

Numerische Simulation des Fließverhaltens von Newton'schen Fluiden in einem Großspaltrheometer mittels CFD

Numerical Simulation of the flow behavior of Newtonian fluids in a wide gap rheometer by CFD

Eslami Pirharati, M.; Krauss, H.-W.; Lowke, D.

Abstract

Wide gap coaxial rheometers with vane-in-cup systems are widely used to determine rheological properties of cement paste, mortar and concrete. In the present contribution, experimental investigations of Newtonian fluids in a wide gap rheometer are presented. Accuracy of analytical models is discussed with respect to shear rate distributions over gap and over cylinder respectively vane probe surfaces determined from Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations. Furthermore, a modified analytical model is proposed.

1. Einleitung

Großspaltrheometer mit dem Sternpaddel werden üblicherweise zur Bestimmung der rheologischen Eigenschaften von nicht-Newton'schen Fluiden z.B. Zementleim, Mörtel und Beton verwendet. Das Materialflussverhalten ist komplex um die Spitzen in dem Sternpaddel. Ovarlez et al. [1] untersuchten die lokalen Fließeigenschaften verschiedener Fluide in einem Großspaltrheometer mit der Sterngeometrie mittels MRI-Technik.

Ziel der Arbeit ist die Validierung der Genauigkeit des analytischen Modells basierend auf dem Fließverhalten Newton'scher Fluide in einem Großspaltrheometer mit der Sterngeometrie mittels CFD Simulationen im Vergleich mit dem Fließverhalten in einem Großspaltrheometer mit glatter koaxialen Zylinder. Ein wichtiges Ziel ist die Vorhersage der Scherratenverteilungen in dem Spalt sowie in verschiedene Höhen des Spaltes. Analytische Lösungen werden für die Vorhersage rheologischer Eigenschaften vorgestellt. Schließlich werden die experimentellen und numerischen Ergebnisse von Newton'schen Fluiden vorgestellt und die Validität analytischer Berechnungen auf der Grundlage dieser Ergebnisse diskutiert.

2. Analytisches Modell

Unter der Annahme einer laminaren Strömung, ohne Gleiten als Randbedingung und konstanter Schubspannungsverteilung an der vertikalen Zylinderoberfläche, kann die

Schubspannung bei vorgegebenem Radius für Newton'sche Fluide analytisch nach Gleichung 1 berechnet werden [2].

$$\tau = \frac{T}{2\pi R^2 h} \quad (1)$$

Newton'sche Fluide weisen einen linearen Zusammenhang zwischen Scherrate $\dot{\gamma}$ und Schubspannung τ wie folgt auf: $\tau = \mu \dot{\gamma}$. Für Newton'sche Fluide ist die Relation zwischen Drehmoment, Drehgeschwindigkeit und geometrischen Parametern in einem koaxialen Zylinder-Rheometer in Gleichung 2 gegeben, wobei T das Drehmoment, ω die Drehgeschwindigkeit und R_i der innere und R_o der äußere Radius sind.

$$\omega = \frac{T}{4\pi\mu h} \left[\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_o^2} \right] \quad (2)$$

Die Scherratenverteilung als Funktion des Radius für Newton'sche Fluide wird nach Gleichung 3 berechnet.

$$\dot{\gamma} = \frac{T}{2\pi\mu R^2 h} \quad (3)$$

3. Experimentelle Arbeiten und numerische Simulationen

Die rheologischen Untersuchungen wurden in dem Großspaltrheometer Viskomat XL (Schleibinger [3]) mit zwei verschiedenen Einstellungen durchgeführt, a) Sterngeometrie und b) koaxialer glatter Stahlzylinder. Der Viskomat XL ist ein Couette-Rheometer mit rotierendem äußerem Zylinder und starrer Innengeometrie, bei dem das Drehmoment am inneren Zylinder/Paddel gemessen wird [4]. Die Dimensionen der Sterngeometrie sind in Bild 1 dargestellt. Der innere Zylinder der Geometrie mit glatter Oberfläche hat den gleichen Radius, wie die Sterngeometrie. Für die Versuche werden zwei Silikonöle (Newton'sche Fluide), AK 5000 und AK 10000, mit einer Dichte von 970 kg/m^3 verwendet. Die Temperatur wurde während der Untersuchungen kontrolliert ($T = 20 \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$). Ein Rampen-Scherprofil (Schritte: 80; 70; 60; 50; 40; 30; 20; 10; 8; 6; 4; 2; 1; 0,1 UPM) wird verwendet, wobei jeder Schritt 15 Sekunden dauert.

Der Ausgleichszustand jedes Intervalls wurde als Mittelwert des Drehmoments in den jeweils letzten 2 Sekunden bestimmt.

