

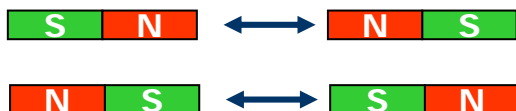
Magnetismus

Magnetismus - Einführung

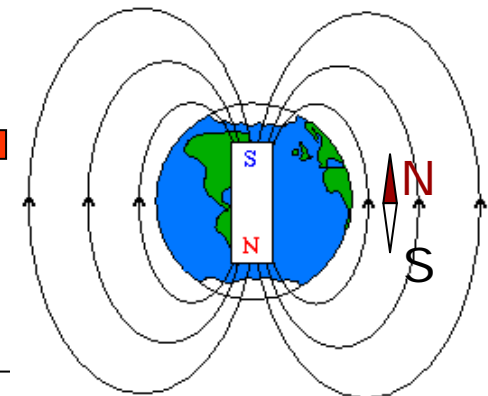
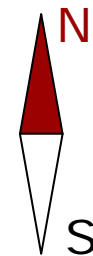
- ▶ Bedeutung:
 - ▶ Technik: Generator, Elektromotor, Transformator, Radiowellen...
 - ▶ Geologie: Erdmagnetfeld
 - ▶ Biologie: Tiere sensitiv auf Erdmagnetfeld (z.B. Meeresschildkröten)
- ▶ Lucretius (97 - 99 v.Chr): Steine aus Magnesia (Klein-Asien)
 - ▶ Sie können andere Steine anziehen oder abstoßen.
 - ▶ Sie verlieren ihre Anziehungs- bzw. Abstoßungskraft bei starker Erwärmung.
 - ▶ Sie richten sich in eine bevorzugte Richtung (Nord-Süd) aus.

▶ Kompassnadel

- ▶ N nach Norden zeigende Spitze: Nordpol
- ▶ S nach Süden zeigende Spitze: Südpol
sollte doch eigentlich umgekehrt sein da...
 - ▷ gleichnamige Pole sich abstoßen und ungleichnamige Pole sich anziehen

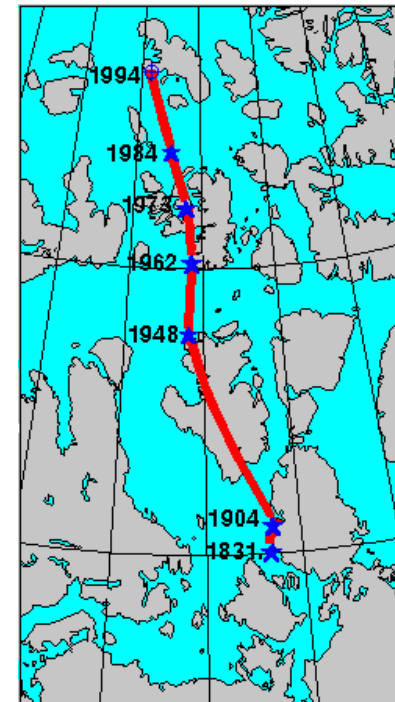


- ▶ Magnetischer Südpol liegt ungefähr beim geographischen Nordpol !

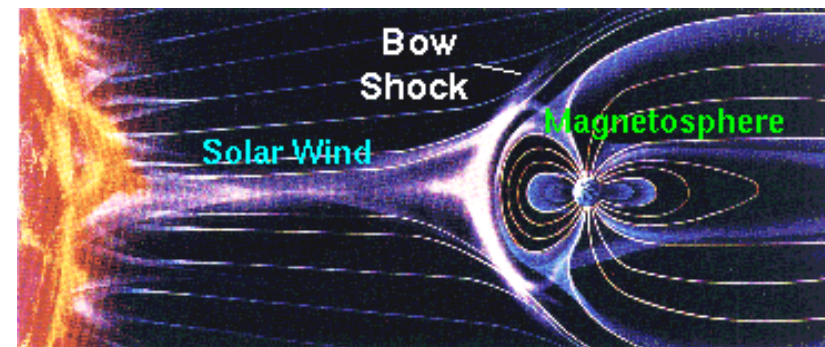
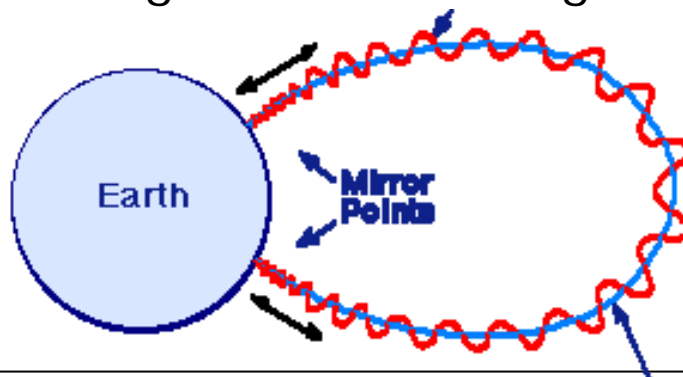


Das Erdmagnetfeld

- ▶ Erdmagnetfeld verändert Position und polt sich um
 - ▶ letzte Umpolung vor ca. 710000 Jahren

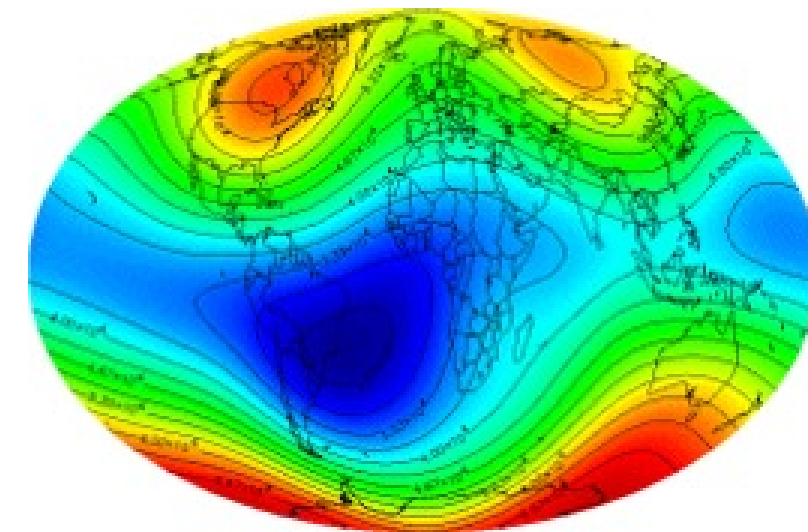


- ▶ Tiere sensitiv auf Erdmagnetfeld (z.B. Meeresschildkröten)
- ▶ wichtig für Abschirmung des Sonnenwindes

