

3.3-1

25.04.24

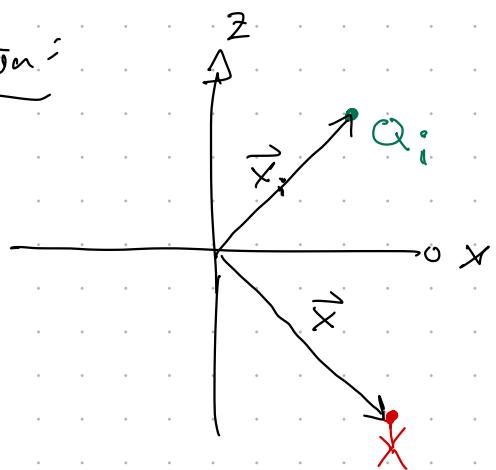
[...]

↪ Das Coulomb-Potential einer Ladung Q :

$$\parallel \phi_{el}(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r}, [\phi_{el}] = 1 \text{ V}$$

→ Q befindet sich im Koordinatenursprung

Situation:



↪ allg. Coulomb-Potential:

$$\parallel \phi_{el}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_i}{|\vec{r} - \vec{r}_i|}$$

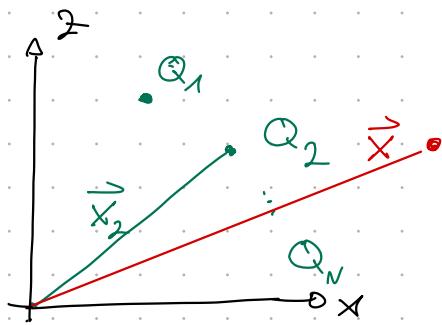
Beurteile Einheiten

$$[\phi_{el}] = 1 \frac{J}{C} = 1 \text{ V}$$

$$\hookrightarrow [\vec{E}] = 1 \frac{\text{V}}{\text{m}} = 1 \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

Zerlegen

3.3.2 | Das el. Potential einer beliebigen Ladungsverteilung



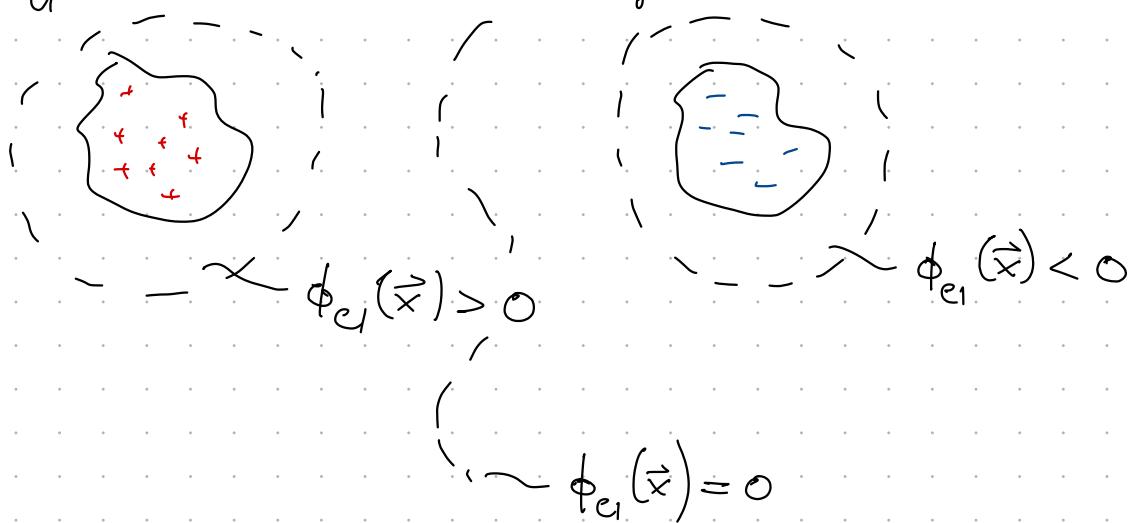
Superposition:

$$\parallel \phi_{el}(\vec{x}) = \sum_{i=1}^N \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_i}{|\vec{x} - \vec{x}_i|}$$

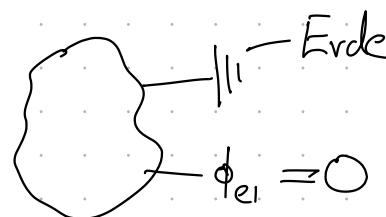
$$\text{mit } |\vec{x} - \vec{x}_i| = \sqrt{(x-x_i)^2 + \dots + (z-z_i)^2}$$

Bem:

1. $\phi_{el}(\vec{x})$ hat ein Vorzeichen!



2. $\phi_{el}(\vec{x})$ für $|\vec{x}| \rightarrow \infty$: $\phi_{el}(|\vec{x}| \rightarrow \infty) = 0$



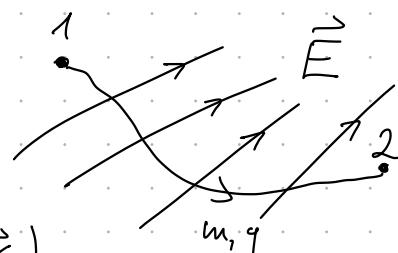
3. EES geschrieben mit $\phi_{el}(\vec{x})$:

Energie-
erhaltungs-
satz

$$\frac{1}{2} m \vec{v}_1^2 + q \cdot \phi_{el}(\vec{x}_1) = \frac{1}{2} m \vec{v}_2^2 + q \cdot \phi_{el}(\vec{x}_2)$$

oder

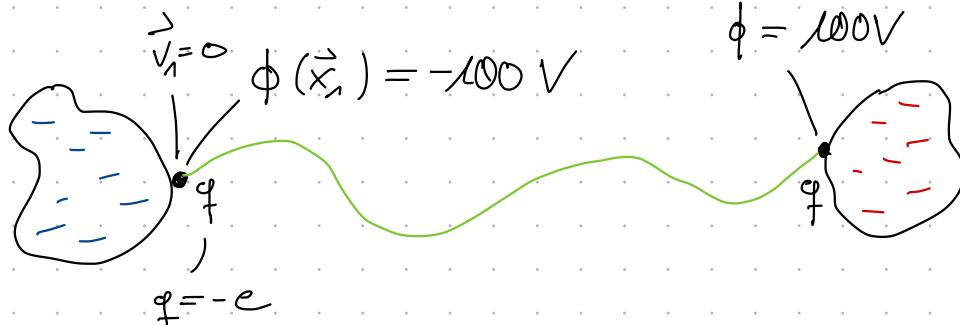
$$\underbrace{\frac{1}{2} m \vec{v}_1^2 + q (\phi_{el}(\vec{x}_1) - \phi_{el}(\vec{x}_2))}_{\text{el. Arbeit}} = \frac{1}{2} m \vec{v}_2^2$$



el. Arbeit: $W_{el}(\vec{x}_1, \vec{x}_2) = q (\phi_{el}(\vec{x}_1) - \phi_{el}(\vec{x}_2))$

↳ geleistet vom el. Feld

Bsp:



EES:

$$0 + (-e)\phi(\vec{x}_1) = \frac{1}{2}mv_2^2 + (-e)\phi(\vec{x}_2)$$

$$\xrightarrow[m_e]{\quad} \frac{1}{2}mv_2^2 = (-e)(\phi(\vec{x}_1) - \phi(\vec{x}_2))$$

$$= 200 \text{ eV} \quad \text{Elektronen-}\text{volt}$$

$$= 200 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

[...]

