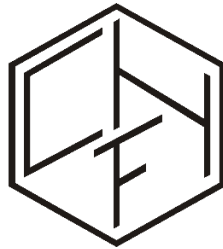


Institut Dr. Flad



Projektarbeit

Nanotechnik Ferrofluide

Alexandra Reckerth

und

Andreas Ehmann

- Lehrgang 64 -

Betreuung: Dr. Jürgen Flad

Schuljahr 2014 / 15

Inhaltverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	iii
Tabellenverzeichnis.....	v
1. Definition Ferrofluid.....	1
2. Theoretischer Teil.....	1
2.1. Physikalische Grundlagen	1
2.1.1. Nanopartikel	1
2.1.2. Magnetismus	1
2.2. Ferrofluide	10
2.2.1. Eigenschaften.....	10
2.2.2. Bestandteile und deren Funktionen	12
2.2.3. Herstellung	13
2.2.4. Verwendung	14
3. Experimenteller Teil.....	15
3.1. Ansetzen eines geeigneten „Lösemittels“	17
3.1.1. Ansetzen einer Verdünnungsreihe mit Spülmittel.....	17
3.1.2. Beobachtung der Verdünnungsreihe mit Spülmittel	17
3.1.3. Ansetzen einer Verdünnungsreihe mit Spiritus	26
3.1.4. Beobachtung der Verdünnungsreihe mit Spiritus	27
3.2. Versuche im Rollrandglas	32
3.2.1. Verhalten unter Einfluss eines Neodym-Magneten	32
3.2.2. Verhalten unter Einfluss verschieden starker Neodym-Magneten.....	34
3.2.3. Verhalten unter Einfluss von zwei Neodym-Magneten	35
3.2.4. Temperaturverhalten	37
3.2.5. Untersuchung des Auftriebverhaltens im Ferrofluids.....	39
3.3. Untersuchung verschiedener Permeabilitäten.....	42
3.3.5. Beeinflussung der Ausbreitung des Magnetfeldes	42
3.4. Versuch mit einem Elektromagnet	46

3.4.1. Beeinflussung der Magnetfeldstärke	46
4. Resümee.....	52
Literaturverzeichnis.....	53
Anhang	58

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Abhängigkeit der Magnetisierung M von der Magnetfeldstärke H	2
Abbildung 2:	Magnetfeldlinien bei gleicher Polung.	4
Abbildung 3:	Magnetfeldlinien bei ungleicher Polung.	4
Abbildung 4:	Visualisierung der Magnetfeldlinien mittels Eisenpulvers	5
Abbildung 5:	Weiss'sche Bezirke und Verschiebung der Bloch-Wände durch äußeres B -Feld.	7
Abbildung 6:	Veranschaulichung magnetischer Dipolmomente verschiedener Magnete.	8
Abbildung 7:	Schematische Darstellung eines Elektromagneten.....	9
Abbildung 8:	Formgebung durch Inhomogenität des B -Feldes im Inneren des Ferrofluids.	10
Abbildung 9:	Rosensweig-Instabilität.....	11
Abbildung 10:	Anordnung der „Stacheln“ in einem Ferrofluid.	11
Abbildung 11:	Tensid und damit umhülltes Magnetit-Partikel.....	12
Abbildung 12:	Für experimentellen Teil benötigte Utensilien.....	15
Abbildung 13:	Ferrofluid ohne Einfluss eines Magnetfeldes.	32
Abbildung 14:	Ferrofluid unter Einfluss eines Neodym-Magneten.	32
Abbildung 15:	Ferrofluid unter Einfluss von einem Magneten.....	34
Abbildung 16:	Ferrofluid unter Einfluss von mehreren gleichen Magneten aneinander..	34
Abbildung 17:	Schematische Darstellung der Versuchsaufbauten.....	35
Abbildung 18:	Ferrofluid unter Einfluss von zwei Magneten ungleicher Polung.	36
Abbildung 19:	Ferrofluid unter Einfluss von zwei Magneten gleicher Polung.	36
Abbildung 20:	Münze versinkt im Ferrofluid.....	39
Abbildung 21:	Durch den Magneten entsteht eine Rosensweig-Instabilität.....	40
Abbildung 22:	Münze „schwimmt“ auf dem Ferrofluid.....	41
Abbildung 23:	Ferrofluid wandert der Schraube entlang nach unten.	42
Abbildung 24:	Versuchsaufbau (A) bis (C) mit $d = 1,0$ cm.	43
Abbildung 25:	Magnetfeld durchdringt Holz und erzeugt Rosensweig-Instabilität.	44
Abbildung 26:	Magnetfeld durchdringt Aluminium und erzeugt Rosensweig-Instabilität.	44
Abbildung 27:	Magnetfeld durchdringt Stahl nicht. Rosensweig-Instabilität bleibt aus. ..	44
Abbildung 28:	Versuchsaufbau mit dem Elektromagneten.	46
Abbildung 29:	Ferrofluid unter Einfluss eines Elektromagneten mit Wertepaar 1.....	47
Abbildung 30:	Ferrofluid unter Einfluss eines Elektromagneten mit Wertepaar 2.....	48
Abbildung 31:	Ferrofluid unter Einfluss eines Elektromagneten mit Wertepaar 3.....	48

Abbildung 32: Ferrofluid unter Einfluss eines Elektromagneten mit Wertepaar 4.....	48
Abbildung 33: Anzahl der „Stacheln“ in Abhängigkeit der Spannung U	49
Abbildung 34: Anzahl der „Stacheln“ in Abhängigkeit der elektrischen Leistung P	50

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Größenordnung physikalischer Größen magnetischer Stoffe.....	3
Tabelle 2:	Beobachtungen der Spülmittel-Verdünnungsreihe an Tag 1.	17
Tabelle 3:	Beobachtungen der Spülmittel-Verdünnungsreihe an Tag 22.	18
Tabelle 4:	Beobachtungen der Spülmittel-Verdünnungsreihe an Tag 29.	20
Tabelle 5:	Beobachtungen der Spülmittel-Verdünnungsreihe an Tag 59.	21
Tabelle 6:	Beobachtungen der Spülmittel-Verdünnungsreihe an Tag 75.	23
Tabelle 7:	Ansatz der Verdünnungsreihe mit Spiritus.	26
Tabelle 8:	Beobachtungen der Spiritus-Verdünnungsreihe an Tag 5.	26
Tabelle 9:	Beobachtungen der Spiritus-Verdünnungsreihe an Tag 19.	28
Tabelle 10:	Beobachtungen beim Erwärmen des Ferrofluids in 10 °C-Abständen.....	38
Tabelle 11:	Dichten ρ der im Versuch verwendeten Materialien.	40
Tabelle 12:	Relative Permeabilität der verschiedenen Materialien.	45
Tabelle 13:	Beobachtungen bei verschiedenen Stromstärken und Spannungen.....	46
Tabelle 14:	Anzahl der "Stacheln" in Abhängigkeit der jeweiligen Parameter.	49

Vorwort

Mit unserer Projektarbeit zum Thema Ferrofluide wollten wir eine Art Handbuch für Lehrer erstellen, das an das Thema herantführt und notwendige theoretische Grundlagen liefert. Auf deren Basis haben wir einfache, wenngleich eindrucksvolle und dem Verständnis dienliche, Versuche erarbeitet.

Nach anfänglichen Startproblemen eigene Versuche zu erstellen, beziehungsweise verwertbare Resultate zu erhalten, stieg unsere Begeisterung für dieses Thema mit den ersten auswertbaren Ergebnissen drastisch.

Nach der intensiven Beschäftigung mit Ferrofluiden bekamen wir immer mehr Versuchsideen, die wir aus Zeitmangel leider nicht alle verfolgen konnten.

Sämtliche Texte wurden von uns gemeinsam verfasst. Zitate sind als solche gekennzeichnet und mit Quellen belegt. Alle in der Arbeit verwendeten Grafiken wurden mit Microsoft PowerPoint 2010 erstellt. Die Bilder wurden von uns selbst aufgenommen und danach mit Adobe Photoshop CC 2014 bearbeitet.

Danksagung

Besonderen Dank möchten wir Herrn Wolfgang Flad für die Ermöglichung der Projektarbeit, sowie für die Bereitstellung der finanziellen Mittel aussprechen.

Des Weiteren möchten wir uns bei Herrn Dr. Jürgen Flad für die gute Betreuung und die vielen anregenden Gespräche bedanken.

Weiterer Dank gilt Herrn Bernhard Ruf für die Bereitstellung verwendeter Geräte und Herrn René Dittus für die tatkräftige Unterstützung und Hilfe im Labor.

Außerdem bedanken wir uns recht herzlich bei Herrn Alexandros Mortis für das Korrekturlesen zahlreicher Rohfassungen und Frau Anna Stärz für das Korrekturlesen der englischen Zusammenfassung.

Zu guter Letzt möchten wir uns bei unseren Familien bedanken, die uns stets zur Seite standen.

Zusammenfassung

Diese Projektarbeit beschäftigt sich mit der Materie des Ferrofluids. Dafür werden zunächst die zum Verständnis notwendigen physikalischen Grundlagen erläutert, welche im Wesentlichen das große Themengebiet *Magnetismus* umfasst.

Im Anschluss daran befassen wir uns mit den Eigenschaften und der Herstellung von Ferrofluiden und wie man ihre außergewöhnlichen Eigenschaften nutzen kann.

Zum besseren Verständnis der Materie wurden Experimente mit einem Ferrofluid durchgeführt, dokumentiert und erklärt.

Unsere Intention mit dem Verfassen dieser Arbeit war es, eine Art Lehrbuch zu erarbeiten, welches sich auf das Nötigste beschränkt, aber dennoch das Thema nicht nur an der Oberfläche kratzt. Dazu haben wir auch anschauliche Schülerversuche entwickelt.

Summary

This essay is about ferrofluids. It explains the physical basics with specific emphasis on magnetism. The essay describes the properties and preparation of these magnetic fluids. It explores possibilities to exploit their remarkable attributes.

The documentation and explanation of experiments further enhances the understanding of the subject. The goal of the project was to develop an information pamphlet, which is condensed and concise but still fully addresses the subject. Developed student experiments serve as an illustrative accompaniment to this information pamphlet.

1. Definition Ferrofluid

Das Wort Ferrofluid leitet sich von den lateinischen Wörtern ferrum und fluidum ab, was übersetzt Eisenflüssigkeit heißt. [23] Man versteht darunter eine gegen Agglomeration und Sedimentation stabile, kolloidale Suspension ferro- oder ferrimagnetischer Nanopartikel in einer Trägerflüssigkeit. [9]

2. Theoretischer Teil

2.1. Physikalische Grundlagen

2.1.1. Nanopartikel

Der Begriff Nano leitet sich vom Griechischen nános ab, was Zwerg bedeutet. Als Präfix bedeutet Nano 10^{-9} . 1 nm entsprechen folglich 10^{-9} m.

Nanopartikel sind Teilchen, die in mindestens einer Dimension eine Ausdehnung von unter 100 nm besitzen. Hier soll nur auf Nanopartikel eingegangen werden, die in allen drei Dimensionen kleiner als 100 nm sind.

2.1.2. Magnetismus

Durch die Bewegung von Elektronen erhält jedes Atom ein magnetisches Dipolmoment, dessen Wirkung erst beim Anlegen eines äußeren Magnetfeldes zu Tage tritt. Beim Anlegen eines solchen Feldes lassen sich unter anderem folgende drei Verhaltensarten unterscheiden: Diamagnetismus, Paramagnetismus und Ferromagnetismus. [11]

Magnetische Dipolmomente dürfen nicht mit elektrischen Dipolmomenten gleichgesetzt werden, da magnetische Dipole ein äußeres Feld verstärken, wohingegen elektrische es schwächen.

2.1.2.1. Magnetisierung

Unter der Magnetisierung M versteht man das unter Einfluss eines äußeren Magnetfeldes resultierende magnetische Moment \vec{m} pro Volumeneinheit V :

$$M = \frac{d\vec{m}}{dV} .$$

2.1.2.2. Magnetische Suszeptibilität

Eine weitere wichtige Größe ist die magnetische Suszeptibilität χ_m . Sie ist der Proportionalitätsfaktor zwischen der Magnetisierung M und der Magnetfeldstärke H :

$$M = \chi_m \cdot H .$$

Während beim Para- und Diamagnetismus ein linearer Zusammenhang zwischen der Magnetfeldstärke und der Magnetisierung vorliegt, steigt sie beim Ferromagnetismus mit zunehmender Magnetfeldstärke zunächst linear an, nähert sich dann allerdings allmählich einer Horizontalen an. Außerdem nimmt die Magnetisierung beim Ferromagneten einen um sechs Zehnerpotenzen größeren Betrag an. Diese Beziehungen sind in Abbildung 1 dargestellt.

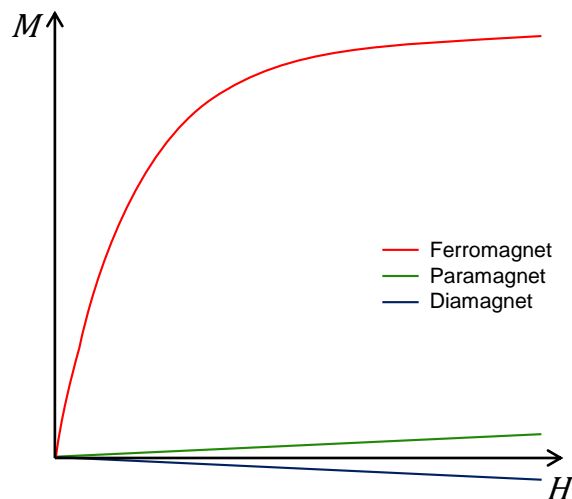


Abbildung 1: Abhängigkeit der Magnetisierung M von der Magnetfeldstärke H .

2.1.2.3. Permeabilität

Eng verwandt mit der magnetischen Suszeptibilität χ_m ist die Permeabilität μ .

Die Permeabilität (lat.: permeare = durchdringen) beschreibt die Durchlässigkeit von Materie für Magnetfelder. Sie ist der Quotient aus der magnetischen Flussdichte B und der Magnetfeldstärke H :

$$\mu = \frac{B}{H} .$$

Folglich ist die Permeabilität der Proportionalitätsfaktor der Funktion $B(H)$.

