

3.3-1

25.04.24

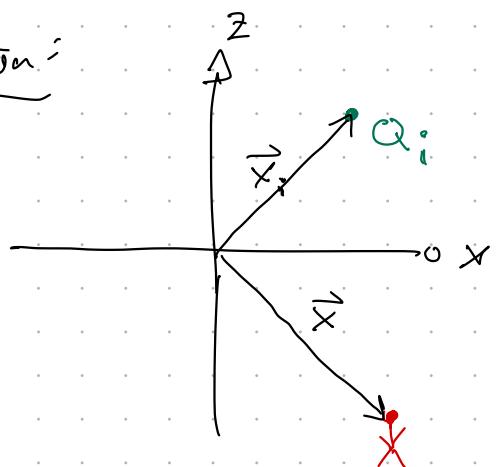
[...]

↪ 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:

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

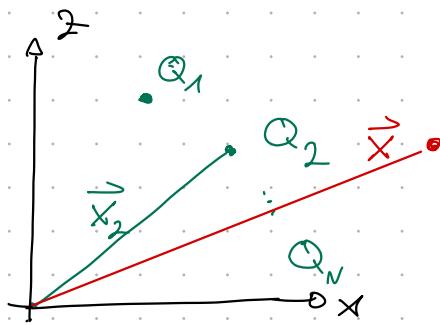
Beurk. Einheiten

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

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

Zerlegen

### 3.3.2 | Das el. Potential einer beliebigen Ladungsverteilung



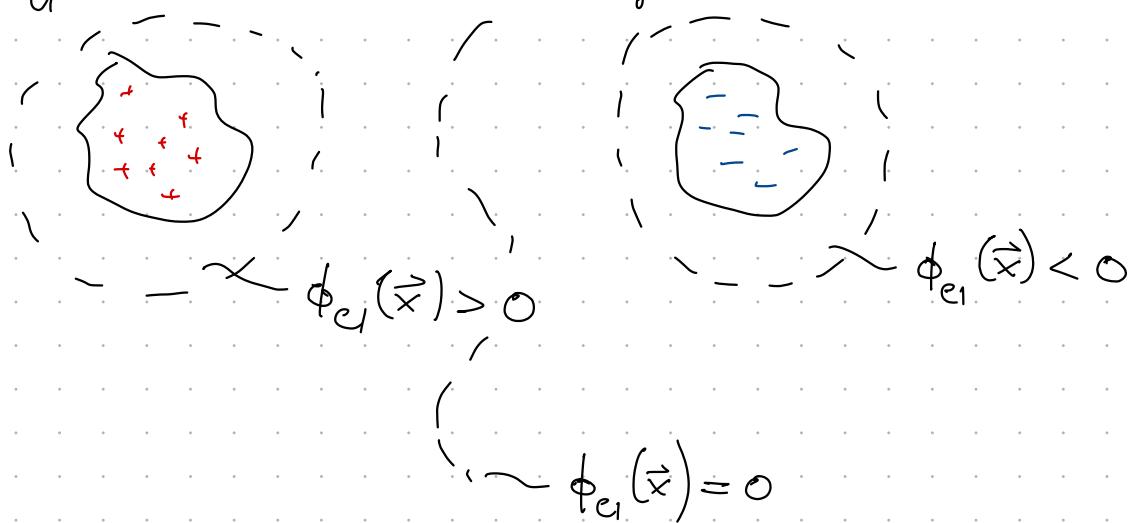
Superposition:

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

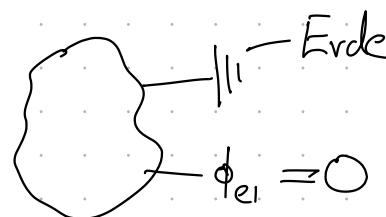
$$\text{mit } |\vec{x} - \vec{x}_i| = \sqrt{(x - x_i)^2 + \dots + (z - z_i)^2}$$

Bem:

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



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



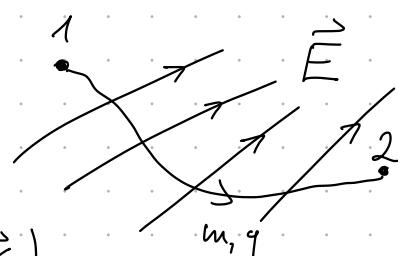
3. EES geschrieben mit  $\phi_{el}(\vec{x})$ :

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

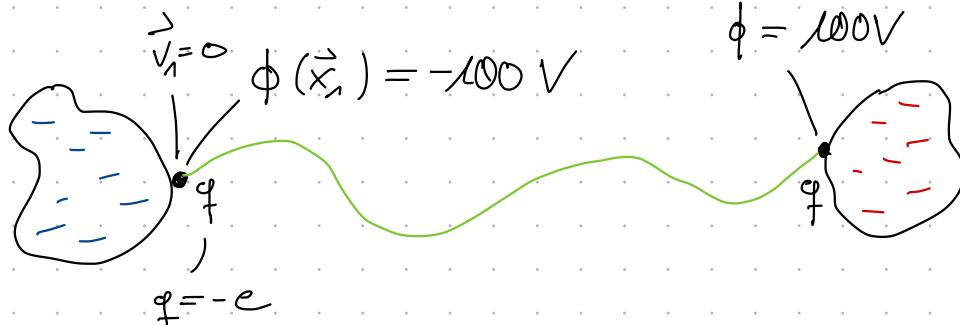
$$\underbrace{\frac{1}{2} m \vec{v}_1^2 + q (\phi_{el}(\vec{x}_1) - \phi_{el}(\vec{x}_2))}_{\text{el. Arbeit}} = \frac{1}{2} m \vec{v}_2^2$$



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:

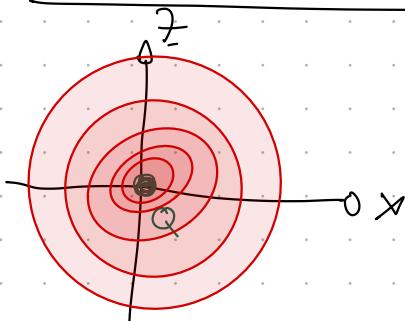
$$\phi = \text{const.}$$

Analogie:

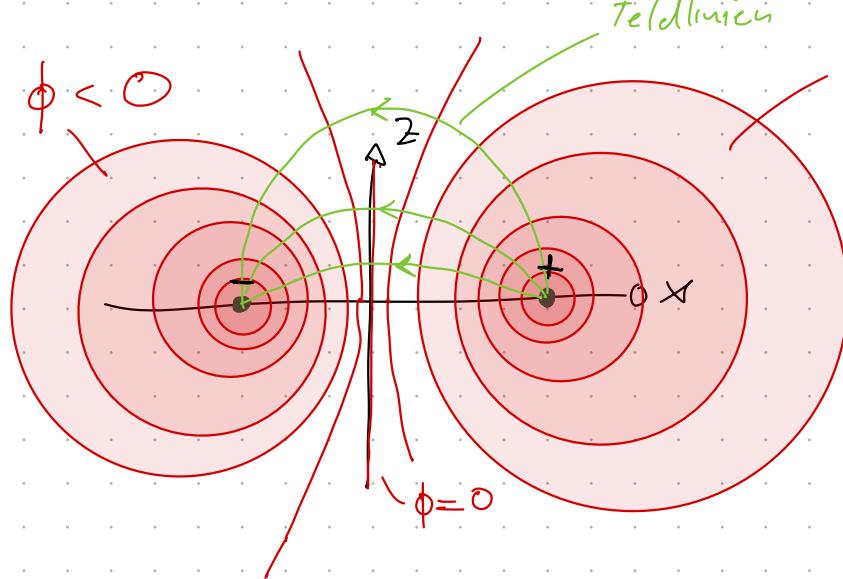
Höhenlinien einer topographischen Karte.



b) Äquipotentialflächen / -linien des Coulomb-Potentials



### c) Äquipotentiallinien des Dipols

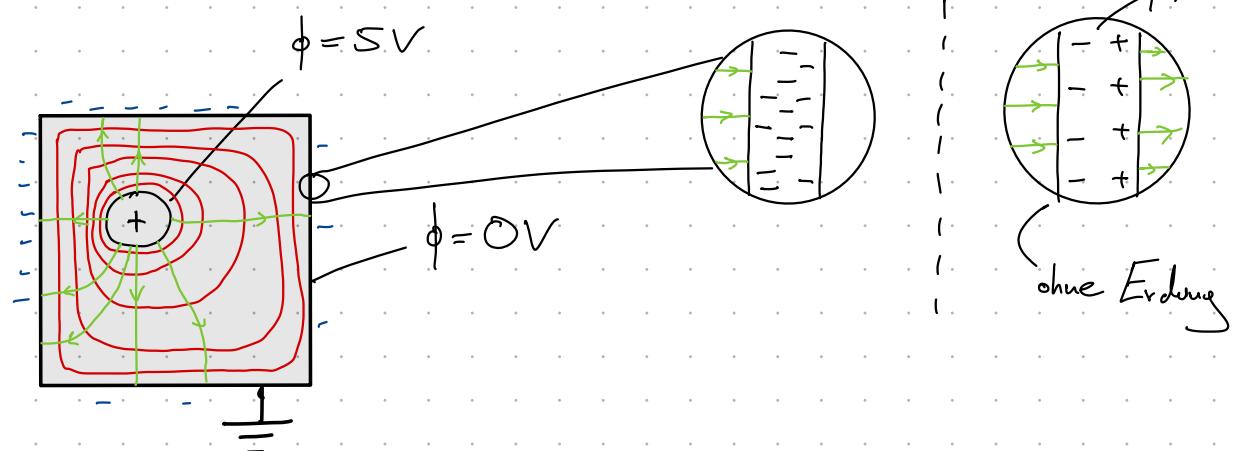
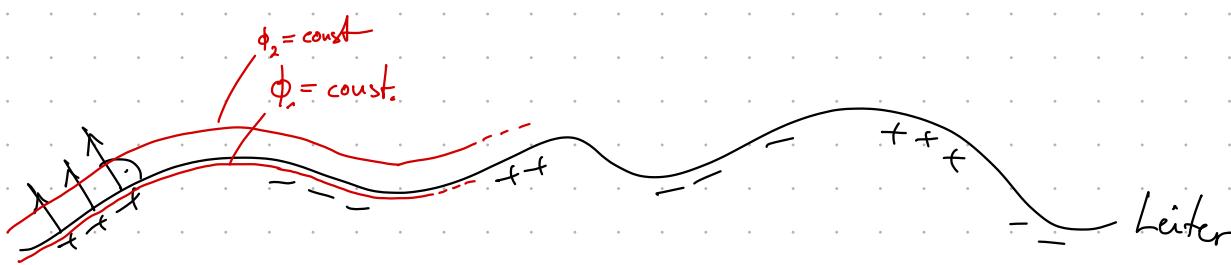


$\Rightarrow$  Feldlinien verlaufen  
senkrecht durch  
Äquipotentiallinien!

