

Magnetfelder

Ursache der Lorentzkraft auf
bewegte Ladungen

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

$$[\vec{B}] = T \left(= \frac{N}{Am} = \frac{Vs}{m^2} \right)$$

$$\approx 10^4 \text{ G} \text{ au\beta}$$

magnet. Feldstärke (!)

B	E	-	H	D
Kraft !			Hilfsgrößen	
alle Quellen			freie Quellen	

IUPAP (Int'l Union of Pure and Applied Physics) definiert (leider):

- B: magnetische Flussdichte oder auch magnetische Induktion
- H: magnetische Feldstärke, früher auch magnetische Erregung

Bergmann-Schäfer; Alonso und Finn, Berkeley Physics Course u.v.a.m.:

B: magnetische Feldstärke
Lorentzkraft
fundamental
berücksichtigt alle Quellen (i. e. Ströme)

H: Hilfsgröße (à la D)

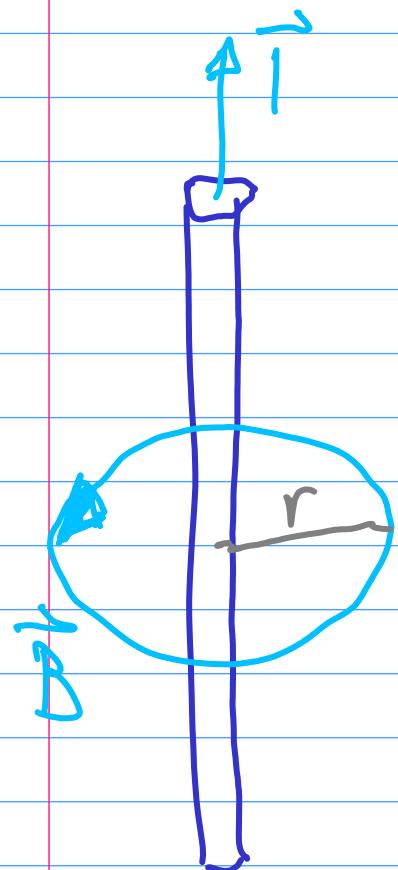
$$\vec{F} = +e \vec{v} \times \vec{B}$$



V_{proton}

INICHT! zeitumkehrinvariant

Ströme sind Ursache von \vec{B} -Feldern



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

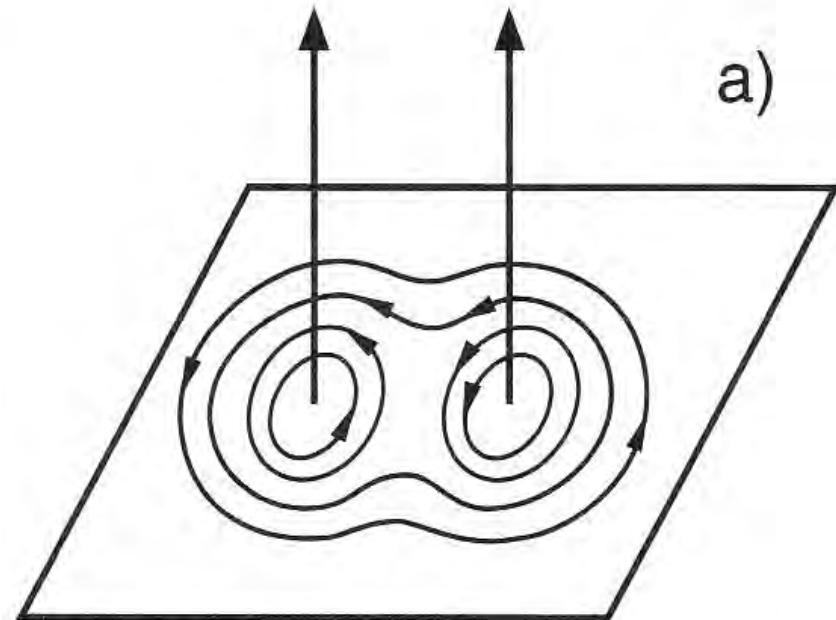
$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{N}{A^2}$$

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{1}{r} \left(\vec{I} \times \hat{e}_r \right)$$

$$= \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{\vec{I} \times \vec{r}}{r^2}$$

\vec{B} ist ein quellenfreies Wirbelfeld. $\neq E$

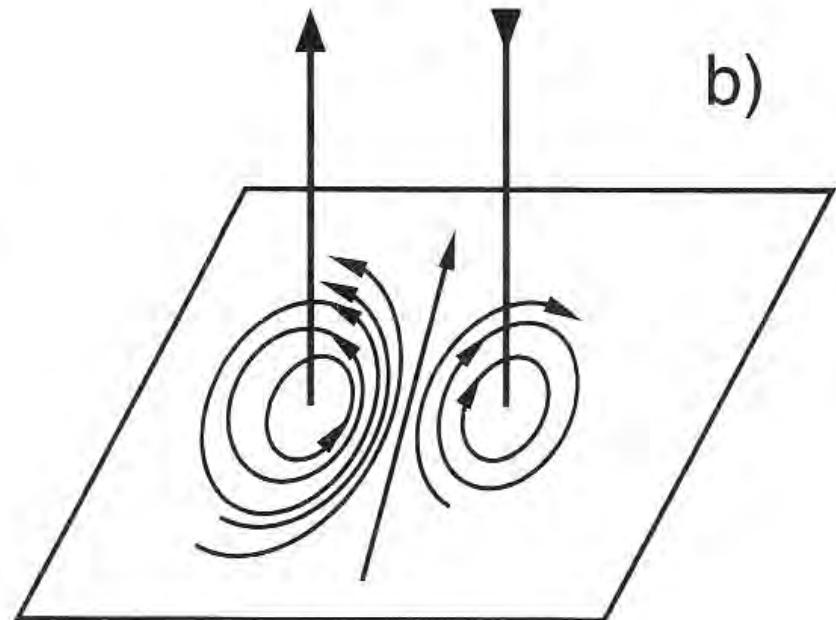
Kraft zwischen parallelen, stromführenden Leitern



a)

