

# F 1 Experimente mit magnetischen Flüssigkeiten

T. Mahr, I. Rehberg

Institut für Experimentelle Physik

Otto-von-Guericke-Universität, Magdeburg

In diesem Experimentalvortrag zeigen wir eine Reihe von Experimenten zum Strömungsverhalten stark magnetisierbarer Flüssigkeiten, sogenannter Ferrofluide. Besonderes Augenmerk wird dabei auf die Dynamik freier Oberflächen unter dem Einfluß zeitabhängiger äußerer Magnetfelder gelegt. Um die im Vortrag präsentierten Effekte richtig einordnen zu können, werden in diesem Artikel die grundlegenden Tatsachen über Ferrofluide kurz zusammengefaßt.

## 1 Was sind Ferrofluide?

Weil die Moleküle einer Flüssigkeit im allgemeinen ein elektrisches und magnetisches Dipolmoment besitzen, wird die Hydrodynamik solcher polarisierbarer Flüssigkeiten von äußeren Feldern beeinflusst. Diese Effekte sind jedoch in der Regel nicht besonders groß. Durch einen technischen Trick gelingt es allerdings, Flüssigkeiten herzustellen, die sich wie sehr stark magnetisch polarisierbare Fluide verhalten. Der Trick besteht darin, eine Suspension magnetischer Teilchen in einer ganz gewöhnlichen Flüssigkeit wie Wasser oder Öl zu erzeugen. Damit diese Suspension stabil bleibt, müssen die magnetischen Partikel (z.B. Magnetit) hinreichend klein sein, etwa in der Größenordnung von 10 nm. Um Clusterbildung der ferromagnetischen Partikel zu verhindern, wird der Suspension eine oberflächenaktive Substanz zugefügt [1]. Die Namensgebung Ferrofluide resultiert also aus der magnetischen Natur der suspendierten Teilchen, die Suspension als Ganzes zeigt jedoch keine spontane Magnetisierung, verhält sich also nicht wie eine ferromagnetische Flüssigkeit, sondern lediglich wie ein ungewöhnlich stark magnetisierbares paramagnetisches Fluid. Die erreichbaren Permeabilitäten liegen in der Größenordnung von 10, man spricht in diesem Zusammenhang auch von Superparamagnetismus.

## 2 Wofür sind Ferrofluide nützlich?

Ferrofluide werden in ein inhomogenes Magnetfeld hineingezogen. Auch mit handelsüblichen kleinen Dauermagneten übersteigt die magnetische Kraft ohne weiteres die Schwerkraft. Diese Tatsache macht man sich bei den Anwendungen zunutze, die seit langem Marktreife erlangt haben: Den Vakuumdrehdurchführungen, die in Festplatten Anwendung finden, und der Kühlung von Lautsprechern. Daneben gibt es jedoch noch ein großes Anwendungspotential, das sich in ca. 2000 Patenten manifestiert [2].

## 3 Warum sind Ferrofluide interessant?

Im Prinzip läßt sich jede Flüssigkeit durch externe elektrische und magnetische Felder beeinflussen, und die durch diese Felder entstehenden zusätzlichen Kräfte müßten in die Navier-Stokes-Gleichungen des Fluids aufgenommen werden. Diese Kräfte sind jedoch in der Regel recht klein und die resultierenden Effekte nur sehr schwer beobachtbar. Hier schließen die Ferrofluide eine Lücke, weil man augenfällige Wirkungen schon mit sehr geringen Feldstärken erzielen kann. Die Flüssigkeiten haben also Modellcharakter für sehr fundamentale Wechselwirkungen in Fluiden [3]. Darüber hinaus gibt es aber auch noch eine Reihe von Eigenschaften, die sich nicht mit dem Modell einer homogenen polarisierbaren Flüssigkeit erklären lassen, sondern auf den spezifischen Eigenschaften einer Suspension beruhen, also der Tatsache, daß die magnetischen Teilchen makroskopisch sind. Hier ergeben sich also Zusammenhänge mit dem Fließverhalten granularer Materie in Fluiden [4].

