

α ELEKTRODYNAMIK (6) (S11)

[Elektrostatik (6.1) siehe WS]

β Ströme (6.2) (S60)

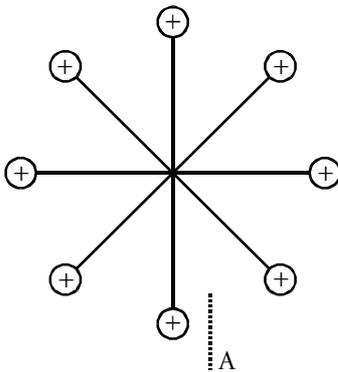
γ Energie und Leistung bewegter Ladungen, Stromstärke (6.2.1) (S60)

[15.04.02]

Definition: Strom

Strom ist die Menge an Ladung, die pro Zeit durch eine Fläche tritt [$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$, falls zeitlich variabel $I = \frac{dQ}{dt}$].

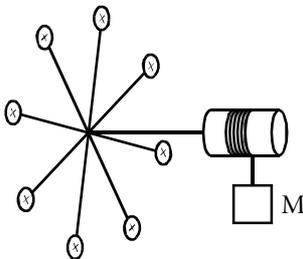
Beispiele



[Kreisstrom]

Strom = Ladung $\cdot 8 \cdot \frac{1}{\text{Umlaufzeit}}$ $I = 8q \cdot \frac{1}{T}$, $T = \frac{2\pi}{\omega}$ [Falls A von ganz oben bis unten, dann kein Nettostrom]

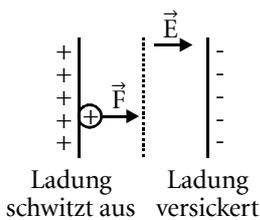
Mit Antrieb ...



Dann ...

- Je größer die Reibung, desto kleiner der Strom
 - Je größer das Gewicht, desto größer der Strom
- [Mechanisches Analogon]

Coulombkraft als Antrieb



[Z.B. Flüssigkeit zwischen Kondensatorplatten, Ionen treten aus; Teilchen fliegt nach rechts, kinetische Energie wird dann aber beim Aufprall komplett zu Wärme und kann nicht dazu genutzt werden, um "besser" zu versickern \Rightarrow Leistung nötig, um Strom aufrechtzuerhalten]

Wärmeleistung für ein Teilchen ...

$$qU = W_{\text{Wärme}} = \frac{1}{2}mv^2$$

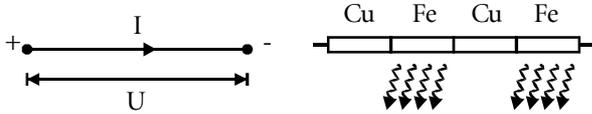
Für N Teilchen ...

$$P = \frac{W}{t} = \frac{NqU}{t} = \frac{Q}{t}U \Leftrightarrow P = UI$$

[Reibung braucht man gar nicht exakt zu wissen, ist in der Gleichung bereits enthalten]

Ohmsches Gesetz, Joulesche Wärme (6.2.2) (S61)

Stromfluß im Leiter



[I wie J geschrieben]

[Versuch: Fe-Bereiche leuchten bei hohem Strom, Verlustleistung größer]

[Versuch: 1V, 1A bei Draht mit 1Ω; Antrieb ändern (d.h. Spannung) ⇒ Spannung~Strom zwischen 0 und 2A (Ohmsches Gesetz)]

Beobachtung ...

$U \sim I$, $R := \frac{U}{I}$ Widerstand [Proportionalitätsfaktor], $[R] = 1 \text{ Ohm} = 1 \Omega$

$$U = RI, I = \frac{1}{R}U$$

Leistung ...