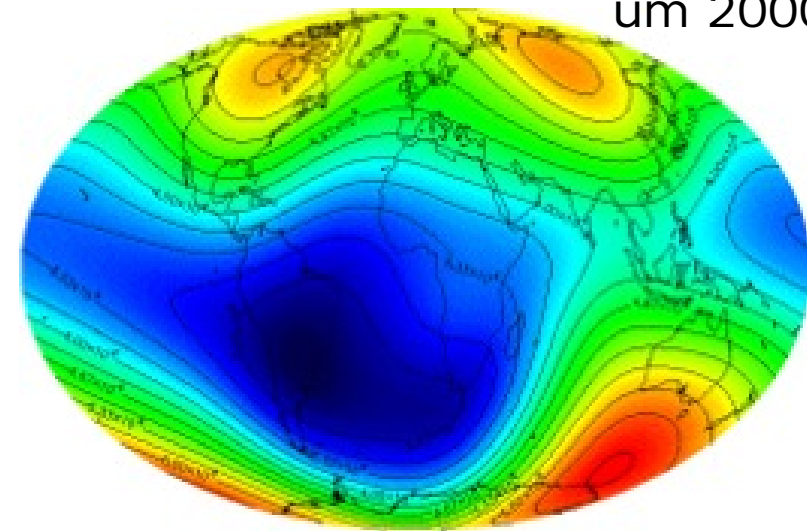


Das Erdmagnetfeld

- ▶ Erdmagnetfeld nicht rotations-symmetrisch
- ▶ Erdmagnetfeld ändert sich auch auf kürzeren Zeitskalen



um 1900



um 2000

Feld in nT

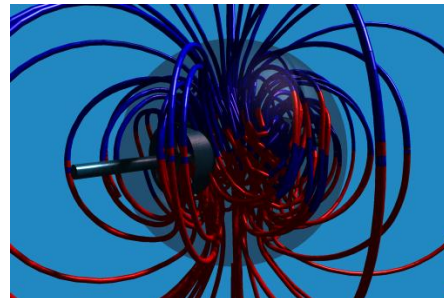
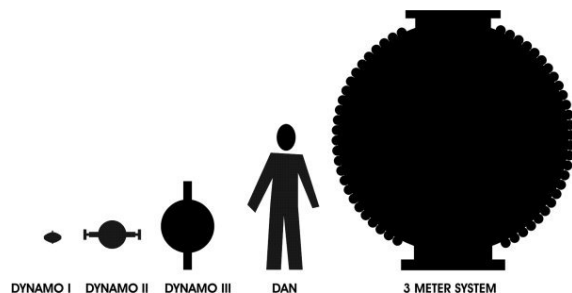
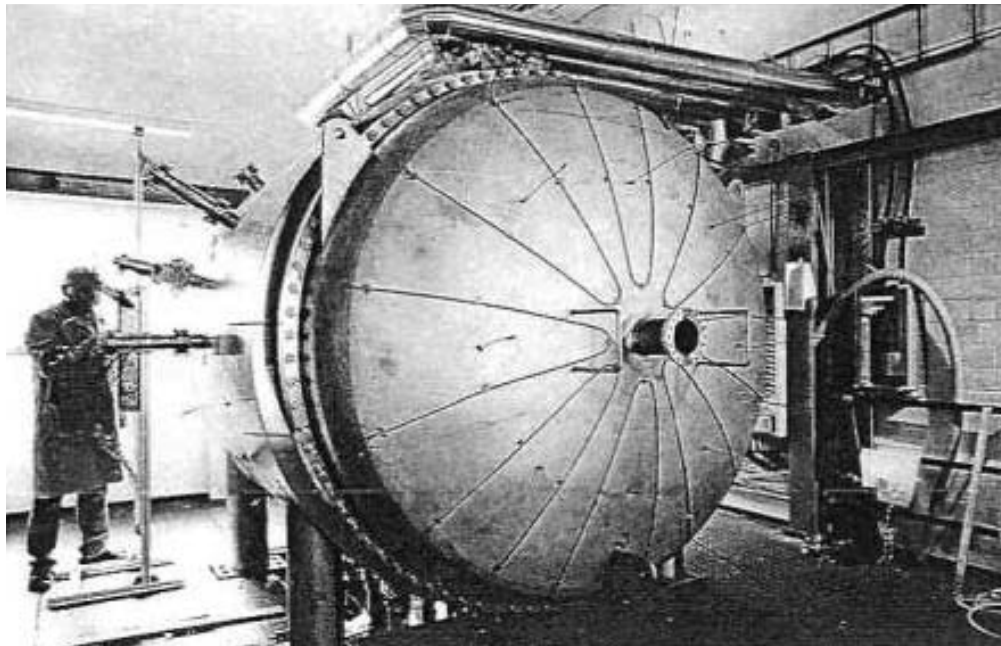
$$\mathbf{B}_{\text{Erde}} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ T}$$

Das Erdmagnetfeld

<http://complex.umd.edu/dynamo/>

http://www.epm.ethz.ch/research/experimental_studies/exp_dyn

- ▶ Experimente versuchen, die Entstehung zu simulieren ...
 - ▶ In rotierenden Aufbauten wird flüssiges Metall (e.g. Natrium) mittels Pumpen zirkuliert, dabei entsteht spontan ein Magnetfeld
 - ▶ Noch nicht demonstriert: Spontane Erzeugung Zirkulation des flüssigen Metalls



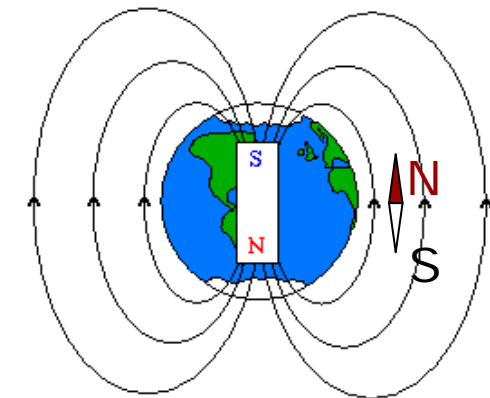
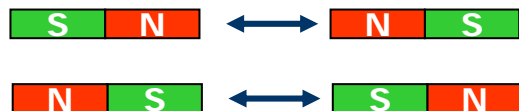
Das Magnetfeld – Phänomenologie

► Fragestellungen:

- Welche beobachtbaren Effekte belegen die Existenz eines weiteren, vom elektrischen Feld zu unterscheidenden „magnetischen“ Feldes ?
- In welcher Beziehung stehen elektrisches und magnetisches Feld zueinander? Was ist die Rolle von elektrischen und hypothetischen „magnetischen“ Ladungen?

Das Magnetfeld – makroskopische Effekte

- ▶ Es existieren Objekte welche, obwohl nicht elektrisch geladen, Kräfte aufeinander ausüben. Dabei kann man insbesondere unterscheiden zwischen
 - ▶ „Magneten“
 - ▶ zwei gleichartige Magneten üben stets Kräfte aufeinander aus
 - ▶ es existieren zwei Pole, die wir mit „Nordpol“ und „Südpol“ bezeichnen
 - ▶ gleichnamige Pole stoßen sich ab, ungleichnamige Pole ziehen sich an
 - ▶ auf der der Erdoberfläche wirken ebenfalls Kräfte auf jeden einzelnen Magneten. Daraus schließen wir, dass die Erde ebenfalls ein Magnet ist



Das Magnetfeld – makroskopische Effekte

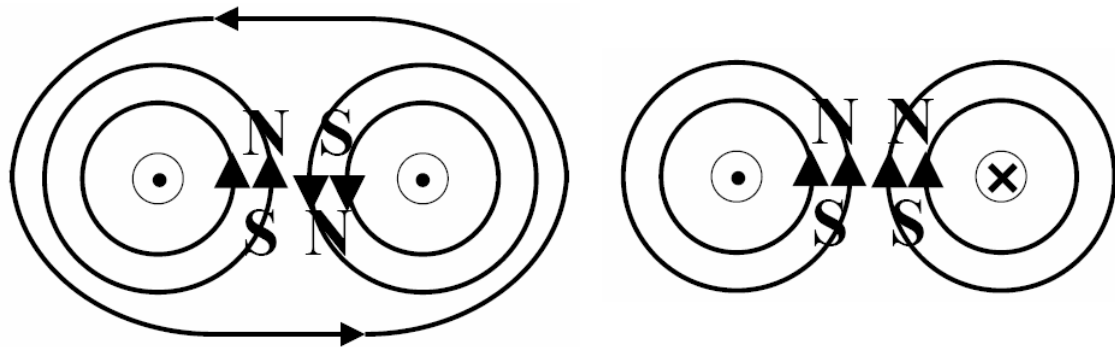
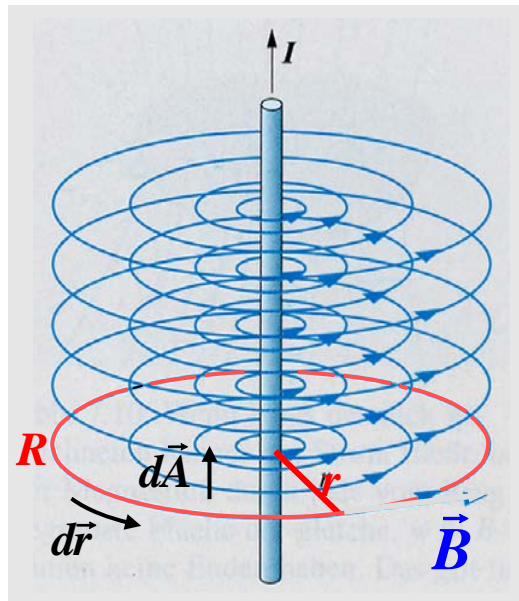
▶ Andere magnetische Materialien

