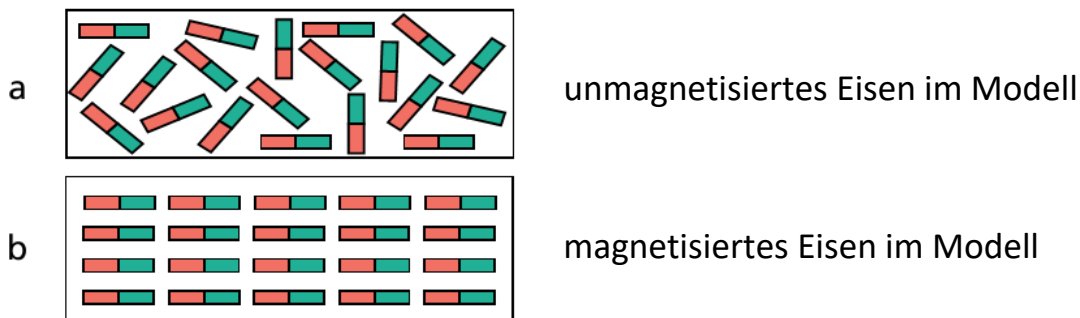


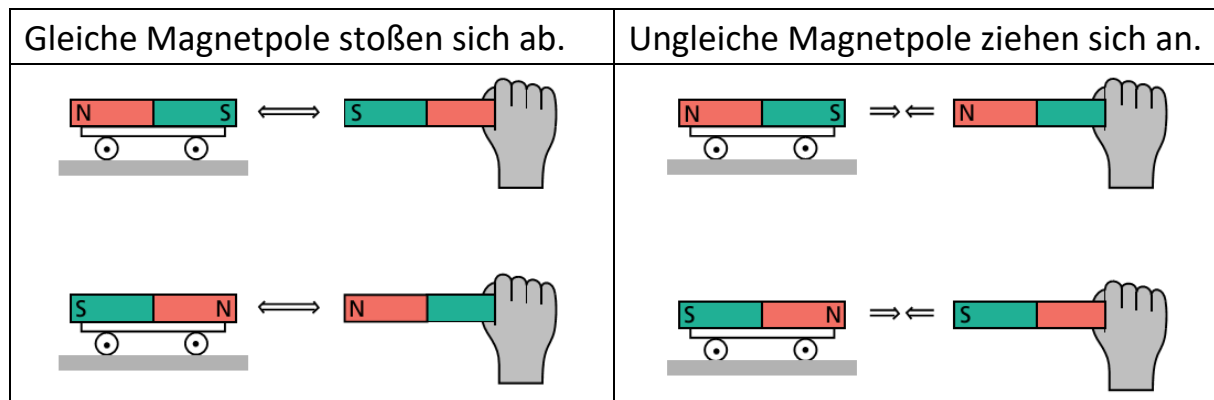
Das magnetische Feld

1. Dauermagnetismus

Dauer- oder Permanentmagnete bestehen aus **ferromagnetischen Stoffen** und weisen winzige Strukturen auf (Weiss-Bezirke), die sich wie kleine **Elementarmagnete** verhalten. Im unmagnetisierten Zustand sind sie ungeordnet. Unter dem Einfluss eines Magnetfeldes können sie sich ausrichten und der Körper wird magnetisiert.

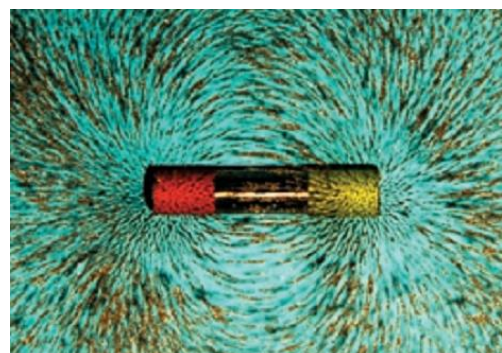


Zwischen Magneten tritt eine **Wechselwirkung** auf. Diese wird durch magnetische Kräfte verursacht. Die Bereiche mit der größten magnetischen Kraft werden als **Magnetpole** bezeichnet.

