

19. Vorlesung EP

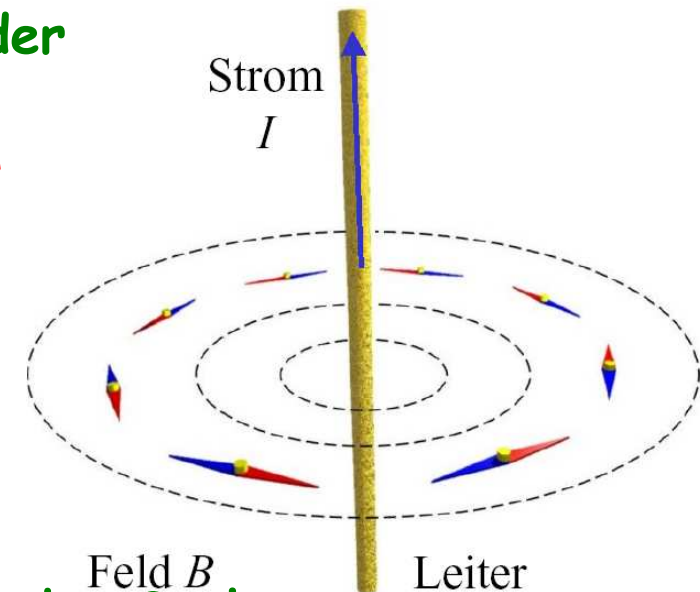
III Elektrizität und Magnetismus

19. Magnetische Felder (Magnetostatik)

Versuche:
Feldlinienbilder
(B-Feld um Einzeldraht, 2 Drähte, Spule)
Kraftwirkung von Strömen
Drehspulinstrument
Fadenstrahlrohr

Magnetostatik: zeitlich konstante Magnetfelder

Ein stromdurchflossener Leiter ist von einem kreisförmigen Magnetfeld umgeben
(Ørsted, 1820)

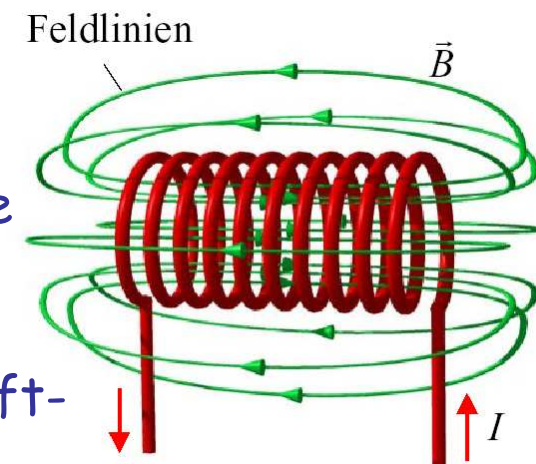


Bewegte Ladungen (elektrische Ströme) erzeugen magnetische Kraftfelder:

B-Feld

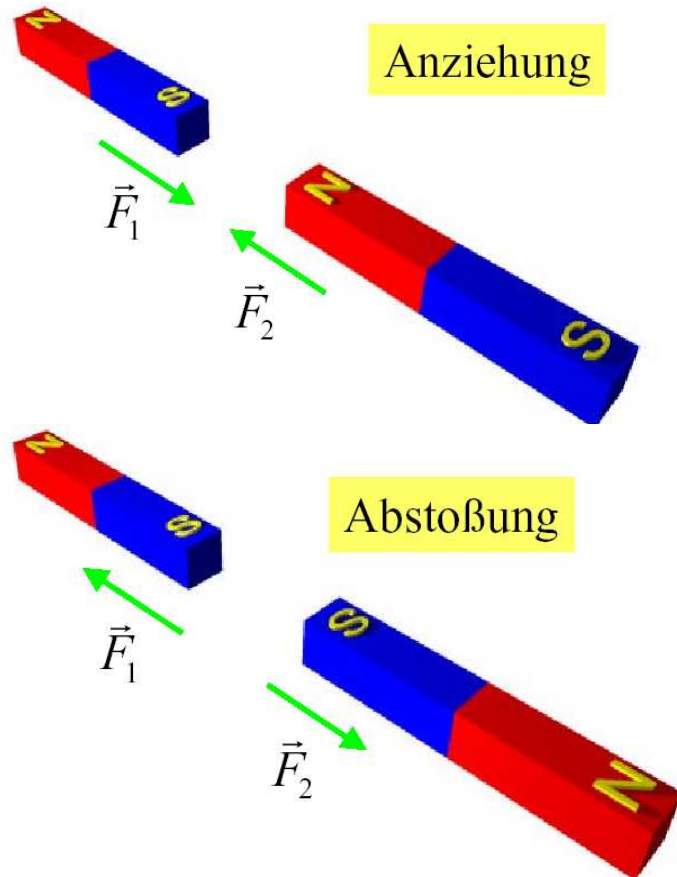
- B-Feld ist 'Wirbelfeld', hat keine Quellen oder Senken
- es gibt keine magnetische Ladung (Ampère'sches Gesetz)

