

## Effect of boundary conditions on the simulation study of equilibrium properties of magnetic dipolar fluids

Zuowei Wang, Christian Holm and Hanns Walter Müller

Max-Planck-Institut für Polymerforschung,  
Ackermannweg 10, D-55128 Mainz, Germany  
[wangzuo@mpip-mainz.mpg.de](mailto:wangzuo@mpip-mainz.mpg.de)

One basic issue in the simulation study of dipolar systems is the treatment of the long-ranged dipolar interactions under the restriction of finite box geometries. In this paper, we deal with magnetic dipolar (ferro-) fluids and discuss finite size effects originating from the use of different boundary conditions in simulation. Both periodic boundary conditions (PBC) and a finite spherical (FS) box are considered. For PBC we use the Ewald summation to account for the dipolar interactions. The magnetic permeability  $\mu_{BC}$  of the surrounding continuum is typically chosen to be either 1 or  $\infty$ , respectively. We focus on the calculation of the initial susceptibility and the full magnetization curves. By varying the the number of particles  $N$  in the simulation box, it is found that the use of PBC with  $\mu_{BC} = 1$  is most appropriate for the weak dipolar coupling system as it yields the fastest approach to the thermodynamic limit. In strong coupling case the thermodynamic limit is most easily reached by using PBC with  $\mu_{BC} = \infty$ . But regardless of the specific  $\mu_{BC}$ -value, both PBC-versions give coinciding results if  $N$  is sufficiently large. On the other hand, the simulations in finite spherical box geometry exhibit a considerable sensitivity to the container size. The cluster analysis of the microstructure in the system reveals that the orientation of the particle clusters is strongly affected by the presence of the hard wall of the FS boundary, thus resulting in an artificial decrease of the initial susceptibility and the magnetization curve.

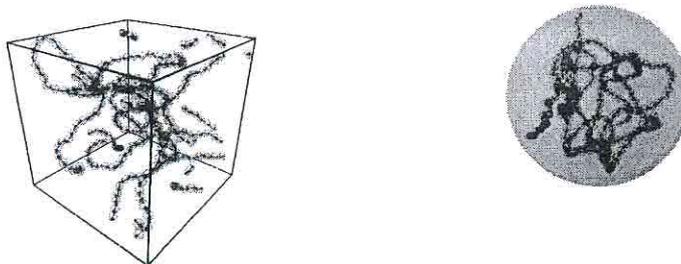


Figure 1: Configurations formed at zero-field in case of strong dipolar coupling by using PBC with  $\mu_{BC} = \infty$  and  $FS$  boundary, respectively.

## **Rotational Brownian motion of a pair of interacting dipoles**

B.U. Felderhof

Institut für Theoretische Physik A, RWTH-Aachen  
[ufelder@physik.rwth-aachen.de](mailto:ufelder@physik.rwth-aachen.de)

The rotational Smoluchowski equation for the orientational distribution function of two identical linear molecules or dipoles with anisotropic interaction is solved by expansion in terms of a limited set of eigenfunctions of the operator for free rotational diffusion. The equilibrium self- and pair time-correlation functions of the two axial unit vectors or dipoles are evaluated for the special case of electrostatic or magnetostatic dipole interaction. The interactions appreciably influence the relaxation behavior. Consequences for the frequency-dependent electric or magnetic susceptibility are discussed.

## Beschreibung des Néelschen Magnetisierungszerfalls in Ferrofluiden mit schmaler Teilchengrößenverteilung

D. Eberbeck, S. Hartwig, U. Steinhoff, L. Trahms  
Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Berlin

Die Ermittlung des Anteils gebundener und im Lösungsmittel frei beweglicher magnetischer Nanopartikel mit Hilfe der Magnetrelaxometrie (MRX) beruht auf der Separation der Beiträge Néelscher und Brownscher Relaxation. Ziel ist es, die Signalstärke und Güte der Separation über die Struktur der Ferrofluidteilchen zu optimieren. Für sphärische Magnetitteilchen z.B. wird ein mittlerer Kerndurchmesser von 20 nm bei möglichst schmaler Größenverteilung angestrebt. Das Relaxationsverhalten derartig idealisierter Teilchenensembles mit unterschiedlichen Größenverteilungen wurde basierend auf dem Modell nichtwechselwirkender Momente mit uniaxialer Anisotropie modelliert. Es sollte geprüft werden, ob der zeitliche Verlauf der Néelrelaxation durch gebräuchliche analytische Funktionen noch gut approximiert werden kann.

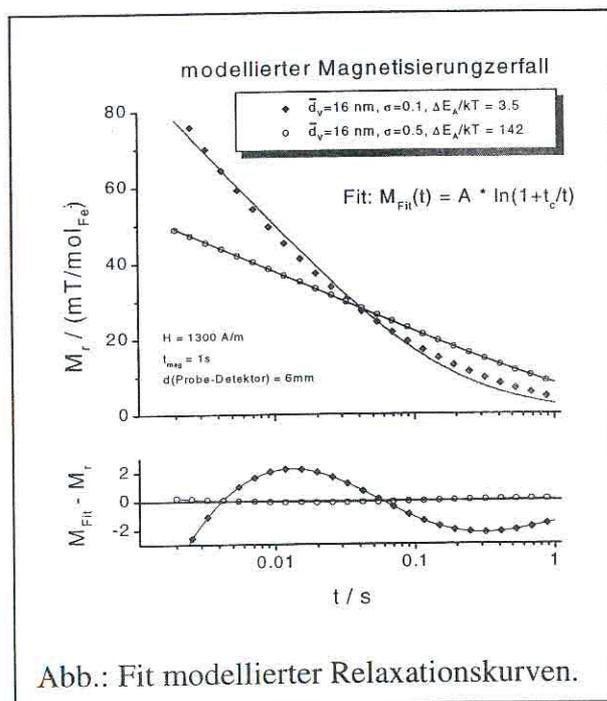


Abb.: Fit modellierter Relaxationskurven.

Für die Beschreibung der Zeitabhängigkeit des Zerfalls der Magnetisierung werden oft, abhängig von Magnetisierungsfeld und -zeit, ein linear-logarithmisches ( $M_r(t) \propto \ln(t/t_0)$ ) [1], ein modifiziertes logarithmisches Gesetz ( $M_r(t) \propto \ln(1+t_c/t)$ ) [2] oder ein gestreckt exponentieller Verlauf ( $M_r(t) \propto \exp(-(t/t_0)^\gamma)$ ) [3] verwendet. Die Magnetisierungszeitverläufe, die an realen Ferrofluiden mit breiter Teilchengrößenverteilung gemessen wurden, ließen sich mit den genannten Funktionen gut anpassen. Mit schmalen Teilchengrößenverteilungen (Lognormalverteilung) modellierte Magnetisierungszerfälle wurden jedoch nur ungenügend durch die einfachen Funktionen approximiert

(Abbildung), wenn die Breite der Verteilungen der Energiebarrieren  $E_A$  klein war ( $\Delta E_A/kT \rightarrow 1$ ). Anhand des Zeitverlaufs der Relaxationsrate von Modell und Fitfunktion zeigte sich weiterhin, daß der Einfluß der Magnetisierungszeit auf die Kurvenform durch eine gestreckt-exponentiale Funktion nicht wiedergegeben werden konnte.

Diese Arbeit wurde im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms 1104 gefördert.

[1] J. L. Dormann, D. Fiorani, E. Tronc, in: I. Prigogine, S.A. Rice (Eds.), *Advances in Chemical Physics* 93, 283-490 (1993)

[2] R.W. Chantrell, S.R. Hoon, B.K. Tanner, *JMMM* 38, 133-141 (1983)

[3] A. Aharoni, in: J.L. Dormann, D. Fiorani (Eds.), *Magnetic Properties of fine Particles*, North-Holland, Amsterdam, 3-11 (1992)

## Computer Simulations of the Magnetization and Structural Properties of Ferrofluids

Z. Wang, C. Holm, H. W. Müller

Max-Planck-Institut für Polymerforschung, Ackermannweg 10, D-55128  
Mainz, Germany  
[holm@mpip-mainz.mpg.de](mailto:holm@mpip-mainz.mpg.de)

We investigate in detail the initial susceptibility, magnetization curves, and microstructure of ferrofluids in various concentration and particle dipole moment ranges by means of molecular dynamics simulations. We use the Ewald summation for the long-range dipolar interactions, take explicitly into account the translational and rotational degrees of freedom, coupled to a Langevin thermostat. When the dipolar interaction energy is comparable with the thermal energy, the simulation results on the magnetization properties agree with the theoretical predictions very well. For stronger dipolar couplings, however, we find systematic deviations from the theoretical curves. We analyze in detail the observed microstructure of the fluids under different conditions. The formation of clusters is found to enhance the magnetization at weak fields and thus leads to a larger initial susceptibility. The influence of the particle aggregation is isolated by studying ferro-solids, which consist of magnetic dipoles frozen in at random locations but which are free to rotate. Due to the artificial suppression of clusters in ferro-solids the observed susceptibility is considerably lowered when compared to ferrofluids.

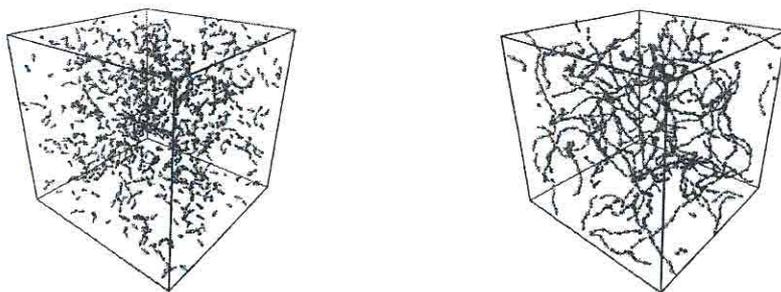


Figure 1: Snapshot of  $H = 0$  configurations with  $\phi = 0.052$  and  $\lambda = 4$  and 8, respectively.

[1] Z. Wang, C. Holm, H. W. Müller, submitted, eprint cond-mat/0203445.

## Cluster expansion for ferrofluid magnetization – The influence of nonmagnetic interactions

Björn Huke<sup>1</sup>, Manfred Lücke<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universität des Saarlandes, Institut für Theoretische Physik,  
Postfach 151150, D-66041 Saarbrücken, Germany  
[huke@lusi.uni-sb.de](mailto:huke@lusi.uni-sb.de)

Ferrofluids with high particle concentration or with particles consisting of ferromagnetic material with a large bulk magnetization show strong deviations from the simple Langevin behavior of the magnetization due to particle–particle interaction effects. Recently [1] we used the Born–Mayer or cluster expansion technique to investigate these effects. This technique results in a series expansion of the equilibrium magnetization in terms of the volume fraction  $\phi$  and a dipolar coupling parameter  $\epsilon$ . The leading terms of this expansion were calculated analytically assuming a model fluid of dipolar hard spheres.

In contrast to simple mean field models as the Weiss model, the equilibrium magnetization calculated by the cluster expansion method depends on the type of short range particle–particle interaction assumed. We recalculated the  $(\phi, \epsilon)$ –expansion terms for more realistic short range potentials  $V^{SR}$  than the simple hard sphere potential to investigate the resulting differences in the magnetization. The potentials used were a spherical symmetric potential with an additional attractive part  $V^{SR} = \text{const.} < 0$  of finite range around the hard core region, and the potential proposed by Rosensweig [2]. The latter describes ferroparticles with steric stabilization realistically but can be treated only numerically. The former captures qualitatively the most important feature of the Rosensweig potential and still allows analytical solutions.

The equilibrium magnetization was calculated for reasonable values of the parameters of the short range interaction and compared to hard sphere results. It turns out that using the simple hard sphere potential does not only give qualitative but also a very good quantitative agreement with the results for more realistic potentials, provided the hard sphere diameter is carefully chosen. Typically, the magnetization for a ferrofluid with particles of diameter  $D$  and a stabilizing polymer layer of thickness  $\delta$ , interacting via the Rosensweig potential, can be replaced by a ferrofluid of hard spheres with diameters about 1 nm smaller than the combined diameter  $D + 2\delta$ .

### Acknowledgement

The support by the Deutsche Forschungsgemeinschaft (SFB 277) is gratefully acknowledged.

[1] B. Huke and M. Lücke, Phys. Rev. E **62** (2000) 6875.