3.3.3.1 Visualisierung des el. Potentials

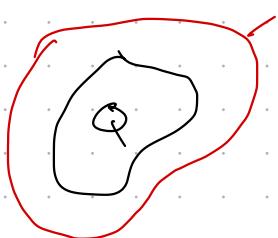
↳ Äquipotentialflächen / -linien

a) Definition:

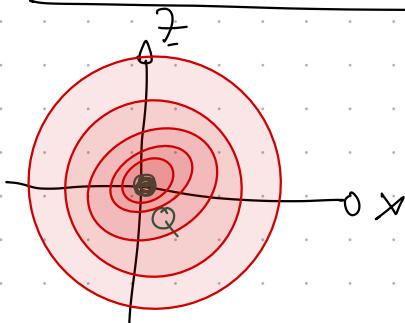
$$\phi = \text{const.}$$

Analogie:

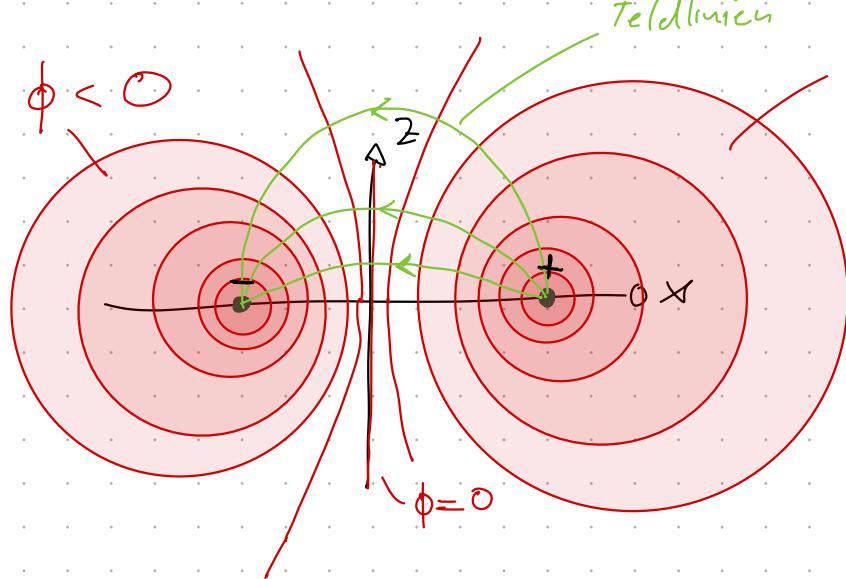
Höhenlinien einer topographischen Karte.



b) Äquipotentialflächen / -linien des Coulomb-Potentials



c) Äquipotentiallinien des Dipols

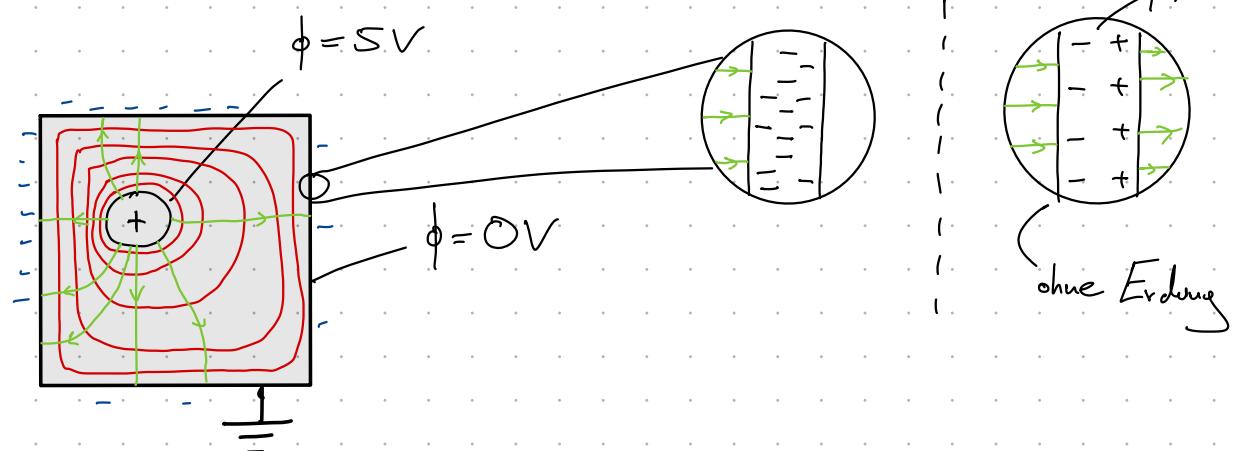
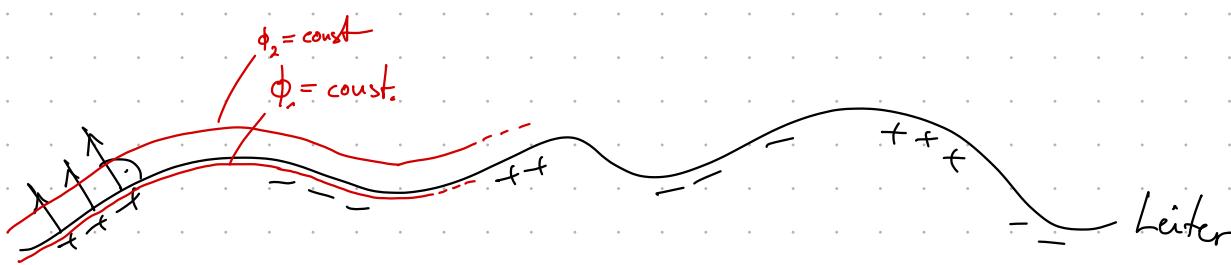


\Rightarrow Feldlinien verlaufen
senkrecht durch
Äquipotentiallinien!

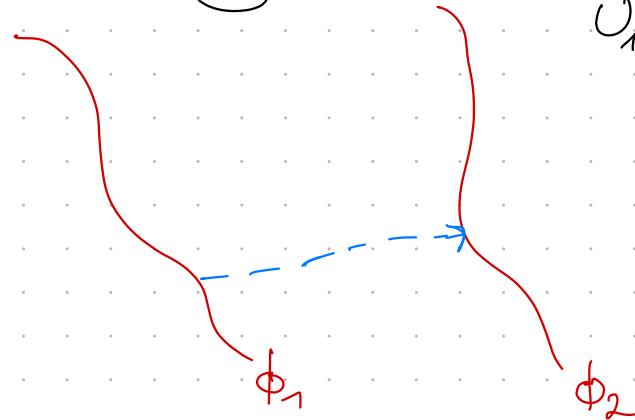
d) Äquipotentiallinien an Leiteroberflächen