In einer Spule addieren sich die Felder benachbarter Drähte vektoriell. Es ergibt sich eine im Vergleich zum Einzeldraht höhere Feldliniendichte im Inneren der Spule, die annähernd homogen ist.



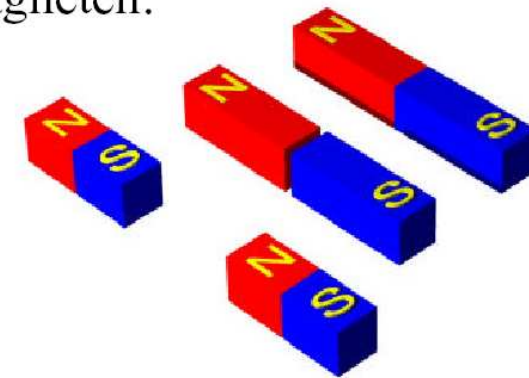
Mit Eisenfeilspänen läßt sich das magnetische Kraftfeld sichtbar machen.

Stabmagnete (Permanentmagnete)



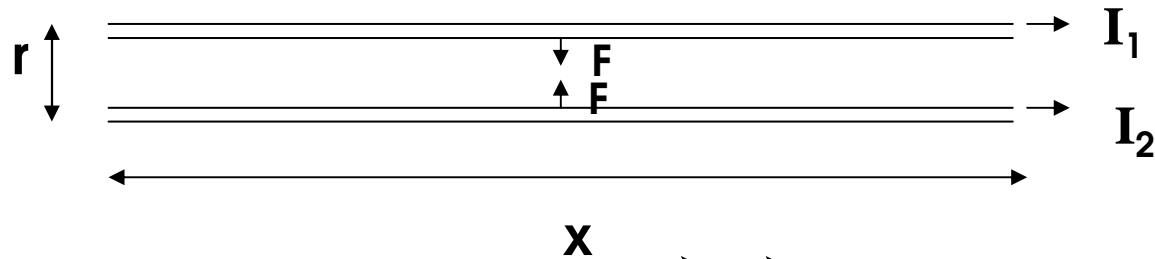
Es gibt also 2 Pole, die mit **Nordpol** und **Südpol** bezeichnet werden

Teilung eines Stabmagneten:



Im Gegensatz zu den elektrischen Ladungen, die man einzeln erzeugen kann, wurden einzelne Magnetpole („Magnetischer Monopol“) bisher nicht beobachtet.

Magnetische Kraft zwischen zwei stromdurchflossenen Leitern



anziehende Kraft für parallele \vec{I}_1, \vec{I}_2 (abstoßende für antiparallele \vec{I}_1, \vec{I}_2)

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot x \cdot \frac{I_1 \cdot I_2}{r}$$

mit „magnetischer Feldkonstante“ $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \left[\frac{\text{N}}{\text{A}^2} = \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A} \cdot \text{m}} \right]$

In Analogie zur Elektrostatik definiert man eine Feldstärke

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

Die B-Feldstärke nennt man „magnetische Induktion“. Sie hat die Einheit

$$\left[\frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} = \text{T}(\text{"Tesla"}) \right]$$

$H = B/\mu_0$ heißt „magnetische Feldstärke“, Einheit $\left[\frac{\text{A}}{\text{m}} \right]$

(Manchmal wird auch B als magnetische Feldstärke und H als magnetische Erregung bezeichnet.)

