

Ultrahochfester Beton – Bemessung und Konstruktion

Ekkehard Fehling, Torsten Leutbecher
Universität Kassel

1 Einleitung

Ultrahochfester Beton ermöglicht zum einen filigranere Konstruktionen als im herkömmlichen Massivbau, was eine geänderte Denkweise bei Entwurf und Konstruktion fordert, zum Beispiel hinsichtlich der Verbindungstechniken für Bauteile mit geringen Querschnittsabmessungen. Zum anderen darf man sich durch ultrahochfesten Beton (UHFB) – oder Ultrahochleistungsbeton / Ultra High Performance Concrete (UHPC) - einen Quantensprung im Hinblick auf die Dauerhaftigkeitseigenschaften von Betonbauwerken erhoffen. Direkt befahrbare und trotzdem dauerhafte Brückendecks sind ein Beispiel dafür.

Im Deutschen Ausschuss für Stahlbeton wird zur Zeit ein Sachstandsbericht [1] über Ultrahochfesten Beton vorbereitet. Ebenso hat sich *fib* in der Arbeitsgruppe 8.6 des Themas angenommen und ist dabei, Richtlinien zur Anwendung zu erarbeiten. Dieser Beitrag soll einen kurzen Überblick über den aktuellen Stand hinsichtlich Bemessungs- und Nachweisverfahren, zur Konstruktion mit UHPC sowie über Forschungsansätze geben.

2 Bemessung

2.1 Bemessungsrelevante Materialeigenschaften

Als hervorstechendes Merkmal ultrahochfesten Betons ist zwar die hohe Druckfestigkeit - nach Definition mindestens 150 MPa - zu nennen, jedoch ist sie in vielen Anwendungsfällen nicht entscheidend. Mindestens ebenso stark von Bedeutung sind

- die Duktilität von UHPC mit Faserzugabe bei Zug- wie bei Druckbeanspruchung,
- die Zugfestigkeit von UHPC, wenn sie dank der Zugabe von als Bewehrung wirkenden Fasern planmäßig genutzt werden kann.

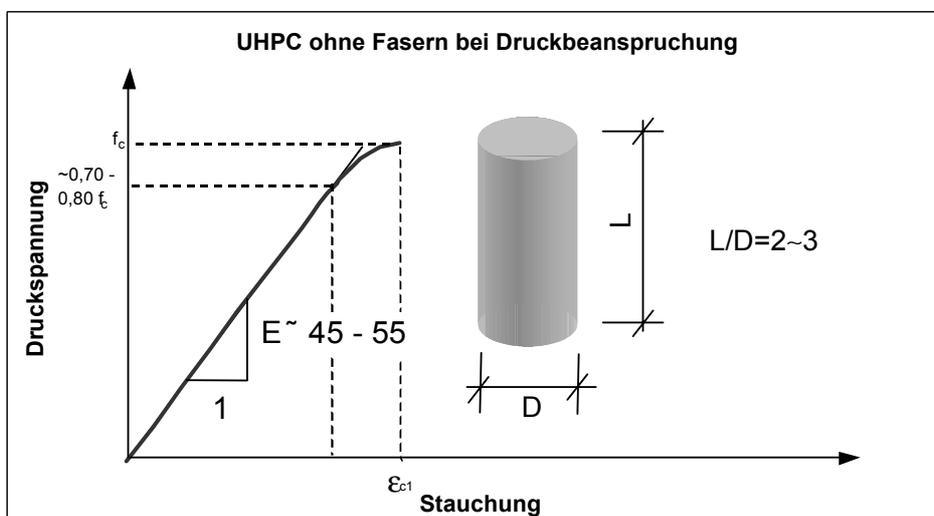


Bild 1:
Spannungs-
Dehnungs-Linie
von UHPC ohne
Fasern bei Druck-
beanspruchung:
Sprödes Verhalten

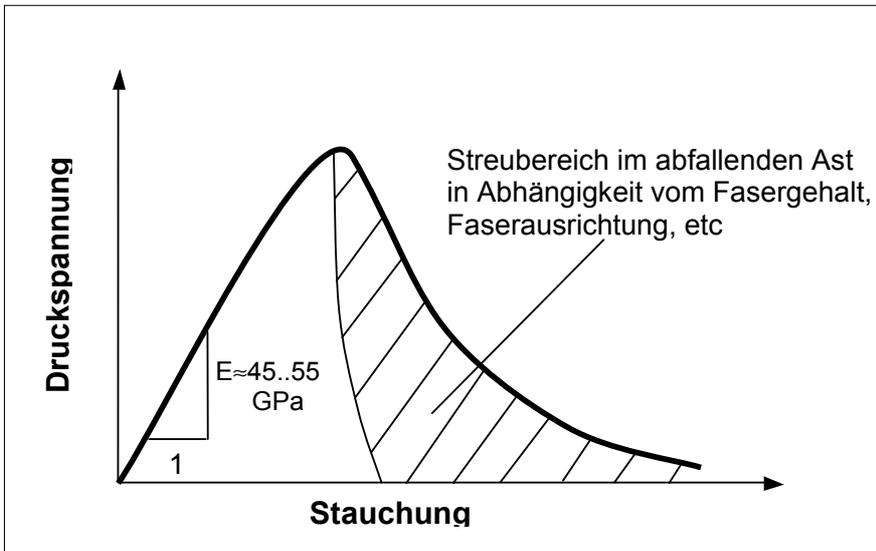


Bild 2:
Duktiles Nachbruchverhalten bei Faserzugabe

Bei Druckbeanspruchung verändert die Faserzugabe hauptsächlich den abfallenden Ast der Spannungs-Dehnungs-Linie (s. Bild 2 gegenüber Bild 1). Auf Zug kann bei ausreichendem Fasergehalt und günstiger Faserorientierung und -verteilung sowohl die Erstrissspannung als auch die maximal aufnehmbare Zugspannung (Spannung im Riss wird allein von den Fasern getragen) gegenüber der Festigkeit der faserfreien Matrix gesteigert werden.