26.04.24

Exp:



e) El. Spannung U



$$U_{1,2} = U = \phi_2 - \phi_1$$

Bem: In EES

$$\frac{1}{2}mv_1^2 - qU = \frac{1}{2}mv_2^2$$

3.3.4 Zusammenhang zw. ϕ und \vec{E}



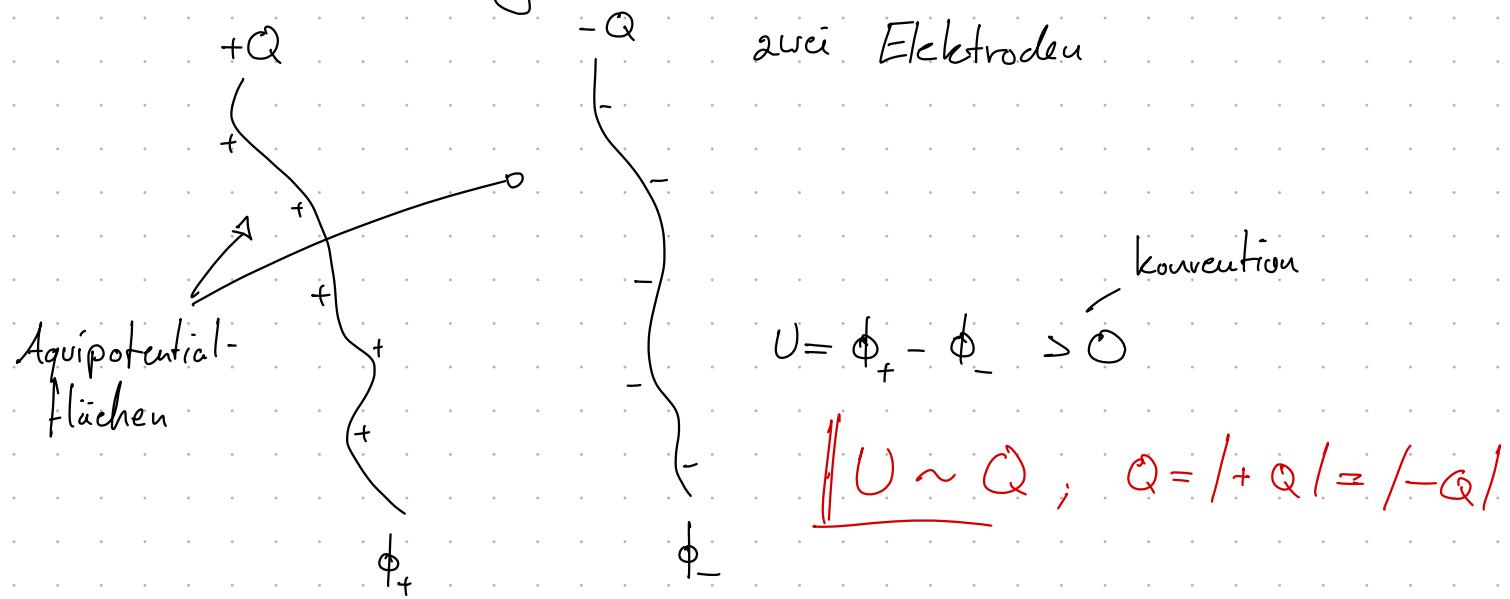
≈ Gradient von $\phi(x, y, z) = \phi(\vec{x})$ bestimmt \vec{E} -Feld:

$$\vec{E} = -\text{grad } \phi(x, y, z) = - \left(\begin{array}{c} \frac{\partial \phi}{\partial x} \\ \frac{\partial \phi}{\partial y} \\ \frac{\partial \phi}{\partial z} \end{array} \right)$$

3.4

Anwendung: Kapazität, Kondensator

3.4.1 // Kapazität: allgemein



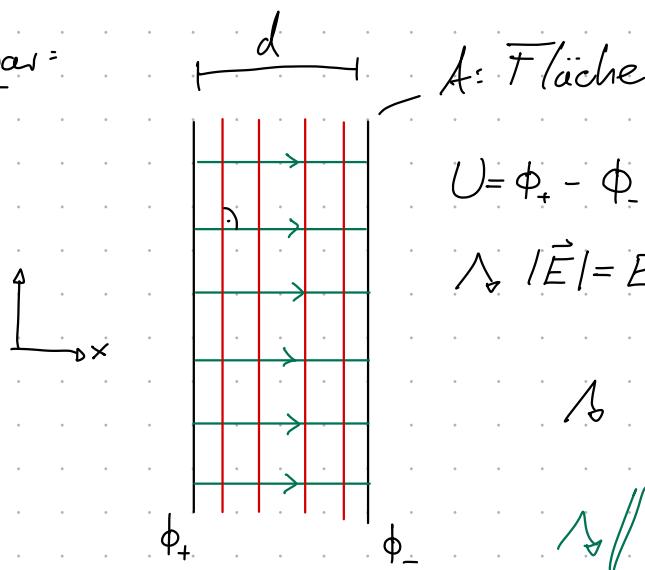
$$\rightsquigarrow \underline{Q = C \cdot U}$$

C : Kapazität ("Ladungsfassungsvermögen")
der Elektrodenanordnung

$$[C] = \left[\frac{Q}{U} \right] = 1 \frac{C}{V} = 1 F \text{ (Farad)}$$

3.4.2 // Kapazität des Plattenkondensator

Aufbau:



$$\text{Idee } C = C(A, d)$$

$$U = \phi_+ - \phi_-$$

s. Physik I

$$\rightsquigarrow |\vec{E}| = E = \frac{U}{d} = \underbrace{\frac{1}{\epsilon \cdot A} Q}_{}$$

$$\rightsquigarrow Q = \epsilon_0 \frac{A}{d} \cdot U$$

$$\rightsquigarrow \underline{C_{\text{Platte}} = \epsilon_0 \frac{A}{d}}$$

Beur:

1) C ist eine geometrische Größe. ($\sim \frac{A}{d}$)

→ Plattenkondensator

2) Typ. techn. Werte:

$$C = 1\text{pF} \dots 1\mu\text{F} \dots 1\text{F}$$

3) Schaltsymbol: $\text{---} \cap$

02.08.24

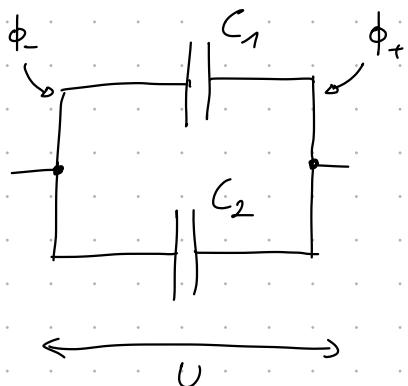
4) Anwendungen:

- Standlicht
- Speicherchips 0/1
- Zellmembran

3.4.3 | Zusammenschalten von Kapazitäten

(i) Parallelschaltung

$$Q_1 = C_1 \cdot U$$

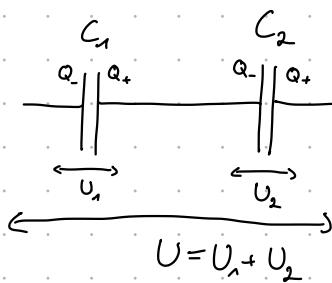


$$\rightarrow Q = Q_1 + Q_2 = \underbrace{(C_1 + C_2)}_{C_{\text{ges}}} \cdot U$$

$$C_{\text{ges}} = C_1 + C_2$$

→ analog für $n > 2$

(ii) Rienschaltung



$$Q = C_1 \cdot U_1$$

$$Q = C_2 \cdot U_2$$

$$\begin{aligned} U &= U_1 + U_2 = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} \\ &= \underbrace{\left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right)}_{\frac{1}{C_{\text{ges}}}} Q \end{aligned}$$

$$\rightarrow \boxed{\frac{1}{C_{\text{ges}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}} \quad \text{→ analog für } n > 2$$

Bem:

$$1) \ C_{\text{ges}} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} \rightarrow \text{nicht analog für } n > 2 ?$$

2) Serenschaltung: $C_{\text{ges}} < \min \{ C_i \}$

3.4.4.1 Materie im elektrischen Feld

\hookrightarrow Dielektrika

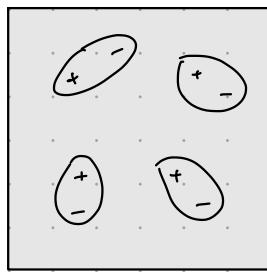
Bisher: Alles im Vakuum!