[2] R. E. Rosensweig: *Ferrohydrodynamics*, Ch. 2, Cambridge Univ. Press, Cambridge (1985)

## Numerical Simulation of a Magnetic-Fluid Seal Subjected to Centrifugal Forces and a Pressure Drop

V.K. Polevikov<sup>1</sup>, L. Tobiska<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Computational Mathematics, Belarusian State University, Minsk, Belarus

<sup>2</sup>Institut für Analysis und Numerik, Otto-von-Guericke Universität Magdeburg  
polevikov@bsu.by; lutz.tobiska@mathematik.uni-magdeburg.de

The object of the study is an isothermal annular magnetic-fluid seal in a narrow gap between two axially symmetric walls, the inner of which is a cylindrical surface of a rotating shaft and the outer is an immovable hyperbola-profiled surface of a pole head of an annular permanent magnet. The magnetic-fluid bridge is kept in the gap by a high-gradient field of the magnet to counterbalance of the forcing out action of centrifugal forces and external pressure. In Fig. 1 a diagram of the magnetic-fluid seal is shown.

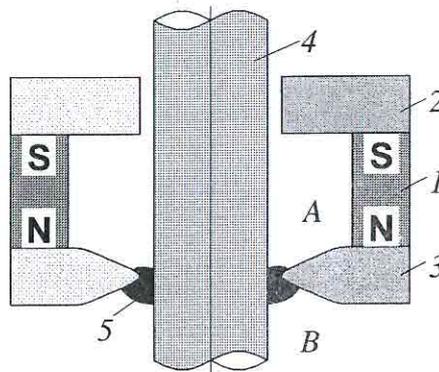


Fig. 1: Diagram of the magnetic-fluid seal: 1, magnet; 2, core; 3, core with the pole head of hyperbolic profile; 4, shaft; 5, magnetic-fluid bridge; A and B are the regions of high and low pressure.

A detailed description both of the mathematical model of the magnetic-fluid seal and a computational algorithm is contained in [1]. In view of the fact that the magnetic field strength in the gaps of real magnetic-fluid seals reaches values of the order  $10^6$  A/m, the fluid is assumed to be in the state of magnetic saturation. The effects of gravitational and capillary forces as well as a magnetic pressure jump on the free surface are neglected considering that they are suppressed by the magnetic field. The pole head shape chosen is not only similar to the ones used in the real seals but makes it possible to find an analytical solution for the magnetic field in the gap.

A particular attention is given to the critical values of the external pressure drop and the velocity of rotation of the shaft as most important characteristics of the seal, on exceeding of which the sealing layer collapses. The dependence of the critical pressure drop on the velocity of rotation is determined in a wide range of admissible values of the volume of the magnetic-fluid plug, physical characteristics of the fluid, and the magnetic field strength.

Also, a flow structure and a heat emission capacity in the sealing layer are studied. It is established that a secondary circulatory flow of low intensity arises in the layer. It does not influence shape and stability of the magnetic-fluid plug but can essentially intensify a heat transfer process in the seal.

[1] V.K. Polevikov & L. Tobiska, *Fluid Dynamics* 36(6), 890-898 (2001)

## Thermal convection in binary fluid mixtures with a weak concentration diffusivity but strong solutal buoyancy forces

Andrey Ryskin, Hanns Walter Müller, Harald Pleiner

*Max-Planck-Institut für Polymerforschung, D-55021 Mainz, Germany*

Thermal convection in binary liquid mixtures is investigated in the limit where the solutal diffusivity is weak but the separation ratio is large. Representative examples are colloidal suspensions such as ferrofluids. With a grain size being large on molecular length scales, the particle mobility is extremely small, allowing to disregard the concentration dynamics in most cases. However, this simplification does not hold for thermal convection: Due to the pronounced Soret effect of these materials in combination with a considerable solutal expansion, the resulting solutal buoyancy forces are dominant. By considering the classical Rayleigh Bénard setup it is shown that both the linear as well as the non-linear convective behavior is significantly altered by the concentration field as compared to single-component systems. Starting from an initial motionless configuration with a uniform concentration distribution, convective perturbations are found to grow even at Rayleigh numbers well below the threshold  $Ra_c^0$  of pure-fluid convection. It turned out that the actual critical Rayleigh number  $Ra_c$  is drastically smaller, but experimentally inaccessible due to the extremely slow growth of convection patterns for  $Ra \gtrsim Ra_c$ , requiring extremely large observation times. On the other hand, operating the ferrofluid convection experiment at Rayleigh numbers  $Ra_c < Ra \lesssim Ra_c^0$ , reveals considerable positive growth rates, which lead to a saturated nonlinear state almost as fast as pure-fluid convection does at  $Ra > Ra_c^0$ . This result is corroborated by convection experiments.

# Magnetization equation, rheology, and an effective description of ferromagnetic units in dilute suspensions

Patrick Ilg<sup>1</sup>, Martin Kröger<sup>1,2</sup>, Siegfried Hess<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut f. Theoret. Physik, TU-Berlin, <sup>2</sup>Polymerphysik, ETH Zürich  
[ilg@physik.tu-berlin.de](mailto:ilg@physik.tu-berlin.de)

The rheological properties of a dilute suspension of ellipsoidal ferromagnetic particles in the presence of a magnetic field are studied on the basis of a kinetic model, where the flow and magnetic external fields couple in qualitatively different ways to the orientational behavior of the ferrofluid. The present study generalizes previous work on the corresponding kinetic model of spherical particles [1].

In the uniaxial phase the stress tensor is found to be of the same form as in the Ericksen-Leslie theory for nematic liquid crystals. Expressions for a complete set of five viscosity coefficients in terms of orientational order parameters are worked out. In the linear rheological regime, the viscosity coefficients are given as explicit functions of the magnetic field and a particle shape factor, where the shape factor may equally represent a non-spherical unit (agglomerate, chain) composed of spherical particles.

The alignment angle of the magnetization and the first and second normal stress coefficient are studied for the special case of plane Couette flow. For this flow geometry, the anisotropy of the viscosity coefficients is conveniently described by three different Miesowicz viscosities, in qualitative agreement with experimental results. For weak magnetic fields, the Miesowicz viscosities are found to vary quadratically with the magnetic field while they approach their limiting values for infinite magnetic field. We observe that the viscosity is higher if the magnetization is oriented in the gradient than in the flow direction. This result was also obtained by nonequilibrium molecular dynamics simulations of a simple model system if magnetic interactions of the colloidal particles are strong enough [2].

Further, by considering the magnetization as the only relevant variable, a magnetization equation within an effective field approach is self-consistently derived from the kinetic equation and compared to existing magnetization equations based on thermodynamic approaches. Thus, it is possible to interpret the phenomenological coefficients appearing in the magnetization equation of the thermodynamic approach within the present kinetic model.

The assumptions employed in the above derivations are tested against a Brownian dynamics simulation of the full kinetic model. Measures for the deviation from uniaxial symmetry are introduced and evaluated for the case of plane Couette flow. It is found that biaxial contributions are appreciable if the Peclet number is comparable to the Langevin parameter and becomes small for strong magnetic fields. Similar to the case of spherical particles [1], however, the results based on the assumption of uniaxial symmetry provide a reasonable description of the numerical data even if biaxial contributions are present. Finally, comparisons with experimental data are presented.

[1] P. Ilg, M. Kröger, S. Hess, to appear in *J. Chem. Phys.* (2002)

[2] S. Hess, T. Weider, M. Kröger, *Magnetohydrodynamics* 37, 297-306 (2001)

## **Magnetofection: Gezielter und potenziertes Gentransfer vermittelt durch superparamagnetische Nanopartikel unter dem Einfluss von Magnetfeldern**

Franz Scherer<sup>1</sup>, Ulrike Schillinger<sup>1</sup>, Martina Anton<sup>1</sup>, Christian Bergemann<sup>2</sup> und Christian Plank<sup>1</sup>

- 1) Institut für Experimentelle Onkologie und Therapieforschung der TU München
- 2) chemicell, Bamberger Str., Berlin

Die geringe Effizienz von Genfähren („Genvektoren“) allgemein, sowie der rezeptorabhängige Wirtstropismus und der oftmals niedrige Titer von viralen Genvektoren limitieren ihre Brauchbarkeit in der Genthherapie. Eine universelle Methode, diese Einschränkungen zu minimieren, fehlte bisher. Hier präsentieren wir eine neue Gentransfermethode, die auf dem Prinzip des „Magnetic Drug Targeting“ basiert. Die Methode potenziert die Effizienz von Genvektoren, erweitert den Wirtstropismus von adenoviralen Genfähren auf ansonsten infektionsresistente Zellen und kompensiert niedrigen Titer von retroviralen Genfähren. Wir assoziierten Genvektoren mit superparamagnetischen Eisenoxid-Nanopartikeln, die zu diesem Zweck mit Polyelektrolyten beschichtet worden waren. Durch die Anwendung von Magnetfeldern wird die Vektordosis an den Zielzellen akkumuliert, wobei die Prozesszeit des Gentransfers von mehreren Stunden auf wenige Minuten verringert wird. Zudem wird dabei die Effizienz des Gentransfers bis zu mehreren tausendfach gesteigert. Bei der Anwendung der Magnetofection an Versuchstieren ist es gelungen, zielzellspezifischen Gentransfer in Blutgefäßen und im Magen-Darm-Trakt zu erreichen. Magnetofection stellt der Grundlagenforschung ein neues, effizientes Werkzeug zur Verfügung, das auch in automatisierten Hochdurchsatzverfahren zur Gencharakterisierung („Functional Genomics“) einsetzbar ist. Darüberhinaus hilft Magnetofection, bisher limitierende fundamentale Barrieren zur erfolgreichen Genthherapie zu überwinden.

## Intraarterielle Chemotherapie mit Magnetischem Drug Targeting: Biodistribution des magnetischen Carriers

Ch. Alexiou<sup>1</sup>, R. Schmid<sup>1</sup>, R. Jurgons<sup>1</sup>, Ch. Bergemann<sup>3</sup>, F.G. Parak<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>Hals-Nasen-Ohren-Klinik und Poliklinik der TU-München,  
<sup>2</sup>Physik-Department E17 der TU-München, <sup>3</sup>Chemicell GmbH, Berlin  
[C.Alexiou@lrz.tu-muenchen.de](mailto:C.Alexiou@lrz.tu-muenchen.de)

Magnetische Nanopartikel werden als Carrier für den Transport von Chemotherapeutika (z.B. Mitoxantron) verwendet. Durch Anlegen eines externen Magnetfeldes lassen sich diese magnetischen Substanzen nach intravasaler Applikation steuern und in der gewünschten Region anreichern. In früheren Studien konnte gezeigt werden, dass "Magnetisches Drug Targeting" als lokoregionäre Tumorthherapie eine effektive Behandlungsmöglichkeit von VX2-Plattenepithelkarzinomen des Kaninchens darstellt, mit reduzierten Chemotherapeutikadosen und ohne Auftreten von Nebenwirkungen [1, 2]. Bei Kaninchen wurde ein VX2-Plattenepithelkarzinom medial am Oberschenkel implantiert. Nach Ausbildung solider Tumore wurden die von Chemicell® Berlin, Deutschland hergestellten Ferrofluide (FF) mit einer Partikelgröße von 100nm in die tumorversorgende Arterie (A. femoralis) injiziert. Die magnetische Flussdichte betrug 1,7 Tesla (beim semi-quantitativen Nachweis der Ferrofluide aus technischen Gründen unter Verwendung eines Permanentmagneten 0,6 Tesla). Nach 60 min. ist das reversibel an die Ferrofluide gebundene Mitoxantron vom Trägermaterial vollständig abdiffundiert [1, 2]. Qualitativ konnte die Anreicherung der Ferrofluide im Tumorareal kernspintomographisch dargestellt werden [1, 2]. Die Biodistribution der Ferrofluide wurde mit radioaktiv markierten Nanopartikeln untersucht. Semiquantitativ gelang dies mit <sup>123</sup>Jod-Ferrofluiden [2], quantitativ mit <sup>59</sup>Fe-Ferrofluiden (Abbildung 1). Die Signalauslöschung im MRI zeigt 6 Stunden post injectionem eine gesteigerte Anreicherung der Ferrofluide in der gewünschten Region nach intraarterieller Applikation im Vergleich zur intravenösen Applikation [1, 2]. Durch das mit der  $\gamma$ -Kamera szintigraphisch gemessene <sup>123</sup>Jod-Signal konnte nach intraarterieller Applikation und 60 min. Magnetfeldeinwirkung (0,6 Tesla) eine bis zu zwei mal höhere Aktivität in der Zielregion nachgewiesen werden als nach alleiniger intraarterieller Applikation ohne Magnetisches Targeting [2]. In der <sup>59</sup>Fe-Studie (Abbildung 1) konnte nach intraarteriellem Magnetischen Drug Targeting im Tumor eine 33,6-mal und peritumoral eine 235,5-mal höhere Aktivität des <sup>59</sup>Fe detektiert werden als ohne Anwendung eines externen Magnetfeldes.

