

# Kap 2: Der elektrische Strom



- 2.1. Ladungstransport
- 2.2. Das Ohmsche Gesetz
- 2.3. Stromleitung und Joulsche Wärme
- 2.4. Messverfahren für elektrische Ströme
- 2.5. Netzwerke und die Kirchhoffschen Regeln
- 2.6. Messung elektrischer Stöme
- 2.7. Leitungsmechanismen
- 2.8. Stromquellen
- 2.9. Thermoelektrizität

# 2.1. Die Elektrische Stromstärke



Elektrischer Strom = Ladungstransport

Stromstärke (bzgl. dA):  $dI = \frac{dQ}{dt}$

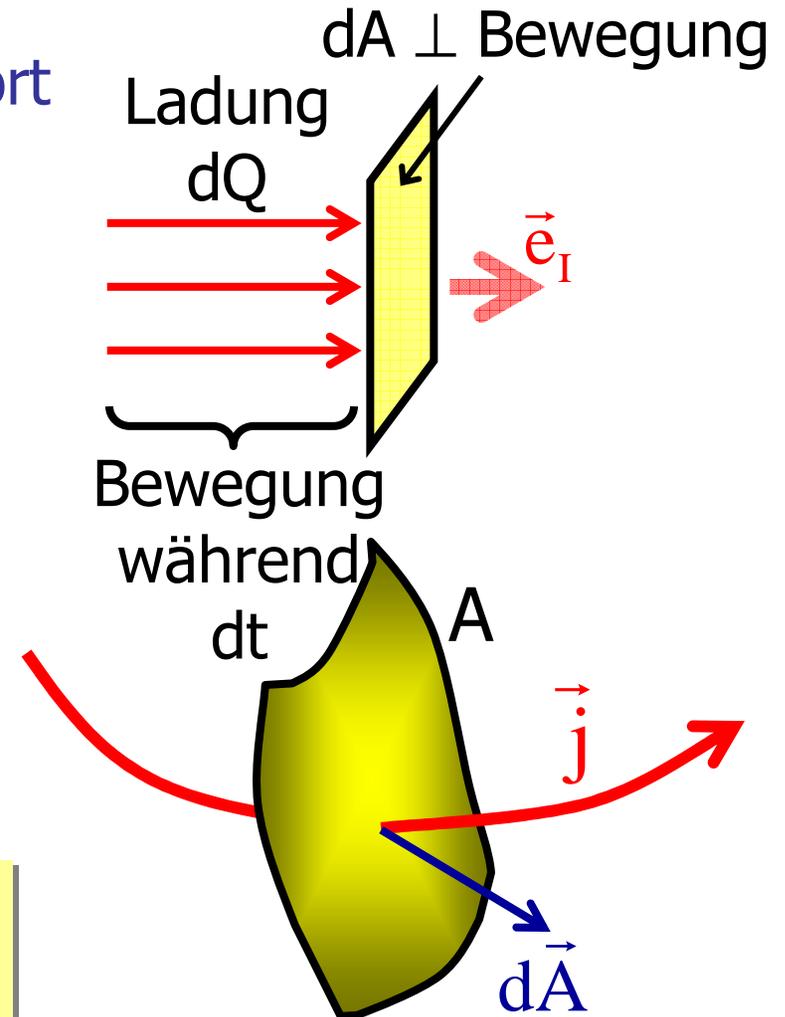
Stromdichte:  $\vec{j} = \frac{dI}{dA} \cdot \vec{e}_I$

Stromstärke bzgl. A:  $I = \int_A \vec{j} \cdot d\vec{A}$

$$[I] = A = Cs^{-1}$$

$$[j] = Am^{-2}$$

Kontinuitätsgleichung  $\text{div } \vec{j} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$



# Leitungsmechanismen

- **Elektronische Leiter: Metalle, Halbleiter**  
Ladungsträger hauptsächlich Elektronen
- **Ionen-Leiter: Elektrolyte, Isolatoren mit Fehlstellen**  
Ladungsträger hauptsächlich positive und negative Ionen
- **Gemischte Leiter: Plasmen**  
Ladungsträger: Elektronen und Ionenrümpfe; z.B. in Gasentladungen

## Mikroskopische Theorie:

$n^\pm$ : Anzahldichte positiver (negativer) Elementarladungen

$\vec{v}^\pm$ : zugehörige Transportgeschwindigkeiten

$$\Rightarrow \vec{j} = en^+ \vec{v}^+ - en^- \vec{v}^-$$

# 1.2. Das Ohmsche Gesetz



(a)

