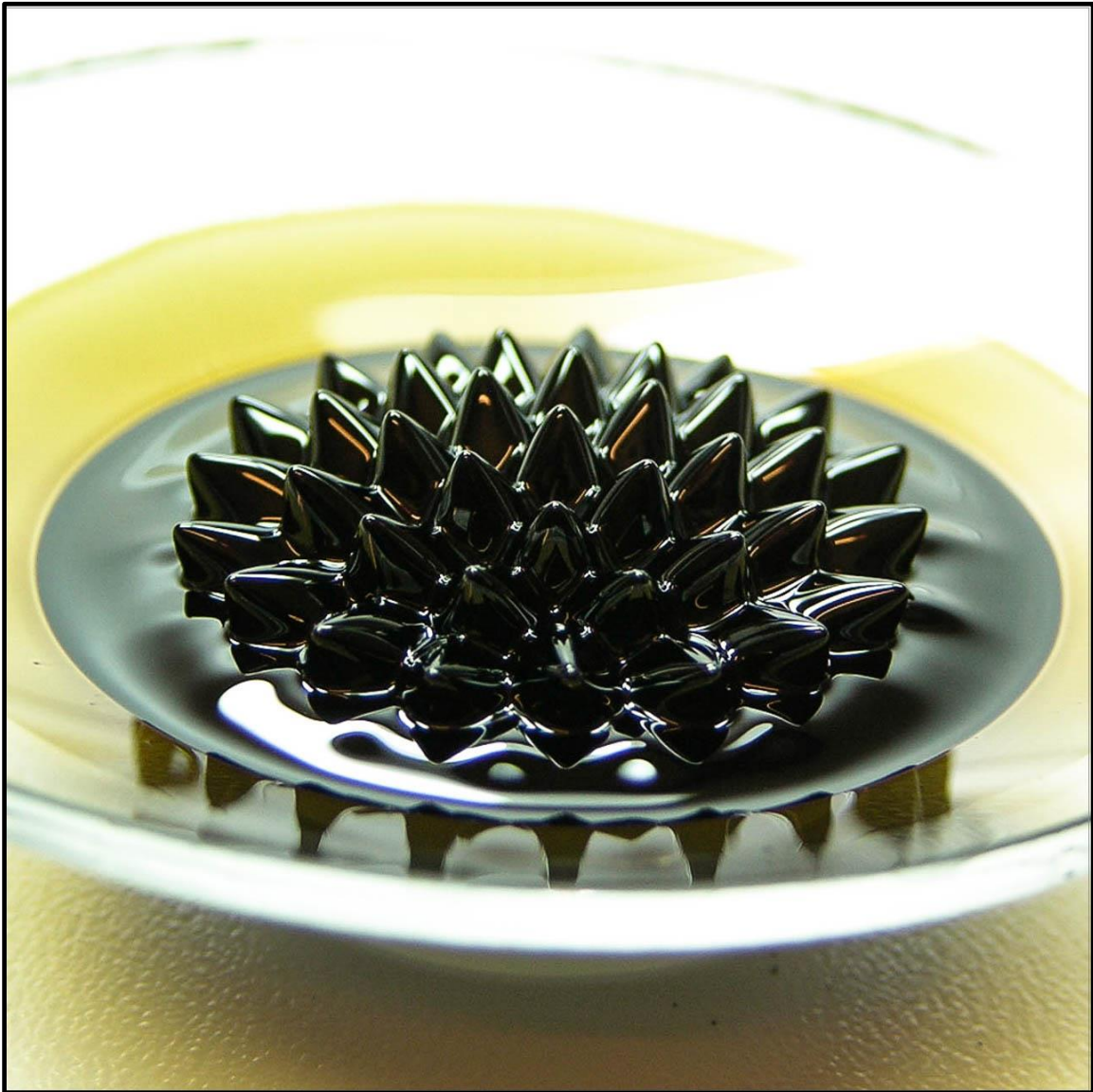


Synthese und Eigenschaften von Ferrofluiden



Verfasser: Lukas Frei (17)

2023

Alexander-von-Humboldt-Gymnasium Schweinfurt

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	- 2 -
2. Theoretische Grundlagen	- 2 -
2.1 Bestandteile eines Ferrofluids	- 2 -
2.2 Stabilisierungsmöglichkeiten für Nanopartikel	- 2 -
2.3 Herstellungsmethoden für Nanopartikel	- 3 -
2.4 Die Ostwald-Reifung	- 3 -
2.5 Rosensweig-Instabilitäten	- 3 -
3. Synthese von Ferrofluiden	- 4 -
3.1 Synthese eines öl-basierten Ferrofluids - Erster Ansatz	- 4 -
3.2 Synthese eines wässrigen Ferrofluids	- 6 -
3.3 Synthese eines öl-basierten Ferrofluids- Erfolgreicher Versuch	- 8 -
4. Eigenschaften von Ferrofluiden	- 9 -
4.1 Adsorption von Farbstoffen und Komplexen	- 9 -
4.2 Modellversuch zur magnetischen Hyperthermie	- 10 -
5. Fazit	- 11 -
Literaturverzeichnis	- 12 -
Abbildungsverzeichnis	- 13 -

