

Eine stabile Schwebelage für einen 'anhaftenden' Magnetkörper

Th. Hähndel, H.-D. Stahlmann

Lehrstuhl Theoretische Elektrotechnik, BTU Cottbus, Universitätsplatz 3-4, 03044 Cottbus

Einleitung

In dieser Arbeit werden auf anschauliche Weise Bedingungen hergeleitet, unter denen mit Hilfe eines Magnetofluids (MF) ein Schwebkörper unter dem Einfluß der Gravitation und eines magnetischen Feldes eine stabile Schwebelage einnimmt.

Die untersuchte Anordnung kann z.B. zur schwingungsgedämpften Aufhängung als auch zum Transport eines erschütterungssensiblen Gutes dienen.

Entwicklung der Stabilitätskriterien

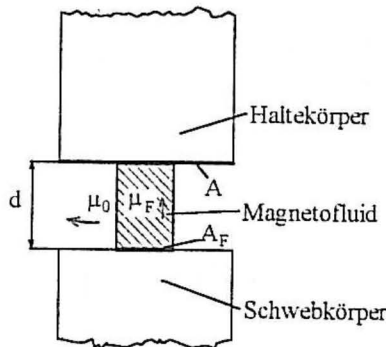


Abb. 1: idealisierte Anordnung

Gemäß Abb. 1 befindet sich ein Schwebkörper im Abstand d zum ortsfesten Haltekörper. Die jeweiligen Stirnseiten besitzen identische Querschnittsflächen A . Zwischen den Körpern befindet sich MF. Zur Vereinfachung der Analyse wird davon ausgegangen, daß das MF ein zylinderförmiges Volumen V mit der Grundfläche A_F einnimmt. Des weiteren werden Randeffekte vernachlässigt, so daß von einem homogenen Magnetfeld H zwischen Schweb- und Haltekörper ausgegangen werden kann. Beide Körper werden als hochpermeabel angenommen, das Magnetofluid besitzt die als feldstärkeunabhängig angenommene Permeabilität μ_F . Die Körper, die im weiteren in Anlehnung an die Terminologie der Magnetostatik Pole genannt werden, werden mit dem eingepprägten magnetischer Fluß $\psi_0 = B_0 A$ durchflutet.

Die Untersuchung der am Schwebkörper auftretenden Kräfte erfordert die Integration der Kraftdichte über die untere Polfläche. Aufgrund der angenommen Homogenität des magnetischen Feldes unterscheidet sich die Kraftdichte lediglich in den Gebieten mit MF und ohne MF. Als Resultat der an der Trennfläche zwischen MF und Luft entstehenden MAXWELLSchen Spannungen [1] muß der in der Flüssigkeit

entstehende Druck p berücksichtigt werden. Mit der Einführung der Suszeptibilität $\chi = \mu_F / \mu_0 - 1$ des MFs ergibt sich

$$F = \frac{1}{2} \iint_A HB dA + pA_F = \frac{1}{2} \mu_0 H^2 (A + 2\chi A_F) \quad (1)$$

Ersetzt man H durch B_0 und berücksichtigt den minimal möglichen Abstand der Pole $d_{min} = \sqrt{V/A}$, bei der der gesamte Raum zwischen den Polen vollständig mit MF ausgefüllt ist, so erhält man für Abstände $d > d_{min}$

$$F = \frac{1}{2} \frac{AB_0^2}{\mu_0} \frac{d^2 + 2\chi d d_{min}}{(d + \chi d_{min})^2} \quad (2)$$

Für Abstände $d < d_{min}$ ist die Kraft konstant, da sich die Grundfläche des aus MF bestehenden Zylinders nicht weiter vergrößern kann. Das Volumen V wurde als konstant vorausgesetzt. Dieser Zusammenhang ist in Abb. 2 als durchgezogene Kurve dargestellt.

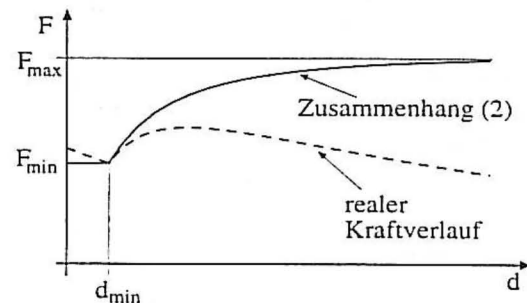


Abb. 2: Kraft F in Abhängigkeit vom Abstand d

Die in Abb. 2 gekennzeichneten Größen F_{min} und F_{max} ergeben sich aus (2) wie folgt.

$$F_{min} = F(d \rightarrow d_{min}) = \frac{1}{2} \frac{AB_0^2}{\mu_0} \frac{1 + 2\chi}{(1 + \chi)^2} \quad (3)$$

$$F_{max} = F(d \rightarrow \infty) = \frac{1}{2} \frac{AB_0^2}{\mu_0} \quad (4)$$

Ein Gleichgewichtszustand stellt sich dann ein, wenn die Summe der an den Schwebkörper angreifende Gravitationskraft und die aus dem Magnetfeld resultierende Kraft F verschwindet. Es ist offensichtlich, daß diese Bedingung nur dann erfüllt werden kann, wenn die Gravitationskraft zwischen F_{min} und F_{max} liegt. Der Gleichgewichtszustand ist nur dann stabil, wenn die Ableitung der Kraft F nach dem Ab-

stand d positiv ist. Dieser Wert ist ein Maß für die Stabilität

$$F' = \frac{AB_0^2}{\mu_0} \frac{\chi^2 d_{min}^2}{(d + \chi d_{min})^3} \quad (5)$$

und in der Nähe von d_{min} am größten.

$$F'(d \rightarrow d_{min}) = \frac{AB_0^2}{d_{min} \mu_0} \frac{\chi^2}{(1 + \chi)^3} \quad (6)$$

Die Stabilität hängt auch vom MF ab. Es läßt sich zeigen, daß die größte Stabilität bei einem MF mit der Suszeptibilität von $c_{opt} = 2$ vorliegt. Ein Einsetzen dieses Wertes in (6) ergibt

$$F'_{max} = \frac{4}{27} \frac{AB_0^2}{d_{min} \mu_0} \quad (7)$$

und für die Kraft F folgt

$$F_{min} = \frac{5}{9} F_{max} \quad (8)$$

Berücksichtigung realer Verhältnisse

Bisher wurde von einem in den Pol eingepägten magnetischen Fluß ausgegangen. Diese Annahme wird an dieser Stelle fallengelassen und die Abhängigkeit des magnetischen Flusses vom Abstand in die Untersuchung einbezogen. Mit zunehmender Entfernung des Schwebkörpers vom Haltekörper nehmen magnetischer Fluß und dementsprechend die resultierende Kraft ab. Berücksichtigt man diesen physikalischen Sachverhalt in (2), so ergibt sich die in Abb. 2 gestrichelte Kurve. In diesen Fall muß die Stabilitätsbeziehung (5) durch den Term

$$B' B_0 \frac{A}{\mu_0} \frac{d(d + 2\chi d_{min})}{(d + \chi d_{min})} \quad (9)$$

additiv ergänzt werden. Grenzstabilität liegt vor, wenn der so erhaltene Ausdruck den Wert Null annimmt. Für einen stabilen Schwebezustand muß die Ableitung B' der Flußdichte B nach dem Abstand d folgende Bedingung erfüllen:

$$-B' < \frac{B_0}{d} \frac{\chi^2 d_{min}^2}{(d + 2\chi d_{min})(d + \chi d_{min})} \quad (10)$$

Für $d = d_{min}$ und $c = c_{opt} = 2$ ergibt sich ein Wert von

$$-B' < \frac{4}{15} \frac{B_0}{d_{min}} \quad (11)$$

Die Dimensionierung einer Aufhängung entsprechend Abb. 1 erfordert eine Analyse des magnetischen Kreises. Diese kann unter Verwendung von Ersatzschaltbildern, wie sie aus der Netzwerktheorie bekannt sind, erfolgen [2]. Ein mögliches Ersatzbild ist in Abb. 3 dargestellt. Der Widerstand R_L repräsentiert den Abfall der magnetischen Spannung zwischen den Polen und besteht aus den Teilwiderständen R_F für das vom MF ausgefüllte Volumen und R für den Luftanteil. Der magnetische Widerstand

des verbleibenden Kreises, in dem auch die weiter unten erwähnten Luftspalte enthalten sein können, wird R_0 genannt.

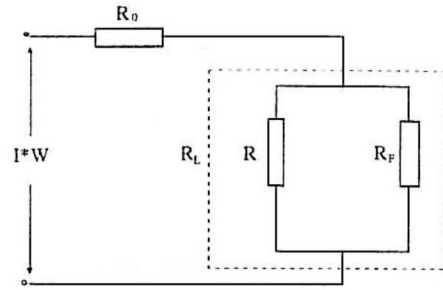


Abb. 3: Ersatzschaltbild

Im Allgemeinen wird R_0 klein gehalten, damit der Hauptteil der Feldenergie für die Kraftbildung im Raum zwischen den Polen zur Verfügung steht. Bei kleinem R_0 führt das Einbringen eines MF zu einer Krafterhöhung und zu keinem stabilen Schwebezustand.

Überträgt man (11) unter Annahme der Konstanz von R_0 auf das Ersatzschaltbild und geht davon aus, daß der Widerstand R_L klein im Vergleich zu R_0 ist, so erhält man für diesen die folgende Beziehung

$$R_0 > \frac{25}{12} \frac{d_{min}}{\mu_0 A} \quad (12)$$

Dieser Wert kann z.B. durch Einfügen von Luftstrecken in den magnetischen Kreis realisiert werden. Dieses Vorgehen bewirkt eine Verringerung der Kraft F . Die maximale Kraft, bei der noch ein stabiler Schwebezustand erreicht wird, beträgt

$$F_{max} = \left(\frac{2}{5}\right)^3 \left(\frac{IW}{d_{min}}\right)^2 \mu_0 A \quad (13)$$

Das sind 12,8% des Wertes, der mit einem Haftmagneten bei gleicher Luftspaltbreite und gleicher Erregung erzielt werden kann.

Schlußfolgerungen und Ausblick

Mit Hilfe von MF kann ein permeabler Körper in eine stabile Schweblage gebracht werden. Diese Erkenntnis führt zu neuen Einsatzgebieten für MF. In Versuchen wurde das Schweben sowohl mit Permanentmagneten als auch bei Stromerregung erreicht.

Weitere Untersuchungen zum Einfluß von Nichtlinearitäten des MF, der Massenträgheit und der Form der Pole sind geplant.

Literatur

- [1] Rosensweig: „Fluid Dynamics and Science of Magnetic Liquids“, Acad. Press, 1979
- [2] Philippow: „Grundlagen der Elektrotechnik“, Dr. Alfred Hüthig Verlag Heidelberg 1989

Unterstützung von Kraftwirkungen in Eisenkreisen durch Magnetofluide

Th. Hähndel, A. Nethe, H.-D. Stahlmann

Lehrstuhl Theoretische Elektrotechnik, BTU Cottbus, Universitätsplatz 3-4, 03044 Cottbus

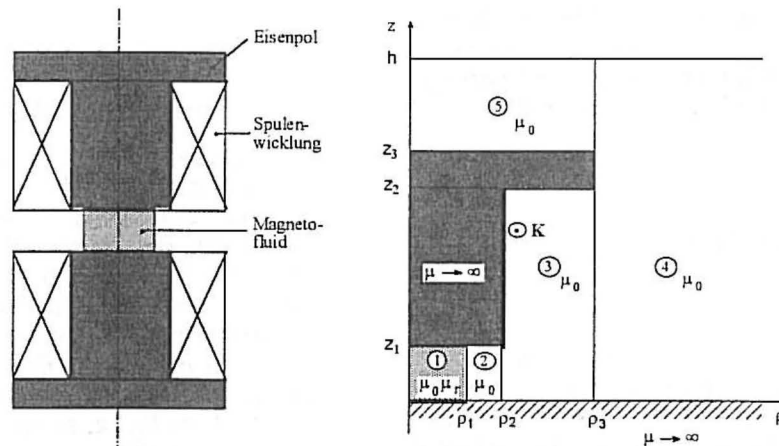


Abbildung 1: Anordnung für den Meßaufbau (links) und das Prozeßmodell (rechts)

X Einleitung

In der Vergangenheit bestanden Eisenkreise nur aus hochpermeablem Material, Permanentmagneten, sowie Luftspalten. Erst der Einsatz modernster Werkstoffe änderte dies. Es handelt sich hierbei um magnetische Flüssigkeiten, die hohe Sättigungspolarisationen, d.h. oberhalb von $J_s=200\text{mT}$, sowie Anfangspermeabilitäten von über $\mu_r=10$ aufweisen [1]. Durch diese Eigenschaften können sie nicht nur wie bisher in Dichtungen u.ä. sondern nunmehr auch in elektromagnetischen Systemen eingesetzt werden.

