

## Prüfung der Zugfestigkeit und Zugdehnung von UHPC (ultrahochfestem faserverstärktem Beton)

Ein Beitrag zur Qualitätsüberwachung innovativer Betonbauteile

**DI Joachim Juhart**

FH Technikum Kärnten, Baulabor

**Dr. techn. Bernhard Freytag**

TU Graz, Labor für Konstruktiven Ingenieurbau

**DI Josef Linder**

TU Graz, Labor für Konstruktiven Ingenieurbau

Zur Qualitätskontrolle von UHPC gehört die Prüfung seiner Zugtragfähigkeit und seines Nachrissverhaltens. In diesem Beitrag wird eine Methode vorgestellt, mit der zentrische Zugversuche an Bohrkernen aus UHPC durchgeführt werden. Die Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung kann damit unmittelbar gewonnen werden.

Die hervorragenden Eigenschaften von ultrahochfestem faserverstärktem Beton (kurz UHPC) sind große Dauerhaftigkeit, hohe Festigkeit und ausgeprägte Duktilität. Die außergewöhnlichen Eigenschaften des UHPC erlauben es, Bauteile herzustellen, die einerseits schlank und leicht und andererseits sehr widerstandsfähig gegen schädigende Umwelteinwirkungen sind.

Dieser neue Baustoff hat eine besonders dichte Struktur und kaum Porenräume. Das ist die Grundlage für seine Druckfestigkeit (>150 N/mm<sup>2</sup>) sowie für seine große Bestän-

digkeit gegen aggressive Umwelteinwirkungen wie zum Beispiel Frost und Taumittel-einwirkung. Durch die Beimischung von Stahlfasern, in der Regel 2 bis 2,5 Vol.-%, werden ein duktileres Materialverhalten unter Druck und Zug sowie eine planmäßige Zugtragfähigkeit auch nach dem Auftreten von Rissen erreicht. Die Rissabstände bleiben im Gebrauchszustand sehr klein und die Risse sind fein verteilt.

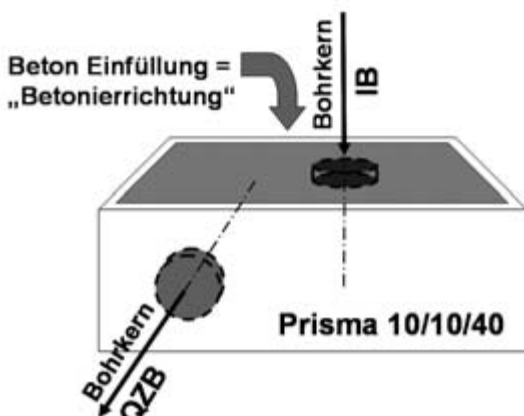
Die Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung ist eine wesentliche Kenngröße von UHPC, die bei der Bemessung von Bauteilen Berücksichtigung findet, insbesondere wenn auf eine schlaffe Bewehrung teilweise oder ganz verzichtet werden soll. Der Fasergehalt, die Faserverteilung und die Faserorientierung der Stahlfasern im UHPC beeinflussen das Zugtragverhalten eines Bauteils. Das Herstellungsverfahren bzw. die Betonierrichtung bei Einbringung des frischen Faserbetons, die Art und Lage des Bau-

teils sowie die Fließigenschaften des UHPC wirken sich auf die Faserverteilung und -orientierung aus. Fasern richten sich, besonders in Plattenbauteilen [1], bevorzugt „liegend“ im Frischbeton aus. Eine Qualitätskontrolle direkt am Bauteil ist in manchen Fällen sinnvoll. Insbesondere sollte festgestellt werden, ob eine Richtungsabhängigkeit des Zugtragverhaltens vorhanden ist. Werden die Proben durch Ziehen von Bohrkernen gewonnen, so wird es möglich, das Zugtragverhalten für unterschiedliche Richtungen im Bauwerk zu untersuchen.

