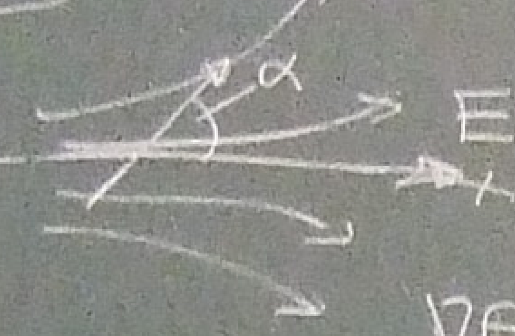
$$F_x = \vec{p} \cdot \underbrace{\text{grad}\, E_x}_{\vec{\nabla} \otimes \vec{E}}$$

Dyadisches Produkt




$$E = \begin{pmatrix} E(x) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \qquad \nabla E = \begin{pmatrix} \partial E / \partial x \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$F_x = \vec{p} \cdot \begin{pmatrix} \partial E / \partial x \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = p_x \cdot \frac{\partial E}{\partial x} = |p| \cdot \cos\alpha \cdot \frac{\partial E}{\partial x}$$

$$\boxed{F_i = p_j \partial_j E_i} = \sum_j p_j \partial_j E_i$$

$i = \{x, y, z\}$

$\partial_i = \{\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z\}$

Einstein'sche Summenkonvention: Summiert über alle doppelt auftauchenden Indize

## Elektrische Arbeit und Leistung

Arbeit: $W_{el} = Q \cdot U$

Einheit $1 V \cdot A \cdot s = 1 Ws$

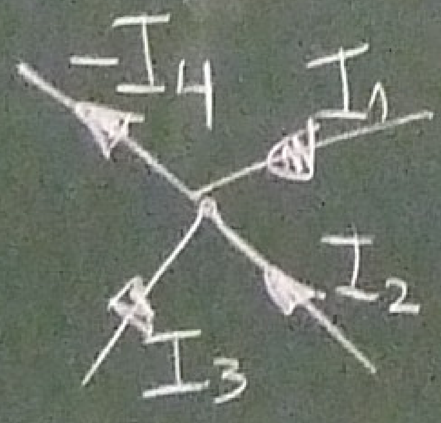
Leistung $P = \dot{W}_{el} = U \cdot \frac{dQ}{dt} = U \cdot I$. Einheit: Watt $= V \cdot A$

Mit dem ohm'schen Gesetz $P = R \cdot I^2 = \frac{U^2}{R}$

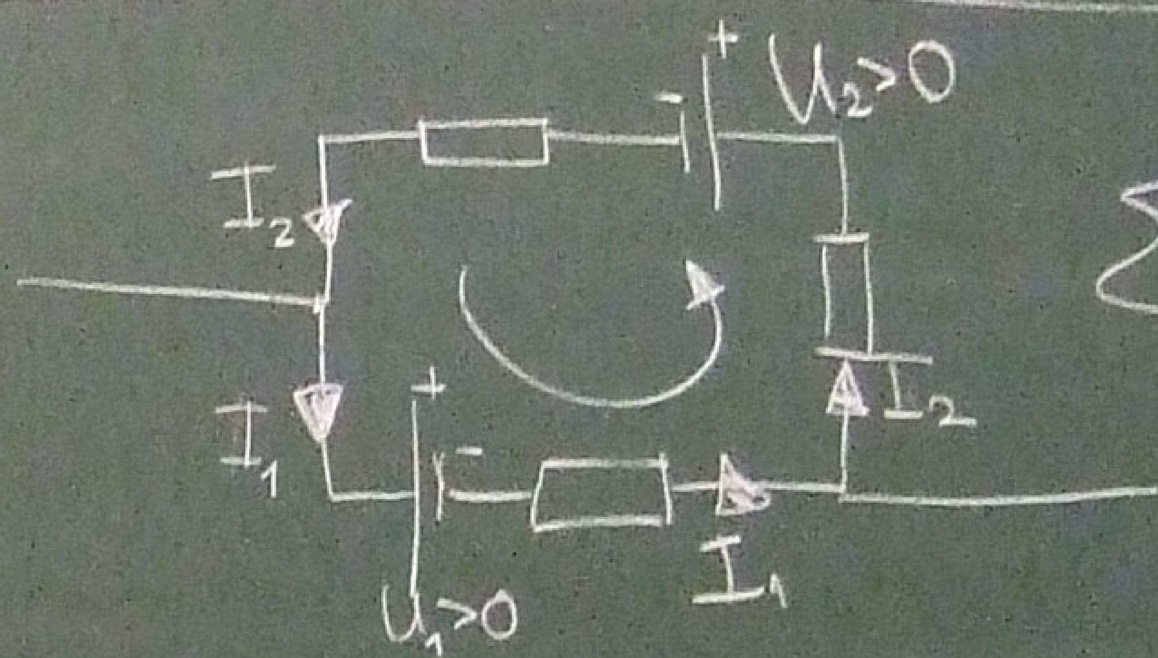
## Elektrische Stromkreise (Kirchhoff'sche Regeln)

Verzweigungspunkt (Knoten)

$$I_1 + I_2 + I_3 + I_4 = \sum_i I_i = 0$$




Geschlossener Stromkreis (Masche)