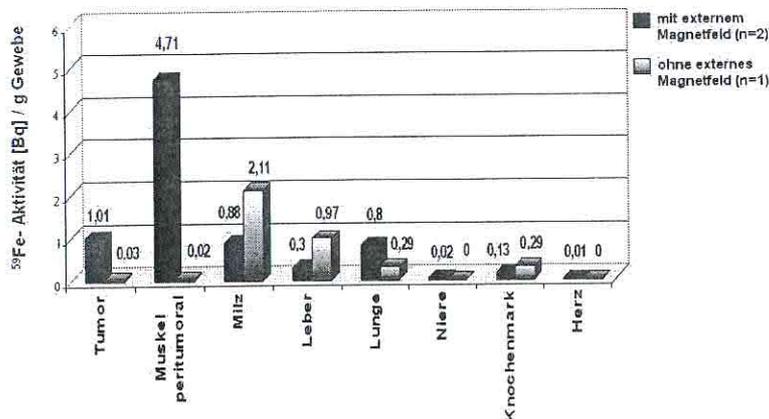


Abb. 1: Anreicherung von <sup>59</sup>Fe-Ferrofluiden in den entsprechenden Organstrukturen in Abhängigkeit vom Applikationsmodus.

Die zur Biodistribution der Ferrofluide durchgeführten Studien zeigen eine hohe selektive Anreicherung sowohl des Carriers als auch des daran gebundenen therapeutisch wirksamen Agens Mitoxantron in der Tumorregion und erklären die Effektivität des Magnetischen Drug Targeting in der lokoregionären Tumorthherapie.

[1] Alexiou et al., Cancer Research 60, 6641-6648, December 1, 2000

[2] Alexiou et al., Journal of Magnetism and Magnetic Materials 225 (2001) 187-193.

## Markierung von Endothelzellen in Kultur mittels magnetischen Nanopartikeln für die magnetische Wärmebehandlung

I Hilger<sup>1</sup>, A Kießling<sup>1</sup>, E Romanus<sup>2</sup>, M Roskos<sup>3</sup>, S Prass<sup>2</sup>, R Hiergeist<sup>4</sup>, R Hergt<sup>4</sup>, W Weitschies<sup>5</sup>, P Weber<sup>2</sup>, W A Kaiser<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut für Diagnostische und Interventionelle Radiologie der Friedrich-Schiller-Universität Jena

<sup>2</sup>Institut für Festkörperphysik der Friedrich-Schiller-Universität Jena

<sup>3</sup>Institut für Klinische Chemie und Laboratoriumsdiagnostik der Friedrich-Schiller-Universität Jena

<sup>4</sup>Institut für Physikalische Hochtechnologie, Jena

<sup>5</sup>Institut für Pharmazie der Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald

[ingrid.hilger@med.uni-jena.de](mailto:ingrid.hilger@med.uni-jena.de)

Zielsetzungen: In jüngster Zeit sind wesentliche Fortschritte in der Aufklärung der für das Tumorwachstum essentiellen Mechanismen der Gefäßneubildung erzielt worden und die Hyperthermie hat sich zu einem neuen Verfahren zur Krebstherapie entwickelt. Basierend auf diesen Erkenntnissen könnte die Hemmung der Gefäßneubildung in Tumoren einen alternativen Weg zur Tumorthherapie darstellen. Daher soll in Grundsatzuntersuchungen geklärt werden, ob nach Markierung von Endothelzellen in Kultur mittels magnetischen Nanopartikeln eine Generierung von magnetisch induzierter Wärme realisierbar ist.

Methoden: Magnetische Nanopartikel (Kerndurchmesser: 4-6 nm; hydrodynamischer Durchmesser: 65 nm) wurden mit Hilfe der Periodat-Methode an Endothelzellen der Maus (SVEC4-10) gekoppelt. Die Zellmarkierung wurde mittels Magnetrelaxometrie (MRX), Elektronenmikroskopie und histologisch unter Verwendung der Berliner-Blau-Färbung überprüft. Die quantitative Bestimmung der gebundenen Eisenmenge erfolgte mittels Flammen-Atom-Absorptionsspektrometrie. Anschließend wurden  $1 \times 10^7$  markierte Zellen einem magnetischen Wechselfeld (Frequenz: 400 kHz, Amplitude: 6,5 kA/m) für 5 min ausgesetzt und die Temperatur mittels Thermoelemente gemessen. Darüber hinaus wurde das spezifische Wärmepotential (SAR) des verwendeten Modellferrofluids bestimmt.

Ergebnisse: Markierte Endothelzellen zeigten deutliche Relaxationssignale (MRX-Messungen aus 3 unabhängigen Versuchen, magnetische Flußdichte:  $32 \pm 5,6$  pT). Ebenfalls wiesen die elektronenmikroskopischen und histologischen Untersuchungen auf eine eindeutige Zellanlagerung der magnetischen Partikel hin.  $1 \times 10^7$  markierte Zellen enthielten  $153 \pm 56$  µg Fe, in unbehandelten Kontrollzellen war die nachgewiesene Eisenmenge dagegen vernachlässigbar gering. Die magnetische Wärmebehandlung der markierten Endothelzellen führte zu Temperaturerhöhungen von etwa 2 K. Die SAR des magnetischen Materials lag bei 78 W/g.

Schlußfolgerungen: Die Generierung von magnetisch induzierter Wärme in markierten Endothelzellen ist prinzipiell möglich. Erforderlich sind weiterführende Optimierungsarbeiten im Hinblick auf eine zellspezifische Anlagerung sowie auf eine Erhöhung des spezifischen Wärmepotentials der zu verwendeten magnetischen Partikel.

## Interaktion zur Wechselwirkung von Magnetosomen-Lipoplex-Komplexen mit Plasma und Serum Proteinen

R.C. Reszka<sup>1</sup>, Julia E. Diederichs<sup>2</sup>, Jana Richter<sup>1</sup>, Dirk Schüler<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Max-Delbrück-Centrum für Molekulare Medizin, Berlin-Buch, <sup>2</sup>Microcarrier Systems GmbH, Neuss, <sup>3</sup>Max-Planck-Institut für Marine Mikrobiologie, Bremen  
[reszka@mdc-berlin.de](mailto:reszka@mdc-berlin.de)

Kolloidale Arzneistoffträger wie Liposome, Nanopartikel und parenterale Fettemulsionen interagieren unmittelbar nach intravenöser Applikation mit Plasma Proteinen. In Abhängigkeit von den physiko-chemischen Eigenschaften applizierter partikulärer Systeme adsorbieren bestimmte Proteine in anderen Mengenverhältnissen als im Plasma vorhanden auf deren Oberfläche [1]. Dem aus dieser sogenannten „differentiellen Adsorption“ [2] resultierenden Proteinmuster wird eine Schlüsselrolle für die Aufnahme in die Zielzelle zugeschrieben [3].

Analytisch kann das Plasmaproteinadsorptionsmuster mittels zweidimensionaler Polyacrylamidgelelektrophorese bestimmt werden [4]. Diese Methode erlaubt die hochauflösende, parallele Separation und Charakterisierung von mehreren hundert Proteinen aus komplexen biologischen Medien. Auf Grund der Trennung nach zwei verschiedenen unabhängigen Parametern hat jedes Protein seinen eigenen charakteristischen Platz auf dem Gel. In jüngsten Untersuchungen konnte bereits eine Korrelation zwischen den physiko-chemischen Eigenschaften der Carrier und dem Plasmaproteinadsorptionsmuster einerseits [5] und dem Adsorptionsmuster und der Organverteilung andererseits für Polymerpartikel [6] und Liposome [7] etabliert werden.

Für den in vivo Einsatz der Magnetosomen-Lipoplex Komplexe ist es entscheidend, deren Interaktion mit Plasmaproteinen zu kennen, um eine mögliche Organverteilung abzuschätzen, aber auch um diese gezielt zu beeinflussen. Daher wurde in dieser Studie erstmals das Proteinadsorptionsmuster auf Magnetosomen-Lipoplexen und ihren Bestandteilen in Plasma und Serum untersucht. Um dies durchführen zu können war es notwendig, eine neue Probenaufbereitungsmethode zu etablieren. Parallel zu den Adsorptionsuntersuchungen konnten wir zum ersten Mal die Proteine in der Phospholipidbilayer der Magnetosomen darstellen. Aus dem Gel heraus ist mittels Blotten und Sequenzieren nun auch ihre Identifizierung möglich.

[1] R.L. Juliano & M. Meyer, *Liposome Technology Vol III, 2<sup>nd</sup> Edn.* (G. Gregoridias, ed.) CRC Press, Boca Raton, p. 15-25 (1993)

[2] R.H. Müller & S. Heinemann, *Bioadhesion- Possibilities and Future Trends.* (R. Gurny, H.E. Junginger, eds.) Wiss. Verlagsgesellschaft, Stuttgart, p. 202-213 (1989)

[3] J.H. Senior, *CRC Crit. Rev. Drug Carrier Systems* 3, 123-193 (1987)

[4] T. Blunk, „Plasmaproteinadsorption auf kolloidalen Arzneistoffträgern.“ *Dissertation Christian-Albrechts-Universität zu Kiel* (1994)

[5] J.E. Diederichs, *Electrophoresis* 17, 607-611 (1996)

[6] T. Blunk, D.F. Hochstrasser et al., *Electrophoresis* 14, 1382-1387 (1993)

[7] W.E. Bucke, S. Leitzke et al., *J. Drug Targ.* 5, 99-108 (1998)

# Einsatz von Ferrofluiden als Schmierstoff in wartungsarmen Gleitlagern

E. Uhlmann<sup>1</sup>, N. Bayat<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb (IWF), Technische Universität Berlin

Bei der Ermittlung der Einsatzgrenzen wartungsarmer, trockenlaufender Gleitlager werden überwiegend thermische und tribologische Größen zugrundegelegt. Das Produkt aus der spezifischen Lagerbelastung  $p$  und der Gleitgeschwindigkeit  $U$  ist ein häufig verwendeter Kennwert für die Einsetzbarkeit des Gleitlagers. Magnetische Flüssigkeiten können grundsätzlich als Schmierstoff in wartungsarmen Gleitlagern eingesetzt werden, da Permanentmagnete eine dauerhafte Fixierung dieses Schmierstoffes im Schmierpalt ermöglichen. Für technische Anwendungen ist der Einfluss magnetischer Flüssigkeiten auf den Gleitlagerverschleiß und die Lagertemperatur von besonderer Bedeutung. Hierfür wurden vergleichende experimentelle Untersuchungen mit verschiedenen Gleitlagern bei definierten tribologischen Beanspruchungen an einem Versuchsstand für wartungsarme Gleitlager durchgeführt, **Abb. 1**.

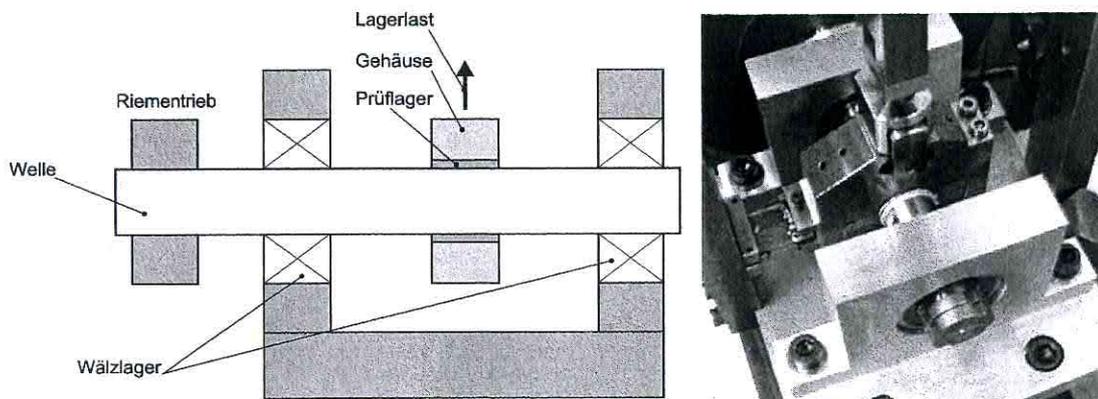


Abb. 1: Versuchsstand für tribologische Untersuchungen an wartungsarmen Gleitlagern

Ziel der Untersuchungen war die Ermittlung des qualitativen Einflusses von magnetischen Flüssigkeiten auf die resultierende Verschleiß- und Temperaturzunahme. Als Vergleichswerte dienen die Untersuchungen mit Fetten als konventionelle Schmierstoffe sowie der Trockenlaufzustand, **Abb. 2**.

