

12 Magnetostatik und Induktion

In diesem Kapitel erfahren Sie unter anderem, wo man solch herrliche Leuchterscheinungen am Nachthimmel sehen kann und wie sie entstehen.



12.1 Grunderscheinungen des Magnetismus

Wir haben im letzten Kapitel die elektrischen Erscheinungen kennen gelernt. Nun befassen wir uns mit ähnlichen aber nicht identischen Erscheinungen. Man nennt sie magnetische Erscheinungen oder Erscheinungen des Magnetismus. Sie äussern sich wie die elektrischen Erscheinungen u.a. durch bestimmte Kraftwirkungen (magnetische Kräfte).

Bereits Thales von Milet war die magnetische Kraftwirkung des Magneteisensteins (Magnetit). Diese Steinart zog eiserne Objekte zu sich hin. Soweit man weiss, waren die Chinesen die ersten, welche die magnetischen Eigenschaften der Materie als Orientierungshilfe (Kompass) in der Seefahrt nutzten.

Taucht man einen Stabmagneten mit einem Ende in Eisennägel, so bleiben Eisennägel am Ende des Magneten haften. Man sagt, das Eisen sei magnetisierbar. Wiederholt man den gleichen Versuch mit Holzspänen stellt man fest, dass keine Späne am Magneten haften bleiben. Holz ist also ein nichtmagnetisierbares Material. Alle Materialien kann man in diese zwei Kategorien einteilen.

Legt man einen Stabmagneten auf einen kleinen Haufen mit Eisennägeln und hebt ihn anschliessend hoch, so gibt es Stellen beim Magneten, an denen die Eisennägel besonders gut haften und Stellen, an denen keine Nägel hängen bleiben. Offensichtlich ist die magnetische Kraft an den Enden des Stabmagneten besonders gross. Man nennt sie deswegen Pole des Magneten.

Ein Stabmagnet wird beweglich auf der Tischplatte gelagert. Das Ende eines zweiten Stabmagneten wird

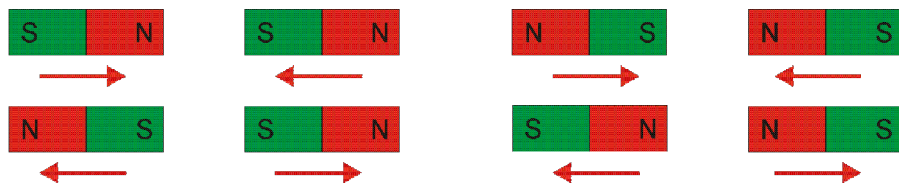


Abbildung 1 Abstoßungs- respektive Anziehungsverhalten von Magneten.

einem Ende der Ersten genähert. Nun wird der Versuch mit dem anderen Ende des zweiten Stabmagneten wiederholt. Offensichtlich können die Wirkungen zwischen den Enden von Stabmagneten unterschiedlich sein. Magneten verfügen offenbar über zwei Pole. Man nennt die beiden Pole Nord- und Südpol. Es hat sich eingebürgert, dass man den Nordpol rot und den Südpol grün einfärbt. Man stellt also fest: *Gleiche Pole stossen einander ab, während ungleiche Pole einander anziehen.*

12.2 Magnetische Stoffe

Das in der Natur vorkommende Mineral Magnetit (Eisen (II,III) - oxid) besitzt eher schwache magnetische Kräfte. Braucht man stärkere magnetische Kraftwirkungen, so greift man auf technisch hergestellte Werkstoffe zurück. Diese sind Keramiken aus z.B. Eisenoxid und andern Metalloxiden (Ferrite) oder Aluminium – Nickel – Kobalt Legierungen. Zu den stärksten Magneten gehören Neodym – Eisen – Bor (NdFeB) Magnete.



Abbildung 2 Verschiedene Arten von Magneten. Von links nach rechts: Stabmagnet, Scheibenmagnet, Hufeisenmagnet, Stabmagnet, Topfmagnet und Ringmagnet.

Magneten gibt es in den verschiedensten Formen – je nach Verwendungszweck, einige Formen sind in Abbildung 2 dargestellt. Stabmagnete in einer flachen Form werden als Kompassnadeln eingesetzt, Scheibenmagnete finden als Kühlschrankschrankmagnete Verwendung. Eines haben die Magnete in Abbildung 2 gemeinsam: sie werden alle technisch hergestellt und behalten ihre magnetischen Eigenschaften dauerhaft. Man nennt sie deshalb *Dauer- oder Permanentmagnete*. Daneben gibt es Stoffe, deren Magnetisierung man leicht verändern kann. Diese werden *weichmagnetische* Stoffe genannt. Magnetisierbare Materialien nennt man auch *ferromagnetisch*.

12.3 Der innere Aufbau von Magneten

Schneidet man einen magnetisierten Draht in zwei Teile, so erhält man zwei Teile, welche je wieder einen Nord und einen Südpol besitzen. Wenn man einen Magneten zerteilt, erhält man immer wieder einen vollständigen Magneten mit Nord- und Südpol. Daraus kann man schliessen: *es gibt keine magnetischen Monopole*. Ein Magnet lässt sich also in viele kleine Magnete zerlegen und aus vielen kleinen zusammensetzen. Dies führt uns zum Modell vom Aufbau der magnetisierbaren Stoffe durch kleinste magnetische Einheiten, den Elementarmagneten. Schematisch kann man sich das wie in Abbildung 4 dargestellt vorstellen. Grundsätzlich handelt es sich bei diesen Elementarmagneten um die Atome selbst, welche als kleinste Magneten angesehen werden dürfen. Die Teilung eines Magneten in zwei Teile lässt sich auf mikroskopischer Ebene also wie in Abbildung 5 gezeigt schematisch darstellen.

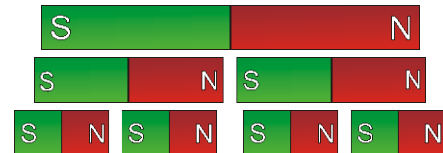


Abbildung 3 Bei der Zerkleinerung eines Magneten entsteht wieder ein Magnet mit zwei Polen

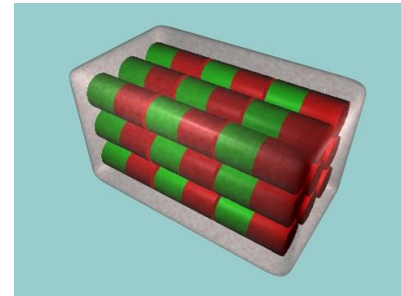


Abbildung 4 Innerer Aufbau eines Magneten durch Elementarmagnete.

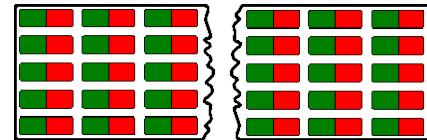


Abbildung 5 Wird ein Magnet geteilt, so entstehen zwei neue Magnete.

12.4 Die magnetische Influenz

Bringt man einen Eisenklotz in die Nähe eines Magneten, so wird er selber zu einem Magneten, wie in Abbildung 6 dargestellt. Die Elementarmagnete des Eisenklotzes werden von den auf sie wirkenden magnetischen Kräften teilweise gleichgerichtet. Der Eisenklotz wird zu einem Magneten. Diese Magnetisierung eines weichmagnetischen Stoffes mit Hilfe eines magnetischen Felds nennt man *magnetische Influenz*.

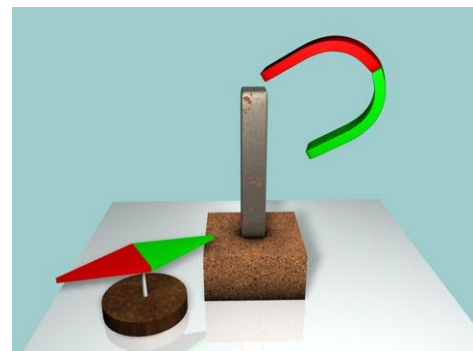


Abbildung 6 Durch die magnetische Influenz wird die magnetische Kraft des Nordpols des oberen Magneten durch den Eisenstab hindurchgeleitet - der Eisenstab wird selber zu einem Stabmagneten und zieht den Südpol des linken Magneten zu sich hin.

