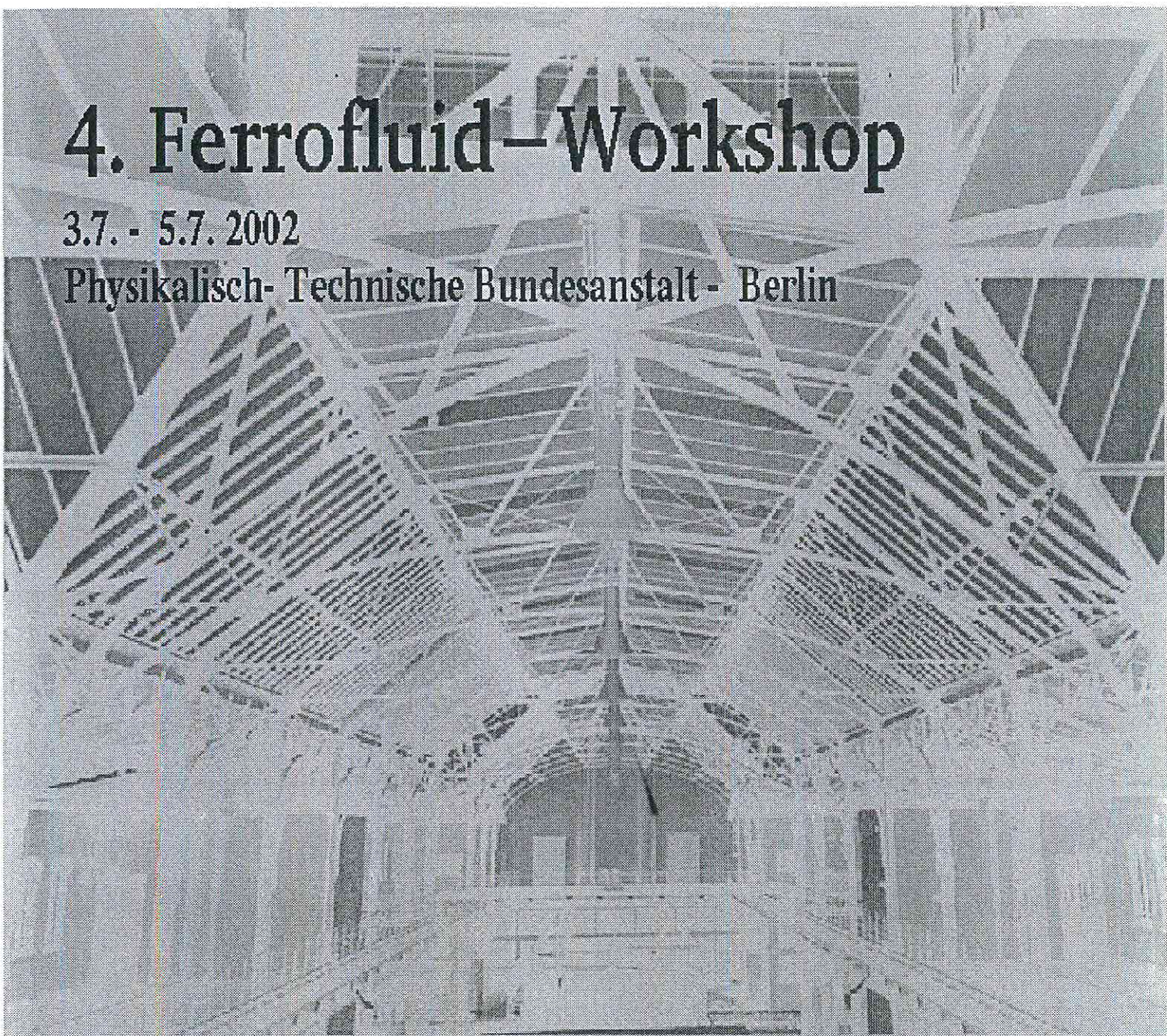


**PTB**

# 4. Ferrofluid-Workshop

3.7. - 5.7. 2002

Physikalisch-Technische Bundesanstalt - Berlin



**Program**

**Zusammenfassungen der Beiträge**

## Zeitplan

### MITTWOCH 3.7.

13:00 Eröffnung

#### HERSTELLUNG UND SYNTHESE VON FERROFLUIDEN

- 13:15 R.Brinkmann N.Matoussevitch N.Waldöfner H.Bönnemann S.1  
Eine gröÙenselektive Synthese von kolloidalen Magnetmetallpartikeln
- 13:40 C.Gansau N.Buske S.2  
Synthese und Charakterisierung von Cobalt-Magnetflüssigkeiten
- 14:05 M.Pridöhl G.Zimmermann S.3  
Superparamagnetic nanocomposite materials

Kaffee

#### CHARAKTERISIERUNG VON FERROFLUIDEN I

- 15:00 A.Terheiden C.Mayer S.9  
NMR-Experimente an fluiden Phasen in Gegenwart dispergierter magnetischer Nanopartikel
- 15:25 J.E.Weber A.R.Goni C.Thomsen S.10  
Raman study of magnetic field effects on surfacted and ionic ferrofluids
- 15:50 P.Weber E.Romanus S.Prass C.Groß A.Reinhard W.Weitschies D.V.Berkov S.11  
Charakterisierung magnetischer Nanopartikel durch temperaturabhängige Messung der Magnetrelaxation

Kaffee

#### THEORETISCHE GRUNDLAGEN I

- 16:45 A.Engel H.W.Müller P.Reimann A.Jung S.22  
Thermal ratchet effect in ferrofluids
- 17:10 R.Schmitz S.23  
*Relaxation in Ferroflüssigkeiten*
- 17:35 H.W.Müller M.Liu S.24  
Shear flow rendered audible by a ferrofluid

DONNERSTAG 4.7.

BIOMEDIZINISCHE ANWENDUNGEN VON MAGNETISCHEN NANOPARTIKELN I

- 9:00 *W.Weitschies*  
Anforderungen an Ferrofluide für klinische Anwendungen
- 9:30 *S.Schmitz*  
Superparamagnetische Eisenoxidpartikel in der MRT: Beispiele für experimentelle und klinische Anwendungen

Kaffee

BIOMEDIZINISCHE ANWENDUNGEN VON MAGNETISCHEN NANOPARTIKELN II

- 10:30 *F.Scherer U.Schillinger M.Anton C.Bergemann C.Plank* S.33  
Magnetofection: Gezielter und potenziertes Gentransfer vermittelt durch superparamagnetische Nanopartikel unter dem Einfluss von Magnetfeldern
- 10:55 *C.Alexiou R.Schmid R.Jurgons C.Bergemann F.G.Parak* S.34  
Intraarterielle Chemotherapie mit Magnetischem Drug Targeting: Biodistribution des magnetischen Carriers
- 11:20 *J.Hilger A.Kießling E.Romanus M.Roskos S.Prass R.Hiergeist R.Hergt W.Weitschies P.Weber W.A.Kaiser* S.35  
Markierung von Endothelzellen in Kultur mittels magnetischen Nanopartikeln für die magnetische Wärmebehandlung
- 11:45 *R.C.Reszka J.E.Diederichs J.Richter D.Schüler* S.36  
Interaktion zur Wechselwirkung von Magnetosomen-Lipoplex-Komplexen mit Plasma und Serum Proteinen

Mittagessen

CHARAKTERISIERUNG VON FERROFLUIDEN II

- 13:15 *A.Hoell A.Wiedenmann R.Müller* S.12  
Structure investigations of ferrofluids and its precursors by SANS with polarized neutrons
- 13:40 *J.Wagner T.Authenrieth W.Härtl R.Hempelmann G.Grübel* S.13  
Structure and dynamics of complex liquids with magnetic dipole-dipole interaction by means of SAXS and XPCS
- 14:05 *P.Meindl C.Elster L.Trahms* S.14  
Bestimmung der Messunsicherheit bei der Messung der Anfangssuszeptibilität von Ferrofluiden
- 14:30 Postersession

THEORETISCHE GRUNDLAGEN II

- 16:45 *D.V.Berkov N.L.Gorn D.Stock* S.25  
Langevin dynamics simulations of the remagnetization processes in ferrofluids
- 17:10 *Z.Wang C.Holm H.W.Müller* S.26  
On the effect of boundary conditions in the simulation study of equilibrium properties of magnetic dipolar fluids
- 17:35 *B.U.Felderhof* S.27  
Rotational Brownian motion of a pair of interacting dipoles

FREITAG 5.7.

FREIE OBERFLÄCHEN

- 9:00 T.Mitkova L.Tobiska S.40  
Finite Elemente Methoden zur numerischen Simulation des Strömungsverhaltens von Ferrofluiden mit freien Oberflächen
- 9:25 A.Lange S.41  
Zerfallende Muster für die Rosensweig-Instabilität
- 9:50 J.P.Embs H.W.Müller S.42  
Experimentelle Untersuchungen zur Faraday- und Rosensweig-Instabilität

Kaffee

VOLUMENEIGENSCHAFTEN

- 10:45 S.Thurm S.Odenbach S.47  
Die Partikelgrößenverteilung als Parameter viskoser und viskoelastischer Eigenschaften in Ferrofluiden
- 11:10 B.Hoffmann W.Köhler S.48  
Photonic glue for magnetic colloids
- 11:35 S.Odenbach S.49  
Soret-unterstützte Konvektion in Ferrofluiden
- 12:00 Abschluss

## Verzeichnis der Beiträge

### Herstellung und Synthese von Ferrofluiden

- R.Brinkmann N.Matoussevitch N.Waldöfner H.Bönnemann*  
Eine gröbenselektive Synthese von kolloidalen Magnetmetallpartikeln 1
- C.Gansau N.Buske*  
Synthese und Charakterisierung von Cobalt-Magnetflüssigkeiten 2
- M.Pridöhl G.Zimmermann*  
Superparamagnetic nanocomposite materials 3
- Th.Götze N.Buske*  
Synthese und Charakterisierung von Cobaltferrit Ferrofluiden 4
- K.Grünberg U.Heyen D.Schüler*  
Biogene Ferrofluide: Gewinnung und Charakterisierung von Magnetosomen aus magnetotaktischen Bakterien 5
- L.Ramirez K.Landfester M.Antonietti*  
Herstellung und Charakterisierung von polymerverkapselten Magnetitpartikeln 6
- K.Moras R.Schaarschuch W.Riehemann*  
Neue Perspektiven für Ferrofluide durch die Herstellung der Nanoteilchen mittels Laserablation 7
- R.Müller R.Hiergeist W.Gawalek*  
Ba-Ferritpulver für magnetische Flüssigkeiten mit erhöhter Neel-Relaxationszeit 8

### Charakterisierung von Ferrofluiden

- A.Terheiden C.Mayer*  
NMR-Experimente an fluiden Phasen in Gegenwart dispergierter magnetischer Nanopartikel 9
- J.E.Weber A.R.Goñi C.Thomsen*  
Raman study of magnetic field effects on surfacted and ionic ferrofluids 10
- P.Weber E.Romanus S.Prass C.Groß A.Reinhard W.Weitschies D.V.Berkov*  
Charakterisierung magnetischer Nanopartikel durch temperaturabhängige Messung der Magnetrelaxation 11
- A.Hoell A.Wiedenmann R.Müller*  
Structure investigations of ferrofluids and its precursors by SANS with polarized neutrons 12
- J.Wagner T.Authenrieth W.Härtl R.Hempelmann G.Grübel*  
Structure and dynamics of complex liquids with magnetic dipole-dipole interaction by means of SAXS and XPCS 13
- P.Meindl C.Elster L.Trahms*  
Bestimmung der Messunsicherheit bei der Messung der Anfangssuszeptibilität von Ferrofluiden 14
- D.Eberbeck S.Hartwig U.Steinhoff L.Trahms Th.Götze N.Buske K.Landfester*  
Magnetische Kurzzeitrelaxometrie realer Ferrofluide 15
- C.Groß K.Büscher E.Romanus C.A.Helm W.Weitschies*  
Größenverteilung eines Ferrofluids nach magnetischer Fraktionierung 16