In Ermangelung vorhersagbarer Ergebnisse beim Einsatz von Magnetofluiden in Eisenkreisen, werden Berechnungen und vergleichende Messungen durchgeführt, die den Zusammenhang von Permeabilität und Anzugskraft verdeutlichen. Die reine meßtechnische Erfassung und Ableitung der funktionalen Zusammenhänge sind sehr aufwendig, da es sich um rheologische Flüssigkeiten handelt, die im veränderten Magnetfeld forminstabil sind und deren Permeabilität vom Arbeitspunkt auf der Magnetisierungskennlinie abhängt.

Problemstellung und Lösung

Ziel der Betrachtungen ist es, Materialgrößen für magnetische Flüssigkeiten so zu bestimmen, daß das Verhalten von Eisenkreisen definiert

verändert werden kann. Hierdurch können die Betriebsparameter der elektromechanischen Komponenten optimiert werden.

Als elektromagnetischer Kreis dienen zwei rotationssymmetrische Pole mit entsprechenden Spulen und dazwischen gelagertem Magnetofluid. Bei der Herleitung des zur Berechnung notwendigen Prozeßmodells für die Anordnung (Abbildung 1) zeigte sich, daß es je nach den auftretenden Kräften zwei unterschiedliche Fragestellungen gibt. Erstens die Kräfte, bei denen davon ausgegangen wird, daß sich der bei einer Verrückung das Volumen des Magnetofluids konstant bleibt, und zweitens die Kräfte, bei denen sich dieser Spalt mit nachströmendem Magnetofluid füllt. Für beide Fälle werden entsprechende Prozeßmodelle erstellt und ausgewertet. Dies geschieht mit den für die Feldtheorie klassischen Methoden [3].

Interessant ist der Vergleich der beiden unterschiedlichen Berechnungsmethoden für die auftretenden Kräfte.

Auswertung

Die Abbildung 2 zeigt exemplarisch die berechneten Ergebnisse des ersten Prozeßmodells. Die Kraft steigt mit Zunahme der Permeabilität an, und es gibt einen Bereich, in dem die Permeabilität μ_r des Magnetofluids überproportional den Anstieg bestimmt, dann aber einen geringeren

Einfluß ausübt. Entscheidend ist dabei das Verhältnis zwischen Eisenweg und dem Weg durch die umgebende Luft bzw. das Fluid.

Abbildung 3 zeigt die Auswertung des zweiten Prozeßmodells. Es ist zu erkennen, daß die Kraft zwar ansteigt, aber nach Erreichen eines Maximalwertes wieder abfällt.

Die berechneten Werte sollten weiterhin meßtechnisch validiert werden. Hierbei besteht die Schwierigkeit, Meßbedingungen zu schaffen, die für eine numerische Auswertung erfassbar sind. Die Abbildung 4 zeigt eine solche Auswertung: mit zunehmenden Strom steigt die Kraft nahezu quadratisch an, was elementar verständlich ist. Interessant ist der dargestellte Kraftgewinn durch das Magnetofluid, denn er gibt indirekt an, mit welchem Anteil Strom die gleiche Kraft erzielt werden kann. Die Abnahme des Kraftgewinns folgt aus dem Absinken der Permeabilität des Magnetofluids im stärker werdenden Magnetfeld.

Zusammenfassung

Es wurde der Zusammenhang zwischen der Permeabilität eines magnetischen Fluids, welches sich zwischen den Polen eines offenen elektromagnetischen Kreises befindet und der dadurch bewirkten Kraftänderung analytisch berechnet. Die sich im realen Magnetfeld einstellende leicht konkave Form wurde dabei unberücksichtigt gelassen.

Die meßtechnische Erfassung ohne zugrunde liegende Rechnung ist sehr zeitaufwendig, da man nicht weiß „was“ und „wo“ man messen muß. Außerdem ist fraglich, ob die gefundenen Ergebnisse auf andere Anordnungen übertragbar wären.

Auch wenn die hier begonnen Untersuchungen noch nicht verallgemeinert werden können, ist eine klare Tendenz zu erkennen: Mit steigender Sättigungspolarisation bzw. Permeabilität, d.h. mit Parameter die oberhalb der heute käuflichen Magnetofluiden liegen, lassen sich in Eisenkreisen erhebliche Kraftsteigerungen erreichen, und somit sind elektromagnetische Antriebe möglich, die geringere Abmessungen oder geringere Verluste bei gleicher Wirkung aufweisen.

Literatur

- [1] Buske, N., private Korrespondenz
- [2] Michalowsky, L.: Magnettechnik. Leipzig, Fachbuchlag, 1993

[3] Nethé, A., Stahlmann, H.-D.: Kraftwirkungen auf magnetische Flüssigkeiten. Electrical Engineering 79 (1996) 173-178

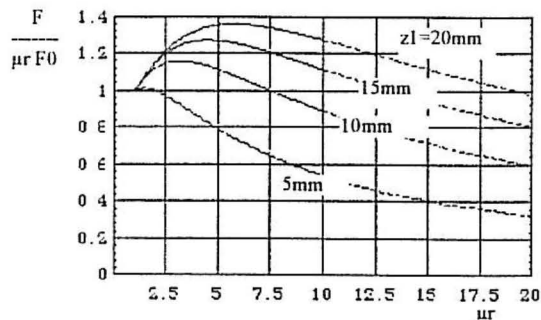


Abbildung 2: Auf die Luftspaltkraft und die Permeabilität bezogene Kraft im Eisenkreis.

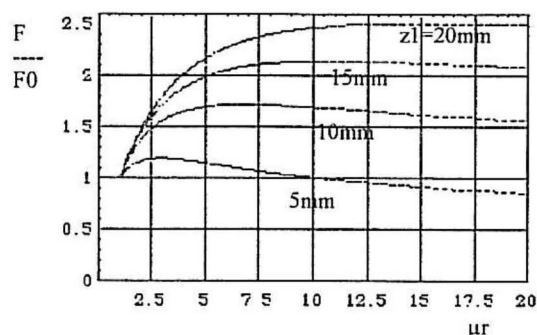


Abbildung 3: Auf die Luftspaltkraft bezogene Kraft im Eisenkreis.

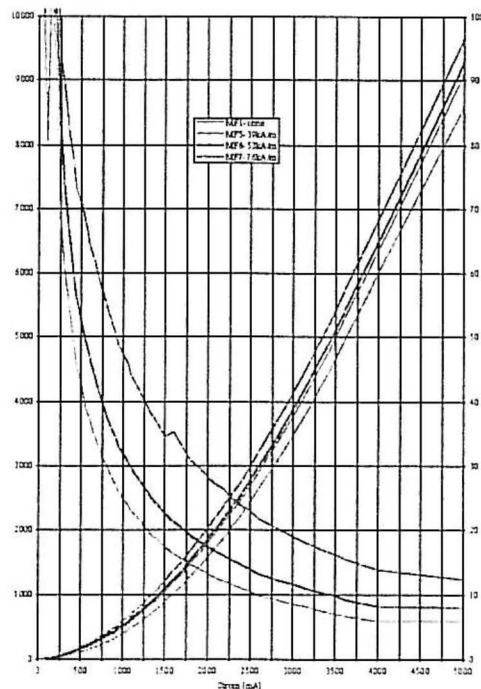


Abbildung 4: Gemessene Kraft und daraus resultierender Kraftgewinn

Session 4

Experimentelle und theoretische Arbeiten zu Hydrodynamik, viskosen und viskoelastischen Eigenschaften (II)

Thermische Konvektion in Ferrofluiden

K. Stierstadt

Sektion Physik, Ludwig-Maximilians-Universität München, Schellingstr. 4, 80799 München

Thermisch angetriebene Konvektion ist, neben der druckinduzierten Strömung, der am besten untersuchte Transportprozeß in normalen Flüssigkeiten. Bei Ferrofluiden steckt das Wissen über die Konvektion jedoch noch in den Kinderschuhen. Die ersten theoretischen Arbeiten erschienen Mitte der 70er Jahre, die ersten systematischen Experimente wurden Anfang der 80er durchgeführt.

Hier wird ein kurzgefaßter Überblick über die bis heute bekannten Ergebnisse vorgestellt:

Die magnetische Kraft ist in Ferrofluiden von der gleichen Größenordnung wie die Schwerkraft. Sie läßt sich aber, im Gegensatz zu dieser, räumlich und zeitlich in weiten Grenzen verändern; auch lassen sich Gradienten des Magnetfeldes leicht herstellen. Das führt zu einer Fülle neuartiger Konvektionsformen, die zum größten Teil noch der Untersuchung harren.

Nach einer Zusammenstellung der wichtigsten theoretischen Ansätze und Methoden wird der magnetische Auftrieb besprochen. Er spielt wahrscheinlich in vielen technischen Anwendungen eine noch nicht beachtete Rolle. Eine Reihe von theoretischen Ergebnissen unter Berücksichtigung variabler Randbedingungen wird erläutert: Die Abhängigkeit der magnetischen

Rayleigh-Zahl, der kritischen Wellenlänge, der Konvektionsamplitude und der Nusselt-Zahl von der archimedischen Rayleigh-Zahl. Systematische Experimente zeigten gute Übereinstimmung mit den Vorhersagen.

Zwei der wichtigsten Meßmethoden zur Abbildung von Konvektionsmustern in Ferrofluiden werden kurz erläutert: Lichtbrechung in der Begrenzungsschicht und Temperaturprofilmessungen mit Mikrotransistoren. Mit dieser zweiten Methode gelang es auch, Konvektionsmuster im schwerelosen Zustand und bei periodischen Randbedingungen zu beobachten.

Viele Besonderheiten, die von der Konvektion in normalen Flüssigkeiten her bekannt sind, wurden bisher in Ferrofluiden noch nicht untersucht: Periodische Anregung, rampenförmige Randbedingung, binäre Flüssigkeiten, Einfluß der Prandtl-Zahl usw. Alle diese Phänomene sollten durch die Existenz der magnetischen Kräfte interessante Modifikationen und Ergänzungen erfahren.

Anschließend werden erste Beobachtungen von höheren Instabilitäten, Phasenturbulenz und Versetzungsbewegungen in Ferrofluiden gezeigt.

Oberflächeninstabilitäten bei Ferrofluiden

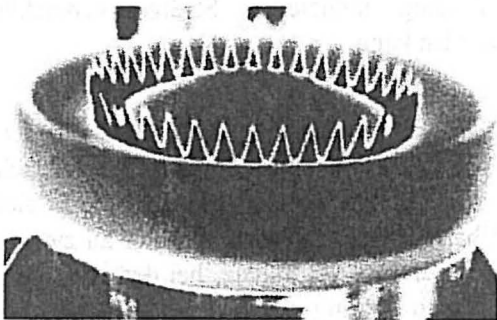
Th. Mahr, I. Rehberg

Universität Magdeburg, Institut für Experimentelle Physik, Universitätsplatz 2, 39106 Magdeburg

Einleitung

In unserer Abteilung für Nichtlineare Phänomene untersuchen wir am Beispiel der drei Modellsysteme Flüssigkristalle, Ferrofluide und Granulare Medien allgemeine Prinzipien der nichtlinearen Dynamik. Schlagworte hierbei sind z.B.: Instabilitäten, Bifurkationen und Strukturbildung. Näheres über unsere Abteilung kann man auf unseren Internet-Seiten unter http://conserv.urz.uni-magdeburg.de/~anp/anp_de.html erfahren.

Ich interessiere mich für Oberflächeninstabilitäten einer freien Ferrofluid-Schicht in Abhängigkeit von einem äußeren Magnetfeld senkrecht zur Oberfläche unter mechanischer oder magnetischer Anregung in unterschiedlichen Behältergeometrien.



0-dim: Getriebener Ferrofluidstachel

Wird ein magnetisches Feld senkrecht zur freien Oberfläche einer magnetischen Flüssigkeit über einen kritischen Wert erhöht entsteht eine spontane Deformation der Oberfläche nach Art einer subkritischen Bifurkation (Rosensweig-Instabilität) [1]. Es bilden sich Ferrofluidstacheln längs der Feldlinien, die sich gemäß einer charakteristischen Wellenlänge λ_c anordnen (siehe Abbildung der Instabilität im Ringkanal). In unserem Experiment wählen wir die Abmessung des Behälters so, daß sich nur ein einziger Stachel ausbildet und modulieren zeitlich das Magnetfeld um die Schwelle für die statische Rosensweig-Instabilität [2]. Wir beobachten

eine Schwellwertverschiebung und eine Kaskade von ungeradzahligem subharmonischen Antworten bis zur Ordnung 11. In einem Minimalmodell versuchen wir die wesentlichen Eigenschaften des Systems wiederzugeben.

