

# Analyse von Schallemissionen bei Zugversuchen an hochduktilen Beton

Stephan PIRSKAWETZ<sup>1</sup>, Wolfram SCHMIDT<sup>1</sup>

<sup>1</sup> BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin

**Kurzfassung.** Hochduktiler Beton eröffnet neue Möglichkeiten bei der Instandsetzung von Bauwerken, der Herstellung dünnwandiger Bauelemente oder dem Einsatz von Dämpfungselementen in stoßartig beanspruchten Bauwerken (z.B. in Erdbebengebieten).

Die Steigerung der Duktilität kann durch die Zugabe von Kurzfasern erreicht werden. Im Falle einer Rissbildung in der Zementsteinmatrix überbrücken die Fasern den Riss, nehmen die Spannung vollständig auf und stoppen lokal das Risswachstum. Bei weiterer Steigerung der Last reißt die Matrix an anderer Stelle. Auf diese Weise wird die Rissbildung fein verteilt und es werden große Dehnungen erreicht, bevor das Bauteil versagt. Zur Optimierung der Festbetoneigenschaften müssen die Matrixfestigkeit und die Faserart sowie deren Gehalt aufeinander abgestimmt werden. Dabei sind auch die Verarbeitungseigenschaften des Frischbetons zu berücksichtigen.

Anhand der Schallemissionen kann die Rissbildung in der Matrix und die Interaktion mit den Fasern analysiert werden. So konnte in ersten Zugversuchen gezeigt werden, dass sich Schallereignisse dem Versagen der Zementsteinmatrix bzw. dem Auszug der Fasern aus der Matrix zuordnen lassen. Damit steht zur Beurteilung des mechanischen Verhaltens von hochduktilen Beton neben der Spannung-Dehnungs-Linie ein weiteres Verfahren zur Verfügung.

## Einführung

Hochduktiler Beton, mit der englischen Bezeichnung “Strain Hardening Cement Based Composite“ (SHCC), zeichnen sich dadurch aus, dass sie unter Zugbeanspruchung hohe Dehnungen aufweisen, bevor sich Mikrorisse zu Makrorissen vereinigen und das Versagen eintritt. Sie eignen sich vor allem zur Ertüchtigung und Neuerrichtung von Gebäuden, bei denen z.B. in Erdbebengebieten die Gefahr einer stoßartigen Beanspruchung besteht. Hochduktiler Beton kann aufgrund ihrer Rissüberbrückungsfähigkeit auch zur Verstärkung und Sanierung von Strukturen und deren Schutz vor Wasser eingesetzt werden [1], [2].

Die hohe Duktilität wird durch den Einsatz von Fasern erreicht. Die mechanischen Eigenschaften von Matrix und Fasern, die Fasergeometrie und der Verbund der Fasern mit der Matrix müssen zur Optimierung der Betoneigenschaften gut aufeinander abgestimmt werden. Unter Zugbelastung kommt es nach Erreichen der Zugfestigkeit der Matrix zunächst zur Bildung von Mikrorissen in der Matrix. Die den Riss kreuzenden Fasern nehmen die Spannungen auf und verhindern lokal ein weiteres Wachstum des Risses. Dadurch werden die Mikrorisse fein in der Matrix verteilt und die Spannung kann bei wachsender Dehnung weiter erhöht werden [3]. Erst wenn die Spannungen die Zugfestigkeit der tragenden Faser bzw. die Verbundfestigkeit zwischen Fasern und Matrix

übersteigen, kommt es zur Makrorissbildung. In einer Studie mit verschiedenen Betonrezepturen und Faserarten wurde untersucht, ob sich die Versagensmechanismen mit der Schallemissionsanalyse identifizieren lassen. Einige Ergebnisse werden im Folgenden am Beispiel einer Betonrezeptur vorgestellt.