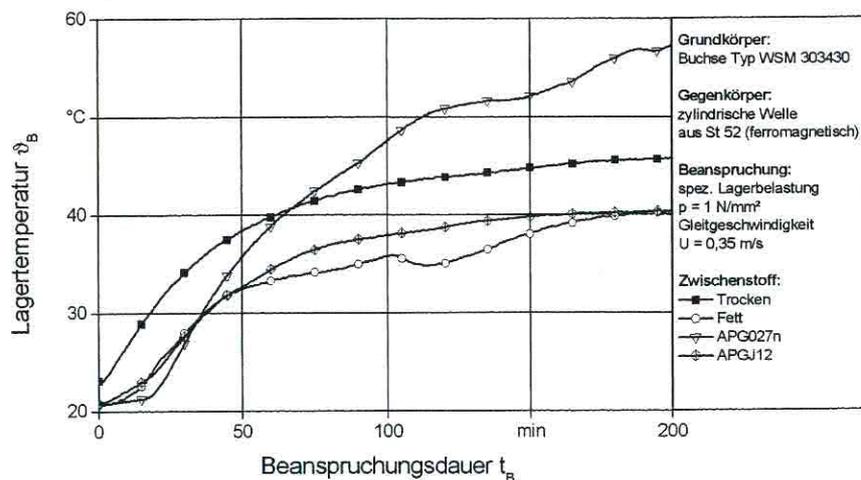


Abb. 2: Temperaturzunahmen eines wartungsarmen Gleitlagers

## Charakterisierung von Ferrofluid betriebenen Elektromotoren

A. Nethe, Th. Scholz, H.-D. Stahlmann  
 Brandenburgische Technische Universität Cottbus,  
 Lehrstuhl Theoretische Elektrotechnik und Prozessmodelle,  
 P.O. Box 101344, 03013 Cottbus, Germany  
[Thomas.Scholz@tet.tu-cottbus.de](mailto:Thomas.Scholz@tet.tu-cottbus.de)

### Dynamik von Gleichstrommaschinen

Für den Betrieb eines Elektromotors ist das Verhalten bei Änderung eines Betriebsparameters (Ankerspannung, Last) bedeutsam [1]. Diese Systemdynamik kann durch folgende Differentialgleichung mit der allgemein formulierten Lösung für die Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  beschrieben werden:

$$\ddot{\omega} + \frac{1}{T_{el}}\dot{\omega} + c_1\omega = c_2U_{K1} \quad , \quad \omega = l_1 \exp(\lambda_1 t) + l_2 \exp(\lambda_2 t) + \omega_{sp} \quad ,$$

wobei  $T_{el}$ ,  $c_1$  und  $c_2$  Motorparameter enthalten. In Abb. 1 sind abhängig von  $\lambda_{1,2}$  drei unterschiedliche Lösungstypen angegeben. Der Einfluss einer Ferrofluidfüllung auf das dynamische Verhalten wird anhand von Motorbeispielen untersucht.

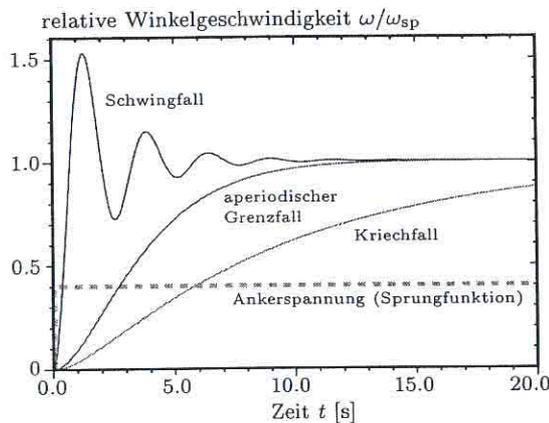


Abb. 1: 3 Beispiele für den Drehzahlverlauf bei einem Spannungssprung.

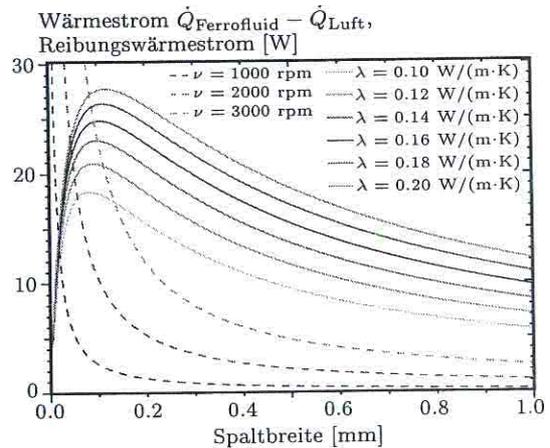


Abb. 2: Wärmestromgewinn durch Ferrofluideinsatz im Motorspalt.

### Wärmefluss in elektrischen Maschinen

Der fluidgefüllte Spalt zwischen Anker und Stator besitzt gegenüber dem luftgefüllten Spalt eine höhere Wärmeleitfähigkeit. Dies führt trotz zusätzlicher Reibungswärme zu einer besseren Kühlung und somit zu einer höheren Belastbarkeit bzw. der Möglichkeit kompakterer Bauweise, wie dies in Abb. 2 dargestellt ist. In Abhängigkeit von der Spaltbreite ist hier durch die durchgezogenen Kurven die Differenz des Wärmestromes zwischen dem Betrieb mit und ohne Fluid für verschiedene Wärmeleitfähigkeiten, durch die gestrichelten Kurven der Reibungswärmestrom für drei Drehzahlen aufgetragen.

Ausgehend von diesen Ergebnissen statischer Rechnung wird für unterschiedliche Geometrien das zeitabhängige Temperaturverhalten untersucht.

## Literatur

- [1] E. HERING, A. VOGT, K. BRESSLER Handbuch der Elektrischen Anlagen und Maschinen Springer Verlag Berlin, 1999

# Messungen am mit Ferrofluid betriebenen Elektromotor

A. Nethe, Th. Scholz, H.-D. Stahlmann  
Brandenburgische Technische Universität Cottbus,  
Lehrstuhl Theoretische Elektrotechnik und Prozessmodelle,  
P.O. Box 101344, 03013 Cottbus, Germany  
[Thomas.Scholz@tet.tu-cottbus.de](mailto:Thomas.Scholz@tet.tu-cottbus.de)

Zur Verifizierung der theoretischen Ergebnisse wurde ein Modellmotor gebaut, der in Abb. 1 gezeigt ist. Entscheidend hierbei ist das aus Acrylglas gefertigte Fluid-Einschlussmodul, dessen innere Schale am Anker, sowie die äußere Schale am Stator montiert ist. Wesentlich ist ein gutes Einschlussverhalten einerseits und reibungsarmer Lauf andererseits, was eine hohe Präzision erfordert.

Die Messung wird auf einem Messstand durchgeführt, der eine Drehzahl- sowie Drehmomentmessung gestattet. Die variable Belastung des Motors wird mit einer Wirbelstrombremse vorgenommen. Abb. 2 zeigt den Messaufbau.

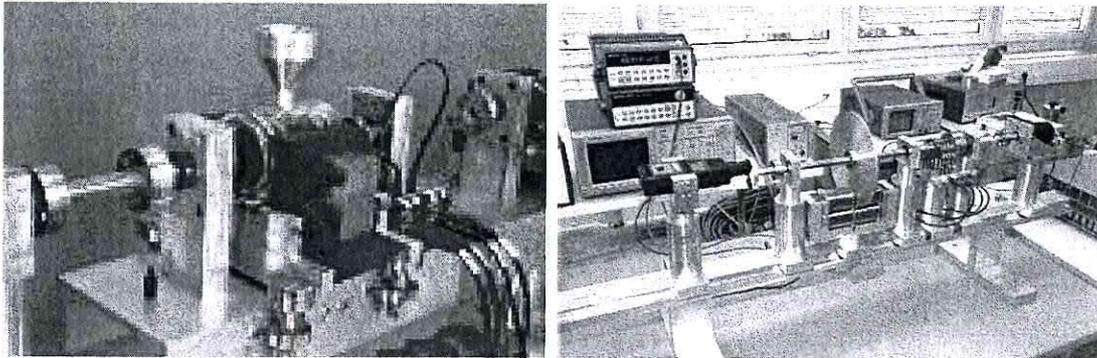


Abb. 1: Photo des Ferrofluid-Motors.      Abb. 2: Motoren-Messstand.

Ein erstes qualitatives Ergebnis ist in Abb. 3 dargestellt. Diese Darstellung des Motorbetriebes ohne (blaue Kurve) und mit Ferrofluid (rote Kurve) gibt einen deutlichen Hinweis auf eine Kraftverstärkung.

Ausgehend von diesem Ergebnis werden quantitative Messungen unter Parametervariation vorgenommen. Weiterhin wird das Einschlussverhalten des Fluides untersucht und optimiert.

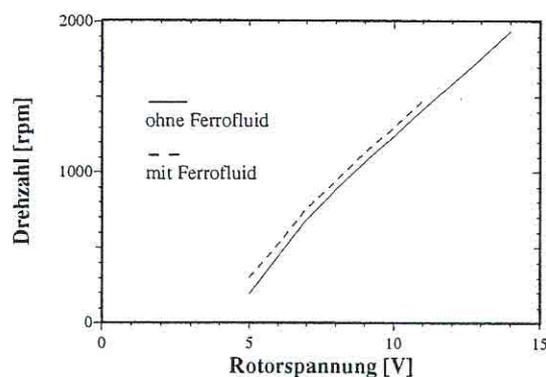


Abb. 3: Drehzahlmessung des Modellmotors bei gleicher Belastung ohne (blau) und mit Ferrofluid (rot) dargestellt.

## Finite Elemente Methoden zur numerischen Simulation des Strömungsverhaltens von Ferrofluiden mit freien Oberflächen

T. Mitkova, L. Tobiska  
 Institut für Analysis und Numerik,  
 Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg  
[mitkova@mathematik.uni-magdeburg.de](mailto:mitkova@mathematik.uni-magdeburg.de)

Die Entwicklung finiter Elemente Methoden zur zuverlässigen Berechnung des Strömungsverhaltens von Ferrofluiden mit freien Rändern spielt in einer Reihe technischer Anwendungen eine entscheidene Rolle (siehe [1],[2]). Derartige Aufgaben führen auf gekoppelte Systeme partieller nichtlinearer Differentialgleichungen für die magnetischen Felder, der Strömungsgeschwindigkeit und des Druckes sowie des freien Randes. Eine Lösungsstrategie besteht in der iterativen Entkopplung der Berechnung des Magnetfeldes in einem vorgegebenen Gebiet, der Bestimmung der Geschwindigkeit und des Druckes in diesem Gebiet, sowie der Lösung der Young-Laplace-Gleichung zur Korrektur des freien Gebietsrandes. Der zweite Schritt erfordert die Lösung der inkompressiblen Navier-Stokes-Gleichungen in einem Gebiet  $\Omega$

$$-\frac{1}{Re} \Delta \mathbf{u} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} + \nabla p = \mathbf{f} \quad \text{in } \Omega, \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad \text{in } \Omega, \quad (2)$$

mit Gleitrandbedingungen auf dem freien Rand

$$\mathbf{u} \cdot \mathbf{n} = 0 \quad \text{auf } \Gamma_F, \quad (3)$$

$$\mathbf{n} \cdot \sigma(\mathbf{u}, p)_{ij} \cdot \tau = 0 \quad \text{auf } \Gamma_F, \quad 1 \leq i, j \leq 2, \quad (4)$$

vorgegebener Geschwindigkeitsverteilung auf dem festen Teil des Randes

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_0 \quad \text{auf } \partial\Omega \setminus \Gamma_F \quad (5)$$

und stellt den numerisch aufwendigsten Teil der Berechnung dar. Hierbei sind  $\sigma(\mathbf{u}, p)$  der Spannungstensor,  $\mathbf{n}$  und  $\tau$  die entsprechenden Einheitsvektoren in normaler bzw. tangentialer Richtung. Die Rolle des Modells (1)-(5) für die Berechnung der Strömung in einer reibungsarmen Ferrofluid-dichtung wird in [1] diskutiert.

