

# Modellierung und numerische Analyse von Beton und faserverstärktem Ultrahochleistungsbeton mit der Diskrete Elemente Methode

Felix Ockelmann

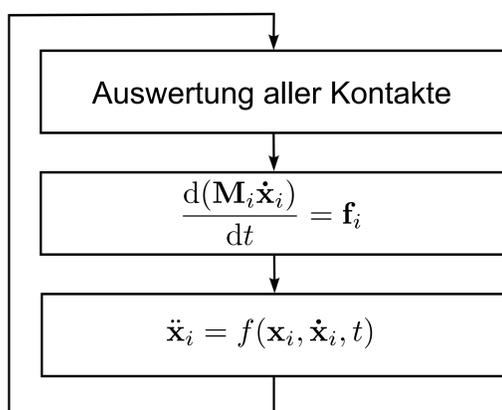
## Motivation

Beton ist einer der am häufigsten verwendeten Baustoffe der Welt. Aufgrund seiner Vielseitigkeit sowie einer guten Wirtschaftlichkeit kommt er in fast allen Anwendungsgebieten zum Einsatz. Dem gegenüber steht ein sehr sprödes Materialverhalten, was die Verwendung von Bewehrung in zugbeanspruchten Teilen notwendig macht. Die Entwicklung neuer und innovativer Betone hat in den letzten Jahren viele hochfeste (HPC) und ultrahochfeste (UHPC) Betone hervorgebracht. Diese Werkstoffe haben eine extrem hohe Festigkeit, zeigen jedoch ein noch spröderes Versagensverhalten als Normalbetone. Stahlfasern als Zuschläge bieten die Möglichkeit trotz dieser Eigenschaften ein duktileres Versagen von Bauteilen und Strukturen zu bewirken.

## Modellbildung

Die theoretische Grundlage der Arbeit bildet die Diskrete Elemente Methode (DEM), die ein Teil der Partikelmethode darstellt. Ausgehend von der ursprünglich für granulare Medien entwickelten Methode, wird ein Modell für Festkörper entwickelt. Das Kontinuum wird auf diskrete Massenpunkte aufgeteilt, die als Partikel bezeichnet werden, jedoch eher Berechnungspunkten als Kleinstteilchen entsprechen. Die Partikel sind über Kontaktmodell miteinander verbunden.

Simulationen mit der DEM laufen grundsätzlich in drei Schritten ab. Zunächst werden alle Kontakte zwischen den Partikeln ausgewertet. Aus der Auswertung resultieren Kräfte, die über das 2. Newton'sche Gesetz mit den Beschleunigungen der Partikel verknüpft sind. Dieser Zusammenhang wird gelöst und als letzter Schritt das entstehende Anfangswertproblem für die Bewegungsgleichung gelöst.



Abschlaufschemata einer Simulation mit der DEM

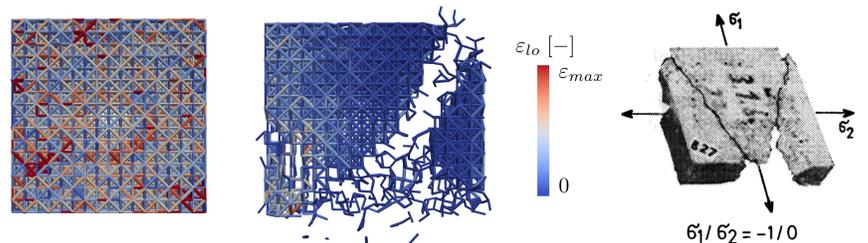
Die Modellierung von initial verbundenen Kontakten wird um eine Versagensbedingung erweitert um Bruchvorgänge beschreiben zu können. Als Kriterium für das Aufbrechen eines Kontaktes werden die lokalen Verzerrungen begrenzt.

$$1 \geq \begin{cases} \left( \frac{\alpha_{en} \varepsilon_{nn}^{ij}}{\varepsilon_{max}} \right)^2 + \left( \frac{\varepsilon_{ns}^{ij}}{\varepsilon_{max}} \right)^2 + \left( \frac{\varepsilon_{nt}^{ij}}{\varepsilon_{max}} \right)^2, & \text{wenn } \varepsilon_{nn}^{ij} > 0 \\ \left( \frac{\varepsilon_{ns}^{ij}}{\varepsilon_{max}} \right)^2 + \left( \frac{\varepsilon_{nt}^{ij}}{\varepsilon_{max}} \right)^2, & \text{wenn } \varepsilon_{nn}^{ij} < 0 \end{cases}$$