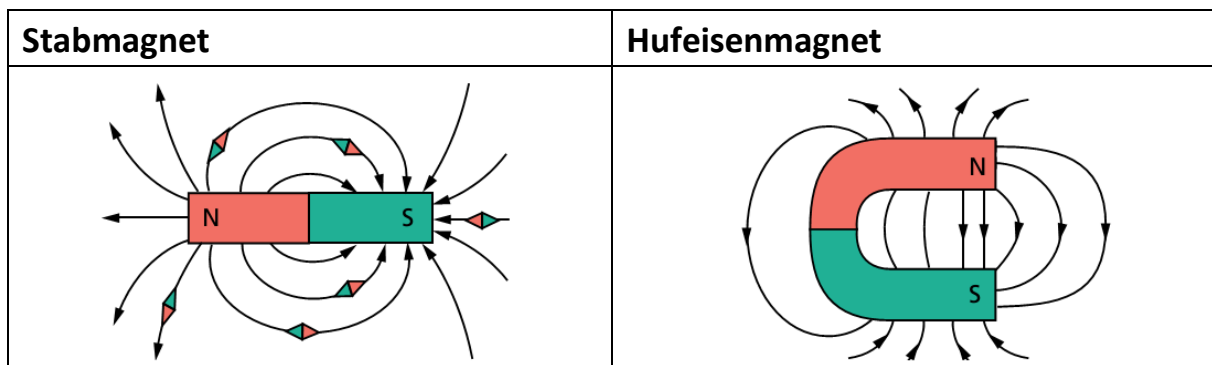


Körper aus ferromagnetischen Stoffen werden von einem Magneten angezogen und drehbare Körper richten sich im Bereich eines Magneten aus → **Kompass**.

Ein **magnetisches Feld** ist der Zustand des Raumes um einen Magneten, in dem auf andere Magnete bzw. Körper aus ferromagnetischen Stoffen Kräfte ausgeübt werden. Das magnetische Feld ist nur an seinen Wirkungen in der Realität nachweisbar. Das **Feldlinienbild** als Modell trifft Aussagen über die Kräfte auf Probekörper (z.B. Eisenfeilspäne).

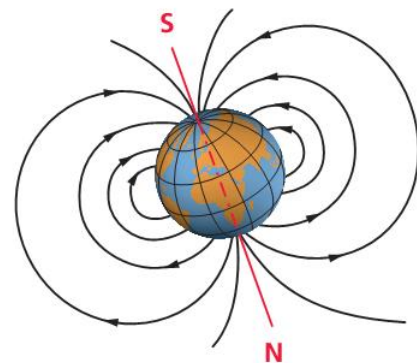


Die Feldlinien eines Magneten sind geschlossene Linien und zeigen die Kraft-
richtung an. Außerhalb eines Dauermagneten verlaufen sie vom Nord- zum
Südpol.



Das Magnetfeld der Erde

Die Erde ist ein großer schwacher Magnet. Die magnetischen Pole liegen in der Nähe der geografischen Pole, wobei sich im Norden der magnetische Südpol und im Süden der magnetische Nordpol befinden. Die Lage der Pole ändert sich mit der Zeit. In Erdnähe ist die Form des Magnetfeldes vergleichbar mit einem Stabmagneten. Untersuchungen durch Satelliten haben er-

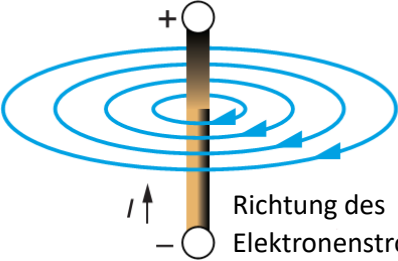
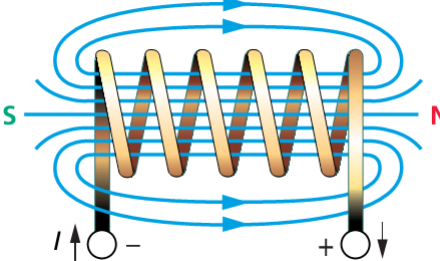


geben, dass das Erdmagnetfeld durch die von der Sonne ausgehende Teilchenstrahlung (Sonnenwind) erheblich deformiert wird und dass es auf der sonnenabgewandten Seite weit in den Raum hinausreicht. Das Erdmagnetfeld beeinflusst die Bewegung dieser geladenen Teilchen und stellt somit einen Schutz für das Leben auf der Erde dar. Die Wechselwirkung dieser solaren Strahlung mit den Luftmolekülen führt in Nähe der Pole zur Erscheinung von **Polarlichtern**.