Betrachte elektronische Leiter (Metalle)

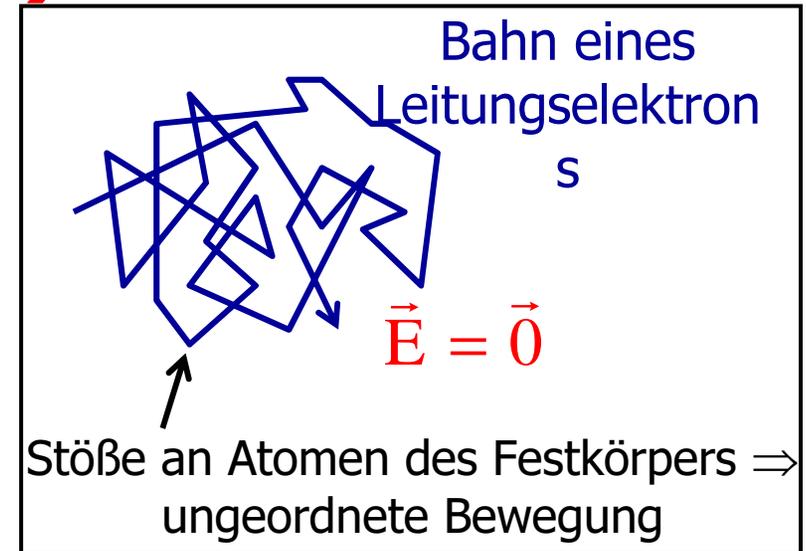
a)  $\vec{E} = \vec{0}$

typische instantane Geschwindigkeit

(T-abhängig):

$$\langle |\vec{v}| \rangle \approx 10^6 \dots 10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

aber  $\langle \vec{v} \rangle = \vec{0}, \langle \vec{j} \rangle = \vec{0}$



mittlere freie Weglänge ( zwischen zwei Stößen ):  $\Lambda$

mittlere Zeit zwischen zwei Stößen:

$$\tau_s = \frac{\Lambda}{\langle |\vec{v}| \rangle}$$

Beispiel: Kupferdraht bei Zimmertemperatur

$$\langle |\vec{v}| \rangle = 1,5 \cdot 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\Lambda = 4 \cdot 10^{-8} \text{ m}$$

$$\tau_s = 2,7 \cdot 10^{-14} \text{ s}$$

# Ohmsches Gesetz (b)

**b)  $\vec{E} \neq \vec{0}$**   
 $\vec{F} = q\vec{E} \Rightarrow \langle \Delta \vec{v} \rangle = \frac{\vec{F}}{m} \cdot \tau_s$

**Bsp.:** Cu-Draht,  $E = 100 \text{ V/m}$

$$\langle |\vec{v}| \rangle = 1,5 \cdot 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}, \quad \langle |\Delta \vec{v}| \rangle \approx 0,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

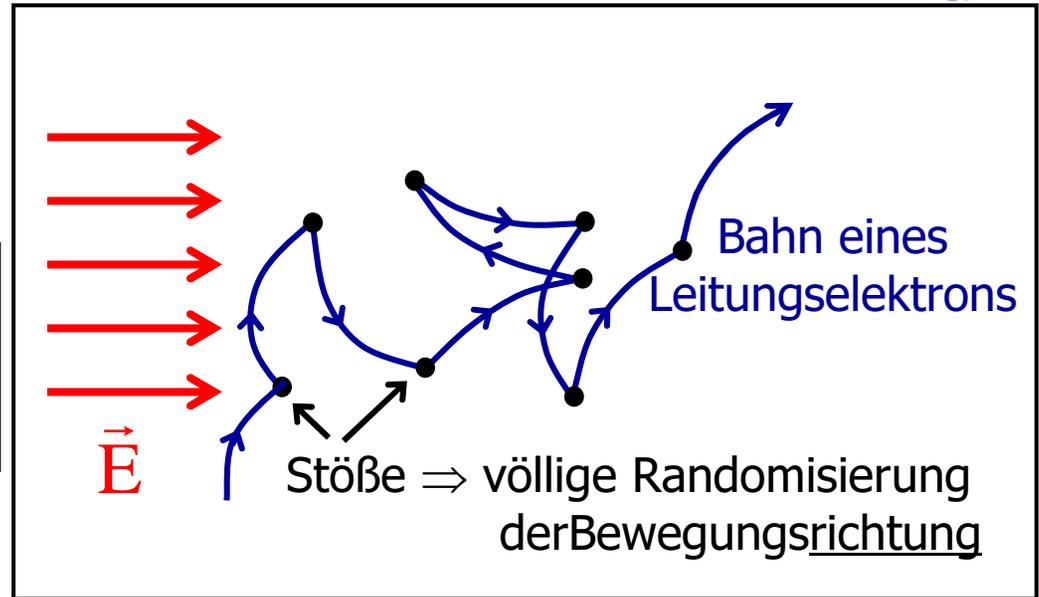
**Def.:** Driftgeschwindigkeit  $\vec{v}_D = \langle \Delta \vec{v} \rangle$