- ▶ zwei gleichartige Stücke solcher Materialien üben im Allgemeinen keine Kräfte aufeinander aus.
- ▶ es gibt eine Kraft zwischen einem solchen Material und einem Magneten
- ▶ man unterscheidet weiter zwischen
 - ▷ Diamagnetischen Materialien
 - werden von Magneten **abgestoßen**
 - ▷ Paramagnetischen Materialien
 - werden von Magneten **angezogen**
 - ▷ Ferromagnetischen Materialien
 - werden ebenfalls von Magneten **angezogen**
 - Anziehung im Allgemeinen stärker als bei Paramagneten
 - Es gibt „Gedächtniseffekte“ (Hysterese)
 - Können sich in Magnete umwandeln ...

Das Magnetfeld – makroskopische Effekte

► Elektromagneten

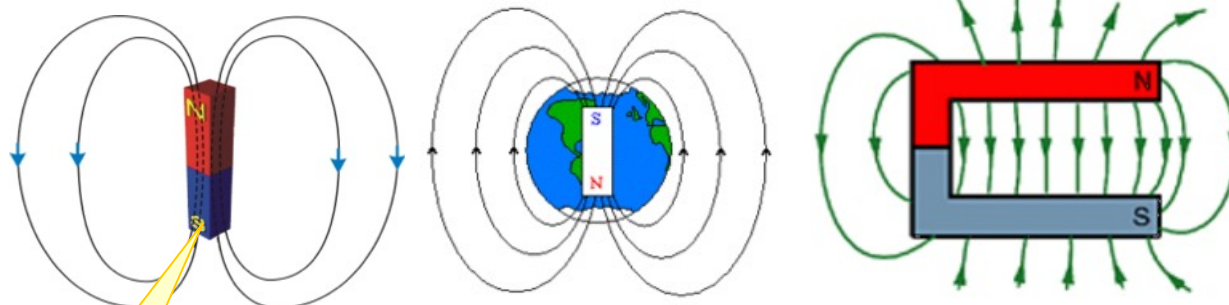
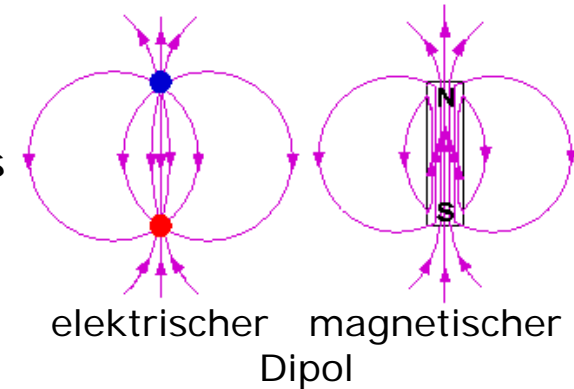
- In der Umgebung eines stromführenden Leiters wirken Kräfte auf Magnete und magnetische Materialien
- In der Umgebung eines Magneten wirkt eine Kraft auf einen Stromführenden Leiter



Das Magnetfeld – Feldlinien

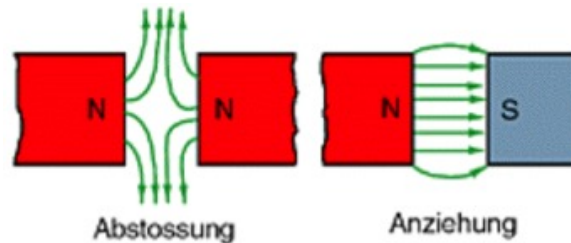
► Beschreibung magnetischer Wechselwirkungen durch Feldlinien

- Feldlinien sind **geschlossene Kurven**
 - ▷ außen von N nach S, innen umgekehrt
- Dichte der Feldlinien Maß für Stärke des Feldes

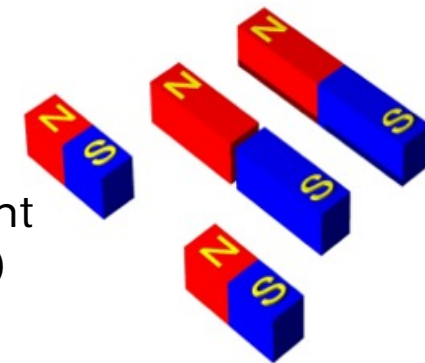


Feldlinien auch im Magnet!

- gleichgerichtete Feldlinien stoßen sich ab und versuchen sich zu verkürzen



- Da Feldlinien geschlossene Kurven sind, ist es nicht möglich isolierte S-Pole oder N-Pole („Monopole“) zu erzeugen

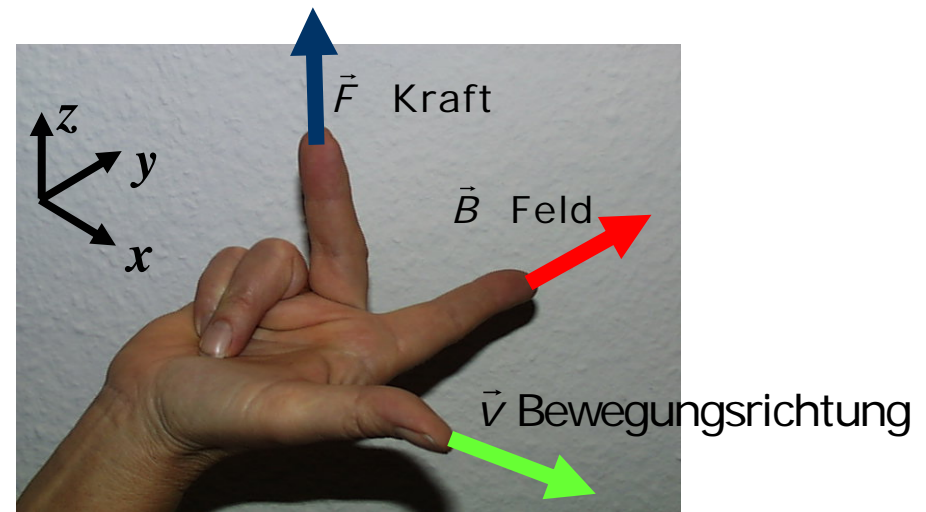


Das Magnetfeld – mikroskopische Effekte

- ▶ Auf bewegte Ladungen wirkt eine Kraft zusätzlich zur elektrischen Kraft. Diese wird der Existenz eines „Magnetfeldes“ zugeschrieben.
 - ▶ Unterscheidungsmerkmal: Elektrische Kraft hängt nicht von der Geschwindigkeit des Teilchens ab. Die magnetische Kraft sehr wohl !
- ▶ Diese neue Kraft ist die Lorentzkraft