Magnetisieren heisst also, Elementarmagnete ausrichten, wie in Abbildung 7a) gezeigt ist; entmagnetisieren heisst, die Ordnung der Elementarmagnete zerstören. Die Elementarmagnete zeigen dann wild in alle Richtungen, sind aber immer noch da (Abbildung 7b)). Ein unmagnetischen Eisennagel (weichmagnetischer Werkstoff) kann man leicht magnetisieren, indem man ein paar Mal mit einem Permanentmagneten in eine Richtung darüber streicht. Kehrt man die Streichrichtung um, so verliert der Eisennagel zunächst seine Magnetisierung, um sich in der Folge umzukehren.

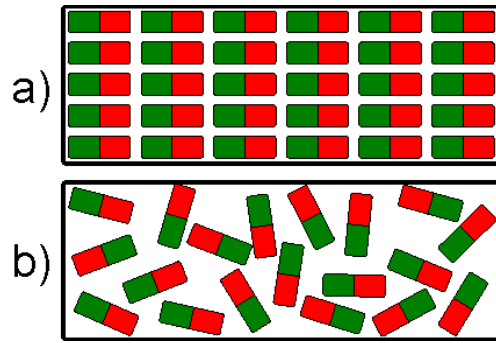


Abbildung 7 Vorstellung über den Aufbau eines magnetischen Materials mit Elementarmagneten.

12.5 Zerstörung von Magnetismus

Man kann den Magnetismus Magneten zerstören, indem man

den Magneten über die sogenannte Curie – Temperatur hinaus erwärmt, oder den Magneten mechanischen Schockeinwirkungen (Schläge) aussetzt.

Material	Curie – Temperatur [K]
Kobalt	1395
Eisen	1033
Nickel	627
Fe ₃ O ₄	851

Tabelle 1 Curie – Temperaturen einiger ausgewählter Materialien.

Materialien wie Eisen, Kobalt oder Nickel besitzen Curie – Punkte weit oberhalb der Raumtemperatur, wie in Tabelle 1 gezeigt ist. In beiden Fällen wird die Ordnung der Elementarmagnete zerstört.

12.6 Das magnetische Feld

Eine Magnethadel schlägt bereits in der Nähe eines Magneten aus – ohne diesen zu berühren. Der Magnet besitzt offensichtlich eine Fernwirkung auf andere Objekte. Diesem Wirkungsbereich sagt man *magnetisches Feld B*. Das magnetische Feld hat die Eigenschaft das Vakuum und nicht magnetisierbare Stoffe durchdringen zu können. Das magnetische Feld kann man sichtbar machen, indem man kleine, regelmässig angeordnete Magnethadeln in die Nähe eines Magneten bringt. Die Magnethadeln scheinen sich entlang von Linien auszurichten. Man nennt diese „Linien“ *magnetische Feldlinien*. Man weist ihnen eine Richtung zu, welche vom magnetischen Nord- zum Südpol zeigt.

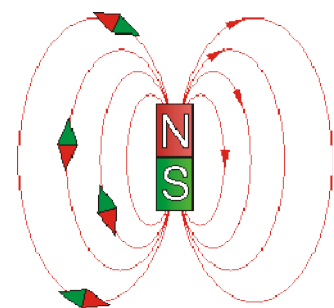


Abbildung 8 Vorstellung von den magnetischen Feldlinien.

Die magnetischen Feldlinien haben folgende wichtigen Eigenschaften:

Magnetismus

Die Pfeilrichtung der magnetischen Feldlinie gibt die Richtung der Kraft auf den Nordpol eines Magneten an.

Die magnetischen Feldlinien sind immer geschlossen => **es gibt keine magnetischen Monopole.**



Die Dichte der Feldlinien an einem Punkt ist ein Mass für die Stärke des magnetischen Feldes.

Magnetfelder sind nicht an die Existenz von Magneten gebunden (mehr im nächsten Abschnitt).

In Abbildung 9 sind die Feldlinienbilder verschiedener Anordnungen von Magneten gezeigt. Verlaufen die Feldlinien parallel und in gleichem Abstand voneinander, so spricht man von einem homogenen magnetischen Feld. Innerhalb eines Hufeisenmagnetes kann man in gewissen Bereichen näherungsweise von einem homogenen Magnetfeld sprechen.

Verlaufen die magnetischen Feldlinien nicht parallel zueinander, spricht man von einem inhomogenen Feld. Die meisten magnetischen Felder sind inhomogen.

Das magnetische Feld B besitzt an einem Ort P im Raum eine bestimmte Richtung, ist also eine vektorielle Grösse!

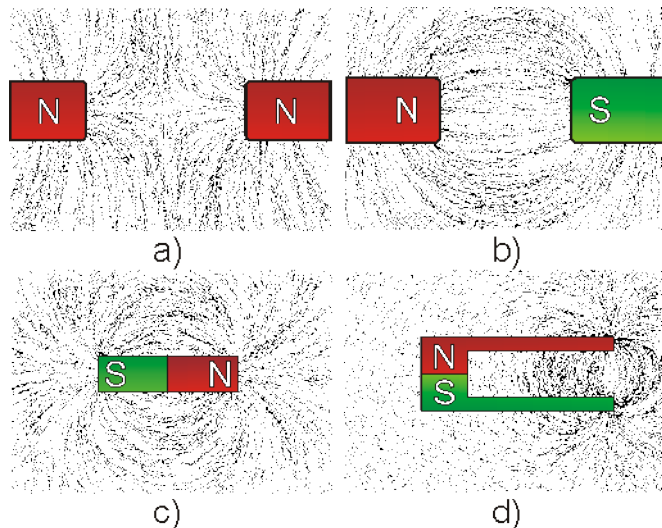


Abbildung 9 Feldlinienbilder verschiedener Anordnungen von Magneten: a) zwischen zwei Nordpolen zweier Stabmagnete, b) zwischen Nord- und Südpol zweier Stabmagnete, c) das Feldlinienbild eines Stabmagneten und d) das Feldlinienbild eines Hufeisenmagneten.

12.7 Elektromagnetismus

Der dänische Physiker Hans Christian Ørsted (Abbildung 10) entdeckte, dass elektrische Ströme ein Magnetfeld erzeugen und somit auf Magnete eine Kraft ausüben.

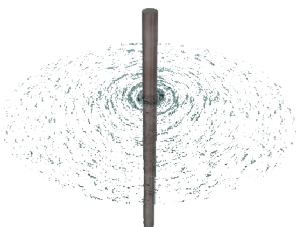


Abbildung 11 Anordnung von Eisenfeilspänen um einen stromführenden Leiter.

Abbildung 11 zeigt die Anordnung von Eisenfeilspänen um einen stromführenden Draht. Wie man unschwer erkennen kann, ordnen sich die Eisenfeilspäne in konzentrischen Kreisen um den stromführenden Draht an. Mit einem Kompass kann man zeigen, dass dieser in der Nähe eines stromdurchflossenen Leiters ausschlägt und sich tangential zu den Kreisen anordnet – wir haben es also tatsächlich mit einem magnetischen Feld zu tun. Ein elektrischer Strom ruft also tatsächlich ein magnetisches Feld hervor!



Abbildung 10 Hans Christian Ørsted (1777-1851) Quelle: Wikipedia

In welche Richtung zeigen die Feldlinien des magnetischen Feldes, das von einem elektrischen Strom erzeugt wird? Zur Ermittlung der Richtung der magnetischen Feldlinien bedient man sich eines Kompasses; damit ist die Richtung der Feldlinien festgelegt, wie in Abbildung 12 gezeigt ist. Kehrt man die Richtung des elektrischen Stromes um, so kehrt sich auch die Richtung des magnetischen Feldes um.

Aus dem Zusammenhang zwischen Stromrichtung und der Richtung des magnetischen Feldes lässt sich eine Merkgel ableiten: *Der Daumen der rechten Hand zeigt in Stromrichtung. Die Finger zeigen dann in Richtung des magnetischen Feldes* (Abbildung 13).

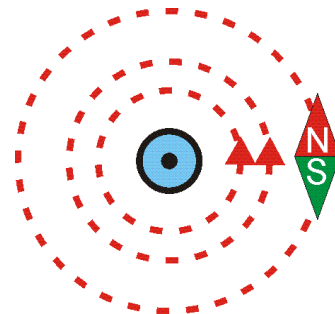


Abbildung 12 Ausrichtung einer Kompassnadel um einen stromführenden Draht.

Zusammenfassend kann man also bisher feststellen, dass



- alle Ladungen elektrische Felder erzeugen und
- Ströme (also bewegte Ladungen) magnetische Felder erzeugen.