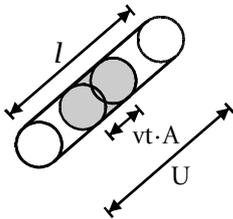
$$P = UI = \frac{U^2}{R} = I^2R$$

Atomistisches Modell zum Ohmschen Gesetz (6.2.3) (S62)

Modell für Widerstand im Leiter

- (1) Feldstärke überall im Leiter konstant [Kraft von + nach -]
- (2) Ladungsträgerdichte überall konstant
- (3) Reibungskraft $F_R \sim$ Geschwindigkeit

Gleichgewicht von Antriebskraft und Reibung, d.h. $\vec{F}_R = q\vec{E}$ [$q\vec{E}$ Coulombkraft] mit $F_R \sim v \Rightarrow v \sim E$, d.h. ... $v = \beta E$, β "Beweglichkeit" der Ladungsträger



In der Zeit t fließen durch A so viele Ladungsträger wie im Volumen $vt \cdot A$ vorhanden sind ...

$$I = \frac{Q}{t} = vt \cdot A \cdot nq \cdot \frac{1}{t} = Anq\beta E \quad [n \text{ Ladungsträgerdichte}]$$

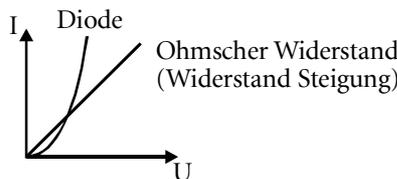
Mit $E = \frac{U}{l}$...

$$I = \frac{1}{R}U, \frac{1}{R} = \frac{Anq\beta}{l}, R = \rho \cdot \frac{l}{A}, \rho = \frac{1}{qn\beta} \text{ spezifischer Widerstand, } \frac{1}{\rho} = \kappa = qn\beta \text{ spezifische Leitfähigkeit}$$

[ρ intrinsische [von innen kommende] Eigenschaft von z.B. Kupfer]

Abweichungen vom Ohmschen Gesetz

[Ohmsches Gesetz nur Spezialfall; Z.B. hängt Strom beim Kondensator oben mehr davon ab, wie ausgeschwitzt wird - als von der Spannung]



[Versuch: Heißleiter, Kaltleiter; Draht kühlen (flüssige Luft), erhitzen (kochendes Wasser); Bei Kupfer Spannung

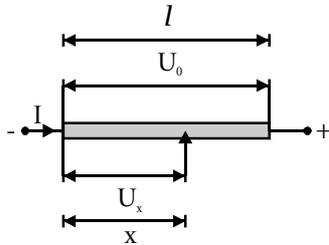
kleiner/Strom größer wenn kühler (weniger Reibung); Konstantan (Kupfer, Nickel, Zink) Temperaturabhängigkeit minimal; Bei Heißeleitern mehr Strom wenn erhitzt]

🦋 **Spannungsabfall, Spannungsquellen, Innenwiderstände (6.2.4) (S64)**
Kirchhoffsche Regeln (6.2.5) (S67)

[16.04.02]

Spannungsteiler (Potentiometer)

[Spannungsabfall: Spannung an Widerstand, dann fließt durch ihn Strom; Umgekehrt fließt durch einen Widerstand Strom, fällt an seinen beiden Enden eine Spannung ab]



$$U_x = \frac{x}{l}U \quad [U_x = R_x I = \rho \frac{x}{A} \cdot I, \quad U = RI = \rho \frac{l}{A} \cdot I] \quad [\text{Bei normalem Draht Widerstand vernachlässigt, hier mit Widerstand}]$$

Innenwiderstand

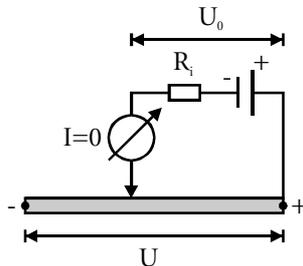
[Ladungstransport in Stromquelle durch Van-de-Graaff-Generator (mechanisch), Dynamo (elektromagnetisch), Batterie (chemisches Potential), Zellpotentiale (biochemisch, Konzentrationsunterschiede zwischen Ionen zu beiden Seiten einer Membran), Photovoltaisch (Lichtabsorption erzeugt Raumladungen im Halbleiter)]

[Falls Quelle unbelastet dann Leerlaufspannung U_0 (oder U_{EMK} (elektromotorische Kraft)); Wird die Quelle belastet sinkt die Klemmenspannung U (oder U_K) durch R_i]

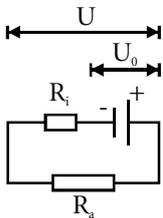
Durch Innenwiderstand ...

$$U = U_0 - R_i \cdot I$$

Ermittlung des Innenwiderstands mit einer Kompensationsschaltung ...