Stromrichtung
parallel

anziehend



b)

Stromrichtung
antiparallel

abstoßend

Oerstedt:

$$\vec{F} = l A n q \vec{v} \times \vec{B}$$

$$= l \underbrace{(n q v)}_{I} A \times \vec{B}$$

$$\vec{F} = l I + \vec{B}$$

$$\vec{F} = l \vec{I} \times \vec{B}_{\text{draht}}$$

$$= l \vec{I} \times \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{\vec{I} \times \vec{r}}{r^2} \Rightarrow F = l \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I^2}{r}$$

$$1 A \stackrel{?}{=} F = 10^{-7} N$$

bei 2 Leitern

1m Abstand
in Vakuum

∞ - lang

Definition der Stromstärke

Das Ampere ist die Stärke eines konstanten elektrischen Stromes, der, durch zwei parallele, geradlinige, unendlich lange und im Vakuum im Abstand von 1 m voneinander angeordnete Leiter von vernachlässigbar kleinem, kreisförmigem Querschnitt fließend, zwischen diesen Leitern je einem Meter Leiterlänge die Kraft $2 \cdot 10^{-7}$ N hervorrufen würde.

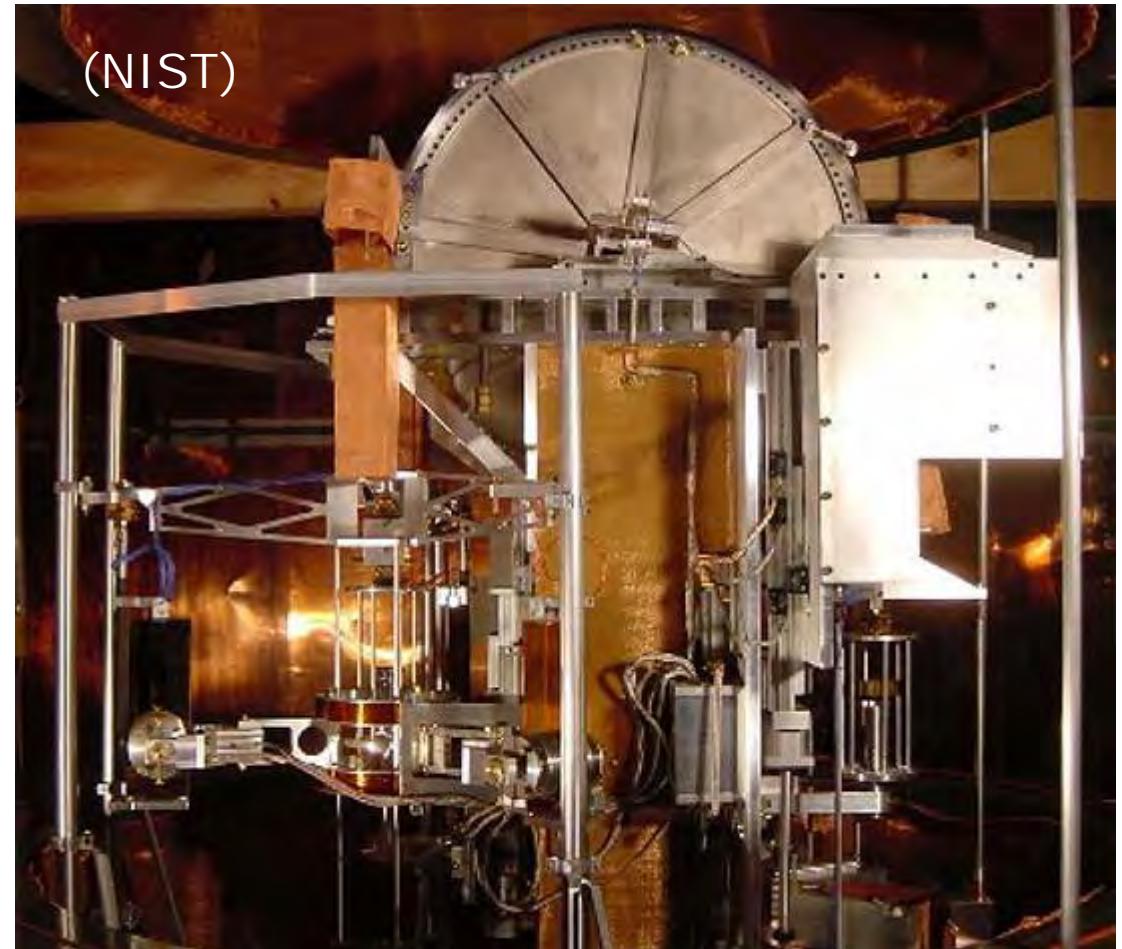
"unendlich", "... hervorrufen würde": das ist keine "Bauanleitung"