Den Quotienten der Permeabilität μ und der Vakuumpermeabilität μ_0 nennt man Permeabilitätszahl, beziehungsweise relative Permeabilität μ_r :

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}.$$

Diese dimensionslose Größe besitzt folgenden Zusammenhang zur magnetischen Suszeptibilität:

$$\mu_r - \chi_m = 1.$$

Die relative Permeabilität beschreibt die Veränderung der Magnetfeldstärke eines Stoffes und ist für ihn spezifisch. So schwächen diamagnetische Stoffe in ihrem Inneren das Magnetfeld, wohingegen paramagnetische es verstärken, indem sie die Magnetfeldlinien dort verdichten. Bei Ferromagneten ist der Effekt der Verstärkung wesentlich stärker ausgeprägt (siehe Abschnitt 2.1.2.5.3.). [2, 21, 22] In Tabelle 1 sind die Größenordnungen magnetischer Suszeptibilitäten, sowie relativer Permeabilitäten verschiedener magnetischer Stoffe aufgelistet:

Tabelle 1: Größenordnung physikalischer Größen magnetischer Stoffe. [28]

Stoffklasse	χ_m	μ_r
Diamagnet	$-1 \leq \chi_m < 0$	$0 \leq \mu_r \leq 1$
Paramagnet	$0 \leq \chi_m < 10^{-1}$	≥ 1
Ferromagnet	$10^{-1} \leq \chi_m < 10^5$	$\gg 1$
Ferrimagnet	$1 \leq \chi_m < 10^4$	$\gg 1$

2.1.2.4. Magnetfeld

Ein Magnetfeld ist eine Raumeigenschaft, welche sich bemerkbar macht, sobald eine elektrische Ladung oder magnetisierbare Materie hinein gebracht wird. In der Physik nennt man ein solches Feld oft auch B -Feld.

2.1.2.4.1. Magnetische Pole

Es gibt zwei verschiedene magnetische Pole: den magnetischen Nordpol und Südpol. Zwischen den stets nebeneinander vorkommenden Polen treten Kräfte auf: Gleichnamige Pole stoßen sich ab, während sich ungleichnamige anziehen.

Ein magnetischer Pol ist der Ort, an dem die Magnetfeldlinien konvergieren, beziehungsweise divergieren.

2.1.2.4.2. Magnetfeldlinien

Zur Veranschaulichung der in einem Magnetfeld wirkenden Kräfte bedient man sich des Modells der Magnetfeldlinien.

Magnetfeldlinien sind stets geschlossen. Sie verlaufen außerhalb eines Magneten definitionsgemäß vom Nord- zum Südpol und im Inneren des Magneten vom Süd- zum Nordpol. Außerdem schneiden sie sich nie. Verlaufen sie parallel, so nennt man das Magnetfeld homogen. [5,12]

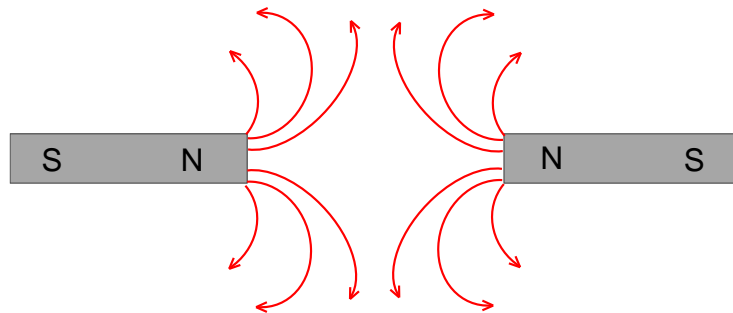


Abbildung 2: Magnetfeldlinien bei gleicher Polung. Bei gleichnamigen Polen stoßen sich die von ihnen ausgehenden Magnetfeldlinien ab.

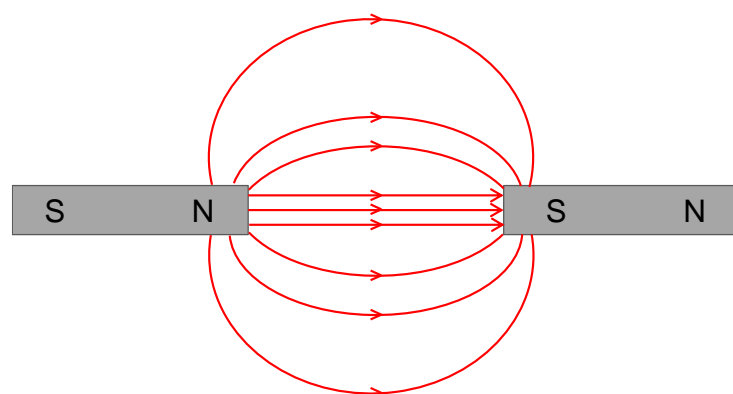


Abbildung 3: Magnetfeldlinien bei ungleicher Polung. Bei ungleichnamigen Polen nehmen die von ihnen ausgehenden Magnetfeldlinien den kürzesten Weg zwischen Nord- und Südpol ein.

Mit Hilfe eines Magneten und Eisenpulvers kann man die Magnetfeldlinien visualisieren (siehe Abbildung 4).

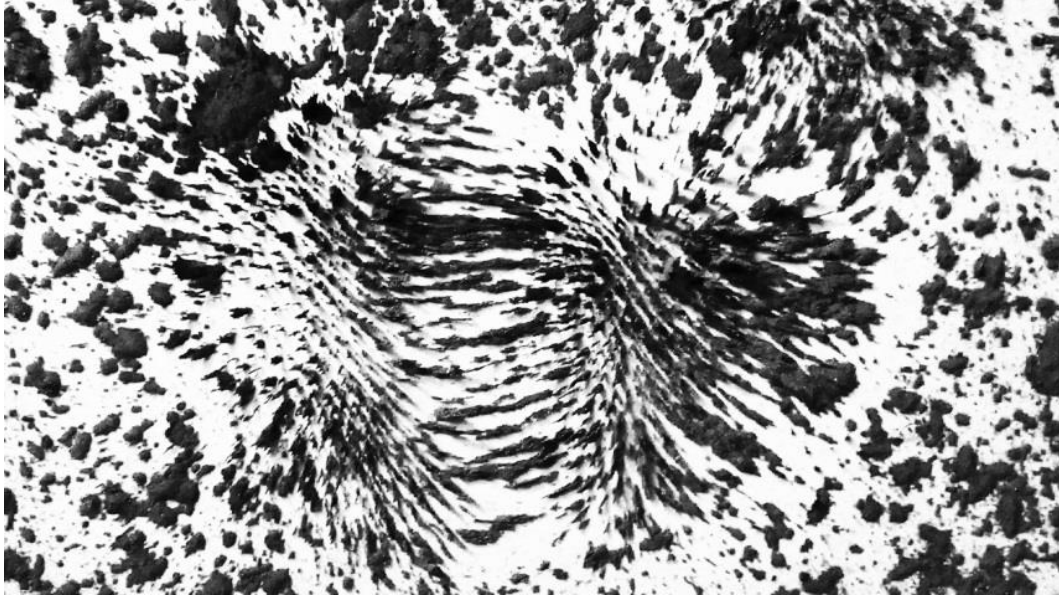


Abbildung 4: Visualisierung der Magnetfeldlinien mittels Eisenpulvers. Wird Eisenpulver unter Einwirkung eines Stabmagneten auf Papier gestreut, ergibt sich solch ein Muster.

2.1.2.5. Arten des Magnetismus

2.1.2.5.1. Diamagnetismus

Wird durch Anlegen eines äußeren Magnetfeldes in einem Stoff ein dem äußeren Feld entgegengesetztes Dipolmoment induziert, so spricht man von Diamagnetismus. [3] Deshalb wird ein Diamagnet, im Gegensatz zu einem Paramagneten, aus einem homogenen Magnetfeld hinaus gestoßen.

Der Diamagnetismus ist nach der Lenz'schen Regel durch eine negative, magnetische Suszeptibilität χ_m gekennzeichnet. [8] Die Lenz'sche Regel besagt, dass das induzierte elektrische Feld seiner Ursache entgegen wirkt.

Ein typischer Vertreter dieser Art von Magnetismus ist Bismut. Prinzipiell sind alle Stoffe Diamagneten, jedoch werden sie nur solche genannt, wenn dieser Effekt nicht durch andere überkompensiert wird.

2.1.2.5.2. Paramagnetismus

Bildet ein Stoff durch den Einfluss eines äußeren Magnetfeldes ein magnetisches Dipolmoment aus, spricht man von Paramagnetismus. Paramagnetismus tritt nur bei Teilchen auf, die mindestens ein ungepaartes Elektron besitzen. Eine Konsequenz dessen ist eine sehr kleine, aber positive magnetische Suszeptibilität χ_m .

Bringt man einen Paramagneten in ein homogenes Magnetfeld, so wird dieser hineingezogen.

Ein Vertreter dieser Art von Magnetismus ist Sauerstoff. Grund dafür ist, dass er im Grundzustand ein Biradikal ist, folglich zwei ungepaarte Elektronen besitzt.

2.1.2.5.3. Ferromagnetismus

Dieses Phänomen, dessen typischer Vertreter und Namensgeber das Element Eisen ist, tritt nur bei den Übergangsmetallen Eisen, Kobalt und Nickel, sowie bei einigen Lanthanoiden auf, ist an den festen Aggregatzustand gebunden und tritt nur unterhalb der Curie-Temperatur T_c auf. [5] Oberhalb dieser verliert ein solcher Stoff seinen Ferromagnetismus und wird zu einem gewöhnlichen Paramagneten, da die Ordnung der magnetischen Dipolmomente durch die resultierende hohe thermische Translation aufgehoben wird. Paramagnetismus ist also eine notwendige Voraussetzung für den Ferromagnetismus.

Der Ferromagnetismus wird durch Bereiche mit parallel ausgerichteten magnetischen Momenten charakterisiert. Diese sogenannten Weiss'schen Bezirke sind allerdings statistisch in alle Raumrichtungen orientiert, wodurch keine nach außen resultierende Magnetisierung auftritt. [13] Die Weiss'schen Bezirke werden durch sogenannte Bloch-Wände voneinander abgegrenzt, wodurch deren spontane Ausrichtung verhindert wird. Wird nun ein äußeres Magnetfeld angelegt, so verschieben sich die Bloch-Wände so, „dass [Weiss'sche] Bezirke mit ähnlicher Ausrichtung der Magnetisierung zum externen Feld vergrößert werden“.¹ Dieser Vorgang ist in Abbildung 5 schematisch dargestellt. Bleibt diese Magnetisierung trotz der hohen thermischen Energie bei Raumtemperatur nach Entfernung des äußeren Magnetfeldes erhalten, so spricht man von einem Permanentmagneten.

¹ http://www.ate.uni-due.de/data/get12/GET_4_Magnetfeld_HO.pdf [Zugriff am 24 07 2014].

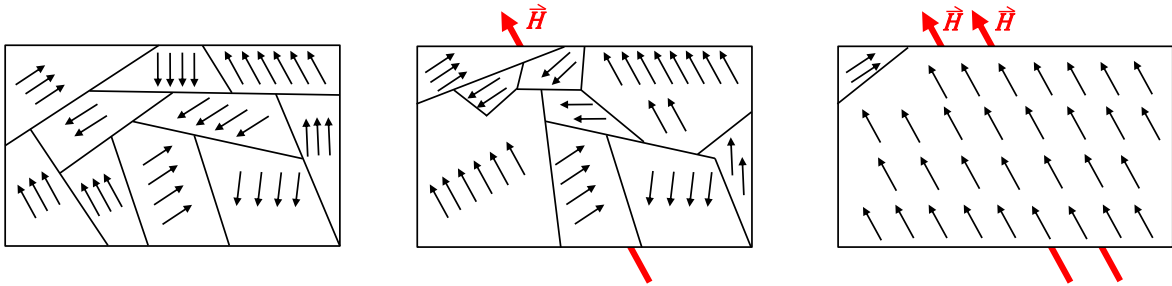


Abbildung 5: Weiss'sche Bezirke und Verschiebung der Bloch-Wände durch äußeres B -Feld. Links sieht man die statistisch verteilten magnetischen Dipolmomente. Durch Anlegen eines äußeren Magnetfeldes \vec{H} (mittleres Bild) verschieben sich die Bloch-Wände so, dass sich die magnetischen Dipolmomente, die durch schwarze Pfeile symbolisiert werden, der Weiss'schen Bezirke entlang von \vec{H} parallel ausrichten (rechtes Bild).

Dadurch, dass die Weiss'schen Bezirke so groß sind, dass sie unter dem Mikroskop beobachtbar sind, bilden die darin enthaltenen magnetischen Dipolmomente ein großes, gemeinsames Dipolmoment, was zu einer im Vergleich zu Paramagneten 10^6 -mal größeren magnetischen Suszeptibilität führt.

Teilt man einen Ferromagneten in zwei Hälften, so erhält man nicht, wie man vermuten könnte, einen magnetischen Nordpol und einen magnetischen Südpol, sondern zwei neue kleinere Magnete mit jeweils einem magnetischem Nord- und Südpol. Teilt man die entstandenen Magnete nochmals und wiederholt diesen Vorgang mehrfach, so erhält man kleinste magnetische Einheiten, die man Elementarmagnete nennt.

2.1.2.5.4. Ferrimagnetismus

Alle Ferrimagneten enthalten zwei verschiedene Elementarmagnete, die an sich jeweils ferromagnetisch sind. Im Magnetit, einem klassischen Vertreter dieses Magnetismus, sind dies Eisen(II)- und Eisen(III)-Ionen. In einer alternativen Summenformel von Fe_3O_4 erkennt man, dass Eisen darin in zwei verschiedenen Oxidationsstufen vorliegt: $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$.

Im Gegensatz zum Antiferromagneten, bei dem die Beträge der antiparallel angeordneten Dipolmomente gleich groß sind, sind die Dipolmomente beim Ferrimagneten nicht von gleichem Betrag. Daraus resultiert eine effektive Magnetisierung, die wesentlich schwächer ist als beim Ferromagneten. [9]

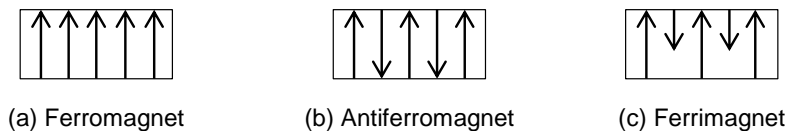


Abbildung 6: Veranschaulichung magnetischer Dipolmomente verschiedener Arten von Magneten. Die Pfeile symbolisieren hier die magnetischen Dipolmomente der jeweiligen magnetischen Stoffe. Beim Ferromagneten resultiert eine starke effektive Magnetisierung, beim Antiferromagneten keine und beim Ferrimagneten eine schwache.

2.1.2.5.5. Superparamagnetismus

Superparamagnetismus ist ein Phänomen, das nur bei stark zerkleinerten ferromagnetischen Stoffen auftritt. Ist die Partikelgröße unter 100 nm, sodass die Partikel nur noch aus einem einzigen Weiss'schen Bezirk bestehen, reagieren diese Teilchen sehr empfindlich auf äußere Magnetfelder.