Im Beispiel zweier stromdurchflossener Leiter (s.o.):

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I_1}{r} \quad (\text{B-Feld um } I_1 \text{ im Abstand } r)$$

$$\rightarrow F = B \cdot I_2 \cdot x \quad (\text{Kraft auf Leiter 2})$$

Allgemein ist die Kraft auf einen Leiter im B-Feld für \vec{B} senkrecht auf Leiterstrecke \vec{x} :

$$F = B \cdot I \cdot x$$

(Obige Beziehungen gelten im Vakuum und in guter Näherung auch in Luft, in Materie (\rightarrow nächste Vorlesung) ist $B = \mu_{\text{relativ}} \cdot B_{\text{Vakuum}}$)

Kraft zwischen parallelen, stromdurchflossenen Leitern

$$\frac{|\Delta \vec{F}|}{\Delta x} = I \cdot B$$

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

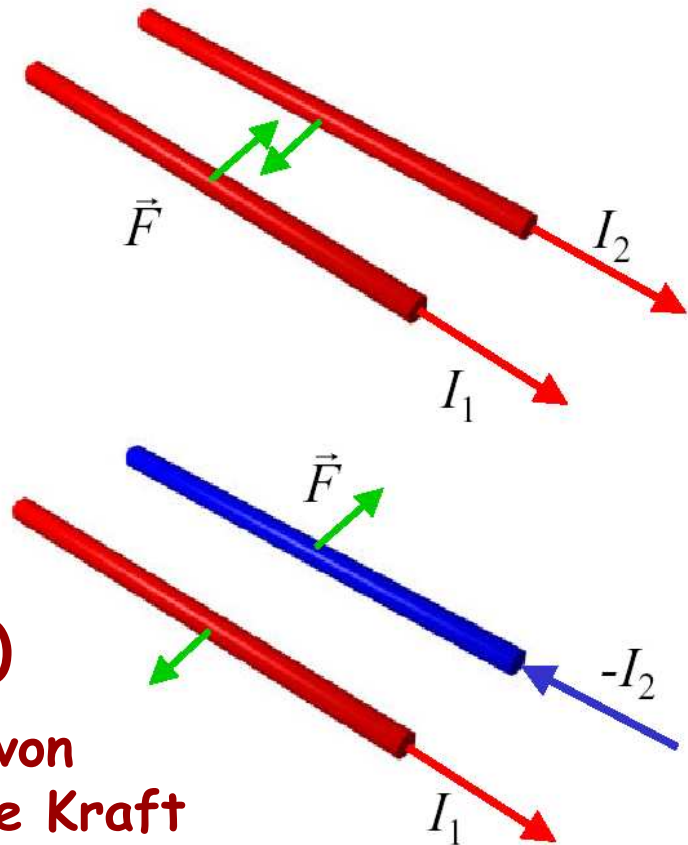
$$\frac{\Delta F}{\Delta x} = \pm \frac{\mu_0 \cdot I^2}{2\pi r}$$

Die Richtung der Kraft hängt von der Stromrichtung ab

Kraft F ist anziehend, wenn Ströme parallel,
abstoßend, wenn Ströme entgegengesetzt

Basiseinheit 1 Ampere:
(alternative Definition zu $1\text{ A} = 1\text{ C/s}$)

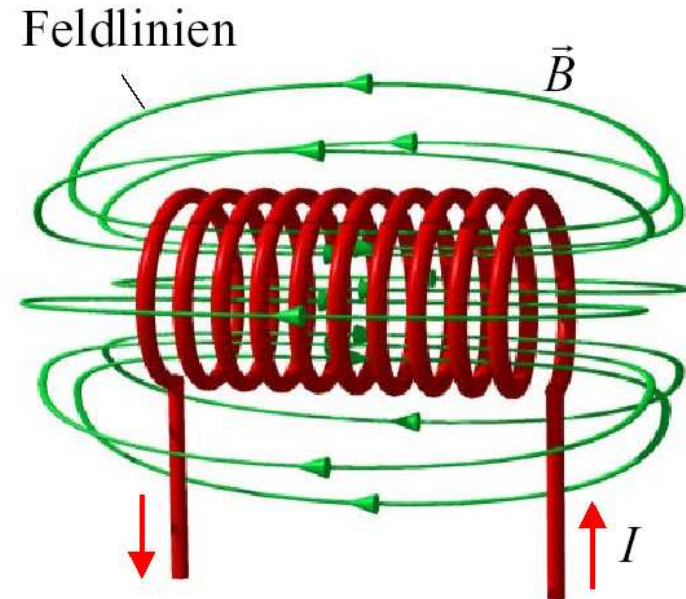
Wenn 2 parallele Leiter im Abstand $r=1\text{ m}$ von je 1 A durchflossen werden, dann wirkt eine Kraft von $2 \cdot 10^{-7}\text{ N}$ pro Meter.



