

1 Das magnetostatische Feld

Student Group

First Name	Surname	Matrikel Nr.

Table of Contents

1. Das magnetostatische Feld	2
1.1 Magnetische Erscheinungen	2
Ziele	2
Effekte um Permanentmagneten	2
Merke:	4
Effekte um stromdurchflossene Leitungen	5
Merke:	5
Vergleich von Elektrostatik und Magnetostatik	6
1.2 Magnetische Feldstärke	6
Ziele	6
Simulation und Superposition des magnetostatischen Felds	6
Herleitung der magnetischen Feldstärke	8
Achtung:	9
1.3 Das Ampere'sche Kraftgesetz, magnetische Flussdichte	9
Ziele	9
1.4 Lorentzkraft	10
Ziele	10
Video	10
1.5 Materie im magnetischen Feld	10
Ziele	10
Aufgaben	12

1. Das magnetostatische Feld

1.1 Magnetische Erscheinungen

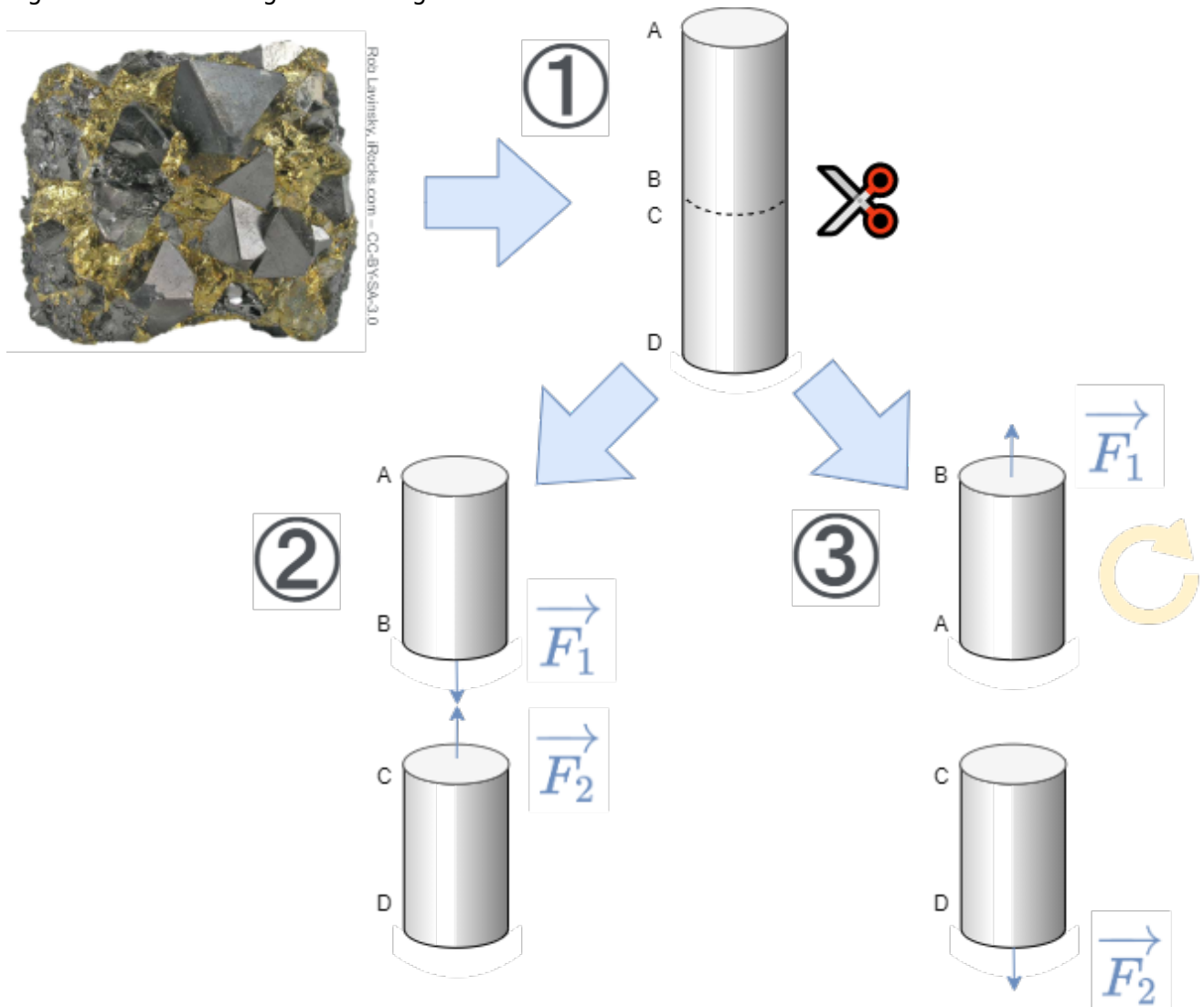
Ziele

Nach dieser Lektion sollten Sie:

1. wissen, dass zwischen Magnetpolen Kräfte wirken und die Richtung der Kräfte kennen.
2. wissen, dass sich um einen stromdurchflossenen Leiter ein magnetisches Feld bildet.
3. die Feldlinien des magnetischen Feldes skizzieren können. Dabei wissen Sie welche Richtung das Feld hat und wo das Feld am dichtesten ist.