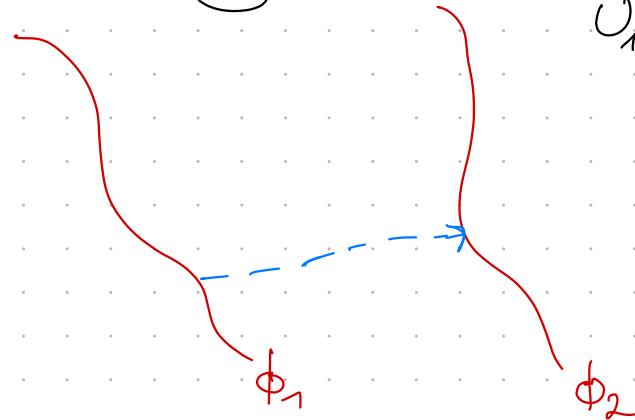
### d) Äquipotentiallinien an Leiteroberflächen

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. $\phi$ und $\vec{E}$



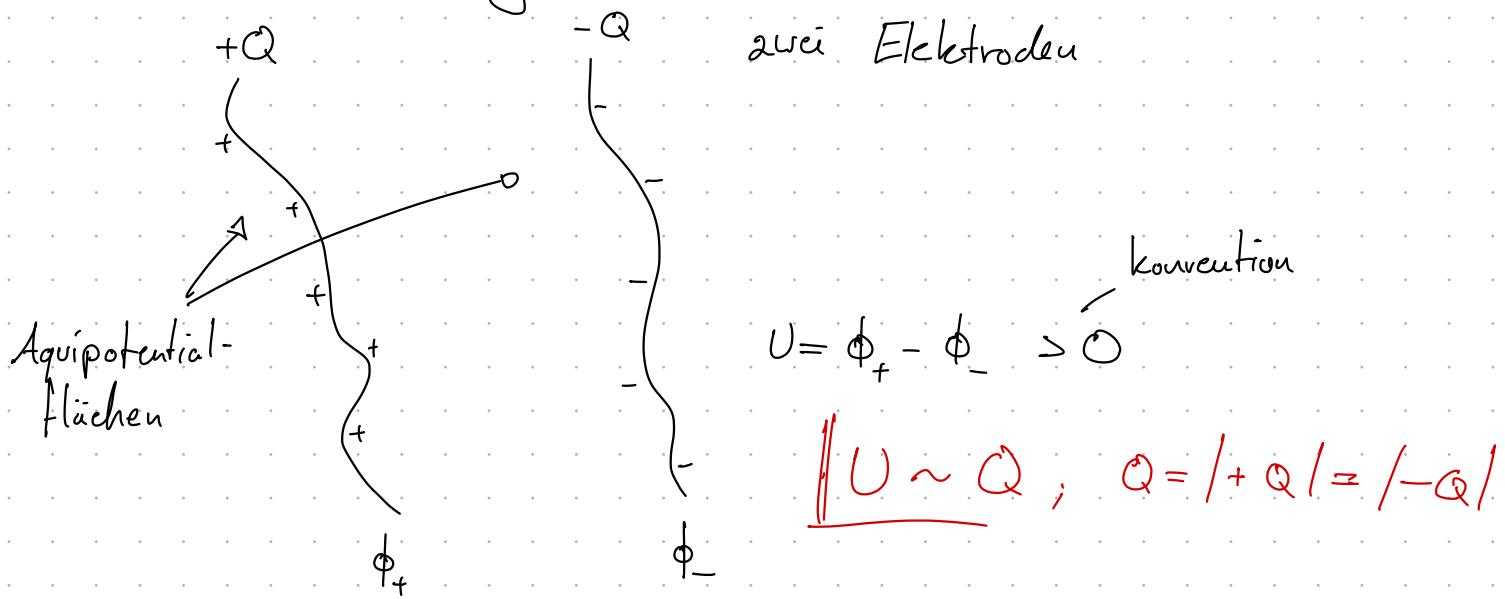
≈ Gradient von  $\phi(x, y, z) = \phi(\vec{x})$  bestimmt  $\vec{E}$ -Feld:

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

3.4

## Anwendung: Kapazität, Kondensator

### 3.4.1 // Kapazität: allgemein



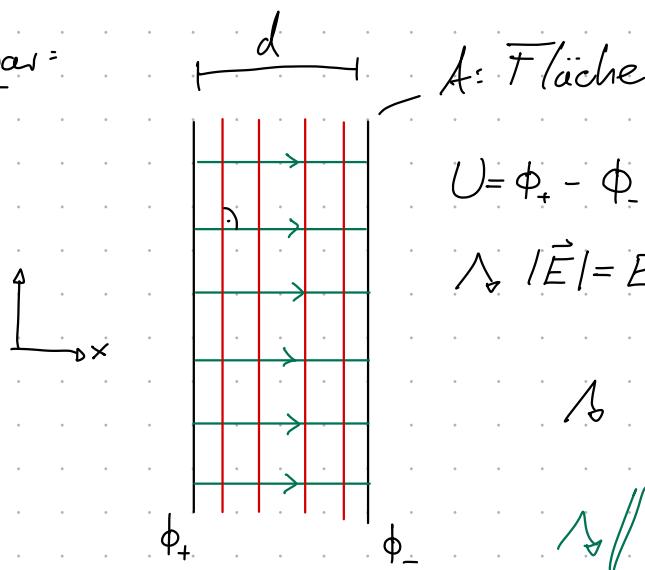
$$\rightsquigarrow \underline{Q = C \cdot U}$$

$C$ : 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:  $\text{---} \cap$

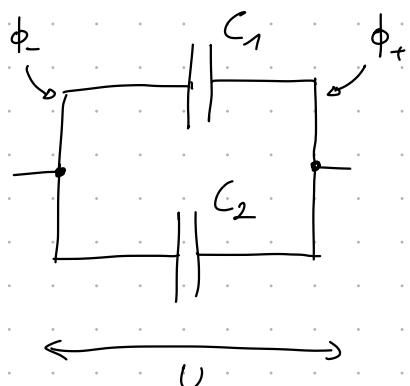
02.08.24

4) Anwendungen:

- Standlicht
- Speicherchips 0/1
- Zellmembran

### 3.4.3 | Zusammenschalten von Kapazitäten

#### (i) Parallelschaltung



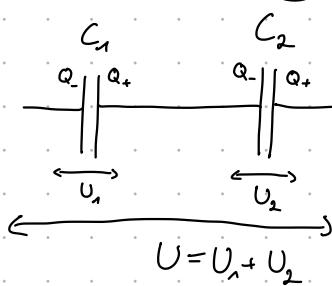
$$Q_1 = C_1 \cdot U$$

$$Q_2 = C_2 \cdot U$$

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

$$C_{\text{ges}} = C_1 + C_2 \quad \text{~analog für } n > 2$$

#### (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

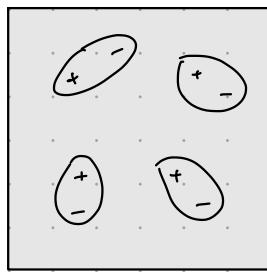
Bisher: Alles im Vakuum!

Jetzt: Was passiert in polarisierbarer Materie - Dielektrika?

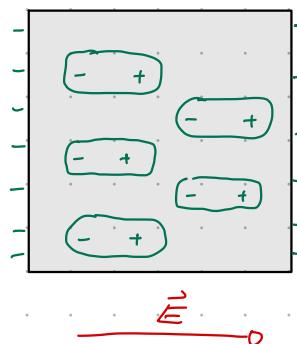
Polarisation:

(i) Materie mit permanenten Dipolen:

$$\vec{E} = 0$$



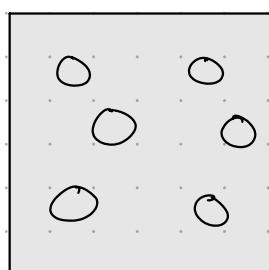
$$\vec{E} \neq 0$$



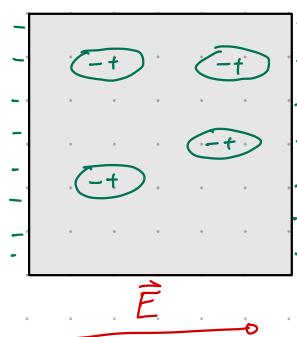
(ii) Materie ohne permanente Dipole:

$\rightarrow$  Dipole werden zunächst induziert!

$$\vec{E} = 0$$

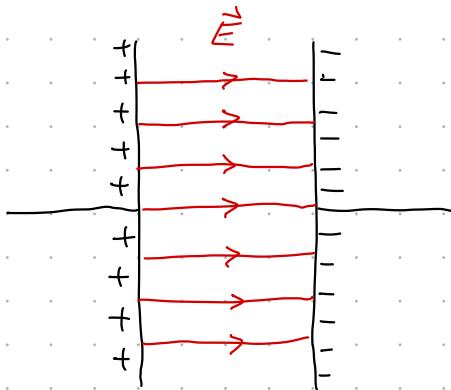


$$\vec{E} \neq 0$$

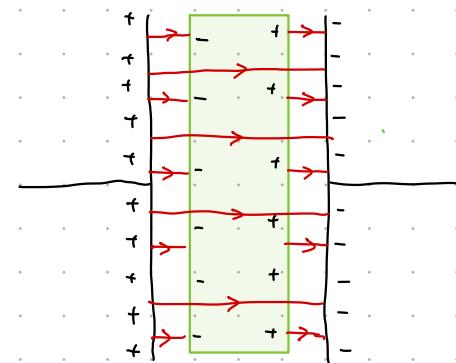


Polarisation

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

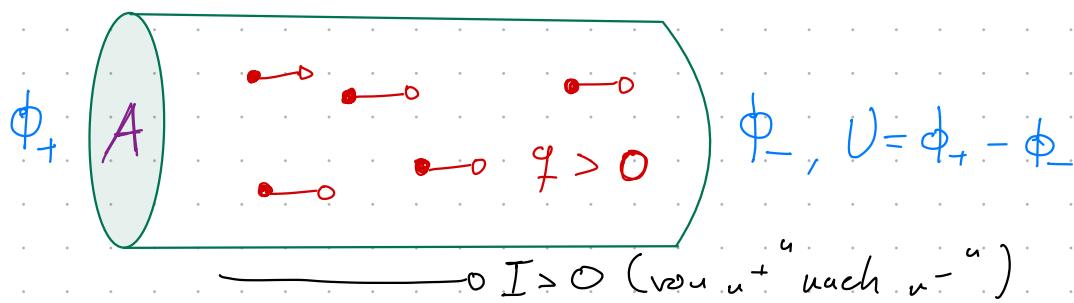
$$\rightarrow U_D = E_D \cdot d = \frac{E_0}{\epsilon_r} \cdot d = \frac{U_0}{\epsilon_r}$$

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

Kapazität mit Dielektrikum wird größer!