## Experimentelle Arbeiten

### 1.1 Herstellung der Proben

Die Proben für Zugversuche wurden in Anlehnung an die Geometrie, die u.a. von Paul et al. [4] vorgeschlagen wurde, gefertigt. Gegenüber dieser Geometrie wurden aber sowohl der schlanke Probenteil als auch der Teil zum Spannen der Proben verlängert. Somit blieb mehr Platz zur Ankopplung der Schallemissionssensoren. Des Weiteren wurden die Übergänge zwischen den Querschnitten stärker ausgerundet. Die Maße der verwendeten Proben sind in Abbildung 1 dargestellt.

Tabelle 1 zeigt den Mischungsentwurf. Beim Zement handelt es sich um einen CEM I 42,5. Als Gesteinskörnung wurde ein Quarzsand mit einer maximalen Korngröße von 0,3 mm verwendet. Die PVA-Fasern (Polyvinylalkohol) hatten eine Länge von 12 mm und einen Durchmesser von 40 µm. Ihre Zugfestigkeit wird vom Hersteller Kuraray Co. Ltd., Japan, mit 1800 MPa angegeben.

Nach der Herstellung wurden die Proben zunächst einen Tag in den abgedeckten Schalungen belassen, anschließend ausgeschalt und bis zwei Tage vor der Prüfung unter Wasser gelagert. Die Lagerung bis zur Prüfung erfolgte dann bei 20 °C und 65 % r.F. Geprüft wurden die Proben 28 Tage nach der Herstellung.

**Tabelle 1.** Mischungsentwurf

Zement kg/m <sup>3</sup>	Wasser kg/m <sup>3</sup>	Flugasche kg/m <sup>3</sup>	Sand kg/m <sup>3</sup>	Fasern M-%	Fließmittel kg/m <sup>3</sup>	Stabilisierer kg/m <sup>3</sup>	Luftporenbildner kg/m <sup>3</sup>
– 359	– 359	– 616	– 506	– 2,5	– 2,15	– 0,04	– 0,54

### 1.2 Zugversuche

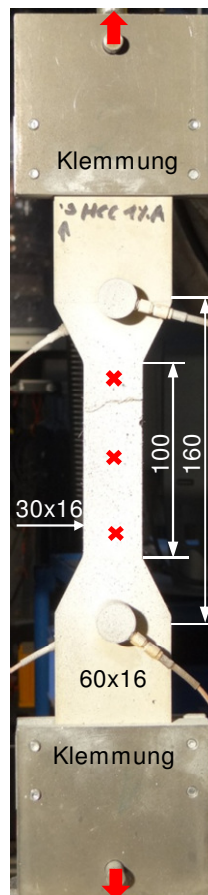
Die Belastung der Proben erfolgte in weggeregelten einaxialen Zugversuchen mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 0,01 mm/s. Dafür wurden die breiten Endstücke der Proben über eine Länge von 35 mm zwischen jeweils zwei Stahlplatten geklemmt, welche über Gelenke mit der Zugvorrichtung einer servohydraulischen Prüfmaschine verbunden wurden. Die Messung der Dehnung erfolgte mit einem Wegaufnehmer über die Länge des schlanken Querschnitts der Probe.

### 1.3 Schallemission

Wie in Abbildung 1 erkennbar, wurde je ein Sensor VS150MS am oberen und unteren Ende der Probe angekoppelt. Als Koppel- und Klebemittel diente BostikPrestik. Die Schallemissionsdaten sowie die Parameter Kraft und Dehnung wurden mit einem AMSY-5-System aufgezeichnet. Der Bandpassfilter wurde auf 25-850 kHz und die Erfassungsschwelle auf 36 dB gesetzt. Vor der Belastung wurde die Ankopplung der Sensoren mittels Bleistiftminenbruch (Mine 2H, Ø 0,3 mm) an den in Abbildung 1 rot markierten Punkten getestet. Dieser Test ermöglichte gleichzeitig die Bestimmung der Schallgeschwindigkeit der Proben.

