



Numerische Simulation des Meniskus einer Ferrofluidschicht im Magnetfeld eines stromdurchflossenen Leiters

P.-B. Eißmann, A. Lange, S. Odenbach



Einleitung

Es wird eine horizontale Ferrofluidschicht betrachtet, in der sich senkrecht dazu ein stromdurchflossener Leiter befindet. Aufgrund des entstehenden Magnetfeldes des Leiters kommt es zur einer Verformung der freien Oberfläche, welche als Meniskusform bezeichnet wird.



Aufnahme der Verformung der freien Oberfläche [1]. In der Mitte dieser Abbildung ist der stromdurchflossene Leiter zu erkennen.

Eine analytische Beschreibung dieser Verformung führt auf die nichtlineare Differentialgleichung [1]

$$\xi - \frac{1}{r^2} - \sigma \frac{\xi' + \xi'^3 + r\xi''}{(1 + \xi^2)^{3/2}} \frac{1}{r} = 0$$

wobei r der Abstand vom Leiter ist, ξ die Höhe des Meniskus und σ die Oberflächenspannung. Da bisher keine analytische Lösung existiert, wurde diese Gleichung numerisch gelöst [2]. Ein anderer Lösungsansatz ist die numerische Simulation der Grundgleichungen unter Einschluss der beiden Phasen: das Ferrofluid und die umgebende Luft. Eine solche Simulation wurde mit der kommerziellen Software Fluent durchgeführt.

Ziel und Durchführung

Das Ziel dieser Arbeit bestand in der numerischen Modellierung des Systems und der Untersuchung des Einflusses einer linearen und nichtlinearen Magnetisierungskurve. Weiterhin wurden Studien durchgeführt, die den Einfluss einer Änderung des Kontaktwinkels φ_1 zwischen Draht und Ferrofluid sowie eine Variation der Oberflächenspannung berücksichtigen. Anschließend wurden die numerischen Ergebnisse mit experimentellen Ergebnissen aus [1] validiert.

Bei der numerischen Modellierung wurde das Ferrofluid EMG-909 zugrunde gelegt und es wurden jeweils Berechnungen für ein zwei- und dreidimensionales Modell durchgeführt. Der Einfluss der Kelvin-Kraftdichte

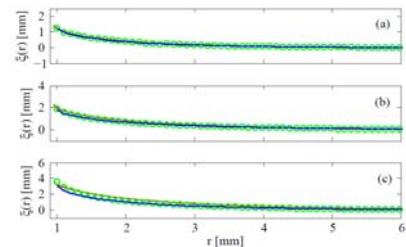
$$\vec{f}_k = \mu_0 (\vec{M} \text{ grad}) \vec{H}$$

wurde mittels einer UDF (User-Defined-Function) in Fluent implementiert. Die Auswertung der Verläufe der Oberflächen wurde anschließend mit MatLAB realisiert.

Es stellte sich heraus, dass bei größeren Feldstärken, d. h. bei höheren Stromstärken, die numerischen Ergebnisse von den experimentellen Werten abweichen. Aus diesem Grund wurden mit der kommerziellen Software Cosmol Multiphysics eine Änderung des Magnetfeldes aufgrund der Meniskusform untersucht sowie die Erwärmung des Ferrofluides durch den Draht analysiert, um eine Erklärung für diese Abweichungen zu finden.

Vergleich mit experimentellen Ergebnissen

Der Vergleich der numerischen Ergebnisse mit den experimentellen Werten zeigt, dass eine lineare Magnetisierungskurve gute Übereinstimmungen erzielt. Bei größeren Feldstärken zeigt sich weiterhin, dass die Verläufe für eine nichtlineare Magnetisierungskurve größere Abweichungen aufzeigen.

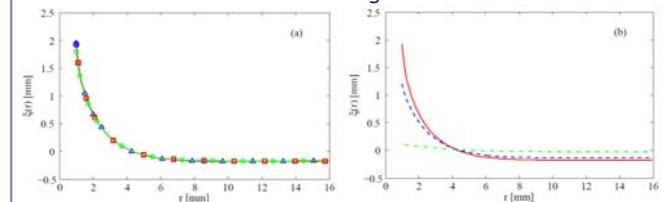


Plot der Meniskusform bei verschiedene Feldstärken von 3.35 kA/m (a), 7.54 kA/m (b) und 11.7 kA/m (c) für eine lineare Magnetisierungskurve (grüne Symbole), nichtlineare Magnetisierungskurve (blaue Kurve) sowie der experimentellen Daten (rote Kurve). Die Feldstärken ergeben sich am Rand des Leiters mit einem Radius von 0.95 mm und Stromstärken von 20 A (a), 45 A (b) und 70 A (c).

Den Ergebnissen wurde ein 3D-Modell zugrunde gelegt. Die Abweichungen bei größeren Feldstärken lassen sich durch eine Änderung der Eigenschaften, insbesondere der Oberflächenspannung, des Ferrofluides erklären. Dies und eine mögliche Verdampfung des Ferrofluides ist auf die Erhitzung durch den Draht zurückzuführen.

Einfluss des Kontaktwinkels φ_1

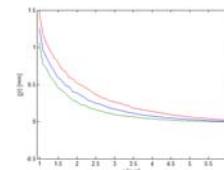
Der Kontaktwinkel φ_1 beeinflusst kaum die Meniskusform bei kleinen Variationen. Bei größeren Änderungen wird die freie Oberfläche des Meniskus allerdings stark modifiziert.



Plot für verschiedene Kontaktwinkel φ_1 . Das linke Bild zeigt die Oberfläche für $\varphi_1 = 4.3^\circ$ (rot), $\varphi_1 = 8.7^\circ$ (grün), $\varphi_1 = 17.4^\circ$ (blau). Das rechte Bild zeigt die Oberfläche für $\varphi_1 = 8.7^\circ$ (rot), $\varphi_1 = 45^\circ$ (blau), $\varphi_1 = 90^\circ$ (grün). Die Feldstärke beträgt 3.35 kA/m.

Einfluss der Oberflächenspannung

Der Vergleich von verschiedenen Oberflächenspannungen führt zu dem Ergebnis, dass bei vorgegebenen Kontaktwinkeln der Meniskus bei größerer Oberflächenspannung breiter wird.



Plot der Oberfläche für verschiedene Oberflächenspannungen bei $H=3.35\text{kA/m}$. Die Oberflächenspannungen sind $\sigma = 0.0518 \text{ N/m}$ (rot), $\sigma = 0.0259 \text{ N/m}$ (blau) und $\sigma = 0.013 \text{ N/m}$ (grün).

References

- [1] K. May, Untersuchung des Meniskus von Ferrofluid an einem stromdurchflossenen Leiter, Tech. Report, Univ. Magdeburg (2010)
- [2] T. John, D. Rannacher, A. Engel: J. Mag. Mag. Mat. 309 (2007) 31-35