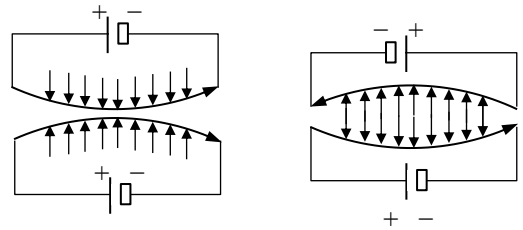


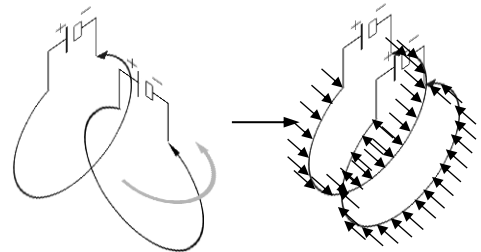
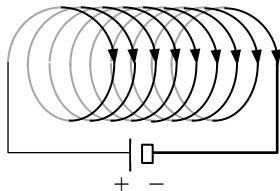
3.3. Magnetostatik

3.3.1. Kräfte zwischen stromdurchflossenen Leitern

Zwei stromdurchflossene **gerade Leiter** ziehen sich an, wenn die Ströme **parallel** laufen. Sie stoßen sich ab, wenn die Ströme **antiparallel** laufen



Zwei stromdurchflossene **Leiterschleifen** versuchen sich so auszurichten, dass ihre Ströme **parallel** fließen. Die Wirkung verstärkt sich, wenn man mehrere Leiterschleifen hintereinander wickelt. Eine solche Anordnung nennt man **Spule**:

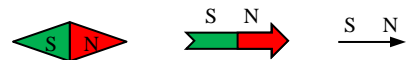
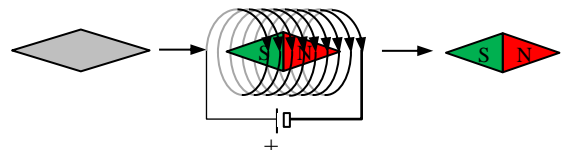


Übungen: Aufgaben zur Magnetostatik Nr. 1

3.3.2. Magnete

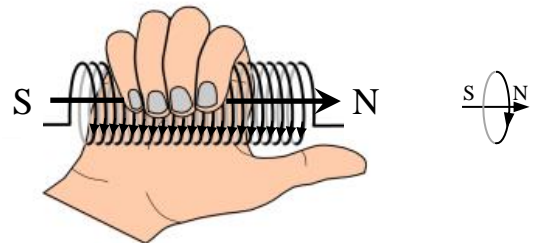
3.3.2.1. Permanentmagnete

Hält man einen **ferromagnetischen Stoff** wie **Eisen** $_{26}\text{Fe}$, **Kobalt** $_{27}\text{Co}$, **Nickel** $_{28}\text{Ni}$ oder **Neodym** $_{60}\text{Nd}$ in eine **stromdurchflossene Spule**, so richtet er sich immer wieder auf dieselbe Art in der Spule aus. Nach dieser **Magnetisierung** verhält er sich auch außerhalb der Spule und in der Nähe beliebiger Ströme genau so wie eine **stromdurchflossene Spule**. In größeren Entfernungen orientiert er sich nicht mehr an den Strömen, sondern an der **Nord-Süd-Richtung der Erde**. Man nennt einen so magnetisierten ferromagnetischen Stoff **Permanent- oder Dauermagnet** und kennzeichnet die nach Norden bzw. nach Süden gerichteten Enden als **Nordpol (rot)** bzw. **Südpol (grün)**. Man benutzt solche Magneten als **Kompassnadeln** und stellt sie daher oft als **Pfeile** dar, die immer nach **Norden** weisen.