Jetzt: Was passiert in polarisierbarer Materie - Dielektrika?

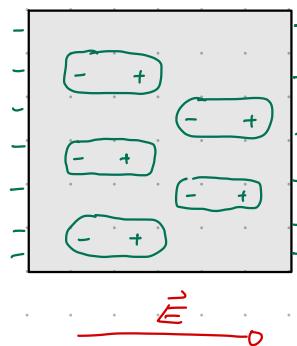
Polarisation:

(i) Materie mit permanenten Dipolen:

$$\vec{E} = 0$$



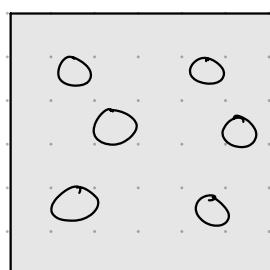
$$\vec{E} \neq 0$$



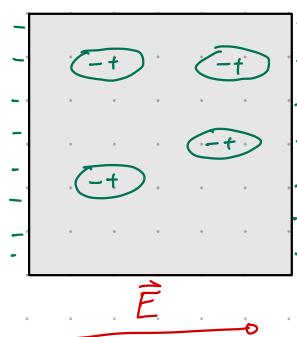
(ii) Materie ohne permanente Dipole:

\rightarrow Dipole werden zunächst induziert!

$$\vec{E} = 0$$

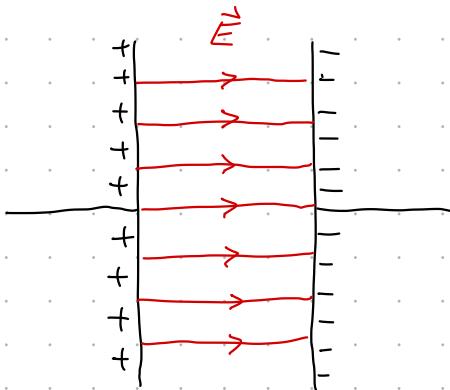


$$\vec{E} \neq 0$$

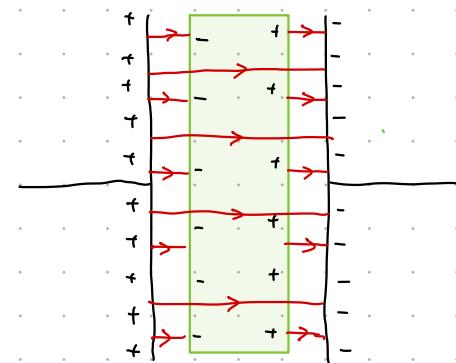


Polarisation

Was passiert zwischen den Platten des Kondensators?



$$E_0 = |\vec{E}| = \frac{U_0}{d}$$



$$E_D = \frac{U_D}{d} < E_0 \quad !$$

$$\rightarrow E_D = \frac{E_0}{\epsilon_r}; \quad \epsilon_r > 1$$

$$[\epsilon_r] = 1$$

$r \sim$ relativ zum Vakuum

Dielektrizitätskonstante

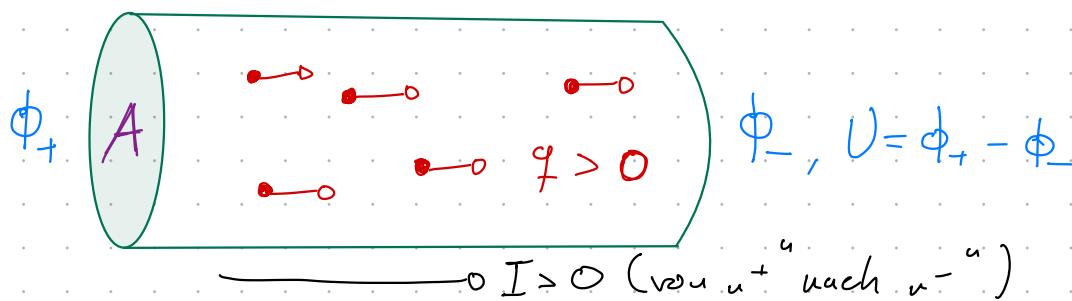
$$\rightarrow U_D = E_D \cdot d = \frac{E_0}{\epsilon_r} \cdot d = \frac{U_0}{\epsilon_r}$$

$$\rightarrow C_D = \frac{Q}{U_D} = \epsilon_r \frac{Q}{U_0} = \textcircled{\epsilon_r} \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d}$$

Kapazität mit Dielektrikum wird größer!

3.5Bewegte Ladungen - Ströme

03.05.24

Bisher: Elektrostatik (~ 1800)Jetzt: \vec{E} -Feld \rightarrow Kraft $\vec{F} = q \cdot \vec{E}$ auf Ladung q \hookrightarrow q bewegt sich in Zeit $t \Rightarrow$ elektrischer Strom!Definition des elektrischen Stroms: $I = I(t)$ 

- Mittlerer Strom in Zeit Δt :

$$\bar{I} = \frac{\Delta Q}{\Delta t}; \quad \Delta Q = \begin{matrix} \text{Gesamtladung} \\ \text{durch } A \end{matrix}$$

- (Momentan-) Strom:

$$I = I(t) = \frac{dQ}{dt} = \dot{Q}(t) \quad [I] = 1 \frac{C}{s} = 1A$$

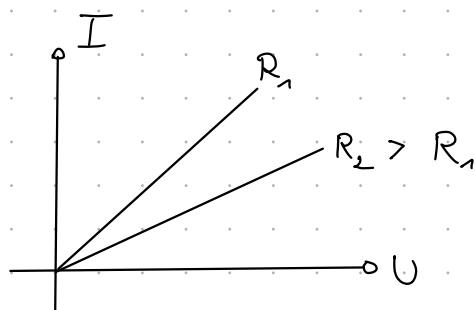
Ampère

3.5.1| Ohm'sches „Gesetz“ \hookrightarrow Georg Simon Ohm, 1789 - 1854

$$I \underset{\text{Wirkung}}{\overset{?}{\sim}} \underset{\text{Ursache}}{\overset{?}{U}}$$

Ohmsches Gesetz (1826): Ohmische Materialien

Kennlinie:



$$I = \frac{1}{R} \cdot U$$

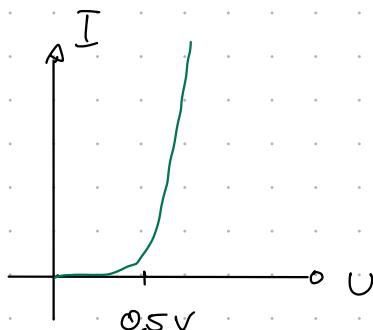
Dimension: $R = \text{Ohmischer Widerstand}$

↳ Materialkonstante

$$[R] = 1 \frac{V}{A} = 1 \Omega \text{ ("Ohm")}$$

Bem.: Nicht ohmische Materialien

z.B. Halbleiterdiode



Der spezifische Widerstand: ρ

$$R \stackrel{?}{\sim} \rho$$

Exp.:

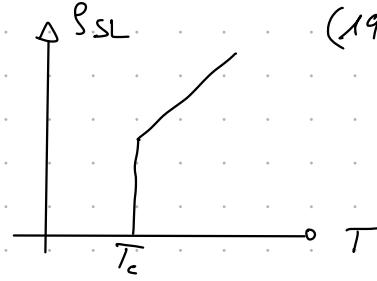
$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}$$

$$; [\rho] = 1 \Omega \cdot m$$

Bem.: Temperaturabhängigkeit $\rho = \rho(T)$?