[Den variablen Widerstand unten stellt man so ein, daß kein Strom zwischen den beiden Quellen fließt, d.h. der Strommesser $I=0$ anzeigt; Dann kann man die Leerlaufspannung oben an der Quelle messen (da $I=0$ ist der Anteil von R_i ebenfalls 0), $U_0 = \frac{x}{l}U$; Nun hat man die Leerlaufspannung und kann den Innenwiderstand berechnen ...



$$U = R_a I, \quad U_0 = U + R_i I = (R_a + R_i) I \Rightarrow [\text{Strom gleichsetzen}] \quad \frac{U}{R_a} = \frac{U_0}{R_a + R_i} \Leftrightarrow R_i = R_a \left(\frac{U_0}{U} - 1 \right)$$

[Kurzschlußstrom falls beide Pole der Quelle kurzgeschlossen, dann $U=0$, $U_0 = I_{kurz} R_i$ (U_0, I_{kurz} messen $\Rightarrow R_i$)]

[Bei Akkus erhöht sich mit dem Alter der Innenwiderstand; U_0 bleibt dann zwar hoch, aber sobald eine Last angeschlossen wird, wird U viel geringer]

Kirchhoffsche Regeln

(1) Knotenregel $\sum_i I_i = 0$ [Summe aller zu- und abfließenden Ströme in einem Knotenpunkt (Verbindungspunkt von ≥ 3 Leitern) ist 0; Elektrische Ladung kann weder zu noch abnehmen (Ladungserhaltung); Ankommende

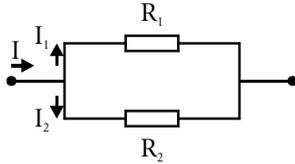
Ströme positiv, abfließende negativ]

(2) Maschenregel $\sum_i U_i = 0$ [Addierte Spannungen im Umlauf einer Masche (geschlossene Schleife) sind 0],

Potentialdifferenz ist unabhängig vom Weg [Sind zwei Verbindungspunkte auf zwei verschiedene Wege (mit U_1 und U_2) miteinander verbunden, dann gilt $U_1 + U_2 = 0 \Leftrightarrow U_1 = -U_2$ (Richtung U_1, U_2 entgegengesetzt)]

[Liegt eine Spannungsquelle U_0 in der Masche, dann $-U_0$ falls Maschen- und Quellenrichtung (von + nach -) entgegengesetzt; Bei Widerstand Stromrichtung festlegen und dann Vorzeichen genauso ermitteln]

Anwendung von (1), Parallelschaltung von Widerständen ...



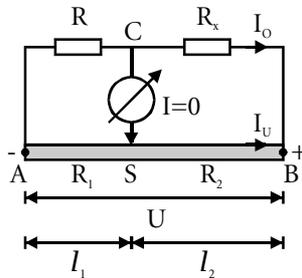
$$I = \frac{U}{R} = I_1 + I_2 = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} \Leftrightarrow \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

[$U = I_1 R_1 = I_2 R_2$ folgt nach Maschenregel, zwei Maschen mit jeweils Spannungsquelle und R_1 bzw. R_2]

Anwendung von (2), Reihenschaltung von Widerständen ...

$$U_1 + U_2 - U = 0 \Leftrightarrow IR_1 + IR_2 = U \Leftrightarrow [U = IR] R = R_1 + R_2$$

Anwendung: Wheatstonesche Brückenschaltung



Spannungsteiler AB, Strommeßgerät zwischen CS, man verschiebt Schleifenkontakt S solange bis $I = 0$...

- **Maschenregel für ACS** $I_0 R = I_U R_1$

- **Maschenregel für SCB** $I_0 R_x = I_U R_2$

Division beider Gleichungen ergibt ...

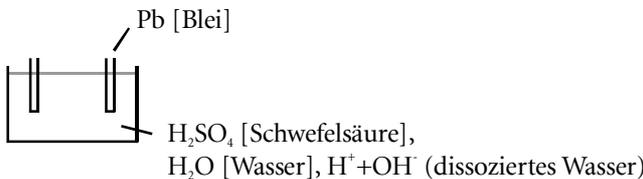
$$\frac{R}{R_x} = \frac{R_1}{R_2} = [R = \rho \frac{l}{A}] \frac{l_1}{l_2}$$

Damit ...

$$R_x = \frac{l_2}{l_1} R$$

[Dient zur Bestimmung von Widerständen, d.h. R_x]

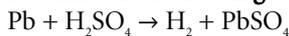
Bleiakku



[dissoziiert=in Ionen zerfallend]

Damit ...