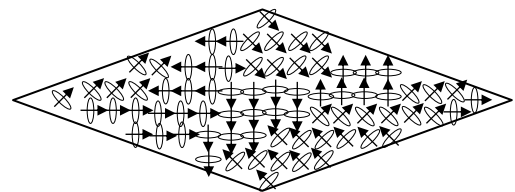
3.3.2.2. Elektromagnete

Stromdurchflossene Spulen richten genauso wie Permanentmagnete in Nord-Süd-Richtung aus, wenn sie nicht durch andere Ströme gestört werden. Ihre Orientierung lässt sich mit der **Rechte-Hand-Regel** bestimmen **Wenn die Finger in Stromrichtung zeigen, gibt der Daumen den Nordpol an.**

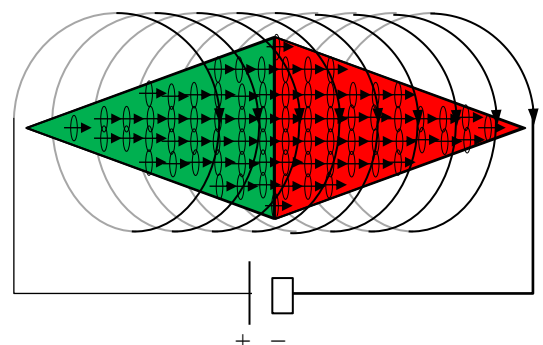


3.3.2.3. Ferromagnetismus

Die Atome vieler Stoffe enthalten ungepaarte Elektronen, die sich auf ihrer Kreisbahn um den Kern wie kleine **Kreisströme** verhalten. Beim **Magnetisieren** werden sie durch das Magnetfeld einer Spule parallel ausgerichtet, so dass ihre Wirkung sich gegenseitig verstärkt und sich das ganze Metallstück **ebenfalls wie eine Spule** mit vielen Trilliarden kleinen Windungen verhält.



Bei ferromagnetischen Stoffen hält diese Wirkung auch dann noch an, wenn das äußere Magnetfeld längst verschwunden ist. In diesen Stoffen sind die Atome schon durch ihre gegenseitigen Magnetfelder in den **Weisschen Bezirken** (nach ihrem Entdecker Pierre Ernest Weiss, 1865 – 1940) aneinander ausgerichtet. Das äußere Magnetfeld richtet dann nur noch die verschiedenen Weisschen Bezirke parallel aus.

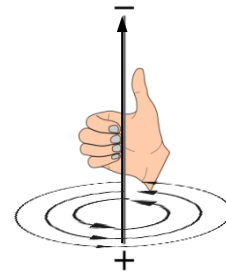


Übungen: Aufgaben zur Magnetostatik Nr. 2 und 3

3.3.3. Das magnetische Feld

3.3.3.1. Feldlinien

Elektro- und Permanentmagnete wie z.B. **Eisenspäne** ordnen sich in der Umgebung stromdurchflossener Leiter in typischen **Feldlinien** an. In Analogie zu den elektrischen Feldlinien legen wir fest, dass die **Richtung des magnetischen Feldes immer dem Nordpol folgt**.

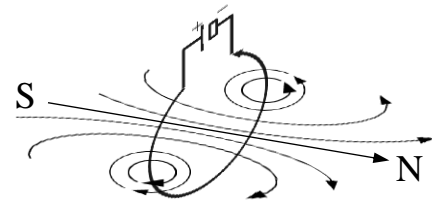


3.3.3.2. Feld eines geraden Leiters

Die Richtung der magnetischen Feldlinien in der Umgebung eines **geraden stromdurchflossenen Leiters** lässt sich mit der **Rechten-Faust-Regel** bestimmen: Folgt der Daumen der technischen Stromrichtung, so geben die Finger die Richtung der **kreisförmigen** magnetischen Feldlinien an.

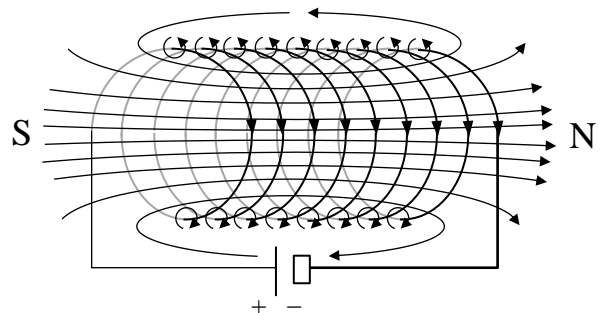
3.3.3.3. Feld einer Spule

In einer **Spule** überlagern sich die Feldlinien im Inneren zu einem nahezu **homogenen Bereich** geradlinig paralleler und eng beieinander liegender Linien analog zum elektrischen Feld eines Plattenkondensators. Die Richtung der Feldlinien lässt sich wieder mit der **Rechten Faust** bestimmen. Diesmal aber mit vertauschten Rollen: Finger in Stromrichtung und Daumen in Feldrichtung. (siehe 3.3.2.2.)



