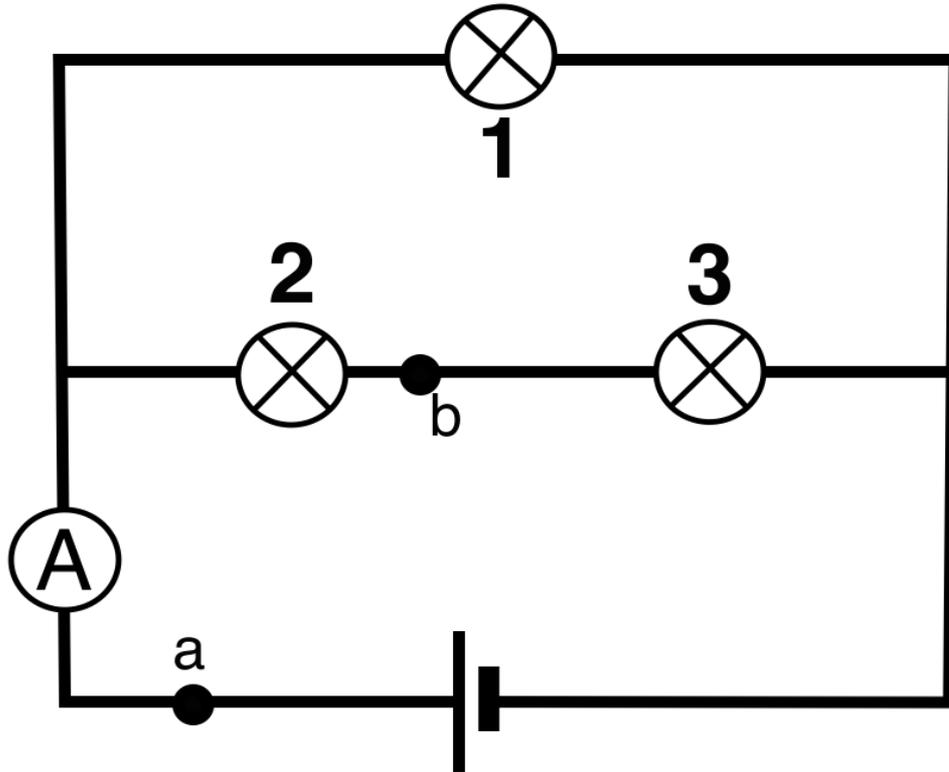




- 2.1 Bewegung von Ladungsträgern**
- 2.2 Elektrische Widerstände**
- 2.3 Einfache Gleichstromkreise**
- 2.4 Verzweigte Stromkreise**
- 2.5 Strom in Flüssigkeiten**
- 2.6 Strom in Gasen**
- 2.7 Strom in Festkörpern**



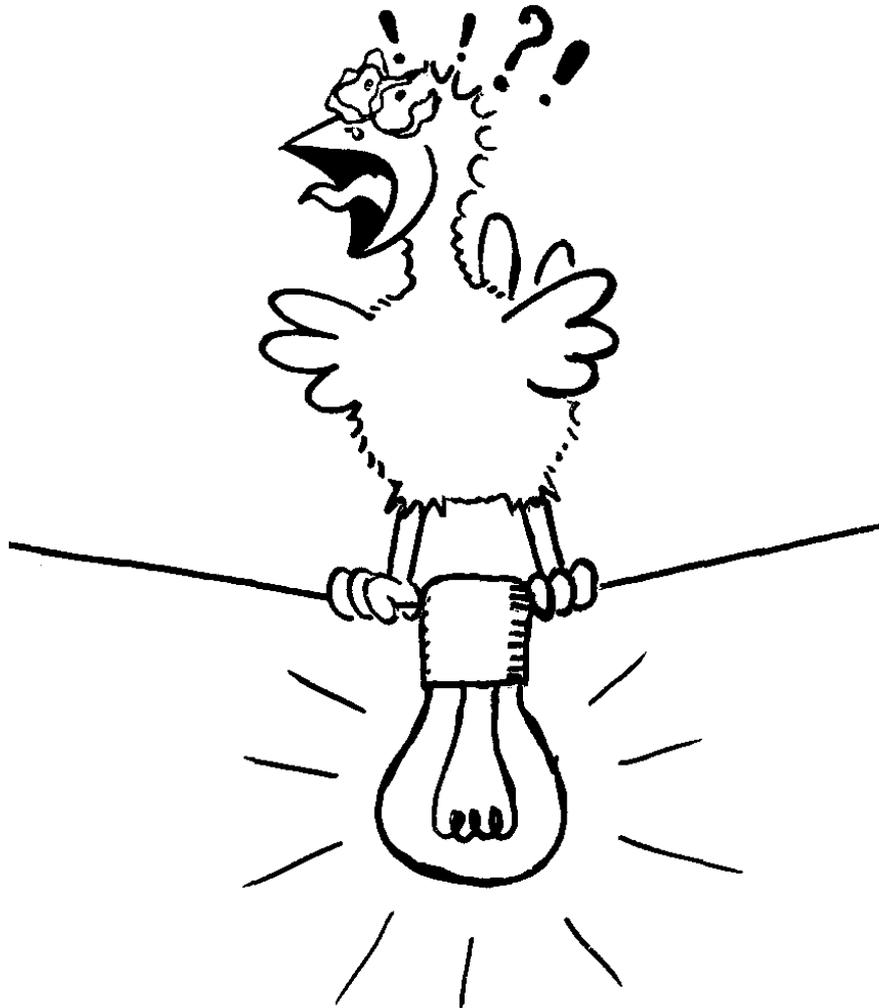
(1) How do the brightnesses of the identical bulbs compare?

(2) How would the brightnesses be affected if we removed bulb 1 from the circuit? Or instead, bulb 2 ?

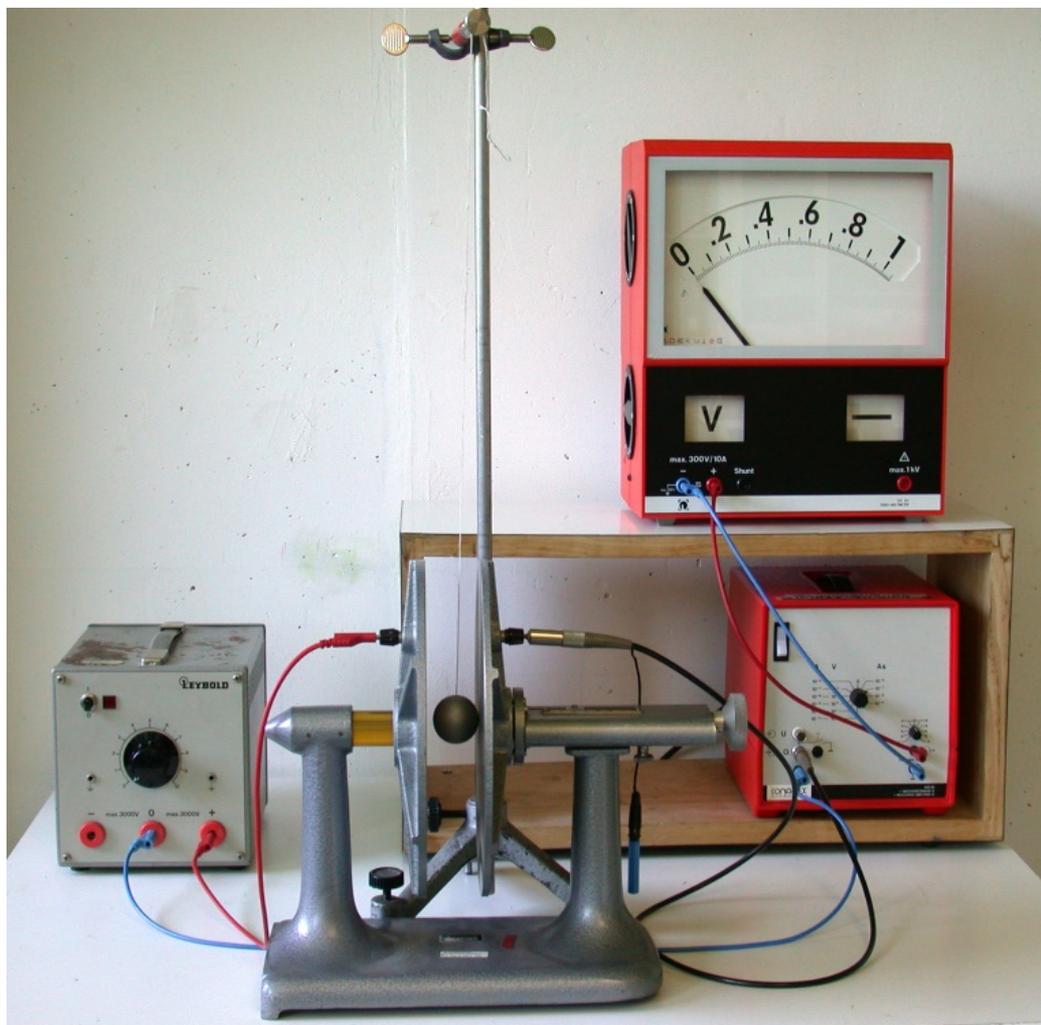
(3) How will the ammeter reading change in these cases? Will the current in the ammeter increase, decrease, or remain unchanged? Why?

(4) What would be the effect of connecting a wire across points *a* and *b* ? What changes would you expect in the relative brightnesses of the bulbs and the reading on the ammeter?





- Pendel mit Graphitkugel im Plattenkondensator



[https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2\\_E\\_Video/2-1-Pendel\\_Strom.m4v](https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/2-1-Pendel_Strom.m4v)

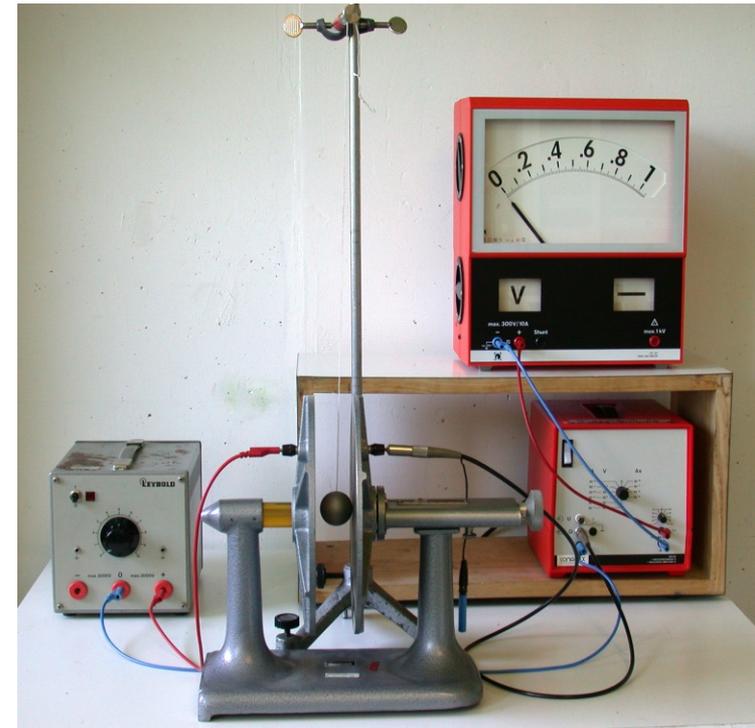
- Ausgangsbetrachtung:  
Pendel mit Graphitkugel im Plattenkond.

- Def.: Elektrische Stromstärke

$$I = \frac{dQ}{dt}$$

(Durch die Fläche  $A$  im Zeitintervall  $dt$  transportierte Ladung  $dQ$ )

- Technische Stromrichtung: „+“  $\rightarrow$  „-“



- Wirkungen des elektrischen Stromes - ! Sicherheit !



