgekehrt gibt es auch Fälle einer mehrfachen Lösung, wie beispielsweise zwei Seifenhautflächen innerhalb des gleichen Drahtrahmens.

Mit den direkten Methoden lassen sich »spannungsoptimale« Strukturen entwerfen, also beispielsweise Seifenhäute als Membranen gleicher Spannung, Türme mit konstanter Spannung im Schaft oder auch Fachwerkstrukturen, bei denen die einzelnen Elemente bestimmte Spannungsvorgaben wie »Nur Zug«, »Nur Druck« usw. erfüllen. Zu sehr interessanten Lösungen führt die Anwendung der direkten Methoden natürlich beim Entwurf von Betonschalen, da man mit ihnen sehr homogen ausgenutzte Strukturen entwerfen kann und damit zu einer ideal auf die Eigenschaften des Werkstoffes abgestimmten Tragwerksform findet [6].

Die Formfindung ist der Hauptaspekt der Software „formfinder“ [8]. Formaktive Strukturen können durch herkömmliche 3d-Programme nicht erzeugt werden. Die durch „formfinder“ berechnete Form basiert auf der Kraft-Dichte-Methode und stellt sich durch mehrere Faktoren ein. Diese Software ist auch in einer freien Version erhältlich.

### **3 Betontechnologische Grundlagen von UHPC**

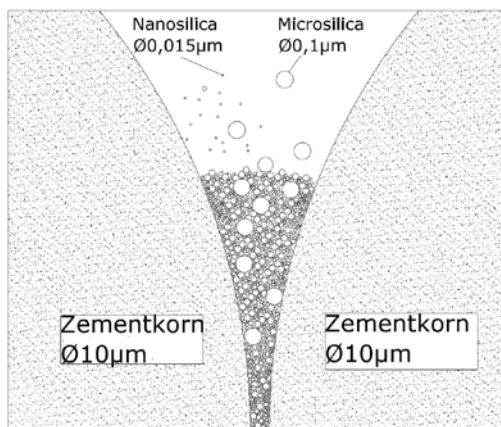
Die Leistungsfähigkeit von UHPC wird im Wesentlichen durch folgende betontechnologische Maßnahmen erreicht:

- Auswahl einer geeigneten Zementsorte
- Zugabe von reaktiven und inerten Zusatzstoffen (z.B. Quarzmehl, Microsilica)
- Reduktion des Größtkorns der Gesteinskörnung (üblicherweise < 1mm)
- Limitierung der Menge an Gesteinskörnung (üblicherweise < 400 l/m<sup>3</sup> Beton)
- Optimierung der Packungsdichte der trockenen Ausgangsstoffe
- Reduktion des Wasser-Zement-Werts auf < 0,3 mit Hilfe von Hochleistungsfließmitteln.

Durch den geforderten niedrigen w/z-Wert sind grundsätzlich Zementsorten mit geringem Wasseranspruch zu bevorzugen. Es kommen daher nur einige Typen von Portlandzement, Portlandhüttenzement und Hochofenzement in Frage.

Inerte Zusatzstoffe, wie Gesteinsmehle (insbesondere Quarzmehle), werden hauptsächlich als Zementersatz zugegeben. Ein zu hoher Gehalt an Zementstein bewirkt große Schwindverformungen im Beton. Es lässt sich ein beachtlicher Teil des Zements durch Quarzmehl ersetzen, ohne dass die Festigkeit des Beton wesentlich abnimmt.

Als reaktiver Zusatzstoff wird meist Microsilica verwendet. Microsilica (Silicastaub) besteht aus amorphem Siliziumdioxid und fällt bei der Ferrosiliziumherstellung aus dem Rauchgas an. Die durchschnittliche Partikelgröße ist um ein vielfaches kleiner als die Zementkörner (Abbildung 5).