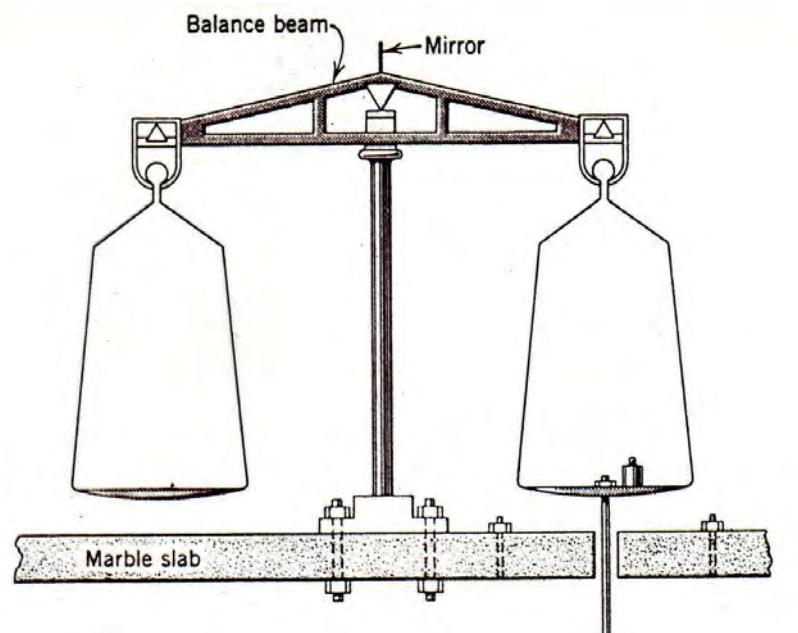
Bureau International des Poids et Mesures:

The realization to high accuracy of the A (basic unit of the SI), the Ω and the V (derived units of the SI) directly in terms of their definitions is difficult and time consuming. The best such realizations of the A are now obtained through combinations of realizations of the W, the Ω and the V.

Watt-Balance: An electronic kilogram?