1-dim: Parametrische Resonanz in einem Ringkanal

Bei der Faraday-Instabilität mit einer herkömmlichen Flüssigkeit wie Wasser werden Oberflächenstehwellen durch Modulation der Erdbeschleunigung parametrisch erregt. Für Ferrofluide ist diese parametrische Anregung in zweierlei Hinsicht interessant, da bei diesem Fluid eine rein magnetische Anregung möglich ist und die Dispersionsrelation für Oberflächenwellen bei hinreichend großen Magnetfeldern nichtmonoton wird [2]. Eine theoretische Analyse sagt dann die Existenz von Domänenstrukturen voraus [4]. In einem Ringkanal (siehe Abbildung), dessen Breite kleiner als λ_c ist erzeugen wir in einem Experiment magnetisch angeregte Stehwellen und beobachten in einem anderen Experiment die vorhergesagten Wellenlängen-Domänen unter mechanischer Anregung.

2-dim: Parametrische Resonanz in einer Schale

In einer Ferrofluid-Schale zeigt sich unter parametrischer Anregung eine komplexe Dynamik der Oberfläche. Wir beobachten Hexagone, Streifen und confined states.

Literatur

- [1] R.E.Rosensweig, Ferrohydrodynamics (Cambridge Univ. Press, Cambridge 1993).
- [2] T.Mahr und I.Rehberg, Physica D (im Druck).
- [3] T.Mahr, A.Groisman und I.Rehberg, J.Magn.Magn.Mater. **159**, L45-L50 (1996).
- [4] D.Raitt und H.Riecke, Parametric forcing of waves with non-monotonic dispersion relation: domain structures in ferrofluids?, Phys.Rev.E. (im Druck).

Numerische Simulation turbulenter Strömungen unter dem Einfluß eines Magnetfeldes

O. Zikanov, A. Thess

Center for Physical Fluid Dynamics, TU Dresden, 01062 Dresden

Das physikalische Verständnis turbulenter Strömungen unter dem Einfluß anisotroper Kräfte ist ein fundamentales und größtenteils ungelöstes Problem der Fluidodynamik. Solche Strömungen sind sowohl für elektrisch leitfähige als auch für magnetische Flüssigkeiten relevant, wengleich die Mechanismen der Wechselwirkung zwischen Magnetfeld und der jeweiligen Flüssigkeit verschieden sind. Anwendungen reichen dabei von der Astrophysik über die magnetische Turbulenzunterdrückung in der Metallurgie und Halbleiterherstellung bis hin zu magnetorheologischen Kupplungen.

Da die interessierenden Flüssigkeiten (Flüssigmetalle, Halbleiterschmelzen, Ferrofluide) in der Regel undurchsichtig und messtechnisch schwer zu erfassen sind, stellt die numerische Strömungssimulation ein wichtiges, häufig sogar das einzige Mittel dar, um fluiddynamische Elementarprozesse zu visualisieren und zu verstehen.

Im vorliegenden Beitrag werden die Ergebnisse hochauflösender numerischer Simulationen der dreidimensionalen Navier-Stokes-Gleichungen unter Einbeziehung eines anisotropen magnetischen Kraftterms vorgestellt. Dieses Modell beschreibt die Strömung einer elektrisch leitfähigen Flüssigkeit (z.B. Quecksilber) unter dem Einfluß eines homogenen Magnetfeldes und wird durch die beiden dimensionslosen Parameter Reynolds Zahl Re und magnetischer Wechselwirkungsparameter N gekennzeichnet. Letzterer beschreibt das Verhältnis zwischen der Stärke der elektromagnetischen Kräfte und der Trägheitskräfte. Durch Verwendung periodischer Randbedingungen in allen drei Raumrichtungen ist eine außerordentlich effiziente numerische Implementierung des Problems unter Verwendung eines pseudospektralen Kollokationsverfahrens möglich.

Die Ergebnisse der Simulationen, die mit einer räumlichen Auflösung von bis zu $128 \times 128 \times 128$ Punkten durchgeführt worden sind, lassen sich wie folgt in drei charakteristische Strömungsregime einteilen.

$N \ll 1$: Für schwache Magnetfelder bleiben die aus der Theorie homogener Turbulenz ohne Magnetfeld bekannten Eigenschaften (isotropes Energiespektrum, räumlich intermittente Struktur des Wirbelfelds) bis auf leichte Korrekturen erhalten. Dieses Ergebnis liefert den numerischen Beweis dafür, daß bei der numerischen Simulation von MHD Prozessen in schwach leitfähigen Flüssigkeiten (z.B. MHD-Grenzschichtbeeinflussung in Seewasser) oder bei schwachen Magnetfeldern (z.B. elektrisch getriebene Strömungen beim Schweißen) die Wirkung induzierter Ströme vernachlässigt werden kann.

$N \sim 1$: Im Bereich moderater Magnetfelder, der z.B. für Anwendungen in der Kristallzüchtung oder Metallurgie relevant ist, vollzieht sich ein Übergang von dreidimensionaler zu zweidimensionaler (2d) Turbulenz, bei dem sich die Wirbellinien entlang der Magnetfeldlinien ausrichten. Bemerkenswerterweise ist dieser Übergang jedoch nicht durch stetige Zunahme der Anisotropie sondern durch zeitlich irreguläres Schwanken des Systems zwischen 2d Dynamik und explosionsartigen 3d Ereignissen gekennzeichnet.

$N \gg 1$: In starken Magnetfeldern, wie sie z.B. in Kernfusionsreaktoren herrschen, vollzieht sich in kürzester Zeit ein Umschlag zu einer quasi 2d Strömung, die sich von einer rein 2d Strömung lediglich durch eine schwache parallel zum Magnetfeld gerichtete Strömungskomponente unterscheidet.

Abschließend wird im Vortrag ein Ausblick auf künftige Arbeiten und Probleme der Turbulenzmodellierung unter Magnetfeldeinfluß gegeben.

Acknowledgment

Diese Arbeit wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft im Rahmen des Innovationskollegs "Magnetofluidynamik" gefördert. Die numerischen Simulationen wurden am Hochleistungsrechenzentrum Jülich durchgeführt.

Negative Viskosität ?

A. Zeuner, I. Rehberg

Universität Magdeburg, Institut für Experimentelle Physik, Universitätsplatz 2, 39106 Magdeburg

Magnetische Flüssigkeiten sind Suspensionen magnetischer Teilchen im Nanometerbereich in einer Trägerflüssigkeit. Die Fähigkeit der suspendierten Teilchen in der umgebenden Flüssigkeit zu rotieren, führt zu interessantem Verhalten der magnetischen Flüssigkeit in äußeren magnetischen Feldern. McTague [1] untersuchte 1969 den Einfluß statischer magnetischer Felder auf eine Hagen-Poiseuille-Strömung, Shliomis entwirft in [2] dazu eine Theorie, die die von McTague beobachtete Erhöhung der Viskosität quantitativ erklärt. Der Effekt der sogenannten negativen Viskosität wurde in [3] von Shliomis für Ferrofluide in alternierenden magnetischen Feldern vorhergesagt und 1995 von Bacri und Perzynski [4] erstmalig gemessen. Dabei handelt es sich um die Verringerung der Gesamtviskosität der Suspension unter dem Einfluß von Wechselfeldern geeigneter Amplitude und Frequenz. Dieser Effekt beruht auf der Transformation magnetischer Energie über die Rotationsenergie der suspendierten Teilchen in kinetische Energie der Strömung durch Verringerung der inneren Reibung.

Wir untersuchen die Viskositätsänderung von magnetischen Flüssigkeiten in einer Hagen-Poiseuille-Strömung bei Einwirkung eines oszillierenden magnetischen Feldes in Strömungsrichtung. Dabei benutzen wir kommerziell erhältliche Ferrofluide.

Der von uns realisierte Meßaufbau besteht aus drei Komponenten:

1. Realisierung der Strömung des Ferrofluids

Einzelteile:

- Vorratsbehälter
- Schlauchpumpe
- Gefäß mit Überlauf und vertikalem Fallrohr
- Meßstrecke aus 2 horizontalen Kapillaren gleicher Länge mit T-Stücken

Das Ferrofluid wird mit Hilfe der Schlauchpumpe aus dem Vorratsbehälter in den Überlaufbehälter gepumpt. Aus dem Überlaufbehälter strömt das Ferrofluid über das Fallrohr

durch die Meßstrecke zurück in den Vorratsbehälter. Durch den Überlauf wird die Notwendigkeit der Feinabstimmung der Förderleistung der Pumpe auf das verwendete Ferrofluid verhindert.

2. Erzeugung des oszillierenden magnetischen Feldes

Das oszillierende äußere magnetische Feld wird durch eine um eine der beiden Kapillaren angeordneten Zylinderspule erzeugt. Die Wechselströme (bis zu 20 A bei Frequenzen zwischen 25 bis 23000 Hz) generiert ein 2x1200W-Audio-Verstärker, der sein Eingangssignal aus einer Synthesizer-Karte eines PCs erhält.

3. Größenmessung

Mit Hilfe von Drucksensoren wird der Druckabfall in der spulenumhüllten Kapillare und der statische Druck in der Mitte der Meßstrecke gemessen. Diese Daten werden über GPIB-Messgeräte zusammen mit Daten über den Spulenstrom erfaßt und weiterverarbeitet.

Unser Meßaufbau erlaubt uns die kontinuierliche Messung der Druck- und damit der Viskositätsänderung für verschiedene Frequenzen und Amplituden des äußeren Magnetfeldes.

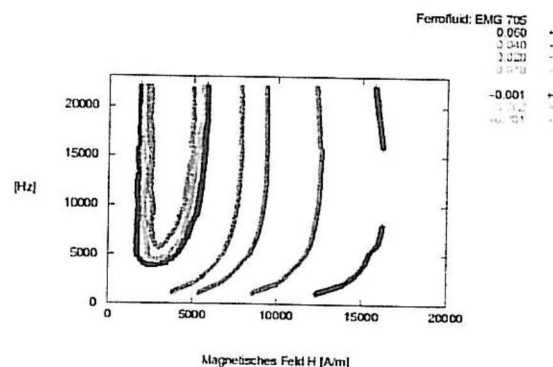


Bild 1.: Änderung der relativen Viskosität in Abhängigkeit von Frequenz und Amplitude des äußeren Magnetfeldes

Die Meßergebnisse (Bild 1) vergleichen wir mit der Theorie für die Viskositätserhöhung im

statischen Magnetfeld (vgl. [2]), um durch Extrapolation den Volumenanteil der suspendierten Teilchen im Ferrofluid zu bestimmen.

Anschließend vergleichen wir unsere Ergebnisse mit der durch Shliomis in [3] dargelegten Theorie für das Verhalten der Viskositätsänderung von Ferrofluiden in alternierenden magnetischen Feldern. Darüber hinaus läßt sich die Brownsche Relaxationszeit der Teilchen mit Hilfe der Shliomis-Theorie [3] aus den gemessenen Daten bestimmen.

Literatur

- [1] McTague, J. P., Magnetoviscosity of Magnetic Colloids, *J. Chem. Phys.* **51**, 133 (1969).
- [2] Shliomis, M.I., Effective Viscosity of Magnetic Suspensions, *JETP* **34**, 1291 (1972).
- [3] Shliomis, M.I. and Morozov K.I., Negative viscosity of ferrofluid under alternating magnetic field, *Phys. Fluids* **6**, 2855 (1995).
- [4] Bacri, J. C. and Perzynski, R., "Negative Viscosity" Effect in a Magnetic Fluid, *Phys. Rev. Lett.* **75**, 2128 (1995).

Rheologische Untersuchungen an Ferrofluiden

S. Odenbach¹, H. Störk²

¹Zentrum für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation,
Universität Bremen, Am Fallturm, 28359 Bremen

²Institut für Materialwissenschaften, BUGH Wuppertal, Müngstener Str. 10, 42285 Wuppertal

Im Rahmen der Erforschung der viskosen Eigenschaften magnetischer Flüssigkeiten haben wir uns in den vergangenen Jahren ausführlich mit der Bestimmung der Rotationsviskosität kommerzieller, konzentrierter Fluide in Abhängigkeit von Stärke und Richtung magnetischer Felder beschäftigt. Zur Bestimmung dieser Größe bedienten wir uns des Übergangs von der Couette- zur Taylor-Wirbel-Strömung in einer Flüssigkeit zwischen zwei konzentrischen Zylindern, von denen der innere rotiert [1]. Der kritische Übergang zwischen den beiden Strömungsformen tritt ein, wenn der, das System beschreibende, dimensionslose Parameter einen kritischen Wert überschreitet. Dieser kritische Wert hängt nur von der Geometrie des Systems, nicht aber von den Stoffeigenschaften der Flüssigkeit ab. Der dimensionslose Parameter selbst - die Reynoldszahl - hängt neben der Geometrie des Systems auch von der Rotationsfrequenz des inneren Zylinders und der Viskosität der verwendeten Flüssigkeit ab. Hält man daher die Geometrie fest, so liefert die Frequenz, bei welcher der Übergang zwischen den Strömungszuständen erfolgt, ein Maß für die Viskosität der Flüssigkeit [2].