- **1. Schritt: Blei wird eingetaucht**

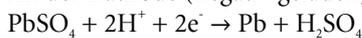


Bleisalz an den Stäben ...

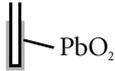
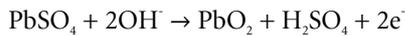


- **2. Schritt: Aufladen**

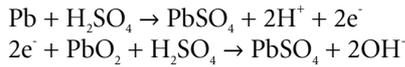
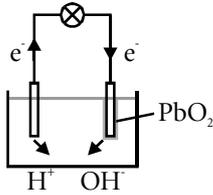
An der Kathode (negativ geladen) ...



Elektronen verbinden sich mit H^+ -Ionen zu H_2 . H_2 verdrängt Pb aus der Bleisalzverbindung, Kathode wird vom Salzbelag befreit. Anode ...



- 3. Schritt: Entladung

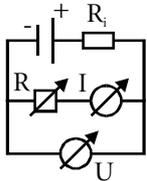


Innenwiderstand eines Bleiakkus

Ionen-transport in der Säure ist nicht reibungsfrei und erzeugt einen Innenwiderstand (kleiner Plattenabstand \Rightarrow kleiner Innenwiderstand). Wärmeleistung ...

$$P_w = U^2 \cdot \frac{1}{R_{\text{Innen}}}$$

Mit Kompensationsschaltung messen ...



Messung ...

- **Akku** $I=0\text{A} \Rightarrow U_0=4,4\text{V}$, $I=1\text{A} \Rightarrow U=4,3\text{V}$

- **Batterie** $I=0\text{A} \Rightarrow U_0=4,5\text{V}$, $I=1\text{A} \Rightarrow U=3,6\text{V}$

Wobei gilt ...

$$U = U_0 - R_i I \Leftrightarrow R_i = \frac{U_0 - U}{I}$$

Damit ...

- **Akku** $R_i = \frac{4,4\text{V} - 4,3\text{V}}{1\text{A}} = 0,1\Omega$

- **Batterie** $\frac{4,5\text{V} - 3,6\text{V}}{1\text{A}} = 0,9\Omega$

β Das Magnetfeld von Strömen (6.3) (S70)

[22.04.02] [Übschriften aus Staudt, aber Inhalt unter anderem Blinkwinkel]

Der Feldbegriff

[Kraft scheint zentraler Begriff zu sein, noch wichtiger aber Feld]

$$\vec{F} = G \cdot \frac{m_1 m_2}{r^2} = m_1 \cdot \frac{G m_2}{r^2} = m g, \vec{G}\text{-Feld}$$

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2} = q_1 \cdot \frac{q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} = q \vec{E}, \vec{E}\text{-Feld}$$

[Feld wichtig, da Eigenschaft des Raums; Ladung beeinflusst Raum \Rightarrow Feld, das Feld kann dann aber als etwas Eigenständiges betrachtet werden, das auch durch etwas anderes zu Stande kommen kann]

[Man möchte in der Physik erhalten, daß alles schrittweise von einem zum anderen Teilchen übertragen wird; Angenommen man nimmt nur den Kraftbegriff und betrachtet den Umlauf um der Erde um die Sonne - würde die Sonne verschwinden, würde die Erde sofort aus ihrer Kreisbahn fliegen; Betrachtet man aber das Feld (das sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitet), dann verläßt die Erde erst nach 8 Minuten die Kreisbahn]

Ein neues Feld: Magnetfeld

[Feld im Raum, etwas ausgedehntes, sozusagen "Zettel" an jedem Raumpunkt; Temperatur skalares Feld, Luftströmung Vektorfeld [mit Richtung]]

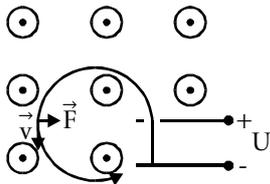
Lorentzkraft ...