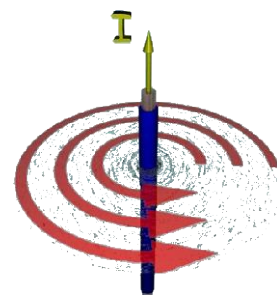


Abbildung 13 Zur rechten Hand Regel...

12.8 Die magnetische Kraftwirkung – Lorentzkraft

Gemäss der obigen Erkenntnisse erfährt ein stromführender Leiter in einem Magnetfeld eine Kraft. Wie gross ist aber diese Kraft, die nach Hendrik Antoon Lorentz (Abbildung 14) *Lorentzkraft* genannt wird? Experimente mit einer Stromwaage zeigen, dass die Lorentzkraft proportional ist zur



- Stromstärke I ,
- der Länge l des sich effektiv im Feld befindlichen Leiterstückes senkrecht zum Magnetfeld und
- der Stärke B des Magnetfeldes.

Dabei stellt sich heraus, dass die Lorentzkraft stets senkrecht zum stromführenden Draht und dem Magnetfeld B steht! Für den Betrag der Lorentzkraft lässt sich, falls Magnetfeld B und Drahrichtung senkrecht aufeinander stehen - schreiben:



$$F_L = B \cdot I \cdot l$$

Umgeformt erhält man für das Magnetfeld¹



Abbildung 14 Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928). Quelle: www.britannica.com

¹ Die Bezeichnung Magnetfeld für B ist umgangssprachlich und ungenau. Richtigerweise spricht man von magnetischer Flussdichte oder magnetischer Induktion.

Magnetismus

$$B = \frac{F_L}{I \cdot l}$$

Damit hat man die Möglichkeit, das Magnetfeld mit einer Einheit zu versehen:

$$[B] = \frac{[F_L]}{[I] \cdot [l]} = \frac{N}{Am} = T,$$

wobei "T" für Tesla steht, nach dem Erfinder und Elektroingenieur Nikola Tesla (Abbildung 15).

Nun stellen wir die Lorentzkraft als Vektorprodukt dar. Die Richtung von l zeigt hierbei in Stromrichtung:



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

Die Richtungsabhängigkeit der Lorentzkraft ist in Abbildung 16 schematisch dargestellt, wobei in Abbildung 16 das Magnetfeld B und die Drahrichtung l senkrecht aufeinander stehen. Sollte dies nicht der Fall sein, so berechnet sich der Betrag der Lorentzkraft nach

$$F_L = I \cdot |l| \cdot |B| \cdot \sin \alpha$$

Es gilt, dass ein Magnetfeld der Stärke 1T wirkt, wenn ein 1 m langer Leiter, in dem ein Strom von 1 A fließt eine Kraft von 1 N erfährt. Oft wird auch noch das Gauss gebraucht, wobei gilt $1 \text{ G} = 10^{-4} \text{ T}$. Tabelle 2 zeigt einige typische Magnetfelder. Das Erdmagnetfeld ist mit etwa

An der Oberfläche eines Neutronensterns	10^8 T
In der Nähe eines kleinen Stabmagneten	10^2 T
An der Erdoberfläche	$5 \cdot 10^{-5} \text{ T}$
intergalaktisches Magnetfeld	10^{-10} T

Tabelle 2 Einige magnetische Flussdichten.

$48 \mu\text{T}$ im Vergleich zu einem gewöhnlichen Küchenmagneten rund um einen Faktor 1000 kleiner!

Die Richtung der Lorentzkraft kann man wiederum mit der rechten Hand, nach der UVW – Regel, ableiten (Abbildung 17):

U (rsache)	= Strom	→ Daumen
V (ermittlung)	= Magnetfeld	→ Zeigefinger
W (irkung)	= Lorentzkraft	→ Mittelfinger

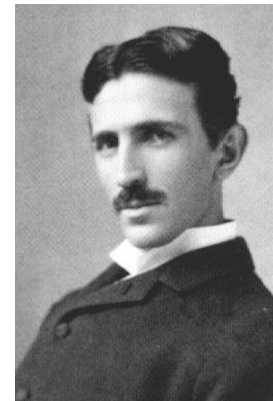


Abbildung 15 Nikola Tesla (1856-1943).
Quelle: Wikipedia.

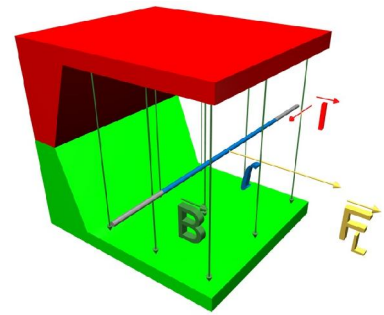


Abbildung 16 Zusammenhang zwischen Magnetfeld, Strom und Lorentzkraft.

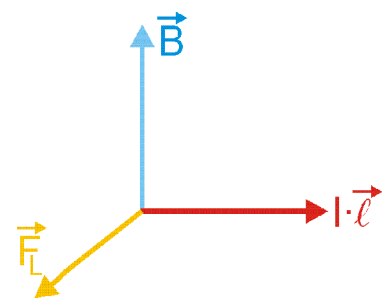


Abbildung 17 Zur Ermittlung der Richtung der Lorentzkraft

12.8.1 Die Kraft auf eine bewegte Ladung im homogenen Magnetfeld

Strom ist bewegte Ladung, also $I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$. Die Lorentzkraft wirkt auf die Ladungen q , welche sich gerade im Magnetfeld B befinden. Der Leiter beinhalte auf der Länge l genau N Ladungsträger q . Man kann also schreiben $\Delta Q = Nq$. Die Ladungsträger bewegen sich mit der Geschwindigkeit v im Leiter. Für das durchwandern des Leiterstücks benötigen die Ladungen die Zeit $\Delta t = \frac{l}{v}$. Setzt man dies in die Formel für die Lorentzkraft ein, so erhält man (richtig für den Fall positiver Ladungen q , weil dann die Richtung von v gleich der technischen Stromrichtung ist):

$$\vec{F}_L = I \cdot l \times \vec{B} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \cdot l \times \vec{B} = \frac{N \cdot q}{l/v} \cdot l \times \vec{B} = N \cdot q \cdot v \times \vec{B}.$$

Auf eine *einzelne* bewegte Ladung q im magnetischen Feld wirkt somit die Kraft



$$\vec{F}_L = q \cdot v \times \vec{B}.$$

Bewegt sich also eine Ladung in einem Magnetfeld, so erfährt sie eine Lorentzkraft. Abbildung 18 zeigt den Zusammenhang zwischen den Richtungen der Geschwindigkeit, dem Magnetfeld und der entstehenden Lorentzkraft.



Abbildung 18 Zur Richtung von v , B und F_L .

12.8.1.1 Die Bewegung einer Punktladung im homogenen Magnetfeld

Gegeben sei eine positive Ladung q , welche mit einer Geschwindigkeit v in ein homogenes Magnetfeld der Stärke B eintritt, wobei $v \perp B$ sein soll. Gemäss obiger Darstellung wirkt ständig eine Kraft auf die Ladung q . Sie wird auf eine gekrümmte Bahn gezwungen. Ist das Magnetfeld ausgedehnt genug, so wird das geladene Teilchen mit seiner Bewegung eine Kreisbahn beschreiben, wie in Abbildung 19 dargestellt ist. Wir wollen diese Situation nun ein wenig genauer betrachten.

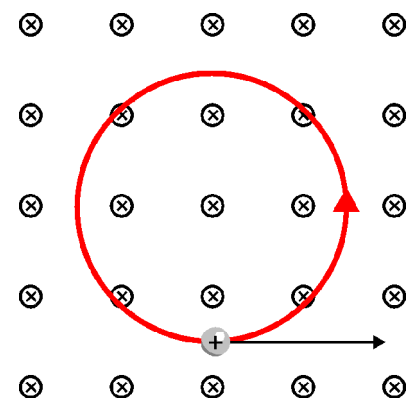


Abbildung 19 Kreisbahn einer positiven Ladung im ausgedehnten Magnetfeld.

12.8.1.2 Die Wägung des Elektrons

Bestimmung der spezifischen Ladung q/m von Elektronen mit dem Fadenstrahlrohr

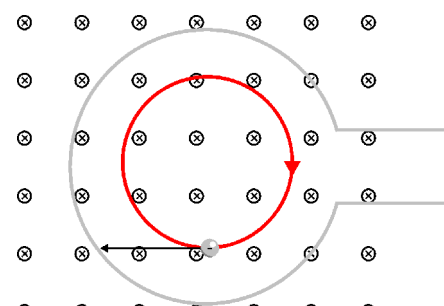


Abbildung 20 Schematische Darstellung eines Fadenstrahlrohrs mit umlaufendem Elektron.