[https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2\\_E\\_Video/2-1-Wurst-Gefahr.m4v](https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/2-1-Wurst-Gefahr.m4v)



## ■ Wirkungen des elektrischen Stromes

- magnetische Wirkung / Kraftwirkung
- Wärmewirkung
- chemische Wirkung (Bsp.: Elektrolyse)
- optische Anregung (Halbleiterlumineszenz, Gasentladungsröhre)

**=> Messmöglichkeiten**



## Empfindungen und Wirkungen beim Stromdurchgang durch den menschlichen Körper:

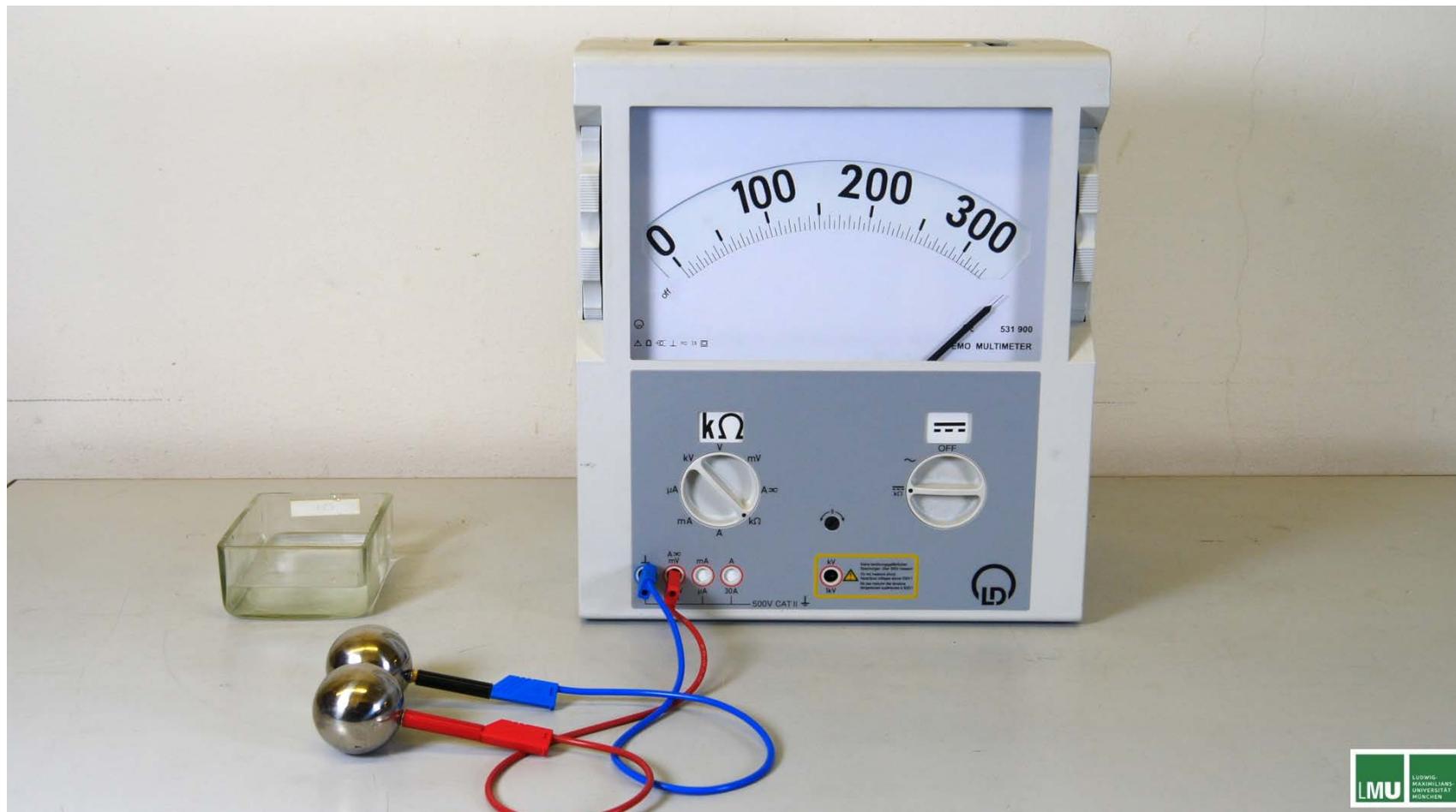
Strombahn	Hand-Rumpf-Hand		Hand-Rumpf-Fuß
Empfindung:	Gleichstrom	Wechselstrom (50 Hz)	
Kribbeln	7 mA	2 mA	3,4 mA
Lösungshemmung	35 mA	12 mA	16 mA



## pathologische Wirkung

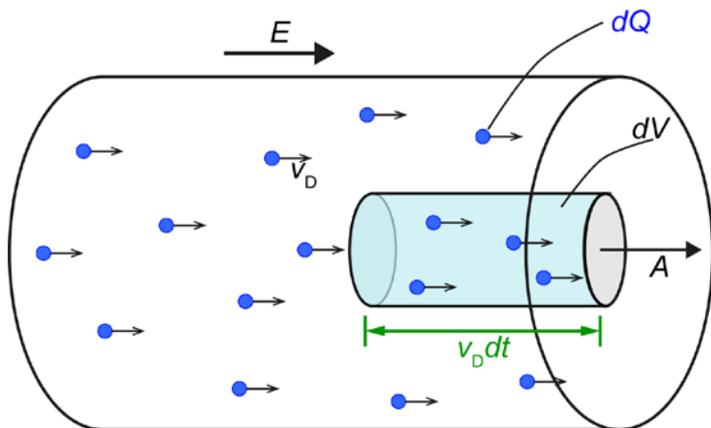
Bereich I	Empfindungsbeginn bis Lösungshemmung	0-25 mA
Bereich II	Blutdrucksteigerung, Herzunregelmäßigkeit noch erträglich	25-80 mA
Bereich III	Bewusstlosigkeit, Herzflimmern	80-3000 mA
Bereich IV	reversibler Herzstillstand	3 A

- Thema Sicherheit – Leitfähigkeit !



[https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2\\_E\\_Video/2-2i-Hand-Hand-Widerstand.m4v](https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/2-2i-Hand-Hand-Widerstand.m4v)

- Modell der Ladungsträgerdrift (mit mikroskopischen Größen)

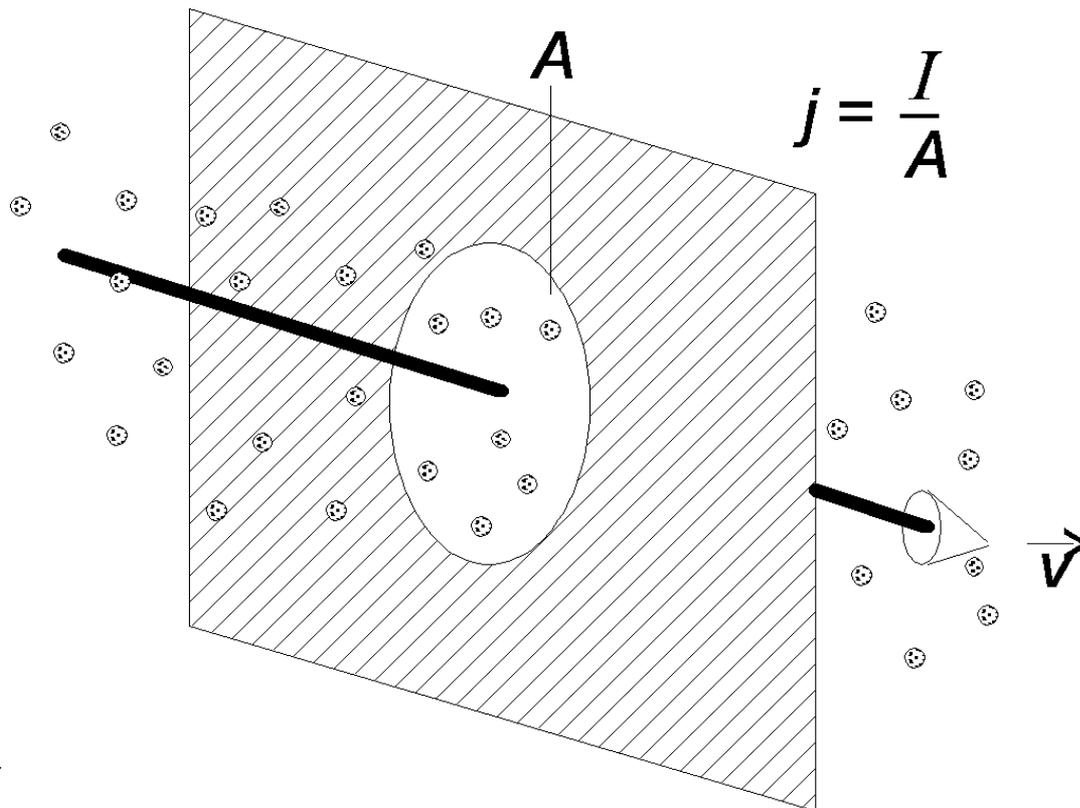


Anzahldichte:

$$n := \frac{\text{Anzahl}}{\text{Volumen}}$$



- Stromdichte



allgemein: 
$$j = \frac{dI}{dA}$$

$$\vec{j} = n \cdot q \cdot \vec{v}_{D+}$$



- **Kontinuitätsgleichung**

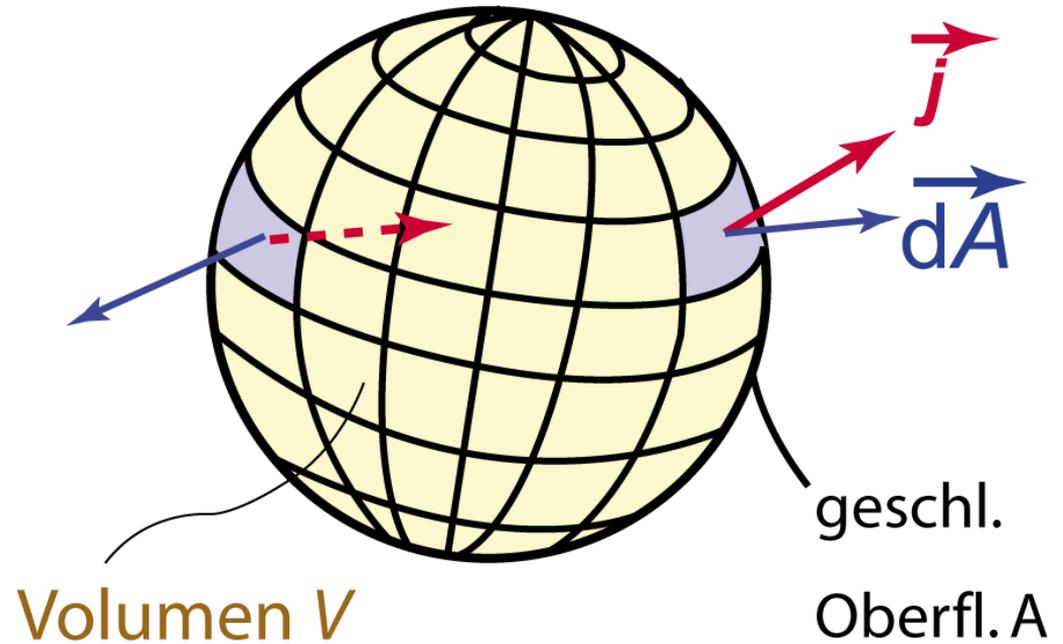
$$I \cdot \Delta t = \Delta Q$$

Ladungserhaltung:

Ist der Zufluss größer als der Abfluss, führt dies zu einer Aufladung (Anhäufung von Ladungen).

[und umgekehrt]

- **Kontinuitätsgleichung**



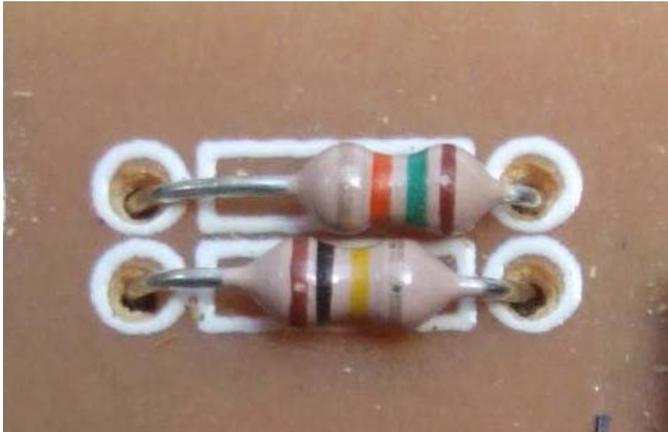
Der Nettostrom durch  
eine geschlossene Oberfläche  
ist gleich der zeitlichen Änderung  
der Gesamtladung  
im eingeschlossenen Volumen