$$\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B} \text{ [Ladung bewegt sich in Magnetfeld und erfährt Kraft]}$$



[Dreifingerregel der rechten Hand, \vec{v} Daumen (technische Stromrichtung), \vec{B} Zeigefinger, \vec{F} Mittelfinger; Nimmt man statt \vec{v} für den Daumen \vec{I} (technische Stromrichtung), dann zeigt der Mittelfinger die Richtung der Kraft auf positive und negative Ladungsträger an (eine Leiterschleife wird z.B. nur in eine Richtung gezogen); Nimmt man aber das wirkliche \vec{v} , so zeigt der Mittelfinger bei Elektronen $-\vec{F}$ an, da ihre \vec{v} -Richtung entgegengesetzt ist (Tipler S. 831)]

[Ein Magnetfeld geht außerhalb eines Magneten bzw. einer Spule von Nord (rot) nach Süd (grün)]
Beispiel ...



[Elektronen durch Kondensator beschleunigt und fliegen durch das Loch in das Magnetfeld \Rightarrow Kreisbahn; Das Ganze befindet sich in einem Glaskolben mit Neon, wodurch die Elektronenbahn leuchtet]

[Kreis mit Punkt bedeutet \vec{B} zeigt aus Zeichenebene heraus, Kreis mit Kreuz bedeutet \vec{B} zeigt in Zeichenebene hinein (Tipler S. 818, 824)]

$$\text{Kräftegleichgewicht } F_z = m\omega^2 r = F_t = qvB, v = \omega r \Rightarrow \omega^2 = \frac{v^2}{r^2}$$

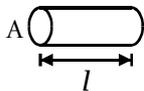
$$m \frac{v^2}{r^2} r = qvB \Leftrightarrow r = \frac{m}{q} \frac{v}{B} \text{ [Z.B. zur Bestimmung von } \frac{m_e}{q} \text{]}$$

[Versuch: \vec{B} stärker \Rightarrow r kleiner, U kleiner \Rightarrow v kleiner \Rightarrow r kleiner (leichter beeinflussbar durch \vec{B})]

Kraft eines B-Feldes auf einen linearen Leiter

$$\vec{F} = Nq\vec{v} \times \vec{B} \text{ [N Anzahl der Ladungsträger im Leiter]}$$

Es gilt $Nq\vec{v} = I\vec{l}$, denn ...

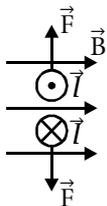


$$I = vqnA \text{ [Modell zum Ohmschen Gesetz]} \Rightarrow Il = vqnAl = vqnV = vqN \Rightarrow [\vec{v} \text{ entlang Draht}] Nq\vec{v} = I\vec{l}$$

Also insgesamt ...

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

[Versuch: Stromwaage, Kraft nach oben bzw. unten wird gemessen (je nach Stromrichtung oben bzw. unten) ...

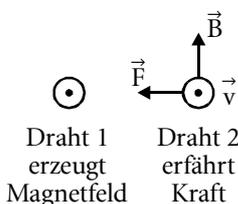


$F \sim I$

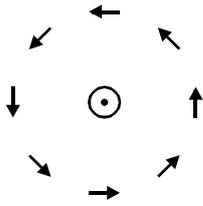
Welches Magnetfeld erzeugt ein Draht?

[Versuch: Parallele Leiter, Strom entgegengesetzt \Rightarrow Abstoßung, Strom parallel \Rightarrow Anziehung; Erklärt mit Dreifinger-Regel und konzentrischem Magnetfeld unten]

Zwei parallele Leiter ...

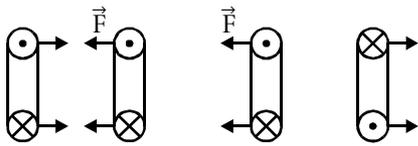


Damit ...