12.8.1.3 Das Massenspektrometer

Im Jahre 1919 baute der Physiker Aston das erste Massenspektrometer mit dem Ziel, die Massen verschiedener Isotope unterscheiden und bestimmen zu können (Abbildung 21). Damit ist es beispielsweise möglich, das natürliche Isotopenverhältnis eines Elements in einem Zahlenwert anzugeben. Den schematischen Aufbau eines Massenspektrographen sehen Sie in der folgenden Abbildung.

Zunächst wird der zu untersuchende Stoff in der Quelle ionisiert und die dabei entstehenden Ionen durch ein Potentialgefälle U beschleunigt. Die Ionen bekommen also die kinetische Energie

$$\frac{1}{2}mv^2 = qU$$

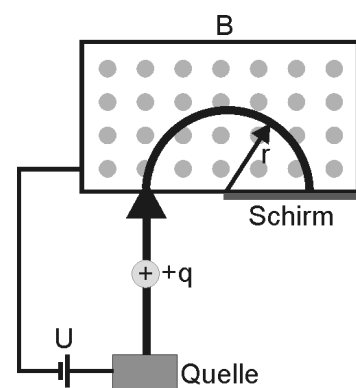


Abbildung 21 Schematischer Aufbau eines Massenspektrographen.

mit. Im Magneten beschreiben die Ionen eine halbkreisförmige Bahn mit dem Radius r und treffen genau im Abstand $2r$ von der Eintrittsöffnung entfernt auf eine Detektionsplatte auf. Im Magnetfeld werden die Ionen durch die Lorentzkraft also auf eine Kreisbahn gezwungen. Die Bewegungsgleichung lautet dafür

$$m \frac{v^2}{r} = qvB$$

Löst man dies nach v^2 auf, erhält man

$$v^2 = \frac{r^2 q^2 B^2}{m^2}$$

Nun verknüpfen wir diese Formel mit derjenigen für die kinetische Energie und lösen nach dem Verhältnis q/m auf und erhalten

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} m \left(\frac{r^2 q^2 B^2}{m^2} \right) &= qU \\ \Rightarrow \frac{q}{m} &= \frac{2U}{B^2 r^2} \end{aligned}$$

Bei bekannter Ladung – welche sich z.B. durch die Untersuchung von Ionisationsprozessen in der Quelle bestimmen lässt, kann man so die Masse bestimmen.

12.8.1.4 Der Geschwindigkeitsfilter

Eine wichtige Anwendungsmöglichkeit von magnetischen und elektrischen Feldern gleichzeitig ist der Geschwindigkeitsfilter. Den schematischen Aufbau sieht man in Abbildung 22. Dabei steht das Magnetfeld senkrecht zum elektrischen Feld.

Die Lorentz- und die elektrostatische Kraft heben einander genau dann auf, wenn sie gleich gross sind – also gilt

$$\begin{aligned} qE &= qvB \\ \Rightarrow v &= \frac{E}{B} \end{aligned}$$

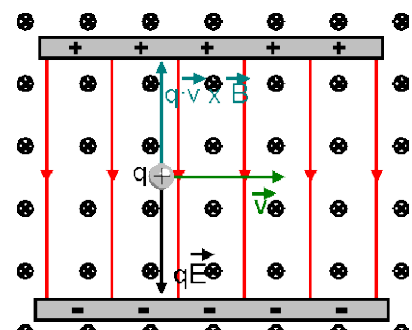


Abbildung 22 Gekreuzte Felder als Geschwindigkeitsfilter.

Es werden also nur Teilchen mit einer genau definierten Geschwindigkeit die obige Anordnung geradlinig durchqueren. Bringt man am Ende des Kondensators eine Blende mit einem kleinen Loch an, so kann man Teilchen mit einer gewünschten Geschwindigkeit herausfiltern. Deshalb der Name Geschwindigkeitsfilter.

12.8.1.5 Der Hall – Effekt

Durch einen sehr dünnen, flächenhaften Leiter fliesse ein Strom der Stärke I . Die Elektronen bewegen sich mit einer Driftgeschwindigkeit v_d entgegengesetzt zur Stromrichtung. Quer zur Stromrichtung wird ein Voltmeter angeschlossen. Es ist keine Spannung U_H messbar.

Magnetismus

Der Leiter wird nun von einem Magnetfeld B durchsetzt. In diesem Fall wirkt auf die Elektronen die Lorentzkraft $F_m = e \cdot v \cdot B$. Dadurch werden die Elektronen nach rechts abgelenkt, es kommt auf der rechten Seite zu einem Elektronenüberschuss und auf der linken Seite zu einem Elektronenmangel. Diese Ladungstrennung führt zum Aufbau eines elektrischen Feldes E quer zur Bewegungsrichtung der Ladungsträger. Dieses elektrische Feld E übt auf die Elektronen die Kraft F_e aus.

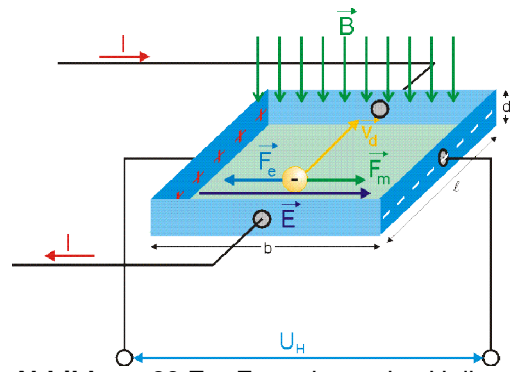
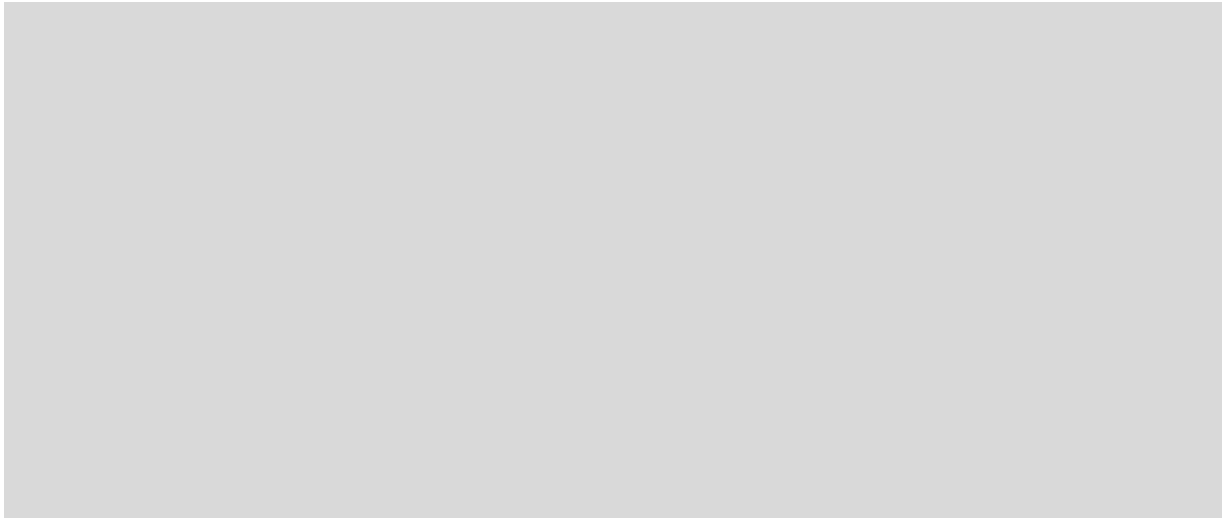


Abbildung 23 Zur Entstehung des Hall-Effekts.

Wir berechnen nun die Spannung U_H :



Das Phänomen der Ablenkung von, Strömen im Magnetfeldern wird nach seinem Entdecker Edwin Herbert Hall (1855-1938) "Hall - Effekt" genannt. Der Hall Effekt gestattet es beispielsweise zu entscheiden, ob die Ladungsträger in einem elektrischen Leiter positiv oder negativ sind. Ebenfalls ist es möglich, die Ladungsträgerdichte in einem Leitermaterial zu bestimmen. Oder aber man kann auch die Driftgeschwindigkeit der Ladungsträger messen.