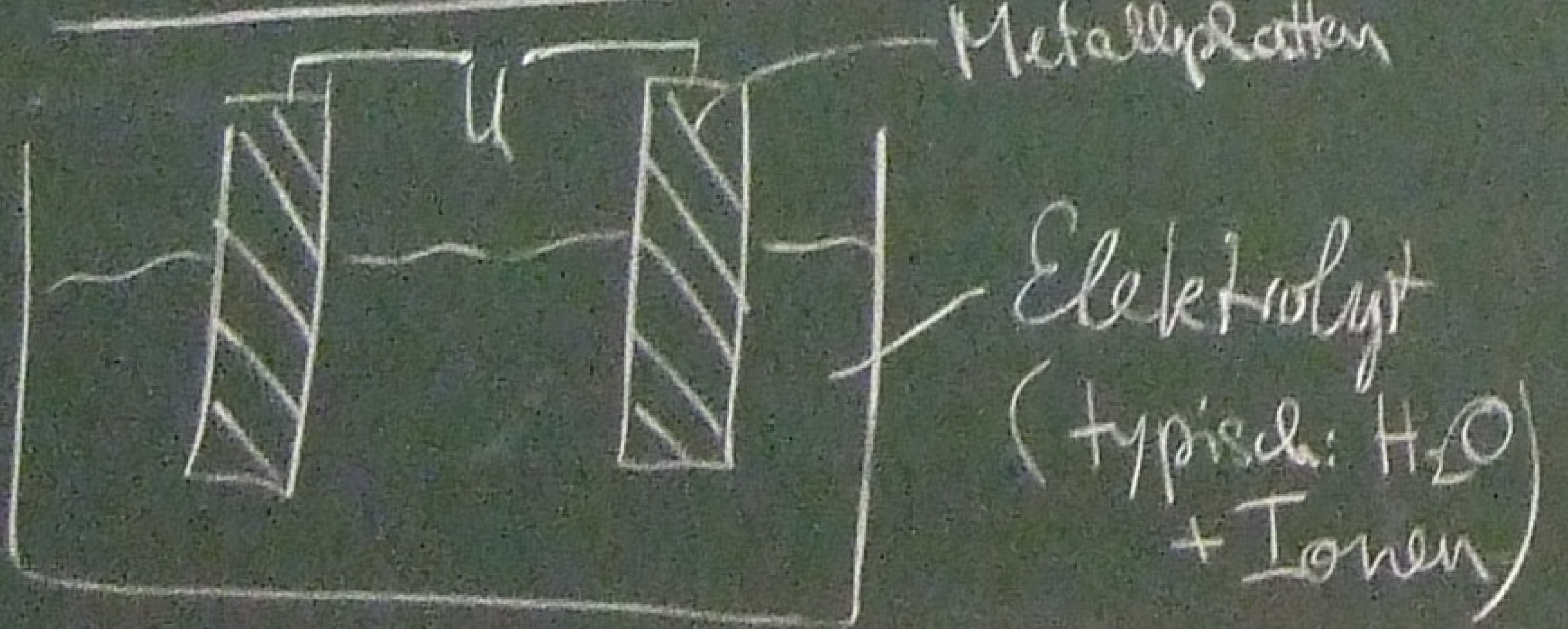

$$\sum_i I_i R_i + \sum U_i = 0$$

Spannung über Widerstand

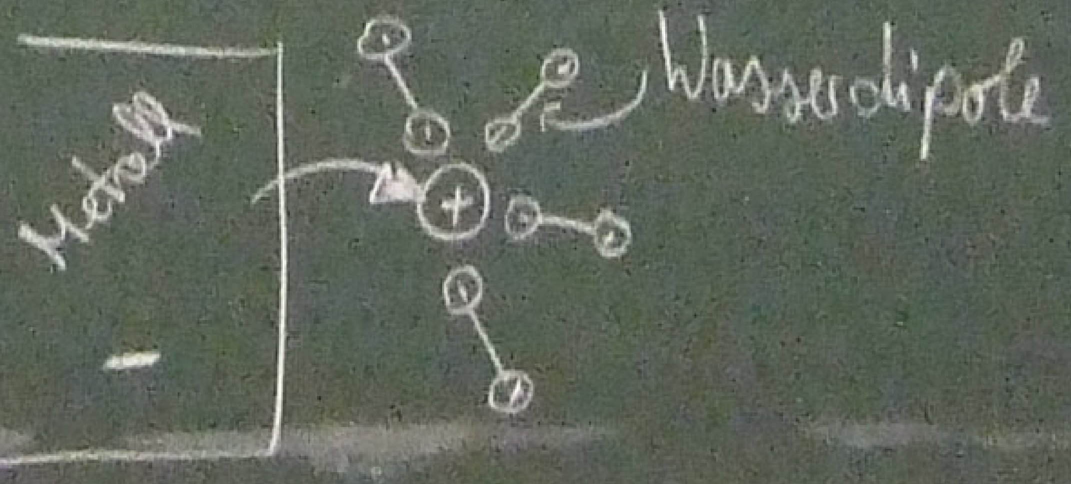
Spannungsquelle

Spannung $U_i$ positiv, wenn Umlaufsinn von + nach – in der Spannungsquelle.

