



Ferrofluide

Experimentieranleitung



Dezember 2010

Stephan Knébel, Marianne Dietiker, Christoph Meili

Modulsponsor:



Dieses Modul wurde mit freundlicher Unterstützung der Metrohm Stiftung Herisau realisiert.

Kontakt:

Die Innovationsgesellschaft St. Gallen

Lerchenfeldstrasse 5, 9014 St. Gallen

Tel. +41 (0) 71 274 72 66

Mail: info@innovationsgesellschaft.ch

www.swissnanocube.ch

Version Dezember 2010

Dieses Modul wurde von der Innovationsgesellschaft St. Gallen im Rahmen des Projektes Swiss Nano-Cube realisiert. Autoren: Stephan Knébel, Marianne Dietiker, Christoph Meili.

Bild Titelseite: Swiss Nano-Cube

Inhalt

1. Nano-Kontext	2
2. Beschreibung des Experiments	2
3. Chemikalien/Substanzen	3
4. Versuchsanordnung/Materialien	3
4.1. Benötigte Materialien Teil 1: Herstellung der Lösungen	3
4.2. Benötigte Materialien Teil 2: Herstellung des Ferrofluids	4
5. Versuchsdurchführung und Musterresultate	5
5.1. Teil 1: Herstellung der Lösungen (Vorbereitung durch die Lehrperson)	5
5.2. Teil 2: Herstellung des Ferrofluids (Durchführung in der Klasse).....	7
5.3. Entsorgung der Lösungen und Chemikalien	9
6. Theoretische Grundlagen zum Experiment	10
6.1. Chemische Grundlagen	10
6.2. Physikalische Grundlagen	11
7. Anhang 1: Literaturnachweis	13
8. Anhang 2: Chemikalien/Sicherheit/Entsorgung	14
8.1. Allgemeine Hinweise.....	14
8.2. Links zu den Sicherheitsdatenblättern.....	14
8.3. Rechtsgrundlagen/Haftung	14
8.4. Details zu den verwendeten Chemikalien.....	15

[Begleitvideo zur Experimentieranleitung](#)

1. Nano-Kontext

- **Veränderung der magnetischen Eigenschaften von nanoskaligen Ferromagneten**
- **Superparamagnetische Nanopartikel**
- **Anwendung von Ferrofluiden zum Beispiel in der Tumorbekämpfung**

2. Beschreibung des Experiments

- Bei diesem Versuch werden superparamagnetische Magnetit-Nanopartikel aus Eisenchlorid und wässriger Ammoniaklösung hergestellt.
- Wird von aussen ein Magnetfeld angelegt, richten sich die Nanopartikel entlang der Feldlinien des Magnetfeldes aus.
- Superparamagnetische Partikel reagieren sehr empfindlich auf Magnetfelder, lassen sich jedoch nicht dauerhaft magnetisieren [1], [2].
- Die magnetischen Nanopartikel haben einen Durchmesser von ca. 10 nm und bilden eine stabile kolloidale Suspension in einer Trägerflüssigkeit, ein sogenanntes Ferrofluid [3].
- Magnetit eignet sich besonders gut für die Herstellung von Ferrofluiden, weil es besonders einfach in der richtigen Partikelgrösse herstellbar ist [3].
- Um zu verhindern, dass die Partikel agglomerieren, werden sie mit einer passenden Oberflächenbehandlung versehen.
- Ferrofluide können dank der flexibel wählbaren Oberflächenbehandlung sehr vielseitig eingesetzt werden. Zu den Anwendungsbereichen gehören unter anderen [3], [4], [5]:
 - Krebsbekämpfung durch Hyperthermie-Therapie
 - Drug Targetting (gerichteter Wirkstoff-Transport) in der Medizin
 - Kontrastmittel bei der Magnetresonanztomographie
 - Dichtungsmittel
 - Oberflächenbeschichtungen von Tarnkappen Flugzeugen (Stealth-Technologie)
- Ferrofluide wurden erstmals 1960 von der NASA entwickelt und getestet, um Flüssigkeiten im Weltraum kontrollierbar zu machen [6].

3. Chemikalien/Substanzen

Details sind im Anhang 2: Chemikalien/Sicherheit/Entsorgung zu finden.

- Eisen(II)-chlorid Tetrahydrat/ $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (Sigma Aldrich)
- Eisen(III)-chlorid Hexahydrat/ $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Carl Roth GmbH)
- Salzsäure 2 M in $\text{H}_2\text{O}/\text{HCl}$ (Carl Roth GmbH)
- 30%ige Ammoniak-Lösung in $\text{H}_2\text{O}/\text{NH}_3 + 3\text{H}_2\text{O}$ (Carl Roth GmbH)
- 25%ige Tetramethylammonium Hydroxid-Lösung in $\text{H}_2\text{O}/(\text{CH}_3)_4\text{N}(\text{OH})$ (Sigma Aldrich)
- destilliertes Wasser

4. Versuchsanordnung/Materialien



Abbildung 1: Versuchsanordnung/Materialien. (Bild: Swiss Nano-Cube)