12.8.2 Bewegung von Teilchen im inhomogenen Magnetfeld

12.8.2.1 Die magnetische Flasche

Mit speziell geformten magnetischen Feldern lassen sich geladene Teilchen einfangen. In nebenstehendem Magnetfeld (grün) erfährt das sich bewegende geladene Teilchen (gelb) eine Lorentzkraft, die immer zur Achse des Magnetfeldes hin zeigt und ausserdem ja stets senkrecht auf den magnetischen Feldlinien steht. Deshalb kann ein geladenes Teilchen eine solche magnetische Flasche nicht mehr verlassen.

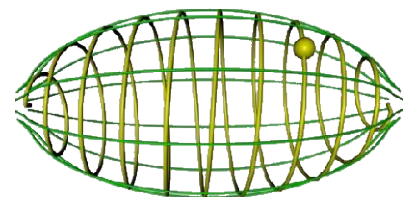


Abbildung 24 Magnetische Flasche.

12.8.2.2 Die Strahlungsgürtel der Erde

Das Magnetfeld der Erde gleicht dem eines Stabmagneten und ist inhomogen. Die Sonne emittiert ständig den sogenannten Sonnenwind, bestehend vor allem aus Elektronen und Protonen, zur Erde. Aufgrund des inhomogenen Magnetfeldes der Erde, welches einer gekrümmten magnetischen Flasche entspricht, werden diese geladenen Teilchen im Magnetfeld gefangen und pendeln permanent zwischen den Polen hin und her. Es werden so eine beträchtliche Anzahl Teilchen in einigen Bereichen des Erdmagnetfeldes gespeichert. Diesen Bereichen sagt man Van Allen Gürtel. Der Van Allen Gürtel reicht bis in eine Höhe von etwa 45000 km.

Es gibt zwei ausgeprägte Strahlungsregionen. In etwa 3000 km Höhe werden hauptsächlich Protonen und in etwa 20000 km hauptsächlich Elektronen gefangen gehalten. In diesen Regionen sind die Strahlungswerte sehr hoch, was z.B. die empfindliche Elektronik von Satelliten stark stören kann.

In den Polargegenden können die geladenen Teilchen bis in die Lufthülle vordringen und erzeugen so die Nordlichter (Aurora borealis) beziehungsweise die Südlichter (Aurora australis) genannten Leuchterscheinungen. Bei uns nennt man sie auch oft einfach Polarlichter. Sehen kann man sie meist nördlich 60° nördlicher Breite respektive südlich 60° südlicher Breite.

Beim Zusammenstoß der geladenen Teilchen mit den Molekülen der Atmosphäre werden letztere angeregt – die Elektronenkonfiguration ändert sich. Beim Relaxieren – quasi dem Herstellen der ursprünglichen Elektronenkonfiguration – wird überschüssige Energie in Licht umgewandelt, welches je nach angeregtem Gas eine andere Farbe hat². Interessant ist die Tatsache, dass die Polarlichter jeweils synchron am Nord- und am Südpol auftreten.

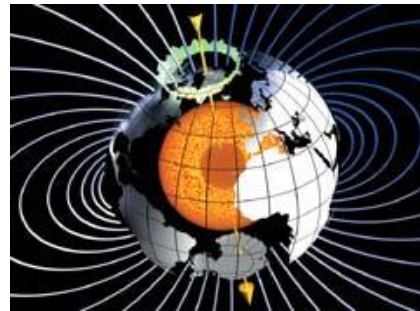


Abbildung 25 Darstellung des Erdmagnetfeldes. Quelle: www.klimaforschung.net



Abbildung 26 Typisches Erscheinungsbild eines Polarlichts. Quelle: Wikipedia

² Siehe "Flammenfärbung" in der Chemie.

12.9 Die Berechnung von magnetischen Feldern

Die Berechnung von Magnetfeldern verschiedener Leiteranordnungen ist ziemlich kompliziert und man braucht dazu auch die Integralrechnung. Wir verzichten deshalb auf die Herleitung der folgenden Formeln und glauben sie einfach.

12.9.1 Das magnetische Feld im Innern einer langen Spule (Solenoid)

Bei einer Spule addieren sich die Magnetfelder der einzelnen Leiterschleifen (Abbildung 27 oben) zu einem starken Gesamtmagnetfeld (Abbildung 27 unten). Ein Vorteil einer Spule ist das fast homogene Magnetfeld in ihrem Innern. Wie man aus der Abbildung entnehmen kann, verlaufen die magnetischen Feldlinien bereits bei kurzen Spulen mit wenigen Windungen annähernd parallel zueinander. Berechnen kann man das Magnetfeld einer Spule der Länge l mit N Windungen, die vom Strom I durchflossen wird nach³



$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{N \cdot I}{l}.$$

Die Konstante μ_0 ist eine Naturkonstante und wird als magnetische Feldkonstante bezeichnet. Sie besitzt per Definition den Wert

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{Am} = 1.26 \cdot 10^{-6} \frac{Vs}{Am}.$$

Der Faktor μ_r wird Permeabilitätszahl genannt und hängt ab vom Material, das sich in der Spule befindet. Doch davon gleich mehr im nächsten Abschnitt. Befindet sich "nichts" in der Spule – also Vakuum, so gilt $\mu_r = 1$.

12.9.1.1 Das Magnetfeld einer langen Spule mit einem Weicheisenkern

Experimentell stellt man eine erhebliche Verstärkung des Magnetfeldes fest, wenn man einen Weicheisenkern in das Innere einer Spule einführt. Dies kann man sich folgendermassen erklären: das Magnetfeld der Spule durchdringt den Weicheisenkern. Dadurch richten sich die Elementarmagnete des Weicheisenkerns in Richtung des von der Spule erzeugten Magnetfeldes aus und verstärken es. Der Verstärkungsfaktor wird Permeabilitätszahl μ_r genannt. Oft tritt in den entsprechenden Formeln das Produkt aus magnetischer Feldkonstante und Permeabilitätszahl $\mu = \mu_r \cdot \mu_0$ auf. Die Tabelle listet einige Permeabilitätszahlen für ferromagnetische Stoffe auf.

Material	μ_r
Kobalt	80 – 200
Eisen	300 – 10000
Ferrite	4 – 15000
μ – Metall (FeNi)	6000 – 70000

Tabelle 3 Einige Permeabilitätszahlen für ferromagnetische Stoffe.

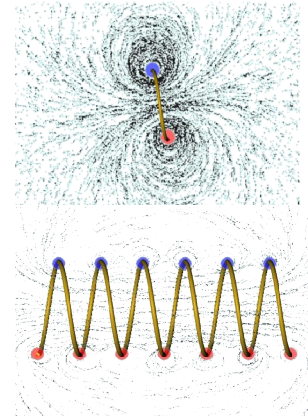


Abbildung 27 Darstellung des Magnetfeldes durch Eisenfeilspäne in einer Leiterschleife (oben) und im Innern einer Spule (unten).

³ Bei dieser Formel wird davon ausgegangen, dass die Länge der Spule viel grösser ist, als ihr Durchmesser. Falls dies nicht zutrifft, ist die Formel nicht mehr anzuwenden!

12.9.2 Anwendungen des Elektromagnetismus

Die Funktionsweise verschiedener Alltagsgeräte beruhen auf der Anwendung des Elektromagnetismus. Nachfolgend sind ein paar davon genauer beschrieben.

12.9.2.1 Der Elektromotor

Ein Gleichstrom – Elektromotor funktioniert nach einem sehr einfachen Prinzip: Eine Spule mit Eisenkern, Rotor oder Anker genannt, befindet sich drehbar gelagert im magnetischen Feld eines Permanent- oder Elektromagneten, wie das in Abbildung 28 schematisch dargestellt ist. Über zwei Schleifkontakte ist die Spule mit einer Gleichspannungsquelle verbunden. Der durch die Spule fließende Strom erzeugt ein Magnetfeld, wie dies in Abbildung 28 links gezeigt ist. Das Nordpol – Ende der Spule wird zum Südpol des Permanentmagneten hingezogen – das Südpol – Ende dementsprechend natürlich zum Nordpol des Permanentmagneten. Der Rotor kann sich durch das entstehende Drehmoment bis in die Vertikale drehen, dann käme die Bewegung zum Stillstand. Damit dieses unvorteilhafte Verhalten bei einem Motor nicht auftritt, wird der Stromfluss in der Spule umgepolt, wenn sich der Rotor in der vertikalen Position befindet. Diese Umpolung wird mit Hilfe des Kommutators (Stromwender) bewerkstelligt, der in der Abbildung 28 als blauer Ring eingezeichnet ist. Durch die Umpolung des Stromes wird auch das Magnetfeld des Rotors umgepolt, wodurch sich nun gleichnamige Pole des Rotors und des Permanentmagneten gegenüberstehen und sich gegenseitig abstoßen. Der Rotor dreht sich weiter.