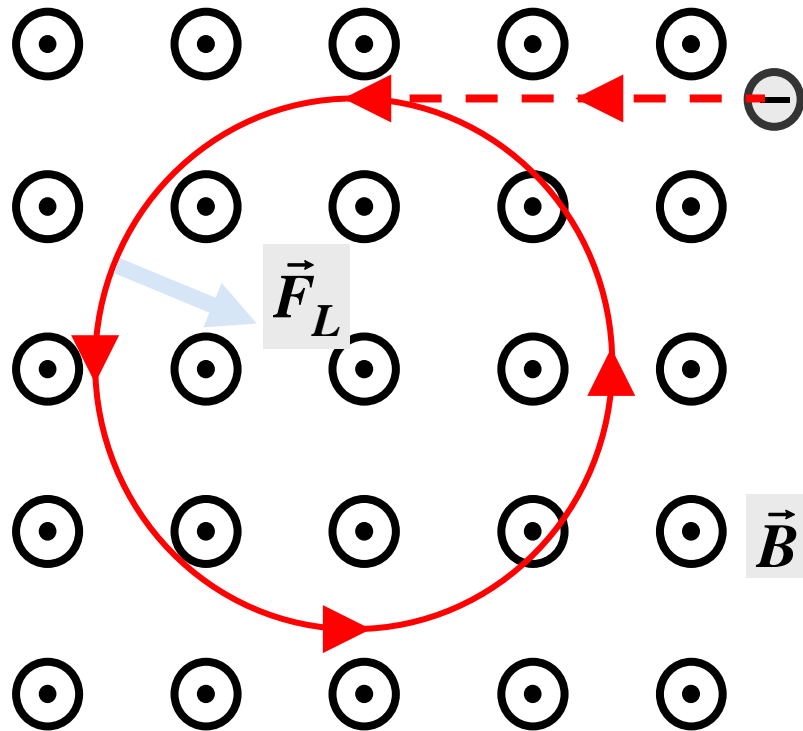
$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$$

- ▶ Kraft F steht senkrecht auf Bewegungsrichtung (v) der Ladung Q
- ▶ Kraft F steht senkrecht auf Magnetfeld B
- ▶ „Rechte-Hand-Regel“



- ▶ beachte: Kraft auf positive Ladung mit \vec{v}
= Kraft auf negative Ladung mit $-\vec{v}$

Ladungen im homogenen Magnetfeld



Ladungen q bewegen sich (im einfachsten Fall) auf Kreisbahnen im homogenen Magnetfeld \vec{B}

- Lorentzkraft

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

- d.h.: ist zu Beginn

$$\vec{v} \perp \vec{B},$$

dann erfolgt wegen

$$m \cdot d\vec{v} = d\vec{p}$$

$$= \vec{F} \cdot dt$$

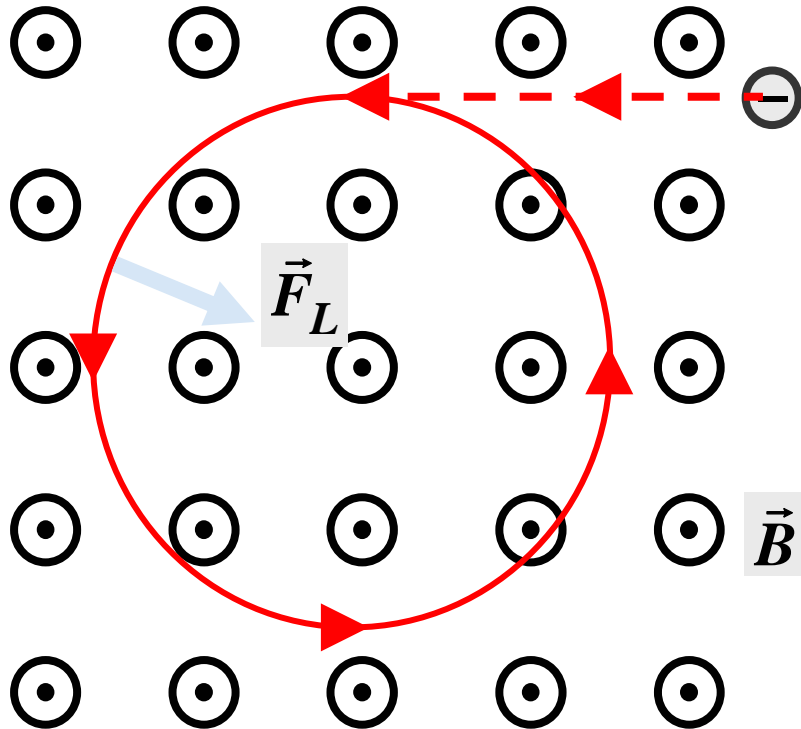
$$= \vec{v} \times \vec{B} \cdot dt$$

stets nur eine

Richtungsänderung, da

$$d\vec{v} \perp \vec{v}, \vec{B}$$

Ladungen im homogenen Magnetfeld



- **Frage:** Kreisbahnfrequenz?:
Zentripetalkraft = Lorentzkraft

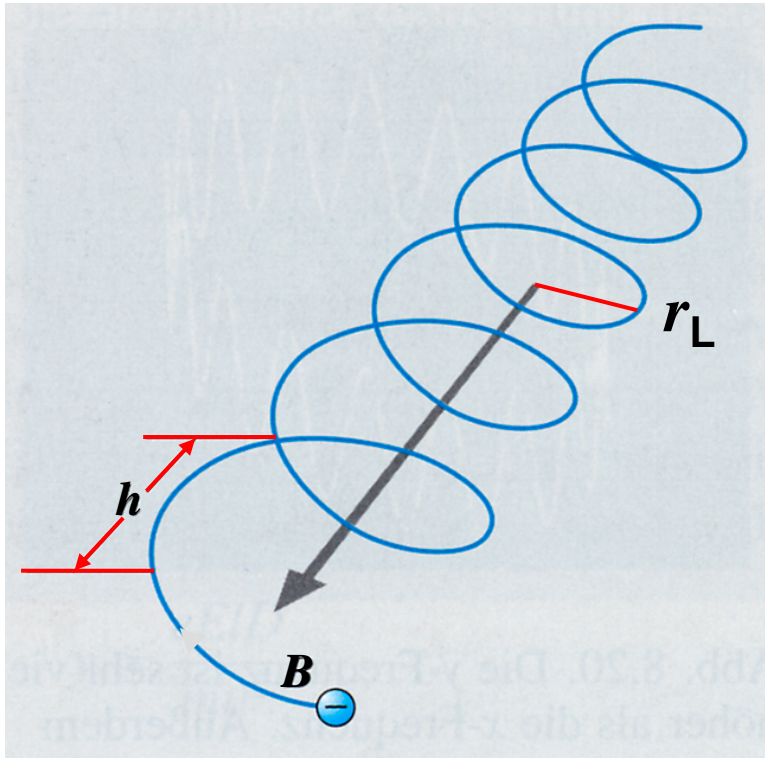
$$\begin{aligned}
 F_L &= q \cdot v \cdot B & , \quad v &= \omega_L \cdot r_L \\
 &= q \cdot \omega_L \cdot r_L \cdot B \\
 &= F_{Z'PETAL} \\
 &= m \cdot \omega_L^2 \cdot r_L
 \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \quad \boxed{\omega_L = \frac{q}{m} \cdot B} \quad \text{\underline{Larmor-Frequenz}}$$