4.1. Benötigte Materialien Teil 1: Herstellung der Lösungen

- 1 Messzylinder 200 ml (Skalierung mind. 10 ml)
- 1 Messzylinder 100 ml (Skalierung mind. 10 ml)
- 1 Stabpipette 10 ml (Skalierung mind. 0.1 ml) mit Pipettierhilfe
- 2 verschliessbare Glasflaschen mit 100 ml Fassungsvermögen
- 1 verschliessbare Glasflasche mit 1000 ml Fassungsvermögen
- 1 Waage (Genauigkeit bis 0.01 g)
- 2 Wäge-Schalen
- 1 Eisenspatel

4.2. Benötigte Materialien Teil 2: Herstellung des Ferrofluids

Materialangaben für jeweils 2 Schülerinnen und Schüler (Zweierteam)

- 1 Magnetrührer mit Rührfisch (alternativ Rührwerk mit Glasrührstab)
- 4 graduierte Plastik-Pasteurpipetten (ca. 5 ml)
- 1 Rührfisch-Entferner
- 2 Bechergläser 100 ml
- 1 Abfallbehälter (ca. 0.5 l)
- 1 Wäge-Schale
- 1 starker Magnet/Haftkraft 3-4 kg (www.supermagnete.ch)
- 1 Stoppuhr

5. Versuchsdurchführung und Musterresultate

Tipps für die Lehrperson:

Wir schlagen vor, dass die Lehrperson die Lösungen für alle Schüler vorgängig herstellt. Die Berechnung der Chemikalienkonzentrationen und -mengen könnte im Theorieteil der Lektion behandelt werden. Die Lösungen können auch einige Tage vor dem Gebrauch hergestellt werden. Die Schülerinnen und Schüler sollten wenn möglich in Zweiertteams arbeiten. Mit Tabelle 1 lassen sich die benötigten Mengen einfach berechnen. Bei diesem Experiment ist es wichtig, dass die Mengen möglichst genau berechnet werden. Die mit Hilfe der Tabelle errechneten Werte sollen daher erst zum Schluss gerundet werden, je nach Genauigkeit der verwendeten Waage.

5.1. Teil 1: Herstellung der Lösungen (Vorbereitung durch die Lehrperson)

5.1.1. Berechnungen

Anzahl Schüler = N (Bei einer ungeraden Anzahl Schüler sollte N+1 als N genommen werden)

Anzahl Zweiertteams = $(N/2) = n$

Reserve: „Rot markiert“

Tabelle 1: Berechnungs-Schlüssel zur Ermittlung der Chemikalienmengen

	Pro Experiment	Pro Klasse (Zweiertteams) (inkl. Reserve)	24 Schüler
2 M FeCl₂ (2M HCl)	1 ml	$[(1 \text{ ml}) \cdot n] + (2 \text{ ml})$	14 ml
FeCl ₂ ·4H ₂ O	0.3976 g	$[(0.3976 \text{ g}) \cdot n] + (0.7952 \text{ g})$	5.5664 g
2 M HCl	1 ml	$[(1 \text{ ml}) \cdot n] + (2 \text{ ml})$	14 ml
1 M FeCl₃ (2M HCl)	4 ml	$[(4 \text{ ml}) \cdot n] + (8 \text{ ml})$	56 ml
FeCl ₃ ·3H ₂ O	1.0813 g	$[(1.0813 \text{ g}) \cdot n] + (2.1624 \text{ g})$	15.138 g
2 M HCl	4 ml	$[(4 \text{ ml}) \cdot n] + (8 \text{ ml})$	56 ml
1 M NH₃ (H₂O)	50 ml	$[(50 \text{ ml}) \cdot n] + (25 \text{ ml})$	625 ml
NH ₃ 30%	3.3334 ml	$[(3.3334 \text{ ml}) \cdot n] + (1.6667 \text{ ml})$	41.7 ml
Dest. Wasser	46.6666 ml	$[(46.6666 \text{ ml}) \cdot n] + (23.3333 \text{ ml})$	583.3 ml

5.1.2. Experimentelle Durchführung Teil 1

Dauer ca. 15 min

Menge für 24 Schüler/innen (vierte Spalte Tab. 1)

Sicherheitshinweis: Schutzbrille, Handschuhe!

Wichtig: Jeweils für jede Lösung einen neuen, sauberen Messzylinder verwenden oder den gebrauchten vorher gut auswaschen (Entsorgungshinweise für Chemikalien in Anhang 2 beachten).

5.1.2.1. Herstellung 2 M Eisen(II)-chlorid Lösung (2 M HCl)

Dauer ca. 5 min

Menge für 24 Schüler/innen (entspricht 14 ml)

Sicherheitshinweis: Vorsicht ätzend!

1. Eine verschliessbare 100 ml Glasflasche beschriften (Chemikalien, Konzentration, Datum, Sicherheitshinweis „ätzend“) und diese mit 14 ml 2 M Salzsäure auffüllen. Dazu eine Stabpipette (10 ml Fassungsvermögen/0.1 ml Skalierung) verwenden.
2. Anschliessend 5.6 g Eisen(II)-chlorid Tetrahydrat abwägen und vorsichtig zur Salzsäure in die Flasche geben. Die Flasche verschliessen und leicht schütteln, bis das Eisen(II)-chlorid Tetrahydrat vollständig gelöst ist. Die Lösung sollte eine gelbliche Farbe annehmen (Abb. 2 links). Es ist darauf zu achten, dass die Flasche gut verschlossen bleibt, damit sich kein unerwünschtes Eisenoxid bildet. Die Eisen(II)-Chlorid Lösung ist anfällig auf Oxidierung und sollte daher spätestens eine Woche nach der Herstellung verwendet werden [6].