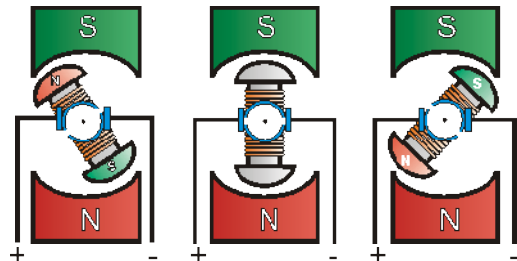


Abbildung 28 Schematische Darstellung der Funktionsweise eines Elektromotors.

12.9.2.2 Drehspulinstrumente

Zur Messung von elektrischen Strömen oder elektrischen Spannungen werden im Unterricht häufig noch Drehspulinstrumente benutzt. Es handelt sich dabei um analoge Messinstrumente, welche auf elektromagnetischer Basis den Strom messen. Für die Strommessung wird das in Abbildung 29 dargestellte Amperemeter seriell in den Stromkreis geschaltet. Im Innern des Gerätes fließt der Strom durch eine drehbar gelagerte Spule, welche um einen Weicheisenkern gewickelt ist. Daran ist auch der Zeiger befestigt. Links und rechts von der Spule sind die Pole eines Permanentmagneten sichtbar. In der Spule wird durch den angelegten Strom ein Magnetfeld erzeugt. Bei richtiger Polung des Stromes am Messgeräteeingang erfährt die Spule ein Drehmoment im Uhrzeigersinn; der Zeiger bewegt sich nach rechts. Wird der Strom schwächer oder wird er abgeschaltet, so sorgt eine an der Spule angebrachte Spiralfeder dafür, dass sich der Zeiger wieder in die Nullposition zurückdreht.

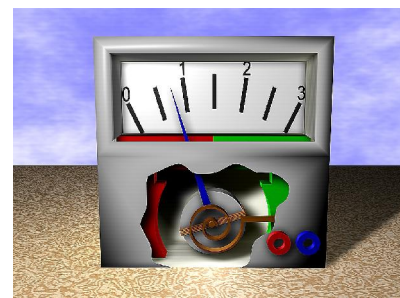


Abbildung 29 Drehspulinstrument mit sichtbarem Innenleben.

12.9.2.3 Der Fehlerstromschutzschalter (FI – Schalter)

Heutzutage ist der Einbau sogenannter Fehlerstromschutzschalter (Abbildung 30) vielerorts Pflicht. Diese Schalter unterbrechen den elektrischen Strom im Fehlerfall sofort und können so lebensbedrohliche Situationen verhindern.

Die Funktionsweise ist dabei denkbar einfach: sowohl Hin- wie auch Rückleitung zum elektrischen Verbraucher bilden zwei ineinander geschachtelte Spulen mit gleicher Windungszahl, so dass die beiden entstehenden Magnetfelder entgegengesetzt gerichtet sind. Im Normalfall fliesst der gleiche Strom zurück, wie zum Verbraucher hin geflossen ist und die Magnetfelder heben sich genau auf. Sind die beiden Ströme nicht mehr identisch, z.B. weil ein Teil des Stromes durch einen Menschen abfliesst, so heben sich die beiden Magnetfelder nicht mehr auf. Mit Hilfe des resultierenden Magnetfeldes wird nun z.B. ein Eisenzylinder in das Magnetfeld gezogen, der gegen einen Schalter schlägt und damit den Stromkreis öffnet.

In der Schweiz müssen – pauschal gesagt – alle FI – Schalter des täglichen Lebens bei einem Fehlerstrom von 30mA innerhalb von 20ms bis 30 ms auslösen. Abbildung 31 zeigt die Wirkung des elektrischen Stromes auf einen Menschen auf. Die rote eingezeichnete Linie entspricht der Auslösekennlinie eines FI – Schalters.



Abbildung 30
Fehlerstromschutzschalter (ABB)

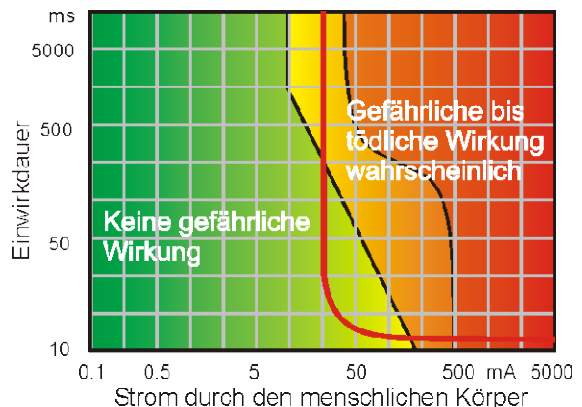


Abbildung 31 Wirkung des elektrischen Stromes auf den menschlichen Körper in Abhängigkeit der Einwirkdauer. Die rote Linie entspricht etwa der Auslösekennlinie eines Fehlerstromschutzschalters.

12.9.2.4 Der Transrapid

Für den Transrapid (Abbildung 32) ist der Elektromagnetismus zentral:

„(sda/dpa) Die Magnetschwebebahn Transrapid hat - anders als ein Eisenbahnzug - keine Räder. Stattdessen verfügt die Bahn über ein elektromagnetisches Trage- und Antriebssystem. Der Zug fährt über eine auf meterhohen Stelzen stehende Betonspur - den so genannten Fahrweg. Das Fahrzeug kann bis zu 450 Kilometer pro Stunde schnell werden.

Der Transrapid hat dabei keinen Kontakt zur Erde: Er schwebt, weil er von einem Magnetfeld gehalten und angetrieben wird. Dieses Magnetfeld überträgt zugleich auch die Energie aus dem Fahrweg in den Zug.

Im Gegensatz zu einer Eisenbahn ist beim Transrapid der Antrieb auch nicht im Fahrzeug, sondern im Fahrweg eingebaut. Zu diesem Antrieb gehört einerseits ein starker Elektromagnet im Transrapid. Auch im Fahrweg gibt es ein Magnetfeld, das sich in Fahrtrichtung vorwärts bewegt und den Transrapid mit sich zieht. Die Magnete halten den Zug dabei zugleich



Abbildung 32 Der Transrapid in Aktion. Quelle: www.transrapid.de

in der Schwebe und in der Spur. Von dem im Fahrweg integrierten Antrieb wird jeweils nur derjenige Abschnitt mit Strom versorgt, in dem sich das Fahrzeug gerade befindet. Diese besondere Konstruktion hat viele Vorteile: Dadurch fällt der Reibungswiderstand zwischen Schiene und Zug weg. Zudem gibt es keine mechanischen Bauteile, die verschleissen könnten. Damit gilt der Transrapid als besonders effektives Transportmittel.“ NZZ-Online, 22.09.2006

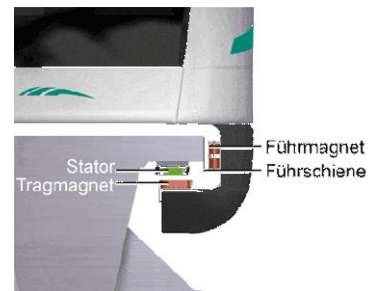


Abbildung 33 Funktionsweise des Führungssystems des Transrapids.

Quelle: www.transrapid.de

12.10 Das Faradaysche Induktionsgesetz

Bisher haben wir den Fall betrachtet, dass sich der stromdurchflossene Leiter im Magnetfeld nicht bewegt. Jetzt gehen wir einen Schritt weiter: wir betrachten den Fall eines statischen Magnetfeldes, in dem sich ein Leiter bewegt, durch den kein Strom fliesst. Aufgrund der Beobachtung von Oersted (s. Abbildung 10), dass Ströme Magnetnadeln bewegen können, hatte Michael Faraday die Idee, dass dieser Effekt sich auf umkehren lassen müsse.