Der Grund dafür ist, dass nicht erst wie bei einem gewöhnlichen Ferromagneten mehrere benachbarte Weiss'sche Bezirke ausgerichtet werden müssen, sondern nur ein einziger. Entfernt man das äußere Magnetfeld, so verbleibt bei Raumtemperatur keine permanente Magnetisierung. Deshalb eignen sich superparamagnetische Nanopartikel zur Herstellung von Ferrofluiden. [16,19]

2.1.2.5.6. Elektromagnetismus

Während von statischen Ladungen ein elektrisches Feld ausgeht, induziert eine sich bewegende Ladung ein magnetisches Feld.

Man unterscheidet grundsätzlich zwei Arten von Ladungen: positive und negative. Analog zu magnetischen Polen stoßen sich gleichnamige Ladungen ab, während sich ungleichnamige anziehen. Bewegt sich eine Ladung, so spricht man von einem Strom. Definitionsgemäß fließt ein Strom stets vom positiven zum negativen Pol.

Abbildung 7 zeigt den schematischen Aufbau eines Elektromagneten mit dem aus der Stromrichtung resultierenden Magnetfeld.

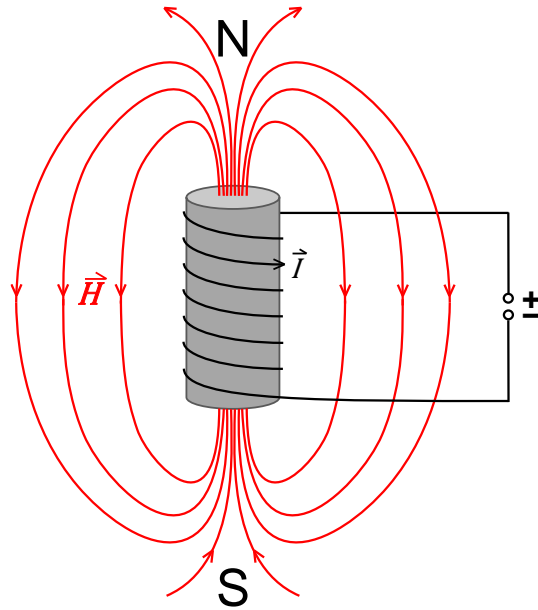


Abbildung 7: Schematische Darstellung eines Elektromagneten. Fließt ein Strom I , wie skizziert, durch die Spule des Elektromagneten, so ergibt sich die entsprechende Polung des Magnetfeldes \vec{H} .

Beim Elektromagneten ist die Magnetfeldstärke proportional zur Spannung U :

$$H \propto U .$$

Das Ohm'sche Gesetz bringt die Spannung U mit der Stromstärke I in Relation, wobei R für den Ohm'schen Widerstand steht:

$$U = R \cdot I .$$

Setzt man diese Gleichung in die Beziehung zwischen Magnetfeldstärke und Spannung ein, so sieht man, dass die Magnetfeldstärke auch proportional zur Stromstärke I ist:

$$H \propto I .$$

Das Produkt der Spannung U und der Stromstärke I ist im Gleichstromkreis die elektrische Leistung P : [30]

$$P = U \cdot I .$$

2.2. Ferrofluide

2.2.1. Eigenschaften

Ohne Einwirkung eines äußeren Magnetfeldes verhält sich ein Ferrofluid wie eine herkömmliche Flüssigkeit. Legt man jedoch ein solches an und überschreitet dieses eine für das Ferrofluid spezifische kritische Feldstärke, so richten sich die statistisch verteilten und damit unwirksamen, magnetischen Dipole entlang des B -Feldes aus, wodurch eine effektive Magnetisierung entsteht. Optisch lässt sich dies aufgrund der Normalfeldbeziehungsweise Rosensweig-Instabilität, die nach ihrem Entdecker Ronald Rosensweig benannt wurde, erkennen. [23]

2.2.1.1. Rosensweig-Instabilität

Allein durch den Einfluss der Oberflächenspannung, sowie der Gewichtskraft, müsste das Ferrofluid eine glatte Oberfläche ausbilden.

Setzt man das Ferrofluid nun einem äußeren Magnetfeld aus, so sammelt es sich bevorzugt an der Stelle maximaler Magnetfeldstärke. Wird der Einfluss der Oberflächenspannung und der Gewichtskraft durch das äußere Magnetfeld überkompensiert, bilden sich „Stacheln“, die durch „Täler“ voneinander getrennt sind, aus. In den „Stacheln“ konzentrieren sich die Magnetfeldlinien, wodurch sie weiter wachsen, während die Dichte der Magnetfeldlinien in den Tälern abnimmt, wodurch diese ausgeprägter werden. [6,19,25]

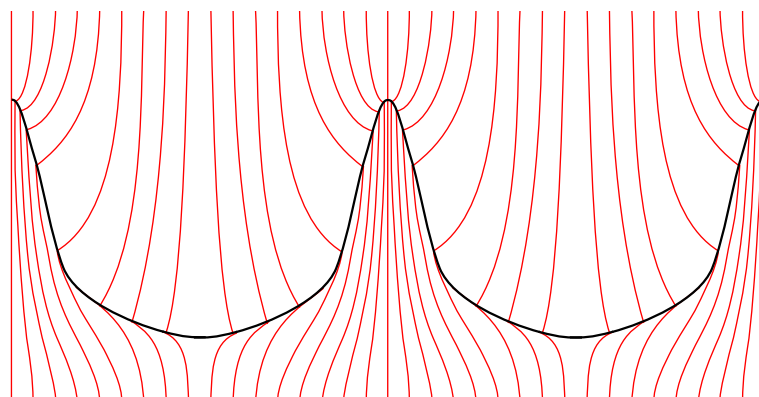
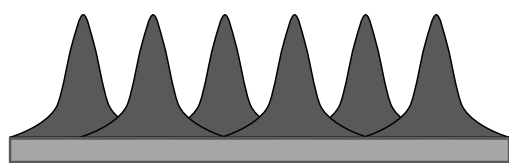


Abbildung 8: Formgebung durch Inhomogenität des B -Feldes im Inneren des Ferrofluids. Darin verdichten sich die Magnetfeldlinien in den „Spitzen“ des Ferrofluids, wodurch diese dort weiter anwachsen.

Das Anwachsen der „Stacheln“ ist jedoch durch die Oberflächenspannung und die Gewichtskraft limitiert. Zudem lässt sich beobachten, dass die Anzahl der „Stacheln“ mit zunehmender Magnetfeldstärke steigt. [16]



(a) Schematische Skizze



(b) Bild

Abbildung 9: Rosensweig-Instabilität. In (a) ist die Struktur der Rosensweig-Instabilität schematisch dargestellt, (b) zeigt eine Aufnahme einer, durch einen Elektromagneten verursachten, Rosensweig-Instabilität.

Legt man in Gedanken ein hexagonales Muster über die Stacheln, so befinden sich die Stacheln jeweils in der Mitte eines Sechsecks.

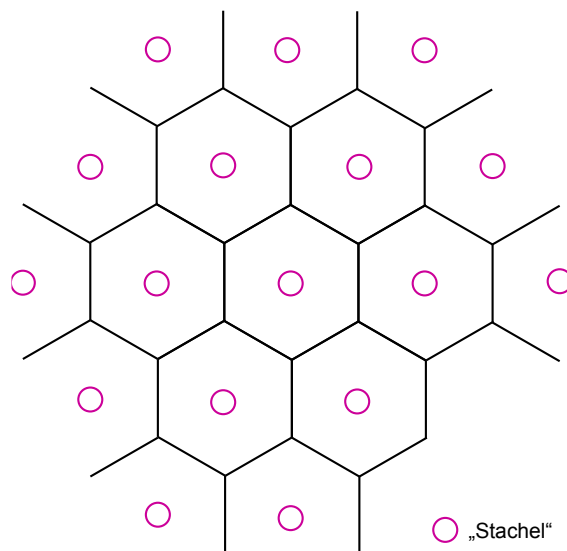


Abbildung 10: Anordnung der „Stacheln“ in einem Ferfluid. In den Zentren der Sechsecke bilden sich „Stacheln“ aus, die durch violette Kreise symbolisiert werden.

2.2.2. Bestandteile und deren Funktionen

Ferrofluide bestehen aus Magnetit-Partikeln, deren Durchmesser unter 100 nm liegen. Damit diese Teilchen, die sich aufgrund der van-der-Waals-Kräfte anziehen, nicht agglomerieren, müssen sie mit Tensiden, oberflächenaktiven Substanzen, beschichtet werden. [9] Diese beschichteten Magnetit-Partikel werden je nach Polarität der Beschichtung in einem polaren oder unpolaren Lösemittel dispergiert – folglich entsteht keine echte Lösung. Üblicherweise werden Öl, Kohlenwasserstoffe oder Wasser dazu verwendet.

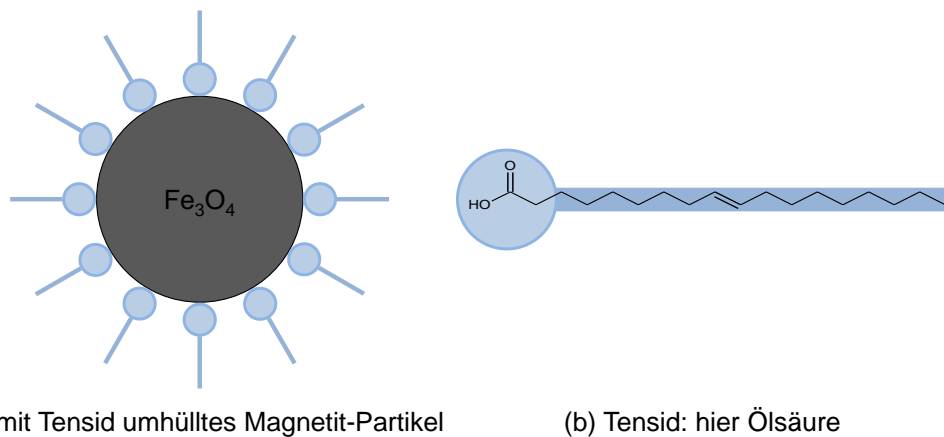


Abbildung 11: Tensid und damit umhülltes Magnetit-Partikel. (a) zeigt schematisch ein Magnetit-Partikel, das von Tensid-Molekülen umhüllt ist, welche in (b) in Form eines Ölsäure-Moleküls beispielhaft dargestellt sind.

Bei einem unpolaren Lösemittel müssen die Magnetit-Partikel, welche polar sind, so mit Tensid beschichtet werden, dass die polaren Reste an die Partikel gebunden sind und die unpolaren Ketten in Richtung des Lösemittels zeigen. [20]

Ein Ferrofluid muss gegenüber folgenden Einflüssen stabil sein:

- magnetische Agglomeration
- magnetische Feldgradienten
- Sedimentation
- van-der-Waals-Kräfte

Unter Agglomeration versteht man das Zusammenballen von Teilchen. Die magnetische Agglomeration, welche durch Dipol–Dipol-Wechselwirkungen bedingt wird, wird nur dann aufgehoben, wenn die thermische Energie die magnetische Anziehung überkompensiert.

Da van-der-Waals-Kräfte für kleine Abstände sehr groß sind, müssen die Partikel mit Tensiden umhüllt werden, sodass die van-der-Waals-Kräfte durch sterische und elektrostatische Abstoßung überkompensiert werden und es zu keiner Sedimentation, also einem Absetzen, kommt.

2.2.3. Herstellung

Da die Curie-Temperatur aller bisher bekannten Ferromagneten unterhalb ihres Schmelzpunktes liegt, lässt sich durch Schmelzen eines solchen Stoffes kein Ferrofluid erzeugen. Stattdessen verwendet man dazu superparamagnetische Nanopartikel.

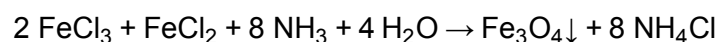
Generell unterscheidet man zwei Herstellungsverfahren für Nanopartikel im Allgemeinen beziehungsweise für Magnetit-Partikel im Speziellen.

2.2.3.1. Top-down-Verfahren

Bei diesem Verfahren werden Partikel, die größer als $0,1\ \mu\text{m}$ sind so lange zerkleinert, bis ihre Größe im Nanobereich liegt. Zur Herstellung eines Ferrofluids gibt man also größere Magnetit-Partikel zusammen mit Löse- und Dispersionsmitteln in eine Kugelmühle und zerkleinert diese für mehrere Wochen.

2.2.3.2. Bottom-up-Verfahren

Beim bottom-up-Verfahren werden Nanopartikel in der Lösung selbst erzeugt. Zur Herstellung von Magnetit-Nanopartikeln fällt man Fe_3O_4 aus einer wässrigen Lösung von Eisen(II)- und Eisen(III)-Chlorid durch Zugabe von Ammoniak aus.



Zur Herstellung des Ferrofluids gibt man nun zum Beispiel Ölsäure als Ummantelung, sowie das Dispersionsmittel hinzu.

2.2.4. Verwendung

2.2.4.1. Technische Anwendung

In Lautsprechern verwendet man Ferrofluide zur Wärmeabführung und aufgrund seiner veränderbaren Viskosität als Dämpfungsmittel. Hierzu fixiert man das Ferrofluid mittels eines Magnetfeldes an der Stelle, an der es die Wärme abführen soll. Sein Vorteil gegenüber Luft ist eine etwa 4,5-mal größere Wärmeleitfähigkeit.

Unter anderem verwendet man Ferrofluide in Festplatten als Dichtungsmittel. Aufgrund ihrer geringeren Reibung und ihrer niedrigeren Verschleißempfindlichkeit gegenüber herkömmlichen Dichtungsmitteln eignen sie sich dazu besser. [14]

2.2.4.2. Medizinische und pharmazeutische Anwendung

In der Magnetresonanztomographie (MRT) werden Ferrofluide als Kontrastmittel verwendet. Eine andere Anwendung ist die Hyperthermie. Hier werden Tumorzellen durch Erhitzen der Ferrofluide im Körper zerstört. Außerdem lassen sich Medikamente mittels Ferrofluiden und angelegten Magnetfeldern gezielt in gewissen Körperregionen fixieren.

3. Experimenteller Teil



Abbildung 12: Für den experimentellen Teil benötigte Utensilien.