Die Implementation der Gleitrandbedingungen (3)-(4) basiert sich auf einer Berücksichtigung in starker Form in Ansatzraum und auf einem direkten Umbau des entsprechenden algebraischen Gleichungssystems. Die angewendete konforme finite Element Methode wird unter Einsatz von Mehrgitterverfahren implementiert. Numerische Testrechnungen an ausgewählten Testbeispielen werden dargestellt.

Die Arbeit wurde durch die DFG im Rahmen des SPP 1104 unterstützt.

[1] T. Mitkova, *Technische Mechanik* 29(3), 283-293 (2000)

[2] V.K. Polevikov & L. Tobiska, *Fluid Dynamics* 36(6), 890-898 (2001)

## Zerfallende Muster für die Rosensweig-Instabilität

Adrian Lange

Institut für Theoretische Physik, Universität Magdeburg, Universitätsplatz 2, D-39106,  
Magdeburg  
adrian.lange@physik.uni-magdeburg.de

Der Zerfall des linear instabilsten Musters für die Rosensweig-Instabilität wird analysiert. Ein solches Muster kann durch die sprunghafte Erhöhung der magnetischen Induktion von einem Startwert  $B_0$  auf einen überkritischen Wert  $B_{\text{sup}}$  generiert werden und ist durch die maximale Wellenzahl  $q_m$  charakterisiert [1]. Wird nach einer sehr kurzen Verweilzeit das Magnetfeld sprunghaft auf einen unterkritischen Wert  $B_{\text{sub}} > B_0$  verringert, so ist der Zerfall des linear instabilsten Musters zu beobachten [2]. Entsprechend dieser experimentellen Prozedur muß die Lösung der Dispersionsrelation für eine unterkritische Induktion  $B_{\text{sub}}$  und die maximale Wellenzahl  $q_m$  bestimmt werden. Der Real- und Imaginärteil von  $p$  ist in Abb. 1 dargestellt, wobei  $p$  die komplexwertige Wachstumsrate aus dem Normalmodenansatz für die kleinen Störungen,  $\delta x \sim \exp(pt)$ , bezeichnet. Die gestrichelten Linien zeigen die Lösung für eine viskose magnetischen Flüssigkeit (MF), die durchgezogenen Linien für einer nichtviskose MF.

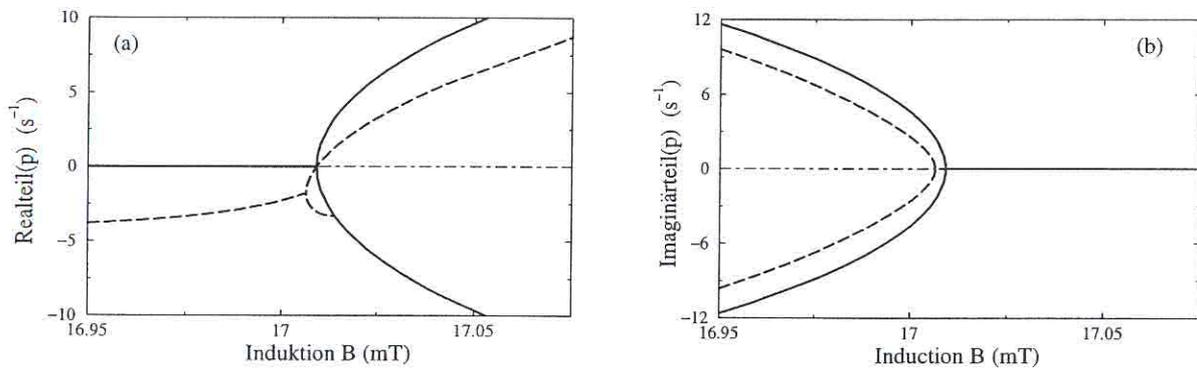


Abbildung 1: Abhängigkeit des Real- (a) und Imaginärteils (b) von  $p$  für eine viskose MF (gestrichelte Linien) und eine nichtviskose MF (durchgezogene Linien), wenn das linear instabilste Muster mit einem Sprung auf  $B_{\text{sup}} = 18$  mT präpariert worden ist.

Für die *nichtviskose* Flüssigkeit ist zu erkennen, daß es bis zu einem kritischen Wert der Induktion zwei rein imaginäre Lösungen gibt. Oberhalb dieses kritischen Wertes gibt es zwei reelle Lösungen.

Für die *viskose* magnetische Flüssigkeit gibt es einen ersten kritischen Wert für die Induktion, bei dem aus zwei komplexen Lösungen zwei negative reelle Lösungen werden. An dieser Stelle vollzieht sich der Wechsel von einem oszillatorischen zu einem rein exponentiellen Zerfall. Die obere Grenze für das Gebiet des rein exponentiellen Zerfalls bildet derjenige kritische Wert der Induktion, bei dem eine der reellen Lösungen die Null passiert. Es gibt noch einen weiteren kritischen Wert, bei dem die Existenz einer der beiden negativen reellen Lösungen aufhört zu existieren. Die verschiedenen kritischen Induktion und ihre Abhängigkeit von der Viskosität der Flüssigkeit werden bestimmt.

[1] A. Lange, B. Reimann, and R. Richter, Phys. Rev. E **61**, 5528 (2000).

[2] B. Reimann, R. Richter, A. Lange, and I. Rehberg (2002), submitted to Phys. Rev. E.

## Experimentelle Untersuchungen zur Faraday- und Rosensweig-Instabilität

J.P.Embs<sup>1</sup>, H.W. Müller<sup>2</sup>

<sup>1</sup>FR 7.3 Technische Physik, Universität des Saarlandes, Im Stadtwald, 66123 Saarbrücken,

<sup>2</sup>MPI für Polymerforschung, Ackermannweg 10, 55128 Mainz

[jp.embs@rz.uni-saarland.de](mailto:jp.embs@rz.uni-saarland.de)

Bekanntermaßen läßt sich die stabile plane Oberfläche eines Ferrofluids durch Überschreiten einer kritischen Magnetfeldstärke destabilisieren, die Rosensweig-Instabilität setzt ein [1] (siehe Abb. 1). Die plane Oberfläche eines Fluids läßt sich bereits durch eine modulierte Erdbeschleunigung destabilisieren (parametrisch getriebene Oberflächenwellen). Von großem Interesse sind Situationen, in denen beide Instabilitäten in Erscheinung treten (siehe Abb. 2), da theoretische Untersuchungen dort komplexe Muster erwarten lassen [2].

Eine weitere Besonderheit ist der nicht-monotone Verlauf der Dispersionsrelation schon für schwach unterkritische Magnetfelder. Dadurch hat das System bei fester Antriebsfrequenz die Wahl zwischen bis zu drei Wellenzahlen, so daß sich die Frage stellt, welche Wellenzahl vom System selektiert wird. Weiterhin hat man durch Einstellen einer bestimmten Füllhöhe die Möglichkeit den anomalen Dispersionsast zu untersuchen.

In meinem Vortrag werde ich über aktuelle experimentelle Ergebnisse zu den oben geschilderten Fragestellungen berichten.

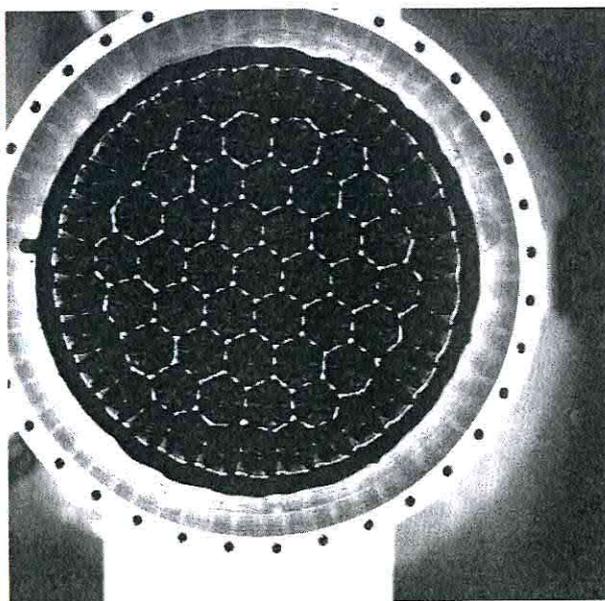


Abb. 1: Abbild der Ferrofluidoberfläche bei voll entwickelter Rosensweig-Instabilität.

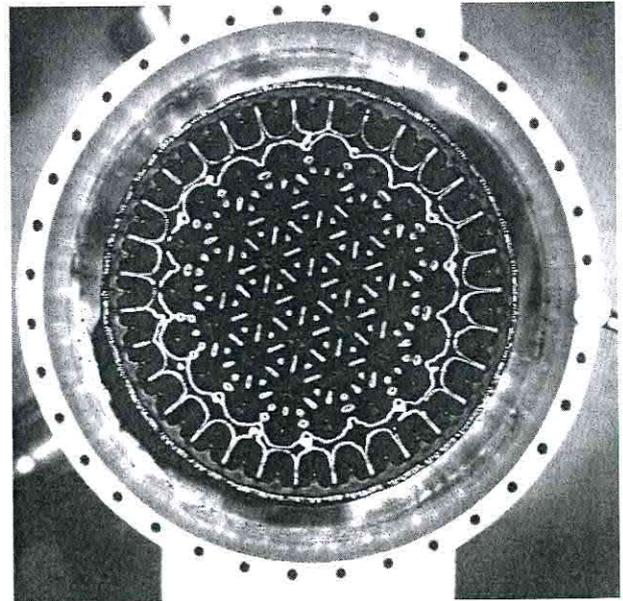


Abb. 2: Abbild der Ferrofluidoberfläche in einer Situation, in der Rosensweig- und Faraday-Instabilität simultan aktiv sind.

[1] R.E. Rosensweig, Ferrohydrodynamics (Cambridge University Press, 1993)

[2] H.W.Müller, Phys. Rev. E, 58, 6199 (1998)

## Low Symmetry Patterns on Ferrofluids

René Friedrichs and Andreas Engel

FNW/ITP, Otto-von-Guericke-Universität, Postfach 4120, D-39016 Magdeburg

[rene.friedrichs@physik.uni-magdeburg.de](mailto:rene.friedrichs@physik.uni-magdeburg.de)

The free surface of a ferrofluid, subjected to a uniform and vertical magnetic field, becomes unstable above a certain threshold for the field [1]. This Rosensweig or normal field instability gives rise to a hexagonal or square pattern of peaks [2]. In contrast, a magnetic field tangential to the undisturbed free interface tends to stabilize the surface in the direction of the field.

Extending previous studies [3], we investigate theoretically the pattern formation in the presence of an arbitrary oriented homogeneous magnetic field. The stability of hexagonal, rhombic, square, rectangular and ridge planforms is analyzed by means of an energy variational method.

Due to the left-right asymmetry in the tilted magnet field the respective periodic patterns lack any point symmetry. We present the detailed shape and the stability of the novel stretched patterns. Our quantitative results can be compared directly with corresponding experiments.