5.1.2.2. Herstellung 1 M Eisen(III)-chlorid Lösung (2 M HCl)

Dauer ca. 5 min

Menge: 24 Schüler (entspricht 56ml)

Sicherheitshinweis: Vorsicht ätzend!

3. Eine verschliessbare 100 ml Glasflasche beschriften (Chemikalien, Konzentration, Datum, Sicherheitshinweis „ätzend“) und diese mit 50 ml 2 M Salzsäure auffüllen. Dazu einen Messzylinder (100 ml Fassungsvermögen/10 ml Skalierung) verwenden. Die restlichen 6 ml sollen der Genauigkeit halber mit einer Stabpipette (10 ml Fassungsvermögen/1 ml Skalierung) dazugegeben werden.
4. Anschliessend 15.1 g Eisen(III)-chlorid Hexahydrat abwägen und vorsichtig zur Salzsäure in die Flasche geben. Die Flasche verschliessen und leicht schütteln, bis das Eisen(III)-chlorid Hexahydrat vollständig gelöst ist. Die Lösung sollte eine rostbraune Farbe annehmen (Abb. 2 rechts). Es ist darauf zu achten, dass die Flasche gut verschlossen bleibt, damit sich kein unerwünschtes Eisenoxid bildet.



Abbildung 2: (links) 2 M Eisen(II)-chlorid Lösung in 2 M HCl. (rechts) 1 M Eisen(III)-chlorid Lösung in 2 M HCl. (Bilder: Swiss Nano-Cube)

5.1.2.3. Herstellung 1 M Ammoniak-Lösung

Dauer ca. 5 min

Menge: 24 Schüler/innen (entspricht 625 ml)

Sicherheitshinweis: Vorsicht ätzend!

5. Eine verschliessbare 1000 ml Glasflasche beschriften (Chemikalien, Konzentration, Datum, Sicherheitshinweis „ätzend“) und diese mit 580 ml dest. Wasser auffüllen. Dazu einen Messzylinder (200 ml Fassungsvermögen/10 ml Skalierung) verwenden. Die restlichen 3.3 ml sollen der Genauigkeit halber mit einer Stabpipette (10 ml /0.1 ml Skalierung) dazugegeben werden.
6. Anschliessend 41.7 ml 30%ige Ammoniaklösung vorsichtig zum dest. Wasser in die Flasche geben. Dazu einen Messzylinder (100 ml Fassungsvermögen/1 ml Skalierung) sowie eine Stabpipette (10 ml Fassungsvermögen/0.1 ml Skalierung) verwenden. Die Flasche verschliessen und leicht schütteln.

5.2. Teil 2: Herstellung des Ferrofluids (Durchführung in der Klasse)

5.2.1. Experimentelle Durchführung Teil 2

Dauer ca. 25min

Tipp für die Lehrperson:

Wir schlagen vor, dass die Schülerinnen und Schüler in Zweiertteams arbeiten. Die 1M Ammoniak-Lösung kann den Zweiertteams in beschrifteten 100 ml Bechergläsern portionenweise (50 ml) bereitgestellt werden.

Sicherheitshinweis: Schutzbrille, Handschuhe!

1. 1 ml 2 M Eisen(II)-chlorid Lösung mit einer sauberen Stabpipette (10 ml Fassungsvermögen/0.1 ml Skalierung) in ein 100 ml Becherglas pipettieren und einen Rührfisch hinzugeben. Danach die Pipette säubern.
2. 4 ml 1 M Eisen(III)-chlorid Lösung mit der sauberen Stabpipette (10 ml Fassungsvermögen/1 ml Skalierung) zur Eisen(II)-chlorid Lösung im 100 ml Becherglas hinzu pipettieren.
3. Das Becherglas auf einen Magnetrührer stellen und bei angemessener Geschwindigkeit rühren.
4. Während 5 min (Stoppuhr benutzen) 50 ml 1 M Ammoniak-Lösung mit einer Plastik Pasteurpipette tropfenweise hinzufügen. Wichtig: Besonders zu Beginn muss die Ammoniak-Lösung unbedingt tropfenweise zugegeben werden. Zudem ist entscheidend, dass die vorgegebenen 5 min eingehalten werden. Falls am Schluss die Zeit knapp wird, können die letzten Milliliter der Ammoniak-Lösung auch rascher zugegeben werden.
5. Nachdem die gesamten 50 ml 1 M Ammoniaklösung zugegeben wurden, den Magnetrührer ausschalten und den Rührfisch so schnell wie möglich mit dem Rührfisch-Entferner (eingepackt in eine Plastikhülle) entfernen. Dabei unbedingt Handschuhe tragen. Den Rührfisch und den Rührfisch-Entferner auf ein Papier-Taschentuch legen und später säubern.

6. Anschliessend das Becherglas auf einem starken Magneten platzieren (Abb.3, Pfeil 1) und solange warten, bis sich die entstandenen Magnetit-Teilchen am Boden des Becherglases abgesetzt haben. Der Überstand sollte nahezu klar sein (Abb. 3, Pfeil 2). Je nach Stärke des verwendeten Magneten dauert dieser Vorgang nur wenige Sekunden.