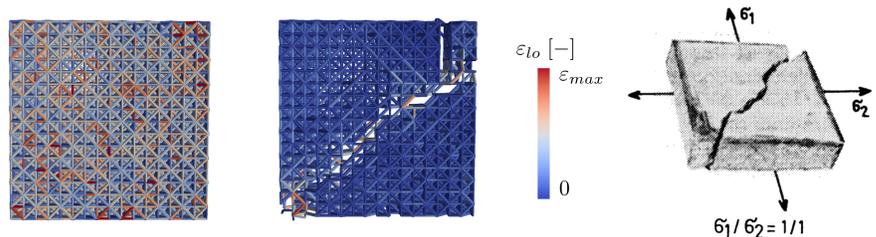
Versagt der Kontakt wird er von der Auswertung ausgeschlossen und stellt im weiteren Verlauf keinen Teil der Struktur mehr dar. Es entsteht eine Auftrennung des Kontinuums und dadurch anschaulich ein Riss.

## Simulation von Bruchvorgängen

Kupfer und Zelger führten 1961 umfangreiche Experimente an Betonscheiben unter ein- und biachsialen Beanspruchungen durch. Die Ergebnisse für Simulationen mit der DEM sowie die experimentellen Referenzergebnisse von Kupfer sind für einachsiale Druck- sowie biachsiale Zugversuche dargestellt.



Verzerrungen vor (links) und nach (Mitte) dem Erreichen der einachsialen Druckfestigkeit sowie Referenz (rechts)



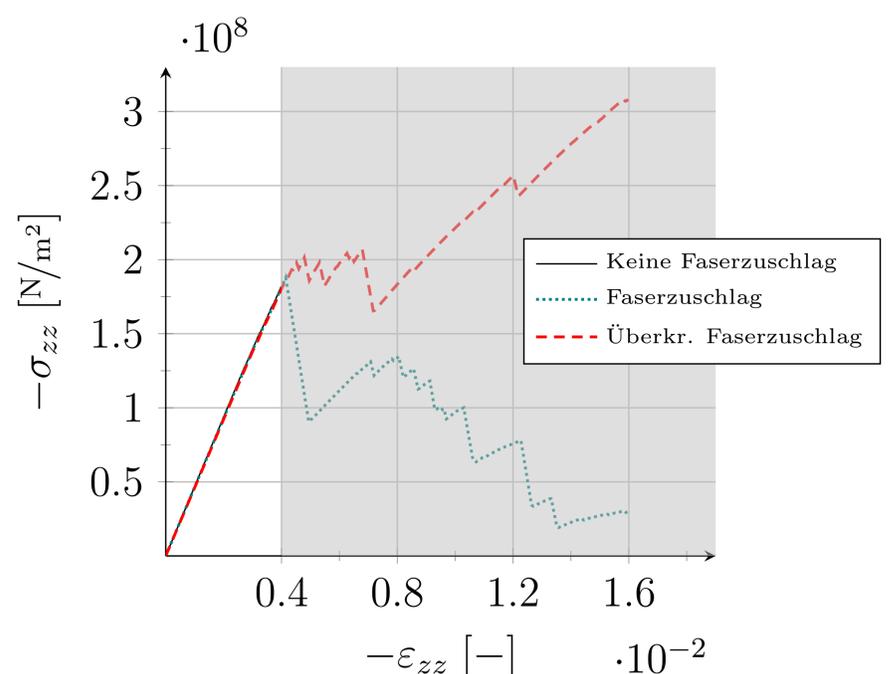
Verzerrungen vor (links) und nach (Mitte) dem Erreichen der biachsialen Zugfestigkeit sowie Referenz (rechts)

## Faserzuschlag

Nach dem Erreichen des Versagenskriteriums wird ein rheologisches Element für die Faserwirkung aktiviert. Die Phänomenologie der Fasern und deren Verbund im Beton wird mit einem kombinierten Element zusammengefasst und berücksichtigt:

- Elastisch – plastisches Materialverhalten
- Viskose Dämpfung
- Kraft-Schlupf Auszugbedingung

Die Menge der Fasern bestimmt das Nachbruchverhalten. Bei geeigneten Fasergehalten kann ein duktileres Bauteilversagen erreicht werden.



Druckprüfungen an UHPC-Würfeln mit und ohne Faserzuschlag