1. Einleitung

Ferrofluide sind Flüssigkeiten, die auf ein magnetisches Feld reagieren. Dabei handelt es sich oft um eine kolloidale Suspension von magnetischen Nanopartikeln in einer Trägerflüssigkeit. Ferrofluide zeigen nicht nur interessante optische Effekte, wie beispielsweise Rosensweig-Instabilitäten, sondern finden auch in der Technik und der Medizin Anwendung. In dieser Arbeit soll zum einen ein Ferrofluid hergestellt und zum anderen Anwendungsbereiche von Ferrofluiden vorgestellt werden.

2. Theoretische Grundlagen

2.1 Bestandteile eines Ferrofluids

Ein Ferrofluid besteht aus magnetischen Nanopartikeln, wie z.B. Magnetit-Nanopartikeln, mit einer Größe von ca. 10 nm, die in einer Trägerflüssigkeit suspendiert sind. Je nach Ferrofluid kann die Trägerflüssigkeit hydrophob oder hydrophil sein. Damit die Nanopartikel in Suspension bleiben und beim Annähern eines Magneten nicht von der Trägerflüssigkeit getrennt werden bzw. ausfallen, müssen die Nanopartikel oberflächenbehandelt werden. Außerdem verhindert die Oberflächenbehandlung, dass die Nanopartikel agglomerieren (verklumpen) und somit größere Aggregate bilden.

2.2 Stabilisierungsmöglichkeiten für Nanopartikel

Die beiden wichtigsten Stabilisierungsstrategien für Ferrofluide sind die elektrostatische und die sterische Stabilisierung. Bei der elektrostatischen Stabilisierung wird ein geeignetes Dispersionsmittel zugegeben, sodass sich eine elektrostatische Doppelschicht bildet (vgl. Abbildung 1). Direkt an der Oberfläche des Nanopartikels befindet sich eine starre Sperrschicht, an welche eine diffuse Guoy-Chapman-Doppelschicht anknüpft. Daraus resultiert eine Ladungswolke um den Nanopartikel herum. Nähern sich nun zwei Nanopartikel mit Ladungswolken, die die gleiche Ladung tragen, an, so stoßen sie sich aufgrund von elektrostatischen Abstoßungskräften ab. [1] Ein geeigneter Stoff für die elektrostatische Stabilisierung ist das Tetrabutylammoniumhydroxid (TBAH).

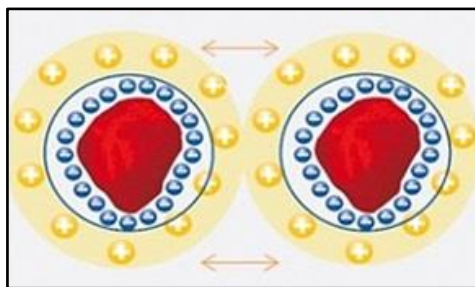


Abb.1: Modell der elektrostatischen Anziehung

Bei der sterischen Stabilisierung werden durch Zugabe eines Polymers oder Liganden die Nanopartikel ummantelt. Nähern sich nun zwei Nanopartikel aneinander an, so bildet diese Schutzschicht eine physikalische Barriere und verhindert somit, dass die Nanopartikel agglomerieren können.[1] Ein Molekül, das sich zur sterischen Stabilisierung eines Ferrofluids eignet, ist die ungesättigte Fettsäure Z-Octadec-9-ensäure (Ölsäure).

Die Ölsäure ordnet sich so um den Nanopartikel an, dass der polare Kopf in Richtung des Nanopartikels und der lange Alkylrest von diesem weg zeigt. Der lange Alkylrest verhindert somit, dass zwei Nanopartikel agglomerieren können. Die Beschichtung mit Ölsäure ermöglicht zudem die Suspension der Nanopartikel in einem hydrophoben Lösungsmittel, wie n-Heptan.

