

Jun.-Prof. Dr.-Ing. Christian Kohlmeyer

# Beton – Werkstoff für Höchstleistungen

## Eine neue Betongeneration eröffnet eine Vielfalt von Möglichkeiten

Zahlreiche Forscher beschäftigen sich weltweit damit, die Eigenschaften von Beton, wie Druckfestigkeit, Duktilität, Dauerhaftigkeit und auch Verarbeitbarkeit zu verbessern sowie Zusammenhänge zu ergründen. Die Ziele sind dabei zum einen in Anwendungsgebiete vorzudringen, die bisher anderen Werkstoffen vorbehalten waren und zum anderen neue Konstruktionen und Bauweisen zu ermöglichen.



Bild 1. Gärtnerplatzbrücke über die Fulda in Kassel mit einem Obergurt aus ultrahochfestem Beton

In der Praxis werden in den meisten Fällen normalfeste Betone verwendet. Ab der Festigkeitsklasse C55/67 bis zur Festigkeitsklasse C100/115 spricht man von hochfestem Beton und alles was darüber hinaus geht wird mit ultrahochfest bezeichnet.

Während normal und hochfeste Betone genormt sind, existieren für die ultrahochfesten Betone (UHFB) mit Druckfestigkeiten zwischen rund 150 und 250 N/mm<sup>2</sup> derzeit in Deutschland noch keine Normen oder Richtlinien. Dement-

sprechend ist für deren Verwendung, aber auch für die Verwendung von C90/105, C100/115, LC70/77 und LC80/88, im bauaufsichtlichen Bereich eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung oder eine Zustimmung im Einzelfall erforderlich.

Neben dem Begriff „Ultrahochfester Beton“ gibt es eine Reihe weiterer Begriffe, die synonym verwendet werden. So zum Beispiel: Reactive Powder Concrete (RPC), Ultra High Strength Concrete (UHSC) oder Ultra High Performance Concrete (UHPC).

Der Begriff Hochleistungsbeton wird in der Regel dann verwendet, wenn bei der Anwendung nicht die Festigkeit im Vordergrund steht, sondern eine andere besondere Eigenschaft, wie z.B. hohe Beständigkeit gegen chemische und physikalische Angriffe. Die Voraussetzung hierfür ist auch wieder das besonders dichte und feste Gefüge. Die Bezeichnung Spezialbeton schließt auch selbstverdichtende Betone (SVB) und Sichtbeton mit ein [1].

Die Anstrengungen, die Festigkeit des Betons zu steigern, reichen weit zurück. Bereits 1954 erzielte Graf [2] unter Laborbedingungen Druckfestigkeiten von 75 N/mm<sup>2</sup>. 1966 erreichte ebenfalls unter Laborbedingungen Walz [3] Druckfestigkeiten bis 140 N/mm<sup>2</sup>. Allerdings wurde erst 1990 beim Bau des Trianon-Hochhauses in Frankfurt das erste Mal hochfester Beton (damals ein B 85) für hochbelastete Stützen und Wände eingesetzt.

In Sherbrooke (Kanada) wurde 1997 eine Fußgängerbrücke aus ultrahochfestem Beton mit einer Festigkeit von 200 N/mm<sup>2</sup> errichtet. 2002 folgte eine weitere Fußgängerbrücke in Seonyu (Südkorea) mit der gleichen Festigkeit. Die Spannweiten betragen 60 bzw. 120 m.

Die Gärtnerplatzbrücke in Kassel ist wohl die bekannteste deutsche Brücke aus ultrahochfestem Beton. Diese Fußgängerbrücke (Bild 1) überquert die Fulda mit einer Gesamtlänge von 133 m. Eine weitere Besonderheit dieser Brücke ist, dass die Übertragung der Schubkräfte zwischen den Fertigteilen des Obergurts und des Rückendecks durch Verkleben mit einem Epoxidharzklebstoff sichergestellt wird [4].

#### Wie lassen sich diese hohen Festigkeiten erzielen?

Der Grundgedanke ist, das Gefüge des Zementsteins zum einen möglichst hohlraumfrei und damit möglichst dicht herzustellen und zum anderen den Verbund zwischen Zementstein und Zuschlägen zu verbessern.