Magnetfeld einer (langen) Spule:

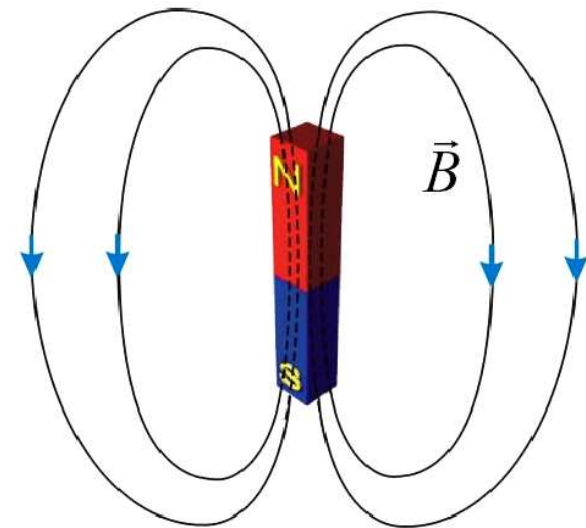
$$B = \mu_0 \cdot I \cdot \left(\frac{N}{L} \right)$$

N = Windungszahl, L = Spulenlänge

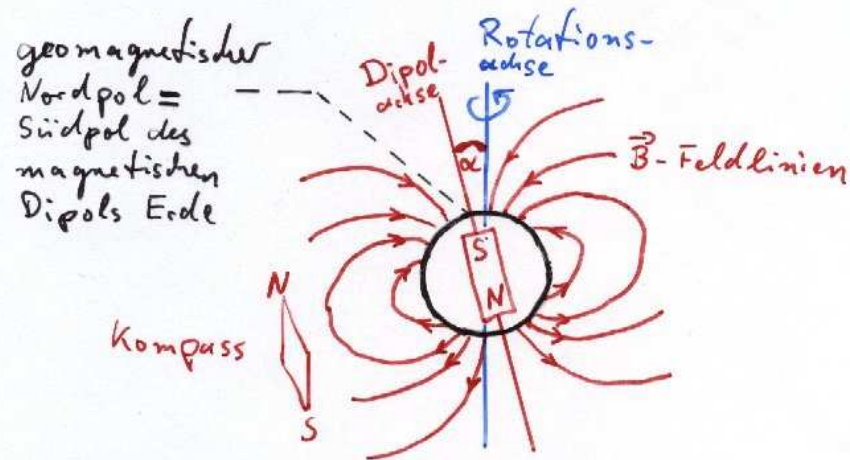


Magnetisches Dipolfeld:

- Feldlinien zeigen vom Nord- zum Südpol
- Bezeichnung aufgrund der Ausrichtung der Kompassnadel (Nordpol der Kompassnadel zeigt nach Norden)
- Dipolfeld wie bei Spule



Magnetfeld der Erde



Die magnetische Dipolachse steht in einem Winkel $\alpha = 11,5^\circ$ zur Rotationsachse der Erde. Der Südpol des Dipols liegt auf der Nordhalbkugel.

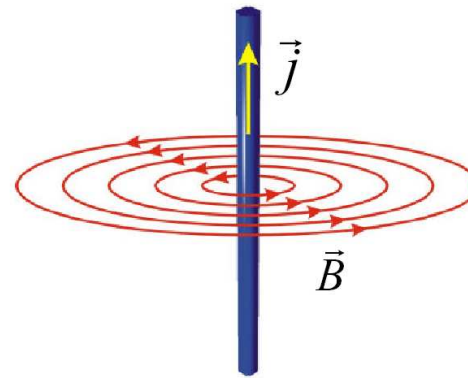
Aus Magnetisierungsprofil des Meeresbodens (erstarrtes Magma): ca. alle 10^6 Jahre Richtungswechsel des Erdmagnetfeldes.
Vermutete Ursache des Erdmagnetfeldes: flüssiger Eisenkern bildet Geodynamo.