Für die durchgeführten Versuche wurden folgende Utensilien verwendet, die auch in Abbildung 12 zu sehen sind:

- Ferrofluid EFH1
- Handschuhe
- Pasteur-Pipette
- Rollrandgläser
100 mm × 30 mm
- Neodym-Magnete
- Labornetzgerät Conrad DIGI35 T
Netzeingang: 230 V (50/60 Hz)
Spannungsbereich: 0–35 V
Strombereich: 0–2,55 A
- Elektromagnet
12 V/DC; 3,8 W Nennleistung; 100 N Anfangs-/Endkraft
- Aluminiumblech
250 mm × 250 mm × 0,8 mm (zweilagig)
- Stahlblech
250 mm × 250 mm × 0,75 mm (zweilagig)

- Sperrholzzuschnitt
210 mm × 297 mm × 4 mm
- Unmagnetische Münzen
Kanadischer Penny
- Isopropanol
- Spiritus
- Spülmittel

Bei Umgang mit Ferrofluid sollten stets Handschuhe und Schutzbrille getragen werden. Um dauerhafte Verschmutzungen der Kleidung zu vermeiden, sollte außerdem Schutzkleidung getragen werden. Zudem empfiehlt es sich die Arbeitsfläche abzudecken, um auch diese vor dauerhaften Verschmutzungen zu bewahren.

Das Ferrofluid sollte nicht in der Nähe starker Magnetfelder gelagert werden.

Zur Entsorgung des Ferrofluids kann dieses zum Beispiel mit Papier gebunden werden und als Restmüll entsorgt werden. [15]

Zur besseren Handhabung der Neodym-Magnete wurden einige davon mit Heißkleber an dünnen Holzstäben fixiert.

3.1. Ansetzen eines geeigneten „Lösemittels“

Für die Versuche im Rollrandglas wird ein geeignetes „Lösemittel“ gesucht. Da für diese Zwecke das Ferrofluid und die umgebende Flüssigkeit zwingend zwei Phasen ausbilden müssen, darf die Flüssigkeit bezogen auf das Ferrofluid kein Lösemittel im eigentlichen Sinne sein.

3.1.1. Ansetzen einer Verdünnungsreihe mit Spülmittel

3.1.1.1. Durchführung

Aus 5,00 g Spülmittel und 100 mL demineralisiertem Wasser wird eine Stammlösung angesetzt. Von dieser werden 1–8 mL jeweils in 1 mL-Schritten in ein mit Isopropanol entfettetes Rollrandglas mit etwa 75 mL Volumen gegeben und mit demineralisiertem Wasser aufgefüllt. Nach einiger Zeit werden die Rollrandgläser je mit ungefähr gleicher Menge Ferrofluid versetzt.

3.1.2. Beobachtung der Verdünnungsreihe mit Spülmittel

3.1.2.1. Durchführung

Die Verdünnungsreihe mit Spülmittel wird nach verschiedenen Zeitintervallen beobachtet.

Zur Beurteilung des Verschmutzungsgrades der Gläser wird eine Skala von 1 bis 10 definiert, wobei 1 keinerlei und 10 maximale Verschmutzung bedeutet.

3.1.2.2. Beobachtung

Tag 1

Tabelle 2: Beobachtungen der Spülmittel-Verdünnungsreihe an Tag 1.

Volumen Stammlösung	Verhalten beim Absinken	Besonderheiten	Verschmutzungsgrad Glas	Aussehen der Lösung
1 mL	Bildung vieler kleiner Tropfen	—	2,0	▪ klar ▪ farblos
2 mL	Schlierenbildung	—	2,0	▪ klar ▪ farblos

3 mL	Bildung vieler kleiner Tropfen	—	1,5	▪ klar ▪ farblos
4 mL	Bildung vieler kleiner Tropfen	—	2,0	▪ klar ▪ farblos
5 mL	Bildung vieler kleiner Tropfen	—	1,5	▪ klar ▪ farblos
6 mL	Bildung größerer Tropfen	—	2,0	▪ klar ▪ farblos
7 mL	Bildung größerer Tropfen	—	2,0	▪ klar ▪ farblos
8 mL	Bildung größerer Tropfen	—	2,0	▪ klar ▪ farblos

Tag 22

Tabelle 3: Beobachtungen der Spülmittel-Verdünnungsreihe an Tag 22.

Volumen Stamm-lösung	Verhalten beim Absinken	Besonderheiten	Verschmutzungsgrad Glas	Aussehen der Lösung
1 mL	Schlierenbildung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ reagiert träge ▪ keine Tropfenbildung ▪ inhomogene Teilchengröße ▪ keine Rosensweig-Instabilität 	3,5	<ul style="list-style-type: none"> ▪ klar ▪ farblos
2 mL	Schlierenbildung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ spricht direkt auf Magnetfeld an ▪ keine Tropfenbildung ▪ homogene Teilchengröße ▪ keine Rosensweig-Instabilität 	2,0	<ul style="list-style-type: none"> ▪ klar ▪ farblos
3 mL	Schlierenbildung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ spricht direkt auf Magnetfeld an ▪ keine Tropfenbildung 	4,0	<ul style="list-style-type: none"> ▪ klar ▪ farblos

		<ul style="list-style-type: none"> ▪ homogene Teilchengröße ▪ keine Rosensweig-Instabilität 		
4 mL	Schlierenbildung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ spricht direkt auf Magnetfeld an ▪ keine Tropfenbildung ▪ Plättchenbildung ▪ keine Rosensweig-Instabilität 	2,0	<ul style="list-style-type: none"> ▪ klar ▪ farblos
5 mL	Schlierenbildung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ spricht direkt auf Magnetfeld an ▪ keine Tropfenbildung ▪ homogene Teilchengröße ▪ keine Rosensweig-Instabilität 	4,0	<ul style="list-style-type: none"> ▪ klar ▪ farblos
6 mL	Schlierenbildung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ spricht direkt auf Magnetfeld an ▪ keine Tropfenbildung ▪ homogene Teilchengröße ▪ keine Rosensweig-Instabilität 	4,0	<ul style="list-style-type: none"> ▪ klar ▪ farblos
7 mL	Schlierenbildung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ spricht direkt auf Magnetfeld an ▪ keine Tropfenbildung ▪ homogene Teilchengröße ▪ keine Rosensweig-Instabilität 	5,0	<ul style="list-style-type: none"> ▪ klar ▪ farblos
8 mL	Schlierenbildung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ spricht direkt auf Magnetfeld an ▪ keine Tropfenbildung 	5,0	<ul style="list-style-type: none"> ▪ klar ▪ farblos

- homogene Teilchengröße
- keine Rosensweig-Instabilität

Tag 29

Tabelle 4: Beobachtungen der Spülmittel-Verdünnungsreihe an Tag 29.

Volumen Stamm-lösung	Verhalten beim Absinken	Besonderheiten	Verschmutzungsgrad Glas	Aussehen der Lösung
1 mL	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Schlierenbildung ▪ reagiert träge auf Entfernen des Magneten 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ rostbraune Farbe des „Ferrofluids“ ▪ keine Tropfenbildung ▪ spricht direkt auf Magnetfeld an ▪ inhomogene Teilchengröße ▪ keine Rosensweig-Instabilität 	3,5	<ul style="list-style-type: none"> ▪ klar ▪ farblos
2 mL	Schlierenbildung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ spricht direkt auf Magnetfeld an ▪ keine Tropfenbildung ▪ homogene Teilchengröße ▪ keine Rosensweig-Instabilität 	2,0	<ul style="list-style-type: none"> ▪ klar ▪ farblos
3 mL	Schlierenbildung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ spricht direkt auf Magnetfeld an ▪ keine Tropfenbildung ▪ Plättchenbildung ▪ keine Rosensweig- 	4,5	<ul style="list-style-type: none"> ▪ klar ▪ farblos

Instabilität				
4 mL	leichte Schlierenbildung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ spricht direkt auf Magnetfeld an ▪ keine Tropfenbildung ▪ Plättchenbildung ▪ keine Rosensweig-Instabilität 	3,5	<ul style="list-style-type: none"> ▪ klar ▪ farblos
5 mL	leichte Schlierenbildung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ spricht direkt auf Magnetfeld an ▪ keine Tropfenbildung ▪ Plättchenbildung ▪ keine Rosensweig-Instabilität 	4,5	<ul style="list-style-type: none"> ▪ klar ▪ farblos
6 mL	keine Schlierenbildung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Plättchenbildung mit rostbrauner Farbe ▪ spricht direkt auf Magnetfeld an ▪ keine Rosensweig-Instabilität 	4,5	<ul style="list-style-type: none"> ▪ klar ▪ farblos
7 mL	leichte Schlierenbildung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ spricht direkt auf Magnetfeld an ▪ keine Tropfenbildung ▪ Plättchenbildung ▪ keine Rosensweig-Instabilität 	5,5	<ul style="list-style-type: none"> ▪ klar ▪ farblos
8 mL	keine Schlierenbildung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ spricht direkt auf Magnetfeld an ▪ keine Tropfenbildung ▪ Plättchenbildung ▪ keine Rosensweig-Instabilität 	5,0	<ul style="list-style-type: none"> ▪ klar ▪ farblos

Tag 59

Tabelle 5: Beobachtungen der Spülmittel-Verdünnungsreihe an Tag 59.

Volumen Stamm- lösung	Verhalten beim Absinken	Besonderheiten	Verschmutz- ungsgrad Glas	Aussehen der Lösung
1 mL	kein Absinken	<ul style="list-style-type: none"> ▪ spricht mäßig auf Magnetfeld an ▪ keine Tropfenbildung ▪ inhomogene Teilchengröße ▪ keine Rosensweig- Instabilität 	3,5	<ul style="list-style-type: none"> ▪ trüb ▪ braun
2 mL	Schlieren- bildung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ spricht direkt auf Magnetfeld an ▪ keine Tropfenbildung ▪ inhomogene Teilchengröße ▪ keine Rosensweig- Instabilität 	2,0	<ul style="list-style-type: none"> ▪ klar ▪ farblos
3 mL	Schlieren- bildung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ spricht direkt auf Magnetfeld an ▪ keine Tropfenbildung ▪ Plättchenbildung ▪ keine Rosensweig- Instabilität 	8,0	<ul style="list-style-type: none"> ▪ klar ▪ farblos
4 mL	Schlieren- bildung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ spricht direkt auf Magnetfeld an ▪ keine Tropfenbildung ▪ Plättchenbildung ▪ keine Rosensweig- Instabilität 	4,5	<ul style="list-style-type: none"> ▪ klar ▪ farblos
5 mL	Schlieren- bildung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ spricht direkt auf Magnetfeld an ▪ keine Tropfenbildung ▪ Plättchenbildung ▪ keine Rosensweig- 	4,5	<ul style="list-style-type: none"> ▪ klar ▪ farblos

Instabilität				
6 mL	kein Absinken	<ul style="list-style-type: none"> ▪ spricht direkt auf Magnetfeld an ▪ keine Tropfenbildung ▪ Plättchenbildung ▪ keine Rosensweig-Instabilität ▪ sitzt am Boden fest 	4,5	<ul style="list-style-type: none"> ▪ klar ▪ farblos
7 mL	Schlierenbildung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ spricht direkt auf Magnetfeld an ▪ keine Tropfenbildung ▪ inhomogene Teilchengröße ▪ keine Rosensweig-Instabilität 	5,5	<ul style="list-style-type: none"> ▪ klar ▪ farblos
8 mL	fällt als Agglomerat	<ul style="list-style-type: none"> ▪ spricht direkt auf Magnetfeld an ▪ keine Tropfenbildung ▪ inhomogene Teilchengröße ▪ keine Rosensweig-Instabilität 	6,0	<ul style="list-style-type: none"> ▪ klar ▪ farblos

Tag 75

Tabelle 6: Beobachtungen der Spülmittel-Verdünnungsreihe an Tag 75.

Volumen Stamm-lösung	Verhalten beim Absinken	Besonderheiten	Verschmutzungsgrad Glas	Aussehen der Lösung
1 mL	kein Absinken	<ul style="list-style-type: none"> ▪ spricht träge auf Magnetfeld an ▪ keine Tropfenbildung ▪ inhomogene Teilchengröße ▪ keine Rosensweig- 	3,5	<ul style="list-style-type: none"> ▪ trüb ▪ braun

Instabilität				
2 mL	Schlieren- bildung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ spricht direkt auf Magnetfeld an ▪ keine Tropfenbildung ▪ inhomogene Teilchengröße ▪ keine Rosensweig-Instabilität ▪ liegt als fein verteilter Feststoff vor 	2,0	<ul style="list-style-type: none"> ▪ klar ▪ farblos
3 mL	Schlieren- bildung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ spricht direkt auf Magnetfeld an ▪ keine Tropfenbildung ▪ Plättchenbildung ▪ keine Rosensweig-Instabilität ▪ Inhomogene Teilchengröße 	8,0	<ul style="list-style-type: none"> ▪ klar ▪ farblos
4 mL	Schlieren- bildung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ spricht direkt auf Magnetfeld an ▪ keine Tropfenbildung ▪ Plättchenbildung ▪ keine Rosensweig-Instabilität ▪ Inhomogene Teilchengröße 	4,5	<ul style="list-style-type: none"> ▪ klar ▪ farblos
5 mL	Schlieren- bildung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ spricht direkt auf Magnetfeld an ▪ keine Tropfenbildung ▪ Plättchenbildung ▪ keine Rosensweig-Instabilität ▪ inhomogene Teilchengröße 	4,5	<ul style="list-style-type: none"> ▪ klar ▪ farblos

6 mL	kein Absinken	<ul style="list-style-type: none"> ▪ sitzt am Boden fest ▪ spricht direkt auf Magnetfeld an ▪ Plättchenbildung ▪ keine Rosensweig-Instabilität ▪ keine Tropfenbildung 	4,5	<ul style="list-style-type: none"> ▪ klar ▪ farblos
7 mL	kein Absinken	<ul style="list-style-type: none"> ▪ spricht direkt auf Magnetfeld an ▪ keine Tropfenbildung ▪ inhomogene Teilchengröße ▪ „Faden“-Bildung ▪ keine Rosensweig-Instabilität 	5,5	<ul style="list-style-type: none"> ▪ klar ▪ farblos
8 mL	kein Absinken	<ul style="list-style-type: none"> ▪ spricht direkt auf Magnetfeld an ▪ keine Tropfenbildung ▪ inhomogene Teilchengröße ▪ keine Rosensweig-Instabilität ▪ rostbraune Farbe des „Ferrofluids“ 	6,0	<ul style="list-style-type: none"> ▪ klar ▪ farblos

3.1.2.3. Deutung

Am ersten Tag zeigt das Ferrofluid in allen Lösungen noch seine typischen Eigenschaften, wie zum Beispiel die Rosensweig-Instabilität. Alle Rollrandgläser waren zu diesem Zeitpunkt relativ sauber.

Bereits ab Tag 22 bildet das Ferrofluid in allen Lösungen weder Tropfen noch eine Rosensweig-Instabilität. Es wird angenommen, dass sich das Ferrofluid im Laufe der Zeit unter Einfluss der umgebenden Flüssigkeit zersetzt hat.