<i>A.Heinemann A.Wiedenmann A.Hoell M.Kammel</i> Approaches for the determination of structure factors in concentrated Ferrofluids	17
<i>M.Kammel A.Hoell A.Heinemann A.Wiedenmann</i> Complex structure and magnetic correlations of ferrofluids studied by SANS with polarised neutrons	18
<i>A.F.Pshenichnikov A.V.Lebedev V.V.Mekhonoshin</i> Low Temperature Susceptibility of Concentrated Ferroc colloids	19
<i>S.Odenbach J.Fleischer A.Zubarev</i> Magnetisierungsrelaxation und Mikrostruktur von Ferrofluiden unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung	20
<i>T.Kruse H.G.Krauthäuser A.Spanoudaki R.Pelster</i> Strukturuntersuchungen an Ferrofluiden mittels Kleinwinkelstreuexperimenten und Simulationen	21
 <b>Theoretische Grundlagen</b>	
<i>A.Engel H.W.Müller P.Reimann A.Jung</i> Thermal ratchet effect in ferrofluids	22
<i>R.Schmitz</i> Relaxation in Ferroflüssigkeiten	23
<i>H.W.Müller M.Liu</i> Shear flow rendered audible by a ferrofluid	24
<i>D.V.Berkov N.L.Gorn D.Stock</i> Langevin dynamics simulations of the remagnetization processes in ferrofluids	25
<i>Z.Wang C.Holm H.W.Müller</i> On the effect of boundary conditions in the simulation study of equilibrium properties of magnetic dipolar fluids	26
<i>B.U.Felderhof</i> Rotational Brownian motion of a pair of interacting dipoles	27
<i>D.Eberbeck S.Hartwig U.Steinhoff L.Trahms</i> Beschreibung des Néelschen Magnetisierungszerfalls in Ferrofluiden mit schmaler Teilchengrößenverteilung	28
<i>Z.Wang C.Holm H.W.Müller</i> Computer simulations of the magnetization and structural properties of ferrofluids	29
<i>B.Huke M.Lücke</i> Cluster expansion for ferrofluid magnetization - The influence of nonmagnetic interaction	30
<i>V.K.Polevikov L.Tobiska</i> Numerical Simulation of a Magnetic-Fluid Seal Subjected to Centrifugal Forces and Pressure Drop	31
<i>A.Ryskin H.W.Müller H.Pleiner</i> Thermal convection in binary fluid mixtures with a weak concentration diffusivity but strong solutal buoyancy forces	32
<i>P.Ilg M.Kröger S.Hess</i> Magnetization equation, rheology and an effective description of ferromagnetic units in dilute suspensions	32a

### **Biomedizinische Anwendungen von magnetischen Nanopartikeln**

<i>F.Scherer U.Schillinger M.Anton C.Bergemann C.Plank</i> Magnetofection: Gezielter und potenziertes Gentransfer vermittelt durch superparamagnetische Nanopartikel unter dem Einfluss von Magnetfeldern	33
<i>C.Alexiou R.Schmid R.Jurgons C.Bergemann F.G.Parak</i> Intraarterielle Chemotherapie mit Magnetischem Drug Targeting: Biodistribution des magnetischen Carriers	34
<i>I.Hilger A.Kießling E.Romanus M.Roskos S.Prass R.Hiergeist R.Hergt W.Weitschies P.Weber W.A.Kaiser</i> Markierung von Endothelzellen in Kultur mittels magnetischen Nanopartikeln für die magnetische Wärmebehandlung	35
<i>R.C.Reszka J.E.Diederichs J.Richter D.Schüler</i> Interaktion zur Wechselwirkung von Magnetosomen-Lipoplex-Komplexen mit Plasma und Serum Proteinen	36

### **Technische Anwendungen von Ferrofluiden**

<i>E.Uhlmann N.Bayat</i> Einsatz von Ferrofluiden als Schmierstoff in wartungsarmen Gleitlagern	37
<i>A.Nethe Th.Scholz H.D.Stahlmann</i> Charakterisierung von Ferrofluid betriebenen Elektromotoren	38
<i>A.Nethe Th.Scholz H.D.Stahlmann</i> Messungen am mit Ferrofluid betriebenen Elektromotor	39

### **Freie Oberflächen**

<i>T.Mitkova L.Tobiska</i> Finite Elemente Methoden zur numerischen Simulation des Strömungsverhaltens von Ferrofluiden mit freien Oberflächen	40
<i>A.Lange</i> Zerfallende Muster für die Rosensweig-Instabilität	41
<i>J.P.Embs H.W.Müller</i> Experimentelle Untersuchungen zur Faraday- und Rosensweig-Instabilität	42
<i>R.Friedrichs A.Engel</i> Low Symmetry Patterns on Ferrofluids	43
<i>G.Matthies L.Tobiska</i> Algorithmen und Fehleranalyse für Finite-Elemente-Methoden bei der Rosensweig-Instabilität	44
<i>D.Rannacher A.Engel</i> Double Rosensweig instability in a ferrofluid sandwich structure	45
<i>B.Reimann R.Richter I.Rehberg</i> Experimentelle Untersuchung magnetischer flüssiger Käme im schrägen Magnetfeld	46

**Volumeneigenschaften**

<i>S.Thurm S.Odenbach</i> Die Partikelgrößenverteilung als Parameter viskoser und viskoelastischer Eigenschaften in Ferrofluiden	47
<i>B.Hoffmann W.Köhler</i> Photonic glue for magnetic colloids	48
<i>S.Odenbach</i> Soret-unterstützte Konvektion in Ferrofluiden	49
<i>A.Jung H.W.Müller</i> Magnetodissipation und Magnetisierungsdynamik in Ferrofluiden	50
<i>L.Pop J.Hilljegerdes S.Odenbach</i> A rheometer for the investigation of structure formation in ferrofluids under magnetic field and shear flow	51
<i>A.Spanoudaki T.Kruse R.Pelster</i> Zum Einfluß der Strukturbildung auf die dielektrischen Eigenschaften von Ferrofluiden	52
<i>T.Völker S.Odenbach</i> Gibt es einen magnetischen Soret-Effekt?	53
<b>Autorenindex</b>	54

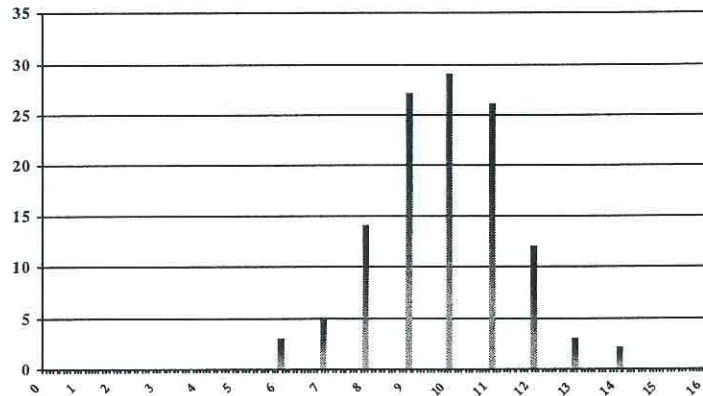


## Eine größenselektive Synthese von kolloidalen Magnetmetallpartikeln für Ferrofluide

Rainer Brinkmann, Nina Matoussevitch, Norbert Waldöfner und Helmut Bönnemann  
Max-Planck-Institut für Kohlenforschung, 45466 Mülheim a.d. Ruhr

Es wird über ein neuartiges Herstellverfahren für kolloidale, nanoskopische Magnetmetallpartikel berichtet. Nach Thermolyse von Fe-, Co-, Ni-Carbonyl-Verbindungen in Gegenwart von Trialkylaluminium werden Dispersionen mit sehr enger Größenverteilung (Standardabweichung max.1,6 nm) erhalten. Beispielsweise ergibt die Co-Thermolyse (150°C) von  $\text{Co}_2\text{CO}_8$  mit  $\text{Al}(\text{C}_8\text{H}_{17})_3$  im molaren Verhältnis von 10:1 unter Gasentwicklung und Verfärbung einen nahezu schwarzen Niederschlag von Co-Partikeln unter klarer Lösung. Die überstehende Lösung wird vom Niederschlag abdekantiert und der verbleibende Rückstand mit dem Dispergiermittel KorantinSH (Firma BASF) in Toluol versetzt, wobei ein vollständig klares, tief schwarzbraun gefärbtes Co-Magnetofluid erhalten wird. Es enthält 67,85 Gew.-% Co und 0,98 Gew.-% Al und hat eine Partikelgröße von  $10 \text{ nm} \pm 1.6 \text{ nm}$ . (siehe Fig.).

Co-Magnetofluid



Eine Dispersion dieser Co-Partikel in Toluol ergibt eine Magnetisierung von 11,6 mT bei einer Konzentration von nur 0,6 Vol.-%.

Art und Konzentration der eingesetzten aluminiumorganischen Verbindung erlaubt die Einstellung der Partikelgröße.  $\text{Al}(\text{C}_8\text{H}_{17})_3$  liefert eine Co-Partikelgröße von 10 nm,  $\text{Al}(\text{C}_2\text{H}_5)_3$  eine von 8 nm und  $\text{Al}(\text{CH}_3)_3$  eine von 3,5 nm bei jeweils sehr geringer Standardabweichung. Erhöhung des molaren Verhältnisses der aluminiumorganischen Verbindung zur Co-Carbonyl-Verbindung von 1:10 auf 2:1 ergibt Co-Nanopartikel der Größe 5,4 nm.

Die Methode ist auf die anderen Magnetmetalle (einzeln oder legiert) übertragbar.

## Synthese und Charakterisierung von Cobalt-Magnetflüssigkeiten

C. Gansau, N. Buske  
Berlin Heart AG, Wiesenweg 10, 12247 Berlin  
[gansau@berlinheart.de](mailto:gansau@berlinheart.de)

Magnetflüssigkeiten (MF) sind stabile Dispersionen von magnetischen Nanopartikeln. Gängige MF werden auf Basis von stabilisierten Eisenoxid (Magnetit und Maghemit) Nanopartikeln hergestellt. Schwieriger ist die Herstellung von MF mit magnetischen Metallkernteilchen, wie Eisen und Cobalt. Eisenpartikel zu stabilisieren ist kaum möglich, da sie mit Sauerstoffkontakt sofort oxidieren. Besser beherscherbar ist die Herstellung von Cobalt-Partikeln, die mit geeigneten Stabilisatoren vor dem Sauerstoff gut abgeschirmt sind.

Zur Herstellung von CoMF gibt es mehrere Möglichkeiten: Reduktion von  $\text{Co}^{2+}$  Ionen [1], thermische Zersetzung von Dicobaltoctacarbonyl [2] oder das Metalldampfverfahren bzw. Sputtern [3]. In Gegenwart von geeigneten Tensiden werden die Co-Partikel umhüllt und in organischen Trägerflüssigkeiten entstehen stabile Dispersionen.