mechanical force due to gravity and Lorentz force

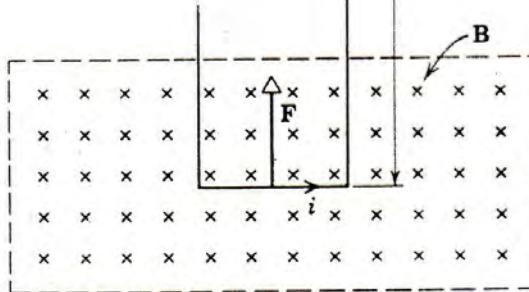




i

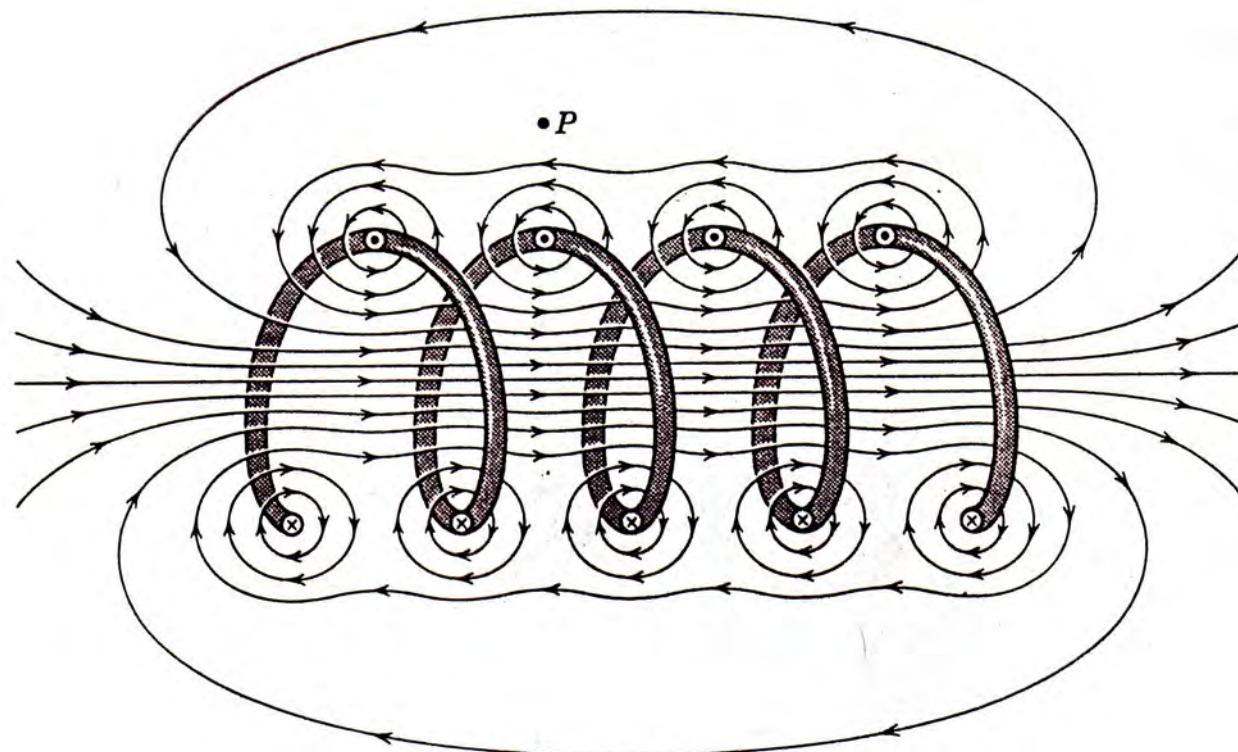
a

i i b



33-7

Magnetfeld einer Spule: Überlagerung von Drahtfeldern



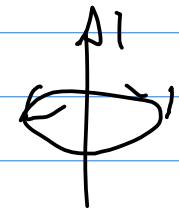
$$\int \vec{E} \cdot d\vec{s}$$

Potential

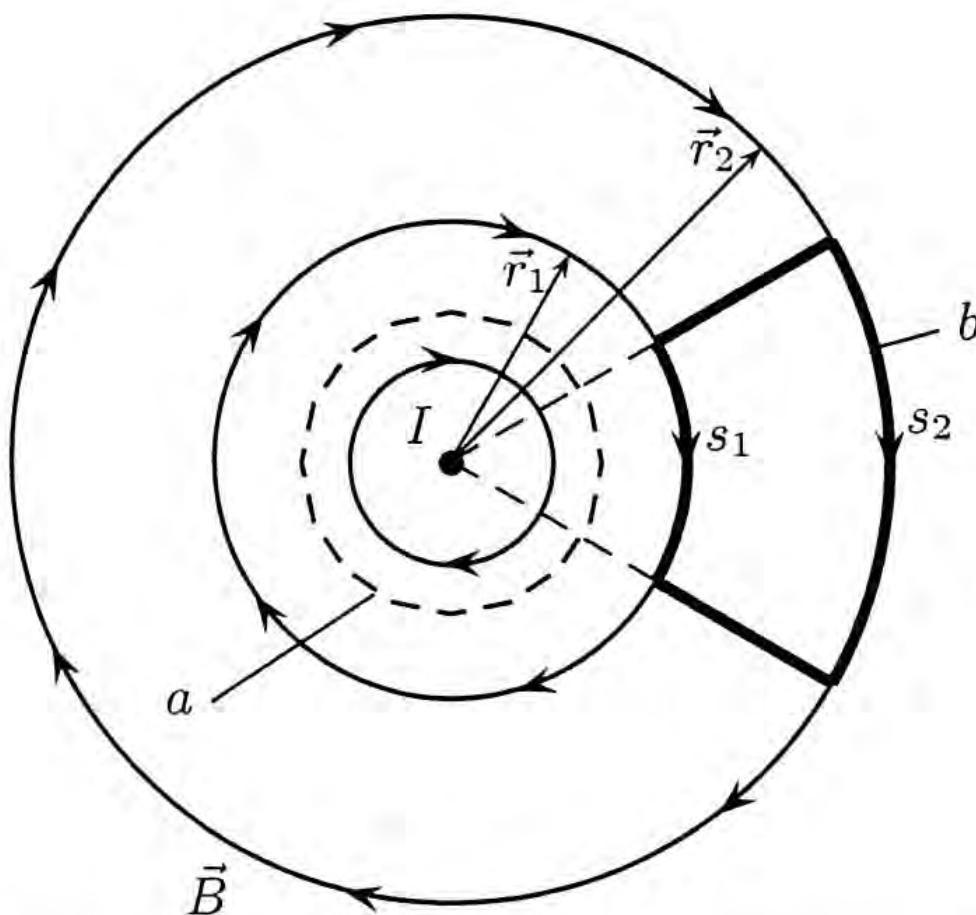
$$\int \vec{E} \cdot d\vec{s} = 0$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s}$$

Zirkulation



Zirkulation des \vec{B} -Felds $\oint \vec{B} d\vec{s}$



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

Bild 6.3: Zur Berechnung der Zirkulation des Magnetfeldes um einen stromdurchflossenen Draht: Kurve a - konzentrischer Kreis um die Drahtachse, Kurve b - Sektor eines Kreisringes.

Weg a: um den Draht

$$\oint_a \vec{B} d\vec{s} = B(r) \cdot 2\pi r = \mu_0 I$$

Weg b: den Draht nicht einschließend

$$\oint_b \vec{B} d\vec{s} = \frac{\mu_0}{2\pi} I \left(\frac{s_2}{r_2} - \frac{s_1}{r_1} \right) = 0$$

denn $\frac{s_1}{r_1} = \frac{s_2}{r_2}$

Allgemeiner Ergebnis:

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

für verteilten Strom mit Dichte \vec{j}

$$I = \int_A \vec{j} \cdot d\vec{A} :$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 \int_A \vec{j} \cdot d\vec{A}$$

Ampère'sches Gesetz

Magnetischer Fluss

$$\Phi_M := \int_A \vec{B} d\vec{A}$$

$$[\Phi_M] = \text{Wb}$$

(Weber)

$$\text{Wb} = \text{Vs} \approx \text{Tm}^2$$



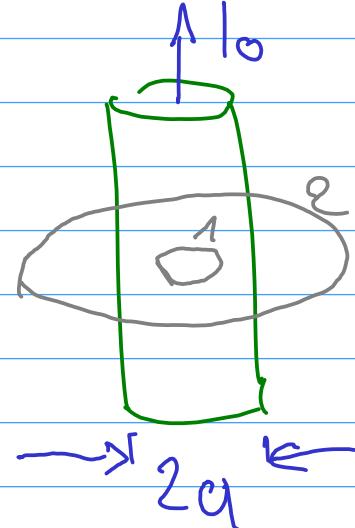
da \vec{B} ringförmig geschlossene

Feldlinien hat $\oint \vec{B} d\vec{A} = 0$

geschlossene Fläche

Anwendungen des Ampère-Gesetzes:

① Stromdurchflossener Draht



$$\text{außen: } B(r_2) \cdot 2\pi r_2 = \mu_0 I_0$$

$$\Rightarrow B(r_2) = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_0}{r_2}$$