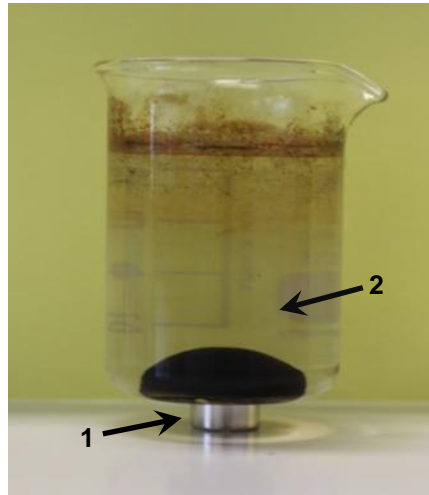


Abbildung 3: Magnetit Ausfällung. Pfeil 1: Starker Magnet, Pfeil 2: Klarer Überstand. (Bild: Swiss Nano-Cube)

7. Ohne den Magneten zu entfernen, den klaren Überstand in ein Abfallbehältnis entleeren (abdekantieren). Danach das Becherglas zu einem Drittel mit dest. Wasser füllen und dieses gleichfalls abdekantieren. Dabei ist es wichtig, dass schnell gearbeitet wird, denn je länger die Magnetit-Teilchen mit dem Magneten zurückgehalten werden, desto eher verklumpen sie und können nachher nur noch mühsam im Wasser aufgeschwemmt werden.
8. Den Magneten entfernen, das Becherglas abermals zu einem Drittel mit dest. Wasser aus füllen und die sich zuvor am Boden des Becherglases abgesetzten Magnetit-Teilchen mit einer Plastik-Pasteurpipette im Wasser aufschwemmen, bis die schwarze Lösung leicht zähflüssig ist.
9. Die schwarze Flüssigkeit anschliessend in eine (weisse) Wäge-Schale überführen, diese vorsichtig auf dem Magneten platzieren und warten, bis sich die Magnetit-Teilchen abermals am Boden abgesetzt haben.
10. Den klaren Überstand ein weiteres Mal abdekantieren. Das Wasser sollte jedoch nicht vollständig entfernt werden. Auch hier muss schnell gearbeitet werden. Anschliessend mit einer Plastik-Pasteurpipette ca. 1 ml 25%ige Tetramethylammonium Hydroxid-Lösung dazu pipettieren. Danach gut mischen, indem der Magnet während ca. 2 min unter der Wäge-Schale, in der sich die Magnetit-Teilchen befinden, kreisförmig bewegt wird.
11. Die restliche Flüssigkeit sollte danach noch einmal abdekantiert werden. Das in der Wäge-Schale zurückbleibende, stark zähflüssige Ferrofluid kann nun durch den Magneten entlang der Feldlinien ausgerichtet werden (Abb. 4). Es bilden sich igelartige Strukturen.



Abbildung 4: Igelstrukturen im Ferrofluid: Rosensweig- oder Stachel-Instabilität, 1966 entdeckt von dem Physiker Ronald E. Rosensweig. Das Ferrofluid befindet sich in einem Gleichgewicht zwischen Magnetischer Kraft, der Gravitation sowie der Oberflächenspannung der Flüssigkeit. (Bilder: Swiss Nano-Cube)

5.3. Entsorgung der Lösungen und Chemikalien

Hinweise zur Entsorgung im Anhang 2 beachten! Die Eisenchlorid-Lösungen und das Ferrofluid müssen bei den dafür vorgesehenen Giftsammelstellen entsorgt werden (Schwermetallabfälle). Der abdekantierte Ammoniumchlorid-Abfall muss ebenfalls bei den dafür vorgesehenen Giftsammelstellen entsorgt werden. Die Ammoniak-Lösung muss neutralisiert werden und anschliessend als Säure/Base-Abfall bei den dafür vorgesehenen Giftsammelstellen entsorgt werden.

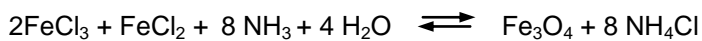
6. Theoretische Grundlagen zum Experiment

6.1. Chemische Grundlagen

6.1.1. Ausfällung der Magnetit Nanopartikel

Bei der Ausfällung der Magnetit Nanopartikel ($\text{Fe}^{\text{II}}(\text{Fe}^{\text{III}})_2\text{O}_4$) werden Eisen(II)-Chlorid Tetrahydrat, Eisen(III)-Chlorid Hexahydrat und 1 M Ammoniak Lösung verwendet. Als Nebenprodukt entsteht Ammoniumchlorid (NH_4Cl). Die Verwendung von Salzsäure als Lösungsmittel für die Eisen-Chlorid Lösungen verhindert die Bildung von unerwünschtem Eisenhydroxid [6]. Nach der Ausfällung der Magnetit Nanopartikel wird das überschüssige Ammoniak und das Ammoniumchlorid durch Abdekantieren des klaren Überstands und die anschliessende Zugabe von Wasser entfernt. Die genaue Bezeichnung für Magnetit lautet $\text{Fe}^{\text{II}}(\text{Fe}^{\text{III}})_2\text{O}_4$ [7].