Als Stabilisatoren sind Tenside geeignet, die eine polare Kopfgruppe (Carboxyl, Sulfonsäure oder Amin) tragen, die eine Wechselwirkung zum Cobaltpartikel haben und einen langkettigen Kohlenwasserstoffrest, der für die Löslichkeit in einem unpolaren Lösemittel sorgt. Na-dioctylsulfosuccinat (AOT) und Oleoylsarcosine (Koranthin SH) sind für Cobalt sehr gute Stabilisatoren. Als Trägerflüssigkeit kann z.B. Toluol, Oktan, Petroleum oder das Vakuumöl L9 verwendet werden.

Nach eigenen Erfahrungen ist der Weg über die thermische Zersetzung des Dicobaltoctacarbonyls die beste Variante, um hochkonzentrierte, sehr gut stabilisierte CoMF zu erhalten. Der Co-Partikeldurchmesser liegt in einem Größenbereich von 5-15 nm und es können Sättigungspolarisationen bis zu  $I_s=250$  mT erreicht werden.

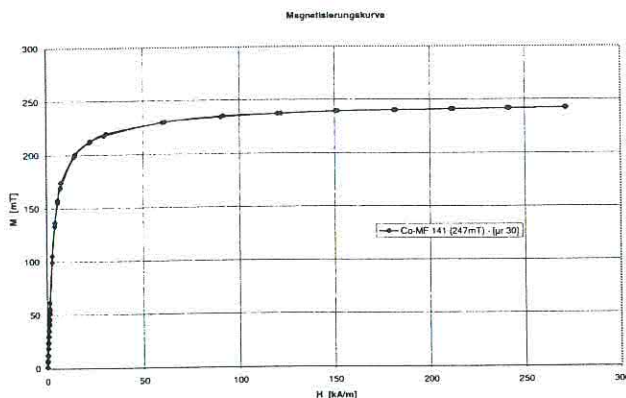


Abb. 1: Magnetisierungskurve einer CoMF  
mit  $I_s = 247$  mT

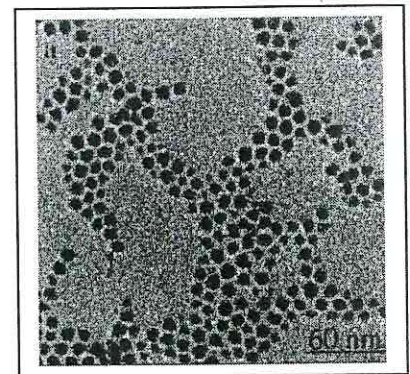


Abb. 2: TEM-Aufnahme von Co-  
Partikeln:  $d=10-12$  nm

- [1] Sun, Murray, *J. Appl. Phys.* 85 No 5, (1999)
- [2] E. Papirer, P. Horny, *J. Colloid Interface Sci.* 94, (1983), 207-219
- [3] M. Wagner, Dissertation TU-Clausthal (1998)

## Superparamagnetic nanocomposite materials

M. Pridöhl<sup>1</sup>, G. Zimmermann<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Degussa, Project House Nanomaterials  
[markus.pridoehl@degussa.com](mailto:markus.pridoehl@degussa.com)

Degussa has developed a high temperature combustion process to produce superparamagnetic ceramic nanocomposite materials.

Isolated nanometer-sized particles of magnetic materials show superparamagnetic behavior. To obtain magnetically decoupled single-domain centers, nano-scaled iron oxide particles were embedded in an amorphous silica matrix via flame synthesis. The iron oxide content of the composite material was varied from 17 w-% to 62 w-%. The X-ray diffraction analysis of the powders mainly indicate magnetite respectively maghemite and only small amounts of hematite. The iron oxide crystals are in the range of 5-20 nm. As can be seen by transmission electron microscopy the magnetic domains are homogeneously dispersed in the amorphous silica matrix. The specific surface area (BET) of the composite material was varied from 114 m<sup>2</sup>/g to 214 m<sup>2</sup>/g by adjusting the process parameters. A SQUID magnetometer was used for magnetic characterization. The particles show superparamagnetic behavior above 50 K and the iron oxide domains are magnetically well decoupled. The highest saturation magnetization of the composite material so far achieved was 18 Am<sup>2</sup>/kg. Taking the magnetic iron content of the composite material into account and considering all iron oxide to be maghemite we so far achieved a saturation magnetization which is in the order of 50 % of its theoretical maximum.

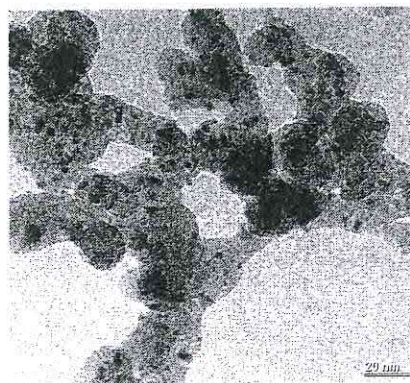


Figure 1 TEM-picture of iron oxide crystals dispersed in fumed silica

The composite material has been synthesized in a hydrogen-air flame starting from iron chloride giving the magnetic domains and tetrachlorsilane forming the non-magnetic matrix. This process provides the capability for producing superparamagnetic ceramic nanocomposite particles in large quantities at affordable costs.

For many applications, superparamagnetic particles require stabilization with organic coatings. The advantage of the described particles is their high chemical, mechanical and thermal stability, which is often well beyond that of traditional organic coatings. In alternating magnetic fields the particles can be used for heating. In unidirectional fields these particles can be oriented or moved. In ferrofluids additional features may arise as well from the rheologic active silica matrix as from the mechanically limited Brownian relaxation of the domains.

The present paper discusses the method of particle synthesis, the properties of the produced particles and provides an outlook for future applications.

## Synthese und Charakterisierung von Cobaltferrit Ferrofluiden

Th. Götze und N. Buske  
BerlinHeart AG Berlin  
[goetze@berlinheart.de](mailto:goetze@berlinheart.de)

Die chemische Synthese von aus Spinelferriten bestehenden Nanopartikeln und deren Stabilisierung in wässrigen oder organischen Medien bietet die Möglichkeit der Bereitstellung von spezifischen magnetisierbaren Trägerpartikeln, die z.B. durch Kopplung von Antikörpern für die Krebsbekämpfung verwendet werden können oder eine radioaktive Markierung mit  $^{60}\text{Co}$  ermöglichen. Die Variation der Teilchengrößen wird durch Kontrolle der physikalischen Parameter und der chemischen Bedingungen während der Kondensationsreaktion erreicht [1,2]. Die Kontrolle des pH-Wertes, der Ionenstärke, der Gegenionen und die Wahl der Hüllsubstanz bedingen die Stabilität der Partikel im wässrigen Medium.

Es wurden Cobaltferrite mit unterschiedlichen Partikeldurchmesser und Morphologie (Abb. 1) synthetisiert. Die präparierten Cobaltferrit-Partikel sind mit unterschiedlichen Stabilisatoren umhüllt und bilden stabile Dispersionen in wässrigen Medien.

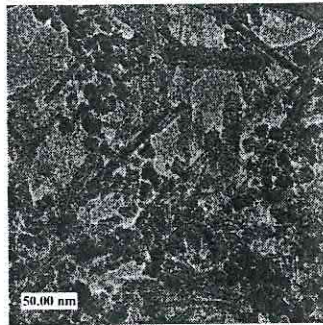


Abb. 1: Synthese von Co-Ferrit-Partikeln unterschiedlicher Morphologie

Die magnetischen Eigenschaften der Cobaltferrite unterscheiden sich wesentlich von denen des Magnetits. Die Magnetisierungskurven von Cobaltferrit zeigen einen sehr steilen Anstieg der Sättigungspolarisation bei kleinen Magnetfeldern.

Die Charakterisierung der Partikelgröße und der Morphologie erfolgt mit der Transmissionselektronenmikroskopie (TEM) und der Photonenkorrelationsspektroskopie (PCS). Die Sättigungspolarisation  $J_s$  der Proben wird in Abhängigkeit vom Magnetfeld mit einem Vibrationsmagnetometer bestimmt. Aussagen über die Kristallstruktur liefert die Röntgendiffraktometrie.

[1] F. Tourinho et al. *Progr. Colloid Polym. Sci.* 79, 128-134 (1989)

[2] P.C. Morais et al., *J.MMM*, 225, 37-40 (2001)

## **Biogene Ferrofluide: Gewinnung und Charakterisierung von Magnetosomen aus magnetotaktischen Bakterien**

K. Grünberg, U. Heyen, D. Schüler

Max-Planck-Institut für marine Mikrobiologie, D-28359 Bremen

[kgruenbe@mpi-bremen.de](mailto:kgruenbe@mpi-bremen.de)

### **Einleitung**

Magnetbakterien bilden zur Magnetfeldorientierung intrazellulär Magnetosomen, die aus membranumgebenen Magnetitkristallen bestehen. Isolierte Magnetosomen bilden stabile Suspensionen mit Ferrofluid-ähnlichen Eigenschaften [1]. Die definierten Eigenschaften sowie Partikelgrößen im Bereich von 40-50 nm machen bakterielle Magnetosomen für verschiedene biotechnologische Anwendungen interessant [2]. Da die Herstellung größerer Mengen bisher problematisch war, waren die biochemischen, biophysikalischen und magnetischen Eigenschaften von Magnetosomensuspensionen bisher jedoch weitgehend uncharakterisiert. Ziel unserer Untersuchungen war die Etablierung der Zucht von Magnetbakterien im Fermentermaßstab sowie die massenhafte Isolierung der Magnetosomen aus den Zellen. Die gewonnenen Magnetosomensuspensionen sollten einer ersten Charakterisierung unterzogen werden.

### **Ergebnisse und Diskussion**

Die Entwicklung einer mikroaeroben Kultivierungsmethode ermöglichte die Massenzucht des magnetischen Bakteriums *Magnetospirillum gryphiswaldense* im Maßstab von bis zu 20 Liter unter definierten Oxystatbedingungen. Mit Hilfe einer magnetischen Separationsmethode konnten 5-6 mg Magnetit / g Trockengewicht Zellen (2,7 mg/l Medium) isoliert werden. Die elektronenmikroskopische Analyse ergab einen mittleren Durchmesser der reifen Primärpartikel von 42 nm sowie die Anwesenheit einer intakten Magnetosomenmembran (MM), die in Abhängigkeit von den Präparationsbedingungen ein unterschiedliches Proteinstmuster aufwies.

Erste Experimente zur selektiven Solubilisierung der MM mit verschiedenen Detergenzien und Proteasen zeigten, daß die Proteinkomponenten entscheidend für die Membranintegrität sind und somit einen Einfluß auf die Suspensionseigenschaften haben. Während intakte Magnetosomen stabile Suspensionen bilden, führte die vollständige Solubilisierung der MM zur Agglomeration der Magnetitkristalle. Weiterhin wurde ein kritischer Einfluß von pH-Wert und Ionenstärke auf die Suspensionseigenschaften nachgewiesen. Die isolierten Magnetosomensuspensionen werden gegenwärtig in verschiedenen Kooperationen eingehend hinsichtlich ihrer magnetischen Eigenschaften sowie Partikelgröße und Dispersion charakterisiert.