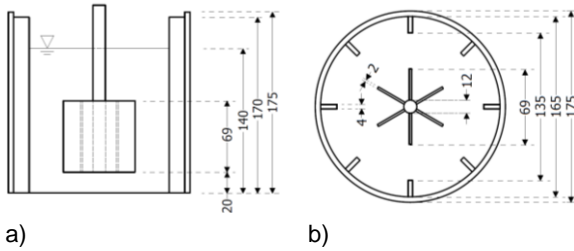


Bild 1: Schematische Darstellung der Einstellung der Sterngeometrie mit 8 vertikalen Lamellen am Außenzylinder und einer Füllhöhe von 140 mm; a) Vertikalschnitt, b) Querschnitt auf das Flügelzellen-System

Die Viskosität und die Scherratenverteilung in dem Spalt in beiden Einstellungen (a und b) werden wie in Gleichung 2 und 3 analytisch berechnet.

Numerische 3D-Simulationen des Fließverhaltens der Newton'schen Fluide wurden in einem Großspaltrheometer mit der Finite-Volumen-Methode (FVM) mit der Software ANSYS Fluent Academic Reserach 18.0 durchgeführt. Der Drehmomentbeitrag der verschiedenen Oberflächen (oben, seitlich, unten und Nagel) wurde bestimmt, um das analytische Modell zu modifizieren. Weiterhin werden die Scherratenverteilungen in dem Spalt von den numerischen Simulationen mit den experimentellen Ergebnissen verglichen.

4. Ergebnisse und Diskussion

Das analytische Modell berücksichtigt nur die Drehmomentbeiträge der vertikalen Fläche (der Beitrag der oberen und unteren Flächen sei vernachlässigt).

Tabelle 1: Relativer Drehmomentbeitrag der verschiedenen Oberflächen der Innengeometrie (in Prozent)

Materialien	Rel. Drehmoment X [%] an Oberflächen				Gesamtdrehmoment T (Nmm)	
	oben	seitlich	unten	Nagel	CFD	Exp
Koaxialzylinder						
SO 5000	8,5	80,6	10,1	0,8	62,6	64,6
SO 10000	8,4	80,7	10,0	0,9	125,0	137,2
Sternpaddel						
SO 5000	1,9	94,7	2,2	1,2	47,2	47,4
SO 10000	1,9	94,6	2,2	1,3	94,3	101,7

Auf Grundlage der durchgeführten Untersuchungen wird vorgeschlagen, einen Korrekturfaktor X einzuführen, um das Analysemodell in Bezug auf die Drehmomentbeiträge der unteren und oberen Fläche wie folgt zu modifizieren: X= der prozentuale Anteil des Drehmomentbeitrags nur auf der vertikalen Fläche. Mit dem Korrekturfaktor X modifiziert, lautet die oben beschriebene Gleichung 3:

$$\dot{\gamma} = X \frac{T}{2\pi\mu R^2 h} \quad (4)$$

Es wird die Scherratenverteilung des Spaltes in drei verschiedenen Höhen des inneren Zylinders sowie der Sterngeometrie [0° - L1 (obere Ecke); 0° - L2 (Mitte) und 0° - L3 (untere Ecke)] mittels CFD berechnet und mit dem analytischen Modell und dem modifizierten analytischen Modell verglichen. Die Scherratenverteilung zwischen zwei Flügeln der Stereometrie (C-D 30°) sind auch mittels CFD zu berechnen.

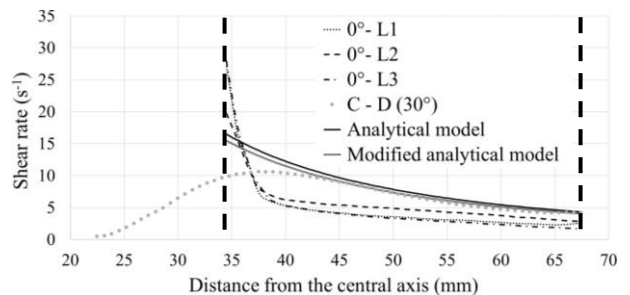


Bild 2: Vergleich der Scherratenverteilungen über den Spalt aus numerischen und analytischen Berechnungen für die Sterngeometrie (SO AK 5000); Innen- und Außenwände der Rheometer werden durch vertikale gestrichelte Linien dargestellt.

Es können Scherratenverteilungen an den Spitzen der Sterngeometrie beobachtet werden, gefolgt von einer starken Abnahme mit zunehmendem Radius. Die Scherratenverteilung zwischen zwei Flügeln ist mit den Ergebnissen des modifizierten analytischen Modells gut vergleichbar.

Das Paper wurde auf der Konferenz "RheoCon & SCC 2019" in Dresden präsentiert und anschließend in "RI-LEM Bookseries 23 proceedings" veröffentlicht.

5. Referenzen

- [1] G. Ovarlez, F. Mahaut, F. Bertrand, X. Chateau, Flows and heterogeneities with a vane tool: Magnetic resonance imaging measurements, *Journal of Rheology* 55 (2011) 197–223.
- [2] E. P. Koehler and D. W. Fowler, Development of a portable rheometer for fresh portland cement concrete, Research report ICAR -105-3 (2004).
- [3] Schleibinger Testing Systems, <http://www.schleibinger.com/cmsimple/>
- [4] G. Schramm, A practical approach to Rheology and Rheometry, Book (1998) 36–39.