Stöchiometrie:



6.1.2. Oberflächenfunktionalisierung

Die Trägerflüssigkeit, in der sich das Ferrofluid befindet, ist Wasser. Damit die Nanopartikel darin kolloidal suspendieren, muss deren Oberfläche polar sein. Zur Oberflächenbehandlung wird in diesem Experiment Tetramethylammonium-Hydroxid verwendet. Tetramethylammonium Hydroxid besteht aus $(\text{CH}_4)_4\text{N}^+$ und OH^- . Es ist damit eine polare, basische Verbindung.

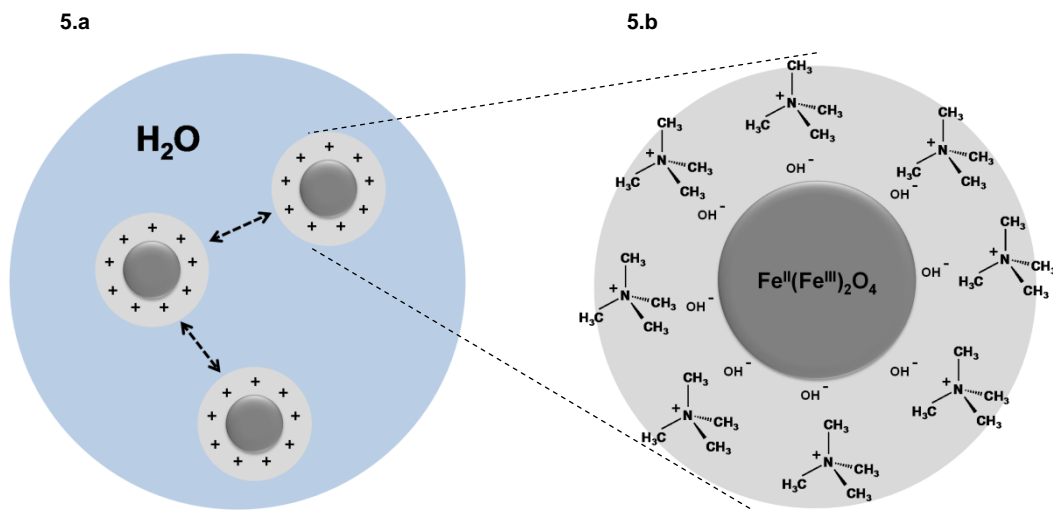


Abbildung 5: (a) Stabile Magnetit-Dispersion mit sich gegenseitig abstossenden Nanopartikeln. (b) Magnetit-Nanopartikel mit Tetramethylammonium-Hydroxid Nanosphäre. Die Grössenverhältnisse sind willkürlich gewählt (Abbildung: Swiss Nano-Cube).

Auf der Partikeloberfläche richten sich die positiv geladenen Tetramethylammonium Moleküle nach aussen hin aus, während die Hydroxid-Gruppen auf der Oberfläche der Magnetit-Teilchen binden. Die Oberfläche aller Partikel ist somit nach der Behandlung positiv geladen (Abb. 5). Die um das Partikel angeordneten Ionen bilden eine Nanosphäre. Die sich abstossenden Partikel können dank der Nanosphäre keine Agglomerate bilden, wodurch eine stabile Dispersion in Wasser entsteht, ein Ferrofluid [3], [6].

6.2. Physikalische Grundlagen

Die ausgefällten Magnetit-Nanopartikel sind ca. 10 nm gross [3] und besitzen spezielle magnetische Eigenschaften. Sie können daher durch die Verwendung eines starken Magneten einfach durch Abdekantieren von der wässrigen Ammoniumchlorid Lösung getrennt werden.

Durch die Verwendung eines starken Magneten lassen sich igelartige Strukturen bilden (Abb. 4). Man spricht von *Rosensweig Instabilität*. Das Ferrofluid befindet sich dabei in einem Kräftegleichgewicht zwischen Gravitation, magnetischer Kraft und der dagegenwirkenden Oberflächenspannung in der Flüssigkeit [3].

Im Vergleich zu ferromagnetischen, makroskopischen Partikeln sind die Magnetit-Nanopartikel superparamagnetisch. Nur dank dieser speziellen Eigenschaft, lassen sich überhaupt Ferrofluide herstellen. Die physikalischen Grundlagen dazu sind in den folgenden Abschnitten erklärt.