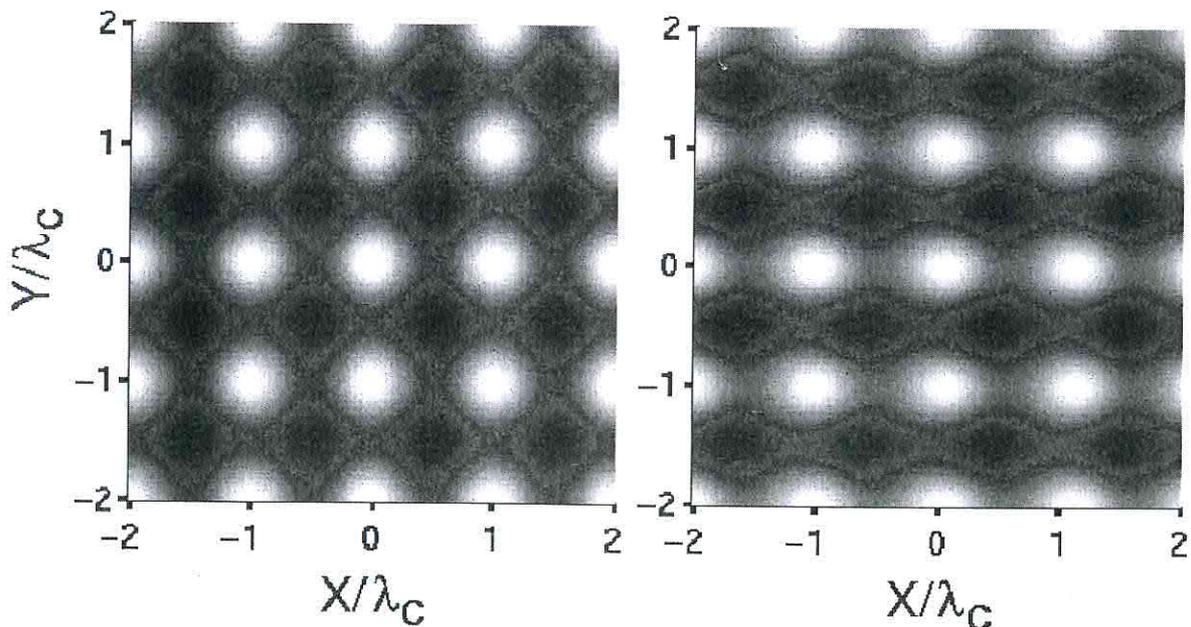


Abb. 1: Stable surface profiles of a magnetic fluid with relative permeability  $\mu_r=1.3$  for different magnetic fields. High surface regions are brighter. For the vertical field  $H_z=1.017 H_C$  the square pattern (left) is stable. The superposition of the vertical field  $H_z=1.017 H_C$  and the horizontal magnetic field  $H_x=0.15 H_C$  leads to the pattern on the right which is periodic on a rectangular lattice.

[1] M. D. Cowley and R. E. Rosensweig, *J. Fluid Mech.* **30**, 671-688 (1967)

[2] B. Abou, J.-E. Wesfreid and S. Roux, *J. Fluid Mech.* **416**, 217-237 (2000)

[3] A. Gailitis, *J. Fluid Mech.* **82**, 401-413 (1977)

## Algorithmen und Fehleranalysis für Finite-Elemente-Methoden bei der Rosensweig-Instabilität

G. Matthies, L. Tobiska

Institut für Analysis und Numerik, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg  
[matthies@mathematik.uni-magdeburg.de](mailto:matthies@mathematik.uni-magdeburg.de)

In der Normalfeld- oder Rosensweig-Instabilität wird ein uniformes magnetisches Feld senkrecht zu einer anfänglich ungestörten, horizontalen Oberfläche angelegt. Nach dem Überschreiten eines kritischen Wertes für die Magnetfeldstärke entstehen auf der Oberfläche Stachel, die ein regelmäßiges Muster bilden. In unseren numerischen Simulationen interessieren wir uns für die Oberflächenform, die kritische Magnetfeldstärke und insbesondere auch für das Magnetfeld innerhalb des Stachels.

Mit Hilfe von numerischen Berechnungen ist es möglich, das Magnetfeld innerhalb eines ausgebildeten Ferrofluid-Stachels zu ermitteln. Die damit erhaltenen Daten sind mit Hilfe von Meßgeräten nicht oder nur unter Störung der Oberflächenstruktur zu erhalten. Die aus den Rechnungen gewonnenen Daten können zur Vorhersage einer möglichen Wanderung der magnetischen Partikeln benutzt werden, die durch das inhomogene Magnetfeld innerhalb des Stachel hervorgerufen wird.

Der numerische Lösungsprozeß zur Bestimmung der Oberflächenform umfaßt das wechselseitige Lösen eines dreidimensionalen Magnetfeldproblems und eines zweidimensionalen Oberflächenproblems. Die Natur des Problems erlaubt die Annahme, daß die freie Oberfläche zwischen dem Ferrofluid und der umgebenden Luft durch einen Graph in der Form

$$\Gamma = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 : z = u(x, y), (x, y) \in \Omega\}$$

gegeben ist. Dann läßt sich die Young-Laplace-Gleichung auf der freien Oberfläche in der Form

$$-\operatorname{div} \frac{\nabla u}{\sqrt{1 + |\nabla u|^2}} + \lambda^2 u = f \quad \text{in } \Omega$$

schreiben. Um diese nichtlineare partielle Differentialgleichung zu lösen, verwenden wir eine Fixpunkt-Iteration zur Linearisierung, d.h., im  $k$ -ten Schritt wird das Problem

$$-\operatorname{div} \frac{\nabla u^k}{\sqrt{1 + |\nabla u^{k-1}|^2}} + \lambda^2 u_k = f \quad \text{in } \Omega$$

gelöst.

Zur numerischen Berechnung einer Näherungslösung verwenden eine Finite-Elemente-Methode, die konforme Finite Elemente benutzt. Für das nichtlineare Gesamtproblem kann die Fehlerabschätzung

$$\frac{K(u)}{2} \Theta^2 + \frac{3}{4} \lambda_0^2 \|u - u_h\|_{0,2,\Omega}^2 \leq C(u) \inf_{v_h \in V_h} \|u - v_h\|_{1,2,\Omega}^2$$

mit

$$\Theta^2 := \int_{\Omega} \frac{|\nabla(u - u_h)|^2}{\sqrt{1 + |\nabla u_h|^2}} dx$$

gezeigt werden, dabei sind die Größen  $C(u)$  und  $K(u)$  positive Konstanten, die nicht vom verwendeten Finite-Elemente-Raum  $V_h$  abhängen. Die obige Abschätzung liefert zusammen mit den Standard-Interpolationsabschätzungen eine optimale Fehlerabschätzung für den Gradienten des Fehlers zwischen der Lösung des kontinuierlichen Problems und der diskreten Lösung.

Die Arbeit des ersten Autors wurde durch die DFG-Forschergruppe „Grenzflächendynamik bei Strukturbildungsprozessen“ (FOR 301) unterstützt.

## Double Rosensweig instability in a ferrofluid sandwich structure

D. Rannacher<sup>1</sup>, A. Engel<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institut für Theoretische Physik, Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, PSF 4120, D-39016 Magdeburg*

We theoretically investigate the formation of interface patterns in a two dimensional ferrofluid sandwich composed of three layers of immiscible fluids of which the middle one is a ferrofluid (see Fig.). In a vertical magnetic field both interfaces may exhibit a Rosensweig instability with in general different values of the critical field strength and critical wavenumber. Due to the finite depth of the ferrofluid layer distortions of the interfaces are coupled and hence the two instabilities influence each other.

Building on the linear stability analysis we perturbatively explore the weakly non-linear regime of the system by minimizing the free energy in a properly chosen subspace of interface profiles. This allows to determine the amplitude of the resulting interface modulation and to give an estimate for the critical value of the magnetic field strength beyond which the ferrofluid layer disintegrates into an array of individual drops.

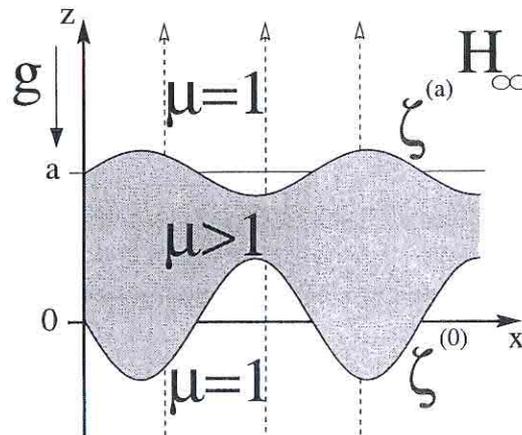


Figure caption: Schematic picture of a ferrofluid sandwich structure. Both interfaces between the ferrofluid in the middle and the other two non-magnetic fluids are flat in the absence of an external magnetic field but may be destabilized by a sufficiently strong field in  $z$ -direction.

## Experimentelle Untersuchung magnetischer flüssiger Kämmen im schrägen Magnetfeld

Bert Reimann, Reinhard Richter und Ingo Rehberg  
Experimentalphysik V, Universität Bayreuth, D-95440 Bayreuth  
[Bert.Reimann@Uni-Bayreuth.de](mailto:Bert.Reimann@Uni-Bayreuth.de)

Die auf dem Gebiet der magnetischen Flüssigkeiten herausragende strukturbildende Instabilität ist die Normalfeld-, oder Rosensweig-Instabilität. Oberhalb eines Schwellwertes der magnetischen Induktion wird die zuvor flache, stabile Oberfläche gegenüber einem Muster aus flüssigen, hexagonalen Stacheln mit einer charakteristischen Wellenzahl  $k_c$  instabil [1], wie in Abb. 1(a) dargestellt.

Bringt man die magnetische Flüssigkeit in ein schräges Feld, beobachtet man magnetische flüssige Kämmen. Der Wellenzahlvektor dieser Kämmen steht senkrecht zu den Feldlinien, so daß sich die Kämmen parallel zur Tangentialkomponente des Feldes einstellen, siehe Abb. 1(b).

Durch anbringen eines linearen Arrays aus Hallen-Sensoren unterhalb der Flüssigkeit, kann man die magnetische Induktion  $B_{\perp}$  orts aufgelöst messen. Die gemessene magnetische Induktion hängt monoton von der Höhe des Kammes ab, so daß auf diese Weise die Position und die Amplitude der flüssigen Kämmen gemessen werden. Trägt man die, auf diese Weise gemessene, Amplitude als Funktion der magnetischen Induktion  $B_{\perp}$  auf, zeigt sich ab einer kritischen Induktion  $B_c$  ein wurzelförmiges Anwachsen der Amplitude mit dem Feld.

Wir untersuchen den Zusammenhang zwischen dem kritischen Feld  $B_c$  und dem Winkel  $\alpha$  der magnetischen Induktion gegen die Horizontale. Hierzu messen wir für einen konstanten Winkel die Amplitude in Abhängigkeit von der magnetischen Induktion und bestimmen hieraus den Einsatzpunkt der Instabilität.



Abb. 1: Teilbild (a) zeigt die Oberflächenreflexionen eines hexagonalen Stachelmusters ohne Neigung des Feldes und einer magnetischen Induktion  $B_{\perp} = 20$  mT. Im Teilbild (b) sind die Reflexionen der flüssigen Kämmen zu beobachten. Hier ist das Feld um  $\alpha = 30^{\circ}$  geneigt, die magnetische Induktion beträgt  $B_{\perp} = 20$  mT. Die Tangentialkomponente des Feldes verläuft parallel zu den flüssigen Kämmen

[1] M. D. Cowley and R. E. Rosensweig. The interfacial stability of a ferromagnetic fluid. *J. Fluid Mech.*, 30:671, 1967.

## Die Partikelgrößenverteilung als Parameter viskoser und viskoelastischer Eigenschaften in Ferrofluiden

S. Thurm, S. Odenbach  
ZARM - Universität Bremen, Am Fallturm, 28359 Bremen  
[thurm@zarm.uni-bremen.de](mailto:thurm@zarm.uni-bremen.de)

Die Partikelgrößenverteilung in Ferrofluiden ist von fundamentaler Bedeutung für das Auftreten von magnetfeldinduzierten Viskositätsänderungen in Scherströmungen. Die von Shliomis entwickelte Theorie zur Rotationsviskosität [1] in nicht wechselwirkenden Suspensionen kann jedoch die experimentell gemessenen Viskositätserhöhungen von bis zu zwei Größenordnungen in kommerziellen, konzentrierten Ferrofluiden nicht erklären. Auch die experimentell gefundene Abhängigkeit von der Schergeschwindigkeit ist in dieser Theorie nicht vorhanden. Offensichtlich müssen die in konzentrierten Suspensionen vorhandenen interpartikulären Wechselwirkungen mit berücksichtigt werden.

Unsere Arbeitshypothese ist die Bildung kettenförmiger Agglomerate zwischen größeren Partikeln, da nur diese aus energetischen Gründen ausreichende attraktive Wechselwirkungen besitzen [2,3]. Die Abhängigkeit der Viskositätserhöhung von der Schergeschwindigkeit kann durch das Zerbrechen der Ketten in Folge höherer mechanischer Belastung erklärt werden.

Gestützt wird diese Arbeitshypothese durch ein theoretisches Modell von Zubarev [4]. Ferrofluide werden in diesem Modell als bidisperse Systeme betrachtet – eine kleine Konzentration großer Partikel und eine große Konzentration kleiner Partikel, suspendiert in einer newtonschen Trägerflüssigkeit. Während die kleinen Partikel nur zur Erhöhung der Grundviskosität der Trägerflüssigkeit beitragen, bilden die großen Partikel unter Einfluß von Magnetfeldern kettenförmige Strukturen. Die gefundenen guten Übereinstimmungen zwischen experimentellen Ergebnissen und theoretischen Berechnungen [5] zeigen, daß die realen physikalischen Prozesse durch das Modell gut angenähert werden. Ein wichtiger Fitparameter im Modell ist die Konzentration großer Partikel.