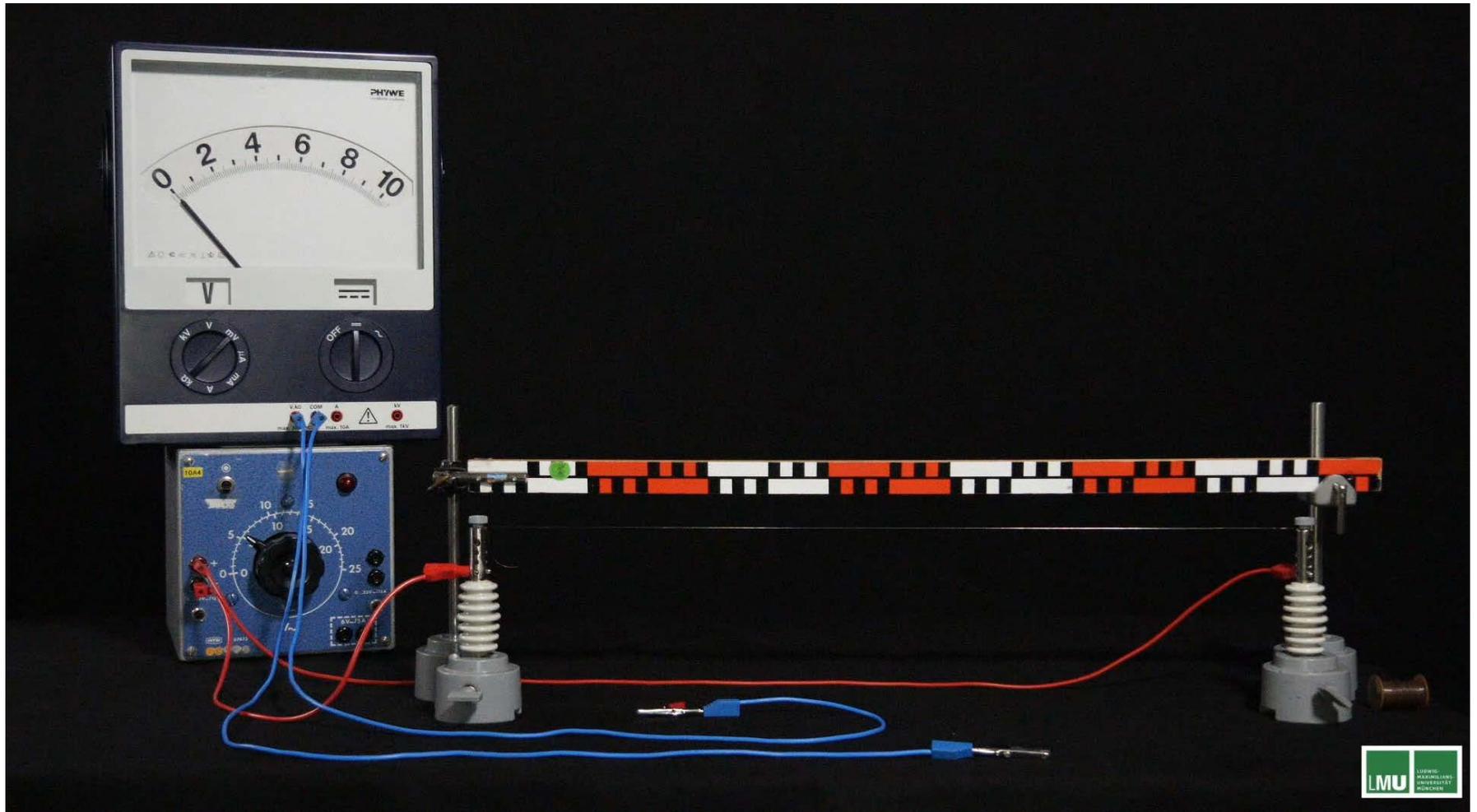


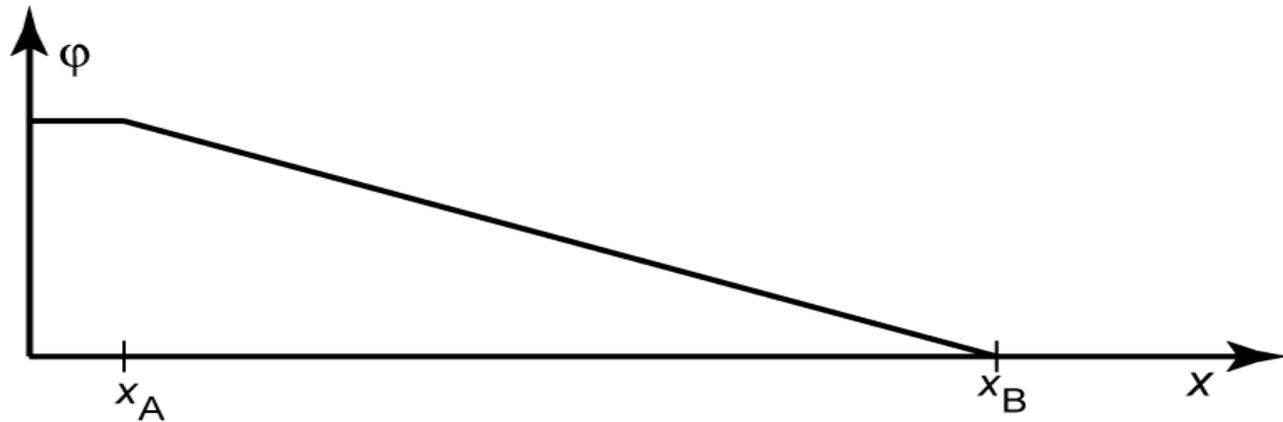


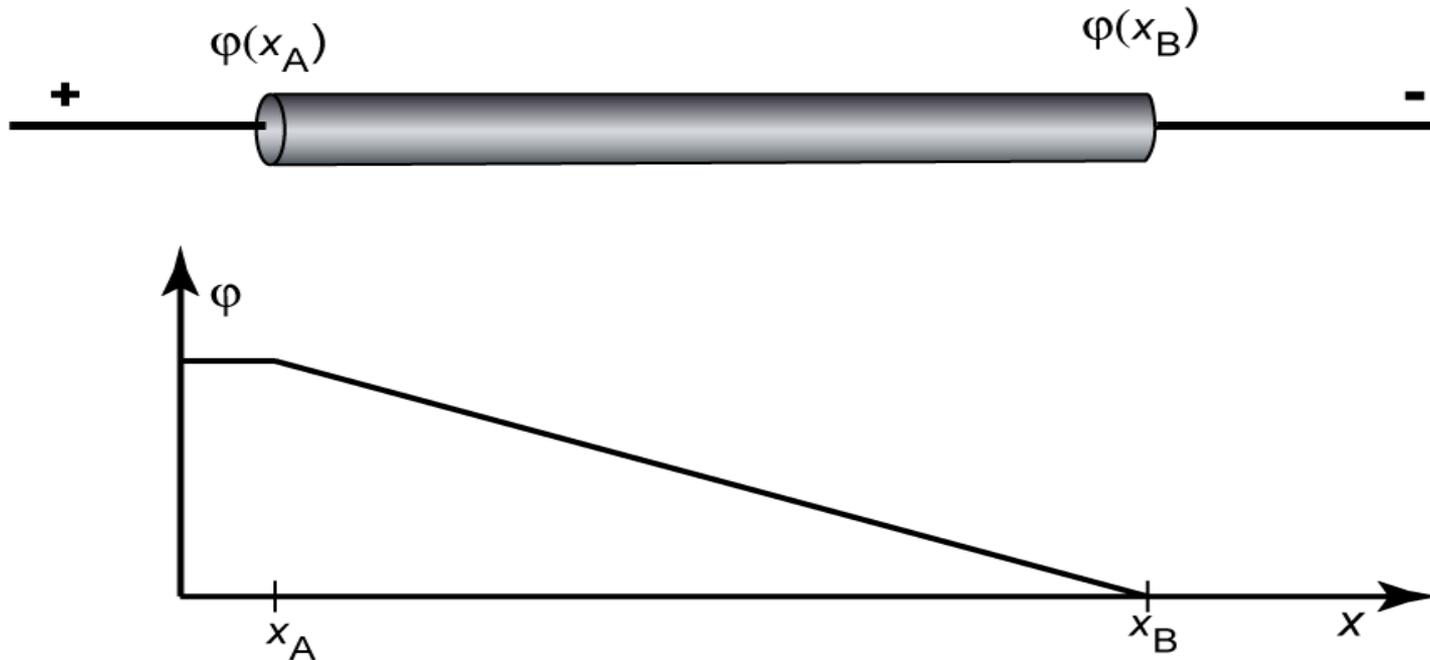
## 2.2 Elektrische Widerstände

## 2.2 Elektrische Widerstände





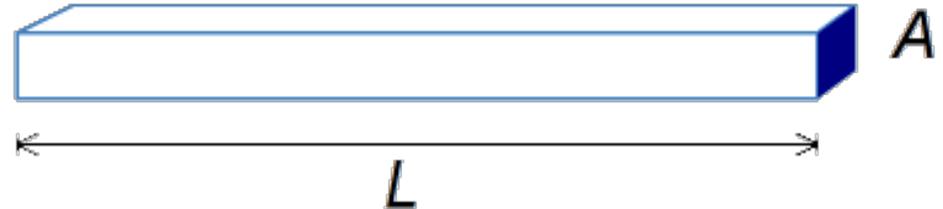




- **Spannungsabfall am Draht**  
**Potentialdifferenz / E-Feld Ursache für Stromfluss**
- **Allg.:**  $I = f(U)$
- **Def.: Elektrischer Widerstand:**

$$R := \frac{U}{I}$$

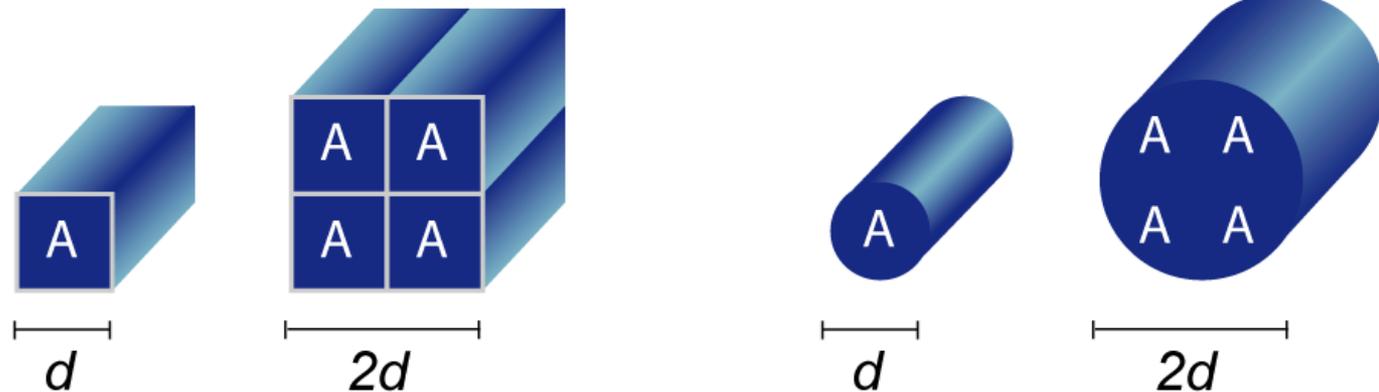
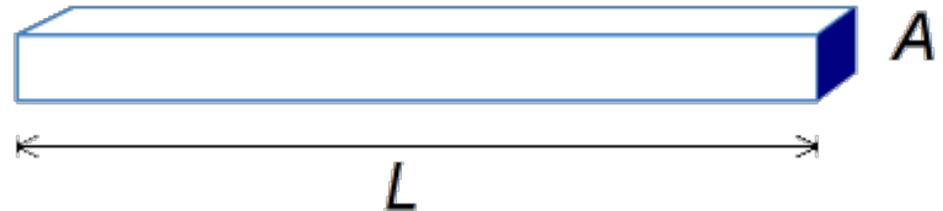
## ■ Homogene Leiter



Widerstand $R(\Omega)$	Leitwert $G$ (S: Siemens)
Spezifischer Widerstand $\rho$	Leitfähigkeit

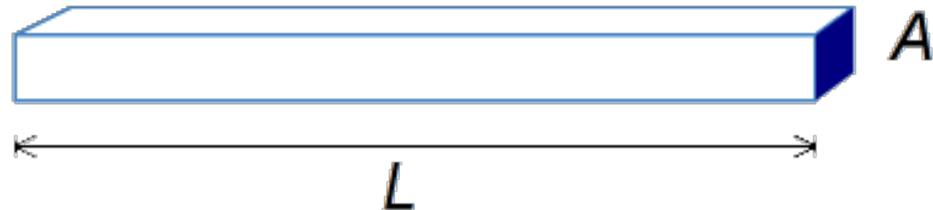


- Homogene Leiter



Doppelter Durchmesser ergibt  
vierfache Querschnittsfläche

- Homogene Leiter



Widerstand $R(\Omega)$	Leitwert $G$ (S: Siemens)
$R = \rho \frac{L}{A}$	$[G] = \left[ \frac{1}{R} \right] = \Omega^{-1}$
Spezifischer Widerstand $\rho$	Leitfähigkeit $\sigma := \frac{1}{\rho}$
$[\rho] = \frac{\Omega m^2}{m} = \Omega m$	$[\sigma] = \Omega^{-1} m^{-1}$