Das Verhalten von UHPC bei Zugbeanspruchung wird am besten durch die Spannungs-Rissöffnungs-Beziehung charakterisiert, da die Spannungs-Dehnungs-Beziehung bei entfestigendem Verhalten (also im „abfallenden Ast“) stark abhängig von der Länge des jeweiligen Probekörpers ist. Bild 3 zeigt Beispiele für experimentell ermittelte Spannungs-Rissöffnungs-Beziehungen (gekerbte Prüfkörper).

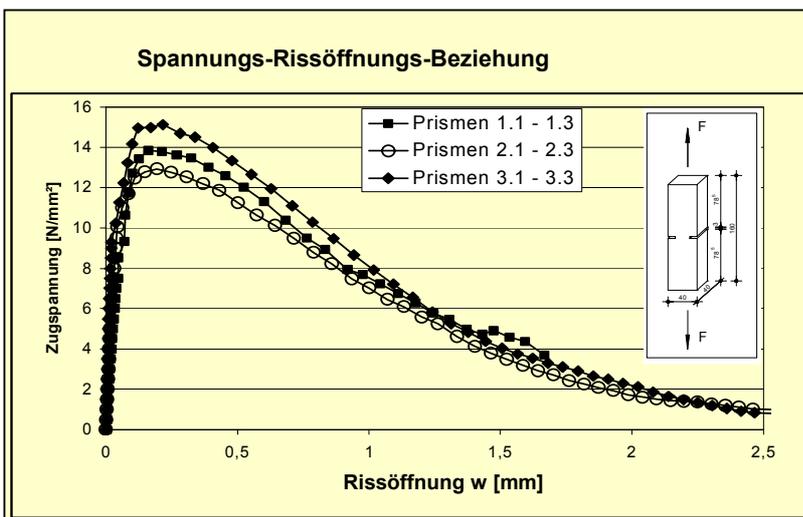


Bild 3:
Beispiele für
Zugspannungs-
Rissöffnungs-
Beziehungen
nach [2]

Es ist festzuhalten, dass die Betonierichtung und die Betoniermethode einen großen Einfluss auf die Vorzugsausrichtung der Fasern haben können. Die Fasern neigen sowohl dazu, sich horizontal einzuschwimmen [2] wie auch dazu, sich in der Fließrichtung zu orientieren. Bei dünnen Bauteilen

sowie allgemein in der Nähe der Bauteilaußenflächen ist eine bevorzugt schalungsparallele Ausrichtung der Fasern zu beobachten. Diese Effekte beeinflussen neben der Zugfestigkeit insbesondere auch die Bruchenergie. Eine detaillierte Darstellung dazu kann dem Sachstandsbericht [1] entnommen werden. Dort sind auch Angaben zu weiteren Festbetoneigenschaften (z.B. Elastizitätsmodul, Querdehnzahl, Spaltzugfestigkeit, Biegezugfestigkeit und ihr Maßstabseinfluss) und den sie beeinflussenden Parametern zu finden.

Das autogene Schwindmaß von UHPC ist deutlich höher als vom Normalbeton bekannt. Das Trocknungsschwinden tritt hiergegen in seiner Bedeutung zurück. Durch Wärmebehandlung, insbesondere im Bereich 70 – 90°C kann das Schwinden jedoch nahezu vollständig vorweggenommen werden, was im Fertigteilbau besonders interessant ist. Ebenso wird durch Wärmebehandlung die Kriechzahl wesentlich vermindert.

Ultrahochfester Beton ermöglicht sehr hohe Verbundspannungen. Somit lassen sich sehr kurze Verankerungs- und Übergreifungslängen realisieren. Stabstahlbewehrung und Faserbewehrung können zugleich angewendet werden. Um angesichts der hohen Verbundspannungen (bei Betonrippenstahl typischerweise in der Größenordnung bis 50 MPa) Längsrisse zu vermeiden, muss in der Regel sogar mit Fasern zusätzlich zur Stabstahlbewehrung gearbeitet werden. Andererseits besteht sowohl bei Biege- wie auch Schubbelastung bei UHPC die Möglichkeit, auf stabförmige Bewehrung zu verzichten und allein die Bewehrungswirkung der Fasern auszunutzen.

Durch Vorspannung kann die „nutzbare Zugfestigkeit“ bei UHPC besonders stark gesteigert werden. Zusätzlich kann durch frühzeitig aufgetragenen Druck der Rissbildung, wie sie aus dem inneren Zwang zwischen Bewehrung und Beton infolge des hohen Schwindmaßes entstehen kann, entgegengewirkt werden.

2.2 Bemessungsansätze nach DAfStb-Sachstandsbericht

2.2.1 Druckbeanspruchung

Der Bemessungswert für Normal- bzw. hochfesten Beton ist in DIN 1045-1 als

$$f_{cd} = 0,85 \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c \cdot \gamma'_c}$$

festgelegt. Neben dem Teilsicherheitsbeiwert γ_c wird dabei der zusätzliche Teilsicherheitsbeiwert γ'_c zur Erfassung der höheren Sprödigkeit von hochfestem Beton

$$\gamma'_c = \frac{1}{(1,1 - f_{ck} / 500)} \geq 1,00$$

angesetzt. Neuere Untersuchungen von Tue et al. [3] zeigen, dass dieser Ansatz wegen der geringeren Variationskoeffizienten für hochfesten Beton aus wissenschaftlicher Sicht nicht notwendig ist. Im Sachstandsbericht wird daher nach Darstellung und Vergleich der Vorgehensweise nach dem Konzept von DIN 1045-1 mit Regelungen aus Frankreich [4] und Japan vorgeschlagen, bei ausreichendem Fasergehalt (oder Umschnürung, z.B. in Rohren) angesichts des duktilen Verhaltens und der besonderen Qualitätskontrolle auf den Ansatz von γ'_c zu verzichten. Zusätzlich sollte die bezogene Druckzonenhöhe auf $x/d \leq 0,35$ wie bei hochfestem Beton beschränkt werden, um duktilen Versagen zu gewährleisten. Bei UHPC ohne Fasern und ohne Umschnürung soll $\gamma'_c = 1,25$ angenommen werden.