Die Zugspannungs-Dehnungs-Linie kann direkt oder indirekt bestimmt werden. Die direkte Bestimmung wird mit einem zentrischen Zugversuch durchgeführt [vgl. 2] und hat den Vorteil, dass die Zugarbeitslinie des Materials unmittelbar gewonnen wird. Allerdings werden die Ergebnisse durch ungewollte Abweichungen (Exzentrizitäten) der Probekörperachse von der Versuchsachse verfälscht. Die Bestimmung der Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung mit einem zentrischen Zugversuch wird in der Fachliteratur oft als kompliziert beschrieben.

Die indirekte Bestimmung der Zugspannungs-Dehnungs-Linie wird entsprechend den geltenden Richtlinien für Faser-Normalbeton mittels Biegezugversuchs ausgeführt. Diese Prüfungen sind zwar einfach durchzuführen, ergeben aber die Zugarbeitslinie nicht unmittelbar. Auf die zentrischen Zugfestigkeiten, die für eine Bemessung von Faser-Normalbeton benötigt werden, muss rechnerisch unter Zuhilfenahme von Modellannahmen für eine Zugspannungsverteilung

Abb. 1: Bohrkernentnahme aus zwei Raumrichtungen eines Betonprismas



- 6 Stück in Betonierichtung IB
- 6 Stück quer Betonierichtung QZB

UHPC „ceracem“

premix Fa. Sika  
Stahlfasern 0,3/20 mm  
160 bzw. 195 kg/m<sup>3</sup>



Abb. 2: Frischer, ultrahochfester Faserbeton wird in Probewürfelformen eingebracht.  
Alle Fotos und Diagramme: © DI Joachim Juhart

rückgeschlossen werden. Für UHPC sind Berechnungen, zum Beispiel mithilfe der so genannten back analysis [vgl. 3], erforderlich, die eine Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung als Grundlage für die Bemessung der Bauteile liefern. Die Größe der geprüften Proben wirkt sich auf die Ergebnisse deutlich aus, was als unerwünschter „Maßstabseffekt“ bezeichnet wird.

### Bestimmung der Zugspannungs-Dehnungs-Linie in Versuchen

Im Rahmen eines Versuchsprogramms, das das Baulabor der FH Kärnten gemeinsam mit dem Labor für Konstruktiven Ingenieurbau der TU Graz durchgeführt hat, wurde die direkte Bestimmung der Spannungs-Dehnungs-Linie im Zugbereich an zylindrischen Proben aus UHPC angewendet.

### Probenherstellung

Der UHPC wurde aus einem Premix mit glatten, geraden Stahlfasern (Länge/Durchmesser: 20/0,3 mm) hergestellt (siehe Abbildung 2). Es wurde eine Charge von Beton mit einem Fasergehalt von 2 Vol.-% (160 kg/m<sup>3</sup>) und eine weitere Charge mit einem Fasergehalt von 2,5 Vol.-% (195 kg/m<sup>3</sup>) gemischt. Aus jeder Charge wurde ein Prisma mit den Abmessungen 10/10/40 cm gegossen. Diese Prismen wurden verwendet, um je zwölf Bohrkerne mit einem Durchmesser von 45,7 mm in zwei Raumrichtungen zu entnehmen (siehe

Abbildung 1). In sechs von zwölf Bohrkernen wurde eine rundum laufende Kerbe eingesägt.

### Versuchsdurchführung und Messungen

Zentrische Zugversuche wurden mithilfe eines modifizierten Haftzugprüfgerätes an Bohrkernen ausgeführt. (siehe Abbildung 5, Abbildung 6).

Es hat sich gezeigt, dass sich ein Riss bei den ungekerbten Probekörpern an einer nicht vorhersehbaren zufälligen Schwachstelle im Gefüge ausbildet (siehe Abbildung 3). Mit den Prüfergebnissen der ungekerbten Bohrkerne kann die maximal erreichbare Zugfestigkeit bei Rissbildung und die Spannungs-Dehnungs-Linie im Bereich bis zum maximalen Spannungswert angegeben werden. An gekerbten Probekörpern lokalisiert sich ein Riss genau im verringerten Querschnitt (Abbildung 4). Hier führt der Einfluss der Kerbspannungen vor der Rissbildung zu einer über den Querschnitt ungleichmäßigen Spannungsverteilung. Der Wert der ermittelten maximalen Zugspannung fällt deshalb zu gering aus. An den Proben kann aber die Rissöffnung bzw. kontinuierliche Rissaufweitung an einem in der Kerbe lokalisierten Riss beobachtet werden. Die Spannungs-Rissöffnungs-Beziehung kann ab dem ersten Riss, der sich ausbildet, wenn die Betonstein- bzw. Matrixfestigkeit überschritten ist, angegeben werden. An den gekerbten Bohrkernen kann also das Nachrissverhalten beobachtet werden.