Effekte um Permanentmagneten

Fig. 1: Erste Näherung an den Magnetismus



Erste Permanentmagnete aus dem Magneteisenstein (Fe_3O_4) wurden in Griechenland in der Region um Magnesia gefunden. Neben den Eisenmaterialien zeigen auch andere Elemente eine ähnliche "starke und dauerhafte magnetische Kraftwirkung", die nach dem Eisen auch Ferromagnetismus genannt wird: Auch Kobalt und Nickel, sowie viele deren Legierungen zeigen einen solchen Effekt. In Kapitel [1.5 Materie im magnetischen Feld](#) wird die Unterteilung der magnetischen Materialien detailliert beschrieben.

Hier soll nun die "magnetische Kraftwirkung" näher betrachtet werden. Dazu werden mit einem Magneteisenstein ein paar Gedankenexperimente durchgegangen [figure 1](#) ([Dieses Video](#) gibt eine ähnliche Einführung).

1. Aus dem Eisenerz soll nun zunächst ein handliches längliches Teil abgetrennt werden. Hat man Glück, so ist das gefundene Eisenerz bereits von sich aus magnetisch. Dieser Fall soll im Folgenden betrachtet werden. Das längliche Stück soll nun wiederum in zwei kleine Teile zertrennt werden.
2. Sobald die beiden Stücke von einander entfernt werden, so stellt man fest, dass die zwei Teile sich direkt an der Schnittfläche wieder anziehen.
3. Wird eines der beiden Teile gedreht (im Bild rechts das obere), so wirkt eine abstoßende Kraft auf die beiden Teile.

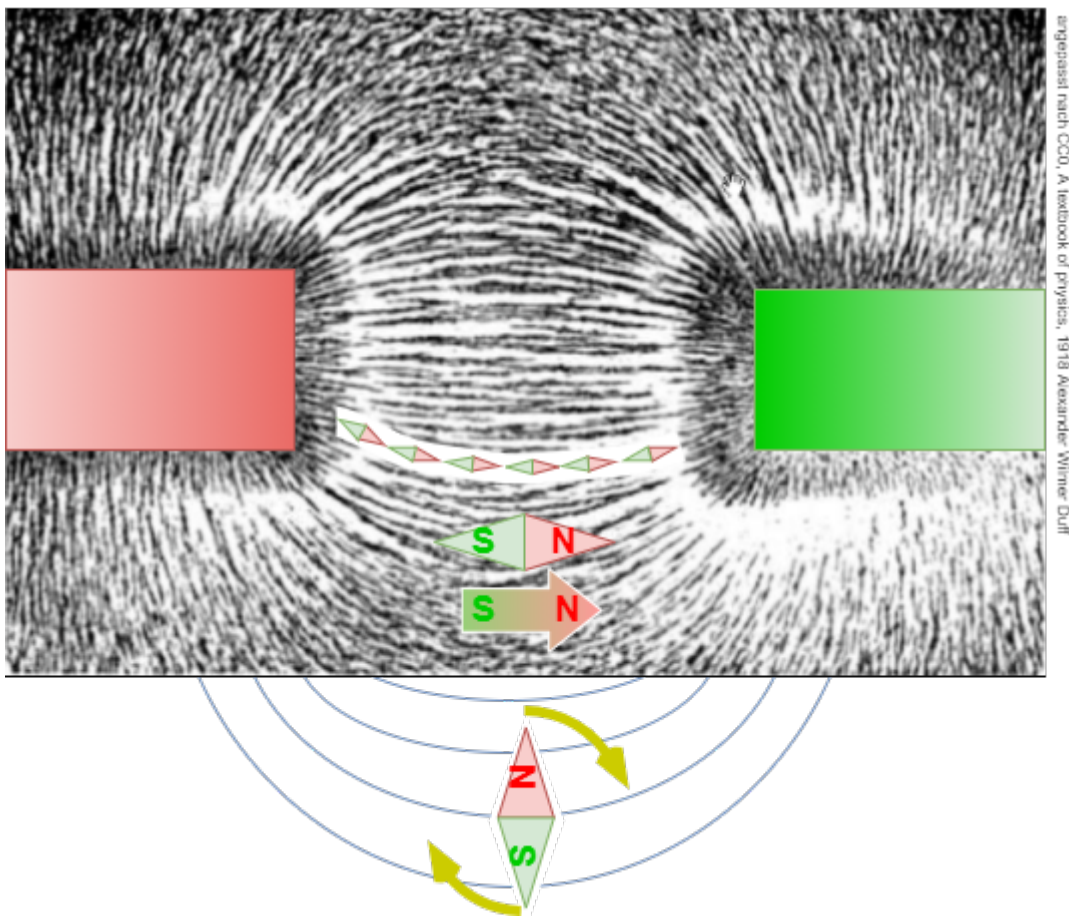
Es scheint also, als ob es eine gerichtete Kraft jeweils in der Umgebung der beiden Teile gibt. Wenn man etwas tiefer nachforscht wird man herausfinden, dass diese Kraft sich auf einem Teil der Außenfläche fokussiert.