Bei einigen Lösungen hat sich der Inhalt merklich rostbraun verfärbt und feste Partikel wurden mit bloßem Auge sichtbar. Des Weiteren zeigte auch die umgebende Flüssigkeit einer der angesetzten Lösungen braune Verfärbungen.

Eine wässrige Spülmittellösung eignet sich also nicht um das Ferrofluid dauerhaft darin aufzubewahren.

3.1.3. Ansetzen einer Verdünnungsreihe mit Spiritus

3.1.3.1. Durchführung

Aus Spiritus und demineralisiertem Wasser wird eine Verdünnungsreihe mit den in Tabelle 7 aufgelisteten Volumenanteilen φ angesetzt.

Tabelle 7: Ansatz der Verdünnungsreihe mit Spiritus.

φ (Spiritus)	V (Spiritus)/mL	V (desmin. Wasser)/mL
0,0	0,00	100,00
0,1	10,00	90,00
0,2	20,00	80,00
0,3	30,00	70,00
0,4	40,00	60,00
0,5	50,00	50,00
0,6	60,00	40,00
0,7	70,00	30,00
0,8	80,00	20,00
0,9	90,00	10,00
1,0	100,00	0,00

Die Verdünnungen werden in mit Isopropanol entfettete Rollrandgläser gefüllt und jeweils mit etwas Ferrofluid (ca. fünf Tropfen) versetzt.

3.1.4. Beobachtung der Verdünnungsreihe mit Spiritus

3.1.4.1. Durchführung

Die Verdünnungsreihe mit Spiritus wird nach verschiedenen Zeitintervallen beobachtet.

Zur Beurteilung des Verschmutzungsgrades der Gläser wird die in 3.1.2.1. eingeführte Skala verwendet.

3.1.4.2. Beobachtung

Tag 5

Tabelle 8: Beobachtungen der Spiritus-Verdünnungsreihe an Tag 5.

$\varphi(\text{Spiritus})$	Verhalten beim Absinken	Besonderheiten	Verschmutzungsgrad Glas	Aussehen der Lösung
0,0	fällt als Tropfen herab	<ul style="list-style-type: none">▪ Tropfenbildung▪ keine Rosensweig-Instabilität▪ spricht direkt auf Magnetfeld an	10,0	<ul style="list-style-type: none">▪ klar▪ farblos
0,1	fällt als Tropfen herab	<ul style="list-style-type: none">▪ Tropfenbildung▪ nur am Rand Rosensweig-Instabilität▪ spricht direkt auf Magnetfeld an	10,0	<ul style="list-style-type: none">▪ klar▪ farblos
0,2	fällt als Tropfen herab	<ul style="list-style-type: none">▪ Tropfenbildung▪ nur am Rand Rosensweig-Instabilität▪ spricht direkt auf Magnetfeld an	10,0	<ul style="list-style-type: none">▪ klar▪ farblos
0,3	fällt als Tropfen herab	<ul style="list-style-type: none">▪ Tropfenbildung▪ nur am Rand Rosensweig-Instabilität	3,5	<ul style="list-style-type: none">▪ klar▪ farblos

		(ausgeprägter)		
		▪ spricht direkt auf Magnetfeld an		
0,4	fällt als Tropfen herab	▪ Tropfenbildung ▪ nur am Rand Rosensweig- Instabilität (nochmals ausgeprägter)	3,5	▪ klar ▪ farblos
		▪ spricht direkt auf Magnetfeld an		
0,5	fällt als „Staub“ herab	▪ liegt als fein verteilter Feststoff vor ▪ homogene Teilchengröße ▪ spricht direkt auf Magnetfeld an	1,0	▪ klar ▪ farblos
0,6	fällt als Tropfen herab	▪ Tropfenbildung ▪ spricht direkt auf Magnetfeld an ▪ Rosensweig- Instabilität überall deutlich erkennbar	3,5	▪ klar ▪ farblos
0,7	fällt als Agglomerat herab	▪ liegt als Feststoff vor ▪ inhomogene Teilchengröße ▪ spricht direkt auf Magnetfeld an	3,5	▪ klar ▪ farblos
0,8	fällt als Agglomerat herab	▪ liegt als Feststoff vor ▪ inhomogene Teilchengröße ▪ spricht direkt auf Magnetfeld an	1,5	▪ klar ▪ farblos

0,9	fällt als „Staub“ herab	<ul style="list-style-type: none"> ▪ liegt als Feststoff vor ▪ inhomogene Teilchengröße ▪ spricht direkt auf Magnetfeld an 	1,0	<ul style="list-style-type: none"> ▪ klar ▪ farblos
1,0	fällt als „Staub“ herab	<ul style="list-style-type: none"> ▪ liegt als Feststoff vor ▪ inhomogene Teilchengröße ▪ spricht direkt auf Magnetfeld an 	1,0	<ul style="list-style-type: none"> ▪ klar ▪ farblos

Tag 19

Tabelle 9: Beobachtungen der Spiritus-Verdünnungsreihe an Tag 19.

$\varphi(\text{Spiritus})$	Verhalten beim Absinken	Besonderheiten	Verschmutzungsgrad Glas	Aussehen der Lösung
0,0	fällt als Agglomerat herab	<ul style="list-style-type: none"> ▪ inhomogene Teilchengröße ▪ Plättchenbildung ▪ keine Rosensweig-Instabilität ▪ spricht verzögert auf Magnetfeld an 	10,0	<ul style="list-style-type: none"> ▪ klar ▪ farblos
0,1	fällt teils als Agglomerat und teils als Tropfen herab	<ul style="list-style-type: none"> ▪ kaum Tropfenbildung ▪ inhomogene Teilchengröße ▪ keine Rosensweig-Instabilität ▪ spricht direkt auf Magnetfeld an ▪ reagiert verzögert auf Wegnahme eines Magnetfeldes 	10,0	<ul style="list-style-type: none"> ▪ klar ▪ farblos

0,2	fällt als verformter Tropfen herab	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tropfenbildung und Plättchenbildung ▪ inhomogene Teilchengröße ▪ keine Rosensweig-Instabilität ▪ spricht direkt auf Magnetfeld an 	10,0	<ul style="list-style-type: none"> ▪ klar ▪ farblos
0,3	fällt als Tropfen herab	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tropfenbildung ▪ homogene Teilchengröße ▪ nur am Rand Rosensweig-Instabilität ▪ spricht direkt auf Magnetfeld an 	6,0	<ul style="list-style-type: none"> ▪ klar ▪ farblos
0,4	fällt als Tropfen herab	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tropfenbildung (verformt) ▪ inhomogene Teilchengröße ▪ nur am Rand Rosensweig-Instabilität (ausgeprägter) ▪ spricht direkt auf Magnetfeld an 	5,0	<ul style="list-style-type: none"> ▪ klar ▪ farblos
0,5	fällt als „Staub“ herab	<ul style="list-style-type: none"> ▪ liegt als fein verteilter Feststoff vor ▪ homogene Teilchengröße ▪ spricht direkt auf Magnetfeld an 	1,0	<ul style="list-style-type: none"> ▪ klar ▪ farblos
0,6	fällt als Tropfen herab	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tropfenbildung ▪ homogene Teilchengröße 	3,5	<ul style="list-style-type: none"> ▪ klar ▪ farblos

		<ul style="list-style-type: none"> ▪ spricht direkt auf Magnetfeld an ▪ Rosensweig-Instabilität überall deutlich erkennbar 		
0,7	fällt als Agglomerat herab	<ul style="list-style-type: none"> ▪ liegt als Feststoff vor ▪ inhomogene Teilchengröße ▪ keine Rosensweig-Instabilität ▪ spricht direkt auf Magnetfeld an 	1,5	<ul style="list-style-type: none"> ▪ klar ▪ farblos
0,8	fällt als Agglomerat herab	<ul style="list-style-type: none"> ▪ liegt als Feststoff vor ▪ inhomogene Teilchengröße ▪ spricht direkt auf Magnetfeld an ▪ keine Rosensweig-Instabilität 	1,5	<ul style="list-style-type: none"> ▪ klar ▪ farblos
0,9	fällt als „Staub“ und als Agglomerat herab	<ul style="list-style-type: none"> ▪ liegt als Feststoff vor ▪ inhomogene Teilchengröße ▪ spricht direkt auf Magnetfeld an ▪ keine Rosensweig-Instabilität 	1,0	<ul style="list-style-type: none"> ▪ klar ▪ farblos
1,0	fällt als „Staub“ herab	<ul style="list-style-type: none"> ▪ liegt als fein verteilter Feststoff vor ▪ inhomogene Teilchengröße ▪ keine Rosensweig-Instabilität ▪ spricht direkt auf Magnetfeld an 	1,0	<ul style="list-style-type: none"> ▪ klar ▪ farblos

3.1.4.3. Deutung

Beim Beobachten der Verdünnungsreihe am fünften Tag ließ sich feststellen, dass etwa bei der Hälfte aller angesetzter Rollrandgläser die zu erwartenden Eigenschaften des Ferrofluids vorhanden waren. Dies war bei den Lösungen mit einem Volumenanteil $\varphi(\text{Spiritus})$ von 0,0 – 0,6 mit Ausnahme der Lösung mit $\varphi(\text{Spiritus}) = 0,5$ der Fall. Bei den anderen Gläsern scheint sich das Ferrofluid bereits durch Einfluss der jeweiligen Spirituslösungen zersetzt zu haben.

Nach weiteren 14 Tagen zeigte nur das Ferrofluid in der Lösung mit $\varphi(\text{Spiritus}) = 0,6$ dessen charakteristischen Eigenschaften. Das Ferrofluid in den Lösungen mit den Volumenanteilen $\varphi(\text{Spiritus})$ von 0,0 – 0,4, das zu Beginn der Beobachtung noch als Tropfen vorlag, verschlechterte sich im Vergleich dazu. Je größer der Volumenanteil an Spiritus in diesen Lösungen ist, desto besser ist das Ferrofluid erhalten.

Das Aufbewahren des Ferrofluids in einer Lösung mit $\varphi(\text{Spiritus}) = 0,6$ ist also zu empfehlen.

3.2. Versuche im Rollrandglas

3.2.1. Verhalten unter Einfluss eines Neodym-Magneten

3.2.1.1. Durchführung

Ein mit Isopropanol entfettetes Rollrandglas (A) wird mit einer wässrigen Isopropanol-Lösung gefüllt und mit etwas Ferrofluid versetzt. Ein zweites Rollrandglas (B) wird mit demineralisiertem Wasser befüllt, mit einem Tropfen Spülmittel und nach Durchmischung ebenfalls mit etwas Ferrofluid versetzt. Ferrofluid, das nicht von alleine absinkt, wird mit Hilfe eines Neodym-Magneten nach unten gezogen.

Nach dieser Präparation wird der Magnet an die Außenwand gehalten und bewegt.

3.2.1.2. Beobachtung

Bei Zugabe des Ferrofluids bilden sich zwei Phasen aus, wobei das Ferrofluid zum Boden sinkt. Bei Glas (A) verfärbt sich das Glas an manchen Stellen dunkel.

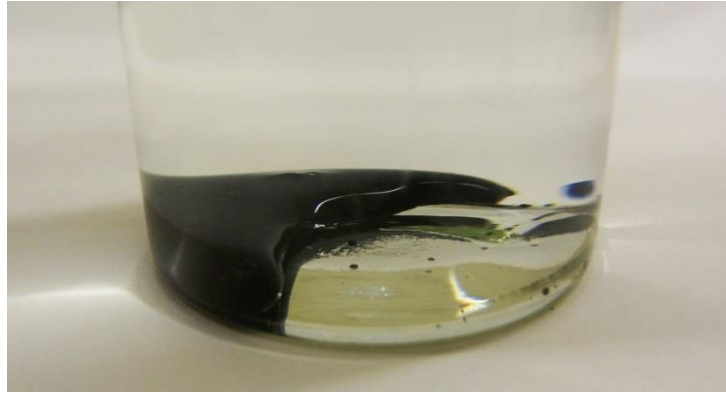


Abbildung 13: Ferrofluid ohne Einfluss eines Magnetfeldes.

An der Stelle, an der der Magnet gehalten wird, bilden sich „Stacheln“, die der Bewegung des Magneten folgen.

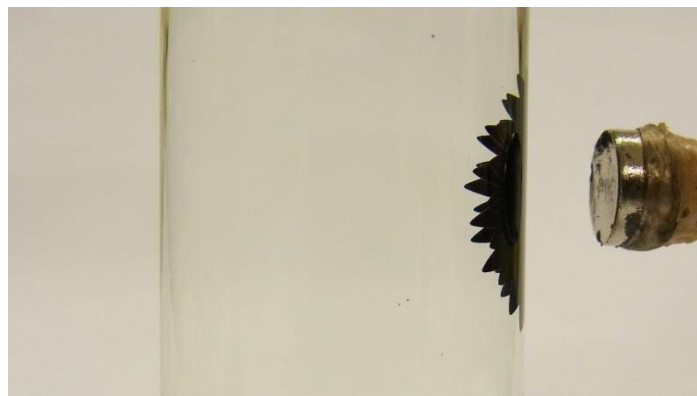


Abbildung 14: Ferrofluid unter Einfluss eines Neodym-Magneten.

3.2.1.3. Erklärung

Die Trägerflüssigkeit des Ferrofluids ist ein Gemisch aus Kohlenwasserstoffen, ist demnach unpolar. Die wässrige Isopropanol-Lösung hingegen ist aufgrund der stark polarisierten O–H-Bindung beider Moleküle sehr polar. Da sich gleiches nur in gleichem löst, bilden sich zwei Phasen aus. Durch die im Vergleich zur Lösung höheren Dichte des Ferrofluids, sinkt es nach unten.

Die Verfärbungen des Glases (A) resultieren daher, dass das Glas nicht überall gleichmäßig mit Lösemittel benetzt ist. Ist die Wechselwirkung des Glases mit dem Ferrofluid größer als

die Wechselwirkungen des Glases mit dem Lösemittel, so bleibt das Ferrofluid am Glas haften, wodurch dunkle Verfärbungen entstehen.

Die beobachtbaren „Stacheln“ sind auf die Rosensweig-Instabilität zurückzuführen. Da diese nur unter dem Einfluss eines Magnetfeldes entstehen und die Magnetit-Partikel *per se* magnetisch sind, folgen sie dem Magnetfeld.

3.2.2. Verhalten unter Einfluss verschieden starker Neodym-Magneten

3.2.2.1. Durchführung

An einen der Magnete mit Griff werden zunächst kein, dann ein und danach zwei Magnete gleicher Art fixiert. Die so entstandenen Magnete sollen als stärkere neue Magnete betrachtet werden.