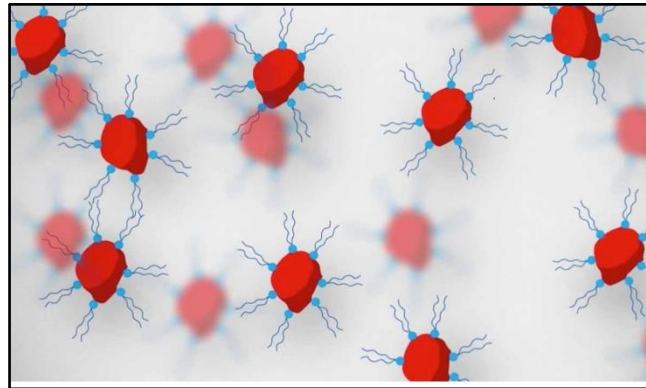


Abb.2: Modell der sterischen Stabilisierung

2.3 Herstellungsmethoden für Nanopartikel

Es existieren allgemein zwei Arten von Synthesestrategien für Nanopartikel. Zum einen gibt es die Top-down Synthesestrategie, bei der aus makroskopischen Partikeln, durch Zerkleinern, Nanopartikel entstehen. Denkbar wäre hier beispielsweise das Mahlen von größeren Magnetit Stücken in einer Kugelmühle. Nachteile dieser Synthesestrategie sind zum einen der hohe Energieaufwand und zum anderen haben die Produkte eine vergleichsweise große Partikelgrößenverteilung. [1] Die Bottom-up Synthesestrategie baut dagegen aus mehreren Molekülen oder Atomen den Nanopartikel auf. Das in dieser Arbeit genutzte Syntheseverfahren ist die Fällungsreaktion. Bei dieser wird zu einer wässrigen Lösung von Eisen(II)- und Eisen(III)-salzen ein Fällungsreagenz, hier eine Base wie Ammoniaklösung oder Natronlauge, gegeben. Es fallen während der Reaktion ca. 10 nm große, magnetische Nanopartikel bestehend aus Eisen(II,III)-oxid (Magnetit), aus. Das Wachstum der Nanopartikel verläuft nach dem Prinzip der Ostwald-Reifung.

2.4 Die Ostwald-Reifung

„Die Ostwald-Reifung [...] bezeichnet einen Prozess, bei dem größere Partikel aus kleineren Partikeln wachsen, indem sie sich auflösen und an der Oberfläche der größeren Teilchen wieder abscheiden.“ [1] Das Prinzip beruht darauf, dass die größeren Partikel eine größere Entropie besitzen und damit, gegenüber den kleineren Partikeln, energetisch begünstigt sind. Somit wird das Partikelwachstum angeregt.

2.5 Rosensweig-Instabilitäten

Ferrofluide bilden in Magnetfeldern „Spikes“ aus. Diese, nach ihrem Entdecker Ronald E. Rosensweig benannten Rosensweig-Instabilitäten, kommen durch sich ausrichtende und abstoßende Magnetit-Partikel im Ferrofluid zu Stande, wobei die Oberflächenspannung der Trägerflüssigkeit diese zusammenhält. [3]

3. Synthese von Ferrofluiden

3.1 Synthese eines ölsäurebasierten Ferrofluids- Erster Ansatz

Durchführung:

5,43 g Eisen(III)-chlorid Hexahydrat und 2,0 g Eisen(II)-chlorid Tetrahydrat werden in ein 100 ml Becherglas gegeben und in 50 ml Wasser gelöst. Anschließend wird eine Natriumhydroxid Lösung angesetzt. Dazu werden 8 g Natriumhydroxid, in einem 400 ml Becherglas, in 200 ml Wasser gelöst. Nun wird die Eisensalzlösung zügig und unter starkem Rühren zur Natronlauge gegeben. Es bildet sich sofort ein schwarzer Niederschlag. Die Suspension wird für weitere 15 min gerührt. Danach wird das Becherglas von der Rührplatte genommen und dieses auf einem starken Magneten platziert, sodass der entstandene schwarze, magnetische Niederschlag sich schneller absetzt. Nachdem sich der Niederschlag abgesetzt hat, wird die überstehende Flüssigkeit abdekantiert und der Niederschlag in 200 ml Wasser resuspendiert. Dieser Vorgang wird noch zwei Mal wiederholt. Nun beginnt die Oberflächenbehandlung der Nanopartikel. Dazu wird die Nanopartikelsuspension in 200 ml Wasser auf 80 °C erhitzt, 2,8 g Ölsäure hinzugegeben und 15 min gerührt. Normalerweise sollte hier eine schwarze zähe Masse ausfallen. Da dies hier aber ausblieb, wurde so lange verdünnte Salzsäure dazugegeben, bis es zur Niederschlagsbildung kam. Die zurückbleibende schwarze Masse wird zwei Mal mit dest. Wasser gewaschen und anschließend im Trockenschrank für einen Tag bei 50 °C getrocknet. Um ein Ferrofluid zu erhalten, werden unter dem Abzug 25 ml n-Heptan zu der schwarzen Paste gegeben und mit einem Spatel so lange gerührt, bis ein Großteil der Masse redispersiert ist. Um zu überprüfen, ob ein Ferrofluid entstanden ist, wird ein Magnet unter das Gefäß mit dem Ferrofluid gehalten. [Durchführung nach [2]]