6.2.1. Ferromagnetismus

Ferromagnetische Materialien sind zum Beispiel Nickel, Eisen, Zink, Kobalt oder Magnetit [2]. Atome ferromagnetischer Materialien besitzen in ihren Elektronenschalen ungepaarte Elektronen. Dadurch ist der Gesamtspin der Atome ungleich null und sie besitzen ein magnetisches Moment. Die Atome werden daher als Elementarmagneten bezeichnet. Bei ferromagnetischen Materialien (anders als bei paramagnetischen, Abs. 6.2.1) entstehen hohe Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Elementarmagneten (Austauschenergie) [2]. Da diese Energie bei Raumtemperatur höher ist als die thermische Energie der einzelnen Atome, richten sich die magnetischen Momente benachbarter Atome spontan innerhalb bestimmter Bereiche (Weiss-Bezirke oder auch Weissche Bezirke genannt) parallel aus [2]. Die Weiss-Bezirke sind je nach Material unterschiedlich gross (0.01 μm bis 1 μm) [1]. Die Ausrichtung aller Weiss-Bezirke des Materials ist vor dem erstmaligen Kontakt mit einem externen Magnetfeld statistisch gleichverteilt und die magnetischen Momente heben sich im Bulkmaterial gegenseitig auf. Die einzelnen Bezirke sind durch sogenannte Bloch-Wände getrennt [2], welche der spontanen gegenseitigen Ausrichtung der Weiss-Bezirke entgegenwirken. Wenn nun aber ferromagnetische Materialien einem externen Magnetfeld ausgesetzt werden, reicht die Kraft aus, um alle Weiss-Bezirke gleichermassen parallel entlang den Feldlinien des Magnetfeldes auszurichten. Man spricht von Magnetisierung. Da bei Raumtemperatur die Austauschenergie zwischen den einzelnen magnetischen Momenten höher ist, als die thermische Energie der einzelnen Atome, lässt sich diese Ausrichtung der Weiss-Bezirke (Magnetisierung) nicht mehr rückgängig machen [2]. Das ferromagnetische Material besitzt nach der Magnetisierung ein intrinsisches, dauerhaftes und starkes magnetisches Moment, von welchem ein magnetisches Feld ausgeht. Ferromagnetische Materialien sind demnach sogenannte Dauer- oder Permanentmagnete und werden von magnetischen Feldern sehr stark angezogen. Nur durch Erhitzen der magnetisierten Materialien über die sogenannte Curie-Temperatur lässt sich die Magnetisierung rückgängig machen. Die Materialien sind oberhalb der Curie-Temperatur paramagnetisch [2] (siehe unten). Die Curie Temperatur entspricht der kritischen Temperatur, bei der die thermische Energie der einzelnen Atome die Austauschenergie der Elementarmagnete überschreitet und die gegenseitige Ausrichtung rückgängig gemacht wird. Oberhalb der Curie-Temperatur findet keine spontane Ausrichtung der Elementarmagnete mehr statt. Auch die Magnetisierung durch ein externes Magnetfeld ist viel schwächer. Die Curie-Temperatur liegt bei allen bekannten Ferromagneten unter dem Schmelzpunkt [3]. Daher lässt sich ein Ferrofluid nicht einfach durch Erhitzen ferromagnetischer Materialien herstellen. Der Schlüssel zur Herstellung von Ferrofluiden sind sogenannte Superparamagnete (Abs. 6.2.4).

6.2.2. Paramagnetismus

Bei paramagnetischen Materialien sind ebenfalls ungepaarte Elektronen in den Elektronenschalen der Atome vorhanden, zum Beispiel beim Sauerstoff. Der Gesamtspin der Atome ist ungleich null. Sie besitzen ein magnetisches Moment und lassen sich demnach in einem Magnetfeld magnetisieren. Allerdings sind die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Elementarmagneten in Paramagneten viel geringer als die thermische Energie bei Raumtemperatur. Paramagnetische Materialien lassen sich daher nur sehr schwach und nicht permanent magnetisieren. Sie werden nur schwach von magnetischen Feldern angezogen [2].

6.2.3. Diamagnetismus

Diamagnetische Materialien, wie zum Beispiel Wasser, besitzen in den Elektronenschalen ihrer Atome keine ungepaarten Elektronen. Der Gesamtspin der Atome ist daher gleich null. Es ist kein magnetisches Moment vorhanden. Diamagnete werden von Magnetfeldern sehr schwach abgestossen [2].

6.2.4. Superparamagnetismus

Wenn ferromagnetische Materialien stark zerkleinert werden und die Partikelgrösse im Bereich von weniger als 100 nm liegt, bestehen die Partikel aus nur noch einem einzigen Weiss-Bezirk [1]. Diese Eindomänenpartikel besitzen ein hohes magnetisches Moment und reagieren sehr empfindlich auf externe Magnetfelder [3]. Da die Partikel jedoch sehr klein sind, reicht nun eine bedeutend geringere Energiemenge aus, um die parallele Ausrichtung der Elementarmagnete (Magnetisierung) nach Entfernen des externen Magnetfeldes rückgängig zu machen. Je kleiner die Partikel, desto weniger Elementarmagnete befinden sich innerhalb des Eindomänen-Weiss-Bezirks und desto geringer ist die Energie, um die Magnetisierung wieder aufzuheben [1]. So reicht bereits die thermische Energie bei Raumtemperatur aus, um die Magnetisierung rückgängig zu machen. Superparamagnete werden daher zwar genau wie Ferromagnete sehr stark von magnetischen Feldern angezogen und magnetisiert, ihre Magnetisierung ist jedoch bei Raumtemperatur nicht permanent und verschwindet, sobald das externe Magnetfeld wieder entfernt wird [1]. Superparamagnetische Nanopartikel sind daher die Grundlage für die Herstellung von Ferrofluiden.