$$\text{innen: } B(r_1) \cdot 2\pi r_1 = \mu_0 I_0 \frac{r_1^2}{a^2}$$

$$\Rightarrow B(r) = \frac{\mu_0}{2\pi} I_0 \frac{r}{a^2}$$

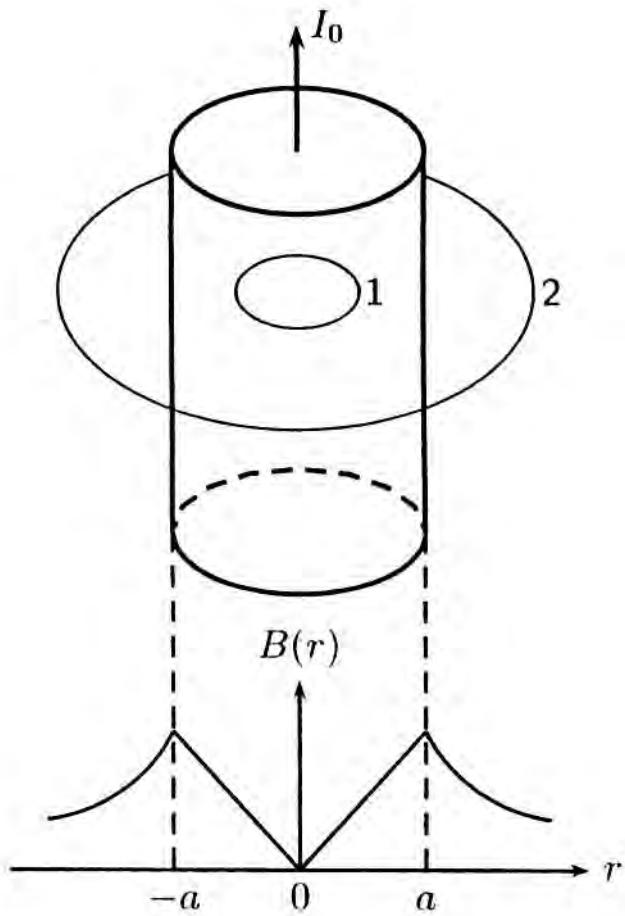
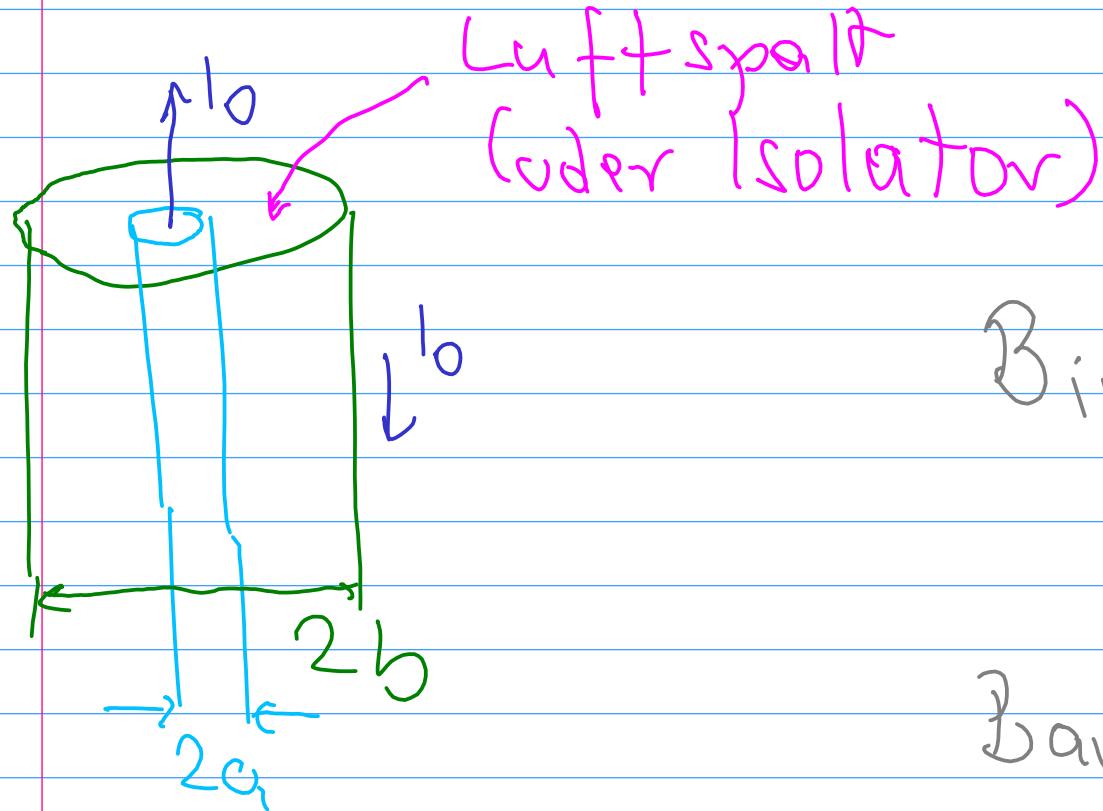


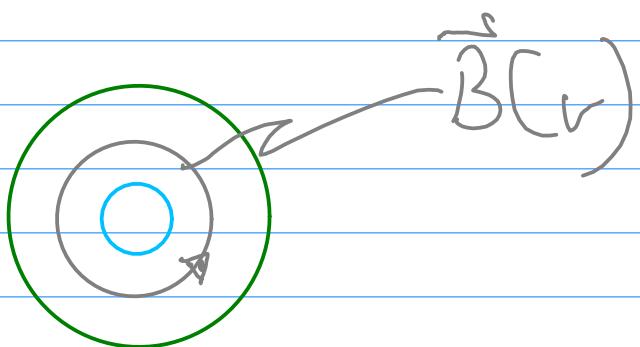
Bild 6.4: Das Magnetfeld innerhalb und außerhalb eines stromdurchflossenen Drahtes mit kreisförmigem Querßchnitt und konstanter Stromdichte.