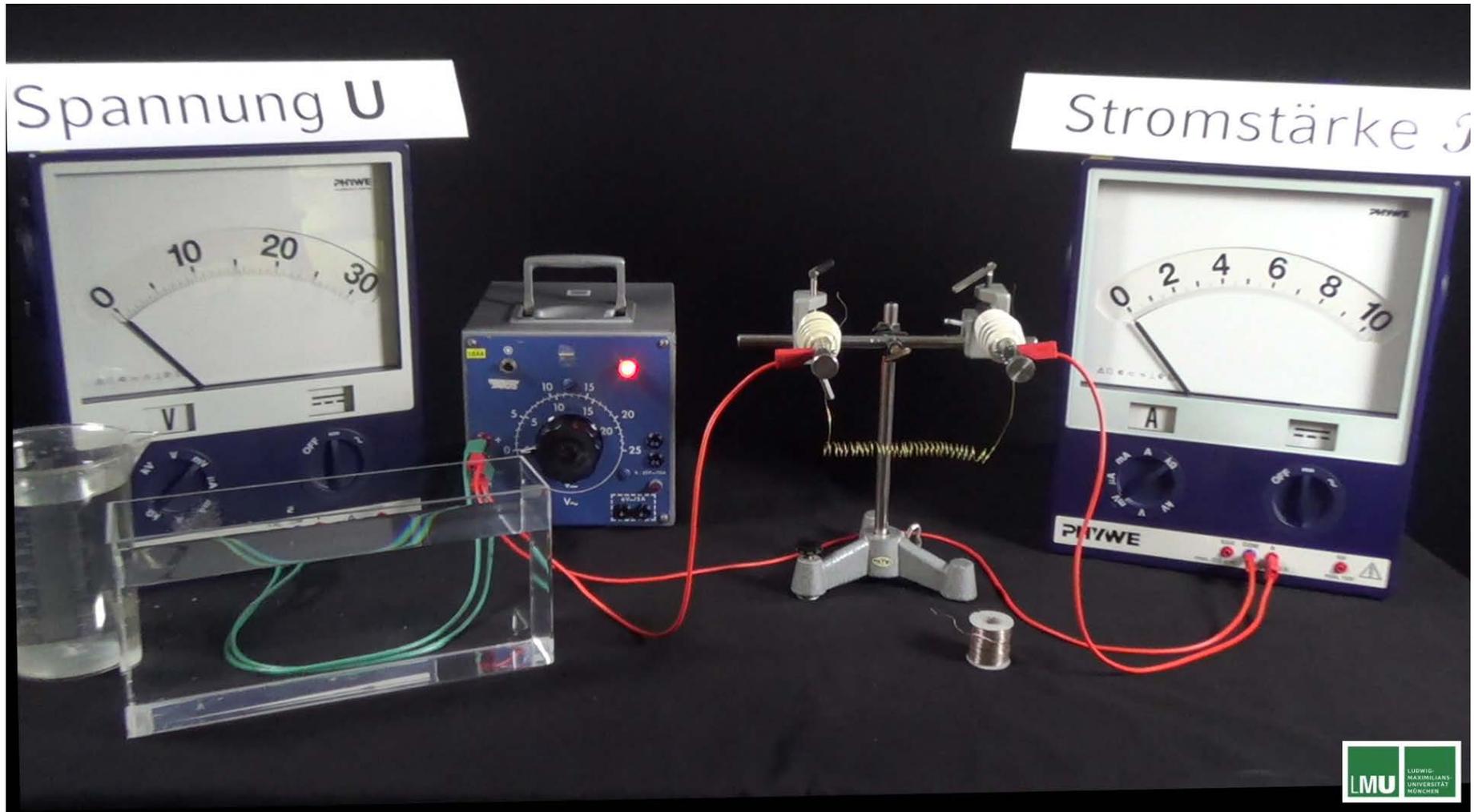


## Spezifischer Widerstand (Resistivität) ausgewählter Materialien ([ $\rho$ ] in $\Omega\text{m}$ ):

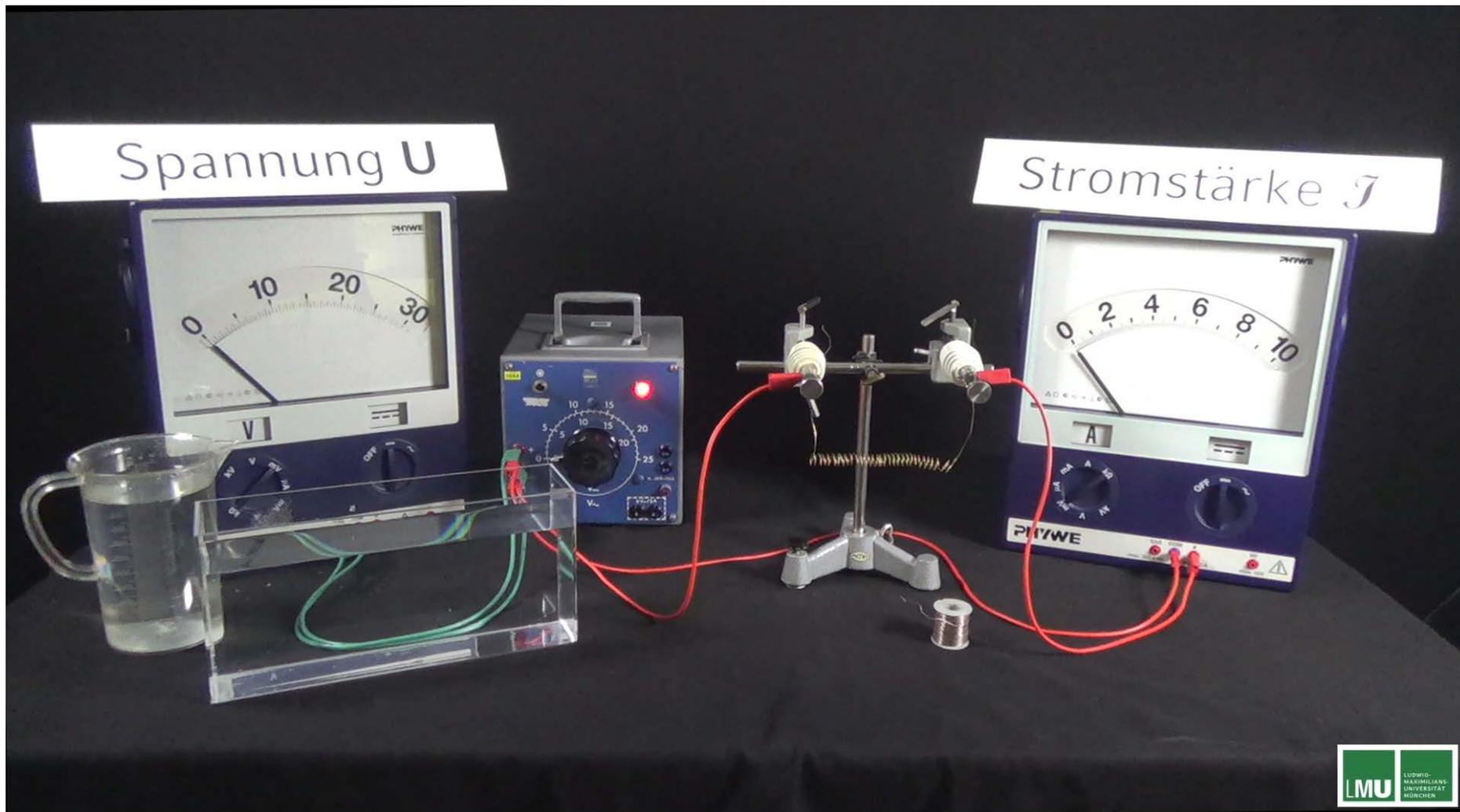
Silber	<i>Me</i>	$1,47 \cdot 10^{-8}$
Kupfer	<i>Me</i>	$1,72 \cdot 10^{-8}$
Konstantan	<i>Me</i>	$4,9 \cdot 10^{-7}$
Kohle	<i>HL</i>	$3,5 \cdot 10^{-5}$
Germanium	<i>HL</i>	$6,0 \cdot 10^{-1}$
Silizium	<i>HL</i>	$2,3 \cdot 10^3$
Bernstein	<i>I</i>	$5,0 \cdot 10^{14}$
Teflon	<i>I</i>	$> 10^{13}$
Holz	<i>I</i>	$10^8 \dots 10^{11}$
Glas	<i>I</i>	$10^{10} \dots 10^{15}$
Blut	<i>I<sub>0</sub></i>	1,6
Muskeln	<i>I<sub>0</sub></i>	2,0
Fettgewebe	<i>I<sub>0</sub></i>	33

Me : Metall
HL : Halbleiter
I : Isolator
I <sub>0</sub> : Ionenleiter

## Gekühlter Draht

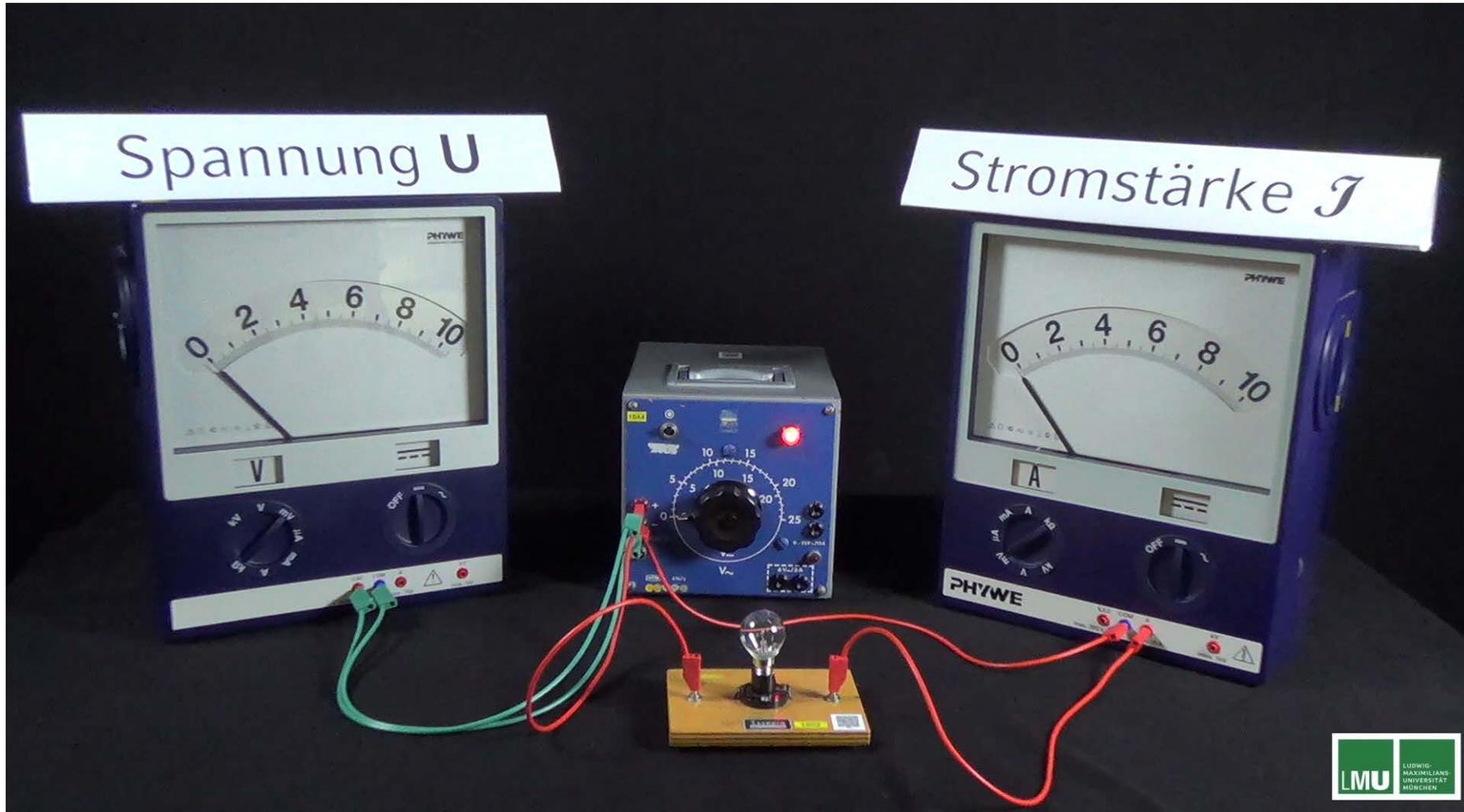


## Kennlinie eines Drahtes



[https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2\\_E\\_Video/2-2K-Kennlinie-Draht.m4v](https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/2-2K-Kennlinie-Draht.m4v)

## Kennlinie einer Glühlampe



[https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2\\_E\\_Video/2-2M-Kennlinie-Gluehlampe.m4v](https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/2-2M-Kennlinie-Gluehlampe.m4v)



Verknüpfungen zwischen  $I$ ,  $U$ ,  $R$ ,  $G$ ,  $\rho$ ,  $\sigma$ ,  $j$ :





Beispiel: Cu-Draht

$$\rho = 1,72 * 10^{-8} \Omega\text{m}; \quad A = 10 \text{ mm}^2; \quad L = 100 \text{ m};$$