2. Elektromagnetismus

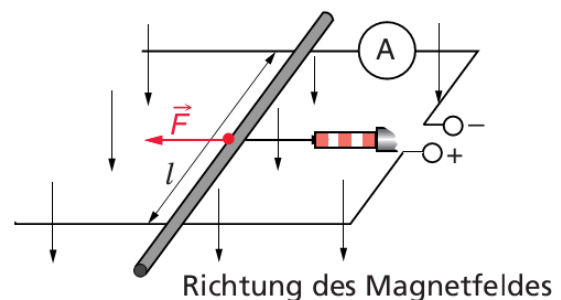
Eine magnetische Wirkung tritt um **stromdurchflossene Leiter** auf. Als technische Anwendung wird eine Spule gewickelt und oft das Magnetfeld durch einen Eisenkern verstärkt → Lautsprecher, Relais, Lasthebemagnete.

Feldlinienbild um einen stromdurchflossenen Leiter	Feldlinienbild einer stromdurchflossenen Spule
 <p>Das Diagramm zeigt einen vertikalen Leiter mit einem Pluszeichen (+) oben und einem Minuszeichen (-) unten. Ein Pfeil mit der Beschriftung 'I' zeigt nach oben, was die Richtung des Elektronenstromes anzeigt. Um den Leiter herum sind konzentrische blaue Kreise als magnetische Feldlinien dargestellt, die im Uhrzeigersinn verlaufen.</p>	 <p>Das Diagramm zeigt eine Spule, die aus mehreren Windungen eines Leiters besteht. Am linken Ende befindet sich ein Minuszeichen (-) und am rechten Ende ein Pluszeichen (+). Ein Pfeil mit der Beschriftung 'I' zeigt nach unten. Blaue Feldlinien verlaufen durch die Spule von rechts nach links. Die Enden der Spule sind als Magnetpolen markiert: ein Nordpol (N) rechts und ein Südpol (S) links.</p>

Magnetische Feldlinien sind geschlossen. Das magnetische Feld ist ein **quellenfreies Wirbelfeld**.

3. Beschreibung magnetischer Felder durch Feldgrößen

Befindet sich ein stromdurchflossener Leiter in einem Magnetfeld, so wird auf ihn eine Kraft ausgeübt. Diese Kraft hängt von der Stärke des Magnetfeldes, von der Stromstärke und der Länge des Leiters ab.



Die Kraftrichtung kann mit der **Drei-Finger-Regel** bestimmt werden. Zeigt der Daumen der linken Hand in Richtung des Elektronenstromes und der Zeigefinger in Richtung des magnetischen Feldes, so gibt der Mittelfinger die Richtung der Kraft an. Alle Richtungen stehen senkrecht zueinander.

Die technische Stromrichtung ist entgegen der Bewegungsrichtung der Elektronen festgelegt. In der Elektrotechnik bezieht sich die Drei-Finger-Regel somit auf die rechte Hand.

Im homogenen Magnetfeld gilt:

$$F \sim I \quad \text{für Länge } \ell = \text{konstant}$$

$$F \sim \ell \quad \text{für Stromstärke } I = \text{konstant}$$

$$F \sim I \cdot \ell \quad \text{oder Quotient } \frac{F}{I \cdot \ell} = \text{konstant}$$

Dieser Quotient kennzeichnet die Stärke eines Magnetfeldes und wird als **magnetische Flussdichte B** bezeichnet. Befinden sich Strom- und Feldrichtung senkrecht zueinander, gilt:

$$B = \frac{F}{I \cdot l} \quad B = 1 \frac{N}{A \cdot m} = 1 T \text{ (Tesla)}$$

Für beliebige Winkel α gilt:

$$B = \frac{F}{I \cdot l \cdot \sin \alpha}$$

Auch die **magnetische Feldstärke H** ist ein Maß dafür, wie stark ein Magnetfeld ist:

$$H = 1 \frac{A}{m}$$

Zwischen beiden Feldgrößen besteht ein Zusammenhang:

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H$$

μ_0 ... magnetische Feldkonstante

$$\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6} \frac{V \cdot s}{A \cdot m}$$

μ_r ... Permeabilitätszahl des Stoffes

Die **magnetische Permeabilität** $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$ als Verhältnis der Flussdichte zur Feldstärke beschreibt die Fähigkeit zur Magnetisierung eines Stoffes in einem äußeren Magnetfeld.