Beobachtung:

Während der Zugabe der Natronlauge bildet sich ein schwarzer, sehr feiner Niederschlag. Nach der Zugabe der Ölsäure ergibt sich keine optische Veränderung. Erst nach der Zugabe von verdünnter Salzsäure fällt eine schwarze, zähe Masse aus. Nach der Zugabe des n-Heptans ergibt sich ein Ferrofluid, das zwar von einem Magneten angezogen wird, allerdings keine Rosensweig-Instabilitäten zeigt.



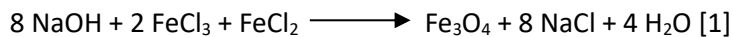
Abb. 3: Schwarzer, magnetischer Eisen(II,III)-oxid Niederschlag



Abb.4: Ferrofluid im Magnetfeld

Erklärung:

Die Reaktion läuft nach folgender Reaktionsgleichung ab:



Es bilden sich Magnetit (Fe_3O_4) – Nanopartikel mit einer Größe von ca. 10 nm. [1] Um die Nanopartikel in einem hydrophoben Lösungsmittel suspendieren zu können, sodass sich eine stabile Suspension bildet, werden die Nanopartikel mit Ölsäure oberflächenbehandelt. Ölsäuremoleküle richten sich so aus, dass der polare Kopf mit der Carboxygruppe in Richtung der Nanopartikel und der unpolare, lange Alkylrest vom Nanopartikel weg zeigt. Diese Beschichtung verhindert außerdem, dass die Nanopartikel agglomerieren und trägt somit zur Stabilisierung des Ferrofluids bei. Die Ölsäure tritt mit der hydrophoben Trägerflüssigkeit n-Heptan in Wechselwirkung und verhindert somit, dass die Nanopartikel aus der Suspension gezogen werden. Dass die Nanopartikel nicht sofort nach der Zugabe der Ölsäure ausfielen, lässt sich dadurch erklären, dass die Lösung durch Reste von Natronlauge noch so alkalisch war, dass die Ölsäure deprotoniert wurde. Das entstehende Natriumoleat fungierte dann als Tensid, wodurch die Nanopartikel in Suspension blieben. Nach der Zugabe von Salzsäure wurde das Oleat-Ion wieder zu Ölsäure protoniert, die die Nanopartikel umhüllte. Aufgrund der hydrophoben Eigenschaften der Ölsäure fielen die Nanopartikel nun aus.

3.2 Synthese eines wässrigen Ferrofluids

Nachdem der erste Versuch ein Ferrofluid zu synthetisieren gescheitert war, wurde ein zweiter Versuch gestartet. Diesmal wurden die Nanopartikel allerdings nicht mit Ölsäure beschichtet, sodass diese in einem hydrophoben Lösungsmittel suspendiert werden konnten, sondern mit Tetrabutylammoniumhydroxid (TBAH). Die Fe_3O_4 Nanopartikel konnten dadurch in Wasser suspendiert werden. Es wurde diesmal auch das deutlich weniger oxidationsempfindliche Eisen(II)-sulfat an Stelle von Eisen(II)-chlorid verwendet.

Durchführung:

Zuerst werden 15 ml konzentrierte Ammoniaklösung mit 85 ml Wasser verdünnt. Anschließend werden 3,5 g Eisen(III)-chlorid Hexahydrat und 2,0 g Eisen(II)-sulfat Heptahydrat in ein 250 ml Becherglas eingewogen und in 25 ml destilliertem Wasser gelöst. Nun wird über einen Tropftrichter die zuvor hergestellte Ammoniaklösung innerhalb von fünf Minuten zugetropft. Dabei wird stark gerührt (600 rpm). Mit Hilfe mehrerer Magnete wird der schwarze Niederschlag sedimentiert und die überstehende Lösung abdekantiert. Der Niederschlag wird zwei Mal mit destilliertem Wasser gewaschen. Der Rückstand wird nun auf ein Uhrglas gegeben, tropfenweise TBAH hinzugefügt und umgerührt. [Durchführung nach [1]]

Beobachtung:

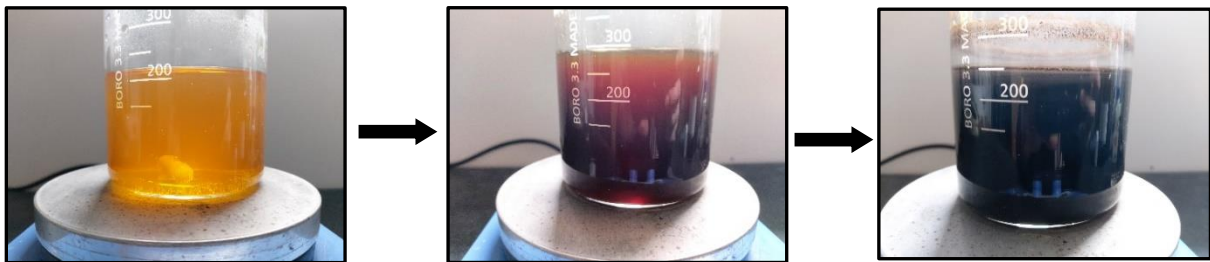


Abb. 3: Links: Eisensalzlösung. Mitte: Eisen(III)-hydroxid Niederschlag. Rechts: Eisen(II,III)-oxid Niederschlag



Abb.5: Wässriges Ferrofluid im Magnetfeld

Erklärung:

Das TBAH baut, analog zu Abbildung 7, eine elektrostatische Doppelschicht auf. Dabei lagern sich die Hydroxid-Ionen an die Oberfläche der Nanopartikel an und die Tetramethylammonium-Ionen bilden eine positiv geladene Ladungswolke aus, sodass bei der Annäherung zweier Nanopartikel sich diese gegenseitig abstoßen.

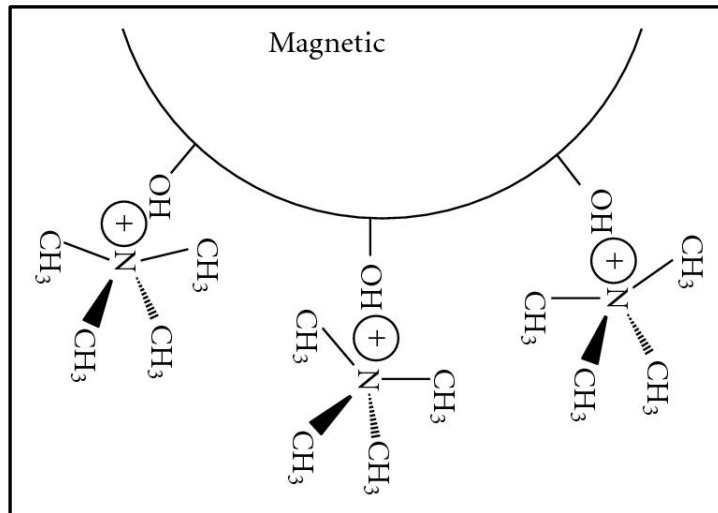


Abb. 7: Anordnung von Tetramethylammoniumhydroxid um Magnetit NP

3.3 Synthese eines ölsäurebasierten Ferrofluids- Erfolgreicher Versuch

Nachdem auch der zweite Versuch, ein Ferrofluid herzustellen, welches Rosensweig-Instabilitäten ausbildet, gescheitert ist, entwickelte ich eine eigene Versuchsvorschrift, in der einige Änderungen am ersten Versuch vorgenommen wurden. Zum einen wies das verwendete, oxidationsempfindliche Eisen(II)-chlorid eine braune Färbung auf, was auf eine Oxidation durch den Luftsauerstoff schließen lässt. Deshalb wurde das Eisen(II)-chlorid zunächst mit Stahlwolle reduziert und dann umkristallisiert, um reines, hellblaues Eisen(II)-chlorid zu erhalten. Zudem wurde das sonst übliche, ideale molare $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ Verhältnis von 1:2 auf 1:1,8 abgeändert, da während der Reaktion Eisen(II)-chlorid teilweise oxidiert wird, und so das perfekte molare Verhältnis gestört wird. Aus dem ersten Versuch wurde ersichtlich, dass die getrocknete Masse sehr ölig und somit ein großer Anteil Ölsäure vorhanden war. Deshalb wurde die Menge an verwendeter Ölsäure im Folgenden deutlich reduziert. Statt den pH-Wert durch eine sehr schnelle Zugabe von Base schlagartig zu erhöhen und damit den Magnetit sehr schnell auszufällen, wurde im nächsten Versuch auf eine langsame Erhöhung des pH-Werts, durch langsame Zugabe der Base, hier Ammoniaklösung, geachtet. Besonders der Menge an zugesetztem n-Heptan scheint eine besondere Bedeutung, bei der Ausbildung der Rosensweig-Instabilitäten, zuzukommen, weshalb dieses im folgenden Versuch nur tropfenweise zu dem oberflächenbehandelten Magnetit gegeben.