② Koaxial Kabel

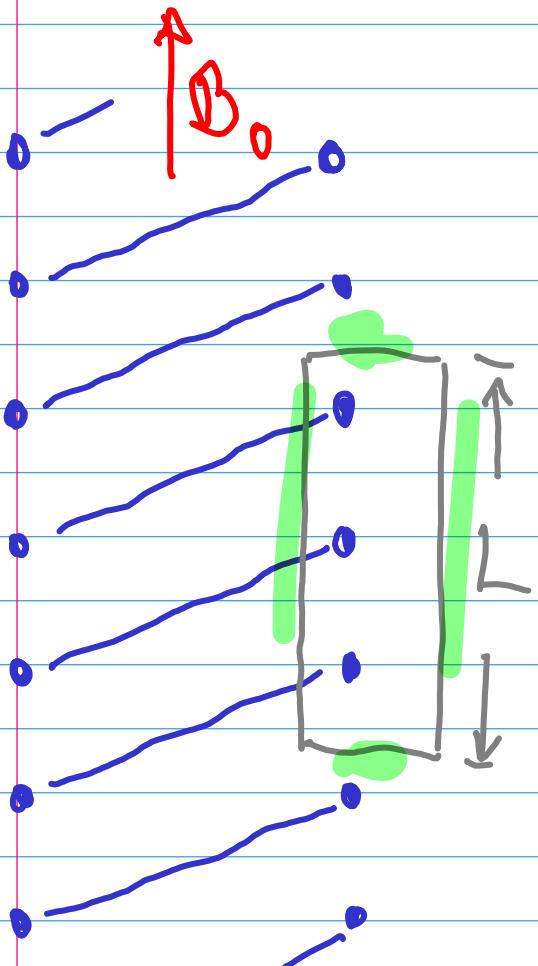


$$B_{\text{innen}} = \frac{\mu_0 l_0}{2\pi r}$$

$$B_{\text{außen}} = 0$$



3. Lange Spule



$$B_0 L - \text{Baußern } L = \mu_0 I N$$

$\rightarrow 0$

$$B_0 = \mu_0 \frac{N}{L} I = \mu_0 n I$$

Erreichbare B ?

$$B \uparrow \Rightarrow I \uparrow \quad \frac{N}{L} \uparrow$$

$$(10\text{cm})^3, 30T$$

Droht 1cm dick, $\rho_{Nb} = 2 \cdot 10^{-7} \Omega \text{m}$

$$\Rightarrow P \approx 45 \text{ MW}$$

H_2O gekühlte Spulen $\approx 25\text{T}$

Supraleitende Spulen $\approx 15\text{T}$

Kombi: 48T (Rekord)

