

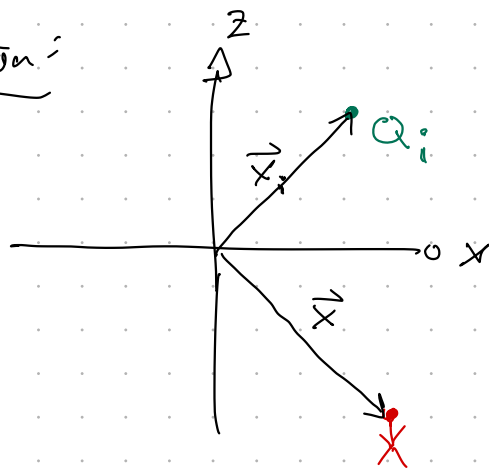
[...]

↳ Das Coulomb-Potential einer Ladung  $Q$ :

$$\| \phi_{el}(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r} ; [\phi_{el}] = 1V$$

→  $Q$  befindet sich im Koordinatenursprung

Situation:



↳ allg. Coulomb-Potential:

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

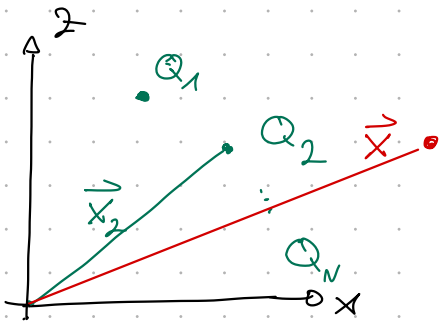
Bem: Einheiten

zerlegen

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

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

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



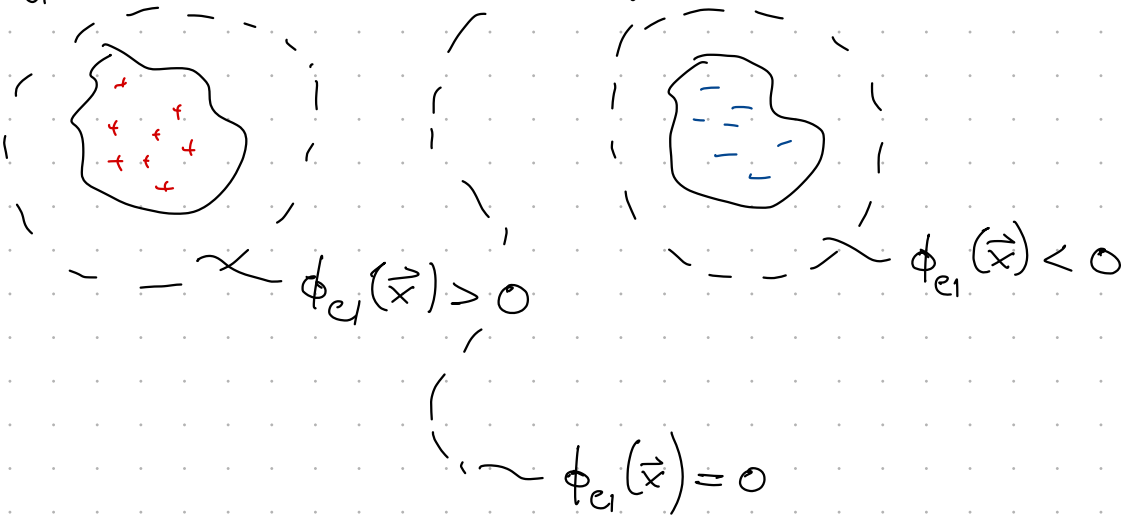
Superposition:

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

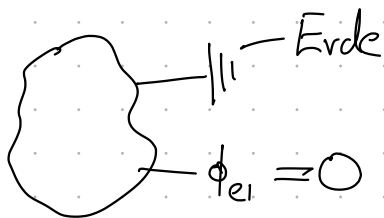
mit  $|\vec{x} - \vec{x}_i| = \sqrt{(x - x_i)^2 + \dots + (z - z_i)^2}$

Bem:

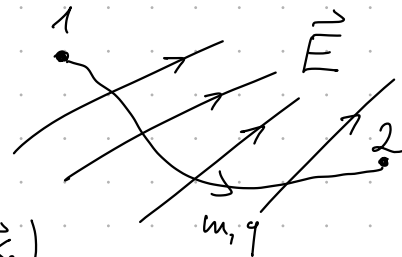
①  $\phi_{el}(\vec{x})$  hat ein Vorzeichen!