- Glasstab

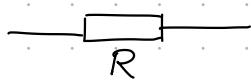
- Supraleiter



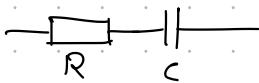
(1911 an Hg bei
 $T_c = 4,2 \text{ K}$)

↓ Sprungtemperatur

Schaltsymbol ohmischer Widerstand:



z.B.:



(Zweipol)

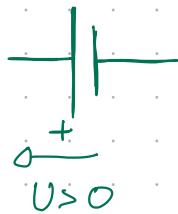
3.5.2 | Stromkreise - Kirchhoff'sche Regeln

10.05.24

KR: G. Kirchhoff, 1845

Liste der Zweipole:

• Spannungsquelle:



• Kondensator:



C, [C] = 1 Farad

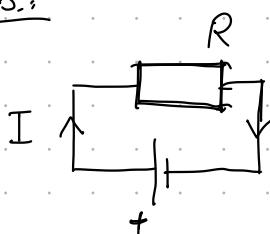
• Ohmischer Widerstand:



R, [R] = 1 Ω

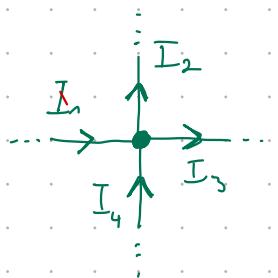
↗ Kombinationen aus diesen Zweipolen liefern/ergeben Stromkreise!

Bsp.:



a) Regeln für diese Stromkreise = KR

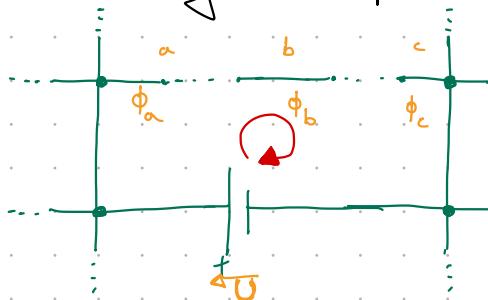
i) Knotenregel für Ströme



$$I_1 + I_4 = I_2 + I_3$$

$$\boxed{\sum_i I_i^{\text{in}} = \sum_i I_i^{\text{out}}}$$

ii) Maschenregel für Spannungen



$$U_{ab} = \phi_b - \phi_a$$

$$U_{bc} = \phi_c - \phi_b$$

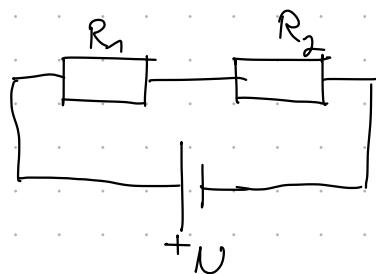
$$U = \phi_a - \phi_c$$

$$U_{ab} + U_{bc} + U = 0$$

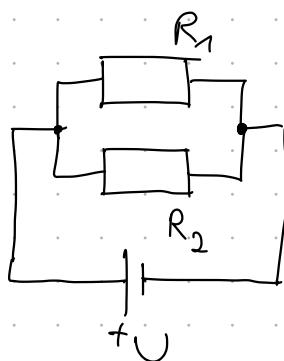
$$\boxed{\sum_i U_i = 0 \text{ in einer Masche}}$$

b) Beispiele

1) Reihen- u. Parallelschaltung von ohmischen Widerständen

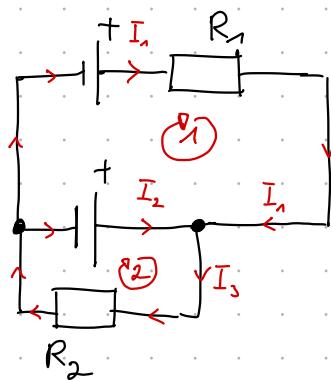


$$R_{\text{ges}} = R_1 + R_2$$



$$\frac{1}{R_{\text{ges}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

2) Etwas komplizierterer Stromkreis



$$U_1 = 10V, U_2 = 5V$$

$$R_1 = 10\Omega, R_2 = 5\Omega$$

$$\text{Knotenregel: } I_1 + I_2 = I_3 \quad (1)$$

$$\text{Maschenregel: } U_1 - (R_1 \cdot I_1) - U_2 = 0 \quad (2)$$

$$U_2 - (R_2 \cdot I_3) = 0 \quad (3)$$

$$(2) \quad I_1 = \frac{U_1 - U_2}{R_1} = \frac{10V - 5V}{10\Omega} = \underline{\underline{0,5A}}$$

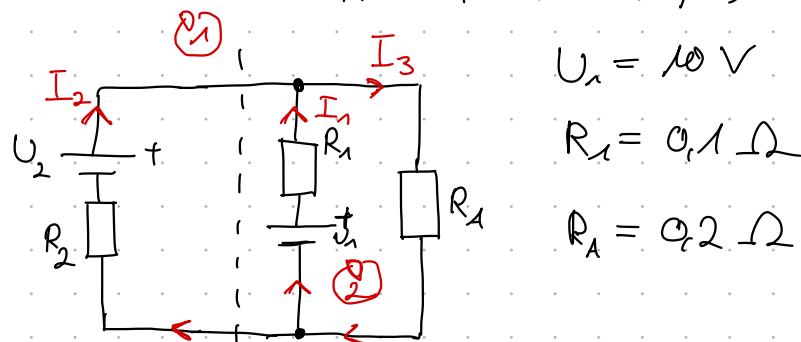
$$(3) \quad I_3 = \frac{U_2}{R_2} = \underline{\underline{1A}}$$

$$(1) \quad I_1 = I_3 - I_2 = 1A - 0,5A = \underline{\underline{0,5A}}$$

3) Starthilfe Autobatterie

$$U_2 = 12V$$

$$R_2 = 0,02\Omega$$



Auto 1 (Starthilfe)

$$U_1 = 10V$$

$$R_1 = 0,1\Omega$$

$$R_A = 0,2\Omega$$

$$\text{KR: } I_1 + I_2 = I_3 \quad I_1 = -8,2A$$

$$\text{MR: } U_2 - (I_3 \cdot R_A) - (I_2 \cdot R_2) = 0 \rightarrow I_2 = 62A$$

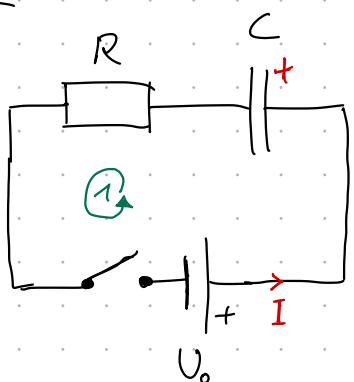
$$U_1 - (I_1 \cdot R_1) - (I_3 \cdot R_A) = 0 \quad I_3 = 53,8A$$

3.5.3 | Der RC-Strangkreis

16.05.24

→ Beschreibung der zeitlichen Lade- und Entladevorgang einer Kapazität C .