Unter Ausnutzung dieser Möglichkeit haben wir die Rotationsviskosität in Magnetfeldern unterschiedlicher Stärke und Ausrichtung relativ zur Symmetrieachse des Systems untersucht. Abbildung 1 zeigt exemplarisch die relative Rotationsviskosität, d.h. das Verhältnis der feldinduzierten Viskositäts-erhöhung zur Volumenviskosität im feldfreien Fall, für ein magnetisches Feld parallel zur gemeinsamen Achse der Zylinder [2] gemessen in einem kommerziellen Ferrofluid mit 7,2 Vol.% Magnetitpartikeln. Die beobachtete Viskositäts-erhöhung kann qualitativ über die von Shliomis [3] angegebene Theorie beschrieben werden, fällt aber quantitativ durch nicht vernachlässigbare Wechselwirkung der magnetischen Teilchen deutlich höher aus.

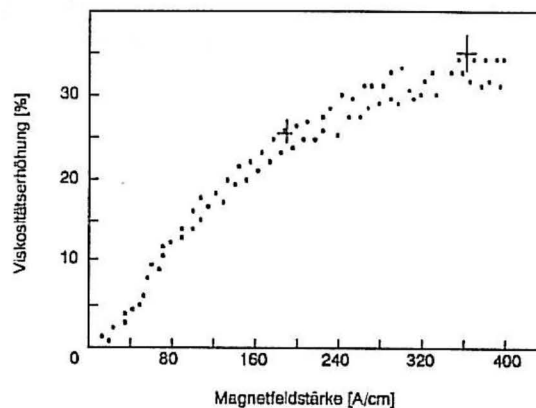


Abbildung 1: Die relative Rotationsviskosität als Funktion der Stärke des magnetischen Feldes, gemessen in einer Couette-Taylor Anordnung mit magnetischem Feld parallel zur Symmetrieachse des Systems.

Das in diesen Versuchen verwendete Verfahren erlaubt nur die feldabhängige Viskositätsbestimmung bei fester Scherrate, gibt aber keine Möglichkeit für Untersuchungen mit variabler Scherrate, oder bei zeitlich veränderlicher Beanspruchung, wie sie für die Bestimmung viskoelastischer Eigenschaften notwendig sind. Um derartige Messungen in magnetischen Flüssigkeiten zu ermöglichen, haben wir ein Rheometer aufgebaut, welches rheologische Untersuchungen unter dem Einfluß magnetischer Felder erlaubt.

Es handelt sich um ein kombiniertes Couette/Kegel-Platte System, bei dem ein äußerer Topf bewegt wird, während an dem in dem Topf befindlichen Kegel das durch die Flüssigkeit übertragene Drehmoment mittels eines kommerziellen Drehmoment-Aufnehmers gemessen wird. Abbildung 2 gibt die entscheidenden Komponenten dieses Rheometers in einer schematischen Darstellung wieder.

Da der gesamte Meßbereich des Rheometers aus nicht magnetischen Materialien gefertigt ist,

erlaubt das Gerät die Untersuchung magnetischer Flüssigkeiten unter dem Einfluß magnetischer Felder. Mit dem derzeit zur Verfügung stehenden Spulensystem können magnetische Felder bis zu 40 kA/m erzeugt werden, deren Homogenität im Bereich der Flüssigkeit besser als 0.5% ist. Der Antrieb des Systems läßt sowohl oszillierende als auch rotierende Bewegungen des äußeren Topfes zu.

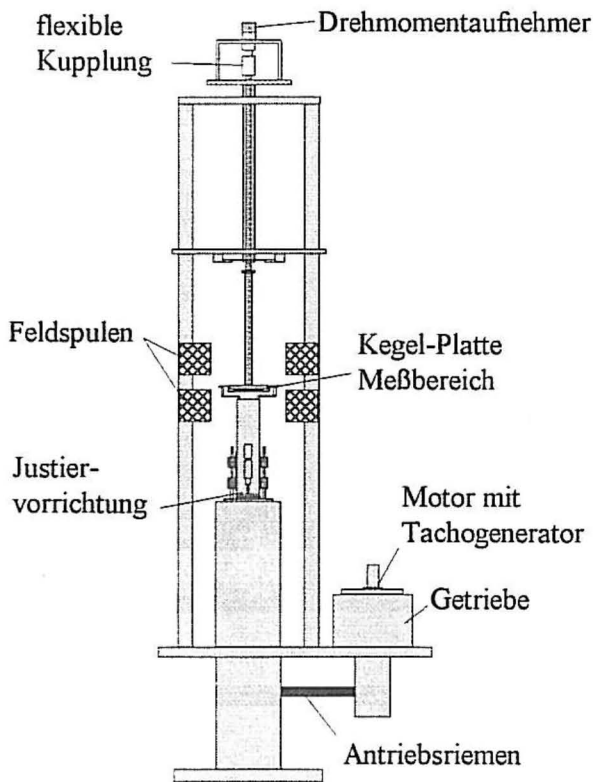


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Rheometers für Ferrofluide der Arbeitsgruppe „Magnetische Flüssigkeiten“ am ZARM.

Die nachstehende Tabelle gibt einige wesentliche technische Daten des Rheometers wider.

Kegeldurchmesser	76 mm
Durchmesser des Topfes	80 mm
Kegel-Platte Winkel	3 °
Drehmomentmessbereich	$10^{-5} - 10^{-2}$ Nm
Frequenzbereich rotierend	0.13 - 2 Hz
oszillierend	0.0035 - 1 Hz

Mit dem beschriebenen System wurden erste Messungen zur Scherabhängigkeit der feldindu-

zierten Viskositätserhöhung an kommerziellen magnetischen Flüssigkeiten durchgeführt. Das verwendete Ferrofluid enthielt Magnetitpartikel mit einem mittleren Durchmesser von 10nm und einer Volumenkonzentration von 7%. Bei den Messungen wurde im oszillierenden Betrieb die Viskosität als Funktion der Scherrate sowie des angelegten magnetischen Feldes bestimmt. Abbildung 3 zeigt die hieraus ermittelte relative feldinduzierte Viskositätsänderung S als Funktion des Magnetfeldes für drei verschiedene Scherraten.

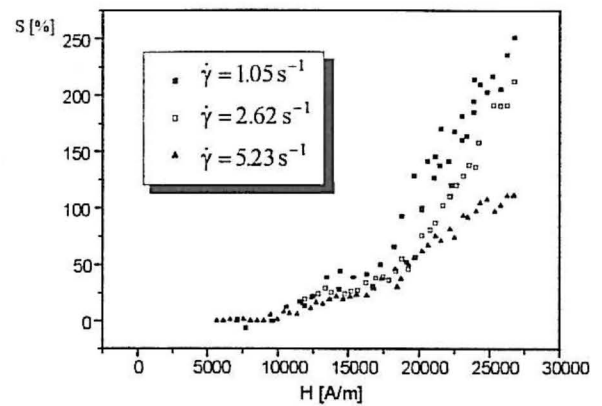


Abbildung 3: Die relative Viskositätsänderung S für verschiedene Scherraten als Funktion des angelegten magnetischen Feldes

Man erkennt deutlich eine Scherverdünnung, die mit wachsendem Feld stärker wird. Diese Scherverdünnung kann qualitativ über die Bildung von Ketten magnetischer Teilchen erklärt werden, die durch die Scherung zerrissen werden und damit bei steigender Scherrate immer geringeren Einfluß auf die Viskosität der Flüssigkeit haben.

Literatur

- [1] Taylor, G. I.; *Stability of a viscous liquid contained between two rotating cylinders*, Phil. Trans., Roy. Soc., A 223 (1923) 289-343
- [2] Ambacher, O., Odenbach, S., Stierstadt, K.; *Rotational viscosity in ferrofluids*, Z. Phys. B-Condensed Matter, 86 (1992) 29-32
- [3] Shliomis, M. I.; *Effective viscosity of magnetic suspensions*; Zh. Eksp. Teir. Fiz. 61 (1972) 2411-2418

Session 5

**Anwendungen magnetischer
Flüssigkeiten**

Anwendung magnetischer Flüssigkeiten in der Sensorik

R. Jaskulke, O. Fiedler

Universität Rostock, FB Elektrotechnik, Albert-Einstein-Straße 2, 18051 Rostock

Abstract

Magnetische Flüssigkeiten sind seit einigen Jahrzehnten bekannt, aber erst in den 60-iger Jahren wurden ökonomische Herstellungsverfahren und interessante Anwendungsgebiete erschlossen. Durchgesetzt haben sich Anwendungen in der Dichtungstechnik (wartungsarme Abdichtungen rotierender Wellen) sowie in der Lagerungs- und Dämpfungstechnik. Bekannt sind weiterhin der Einsatz zur Visualisierung von magnetischen Bereichen, die Verwendung als magnetische Tinte in der Drucktechnik oder als Trennmedium in der Sekundärrohstoffaufbereitung.

In der Meßtechnik finden sich dagegen vergleichsweise wenige erfolgversprechende Entwicklungen. In der Elektronik dienen sie zur Leistungsverbesserung in Lautsprechern und sie finden Anwendung in Sensoren zur Vibrations- und Druckmessung.

Im Institut für Allgemeine Elektrotechnik der Universität Rostock wurden in den 80-iger Jahren experimentelle Untersuchungen zur Anwendung magnetischer Flüssigkeiten in der Druck-, Strömungs- und Neigungswinkelmeßtechnik durchgeführt.

Des Weiteren wurden Nutzungsmöglichkeiten von magnetischen Flüssigkeits-Zellen für die optische Steuer- und Regeltechnik erkundet. Anliegen dieser Arbeiten war es, Eigenschaften der magnetischen Flüssigkeiten in Hinblick auf die Einsetzbarkeit in Sensoren und Sensorsystemen zu untersuchen und davon ausgehend robuste Sensoren für den industriellen Einsatz zu entwickeln.

Magnetofluidische Sensoren

Das Wandlerprinzip der Sensoren basiert auf der mechanischen Reaktion der magnetischen Flüssigkeit auf den zu erfassenden physikalischen Parameter und der induktiven Abtastung der resultierenden Ortsveränderung der Flüssigkeit. Es werden somit zwei besondere Eigenschaften der magnetischen Flüssigkeit zur Wandlung einer physikalischen in eine elektrische Größe genutzt, die Fließeigenschaft verbunden mit der magnetischen Eigenschaft.

Differenzdrucksensor

Der Einsatz als Füllflüssigkeit in einem U-Rohr-Manometer ermöglicht die Erfassung kleinster Druckdifferenzen.

Die Druckdifferenz wird in eine Steighöhendifferenz umgesetzt. Um jeden Schenkel des U-Rohres befindet sich eine Spule, die Teil eines Schwingkreises ist. Ändert sich der Druck, so ändern sich gegensinnig die Frequenzen der Schwingkreise. Damit ist die Differenzfrequenz ein Maß für die Druckdifferenz.

Es erscheint naheliegend, die Laageempfindlichkeit derartiger Manometer-Anordnungen zur Bestimmung kleiner Neigungswinkel zu benutzen. Werden die Anschlußöffnungen der U-Rohr-Anordnung verbunden, so entsteht eine in sich geschlossene, ringförmige Anordnung, deren Flüssigkeitsfüllung unter dem Sättigungsdruck des Trägermittels steht und sich nur noch in Abhängigkeit von auftretenden Neigungen relativ zu den fest auf den U-Rohr-Schenkeln justierten Schwingkreisspulen bewegt.

Für die entwickelten Meßanordnungen wurden Empfindlichkeiten ermittelt, die bei herkömmlichen Verfahren nur mit aufwendigen Mitteln erreicht werden. Druckdifferenzen bis hinunter zu 0,1 Pa und Neigungswinkel im Bereich von 0,002° bis 10° sind damit meßbar. Beide Varianten sind durch eine gute Linearität gekennzeichnet.

Die hochempfindlichen Magnetometer können des Weiteren vorteilhaft in der Strömungsmeßtechnik eingesetzt werden. Das betrifft speziell Verfahren, in denen nur mit kleinen Druckdifferenzen gearbeitet wird, z. B. der Strömungsmessung aus dem Druckabfall im geraden Rohr.

Neigungssensor

Günstige Bedingungen insbesondere hinsichtlich der Langzeitstabilität ergeben sich, wenn die magnetische Flüssigkeit als „Meßflüssigkeit“ in einem gegenüber der Umgebungsluft abgeschlossenem Raum bleiben kann. Dazu gehört die Entwicklung eines Neigungssensors, in dem die magnetische Flüssigkeit als verformbarer Kern eines Differentialtransformators Anwendung findet. Als Kern des Transformators wird ein zur Hälfte gefüllter Hohlzylinder genutzt, der mit einer

Erregerspule versehen ist. Seine Neigung führt in zwei gegenphasig geschalteten Meßspulen zu unterschiedlichen Flußdichten, so daß eine Differenzspannung entsteht, die ein Maß für den Neigungswinkel ist. Die elektronische Auswertung erfolgt nach einem amplitudenanalogen oder frequenzanalogen Meßverfahren.

