

# Zum Formfüllungsvermögen dünnwandiger Schalungen – Experiment und Simulation

S. Illguth (1), D. Lowke (2) und C. Gehlen (3)

Centrum Baustoffe und Materialprüfung, Technische Universität München  
1. Tel. +49.89.289.27101 · illguth@tum.de  
2. Tel. +49.89.289.27119 · lowke@tum.de  
3. Tel. +49.89.289.27062 · gehlen@tum.de



---

## **Sandy Illguth M.Sc.**

---

2003–2008 Diplomstudium Bauingenieurwesen an der Fachhochschule München

---

2008 – 2009 Masterstudium Baustoffe, Bauchemie und Instandsetzung an der Technischen Universität München

---

Seit 2009 Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Centrum Baustoffe und Materialprüfung der Technischen Universität München, Arbeitsgruppe Betontechnologie

---

## **Kurzfassung**

Insbesondere bei dünnwandigen, gekrümmten Schalungen ist es mitunter schwierig, diese komplett und in angemessener Zeit durch Beton auszufüllen. Kommt zudem ein zäher Hochleistungsbeton für das Bauteil zum Einsatz, kann die Formfüllung unter Umständen nicht mehr gewährleistet werden. Umso wichtiger wird es, eine Methode zu haben, mit der es möglich ist, das Fließverhalten des Betons und damit den Füllungsgrad der Schalung vorherzusagen zu können. Im Beitrag wird eine Methode vorgestellt, die es ermöglicht, das Fließverhalten von feinkörnigem UHPC mit numerischer Strömungsmechanik abzubilden.

## Einleitung

Architektonisch ansprechende Bauwerke sind oft dünnwandig und frei geformt, wie das jüngst erbaute Museum der Zivilisationen Europas und des Mittelmeers in Marseille. Soll der Werkstoff Beton bei solchen Bauwerken zum Einsatz kommen, muss die Festigkeit entsprechend hoch sein, um alle Lasten abtragen zu können. Dies wiederum bedingt in der Regel einen Hochleistungsbeton, der über das bekannte 3-Stoff-System Zement-Wasser-Gesteinskörnung hinausgeht. Diese Betone, die zusätzlich noch Zusatzstoffe wie Quarzmehle oder Kalksteinmehle und Fließmittel enthalten, sind jedoch mitunter schlecht verarbeitbar, die Konsistenz ist plastisch bzw. zähflüssig. Die Herstellung filigraner Bauteile bedingt jedoch eine gute Fließfähigkeit des Betons, um die dünnwandigen Schalungen mit Querschnittsdicken von zum Teil  $\leq 50$  mm komplett und hohlstellenfrei zu befüllen. Der zur Regulierung der Konsistenz verwendete Wasser- und Fließmittelgehalt sollte jedoch aufgrund der geforderten hohen Festigkeiten und der ökologischen bzw. ökonomischen Vertretbarkeit möglichst niedrig gehalten werden. Im Hinblick auf die für dünnwandige Schalungen geforderte gute Fließfähigkeit ist es notwendig, eine Methode zu entwickeln, mit der das Formfüllungsvermögen von Betonen zielsicher vorhergesagt werden kann. Die Methode der numerischen Strömungsmechanik (engl. CFD - Computational Fluid Dynamics) bietet die Möglichkeit, den Fließvorgang von Beton zu simulieren. Dafür ist es notwendig, die für die Simulation notwendigen rheologischen Eingangsparameter vorab in einem Experiment möglichst genau zu bestimmen.

Im vorliegenden Beitrag wurde das Fließverhalten von ultrahochfestem Beton (UHPC) mithilfe der numerischen Strömungsmechanik simuliert. Dazu wurde eine Methode entwickelt, mit der es möglich ist, aus experimentell ermittelten Daten Eingangsparameter für die Simulation zu bestimmen.

## Experiment

Zunächst erfolgten Untersuchungen in einem Rotationsrheometer mit einem Kugel-Mess-System, siehe Bild 1. Ziel dieser Versuche war es, das jeweils durch den Widerstand der Kugel hervorgerufene Moment zu erfassen, wenn der mit Beton gefüllte Topf mit den Geschwindigkeiten 32-16-3,2-0,16 U/min für 10s bei höchster und je weiterer Geschwindigkeit für 15s rotierte. Neben zwei feinkörnigen ultrahochfesten Betonen (ein UHPC entsprach der Mi-

schung M3Q ohne Stahlfasern aus dem DFG-Schwerpunktprogramm SPP 1182 [1]) wurde zusätzlich ein Silikonöl mit einer konstanten Viskosität im Rotationsrheometer untersucht. Silikonöl weist im Gegensatz zu den beiden Betonen keine scherratenabhängige Viskosität auf und diente daher zur Kalibrierung der Simulation.