7. Anhang 1: Literaturnachweis

- [1] <http://www.nanoportal-hessen.de>
- [2] <http://www.supermagnete.de>
- [3] <http://www.ferrofluide.de>
- [4] <http://www.magforce.de>
- [5] Odenbach S., *Magnetische Flüssigkeiten kontrollieren. Ferrofluide – ihre Grundlagen und Anwendungen, Physik in unserer Zeit* 32, 2001, 122-127
- [6] Berger P., Adelman N., Beckman K.J., Campbell D.J., Ellis A.B. and Lisensky G.C., *Preparation and Properties of an Aqueous Ferrofluid, Journal of Chemical Education* 76, 1999, 943-948
- [7] <http://de.academic.ru>

8. Anhang 2: Chemikalien/Sicherheit/Entsorgung

8.1. Allgemeine Hinweise

Vor der Verwendung der Chemikalien müssen in allen Fällen die Sicherheitsdatenblätter studiert werden!

Diese werden vom Hersteller mit den Chemikalien mitgeliefert oder können auf den Webpages der Hersteller kostenlos heruntergeladen werden. Die Links zu den Sicherheitsdatenblättern sind im Abschnitt 7.2 zu finden.

Weitere Informationen zu den Chemikalien können auch in der [GESTIS-Stoffdatenbank](#) abgerufen werden. Die gesuchten Chemikalien lassen sich in Datenbanken am besten finden, wenn nach der CAS Nummer gesucht wird. Die jeweiligen Nummern sind in diesem Dokument vermerkt.

Alle R- & S-Sätze sind auf der [Webpage des Bundesamtes für Gesundheit \(BAG\)](#) zu finden.

Weitere Hinweise zum Umgang mit Chemikalien finden Sie auf der [Infowebsite des Bundes](#).

8.2. Links zu den Sicherheitsdatenblättern

- [Eisen\(II\)-chlorid Tetrahydrat](#) (Sigma Aldrich)
- [Eisen\(III\)-chlorid Hexahydrat](#) (Carl Roth GmbH)
- [Salzsäure 2 M in H₂O/HCl](#) (Carl Roth GmbH)
- [30%ige Ammoniak-Lösung](#) (Carl Roth GmbH)
- [25%ige Tetramethylammonium Hydroxid-Lösung](#) (Sigma Aldrich)

8.3. Rechtsgrundlagen/Haftung

Als verbindlich gelten ausschliesslich die Informationen aus den Sicherheitsdatenblättern der Chemikalien-Hersteller.

Die Sicherheitsdaten für die verwendeten Chemikalien sowie die Sicherheitshinweise zur Durchführung der Experimente wurden sorgfältig recherchiert **Trotzdem wird keine Haftung für die Richtigkeit, Vollständigkeit und Aktualität der Informationen übernommen.**

8.4. Details zu den verwendeten Chemikalien

8.4.1. Eisen(II)-chlorid Tetrahydrat/ $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ /198.81 $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$

[Link zum Sicherheitsdatenblatt](#)

Hersteller [Sigma Aldrich](#) (Art.-Nr. 44939)

CAS-Nummer 13478-10-9

Eisen(II)-chlorid Tetrahydrat erscheint bei Raumtemperatur und Standarddruck in festem Aggregatzustand und in Form von hellgrünem, kristallinem Pulver.

Von der Substanz gehen akute oder chronische Gesundheitsgefahren aus!

Gefahrensymbole



Xn gesundheitsschädlich

Gebotszeichen



Schutzbrille tragen



Handschuhe tragen

- | | |
|------|---|
| R 22 | Gesundheitsschädlich beim Verschlucken. |
| R 38 | Reizt die Haut. |
| R 41 | Gefahr ernster Augenschäden. |
| S 26 | Bei Berührung mit den Augen sofort gründlich mit Wasser abspülen und Arzt konsultieren. |
| S 39 | Schutzbrille/Gesichtsschutz tragen. |

Hinweise zur Entsorgung

Bei der Giftsammelstelle entsorgen. Nie im Ausguss, in der Toilette oder im Haushaltsabfall entsorgen! Hinweise im [Sicherheitsdatenblatt](#) des Herstellers beachten. Lokale Vorschriften beachten.

Quellen

- [Sigma Aldrich](#)

8.4.2. Eisen(III)-chlorid Hexahydrat/ $\text{FeCl}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ /270.3 g* mol^{-1}

[Link zum Sicherheitsdatenblatt](#)

Hersteller [Carl Roth GmbH](#) (Art.-Nr. P742.1)

CAS-Nummer 10025-77-1

Eisen(III)-chlorid Hexahydrat erscheint bei Raumtemperatur und Standarddruck in festem Aggregatzustand und in Form von gelbbraunem, grobkörnigem Pulver.

Von der Substanz gehen akute oder chronische Gesundheitsgefahren aus!

Gefahrensymbole



Xn gesundheitsschädlich

Gebotszeichen



Schutzbrille tragen



Handschuhe tragen

- | | |
|------|---|
| R 22 | Gesundheitsschädlich beim Verschlucken. |
| R 38 | Reizt die Haut. |
| R 41 | Gefahr ernster Augenschäden. |
| S 26 | Bei Berührung mit den Augen sofort gründlich mit Wasser abspülen und Arzt konsultieren. |
| S 39 | Schutzbrille/Gesichtsschutz tragen. |

Hinweise zur Entsorgung

Bei der Giftsammelstelle entsorgen. Nie im Ausguss, in der Toilette oder im Haushaltsabfall entsorgen! Hinweise im [Sicherheitsdatenblatt](#) des Herstellers beachten. Lokale Vorschriften beachten.