Kreisfrequenz ω_L der Kreisbahn hängt nur von B und Verhältnis von Ladung q zur Masse m ab

$$\boxed{r_L = \frac{m}{q} \cdot \frac{v}{B}}$$

Ladungen im homogenen Magnetfeld



- Wird das Teilchen nicht senkrecht zu \mathbf{B} eingeschossen, i.e.

$$\vec{v} = \vec{v}_{\perp} + \vec{v}_{\parallel}$$

dann ergibt sich schraubenförmige Bahn. Dabei bestimmt

\vec{v}_{\perp} den Radius r_L

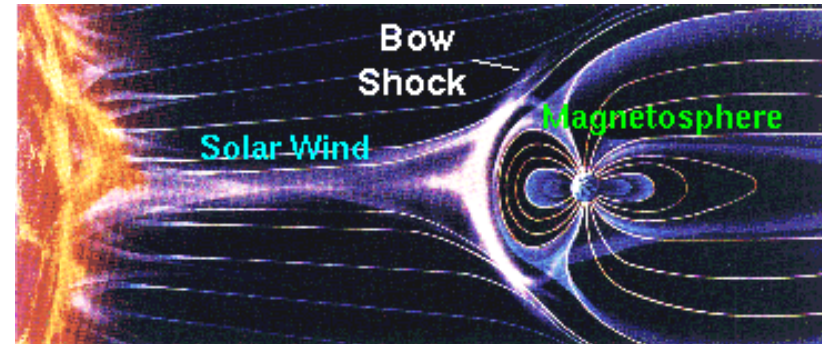
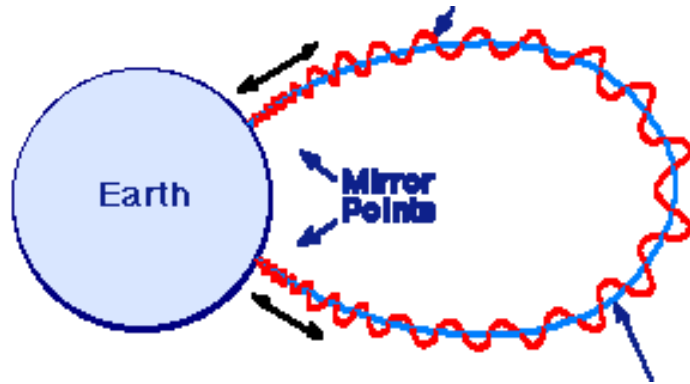
$$r_L = \frac{m}{q} \cdot \frac{v_{\perp}}{B}$$

\vec{v}_{\parallel} die Ganghöhe h

$$h = v_{\parallel} \cdot T = v_{\parallel} \cdot \frac{2\pi}{\omega_L}$$

der Schraubenbahn

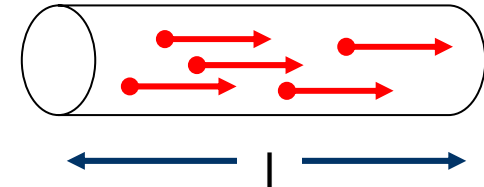
Ladungen im homogenen Magnetfeld



Kraft auf stromdurchflossenen Leiter

- ▶ In einem Leiter bewegen sich Elektronen mit der Driftgeschwindigkeit v_D

- ▶ betrachte Leiterstück der Länge l
- ▶ auf jeden Ladungsträger wirkt Lorentzkraft

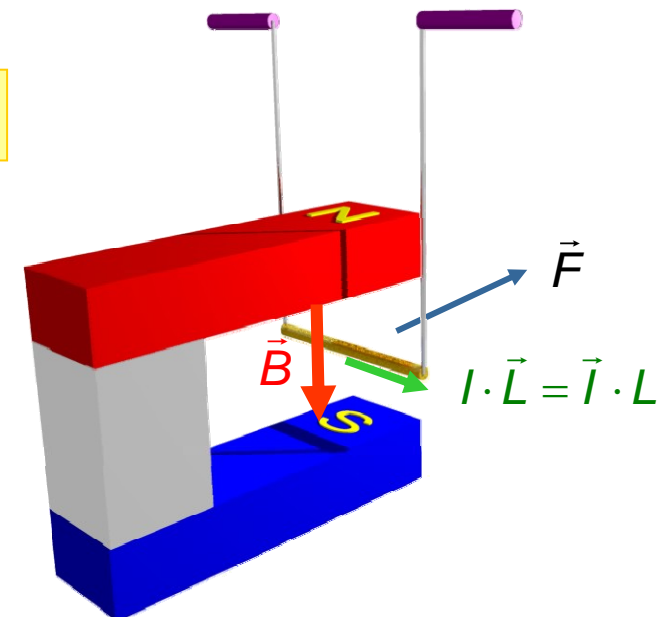


$$\vec{F}_L = e \cdot \vec{v}_D \times \vec{B}$$

$$\text{Gesamtkraft } \vec{F}_{\text{ges}} = \sum_{\text{alle } e} \vec{F}_{L,i} = (\text{Anzahl der } e^-) \cdot e \cdot \vec{v}_D \times \vec{B} = N \cdot e \cdot \vec{v}_D \times \vec{B}$$

$$\text{Strom } I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{e \cdot N}{L/v_D} \Rightarrow N = \frac{I \cdot L}{e \cdot v_D}$$

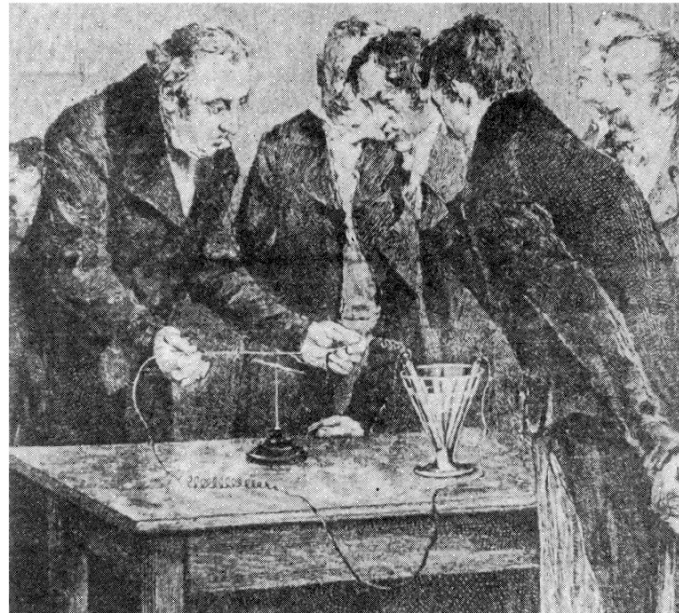
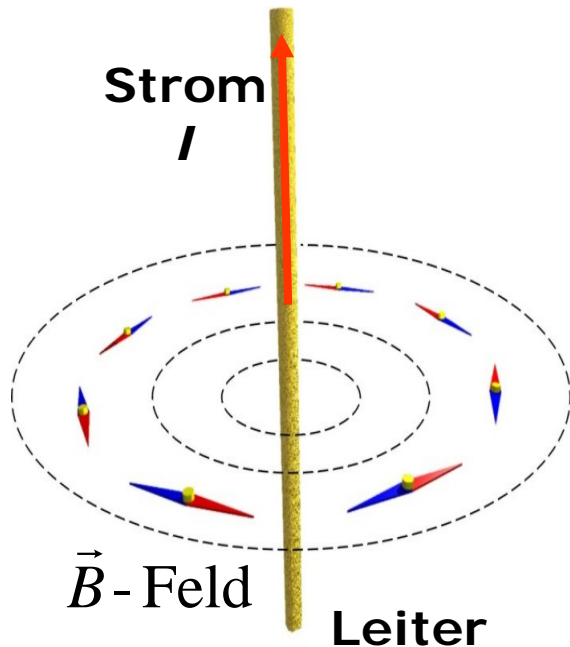
$$\vec{F}_{\text{ges}} = \frac{I \cdot L}{e \cdot v_D} \cdot e \cdot \vec{v}_D \times \vec{B} \xrightarrow{L \square v_D} \vec{F}_{\text{ges}} = I \cdot \vec{L} \times \vec{B}$$