Für die Querschnittsbemessung könnte dann eine Spannungs-Dehnungs-Linie wie in Bild 4 dargestellt zugrunde gelegt werden. Dabei wird der Dauerstandeffekt für eine kritische Belastungsdauer von 3 Tagen angesetzt. Der Bemessungswert des E-Moduls wird zur Berücksichtigung des Kriechens unter Ansatz von $\varphi = 0,3$ (geschätzt) mit $E_{cd} = E_{c0}/1,3$ angesetzt.

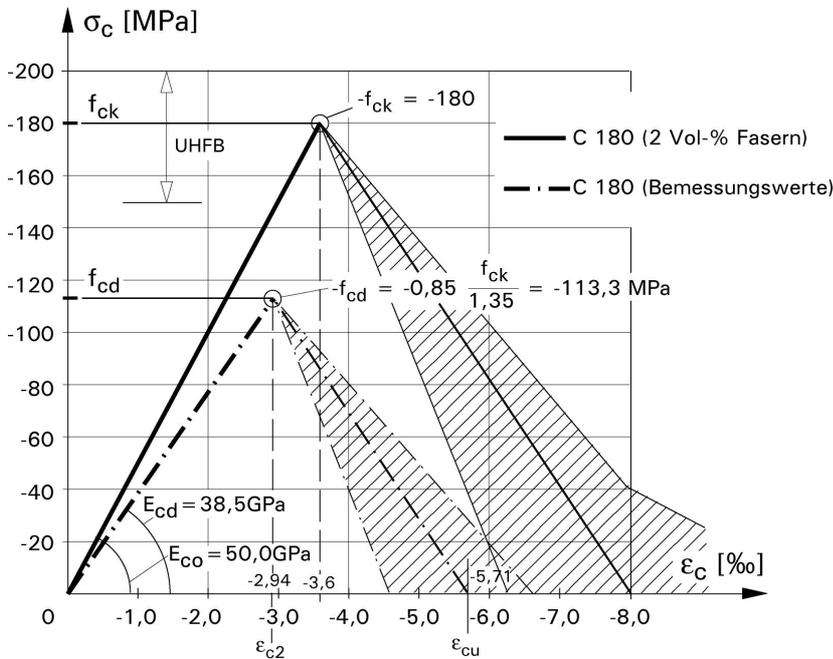


Bild 4:
Spannungs-
Dehnungs-Linie für
die Querschnitts-
bemessung
(mit $f_{ck} = 180$ MPa,
 $\gamma_c = 1,35$ und
 $\gamma_c' = 1,0$),
aus DAfStb-
Sachstandsbericht,
Kapitel 7

Die Steigung des abfallenden Astes in Bild 4 ist vom Fasergehalt und der Faserorientierung abhängig, ebenso letztlich auch von der Probekörpergeometrie. Ein einfacher Ansatz zur vereinfachten Berücksichtigung des Nachbruchverhaltens ist ein plastischer Ast in einem bilinearen Ersatz-Spannungs-Dehnungsdiagramm (s. Bild 5). Dieser Weg wird auch in den französischen Empfehlungen [4] gegangen. Nach dem DAfStb-Sachstandsbericht [1] soll bei einer solchen Vorgehensweise die Dehnung $\epsilon_{c3} = \epsilon_{c2}$, und der Wert für ϵ_{c3u} so bestimmt werden, dass ein bilinearer elastisch-plastischen Ansatz nach Bild 5 die gleichen Werte für die Lage und Größe der Druckzonenkraft liefert wie der im Bild 4. Der Wert ϵ_{c3u} kann dafür abhängig von der Steigung des abfallenden Astes aus einem Diagramm ermittelt werden oder pauschal mit $\epsilon_{c3u} = \epsilon_{c3} + 0,3$ ‰ angesetzt werden.

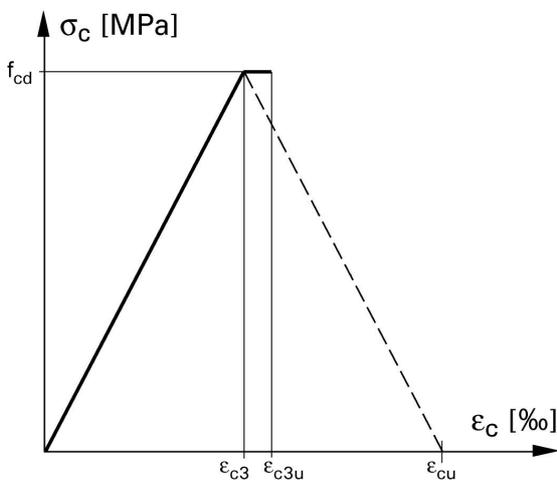


Bild 5:
Bilineares
Spannungs-
Dehnungs-
Diagramm

2.2.2 Zugbeanspruchung

Für die Zugfestigkeit werden im Sachstandsbericht verschiedene Ansätze diskutiert. Es sind dies die Vorgehensweise nach der französischen Richtlinie, nach JSCE und ein Vorschlag, der in Anlehnung an die DAfStb-Stahlfaserbetonrichtlinie [5] für UHPC entwickelt wurde. Der Bemessungswert der Betonzugfestigkeit ergibt sich für einen faserbewehrten UHPC in Anlehnung an die fib-Recommendations [6] sowie [4] zu:

$$f_{ctd} = \frac{0,85 f_{ctk}}{\gamma_{ct} \cdot \gamma_f}$$

mit

- f_{ctk} = 5 % - Fraktile der Betonzugfestigkeit (Höchstwert der Linie)
- γ_{ct} = Sicherheitsbeiwert für die Zugfestigkeit von Faserbeton
 - = 1,3 für Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit
 - = 1,0 für Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit
- γ_f = Sicherheitsbeiwert zur Berücksichtigung möglicher Unregelmäßigkeiten in der Faserorientierung:
 - = 1,25 allgemein, außer lokalen Effekten
 - = 1,75 zur Erfassung lokaler Effekte (Fehlstellen)

Auf dieser Grundlage wird aus einer Spannungs-Rissöffnungs-Beziehung eine Spannungs-Dehnungs-Linie für die Bemessung abgeleitet. Hierbei wird nach [4] eine charakteristische Länge l_c verwendet, die im allgemeinen $l_c = 2/3 h$ beträgt und näherungsweise den Scheibenspannungszustand neben einem Riss erfasst.