Beispiele für erprobte Anwendungen sind u. a.: die Bestimmung der lastabhängigen Neigung von Kranen, die Erfassung der Rollschwingbewegung eines Schiffes und das Neigungsverhalten der Ausleger von Straßenfertigermaschinen.

Es handelt sich hierbei um die Erfassung von quasistationären Vorgängen mit störenden Querneigungen.

Querneigungen werden durch die Sensorgeometrie nicht erfaßt.

Der Differentialstabsensor zeichnet sich insbesondere durch seine geringe Größe, Schlag- und Stoßfestigkeit sowie durch geringen Herstellungsaufwand aus.

Die Verschiebbarkeit der magnetischen Flüssigkeit im DSS kann auch für Beschleunigungsmessungen genutzt werden.

Er läßt sich sowohl als Neigungssensor als auch als Beschleunigungssensor einsetzen.

Optische Blende

Magnetische Flüssigkeiten sind im allgemeinen lichtundurchlässig. Da sie zusätzlich durch magnetische Felder positionierbar sind, eignen sie sich zur Steuerung eines Lichtstromes von optischen Einrichtungen.

Untersuchungen mit zylindrischen Anordnungen zeigten, daß eine problemlose analoge Steuerung von Lichtstrahlen, bei weitem Regelbereich bis zum vollständigen Verschuß, möglich ist.

Die Kreisblenden sind gekennzeichnet durch einen einfachen Aufbau und kleinen Leistungsbedarf.

Ähnliche Vorteile ergaben sich für magnetische Flüssigkeits-Zellen, mit deren Hilfe der Lichtstrom in einem Lichtleiter gesteuert werden kann.

Prüfverfahren für Fluid-Stabilität

Die Langzeitstabilität von Sensoren entscheidet maßgebend über ihre Akzeptanz in der Applikation. Befindet sich die magnetische Flüssigkeit in einem geschlossenem Volumen, ist die geforderte Stabilität gegeben.

Für die Beurteilung der Alterung des magnetischen Flüssigkeit wurde eine Möglichkeit der Visualisierung von Sedimentationserscheinungen gefunden.

Hierfür wird ein metastabiler Membranzustand genutzt, der beim Aufziehen einer steuerbaren Blende entsteht. Dieses Verfahren kann als Grundlage für weitere Untersuchungen zum Sedimentationsverhalten der magnetischen Flüssigkeiten dienen.

Ferrofluide als Schmiermittel in hydrodynamischen Gleitlagern

R. Patzwald

Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb, TU Berlin, Pascalstr.8-9, 10587 Berlin

Einführung und Projektidee

Die Arbeiten zu diesem Projekt wurden im Rahmen eines DFG-Forschungsvorhabens durchgeführt. Der Grundgedanke war es, durch gezielte Beeinflussung der Schmiermittelviskosität das Verschleißverhalten von Gleitlagern zu verbessern. Hydrodynamische Gleitlager weisen einen verschleißbehafteten Drehzahlbereich ($0 < n < n_n$) auf, der sich durch Erhöhung der Schmiermittelviskosität verringern läßt, was jedoch zu einer Verschlechterung des thermischen Verhaltens bei Flüssigkeitsreibung führt.

Ferrofluide eignen sich als Schmiermittel wegen ihres magnetoviskosen Verhaltens und der Möglichkeit, konventionelle Schmieröle als Trägerflüssigkeit zu verwenden.

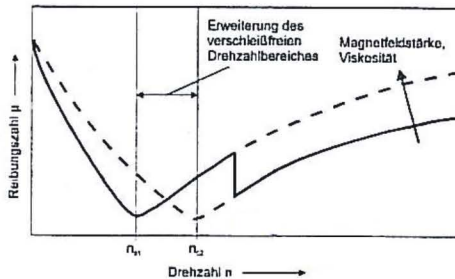


Bild 1. Reibungsverhalten hydrodynam. Gleitlager

Der Verlauf der Reibungszahl sollte durch Erhöhung der Viskosität wie in Bild 1 dargestellt beeinflusst werden.

Rheologische Untersuchungen

Für die Untersuchungen wurde ein Rotationsviskosimeter mit Doppelspaltmeßeinrichtung derart umgebaut, daß die Meßspalte von einem Magnetfeld in radialer Richtung durchflossen werden konnten.

Die Untersuchungen erfolgten mit folgenden Schmierstoffen:

Schmierstoff	Trägerflüssigkeit	Sättigungspolarisation
F1	Mineralöl ISO VG 15	-

MF1	Mineralöl ISO VG 10	55 mT
MF2	Mineralöl ISO VG 10	22 mT
MF3	Petroleum	50 mT

Als Versuchsparameter wurden die Temperatur und die magnetische Induktion variiert. Das Geschwindigkeitsgefälle wurde bei der Aufnahme der Fließkurven stetig erhöht.

Die Viskositätskurven in Bild 2 zeigen mit zunehmender Magnetfeldstärke eine Erhöhung der Viskosität und Zunahme des strukturviskosen Verhaltens. Für dieses magnetorheologische Verhalten werden zwei verschiedene Erklärungsmodelle angeführt. Während das eine die Behinderung der freien Teilchenrotation als Hauptursache ansieht, ist bei dem anderen die Ausbildung von verzweigten Teilchenkettten für die Viskositätssteigerung verantwortlich.

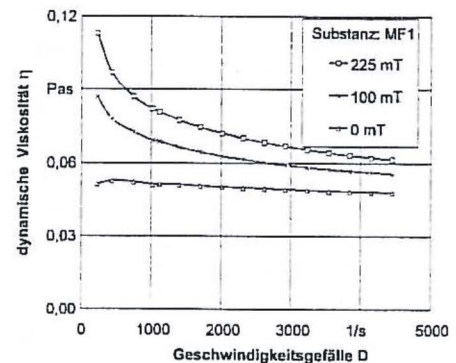


Bild 2. Viskositätskurven von MF1

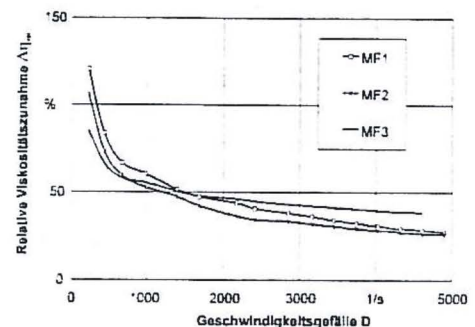


Bild 3. Viskositätszunahme infolge Magnetisierung

Die relative Viskositätszunahme in Bild 3

$$\Delta\eta_{\text{rel}} = \frac{\eta(B = B_{\text{max}}) - \eta(B = 0)}{\eta(B = 0)}$$

zeigt nur bei niedrigen Geschwindigkeitsgefällen eine Abhängigkeit von der Teilchenkonzentration. Den entscheidenden Einfluß auf die Viskositätszunahme übt das Geschwindigkeitsgefälle aus. Dieser Umstand deutet auf eine starke Strukturbildung innerhalb der Ferrofluide hin. Unter Scherbeanspruchung werden diese Strukturen dann orientiert oder zerstört.

Verschleißverhalten ferrofluidgeschmierter Gleitlager

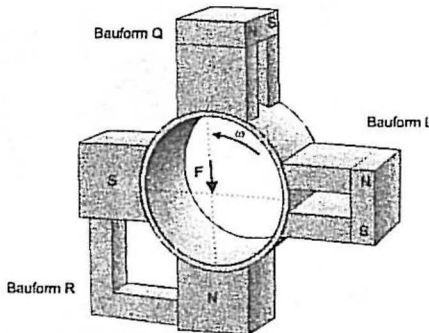


Bild 4. Lagerbuchse mit Magnetbauformen

Zur genaueren Untersuchung von Ferrofluiden als Schmierstoff wurden diese an einem Gleitlagerversuchsstand eingesetzt. Die Magnetisierung der Lagerbuchsen wurden an vier Stellen am Umfang vorgenommen. Verschiedene Magnetbauformen (Bild 4) sollten eventuelle Einflüsse der Feldlinienverläufe zur Schmierstoffbewegung feststellen.

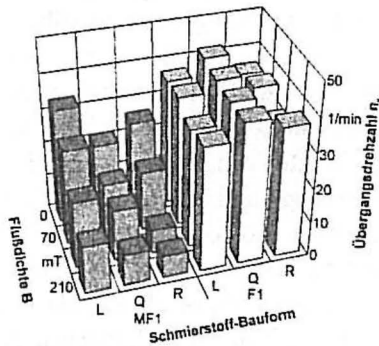


Bild 5. Übergangsdrehzahlen für MF1 und F1

Die Erfassung der für das Verschleißverhalten charakteristischen Übergangsdrehzahl $n_{\bar{u}}$ erfolgte anhand von Auslaufversuchen. Durch die Magnetisierung des Schmierfilms konnte diese bei Ferrofluidschmierung gesenkt und damit das Verschleißverhalten des Gleitlagers verbessert werden (Bild 5). Für die höher konzentrierten Ferrofluide MF1 und MF3 fiel die Verbesserung des Verschleißverhaltens mit zunehmender

magnetischer Flußdichte deutlich aus, während das schwächer konzentrierte MF2 nur eine geringe Senkung der Übergangsdrehzahlen aufwies. Bei dem nichtmagnetischen Vergleichsschmierstoff F1 zeigten die Übergangsdrehzahlen dagegen keine Abhängigkeit von der Magnetisierung (Bild 6).

Unterschiede der Übergangsdrehzahlen innerhalb eines Schmierstoffes sind auf Einlaufvorgänge an den Lagerbuchsen während der Versuche zurückzuführen.

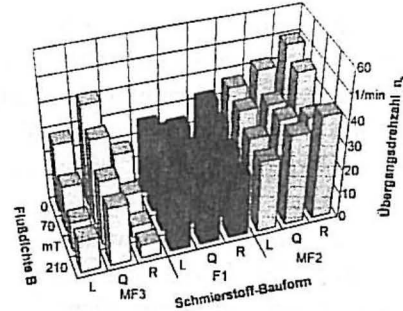


Bild 6. Übergangsdrehzahlen für MF3, F1, und MF2

Im Druckbereich des Gleitlagers traten auch bei niedrigen Drehzahlen sehr hohe Geschwindigkeitsgefälle auf, die nur eine geringe Viskositäts-erhöhung erwarten ließen.

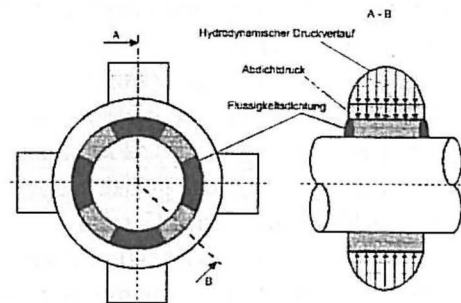


Bild 7. Dichtwirkung bei Ferrofluidschmierung

Hinsichtlich der Magnetbauformen zeigte die Bauform R leichte Vorteile. Hauptverantwortlich für das verbesserte Verschleißverhalten bei Ferrofluidschmierung war die Fixierung des Schmiermittels an den Polschuhrändern. Hier wirkten die Magnetfeldgradienten mit dem Ferrofluid wie eine Magnetflüssigkeitsdichtung, die ein seitliches Abfließen des Schmierstoffes verhinderte. Der Druck an den Lagerrändern fiel nicht auf Null ab (Bild 7), wodurch sich die Tragfähigkeit des Lagers erhöhte. Innerhalb der Polschuhflächen wird das Ferrofluid nahezu gleichmäßig magnetisiert. Dies führte in diesen Bereichen zu einer Viskositäts-erhöhung, die jedoch verhältnismäßig gering ausfiel.

Einsatz von Ferrofluiden als magnetisch steuerbare Schmiermittel für präzise elektromechanische Antriebe

H. Ahlers

Institut für Fertigungstechnik und Spanende Werkzeugmaschinen,
Schloßwender Str. 5, 30159 Hannover

Magnetische Flüssigkeiten haben sich in der Industrie bereits als Dichtungsmittel bei vielen Anwendungen durchgesetzt. Darüber hinaus sind die ersten Ideen, magnetische Flüssigkeiten als steuerbare Schmiermittel einzusetzen, bereits Mitte der 70er Jahre vorgeschlagen worden. Die ersten konkreten Untersuchungen zu diesem Thema sind Mitte der 80er Jahre vor allem in der ehemaligen Sowjetunion durchgeführt worden [5]. In diesen ersten allgemeinen Untersuchungen wurde vor allem das Reibverhalten von magnetischen Flüssigkeiten und der Einfluß des magnetischen Feldes darauf ermittelt.