Natürlich kennen Sie bereits Magnete und wissen auch, dass es Pole gibt. Das betrachtete Gedankenexperiment soll verdeutlichen, wie man bei einer unbekannten Erscheinung hätte vorgehen können. In weiteren Gedankenexperimenten können solche Magneteisensteine auch in andere Richtungen zerschnitten und die Kräfte analysiert werden.

Das Ergebnis hier ist:

1. Es existieren 2 Pole. Diese werden Nordpol und Südpol genannt. Der **N**ordpol wird **rot**, der **S**üdpol **grün** gefärbt.
2. Gleichnamige Pole stoßen sich ab. Ungleichnamige Pole ziehen sich an. Dies ähnelt dem elektrischen Feld (gegensätzliche Ladungen ziehen sich an).
3. Magnete erfahren also eine Kraft in der Umgebung anderer Magnete.
4. Ein Kompass ist ein kleiner drehend gelagerter "Probe" Magnet und wird auch Magnetnadel genannt. Dieser Probemagnet kann damit die Wirkung eines Magnetes darstellen. Auch dies ähnelt der Probeladung des elektrischen Feldes.
5. Die Namensgebung der Magnetpole geschah durch den Teil des Kompasses, welcher auf den geografischen Nordpol zeigt. Daher rührt, dass am geografischen Nordpol der magnetische Südpol zu finden ist.
6. Magnetpole sind nicht isolierbar. selbst der kleines Bruchteil eines Magneten zeigt entweder keinen Magnetismus, oder sowohl Nord- als auch Südpol.

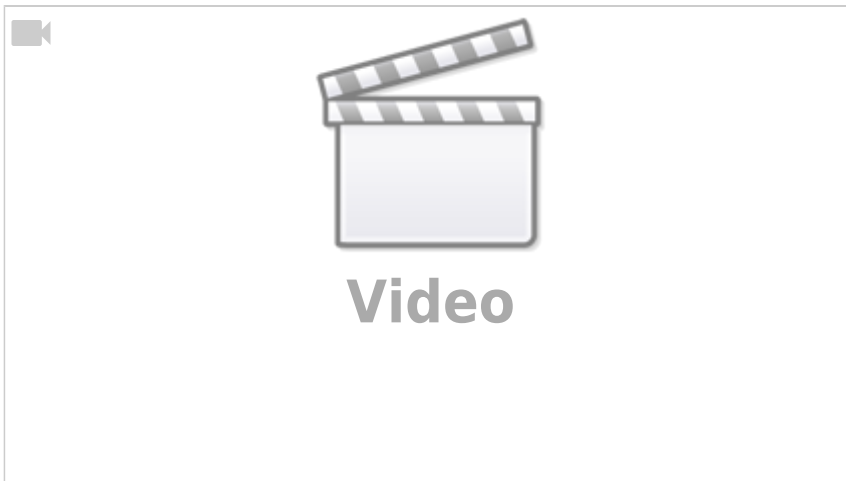
Fig. 2: Magnetfeld wird durch Eisenspäne sichtbar



Ein interessanter Aspekt ist, dass selbst nicht magnetisierte, ferromagnetische Materialien im Magnetfeld eine Kraftwirkung erfahren. Ein nichtmagnetischer Nagel wird von einem Permanentmagneten angezogen. Dies geschieht sogar unabhängig vom Magnetpol. Hieraus lässt sich auch die Visualisierung über Eisenspäne (= kleine ferromagnetische Teile) erklären, siehe [figure 2](#). Auch hier gibt es eine Kraftwirkung und ein Drehmoment, welches die Eisenspäne ausrichtet. Das sichtbare Feld scheint hier Feldlinien auszubilden.

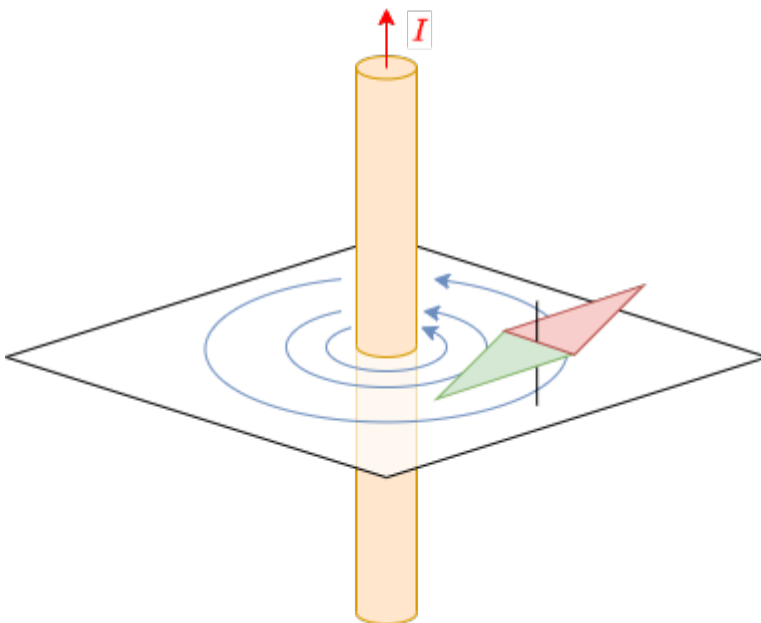
Merke:

- Feldlinienbilder lassen sich durch Eisenspäne sichtbar machen. Konzeptionell können diese als eine Aneinanderreihung von Probemagneten verstanden werden.
- Die **Richtung des Magnetfelds** über den Probemagnet definiert: Der Nordpol des Probemagneten zeigt in Richtung des Magnetfelds.
- Der **Betrag des Magnetfelds** ergibt sich durch das Drehmoment welches ein Probemagnet erfährt, der senkrecht zum Feld ausgerichtet ist.
- Feldlinien scheinen sich voneinander abzustößen (Querdruck). z.B. sichtbar beim Feldaustritt aus dem Permanentmagneten
- Feldlinien versuchen einen möglichst kurzen Weg zurückzulegen (Längszug)



Effekte um stromdurchflossene Leitungen

Fig. 3: Magnetfeld um einen stromdurchflossenen Leiter

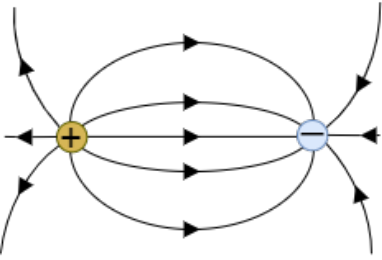
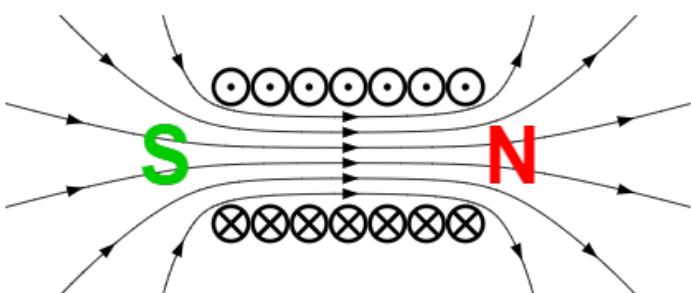


Christian Ørsted entdeckte 1820 her zufällig während einer Vorlesung, dass auch stromdurchflossene Leiter eine Wirkung auf einen Kompass zeigen. Diese Experiment ist in [figure 3](#) dargestellt. Ein langer, gerader Leiter mit kreisrundem Querschnitt wird mit dem Strom I durchflossen. Aufgrund von Symmetrieüberlegungen muss das Feldlinienbild radialsymmetrisch zur Leiterachse sein. Durch ein Experiment mit einer Magnetenadel lässt sich zeigen, dass die Feldlinien konzentrische Kreise bilden.

Merke:

- Wird die technische Stromrichtung betrachtet, so umgeben die magnetischen Feldlinien dem Strom im Sinne einer Rechtsschraube. ("Rechtschraubenregel")
- Diese Regel lässt sich auch auf eine andere Art merken: Zeigt der Daumen der rechten Hand in die (technische) Stromrichtung, so umgeben die Finger der Hand den Leiter wie die magnetischen Feldlinien. Ebenso gilt, wenn der Daumen der linken Hand in die Elektronenflussrichtung zeigt, umgeben die Finger der Hand den Leiter wie die magnetischen Feldlinien.

Vergleich von Elektrostatik und Magnetostatik

Eigenschaft	Elektrostatik	Magnetostatik
Feldlinienbilder	Fig. 4: Elektrostatische Feldlinien 	Fig. 5: Magnetostatische Feldlinien 
Probe für das Feld	positive Probeladung	Kompass
Feldlinien	- beginnen auf einer positiven Ladung - enden auf einer negativen Ladung	- sind geschlossen - haben kein Anfang und kein Ende
Feldlinienenden	Es gibt Quellen und Senken	es gibt <u>keine</u> Quellen und Senken
Feldtyp	wirbelfreies Quellenfeld	quellenfreies Wirbelfeld

1.2 Magnetische Feldstärke

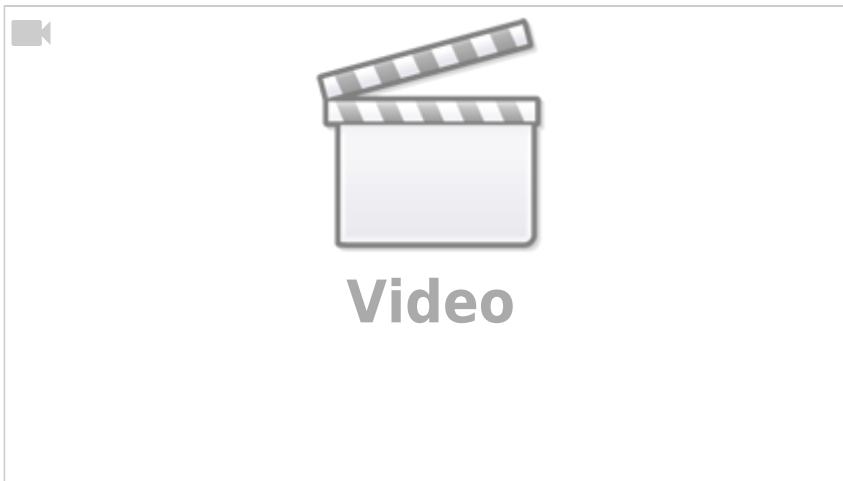
Ziele

Nach dieser Lektion sollten Sie:

1. die beiden feldbeschreibenden Größen des magnetischen Feldes kennen.
2. in der Lage sein, den Zusammenhang dieser beiden Größen zu beschreiben und anzuwenden.