$$B_{\text{Erde}} = (0.03 - 0.06) \times 10^{-3} \text{ T } (= 0.3 - 0.6 \text{ Gauss})$$

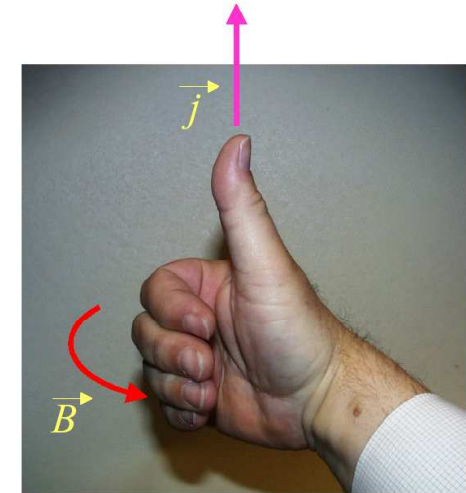
$$(1 \text{ Gauss} = 10^{-4} \text{ T})$$

Richtung des Magnetfeldes

\vec{B} und $\vec{H}(= \vec{B} / \mu_0)$ sind Vektoren. Ihre Richtung ergibt sich aus der „Rechte-Hand-Regel“. (Der Strom \vec{I} oder \vec{j} hat dieselbe Richtung wie der Leiter $\vec{\ell}$).

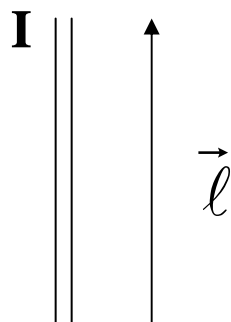


Die Richtung von Strom und Magnetfeld kann einfach durch die „rechte Hand“ demonstriert werden.



Veranschaulichung der „Rechte-Hand-Regel“

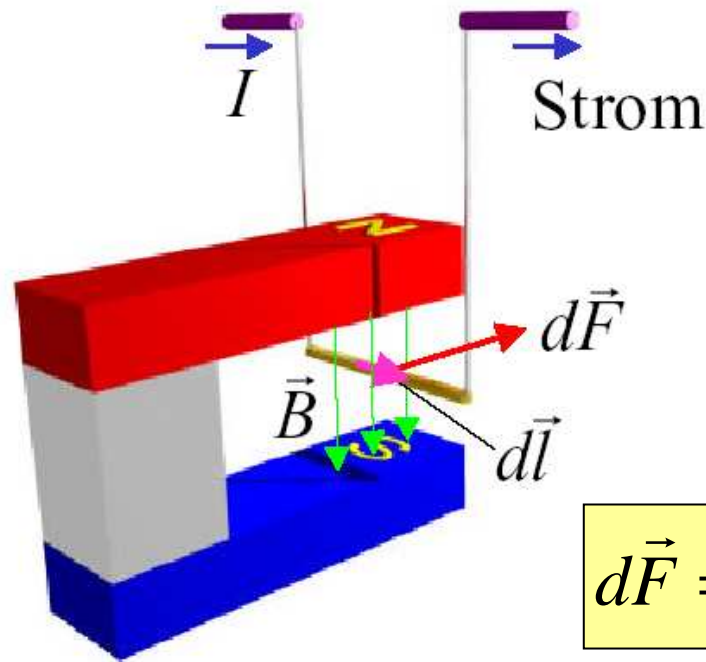
Richtung der Kraft auf stromdurchflossenen Leiter