Strangkreis:



$$t = 0: Q(0) = 0$$

$$I(t) = \dot{Q}(t)$$

$$U_C = \frac{Q(t)}{C}$$

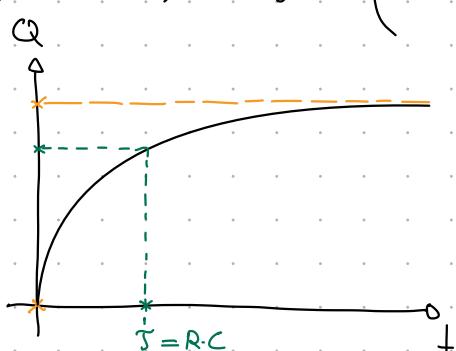
$$\text{M: } U_0 - U_C - (I \cdot R) = 0, \quad U_C = U_C(t)$$

$$I = I(t)$$

$$\rightarrow U_0 - \frac{Q(t)}{C} - (\dot{Q}(t) \cdot R) = 0, \quad Q(t) = ?$$

$$\Leftrightarrow \boxed{\dot{Q} + \frac{Q}{RC} = \frac{U_0}{R}} \quad \text{DGL 1. Ord linear}$$

Lösung: $Q(t) = U_0 \cdot C \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right); \quad U_C(t) = \frac{Q(t)}{C}$

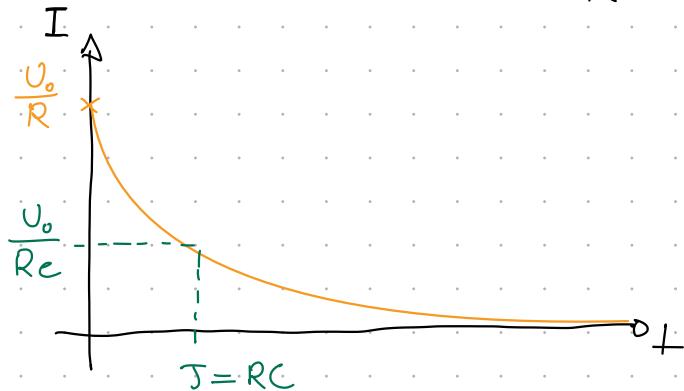


$$\begin{aligned} \text{Bem: } [RC] &= 1 \Omega \cdot 1 F \\ &= \dots \\ &= 1 s \end{aligned}$$

⇒ Char. Ladzeit des RC-Kreises:

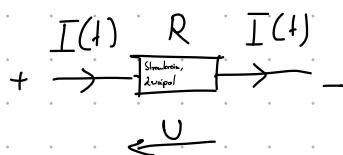
$$\boxed{T = R \cdot C}$$

Ladestrom: $I(t) = \dot{Q} = \frac{U_0}{R} e^{-\frac{t}{RC}}$



3.5.4 | Elektrische Leistung P

Prinzip:



El. Arbeit:

$$(W_{el} = -q \cdot U)$$

$$dW_{el} = dQ \cdot U(t)$$

El. Leistung:

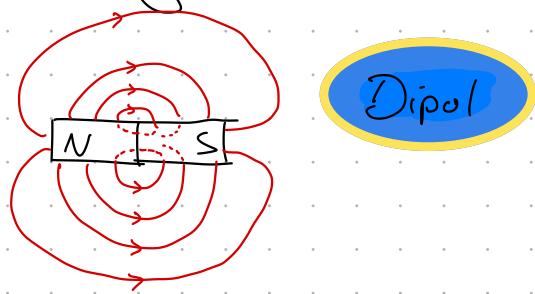
$$P(t) = \frac{dW_{el}}{dt} = U(t) \cdot \frac{dQ}{dt} = U(t) \cdot I(t)$$

$$[P] = [U \cdot I] = 1V \cdot 1A = 1W \quad (1 \text{ Watt}) \quad (= 1 \frac{J}{s})$$

3.6 | Magnetfelder - magnetische Phänomene

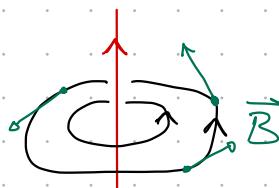
3.6.1 | Magnetische Phänomene

a) Permanentmagnete ("Erze")



b) Magnetfeld eines Stroms I

↓ H.C. Oersted 1820

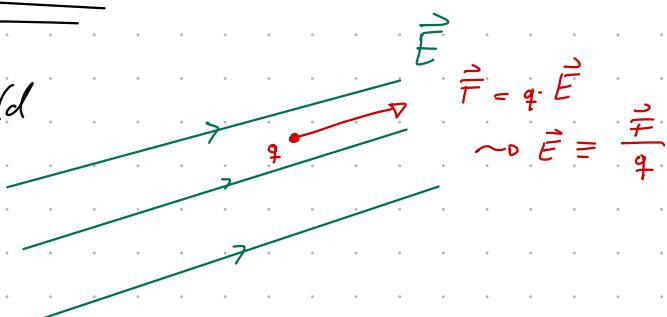


\vec{B} -Feldlinien sind immer geschlossen.

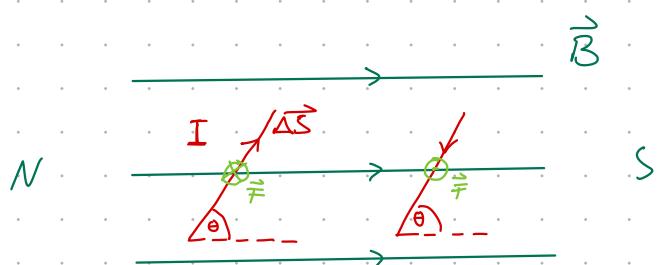
3.6.2 | Messung des \vec{B} -Feldes

17.05.24

Erinnerung: Messprinzip \vec{E} -Feld



Def: \vec{B} -Feld über Probestrom



Vektoriell:

$$\vec{F} = I \vec{A} \vec{s} \times \vec{B}$$

Probestrom: $I \vec{A} \vec{s}$

$$F \sim I \cdot |A\vec{s}| \cdot B \cdot \sin \theta$$

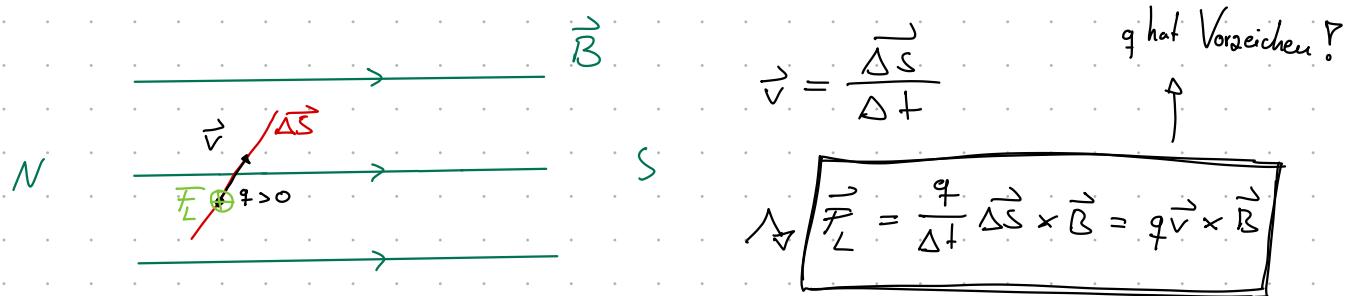
$$[\vec{B}] = 1 \frac{N}{A \cdot m} = 1 T \text{ (Tesla)}$$

Bem: 1) Erdmagnetfeld: $B \approx 0,5 \cdot 10^{-4} T$
 $\approx 0,5 \text{ Gauß (G)}$

