



**TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN**

**Entwicklung eines zustandsabhängigen DEM-Stoffmodells  
zur Nachbildung von Mischprozessen für Frischbeton**

**Development of a state-dependent DEM-Contact-Model to  
simulate mixing processes of fresh concrete**

**Dissertation**

Zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

Eingereicht an der Fakultät für Bauingenieurwesen  
der Technischen Universität Dresden

Von Diplom Informatiker Knut Krenzer  
Geboren am 08.05.1981 in Weimar

Dresden 2016

# Entwicklung eines zustandsabhängigen DEM-Stoffmodells zur Nachbildung von Mischprozessen für Frischbeton

## Kurzfassung

In der vorliegenden Dissertation wird ein Simulationsmodell für die Diskrete Elemente Methode vorgestellt, das in der Lage ist, das Materialverhalten während des Mischprozesses von Frischbeton nachzubilden. Zur realitätsnahen Abbildung des Materialverhaltens während des gesamten Mischprozesses ist zum einen die korrekte, prozessabhängige Modellierung der Feuchtigkeitsverteilung im Mischgut notwendig. Zum anderen definiert sich das lokale Materialverhalten durch den aktuellen Feuchtegrad und die Materialzusammensetzung der Mischung und muss im Simulationsmodell Berücksichtigung finden. Zur korrekten Modellierung der Feuchteverteilung wurde der Flüssigkeitstransfer zwischen unterschiedlich feuchten Kontaktpartnern (Partikeln) im Simulationsmodell realisiert. Der Flüssigkeitstransfer ist dabei abhängig vom Feuchtegrad der beiden Kontaktpartner, ihrer relativen Positionierung zueinander und der Viskosität der zu transferierenden Flüssigkeit. Zudem spielt die Partikelgröße eine entscheidende Rolle bei der Flüssigkeitsaufnahme eines Partikels und bei der Geschwindigkeit des Flüssigkeitstransfers. Zur Repräsentation des Flüssigkeitsanteils jedes Partikels im Simulationsmodell erhalten alle Partikel eine zusätzliche Partikelvariable. Feuchte Feststoffpartikel lassen sich somit als zweischichtige Partikel repräsentieren, die eine äußere Flüssigkeitsschicht und einen inneren Feststoffkern besitzen. Die Modellierung des Materialverhaltens basiert auf einer Unterteilung in drei verschiedene Kraftkomponenten, die in Abhängigkeit der lokalen Feuchtegrade Anwendung finden. Die erste Kraftkomponente umfasst Reibungs-, Dämpfungs- und Federkräfte, die bei trockenen Feststoffkontakten zum Einsatz kommen. Die zweite Kraftkomponente besteht aus zusätzlichen Flüssigkeitsbrückenkräften, die bei leicht angefeuchteten Materialien wirken. Die Flüssigkeitsbrückenkräfte definieren sich in Abhängigkeit von Flüssigkeitsvolumen, Flüssigkeitszusammensetzung, Partikelgröße und Abstand der Kontaktpartner. Die dritte Kraftkomponente umfasst die viskosen Kräfte, die bedingt durch die Flüssigkeitsschichten zwischen den Kontaktpartnern auftreten. Die viskosen Kräfte in Tangentialrichtung basieren auf dem Bingham-Modell, das häufig für zementgebundene Suspensionen eingesetzt wird. Die Anwendung des Bingham-Modells setzt die Kenntnis der rheologischen Kenngrößen Fließgrenze und plastische Viskosität voraus, die aus der lokalen Zusammensetzung der Flüssigkeitsschicht approximiert werden müssen. Die Grundlage für diese Approximation bilden sowohl Modelle aus der Literatur als auch experimentelle Untersuchungen, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden. Auch die Definitionen der materialabhängigen Flüssigkeitsaufnahmemengen und -geschwindigkeit sowie die Berechnung der zustandsabhängigen Flüssigkeitsbrückenkräfte basieren auf theoretischen Modellen und experimentellen Untersuchungen. Die Experimente sollen die entsprechenden theoretischen Modelle stützen, die materialspezifischen Modellparameter bestimmen und zusätzliche Daten außerhalb des Gültigkeitsbereichs der Modelle liefern. Alle Einzelaspekte der Flüssigkeitsaufnahme, des -transfers und des feuchteabhängigen Materialverhaltens werden in der Simulation implementiert und anhand der Nachbildung der Experimente überprüft. Das Zusammenspiel aller Modellaspekte wird anhand der Simulation eines experimentell durchgeführten Betonmischprozesses in einem Zwangsmischer für zwei Rezepturen mit unterschiedlichen w/z-Werten ohne Verwendung von Zusatzstoffen und -mitteln validiert. Während des Mischprozesses wurde die Leistungsaufnahme des Mixers erfasst und mit der aus dem Drehmoment abgeleiteten Leistungsausnahme aus der Simulation verglichen. Dabei zeigte sich eine gute qualitative Übereinstimmung des zeitlichen Leistungsverlaufs, der das realistische Durchlaufen der verschiedenen Phasen der Materialzustände widerspiegelt. Als zusätzliches Vergleichskriterium wurde nach dem Mischprozess das Setz- bzw. Setzfließmaß ermittelt. Auch hier zeigte sich eine gute qualitative Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation. Damit konnte die grundsätzliche Anwendbarkeit des Modells zur Nachbildung des Materialverhaltens während des Frischbetonmischprozesses anhand einer ausgewählten Betonrezeptur demonstriert werden.