$\Rightarrow$  Ladungstransport

$$\vec{j} = nq\vec{v}_D = nq \frac{\vec{F}}{m} \tau_s = \frac{nq^2 \tau_s}{m} \cdot \vec{E} \Rightarrow$$

$$\vec{v}_D = \mu \cdot \vec{E}$$

$$\mu = \frac{\sigma_{el}}{nq} \quad \text{Beweglichkeit}$$



$$\vec{j} = \sigma_{el} \cdot \vec{E} \quad \text{Ohmsches Gesetz}$$

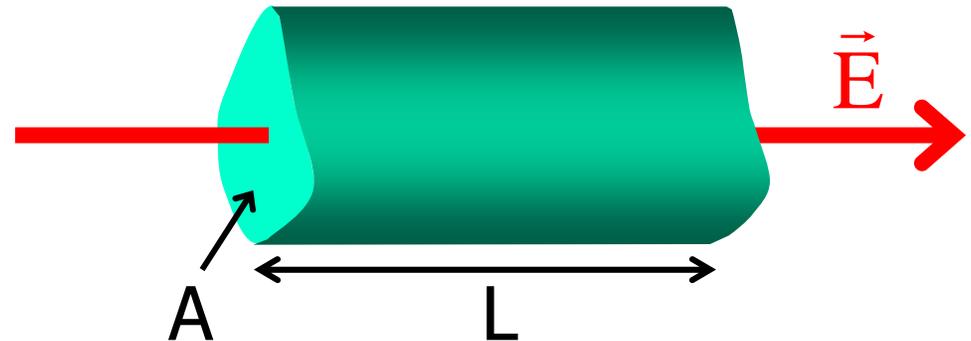
$$\sigma_{el} = \frac{nq^2 \tau_s}{m} \quad \text{elektrische Leitfähigkeit}$$

$\sigma_{el}, \mu$  stark T-abhängig,  
oft unabhängig von E

# Homogener Leiter (konst. Querschnitt)

$\vec{j} = \text{const.}$  über Querschnitt

$\vec{E} = \frac{\vec{j}}{\sigma_{\text{el}}}$  homogen



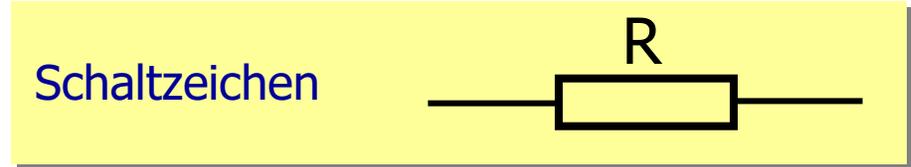
$U = E \cdot L$   
 $I = j \cdot A$

$j = \sigma_{\text{el}} \cdot E$

$U = R \cdot I$	Ohmsches Gesetz
$R = \frac{L}{\sigma_{\text{el}} \cdot A}$	elektrischer Widerstand
$\rho_s = \frac{1}{\sigma_{\text{el}}} = R \cdot \frac{A}{L}$	spezifischer Widerstand (Materialparameter)