## Chemisches Element

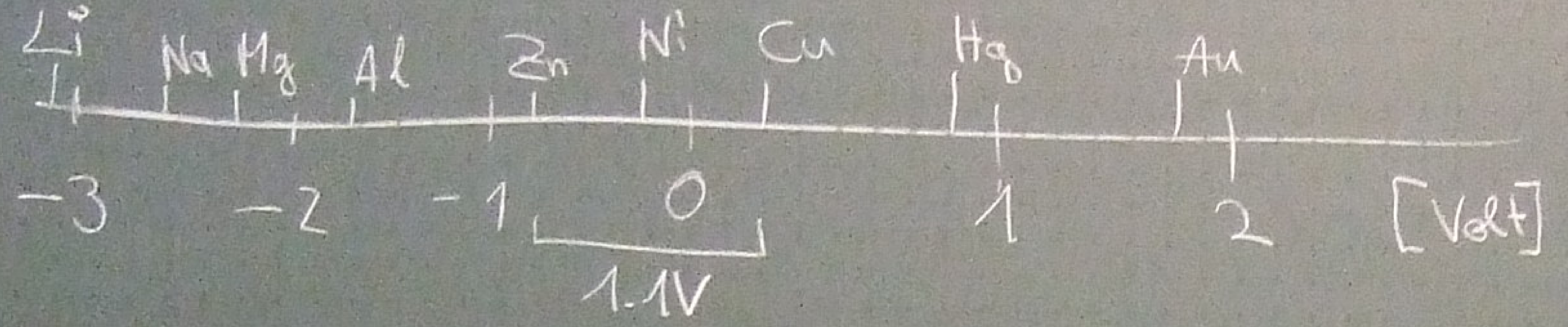



Metallatome sind nicht löslich, aber Metallionen aufgrund der Polarisierbarkeit von $H_2O$.




Ionen gehen so lange in Lösung, bis Elektroden stark genug aufgeladen sind (→ chem. Pot.)

Aufladung ist materialabhängig ~> Elektronegativitätsskala




Daniell-Element


durchlässig für $SO_4^{2-}$

Trennwand für Spannung alleine nicht nötig (sonst schlägt Cu auf Zn Elektrode nieder)

## Magnetismus

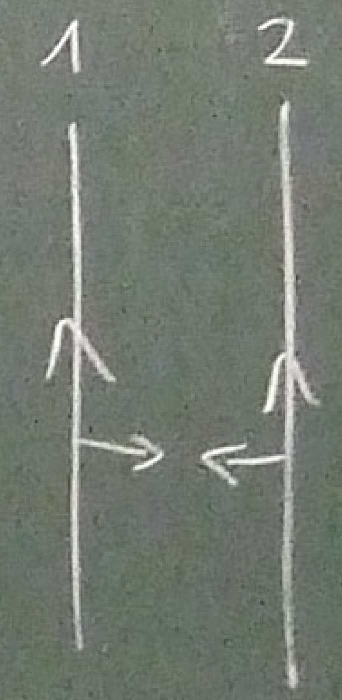
### Das magnetische Feld

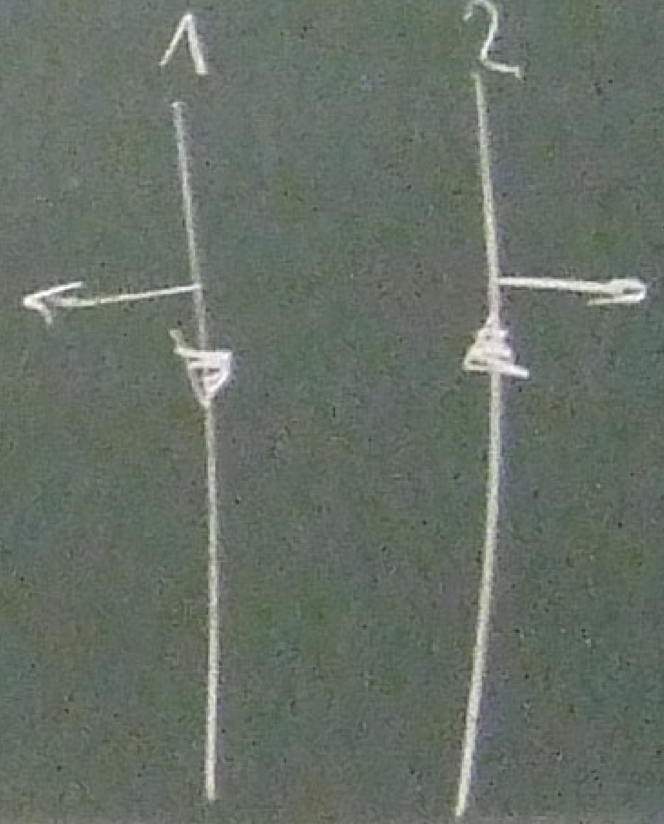
Ruhende Ladungen: Coulombkraft; $\vec{E}$

Bewegte Ladungen: Zusatzkraft ≙ Lorentzkraft ~> $\vec{B}$

Zusatzkraft am einfachsten an stromdurchflossenen Leitern zu demonstrieren (Leiter sind neutral geladen)