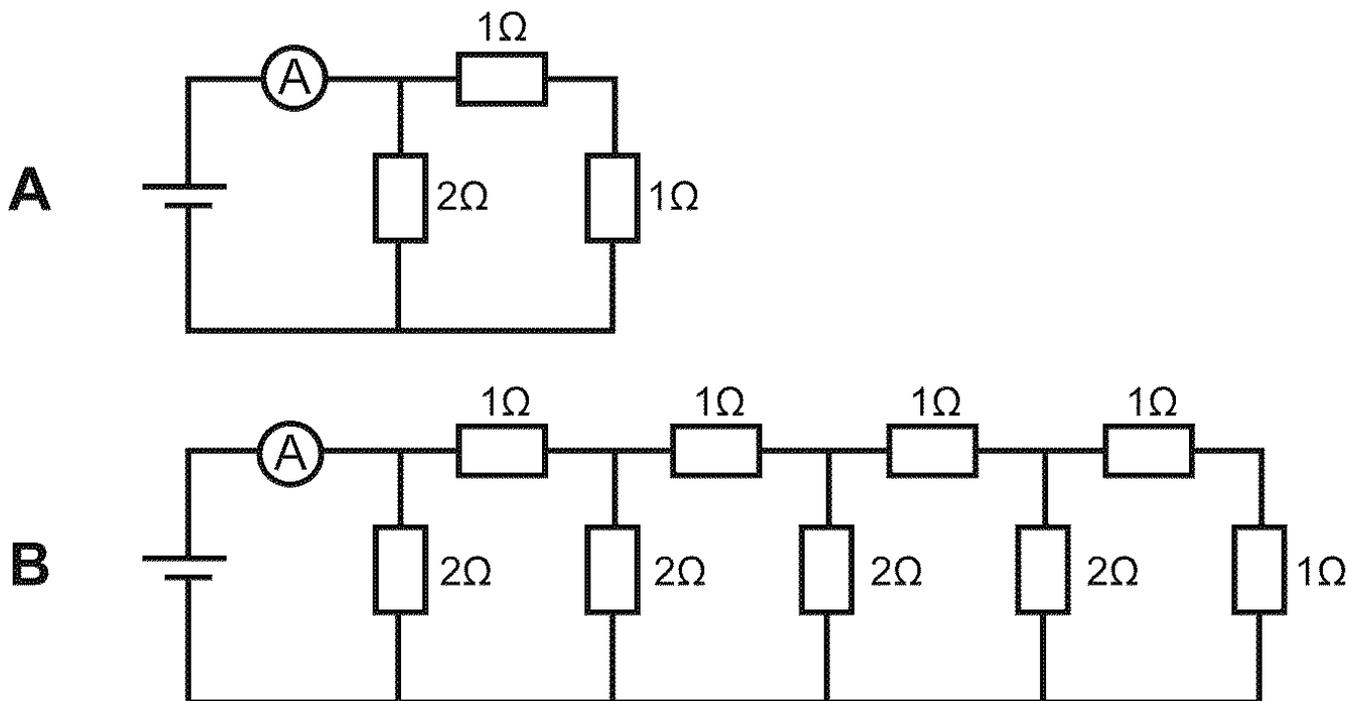
$$R =$$





- **Widerstandschaltungen**

## Widerstandschaltungen

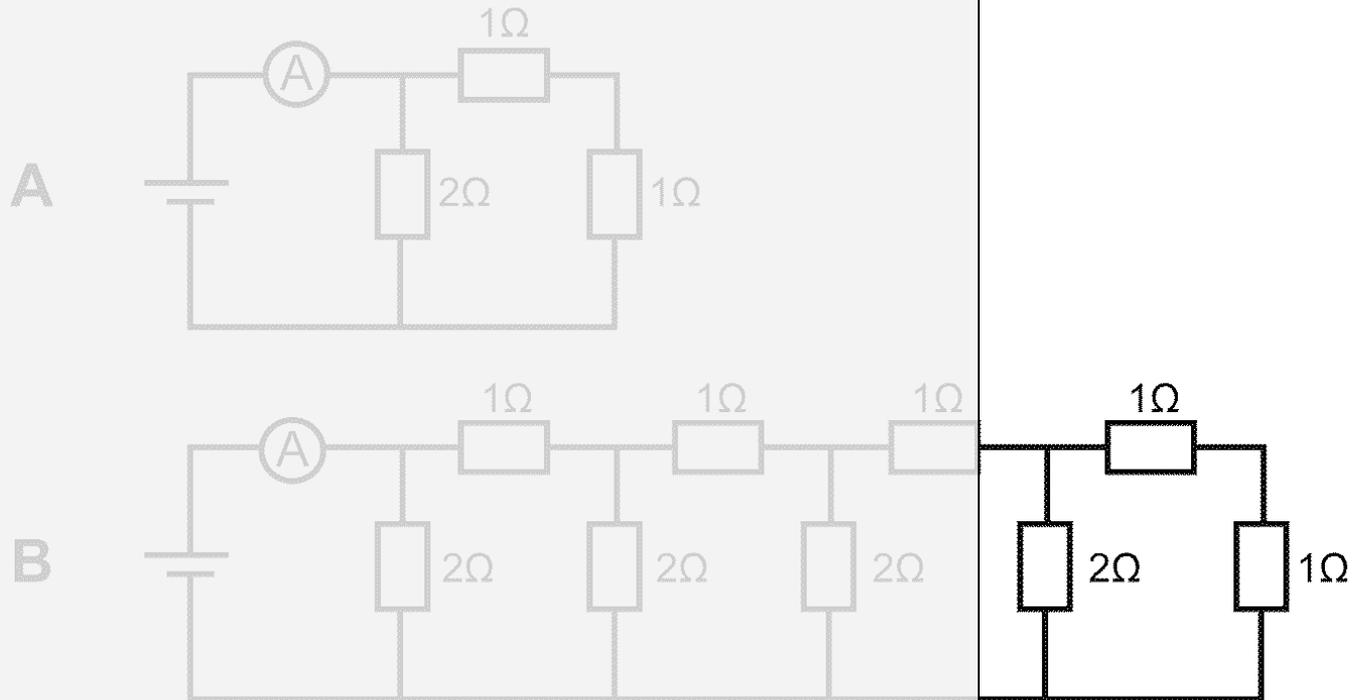


In welchem Stromkreis fließt der größere Strom?

- Im Stromkreis A
- Im Stromkreis B
- Der Strom ist in beiden Stromkreisen gleich groß.

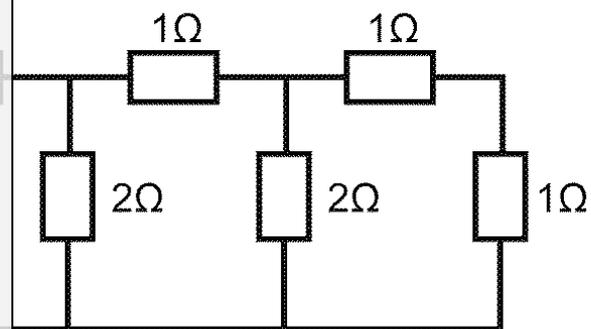
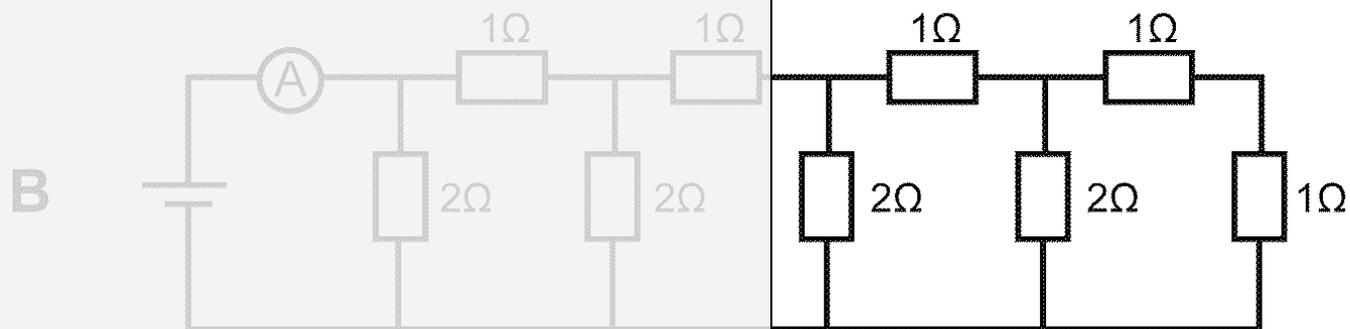
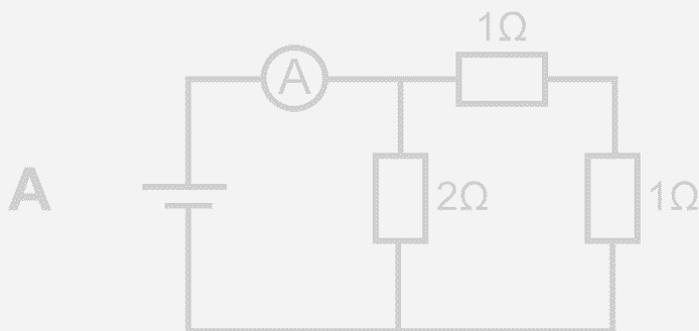


## Widerstandsschaltungen

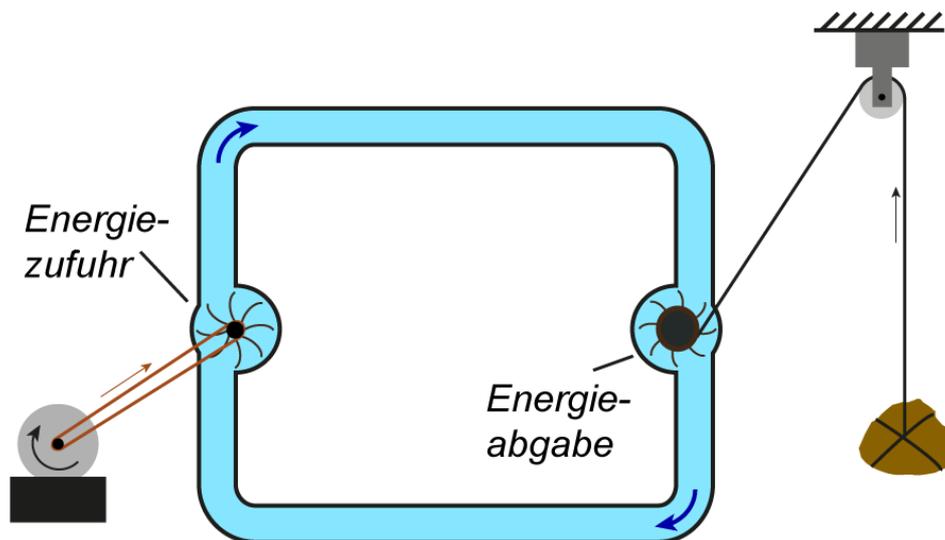
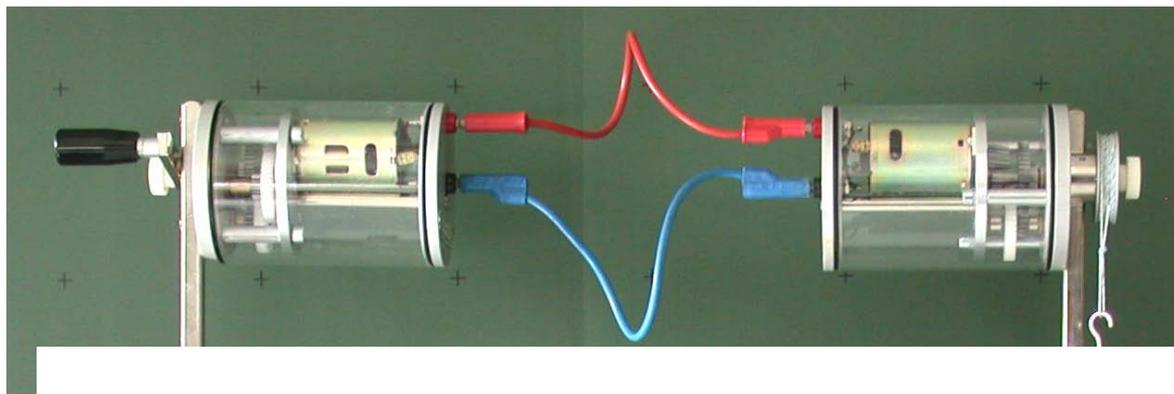