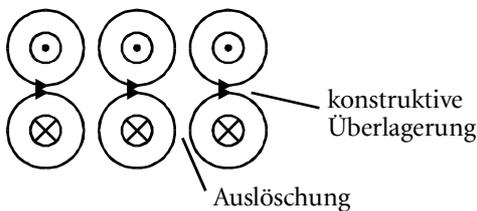
[Kraft immer nach innen; Rechte-Hand-Regel (Daumen technische Stromrichtung, Finger \vec{B} -Feld-Richtung)]

Kraft zwischen zwei Spulen

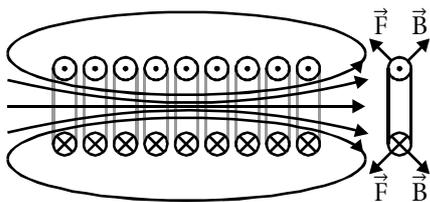


[Kraft zwischen zwei Leiterschleifen (Ring von der Seite)]

Superpositionsprinzip: Felder addieren sich ...



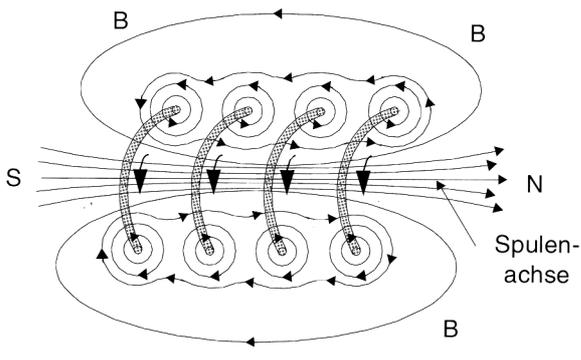
Also ...



[Spulenmagnetfeld übt Kraft auf zweite Leiterschleife aus, ziehen sich an]

[Versuch: Zwei Wagen mit Spulen ziehen sich an, stoßen sich ab]

[Demtröder S. 80 ...

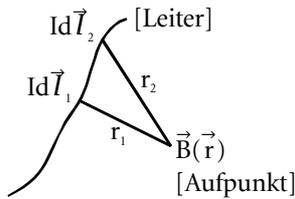


Magnetfeld quantitativ

[oben qualitativ (Eigenschaften), jetzt quantitativ (Berechnung)]

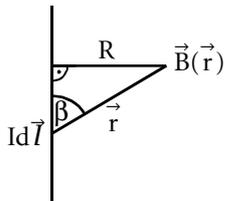
Biot-Savart-Gesetz

[Feld aus allen "Stromstückchen" aufaddieren \Rightarrow Integral]



$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot I \cdot \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^2} \quad \text{Biot-Savart-Gesetz [ohne Herleitung], } \vec{B} = \int d\vec{B}$$

Beispiel 1: Unendlich langer linearer Leiter



[IdI Stromelement/Stromstückchen]

$$\vec{B} = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot I \cdot \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^2} \quad [\text{integriert über } d\vec{l}] = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot I \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sin(\beta)}{r^2} dl \quad [c = a \times b, |c| = |a| \cdot |b| \sin(\beta), \text{ rechts genauer } |\vec{B}|]$$

Substitution ...

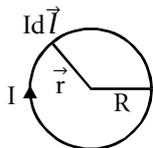
$$l = \frac{R}{\tan(\beta)}, \quad \frac{dl}{d\beta} = -\frac{R}{\tan^2(\beta)} \cdot \frac{d(\tan(\beta))}{d\beta} = -\frac{R}{\tan^2(\beta)} \cdot \frac{1}{\cos^2(\beta)} = -\frac{R}{\sin^2(\beta)} \quad [(\tan(x))' = 1 + \tan^2(x) = \frac{1}{\cos^2(x)}, \tan(x) = \frac{\sin(x)}{\cos(x)}]$$

$$r = \frac{R}{\sin(\beta)}, \quad |\vec{B}| = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot 2I \cdot \int_0^{\pi/2} \frac{\sin(\beta)}{R^2/\sin^2(\beta)} dl = \left[\frac{\sin(\beta)}{R \cdot (R/\sin^2(\beta))} \right] dl = \frac{\sin(\beta)}{R} \cdot dl/d\beta = \frac{\sin(\beta)}{R} d\beta, \quad \text{Betrag ohne } - \int_0^{\pi/2} \frac{\sin(\beta)}{R} d\beta$$

$$= \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{1}{R} \cdot I \cdot \int_0^{\pi/2} \sin(\beta) d\beta \quad \left[\int_0^{\pi/2} \sin(\beta) d\beta = 1 \right]$$

$$|\vec{B}| = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I}{R}$$

Beispiel 2: Feld im Zentrum eines Kreisstroms



[Winkel dl und r immer 90°]

$$B = \int \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot I \cdot \frac{dl}{r^2} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I}{R^2} \cdot \oint dl = \left[\oint dl = 2\pi r \right] \frac{\mu_0}{2} \cdot \frac{I}{R} \Leftrightarrow B = \frac{\mu_0}{2} \cdot \frac{I}{R}$$