3.3.3.4. Magnetische Felder sind quellenfrei

Im Gegensatz zum elektrischen Feld hat das magnetische Feld aber keine Quellen: **Es gibt keine magnetischen Ladungen und die Feldlinien sind immer geschlossen**. Die Vorstellung von Nord- und Südpolen kann irreführend sein, denn im Gegensatz zu elektrische geladenen Leitern, deren Inneres feldfrei ist, schließen sich magnetische Feldlinien im Inneren einer Spule bzw. eines Magneten zu geschlossenen Linien: Außen laufen sie von Norden nach Süden, innen aber zurück von Süden nach Norden!



Übungen: Aufgaben zur Magnetostatik Nr. 4 und 5

3.3.4. Die magnetische Flussdichte

3.3.4.1. Das Ampèresche Gesetz

Die **magnetische Flussdichte B** ist ein Maß für die **Dichte der Feldlinien** und damit für die **Kraft des Magnetfeldes** auf einen stromdurchflossenen Leiter. Die **Ursache** für die Flussdichte auf dem Umfang u einer Fläche A ist der **Strom I** , der durch A fließt. Ist B überall auf dem Rand der Fläche A gleich groß, so verteilt sich die Wirkung B der Ursache I gleichmäßig auf u :

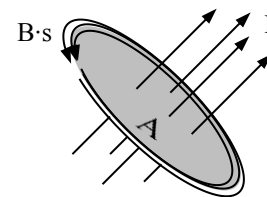
$$\boxed{B \cdot u = \mu_0 \cdot I}$$

Dies ist das **Ampèresche Gesetz** mit der **magnetischen Feldkonstanten $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{A}^{-2}$** , die wie die elektrische Feldkonstante ϵ_0 nur zur Anpassung der Einheiten dient.

3.3.4.2. Die magnetische Flussdichte des geraden Leiters

Im Abstand r von einem **geraden Leiter** mit der Stromstärke I ist der Umfang $u = 2\pi r$. Die magnetische Flussdichte ist also

$$\boxed{B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi r}}$$



3.3.4.3. Die magnetische Flussdichte des langen Spule

In einer **langen Spule** der Länge s mit n Windungen und der Stromstärke I kann man ähnlich wie beim Plattenkondensator das äußere Feld vernachlässigen und berücksichtigt vom Umfang nur die **Länge der Spule**. Mit $u = s$ erhält man

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 \cdot n \cdot \vec{I}}{s}$$

3.3.4.4. Die Permeabilität

Ferromagnetische Materialien (siehe 3.3.2.3.) verstärken die Flussdichte durch ihre eigenen kleinen Ringströme um ein Vielfaches. Viele **paramagnetische** Materialien besitzen ebenfalls ungepaarte Elektronen, deren Bahnen sich im äußeren Magnetfeld ausrichten und es dadurch (sehr geringfügig) verstärken. Diese Ordnung und das damit verbundene eigene Magnetfeld brechen aber wieder zusammen, solange keine Weisschen Bezirke vorliegen. Die temporäre oder permanente Verstärkung der Flussdichte durch paramagnetische bzw. ferromagnetische Materialien wird durch die **Permeabilitätszahl** μ_r zum Ausdruck gebracht. Insbesondere in **Spulen** mit einem para- oder ferromagnetischen **Kern** erhöht sich die Flussdichte auf

$$\vec{B} = \frac{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot n \cdot \vec{I}}{s}$$

wodurch z.B. die enorme Kraft von **Elektromagneten** bedingt wird.

Übungen: Aufgaben zur Magnetostatik Nr. 6 und 7

3.3.5. Die Lorentz-Kraft auf stromdurchflossene Leiter

Der Zusammenhang zwischen der in 3.3.1. besprochenen Kraft auf stromdurchflossene Leiter und der Flussdichte kann jetzt hergestellt werden:

Die **Lorentz-Kraft** eines Magnetfeldes mit der Flussdichte \vec{B} auf einen Leiter der Länge s mit der Stromstärke \vec{I} ist

$$\vec{F}_L = s \cdot \vec{I} \times \vec{B}$$

Die Orientierung der drei Größen in diesem **Vektorprodukt** kann man sich mit der **Rechte-Hand- oder UVW-Regel** merken:

$$\vec{U} \times \vec{V} = \vec{W}$$

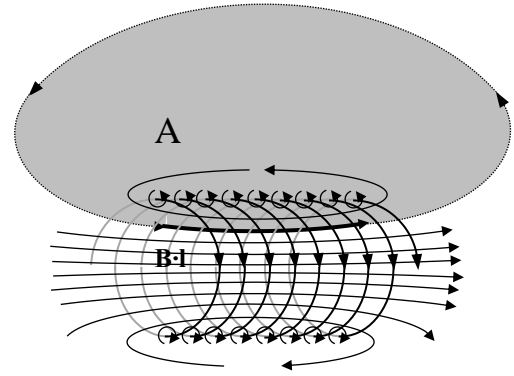
„Ursache kreuz Vermittlung gleich Wirkung“

Übungen: Aufgaben zur Magnetostatik Nr. 8 - 10

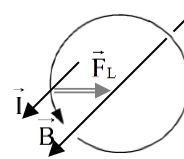
3.3.6. Der Elektromotor

Die Lorentzkraft wird im Elektromotor genutzt, um eine Spule im festen Magnetfeld in Drehbewegung zu versetzen. Damit sich die Spule immer weiterdreht, wird ein geteilter Schleifkontakt (**Kommutator**) verwendet, der dafür sorgt, dass z.B. im rechten Bild der **Strom im oberen Zweig immer nach hinten und im unteren Zweig immer nach vorn** fließt. Um die Laufruhe zu verbessern, werden 3, 4, usw. Spulen auf den **Anker** aus **ferromagnetischem Eisen** gewickelt, so dass die Umpolung schon nach 120°, 90°, usw. erfolgt.

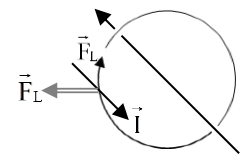
Übungen: Aufgaben zur Magnetostatik Nr. 11 und 12



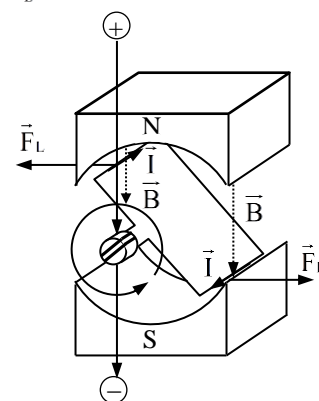
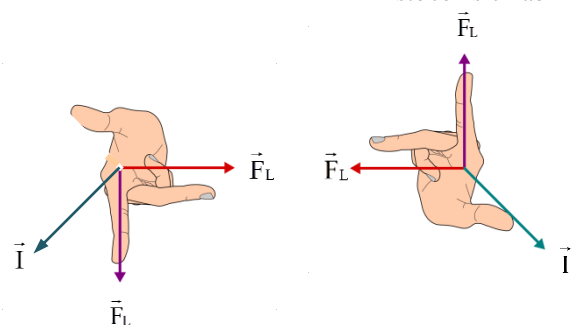
| Material | Einteilung | μ_r |
|--------------|-----------------|---------|
| Luft, Vakuum | | 1 |
| Aluminium | paramagnetisch | 1,00002 |
| Platin | paramagnetisch | 1,0003 |
| Eisen | ferromagnetisch | 1000 |
| Kobalt | ferromagnetisch | 100 |
| Nickel | ferromagnetisch | 1000 |
| Neodym | ferromagnetisch | 10 000 |



parallele Ströme ziehen sich an



antiparallele Ströme stoßen sich ab



3.3.7. Die Lorentz-Kraft auf bewegte Ladungen

Die Lorentzkraft lässt sich auch für bewegte Einzelladungen formulieren. Für konstante Ströme ist nämlich $\vec{s} \cdot \vec{I} = \vec{s} \cdot I = \vec{s} \cdot \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{\vec{s} \cdot Q}{t} = \frac{\Delta \vec{s} \cdot Q}{\Delta t} = \vec{v} \cdot Q$. Die Lorentzkraft auf eine Ladung Q mit der Geschwindigkeit \vec{v} ist also

$$\vec{F}_B = Q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$$

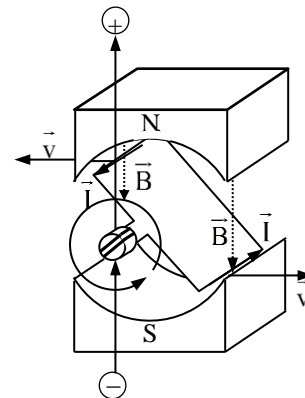
Bei der **rechten-Hand-Regel** muss beachtet werden, dass sie für die **technische Stromrichtung**, also **positive Ladungsträger** gilt!