Dies wird durch die folgenden Maßnahmen erreicht:

- **Niedriger Wasserzementwert**  
Während beim normalfesten Beton der Wasserzementwert zwischen 0,6 und 0,4 liegt, werden für hochfeste Betone Wasserzementwerte unter 0,25 angestrebt. Ziel ist, das überschüssige Wasser und die dadurch beim Verdampfen entstehenden Kapillarporen auf ein Minimum zu reduzieren.
- **Zugabe von Zusatzmitteln**  
Die Konsistenz und damit die Verarbeitbarkeit kann durch den Einsatz hoch wirksamer Betonzusatzmittel sichergestellt werden.
- **Zugabe von Zusatzstoffen**  
Durch feine, sowohl inerte als auch reaktive Zusatzstoffe wird die Porosität verringert und die Festigkeit gesteigert. Die inerten Zusatzstoffe, wie Gesteinsmehle (Quarzmehle) erhöhen die Packungsdichte. Als reaktive Zusatzstoffe werden puzzolanische oder latent-hydraulische Zusatzstoffe, wie Trass, Flugasche oder Silikastaub verwendet.

- **Zugabe von Fasern**

Beim normalfesten Beton stellen die Festigkeit des Zementsteins und dessen Verbindung mit den Zuschlägen die Schwachstellen dar. Unter Druckbeanspruchung findet dort eine fortschreitende Rissbildung statt, die zur allmählichen Entfestigung führt. Hieraus resultiert auch der typische parabelförmige Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Linie. Beim ultrahochfesten Beton ist der Zementstein in der Regel fester als der Zuschlag und die Haftung daran so gut, dass die Spannungs-Dehnungs-Linie nahezu linear verläuft und die gesamte im Material gespeicherte Energie erst beim Bruch schlagartig frei wird, was zu einem explosionsartigen Versagen führt. Um dieses unerwünschte spröde Verhalten zu vermeiden, werden dem Beton Fasern zugegeben, welche eine gewisse Duktilität im Nachbruchbereich sicherstellen.

Durch die hohe Druckfestigkeit lassen sich Stützenquerschnitte und die Druckzonenflächen von Biegebalken entsprechend reduzieren. Damit können solche Bauteile bei gleicher Tragfähigkeit filigraner ausgeführt werden.

Gerade in Kombination mit Stahl lassen sich die beiden Werkstoffe zu hybriden Tragwerken verbinden. Ein Beispiel hierfür ist das Vordach des ETA-Gebäudes auf dem Campus der Technischen Universität Kaiserslautern (Bild 2). Zur Aufnahme der Zugkräfte dienen die dünnen Stahlstege, während die 4 cm dicke Platte aus ultrahochfestem Beton die Druckkräfte abträgt.



Bild 2. Vordach des ETA-Gebäudes der TU Kaiserslautern

Durch die hohe Packungsdichte des Materials lässt sich auch eine hohe Dichtigkeit und Dauerhaftigkeit erzielen, was den Werkstoff als Abdichtung und Beschichtung sowohl für den Neubau als auch für die Sanierung attraktiv macht. Bei dem eben erwähnten Vordach konnte deshalb auf eine zusätzliche Abdichtung verzichtet werden.

Die Firma DENSIT aus Dänemark hat das Potential dieses Werkstoffes schon vor mehr als 25 Jahren erkannt und bietet Bodensysteme für Industrieanlagen an. Lafarge und Dyckerhoff bieten Fertigmischungen, wie Ductal® bzw. Nanodur® an, mit denen sich u. a. hochwertige Oberflächen für den Sichtbetonbereich erzielen lassen.

In den letzten Jahren wird in Deutschland auf breiter Basis rund um das Thema Hochleistungsbetone geforscht. Seit 2004 läuft das DFG-Schwerpunktprogramm „Nachhaltiges Bauen mit ultrahochfestem Beton“, in das fast alle deutschen Universitäten mit Massivbau- und Baustofflehrstühlen eingebunden sind. Im Rahmen dieses Programms wurden sowohl das Bauteilverhalten als auch das Material intensiv untersucht. In dem nun folgenden DFG-Schwerpunktprogramm „Leicht Bauen mit Beton – Grundlagen für das Bauen der Zukunft mit bionischen und mathematischen Entwurfsprinzipien“, dessen erste Förderperiode voraussichtlich Mitte 2011 beginnt, stehen materialgerechte Konstruktionen im Fordergrund.