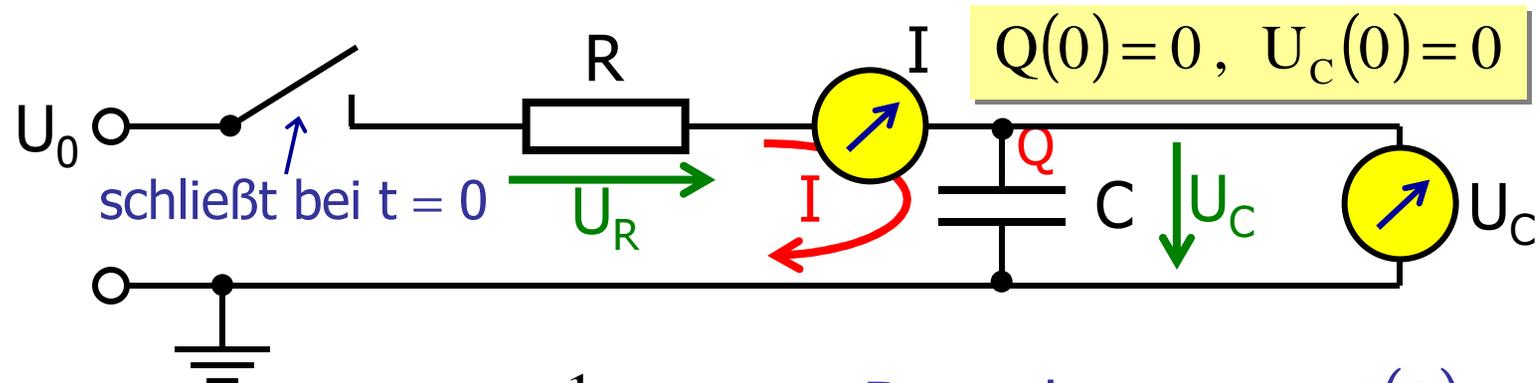
$[R] = \text{VA}^{-1} = \Omega = \text{Ohm}$   
 $[\rho_s] = \Omega \text{m}$

Allgemeine Def.:  $R = \frac{U}{I}$



# Auf- / Entladen eines Kondensators

quasistatisch  $\approx$  Folge statischer Situationen

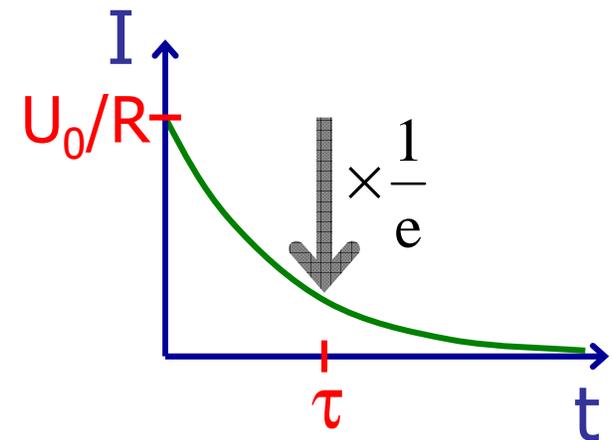


$$U_0 = U_R + U_C = RI(t) + \frac{1}{C}Q(t)$$

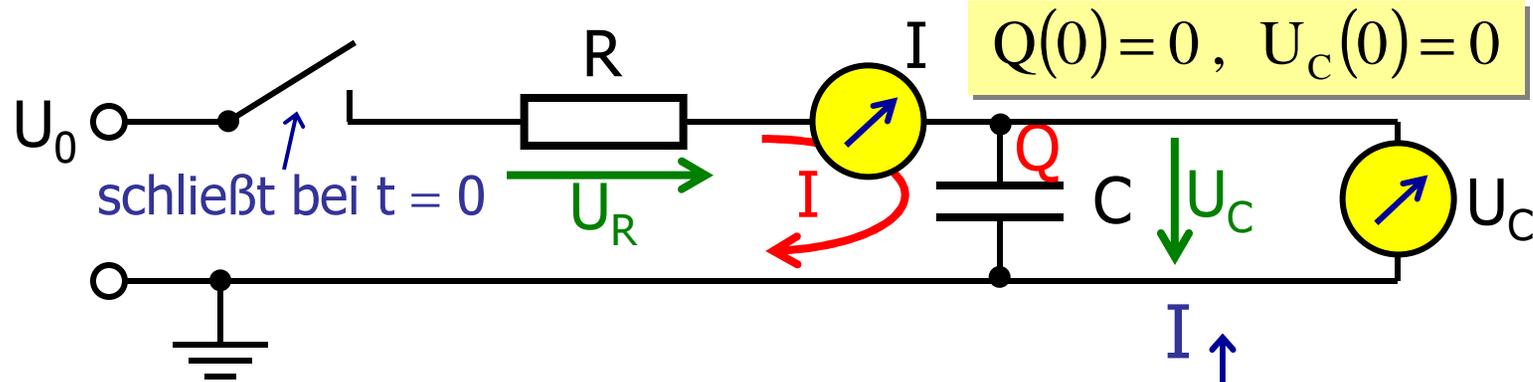
Bemerkung:  $\Rightarrow I(0) = \frac{U_0}{R}$

$$0 = R\dot{I} + \frac{1}{C}\dot{Q} = R\dot{I} + \frac{1}{C}I \Rightarrow \dot{I} = -\frac{1}{RC}I$$