Diese werden an die Außenwand eines, mit Isopropanol entfettetem und mit einer wässrigen Spirituslösung ($\varphi = 0,6$) gefülltem, Rollrandglases gehalten und mit einer Klammer auf einen festen Abstand justiert.

3.2.2.2. Beobachtung

Bei allen Versuchsanordnungen ist eine Rosensweig-Instabilität beobachtbar, wobei diese bei Verwendung von drei Magneten deutlich ausgeprägter ist, als bei einem.

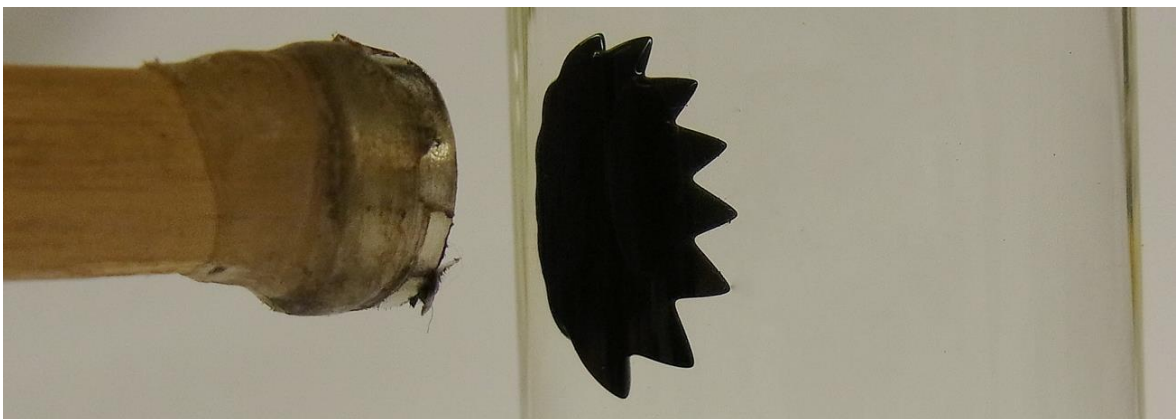


Abbildung 15: Ferrofluid unter Einfluss von einem Magneten.

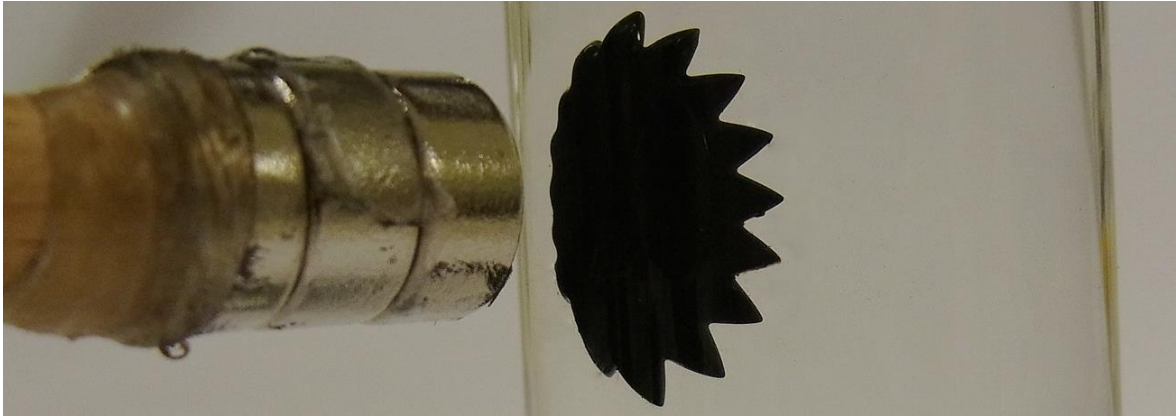


Abbildung 16: Ferrofluid unter Einfluss von mehreren gleichen Magneten aneinander.

3.2.2.3. Erklärung

Vergleicht man die Versuchsanordnungen miteinander, so stellt man fest, dass die Rosensweig-Instabilität bei mehreren Magneten aneinander ausgeprägter ist.

Dies lässt sich dadurch erklären, dass die Rosensweig-Instabilität abhängig von der Magnetfeldstärke ist. Je größer diese ist, desto mehr „Stacheln“ bilden sich.

Fügt man mehrere gleiche Magnete zusammen, entsteht ein neuer Magnet größerer Magnetfeldstärke als die eines einzelnen.

3.2.3. Verhalten unter Einfluss von zwei Neodym-Magneten

3.2.3.3. Durchführung

An ein, wie in 3.2.2.1. befülltes, Rollrandglas wird von beiden Seiten je ein Neodym-Magnet gleicher Stärke gehalten.

Bei Versuchsaufbau (A) wurden zwei Magnete unterschiedlicher Polung in einem Winkel von etwa 180° , bei Versuchsaufbau (B) zwei Magnete gleicher Polung in einem Winkel von etwa 90° an das Rollrandglas gehalten. Diese sind in Abbildung 17 skizziert.

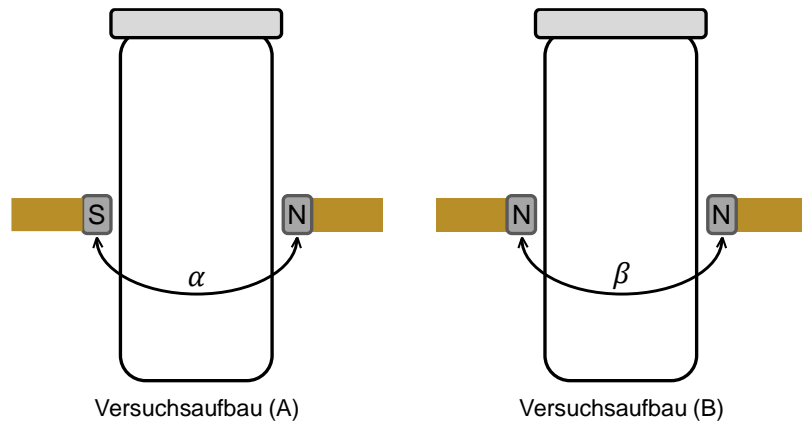


Abbildung 17: Schematische Darstellung der Versuchsaufbauten.

3.2.3.4. Beobachtung

Abhängig vom Versuchsaufbau gibt es zwei verschiedene Beobachtungen:

Bei Versuchsaufbau (A) entsteht eine „Brücke“ aus Ferrofluid zwischen den zwei Magneten.

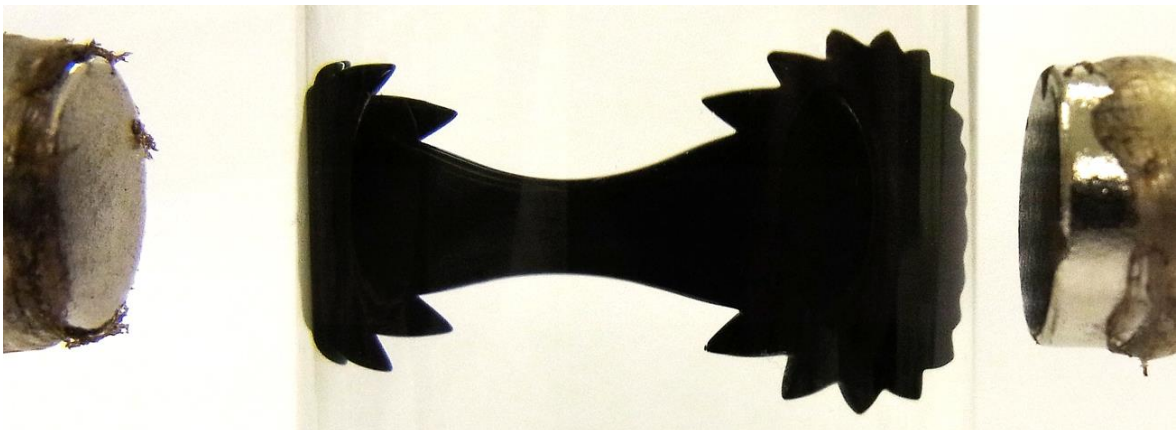


Abbildung 18: Ferrofluid unter Einfluss von zwei Magneten ungleicher Polung.

Bei Versuchsaufbau (B) stoßen sich die an den Magneten haftenden Ferrofluid-Ansammlungen gegenseitig ab.



Abbildung 19: Ferrofluid unter Einfluss von zwei Magneten gleicher Polung.

3.2.3.5. Erklärung

Bei Versuchsaufbau (A), mit unterschiedlicher Polung der von außen an das Rollrandglas angelegten Magnete, verlaufen die Magnetfeldlinien vom Nord- zum Südpol durch das Glas. Entlang dieser sammelt sich das Ferrofluid an, wodurch eine „Brücke“ entsteht.

Bei Versuchsaufbau (B), mit gleicher Polung der Magnete, divergieren die Magnetfeldlinien nach außen. Daher stoßen sich die Ansammlungen von Ferrofluid voneinander ab.

3.2.4. Temperaturverhalten

3.2.4.1. Abkühlen

3.2.4.1.1. Durchführung

Ein mit Isopropanol entfettetes Rollrandglas wurde mit wässriger Spülmittellösung gefüllt und mit Ferrofluid versetzt. An der Unterseite des Glases wurde ein Neodym-Magnet fixiert. Das Rollrandglas wurde in ein mit Alufolie isoliertes Becherglas mit einer Kältemischung aus Magnesiumchlorid-Hexahydrat und Eis gestellt.

Die Kältemischung wurde mit folgendem Mischungsverhältnis erstellt:

85g $\text{MgCl}_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$ auf 100g Eis.

Nach einiger Zeit wurde das Rollrandglas aus der Kältemischung herausgenommen und der Magnet entfernt.

3.2.4.1.2. Beobachtung

Nach Anbringen des Neodym-Magneten konnte eine Rosensweig-Instabilität beobachtet werden.

Nach dem Entfernen des Magneten verschwand diese.

3.2.4.1.3. Erklärung

Absicht dieses Versuches war es den Zustand der Rosensweig-Instabilität durch Abkühlen so zu beeinflussen, dass er auch nach Entfernen des Magneten noch vorhanden ist.

Das verwendete Ferrofluid EFH1 besitzt einen Pourpoint von -94 °C . [27] Bei dieser Temperatur ist das Ferrofluid gerade noch fließfähig.

In der Theorie sollte es möglich sein den Zustand der Rosensweig-Instabilität durch Abkühlen zu konservieren. Durch eine falsche Annahme, dass die verwendete Kältemischung eine Temperatur von -94 °C erreichen könnte, in der Theorie aber nur -34 °C erreichen kann, konnte der angestrebte Zustand nicht realisiert werden. [29] Folglich verschwand die Rosensweig-Instabilität direkt nach Entfernen des Magneten.

3.2.4.2. Erhitzen

3.2.4.2.1. Durchführung

Ein mit Isopropanol entfettetes Rollrandglas wurde mit wässriger Spülmittellösung gefüllt und mit Ferrofluid versetzt. Anschließend wurde es in einem Wasserbad in 10 °C -Schritten erwärmt.

Nach Einstellen der jeweiligen Temperatur wurde das Verhalten bei Anlegen eines Neodym-Magneten untersucht.

3.2.4.2.2. Beobachtung

Die gemachten Beobachtungen sind in Tabelle 10 festgehalten.

Tabelle 10: Beobachtungen beim Erwärmen des Ferrofluids in 10 °C-Abständen.

Temperatur/°C	Verhalten
22	▪ normale Rosensweig-Instabilität
30	▪ normale Rosensweig-Instabilität
40	▪ normale Rosensweig-Instabilität
50	▪ normale Rosensweig-Instabilität ▪ in der Bewegung dünnflüssiger
60	▪ normale Rosensweig-Instabilität ▪ in der Bewegung nochmals dünnflüssiger
70	▪ „Stacheln“ der Rosensweig-Instabilität sind kleiner ▪ in der Bewegung nochmals dünnflüssiger

3.2.4.2.3. Erklärung

Mit zunehmender Temperatur nimmt die Viskosität einer Flüssigkeit, und somit auch des Ferrofluids, ab. Dennoch ist die Rosensweig-Instabilität bei Anlegen eines Magnetfeldes zu beobachten. Offensichtlich ist dieses Verhalten nicht von der Temperatur abhängig.

Aus diesem Grund eignet sich Ferrofluid unter anderem als Dichtungsmaterial in Motoren, in denen durch Verbrennung hohe Temperaturen herrschen.

3.2.5. Untersuchung des Auftriebverhaltens im Ferrofluids

3.2.5.1. Versuch ohne Magnet

3.2.5.1.1. Durchführung

In ein wie in 3.2.2.1. präpariertes Rollrandglas wird eine nicht-ferromagnetische Münze gegeben.

3.2.5.1.2. Beobachtung

Nach Zugabe der Münze versinkt diese im Ferrofluid.

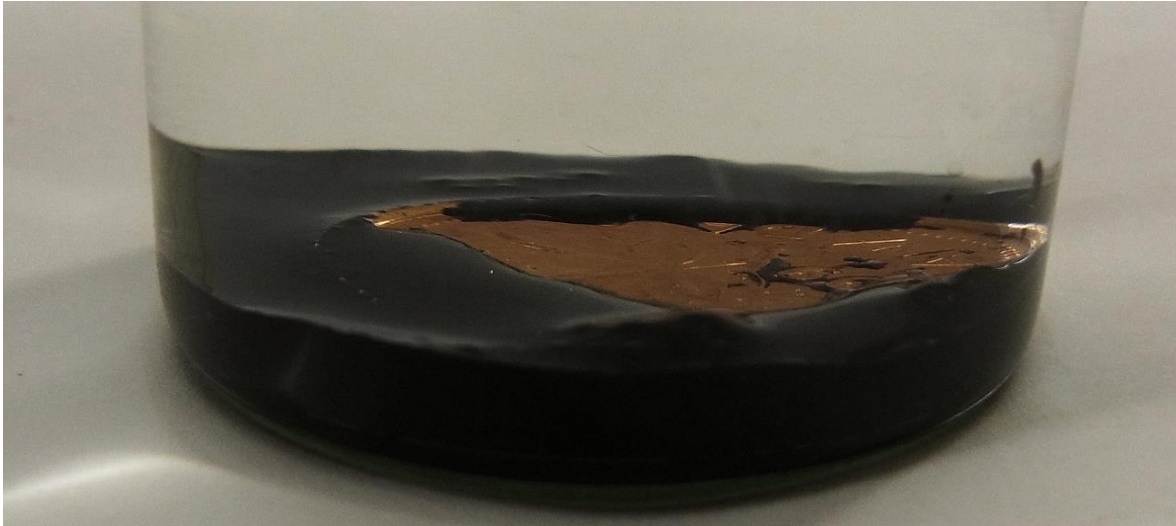


Abbildung 20: Münze versinkt im Ferrofluid.