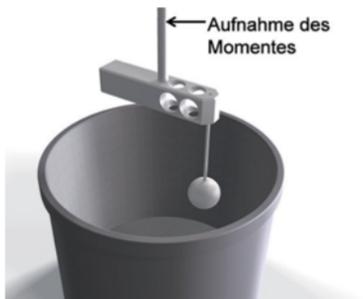


Bild 1: Kugel-Mess-System für Rotationsrheometer (Fa. Schleibinger [2])

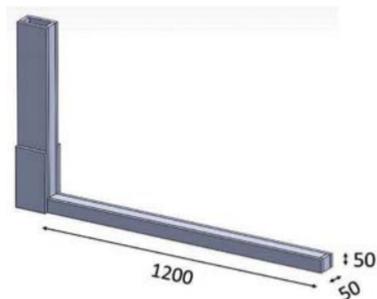


Bild 2: L-förmige Modellschalung zur Untersuchung des Formfüllungsvermögens (Maße in mm)

Das Formfüllungsvermögen wurde in einer L-förmigen Modellschalung untersucht (siehe Bild 2). Nach Befüllung des vertikalen Schenkels mit Beton wurde das Trennblech zum horizontalen Schenkel mit einer Geschwindigkeit von 0,2 m/s gezogen und die Fließstrecke im allseitig geschlossenen horizontalen Schenkel fotografisch aufgezeichnet.

## Simulation

Zur Simulation der Betone wurde die Software Flow 3D® [3] verwendet. Strömungsvorgänge werden hierin durch Lösen der Navier-Stokes-Gleichungen abgebildet. Es ist möglich, die dynamische Viskosität  $\eta$  des Betons in Abhängigkeit der je nach Fließgeschwindigkeit vorherrschenden Scherrate  $\dot{\gamma}$  zu definieren. In einem ersten Ansatz erfolgt die Darstellung der Viskosität in Abhängigkeit der Scherrate auf Grundlage des Potenzgesetzes von Ostwald und de Waele [4] mit folgender Gleichung

$$\eta = k \cdot \dot{\gamma}^{b-1} (\dot{\gamma} \geq 0,001)$$

Gleichung 1

mit

$k$  – Konsistenz [ $Pa \cdot s^n$ ]

$\dot{\gamma}$  – Scherrate [ $s^{-1}$ ]

$b$  – Fließindex [-].

Um die für jeden Beton unterschiedlichen Parameter  $k$  und  $b$  aus Gleichung 1 zu bestimmen, waren folgende Schritte notwendig:

1. Bildung des Simulationsmodells für das Rotationsrheometer (siehe Bild 3) und Konvergenzanalyse zu Elementgröße und Größe des Zeitschrittes
2. Variation der Parameter  $k$  und  $b$  in einem vorgegebenen Intervall
3. Bestimmung von stetig differenzierbaren Ersatzfunktionen (vgl. Gleichung 2) für die Torsionsmomente der unterschiedlichen Geschwindigkeitsstufen (Mittelwerte der letzten 2 s der jeweiligen Stufe) in Abhängigkeit der genannten Parameter

$$R_i(x) = c_0 + \sum_{i=1}^n c_i \cdot x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n c_{ij} \cdot x_i \cdot x_j \quad \text{Gleichung 2}$$

mit

$R_i$  – Torsionsmoment

$x$  – Variablenvektor, hier  $x^T = [k \ b]$

$c_i, c_{ij}$  – Konstanten

4. Verwendung eines Optimierungsmodells zur Bestimmung der Modellparameter unter Minimierung der Fehlerquadratsumme der Torsionsmomente aus Experiment und Ersatzfunktion

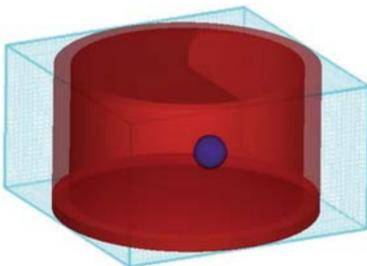


Bild 3: Modell des Rotationsrheometers mit Kugel

Dieses Vorgehen hat den Vorteil, dass die Modell-Parameter sofort zur Verfügung stehen, wenn die zuvor bestimmten Ersatzfunktionen die Simulationsergebnisse hinreichend genau wiedergeben und die Simulationsmodelle alle hier signifikanten physikalischen Zusammenhänge ausreichend genau beschreiben können.