3.5Bewegte Ladungen - Ströme

03.05.24

Bisher: Elektrostatik ( $\sim 1800$ )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  $\Delta t$ :

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

- (Momentan-) Strom:

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

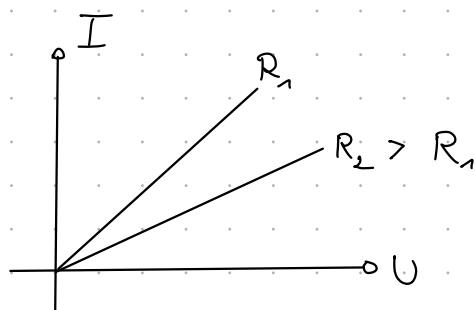
Ampère

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:



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

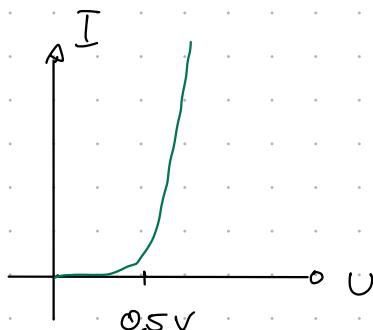
Dimension:  $R = \text{Ohmischer Widerstand}$

$\hookrightarrow$  Materialkonstante

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

Bem.: Nicht ohmische Materialien

z.B. Halbleiterdiode



Der spezifische Widerstand:  $\rho$

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

Exp.:

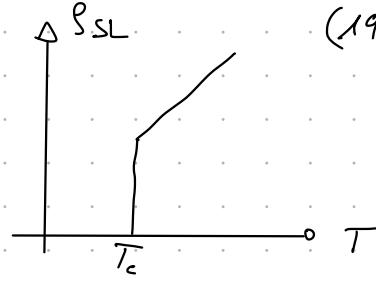
$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}$$

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

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

- Glasstab

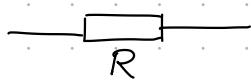
- Supraleiter



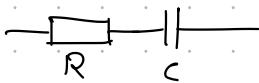
(1911 an Hg bei  
 $T_c = 4,2 \text{ K}$ )

↓ Sprungtemperatur

Schaltsymbol ohmischer Widerstand:



z.B.:



(Zweipol)

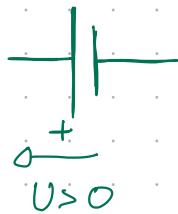
## 3.5.2 | Stromkreise - Kirchhoff'sche Regeln

10.05.24

KR: G. Kirchhoff, 1845

Liste der Zweipole:

• Spannungsquelle:



• Kondensator:



C, [C] = 1 Farad

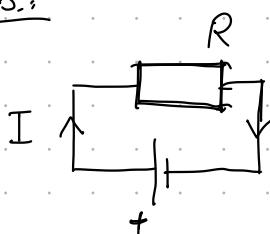
• Ohmischer Widerstand:



R, [R] = 1 Ω

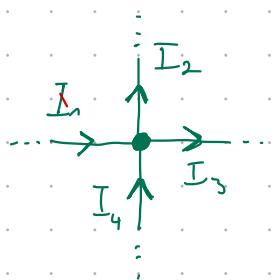
↗ Kombinationen aus diesen Zweipolen liefern/ergeben Stromkreise!

Bsp.:



a) Regeln für diese Stromkreise = KR

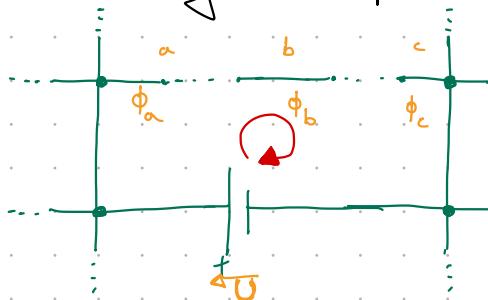
i) Knotenregel für Ströme



$$I_1 + I_4 = I_2 + I_3$$

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

ii) Maschenregel für Spannungen



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

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

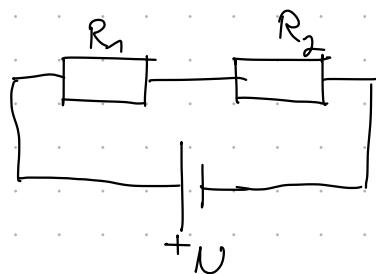
$$U = \phi_a - \phi_c$$

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

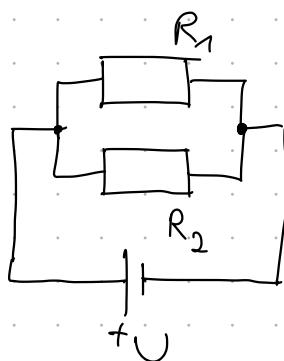
$$\boxed{\sum_i U_i = 0 \text{ in einer Masche}}$$

b) Beispiele

1) Reihen- u. Parallelschaltung von ohmischen Widerständen

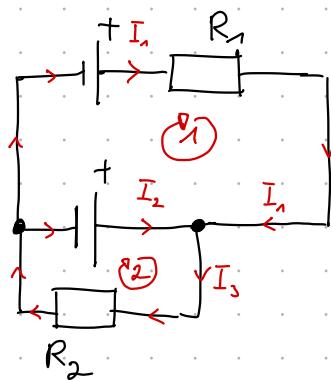


$$R_{\text{ges}} = R_1 + R_2$$



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

## 2) Etwas komplizierterer Stromkreis



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

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

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

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

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

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

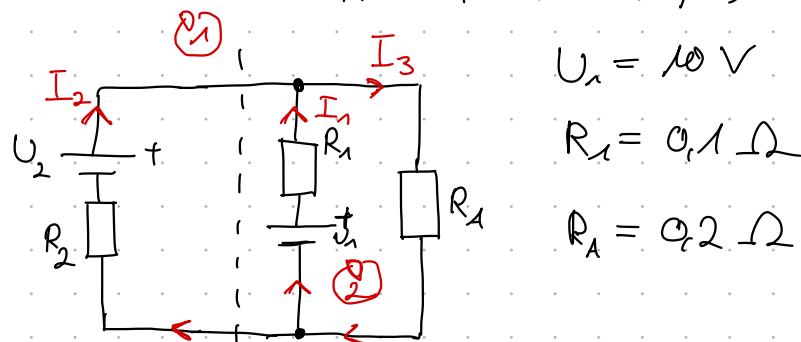
$$(3) \quad I_3 = \frac{U_2}{R_2} = \underline{\underline{1A}}$$

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

## 3) Starthilfe Autobatterie

$$U_2 = 12V$$

$$R_2 = 0,02\Omega$$



Auto 1 (Starthilfe)

$$U_1 = 10V$$

$$R_1 = 0,1\Omega$$

$$R_A = 0,2\Omega$$

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

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

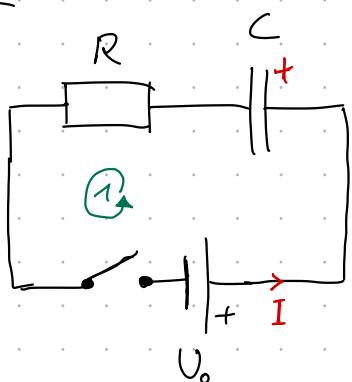
$$U_1 - (I_1 \cdot R_1) - (I_3 \cdot R_A) = 0 \quad I_3 = 53,8A$$

### 3.5.3 | Der RC-Strangkreis

16.05.24

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

Strangkreis:



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

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

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

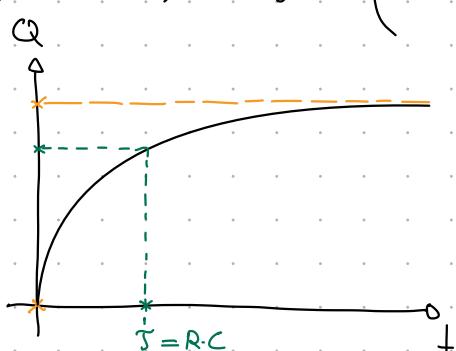
$$\text{M: } U_0 - U_C - (I \cdot R) = 0, \quad U_C = U_C(t)$$

$$I = I(t)$$

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

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

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

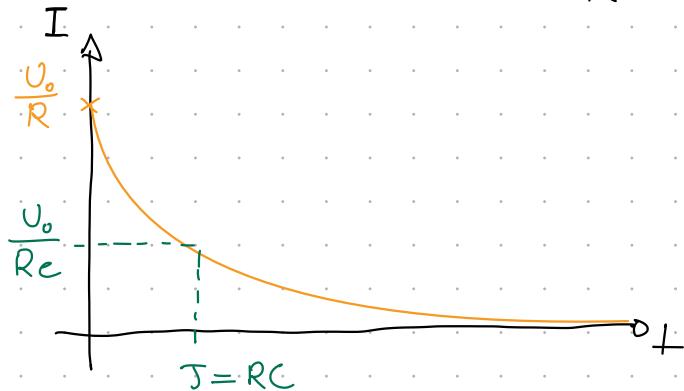


$$\begin{aligned} \text{Bem: } [RC] &= 1 \Omega \cdot 1 F \\ &= \dots \\ &= 1 s \end{aligned}$$