Der Einsatz magnetischer Schmierstoffe bietet sich jedoch gerade in denjenigen Anwendungsfällen an, wo es aufgrund niedriger Relativbewegungen der Reibpartner zueinander zu Mischreibung und damit zu erhöhtem Verschleiß kommt. Durch das Vorhandensein der magnetischen Phase können diese Flüssigkeiten von einem magnetischen Feld gezielt gesteuert und somit den Reibzonen eines Getriebes zugeführt oder im Falle eines Getriebestillstandes dort gehalten werden. Der Schmierungseinfluß auf die Getriebecharakteristika, wie Hysterese, Reibkennlinie und Wirkungsgrad, ist besonders bei Präzisions- und Sondergetrieben sehr ausgeprägt, da diese aus konstruktiven Gründen nur über eine begrenzte Schmierstoffmenge verfügen oder mit Fett geschmiert werden. Von der Stabilität der mechanischen Getriebekennwerte ist weiterhin die Arbeitsfähigkeit der abgetriebenen Maschinen abhängig. Ein besonders starker Getriebeeinfluß ist bei Robotern mit hoher Arbeitsgenauigkeit und schnellen Maschinen zu nennen [1].

Mit dem Ziel, grundlegende Aussagen über die technischen Einsatzpotentiale von magnetischen Schmierstoffen in Präzisionsgetrieben zu erhalten, wird am Institut für Fertigungstechnik und Spanende Werkzeugmaschinen (IFW) der Universität Hannover ein von der DFG geför-

deres umfangreiches Forschungsprojekt durchgeführt.

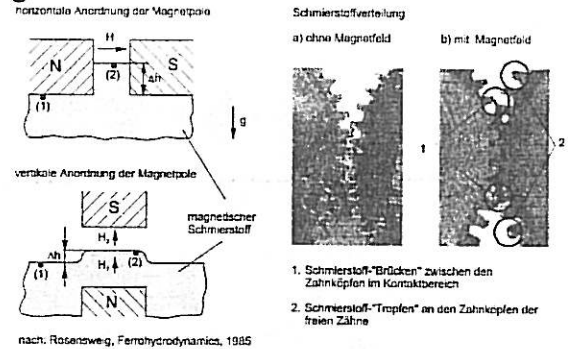


Abb. 1: Mechanismen zum Transport von magnetischem Schmierstoff

Die schmierstofftechnischen Eigenschaften von Flüssigkeiten werden allgemein durch zwei Mechanismen bestimmt: der Aufbau eines hydrodynamisch wirksamen Druckes und die Benetzung der Gleitstellen mit Schmierstoff. Für den Aufbau eines hydrodynamischen Druckes muß eine geeignete Spaltform, ein Medium im Spalt sowie eine Relativbewegung vorhanden sein. Das Medium im Spalt muß viskos sein, d.h. der Verdrängung aus demselben einen Widerstand entgegensetzen. Der zweite Mechanismus wird durch die Benetzbarkeit der Flüssigkeit beschrieben. Hierbei sind zwei physikalische Effekte von Bedeutung, die Grenzflächenspannung und die polare Wirkung von ungesättigten Kohlenwasserstoffen. Durch ungleiche Ladungsverteilung innerhalb von Molekülen erscheinen diese als Dipole und besitzen die Eigenschaft der physikalischen Adsorption. So wird z.B. die der Metalloberfläche zunächst gelegene Molekülschicht einer Fettsäure gewissermaßen bürstenartig ausgerichtet, so daß die Kohlenwasserstoffketten senkrecht zur Oberfläche stehen. Dadurch wird die Haftfähigkeit am Metall erhöht und die Schmierfähigkeit verbessert. Die Effektivität dieses Mechanismus wird durch die Dicke und die Stärke der Bindung der adsorbierten Schicht spezifiziert.

Bei einer magnetischen Schmierung werden beide Mechanismen beeinflusst. Die durch die Schmierung zu trennenden Reibpartner bestehen in der Regel aus magnetisierbarem Stahl. Wird ein Feld angelegt, so werden die magnetischen Partikel in einem Ferrofluid durch die wirkenden magnetischen Kräfte an den Oberflächen gehalten. Hieraus resultiert eine zusätzliche Erhöhung der Viskosität in oberflächennahen Schichten des Fluids. Aufgrund ihres Aufbaues - jedes Partikel ist mit einer oberflächenaktiven Schicht umgeben, die das Fluid gegen Agglomeration und Sedimentation stabilisiert - formen die Partikel zusätzlich durch die polare Wirkung des Stabilisierers eine dichte Schicht auf der Oberfläche der Reibpartner.

Der Mechanismus des Ferrofluid-Transportes spielt bei der Schmierstoffversorgung der Reibzonen eine wichtige Rolle, da dem Schmierstoff damit eine aktive Rolle zukommt. Rosensweig führt in [4] eine Erweiterung der Navier-Stokes'schen Gleichungen ein und erhält letztlich daraus die ferrohydrodynamische (FHD) Bernoulli-Gleichung:

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho gh - \mu_0 \overline{MH} = const. \quad (1)$$

Der Ferrofluid-Transport in den Luftspalt zwischen zwei als Nord- und Südpol ausgeführten Zähnen kann anhand von zwei Beispielen für den horizontalen und den vertikalen Einbaufall beschrieben werden.

Wird für die in Bild 1, oben, beschriebene Anordnung angenommen, daß der Abstand zwischen den Polen hinreichend groß ist, spielen Kapillareffekte keine Rolle und die Steighöhe des Fluids wird ausschließlich durch das magnetische Feld bestimmt. Die sich einstellende Kraft auf die Flüssigkeit verläuft senkrecht zu den Feldlinien des magnetischen Feldes. Wird für den horizontalen Einbaufall die FHD-Bernoulli-Gleichung an den Punkten (1) und (2) angewendet und vorausgesetzt, daß die Drücke an diesen Punkten gleich sind, so ergibt sich für die Steighöhe folgender Zusammenhang:

$$\Delta h = h_2 - h_1 = \frac{\mu_0 \overline{MH}}{\rho g} \quad (2)$$

Sind die Magnetpole vertikal angeordnet, stehen das magnetische Feld und die Oberfläche der Flüssigkeit senkrecht zueinander. Daraus folgt eine Erhöhung des Flüssigkeitsspiegels in dem Spalt. Zur Veranschaulichung der beschriebenen Effekte ist in Bild 1, rechts, die

Verteilung von magnetischem Schmierstoff ohne bzw. bei Anwesenheit eines magnetischen Feldes am Beispiel eines einfachen Stirnradgetriebes dargestellt.

Anhand von Versuchen an einem zweistufigen Planetengetriebe konnte festgestellt werden, daß für die Wirksamkeit einer magnetischen Getriebebeschmierung die Neukonstruktion des Getriebes unumgänglich ist. Als Untersuchungsobjekt dient daher ein Planetengetriebe-Einbausatz für den ein spezielles Gehäuse entwickelt worden ist.

Wichtigstes Ergebnis der durchgeführten Messungen ist der Anstieg des Wirkungsgrades bis zu einer bestimmten Stärke des Magnetfeldes. Die Tragfähigkeit des Schmierstoffes wird also durch den Einsatz des magnetischen Stoffes verbessert. Bei weiter steigendem magnetischen Feld überwiegen jedoch wirkende Maxwellkräfte und führen zu einer Verschlechterung der Reibverhältnisse.

Die Untersuchungen an dem neu entwickelten Planetengetriebe zeigten, daß mit magnetischen Schmierstoffen für bestimmte Betriebszustände eine Verbesserung der Reibverhältnisse in Präzisionsgetrieben zu erzielen ist. Zur Zeit werden weitere Untersuchungen mit Schmierstoffen mit unterschiedlicher Partikelkonzentration durchgeführt. Ferner wird ein Sensorsystem zur direkten Messung des Magnetfeldes entwickelt. Mit Hilfe der FE-Methode soll der Verlauf des Feldes im Getriebe optimiert und es sollen allgemeine Richtlinien zur Auslegung von Getrieben mit magnetischer Getriebebeschmierung erarbeitet werden.

Literatur:

- [1] Tönshoff, H.K., Janocha, H., Gerstmann, U.: Robotergenauigkeit. Erwartungen der Anwender u. Realisierbarkeit. VDI-Z 132 (1990), 6, S. 93-97
- [2] Tönshoff, H.K., Ahlers, H.: Präzisionsgetriebe - Einsatz magnetischer Schmierstoffe. antriebstechnik 35 (1996) 8, S. 53-56
- [3] Livotov, P.: Einsatzpotential von magnetisch aktiven Schmierstoffen in Getrieben. antriebstechnik 31 (1992) 10, S. 71-74
- [4] Rosensweig, R.E.: Ferrohydrodynamics. Cambridge University Press, Cambridge, 1985
- [5] Mikhalev, Yu.O., Zemlyakov, A.M., Lapochkin, A.I.: Study of Effectiveness of low-modulus Gear Drives with Magnetofluid

Design Aspekte für Kupplungen mit Magnetorheologischen Flüssigkeiten

D. Lampe

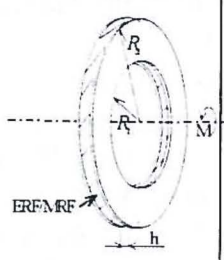
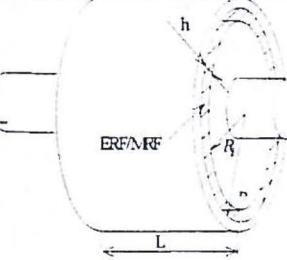
Center for Physical Fluid Dynamics, TU Dresden, 01062 Dresden

Die potentiellen Vorteile von magnetorheologischen gegenüber herkömmlichen Kupplungen liegen vor allem in der guten Steuerbarkeit des übertragenen Drehmomentes, der schnellen Reaktionszeit und dem geringen Verschleiß. Die schnelle Reaktionszeit ergibt sich vor allem aus dem fundamentalen Vorteil, daß die elektrische Information direkt, d.h. ohne mechanische Bewegung von Teilen, auf das Wirkmedium übertragen wird. Magnetorheologische Kupplungen sind sowohl als Sicherheitskupplungen, als Kupplungen zur Dämpfung von Rotationschwingungen und auch als Kupplungen mit steuerbarer Ausgangsdrehzahl bzw. -drehmoment anwendbar. Ihr möglicher Anwendungsbereich reicht von Werkzeugmaschinen bis hin zum Automobilbereich.

Merkmale von magnetorheologischen Kupplungen sind die Größe des übertragbaren Drehmomentes, des Leerlaufdrehmomentes, die zur Drehmomentübertragung erforderliche elektrische Leistung, sowie die Massenträgheitsmomente von Antriebs- und Abtriebsselement und die Fähigkeit zur Ableitung entstehender Wärme. Unter Leerlaufdrehmoment versteht man das Drehmoment, welches auftritt, wenn kein magnetisches Feld anliegt und das nur durch Flüssigkeitsreibung, hervorgerufen durch die

Drehzahldifferenz zwischen Antriebs- und Abtriebsselement, erzeugt wird. Das übertragbare Drehmoment tritt auf, wenn sich Antriebs- und Abtriebsselement mit gleicher Drehzahl drehen und das magnetische Feld eingeschaltet ist. Gute Kupplungen zeichnen sich durch ein hohes übertragbares Drehmoment bei gleichzeitigem niedrigen Leerlaufdrehmoment, niedrige elektrische Leistungsaufnahme, geringes Gewicht und niedriges Trägheitsmoment, einfachen möglichst modularen Aufbau, sowie durch einfache und preisgünstige Herstellbarkeit aus. In jedem Falle ist sicherzustellen, daß der Temperatureinsatzbereich ausreichend ist, es nicht zu Überhitzung kommt, die Eigenschaften über ausreichende Zeiträume gewährleistet werden können (d.h. Verhinderung der Auszentrifugierung und des Absetzens der Partikel) und daß Dichttheit gegeben ist.

Für die beiden möglichen Grundvarianten einer Spaltanordnung wurden die Gleichungen zur Drehmomentübertragung abgeleitet. Magnetorheologische Flüssigkeiten zeichnen sich meist durch einen starken Abfall der Scherspannung beim Übergang von fest zu flüssig aus. Die maximale im festen Zustand erreichbare Scherspannung wird mit $\tau_{y,s}$ (statische

	Scheibenanordnung	Glockenanordnung
		
Maximales Statisches Drehmoment	$\frac{\pi \tau_{y,s}}{2 R_a} (R_a^4 - R_i^4)$	$2\pi \left(\frac{R_a + R_i}{2} \right)^2 L \tau_{y,s}$
Minimales Dynamisches Drehmoment	$\frac{2}{3} \pi \tau_{y,d} (R_a^3 - R_i^3)$	$2\pi \left(\frac{R_a + R_i}{2} \right)^2 L \tau_{y,d}$

Grenzscherspannung) und die bei minimaler Schergeschwindigkeit im flüssigen Zustand erreichbare Scherspannung $\tau_{y,d}$ (dynamische Grenzscherspannung) bezeichnet.