Simulation und Superposition des magnetostatischen Felds

Überlagerung magnetischer Felder (nur bis 04:08)



Bevor die magnetische Feldstärke genauer betrachtet werden soll, wird hier auf die Simulation und Superposition des magnetischen Felds näher betrachtet werden.

Magnetostatische Felder lassen sich superponieren, wie elektrostatische Felder auch. Dadurch lassen sich die Felder von mehreren stromdurchflossenen Leitungen zu einem einzigen zusammenfassen. Dieser Trick wird im folgenden Kapitel genutzt, um das Magnetfeld näher zu untersuchen.

Rechts ist das magnetische Feld eines einzelnen stromdurchflossenen Leiters dargestellt. Diese wurde bereits schon im vorherigen Kapitel durch Symmetriebetrachtungen hergeleitet. Die Darstellung in der Simulation kann hier etwas vereinfacht werden, um die Gegebenheiten deutlicher zu sehen: Aktuell sind die Feldlinien in 3D dargestellt, was durch die Auswahl von "Display: Field Lines" und "No Slicing" geschieht. Wenn Sie statt "No Slicing" die Auswahl auf "Show Z Slice" stellen, so kann in eine 2D Darstellung gewechselt werden. In dieser können auch kleine Kompassnadeln das Magnetfeld darstellen. Wählen Sie dazu "Display: Field Vectors" statt "Display: Field Lines". Zudem ist in der 2D-Darstellung am Mauszeiger eine "Magnetprobe", also eine beweglicher Kompass zu finden.

Liegt nun ein weiterer stromdurchflossener Leiter in der Nähe des ersten Leiters, so überlagern sich die Felder. In der Simulation rechts ist der Strom beider Leiter in die gleiche Richtung gerichtet. Das Feld zwischen den Leitern überlagert sich gerade so, dass es sich abschwächt. Dies lässt sich auch durch die bisherigen Kenntnisse herleiten, wenn gerade der Mittelpunkt zwischen beiden Leitern betrachtet wird: Dort ergibt die rechte Hand-Regel für den linken Leiter einen Vektor, der zum Betrachter hinwärts gerichtet ist. Für den rechten Leiter ergibt sich ein Vektor der vom Betrachter wegwärts gerichtet ist. Diese heben sich gerade auf. Weiter außenliegende Feldlinien führen um beide Leiter herum. Nord- und Südpol ist hier nach außen nicht fest lokalisiert.

Wenn hingegen der Strom des zweiten Leiters gerade entgegen des Stroms im ersten Leiter gerichtet ist, ändert sich das Bild: Hier ergibt sich eine verstärkende Überlagerung zwischen den beiden Leitern. Mit der Nomenklatur aus dem vorherigen Kapitel ist es hier auch möglich Nord- und Südpol lokal zu zu

ordnen. Nach außen erscheint ein Pol vor den beiden Leitern lokalisiert zu sein und ein weiterer dahinter.

in den beiden Simulationen lassen sich auch die Abstände der Leiter über den Slider "Line Separation" verändern. Was stellen Sie jeweils fest, wenn beide Linien nahe aneinander gebracht werden?

Herleitung der magnetischen Feldstärke

Fig. 6: Magnetfeld in einer Toroidspule

Bisher wurde das Magnetfeld recht pragmatisch durch die Wirkung auf einen Kompass definiert. Für eine tiefere Analyse des Magnetfeldes soll das Feld nun wieder - wie beim elektrischen Feld - aus zwei Richtungen betrachtet werden. Auch das Magnetfeld wird als ein "Verursacherfeld" (ein von Magnete erzeugtes Feld) und ein "wirkendes Feld" (Feld wirkt auf einen Magneten). In diesem Kapitel wird zunächst auf das magnetische Wirkfeld eingegangen. Für diese bietet sich die Betrachtung der Effekte im Inneren einer Ringspule (= Toroidspule) an. Diese ist in [figure 6](#) zu sehen. Aus Symmetriegründen ist auch hier klar, dass die Feldlinien sich als konzentrische Kreise ausbilden.

In einem Experiment soll nun eine Magnetenadel im Inneren der Ringspule rechtwinklig zu den Feldlinien ausgerichtet werden. Dann wird das Magnetfeld ein Drehmoment erzeugen, welches die Magnetenadel in die Feldrichtung auszurichten versucht.

Es ergibt sich nun:

1. $M \neq M(\phi)$: Bei gleichem Abstand von der Symmetrieachse ist das Drehmoment M unabhängig vom Winkel ϕ .
2. $M \sim I$: Je stärker der durch eine Wicklung fließende Strom, desto stärker die Wirkung, d.h. desto stärker das Drehmoment.
3. $M \sim N$: Je größer die Anzahl N der Wicklungen, desto stärker das Drehmoment M .
4. $M \sim \frac{1}{l}$: Je kleiner der mittlere Spulenumfang l desto größer das Drehmoment. Der mittlere Spulenumfang l gleicht der Feldlinienlänge.