**Abbildung 5: Größenunterschied zwischen Zement und Micro- bzw. Nanosilica [9]**

Die Wirkungsweise von Microsilica im Beton beruht auf einem physikalischen und einem chemischen Effekt. Der physikalische Effekt besteht darin, dass die feinen Microsilica-Partikel die Hohlräume zwischen den Zementkörnern ausfüllen (Microfüller-Effekt). Der chemische Effekt ergibt sich dadurch, dass Microsilica ein hochreaktives Puzzolan ist. Beim Erhärten bildet der Zement gemeinsam mit Wasser Calcium-Silikat-Hydratphasen aus. Diese sind für die Festigkeit des Zementsteins maßgebend. Daneben wird aber auch Calciumhydroxid gebildet (Abbildung 6). Das Microsilica reagiert mit diesem Calciumhydroxid (puzzolanischer Effekt) und es werden weitere Calcium-Silikat-Hydratphasen gebildet (Abbildung 7). Beide Effekte zusammen ergeben daher ein besonders dichtes Gefüge ohne Schwachstellen mit hoher Festigkeit und Widerstandsfähigkeit.

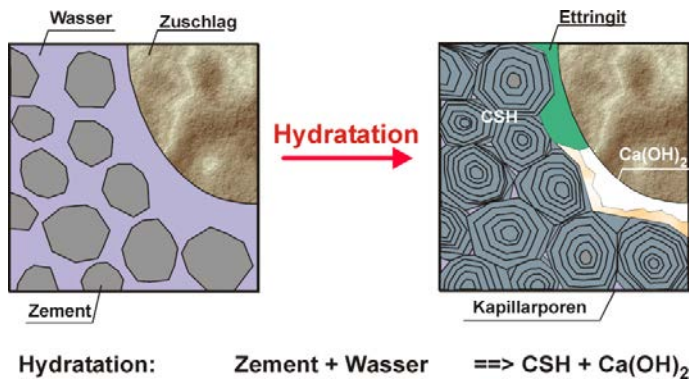


Abbildung 6: Hydratation von Normalbeton [9]

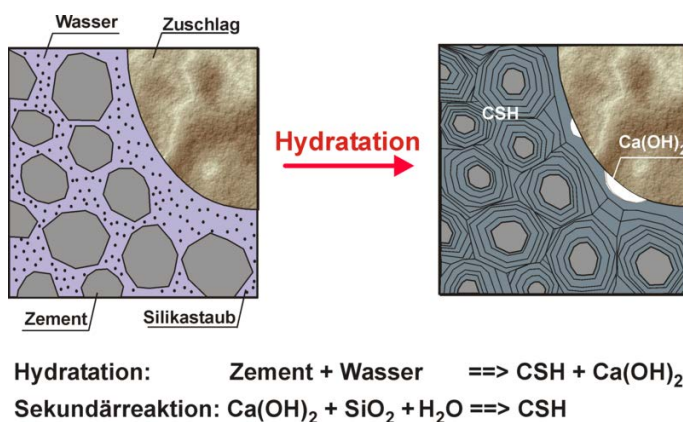
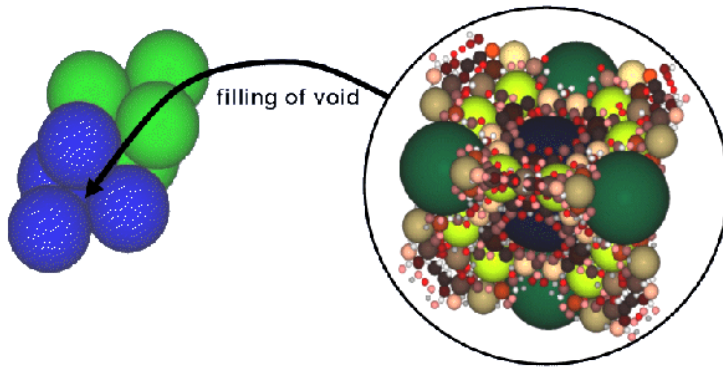


Abbildung 7: Hydratation von UHPC [9]

Als Gesteinskörnung kommen natürlich vorkommenden Sande mit hoher Gesteinsfestigkeit in Frage, die auch die Bildung einer dichten und festen Überganszone zwischen Gesteinskorn und Bindemittelmatrix gewährleisten. In Hinblick auf eine fließfähige Konsistenz des Betons sind runde Gesteinskörnungen kantigen zu bevorzugen. Während die Begrenzung des Größtkorns eine Frage der Homogenität ist, wirkt sich die Sandmenge auf die Bindemittelschichtdicke und in weiterer Folge auf die Festigkeit aus. Je geringer diese Schichtdicke ist, desto höher ist die Festigkeit. Allerdings darf diese einen kritischen Wert nicht unterschreiten, da es sonst zu festigkeitsmindernden Verarbeitungsporen kommen kann und die Konsistenz verschlechtert wird.