[1] Grünberg, K., Wawer, C., Tebo, B. M. and Schüler, D. A large gene cluster encoding several magnetosome proteins is conserved in different species of magnetotactic bacteria. Appl. Environ. Microbiol. 2001; 67: 4573-4582

[2] Schüler, D. and Frankel, R.B. Bacterial magnetosomes: Microbiology, biomineralization and biotechnological applications. Appl. Microbiol. Biotechnol. 1999; 52: 464-473

## **Herstellung und Charakterisierung von polymerverkapselten Magnetitpartikeln**

Liliana Ramirez, Katharina Landfester, Markus Antonietti

Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung

Am Mühlenberg 1, 14424 Potsdam/Golm, Deutschland

Mittels verkapselnder Miniemulsionspolymerisation ist es möglich, Polymerdispersionen herzustellen, die in ihrem Inneren einen möglichst hohen, homogenen Gehalt an superparamagnetischen Partikeln tragen. Dabei werden die Vorteile einer derartigen Syntheseroute ausgenutzt, um eine unabhängige Variation von Partikelgröße, Art und Stärke des magnetischen Momentes sowie der für biologische Erkennungsprozesse relevanten Partikeloberfläche zu erreichen. Durch eine dichte und homogene Polymerhülle kann wirkungsvoll die Korrosion oder chemische Reaktion der magnetischen Substanz weitgehend vermieden werden, was Langzeitanwendungen und Aufenthalt in biologischen Systemen deutlich vereinfacht.

Die Herstellung der Teilchen erfolgt durch einen Ad-Miniemulsionsprozess. Dazu werden hydrophobisierte Magnetitteilchen mit Hilfe von Tensid in Wasser emulgiert und mit einer Monomerminiemulsion versetzt. Durch gezielten Einsatz hoher Schwerfelder werden daraus Magnetit-beladene Nanotröpfchen erzeugt, die einer Polymerisation unterworfen werden können. Dieses Verfahren ergibt nanoverkapselte Partikeln mit einem Durchmesser zwischen 50-200 nm und einem durchschnittlichen Magnetitgehalt zwischen von über 50 %.

Eine Funktionalisierung der Partikel erlaubt eine gezielte Anbindung von Antikörpern an die Oberfläche, wodurch eine Gewebeselektivität erreicht werden kann.

Die Hybridpartikeln wurden durch Thermoanalyse, TEM, DLS und Magnetometrie charakterisiert. Zum Nachweis der vollständigen Verkapselung des Magnetits wurde die präparative Ultrazentrifugation angewandt.

Mögliche Anwendungsgebiete dieser polymerverkapselten Magnetit-Nanopartikeln bestehen in biologischen und medizinischen Separationsprozessen.

## Neue Perspektiven für Ferrofluide durch die Herstellung der Nanoteilchen mittels Laserablation

K. Moras<sup>2</sup>, R. Schaarschuch<sup>1</sup>, W. Riehemann<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut für Werkstoffkunde und Werkstofftechnik (IWW), Technische Universität Clausthal

<sup>2</sup> Ziolkowskistr. 30, 09599 Freiberg

An neuartige ferromagnetische nanoskalige Pulver für den Einsatz in Ferrofluiden sind folgende Anforderungen zu stellen: (1) Möglichst sphärische Pulverteilchen mit einem Durchmesser um 10 nm und möglichst schmaler Teilchengrößenverteilung, (2) Korrosionsbeständigkeit gegen Luftsauerstoff sowie gegen die für die Ferrofluidherstellung üblichen Suspensionsflüssigkeiten zur Erzielung hoher Langzeitstabilität, (3) hohe Sättigungspolarisation  $J_s$  des Pulvermaterials, da sie mit der Volumenkonzentration des Pulvers in der Flüssigkeit direkt proportional zur Sättigungspolarisation des gesamten Ferrofluids ist und (4) extreme Kristallanisotropiekonstante d.h. sehr klein oder sehr groß zur Erzielung von extremem Néel- oder Brown-Verhalten.

Die Verwendung reiner nanoskaliger Fe-, Ni- oder Co- Teilchen für Ferrofluide ist wegen deren sofortiger und vollständiger Oxidation bei Luftzutritt bisher nicht gelungen. Daher wird bislang nahezu ausschließlich nanoskaliges Pulver aus Magnetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) mit einer Sättigungspolarisation von nur  $J_s = 0,605$  T verwendet, wobei die Herstellung des Nanopulvers entweder durch Langzeitmahlen mit anschließendem Zentrifugieren oder durch chemische Ausfällung geschieht. Es ist jedoch bekannt, dass sich mit Mischkristallen  $\text{FeSi}$ ,  $\text{FeCo}$ ,  $\text{FeCr}$ ,  $\text{FeNi}$  im Vergleich zu den reinen Elementen eine höhere Oxidationsbeständigkeit und im Vergleich zu  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  eine immer noch erheblich höhere Sättigungspolarisation erreichen lässt. Weiterhin besteht die Möglichkeit, durch geeignete Wahl der Zusammensetzung eine verschwindende Anisotropiekonstante zu erzielen und damit Pulver mit Néels-Teilchen herzustellen.

Wir produzieren seit langem Nanopulver von ca. 10 nm durch Verdampfung von Festkörpern mit gepulstem Nd:YAG-Laserlicht und anschließender Kondensation des Dampfes in einem Aggregationsgas. Die Pulverteilchen sind dabei logarithmisch normalverteilt mit einer konstanten geometrischen Standardabweichung von ca. 1,3. Ein weiterer Vorteil bei der Nanoteilchenerzeugung durch Laserverdampfung gegenüber den anderen Herstellungsmethoden besteht darin, dass nahezu jeder Festkörper als Ausgangsmaterial eingesetzt werden kann. Das gilt auch für die Möglichkeit, Mischungen verschiedener Materialien zu verdampfen, wobei mit geeigneter Wahl der Ausgangsmaterialien, des Aggregationsgases und der Reaktionsbedingungen die gewünschten Mischkristalle als Nanoteilchen entstehen.

Mit diesem Verfahren ist es verhältnismäßig einfach, nanoskalige Pulver aus den relativ edlen Reinmetallen Cu, Ag und Au aber auch aus Oxidkeramiken herzustellen, die an Luft stabil sind. In letzter Zeit ist es gelungen mit dem Laserverdampfungsverfahren stabile nanoskalige ferromagnetische Pulver aus den Mischkristallen FeCr und FeSi herzustellen. Dazu wurden bestimmte Gemische unter bestimmten Umgebungsgasbedingungen, mit einem Nd:YAG- Laser verdampft.

Die genauen experimentellen Bedingungen, mit denen sich diese Pulver herstellen lassen, werden beschrieben. Die entstandenen nanoskaligen Pulver werden durch röntgendiffraktometrische und elektronenoptische Untersuchungen charakterisiert. Durch Wiederholung dieser Untersuchungen zu verschiedenen Zeiten nach der Herstellung werden Aussagen zur Langzeitstabilität der Pulver unter Luft gewonnen. Alle Untersuchungen weisen darauf hin, dass die teilweise gute Langzeitstabilität der erhaltenen Nanopulver auf passivierende Oxid- bzw. Nitridschichten auf den Teilchen, die bei der Herstellung entstanden sind, zurückgeführt werden kann.

## Ba-Ferritpulver für magnetische Flüssigkeiten mit erhöhter Neel-Relaxationszeit

R. Müller, R. Hiergeist, W. Gawalek  
Institut f. Physikalische Hochtechnologie, Jena  
[robert.mueller@ipht-jena.de](mailto:robert.mueller@ipht-jena.de)

Nanokristalline Bariumhexaferritpartikel  $\text{BaFe}_{12-2x}\text{Co}_x\text{Ti}_x\text{O}_{19}$  sind für Anwendungen in magnetischen Flüssigkeiten interessant, da sie über eine um etwa eine Größenordnung größere intrinsische Anisotropie als Magnetit, dem üblichen Ferrofluidpigment, verfügen. Partikel um 10nm verhalten sich superparamagnetisch, wogegen größere Partikel bis ca. 30nm je nach Temperatur und Messfrequenz einen Übergang zum Einbereichs (Stoner-Wohlfarth)-Verhalten zeigen. Neben der Korngröße hängt die Anisotropieenergie  $K_1V$ , und damit die Néelsche Relaxationszeit, auch vom CoTi-Dotierungsgrad  $x$  ab. Partikel mit geeigneter Néelscher Relaxationszeit könnten zur Detektion biologischer Bindungsreaktionen genutzt werden [1]. Fluide aus größeren formanisotropen Partikeln sollten bei Ausrichtung im Magnetfeld neue anisotrope rheologische Eigenschaften zeigen.

Zur Herstellung der Ba-Ferritpartikel haben wir das Glaskristallisationsverfahren [2] genutzt, da hierbei sowohl die intrinsische Anisotropie ( $K_1$ ) als auch die Korngröße in einem weiten Bereich eingestellt werden kann.

Die Hystereseverluste fixierter Pulverpartikel in Abhängigkeit von der maximalen Feldaussteuerung wurden mittels Hysteresograph bei 50 Hz bestimmt. Dabei wurden uniaxial-anisotrope Ferrite mit verschiedenen Dotierungsgrad (M-Typ-Bariumhexaferrit, verschieden hart) und unterschiedlichen Korngrößen, sowie planar anisotrope Ferrite (M-Typ und W-Typ) untersucht. Es wurde festgestellt, daß die Aussteuerungsfeldstärke, die zur Erzeugung großer spezifischer Verluste ( $\text{SLP}(H)/\text{SLP}(H_{\text{Sättigung}})$  SLP: specific loss powder), nötig ist, näherungsweise mit der Koerzitivfeldstärke der Ferritpulver (quasistatisch gemessen) korreliert.

Hystereseverhalten und Anfangssuszeptibilität sowie Korngrößenberechnungen aus magnetischen Daten wurden an einem Ferrofluid aus superparamagnetischen Teilchen (siehe auch [3] und [4]) und einem Fluid aus Teilchen im Übergangsbereich zum stabilen Einbereichsverhalten untersucht. Strukturuntersuchungen mit nicht-magnetischen Methoden (TEM, SANS [4]) wurden durchgeführt.

[1] W. Weitschies, private Mitteilung

[2] W. Schüppel, R. Müller et al., in "Scientific and Clinical Applications of Magnetic Carriers", Plenum Press (Eds. U. Häfeli u.a.), New York, London 1997, 109-115

[3] R. Müller, R. Hiergeist, et al, *J. Magn. Magn. Mater.* 201, (1999) 34-37

[4] R. Müller, R. Hiergeist, et al, *J. Magn. Magn. Mater.* im Druck (Proceed. ICMF9)



## NMR-Experimente an fluiden Phasen in Gegenwart dispergierter magnetischer Nanopartikel

Annegret Terheiden, Christian Mayer

Institut für Chemie, Gerhard-Mercator-Universität Duisburg, 47 057 Duisburg

Flüssige Dispersionen para- oder ferromagnetischer Partikel (z.B. Ferrofluide) werden durch die Einwirkung eines äußeren magnetischen Feldes mehr oder weniger stark in ihrer Struktur beeinflusst. Neben einer Ausrichtung der individuellen magnetischen Momente beobachtet man dabei teilweise die Entstehung anisotroper Verteilungen über den Raum, beispielsweise unter Bildung von Ketten entlang der Magnetfeldlinien. Alle Veränderungen dieser Art spiegeln sich direkt in der Geometrie des magnetischen Streufelds wider, das aus der Gegenwart der Partikel resultiert. Eine genaue Kenntnis der Abhängigkeit der lokalen Feldstärke von den Ortskoordinaten lässt somit eindeutige Rückschlüsse auf die Partikelverteilung zu.

Einen einfachen und vielseitigen experimentellen Ansatz zur Messung der Streufeldgeometrie bietet die kernmagnetische Resonanzspektroskopie (NMR). Dabei werden Kernspins beobachtet, die sich im Medium zwischen den Partikeln aufhalten (z.B.  $^{13}\text{C}$ -Spins der kontinuierlichen organischen Phase). Die Resonanzfrequenz jedes einzelnen Spins hängt unter den gegebenen Bedingungen lediglich von der Stärke des lokalen Magnetfelds ab. Das insgesamt erhaltene Spektrum, das aus der Überlagerung der Einzelspektren aller Spins hervorgeht, reflektiert somit die geometrische Verteilung der Magnetfeldintensität über den Raum und damit beispielsweise eine Kettenbildung (Abb. 1). Durch eine zunehmende Selbstdiffusion der beobachteten Moleküle wird die erhaltene Verteilungsfunktion in wachsendem Maße ausgemittelt, was zu einfacher messbaren Spektren führt, gleichzeitig aber die verfügbare Information deutlich einschränkt (Abb. 2). Darüber hinaus beeinflusst die Probengeometrie das Messergebnis.