Pulsfelder $\sim 100\text{T}$

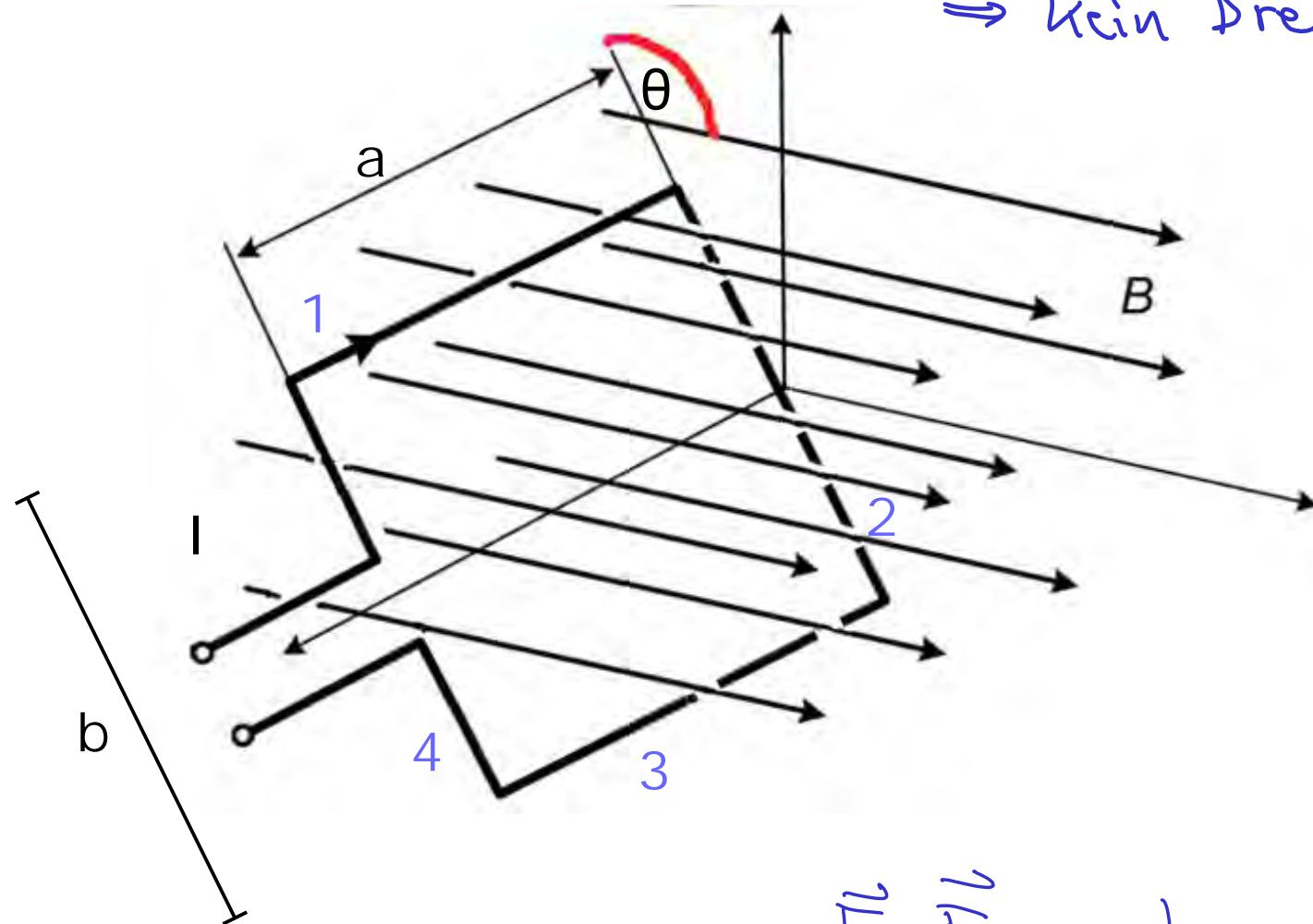
$$I \approx 10^7 \text{ A}$$

$$B \approx 100\text{T} \quad F = lIB = 10^{17}\text{N}$$

$$l = 1\text{cm}$$

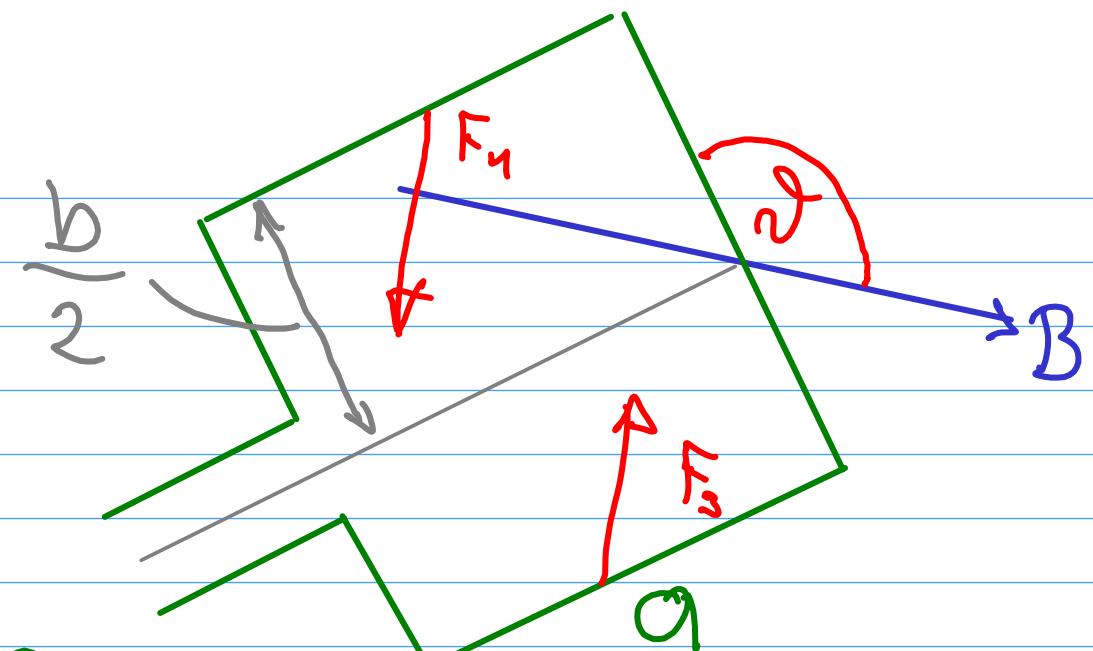
$$\rightarrow \frac{1\text{Tonne}}{1\text{cm}}$$

Drehmoment auf eine Stromschleife



\vec{F}_2, \vec{F}_4 : in Schleifenebene
⇒ kein Drehmoment

\vec{F}_1, \vec{F}_3 : entgegengesetzt
jeweils $1aB$



$$|F_1| = |F_3| = I a B$$

$$\text{Hebelarm: } \frac{b}{2} \sin \vartheta$$

$$\text{Drehmoment: } \tau = 2 \cdot I a B \frac{b}{2} \sin \vartheta$$

$$\tau = I a b B \sin \vartheta$$

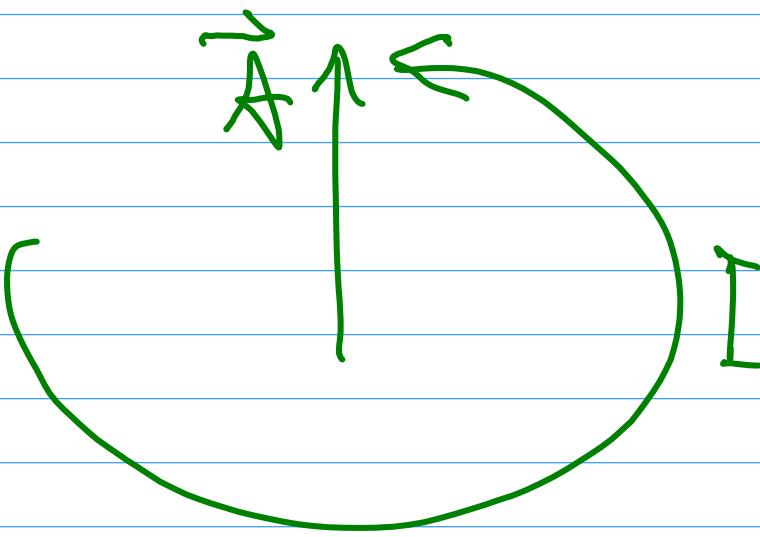
$$\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B}$$

$$\vec{\mu} = I \vec{A}$$

(N Windungen: $\mu = NIA$)

Vorzeichen?

Recht-Hand-Regel



Potentielle Energie?

$$V = \int_{90^\circ}^{\vartheta} \tau d\vartheta = 1/AB \int_{90^\circ}^{\vartheta} \sin \vartheta' d\vartheta'$$