## **Development of a state-dependent DEM-Contact-Model to simulate mixing processes of fresh concrete**

### **Abstract**

In this thesis a simulation model for the Discrete Element Method is presented, which is capable to simulate the material behavior during the mixing process of fresh concrete. For the realistic modeling of the material behavior during the entire mixing process two major aspects have to be integrated in the model. On the one hand the correct, process-dependent representation of the moisture distribution within the mix is necessary. Second, the local material behavior defined by the current degree of humidity and the mix composition must be taken into account in the simulation model. For a correct simulation of the humidity distribution representation the fluid transfers between different wet contact partners (particles) was realized in the contact model. The fluid transfer is dependent on the moisture level of the two contact partners, their relative positioning to each other and the viscosity of the liquid to be transferred. In addition, the particle size plays a crucial role in the water absorption capacity of a particle and in the water transfer velocity. For the representation of the liquid content of each particle, all particles in the simulation model have an additional particle variable. Wetted solid particles can thus be represented as two-layered particles having an outer liquid layer and an inner solid core. The modeling of the material behavior is based on a subdivision into three different force components, which are applied dependent on the local moisture degree. The first force component comprises friction, damping and spring forces, which are used in dry solid contacts. The second force component consists of additional liquid bridge forces acting in weakly wetted materials. The liquid bridge forces are defined as a function of liquid volume, liquid composition, particle size and the distance of the contact partners. The third force component covers the viscous forces that occur due to the fluid layers between the contact partners. The viscous forces in the tangential direction are based on the Bingham model, which is commonly used for cementitious suspensions. The application of the Bingham model assumes knowledge of the rheological parameters yield stress and plastic viscosity, which need to be approximated from the local composition of the liquid layer. The basis of this approximation is provided by models of literature and experimental investigations that have been carried out in this work. Also, the definitions of the material-dependent fluid absorption volume and the liquid transfer velocity as well as the computation of the state-dependent liquid bridge forces are based on theoretical models and experimental studies. Experiments are supposed to support the relevant theoretical models, determine the material-specific model parameters and provide additional information outside the scope of the models. All aspects of the fluid absorption, fluid transfer and the moisture-dependent material behavior are implemented in the simulation and verified by the remodeling of the experiments. The interplay of all aspects of the model is validated by the simulation of an experimentally investigated concrete mixing process in a compulsory mixer for two concrete recipes with different w/c ratios without using additives and admixtures. During the mixing process the power consumption of the mixer was recorded and compared with the approximated power consumption in the simulation, deduced from the torque data. Thereby a good qualitative agreement of the power curve was achieved, which reflects a realistic pass through the various phases of the material states during the mixing process. As an additional comparison criterion the slump or the slump flow was determined after the mixing process. Again, a good qualitative agreement between experiment and simulation was achieved. Thus the basic applicability of the model to simulate the material behavior during the fresh concrete mixing process is demonstrated using a selected concrete mix.