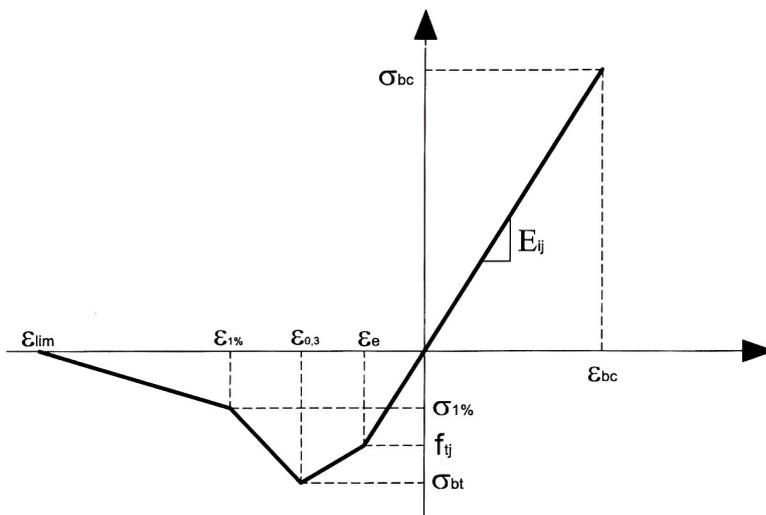


Bild 6:
typische Spannungs-Dehnungs-Linie nach [AFGC]

Es sei jedoch kritisch angemerkt, dass der Versuch, eine eindeutige Spannungs-Dehnungs-Linie zu verwenden, das bei Faserbeton auftretende Problem, dass schließlich ein dominanter Riss mit entfestigendem Verhalten entsteht, nicht lösen kann und daher mechanisch letztlich nicht korrekt ist. Dies wird auch schon dadurch deutlich, dass durch den Parameter l_c eine Abhängigkeit von der Bauteildicke besteht.

Der somit aufzuwerfenden Frage, inwieweit die Tragwirkung von Faserbewehrung und Stabstahlbewehrung addiert werden kann, wurde von Jungwirth [7] und Leutbecher [8] nachgegangen.

So ließen Versuche zum Tragverhalten von UHPC-Zugkörpern mit gemischter Bewehrung aus hochfestem geripptem Stabstahl St 1470/1620 und Stahlfasern [8] bis zum Erreichen der Elastizitätsgrenze der Stabbewehrung ($> 6 ‰$) keinen Abschluss der Rissbildung, sondern vielmehr eine stetige Zunahme des Mitwirkungsanteils des Faserbetons erkennen (Bild 7). Auch für Faserbetonmischungen, die selbst kein verfestigendes Verhalten im zentrischen Zugversuch aufweisen (Fasergehalt 0,9 Vol.-%), konnte in Kombination mit Stabbewehrung eine sukzessive Rissteilung mit sehr kleinen Rissabständen beobachtet werden (im Mittel rund 8 mm bei 4,5 ‰ mittlerer Stahldehnung), während für ausschließlich stabstahlbewehrte Zugkörper Rissabstände zwischen 30 und 70 mm erhalten wurden.

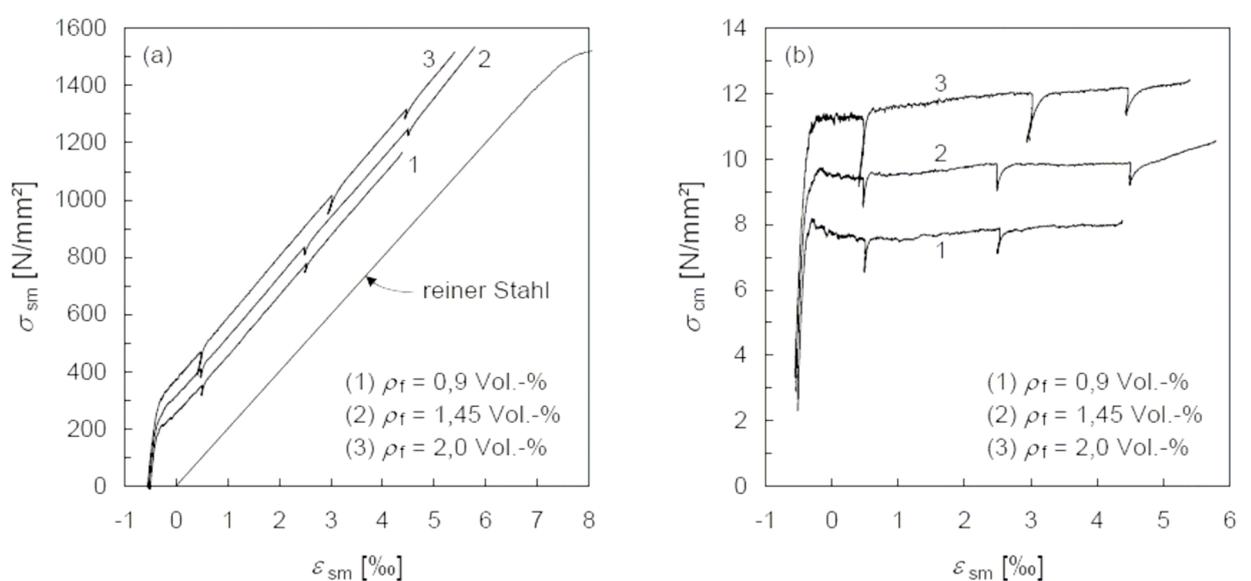


Bild 7: Last-Verformungs-Verhalten der mit hochfesten Stabstählen St 1470/1620, $d_s = 12$ mm und unterschiedlichen Fasergehalten ($l/d = 17$ mm/0,15 mm) bewehrten UHPC-Zugkörpern:

- Stahlspannungs-Dehnungs-Beziehung
- Mitwirkungsanteil des Faserbetons

Wegen der unterschiedlichen Aufteilung der Kräfte im Riss auf die beiden Bewehrungsarten Stabstahl und Fasern ergaben sich mit zunehmendem Stabstahlgehalt erwartungsgemäß kleinere maximale Rissbreiten. Entsprechend des Spannungs-Rissöffnungs-Zusammenhangs werden also die Fasern in Abhängigkeit des Stabstahlgehalts bei gleicher mittlerer Dehnung unterschiedlich stark aktiviert. Dies zeigt, dass eine Kopplung des Tragverhaltens der Stabbewehrung und des Faserbetons nicht durch Superposition isoliert ermittelter, allgemeingültiger Spannungs-Dehnungs-Linien erfolgen kann. Vielmehr muss neben dem Gleichgewicht auch die Verträglichkeit der Verformungen am diskreten Riss beachtet werden. Ein entsprechendes Modell wird in [8] vorgestellt.