⇒ Char. Ladegesetz des RC-Kreises:

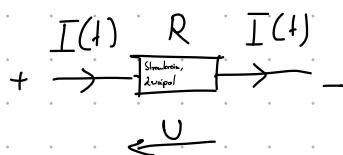
$$\boxed{T = R \cdot C}$$

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:

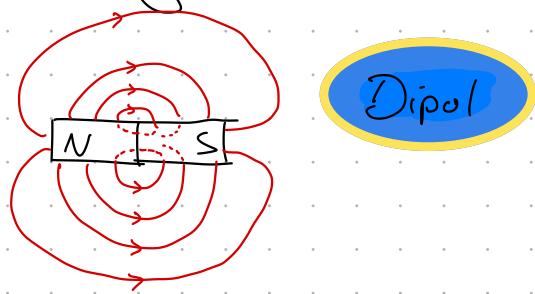
$$P(t) = \frac{dW_{el}}{dt} = U(t) \cdot \frac{dQ}{dt} = U(t) \cdot I(t)$$

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

## 3.6 | Magnetfelder - magnetische Phänomene

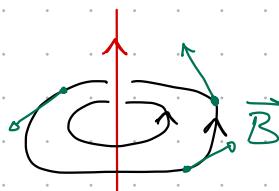
### 3.6.1 | Magnetische Phänomene

#### a) Permanentmagnete ("Erze")



#### b) Magnetfeld eines Stroms I

↓ H.C. Oersted 1820

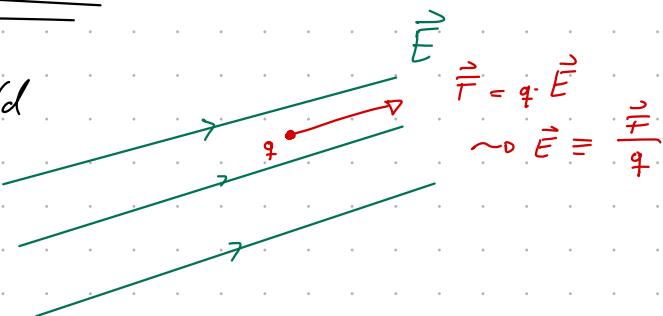


$\vec{B}$ -Feldlinien sind immer geschlossen.

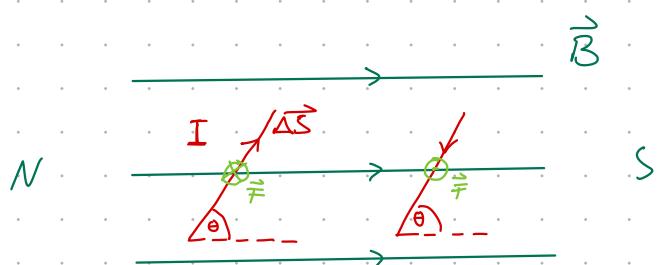
### 3.6.2 | Messung des $\vec{B}$ -Feldes

17.05.24

Erinnerung: Messprinzip  $\vec{E}$ -Feld



Def:  $\vec{B}$ -Feld über Probestrom



Vektoriell:

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

Probestrom:  $I \vec{A}$

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

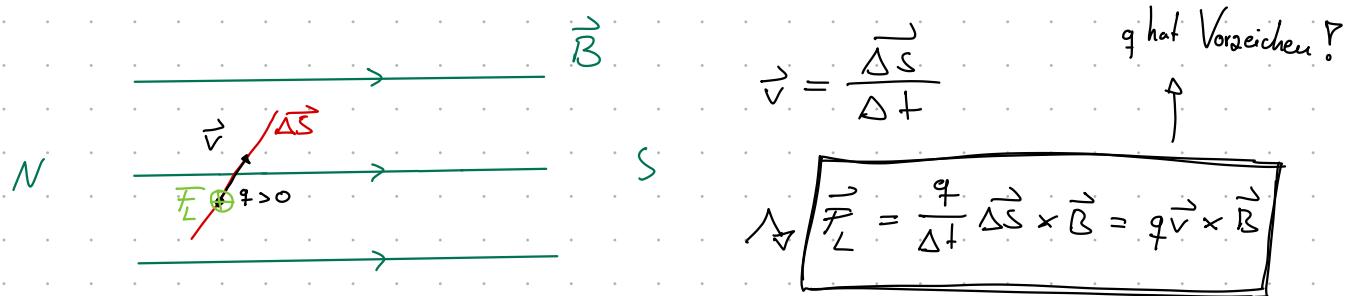
$$[B] = 1 \frac{N}{A \cdot m} = 1 T \text{ (Tesla)}$$

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

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

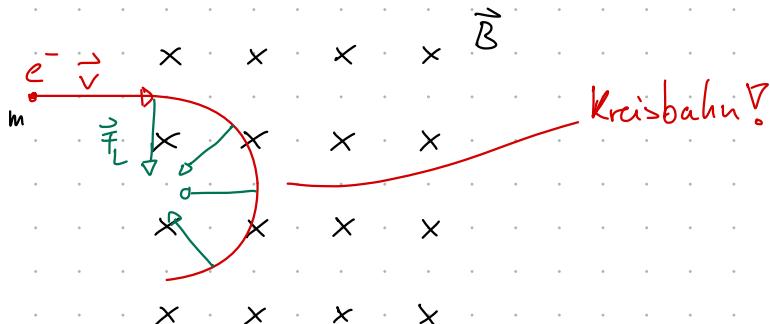
3) Elektromagnet:  $B \sim 1T$

### 3.6.3/ Einzelne Ladung im Magnetfeld - Lorentzkraft



#### Konsequenzen:

a)  $e^-$  im homogenen Magnetfeld



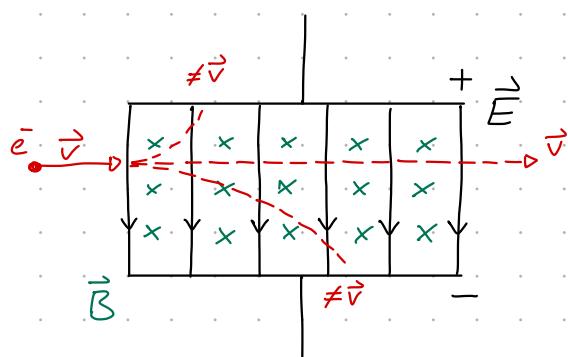
Kreisbahn: Zentripetalkraft = Lorentzkraft

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

$\hookrightarrow \sin = 1$

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

b) Geschwindigkeitsfilter - gekreuzte  $E/B$ -Felder



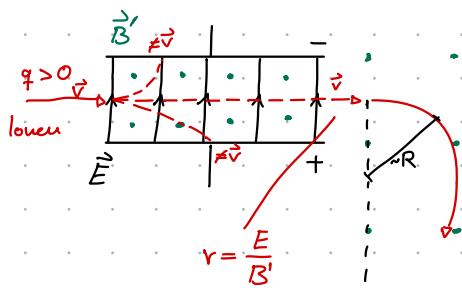
Bedingung für geradlinige Bahnen:

$$evB = E \rightarrow$$

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

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

### c) Prinzip des Massenspektrometers



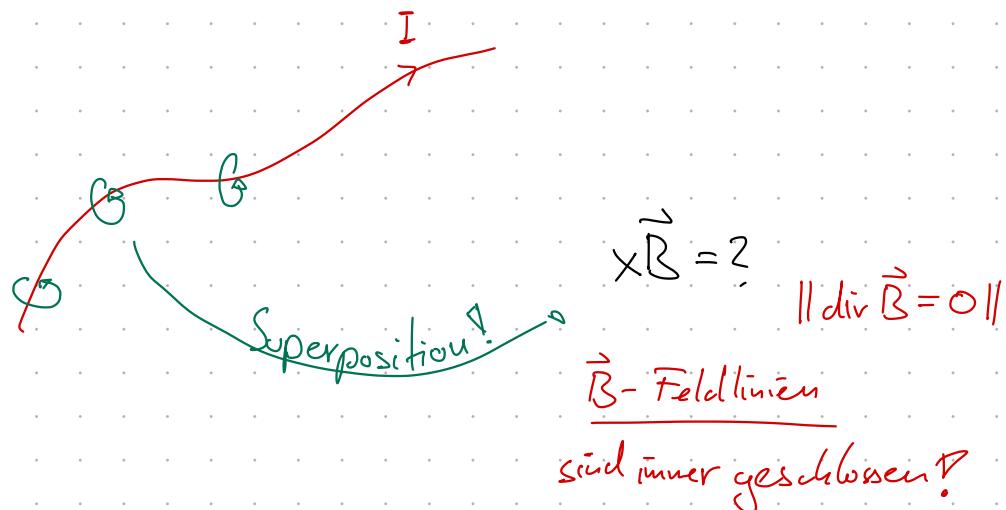
$$R = \frac{m \cdot v}{q \cdot B} = \frac{m \cdot E}{q \cdot B \cdot B'}$$