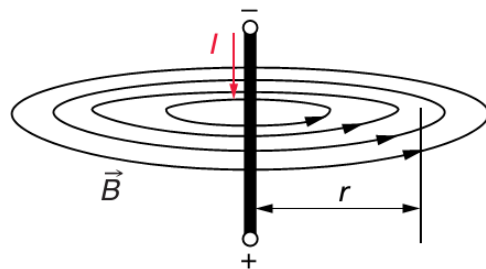
Die Richtungen der Vektoren für Flussdichte und Feldstärke sind gleich der Richtung der Feldlinien des magnetischen Feldes.

A

Magnetfelder um stromdurchflossene Leiter und Spulen:

Die Stärke des Magnetfeldes um einen geraden stromdurchflossenen **Leiter** ist umso größer, je größer die Stromstärke und je kleiner der Abstand zum Leiter ist. Für die magnetische Flussdichte gilt:

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



Zwei parallel verlaufende Leiter beeinflussen sich gegenseitig. Bei gleicher Stromrichtung wirkt eine anziehende Kraft, bei entgegengesetzter Stromrichtung eine abstoßende Kraft.

Bei einer **Spule** kann die magnetische Flussdichte im Inneren durch einen Kern aus bestimmten Stoffen vergrößert werden. Für die magnetische Flussdichte im Inneren einer langen, stromdurchflossenen Spule gilt:

$$\boxed{B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{N \cdot I}{l}} \quad \text{mit } N \dots \text{Windungsanzahl der Spule} \\ \quad \quad \quad l \dots \text{Länge der Spule}$$

Die **Permeabilitätszahl** μ_r als Stoffkenngröße gibt an, wie sich die magnetische Flussdichte vergrößert, wenn sich innerhalb einer Spule statt Vakuum bzw. Luft ein bestimmter Stoff befindet.

4. Geladene Teilchen in magnetischen Feldern

Bewegen sich geladene Teilchen senkrecht zu den magnetischen Feldlinien, so wird auf sie im Magnetfeld die **Lorentz-Kraft** ausgeübt.

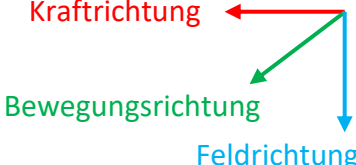
Elektronen der Anzahl N im Bereich eines Leiterstücks der Länge l bewegen sich in der Zeit t durch den Leiterquerschnitt mit der mittleren Driftgeschwindigkeit:

$$v = \frac{l}{t}$$

Die Stromstärke im Leiter beträgt: $I = \frac{Q}{t} = \frac{N \cdot e}{t}$ mit $e \dots$ Elementarladung

Auf das Leiterstück wirkt im Feld mit der magnetischen Flussdichte B die Kraft:

$$F_L = B \cdot I \cdot l = B \cdot \frac{N \cdot e}{t} \cdot l = B \cdot Q \cdot \frac{l}{t}$$

$$\boxed{F_L = Q \cdot v \cdot B} \quad \dots \text{Lorentz-Kraft}$$


Kraft-, Bewegungs- und Feldrichtung stehen senkrecht aufeinander (Drei-Finger-Regel).

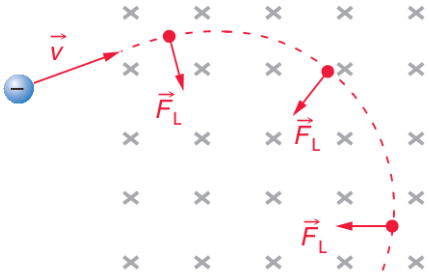
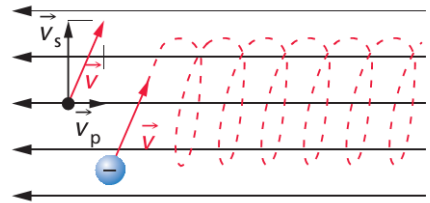
Schlussfolgerungen aus der Definition der **Lorentz-Kraft**:

- Da die Lorentz-Kraft senkrecht zur Bewegungsrichtung wirkt, ändert sich die Richtung, nicht aber der Betrag der Geschwindigkeit der geladenen Teilchen (vgl. Radialkraft bei der Kreisbewegung).
- Im homogenen Magnetfeld ist die Kraft konstant. Somit bewegen sich die Teilchen auf einer Kreisbahn.
- Die Kräfte auf positiv und negativ geladene Teilchen sind entgegengesetzt gerichtet.