2.2.3 Querkraftbeanspruchung

Für Querkraftbelastung und Durchstanzen ist grundsätzlich eine Addition der Traganteile von Beton, Faserbewehrung und Querkraftbewehrung denkbar. Auf die entsprechenden Ansätze in [3] und in der DAfStb-Faserbeton-Richtlinie [5] wird hingewiesen. In [9] wird festgestellt, dass der für hochfesten Beton entwickelte Ansatz nach Zink [10], bei dem die Schubtragfähigkeit der Betondruckzone entscheidend ist, für UHPC ohne Fasern anwendbar ist. Dementsprechend kann grundsätzlich auch die Beziehung nach DIN 1045-1 für die Querkrafttragfähigkeit ohne rechnerisch erforderliche Querkraftbewehrung – unter Einbezug einer Anpassung für UHPC – verwendet werden.

Für Balken aus UHPC mit Faserbewehrung, war in den Versuchen [9] praktisch kein Querkraftversagen zu beobachten. Der Nachweis der Querkrafttragfähigkeit wird daher nur bei extrem hoch bewehrten (Rechteck-)Querschnitten sowie bei profilierten Querschnitten ein Thema sein. Hier besteht noch besonderer Forschungsbedarf.

2.2.4 Sonstige Nachweise

Bei den bisher durchgeführten Versuchen mit Ermüdungsbelastung hat sich gezeigt, dass UHPC unter Druckschwellbeanspruchung eine Dauerfestigkeit von etwa 40 % der statischen Kurzzeitfestigkeit aufweist [2]. Er ist daher nicht grundsätzlich empfindlicher als Normalbeton. Untersuchungen bei Biegebelastung legen nahe, dass nach Rissbildung die Beanspruchbarkeit auf Ermüdung begrenzt ist. Sicherlich besteht auch hier weiterer Forschungsbedarf. Daher wird dieses Thema u.a. im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms auch untersucht.

Stabwerkmodelle können bei UHPC mit Fasern angewendet werden. Bei Zugstäben ist die Faserbewehrung für den Nachweis der Tragfähigkeit grundsätzlich anwendbar. Es muss jedoch auf die Verformungen geachtet werden, damit nicht durch eine zu hohe Rissbreite an einem Querschnitt ein Versagen durch Faserauszug stattfindet.

Für Teilflächenbelastung sind gegenüber den Formeln in DIN 1045-1 Abminderungen erforderlich. Hierbei spielt offenbar die Mischungszusammensetzung (Feinkornbeton oder Splitt als Zuschlag) sowie die Faserzugabe eine Rolle.

Grenzen der Druck- und Zugspannungen im Gebrauchszustand werden im Sachstandsbericht diskutiert. Wenn ermüdungsrelevante Beanspruchungen vorliegen, ist eine Zugspannungsbegrenzung zur Vermeidung der Rissbildung sinnvoll. Der Nachweis der Dekompression bzw. ein Spannungsnachweis für die häufige Einwirkungskombination ist bei vorgespannten Bauteilen zu führen.

Für weitere Aspekte der Bemessung wird auf Kapitel 7 des Sachstandsberichts [1] sowie auf [11] verwiesen. Kleben von UHPC kann die hohe Zugfestigkeit der Matrix und an der Oberfläche sinnvoll ausnutzen.

3. Konstruktion

3.1 Einteilige Fuß und Radwegbrücken

Konstruktionen mit UHPC sollen nachfolgend an einigen Beispielen aus der eigenen Praxis erläutert werden. Nach einigen Labormodellen (Bildern 8 a und b) wurden für die Gemeinde Niestetal einige kleinere Fuß- und Radwegbrücken realisiert.



Bild 8 a: Fußgängersteg mit 6 m Länge und 3 cm Plattendicke, hergestellt im eigenen Labor
 Bild 8 b: Modell einer UHPC-Fachwerk-Brücke, entstanden in Zusammenarbeit der Universität Kassel und IBB Fehling + Jungmann mit der Fa. Max Bögl



Bilder 9a und b: Montage der ersten UHPC-Fuß- und Radwegbrücke zum Schwimmbad der Gemeinde Niestetal

Die in den Bildern 9 a und b abgebildete Brücke weist eine Länge von 12 m auf. Außer im verstärkten Bereich an den Auflagern und für die Verankerung der Geländerpfosten wurde keine Stabstahlbewehrung verwendet. In den beiden Stegen ist je ein Spannglied mit 1,2 MN Vorspannkraft und nachträglichem Verbund geführt.

Danach wurden 2 weitere kleine Brücken mit Plattenbalkenquerschnitt und Längen von 7 und 9 m realisiert (s. Bilder 10 a und b sowie [11]). Diese Brücken sind mit Spannlitzen im sofortigen Verbund vorgespannt.

Durch die gevoutete Führung der Unterseite des Stegs ergibt sich das höchste Moment aus Vorspannung in Feldmitte, während an den Widerlagern fast eine zentrische Vorspannung vorliegt. Somit wird der Nachweis der Dekompression vorteilhaft beeinflusst.