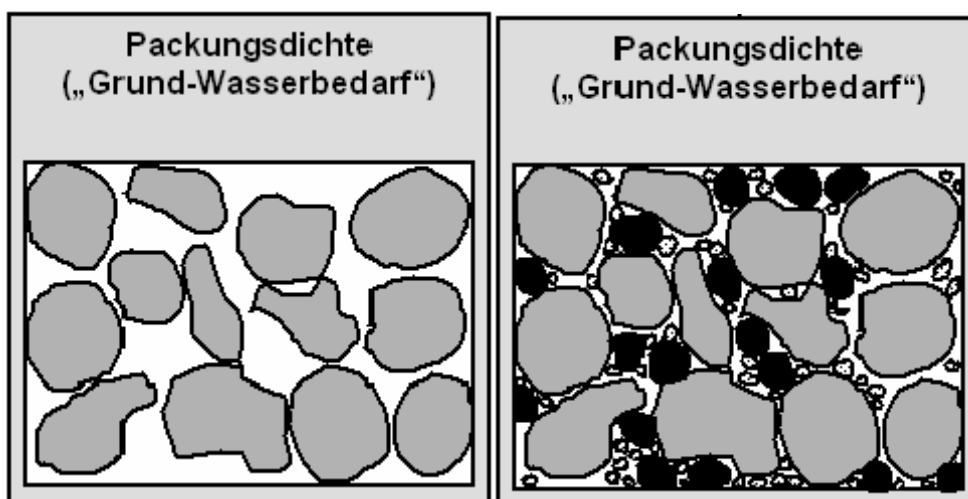
Ein Hauptaspekt beim Entwurf einer UHPC-Mischung ist es, eine möglichst hohe Packungsdichte der trockenen Ausgangsstoffe zu erreichen. Unter Beachtung der Partikelgrößenverteilung der einzelnen Komponenten ist es möglich, eine Zusammensetzung mit einer optimalen Packungsdichte zu finden. Natürlich müssen dabei aber auch betontechnologische Zusammenhänge beachtet werden. So sind etwa die Verhältnisse der

einzelnen Komponenten zueinander nur in bestimmten Grenzen variierbar. Erscheint die Packungsdichte unter diesen Randbedingungen zu gering, so können noch die Ausgangsstoffe variiert werden. Speziell Quarzmehle sind in verschiedenen Mahlfineinheiten und Partikelgrößenverteilungen erhältlich. Optimal aufeinander abgestimmte Komponenten ergeben in der richtigen Kombination eine optimale Packungsdichte (Abbildung 8).



**Abbildung 8: Optimierung der Packungsdichte [10]**

Eine optimale Packungsdichte führt nicht nur zu einem homogenen und dichten Betongefüge sondern verringert auch wesentlich den Wasserbedarf der Mischung und beeinflusst auf diese Weise auch die Verarbeitbarkeit des Frischbetons erheblich. Da die Zwickel zwischen den einzelnen Körnern bei einer hohen Packungsdichte durch kleinere Körner ausgefüllt werden, müssen diese Zwickel nicht mit Wasser ausgefüllt werden (Abbildung 9). Das Wasser steht dann in vermehrtem Maße zur Ausbildung des notwendigen Wasserfilms rund um die Partikel zur Verfügung.