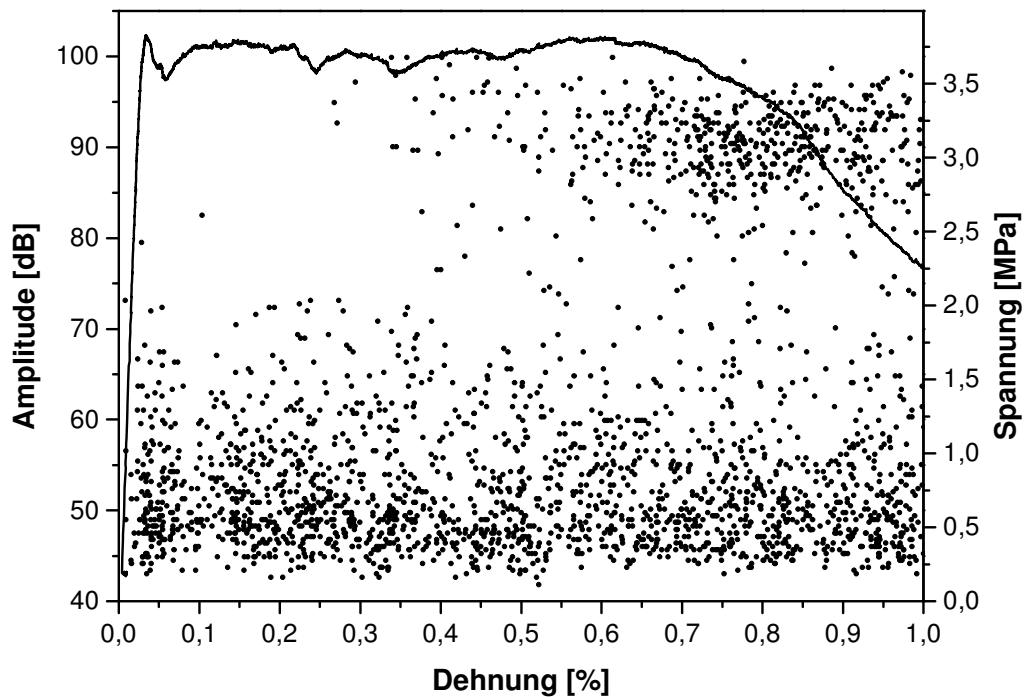
## 2. Ergebnisse und Diskussion

Die Schallgeschwindigkeit in der Zugprobe wurde indirekt über die bekannten Positionen der vor Belastungsbeginn durchgeführten Bleistiftminenbrüche ermittelt. Dafür wurde die Schallgeschwindigkeit im Ortungsalgorithmus so angepasst, dass die Ortungsergebnisse mit den Positionen der Bleistiftminenbrüche übereinstimmten. Die Schallgeschwindigkeit ist mit 3000 m/s im Vergleich zu Normalbetonen klein. Ursache dafür ist nicht der Faseranteil. Das konnte durch vergleichende Schallgeschwindigkeitsmessungen an Proben ohne Fasern aber sonst vergleichbarer Rezeptur gezeigt werden.



**Abb. 1.** SHCC-Zugprobe in der Klemmvorrichtung der Prüfmaschine. Die roten Kreuze markieren die Positionen der Bleistiftminenbrüche.

Der Spannungsverlauf während der Zugbelastung ist in Abbildung 2 dargestellt. Nach einem nahezu linearen Spannungsanstieg konnte mit der beschriebenen Mischung, Probengeometrie und Belastung eine Erstrissspannung von 3,8 MPa erreicht werden. Im anschließenden dehnungsverfestigenden Bereich bewegt sich die Spannung zwischen 3,8 MPa und 3,6 MPa. Ab einer Dehnung von ca. 0,7 % setzt das finale Versagen der Probe ein und die Zugspannung fällt rapide ab.