Abb. 3: Ungekerbter Probekörper nach dem Versuch



Abb. 4: Gekerbter Probekörper nach dem Versuch

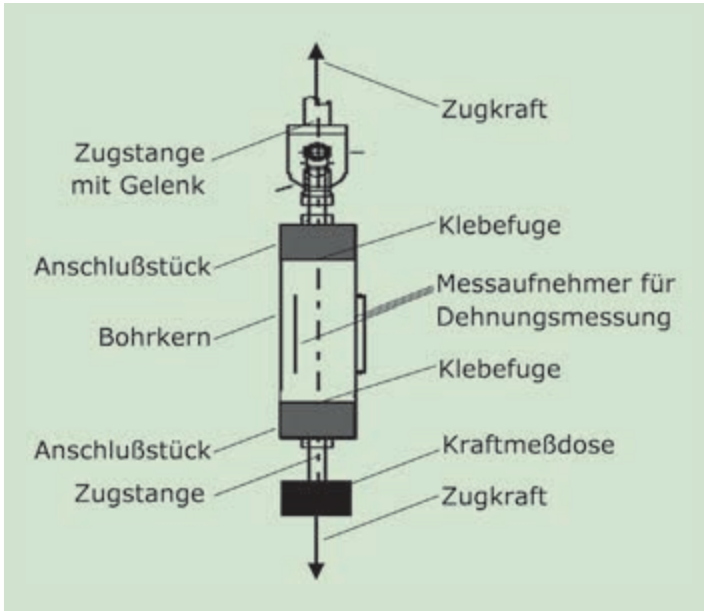


Abb. 5: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus  
Alle Fotos und Diagramme: © DI Joachim Juhart

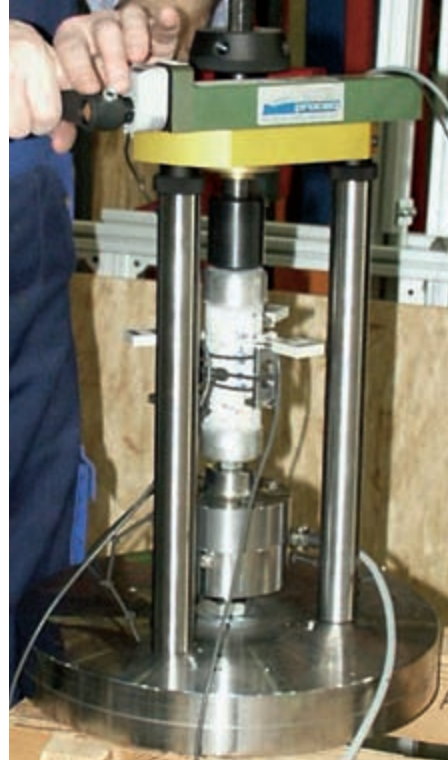


Abb. 6: Versuchsaufbau: modifiziertes Haftzugprüfgerät mit Probekörper und Messwertaufnehmern

Eine Besonderheit des entwickelten Versuchsaufbaus besteht darin, dass Dehnungen an drei Stellen des Probenzylinderumfangs gemessen werden (siehe Abbildung 7). Es können deshalb sowohl die axiale Dehnung als auch die Randdehnungen genau bestimmt werden. Damit lässt sich der Einfluss der praktisch unvermeidlichen Ausmittigkeiten des Versuchsaufbaus quantifizieren und zum Teil eliminieren. Im ersten Abschnitt der Arbeitslinie, das ist der Bereich bis zum Auftreten eines sichtbaren Risses, lässt sich die Spannungs-Dehnungs-Linie für die maximale Randspannung und maximale Randdehnung ermitteln. Nach dem Riss der Betonmatrix können nur die axiale Zugspannung und die zugehörige Dehnung zuverlässig angegeben werden. Die Fasern werden auf einem bestimmten Spannungsniveau, das vom Fasergehalt abhängt, kontinuierlich herausgezogen. Spannungs-Rissöffnungs-Beziehungen lassen sich aus den Messwerten für die axiale Zugbeanspruchung und die zugehörige axiale Dehnung angeben (siehe dazu Abbildung 8).