Magnetfelder – Moderne Vorstellung

- ▶ Alle *statischen* magnetischen Phänomene werden durch **bewegte Ladungen** verursacht

- ▶ Ørsted (um 1820)



Hans Christian
Ørsted
(1777-1851)

- ▶ Elektronen „drehen“ sich um den Atomkern („Bahndrehimpuls“) und um sich selbst („Spin“)
 - ▶ diese Bewegung einer Ladung (e) erzeugt Magnetfeld
 - ▶ bei einigen Materialien können diese Elementarmagnete durch ein äußeres Magnetfeld ausgerichtet werden
 - ▷ Magnetisierung

Magnetfeld eines stromdurchfl. Leiters

- ▶ „Jede bewegte Ladung (=Strom) ist von einem Magnetfeld umgeben“

- ▶ magnetisches Feld (**Ampère'sches Gesetz**)

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 I$$

- ▶ μ_0 : magnetische Feldkonstante
Vakuumpermeabilität

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{N}{A^2} \approx 1.2566370614 \cdot 10^{-6} \frac{V \cdot s}{A \cdot m}$$

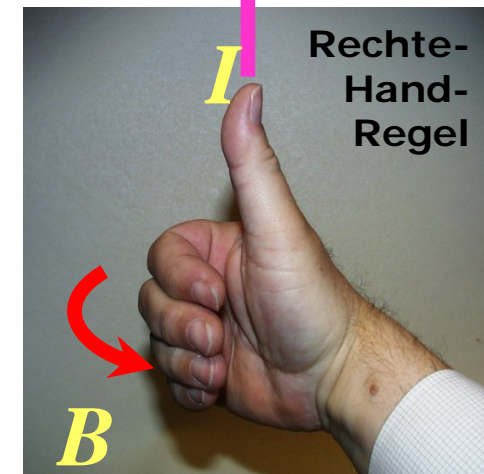
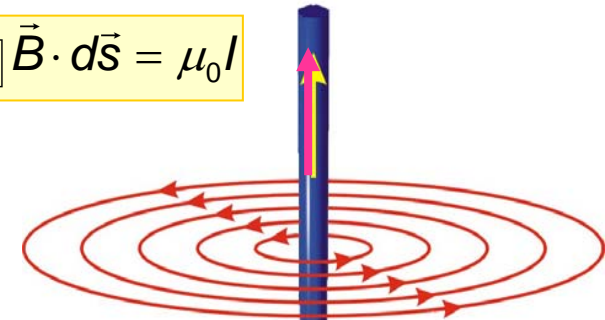
- ▶ Betrag des magnetischen Feldes eines stromdurchflossenen Leiters

$$B_{\text{Draht}} = \frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi \cdot r}$$

- ▶ Feldlinien kreisförmig
- ▶ Richtung: Rechte-Hand-Regel

$$[B] = \frac{V \cdot s}{m^2} = T = \text{Tesla}$$

(früher : 1Gauß(G) = $10^{-4} T$)



Magnetische Spule

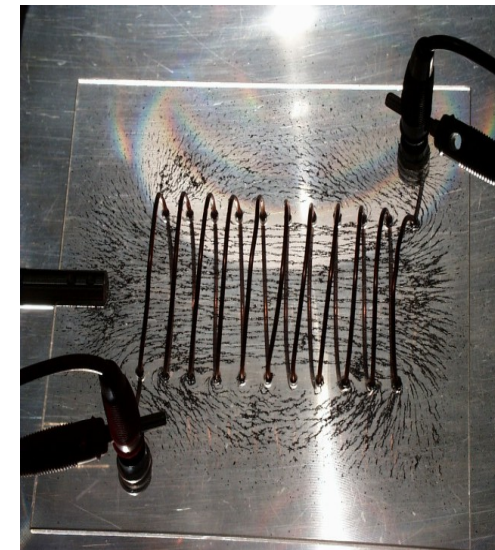
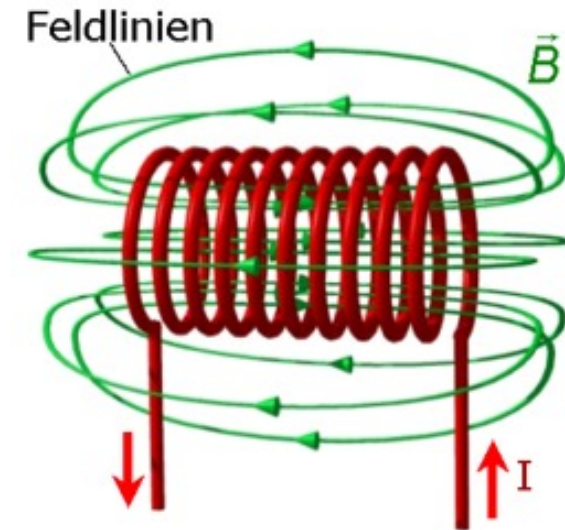
- ▶ Magnetische Feldstärke im Inneren einer zylindrischen Spule im Vakuum

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

I : Strom durch Spule

n : Zahl der Windungen

L : Länge der Spule



Elektrostatik & Magnetostatik

- ▶ Elektrisches Feld einer Punktladung:

$$E(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2}$$

- ▶ Magnetisches Feld eines Drahtes:

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

- ▶ Das Produkt aus den Feldkonstanten des elektrischen und magnetischen Feldes stehen über eine Naturkonstante in Verbindung