$$\vec{F} = I \cdot \vec{\ell} \times \vec{B}$$

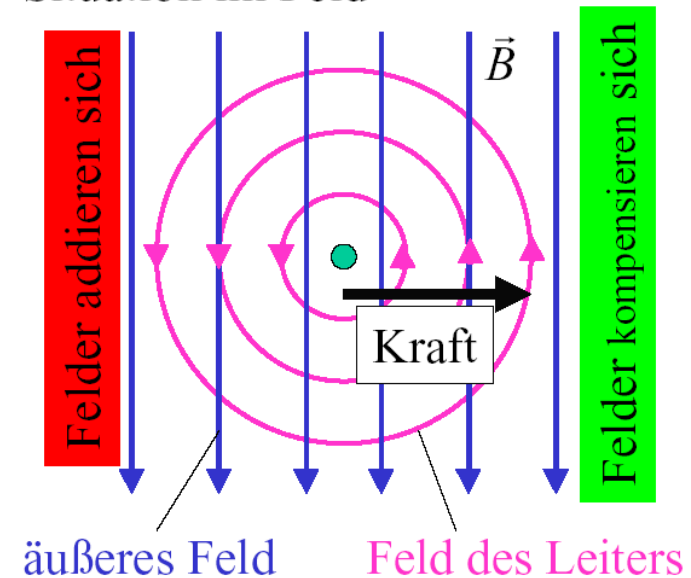
d.h. \vec{F} steht senkrecht auf $\vec{\ell}$ und \vec{B} (im Fall der Skizze zeigt \vec{F} in die Zeichenebene)

Auf einen stromdurchflossenen Leiter der Länge l wirkt im Magnetfeld eine Kraft F :



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

Situation im Feld

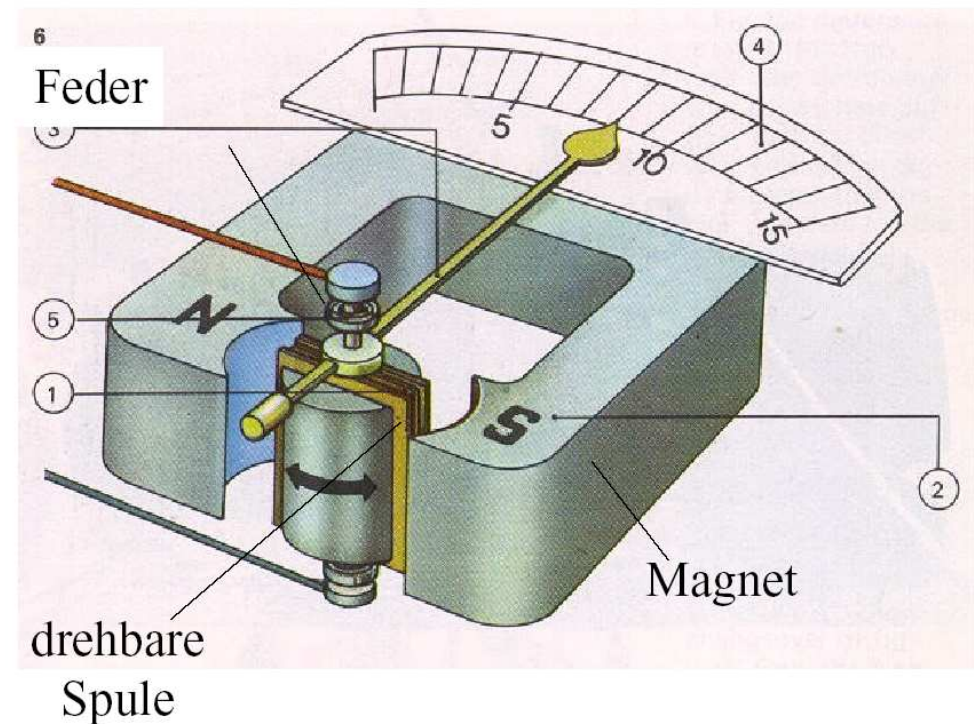
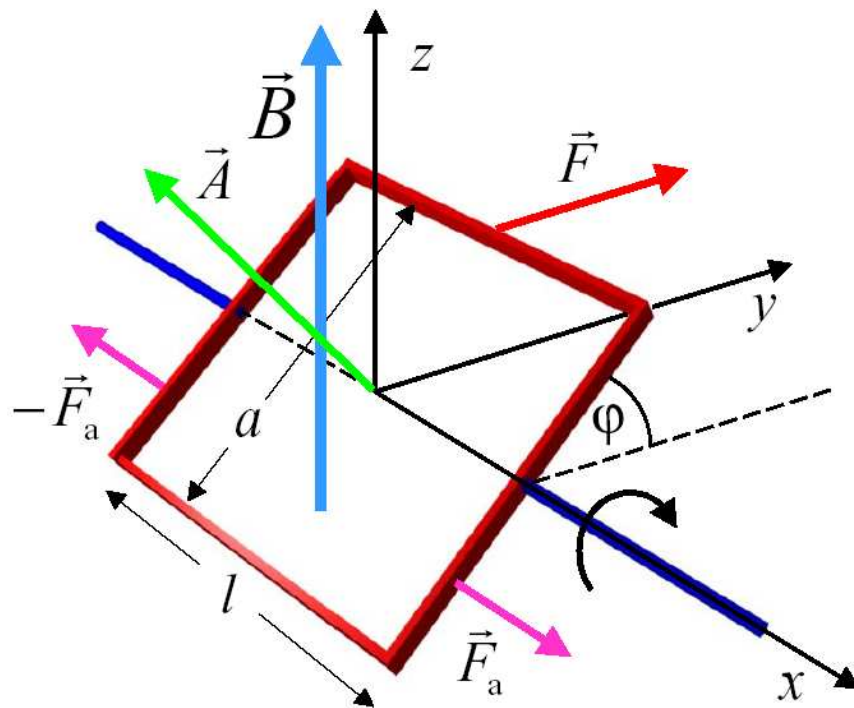