3.2.5.1.3. Erklärung

Da die Münze eine höhere Dichte hat, als das Ferrofluid (siehe Tabelle 11), versinkt sie darin.

Tabelle 11: Dichten ρ der im Versuch verwendeten Materialien. [26,28]

Substanz	$\rho/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
Ferrofluid EFH1	1,21
Münze	6,84

3.2.5.1. Versuch mit Magnet

3.2.5.1.1. Durchführung

An der Unterseite eines wie in 3.2.2.1. präparierten Rollrandglases wird ein Neodym-Magnet angebracht. Anschließend wird eine nicht-ferromagnetische Münze in das Glas gegeben.

3.2.5.1.2. Beobachtung

Durch den Magneten entsteht eine Rosensweig-Instabilität.



Abbildung 21: Durch den Magneten entsteht eine Rosensweig-Instabilität.

Nach Zugabe der Münze versinkt diese nicht im Ferrofluid (siehe Abbildung 22).



Abbildung 22: Münze versinkt nicht im Ferrofluid.

3.2.5.1.3. Erklärung

Wider Erwarten versinkt die nicht-ferromagnetische Münze, trotz der wesentlich höheren Dichte ρ (siehe Tabelle 11), nicht im Ferrofluid.

Ein Magnetfeld verursacht in einem Ferrofluid nicht nur eine Rosensweig-Instabilität, sondern auch eine Auftriebskraft. Diese Kraft sorgt dafür, dass nicht-ferromagnetische Materialien, die sich im Ferrofluid befinden, an die Oberfläche steigen: Je stärker das angelegte Magnetfeld, desto größer ist der Auftrieb im Ferrofluid.

Durch Variation der Magnetfeldstärke lassen sich so Materialien unterschiedlicher Dichte nacheinander abtrennen. [32] Diese Eigenschaft ist so ausgeprägt, dass sogar Materialien mit einer Dichte bis zu $20\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ entgegen der Gewichtskraft angehoben werden. [33]

3.2.5.1.4. Anwendung

Diese Eigenschaft wird heutzutage als Trenntechnik, die man als magnetohydrostatische Trennung bezeichnet, ausgenutzt, um Stoffe verschiedener Dichte voneinander abzutrennen: In der Automobilindustrie beispielsweise werden die verschiedenen Metalle von den restlichen Bestandteilen des zerkleinerten Autoschrotts abgetrennt. [31]

3.3. Untersuchung verschiedener Permeabilitäten

3.3.5. Beeinflussung der Ausbreitung des Magnetfeldes

3.3.5.1. Untersuchung der Permeabilität einer Eisenschraube

3.3.5.1.1. Durchführung

Mit Hilfe eines Neodym-Magneten wird eine Eisenschraube in der Mitte einer Aluminiumschale, mit dem Schraubenkopf nach unten, fixiert. Auf die Spitze des Gewindes wird etwas Ferrofluid getropft.

3.3.5.1.2. Beobachtung

An der Spitze des Gewindes entstehen „Stacheln“. Nach weiterer Zugabe an Ferrofluid, „wandert“ es entlang des Gewindes unter Ausbildung weniger ausgeprägter „Stacheln“ nach unten.



Abbildung 23: Ferrofluid wandert der Schraube entlang nach unten.

3.3.5.1.3. Erklärung

Die beobachtbaren „Stacheln“ bezeichnet man als Rosensweig-Instabilität.

Diese „wandern“ gezwungenermaßen, nachdem die Spitze vollkommen bedeckt ist, entlang des Gewindes dem Magneten entgegen. Da die Schraube, die aus Eisen besteht und damit magnetisch ist, eine höhere Permeabilität besitzt als Luft, bleibt das Ferrofluid an der Schraube, anstatt senkrecht nach unten zu fallen. Da die Magnetfeldlinien an der Spitze der Schraube am konzentriertesten sind, ist die Rosensweig-Instabilität dort am ausgeprägtesten beobachtbar.

3.3.5.2. Untersuchung der Permeabilität verschiedener Materialien

3.3.5.2.1. Durchführung

Zwischen dem bereits in 3.3.1.1. präparierten Rollrandglas und einem Neodym-Magneten werden in Versuchsaufbau (A) ein Sperrholzzuschnitt, in (B) ein Aluminiumblech und in (C) ein Stahlblech im Abstand von je 1,0 cm fixiert.

Abbildung 20 zeigt Versuchsaufbau (A) bis (C) schematisch.

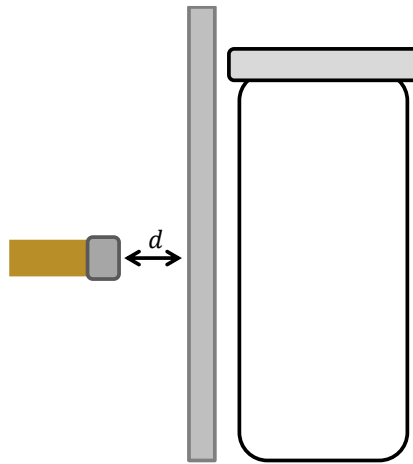


Abbildung 24: Versuchsaufbau (A) bis (C) mit $d = 1,0$ cm.

3.3.5.2.2. Beobachtung

Bei Versuchsaufbau (A) entsteht eine deutliche Rosensweig-Instabilität.



Abbildung 25: Magnetfeld durchdringt Holz und erzeugt Rosensweig-Instabilität.

Bei Versuchsaufbau (B) entsteht eine deutliche Rosensweig-Instabilität.

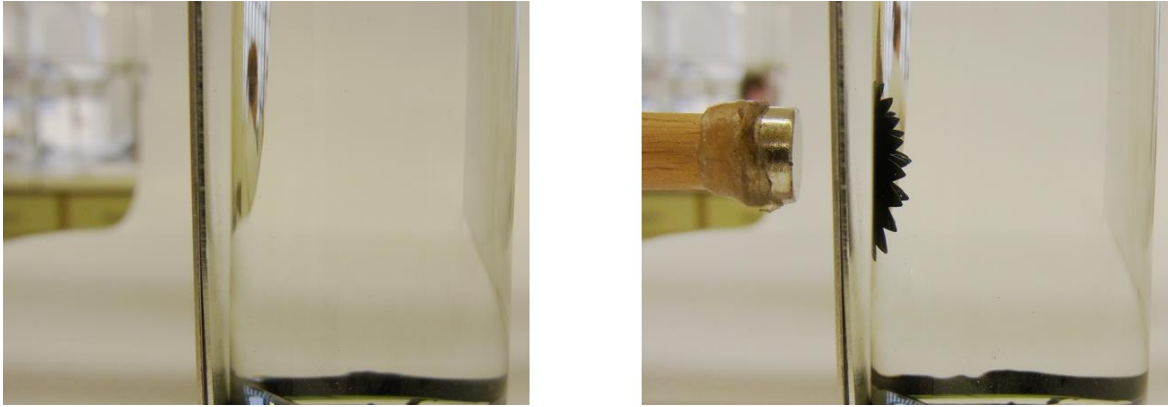


Abbildung 26: Magnetfeld durchdringt Aluminium und erzeugt Rosensweig-Instabilität.

Bei Versuchsaufbau (C) entsteht keine Rosensweig-Instabilität.



Abbildung 27: Magnetfeld durchdringt Stahl nicht. Rosensweig-Instabilität bleibt aus.

3.3.5.2.3. Erklärung

Die verschiedenen Beobachtungen sind auf die unterschiedlichen relativen Permeabilitäten der Gegenstände zurückzuführen.

Tabelle 12: Relative Permeabilität der verschiedenen Materialien. [4,7]

Material	μ_r
Holz	1
Aluminium	≈ 1
Stahl	100 – 4000
Luft	1

Da Holz die gleiche relative Permeabilität besitzt wie Luft, beeinflusst Holz das Magnetfeld nicht. Aluminium hat eine nur unwesentlich höhere relative Permeabilität, so dass dieses das Magnetfeld auch kaum beeinflusst. Stahl hingegen mit seiner deutlich höheren Permeabilität beeinflusst das Magnetfeld folgendermaßen: im Inneren verdichten sich die Magnetfeldlinien derart, dass sie das Material nicht mehr verlassen können. Folglich erreicht das Magnetfeld das Ferrofluid nicht und es kann zu keiner Rosensweig-Instabilität kommen.

3.4. Versuch mit einem Elektromagnet

3.4.1. Beeinflussung der Magnetfeldstärke

3.4.1.1. Variation der elektrischen Leistung

3.4.1.1.1. Durchführung

Ein mit Isopropanol entfettetes Rollrandglas wird mit einer wässrigen Spirituslösung ($\varphi = 0,6$) befüllt und mit etwas Ferrofluid versetzt. Dieses Rollrandglas wird auf einem zylindrischen Elektromagneten fixiert. Der Elektromagnet wird über ein Labornetzgerät mit Gleichstrom betrieben.

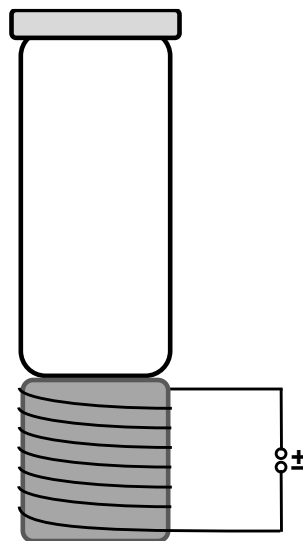


Abbildung 28: Versuchsaufbau mit dem Elektromagnet.

Die Stromstärke und die Spannung des Netzgerätes werden in verschiedenen Einstellungen variiert, wobei mit kleinen Stromstärken beziehungsweise Spannungen begonnen wird.

3.4.1.1.2. Beobachtung

Je nach verwendetem Wertepaar wurden verschiedene Beobachtungen gemacht, die in Tabelle 13 zusammengefasst sind und in Abbildung 22 festgehalten wurden.

Tabelle 13: Beobachtungen bei verschiedenen Stromstärken und Spannungen.

Wertepaar	U/V	I/A	P/W	Beobachtungen
1	3,7	0,09	0,33	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kaum bis gar keine Rosensweig-Instabilität ▪ ein „Stachel“ erkennbar
2	4,9	0,12	0,59	<ul style="list-style-type: none"> ▪ besser ausgeprägte Rosensweig-Instabilität ▪ mehr „Stacheln“ in der Mitte des Ferrofluids erkennbar
3	6,2	0,15	0,93	<ul style="list-style-type: none"> ▪ nochmals besser ausgeprägte Rosensweig-Instabilität ▪ nochmals mehr „Stacheln“ in der Mitte des Ferrofluids erkennbar
4	7,0	0,17	1,19	<ul style="list-style-type: none"> ▪ nochmals besser ausgeprägte Rosensweig-Instabilität ▪ nochmals mehr „Stacheln“ in der Mitte des Ferrofluids erkennbar
5	8,2	0,20	1,64	<ul style="list-style-type: none"> ▪ nochmals besser ausgeprägte Rosensweig-Instabilität ▪ nochmals mehr „Stacheln“ in der Mitte des Ferrofluids erkennbar
6	9,4	0,23	2,16	<ul style="list-style-type: none"> ▪ nochmals besser ausgeprägte Rosensweig-Instabilität ▪ nochmals mehr „Stacheln“ in der Mitte des Ferrofluids erkennbar

7	11,4	0,28	3,19	<ul style="list-style-type: none"> ▪ nochmals besser ausgeprägte Rosensweig-Instabilität ▪ nochmals mehr „Stacheln“ in der Mitte des Ferrofluids erkennbar
8	12,0	0,29	3,48	<ul style="list-style-type: none"> ▪ nochmals besser ausgeprägte Rosensweig-Instabilität ▪ viele kleine, feine „Stacheln“ im Ferrofluid Erkennbar



Abbildung 29: Ferrofluid unter Einfluss eines Elektromagneten mit Wertepaar 1.



Abbildung 30: Ferrofluid unter Einfluss eines Elektromagneten mit Wertepaar 2.

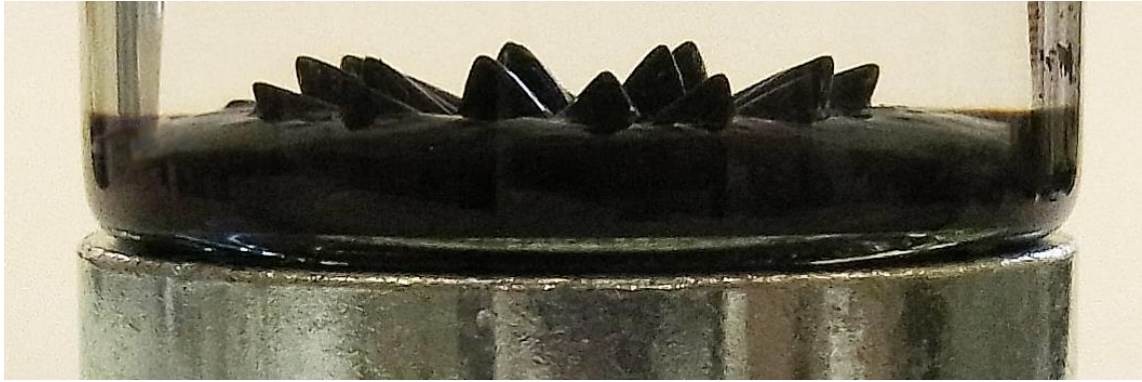


Abbildung 31: Ferrofluid unter Einfluss eines Elektromagneten mit Wertepaar 3.



Abbildung 32: Ferrofluid unter Einfluss eines Elektromagneten mit Wertepaar 4.

Mit Hilfe der Bilder war es möglich die Anzahl der „Stacheln“ der Rosensweig-Instabilität bei den verschiedenen Wertepaaren auszuzählen. Diese sind in der nachfolgenden Tabelle aufgelistet:

Tabelle 14: Anzahl der "Stacheln" in Abhängigkeit der jeweiligen Parameter.

Wertepaar	Anzahl der „Stacheln“
1	1
2	6
3	16
4	23
5	30
6	33
7	43
8	49

3.4.1.1.3. Erklärung

Da die Magnetfeldstärke H des Elektromagneten proportional zur Stromstärke und der angelegten Spannung ist, ergeben sich verschiedene Magnetfeldstärken für die verwendeten Wertepaare von U und I .