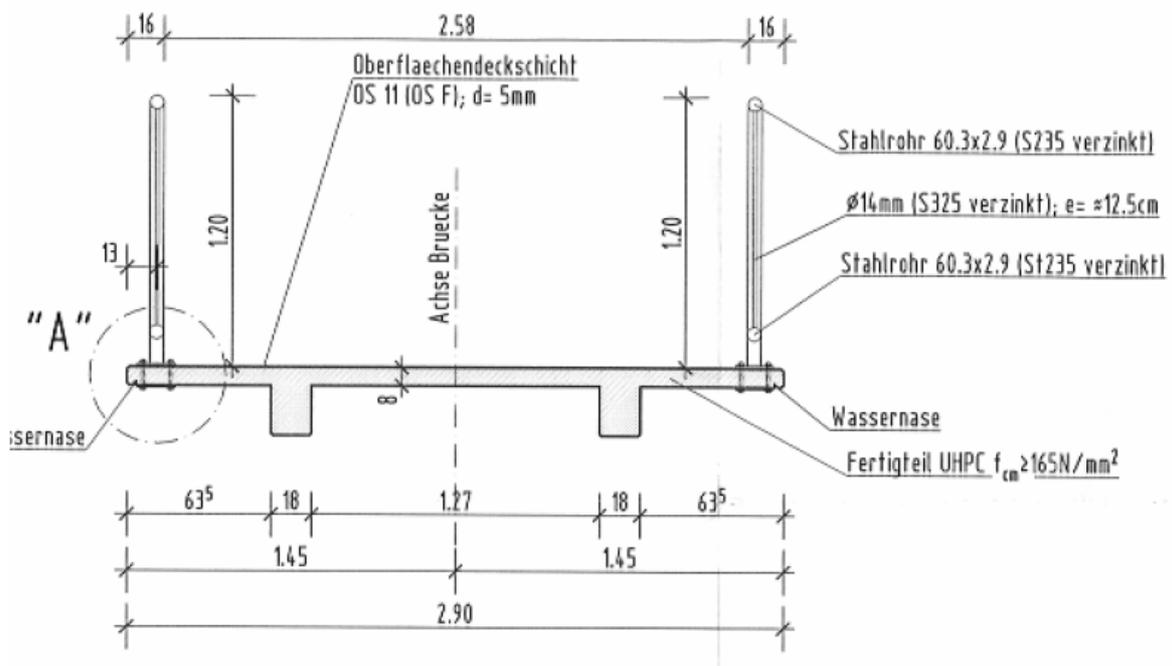


Bild 10 a: Querschnitt der Plattenbalkenbrücken



Bild 10 b: Ansicht der 9 m langen Plattenbalkenbrücke

3.2 Konstruktion der Gärtnerplatzbrücke in Kassel als hybrides UHPC / Stahl-Fachwerk

Für die insgesamt 132 m lange neue Gärtnerplatzbrücke aus UHPC und Stahl über die Fulda wurden weitere Innovationen zur Anwendung gebracht.

Dies soll nachfolgend kurz dargestellt werden (eine ausführlichere Darstellung enthält z.B. [12]).

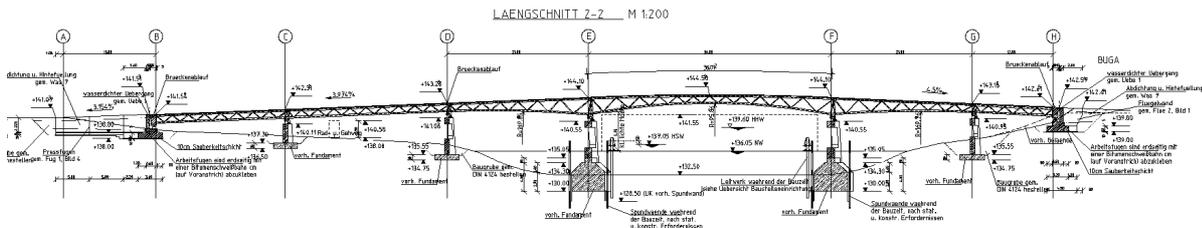


Bild 11: Längssystem der Gärtnerplatzbrücke

Wie Bild 11 zu entnehmen ist, verlaufen über der Stromöffnung sowohl Obergurt wie Untergurt des Fachwerksystems des Überbaus gekrümmt. Auch in den Nachbarfeldern ist der Untergurt gekrümmt. Dafür wurde als eine Variante ein Dreigurtfachwerk entworfen, das Obergurte und Untergurte aus UHPC besitzt (s. Bild 12). Ober – und Untergurte sollten als gerade Spannbettfertigteile hergestellt werden, die dann später mit den Stahlrohrdiagonalen zu einem räumlichen Fachwerkträger zusammengesetzt werden.

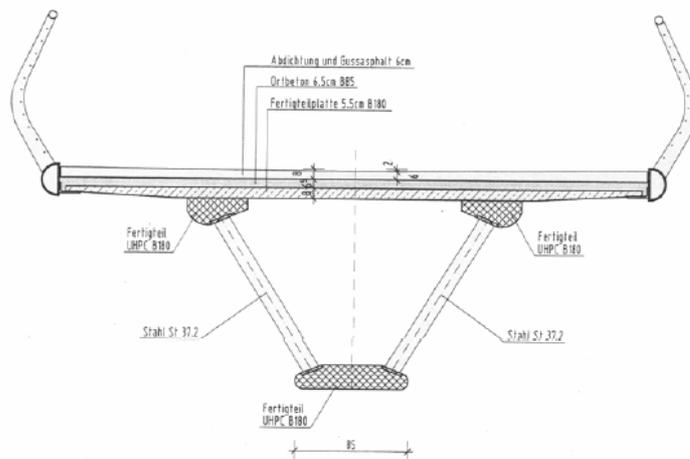


Bild 12: Erster Entwurf eines UHPC – Stahl – Dreigurtsystems

Vorgespannte, geradlinig im Spannbett hergestellte UHPC-Stäbe großer Schlankheit können in begrenztem Umfang gekrümmt bzw. verbogen werden, um den gekrümmten Verlauf der Gradienten bzw. die Voutung zu realisieren. Dies gelingt nahezu vollständig durch Ausnutzung der Durchbiegung aus Eigengewicht des schlanken Obergurts, wenn dieser an entsprechenden Aufhängepunkten angehoben wird. Diese Methode, bei der die hohe Dehn- oder besser Stauchfähigkeit des ultrahochfesten Betons ausgenutzt wird, lässt sich auch für andere Konstruktionsformen einsetzen (s. Bild 13).