### Ergebnisse

Die Bestimmung der Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung, die Ermittlung der Zugtragfähigkeit und die Bestimmung des Einflusses der Faserorientierung können mit der vorgestellten Methode erfüllt werden und sind kostengünstig zu bewerkstelligen. Eine Arbeitslinie von UHPC mit Stahlfasern kann erhalten werden, wenn die Ergebnisse von ungekerbten Proben für den Bereich vor einem Riss mit den Ergebnissen an gekerbten Proben für den Bereich nach einem sichtbaren Riss zusammengesetzt werden.

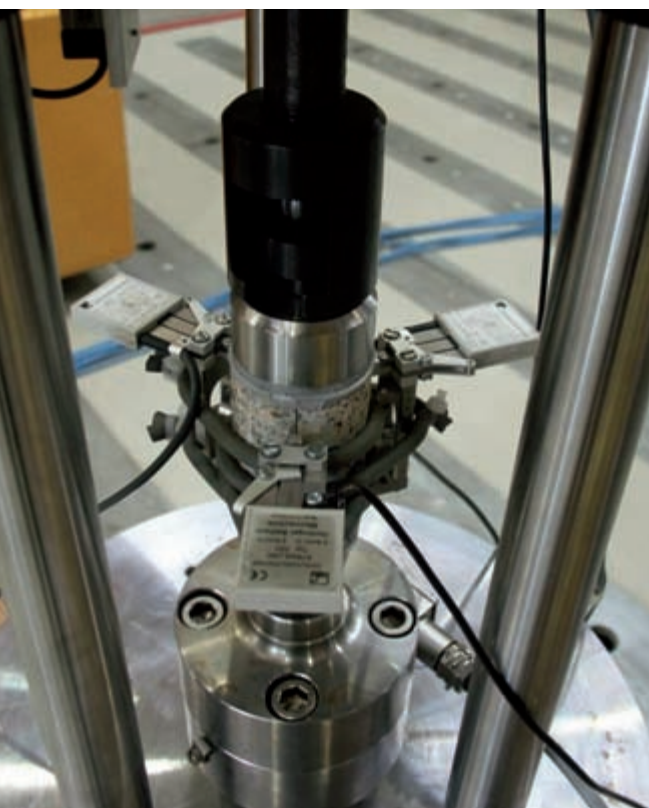
Bei den gekerbten Versuchskörpern zeigt die Arbeitslinie den Einfluss der Fasern nach dem Erreichen der Betonstein- bzw. Matrixfestigkeit deutlich. Bei einem Fasergehalt von 2 Vol.-% Stahlfasern wird die maximale Zugfestigkeit kurz vor der Ausbildung eines ersten sichtbaren Risses erreicht. Die weitere Belastung führt zu einem Spannungsabfall und zu einem kontinuierlichen Faserauszug auf niedrigerem Spannungsniveau. Bei einem Fasergehalt

von 2,5 Vol.-% Stahlfasern hingegen wird die maximale Zugfestigkeit im gerissenen Zustand bei voller Faseraktivierung erreicht. Die Fasern sorgen für ein Ansteigen der Zugspannungen nach dem ersten Aufreißen und werden auf einem höheren Spannungsniveau kontinuierlich herausgezogen. Der Vergleich der Ergebnisse von gekerbten Probekörpern mit unterschiedlichen Fasergehalten ist in Abbildung 9 dargestellt. Eine Richtungsabhängigkeit der Eigenschaften wurde im gegenständlichen Fall nicht festgestellt. Damit spielt beim gegebenen Beton mit seiner Konsistenz die Betonierichtung bzw. Einfüllrichtung in die Prismen keine Rolle.

Eine Qualitätsüberwachung des Zugtragverhaltens innovativer Betonbauteile aus UHPC ist auf einfache Weise möglich.