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

### 3.6.4 // Erzeuger von Magnetfeldern - Beispiele

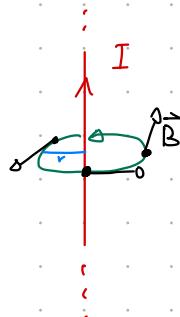
23.05.24

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



#### b) Beispiele für Magnetfelder

##### i) Oersted - Magnetfeld

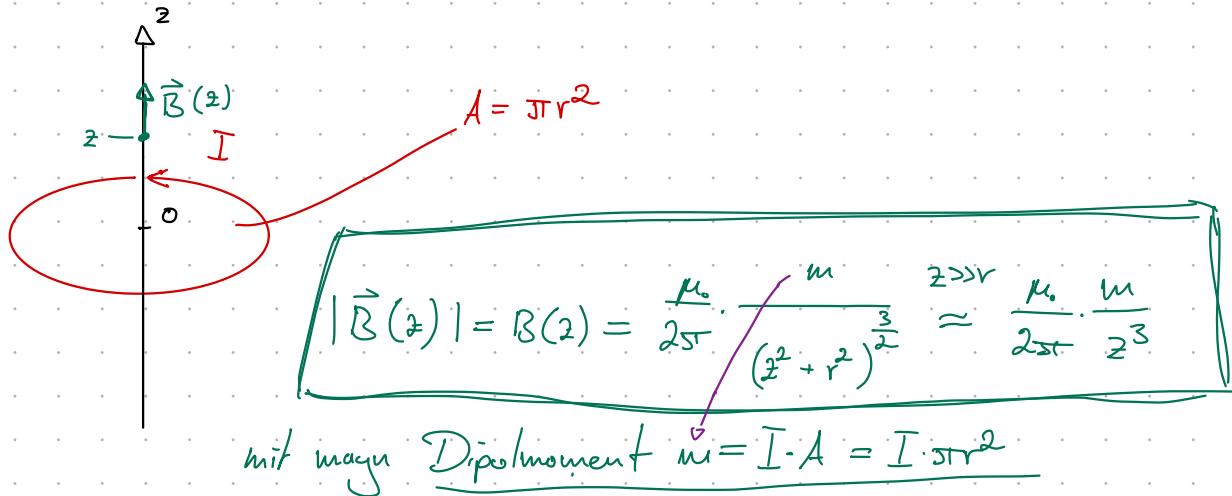


$$|\vec{B}| = B(r) = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I}{r}$$

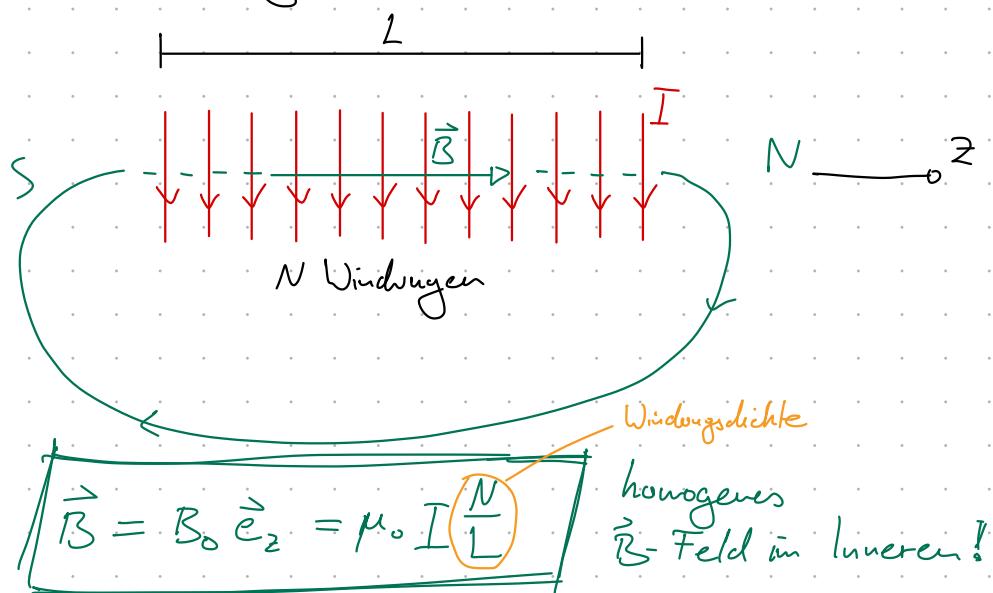
$\mu_0$  = magnetische Feldkonstante,  
Permeabilität des Vakuums

$$= 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{T \cdot m}{A}$$

## ii) Magnetfeld eines Kreisstroms - magn. Dipol



## iii) Magnetfeld einer langen Spule (Solenoid)



### 3.6.5 // Magnetische Materialien

24.05.24

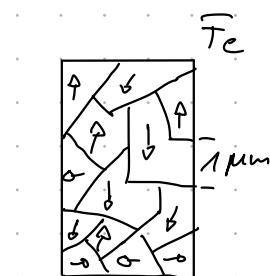
↳ Drei Grundklassen

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

- Paramagnete:  
Al, Ca, ...

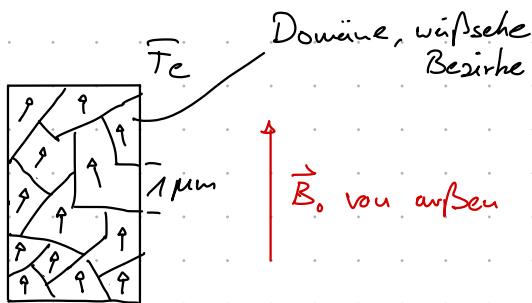
- Diamagnete:  
Au, Pb, Diamant, Bi

#### a) Ferromagnete



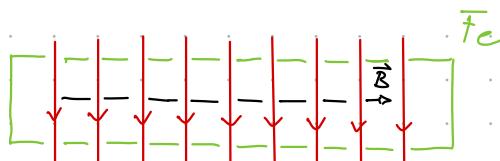
nicht magnetisiert

„umklappen“  
der Domänen



magnetisiert

#### i) Ausrichten der Domänen im äußeren Feld

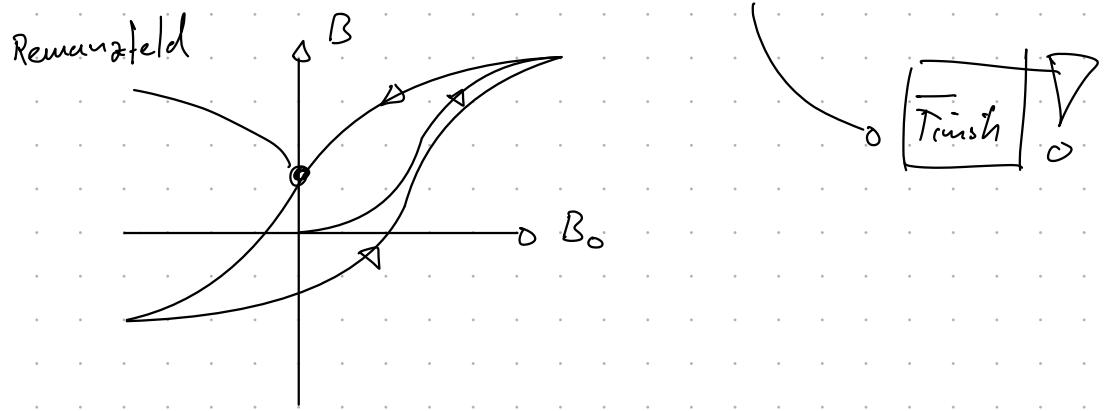


$$\begin{aligned}\vec{B} &= \vec{B}_{\text{Spule}} + \vec{B}_{\text{Fe}} \\ &= \mu_r \cdot \mu_0 \cdot I \cdot \frac{N}{L} \vec{e}_z\end{aligned}$$

$\mu_r$ : relative Permeabilität (Materialkonst.)

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

Ausrichten findet statt nach einer sog. Hysteresekurve:



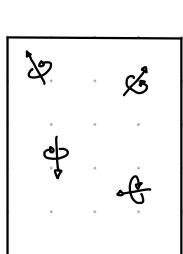
ii) Zerstören der Ausrichtung durch Temperatur

Temperatur: Curiekp. = Curie-Temperatur

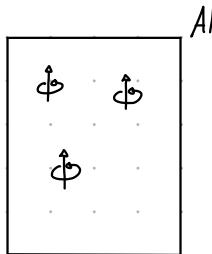
$$T_{C, Fe} \approx 1000 \text{ K}$$

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

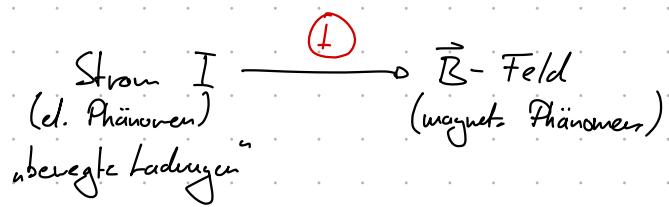
Induktionsgesetz  $\propto$

### 3.7 | Elektromagnetische Induktion

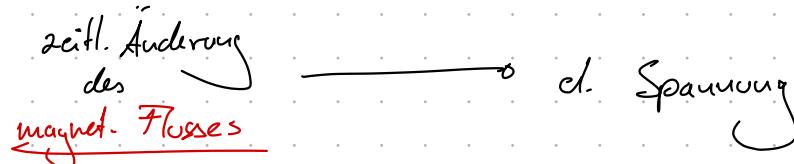
-1830

↳ Entdeckt von M. Faraday und J. Henry

Wir wissen schon:



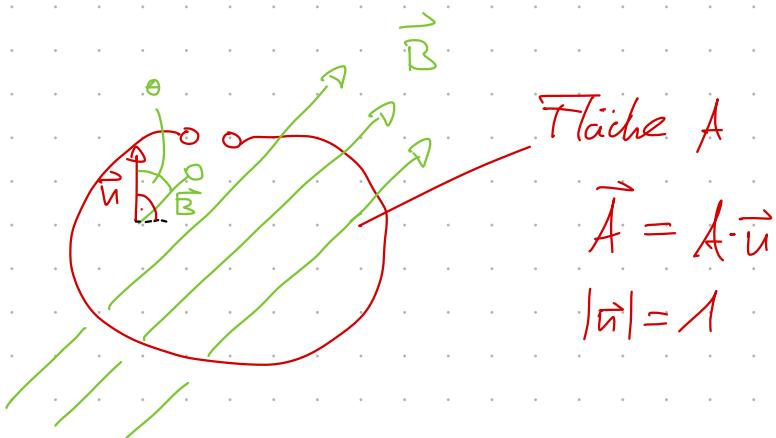
Jetzt:



el. Phänomene  $\leftrightarrow$  magnet. Phänomene

### Grundexperimente zur Induktion

06.06.24 /  
08.06.24



$U_{\text{ind}}$  entsteht nur, wenn:

- $A = A(t)$  (zeitliche Veränderung) / oder  $\vec{B} = \vec{B}(t)$
- A muss von  $\vec{B}$  durchflossen werden

## Magnetischer Fluss von $\vec{B}$ durch A

$$\boxed{\Phi_{\text{mag}} = \vec{B} \cdot \vec{A} = |\vec{B}| \cdot A \cdot \cos(\theta)}$$

Einheit  $[\Phi_{\text{mag}}] = 1 \text{ T m}^2 = 1 \text{ Wb} \text{ (Weber)}$   
 $= 1 \frac{N}{m \cdot A} \text{ m}^2 = 1 \frac{C \frac{V}{m}}{m \cdot A} \cdot \cancel{m^2} = 1 \frac{A \cdot s \cdot V}{A} = 1 \text{ Vs}$

$$\rightarrow 1 \text{ V} = 1 \frac{\text{Wb}}{\text{s}}$$

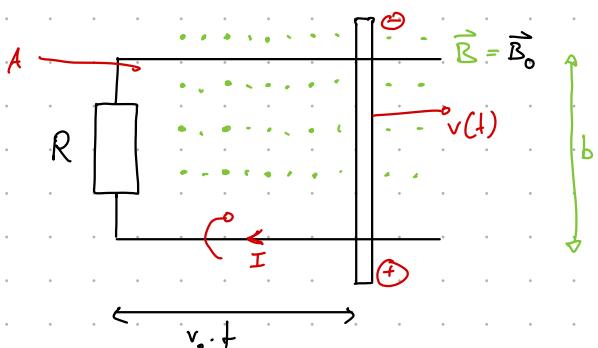
$\rightarrow$  Vollständiges Induktionsgesetz folgt somit aus der obigen Einheitenüberlegung! ✓

## 3.7.1 | Induktionsgesetz

- $U_{\text{ind}} = \left| \frac{d}{dt} \Phi_{\text{mag}}(t) \right|$

- Lenz-Regel:  $U_{\text{ind}}$  ist so gepolt, dass der Flussänderung entgegen gewirkt wird.