Die zu erwartenden NMR-Spektren unter Berücksichtigung aller Gegebenheiten (Partikelverteilung, Diffusionskoeffizient, Probengeometrie) sind durch numerische Spektrensimulation zugänglich. Dadurch eröffnen sich vielfältige experimentelle Ansätze zu Untersuchung der Partikelanordnung sowie der Selbstdiffusion des kontinuierlichen Mediums.

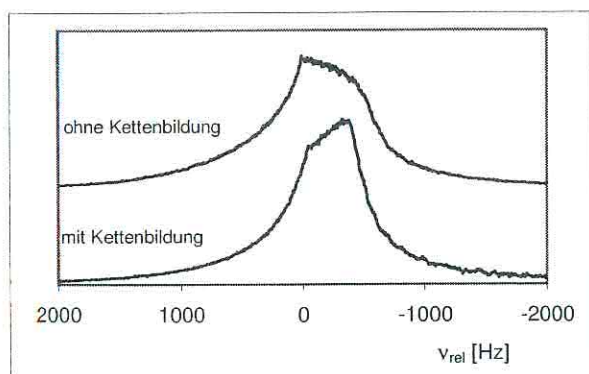


Abb. 1: Simulierte  $^{13}\text{C}$ -Spektren eines fluiden Mediums bei kubisch-raumzentrierter Anordnung einzelner Partikel (oben) und bei beginnender Bildung von Partikelketten (unten).

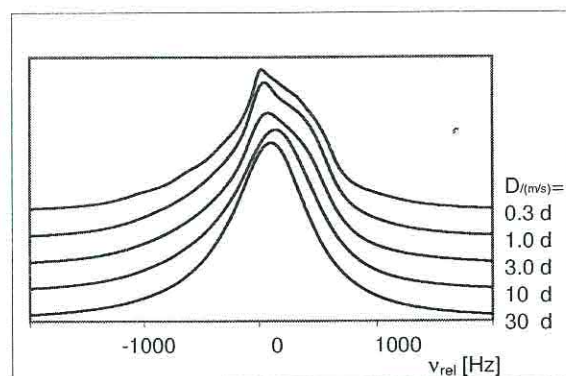


Abb. 2: Simulierte  $^{13}\text{C}$ -Spektren eines fluiden Mediums in Gegenwart von magnetischen Nanopartikeln in kubisch-raumzentrierter Anordnung für verschiedene Selbstdiffusionskoeffizienten  $D$  ( $d =$  minimaler Partikelabstand).

## Raman study of magnetic field effects on surfacted and ionic ferrofluids

J.E. Weber, A.R. Goñi, and C. Thomsen

Institut für Festkörperphysik, Technische Universität Berlin

Hardenbergstr. 36, 10623 Berlin, Germany

Colloidal suspensions of magnetic nanoparticles, so-called ferrofluids, are being increasingly studied because of their peculiar physical properties and applications. In recent years, special emphasis has been laid on the investigation of the interactions between magnetic particles in the fluid and the formation of structures, clusters and other configurations under the influence of a magnetic field. We present a study of the effects of an external magnetic field up to 0.25 T in both surfacted and ionic ferrofluids using Raman spectroscopy in backscattering geometry. The measurements were performed with parallel and crossed linear polarization to establish Raman selection rules. We systematically varied temperature, magnetic field and particle concentration of the samples to investigate the generation of structures.

The spectra of surfacted ferrofluids are dominated by the Raman modes of surfactant and water. With increasing magnetic field as well as particle concentration the spectra display a decrease in the total intensity of the Raman scattered light. Furthermore, a broad peak with  $\text{FWHM} \sim 3000 \text{ cm}^{-1}$ , which we attribute to a magnetic excitation, becomes apparent in the spectra at around  $4400 \text{ cm}^{-1}$ . Its intensity increases in proportion to the magnetization of the ferrofluid. Our results can be explained if one assumes that in the presence of a magnetic field there is a local increase in the concentration of the magnetic particles because of the formation of an ordered structure.

The Raman spectra of the electrostatically stabilized ferrofluids also indicate the incipient formation of a structure in a magnetic field, but the stability of this configuration depends on the concentration of the magnetic particles and their diameter.

## Charakterisierung magnetischer Nanopartikel durch temperaturabhängige Messung der Magnetrelaxation

P. Weber<sup>1</sup>, E. Romanus<sup>1,2</sup>, S. Prass<sup>1</sup>, C. Groß<sup>2</sup>, A. Reinhard<sup>1</sup>, W. Weitschies<sup>2</sup>, D. Berkov<sup>3</sup>  
<sup>1</sup>Institut f. Festkörperphysik, Friedrich-Schiller-Universität Jena, <sup>2</sup>Institut für Pharmazie,  
Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald, <sup>3</sup>Innovent e.V. Jena  
[Peter.Weber@uni-jena.de](mailto:Peter.Weber@uni-jena.de)

Der Einsatz der Relaxometrie mit Markern aus magnetischen Nanopartikeln (MNP) eröffnet neue Einsatzgebiete in der medizinischen *in vitro*- und *in vivo*-Diagnostik. Eine wesentliche Voraussetzung für die Einführung dieser Diagnostikverfahren ist die deutliche Verbesserung der Empfindlichkeit u.a. durch die Entwicklung von MNP mit hoher Signalausbeute.

Bei der Néel-Relaxometrie bestimmt insbesondere die Relaxationszeit die Signalausbeute. Während die Relaxationszeit für die Brownsche Relaxation im Wesentlichen proportional zum hydrodynamischen Teilchenvolumen ist, hängt sie für die Néelrelaxation exponentiell vom Kernvolumen  $V$  und der Anisotropiekonstante  $K$  der Teilchen ab.

$$\tau_N = \frac{1}{f_0} e^{\frac{KV}{k_B T}} \quad (1)$$

Dabei ist  $f_0$  eine charakteristische Frequenz in der Größenordnung  $10^9 \text{s}^{-1}$ . Für MNP, die optimal für die Néelrelaxation geeignet sind, stellt Gl. (1) eine sehr weitgehende Bedingung dar, da reale Ferrofluide aus Teilchen unterschiedlicher Größe und Anisotropie bestehen, wobei unter Umständen zwischen den Teilchen eine magnetische Wechselwirkung (z.B. bei Agglomeration) besteht. Derartige Teilchensysteme müssen realistisch nicht durch Verteilung der geometrischen Größe oder der magnetischen Momente, sondern durch die Verteilung der Energiebarrieren  $E=KV$  charakterisiert werden [1-3]. Die Optimierung von Teilchen für die Magnetrelaxation erfordert die Bestimmung der Verteilung der Energiebarrieren sowie die gezielte Beeinflussung der Verteilung durch geeignete Präparationsverfahren.

Im Beitrag werden dazu eine neue Methode zur Charakterisierung von MNP und deren Grundlagen vorgestellt. Sie basiert auf der Messung und Auswertung des Néelrelaxationssignals in einem konstanten Zeitfenster in Abhängigkeit von der Temperatur der MNP. Damit kann im Gegensatz zu den etablierten Charakterisierungsverfahren, die im Wesentlichen die Teilchengrößenverteilung liefern, die Verteilung der Energiebarrieren  $KV$  ermittelt werden. Diese Verteilung der Energiebarrieren ist neben den diagnostischen Anwendungen u.a. auch für grundlegende Eigenschaften von MNP sowie für die Entwicklung von MNP für Hyperthermieanwendungen von Bedeutung.

Es wurden erste Untersuchungen der Temperaturabhängigkeit der Néelrelaxation an ausgewählten Ferrofluiden durchgeführt. Sie erfolgten mit dem an der FSU Jena entwickelten Relaxometriemeßplatz [4] in einem Temperaturbereich von 77K bis 350K. Die Kennlinien werden diskutiert und die Anforderungen an das erforderliche quantitative Auswerteverfahren vorgestellt.

[1] D. V. Berkov, R. Kötzitz, *J. Phys. Condens. Matter*, **8**, 1257-1266 (1996).

[2] R. Kötzitz, *Dissertation an der FU Berlin* (1997).

[3] D. V. Berkov, *J. Magn. Magn. Mat.*, **186**, 199-213 (1998).

[4] J. Schambach, L. Warzemann, P. Weber, R. Kötzitz, W. Weitschies, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **9** (2), 3527-3530 (1999).

## Structure investigations of ferrofluids and its precursors by SANS with polarized neutrons

A. Hoell<sup>1</sup>, A. Wiedenmann<sup>1</sup>, R. Müller<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Hahn-Meitner-Institut, Department of Structural Research, Glienicke Straße 100, D-14109 Berlin, Germany.

<sup>2</sup> Institut für Physikalische Hochtechnologie, Winzerlaer Straße 10, D-07745 Jena, Germany.  
[hoell@hmi.de](mailto:hoell@hmi.de)

A new type of magnetic liquids with Ba-ferrite,  $\text{BaFe}_{12-2x}\text{Ti}_x\text{Co}_x\text{O}_{19}$  ( $x=0.8$ ), as magnetic nano-particles has been developed [1] using a modified glass crystallisation method for the preparation of the particles. The particles grow isolated in a glass matrix during a thermal treatment and were leached out by dissolving the matrix. The Ba-ferrite particles are superparamagnetic at room temperature and have a very high uniaxial crystalline anisotropy energy compared with magnetite. Ba-Ferrite ferrofluids were prepared using oleic acid as surfactant and dodecane,  $\text{C}_{12}\text{H}_{26}$ , as carrier liquid.

In order to evaluate the complex structure of the Ba-ferrite ferrofluids (magnetic cores, surfactant layers, magnetic nanostructure, existence of aggregates and free surfactant molecules) we performed Small Angle Neutron Scattering (SANS) experiments. Different ferrofluids with a particle content between 1 and 4 vol % have been measured in mixtures of protonated and deuterated dodecane for contrast requirements. In addition, different preparation states including the particle containing glass ceramics, the pure and coated particles have been investigated using the powerful polarisation option "SANSPOL" at the SANS instrument of the HMI in Berlin [2]. The combination of magnetic contrast variation and of H/D variation of the carrier liquid allowed different nanosized components of the complex multiphase system to be identified: i) weakly magnetic Ba-ferrite cores coated by an impenetrable shell of surfactants. ii) aggregates about 2.5 times larger than the particles containing 1/3 of the magnetisation and iii) nonmagnetic free surfactant molecules.

[1] Müller, R., Hiergeist, R., Gawalek, W., Hoell, A., Wiedenmann, A., Magnetic and structural investigations on Barium Hexaferrite Ferrofluids JMMM, (2002) in print.

[2] Wiedenmann, A., Physica B 297 (2001) 226-233.