Durchführung:

4,37 g wasserfreies FeCl_3 (0,027 mol) und 3,00 g frisch umkristallisiertes $\text{FeCl}_2 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$ (0,015 mol) werden in ein großes, 600 ml Becherglas eingewogen und in 200 ml destilliertem Wasser gelöst. Die Heizplatte wird auf 200°C eingestellt. Nachdem die Lösung eine Temperatur von ca. 60°C erreicht hat, wird tropfenweise, innerhalb von 7 min, 10 %- ige Ammoniaklösung dazugegeben bis der pH- Wert der Lösung ca. 12 beträgt. Während der Zugabe der Ammoniaklösung wird mit 800 rpm gerührt. Es wird noch 5 min weitergerührt und nochmals 20 ml der Ammoniaklösung hinzugefügt. Nun werden 2ml Ölsäure dazugegeben und das Gemisch für weitere 5 min gerührt und solange halbkonzentrierte Salzsäure zugetropfpt, bis eine schwarze, zähe Masse ausfällt. Die Paste wird zweimal mit destilliertem Wasser und zweimal mit Isopropanol gewaschen. Sie wird bei 120 °C auf dem Magnetrührer getrocknet. Abschließend wird zu der Masse tropfenweise Waschbenzin dazugegeben und mit einem starken Magneten durch kreisende Bewegungen mit dieser vermischt bis die charakteristischen Zacken (Rosensweig- Instabilitäten) auftreten.

Beobachtung:

Analog zu den vorherigen Versuchen fällt während der Fällungsreaktion der schwarze Eisen(II,III)-oxid Niederschlag aus. Nach der Zugabe des Waschbenzins bilden sich allerdings, anders als bei den vorherigen Versuchen, Rosensweig-Instabilitäten. Durch Variation des Abstands des Ferrofluids vom Magneten, entstehen unterschiedlich große „Spikes“.

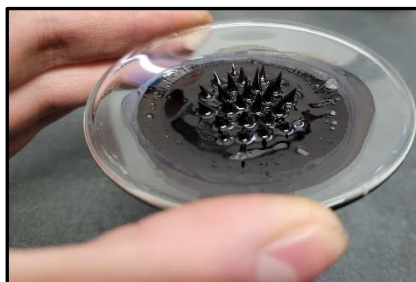


Abb. 8: Ferrofluid mit Rosensweig-Instabilitäten

4. Eigenschaften von Ferrofluiden

4.1 Adsorption von Farbstoffen und Komplexen

Magnetit-Nanopartikel können Farbstoffe an ihre Oberfläche binden (adsorbieren) und somit eventuell verschmutzte Gewässer reinigen. Um die reinigenden Eigenschaften von Ferrofluiden zu veranschaulichen, wurden Lösungen von Tetraaminkupfersulfat und Methyleneblau mit Ferrofluid versetzt und überprüft, ob sich die Lösungen entfärben.

Durchführung:

Zunächst wurden die beiden Farbstofflösungen angesetzt. Zur Herstellung der Methyleneblaulösung (MB) werden 100 mg Methyleneblau in 400 ml Wasser gelöst und schließlich 0,5 ml dieser Lösung zu 10 ml Wasser gegeben. Die erhaltene Farbstofflösung wird auf zwei Reagenzgläser aufgeteilt. Zur Herstellung der Tetraaminkupfersulfatlösung (TK) werden 0,05 g Kupfersulfat in 100 ml Wasser gelöst und 1 ml konzentrierte Ammoniaklösung dazugegeben, sodass sich die Lösung dunkelblau färbt. Auch hier werden 10 ml der Lösung entnommen und auf zwei Reagenzgläser verteilt. Bei beiden Farbstofflösungen wird das zweite Reagenzglas später als Vergleichsprobe dienen. Nun werden 0,2 g Ferrofluid zu den beiden Farbstofflösungen gegeben und für ca. 1 min kräftig geschüttelt. Das Ferrofluid wird mit Hilfe eines Magneten sedimentiert und überstehende Flüssigkeit abdekantiert. [Durchführung nach [1]]

Beobachtung:

Die beiden dunkelblau gefärbten Lösungen entfärben sich nach dem Schütteln mit Ferrofluid. Die Methyleneblaulösung weist allerdings noch eine leichte Blaufärbung auf.