Übungen: Aufgaben zur Magnetostatik Nr. 13 - 16

3.3.8. Der Generator und die Induktion

Mit Hilfe der Formulierung der Lorentzkraft für bewegte Einzelladungen erkennt man, dass der Elektromotor aus 3.3.6. umgekehrt auch als Stromquelle (**Generator**) dienen kann: Dreht man an der Leiterschleife, so wirkt die Lorentzkraft auf die bewegten Ladungsträger im Leiter und bewirkt einen Strom.

Der **erzeugte Strom** des Generators fließt **entgegengesetzt** zum **verbrauchten Strom** des Motors. Die Klemmen haben aber die **gleiche Polung**, da sie immer **aus der Sicht des Verbrauchers** bezeichnet wird. Beim Motor ist es dieser selbst, beim Generator jedoch ein außerhalb liegendes Gerät.



Allgemein spricht man von **Induktion**, wenn durch die Lorentzkraft in einem quer zum Magnetfeld bewegten Leiter ein Strom in Gang setzt.

Übungen: Aufgaben zur Magnetostatik Nr. 17

3.3.9. Das Massenspektrometer

Massenspektrometer erlauben die schnelle, mobile und vergleichsweise preiswerte Identifizierung von Biomolekülen wie z.B. **Eiweißen**. Sie werden u.a. bei Feuerwehr und Militär zur Bedrohungsanalyse bei Giftunfällen oder Verdacht auf Giftwareneinsatz verwendet. Ein Massenspektrometer besteht aus drei Teilen:

1. In der **Ionisationskammer** werden die zu untersuchenden Moleküle erhitzt und dabei in Bruchstücke mit der Masse m und der Ladung Q aufgespalten bzw. ionisiert.
2. Im **Analysator** werden die Ionen zunächst durch einen **Plattenkondensator** mit der Spannung U auf die kinetische

Energie $E_{\text{kin}} = \frac{1}{2}mv^2 = U \cdot Q = E_{\text{pot}}$ bzw. die Geschwindigkeit $v =$

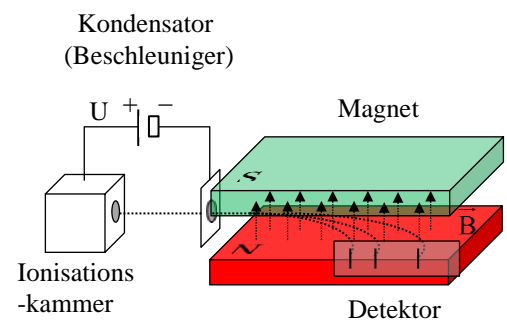
$\sqrt{\frac{2 \cdot U \cdot Q}{m}}$ beschleunigt. Anschließend werden sie durch einen

Magneten der Flussdichte B senkrecht dazu auf eine Kreisbahn mit Radius r gebracht. Dabei ist $F_z = \frac{m \cdot v^2}{r} = Q \cdot v \cdot B = F_L$. Aus F_z

$= F_L$ folgt der Radius $r = \frac{m \cdot v}{Q \cdot B} = \sqrt{\frac{2 \cdot U \cdot m}{Q \cdot B^2}}$. Bei gleicher Ladung,

konstanter Kondensatorspannung U und konstanter Flussdichte B ist der **Radius der Kreisbahn also proportional zur Wurzel \sqrt{m} der Masse der Teilchen**.

3. Im **Detektor** werden die Bruchstücke durch Fotoplatten, Halbleitersensoren oder auch Induktionsspulen (siehe 3.4.) registriert. Ein bestimmtes Eiweiß zerbricht immer an den gleichen Stellen und hinterlässt einen typischen „**Fingerprint**“ von Bruchstücken mit charakteristischen Kombinationen von Ladungen und Massen, die durch Vergleich mit einer Datenbank schnell zu einer Identifikation führen können.



Übungen: Aufgaben zur Magnetostatik Nr. 18 und 19