Unser Dank gilt Herrn DI Helmut Zehentner, Fröhlich & Locher ZT GmbH, für die Initiierung der Untersuchungen und den Firmen Sika Österreich sowie IFT Fasertechnik für die Materialbereitstellung.

Abb. 7: Detail des Versuchsaufbaus: sternförmig angeordnete Dehnungsaufnehmer am Probekörper



Literatur

- [1] Fehling, E.; Schmidt M. et al.: Entwicklung, Dauerhaftigkeit und Berechnung ultrahochfester Betone (UHPC), Forschungsbericht DFG FE 497/1. In: Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Heft 1, kassel university press. 2005.
- [2] Rilem TC 162-TDF: Test and design methods for steel fibre reinforced concrete: Uni-axial tension test for steel fibre reinforced concrete. In: Materials and Structure, Vol. 34, Jan–Feb. 2001, Rilem Publications.
- [3] Documents scientifiques et techniques: Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concrete, Interim Recommendations, Setra, AFGC, 01/2002.

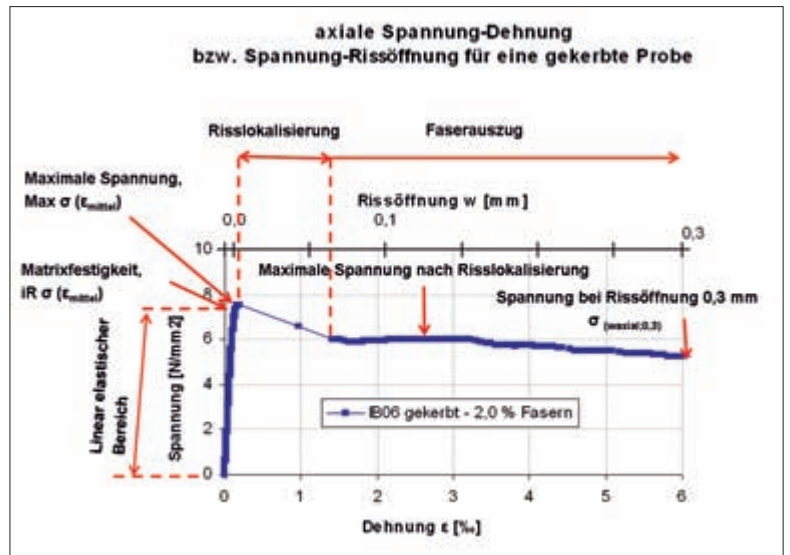


Abb. 8: Zugspannungs-Dehnungs-Linie bzw. Rissöffnungsbeziehung für eine gekerbte Probe

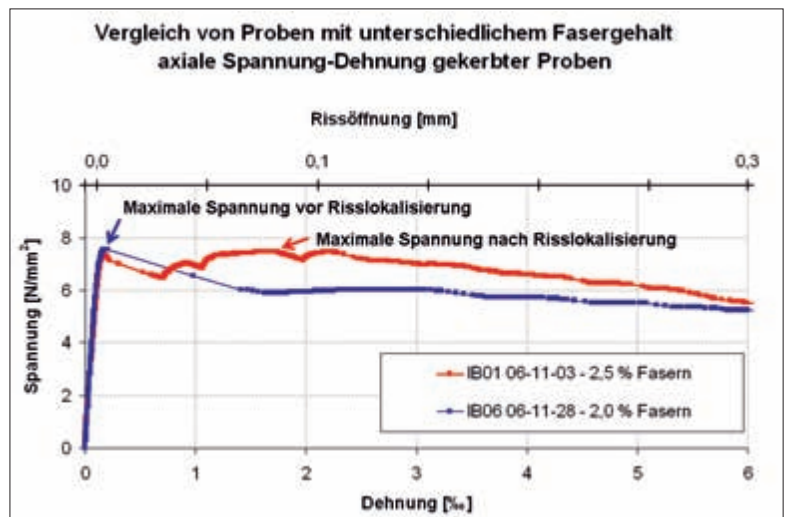


Abb. 9: Vergleich der Zugspannungs-Dehnungs-Linien bzw. Rissöffnungsbeziehungen für eine gekerbte Probe mit 2 Vol.-% Stahlfasern und eine Probe mit 2,5 Vol.-% Stahlfasern