Quellen

- [Carl Roth GmbH](#)

8.4.3. Salzsäure 2 M/HCl in H₂O

[Link zum Sicherheitsdatenblatt](#)

Hersteller [Carl Roth GmbH](#) (Art.-Nr. T134.1)

CAS-Nummer 7647-01-0

2 M Salzsäure erscheint bei Raumtemperatur und Standarddruck in farblosem, geruchlosem, flüssigem Aggregatzustand und ist vollständig mit Wasser mischbar.

Von der Substanz gehen akute oder chronische Gesundheitsgefahren aus!

Gefahrensymbole



C ätzend

Warnsymbole



Vorsicht ätzend

Gebotszeichen



Schutzbrille tragen



Schutzhandschuhe tragen

R 34 Verursacht Verätzungen.

R 37 Reizt die Atmungsorgane.

Hinweise zur Entsorgung

Bei der Giftsammelstelle entsorgen. Nie im Ausguss, in der Toilette oder im Haushaltsabfall entsorgen! Säuren und Basen vor der Entsorgung neutralisieren. Hinweise im [Sicherheitsdatenblatt](#) des Herstellers beachten. Lokale Vorschriften beachten.

Quellen

- [GESTIS-Stoffdatenbank](#)
- [Carl Roth GmbH](#)

8.4.4. Ammoniak Lösung 30%/NH₃ + 3H₂O/17.03 g*mol⁻¹

[Link zum Sicherheitsdatenblatt](#)

Hersteller [Carl Roth GmbH](#) (Art.-Nr. CP17.1)

CAS-Nummer 1336-21-6

Die farblose Ammoniak Lösung (30% in H₂O) erscheint bei Raumtemperatur und Standarddruck in flüssigem Aggregatzustand. Der Siedepunkt liegt bei 30 °C.

Die Substanz verursacht schwere Verätzungen der Haut und schwere Augenschäden. Sie ist sehr giftig für Wasserorganismen. Die Substanz wird als gefährlich eingestuft!

Gefahrensymbole



C ätzend



N umweltgefährlich

Warnsymbole



Vorsicht ätzend

Gebotszeichen



Schutzbrille tragen



Schutzhandschuhe tragen

- | | |
|------------|---|
| R 34 | Verursacht Verätzungen. |
| R 50 | Sehr giftig für Wasserorganismen. |
| S 26 | Bei Berührung mit den Augen sofort gründlich mit Wasser abspülen und Arzt konsultieren. |
| S 36/37/39 | Bei der Arbeit geeignete Schutzkleidung, Schutzhandschuhe und Schutzbrille/Gesichtsschutz tragen. |
| S 45 | Bei Unfall oder Unwohlsein sofort Arzt hinzuziehen (wenn möglich, das Etikett der Substanz vorzeigen). |
| S 61 | Freisetzung in die Umwelt vermeiden. Besondere Anweisungen einholen/Sicherheitsdatenblatt zu Rate ziehen. |

Hinweise zur Entsorgung

Bei der Giftsammelstelle entsorgen. Nie im Ausguss, in der Toilette oder im Haushaltsabfall entsorgen! Wenn möglich Säuren und Basen vor der Entsorgung neutralisieren. Hinweise im [Sicherheitsdatenblatt](#) des Herstellers beachten. Lokale Vorschriften beachten.

Quellen

- [GESTIS-Stoffdatenbank](#)
- [Carl Roth GmbH](#)

8.4.5. Tetramethylammonium Hydroxid Lösung 25%ig in H₂O (CH₃)₄N(OH)/ 91.15 g*mol⁻¹

[Link zum Sicherheitsdatenblatt](#)

Hersteller [Sigma Aldrich](#) (Art.-Nr. 331635)

CAS-Nummer 75-59-2

Tetramethylammonium Hydroxid erscheint bei Raumtemperatur und Standarddruck in festem Aggregatzustand und in Form von weissem kristallinem Pulver.

Von der Substanz gehen akute oder chronische Gesundheitsgefahren aus!

Gefahrensymbole



T giftig



C ätzend

Warnsymbole



Vorsicht giftig



Vorsicht ätzend

Gebotszeichen



Schutzbrille tragen



Schutzhandschuhe tragen

- | | |
|------------|--|
| R 24/25 | Giftig bei Berührung mit der Haut und beim Verschlucken. |
| R 34 | Verursacht Verätzungen. |
| R35 | Verursacht schwere Verätzungen. |
| R 52 | Schädlich für Wasserorganismen. |
| S 26 | Bei Berührung mit den Augen sofort gründlich mit Wasser abspülen und Arzt konsultieren. |
| S 36/37/39 | Bei der Arbeit geeignete Schutzkleidung, Schutzhandschuhe und Schutzbrille/Gesichtsschutz tragen. |
| S 45 | Bei Unfall oder Unwohlsein sofort Arzt hinzuziehen (wenn möglich, das Etikett der Substanz vorzeigen). |

Hinweise zur Entsorgung

Bei der Giftsammelstelle entsorgen. Nie im Abguss, in der Toilette oder im Haushaltsabfall entsorgen! Hinweise im [Sicherheitsdatenblatt](#) des Herstellers beachten. Lokale Vorschriften beachten.

Quellen

- [GESTIS-Stoffdatenbank](#)
- [Sigma Aldrich](#)