### Prinzip eines Generators:



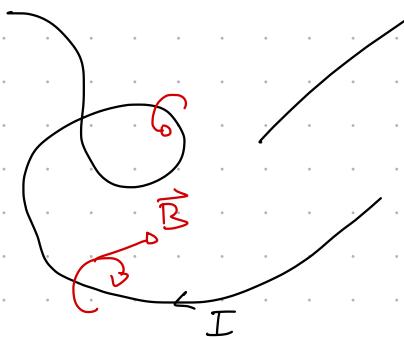
$$\rightarrow A = A(t) = b \cdot v_0 \cdot t$$

$$\rightarrow \Phi_{\text{mag}}(t) = B_0 \cdot A(t) = B_0 \cdot b \cdot v_0 \cdot t$$

$$\rightarrow U_{\text{ind}} = \left| \frac{d}{dt} \Phi_{\text{mag}} \right| = B_0 \cdot b \cdot v_0$$

## 3.7.2 | Induktivität

magn. Fluss  $\Phi_{\text{mag}}$  enthalten / gespeichert



$\nearrow$  Speichervermögen für  $\Phi_{\text{mag}}$  einer Leiteranordnung heißt Induktivität. (vgl. Kapazität)

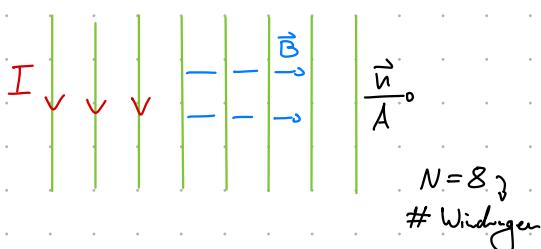
$\nearrow \Phi_{\text{mag}} = L \cdot I$  (vgl.  $Q = C \cdot U$ )

$\hookrightarrow$  Proportionalitätskonstante

Einheit:  $[L] = \left[ \frac{\Phi_{\text{mag}}}{I} \right] = 1 \frac{\text{Wb}}{\text{A}} = 1 \text{H}$  (Henry)

Bsp: L einer langen Spule (Solenoid)

(Aufsicht)



$$|\vec{B}| = B = \mu_0 \cdot \frac{N}{l} I$$

$$\nearrow \Phi_{\text{mag}} = B \cdot A \cdot N$$

$$= \mu_0 \cdot \frac{N}{l} \cdot I \cdot A \cdot N$$

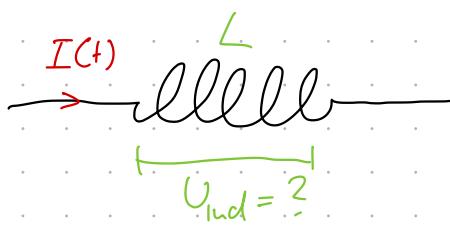
$$= \mu_0 \cdot \frac{N^2}{l^2} \underbrace{(A \cdot l)}_{V} \cdot I$$

$$= V$$

$\nearrow$  Geometriegröße  
 $L = \mu_0 \cdot \frac{N^2}{l^2} \cdot V$

### 3.7.3 | Induktionsspannung an einer Induktivität

Betrachte:



$$\Phi_{\text{mag}} = L \cdot I$$

$\hookrightarrow$  nicht änderbar

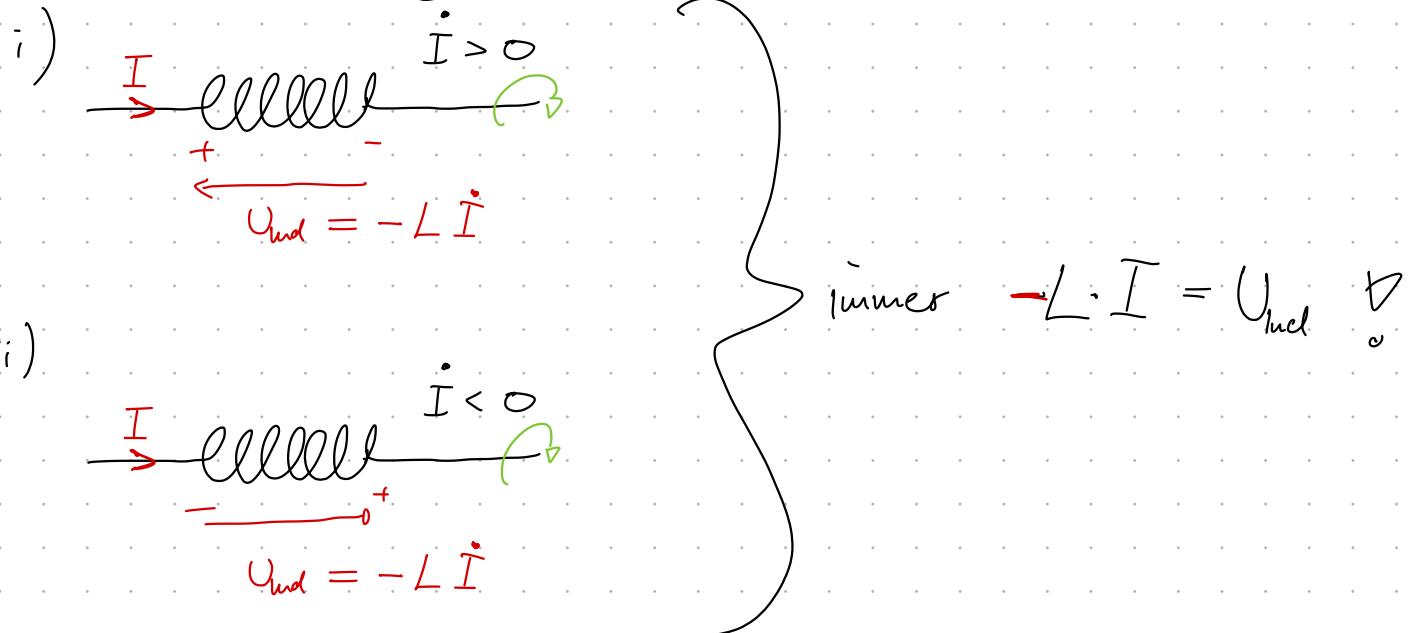
$\Rightarrow$  Änderung kann nur durch I

hervorgebracht werden!

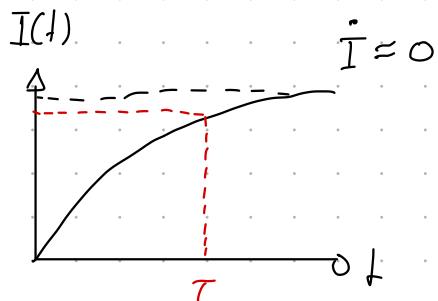
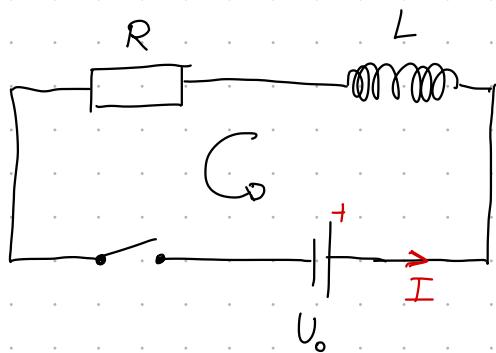
$\nearrow$  Induktionsgesetz:

$$U_{\text{ind}} = \left| \frac{d}{dt} \Phi_{\text{mag}} \right| = \left| \frac{d}{dt} (L \cdot I) \right| = \underline{\underline{L \cdot \dot{I}}} \quad | \dot{I} |$$

# Polarität der Spannung Und Lenz-Regel



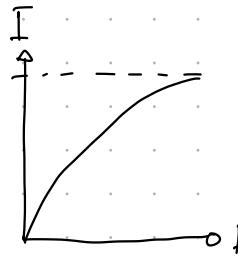
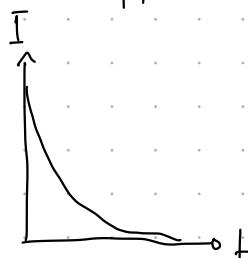
## 3.7.4 | RL-Kreis (Ladekreis für L)



char. Ladezeit

$$\tau = \frac{L}{R} \quad [ \frac{L}{R} ] = 1 \frac{\Omega}{\Omega} = \dots = 1 \text{s}$$