2) Magnetfeld Tomograph: $B \sim 10T$

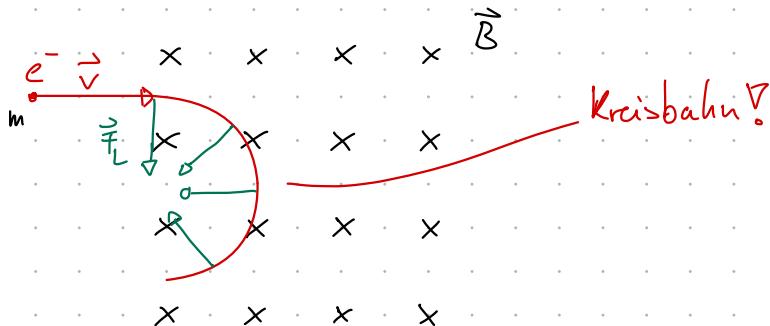
3) Elektromagnet: $B \sim 1T$

3.6.3/ Einzelne Ladung im Magnetfeld - Lorentz-Kraft



Konsequenzen:

a) e^- im homogenen Magnetfeld

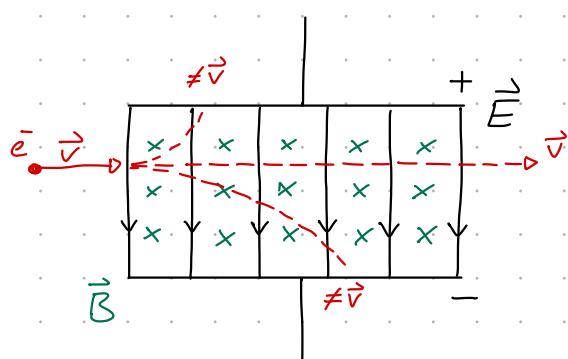


Kreisbahn: Zentripetalkraft = Lorentzkraft

$$m \frac{v^2}{R} = evB; \theta = \frac{\pi}{2}$$

$$R = \frac{mv}{eB}$$

b) Geschwindigkeitsfilter - gekreuzte E/B -Felder



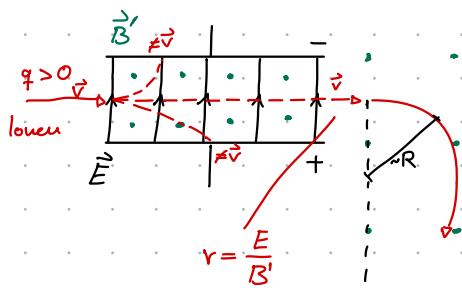
Bedingung für geradlinige Bahnen!

$$evB = E \rightarrow$$

$$v = \frac{E}{B}$$

$$\text{Bem: } \left[\frac{E}{B} \right] = \frac{m}{s}$$

c) Prinzip des Massenspektrometers



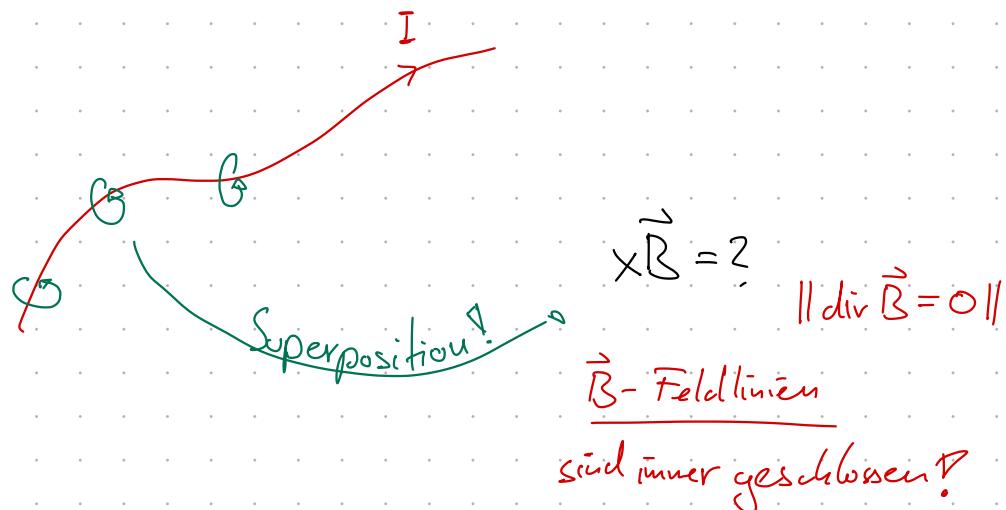
$$R = \frac{m \cdot v}{q \cdot B} = \frac{m \cdot E}{q \cdot B \cdot B'}$$

$$\Rightarrow \frac{m}{q} = \frac{R \cdot B \cdot B'}{E}$$

3.6.4 // Erzeuger von Magnetfeldern - Beispiele

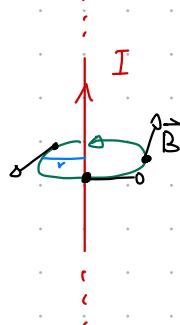
23.05.24

a) Grundprinzip - Gesetz von Biot und Savart (1820)