Auf der linken Seite addieren sich die Felder und rechts kompensieren sie sich. Der Leiter weicht der Konzentration aus, die Kraft weist nach rechts.

Verwendung zur Strommessung:

Amperemeter: Drehspulinstrument (Galvanometer)

Prinzip eines Amperemeters



Kraft auf Ladung in elektr. u. magnet. Feldern:

Lorentz-Kraft:

$$\vec{F} = Q \cdot (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

↑
Ladung

↑
Geschwindigkeit
d. Ladung

beachte: die von der mit v bewegten Ladung erzeugten Felder werden bei E , B nicht mitgezählt.

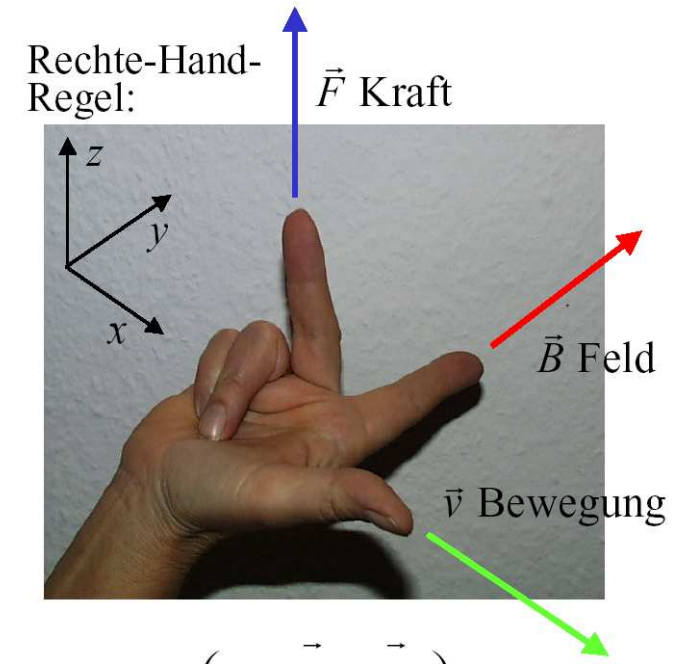
Lorentzkraft auf Ladung ΔQ :

$$|\Delta \vec{F}| = \Delta Q \cdot v \cdot B$$

falls Geschwindigkeit v senkrecht zum B -Feld

Aus $\Delta Q \cdot v = I \cdot \Delta x$ folgt Lorentzkraft pro 1m Leiter:

$$\frac{|\Delta \vec{F}|}{\Delta x} = I \cdot B$$



Ablenkung von Elektronenstrahlen im Magnetfeld (Fadenstrahlröhre):

-> im Magnetfeld B werden Elektronen auf einer Kreisbahn abgelenkt

Kräftegleichgewicht:

$$F_Z = F_L \Rightarrow m \cdot \frac{v_0^2}{R} = e \cdot v_0 \cdot B$$

damit: $\frac{e}{m} = \frac{v_0}{R \cdot B}$ **oder:** $\frac{e}{m} = \frac{2 \cdot U}{R^2 \cdot B^2}$

Ablenkradius: $R = \frac{m \cdot v_0}{e \cdot B}$

Umlauffrequenz: $\omega = \frac{v_0}{R} = \frac{e \cdot B}{m}$

(Zyklotronfrequenz)