**Abbildung 9: Packungsdichte und Wasserbedarf (links hoher Wasserbedarf, rechts niedriger Wasserbedarf) [10]**

Trotz aller bislang angestellten Überlegungen reicht die Wassermenge beim geforderten, niedrigen w/z-Wert nicht aus, um einen Beton mit zufriedenstellenden

Verarbeitungseigenschaften herzustellen. Es ist daher unumgänglich, ein Hochleistungsfließmittel einzusetzen. Grundsätzlich gibt es verschiedene Arten von Fließmitteln, wobei sich bei der Herstellung von UHPC die Verwendung von Fließmitteln auf Basis von Polycarboxylatethern (PCE) als besonders günstig herausgestellt hat. Diese Fließmittel sind im Gegensatz zu Fließmitteln auf Basis von Polynaphthalinsulfonaten (PNS) oder Polymelaminsulfonaten (PMS) besonders wirksam hinsichtlich Wassereinsparung und Konsistenzerhaltung über einen längeren Zeitraum. Die längere Verarbeitungszeit ist dabei in der längeren Verhinderung der Bildung von Ettringit begründet. Außerdem können diese Fließmittel trotz geringer Dosierung eine größere Verflüssigung des Frischbetons erreichen, als die Fließmittel auf Basis anderer Wirkstoffe. Grund dafür ist eine Kombination aus sterischer und elektrostatischer Abstoßung. Die Wirkstoffmoleküle des Fließmittels bzw. die Hauptketten der Fließmittelmoleküle adsorbieren bevorzugt auf den polarisierten Zementoberflächen und verändern das Oberflächenpotential in Richtung negativer Werte stärker als Fließmittel mit anderen Wirkstoffen. Dadurch kommt es zu einer Ladungsumkehr und in weiterer Folge zu einer elektrostatischen Abstoßung der Zementpartikel. Eine sterische Abstoßung wird durch die im Polycarboxylatether gebundenen Polyethergruppen bzw. durch die langen Seitenketten der Fließmittelmoleküle, die als Abstandhalter fungieren, bewirkt. Erst durch die Kombination dieser beiden Reaktionen kommt es zu einer Verhinderung der Agglomeration von Zementpartikeln [11]. Bei der Wahl des Fließmittels ist dementsprechend auf den verwendeten Zement Rücksicht zu nehmen.

#### **4 Anwendungen von UHPC**

Die bekanntesten Anwendungen von UHPC sind eine Reihe von Brücken. Die Sherbrooke-Fußgängerbrücke in Kanada wurde 1997 hergestellt [12]. Im Jahre 2007 wurde die Gärtnerplatzbrücke in Kassel – ebenfalls eine Fußgängerbrücke – eröffnet [13]. Eine weitere Fußgängerbrücke wurde in Lienz, Osttirol errichtet [14]. Die bis jetzt größte Brücke aus UHPC wurde 2010 in Völkermarkt eröffnet. Die Wild-Brücke ist auch für Fahrzeuge befahrbar [15]. Beim Umbau des Kernkraftwerkes Cattenom (Frankreich) wurde UHPC für die Kühltürme verwendet. UHPC wird auch für schlanke, hochbelastete Stützen im Hochhausbau verwendet und generell für filigrane Tragkonstruktionen. Daneben gibt es Spezialanwendungen, wie z.B. Drucklager aus UHPC für Querkraftanschlüsse oder etwa als verlorene Bohrspitzen im Spezialtiefbau. Aufgrund seiner Dichtigkeit und seiner hervorragenden Sichtbetoneigenschaften werden aus UHPC auch Behälter, Fassadenelemente, Betonmöbel, Bad- und Küchenausstattungen und sogar Tableware hergestellt. Architektonische Akzente lassen sich mit UHPC hervorragend umsetzen.

## 5 Die Anwendung von UHPC als Spritzbeton

Um nun einen UHPC als Spritzbeton anwenden zu können, empfiehlt es sich entsprechend eigener Versuche, eine fließfähige Konsistenz des Betons einzustellen, um eine gute Pump- und Spritzfähigkeit zu gewährleisten. Daraus folgt auch, dass UHPC im Nassspritzverfahren verarbeitet wird. Da aber der fließfähige Beton nach dem Auftrag auf geneigte Flächen sofort abrinnen würde, ist der Einsatz eines Erstarrungsbeschleunigers zwingend notwendig. Solche Beschleuniger bestehen vorwiegend aus Salzen, die in wässriger Lösung alkalisch reagieren, z.B. bestimmten Carbonaten (Natriumcarbonat), Aluminaten oder Silikaten. Die Wirkung eines Erstarrungsbeschleunigers setzt unmittelbar nach dem Kontakt mit dem Beton ein. Die Dosierung erfolgt daher über die Druckluft des Spritzgerätes direkt über die Luftdüse. Der Beschleuniger kommt somit erst im Spritzstrahl mit dem Beton in Berührung. Für die Förderung und Dosierung des Beschleunigers ist eine eigene Dosierpumpe erforderlich. Der Beton selbst kann mit herkömmlichen Mörtel- oder Feinputzpumpen (meist Schneckenpumpen) gefördert werden und mit den dazu passenden Spritzgeräten aufgetragen werden. Diese Putz- und Mörtelspritzgeräte unterscheiden sich konstruktiv und in der Größe von Betonspritzgeräten für herkömmlichen Spritzbeton – diese sind schlicht zu groß für die Verwendung mit UHPC. Für Betonsanierungsarbeiten sind aber auch kleinere Betonspritzgeräte mit geringeren Düsendurchmessern erhältlich, die bestens geeignet sind.