Wir haben ein Experiment entwickelt, welches uns eine gezielte Entmischung gerade dieser großen Partikel erlaubt. Das Fluid wird hierzu für eine bestimmte Zeitdauer einem hohen magnetischen Feldgradienten ausgesetzt. Die Diffusionsgeschwindigkeit ist abhängig vom Teilchenvolumen, wodurch größere Partikel schneller zum Bereich größerer Feldstärken wandern als kleinere Partikel. Das Fluid wird nach dem Experiment in zwei Fraktionen entnommen, die sich hauptsächlich in der Konzentration großer Teilchen unterscheiden.

Präsentiert wird ein Vergleich zwischen rheometrischen, feldabhängigen Messungen und theoretischen Berechnungen nach dem Modell von Zubarev für Fluidfraktionen, die sich in der Konzentration großer Partikel unterscheiden. Schwerpunkt ist neben der magnetfeld- und strömungsabhängigen stationären Viskosität auch das Auftreten viskoelastischer Effekte.

Die Selektivität des Separationsprozesses in Hinblick auf große Teilchen wird durch einen Vergleich zwischen Magnetisierungsmessungen und der gefitteten Konzentration großer Teilchen gezeigt.

Danksagung: Dieses Projekt wird von der DFG unter dem Kennzeichen OD18/3 gefördert.

[1] Shliomis, M.I., *Zh. Eksp. Teir. Fiz.* 61 (1972) 2411-2418

[2] Odenbach, S., Störk, H., *JMMM* 183 (1998) 188

[3] Odenbach, S., *LNP m71* (2002)

[4] Zubarev A.Yu., *LNP*, (2002) in Vorbereitung

[5] A.Yu. Zubarev, S. Odenbach, J. Fleischer, (2001) eingereicht bei *Physical Review*

## Photonic glue for magnetic colloids

Björn Hoffmann and Werner Köhler  
 Physikalisches Institut, Universität Bayreuth  
 werner.koehler@uni-bayreuth.de

The intensity of a HeNe laser beam transmitted through a  $100\ \mu\text{m}$  thick layer of a kerosene-based ferrofluid (particle diameter  $10\ \text{nm}$ ) of different concentrations shows an initial rise on a time scale of a few seconds followed by a decrease on a longer intensity-dependent time scale. The initial photobleaching is caused by the thermophoretic migration of the colloidal particles out of the laser beam. The later decrease is caused by a fully reversible photoinduced formation of  $\mu\text{m}$ -sized aggregates, which could be observed at laser intensities as low as  $10\ \text{nW}$ . The aggregation dynamics could be visualized under a microscope. Linear structures with a well defined lateral dimension are formed in the presence of a magnetic field. Different time scales are observed for the loss of orientation and the dissolution of the aggregates after removal of the static magnetic and the light field.

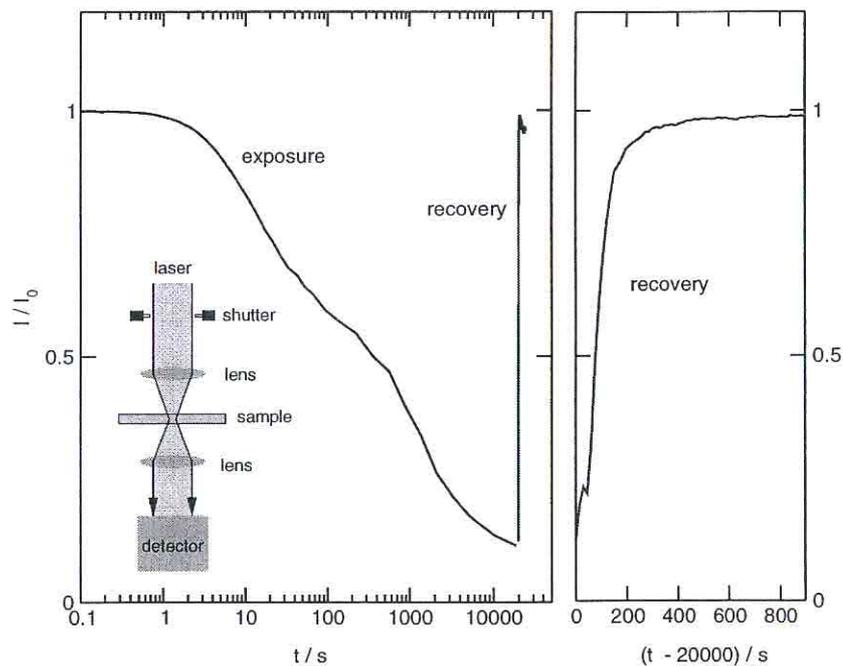


Figure 1: Transmission decay of the ferrofluid during exposure with a  $20\ \mu\text{W}$  HeNe laser focused down to  $17\ \mu\text{m}$  and subsequent recovery. Sample thickness  $100\ \mu\text{m}$ ,  $\phi = 0.036$ . The fast thermophoretic bleaching is only visible at much higher laser powers.

## Soret-unterstützte Konvektion in Ferrofluiden

S. Odenbach

ZARM, Universität Bremen, Am Fallturm, 28359 Bremen, Germany  
odenbach@zarm.uni-bremen.de

Bei der Betrachtung binärer Systeme anstelle einkomponentiger Fluide treten im Wärme- und Massentransport interessante zusätzliche Effekte auf. So kann das Auftreten des Soret-Effekts – also der Entmischung des Fluids unter Einwirkung eines Temperaturgradienten – zur Entstehung eines Dichtegradienten führen, der starken Einfluss auf das Auftreten thermischer Konvektion hat. Für Ferrofluide, und allgemein kolloidale Systeme, ist dabei als Besonderheit zu beachten, dass diese durch sehr niedrige Diffusionskoeffizienten aber große Soret-Koeffizienten sowie große Dichteunterschiede zwischen den Partikeln und der Trägerflüssigkeit charakterisiert sind. Die charakteristische Größe für den Einfluss der thermodynamischen Effekte auf die thermische Konvektion ist die sogenannte Diffusionsrate  $\psi = S_T \beta_C / \beta_T$  (hier bezeichnen  $S_T$  den Soret Koeffizienten und  $\beta_C$  und  $\beta_T$  die Volumenausdehnungskoeffizienten aufgrund von Konzentrations- bzw. Temperaturänderungen). Diese kann bei Ferrofluiden Werte in der Größenordnung von 1000 annehmen [1]. Das sollte dazu führen, dass starke Konvektionserscheinungen bei Rayleigh-Zahlen deutlich unterhalb des kritischen Punkts für einkomponentige Flüssigkeiten auftreten können.

Die Frage des Einflusses der Thermodiffusion auf die thermische Konvektion in binären Fluiden wurde im Detail von Hollinger et al. [2] untersucht. Kürzlich wurde diskutiert [3], dass in Ferrofluiden oszillatorische Instabilitäten auftreten sollen, ein Effekt der weder aus der Theorie in [2] noch aus numerischen Untersuchungen [4] hervorgeht.

Zur Klärung des Einflusses der Thermodiffusion auf die thermische Konvektion in Ferrofluiden wurden Experimente durchgeführt, in denen die Konvektionsamplitude der Strömung als Funktion der Temperaturdifferenz zwischen zwei horizontalen, die Flüssigkeitsschicht begrenzenden Platten bestimmt wurde. Die Experimente zeigen deutlich das Auftreten einer stationären Konvektion bei Temperaturdifferenzen unterhalb der kritischen Temperaturdifferenz für einkomponentige Fluide. Die experimentellen Resultate werden mit dem theoretischen Modell aus [2] verglichen.

- [1] E. Blums, S. Odenbach, A. Mezulis, M. Maiorov, *J. Magn. Magn. Mater.* 201 (1999)
- [2] St. Hollinger, M. Lücke, H.W. Müller, *Phys. Rev. E* 57, 4 (1997)
- [3] M. Shliomis, B. Smorodin *ICMF9, Book of Abstracts*, (2001)
- [4] A. Ryskin, H.W. Müller, H. Pleiner, *Physica D*, (eingereicht)

## Magnetodissipation und Magnetisierungsdynamik in Ferrofluiden

A. Jung<sup>1</sup>, H.W. Müller<sup>2</sup>

<sup>1</sup>FR 7.3 Technische Physik, Universität des Saarlandes, Im Stadtwald, 66123 Saarbrücken

<sup>2</sup>MPI für Polymerforschung, Ackermannweg 10, 55128 Mainz

Die scherfreie starre Körperrotation eines Ferrofluids erfährt in einem magnetischen Feld aufgrund magnetoviskoser Dissipation eine Dämpfung. Durch Resonanzmessungen an einem Torsionspendel können wir unmittelbar Messungen der feldabhängigen Rotationsviskosität durchführen, wobei durch unseren speziellen Aufbau die störende Scherviskosität ausgeschaltet werden kann [1]. Mit Hilfe eines einfachen mesoskopischen Modells für die Relaxation der Magnetisierung können wir aus den so gewonnenen Daten den mittleren magnetischen und hydrodynamischen Durchmesser der Ferrofluidpartikel bestimmen [2, 3].

Parallel zu diesen Messungen verfolgen wir die magnetfeldabhängige Dynamik der Magnetisierung mittels geeignet um das Pendel angeordneter Hallensoren. In meinem Poster werde ich auf die oben geschilderten Aufbauten und die Resultate der Messungen näher eingehen.

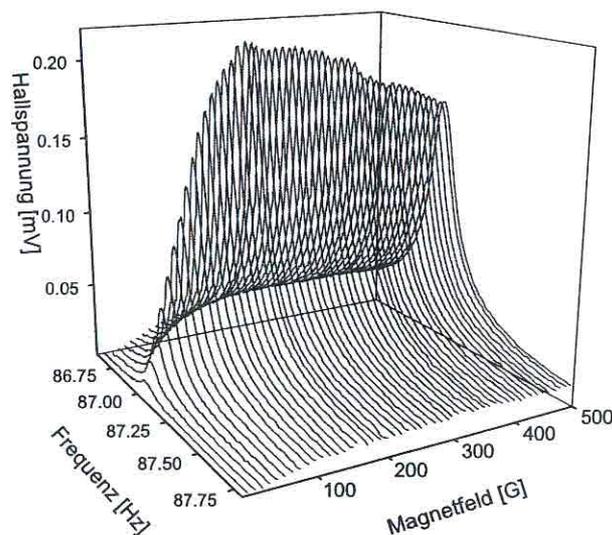


Abb. 1 Magnetisierung in Abhängigkeit des angelegten magnetischen Feldes

- [1] J.P. Embs, H.W. Müller, C. Wagner, K. Knorr, M. Lücke, Measuring the rotational viscosity of ferrofluids without shear flow, *Phys. Rev. E*, vol. 61 (2000), No. 3, pp.R2196-R2199.
- [2] J.P. Embs, H.W. Müller, C. E. Krill III, F. Meyer, H. Natter, B. Müller, S. Wiegand, M. Lücke, R. Hempelmann, K. Knorr, Particle size analysis of ferrofluids, *Magneto hydrodynamics*, vol. 37 (2001), No. 3, pp.222-229.
- [3] J.P. Embs, H.W. Müller, M. Lücke, K. Knorr, Shear free measurement of the rotational viscosity of ferrofluids with a forced torsional pendulum, *Magneto hydrodynamics*, vol.36 (2000), No. 4, pp.387-395.

## A rheometer for the investigation of structure formation in ferrofluids under magnetic field and shear flow

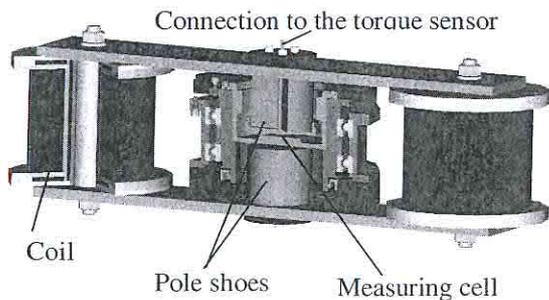
L. Pop, J. Hilljegerdes, S. Odenbach  
ZARM University of Bremen, Am Fallturm, 28359 Bremen  
[pop@zarm.uni-bremen.de](mailto:pop@zarm.uni-bremen.de)

The possibility to change the physical properties of ferrofluids by magnetic fields makes them useful for a wide area of applications in engineering and medicine and also highly interesting for numerous questions in basic research.