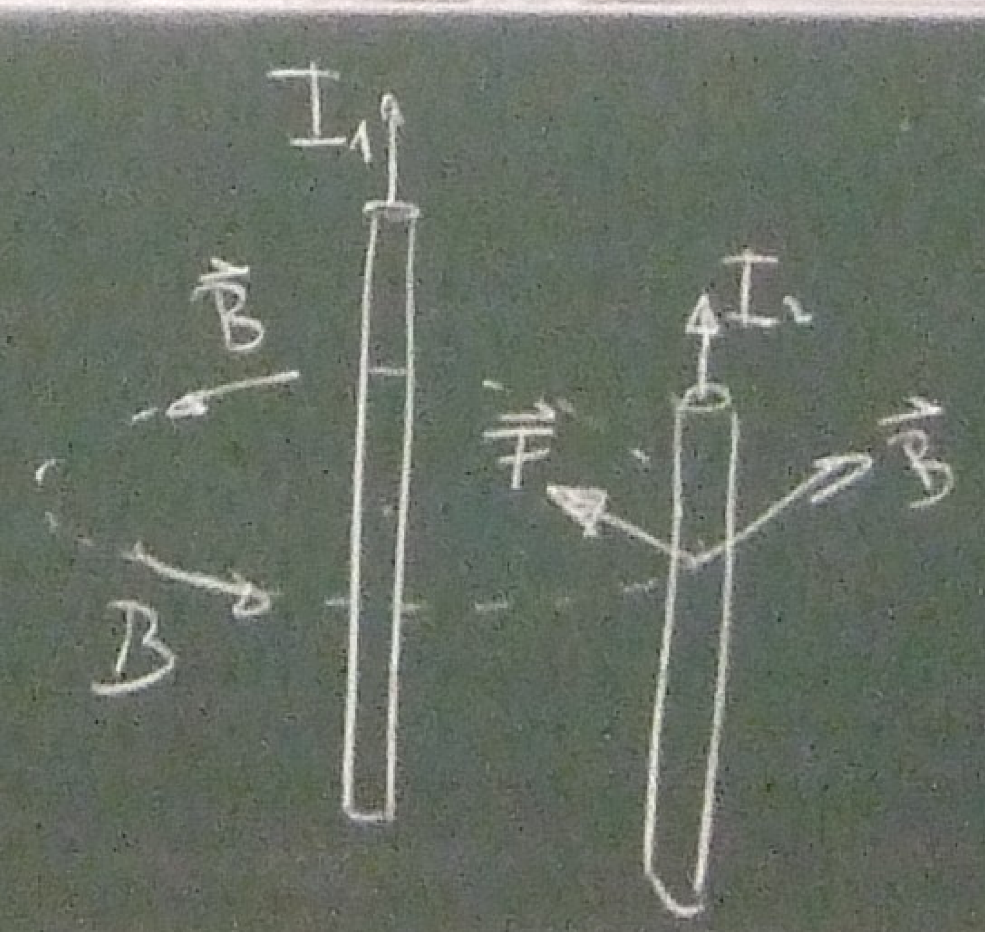
Gleichgerichtete Ströme ziehen sich an




Entgegengesetzte Ströme stoßen sich ab.

Veränderung des Raumes durch Strom in 1 am Ort von 2 wird (wieder) durch ein Feld beschrieben: das Magnetfeld $\vec{B}$




$$\boxed{\frac{F}{L} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_1 I_2}{r}}, \quad \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{Am}$$

Kraft pro Leiterlänge L

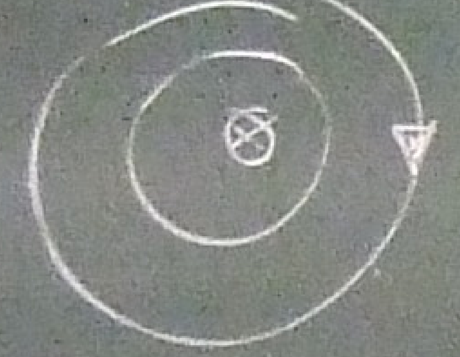
Messung der Kraft ~> Definition der Stromstärke I

Analog zum elektrischen Feld: B ist Kraft „pro Strom"

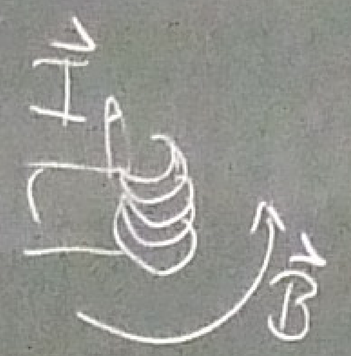
$$\frac{F}{L} = \underbrace{\frac{\mu_0}{2\pi}\frac{I_1}{r}}_{B} I_2$$