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



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



Energieerhaltungssatz

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

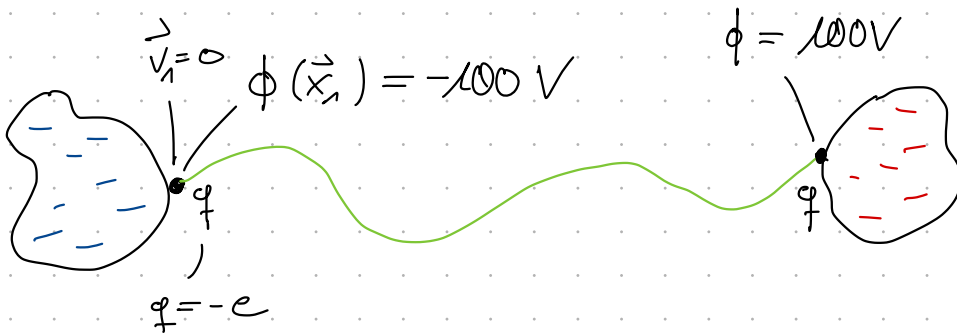
oder

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

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

$$\boxed{\phi = \phi_{el}}$$

Bsp:



EES:

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

$$\hookrightarrow \frac{1}{2} m \vec{v}_2^2 = (-e)(\phi(\vec{x}_1) - \phi(\vec{x}_2))$$

$m_e$

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

$$= 200 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

[...]

### 3.3.3 | Visualisierung des el. Potentials

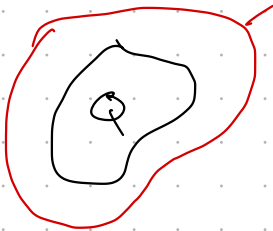
↳ Äquipotentialflächen/-linien

a) Definition:

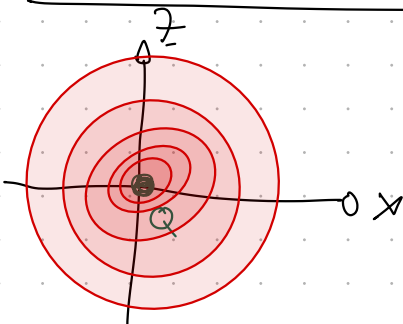
$$\phi = \text{const.}$$

Analogie:

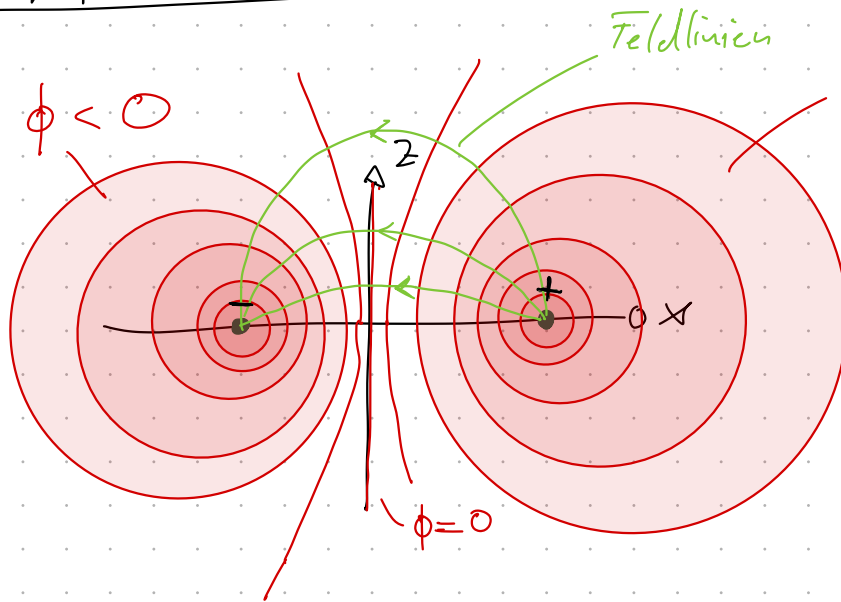
Höhenlinien einer topographischen Karte.