Lösung:  $I(t) = \frac{U_0}{R} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad \tau = RC$



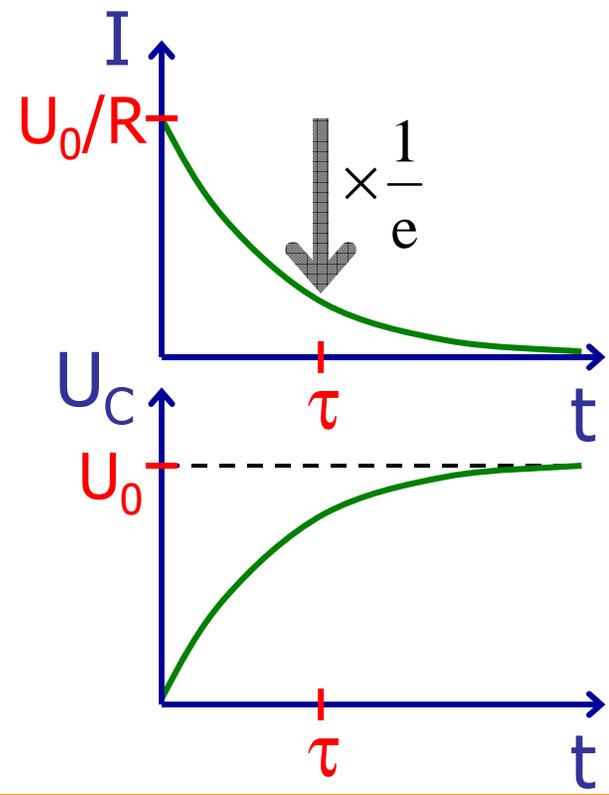
# Auf- / Entladen eines Kondensators



$$I(t) = \frac{U_0}{R} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad \tau = RC$$

Kondensatorspannung:

$$U_C(t) = \frac{Q(t)}{C} = \frac{1}{C} \cdot \int_0^t I(\tilde{t}) d\tilde{t} = U_0 \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right)$$



## 2.3. Joulsche Wärme

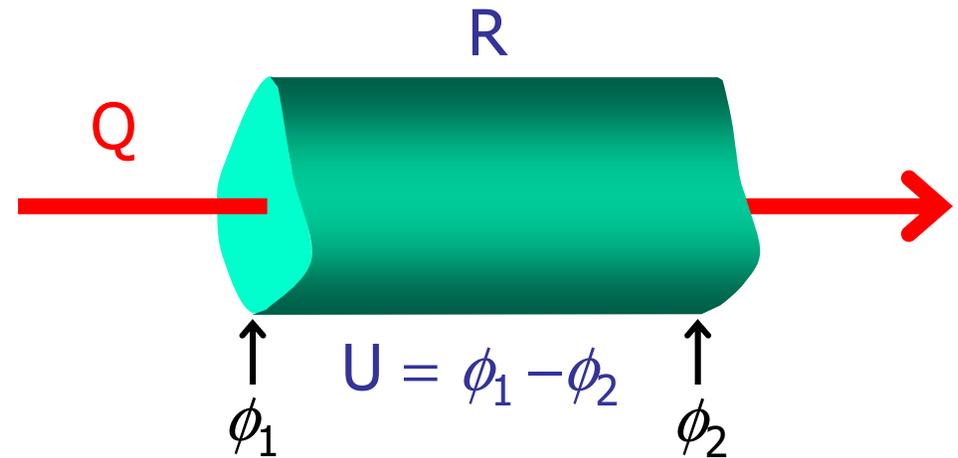
Arbeit des E-Feldes:

$$W = Q(\phi_1 - \phi_2) = QU$$

Elektrische Leistung:

$$P = \frac{dW}{dt} = U \frac{dQ}{dt} = UI$$

↑  
U = const.



Einheiten:

$$[P] = VA = W = \text{Watt}$$

$$[W] = \text{Ws}, \quad 1 \text{Ws} = 1\text{J}$$

Ohmsches Gesetz  $\Rightarrow$   $P = UI = RI^2 = \frac{U^2}{R}$

$$I = \text{const.} \Rightarrow P \propto R, \quad U = \text{const.} \Rightarrow P \propto 1/R$$