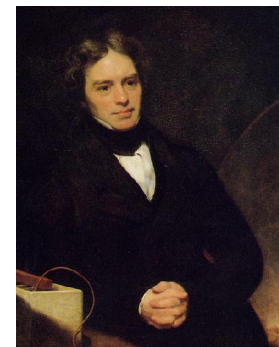


Abbildung 34 Michael Faraday (1791-1867) in Öl, gemalt von Thomas Phillips. Quelle: Wikipedia

12.10.1 Stromdurchflossene Leiterschleife im Magnetfeld

Zwischen den Polen eines Hufeisenmagneten lassen wir eine Leiterschaukel schwingen. Die Enden der Leiterschaukel verbinden wir mit einem Messgerät, welches geringe Spannungen anzeigen kann, wie es in Abbildung 35 schematisch dargestellt ist.

Bewegt man den Leiter nun im Magnetfeld hin und her, so liest man an Voltmeter eine sich periodisch ändernde Spannung ab.

Wie ist das möglich? Um das Ergebnis zu erklären, betrachten wir Abbildung 36. Durch die Bewegung des Leiterstücks im Magnetfeld, bewegen sich auch die Ladungsträger im Leiterstück im Magnetfeld. Dadurch entsteht eine Lorentzkraft auf die Ladungsträger, welche in Abbildung 36 nach links zeigt. Durch die Bewegung des Leiters wurde eine Spannung induziert, welche man *Induktionsspannung* nennt. Der von ihr im geschlossenen Stromkreis erzeugte Strom nennt man analog *Induktionsstrom*.

Die Richtung der Induktionsspannung kehrt sich um, wenn sich die Bewegungsrichtung des Leiters ändert. Ebenso kehrt sich die Richtung der Induktionsspannung um, wenn das Magnetfeld umgepolt wird. Hingegen schlägt das Voltmeter nicht aus, wenn der Leiter längs der Magnetfeldlinien bewegt wird.

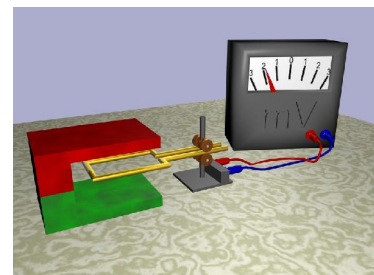


Abbildung 35 Leiterschleife im Magnetfeld.

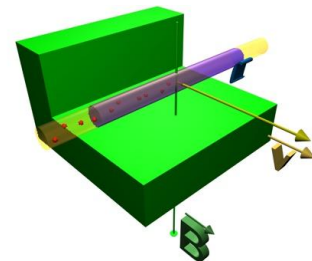


Abbildung 36 Zur Induktion

Wie gross ist aber nun die Induktionsspannung? Ursache für die Induktionsspannung ist, wie erwähnt, die Bewegung des Leiters in einem Magnetfeld. Dadurch wird eine Lorentzkraft erzeugt, die Ladungsträger entlang des Leiters in eine Richtung bewegt. Dadurch entsteht im Leiter ein elektrisches Feld, welches eine Kraft auf die Ladungsträger in die andere Richtung erzeugt. Irgendwann halten sich dann die elektrostatische Kraft und die Lorentzkraft die Waage, wie dies in Abbildung 37 in der Vergrößerung dargestellt ist. Wir schreiben dies

$$F_L = F_{el}$$

und setzen ein:

$$q \cdot v \cdot B = q \cdot E.$$

Nun fehlt nur noch die Verknüpfung mit der Spannung. Dazu benutzen wir die Relation $U = E \cdot l$, setzen ein und erhalten für die induzierte Spannung schliesslich

$$U_{ind} = v \cdot B \cdot l.$$

Nun schreiben wir das noch ein wenig anders:

$$U_{ind} = B \cdot v \cdot l = B \cdot \frac{\Delta s \cdot l}{\Delta t} = B \cdot \frac{a \cdot l}{\Delta t} = B \cdot \frac{\Delta A}{\Delta t},$$

wobei mit ΔA die in der Zeit Δt vom Leiterstück der Länge l überstrichene Fläche gemeint ist (Abbildung 37).

Ändert sich die vom Magnetfeld B durchdrungene Fläche A mit der Zeit, so wird eine Spannung induziert. Dabei ist es wichtig anzumerken, dass mit der Fläche A diejenige Fläche gemeint ist, welche senkrecht zum Magnetfeld steht (Abbildung 38)!

In einem zweiten Experiment lassen wir jetzt die Leiterschaukel ruhen und bewegen den Magneten. Wieder beobachtet man eine Induktionsspannung. Diese Spannung kann man nicht mit der Lorentzkraft erklären (der Leiter wurde nicht bewegt).

Unsere bisherigen Erkenntnisse lassen sich salopp wie folgt zusammenfassen:



Ändert sich die Anzahl der Feldlinien, welche durch eine Leiterschleife hindurch treten, so wird eine Spannung induziert.

Diese Formulierung ist noch etwas unmathematisch. Um die Sache etwas genauer zu beschreiben, führen wir an dieser Stelle eine neue Grösse ein – den magnetischen Fluss Φ . Der magnetische Fluss Φ gibt die Anzahl der Feldlinien an, die durch eine Fläche hindurch treten. Da das Magnetfeld B ein Mass für die Dichte der mag-

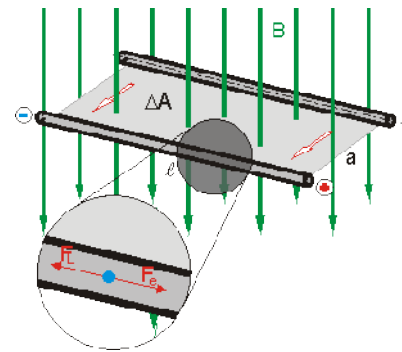


Abbildung 37 Zur Entstehung der Induktionsspannung.

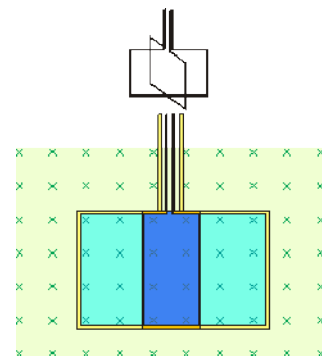


Abbildung 38 Für die Induktionsspannung ist nur die Fläche relevant, welche senkrecht zum Magnetfeld steht.

netischen Feldlinien darstellt⁴ – seine Einheit $T = \frac{Vs}{m^2}$ zeigt das ja – muss man das Magnetfeld B mit einer Fläche multiplizieren und man bekommt ein Mass für die Anzahl der Feldlinien innerhalb dieser Fläche. Der magnetische Fluss ist deshalb definitionsgemäss

$$\Phi = B \cdot A_{\perp}, \text{ mit der Einheit } [\Phi] = [B][A] = Vs = Wb \text{ (Weber)}$$

Mit dieser Erkenntnis können wir nun das Induktionsgesetz formulieren:



$$U_{ind} = - \frac{d\Phi}{dt} \text{ Faraday'sches Induktionsgesetz}$$

Das Minuszeichen werden wir nach dem folgenden Beispiel diskutieren. Im Falle einer Spule sind N Leiter betroffen, dementsprechend folgt für die induzierte Spannung in einer Spule einfach

$$U_{ind, Spule} = - N \cdot \frac{d\Phi}{dt}.$$

Nun sind wir auch in der Lage, den letzten Merksatz besser zu formulieren:



Jede Änderung des Magnetischen Flusses durch eine Leiterschleife bewirkt die Induktion einer Spannung!

Beispiel: Eine Spule mit $N=80$ Windungen habe einen Radius $r=5\text{cm}$ und einen elektrischen Widerstand $R=30\Omega$. Mit welcher Geschwindigkeit muss sich ein senkrecht zur Spule stehendes Magnetfeld B ändern, damit in der Spule ein Strom der Stärke $I=4\text{A}$ induziert wird?

Lösung: Aus der Elektrodynamik kennt man den Zusammenhang zwischen Strom, Spannung und elektrischem Widerstand $U = R \cdot I$. In Kombination mit dem Induktionsgesetz erhält man

$$U_{ind} = N \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$
$$R \cdot I_{ind} = N \cdot A \cdot \frac{\Delta B}{\Delta t}$$

Aufgelöst nach der gesuchten Grösse $\frac{\Delta B}{\Delta t}$ bekommt man

$$\frac{\Delta B}{\Delta t} = \frac{R \cdot I_{ind}}{N \cdot A} = \frac{30 \frac{V}{A} \cdot 4A}{80 \cdot (0.05m)^2 \pi} \approx \underline{\underline{191 \frac{T}{s}}}$$

⁴ Jetzt macht auch die anderweitig verwendete Bezeichnung "magnetische Flussdichte" für B Sinn.