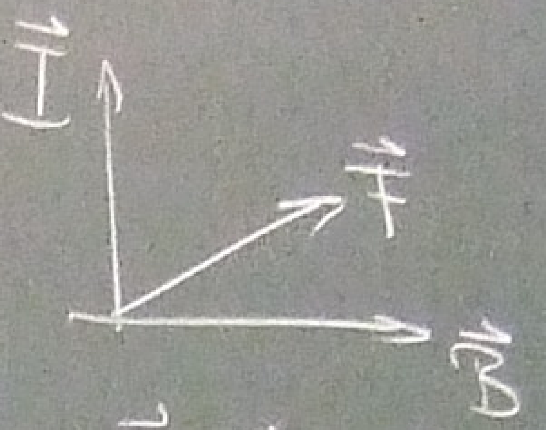
, geometrisch

$$\frac{\vec F}{L} = \vec I \times \vec B$$

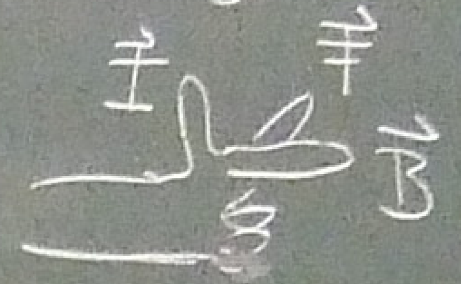


rechte Hand Regel

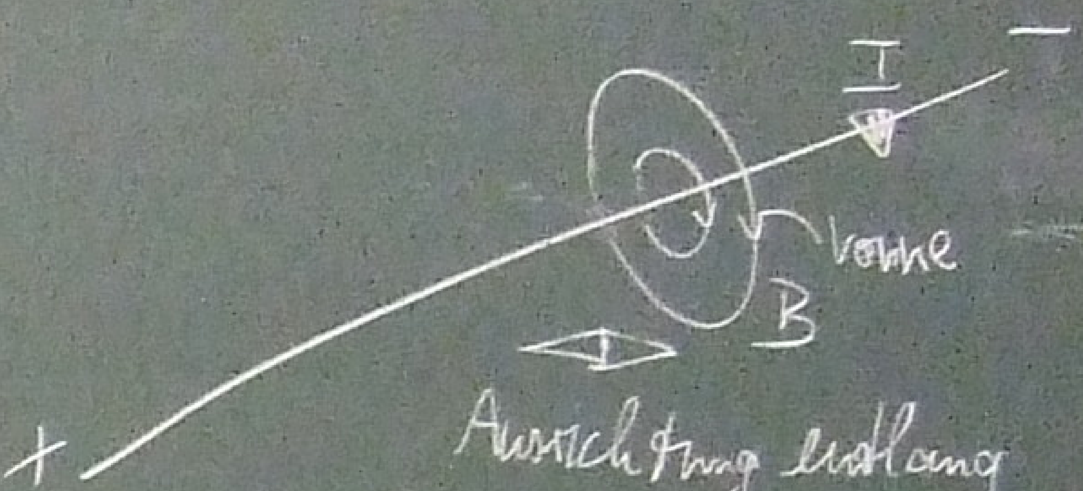



$\vec F \sim \vec I \times \vec B$




Nachweis von Magnetfeldern mit Magnetnadeln




Ausrichtung entlang von B

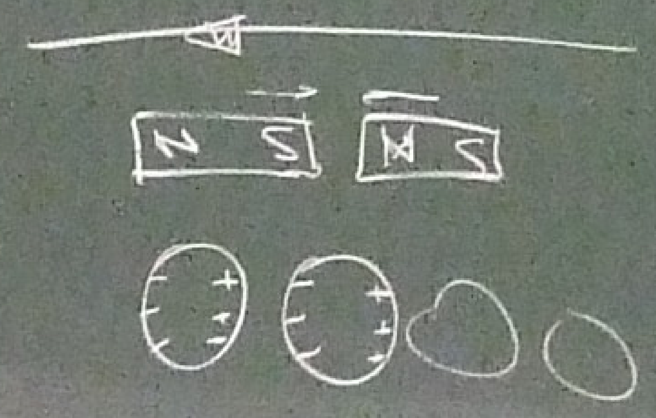
Einheit Magnetfeld: $1\,\text{Tesla} = 1\,T = \frac{N}{mA} = \frac{Nm}{m^2 A} = \frac{Js}{m^2 C} = \frac{Vs}{m^2}$

$A = C/s$

$\rightsquigarrow$ Einheit $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \left[\frac{N\cancel{m}}{\cancel{m}A^2} = \frac{N}{A^2} = T\frac{m}{A} = \frac{Vs}{m^2}\frac{m}{A} = \frac{Vs}{mA}\right]$

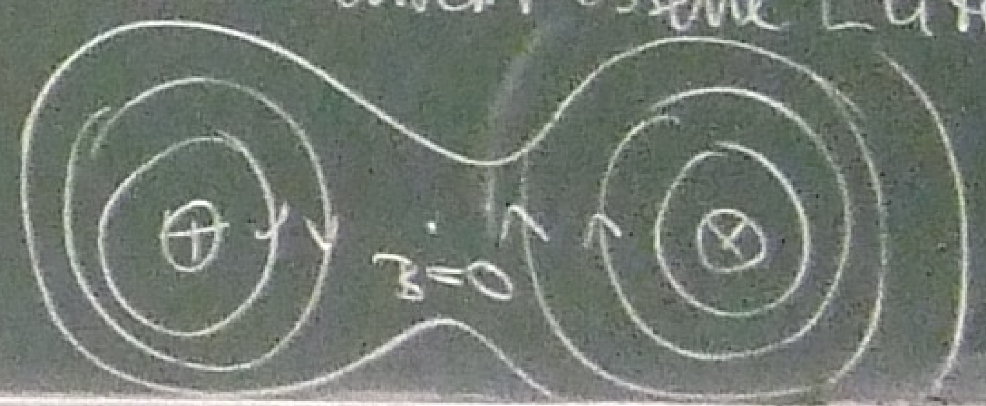
Feldlinien sichtbar machen mit Eisenteilchen