b) Äquipotentialflächen/-linien des Coulomb-Potentials



### c) Äquipotentiallinien des Dipols

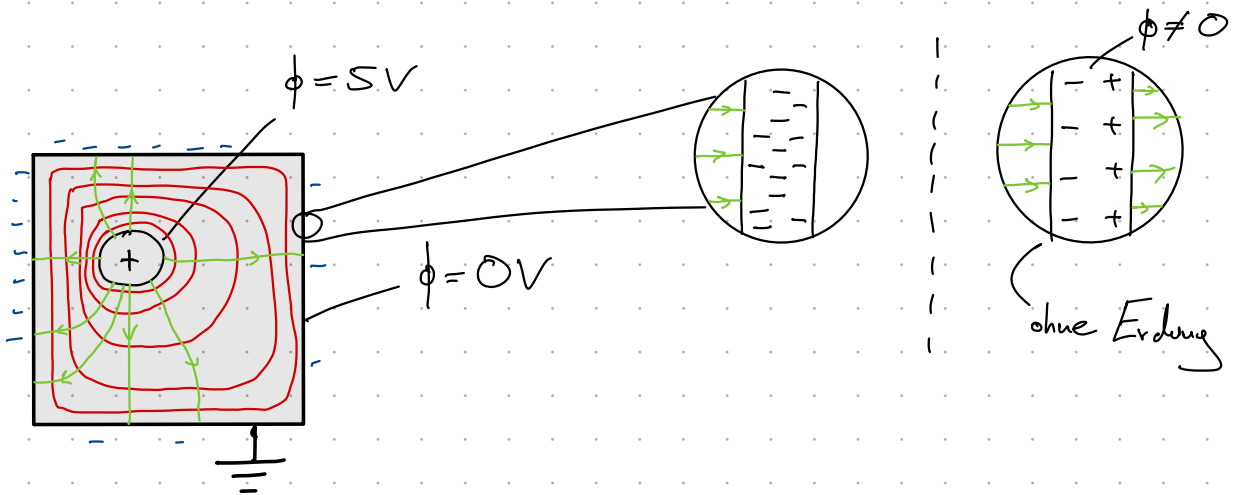
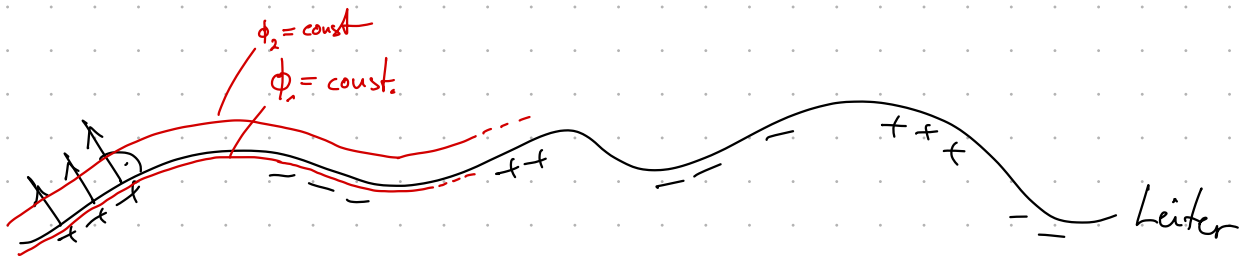


$\Rightarrow$  Feldlinien verlaufen senkrecht durch Äquipotentiallinien!

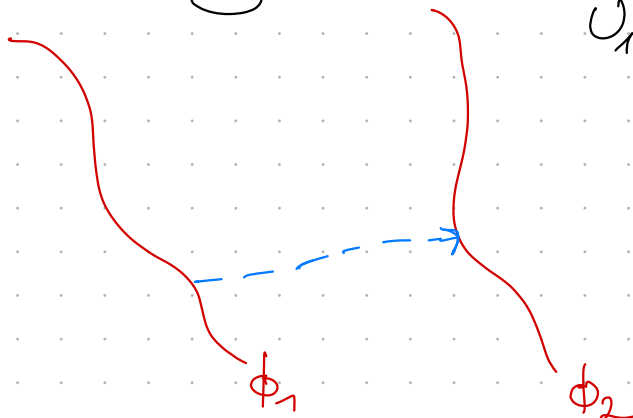
### d) Äquipotentiallinien an Leiteroberflächen

26.04.24

Exp:



### e) El. Spannung U



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

Bem: Im EES

$$\frac{1}{2} m \vec{v}_1^2 - qU = \frac{1}{2} m \vec{v}_2^2$$

### 3.3.4 Zusammenhang zw. $\phi$ und $\vec{E}$

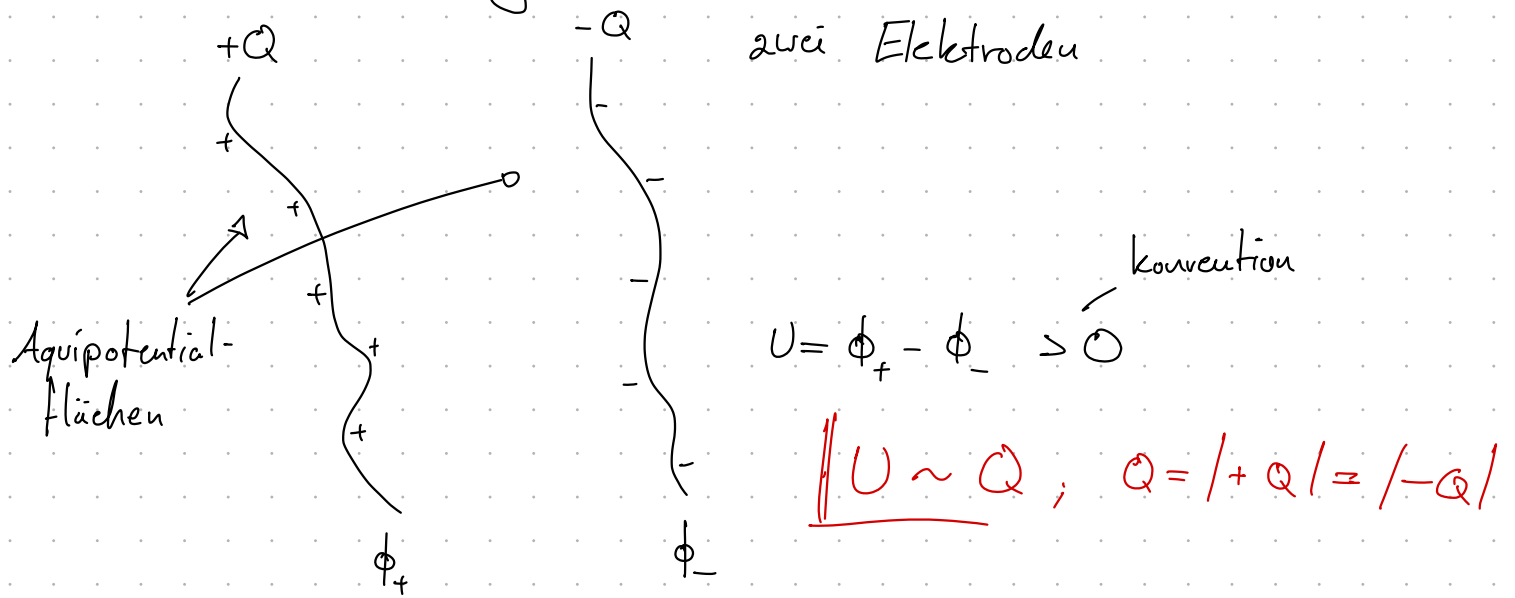


↳ Gradient von  $\phi(x, y, z) = \phi(\vec{x})$  bestimmt  $\vec{E}$ -Feld:

$$\underline{\underline{\vec{E}}} = -\text{grad } \phi(x, y, z) = - \begin{pmatrix} \frac{\partial \phi}{\partial x} \\ \frac{\partial \phi}{\partial y} \\ \frac{\partial \phi}{\partial z} \end{pmatrix}$$

### 3.4 Anwendung: Kapazität, Kondensator

#### 3.4.1 Kapazität: allgemein



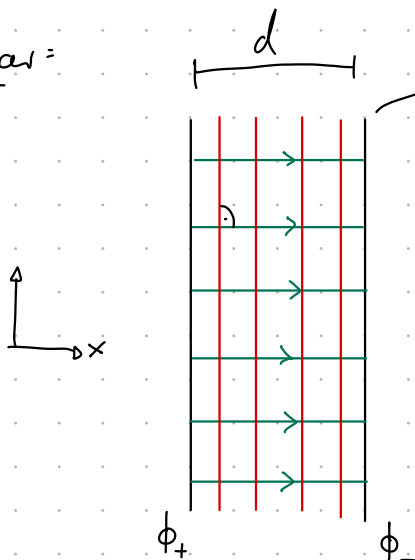
$$\hookrightarrow \underline{\underline{Q = C \cdot U}}$$

$C$ : 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:



$A$ : Fläche

Idee  $C = C(A, d)$

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

$$\hookrightarrow |\vec{E}| = E = \frac{U}{d} \stackrel{\text{s. Physik I}}{=} \frac{1}{\epsilon} \frac{Q}{A}$$