Die Vernetzung des Rotationsrheometermodells erfolgte mit Hexaeder-Elementen mit einer Kantenlänge von 3 mm. Bild 4 zeigt den im Rotationsrheometer bestimmten Momentenverlauf beispielhaft für die Mischung M3Q. Zum Vergleich ist die Simulationskurve mit den nach oben beschriebener Methode bestimmten Eingangsparametern  $k$  und  $b$  dargestellt.

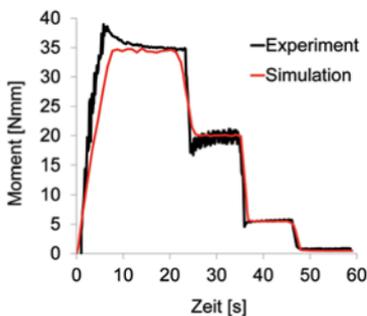


Bild 4: Experimenteller und simulierter Momentenverlauf von M3Q aus dem Rotationsrheometerexperiment

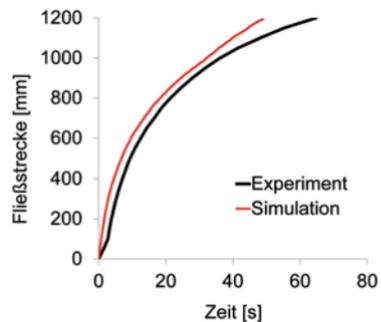


Bild 5: Experimentell bestimmte und simulierte Fließstrecke von M3Q in L-förmiger Modellschalung

Mit den bestimmten Parametern  $k$  und  $b$  wurde anschließend das Formfüllungsvermögen der beiden Betone in der L-förmigen Modellschalung simuliert. Hierfür wurde die Kantenlänge der Hexaeder-Elemente auf 5 mm erhöht, um Rechenzeit zu sparen. In Bild 5 ist jeweils der zeitliche Verlauf der Fließstrecke im horizontalen Schenkel aus dem Experiment und der Simulation – wiederum exemplarisch für M3Q - ersichtlich. Hier zeigte sich eine gute Übereinstimmung der experimentellen mit denen aus der Simulation erhaltenen Werte. Die mit CFD ermittelten Fließstrecken unterschieden sich mit zunehmender Zeit und damit kleiner werdenden Scherraten gegenüber den im Experiment ermittelten Fließstrecken. Das Fließverhalten im Bereich geringer Scherraten könnte durch Einführung eines zusätzlichen Parameters  $\tau_0$  in Gleichung 1 und der damit verbundenen Überführung in das Herschel-Bulkley-Modell noch optimiert werden. Dies soll in nachfolgenden Untersuchungen geklärt werden.

## Schlussfolgerungen

Mit der hier vorgestellten Methode ist es nunmehr möglich, das Fließverhalten von feinkörnigen ultrahochfesten Betonen in einer L-förmigen Modellschalung vorherzusagen. Um sicherzustellen, dass das Fließverhalten auch in großformatigen, gekrümmten Schalungen vorhersagbar ist, müssen der Anwendung der oben vorgestellten Methode jedoch großformatige Experimente zur Verifikation vorausgehen. Hier können zudem zeitliche Einflüsse wie Thixotropie hinzukommen, die das Fließverhalten wiederum entscheidend beeinflussen. Somit wird es notwendig, auch diese Komponente in das Modell z.B. als einen zusätzlichen Parameter mit einzubinden.

Dünnwandige hochfeste Betone sind zudem meist faserbewehrt. Entsprechend müssen die Methode bzw. die eingebunden Parameter auch auf das Fließverhalten faserhaltiger Betone hin überprüft werden.

Die Untersuchungen fanden innerhalb des DFG-Schwerpunktprogrammes 1542 Leicht Bauen mit Beton statt.

## Literatur

- [1] Fröhlich, S., Schmidt, M.: Influences on Repeatability and Reproducibility of Testing Methods for Fresh UHPC. In: Ultra-High Performance Concrete and Nanotechnology in Construction Proceedings of Hipermat 2012. 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials, Kassel, March 7-9, 2012
- [2] [www.schleibinger.com](http://www.schleibinger.com)
- [3] FLOW-3D v10.0 user manual
- [4] Chhabra, R.P. Richardson, J.F. (2008). Non-Newtonian Flow and Applied Rheology - Engineering Applications (2nd Edition). Elsevier