b) Beispiele für Magnetfelder

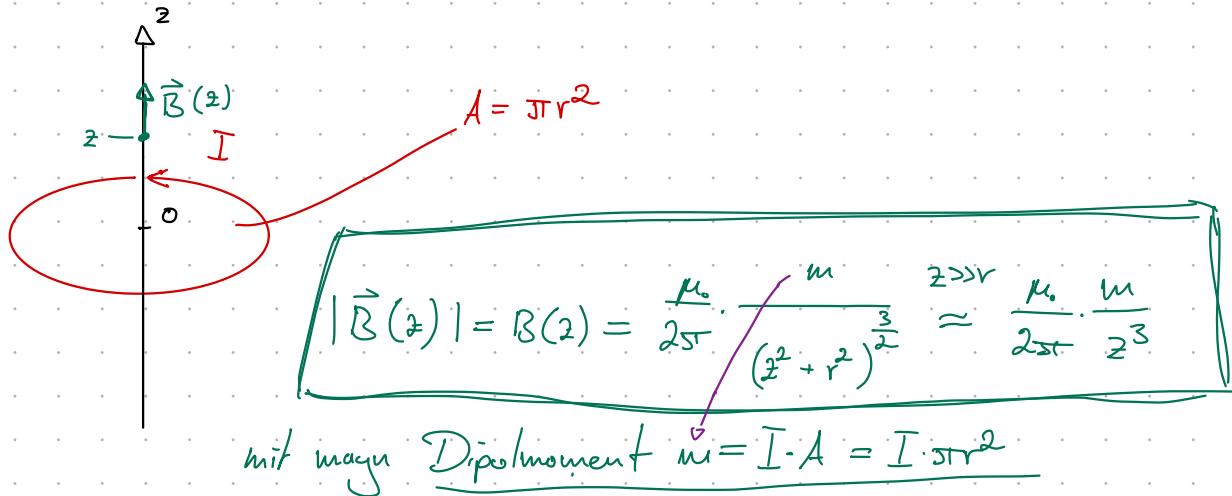
i) Oersted - Magnetfeld



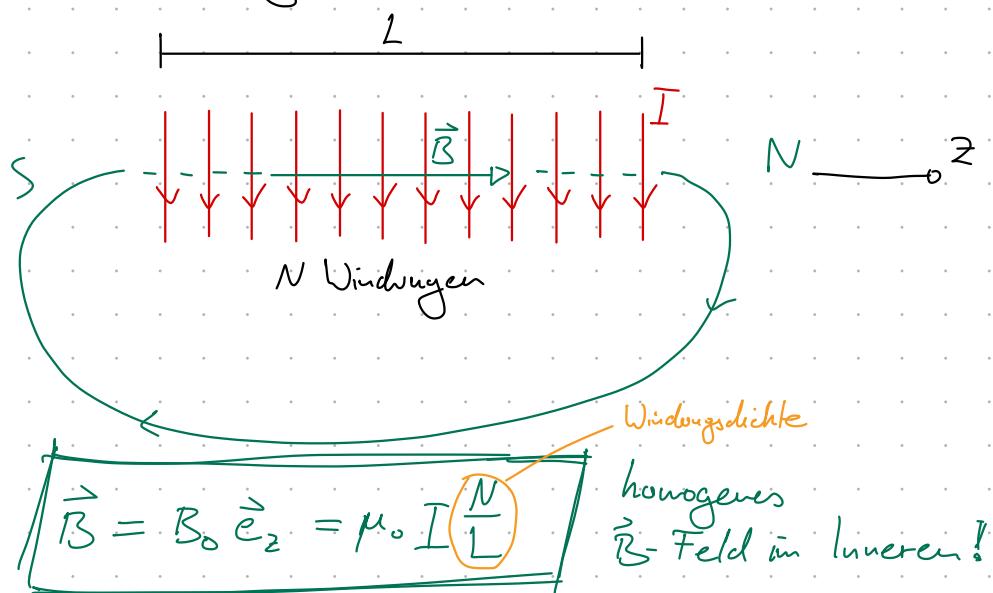
$$|\vec{B}| = B(r) = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I}{r}$$

μ_0 = magnetische Feldkonstante,
Permeabilität des Vakuums
 $= 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{T \cdot m}{A}$

ii) Magnetfeld eines Kreisstroms - magn. Dipol



iii) Magnetfeld einer langen Spule (Solenoid)



3.6.5 // Magnetische Materialien

24.05.24

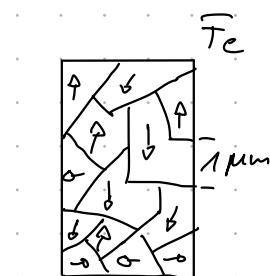
↳ Drei Grundklassen

- Ferromagnete (Permanentmagnete):
Fe, Ni, Co, Gd (bei Raumtemperatur)

- Paramagnete:
Al, Ca, ...

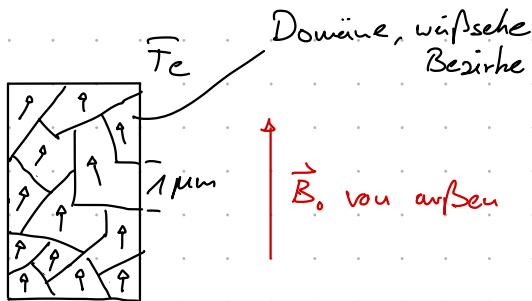
- Diamagnete:
Au, Pb, Diamant, Bi

a) Ferromagnete



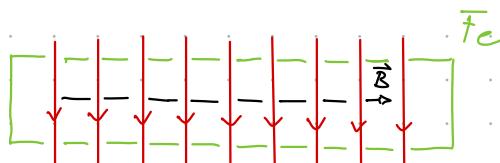
nicht magnetisiert

„umklappen“
der Domänen



magnetisiert

i) Ausrichten der Domänen im äußeren Feld

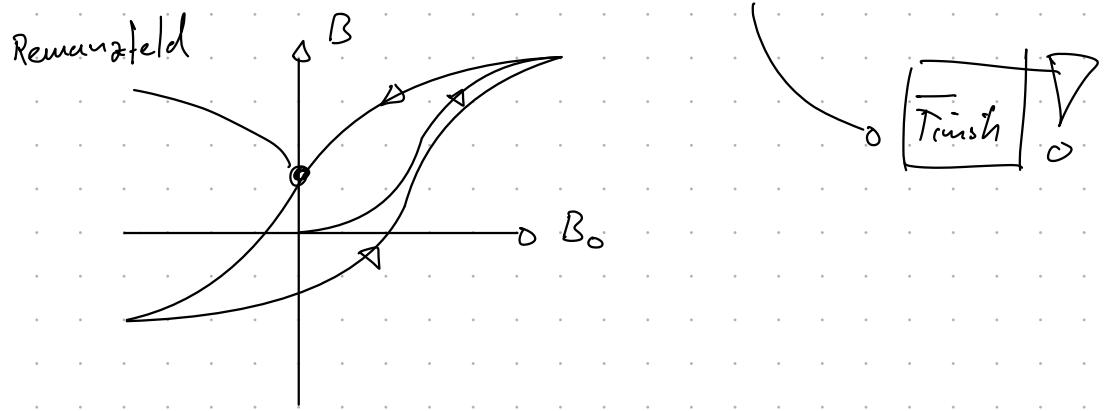


$$\begin{aligned}\vec{B} &= \vec{B}_{\text{Spule}} + \vec{B}_{\text{Fe}} \\ &= \mu_r \cdot \mu_0 \cdot I \cdot \frac{N}{L} \vec{e}_z\end{aligned}$$

μ_r : relative Permeabilität (Materialkonst.)

z.B.: $\mu_{r,\text{Fe}} \approx 5000$

Ausrichten findet statt nach einer sog. Hysteresekurve:



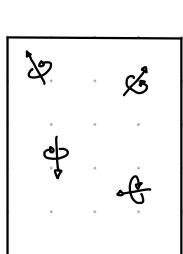
ii) Zerstören der Ausrichtung durch Temperatur

Temperatur: Curiekp. = Curie-Temperatur

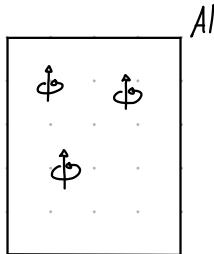
$$T_{C, Fe} \approx 1000 \text{ K}$$

b) Paramagnetismus (schwach magnetisierbar)

z.B.: Al $\mu_{r, Al} = 1 + 2 \cdot 10^{-5}$



vorher Dipole
nicht magnetisiert



ausgerichtete Dipole
magnetisiert (schwach!)

c) Diamagnetismus

$\mu_r < 1 \Rightarrow$ keine perm. magu. Dipole im Material vorhanden;

Dipole werden induziert durch äußeres Feld

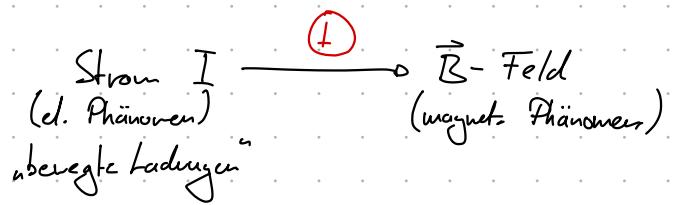
Induktionsgesetz \propto

3.7 Elektromagnetische Induktion

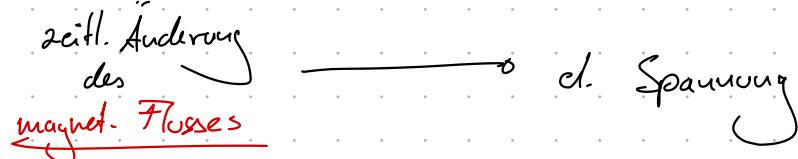
-1830

↳ Entdeckt von M. Faraday und J. Henry

Wir wissen schon:



Jetzt:



 el. Phänomene \longleftrightarrow magnet. Phänomene