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

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

Bem:

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

→ Plattenkondensator

2) Typ. techn. Werte:

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

02.08.24

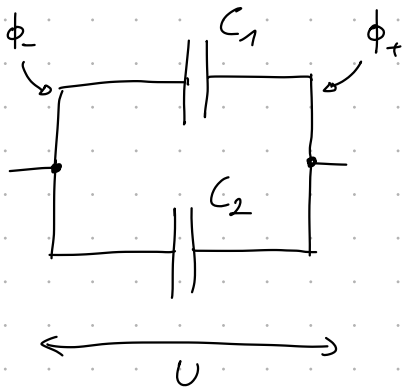
3) Schaltsymbol:  $\text{---} \text{||} \text{---}$

4) Anwendungen:

- Standlicht
- Speicherchips 0/1
- Zellmembran

### 3.4.3 | Zusammenschalten von Kapazitäten

(i) Parallelschaltung



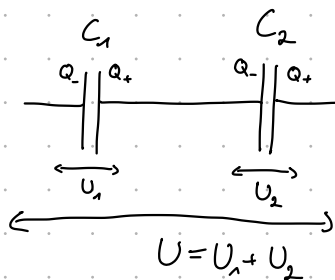
$$Q_1 = C_1 \cdot U$$

$$Q_2 = C_2 \cdot U$$

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

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

(ii) Reihenschaltung



$$Q = C_1 \cdot U_1$$

$$Q = C_2 \cdot U_2$$

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

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



Bem:

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

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

### 3.4.4) Materie im elektrischen Feld

$\hookrightarrow$  Dielektrika

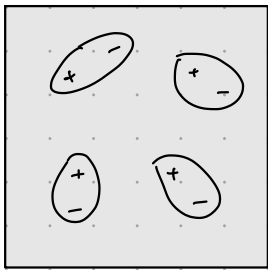
Bisher: Alles im Vakuum !

Jetzt: Was passiert in polarisierbarer Materie - Dielektrika ?

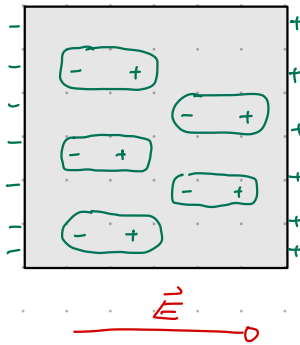
Polarisation:

(i) Materie mit permanenten Dipolen:

$\vec{E} = 0$



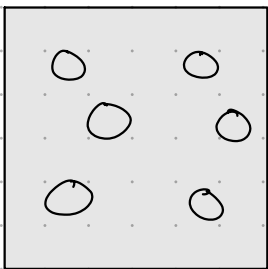
$\vec{E} \neq 0$



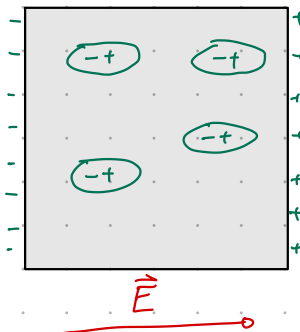
(ii) Materie ohne permanente Dipole:

$\rightarrow$  Dipole werden zunächst induziert !

$\vec{E} = 0$

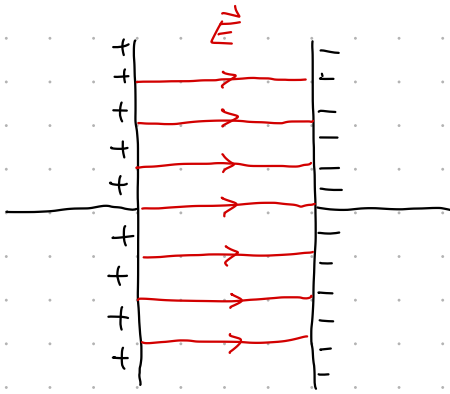


$\vec{E} \neq 0$

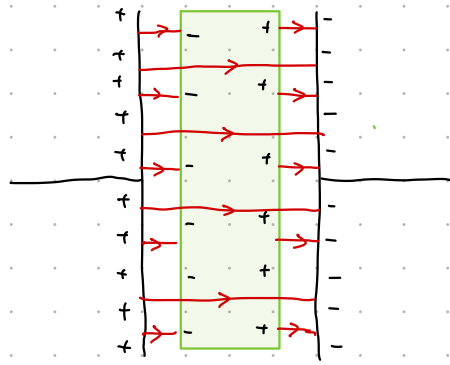


Polarisation

Was passiert zwischen den Platten des Kondensators?