Zusammengefasst wird daraus:
$$M \sim \frac{l \cdot N}{l}$$

Die **magnetische Feldstärke** H im Innern der Ringspule wird angegeben als:
$$H = \frac{l \cdot N}{l} \quad | \text{ gilt nur für die Toroidspule }$$

Als Einheit der **magnetische Feldstärke** H ergibt sich $[H] = \frac{[I]}{[m]} = 1 \frac{[A]}{[m]}$

1. Erregerfeld
2. Elektret

Werden mit dem nun aufgebauten Verständnis die bisherigen Simulationen betrachtet, so stellt man eine Ungereimtheit fest: Im Gegensatz zur Realität, zeigt die Feldliniendichte in der Falstad-Simulation **nicht** die Stärke des Feldes an. Rechts ist eine realitätsnahe Simulation dargestellt, die den Unterschied deutlich macht: in der Nähe des Leiters ist das Feld stärker. Damit muss dort auch die

Feldliniendichte auch stärker sein.

Achtung:

- Die Dichte der Feldlinien ist ein Maß für die Feldstärke.
- Die Simulation in Falstad kann dies so nicht abbilden. Hier ist die Feldstärke durch die Farbinsintensität codiert (dunkelgrün = geringe Feldstärke, hellgrün bis weiß = hohe Feldstärke)

1.3 Das Ampere'sche Kraftgesetz, magnetische Flussdichte

Ziele

Nach dieser Lektion sollten Sie:

1. das Kraftgesetz für stromdurchflossene Leiter kennen.
2. die Richtung der Kräfte anhand gegebener Stromrichtungen und gegebenenfalls Flussdichte bestimmen können.
3. die wirkenden Kraftvektoren in einer Skizze darstellen können.
4. in der Lage sein, einen Kraftvektor durch Überlagerung mehrerer Kraftvektoren mit Hilfe der Vektorrechnung zu bestimmen
5. in der Lage sein, für einen Kraftvektor folgende Größen anzugeben:
 1. Kraftvektor in Koordinatendarstellung
 2. Betrag des Kraftvektors
 3. Winkel des Kraftvektors



Video

Bitte sehen Sie sich auf der Seite des [KIT-Brückenkurs >> 3.2.2 Magnetisches Feld](#) die Inhalte (Text, Videos, Übungen) an. Achten Sie darauf, dass in der Auswahlliste oben "Gesamt" ausgewählt wurde. Der letzte Teil zu "Magnetfeld mit Materie" kann übersprungen werden - dieser kommt erst in 2-3 Terminen.

1.4 Lorentzkraft

Ziele

Nach dieser Lektion sollten Sie:

1. in der Lage sein, bei Vorgabe mehrerer stromdurchflossener Leiter die Vektoren der magnetischen Flussdichte in einer Skizze darzustellen.
2. durch Überlagerung mehrerer Vektoren mit Hilfe der Vektorrechnung den resultierenden Vektor der magnetischen Flussdichte bestimmen können.
3. durch Anwendung des Kraftgesetzes für stromdurchflossene Leiter im magnetischen Feld die Kraft auf einen stromdurchflossenen Leiter in einem magnetostatischen Feld bestimmen können:
 1. Kraftvektor in Koordinatendarstellung
 2. Betrag des Kraftvektors
 3. Winkel des Kraftvektors

Video

Bitte sehen Sie sich auf der Seite des [KIT-Brückenkurs >> 3.2.3 Lorentz-Kraft](#) die Inhalte (Text, Videos, Übungen) an. Achten Sie darauf, dass in der Auswahlleiste oben "Gesamt" ausgewählt wurde. Der letzte Teil zu "Magnetfeld mit Materie" kann übersprungen werden.