Experimental studies of field induced changes of viscosity under shear flow as well as theoretical studies [1] lead to the conclusion that the microscopic investigation of the structure formation in ferrofluids is absolutely necessary.

An appropriate tool for the investigation of structure formation in ferrofluids is small angle neutron scattering (SANS) which enables the non-destructive investigation of structures of materials in the range of 0.5nm – 400nm. The possibility to investigate the microstructure of visco-elastic systems with SANS was experimentally proved for polymer dispersions [2] as well as for ferrofluids [3, 4].

To verify and improve the model that explains the magnetoviscous and shear thinning effect we designed a new rheometer that can be used to perform rheological measurements as well as for experiments in a small angle neutron scattering setup. In this way we can make a direct connection between microstructural changes and the macroscopic behaviour of the ferrofluids under the influence of magnetic field and different values of shear rate.



Experimental setup

The magnetic field necessary for the experiments is produced by a symmetrical system of two coils, connected by steel bars and directed to the measurement region by means of two pole shoes, also made from steel. This configuration ensures a high and homogenous magnetic field in the region between the pole shoes and low values outside of the measuring area. The ferrofluid is placed within a modified cone plate system. The plate is rotated while the cone is attached to a torque sensor, allowing measurement of the torque

transmitted to the cone. The modification is an additional plate region. This new geometry has the advantage that the free surface region of the ferrofluid is located outside of the measuring area. In this region the magnetic field strength has low values, of about 30% of the maximal field. In this way, the spike formation due to normal field instability can be avoided for relatively high magnetic field strengths in the measuring area.

Channels drilled in pole shoes and the niobium windows for the measuring cell make the rheometer also suitable for SANS experiments without changing the magnetic field or shear flow conditions.

In the presentation we will show the experimental set-up and the first results.

- [1] A. Yu. Zubarev, S.Odenbach, J. Fleischer, (2001) submitted to *Physical Review E*
- [2] H. M. Laun, R. Bung, S. Hess, W. Loose, O. Hess, K. Hahn, E. Hädicke, R. Hingmann, F. Schmidt, P. Lindner, *J. Rheol.*, 36, 4 (2001) 329
- [3] F. Boué, V. Cabuil, J.-C. Bacri, R. Perzynski, *JMMM*, 122 (1993) 78-82
- [4] A. Wiedenmann, *Magneto hydrodynamics*, 37, 3, (2001) 329

## Zum Einfluß der Strukturbildung auf die dielektrischen Eigenschaften von Ferrofluiden

Anna Spanoudaki, Tobias Kruse und Rolf Pelster  
 II. Physikalisches Institut der Universität zu Köln  
[anna.spanoudaki@ens-lyon.fr](mailto:anna.spanoudaki@ens-lyon.fr)

Ein äußeres Magnetfeld induziert bei Ferrofluiden strukturelle Anisotropie, die sich auch in den dielektrischen Eigenschaften widerspiegelt: Die Permittivität steigt in der Richtung des Feldes und sinkt senkrecht dazu (magnetodielektrischer Effekt).

Durch breitbandige dielektrische Relaxationsspektroskopie wurde die Stärke des Phenomens in Abhängigkeit von der Konzentration untersucht [2]. Messungen wurden sowohl im feldfreien Raum als auch in einem starken Magnetfeld parallel und senkrecht zur Feldrichtung durchgeführt. Es hat sich gezeigt, dass die relative Änderung der dielektrischen Funktion, die unmittelbar durch die Strukturänderung verursacht wird [1], in der Größenordnung von 5% liegt.

Anhand effektiver Medien Analyse lässt es sich zeigen, dass eine Erklärung des magnetodielektrischen Effektes durch die Brownsche Orientierung ellipsoidförmiger Partikel allein nicht genügt, um ihn quantitativ zu beschreiben. Obwohl eine Mitwirkung dieses Mechanismus nicht auszuschließen ist, ist die Änderung der dielektrischen Funktion hauptsächlich auf die Bildung länglicher, parallel zum Magnetfeld orientierten Cluster zurückzuführen [2].

Das wird durch numerische Berechnungen der effektiven Permittivität simulierten Ferrofluidsysteme bestätigt. Diese Berechnungen erlauben weiter die Abhängigkeit der Stärke des magnetodielektrischen Effektes vom Volumenanteil der Magnetitpartikel näher zu studieren. Es wird z. B. eine Sättigung der magnetodielektrischen Anisotropie bei hohen Füllfaktoren beobachtet. Das ist in Übereinstimmung sowohl mit den experimentellen Ergebnissen, als auch mit deren statistischen Auswertung der Clusterbildung der simulierten Systeme, wonach die Cluster mit wachsender Konzentration immer weniger länglich werden [4].

[1] A. Spanoudaki, Dissertation, Universität zu Köln, Köln (2002).

[2] A. Spanoudaki & R. Pelster, to be published in *J. Magn. Magn. Mater.*

[3] A. Spanoudaki & R. Pelster, *Phys. Rev. B* 64, 064205 (2001).

[4] T. Kruse, H.-G. Krauthäuser, A. Spanoudaki & R. Pelster, beitrug zu diesem Workshop.

## Gibt es einen magnetischen Soret-Effekt?

Thomas Völker, Stefan Odenbach  
Zentrum für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation  
Universität Bremen, 28359 Bremen  
[voelker@zarm.uni-bremen.de](mailto:voelker@zarm.uni-bremen.de)

Unter dem Soret-Effekt (Thermodiffusion) versteht man den Materietransport einer Komponente eines Flüssigkeitsgemischs aufgrund eines anliegenden Temperaturgradienten. Das Maß für die Stärke des Materietransports ist der konventionelle Soret-Koeffizient, der für magnetische Partikel in einem Ferrofluid mittels einer Thermodiffusionsmesszelle zu  $S_T = 0,15 \text{ K}^{-1} \pm 0,02 \text{ K}^{-1}$  bestimmt wurde [1]. Eine solche Messzelle besteht im Wesentlichen aus einem vertikalen Flüssigkeitsspalt, der zwei Reservoirs miteinander verbindet. Durch eine Temperaturdifferenz zwischen den Wänden des Flüssigkeitsspaltens bildet sich ein Konzentrationsgradient in der Flüssigkeitsschicht aus, der zusammen mit der thermischen Strömung zu einem Konzentrationsanstieg der magnetischen Partikel im unteren und einer Verarmung im oberen Reservoir führt. Durch ein induktives in-situ-Messverfahren wird die Konzentration der magnetischen Partikel in den Reservoirs ermittelt, woraus dann deren Soret-Koeffizient bestimmt werden kann.

Im Gegensatz zu binären Flüssigkeiten, bei denen der Soret-Koeffizient eine Materialkonstante darstellt, soll dieser in Ferrofluiden magnetisch beeinflusst werden können. Theoretische Untersuchungen von E. Blums [2] ergaben, dass sowohl die Stärke als auch die Richtung des Magnetfeldes relativ zum Temperaturgradienten den Soret-Koeffizienten verändern. Bisherige experimentelle Untersuchungen haben gezeigt, dass für kleine Felder ( $H < 60 \text{ kA/m}$ ) die experimentellen Ergebnisse qualitativ mit den theoretischen Vorhersagen übereinstimmen. Allerdings liegen die experimentell gefundenen Werte für den magnetischen Soret-Koeffizienten um drei Größenordnungen über den theoretisch berechneten, falls man davon ausgeht, dass nur der Soret-Koeffizient durch das Magnetfeld beeinflusst wird. In diesem Falle liegt der magnetische Soret-Koeffizient dann in der gleichen Größenordnung wie der konventionelle Soret-Koeffizient selbst.

Als mögliche Ursache für die Diskrepanz zwischen Theorie und Experiment wird die Destabilisierung der existierenden thermisch induzierten Strömung in der Thermodiffusionszelle durch das anliegende Magnetfeld angenommen. Durch die Beobachtung der Temperaturverteilung an den Wänden der Messzelle mittels thermochromer Flüssigkristalle kann auf das Strömungsprofil bei paralleler und senkrechter Ausrichtung des Magnetfeldes relativ zum Temperaturgradienten geschlossen werden. Dabei zeigt es sich, dass das Auftreten thermomagnetischer Konvektion in paralleler Ausrichtung zwischen Magnetfeld und Temperaturgradient zu einer Strömungsstruktur führt, bei der thermodiffusive Messungen in dieser experimentellen Anordnung nicht mehr möglich sind. Bei senkrechter Ausrichtung wird gezeigt, dass das Auftreten von thermischen und magnetischen Randeffekten zu einem scheinbar niedrigeren Soret-Koeffizienten führt. Somit kann mit einer derartigen experimentellen Anordnung der Nachweis für die magnetische Beeinflussung des Soret-Effekts nicht geführt werden.

Durch eine entsprechende Versuchsanordnung, die das Auftreten von Konvektion ausschließt, wollen wir die in der Überschrift gestellte Frage abschließend beantworten.

[1] T. Völker, E. Blums, S. Odenbach, *Magnetohydrodynamics* 36 (2001)

[2] E. Blums, *Phys. Fluids* 10, 9 (1998)

## Autorenindex

Alexiou C.	34	Meindl P.	14
Anton M.	33	Mekhonoshin V.V.	19
Antonietti M.	6	Mitkova T.	40
Authenrieth T.	13	Moras K.	7
Bayat N.	37	Müller H.W.	22, 24, 26, 29, 32, 42, 50
Bergemann C.	33, 34	Müller R.	8, 12
Berkov D.V.	11, 25	Nethe A.	38, 39
Brinkmann R.	1	Odenbach S.	20, 47, 49, 51, 53
Buske N.	2, 4, 15	Parak F.G.	34
Bönnemann H.	1	Pelster R.	21, 52
Büscher K.	16	Plank C.	33
Diederichs J.E.	36	Pleiner H.	32
Eberbeck D.	15, 28	Polevikov V.K.	31
Elster C.	14	Pop L.	51
Embs J.P.	42	Prass S.	11, 35
Engel A.	22, 43, 45	Pridöhl M.	3
Felderhof B.U.	27	Pshenichnikov A.F.	19
Fleischer J.	20	Ramirez L.	6
Friedrichs R.	43	Rannacher D.	45
Gansau C.	2	Rehberg I.	46
Gawalek W.	8	Reimann B.	46
Goni A.R.	10	Reimann P.	22
Gorn N.L.	25	Reinhard A.	11
Groß C.	11, 16	Reszka R.C.	36
Grübel G.	13	Richter J.	36
Grünberg K.	5	Richter R.	46
Götze Th.	4, 15	Riehemann W.	7
Hartwig S.	15, 28	Romanus E.	11, 16, 35
Heinemann A.	17, 18	Roskos M.	35
Helm C.A.	16	Ryskin A.	32
Hempelmann R.	13	Schaarschuch R.	7
Hergt R.	35	Scherer F.	33
Heyen U.	5	Schillinger U.	33
Hiergeist R.	8, 35	Schmid R.	34
Hilger I.	35	Schmitz R.	23
Hilljegerdes J.	51	Scholz Th.	38, 39
Hoell A.	12, 17, 18	Schüler D.	5, 36
Hoffmann B.	48	Spanoudaki A.	21, 52
Holm C.	26, 29	Stahlmann H.D.	38, 39
Huke B.	30	Steinhoff U.	15, 28
Härtl W.	13	Stock D.	25
Jung A.	22, 50	Terheiden A.	9
Jurgons R.	34	Thomsen C.	10
Kaiser W.A.	35	Thurm S.	47
Kammel M.	17, 18	Tobiska L.	31, 40, 44
Kießling A.	35	Trahms L.	14, 15, 28
Krauthäuser H.G.	21	Uhlmann E.	37
Kruse T.	21, 52	Völker T.	53
Köhler W.	48	Wagner J.	13
Landfester K.	6, 15	Waldöfner N.	1
Lange A.	41	Wang Z.	26, 29
Lebedev A.V.	19	Weber J.E.	10
Liu M.	24	Weber P.	11, 35
Lücke M.	30	Weitschies W.	11, 16, 35
Matoussevitch N.	1	Wiedenmann A.	12, 17, 18
Matthies G.	44	Zimmermann G.	3
Mayer C.	9	Zubarev A.	20