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



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

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

$$[\epsilon_r] = 1$$

Dielektrizitäts-  
konstante

$\epsilon_r$  relativ zum Vakuum

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

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

Kapazität mit Dielektrikum wird größer !

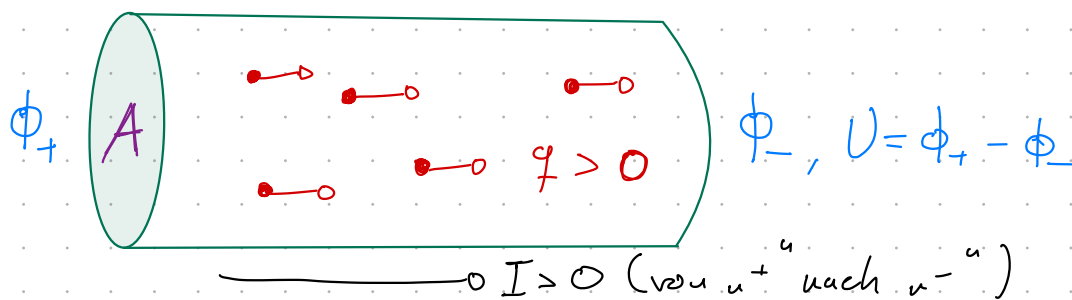
# 3.5 | Bewegte Ladungen - Ströme 10.05.24

Bisher: Elektrostatik ( $\sim 1800$ )

Jetzt:  $\vec{E}$ -Feld  $\rightarrow$  Kraft  $\vec{F} = q \cdot \vec{E}$  auf Ladung  $q$   $\Rightarrow$

$\hookrightarrow q$  bewegt sich in Zeit  $t \Rightarrow$  elektrischer Strom!

Definition des elektrischen Stroms:  $I = I(t)$



- Mittlerer Strom in Zeit  $\Delta t$ :

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

- (Momentan-)Strom:

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

## 3.5.1 | Ohmsches „Gesetz“

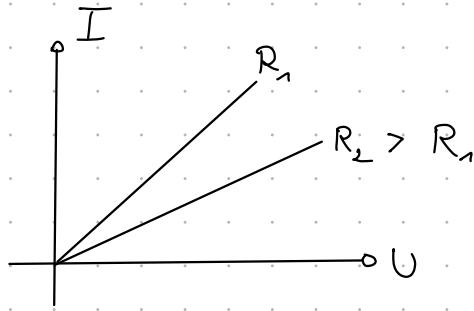
$\hookrightarrow$  Georg Simon Ohm, 1787 - 1854

$$I^2 \sim U$$

Wirkung  $\nearrow$   $\nwarrow$  Ursache

Ohmsches Gesetz (1826): Ohmsche Materialien

Kennlinie:



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

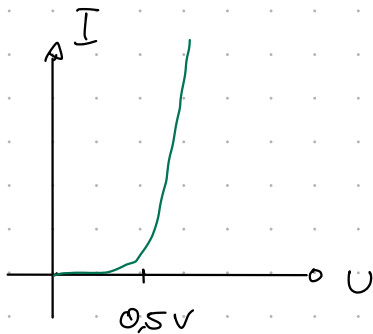
$\frac{U}{R}$

Dimension:  $R = \text{Ohmscher Widerstand}$   
 $\hookrightarrow \text{Materialkonstante}$

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

Beim: Nicht ohmsche Materialien

z.B. Halbleiterdiode



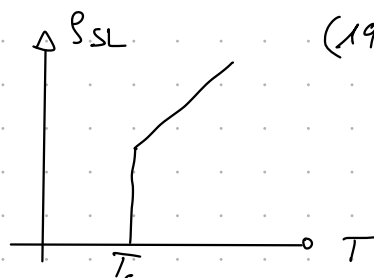
Der spezifische Widerstand:  $\rho$

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

Exp.:  $R = \rho \cdot \frac{l}{A}$  ;  $[\rho] = 1 \Omega \cdot m$

Beim: Temperaturabhängigkeit  $\rho = \rho(T) \text{ ?}$

- Glasstab
- Supraleiter



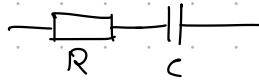
(1911 am Hg bei  $T_c = 4,2 K$ )

Springtemperatur

Schaltsymbol ohmscher Widerstand:



z.B.:



(Zwäpol)

3.5.2 | Stromkreise