## Widerstandsschaltungen



## ▪ Elektrische Arbeit / Leistung



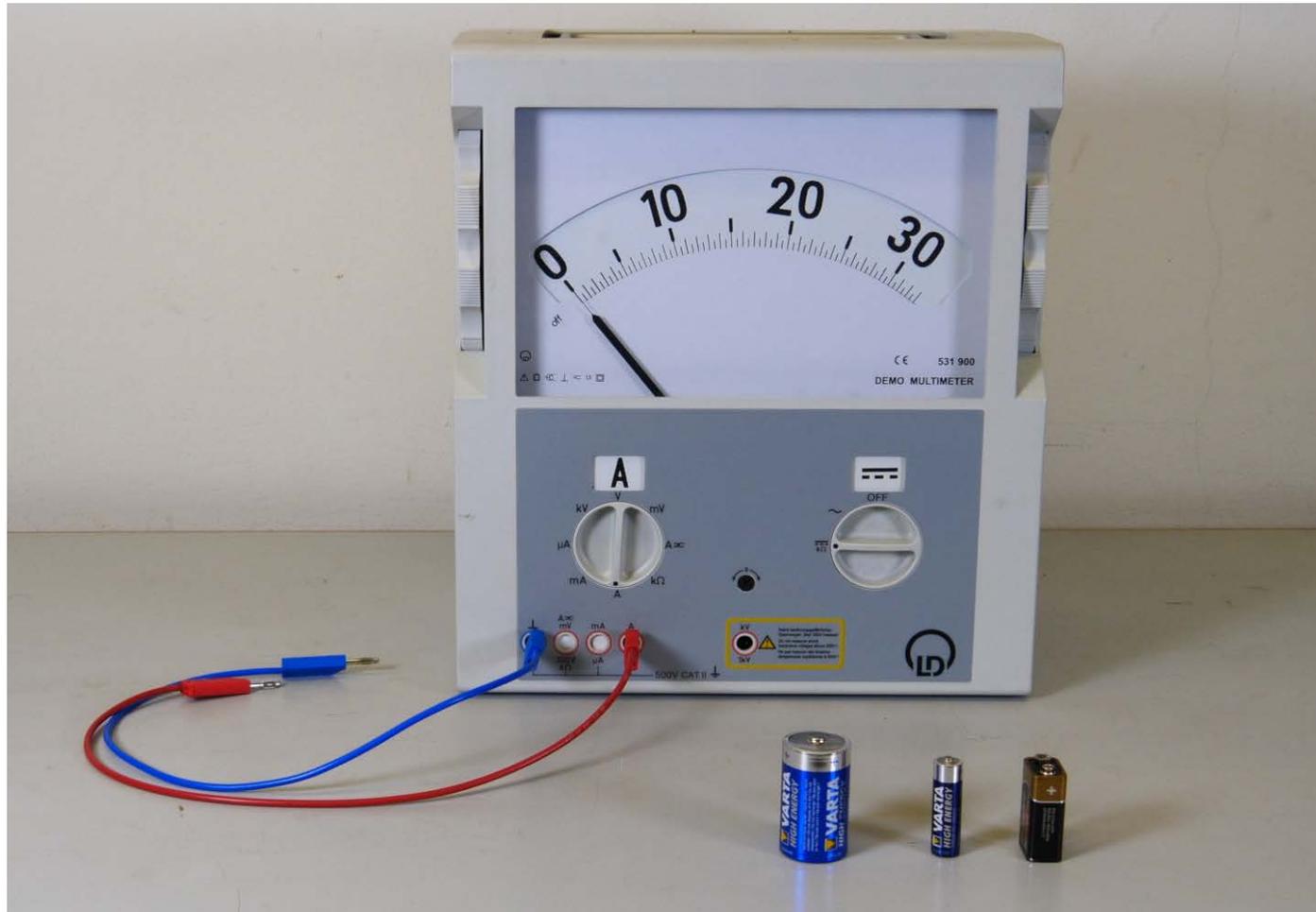


### ▪ Elektrische Leistung / Wärmeleistung



In einem Ohm'schen Widerstand  
wird die gesamte elektrische Leistung in Wärme umgesetzt.

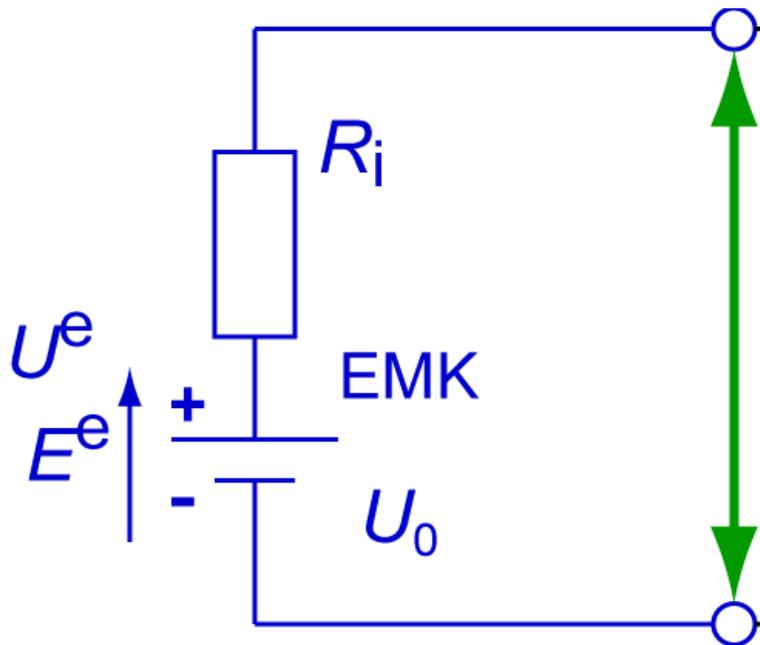
- reale Spannungsquellen - Kurzschlussstromstärke



[https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2\\_E\\_Video/2-3F-Kurzschlussstrom.m4v](https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/2-3F-Kurzschlussstrom.m4v)

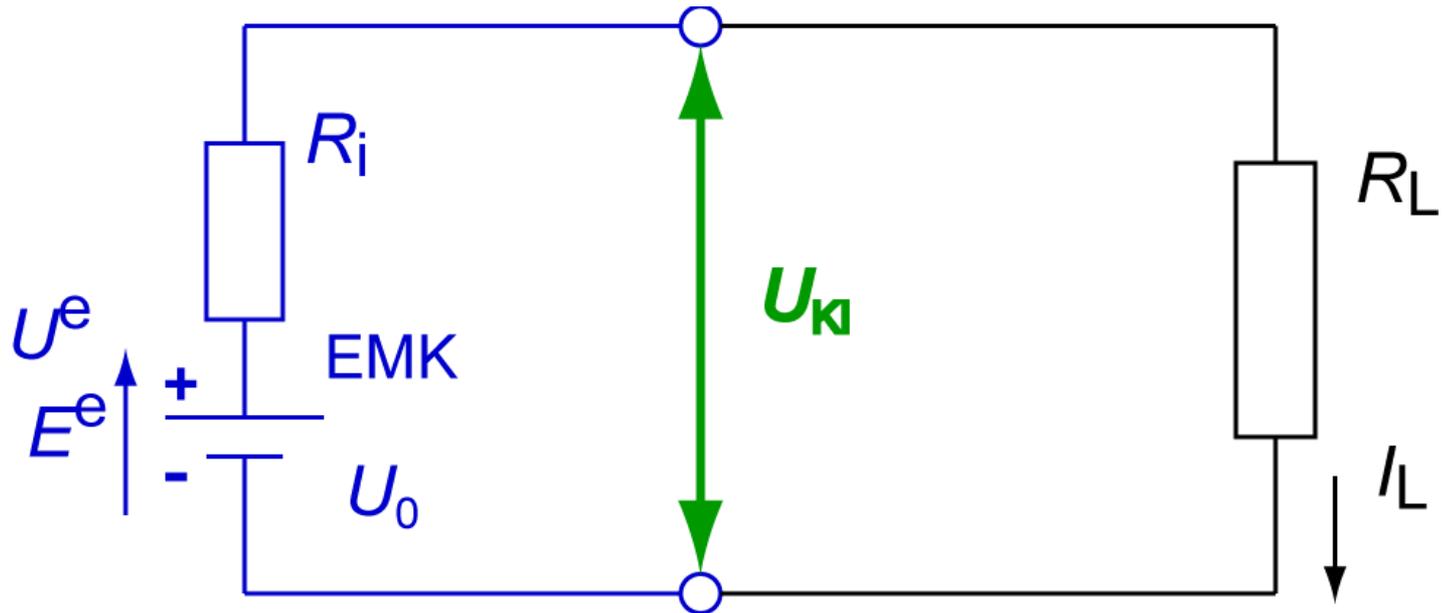


- **Modell für reale Spannungsquellen**  
Klemmenspannung, Leerlaufspannung,  
EMK, eingepreagte Spannung, eingepreagtes Feld



- **Modell für reale Spannungsquellen**

Klemmenspannung, Leerlaufspannung,  
EMK, eingepreßte Spannung, eingepreßtes Feld

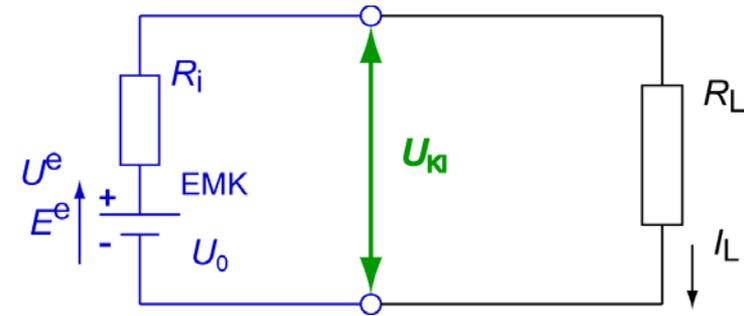


- **Innenwiderstand realer Spannungsquellen**

- **Leistungsanpassung (siehe Zusatzrechnung)**

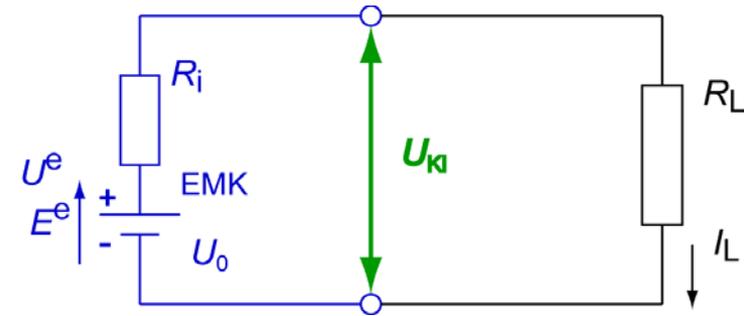


- Leistungsanpassung (Maximalleistung) bei realer Quelle





- Leistungsanpassung (Maximalleistung) bei realer Quelle



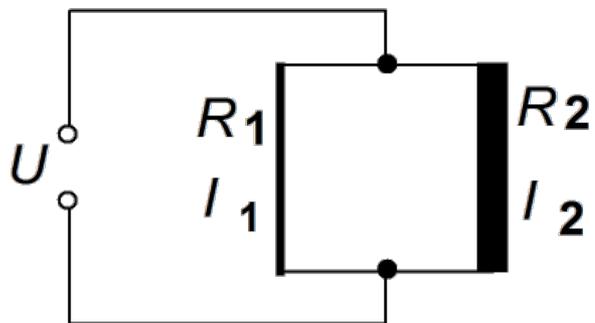


- **Leistungsanpassung (Maximalleistung) bei realer Quelle**





■ Anwendung: Experiment mit dicken und dünnen Drähten

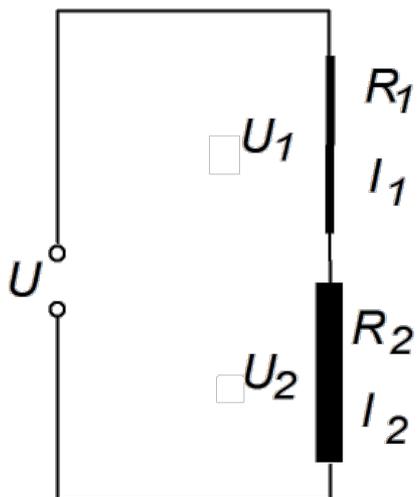


(dünn)  $R_1 > R_2$  (dick)

$$U_1 = U_2 = U$$

$$I_1 < I_2$$

$$P_1 = \frac{U^2}{R_1} < P_2 = \frac{U^2}{R_2}$$



$$I_1 = I_2 = I$$

$$U_1 > U_2$$

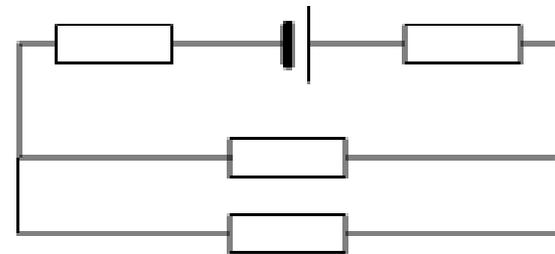
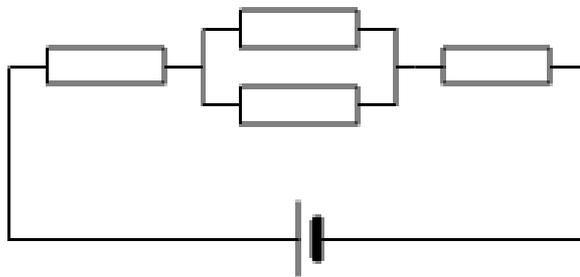
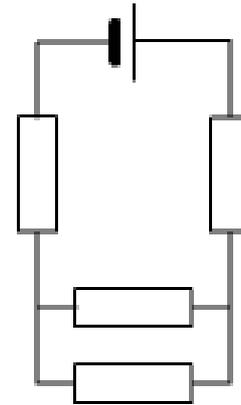
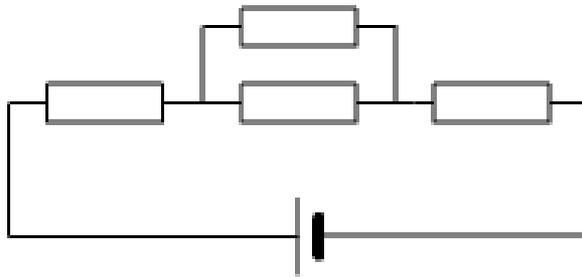
$$P_1 = I^2 R_1 > P_2 = I^2 R_2$$