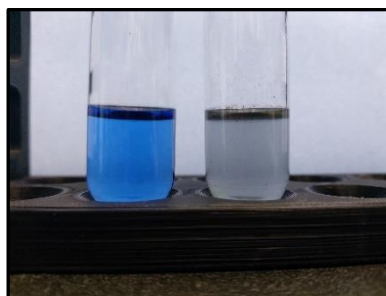
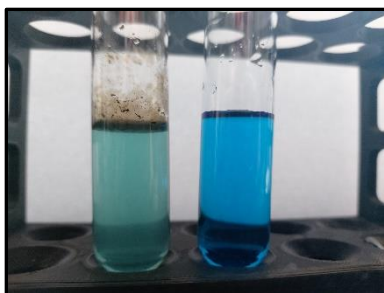


Abb.9: Links: MB vorher und nachher. Rechts: TK vorher und nachher

Erklärung:

Das Methyleneblau wurde, von den im Ferrofluid enthaltenen Magnetit Nanopartikeln, adsorbiert, wodurch sich die Lösung entfärbt. Auch der dunkelblaue Tetraaminkupfer(II)-sulfat- Komplex könnte von den Nanopartikeln adsorbiert werden, allerdings lässt sich hier noch eine zweite Erklärung für die Entfärbung des Komplexes finden. Die im Magnetit enthaltenen Eisen(II)-Ionen können durch die im Kupferkomplex enthaltenen Cu^{2+} -Ionen zu Eisen(III)-Ionen oxidiert werden. Die Cu^{2+} -Ionen werden dabei zu elementarem Kupfer reduziert, welches die Magnetit Nanopartikel umhüllt. Durch die Oxidation der Eisen(II)-Ionen zu Eisen(III)-Ionen entsteht Maghemit, welches deutlich weniger magnetisch im Vergleich zu Magnetit ist. [1] Diese These stützt, dass nach dem Abtrennen des Ferrofluids, wie in Abb.9 links zu sehen ist, braune Partikel übrigbleiben, die nur schwach magnetisch sind.

4.2 Modellversuch zur magnetischen Hyperthermie

Auch in der Medizin könnten Ferrofluide eingesetzt werden. Zur Krebstherapie wird eine Suspension von Magnetit-Nanopartikeln direkt in den Tumor injiziert und anschließend ein magnetisches Wechselfeld, z.B. im MRT, angelegt. Nun erwärmen sich die Nanopartikel und das umliegende Tumorgewebe. Da Krebszellen empfindlicher auf Wärme reagieren als gesunde Körperzellen werden diese bereits bei einer Temperatur von $42,5\text{ °C}$ abgetötet. [1] Der folgende Versuch soll nun dieses Verfahren der magnetischen Hyperthermie veranschaulichen.

Durchführung:

Es wird zunächst ein Glasvial mit 5 ml Wasser befüllt und anschließend fünf Tropfen Ferrofluid dazugegeben. Dann wird ein mit Wasser gefüllter Topf auf das Induktionskochfeld gestellt und das mit Ferrofluid präparierte Glasvial daneben platziert. In das Glasvial wird ein Digitalthermometer gehängt, sodass dieses nicht den Boden des Glases berührt. Nun wird das Induktionskochfeld auf die höchste Stufe eingestellt und die Temperatur des Wassers im Glasvial gemessen. Nach 10 min wird der Versuch beendet. Das Experiment wird mit einem Glasvial, welches nur mit Wasser gefüllt ist wiederholt, um die Temperaturunterschiede der beiden Versuchsansätze vergleichen zu können. [Durchführung nach [1]]

Beobachtung

Nach dem Einschalten des Induktionskochfeld erwärmt sich das Wasser im Glasvial bei beiden Versuchsansätzen. Die Temperatur des unpräparierten Wassers beträgt vor dem Versuch $24,5\text{ °C}$ und danach $34,2\text{ °C}$. Somit ergibt sich ein Temperaturunterschied von $9,7\text{ °C}$ für das ferrofluidfreie Wasser. Die Temperatur des ferrofluidhaltigen Wassers vor dem Versuch beträgt $27,8\text{ °C}$ und danach 38 °C . Es ergibt sich eine Temperaturdifferenz von $10,2\text{ °C}$. Das mit Ferrofluid versetzte Wasser hat sich somit um $0,5\text{ °C}$ mehr erwärmt als das ohne Ferrofluid.

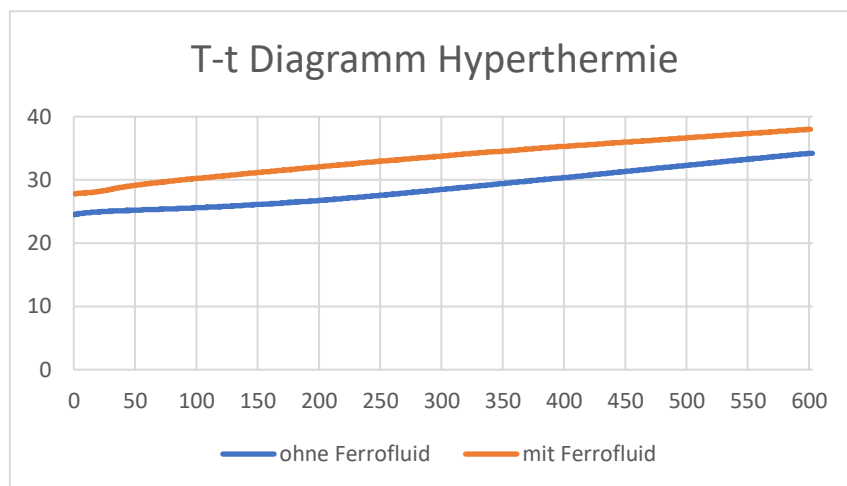


Abb.10: Diagramm des Hyperthermie-Versuchs

Erklärung:

Durch das hochfrequente Wechselfeld des Induktionskochfelds werden die Magnetit-Nanopartikel in Bewegung versetzt, sodass diese Reibung auf das Lösungsmittel ausüben. Durch Energiedissipation wird die kinetische Energie in thermische Energie umgewandelt. Um allerdings eine Temperatur von $42,5\text{ °C}$ zu erreichen, ist entweder ein stärkeres Magnetfeld, z.B. von einem MRT, notwendig oder der Versuch muss über einen längeren Zeitraum durchgeführt werden.

5. Fazit

In dieser Arbeit ist es mir gelungen ein Ferrofluid, das Rosensweig-Instabilitäten ausbildet, zu synthetisieren. Allerdings war die Synthese deutlich schwieriger als zunächst gedacht und es brauchte mehrere Anläufe, um die gewünschten Rosensweig-Instabilitäten beobachten zu können. Als mögliche Ursachen dafür, dass sich keine Rosensweig-Instabilitäten ausgebildet haben, kommen einerseits eine zu große Menge Ölsäure für die Beschichtung, andererseits zu große Nanopartikel oder ein nicht perfektes $\text{Fe}^{2+} : \text{Fe}^{3+}$ Verhältnis, in Frage. Eine zu große Menge Ölsäure könnte dazu führen, dass die Nanopartikel agglomerieren und nicht effektiv suspendiert werden können. Zu große Nanopartikel können entstehen, wenn die Base zu schnell zur Eisensalzlösung gegeben wird oder die Eisensalzlösung zu konzentriert ist oder zu langsam gerührt wird. Ein nicht perfektes $\text{Fe}^{2+} : \text{Fe}^{3+}$ Verhältnis von 1:2 kann durch Verunreinigung des Eisen(II)-salzes mit Eisen(III)-salzen zu Stande kommen. Dies ist vor allem bei dem oxidationsempfindlichen Eisen(II)-chlorid der Fall. Um dieses Problem zu lösen, wurde, wie bereits erwähnt, das Eisen(II)-chlorid unter Zusatz von Stahlwolle umkristallisiert. Somit war eine Verunreinigung mit Eisen(III)-Ionen praktisch auszuschließen. Außerdem wurde das $\text{Fe}^{2+} : \text{Fe}^{3+}$ Verhältnis auf 1:1,8 abgeändert, um eine Oxidation der Fe^{2+} -Ionen während der Fällungsreaktion zu kompensieren. Bei einem nicht perfekten molaren Verhältnis würde statt Magnetit das deutlich weniger magnetische Maghemit entstehen und somit wäre keine „Spikebildung“ möglich. Die beiden Versuche zur Anwendung von Ferrofluiden verliefen dagegen problemlos. Zwar wäre ein größerer Temperaturunterschied beim Hyperthermie-Versuch wünschenswert gewesen, allerdings wird das grobe Prinzip der Hyperthermie trotzdem deutlich. Ferrofluide sind nicht nur schön anzusehen, sondern sie haben auch noch interessante Anwendungsgebiete, wie z.B. die Reinigung von Gewässern und zur Reibungsreduktion bei Hochtönern in Lautsprechern. Vor allem das Verfahren der Hyperthermie verspricht große Fortschritte in der Krebstherapie.

Literaturverzeichnis

Papers:

[1] A.Nimz (2018). Synthese, Stabilisierung und Eigenschaften von Ferrofluiden

[2] Versuchsanleitung Nanonetzwerk Bayern

Internetquellen:

[3] https://www.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Ferrofluid?utm_content=cmp-true

Abbildungsverzeichnis

Deckblatt: <https://tse4.mm.bing.net/th?id=OIP.FE-GzVRfQL3jhtouvUTJwHaHa&pid=Api&P=0&h=180>

Abbildung 1: <https://adhesives.specialchem.com/selection-guide/select-dispersing-agents-for-adhesives-and-sealants>

Abbildung 2: [Sterische Stabilisierung \(byk.com\)](#)

Abbildung 7: <https://www.hindawi.com/journals/jnm/2012/454759/>