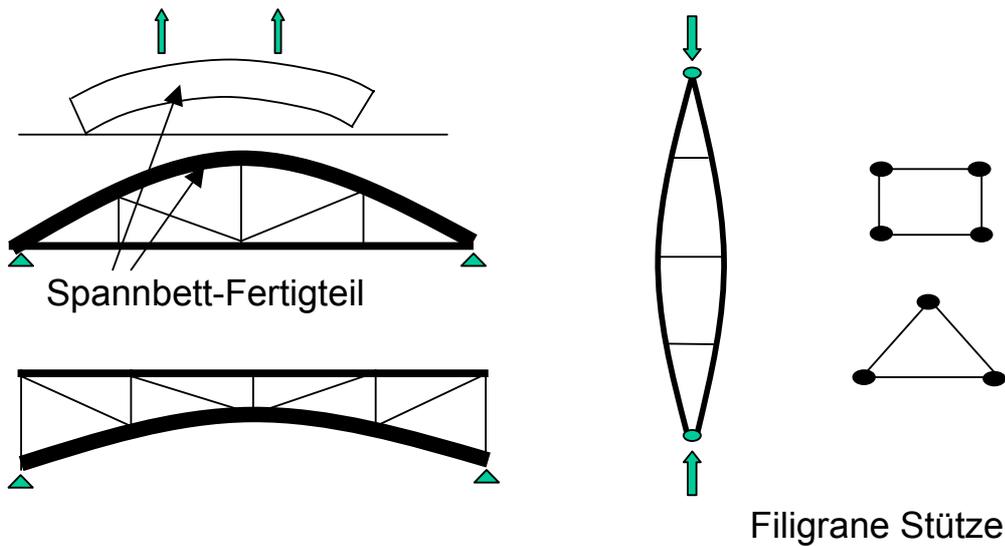


Bild 13: Anwendung gekrümmter, aber gerade hergestellter UHPC – Bauteile

Auch der noch stärker gekrümmte Untergurt hätte prinzipiell auf diese Weise aus werkmäßig im Spannbett vorgespannten -geradlinigen- Fertigteilstäben geformt werden können. Im vorliegenden Fall wurde hierfür jedoch zunächst die Ausführung als gekrümmtes Stahlrohr vorgezogen, da für die relative hohe erforderliche Krümmung noch keine Erfahrungen bzw. Versuchsergebnisse vorliegen. Der Querschnitt der Ausführungsvariante ist in Bild 14 dargestellt.

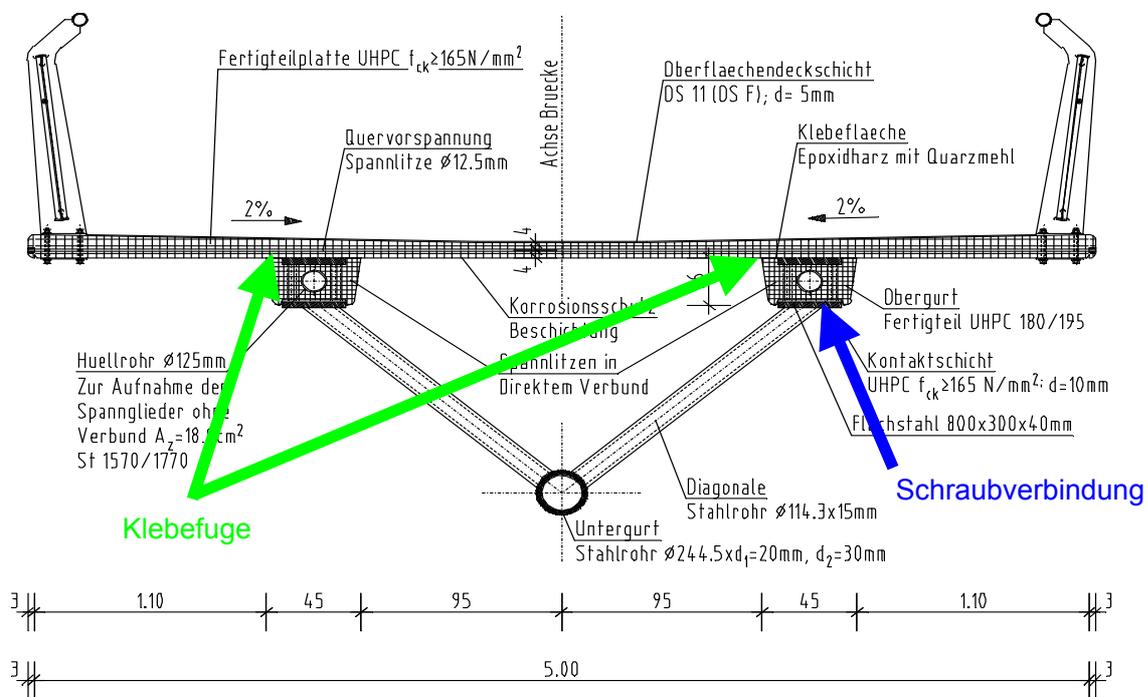


Bild 14: Hybrider UHPC-Stahl Querschnitt in Feldmitte der Stromöffnung

Bei der Gärtnerplatzbrücke werden die UHPC-Fertigteileplatten des Brückendecks (im sofortigem Verbund in Querrichtung vorgespannt, ansonsten ohne jegliche Stabstahlbewehrung) auf die UHPC-Obergurte aufgeklebt, da wegen der geringen Querschnittsabmessungen mechanische Verbindungsmittel nicht unproblematisch sind. Im Rahmen einer Zustimmung im Einzelfall wurden die erforderlichen Voraussetzungen für die Realisierung einer Klebeverbindung für die schubfeste Fuge zwischen Obergurten und Deck-Platten gelegt. Die Zug- und Schubfestigkeit der Klebeverbindung erreicht mit dem verwendeten Epoxydharz - Kleber zumindest den Wert der Zugfestigkeit des UHPC. Auch bei erhöhter Temperatur und Feuchtigkeit sowie bei kombinierter thermisch / hygri-scher und mechanischer Beanspruchung ergab sich in den durchgeführten Versuchsserien zufrieden stellendes Verhalten, wenn die UHPC – Oberflächen durch Sandstrahlen vorbehandelt wurden.

Als weitere Innovation sei die gleitfest vorgespannte Verbindung zwischen den Stahldiagonalen und den UHPC-Obergurten genannt [12].