**Abb. 2.** Amplituden der Schallemissionen in Korrelation zur Zugspannung.

Im Amplitudendiagramm (Abb. 2) sind im linearen Bereich keine Schallemissionen erkennbar. Erst mit Erreichen der maximalen Spannung setzt eine nennenswerte Schallemissionsaktivität ein. Bis zu einer Dehnung von 0,25 % liegen die Amplituden der Schallemissionen unter 75 dB und deren Quellen sind, wie das Ortungsdiagramm Abb. 3 zeigt, relativ gleichmäßig über die Probenlänge verteilt. Das läßt auf eine Mikrorissbildung in der Matrix schließen. Die Konzentration der Mikrorisse zu einem Hauptriss beginnt ab einer Dehnung von 0,3 %. Ab dieser Dehnung werden Schallemissionen mit Amplituden über 75 dB registriert, deren Quellen sich innerhalb der nach dem Versuch erkennbaren Hauptschädigungszone orten lassen. Mit der Schallemissionsanalyse ist damit der zu vermutende kritische Schädigungsbeginn deutlich eher als anhand der Spannung-Dehnungs-Linie bei 0,7 % erkennbar. Die Entfestigung ab 0,7 % Dehnung wird erwartungsgemäß von einer hohen Schallemissionsaktivität begleitet. Bemerkenswert ist, dass auch während der Entfestigung nur vergleichsweise wenig Schallemissionen im Amplitudenbereich von 70 dB bis 85 dB auftreten.

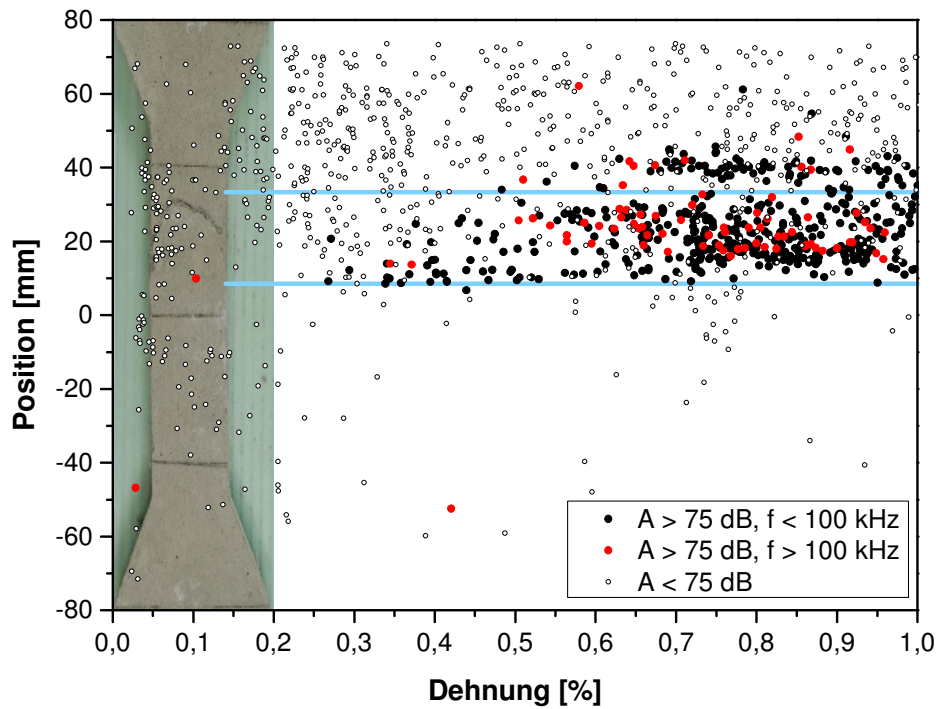


Abb. 3. Ortungsergebnisse im Vergleich zum Schadensbild am Versuchsende.

Zur weiteren Differenzierung der Schallemissionen und deren Quellmechanismen wurden die Signale fouriertransformiert. Einem Vorschlag von Sause [5] folgend, wurden dann aus peak frequencies  $f_{MXA}$  und frequency centres of gravity  $f_{COG}$  die *weighted peak frequencies*  $f_{WP} = \sqrt{f_{COG} \times f_{MXA}}$  der Signale berechnet. Wie aus Abb. 4 deutlich wird, können die Schallemissionen anhand der Frequenzen in zwei Gruppen eingeteilt werden: Signale mit Frequenzen kleiner als 100 kHz und mit Frequenzen größer als 100 kHz.