[Viel mehr als diese Beispiele kann man kaum rechnen, sehr komplex ⇒ Computerprogramme]

Feldlinien sind immer geschlossen

[Feldlinien immer geschlossen (nicht bei Gravitation, Elektrostatik); Es gibt nicht Quellen und Senken für Magnetfeld ...]



Es gibt auch keine Monopole bzw. Stromansammlungen]

Ampèresches Durchflutungsgesetz ...

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

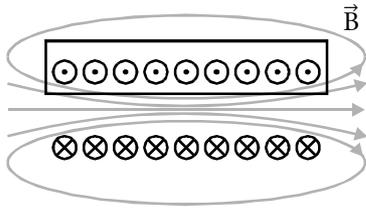
[Staudt S. 76: Längs einer Feldlinie eines unendlich langen linearen Drahtes (Draht als Achse) ergibt sich ...]

$$\oint \vec{B} d\vec{s} = \oint B ds = B \oint ds = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I}{R} \cdot 2\pi R \Leftrightarrow \oint \vec{B} d\vec{s} = \mu_0 I$$

[Integral der Tangentialkomponenten entlang eines geschlossenen Pfades; Der Pfad ist völlig beliebig (z.B. nicht

nur auf einer Feldlinie) und die Gleichung gilt auch nicht nur für einen unendlich langen linearen Leiter; Alles, was diese Eigenschaft hat, ist ein Magnetfeld; Manchmal auch drittes Maxwellsches Gesetz]

Magnetfeld einer Spule [23.04.02]



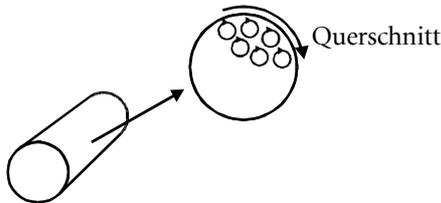
[Integration über markierte Wegstrecke; Feld außen trägt kaum bei, an der Seite etwa $\vec{B} \perp d\vec{s}$, übrig innerhalb]

$\oint \vec{B} d\vec{s} = \mu_0 I'$ mit $\oint \vec{B} d\vec{s} = \mu_0 I'$ und $I' = nI$ [Strom durch einzelne Schleife]

$\Rightarrow B = \mu_0 I \frac{n}{l}$ [$\frac{n}{l}$ Windungsdichte]

Magnetisierung (S125)

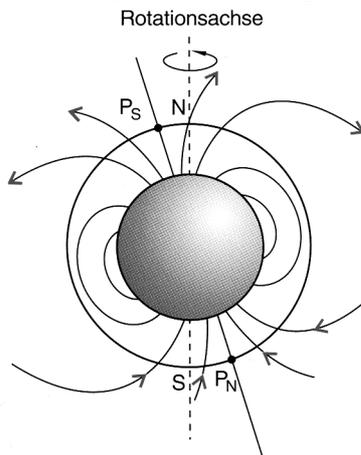
[Alle Magnetfelder durch Ströme erzeugt - auch Permanentmagnete; Kleinster Ringstrom ist ein kreisendes Elektron \Rightarrow Magnetfeld; Daher nicht verwunderlich, daß es magnetische Atome gibt \Rightarrow z.B. Kompaßnadel (Erde produziert Dipolfeld); Ströme durch viele Eisenatome erzeugt, deren Kreisströme alle gleich ausgerichtet sind (aufaddierte Kreisströme)]



[Überall im Material kompensieren sich die kleinen Ringströme; Außen dagegen addieren sich alle auf, Gesamtfeld wie Draht konzentrisch; Bei einer Spule addieren sich nun die ganzen Ringströme, wie oben angegeben, auf, wodurch die Enden unterschiedlich werden - auf einer Seite treten die Feldlinien ein (S), auf der anderen aus (N)]

[Versuch: Zwei Magnetnadeln nebeneinander; Dreht sich die eine, dreht sich die andere mit]

[Versuch: Vertikaler Kompaß, Magnetnadel hat bestimmten vertikalen Winkel (Hochkantkompaß) \Rightarrow Winkel mit der Magnetfeld in Tübingen eintritt ...]