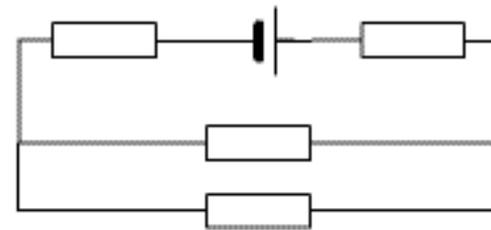
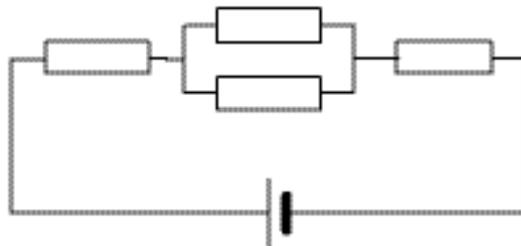
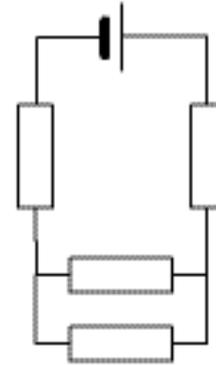
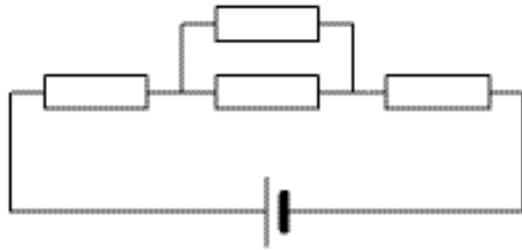


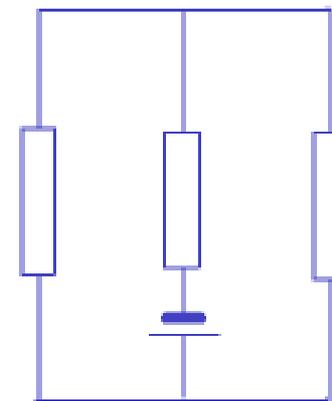
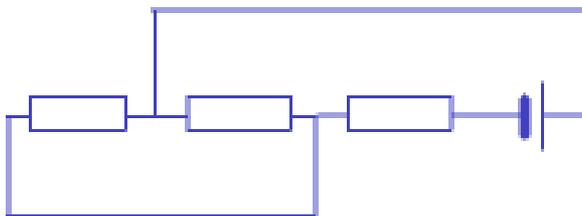
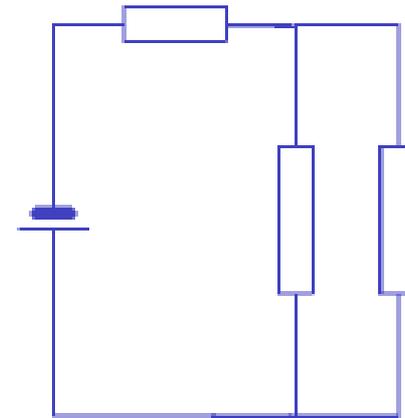
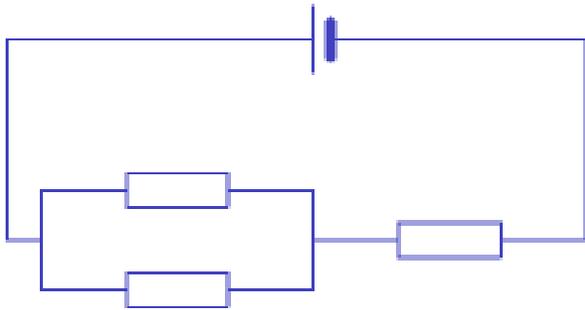
## ■ Verbrauchswerte moderner Haushaltsgeräte

Kühlschrank (ohne Verdampferfach) (270 l)		0,15 kWh je 100 l in 24 h	ca. 0,05 €
Gefrierschrank (270 l)		0,29 kWh " " " "	ca. 0,11 €
Gefriertruhe (330 l)		0,22 kWh " " " "	ca. 0,08 €
Waschmaschine (5 kg) Kochwäsche	95°C	1,65 kWh	ca. 0,61 €
	60°C	0,90 kWh	ca. 0,33 €
	40°C	0,42 kWh	ca. 0,15 €
Wäschetrockner (Kondensatortrockner, 5 kg)		2,60 kWh	ca. 0,96 €
Geschirrspüler (12-14 Gedecke, 50°C)		1,10 kWh	ca. 0,41 €

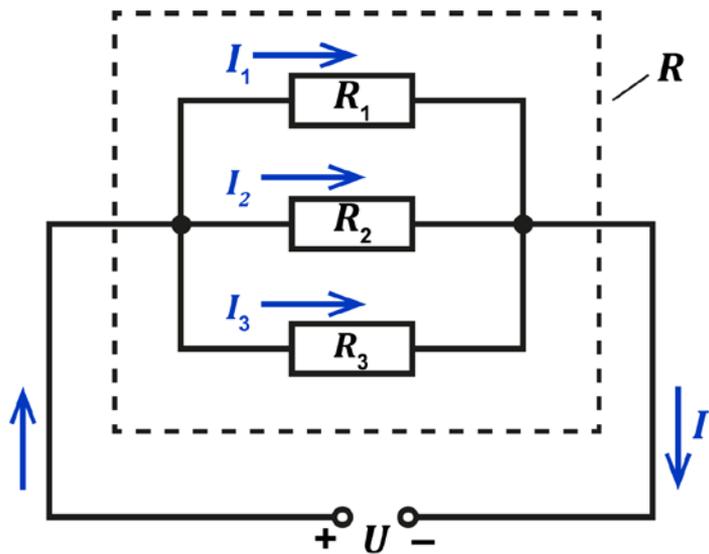
EnBW 6/2008 : 0.3695 €/kWh







## Parallelschaltung von Widerständen



Knotenregel:

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

Maschenregel:

$$U = I_1 R_1 = I_2 R_2 = I_3 R_3$$

daraus folgt:

$$I_1 = \frac{U}{R_1}; \quad I_2 = \frac{U}{R_2}; \quad I_3 = \frac{U}{R_3}$$

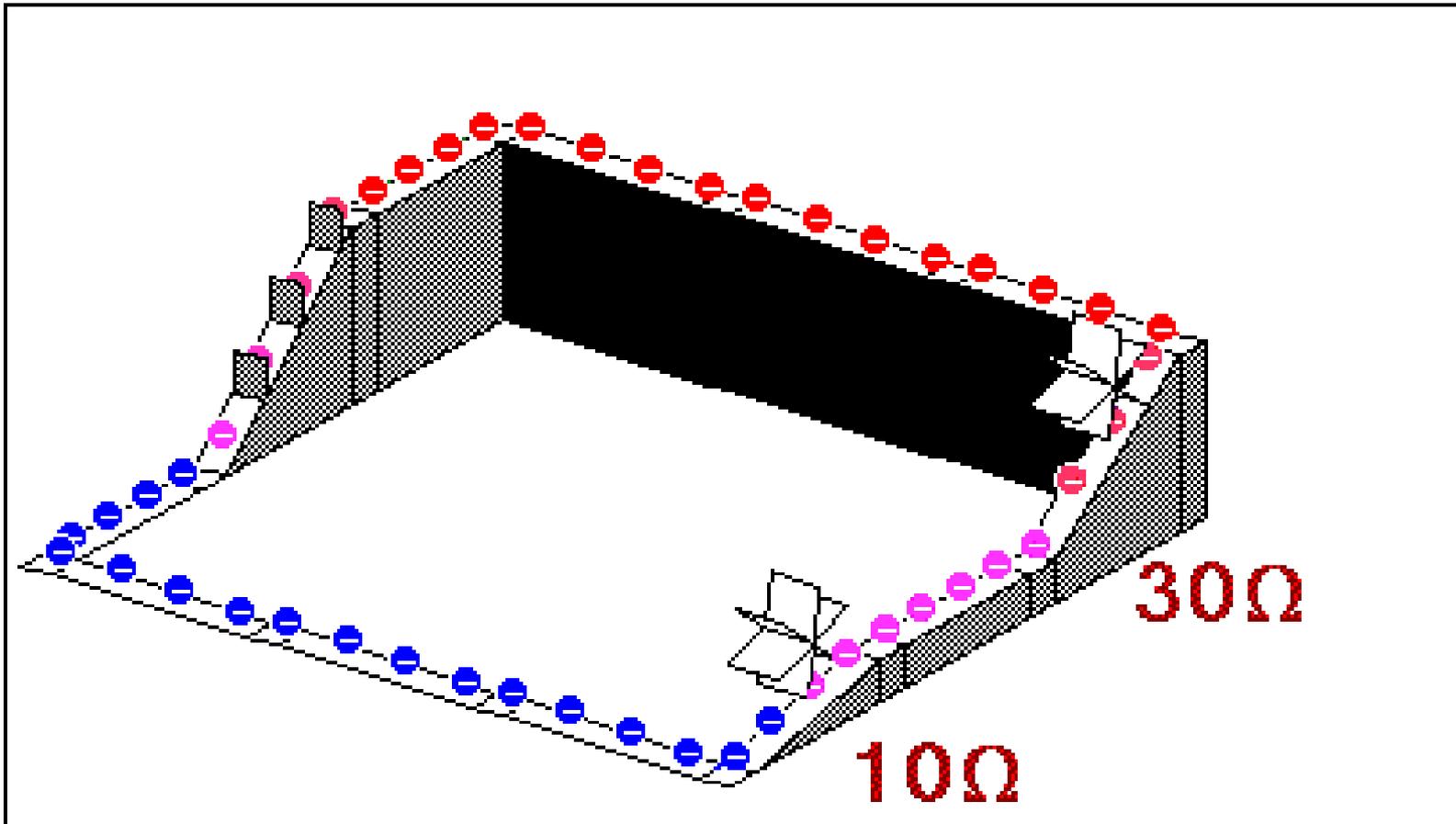
$$I = \frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3}$$

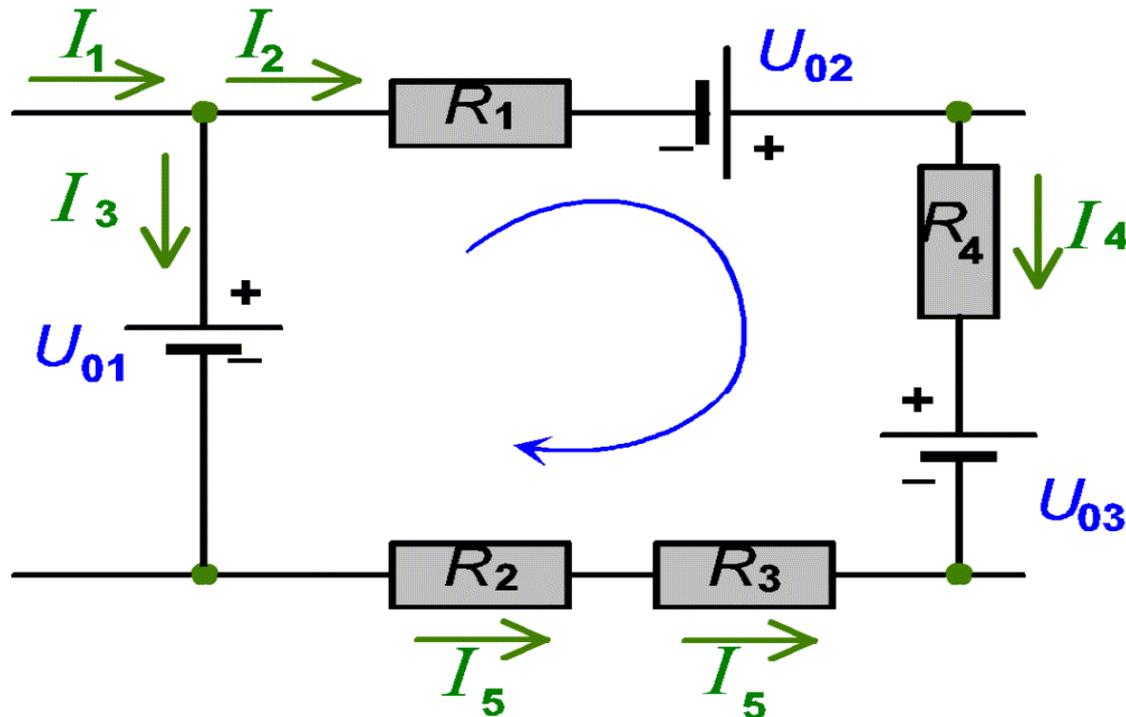
$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

Addition der Leitwerte:  $\mathbf{G = G_1 + G_2 + G_3}$



# Widerstandsnetze





- **Knotenregel:**

$$\sum I_v = 0$$

zufließend pos. zählen  
abfließend neg.