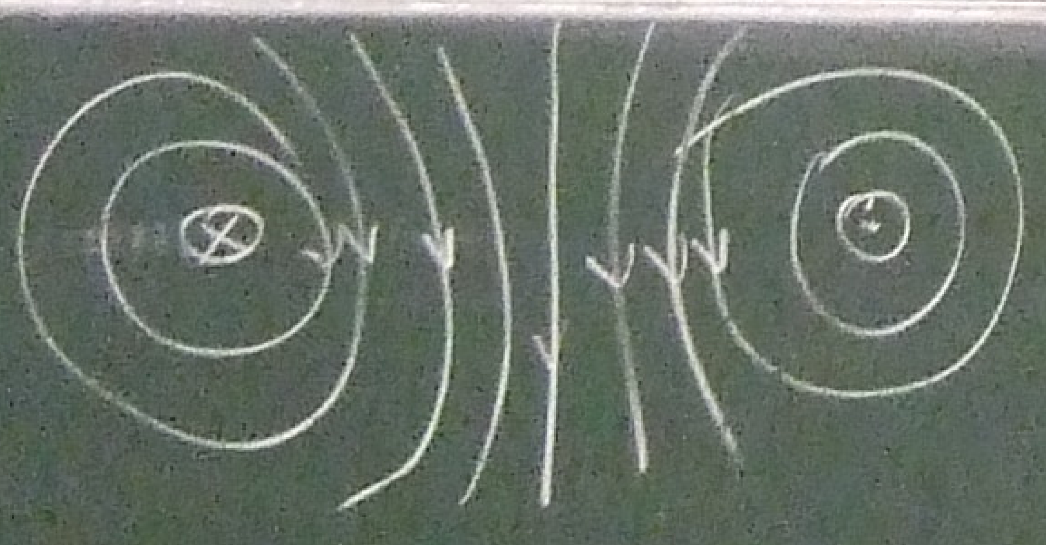
→ kleine induzierte Magnete → Ausrichtung