12.10.2 Die Lenzsche Regel

Bleibt noch das Vorkommen des Minuszeichens im Induktionsgesetz zu erklären. Wir nähern dazu in einem Experiment einen Magneten einem bifilar aufgehängten Metallring auf dessen Rotationsachse, wie es in Abbildung 39 dargestellt ist.

Wir stellen fest, dass der Metallring bei der Annäherung des Magneten abgestossen wird.

Im Metallring wurde durch die Änderung des magnetischen Flusses ein Strom induziert, welcher so gerichtet war, dass von ihm erzeugte Magnetfeld dem äusseren entgegengerichtet war.

Wiederholt man das Experiment, indem man nun den Magneten vom Metallring entfernt, so wird der Metallring kurzfristig zum Magneten hingezogen.

Der Physiker Emil Lenz (Abbildung 40) hat die nach ihm benannte Regel für die Richtung des Induktionsstromes drei Jahre nach der Veröffentlichung des Induktionsgesetzes durch Faraday formuliert.

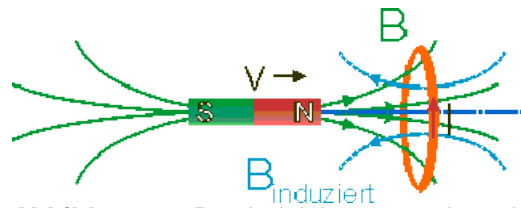


Abbildung 39 Der Induktionsstrom ist seiner Ursache entgegengerichtet.



Der Induktionsstrom ist stets so gerichtet, dass er seiner Ursache entgegenwirkt!

Dies ist nichts anderes als eine spezielle Formulierung des Energieerhaltungssatzes.



Abbildung 40 Heinrich Friedrich Emil Lenz (1804-1865) . Quelle: Wikipedia

12.10.2.1 Wirbelströme

Sehr gut demonstrieren lässt sich die Lenz'sche Regel mit dem *Waltenhof'schen Pendel*. Wir lassen ein Metallpendel (z.B. eine Kupferplatte) zwischen den Polen eines Elektromagneten hin und her schwingen. Wird der Magnet eingeschaltet, so bleibt das Pendel sehr schnell stehen. Doch woher kommt das? Beim Pendel befindet sich jeweils nur ein Teil der Metallplatte im Magnetfeld, wie dies in Abbildung 41a) dargestellt ist. Durch die Bewegung der Platte nach rechts, erfahren die Elektronen im Leiter eine Lorentzkraft nach oben. Weil sich nur ein Teil der Metallplatte im Magnetfeld befindet, fliessen Elektronen von aussen nach und es kommt zur Ausbildung eines Kreisstromes, auch Wirbelstromes. Entsprechend der Lenzschen Regel muss dieser Wirbelstrom so gerichtet sein, dass er seiner Ursache entgegenwirkt, die Bewegung also gehemmt wird: Im Magnetfeld bewegen sich in Abbildung 41b) Elektronen mit dem Kreisstrom nach oben; auf sie wirkt deshalb eine Lorentzkraft nach rechts – wie zu er-

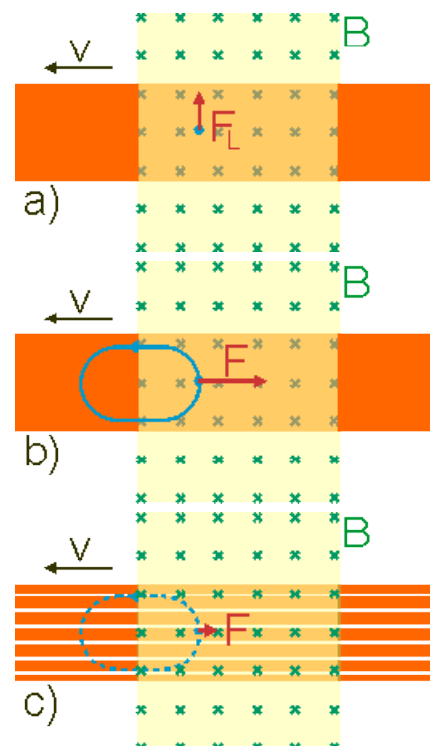


Abbildung 41 Prinzip der Wirbelstrombremse.

warten war. Die entstehende Kraft wirkt der Bewegung der Metallplatte entgegen. Verwenden wir anstelle des Metallblechs ein geschlitztes Blech, wie in Abbildung 41c) dargestellt ist, so verringert sich die Bremswirkung drastisch, weil sich keine grossflächigen Wirbelströme ausbilden können.

Diese Bremswirkung macht man sich beispielsweise bei den Wirbelstrombremsen zunutze. Die Vorteile liegt klar auf der Hand: da keine mechanischen Teile vorkommen und die Bremse berührungsfrei arbeitet, tritt auch kein mechanischer Verschleiss auf. Zusätzlich ist die Bremswirkung umso grösser, je grösser die Geschwindigkeit ist.

Die Wirbelströme sind auch der Grund, weshalb Eisenkerne in Spulen nicht aus einem einzelnen Eisenklotz bestehen, sondern aus einer Vielzahl gegeneinander isolierter Eisenbleche. Auf diese Art und Weise lassen sich die Wirbelströme gering halten.

12.10.3 Anwendungen der Induktion

12.10.3.1 Der Induktionsherd

In Küchen findet der Induktionskochherd immer weitere Verbreitung, weil sie gegenüber herkömmlichen Cerankochfeldern viele Vorteile besitzen. So resultieren zum Beispiel eine sehr kurze Vorwärmzeit (s. Abbildung 42), eine bessere Sicherheit – weil nur geheizt wird, wenn ein Topf auf dem Kochfeld steht und nicht zuletzt auch eine Energieersparnis, weil insgesamt nur eine kleine Masse erwärmt wird.

Beim Induktionsherd befindet sich unter dem jeweiligen Kochfeld eine Spule, welche ein magnetisches Wechselfeld erzeugt. Dieses wiederum induziert im Topfboden Wirbelströme, welche den Topf erwärmen.

12.10.3.2 Der Wechselstromgenerator

In Abschnitt 12.9.2.1 hatten wir den Gleichstrommotor besprochen; ein Motor der läuft, weil im Rotor ständig ein Magnetfeld umgepolt wird. Wir wollen nun mal eine Leiterschleife in einem Magnetfeld rotieren lassen, wie in Abbildung 44 dargestellt ist. Die Rotation der Leiterschleife wird durch einen mechanischen Antrieb sichergestellt (z.B. ein Wasserrad). Aufgrund der Rotation des Leiters im Magnetfeld ändert sich ständig der magnetische Fluss durch die von der Leiterschleife eingeschlossene Fläche. Entsprechend dem Induktionsgesetz wird darum eine Spannung induziert, welche sinusförmig ist und an angebrachten Schleifkontakten abgegriffen werden kann. Auf diese Art und Weise wandelt man mechanische in elektrische Energie um.

Vergleich: Heizsysteme beim Sieden von 1 Liter Wasser

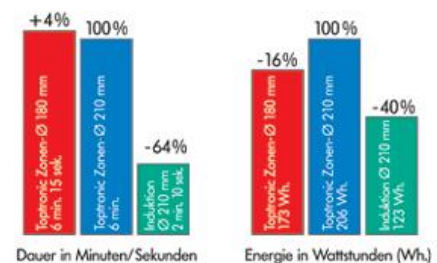


Abbildung 42 Ein Vergleich der verschiedenen Heizsysteme in Küchen. Ganz rechts: heizen mit Induktion. Quelle: www.vzua.ch

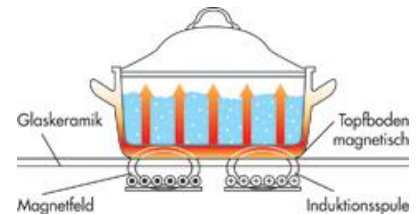


Abbildung 43 Funktionsweise eines Induktionsherdes. Quelle: www.vzug.ch

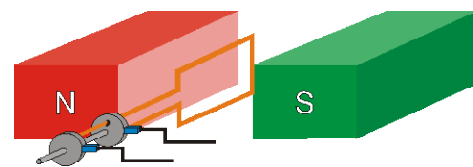


Abbildung 44 Prinzip des Wechselstrommotors