Die Bewehrung des Spritzbetons kann herkömmlich mit Bewehrungsstahl oder Textilgeweben sowie durch Fasern im Beton erfolgen. Eine Kombination ist ebenfalls möglich. Beim Einsatz von Fasern ist auf die Pump- und Spritzfähigkeit des Faserbetons zu achten. Beispielsweise ist die Verwendung von Microstahlfasern, Glasfasern, Carbonfasern oder HD-PE-Fasern denkbar, um nur einige zu nennen. Der Einsatz von Textilgeweben (z.B. Glas- oder Carbonfasergittermatten) hat den Vorteil, dass diese Gittermatten aufgrund ihrer hohen Zugfestigkeit sehr dünn sind und sich hervorragend in eine dünne Betonschale einarbeiten lassen. Bei Bewehrungsstählen hingegen können sich je nach statischen Anforderungen zu große Querschnitte ergeben, wobei auch noch eine Mindestüberdeckung einzuhalten ist. Extrem dünne Schalen könnten so oft nicht realisiert werden.

Im Rahmen der Modul-Lehrveranstaltung „Experimenteller Hochbau“ wurde den teilnehmenden Architekturstudenten vorgegeben, leichte Formen und Skulpturen frei nach dem Motto „Aufblasen – Aufhängen – Aufspannen – Auffalten“ zu entwickeln. Darunter waren im Wesentlichen pneumatische aufgeblasene Formen und vorgespannte segelartige Formen aus Folien und Geweben zu verstehen. Die derart hergestellten Formen wurden dann im Betonlabor des Forschungsbereiches für Baustofflehre mit einem speziell für diese Anwendung modifizierten UHPC bespritzt (Abbildung 12).

Die Ausnahme dabei bildeten die Objekte „Walskelett“ und „Überdachung Haltestelle“. Die Haltestelle wurde nicht aus einem Pneu hergestellt, sondern mit einer aufgespannten Membrane (Abbildung 10).



**Abbildung 10: Aufgespannte Membrane als Schalung**

Beim Walskelett dienten auf eine Unterkonstruktion befestigte Schläuche als Schalung (Abbildung 11). Der Beton wurde eingepumpt und die Schläuche wurden nach dem Erhärten des Betons entfernt.



**Abbildung 11: Walskelett auf Unterkonstruktion**

	
<p><b>„Inside/Outside“</b></p>	<p><b>„Walskelett“</b></p>
	
<p><b>„Überdachung Haltestelle“</b></p>	<p><b>„pneUHPC (Säule)“</b></p>
	
<p><b>„Sitro“</b></p>	<p><b>„Baum der Sinne“</b></p>

Abbildung 12: Auswahl einiger im Rahmen der Lehrveranstaltung „Experimenteller Hochbau“ hergestellter Objekte [16]

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Idee, pneumatische Schalungen zur Herstellung von Betonschalen zu verwenden, ist nicht neu. Bereits Mitte des 20. Jahrhunderts wurden so Schalen mit über 100m Durchmesser errichtet. Für den Entwurf geeigneter Formen stehen heutzutage entsprechende Methoden und Werkzeuge zur Verfügung, die es erlauben, aus einer enormen Formenvielfalt zu schöpfen. Der relativ neue und leistungsfähige Ultra-Hochleistungsbeton kombiniert mit innovativen Bewehrungssystemen macht es möglich, ansprechende Skulpturen und Schalentragwerke mit relativ geringem Aufwand herzustellen.