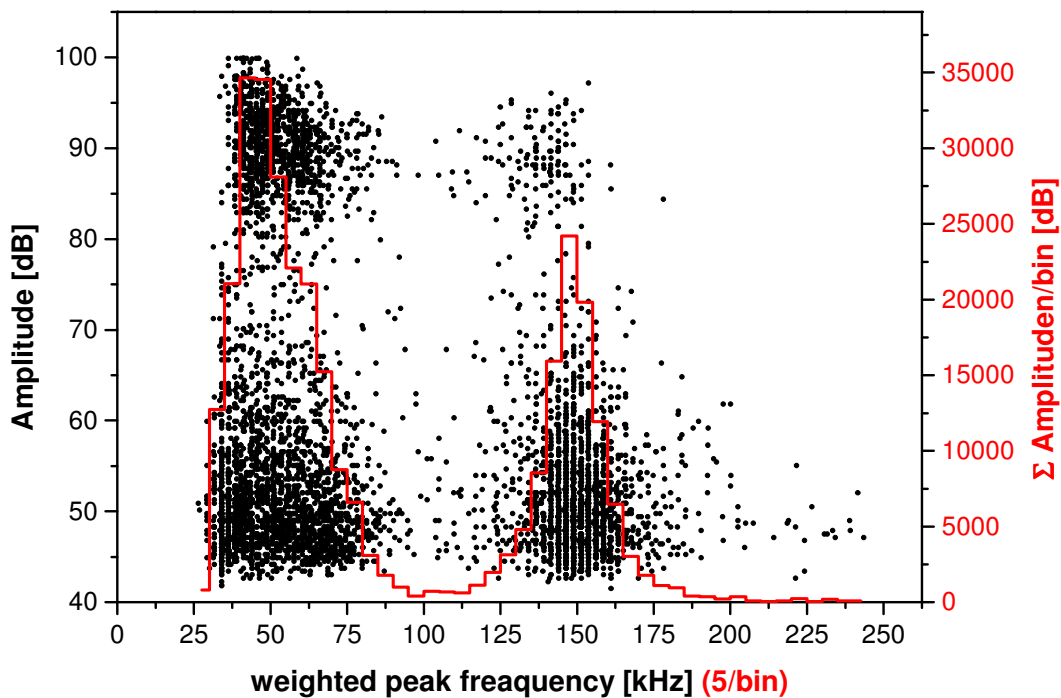


Abb. 4. Verteilung der Amplituden bezüglich der Frequenz.

Der Vergleich der Schallemissionsaktivität in den beiden Frequenzbereichen mit der Spannungs-Dehnungs-Linie zeigt, dass im dehnungsverfestigenden Bereich bis 0,3 % Dehnung die Schallemissionen mit hohen Frequenzen überwiegen. Durch Vergleich mit Zugversuchen an Proben ohne Fasern können diese Schallemissionen Matrixrissen zugeordnet werden. Ab einer Dehnung von 0,5 % treten Ereignisse mit Amplituden über 75 dB und Frequenzen über 100 kHz auf. Diese entstehen, wie Zugversuche an einzelnen, nur teilweise in eine Matrix eingebetteten Fasern ergaben, bei Faserrissen. Dominiert wird dieser Bereich aber von Schallemissionen mit hohen Amplituden und Frequenzen unterhalb von 100 kHz. Vermutlich sind diese Schallemissionen auf das teilweise Ausziehen einzelner Fasern aus der Matrix zurückzuführen. Das konnte allerdings nicht durch Zugversuche an Einzelfasern bestätigt werden. Die Fasern ließen sich bei diesem Versuchsaufbau nicht aus der Matrix ziehen, da sie zuvor rissen.