### 3.1 Negative Viskosität

Bei Abwesenheit äußerer Felder ist das Strömungsverhalten hinreichend stark verdünnter Ferrofluide von einem einfachen newtonschen Fluid nicht zu unterscheiden. Unter dem Einfluß äußerer Felder bekommt die Flüssigkeit anisotrope Eigenschaften, die man etwa durch Messung der Viskosität leicht nachweisen kann. In der Regel wird sich die Viskosität beim Anlegen statischer Felder erhöhen. Das ist gut verständlich, weil die freie Drehbarkeit der magnetischen Partikel behindert wird und es dadurch zu vermehrter Energiedissipation in einer wirbelbehafteten Strömung kommt. Macht man das Magnetfeld jedoch zeitabhängig, sind die Zusammenhänge komplizierter. In der Regel wird man auch hier mit einer Erhöhung der Viskosität rechnen müssen. Unter Umständen kann die Viskosität jedoch auch vermindert erscheinen, wenn nämlich die Rotation der Flüssigkeit durch die erzwungene Drehung der ma-

gnetischen Partikel unterstützt wird. Es ist in der Tat kürzlich gelungen, diesen zunächst theoretisch vorhergesagten Effekt experimentell zu verifizieren [5]. In diesem Zusammenhang spricht man von einer differentiell negativen Viskosität. Im Prinzip hält man auf diesem Wege auch die Realisierung einer absolut negativen Viskosität für möglich, also den Bau einer Pumpe, die nur mit Hilfe zeitabhängiger Magnetfelder aus mikroskopischen Rotationsbewegungen makroskopische Strömungen erzeugt [6].

### 3.2 Oberflächeninstabilitäten

Viel direkter läßt sich ein Ferrofluid durch Magnetfelder beeinflussen, wenn freie Oberflächen des Fluids im Spiel sind. In diese Kategorie fällt etwa die sogenannte Labyrinth-Instabilität [7], die eine starke Ähnlichkeit mit magnetischen Bezirken in dünnen ferromagnetischen Schichten aufweist und sich mit statischen Magnetfeldern recht gut im Hörsaal demonstrieren läßt.

Steht die freie Oberfläche des Fluids senkrecht zum Magnetfeld, kommt es oberhalb einer kritischen Feldstärke zu einer strukturbildenden Instabilität, welche sich in einer räumlich periodischen Deformation der Oberfläche äußert. Die resultierende Wellenlänge stellt einen Kompromiß zwischen Oberflächenenergie und der Energie des Magnetfeldes dar; diese statische Instabilität ist also im Prinzip verstanden.

Die Situation wird komplizierter beim Anlegen eines zeitabhängigen Magnetfeldes. In diesem Fall ist es möglich, stehende Oberflächenwellen durch parametrische Resonanz anzuregen. Dies ist auch der Grundgedanke bei der sogenannten Faraday-Instabilität, wo solche Oberflächenwellen durch vertikale Vibrationen des Behälters erzeugt werden. Die magnetischen Fluide bieten hier den technischen Vorteil, die Wellenbewegung ohne mechanisch bewegte Teile antreiben zu können. Bei hinreichend kleinen Anregungen wird die Wellenlänge der Faraday-Rippel über die externe Frequenz vermöge der Dispersionsrelation von Oberflächenwellen festgelegt. Bei magnetischen Fluiden läßt sich diese Dispersionsrelation durch das externe Magnetfeld in weiten Grenzen beeinflussen [8]. Wird die Anregungsamplitude dagegen groß, muß die Oberfläche nicht mehr der anregenden Frequenz folgen. Vielmehr zeigt bereits ein einzelner Fluid-Stachel eine kaum überschaubare Fülle von regulären und irregulären Schwingungsmoden [9], die im Hörsaal mit Hilfe stroboskopischer Beleuchtung sichtbar gemacht werden können.

## References

- [1] R. E. Rosensweig, *Ferrohydrodynamics* (Cambridge University Press,

Cambridge 1993).

- [2] V. E. Fertman, *Magnetic Fluids: Guidbook* (Hemisphere Publishing Corporation), New York 1990).
- [3] M. Liu, *Phys. Rev. Lett* **70**, 3580 (1993).
- [4] *Proc. Seventh Intern. Conf. on Magnetic Fluids*, eds. R. V. Mehta, S. W. Charles, and R. E. Rosensweig, *J. Magn. Magn. Mater.* **149** (1995).
- [5] J. -C. Bacri, R. Perzynski, M. I. Shliomis, and G. I. Burde, *Phys. Rev. Lett* **75**, 2128 (1995).
- [6] R. E. Rosensweig, *Science* **271**, 614 (1996).
- [7] D. P. Jackson, R. E. Goldstein, and A. O. Cebers, *Phys. Rev.* **E50**, 298 (1994).
- [8] T. Mahr, A. Groisman, and I. Rehberg, *J. Magn. Magn. Mater.* **159**, L45-L50 (1996).
- [9] T. Mahr, and I. Rehberg, submitted to *Physica D*.