4. Zusammenfassung und Ausblick

Ultrahochfester Beton ist mittlerweile auch in Deutschland bei einer Reihe von Projekten zur Anwendung gekommen. Soweit bisher zu sehen, hat er sich dabei wirtschaftlich wie technisch bewährt. Natürlich müssen weitere Praxis-Erfahrungen noch gesammelt werden und ebenso ist weitere Forschung gerade im Bereich des Tragverhaltens und der Bemessung nötig. Durch das Schwerpunktprogramm der DFG zum Thema „Nachhaltiges Bauen mit ultrahochfestem Beton“ [13] wird diese Forderung realisiert.

Durch die Einsparung an Konstruktionsgewicht lassen sich ökologische Vorteile nachweisen. Die Anwendung von Ultrahochfestem Beton lohnt sich zumeist dann, wenn mehrere Vorteile dieses Werkstoffs ausgespielt werden können, z.B.

- geringe Konstruktionsabmessungen und geringes Gewicht (und damit Schnittgrößen),
- geringe Massen (Materialkosten, Transportgewichte),
- Bauzeitverkürzung, z.B. wegen leichter, weitgespannter Teile,
- überlegene Dauerhaftigkeit und geringer Wartungsaufwand (Kostenreduktion, verbesserte Nachhaltigkeit),
- einfaches Bewehren, z.B. Entfall der Querkraftbewehrung, Ausnutzung der Biegezugfestigkeit,
- Ästhetik, beispielsweise durch filigrane Konstruktionen.

Bei den bisherigen Anwendungsfällen handelte es sich überwiegend um vorgefertigte Bauteile. Die Fertigung im Werk kommt der zielgenauen Qualitätssicherung zwar entgegen, dennoch sind auch Ortbetonanwendungen, z.B. zur Beschichtung von Brückendecks mit dünnen UHPC-Schichten möglich und sinnvoll. Neben einer verbesserten Dauerhaftigkeit kann hier eine Reduktion der Anzahl der Schichten (und entsprechend der Anzahl der Arbeitsschritte) und damit eine Bauzeitverkürzung realisiert werden. Auch kann die hohe Tragfähigkeit von UHPC, z.B. für den Fugenverguss bei Fertigteiltrüben, lässt sich dabei nutzen [14].

Die Technologie des Ultrahochleistungsbetons bietet nach unserer Meinung große Chancen für Bauwerke, die in hohem Maße ökonomisch und leistungsfähig und gleichermaßen ökologisch sein können.

5 Literatur

- /1/ Sachstandsbericht Ultrahochfester Beton – Betontechnik und Bemessung, Veröffentlichung in Vorbereitung, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, (2007).
- /2/ Fehling, E.; Schmidt, M.; Teichmann, T.; Bunje, K.: Entwicklung, Dauerhaftigkeit und Berechnung Ultra-Hochfester Beton (UHPC), Forschungsbericht an die DFG, Universität Kassel, 2003.
- /3/ Tue, N. V.; Schenck, G.; Schwarz, J. (2005): Absicherung der statistisch erhobenen Festbetonkennwerte für die neue Normengeneration. Forschungsbericht. Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Universität Leipzig. Januar 2005
- /4/ AFGC / SETRA (2002): Bétons fibrés à ultra-hautes performances. Recommendations provisoires. Documents scientifiques et techniques. Association Française de Génie Civil, Setra, Bagnaux Cedex, Januar 2002, 152 pp.
- /5/ DAfStb-Richtlinie Stahlfaserbeton (2005): Ergänzungen zu DIN 1045, Teile 1 bis 4 (07/2001). 21. Entwurf. DAfStb im DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, April 2005
- /6/ FIP Recommendations (1999): Practical Design of Structural Concrete. FIP-Commission 3 "Practical Design", Sept. 1996. Publ.: SETO, London, Sept. 1999. (Distributed by: fib, Lausanne, email: fib@epfl.ch)
- /7/ Jungwirth, Zum Tragverhalten von zugbeanspruchten Bauteilen aus Ultra-Hochleistungs-Faserbeton. Thèse EPFL, no 3429 (2006). Dir.: Aurelio Muttoni.
- /8/ Leutbecher, T.: Rissbildung und Tragverhalten von Ultrahochfestem Beton mit gemischter Bewehrung aus Stabstahl und Fasern unter Zugbeanspruchung, Dissertation (in Vorbereitung), Universität Kassel, 2007.
- /9/ Bunje, K.; Fehling, E.: "About shear force and punching shear resistance of structural elements of Ultra High Performance Concrete", in: Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Hrsg.: Schmidt, M.; Fehling, E.; Heft 3: Ultra High Performance Concrete (UHPC), International Symposium on Ultra High Performance Concrete, 13.-15. September 2004; S.401-412, kassel university press, Kassel, 2004, ISBN 3-89958-086-9
- /10/ Zink, M.: Zum Biegeschubversagen schlanker Bauteile aus Hochleistungsbeton mit und ohne Vorspannung. Dissertation, Universität Leipzig, 1999.
- /11/ Schmidt, M.; Bunje, K.; Fehling, E.; Teichmann, Th.: Brückenfamilie aus Ultrahochfestem Beton in Niestetal und Kassel, Beton- und Stahlbetonbau, Vol. 101, Nr. 3 (2006), S. 198-204, Verlag Ernst & Sohn, Berlin.
- /12/ Fehling, E.; Bunje, K.; Schreiber, W.; Schmidt, M.: Ultrahochleistungsbeton - Anwendung bei der Gärtnerplatzbrücke in Kassel, Festschrift 50 Jahre Institut für Massivbau der Universität Hannover, 2006/2007 (zur Veröff. eingereicht)
- /13/ Schmidt, M.: Das DFG-Schwerpunktprogramm "Nachhaltiges Bauen mit ultrahochfestem Beton" und Anwendungen, Fachtagung des DAfStb, 8./9. März 2007, Berlin
- /14/ Brühwiler, E.; Fehling, E.; Bunje, K.; Pelke, E.: Design of an innovative composite bridge combining reinforced concrete with UHPFRC, Proceedings, IVBH/IABSE – Symposium, 19.-21. September 2007, Weimar (zur Veröffentlichung eingereicht)