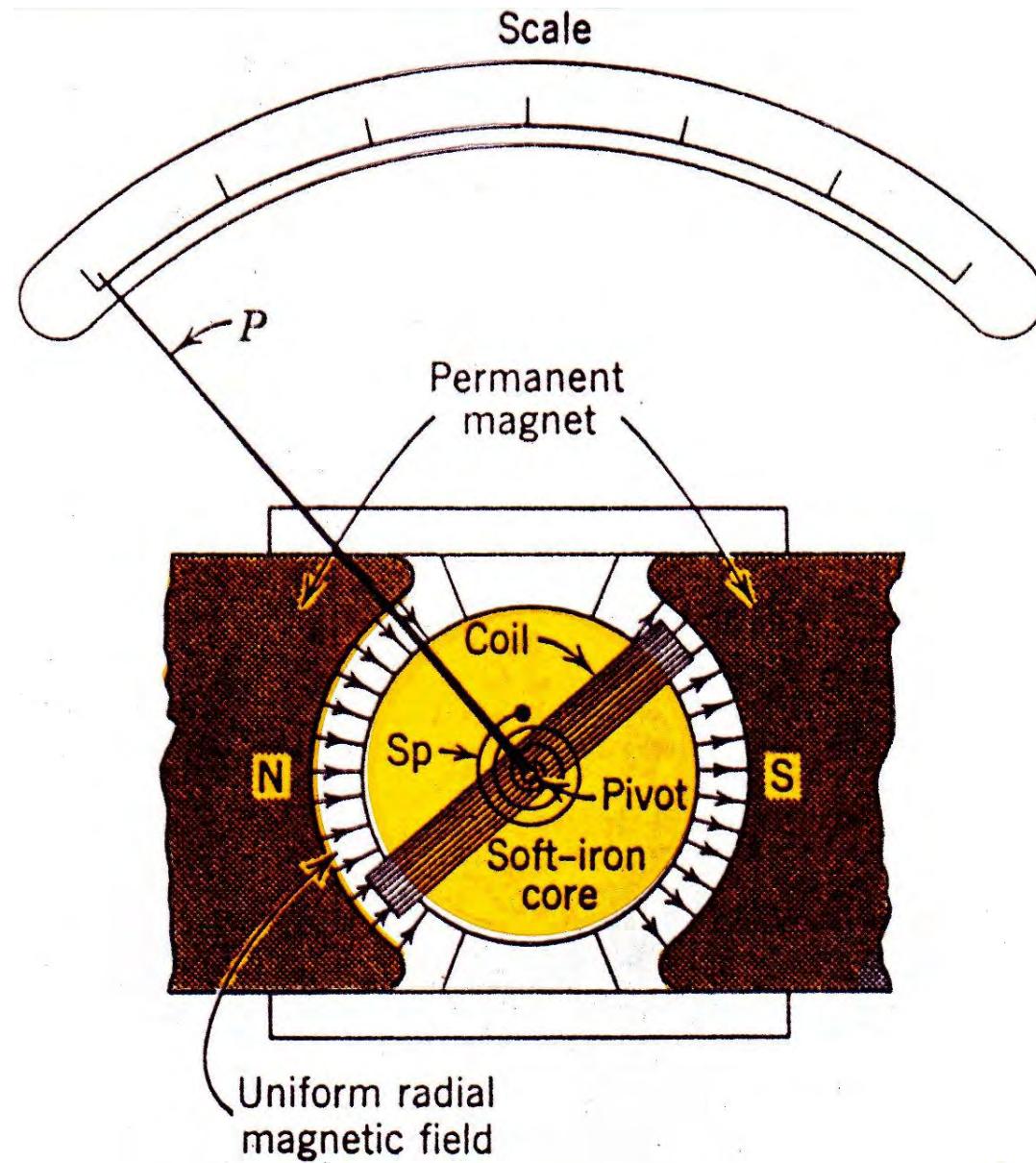
$$\vec{m} \perp \vec{B} \quad \approx \text{Schleife } \parallel B$$

$$= -\mu B \cos \vartheta$$

$$\text{Also: } V_0 = -\vec{\mu} \vec{B}$$

$$(\text{vgl. } V_E = -\vec{p} \vec{E})$$

Drehspulmessinstrument



Elektromotörchen

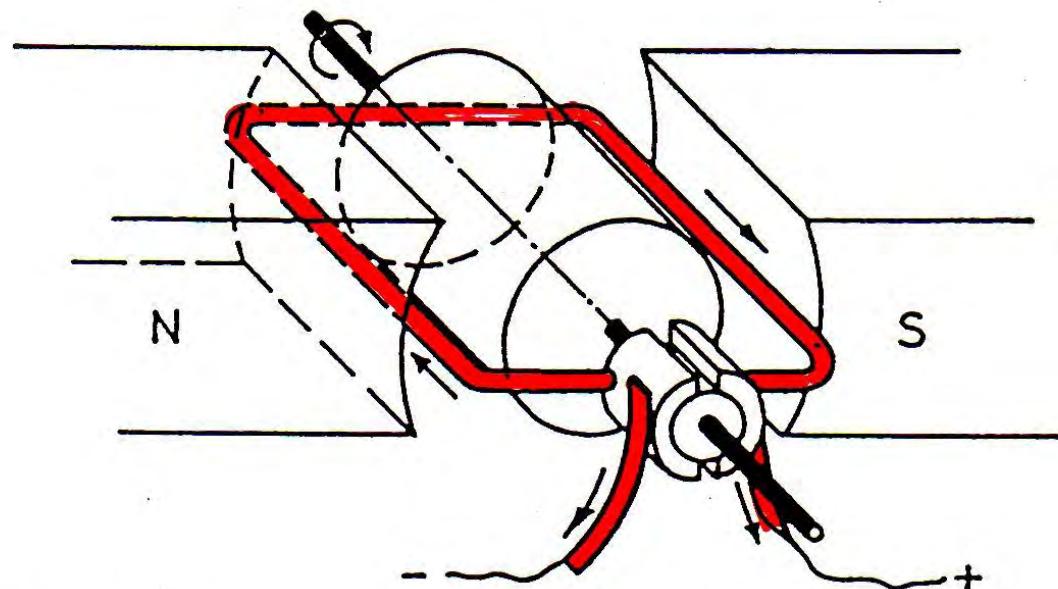


Abb. 352 Prinzip einer Gleichstrommaschine mit zweiteiligem Kollektor

Nettes altes Video:

Magnetic river

https://www.youtube.com/watch?v=OI_HFnNTfyU