Bewegen sich die geladenen Teilchen unter einem beliebigen Winkel α zur Richtung des Magnetfeldes, dann gilt für die **Lorentz-Kraft**:

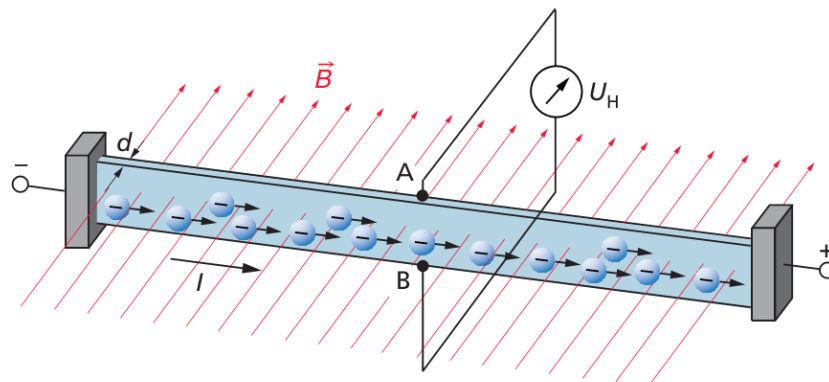
$$F_L = Q \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha$$

Vektorprodukt: $\vec{F}_L = Q \cdot (\vec{v} \times \vec{B})$

Bewegung senkrecht zu den Feldlinien des Magnetfeldes	Bewegung schräg zu den Feldlinien des Magnetfeldes
	
Die Elektronen bewegen sich auf einer kreisförmigen Bahn.	Die Elektronen bewegen sich auf einer spiralförmigen Bahn.

Der Hall-Effekt:

A



Wird ein flächenhafter stromdurchflossener Leiter senkrecht zur Driftgeschwindigkeit der Elektronen von einem Magnetfeld durchsetzt, so kann zwischen den Punkten A und B eine **Hall-Spannung** U_H nachgewiesen werden. Infolge ihrer Bewegung im Magnetfeld werden die Elektronen durch die Lorentz-Kraft im skizzierten Fall nach unten abgelenkt (Drei-Finger-Regel). Die Elektronenzahl im Punkt B ist größer als im Punkt A. Somit kommt es zu einer Spannung zwischen den beiden Punkten.

Der Betrag der **Hall-Spannung** U_H hängt von der Stromstärke I , der magnetischen Flussdichte B und der Dicke d des Leiters ab:

$$U_H = R_H \cdot \frac{I \cdot B}{d}$$

mit R_H ... Hall-Konstante (Stoffkenngröße)

Ein **Hall-Sensor** wird genutzt, um die magnetische Flussdichte und damit die Stärke von Magnetfeldern indirekt zu messen.

Stoffe im magnetischen Feld:

Die Stärke des Magnetfeldes um eine Spule hängt davon ab, welcher Stoff sich in der Spule befindet. Durch die **Permeabilitätszahl μ_r** wird die Veränderung der magnetischen Flussdichte in einem Stoff in Bezug auf das Vakuum ($\mu_r = 1$) erfasst. Es werden drei Gruppen von Stoffen unterschieden:

ferromagnetische Stoffe	paramagnetische Stoffe	diamagnetische Stoffe
$\mu_r \gg 1$	$\mu_r > 1$	$\mu_r < 1$
Eisen, Nickel, Kobalt, spezielle Legierungen	Aluminium, Platin, Luft $\mu_r = 1,00000037$	Antimon, Gold, Wasser, Zink, Kupfer, Glas
Magnetfelder werden stark beeinflusst.	Magnetfelder werden durch diese Stoffe nur wenig beeinflusst.	