### 3.8 | Elektromagnetische Schwingungen



$\hat{=}$  elast. Verhalten

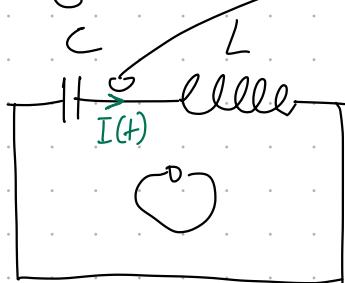
$\hat{=}$  trüger Verhalten

$\hat{=}$  Feder

$\hat{=}$  Masse

13.06.24

$\rightsquigarrow$  Schwingkreis



$Q(t=0) = Q_0$  ("Feder" ist gespannt)

$$I(t) = -\dot{Q}, \quad -\dot{I} = -\ddot{Q}$$



$$\text{Eigenfrequenz } \omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = 2\pi \cdot f$$

$$\ddot{x} + \omega_0^2 x = 0 \quad \rightsquigarrow x(t) = x_0 \cos(\omega_0 t)$$

$$MR: \quad U_C + U_L = 0$$

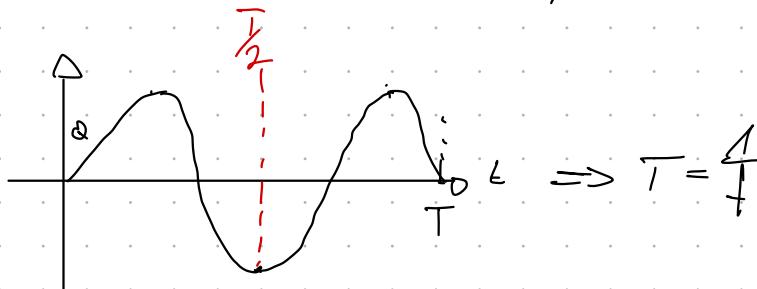
$$\Leftrightarrow \frac{Q}{C} - L \cdot \dot{I} = 0$$

$$\rightsquigarrow \frac{Q}{C} + L \cdot \ddot{Q} = 0$$

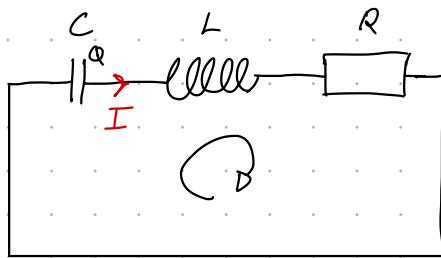
$$\Leftrightarrow \ddot{Q} + \frac{1}{CL} Q = 0$$

$$\rightsquigarrow \boxed{\text{Erfahrungswert } \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}}$$

$$\rightsquigarrow Q(t) = Q_0 \cos(\omega_0 t), \quad I(t) = Q_0 \omega_0 \sin(\omega_0 t)$$

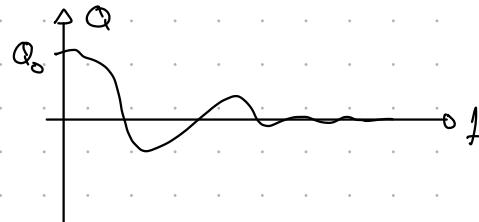


### 3.8.1 | Gedämpfter Schwingkreis



$$Q(t=0) = Q_0$$

gedämpfte Oszillationen:



$$MR: \frac{Q}{C} - L \dot{I} - RI = 0$$

$$\rightarrow \frac{Q}{C} + L \ddot{Q} + R \dot{Q} = 0$$

$$\rightarrow \ddot{Q} + \underbrace{\frac{R}{L} \ddot{Q}}_{2K} + \omega_0^2 Q = 0$$

$$\Rightarrow Q(t) = Q_0 e^{-Kt} \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad \text{mit}$$

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - K^2}, \quad K = \frac{R}{2L}$$

Zusammenfassung:

Grundgesetze des Elektromagnetismus

1) Coulombgesetz:

$$Q \longrightarrow \vec{E}$$

2) Biot-Savart-Gesetz:

$$I(t) = \dot{Q}(t) \longrightarrow \vec{B}$$

Maxwell -  
gleichungen

3) Faraday-Henry Induktionsgesetz:

$$\vec{B}(t) \longrightarrow \vec{E}(t)$$

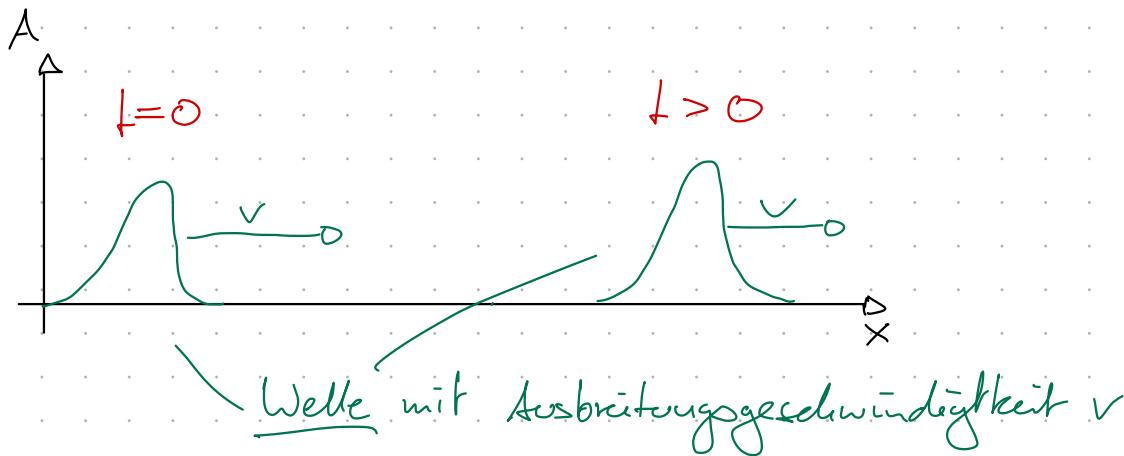
Vorhersage:  
EM-Wellen

4) Ladungserhaltung

### 3.9 | Elektromagnetische Wellen

#### 3.9.1 | Wellen

Wellen: Eine physikalische Größe („Auslenkung“), die sich in Raum und Zeit ausbreitet.



$$A(x, t) = A_+(x - vt) \quad \begin{matrix} \text{Welle von links} \\ \text{nach rechts} \end{matrix}$$

Wellenargument:  $x \pm vt$

Entscheidend:  
Ausbreitungsgeschwindigkeit!

#### 3.9.2 | Harmonische Welle

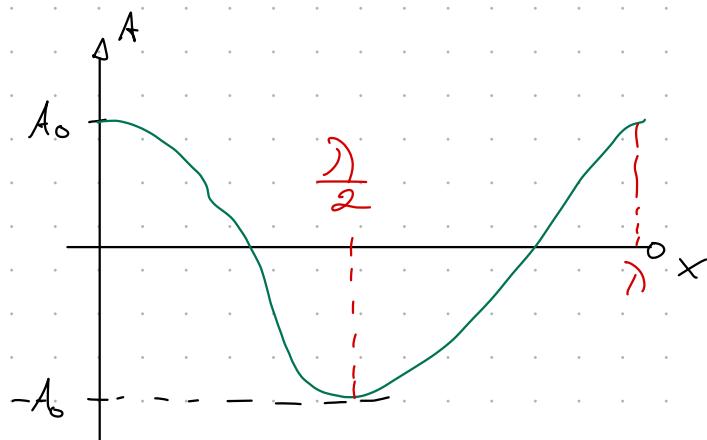
$$\begin{aligned} A(x, t) &= A_0 \cdot \cos(k(x - vt)) \\ &= A_0 \cos(kx - kv t), \quad [k] = \frac{1}{m} \\ &\quad \swarrow \quad \nearrow \\ &\quad \text{Zusammenhang zw. räumlicher \& zeitliche Periodizität} \end{aligned}$$

$A_0$ : Wellenamplitude räumlicher Periodizität

# Interpretation der Parameter einer harm. Welle

14.06.24

i)  $k = ?$ : „Schwapposchuss“ bei  $t = 0$



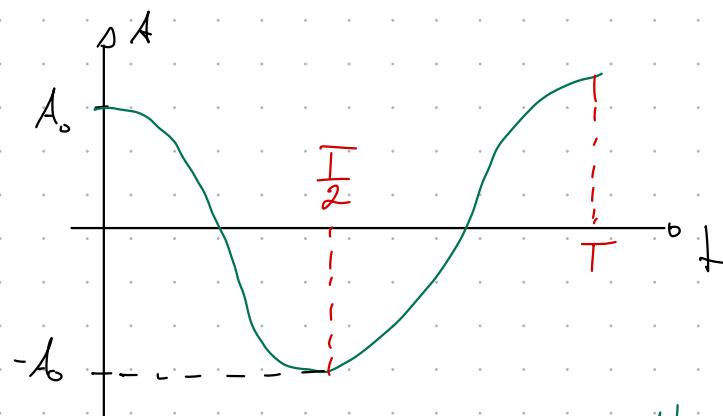
$$\rightarrow k \cdot \lambda = 2\pi$$

$\hookrightarrow \lambda$  = Wellenlänge

$$\rightarrow k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$\hookrightarrow k$  = „Wellenzahl“

ii)  $k \cdot v = ?$ ;  $x = 0$



$$k \cdot v \cdot T = 2\pi$$

$$\rightarrow k \cdot v = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f = \omega$$

$$\boxed{\omega = k \cdot v}$$

zeitl. periodisches  
Verhalten

räuml. periodisches  
Verhalten

Bem: Zusammenhang  $\omega \leftrightarrow k$

$$\omega = \omega(k)$$

heißt auch Dispersionsrelation

$\nearrow$  Harmonische Welle:

$$A(x, t) = A_0 \cos(kx - \omega t)$$

$$\text{mit } \omega(k) = v \cdot k ?$$

### 3.9.3 Elektromagnetische Wellen

Vorhersage: J. C. Maxwell 1864 !

$$\vec{E}(\vec{x}, t) \longleftrightarrow \vec{B}(\vec{x}, t)$$

*Kopplung !*

Experimentell nachgewiesen: Heinrich Hertz 1887

Bem: Suche nach dem Äther bis zum Michelson-Morley Experiment.