Aus der unterschiedlichen radialen Spannungsverteilung im festen und flüssigen Zustand resultiert, daß man durch eine geschickte Wahl von R_a und R_i bei der Scheibenanordnung erreichen kann, daß der Übergang zwischen starrer Verbindung und schlupfender Drehmomentübertragung ohne Drehmomentensprung erfolgt. Desweiteren bietet die Scheibenanordnung den fundamentalen Vorteil, daß bei Fluidentmischung aufgrund von Zentrifugalkräften die Grenzscherspannung nicht durch Partikelentmischung an einer Übertragungsfläche gegen Null geht.

Zur Vermeidung der Überhitzung (besonders die im Leerlauf entstehende Wärme ist sicher abzuleiten) sind folgende Maßnahmen sinnvoll:

- a) große und stark strukturierte Kupplungsaußenflächen zur Gewährleistung einer größtmöglichen Oberfläche
- b) antreibendes Element liegt außen, damit auch bei Stillstand des abtreibenden Elementes ein turbulenter konvektiver Wärmeabtransport gegeben ist

Die Größe des übertragbaren Drehmomentes hängt von der Stärke des magnetischen Flusses durch den Drehmomentübertragungsspalt, der als Flüssigkeitseigenschaft gegebenen Abhängigkeit der Schubspannungserhöhung vom magnetischen Fluß, sowie von den Radien und dem Winkel des Übertragungsspalt ab. Dabei trägt nur der Teil des Spaltes zur Erzielung des Nenn Drehmomentes bei, in dem die Magnetfeldlinien senkrecht durch die Spaltbegrenzungsflächen treten. Daraus folgt, daß die Flüssigkeit im Spalt an den Stirnflächen des Rotors ausschließlich das Leerlaufdrehmoment erhöht und nicht zum übertragbaren Drehmoment beiträgt.

Durch eine V-förmige Ausbildung der Abtriebsscheiben (Bild 1) kann die nicht zum übertragbaren Drehmoment beitragende benetzte Spaltfläche minimiert und dadurch eine Verringerung des Leerlaufdrehmomentes erzielt werden. Desweiteren wird durch eine sinnvolle Wahl des V-Winkels sowohl erreicht, daß die magnetische Induktion im Antriebseisenteil so hoch ist, daß es zu einer optimalen Ausnutzung der Magnetisierbarkeit des Materials, als auch zu einer Minimierung des elektrischen Spulen-

widerstandes durch Vergrößerung der Querschnittsfläche kommt. Dadurch wird die erforderliche elektrische Steuerleistung entscheidend verringert.

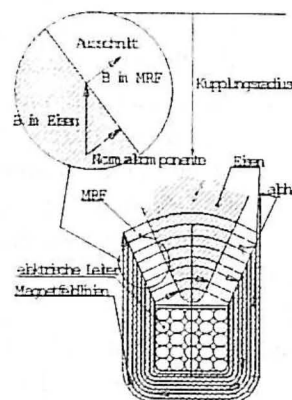


Bild 1: Skizze der gewählten Anordnung

Auch bisher bekannte zur Magnetkreisauslegung verwendete Verfahren wären prinzipiell zur günstigen Abstimmung zwischen MRF-Querschnitt und Eisenquerschnitt in der Lage. Sie können aber nicht den Gewinn, der durch eine mit der Eisenquerschnittsverringerung verbundenen Vergrößerung der Spulenquerschnittsfläche einhergeht, berücksichtigen. Eine Spulenquerschnittsvergrößerung wirkt sich ja bekanntlich zugunsten einer elektrischen Widerstandsverminderung aus.

Die Optimierung dieses V-winkels geschah so, indem für gegebene Materialkennkurven, vorgegebene Außenabmessungen der Einheit Spule, Eisenteile und MRF, sowie für vorgegebene Spaltlänge und -breite, dann für eine Reihe von elektrischen Leistungen und V-winkeln α die daraus resultierende magnetische Induktion in der MRF berechnet wurde. Aus den erhaltenen 3-d Diagrammen konnte man dann für jede gewünschte magnetische Induktion den V-winkel ablesen, bei dem die optimal niedrige elektrische Leistung zur Erzeugung der Induktion erforderlich ist.

Für die Versuchskupplung wurde neben der Optimierung der Felderzeugung eine neuartige Dichtung (Bild 2) entwickelt, die die Eigenschaft der Magnetisierbarkeit und die daraus folgende Möglichkeit der Ausübung von magnetischen Volumenkräften ($f_m = \mu_0 M \nabla H$) auf die MRF ausnutzt. Durch die Anwendung eines Permanentmagnetes und eines Eisenteiles aus gut magnetisierbarem Material, die sich unter Beibehaltung des gegenseitigen Abstandes

relativ zueinander bewegen können, wird ein Magnetfeld erzeugt, welches an den Außenrändern am größten ist und mit wachsendem Abstand dazu abfällt. Unter Außenrändern wird hier die Grenze verstanden, über die das MRF nicht hinaus gelangen soll. Sollte die MRF z. B. durch Schwerkrafteinfluß doch in den Spalt zwischen Permanentmagnet und Eisenteil gelangen, so wirkt auf sie durch das Magnetfeld eine Kraft, die die MRF automatisch wieder hinaus befördert. Bedingungen für das Entstehen dieser Kraftwirkung sind die Magnetisierbarkeit der Flüssigkeit und ein starker Abfall der magnetischen Feldstärke mit wachsender Entfernung zum Außenrand. Der Abfall der magnetischen Feldstärke wird durch eine Vergrößerung des Spaltes zwischen Permanentmagnet und Eisenteil erreicht. Durch diese Art der Abdichtung wird erreicht, daß die MRF ohne zusätzliche Reibkräfte und ohne jeden Dichtungsverschleiß kontinuierlich in den Übertragungsspalten gehalten werden kann und zudem das Eindringen der MRF in unerwünschte Bereiche verhindert wird. Desweiteren zeichnet sie sich dadurch aus, daß keine elektrische Leistung zur dauerhaften Aufrechterhaltung der Dichtungswirkung erforderlich ist.

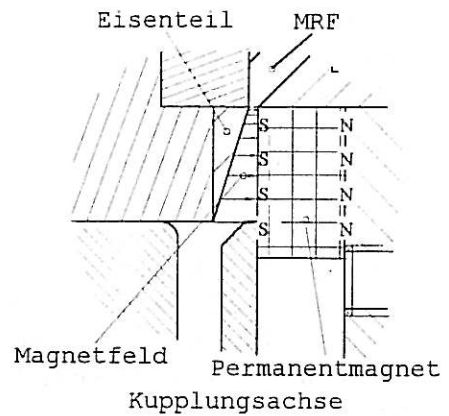


Bild 2: Schnitt durch Permanentmagnetabdichtung

Zu Beginn der Arbeiten an der Entwicklung von MRF-Kupplungen wurde vom Autor eine Stoffdatensammlung zu kommerziell verfügbaren ERF und MRF erstellt. Die Datensammlung verschafft eine Übersicht über wichtige Fluideigenschaften, beinhaltet Daten über verfügbare Fluide, und liefert notwendige Informationen zur Beschaffung. Die Datenbank ist im Internet zu finden unter:

<http://www.tu-dresden.de/mw/ilr/lampe/HAUPT.HTM>

Session 6

**Separation mittels magnetischer
Flüssigkeiten**

Magneto-hydrostatische Sortierung von Metallen mittels Ferrofluiden

E. Madai

UVR-FLA GmbH Freiberg, Chemnitz Str. 40, 09596 Freiberg/Sa.

Trotz der Fortschritte bei Zerlegungstechnologien für Altgeräte sind viele Probleme des Stoffrecyclings nur durch Massenstromverfahren wirtschaftlich lösbar. Stofftrennungen werden bei Massenstromverfahren in sehr vielen Fällen mit dem Parameter Dichte als Trennmerkmal realisiert, da die Dichte häufig, insbesondere bei Metallen als wichtigsten Wertstoffen, aber auch bei Kunststoffen, mit der chemischen Zusammensetzung korreliert. Aus der klassischen Aufbereitungstechnik bekannte Dichtentrenngeräte wie Herde, Setzmaschinen, Windsichter oder Schwertrübescheider versagen in einigen Problemfällen der Recyclingtechnik. Diese Problemfälle sind gekennzeichnet durch:

geringe Dichteunterschiede zwischen den zu trennenden Materialien und/oder

Notwendigkeit einer Vielzahl von Dichtentrennschnitten und/oder

Vorliegen extremer Kornformen (plattig, langgestreckt) und/oder

Notwendigkeit sehr hoher Trenndichten und/oder

Notwendigkeit von Trennschnitten bei Dichten kleiner 1 g/cm^3

Seit längerer Zeit ist mit der magneto-hydrostatischen (MHS) Scheidung ein Verfahrensprinzip für den Labormaßstab bekannt, welches wahlweise durch eine scheinbare Vergrößerung der Dichte magnetisierbarer Medien auf Werte bis zu 10 g/cm^3 oder durch eine Herabsetzung auf Werte kleiner 1 g/cm^3 die Aussicht bietet, auch bei oben genannten Problemfällen erfolgreiche Trennungen durchzuführen.

Die magneto-hydrostatische Trennung beruht auf einer Verstärkung der Auftriebskräfte in magnetisierbaren Flüssigkeiten. Wenn diese Flüssigkeiten sich in einem inhomogenen Magnetfeld befinden, das eine Magnetkraft parallel zur Schwerkraft auf das Medium ausübt, erhöht sich scheinbar die Dichte des Mediums.

Die MHS-Scheidung kann mit paramagnetischen Salzlösungen durchgeführt werden, erfordert aber dann wegen der geringen Suszeptibilität der Lösungen sehr starke Magnetfelder.

Der Aufwand zur Felderzeugung kann drastisch eingeschränkt werden, wenn man Ferrofluide als Trennmedium einsetzt.

Die technische Anwendung scheiterte bisher an den hohen Kosten des Trennmediums, wegen zu hoher Umweltbelastungen - insbesondere wenn Fluide mit organischem Trägermedium eingesetzt werden -, sowie fehlender verfahrenstechnischer Anlagen.

Seit einigen Jahren ist eine Berliner Firma in der Lage, Magnetofluide auf Wasserbasis zu relativ niedrigen Kosten herzustellen. Sie besitzen magnetische Eigenschaften, die für die Anwendung in MHS-Scheidern völlig ausreichen. Ferner sind sie für technische Trennprozesse stabil genug, da bei derartigen Prozessen das Ferrofluid - bedingt durch Haftverluste - relativ schnell ersetzt werden muß, und ihre Rückgewinnung aus den Trennprodukten ist wesentlich einfacher als diejenige von Ferrofluiden mit organischen Trägerflüssigkeiten. Damit wird die magneto-hydrostatische Scheidung mit Ferrofluiden als technisches Trennverfahren interessant. UVR-FIA und die damalige IKOSTA GmbH, Berlin, lieferten bereits einen kleinen Scheider, mit dem die außerordentlich hohe Trennschärfe des Verfahrens in einem Spezialfall nachgewiesen wurde. Aus früheren Untersuchungen ist bekannt, daß die Magneto-fluid-Trenntechnik eine Mehrproduktentrennung in einem Schritt ermöglicht, die Trennschärfe wenig oder nicht von der Kornform abhängig ist, und daß für Körnungen $> 5 \text{ mm}$ die Trennschärfe auch von der Partikelgröße unabhängig ist. Es können beliebige Trenndichten zwischen $0,5$ und 10 g/cm^3 erreicht werden. Die Ökonomie des Verfahrens wird sowohl durch die Rückgewin-

nung des Magnetofluids als auch durch die Kosten der Magnetfelderzeugung erheblich beeinflußt. Moderne Dauermagnetwerkstoffe mit sehr hohem Energieprodukt erlauben in einigen Fällen, die für die MHS-Scheidung notwendigen Magnetfelder ohne dauernde Energiezufuhr zu erzeugen. Die Einsatzgebiete von Dauermagneten in der MHS-Scheidung werden gegenüber der klassischen elektromagnetischen Felderzeugung abgegrenzt. Auf die Beeinträchtigung der Trennschärfe der MHS-Scheidung bei feinen Körnungen durch magnetisch induzierte Wechselwirkungen zwischen den an sich unmagnetischen Partikeln des zu trennenden Materials wird hingewiesen.