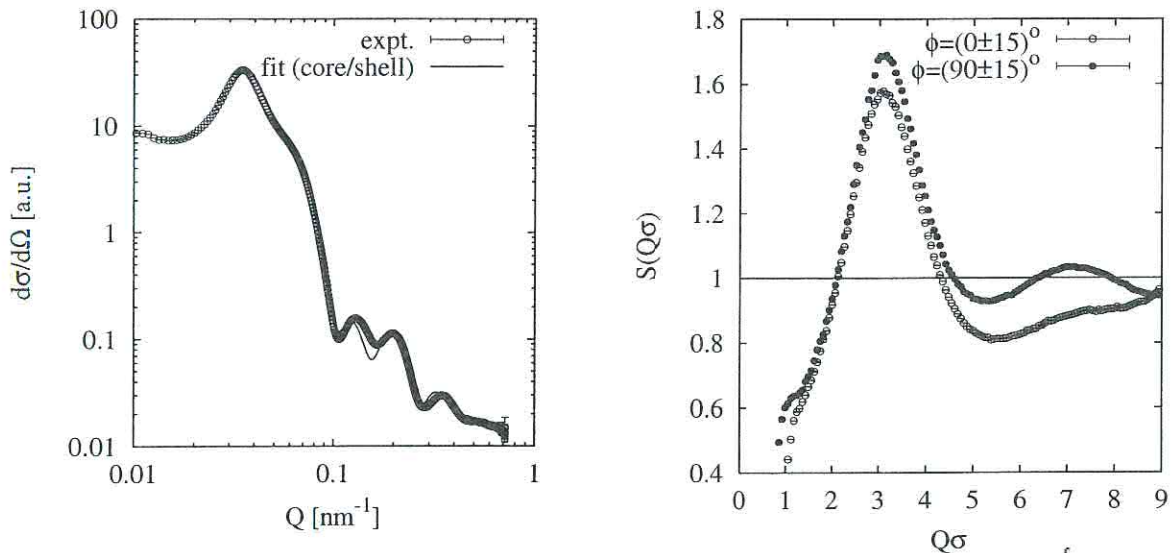
# Structure and Dynamics of Complex Liquids with Magnetic Dipole-Dipole Interaction by Means of SAXS and XPCS

J. Wagner<sup>1</sup>, T. Autenrieth<sup>1</sup>, W. Härtl<sup>1</sup>, R. Hempelmann<sup>1</sup> and G. Grübel<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universität des Saarlandes, D-66123 Saarbrücken, Germany

<sup>2</sup>ESRF, Grenoble, France

Complex liquids consisting of core-shell colloids with magnetic cobalt ferrite core and silica shell are studied by means of static and dynamic X-Ray small angle scattering in dependence on an external magnetic field. These particles interact via the sum of an isotropic screened Coulomb potential and an additional anisotropic magnetic dipole-dipole interaction. In presence of an external magnetic field (1.5T), the magnetic moments arrange parallel to the field direction. In this configuration, an additional attraction parallel and an additional repulsion perpendicular to the magnetic field induces an asymmetry in the static structure factor visible as anisotropic scattering pattern. Hereby, the interparticle correlations are enhanced perpendicular to the field direction and reduced parallel to the field direction, respectively. As consequence, the maximum of  $S(Q)$  increases perpendicular and decreases parallel to the external field, whereas the position of the structure peak,  $S(Q_{max})$ , is nearly unchanged. By means of XPCS we could also observe differences in the collective diffusion for different directions: the collective diffusion is enhanced parallel and slowed down perpendicular to the external field. The results of static and dynamic scattering experiments imply that the time-averaged equilibrium distances are nearly unchanged whereas the range of interparticle correlations is influenced by the anisotropic dipole-dipole interaction.



Left hand side: Scattering of  $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{SiO}_2$  core-shell particles without external magnetic field.  
Right hand side: Structure factor parallel and perpendicular to an external magnetic field.

## **Bestimmung der Messunsicherheit bei der Messung der Anfangsuszeptibilität von Ferrofluiden**

P. Meindl, C. Elster, L. Trahms

Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Institut Berlin

[Peter.Meindl@ptb.de](mailto:Peter.Meindl@ptb.de)

Mit dem 1993 erschienenen "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement" (GUM) [1] wird von der International Organisation for Standardisation (ISO) und anderen internationalen Institutionen ein Leitfaden zur Angabe von vollständigen Messergebnissen empfohlen. Darin wird u.a. eine standardisierte Berechnung der Messunsicherheit in Anlehnung an statistische Konzepte festgelegt. Die Anwendung dieses vereinheitlichten Verfahrens (auch in der magnetischen Messtechnik) ist notwendig, um in sich konsistente, transferable Messergebnisse zu erhalten. Hierzu sind Modelle der Auswertung der Messung aufzustellen, die die Einflüsse möglichst aller Eingangsgrößen auf das Messergebnis beschreiben [1, 2].

Die standardisierte Berechnung der Unsicherheit einer Messung ermöglicht zunächst eine Aussage über die Qualität der Messung. Ein Messergebnis kann erst dann als vollständig angesehen werden, wenn es auch Angaben über die Unsicherheit der Messung beinhaltet. Erst die Angabe des vollständigen Messergebnisses macht die Messung vergleichbar mit Messungen an anderen Messgeräten. Darüber hinaus werden bei der Erstellung eines Messunsicherheitsbudgets die Beiträge der unterschiedlichen Eingangsgrößen zur Unsicherheit des Messergebnisses transparent, was insbesondere für eine Optimierung der Messung von Nutzen ist. Die Auswertung einer Messung wird zweckmäßigerweise in vier Schritten ausgeführt [DIN 1319, Teil 3]. Zunächst wird ein umfassendes, mathematisches Modell der Abhängigkeit der Messgröße von allen Eingangsgrößen formuliert. Nach der Vorbereitung der Eingangsdaten, d.h. der Ermittlung der besten Schätzwerte der Eingangsgrößen und der zugehörigen Standardmessunsicherheiten, wird schließlich mit Hilfe des Modells das Messergebnis berechnet. Für jede Messung ist darüber hinaus jeweils ein Messunsicherheitsbudget aufzustellen, aus dem die Auswirkungen der Messunsicherheiten der Eingangsgrößen auf die Unsicherheit der Messgröße abgeleitet werden kann. Das jeweilige Messunsicherheitsbudget ist bei vorliegendem Modell der Auswertung gemäß [1] vorgegeben. Am Ende der Auswertung kann schließlich das vollständige Messergebnis incl. der Standardmessunsicherheit angegeben werden.

Vorgestellt wird die Anwendung dieser Vorgehensweise auf ein Messverfahren zur Bestimmung der magnetischen Anfangsuszeptibilität von Ferrofluiden (APG513a und EMG900, FerroTec). Dabei wurde ein kommerzielles DC-Suszeptometer (Magnetic Property Measurement System, MPMS) des Herstellers Quantum Design genutzt. Die explizite Ausführung des GUM auf dieses relativ komplexe Messproblem illustriert die in der messtechnischen Praxis im einzelnen erforderlichen Schritte und mag als Vorlage für Anwendungen auf ähnliche messtechnische Verfahren dienen.

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

[1] "Guide to the expression of uncertainty in measurement", *International Organisation for Standardisation* (1993/95). dtsh: "Leitfaden zur Angabe der Unsicherheiten beim Messen", 1. Auflage 1995, DIN/Beuth-Verlag.

[2] EA-4/02 "Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration", European co-operation for Accreditation, 1999. (als pdf-File: <http://www.european-accreditation.org>)

## Magnetische Kurzzeitrelaxometrie realer Ferrofluide

D. Eberbeck<sup>1</sup>, S. Hartwig<sup>1</sup>, U. Steinhoff<sup>1</sup>, L. Trahms<sup>1</sup>, Th. Götze<sup>2</sup>, N. Buske<sup>2</sup>, K. Landfester<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Berlin, <sup>2</sup> Berlin Heart AG, Berlin, <sup>3</sup> Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung, Potsdam/Golm

Die Relaxation des magnetischen Momentes der Nanopartikel in verdünnten Ferrofluiden wird bei Vernachlässigung der Dipol-Dipol-Wechselwirkung durch 2 Mechanismen bestimmt, die Brownsche und die Néelrelaxation. Die quantitative Bestimmung der Teilchenfraktionen, die nach Brown bzw. Néel relaxieren, erlaubt es, die Bindung von magnetischen Nanopartikeln zu beobachten. Das stellt die Grundlage magnetischer Immunoassays dar. Ziel ist es, Nanopartikel zu verwenden, die eine optimale Größe und Anisotropie der magnetischen Kerne aufweisen, so daß die Néelrelaxationszeit ( $\tau_N$ ) wesentlich langsamer als die Brownsche Relaxationszeit ( $\tau_B$ ) wird. Damit wird eine klare Trennung der Beiträge von gebundenen und ungebundenen Teilchen zum Meßsignal möglich.

Gefriertrocknen der Ferrofluide, die auf Wasser versetzt mit Mannit basierten, fixierte die Teilchen und unterband somit die Brownsche Relaxation. Somit konnte das Néelsche Relaxationsverhalten separat beobachtet werden. Die Proben mit mittleren Kerngrößen von 10-15 nm lieferten Anfangsmagnetisierungen von etwa 30 mT/mol bei einer Meßgenauigkeit des verwendeten SQUID-Meßsystems von unter 1 pT.

Die Momente frei beweglicher Teilchen in flüssigen Proben relaxieren aufgrund der Wirksamkeit beider Mechanismen nicht langsamer als in verfestigten Proben. Ein solch reguläres Verhalten wurde in den untersuchten Dispersionen mit Magnetitteilchen, deren Hülle aus Carboxymethyldextran, Ölsäure, oder Ölsäure+Polystyrol bestand (Dicke > 2 nm), gemessen ( $\tau_N \approx 6 \dots 20 \tau_B$ ). Über einen Konzentrationsbereich, der sich über 3 Größenordnungen erstreckte, konnte ein linearer Zusammenhang zur Signalstärke nachgewiesen werden.

Einige der untersuchten flüssigen Proben zeigten jedoch ein abweichendes Verhalten: Die Relaxationszeit variierte mit der Konzentration und erreichte z.T. Werte, die in der Größenordnung der Néelrelaxationszeit lagen. Diese Proben zeichneten sich dadurch aus, daß die Magnetitkerne größer als 10 nm waren und die Dicke der Adsorptionsschicht nur etwa 0.6 nm betrug (Dimension des Zitronensäuremoleküls). Die zwischenpartikuläre magnetische Dipol-Dipol-Wechselwirkung war damit wesentlich stärker als für die Teilchen mit den dickeren Adsorptionsschichten. Das könnte die Bildung großer Aggregate verursachen und damit eine mögliche Ursache für das starke Ansteigen der Relaxationszeit in den genannten flüssigen Proben sein.

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

## Größenverteilung eines Ferrofluids nach magnetischer Fraktionierung

C. Groß<sup>1</sup>, K. Büscher<sup>2</sup>, E. Romanus<sup>1</sup>, C.A. Helm<sup>2</sup> & W. Weitschies<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut für Pharmazie, Universität Greifswald, Jahnstr.17, 17487 Greifswald

<sup>2</sup>Institut für Angewandte Physik, Universität Greifswald, Jahnstr. 16, 17487 Greifswald  
[chgross@pharmazie.uni-greifswald.de](mailto:chgross@pharmazie.uni-greifswald.de)

Ferrofluide werden für die Anwendung in der Biologie, Biochemie und Medizin zunehmend interessanter. Dabei sind die Eigenschaften der einzelnen Nanopartikel, die im Ferrofluid enthalten sind, von großer Bedeutung. Besonders wichtig sind sie z.B. für hohe Relaxationssignale bei der Nutzung als Kontrastmittel oder für Separationsanwendungen in der magnetischen Hochgradiententechnik.

Wie hinlänglich bekannt ist, zeigen Ferrofluide, die nach den klassischen chemischen Syntheseverfahren hergestellt werden, eine breite Partikelgrößenverteilung.