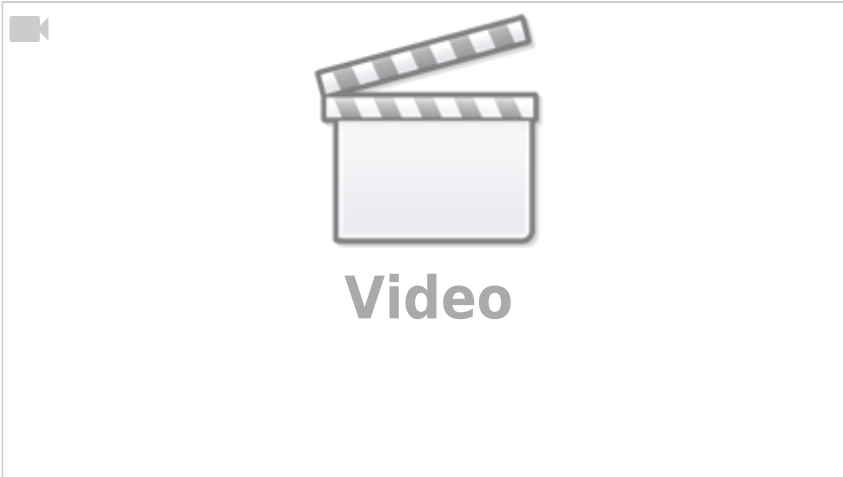
1.5 Materie im magnetischen Feld

Ziele

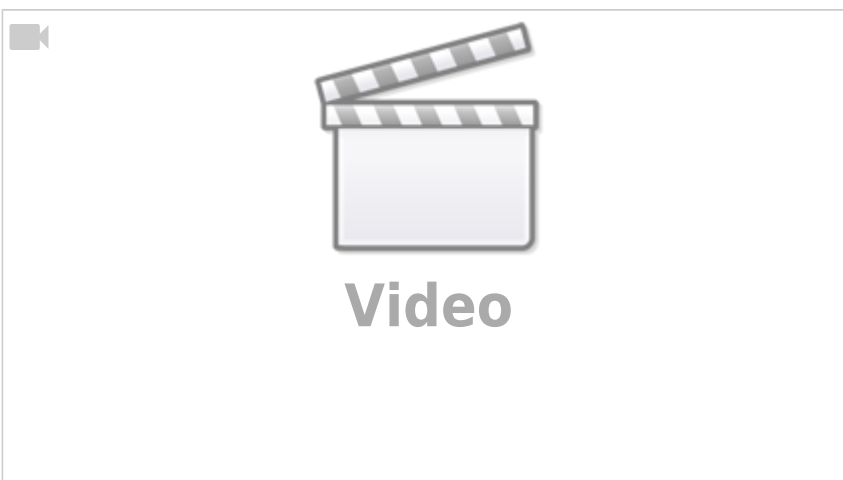
Nach dieser Lektion sollten Sie:

1. die beiden feldbeschreibenden Größen des magnetostatischen Feldes kennen.
2. in der Lage sein, den Zusammenhang dieser beiden Größen über das Materialgesetz zu beschreiben und anzuwenden.
3. die Einteilung der magnetischen Werkstoffe kennen.
4. in der Lage sein, aus einer Magnetisierungskennlinie die relevanten Daten abzulesen

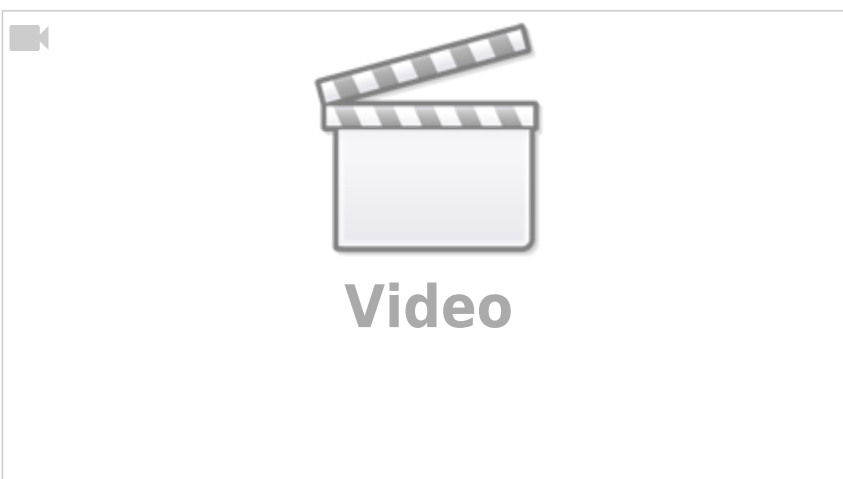
Kraftwirkung auf dia- und paramagnetische Stoffe im Magnetfeld



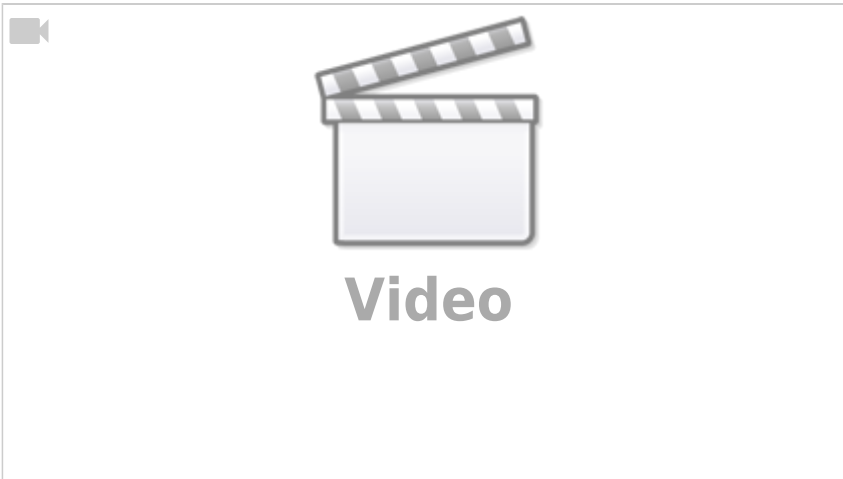
Ein lebendiger Frosch ("Diamagnet") schwebt in einem sehr starken Magnetfeld



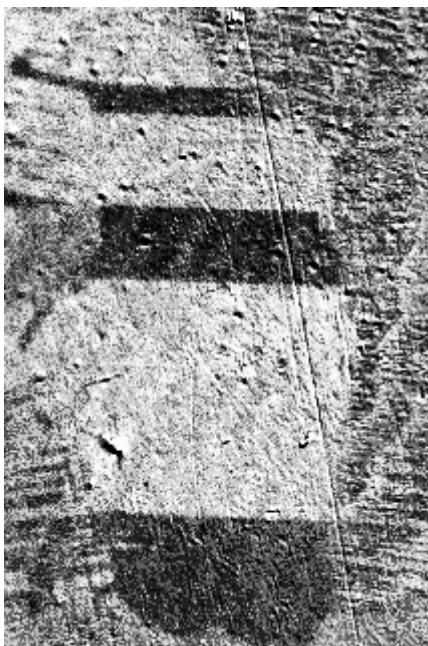
Erklärung der Hysteresekurve



Schöne Darstellung von Magnetisierung und Entmagnetisierung von weichmagnetischen Material