KREISLAUF VON FERROFLUIDEN BEI DER MAGNETOHYDROSTATISCHEN SORTIERUNG

D. Bruhn

Daimler-Benz Forschungszentrum Ulm, Prozeß- und Recyclingtechnik, Postfach 2360, D-89013 Ulm

Problemstellung

Die magneto hydrostatische Sortierung ist eine Option für die Sortierung nach der Dichte von Stoffen, die mit herkömmlichen Dichtesortierverfahren nicht zu trennen sind. Im Bereich von Sekundärrohstoffen gilt dies vor allem für Metalle. Ein Beispiel ist die sortenreine Rückgewinnung von Aluminium aus einem Aluminium-, Messing/Kupfer-, Kondensator- und Nichtleitergemisch, wie es u.a. bei dem Recycling von Leiterplattenschrott in einer Pilotanlage von Daimler-Benz in Ulm anfällt. Eine erste Überschlagsrechnung zeigt aber, daß allein der Verlust durch die Verschleppung von an getrenntem Material anhaftendem Ferrofluid ohne Fluidrückgewinnung und -aufbereitung in etwa dem Materialwert des Aluminiums entspricht. Aus diesem Grund ist die Kreislaufführung des Trennmediums auch bei fallendem Fluidpreis unabdingbar. Hierauf wurde von verschiedenen Autoren [1-3] hingewiesen und

auch Vorschläge für die Gestaltung des Kreislaufprozesses vorgelegt. Eine systematische Untersuchung des Verhaltens der zur Verfügung stehenden Ferrofluide mit dem Ziel, einen solchen Kreislauf (siehe Abbildung) zu installieren und Anforderungen an das Prozeßdesign und das Ferrofluid zu formulieren, steht noch aus. Dies ist aber für die weitere Entwicklung des MHS-Verfahrens von großer Bedeutung.

Anforderungen an das Ferrofluid (Ff) im Kreislauf

Das Ferrofluid hat hinsichtlich des anzustrebenden Kreislaufes mehrere Voraussetzungen zu erfüllen. Für den eigentlichen Trennvorgang ist die Trenndichte der wichtigste Faktor. Bei der Verwendung von Ferrofluiden wird sie im wesentlichen durch den Magnetfeldgradienten, die Sättigungsmagnetisierung und die eigentliche Fluidichte bestimmt.

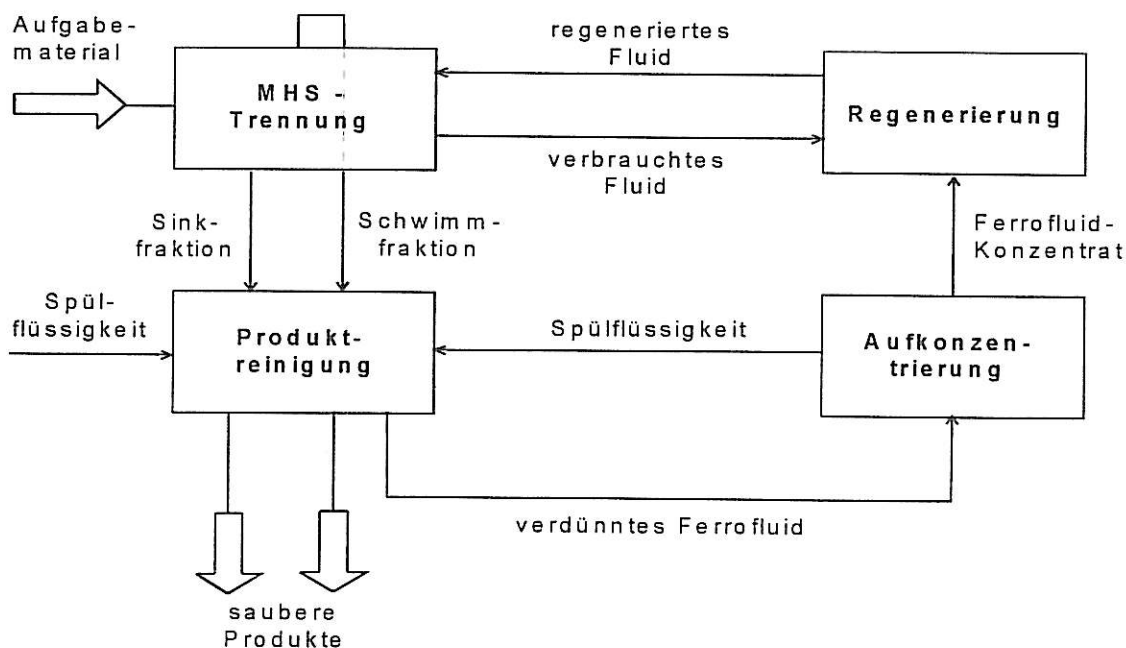


Abbildung: Grundfließbild des Ferrofluidkreislaufes

Die Einstellung der Trenndichte erfolgt bei festgelegter Magnetfeldgeometrie durch die Konzentration des Ferrofluides. Dabei ergibt sich für die Sättigungsmagnetisierung und damit auch für die Trenndichte eine Obergrenze, die durch die Viskosität des Ferrofluides im Magnetfeld und seine Stabilität gegen Agglomeration und Sedimentation unter Einwirkung des für die Trennung notwendigen starken Magnetfeldes und dessen Gradienten gegeben ist. Bei hochkonzentrierten Fluiden verhindert eine zu hohe Viskosität im Magnetfeld die Trennung entweder völlig oder reduziert den Durchsatz durch einen Scheider in nicht akzeptablem Maße. Die Effekte von Agglomeration und Sedimentation führen im ungünstigsten Fall nach einiger Zeit zu einer spürbaren Reduzierung der Trenndichte. Je nachdem, wie stark sich dies bemerkbar macht, müssen Maßnahmen zur Verhinderung bzw. Aufhebung von Agglomeraten getroffen werden.

Die Vorgänge der Produktreinigung, Aufkonzentrierung und Regenerierung sind mit der Art des Basisfluides und der Spülflüssigkeit verknüpft. Fluide auf Wasserbasis und Wasser als Spülflüssigkeit sind aus Sicherheits- und Arbeitsschutzgründen erstrebenswert. Zur Zeit werden Untersuchungen zur Schließung des Kreislaufes mit dieser Auswahl durchgeführt.

Erste Ergebnisse

Wie bekannt ist, macht sich bei Systemen auf Wasserbasis gegenüber anderen eine schlechte

re Stabilität bemerkbar. Sedimentationsmessungen zeigen, daß dieser Effekt bereits nach wenigen Stunden Aufenthalt in einem für die Trennung typischen Magnetfeld auftritt, wobei sich je nach Art des Ferrofluides und nach Konzentration im für die Trennung wesentlichen Raum Veränderungen der Trenndichte im Bereich von einigen Prozent ergeben. Dies bedeutet jedoch nicht, daß Wasser als Basisfluid prinzipiell nicht geeignet ist. Ziele weiterer Untersuchungen sind, exakte Daten über das Verhalten verschiedener Fluide auf Wasserbasis speziell für die Bedingungen der Separation zu gewinnen und Komponenten für Aufkonzentrierung und Regenerierung zu testen.

Literatur

- [1] Farkas, J.; Hargitay, B.: *Recovery and Reconstitution of Ferromagnetic Fluids*. Separation Science and Technology, **18** (10), pp. 917-939, 1983
- [2] Madai, E.; Thiessen, K.P.: *Magnetohydrostatische Sortierung von Metallen mittels Ferrofluiden*. XLVI. Berg- und Hüttenmännischer Tag, Kolloquium 8, TU Bergakademie Freiberg, 14. bis 17. Juni 1995
- [3] Günther, D.: *Schrottsortierung in magnetischen Flüssigkeiten*. Physik in unserer Zeit, **26** (3), S. 124-128, 1995

Anwendung des MHS-Verfahrens zur Sonderabfallsortierung

D. Günther

Polychemie Velten

Die Idee der magnetohydrostatischen Separation wurde schon Mitte der 60er Jahre als eine der ersten möglichen Anwendungsgebiete von Magnetofluiden geboren. Das Verfahren setzte sich jedoch im technischen Maßstab nie durch. Selbst für die wirtschaftlich interessante Aufgabe der NE-Metall-Trennung steht die Wertschöpfung, zumindest in Deutschland, scheinbar in keinem Verhältnis zu den Entwicklungs- und Betriebskosten von MHS-Anlagen. Als Grund wird von allen Fachleuten vor allem auch der zu hohe Preis für das Trennmedium genannt.

Einen neuen Weg geht seit 1996 die Polychemie Velten GmbH. Man erkannte, daß das Verfahren nur auf Nischenmärkte anzuwenden sei, und daß die Produktion der Betriebsflüssigkeiten und der Anlagenbetrieb möglichst auf ein Unternehmen konzentriert sein sollten.

Innerhalb eines innovativen Projektes entsteht z.Z. in Velten eine Anlage zur Trennung PCB-haltiger von PCB-freien Kleinkondensatoren. (PCB: polychlorierte Biphenyle, eingesetzt als Dielektrikum)

Kleinkondensatoren zählen neben quecksilberhaltigen Bauteilen zu den potentiell schadstoffhaltigen Komponenten, die bei der Elektronikschrottverwertung im ersten Schritt manuell entfernt werden. Entsprechend der PCB-Verbotsordnung sollten in den 90er Jahren keine PCB-haltigen Kondensatoren mehr produziert worden sein. Trotzdem sind noch einige Jahre derartige Kondensatoren verbaut worden. Aufgrund langer Nutzungsdauern, speziell von Industrieanlagen, ist mit Rückläufen PCB-haltiger Kondensatoren noch etwa bis zum Jahr 2017 zu rechnen.

Eine getrennte Erfassung der PCB-haltigen Kondensatoren ist derzeit nicht zufriedenstellend möglich. Vergleiche der Gehäusebeschriftungen mit derzeit verfügbaren Bauteillisten

führen oft nicht zum Ziel, da die Listen unvollständig sind, die Kondensatorhersteller teilweise nicht mehr existent und technische Daten nicht zu recherchieren sind und der betriebliche Demontageprozeß in jedem Falle gestört wird. Alle nicht mit Sicherheit PCB-freien Kondensatoren müssen deshalb den PCB-haltigen zugeordnet und mit diesen sehr kostenaufwendig entsorgt werden. Der einzige Entsorgungsweg ist für ganz Deutschland die Untertagedeponie in Herfa-Neurode. Der Anteil der tatsächlich PCB-haltigen Kondensatoren liegt in diesen Gemischen unter 10 %.

Durch unabhängige Studien ist bewiesen worden, daß für eine automatisierte Trennung dieser Kondensatorgemische nur das Trennmerkmal Dichte in Frage kommt. PCB-haltige Kondensatoren sind signifikant spezifisch schwerer. Unterschiedliche Bauarten und Betrachtungsweisen der Demontagebetriebe führen jedoch dazu, daß die für den Trennschnitt erforderliche Dichte des Trennmediums der jeweiligen Charge angepaßt werden muß.

Die Trennung in Schwerertrüben ist zu ungenau, eine wechselnde Einstellung der Konzentration von spezifisch schweren Salzlösungen ist zu aufwendig.

Eine Alternative bietet die magnetohydrostatische Sortierung in magnetischen Flüssigkeiten. Die Anpassung der Trenndichte ist für technische Anwendungen ausreichend genau nach der allgemein bekannten Formel

$$\rho_{\text{scheinbar}} = \rho_{MF} + \frac{dH \cdot M_{MF}}{g}$$

über die Änderung des Magnetfeldgradienten sogar im laufenden Anlagenbetrieb möglich.

Schwerpunkt der Entwicklungsarbeiten ist die Formulierung der Magnetfeldkonfiguration, die Schaffung einer geeigneten Vereinzelungs- und

Transportvorrichtung und die Aufarbeitung des Trennmediums. Die Magnetfeldgestaltung ist aufgrund der erforderlichen großen Abmessung in der Praxis schwierig zu realisieren. Eine mechanische Beschädigung der Kondensatoren muß in jedem Fall vermieden werden, da im Fall der PCB-Freisetzung das Trennmedium kontaminiert wäre. Eine Aufkonzentration der mit den Kondensatoren ausgetragenen und durch abspülen mit Wasser verdünnten Magnetofluide muß in den kontinuierlichen Anlagenprozeß integriert werden, so daß ein geschlossener Stoffkreislauf entsteht.

Ende 1997 wird der Probetrieb einer entsprechenden Sortieranlage bei der Polychemie Velten aufgenommen. Die Kapazität beträgt bei Kondensatorgrößen zwischen 20 und 400 g bis

zu 1200 Stück pro Stunde. Eine zur Trennung geeignete magnetische Flüssigkeit wird von der Polychemie selbst produziert. Die Sortierung soll zunächst in Lohnarbeit erfolgen. Der Aufbau einer Entsorgungslogistik ist angedacht. Auch eine Technologievermarktung ist nicht ausgeschlossen.

Durch eine erfolgreiche Trennung können die Entsorgungskosten der Kondensatorgemische für die Zerlege- u. Demontagebetriebe drastisch gesenkt werden.

Die Rahmenbedingungen zur Kondensatortrennung, ein Anlagenfließschema und Ergebnisse von Laboruntersuchungen zur Kondensatortrennung werden vorgestellt.