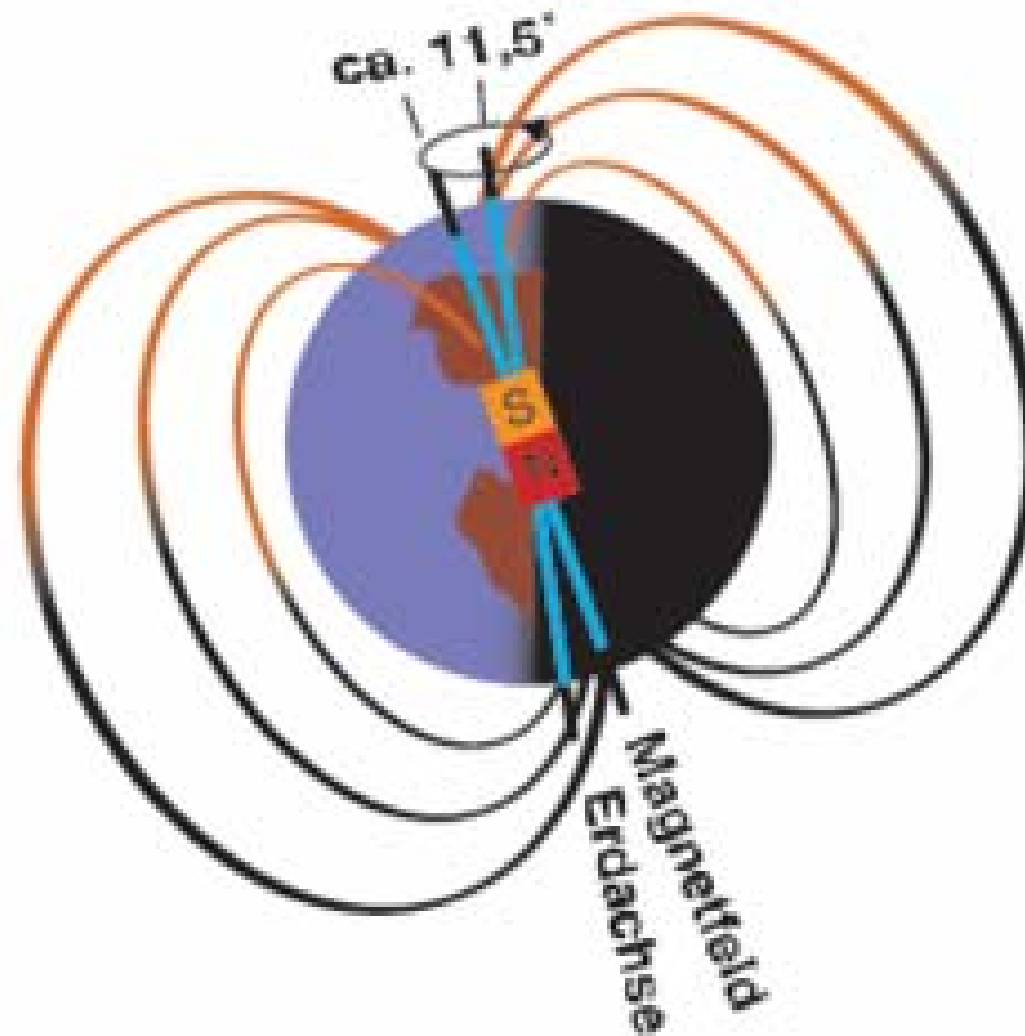
$$\text{Elektrisches Feld:} \quad \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 10^{-7} \cdot c^2 \frac{N}{A^2} \Rightarrow \epsilon_0 = \frac{1}{c^2} \frac{10^7}{4\pi} \frac{A^2}{N}$$

$$\text{magnetisches Feld} \quad \mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{N}{A^2}$$

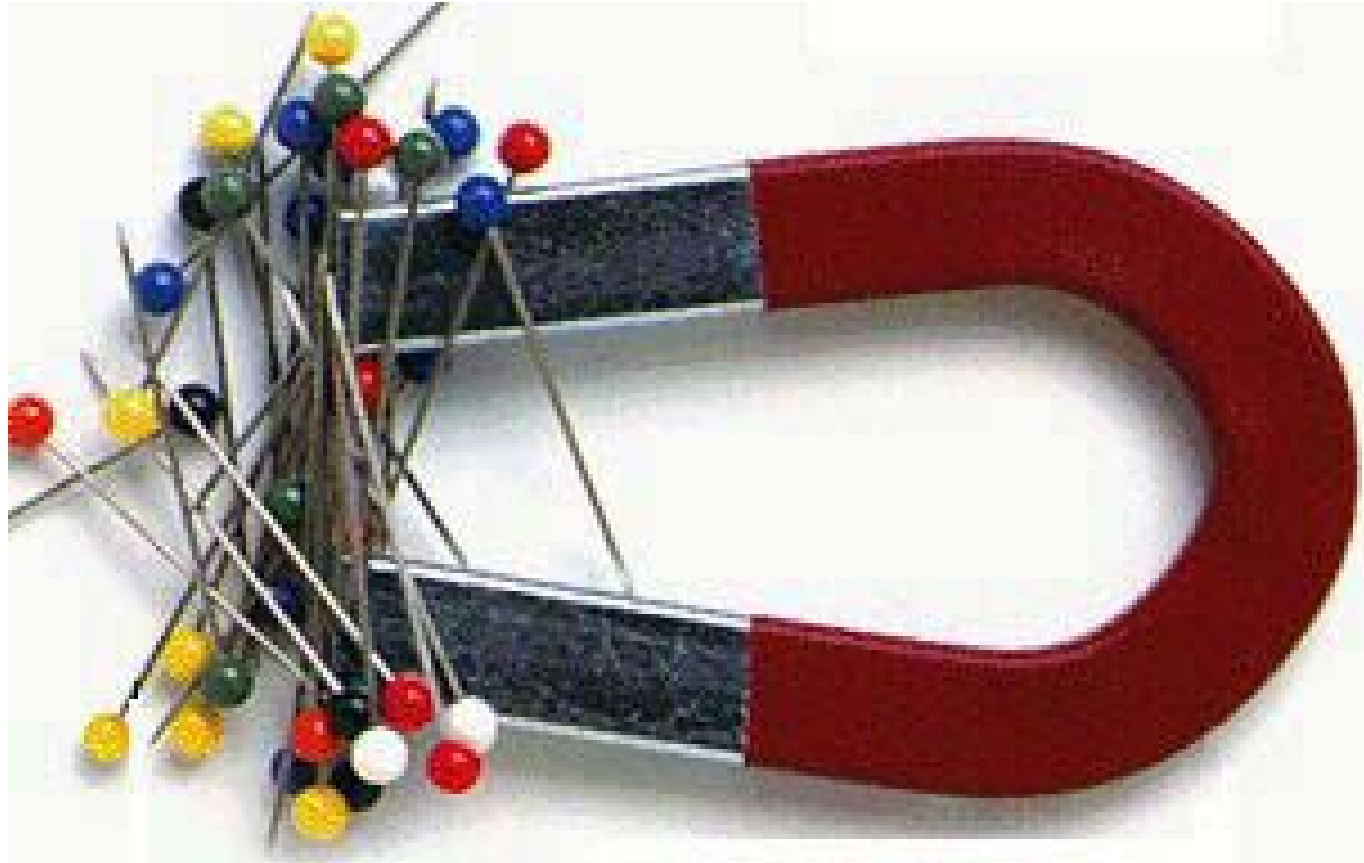
$$\Rightarrow \epsilon_0 \cdot \mu_0 = \frac{1}{c^2} \frac{10^7}{4 \cdot \pi} \frac{A^2}{N} \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{N}{A^2} = \frac{1}{c^2}$$

Stärke von Magnetfeldern - Beispiele

Erdmagnetfeld ($\sim 30 \mu\text{Tesla} = 0.3 \text{ Gauss}$)