Gleich zwei DFG-Sonderforschungsbereiche, SFB 532 in Aachen (Thema: Textilbewehrter Beton – Grundlagen für die Entwicklung einer neuartigen Technologie) und SFB 528 in Dresden (Textile Bewehrungen zur bautechnischen Verstärkung und Instandsetzung) widmen sich der Kombination von Hochleistungsbeton und textiler Bewehrung.

Die Aktualität des Themas Hochleistungsbeton griff auch der Deutsche Ausschuss für Stahlbeton DAfStb auf, dessen 51. Forschungskolloquium am 11. und 12. November 2010 im Fraunhofer Tagungszentrum in Kaiserslautern ausgerichtet wurde.

So stand dieses Forschungskolloquium, das als Doktorandensymposium gestaltet war, unter dem Leitthema „Beton – Werkstoff der Superlative“.

Junge, deutschsprachige Wissenschaftler waren aufgerufen, ihre neuesten Forschungsergebnisse rund um den Werkstoff Beton zu präsentieren. Dabei standen werkstofftechnologische Themen genauso im Fokus wie Entwurf, Konstruktion und Bemessung von tragenden Bauteilen aus Beton.

Zugelassen waren alle Doktoranden, deren mündliche Prüfung nicht vor dem 30. April 2010 stattgefunden hatte. Über 70 Abstracts wurden termingerecht eingereicht.

Schließlich kamen mehr als 180 Teilnehmer zu der zweitägigen Tagung nach Kaiserslautern.

## Über den Autor

Jun.-Prof. Dr.-Ing. Christian Kohlmeyer wurde im Mai 2009 auf die Juniorprofessur „Konstruieren mit Hochleistungsbetonen“ an der TU Kaiserslautern berufen. Die Juniorprofessur wird von der Carl-Zeiss-Stiftung gefördert.



Herr Kohlmeyer (geb. 1971 in Kusel) promovierte 2007 im Fachbereich Architektur/Raum- und Umweltplanung/Bauingenieurwesen (A/RU/BI) der TU Kaiserslautern zu dem Thema „Beitrag zum Tragverhalten von Verbundträgern im Bereich von großen Stegöffnungen unter besonderer Berücksichtigung der Querkrafttragfähigkeit des Stahlbetongurtes“.

Nach seiner Zeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktion arbeitete Herr Kohlmeyer als Tragwerksplaner in einem Saarbrücker Ingenieurbüro, bevor er Ende 2007 zusammen mit zwei Partnern in Kaiserslautern ein Ingenieurbüro für Tragwerksplanung, die IG Bauplan GmbH, gründete.

In der Lehre vertritt er das zentrale Fach Baukonstruktion für Bauingenieure, das im Vordiplom den Studierenden eine Zusammenfassung der wichtigsten Themenbereiche des Konstruktiven Ingenieurbaus bietet. Eine Wahlpflichtveranstaltung zum Thema Hochleistungsbetone, die im Vertiefungsstudium angesiedelt sein soll, ist in Vorbereitung.

In der Forschung haben sich bereits erste Erfolge eingestellt. So wurde sein erstes Forschungsvorhaben im Dezember 2009 bewilligt. Das Vorhaben zum Thema „Sandwich-Wandelemente mit Deckschichten aus hochfestem Beton“ wird im Rahmen des Pilotvorhabens „Innovation und Promotion“ gefördert und ist auf drei Jahre angelegt.

Die Deckschichten der dabei zu untersuchenden Sandwichelemente sind rund 10 mm dick und mit Matten aus Draht oder Carbon bewehrt (Bild 3). Den Kern bildet extrudiertes Polystyrol (XPS), ein handelsüblicher Wärme-

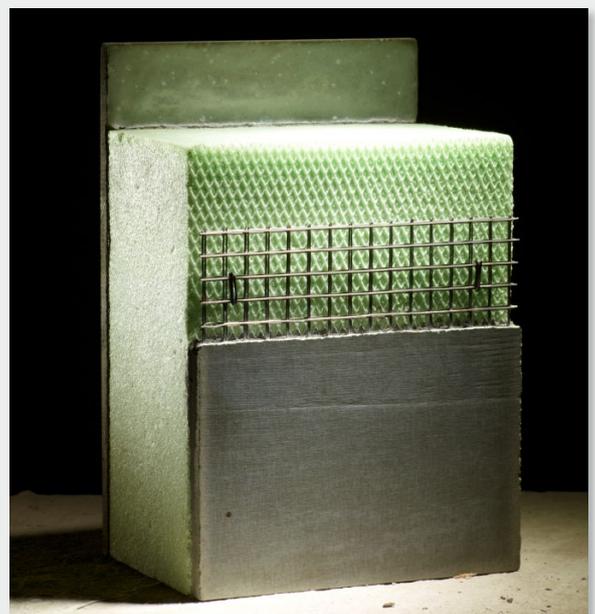


Bild 3. Sandwichelement aus mikrobewertem hochfesten Beton und extrudiertem Polystyrol