Feld eines Leiters

Zwei stromdurchflossene Leiter

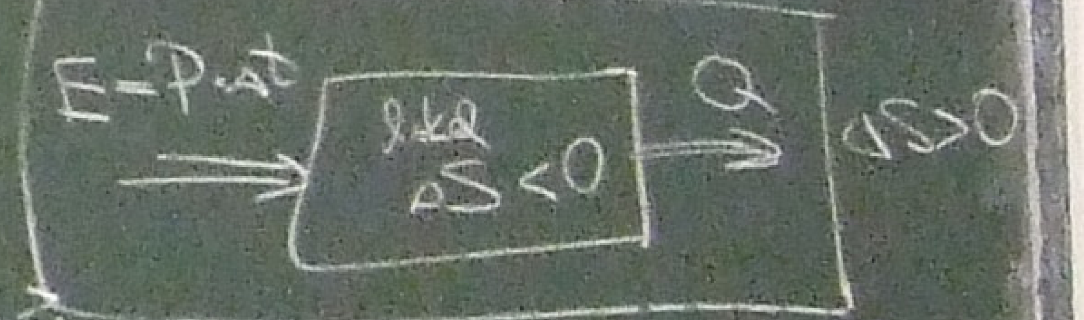


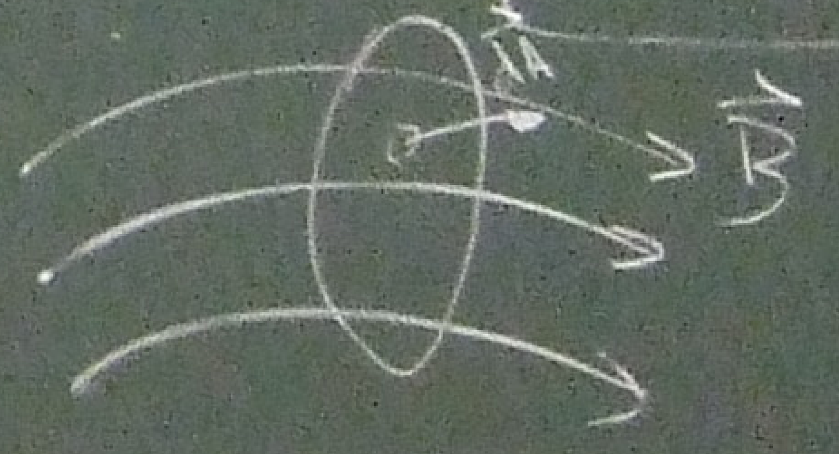



Magnetische Fluß

analog zum elektrischen Fluß

$\phi = \iint \vec B\, d\vec A$ : Magnetischer Fluß




Einheit $[\phi] = T m^2$

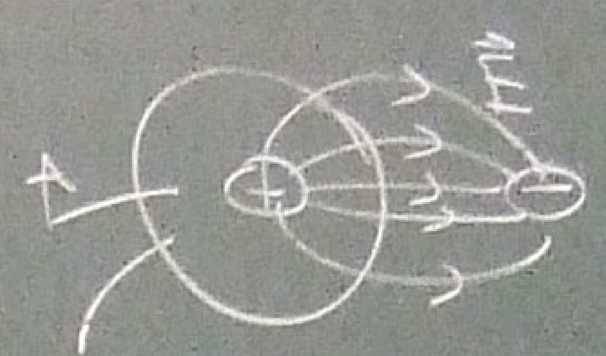
Da magnetischen Feldlinien in sich geschlossen sind, ist das Analogon zum Gauß'schen Satz besonders einfach:


$$\boxed{\oint_A \vec{B}\, d\vec{A} = 0} \sim \text{Quellenfreiheit des magnetischen Feldes}$$

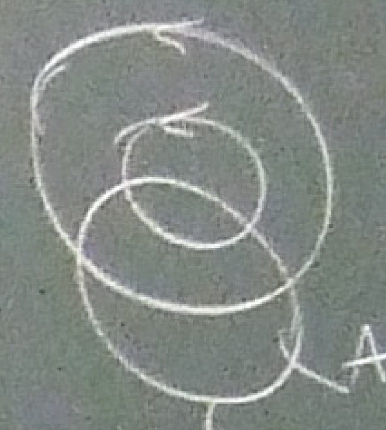
2. Maxwell'sche Gesetz

$$= \iiint \operatorname{div} \vec{B}\, dV \sim \boxed{\operatorname{div} \vec{B} = 0}$$

Wdh:




$$\iint \vec{E}\, d\vec{A} = Q/\varepsilon_0$$




$$\iint \vec{B}\, d\vec{A} = 0$$

geschlossene Fläche

## Rotation des Magnetfeldes?

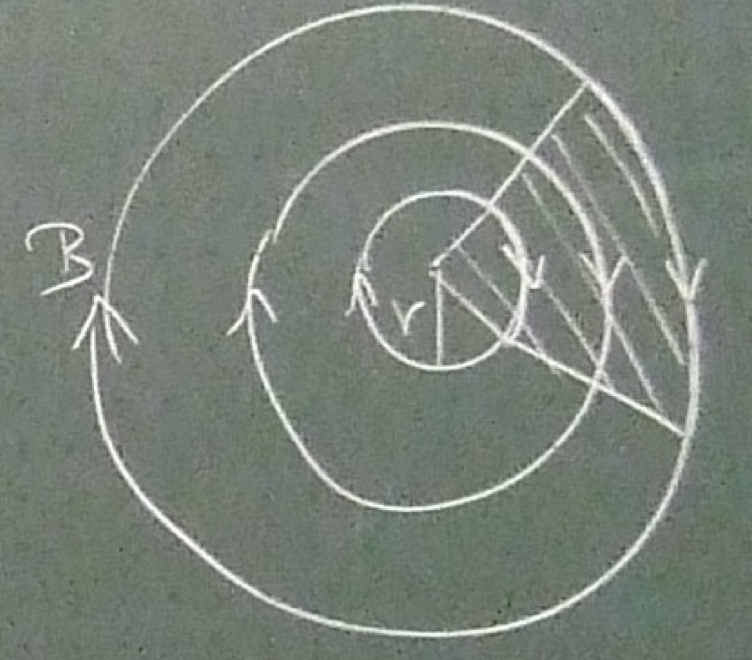
(Wdh: elektrisches Feld: $\operatorname{rot} \vec{E} = 0$

(statischer Fall) wegen $\vec{E} = -\operatorname{grad} \varphi$

$\operatorname{rot} \cdot \operatorname{grad} \varphi = 0$

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

Linienintegral

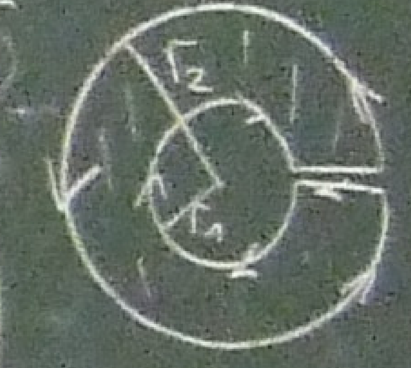



Entlang eines Kreises

$$\oint \vec{B}\, d\vec{s} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \cdot 2\pi r = \mu_0 I$$

Zwei Kreisscheiben

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




Verallgemeinerung $\oint \vec{B}\, d\vec{s} = \mu_0 I$. Ampère'sche Gesetz

Linienintegral des magnetischen Feldes über eine geschlossene Kurve ist gleich $\mu_0$ mal dem eingeschlossenen Strom.