Wandernde magnetische Domänen in einem ferromagnetischen Material (von [Zureks@en.wikipedia.org](https://en.wikipedia.org/wiki/Zureks) unter CC-BY-SA 3.0)



Aufgaben

Aufgabe 1

1. Mit welcher Hand lässt sich aus Strömen die Magnetfeldrichtung herleiten?

[Tipp zu 1](#)

- ☐ Die rechte Hand
- ☐ Die linke Hand

Bei St**R**omfluss nutzt man welche Hand?

2. Wie sind bei der Herleitung aus 1. die Finger zuzuordnen?

[Tipp zu 2](#)

- ☐ Daumen für Stromrichtung, restliche Finger für Magnetfeldrichtung
- ☐ Daumen für Magnetfeldrichtung, restliche Finger für Stromrichtung
- ☐ beide Möglichkeiten sind richtig

- Stellen Sie sich eine Spule mit einer Wicklung bildlich vor, oder malen Sie es auf.
- Nun denken Sie sich ein erzeugtes Feld

3. Zwei stromdurchflossene Leiter liegen parallel und nahe beieinander. Der Strom in beiden fließt in die gleiche Richtung. Welche Kraftwirkung ist zu sehen?

- ☐ keine
- ☐ Die Leiter ziehen sich an
- ☐ Die Leiter stoßen sich ab

4. Zwei stromdurchflossene Leiter liegen rechtwinklig aufeinander. Durch beide fließt Strom. Welche Kraftwirkung ist zu sehen?

- ☐ keine
- ☐ Die Leiter ziehen sich an
- ☐ Die Leiter stoßen sich ab

5. Wie verläuft das Magnetfeld im Inneren der Erde bzw. eines Permanentmagneten?

- ☐ vom magnetischen Nordpol zum Südpol
- ☐ vom magnetischen Südpol zum Nordpol
- ☐ das Innere ist feldfrei

6. An welchem Ort einer stromdurchflossenen Spule sind die Feldlinien am dichtesten?

- ☐ am magnetischen Nordpol
- ☐ am magnetischen Südpol
- ☐ im Inneren der Spule
- ☐ an beiden Polen

Check Answers

You Scored % - /

durch diese dazu. Welche Richtung muss der verursachende Strom haben? Passt dies zur Faustregel?

- Im Anschluss versuchen sie es andersherum: Wenn ein Strom gegeben ist, wo gehen dann die Feldlinien hinein und wo heraus? Welche Pole entstehen dort?

[Tipp zu 3](#)

Siehe 3. Video

- Stellen Sie sich die beiden Drähte bildlich vor, oder malen Sie es auf.
- In welche Richtung würde das äußere Feld jeweils laufen?
- Das Feld ist ein lineares Vektorfeld. Aus mehreren Einzelfeldern kann also durch Addition das Gesamtfeld erzeugt werden. Wird die Addition des Feldes dazwischen größer, oder kleiner?

[Tipp zu 4](#)

- Stellen Sie sich zunächst nochmal die parallelen Drähte vor. Was passiert bei gleich und was bei entgegen gerichteten Stromfluss? Sind die entstehenden Kräfte betragsmäßig gleich?
- Die Stromrichtungsumkehr kann man nun auch statt durch ändern des Stroms durch Drehen des Drahtes erzeugen - gerade so, dass beim Drehen zwischenzeitlich die Drähte senkrecht aufeinander liegen.
- Wenn nun bei parallelen Drähten und unterschiedlicher Stromrichtung die betragsmäßig gleiche Kraft entsteht. so ist dies auch bei jedem Winkel dazwischen (Ausführlich über Integration der Kraft über einzelne Drahtstücke).
- Dann muss es aber einen Punkt geben bei der die Kraft 0 wird.

[Tipp zu 5](#)

- Die magnetischen Feldlinien müssen geschlossen sein.

- Vergleichen Sie den Feldverlauf zwischen Spule und Permanentmagnet.

Tipp zu 6

- Im Video 1 ist der Verlauf außerhalb und innerhalb der Spule zu sehen.

Referenzen zu den genutzten Medien

Element	Lizenz	Link
figure 1	CC-BY-SA 3.0	https://de.wikipedia.org/wiki/Magnetit#/media/Datei:Chalcopyrite-Magnetite-cktsr-10c.jpg
figure 2	Public Domain	https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Magnetic_field_of_bar_magnets_attracting.png
figure 5	CC-BY-SA 3.0	https://commons.wikimedia.org/wiki/File:VFpt_Solenoid_correct.svg

From:

<https://wiki.mexle.te.hs-heilbronn.de/> - **MEXLE Wiki**

Permanent link:

https://wiki.mexle.te.hs-heilbronn.de/elektrotechnik_2/das_magnetostatische_feld?rev=1615256382

Last update: **2021/05/09 09:58**