### Literaturverzeichnis

- [1] N. N., „Casting pipes around rubber core,“ *Concrete and constructional engineering*, pp. 568-569, November 1938.
- [2] W. Neff, „Verfahren zur Herstellung von schalenförmigen Baukonstruktionen auf einer inneren, aufblasbaren Form,“ *Auslegeschrift 052103, Deutsches Patentamt*, März 1959.
- [3] H.-J. Weisser, Ein Beitrag zur Berechnung von Membrantragwerken mit viskoelastischen Werkstoffverhalten, Diplomarbeit am Institut für Massivbau der Universität Stuttgart, 1983.
- [4] H. Heifetz, „Progres realises dans le damaine des coffrages gonfiabiles,“ *Bastiment International*, Jan/Feb 1970, Paris.
- [5] T. Herzog, Pneumatische Konstruktionen, Stuttgart: Hatje-Verlag, 1976.
- [6] W. Sobek, „Pneu und Schale: Betonschalen und pneumatisch vorgespannte Membranen,“ *Deutsche Bauzeitung* 124, Nr. 7, pp. 66-74, 1990.
- [7] W. Sobek, Auf pneumatisch gestützten Schalungen hergestellte Betonschalen, Stuttgart, 1987.
- [8] „www.formfinder.at,“ [Online]. [Zugriff am 10. September 2012].
- [9] U. Schneider, L. Roszbacher und J. Kirnbauer, Einfluss unterschiedlicher Nachbehandlungsmethoden auf ausgewählte Eigenschaften vakuumgemischter ultrahochfester Betone, TU Wien: Institutsheft 16, Schriftenreihe des Instituts für Hochbau und Technologie - Forschungsbereich für Baustofflehre, Werkstofftechnologie und Brandsicherheit, 2010.

- [10] „[http://www.uni-kassel.de/hrz/db4/extern/wdbubc/index\\_was\\_ist\\_uhpc\\_de.php](http://www.uni-kassel.de/hrz/db4/extern/wdbubc/index_was_ist_uhpc_de.php),“ [Online]. [Zugriff am 11 September 2012].
- [11] A. Stangl, Optimierung der Packungsdichte und Bestimmung der minimal erforderlichen Wasserfilmdicke zur Herstellung von Ultra - Hochleistungsbeton, Diplomarbeit am Institut für Hochbau und Technologie - Forschungsbereich für Baustofflehre, Werkstofftechnologie und Brandsicherheit, TU Wien, 2011.
- [12] „Sherebrooke-Bridge,“ [Online]. Available: [http://www.ductal-lafarge.com/wps/portal/ductal/2\\_3\\_1-Detail?WCM\\_GLOBAL\\_CONTEXT=/wps/wcm/connectlib\\_ductal/Site\\_ductal/English\\_version/Page.Navigation.Structural.Footbridges/KeyProjectDuctal%20Page/KeyProjectDuctal\\_1278712507168&Rdt=On](http://www.ductal-lafarge.com/wps/portal/ductal/2_3_1-Detail?WCM_GLOBAL_CONTEXT=/wps/wcm/connectlib_ductal/Site_ductal/English_version/Page.Navigation.Structural.Footbridges/KeyProjectDuctal%20Page/KeyProjectDuctal_1278712507168&Rdt=On). [Zugriff am 19 September 2012].
- [13] „Gärtnerplatzbrücke,“ [Online]. Available: <http://www.gaertnerplatzbruecke.de/>. [Zugriff am 19 September 2012].
- [14] M. Reichel und J. Duregger, „Fußgängerfertigteilebrücke aus ultrahochfestem Faserbeton in Lienz,“ *Zement + Beton, Brückenbau*, pp. 16-21, 2010.
- [15] „Wild-Brücke,“ [Online]. Available: <http://www.wild.raum.at/>.
- [16] J. Kirnbauer und K. Deix, „UHPC als Spritzbeton zur Herstellung von luftig-leichten Skulpturen,“ *VÖZ Kolloquium 2011 Forschung & Entwicklung für Zement und Beton, Kurzfassungen der Beiträge*, 2011.