Umrahmt wurde das Programm durch die Eröffnungsveranstaltung und das Abendprogramm auf dem Betzenberg.

Um den Ehrgeiz der Doktoranden anzustacheln, fanden zwei Wettbewerbe statt: Zum einen die „Wissenschaftsreportage“ und zum anderen der „UHPC-Wettbewerb“.

Bei der Wissenschaftsreportage waren die Doktoranden aufgefordert, zusammen mit der für den Tagungsband bestimmten Langfassung, einen Textbeitrag einzureichen, in dem das jeweilige Thema kompetent, spannend und allgemeinverständlich auf den Punkt gebracht werden sollte.

### UHPC-Wettbewerb

Gegenstand des UHPC-Wettbewerbs, der unter dem Motto stand: „Wer baut die Platte mit der ultra high Performance“, war es, eine punktgelagerte Platte aus Hochleistungsbeton anzufertigen, die – beansprucht durch eine Flächenlast – bei geringem Gewicht eine möglichst hohe Tragfähigkeit erzielt. Alle Hochschulen waren im Vorfeld eingeladen worden, entsprechende Probekörper einzureichen, die vor dem Symposium in einem Unterdruckprüfstand (Bild 5) an der TU Kaiserslautern bis zum Bruch belastet wurden.

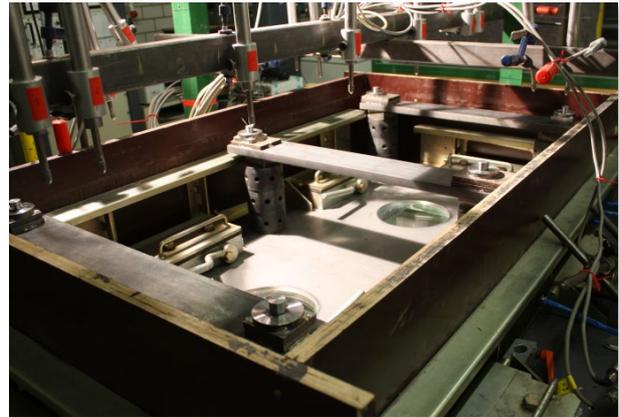


Bild 5. Unterdruckprüfstand

Die Platten, die keine Öffnungen aufweisen und an der Oberseite eben sein sollten, mussten einen rechteckigen Grundriss mit den Abmessungen von genau 1400 mm x 800 mm aufweisen. Die Plattendicke an den Rändern durfte nicht weniger als 5 mm betragen. Die Platten wurden auf sechs Punktlagern zwangsfrei gelagert. Die kreisförmigen Auflagerflächen hatten jeweils einen Durchmesser von 20 mm. Die Plattenränder wurden nicht gestützt.

dämmstoff. Im Rahmen des Forschungsvorhabens soll zunächst das Tragverhalten solcher Konstruktionen umfassend erforscht werden, um so Unternehmen die Möglichkeit zu schaffen, auf der Grundlage dieser Ergebnisse, neue Produkte zu entwickeln. Kooperationspartner in diesem Projekt ist die BASF und die Firma RETT, ein mittelständisches Unternehmen aus dem Kreis Kaiserslautern.

Im Rahmen der Forschungsinitiative „Zukunft Bau“ des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung hat er zusammen mit Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schnell im Juli 2010 ein Projekt mit dem Thema „Untersuchungen zum Tragverhalten und zur Tragfähigkeit von Mikroverbundträgern mit Stegöffnungen“ beantragt.