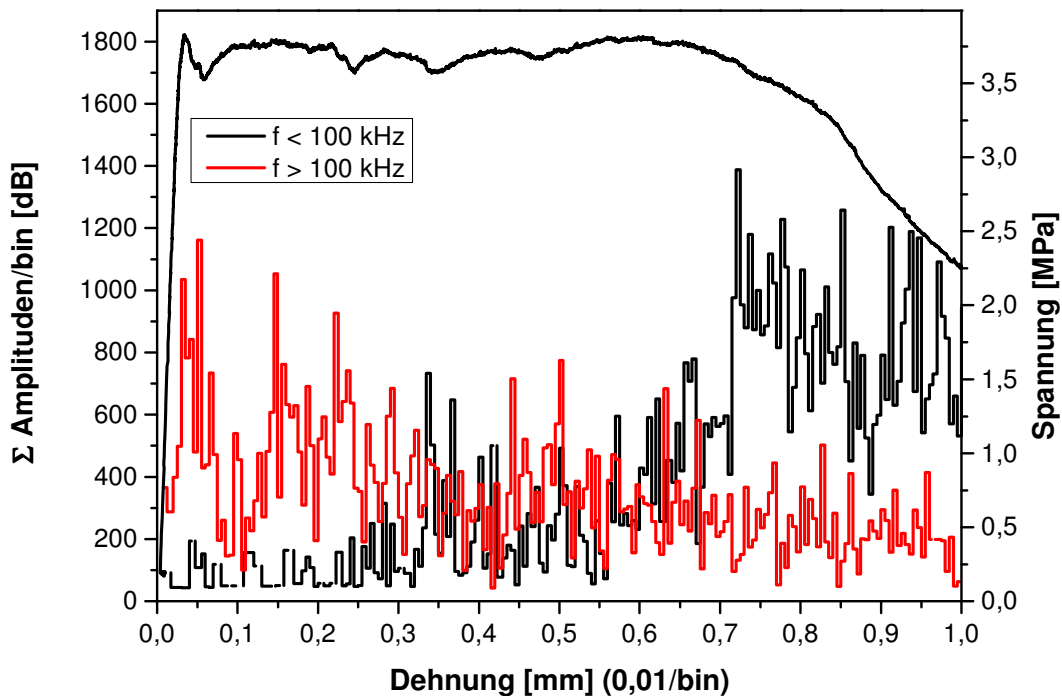


Abb. 5. Frequenzen der Schallereignisse in Korrelation zur Spannungs-Dehnungs-Linie.

### 3. Zusammenfassung

Anhand des beschriebenen Zugversuches konnte gezeigt werden, dass sich mit der Schallemissionsanalyse verschiedenen Schädigungsprozesse in hochduktilen Betonen identifizieren lassen. Mittels der Frequenzen und Amplituden der Signale können die Entstehung von Matrixrissen, Faserrissen und das Ausziehen von Fasern aus der Matrix unterschieden werden. Die Charakteristika der Matrix- und Faserbrüche ließen sich in zusätzlichen Versuchen bestätigen. Zur Validierung der Charakteristik der der Schallemissionen während des Ausziehens der Fasern aus der Matrix sind allerdings noch weiterführende Versuche nötig.

Die Schallemissionsanalyse eignet sich damit hervorragend zur Untersuchung des Trag- und Versagenverhaltens hochduktiler Betone und wird zu einem wertvollen Werkzeug bei deren Optimierung.

## Referenzen

- [1] V. Mechtcherine, Novel cement-based composites for the strengthening and repair of concrete structures, *Construction and Building Materials* 41 (2013) 365–373
- [2] E. Esmaeeli, J.A.O. Barros, J. Sena-Cruz, L. Fasan, F. R. L. Prizzi, J. Melo, H. Varum, Retrofitting of interior RC beam–column joints using CFRP strengthened SHCC: Cast-in-place solution, *Composite Structures* 122 (2015) 456–467
- [3] P. Jun, V. Mechtcherine, Behaviour of Strain-hardening Cement-based Composites (SHCC) under monotonic and cyclic tensile loading Part 1 – Experimental investigations, *Cement & Concrete Composites* 32 (2010) 801–809
- [4] S.C. Paul, G.P.A.G. van Zijl, Mechanically induced cracking behaviour in fine and coarse sand strain hardening cement based composites (SHCC) at different load levels, *J. Adv. Concr. Technol.* 11 (2013) 301–311.
- [5] M.G.R. Sause, S. Horn, Simulation of acoustic emission in planar carbon fibre reinforced plastic specimen, *J. Nondestruct. Eval.* 29 (2010) 123–142.