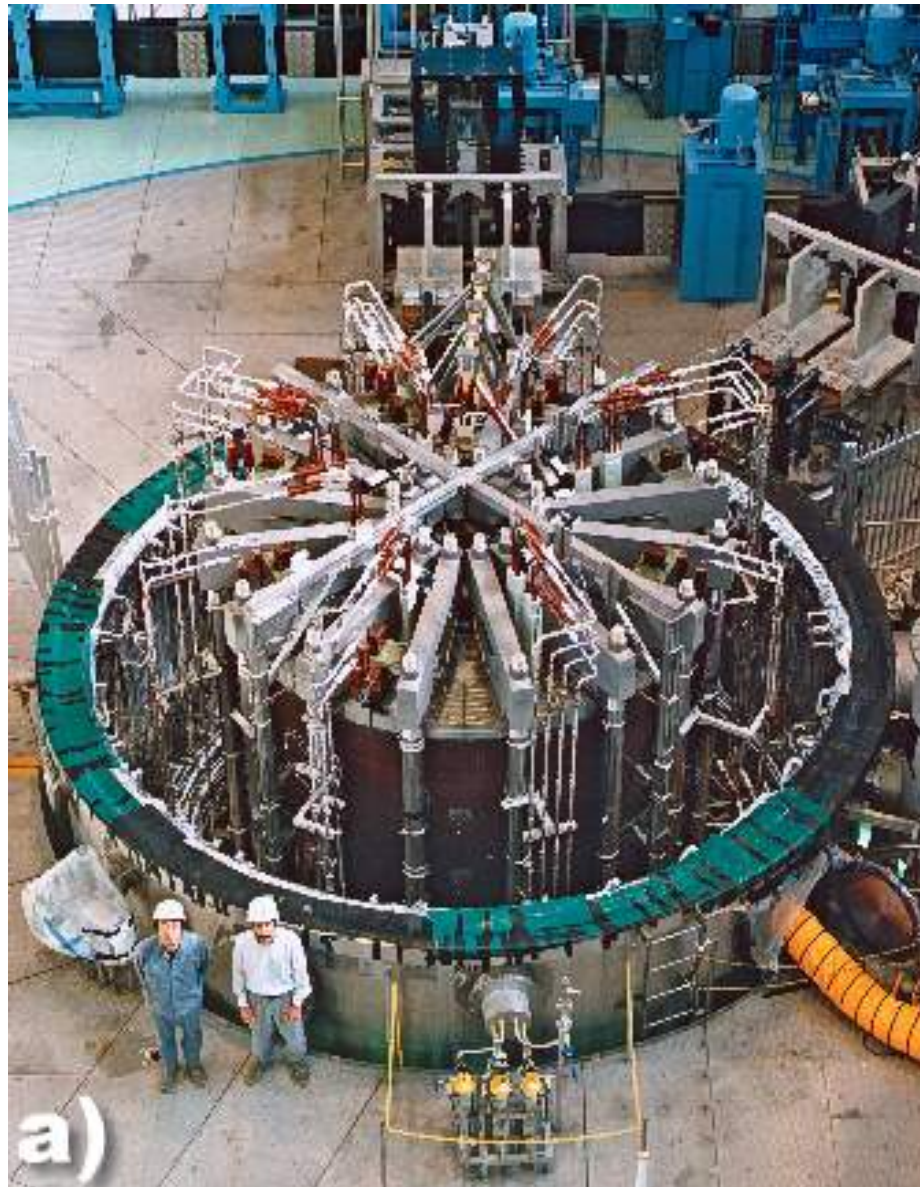
Permanentmagnete (bis ~ 1 Tesla)



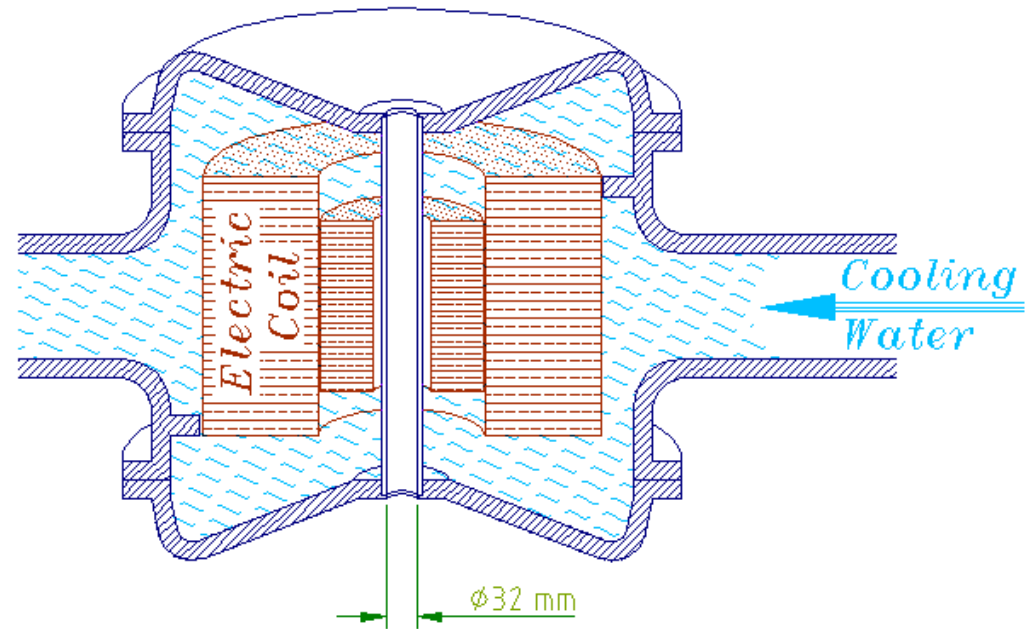
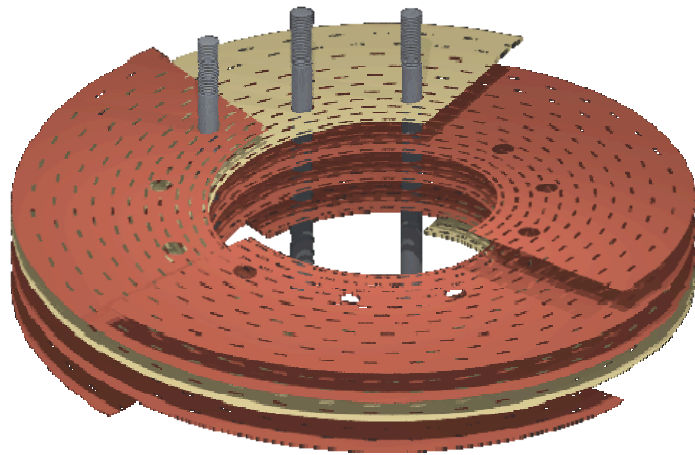
Supraleitende Magnete (bis ~ 20 Tesla)



Supraleitende Magnete (ITER TS model, 13 Tesla)



Resistive Bitter-Magnets (up to ~ 25 Tesla)



Resistive Bitter-Magnets (up to ~ 25 Tesla)



Magnetfelder kosmischer Objekte:

Tabelle 14.1. Physikalische Parameter kompakter kosmischer Objekte im Vergleich zur Sonne. Pulsar: magnetischer rotierender Neutronenstern (nach Ruder et al.)

	Sonne	Magnetischer Weißer Zwerg	Pulsar
Masse	$2 \times 10^{30} \text{ kg} = m_{\odot}$	$\sim 1 m_{\odot}$	$\sim (1-2) m_{\odot}$
Radius	$7 \times 10^5 \text{ km} = R_{\odot}$	$\sim 10^4 \text{ km} \approx 10^{-2} R_{\odot}$	$\sim 10 \text{ km} \approx 10^{-5} R_{\odot}$
Mittlere Dichte	$1,4 \text{ g/cm}^3$	$\sim 10^6 \text{ g/cm}^3$	$\leq 10^{15} \text{ g/cm}^3$
Rotationsperiode	27 d	100 s-Tage?	$10^{-3} - 10^3 \text{ s}$
Magnetfeldstärke	$\sim 10^{-4} - 10^{-3} \text{ T}$	$\sim 10^2 - 10^5 \text{ T}$	$\sim 10^7 - 10^9 \text{ T}$

Aus: Haken, Wolf; Atom- und Quantenphysik, Springer

Kosmische Magnetfelder ... (up $\sim 10^{11}$ Tesla !)



Beispiele für Magnetfeldstärken

Prozess	Feldstärke B
Hirnrindenaktivität	$50\text{fT} = 5 \cdot 10^{-14}\text{T}$
Kardiographische Felder	$100\text{pT} = 10^{-10}\text{T}$
Monitor im Abstand von 0.3m	$1\mu\text{T} = 10^{-6}\text{T}$
Erdmagnetfeld	$50\mu\text{T} = 5 \cdot 10^{-5}\text{T}$
Fahrgastraum einer Straßen- oder S-Bahn	$80\mu\text{T} = 8 \cdot 10^{-5}\text{T}$
Schwelle für messbare EKG Veränderung	0.1T
MR-Tomograph	$< 2\text{T}$
supraleitende Spulen	10T