Ziel der Arbeit ist es, die Partikelgrößenverteilung in einem auf wässriger Basis hergestellten Ferrofluid zu untersuchen. Zu diesem Zweck wurde das Ferrofluid magnetisch fraktioniert [1] und mittels Kraftmikroskopie [2] und Photonenkorrelationspektroskopie charakterisiert.

Die magnetische Fraktionierung trennte die Partikel entsprechend der magnetischen Momente auf. Dabei sind die magnetischen Momente proportional zur Menge an magnetischen Material in den Einzeldomänenpartikeln bzw. zum Volumen der magnetischen Partikel. Das ließ sich durch die Ergebnisse der Messungen per PCS, MRX und Kraftmikroskopie bestätigen.

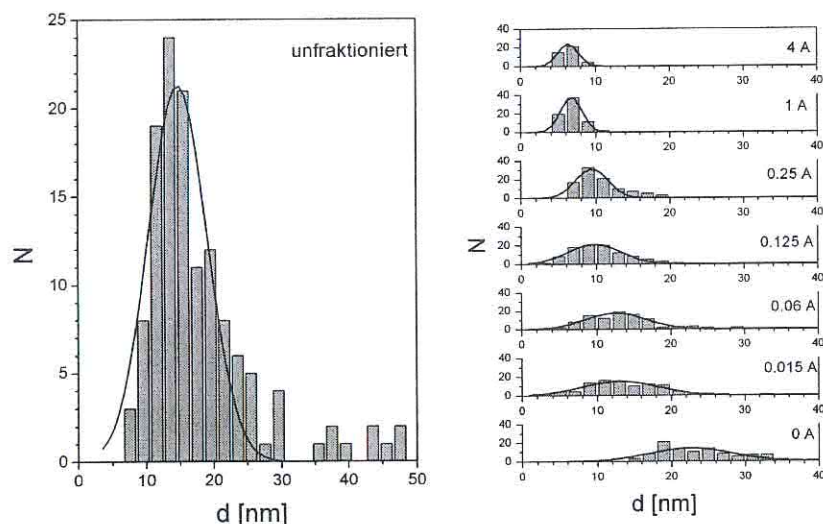


Abb.1: Mit AFM gemessene Größenverteilung der Nanopartikel eines unfraktionierten Ferrofluids und repräsentativer Fraktionen

[1] T. Rheinländer, J. Justiz, A. Haller, R. Kötz, W. Weitschies, W. Semmler, *IEEE Trans. Magn.* 35: 4055-4057 (1999)

[2] J. Schmitt, P. Mächtle, D. Eck, H. Möhwald and C.A. Helm, *Langmuir* 15: 3256 (1999)



## Approaches for the determination of structure factors in concentrated Ferrofluids.

A. Heinemann, A. Wiedenmann, A. Hoell and M. Kammel  
Hahn-Meitner Institute Berlin, Department of structure investigation  
heinemann@hmi.de

Small-angle scattering methods have been successfully used for determination of nanometer scale structures in various kinds of ferrofluids [1,2]. For this purpose, in general, diluted systems were used. Under the assumption that inter-particle interferences are negligible the measured scattering intensity is related to the sum of all single particle intensities. The explicit correlation of model parameters with the measured macroscopic scattering intensity permits standard least square fitting procedures to be applied to determine the model parameters in a straightforward way. It is clear, that for more concentrated systems this approximation is no longer correct.

If the inter-particle distances run under a wavelength dependent length the coherence condition for the scattering waves are fulfilled over a distance greater than the mean particle-particle spacing. In this case one is forced to take this inter-particle interferences into account. The first question which appears concerns the critical concentration. Also in a diluted system of randomly distributed particles the coherence condition is certainly fulfilled for at least some of the particles. Whenever interference parts are neglected, one has to estimate the errors for the structure model. This is a very hard task for the general case and so we will follow an alternative way. In this contribution we present different ways for introducing a structure factor. Starting from the Percus-Yevick approach [3,4] which is exact for systems of monodisperse spheres we discuss different ways to generalize this. The aim of this work is to explain the evolution of scattering curves in ferrofluids of different concentrations and estimate the influence of the inter-particle interference to the modeling procedure for the composition of the nanometer scale particles. From the basics of the Percus-Yevick approach it is clear that this method works only for randomly distributed particles in a uniform matrix. If there is any kind of force between the particles which may introduce some kind of symmetry breaking the model is no longer applicable. Since ferrofluids are built of magnetic particles surrounded by a non magnetic shell must be some magnetic interaction between these particles. This magnetic dipole-dipole interaction can cause anisotropic ordering effects which should influence the scattering patterns. If this interaction leads to locally ordered regions of some particles like rings or chains the Percus-Yevick approach makes no sense any more. The Reversed Monte-Carlo method [5] is one possible way out of structure simulation. We outline a scheme how to use this general technique in small-angle scattering.

[1] M. Kammel, A. Hoell and A. Wiedenmann, *Script. Mater.* **44**, 2341-2345 (2001)

[2] A. Wiedenmann, *Magnetohydrodynamics* **37**, 236-242 (2001)

[3] N.W. Ashcroft and J. Lekner, *Phys. Rev.* **145**, 83-90 (1966)

[4] Heinemann, *Dissertation TU-Dresden*, 50-52 (2001)

<http://hsss.slub-dresden.de/hsss/servlet/hsss.urlmapping.MappingServlet?id=1004968857625-2227>

[5] R.L. McGreevy, M.A. Howe and J.D. Wicks, *RMCA. Version 3 manual*, NFL Studsvik internal report (1993)

## **Complex structure and magnetic correlations of ferrofluids studied by SANS with polarised neutrons**

M. Kammel, A. Hoell, A. Heinemann, A. Wiedenmann  
Hahn-Meitner-Institut, Glienicker Strasse 100, D-14109 Berlin, Germany.  
e-mail:Kammel@hmi.de

Ferrofluids are stable colloidal dispersions of magnetic nano-sized particles in suitable carrier liquids. The particles are coated by nonmagnetic organic surfactants in order to prevent agglomeration. Growing interest is directed on new ferrofluids for advanced medical applications, for which the microstructures has to be known precisely. Contrast variation using polarised neutrons (SANSPOL) has been applied in combination with various H/D mixtures of carrier liquids to analyse the complex nano-structure by small angle scattering. In diluted ferrofluids based on Magnetite or Cobalt we were able to determine reliably magnetization and size distributions of magnetic cores. Thickness and composition of the shell has been evaluated, which was found to be impenetrable for the solvents. The new SANSPOL technique allowed weakly magnetic aggregates and free surfactants to be identified in the multiphase systems.

Inter-particle correlation and field induced arrangements have been studied in series with higher particle concentrations up to 6 vol%. For larger particles alignment in chains along the magnetic field is theoretically predicted. In order to distinguish the structure factor from the magnetic particle form-factors measurements have been performed in external fields applied perpendicular and parallel to the neutron beam. In addition, the freezing process of the magnetic liquids has been studied in zero and non-zero fields. Finally, the combination of these different experiments improved the consistency of the models describing the particles and their spatial arrangements. (This work is supported by the DFG grant: WI1151/2)

## Low Temperature Susceptibility of Concentrated Ferrocolloids

A.F. Pshenichnikov<sup>1</sup>, A.V. Lebedev<sup>1</sup>, V.V. Mekhonoshin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Perm, Russia

<sup>2</sup>Institut für Theoretische Physik, Universität Magdeburg  
[vladislav.mekhonoshin@physik.uni-magdeburg.de](mailto:vladislav.mekhonoshin@physik.uni-magdeburg.de)

The initial susceptibility of concentrated magnetite ferrocolloids is investigated experimentally and by the numerical simulation. In Fig. 1 the data for the ferrofluid with decan as a carrier liquid are presented. The melting point of the sample is 238.6 K. The blocking of Brownian degrees of freedom of colloidal particles leads to the abrupt decrease of the initial susceptibility at this temperature. The experimental data in Fig. 1 are compared with the Weiss model of the effective field, the algebraic perturbation theory (APT) [1], and the Born Mayer expansion (BME) [2]. The effective field constant within the Weiss model was varied to get the best fit at high temperatures. The value 0.045 is used in Fig. 1. Other two models require knowledge of the hydrodynamic concentration of the particles. The density at the room temperature is definitely higher than 0.5 and it is presumable lower than 0.6 (0.605 is the random packing density limit for monodisperse system). The gray regions in the figure extend over this interval of the hydrodynamic concentrations. The aggregation parameter at the highest temperature is determined in such a way that the susceptibility predicted by the model coincides with the experimental value. The aggregation parameter and the concentration at arbitrary temperatures were determined taking into account thermal expansion of the sample and dependence of the saturation magnetization of magnetite on the temperature. It is seen that even with two fit parameters, the Weiss model fails to describe the susceptibility at low temperatures. The best agreement is observed in the case of the algebraic perturbation theory (with a single fit parameter).

A number of improvements in the Monte Carlo simulation algorithm were made. First, the shape of the system is now ellipsoidal. Thus, the demagnetizing factor is lower than that for a spherical system. Then, the boundary effects are weakened. The modeled system is now cut from a large "bulk" ensemble of particles. The particles at the boundary are included in the system with probabilities depending on their positions. The improvements allows us to obtain reliable results for strongly dipolar systems with high concentration of particles. Our results demonstrates a good agreement between the experiment, the algebraic perturbation theory, and the Monte Carlo simulation in the whole interval of tested temperatures. There is no sign of any ferromagnetic ordering at a finite temperature.

A.F.P. and A.V.L. acknowledge the financial support of Russian Foundation for Basic Researches (project N 01-02-17839)

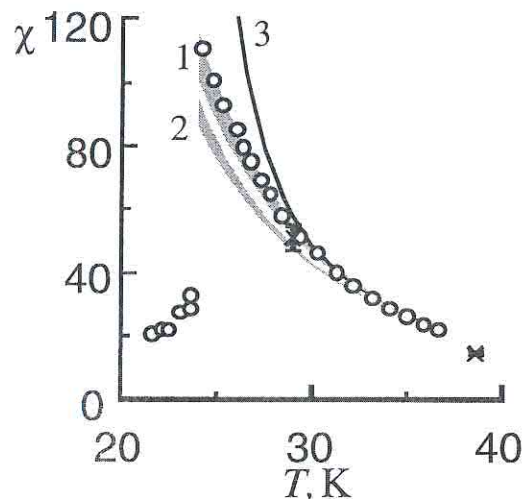


Fig. 1 Initial susceptibility of the concentrated ferrocolloid versus the temperature. Region 1: APT, 2: BME, curve 3: the Weiss model. Circles denote the experimental data, crosses - the simulation results.

[1] V.I. Kalikmanov, *Statistical Physics of Fluids* (Springer Verlag, 2001)

[2] B. Huke and M. Lücke, *Phys. Rev. E* **62**, 6875-6890 (2000)

## Magnetisierungsrelaxation und Mikrostruktur von Ferrofluiden unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung

S. Odenbach, J. Fleischer, A. Zubarev\*

ZARM, Universität Bremen, Am Fallturm, 28359 Bremen, Germany

\* Ural State University, Ekaterinburg, Russland

odenbach@zarm.uni-bremen.de

Die Magnetisierungsdynamik von Ferrofluiden stellt eine der Grundlagen für die Beschreibung ferrohydrodynamischer Vorgänge dar. Klassischerweise folgt man hierbei dem Ansatz von Shliomis [1], der ausgehend vom mikroskopischen Bild nicht wechselwirkender, sphärischer, magnetisch harter Teilchen unter dem Einfluss magnetischer und viskoser Drehmomente hergeleitet ist. Nachdem dieser Ansatz zahlreiche experimentell gefundene Phänomene in Ferrofluiden – wie beispielsweise starke magnetoviskose und viskoelastische Effekte [2] nicht erklären kann stellte sich die Frage nach einer Magnetisierungsdynamik ohne mikroskopische Grundannahmen.