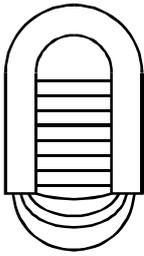
[Demtröder S. 112 (ungefähr); Pfeilrichtung des Magnetfeldes umgekehrt, P_S/P_N Dipolachse]

[Versuch: Eisen wird durch engen Kontakt mit einem Magnet selber zum Magneten \Rightarrow Kreisströme induziert (Induktion); Danach Magnetismus aber wieder verloren, wenn auch nicht sofort (dauert kurz, bis der Strom abklingt); Permanentmagnete werden durch sehr hohe Ströme durch Spulen hergestellt]

[Anmerkung: "Spin" eigentlich noch wichtiger für Magnetismus; Elektronen drehen sich um sich selbst und obwohl die Ladung punktförmig ist (Radius 0) erzeugt sie ein Magnetfeld \Rightarrow Anschaulichkeit setzt aus, hier kann man nur mit Formalismus beschreiben (nicht genauer erklärt)]

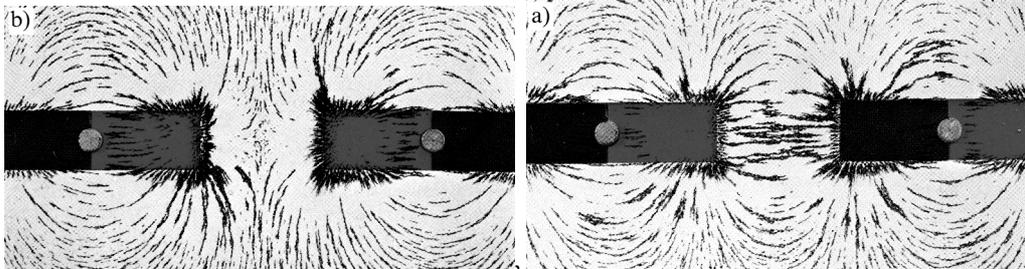
[Versuch: Durch ausgerichtete Magnetfelder Projektion von magnetischen Feldlinien ...]

- Hufeisenmagnet ...



[Magnetische Feldlinien enden nicht wie elektrostatische immer senkrecht auf der Oberfläche]

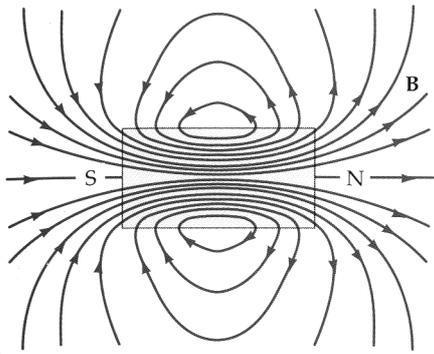
- Zwei Dipole ...



[Dorn S. 54]

[Links innerer Bereich gemieden, rechts Addition (wie ein großer Permanentmagnet)]

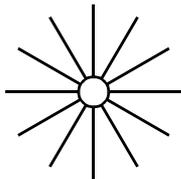
- Einzelner Dipol ...



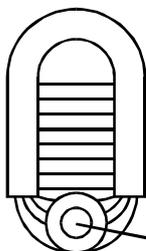
[Tipler S. 817]

[Schneidet man den Dipol in der Mitte durch, so erhält man zwei Dipole]

- Dipol Hochkant ...



- Hufeisenmagnet mit Ring ...



Abschirmung

[Der Ring wird magnetisiert (vorher unmagnetisch) und das Innere vom magnetischen Feld abgeschirmt (analog Faraday-Käfig); Beim Faraday-Käfig genügt aber ein dünnes Blech, hier ist dickeres Material nötig (Magnetfeld schwieriger abzuschirmen); Benutzt man einen Messingring (nicht magnetisierbar) wird das Feld dagegen nicht beeinflusst \Rightarrow keine Abschirmung]

- Leiter von oben ...