Zurzeit ist ein Forschungsantrag mit dem Thema „Konstruktion und Optimierung von Klebverbindungen für Platten- und Scheibenbauteile aus ultrahochfestem Beton“, in der Begutachtung, den Kohlmeyer zusammen mit dem Fraunhofer ITWM Kaiserslautern im Rahmen des DFG Schwerpunktprogramms „Leicht Bauen mit Beton – Grundlagen für das Bauen der Zukunft mit bionischen und mathematischen Entwurfsprinzipien (SSP 1542)“ im Oktober 2010 gestellt hat.

Unter dem Titel „Ein Raum im Weinberg“ setzt er zusammen mit Prof. Dirk Bayer und Prof. Bernd Meyerspeer aus dem Studiengang Architektur zurzeit ein konkretes Bauprojekt um. Dahinter steckt die Idee, eine Schutzhütte aus Betonfertigteilen zu entwerfen und zu bauen. Der Entwurf, der ausgewählt wurde und dessen Modell in Bild 4 dargestellt ist, sieht eine rautenförmige

Grundfläche von 7,5 x 2,5 m vor. Das Gebäude besteht aus 7 Fertigteilen aus hochfestem Beton, die durch Verkleben zusammengefügt werden. Das erste Bauteil, die Bodenplatte, wurde letztes Jahr im Labor für Konstruktiven Ingenieurbau an der TU Kaiserslautern betoniert. Die restlichen 6 Teile werden im Februar 2011 in einem Fertigteilwerk hergestellt.

Aufgestellt werden soll das Haus im Frühjahr 2011 in einem Weinberg bei Wörrstadt. Dieses Projekt wurde 2010 für den Innovationspreis des Bauforums Rheinland-Pfalz eingereicht und mit einer Auszeichnung prämiert.

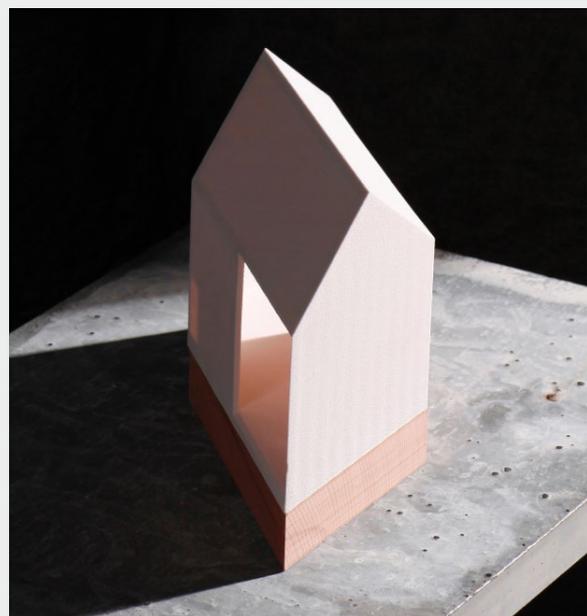


Bild 4. Modell des Weinberghauses

Die maximale Plattendicke war auf 25 mm und das Gewicht der Platte auf 30 kg begrenzt. Außerhalb des Betonquerschnittes geführte Bewehrungselemente waren nicht erlaubt.

Die Platten wurden durch Unterdruck gleichmäßig flächig belastet, wobei die Last kontinuierlich gesteigert wurde. Unterschritt das Eigengewicht die zugelassene Grenze von 30 kg, so wurde die angerechnete Traglast um den Faktor  $f = 30 \text{ kg}/(\text{Gewicht Versuchsplatte})$  erhöht.

Sieben Teams der Universitäten Braunschweig, Dresden, Duisburg-Essen, Hannover, Innsbruck und Kaiserslautern sowie der Fa. durcrete aus Limburg an der Lahn beteiligten sich mit insgesamt elf Platten an dem Wettbewerb. Zwei Probekörper konnten wegen Übergewichts nur außer Konkurrenz am Wettbewerb teilnehmen. Andere Platten waren erkennbar durch Schleifen auf das Maximalgewicht getrimmt worden.

Die insgesamt elf eingereichten Platten konnten in drei Konstruktionsarten untergliedert werden: zum einen vier massive Platten mit planparallelen Oberflächen, fünf Platten mit einem dünnen Plattenspiegel, der an den sechs Auflagerpunkten und örtlich dazwischen verstärkt oder gevoutet war, sowie zwei Sandwichplatten. Die jeweils dreilagigen Sandwichplatten hatten dünne UHPC-Deckschichten, die mit Carbonmatten bewehrt waren. Dabei wurde für die Dresdner Sandwichplatte Leichtbeton und für die Kaiserslauterer Version extrudiertes Polystyrol als Zwischenschicht verwendet. Als Bewehrung wurden weiterhin Mikromatten aus Stahl (Duisburg-Essen) oder dünne Stahlseile (Hannover und Fa. durcrete) eingesetzt.