Müller und Liu [3] erarbeiteten unter diesen Voraussetzungen einen neuen Ansatz auf der Basis der irreversiblen Thermodynamik. Als Resultat erhält man eine Magnetisierungsdynamik, die neben den bekannten Termen Ausdrücke im Zusammenhang mit der Divergenz des Geschwindigkeitsfeldes und dem symmetrischen Geschwindigkeitsgradienten enthält.

In Experimenten zur Magnetisierungsrelaxation in einem Ferrofluid zwischen konzentrischen Zylindern konnte gezeigt werden, dass der Transportkoeffizient ( $\lambda_2$ ), der im Zusammenhang mit dem Auftreten des symmetrischen Geschwindigkeitsgradienten in der Magnetisierungsdynamik steht, von Null verschieden ist [4].

Da der Wert von  $\lambda_2$  von der Mikrostruktur des Ferrofluids und speziell von der Länge der im Fluid auftretenden Partikelketten abhängt kann seine Bestimmung als unabhängiger Zugang zur Kettenbildung verwendet werden und die entsprechenden Resultate können mit den Ergebnissen viskoser Untersuchungen verglichen werden. Derartige Experimente wurden mit Ferrofluiden unterschiedlicher Zusammensetzung durchgeführt und zeigen eine Scherratenabhängigkeit des Wertes von  $\lambda_2$  die mit einer scherbedingten Veränderung der Länge der Ketten magnetischer Partikel korreliert werden kann. Diese Ergebnisse sind in guter Übereinstimmung mit magnetoviskosen Untersuchungen an den gleichen Proben.

[1] M. Shliomis, , *Sov. Phys. JETP*, 34, 6 1291 (1972)

[2] S. Odenbach, *Magnetoviscous effects in ferrofluids*, Springer LNPM71, Springer, Heidelberg (2002)

[3] H.W.Müller, M. Liu, *Phys. Rev. E* 64, 061405 (2001)

[4] S. Odenbach, H.W. Müller, *Phys.Rev.Lett.* (eingereicht)

## **Strukturuntersuchungen an Ferrofluiden mittels Kleinwinkelstreuexperimenten und Simulationen**

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

Die Strukturbildung in Ferrofluiden wird in Abhängigkeit von der angelegten magnetischen Feldstärke und der Konzentration durch zweidimensionale Röntgen-Kleinwinkelstreuung (SAXS) untersucht. Die Messungen zeigen, dass die Mikrostruktur kontinuierlich von der Feldstärke abhängt. Dabei kommt es sowohl zu einer Vorzugsorientierung der einzelnen Partikel mit der längeren Achse parallel zum Feld als auch zu einer anisotropen Anordnung der Partikel zueinander.

Anhand der quantitativen Ergebnissen der Streuexperimenten wird ein Partikelmodell aufgestellt, auf dessen Grundlage Monte Carlo Simulationen durchgeführt werden können. Der Vergleich von simulierten Kleinwinkelstreuexperimenten mit den gemessenen Daten zeigt, dass die Simulationen geeignet sind, die realen Systeme in ihren wesentlichen Eigenschaften nachzubilden, so dass eine Visualisierung der Gleichgewichtskonfigurationen einen guten Eindruck von der Topologie der Systeme vermitteln kann.

Die Ergebnisse zeigen u.a. dass die Partikel im feldfreien Raum über das ganze Probenvolumen verteilt. Kleine Cluster bilden sich, die Struktur bleibt aber makroskopisch isotrop. Nach Anlegen eines magnetischen Feldes finden sich die Partikel zu Ketten mit wenigen Partikel zusammen, die sich entlang der Feldrichtung ausrichten. Die statistische Auswertung der Konfigurationen gibt Information sowohl über Größe und Ausdehnung der Agglomerate als auch über die Größe der Partikel die zur Kettenbildung teilnehmen. Diese Strukturparameter werden in Abhängigkeit von Feldstärke, Konzentration und Temperatur untersucht.

[1] T. Kruse, Dissertation, Universität zu Köln, Köln (2000)

[2] T. Kruse, H-G. Krauthäuser, A. Spanoudaki & R. Pelster, *to be published*

## Thermal ratchet effect in ferrofluids

Andreas Engel

*Universität Magdeburg, Institut für Theoretische Physik, PSF 4120,39106 Magdeburg, Germany*

Hanns Walter Müller

*Max-Planck-Institut für Polymerforschung, 55128 Mainz, Germany*

Peter Reimann

*Universität Augsburg, Institut für Physik,  
Universitätsstr. 1, 86135 Augsburg, Germany*

Achim Jung

*Technische Physik, Universität des Saarlandes,  
PSF 151150, 66041 Saarbrücken, Germany*

To extract directed motion from random fluctuations is a central problem in statistical physics with long history. Besides its principal interest it has gained renewed attention due to its relevance for biological transport and the prospects of nano-technology. Ferrofluids are ideal systems to test theoretical predictions on fluctuation driven transport experimentally. This is due to three main reasons: First, the small size of the ferromagnetic grains implies that their dynamics is strongly influenced by thermal fluctuations. Second, spatially periodic, asymmetric and/or time-dependent potentials for the orientation of the particles can be easily realized by external magnetic fields. Third, directed orientational transport shows up in a coherent rotation of the ferromagnetic particles and can be easily detected from the resulting macroscopic torque on the carrier liquid. As an experimental realization we demonstrate for the first time fluctuation assisted transfer of angular momentum from an ac magnetic field to a ferrofluid at rest.

## Relaxation in Ferroflüssigkeiten

R. Schmitz

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

Eine ideale Ferroflüssigkeit wird auf mikroskopischer Ebene beschrieben als ein monodisperses System von harten Kugeln, die mit einem permanenten magnetischen Dipolmoment ausgestattet und in einer Trägerflüssigkeit suspendiert sind. Die Ferroteilchen wechselwirken miteinander auf drei Arten:

- entropisch (keine Überlappungen)
- magnetisch (anisotrope Dipolkräfte)
- hydrodynamisch (über die Trägerflüssigkeit).

Unser Ziel ist die Berechnung des makroskopischen Relaxationverhaltens dieses komplizierten Vielteilchensystems mit Methoden der statistischen Physik. Hierzu wird von einer Ito-Langevin Dynamik für die mikroskopische Konfiguration des Systems ausgegangen, wobei die Kopplung zwischen den Translations- und den Rotationsfreiheitsgraden explizit berücksichtigt wird. Auch die Einbeziehung äußerer Magnet- und Strömungsfelder wird diskutiert. Die zugehörige Fokker-Planck Gleichung - in diesem Zusammenhang auch als verallgemeinerte Smoluchowski Gleichung bezeichnet - wird mit Methoden der Feldtheorie behandelt, was auf geschlossene Gleichungen für die Korrelations- und Responsefunktionen führt. Hieraus lassen sich die physikalisch interessanten Transportkoeffizienten des Systems berechnen.

Auf kurzen Zeitskalen ist die Dynamik durch die Propagatoren der linearisierten Theorie bestimmt. Diese werden zuerst berechnet und in Abhängigkeit von den oben genannten Wechselwirkungen diskutiert. Auf langen Zeitskalen wird der 1-Loop Beitrag wichtig, was zu Memory-Effekten in den Transportkoeffizienten führt. Erste Ergebnisse werden vorgestellt.

## Shear flow rendered audible by a ferrofluid

Hanns Walter Müller<sup>1</sup>, M. Liu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Max-Planck-Institut für Polymerforschung, Ackermannweg 10, 55128 Mainz,

<sup>2</sup>Theoretische Physik, Universität Tübingen, 72076 Tübingen,  
[hwm@mpip-mainz.mpg.de](mailto:hwm@mpip-mainz.mpg.de)

The propagation of sound in ferrofluids is investigated. A considerable enhanced attenuation is observed owing to the magneto-dissipative effect. This feature may be attributed to a field-enhanced, effective compressional viscosity - in analogy to the ubiquitous field-enhanced shear viscosity that is known to be the reason for many unusual behavior of ferrofluids under shear.

Furthermore, it will be shown that shear waves in magnetized ferrofluids can be made audible. Perceptible sound is shown to be excited in ferrofluids by the shear motion of a rigid plate, if the fluid is exposed to a magnetic field oblique both to the plate and the direction of propagation.

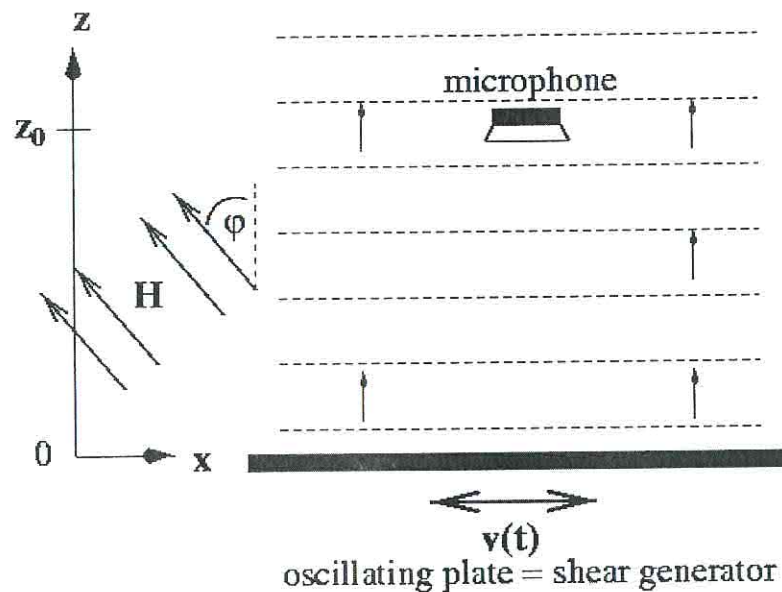


Fig. 1: Given a magnetic field  $\mathbf{H}$  in the  $x$ - $z$ -plane, at an angle  $\varphi$ , a plate oscillating along  $x$  is predicted to emit a sound wave with an amplitude proportional to  $\sin(2\varphi)$ . This may be picked up by a microphone located at  $z=z_0$  where  $z_0$  is much larger than both the wavelength of sound and the viscous penetration depth. (Solid arrows indicate the direction of propagation, dashed lines the crests of the sound wave).



## Langevin dynamics simulations of the remagnetization processes in ferrofluids

D.V.Berkov, N.L.Gorn, D.Stock

*Innovent Technologieentwicklung e.V., D-07745 Jena, Germany*

We report first results of numerical simulations of fast remagnetization processes in ferrofluids using the Langevin dynamics method. This method is based on the solution of stochastic differential equations describing the motion of the system under consideration taking into account both deterministic forces and random thermal fluctuations. The system of these equations used to describe ferrofluids includes all relevant degrees of freedom for these systems, in particular: translational and rotational motion of the ferrofluid particles and rotation of the particle magnetic moment with respect to the particle itself. At present stage we could take into account in our simulations the long-range magnetodipolar and the short-range steric repulsive interaction between particles.

In our contribution we present some examples of remagnetization processes which could be simulated using the Langevin dynamics, in particular, (i) relaxation of the ferrofluid magnetization after a sudden change of an external field (magnetic viscosity) and (ii) remagnetization in an oscillating field (temperature and frequency dependencies of *ac*-susceptibility). We also discuss some limitations of the method and prospects to include also the hydrodynamic interaction between the ferrofluid particles.