Trägt man die Anzahl der „Stacheln“ (siehe Tabelle 14) gegen die Spannung U beziehungsweise die elektrische Leistung P auf, erhält man folgende Diagramme:

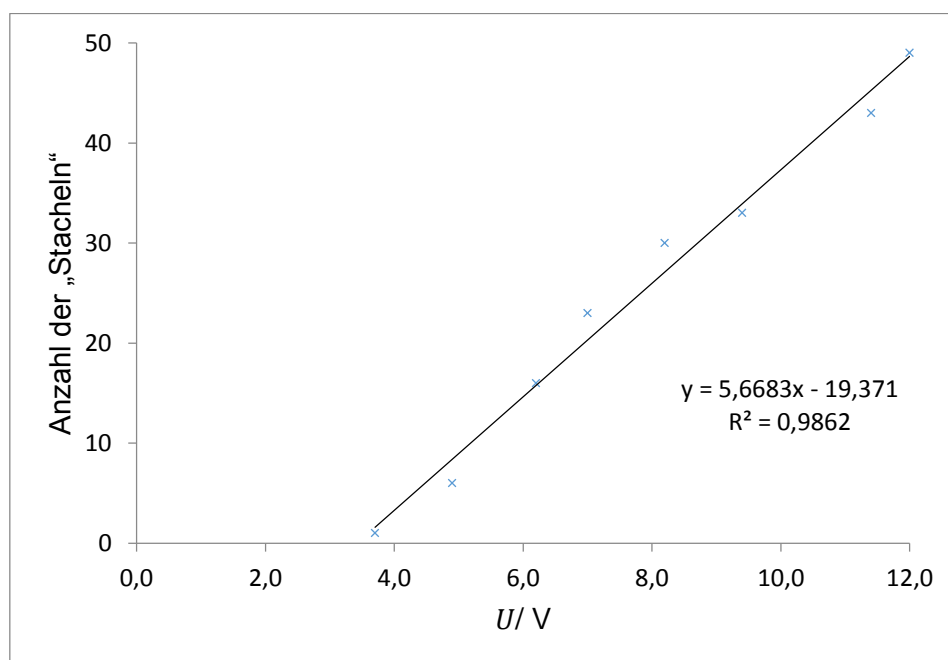


Abbildung 33: Anzahl der „Stacheln“ in Abhängigkeit der Spannung U .

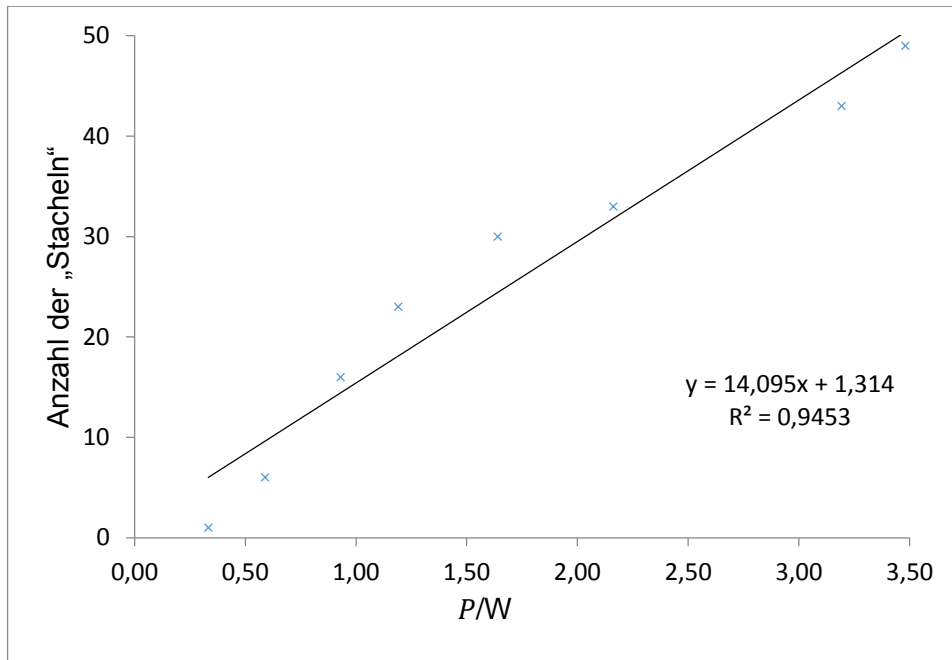


Abbildung 34: Anzahl der „Stacheln“ in Abhängigkeit der elektrischen Leistung P .

Abbildung 33 und 34 lassen auf einen linearen Zusammenhang der aufgetragenen Größen schließen. Der Korrelationskoeffizient der jeweiligen Regressionsgeraden untermauert diese Annahme. Je näher dieser an $R^2 = 1$ ist, desto besser ist die Näherung der Geraden. Daraus lässt sich schließen, dass in Abbildung 33 dargestellte Diagramme den linearen Zusammenhang besser wiedergibt.

Da für eine Rosensweig-Instabilität ein Magnetfeld von Nöten ist, wurde das Wertepaar im stromlosen Zustand nicht berücksichtigt. Ergo können die jeweiligen Regressionsgeraden keine Ursprungsgeraden sein.

4. Resümee

Mit Hilfe der im experimentellen Teil durchgeführten Versuche kann man nicht nur die beeindruckenden und teils ungewöhnlichen Eigenschaften der Ferrofluide, sondern auch grundlegende physikalische Größen und Effekte veranschaulichen. So lassen sich zum Beispiel durch die Ausprägung der Rosensweig-Instabilität die Magnetfeldstärke sowie die Durchlässigkeit verschiedener Materialien für Magnetfelder demonstrieren.

Der Versuch mit der Münze verdeutlicht das Prinzip der Auftriebskraft in Lösungen und lässt erahnen, wie sich dieses Phänomen nutzen lässt. Gerne hätten wir dies noch mit Hilfe des Elektromagneten und Materialien unterschiedlicher Dichte untersucht.

Da uns zunächst ein geeignetes Medium zur Aufbewahrung des Ferrofluids fehlte, in dem es nicht nur stabil ist, sondern auch das umgebende Glas nicht verschmutzt, blieb uns gegen Ende leider keine Zeit mehr anderen Versuchen und Ideen nachzugehen. Andere Versuche haben wir aufgrund der Diskrepanz zwischen finanziellen Ausgaben und zu erwartendem Ergebnis verworfen. So hätten wir gerne eine Art Stirlingmotor gebaut, bei dem Ferrofluid als Dichtungsmaterial zwischen Kolben und Zylinder fungiert hätte.

Des Weiteren ließen sich fehlgeschlagene Versuche optimieren, um doch verwertbare Ergebnisse zu erhalten.

Literaturverzeichnis

- [1] **Bergmann, Ludwig (1999):** Lehrbuch der Experimentalphysik. Elektromagnetismus, [enthält 35 Tabellen]. 8. völlig neubearbeitete Auflage. Band 2. Berlin, de Gruyter.

- [2] **Callister, William D.; Rethwisch, David G. (2012):** Materialwissenschaften und Werkstofftechnik: Eine Einführung. John Wiley & Sons

- [3] **Erdmann, Ludwig /Flügge, Günter (2012):** Experimentalphysik. Elektrizität, Magnetismus. Band 6. Heidelberg [u.a.]: Springer Spektrum Berlin.

- [4] **Friesecke, Andreas (2007):** Die Audio-Enzyklopädie: Ein Nachschlagewerk für Tontechniker. De Gruyter.

- [5] **Kuchling, Horst (1994):** Taschenbuch der Physik. Band 14. neubearb. Auflage. Leipzig [u.a.]: Fachbuchverlag Leipzig-Köln.

- [6] **Dr. Lange, Adrian (2003):** Instabilitäten magnetischer Flüssigkeiten in statischen Magnetfeldern. Magdeburg.

- [7] **Meschede; Dieter (2010):** Gerthsen Physik. 24. Auflage. Berlin, Heidelberg [u.a.]: Springer-Verlag.

- [8] **Nolting, Wolfgang (2011):** Grundkurs Theoretische Physik 3: Elektrodynamik. Berlin, Heidelberg: Springer.

- [9] **Paus, Hans Josef (1995):** Physik in Experimenten und Beispielen: mit 65 Tabellen. München [u.a.]: Hanser.

- [10] **Otten, Ernst W. (1998):** Repetitorium Experimentalphysik: für Vordiplom und Zwischenprüfung. Berlin; Heidelberg: Springer.
- [11] **Tipler, Paul Allen/ Mosca, Gene (2004):** Physik für Wissenschaftler und Ingenieure. 2. Deutsche Auflage. [Hrsg.] Dietrich Pelte. Heidelberg: Spektrum Akademie Verlag.
- [12] [Online]: <http://www.uni-saarland.de> [Zugriff am 28.08.2014].
Bastuck, Manuel: Ferrofluide. Physikalische Grundlagen.
<http://www.uni-saarland.de/fak7/hartmann/files/docs/pdf/teaching/lectures/talks/WS1112/Bastuck%20Manuel.pdf>
- [13] [Online]: <http://ate.uni-due.de> [Zugriff am 24 07 2014].
Grundlagen der Elektrotechnik. Das Magnetfeld.
http://www.ate.uni-due.de/data/get12/GET_4_Magnetfeld_HO.pdf
- [14] [Online]: <http://www.bine.info> [Zugriff am 04 01 2015].
Stefan Odenbach: Ferrofluide-Ihre Grundlagen und Anwendungen.
http://www.bine.info/fileadmin/content/Publikationen/Projekt-Infos/Zusatzinfos/2005-06_Fachartikel_Ferrofluide.pdf
- [15] [Online]: <http://www.ferrotec-europe.de> [Zugriff am 18 01 2015].
Anleitungsbuch.
<http://www.ferrotec-europe.de/pdf/faskit-de.pdf>
- [16] [Online]: <http://www.swissnanocube.ch> [Zugriff am 04 01 2015].
Knébel, Stephan/ Dietiker, Marianne/ Meili, Christoph: Ferrofluide Experimentieranleitung.
http://www.swissnanocube.ch/uploads/tx_rfnanoteachbox/Ferrofluid_Lehrer_031210.pdf

- [17] [Online]: <http://www.brinkmann-du.de> [Zugriff am 24 07 2014].
Magnetfelder und Feldlinien.
http://www.brinkmann-du.de/physik/sek1/ph05_11.htm
- [18] [Online]: <http://scidok.sulb.uni-saarland.de> [Zugriff am 16 07 2014].
Lang, Christian: Nanostab Ferrofluide.
<http://scidok.sulb.uni-saarland.de/volltexte/2006/631/>.
- [19] [Online]: <http://www.thomas-wilhelm.net> [Zugriff am 28 08 2014].
Reuss Sebastian: Nanotechnologie im Schulunterricht am Beispiel
Rastertunnelmikroskopie und Ferrofluid.
<http://www.thomas-wilhelm.net/arbeiten/Nanotechnologie.pdf>
- [20] [Online]: <http://www.sbfisica.org.br> [Zugriff am 17.07.2014].
Scherer, C./ Figueiredo Neto, A.M.: Ferrofluids: Properties and Applications.
http://www.sbfisica.org.br/bjp/files/v35_718.pdf
- [21] [Online]: <http://elektroniktutor.oszkim.de>[Zugriff am 24.01.2014].
Vom Elektron zur Elektronik.
<http://elektroniktutor.oszkim.de/grundlagen/mfeldgr.html>
- [22] [Online]: <http://www.uni-kassel.de> [Zugriff am 24.01.2014].
Bestimmung der relativen Permeabilität μ_r magnetischer Werkstoffe.
<http://www.uni-kassel.de/eecs/fileadmin/datas/fb16/Fachgebiete/FSG/Download/Lehre/ETP1/MagnetischeWerkstoffe.pdf>
- [23] [Online]: <http://www.nanotruck.de> [Zugriff am 09.01.2014].
Schönes in nano: Flüssige Magneten.
<http://www.nanotruck.de/treffpunkt-nanowelten/nanotechnologie-konkret/nanotechnologie-von-kleinen-strukturen-zum-grossen-bild/nanotechnologie-fluessige-magneten.html>

- [24] [Online]: <http://www.uni-kiel.de> [Zugriff am 09.01.2015].
Näther, Christian: Darstellung einer magnetischen Flüssigkeit.
http://www.uni-kiel.de/anorg/bensch/lehre/Dokumente/versuch_f8_magnetische_fluessigkeit.pdf
- [25] [Online]: <http://www.pro-physik.de> [Zugriff am 14.01.2015].
Reinhardt, Richter: Flüssige magnetische Gebirge.
<http://www.pro-physik.de/details/articlePdf/1104067/issue.html>
- [26] [Online]: <http://www.mint.ca> [Zugriff am 31.01.2015].
A national symbol—the 1-cent coin.
<http://www.mint.ca/store/mint/learn/1-cent-5300004>
- [27] [Online]: <http://www.ferrotec-europe.de> [Zugriff 31.01.2015].
Ferrofluid Datenblatt EFH Serie.
<http://www.ferrotec-europe.de/pdf/efh-de.pdf>
- [28] [Online]: <http://www.tf.uni-kiel.de> [Zugriff am 31.01.2015].
Feld, Fluß, Permeabilität und magnetische Suszeptibilität.
http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/mw_for_et/kap_7/backbone/r7_1_2.pdf
- [29] [Online]: <https://roempp.thieme.de> [Zugriff am 01.02.2015].
Kältemischungen.
<https://roempp.thieme.de/roempp4.0/do/data/RD-11-00029>
- [30] [Online]: <https://roempp.thieme.de> [Zugriff am 01.02.2015].
Leistung.
<https://roempp.thieme.de/roempp4.0/do/data/RD-12-00769>
- [31] [Online]: <http://cfn.physik.uni-saarland.de> [Zugriff am 01.02.2015].
Ferrofluide.

<http://cfn.physik.uni-saarland.de/Dokumente/Manuals/Ferrofluide.pdf>

[32] [Online]: <http://webdoc.sub.gwdg.de> [Zugriff am 01.02.2015].

Reiner Patzwald. Magnetische Flüssigkeiten als Schmierstoff in hydrodynamischen Gleitlagern.

http://webdoc.sub.gwdg.de/ebook/diss/2003/tu-berlin/diss/2001/patzwald_reiner.pdf

[33] [Online]: <http://www.hsr.ch> [Zugriff am 01.02.2015].

Raffael Palazzolo. Bestimmung der Metallanteile von KVA-Schlacken.

http://www.hsr.ch/uploads/tx_icscrm/EEU_Palazzolo_Raffael_BA_FS13.pdf

Anhang

Im Anhang befinden sich:

- Protokolle und Mitschriebe
- Stundennachweise
- Begleitblätter zur Projektarbeit
- Eigenständigkeitserklärung
- Laborjournale
- E-Mail-Verkehr mit Ferrotec GmbH
- Materialkostenaufstellung