Die „Traglast“ galt dann ausschreibungsgemäß als erreicht, wenn entweder ein Bruch eintrat (Biege- oder Durchstanzversagen) oder wegen Undichtigkeit der Platte infolge breiter Risse der Unterdruck nicht mehr aufrecht erhalten werden konnte.

Platten, die schon auf niedrigem Lastniveau undicht wurden, wurden mit Folie abgedichtet und weiter belastet. Dabei stellten sich teilweise sehr große Verformungen ein (Bild 6).

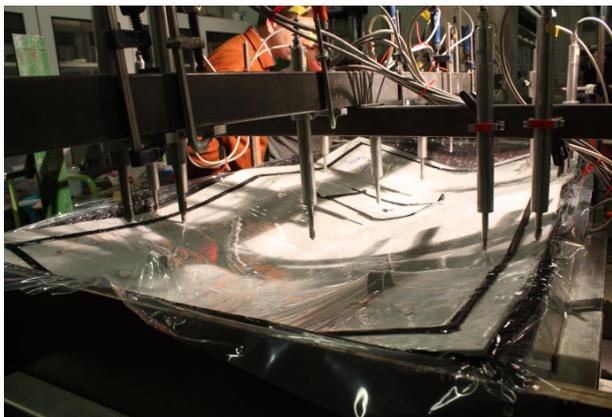


Bild 6. Stark verformte Platte im Unterdruckprüfstand



Bild 7. Dipl.-Ing. Johann G. Löwenstein überreicht den 1. Preis an Dipl.-Ing. Frank Schladitz M.Sc. von der TU Dresden

Die Versuche wurden im Vorfeld des Symposiums im Labor für Konstruktiven Ingenieurbau an der TU Kaiserslautern durchgeführt. Sieger des Wettbewerbs wurde das Team aus Dresden, dessen Platte Dresden II eine Traglast von 29,93 kN/m<sup>2</sup> erzielte. Auf den zweiten Platz kam die Projektgruppe aus Braunschweig (14,2 kN/m<sup>2</sup>) gefolgt von der Fa. durcrete (8,83 kN/m<sup>2</sup>). Die UHPC-Sandwichplatte der gastgebenden TU Kaiserslautern hatte außer Konkurrenz 31,83 kN/m<sup>2</sup> erreicht.

Die mit 2.000, 1.000 und 500 Euro dotierten Hauptpreise wurden von der Firma mb AEC Software GmbH aus Kaiserslautern gestiftet und von deren Geschäftsführer Johann Gottfried Löwenstein überreicht (Bild 7). Alle Sieger erhielten zusätzlich eine zweijährige kostenlose Mitgliedschaft im Deutschen Ausschuss für Stahlbeton.

Jun.-Prof. Dr.-Ing. Christian Kohlmeyer

Technische Universität Kaiserslautern  
Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktion

Konstruieren mit Hochleistungsbetonen  
Junior-Stiftungsprofessur der Carl-Zeiss-Stiftung

#### Literatur

- [1] Hillemeier, B. et al.: Spezialbetone. Betonkalender 2006, Band 1. Ernst & Sohn, Berlin, 2006
- [2] Graf, U.: Festigkeit und Elastizität von Beton mit hoher Festigkeit. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 113, Ernst & Sohn, Berlin, 1954.
- [3] Walz, K.: Beziehung zwischen Wasserzementwert, Normfestigkeit des Zements und Betondruckfestigkeit. Betontechnische Berichte 1970, Beton-Verlag.
- [4] Schmidt, M. et al: Fügen von Betonbauteilen aus UHPC durch Kleben. Beton- und Stahlbetonbau, Band 102, Heft 10, 2007, S. 681–690.

#### Weiterführende Literatur

- [5] Schmidt, M. et al: Sachstandsbericht Ultrahochfester Beton. 1. Auflage 2008, Herausgeber Deutscher Ausschuss für Stahlbeton DAfStb, Heft 561, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Wien, Zürich.