Ablösen em-Wellen:

Fernfeld:  $\propto \gg \lambda$

ebene Welle

$$\approx \vec{E}(x, t) = E_0 \vec{e}_y \cos(kx - \omega t)$$

$$\vec{B}(x, t) = B_0 \vec{e}_z \cos(kx - \omega t)$$

Parameter:

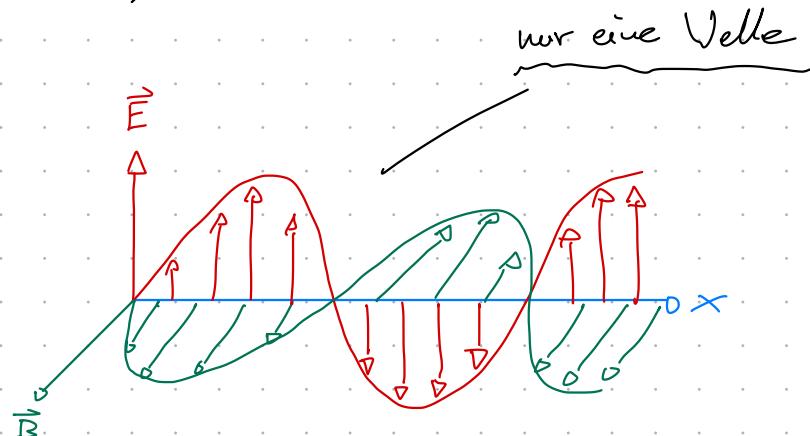
$E_0, B_0$ : Amplituden

$\vec{e}_y, \vec{e}_z$ : Polarisierung

$$\omega = c \cdot k$$

$$\text{mit } c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \approx 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Lichtgeschwindigkeit !



# 4 | Optik

Bedeutung: Licht mit Auge (Detector) wahrnehmbar  
 $\leadsto$  Optik = Alltagsphysik

Zwei Teilgebiete der Optik:

- geometrische Optik / Strahlenoptik



- Wellenoptik

- Interferenz, Beugung, Auflösungsvermögen

## 4.1 // Was sehen wir?

Optisches Fenster:  $\lambda = 400\text{nm} \dots 700\text{nm}$

blau                                    rot

$$c \approx 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\omega = c \cdot k \sim 10^{15} \frac{1}{\text{s}}$$



$\hookrightarrow$  gilt auch für jeden anderen elektrischen Detektor!

## Optische Intensität

$$\bullet I \sim E^2 \quad \text{Energiedichte}$$

$T$  und Mittelung

$$\bullet I = \frac{1}{T} \int_0^T E^2(x, t) dt = I(x)$$

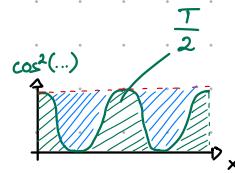
fein

$$\text{mit } T = 10^{-15} \text{ s} = 1 \text{ fs}$$

Berechnung für: senkrecht zur Ausbreitungsrichtung

$$\vec{E}(x, t) = E_0 \vec{e} \cos(kx - \omega t)$$

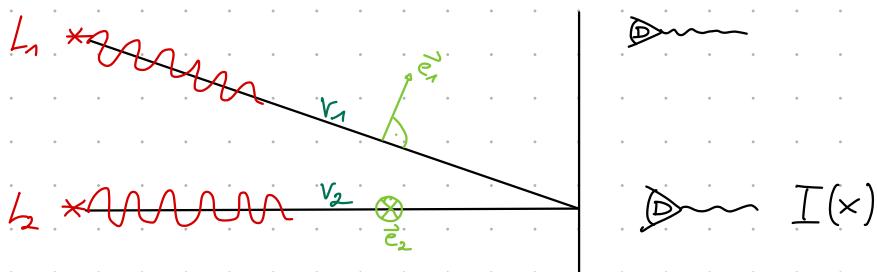
$$\begin{aligned} \nearrow I(x) &= \frac{1}{T} \int_0^T E_0^2 \vec{e}^2 \cos^2(kx - \omega t) dt \\ &= E_0^2 \frac{1}{T} \int_0^T \cos^2(kx - \omega t) dt \\ &= E_0^2 \frac{1}{T} \cdot \frac{T}{2} \\ &= \frac{E_0^2}{2} \quad \text{○ zeitliche & räumliche} \\ &\quad \text{Unabhängigkeit} \quad \triangleright \\ &= \frac{I_0}{2}, \quad I_0 = E_0^2 \end{aligned}$$



## 4.2 // Zwei-Wellen-Interferenz

↳ Absolutes Gravideperiment der Wellenoptik! ▷

\* = Laser



$$\vec{E}_1(r_1, t) = E_0 \vec{e}_1 \cos(kr_1 - \omega t)$$

$$\vec{E}_2(r_2, t) = E_0 \vec{e}_2 \cos(kr_2 - \omega t)$$

$$\nearrow \vec{E}(r_1, r_2, t) = \underbrace{\vec{E}_1(r_1, t) + \vec{E}_2(r_2, t)}_{\text{Superposition}}$$

$$\begin{aligned} \nearrow I &= \frac{1}{T} \int_{T_0}^{T_0+T} \vec{E}(r_1, r_2, t) dt \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T \left( \vec{E}_1^2 + \vec{E}_2^2 + 2 \vec{E}_1(r_1, t) \cdot \vec{E}_2(r_2, t) \right) dt \\ &= \frac{I_0}{2} + \frac{I_0}{2} + \frac{1}{T} \int_0^T 2 \vec{E}_1(r_1, t) \cdot \vec{E}_2(r_2, t) dt \\ &= I_0 + \frac{1}{T} \int_0^T 2 E_0^2 \vec{e}_1 \cdot \vec{e}_2 \cos(kr_1 - \omega t) \cos(kr_2 - \omega t) dt \\ &= I_0 + E_0^2 \vec{e}_1 \cdot \vec{e}_2 \left[ \frac{1}{T} \int_0^T \cos(kr_1 - kr_2) dt + \frac{1}{T} \int_0^T \cos(kr_1 + kr_2 - 2\omega t) dt \right] \\ &\quad \downarrow I_0 \end{aligned}$$

$$= I_0 + I_0 \vec{e}_1 \vec{e}_2 \cdot \cos(k(r_1 - r_2))$$

$$= I_0 (1 + \vec{e}_1 \vec{e}_2 \cdot \cos(k\Delta r))$$

mit Gangunterschied

$$\Delta r = r_1 - r_2.$$

$$\boxed{I(\Delta r) = I_0(1 + \vec{e}_1 \vec{e}_2 \cos(k\Delta r))}$$

Zwei-Wellen Interferenzuster?

### Diskussion:

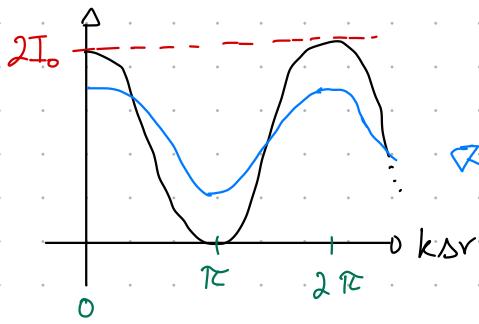
- $\vec{e}_1 \cdot \vec{e}_2 = 0$  oder  $\vec{e}_1 \perp \vec{e}_2$ :

$$\hookrightarrow I(\Delta r) = I_0$$

- $\vec{e}_1 \cdot \vec{e}_2 = 1$ :

$$I(\Delta r) = I_0(1 + \cos(k\Delta r))$$

$$I(\Delta r)$$



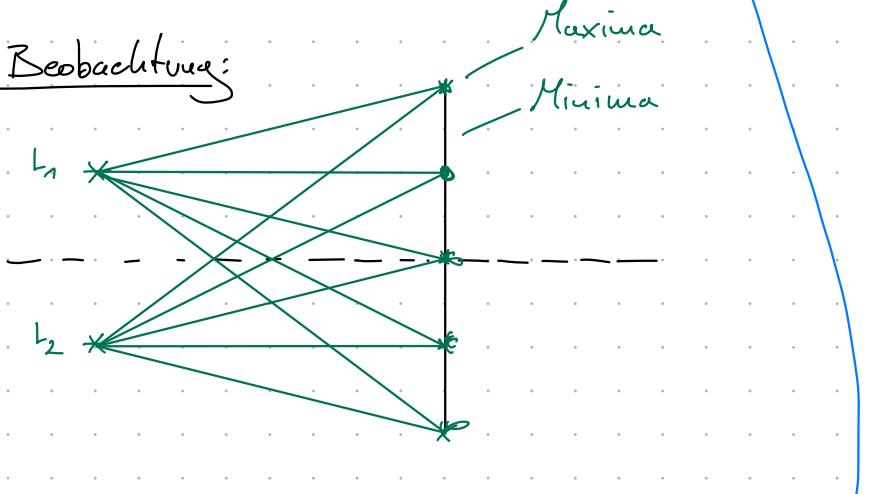
Maximale Intensität:  $k\Delta r = \pm n \cdot 2\pi$ ,

$$\Rightarrow \boxed{\Delta r = \pm n\lambda} \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

Minimale Intensität:  $k\Delta r = \pm (2n+1)\pi$

$$\Rightarrow \boxed{\Delta r = \pm (2n+1)\frac{\lambda}{2}}$$

### Beobachtung:



- $\vec{e}_1 \cdot \vec{e}_2 < 1$ :

$$\vec{e}_1 \cdot \vec{e}_2 < 1$$

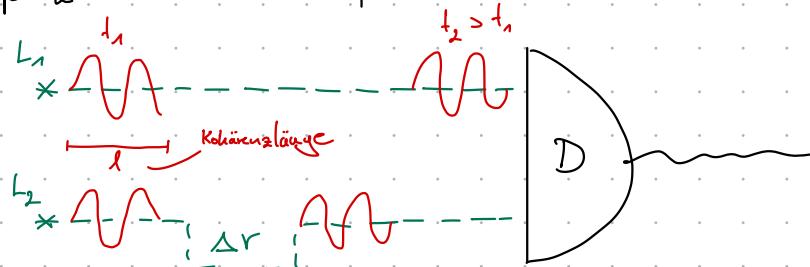
$$I(\Delta r) = I_0(1 + \underbrace{s \cos(k\Delta r)}_{\vec{e}_1 \cdot \vec{e}_2 < 1})$$

Frage: Warum sieht man dieses Zwei - Wellen - Interferenzmuster nicht alltäglich?

- Polarisierung ist statistisch ?
- Kohärenz

#### 4.3 | Optische Kohärenz

Prinzip Zwei - Wellen - Interferenz:



↗ Interferenz nur, wenn:

$$\Delta r \leq l$$

Typische Kohärenzlängen:

- Klassische Lichtquellen:  $l \sim 1 \mu\text{m}$
- Laser:  $l > 100 \text{ m}$