Für beliebige Stromverteilung $I = \iint_A \vec{j}\, d\vec{A}$ ← Stromdichte $= \frac{\text{Strom}}{\text{Fläche}}$

$$\oint \vec{B}\cdot d\vec{s} = \mu_0 \iint_A \vec{j}\cdot d\vec{A} \rightsquigarrow \boxed{\operatorname{rot}\vec{B} = \mu_0 j}$$

$$= \iint_A \operatorname{rot}\vec{B}\cdot d\vec{A}$$

Stokes-Satz

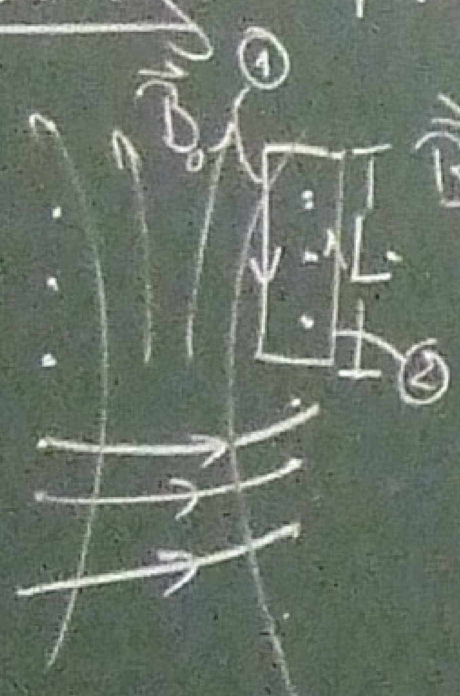
( später: dynamische Zusatz: $+\frac{1}{c^2}\dot{E}$

## Übersicht

$$\oiint \vec{E}\, d\vec{A} = \frac{Q}{\varepsilon_0} \quad \text{und} \quad \oint \vec{E}\, d\vec{s} = 0$$

$$\oiint \vec{B}\, d\vec{A} = 0 \quad \text{und} \quad \oint \vec{B}\, d\vec{s} = \mu_0 I$$

## Anwendung: Magnetfeld einer langen Spule




$\vec{B}_{\text{außen}} \ll \vec{B}_{0,\text{innen}_{\parallel}}$ „$= 0$"

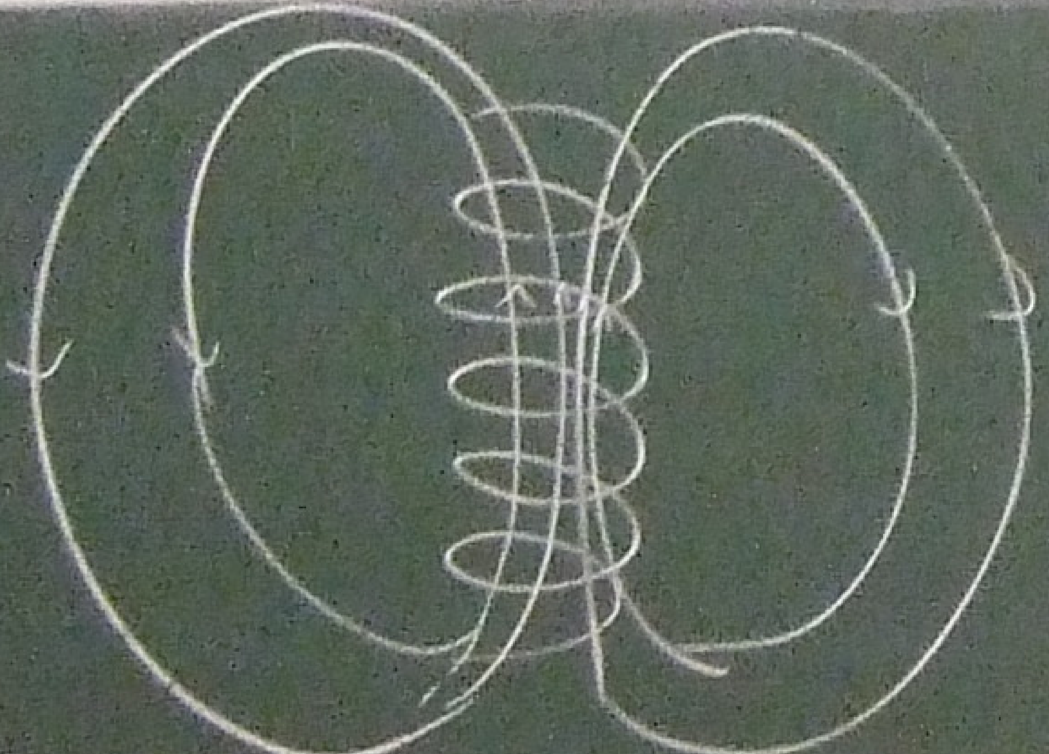
\# der Windungen

$$\oint \vec{B}\, d\vec{s} = \overset{①}{B_0} L - \overset{②}{B_A} \cdot L = \mu_0 N I$$

$$B_0^{\parallel} - B_A^{\parallel} = \Delta B_{\parallel} = \mu_0 \frac{N}{L} I = \mu_0 n I$$

$n = \frac{N}{L} = \frac{\text{Windungszahl}}{\text{Länge}}$

$\overset{B_A = 0}{\rightsquigarrow}$ $B_0 = \mu_0 \cdot n \cdot I$ für inneres einer langen Spule.



$\hat{=}$