- **Maschenregel:**

$$\sum_v U_{0v} + \sum_v R_v I_v = 0$$



- **Knotenregel – Ladungserhaltung**
- **Maschenregel – Energieerhaltung**
  
- **Vorzeichenvorschriften:**
  1. Stromrichtungen willkürlich annehmen
  2. Umlaufssinn der Maschen willkürlich festlegen
  3. Quellenspannung von „-“ nach „+“ im Umlaufssinn positiv zählen (entspricht Potentialanstieg) ...
  4. Strom durch Widerstand im Umlaufssinn =>  $R_v I_v$  negativ zählen (entspricht Potentialabfall) ...



- Berechnungen zu einem Gleichstromnetzwerk (Rechenübung)

$$U_1 = 12V$$

$$U_2 = 10V$$

$$U_3 = 8,0V$$

$$R_{i,1} = 1,0\Omega$$

$$R_{i,2} = 1,0\Omega$$

$$R_{i,3} = 1,0\Omega$$

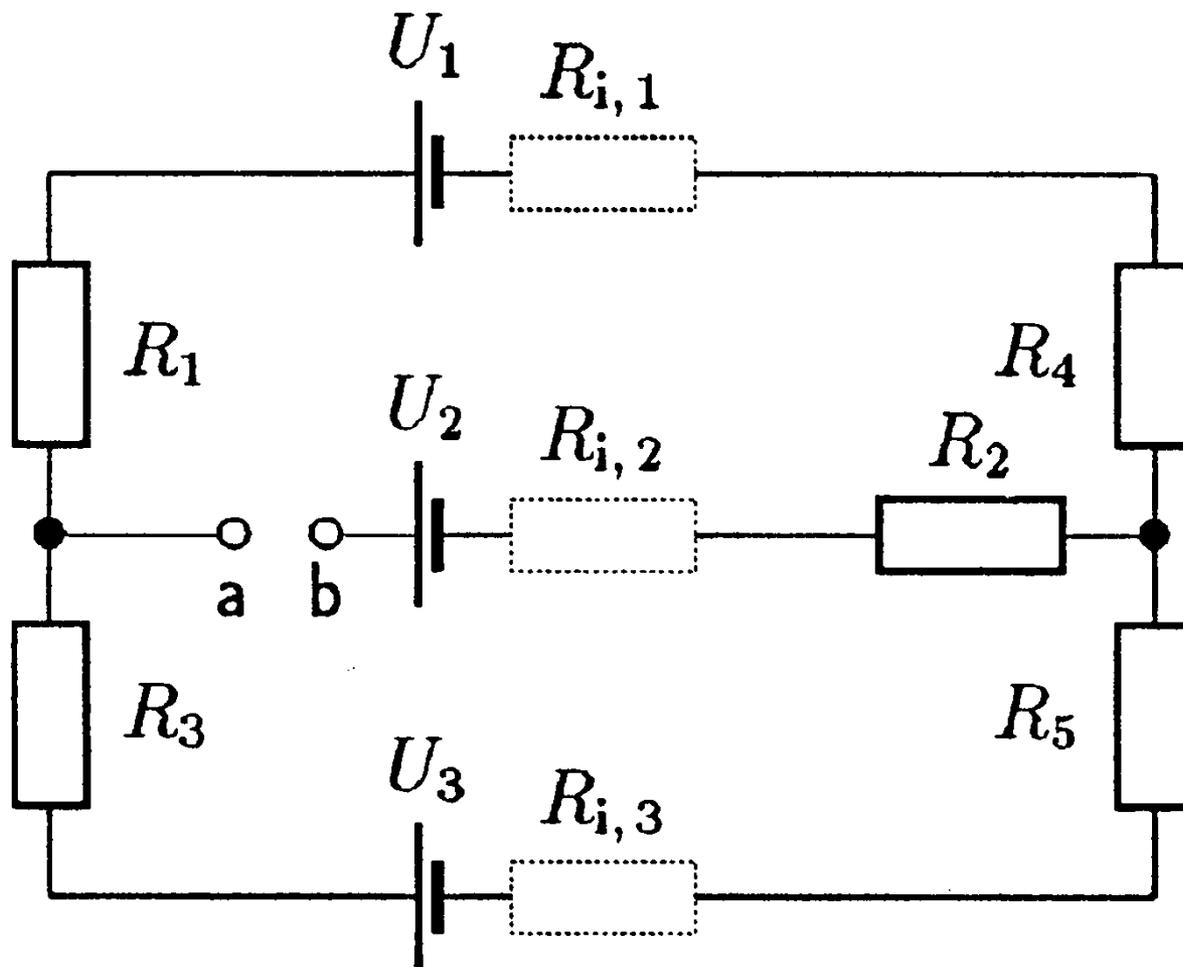
$$R_1 = 2,0\Omega$$

$$R_2 = 3,0\Omega$$

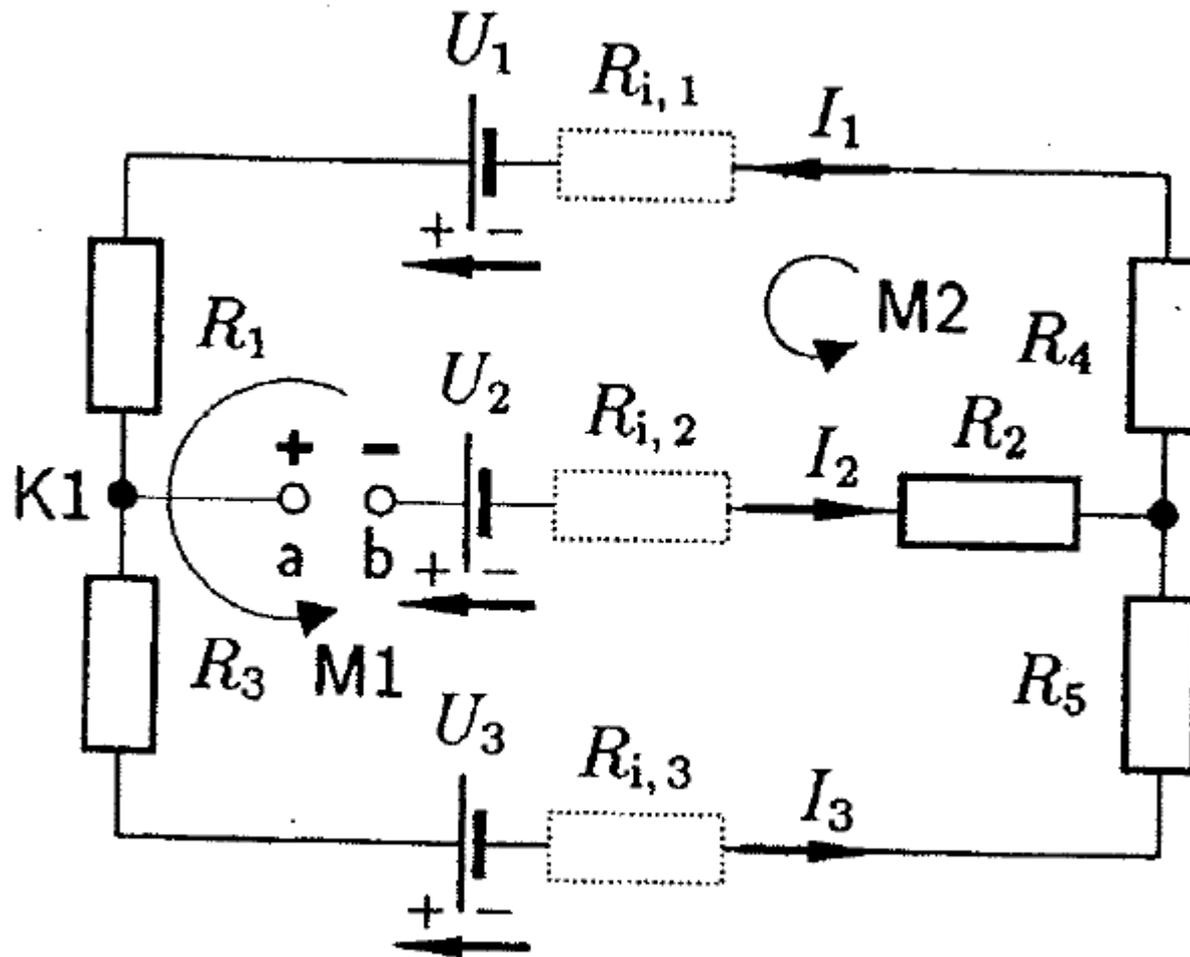
$$R_3 = 2,0\Omega$$

$$R_4 = 1,0\Omega$$

$$R_5 = 2,0\Omega$$

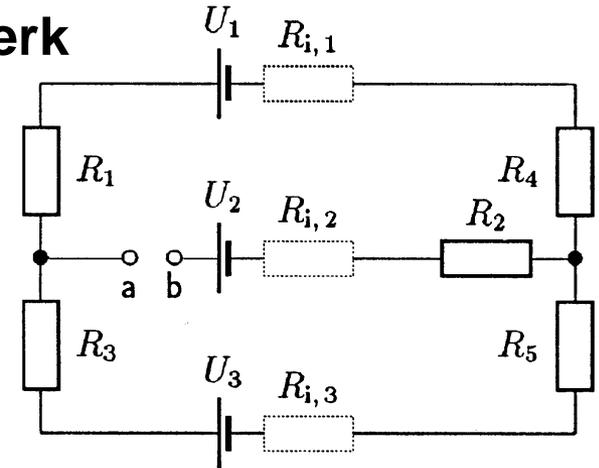


- Berechnungen zu einem Gleichstromnetzwerk (Rechenübung)



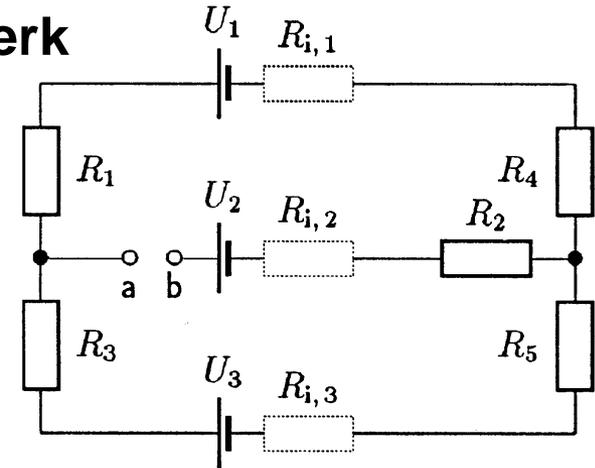


- Berechnungen zu einem Gleichstromnetzwerk (Rechenübung)





- Berechnungen zu einem Gleichstromnetzwerk (Rechenübung)

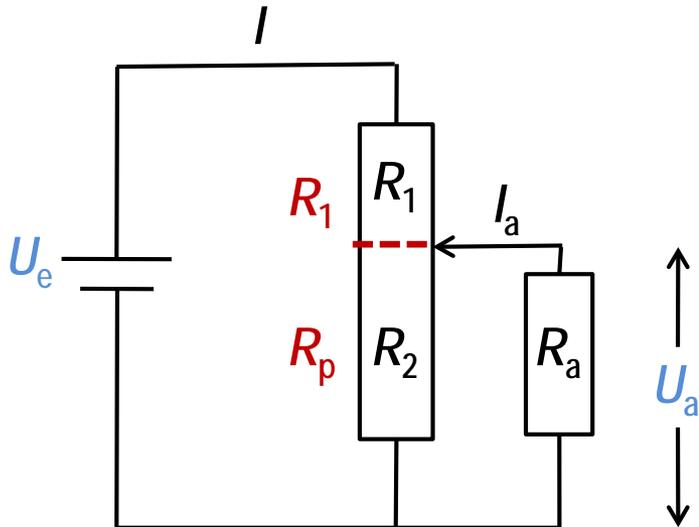




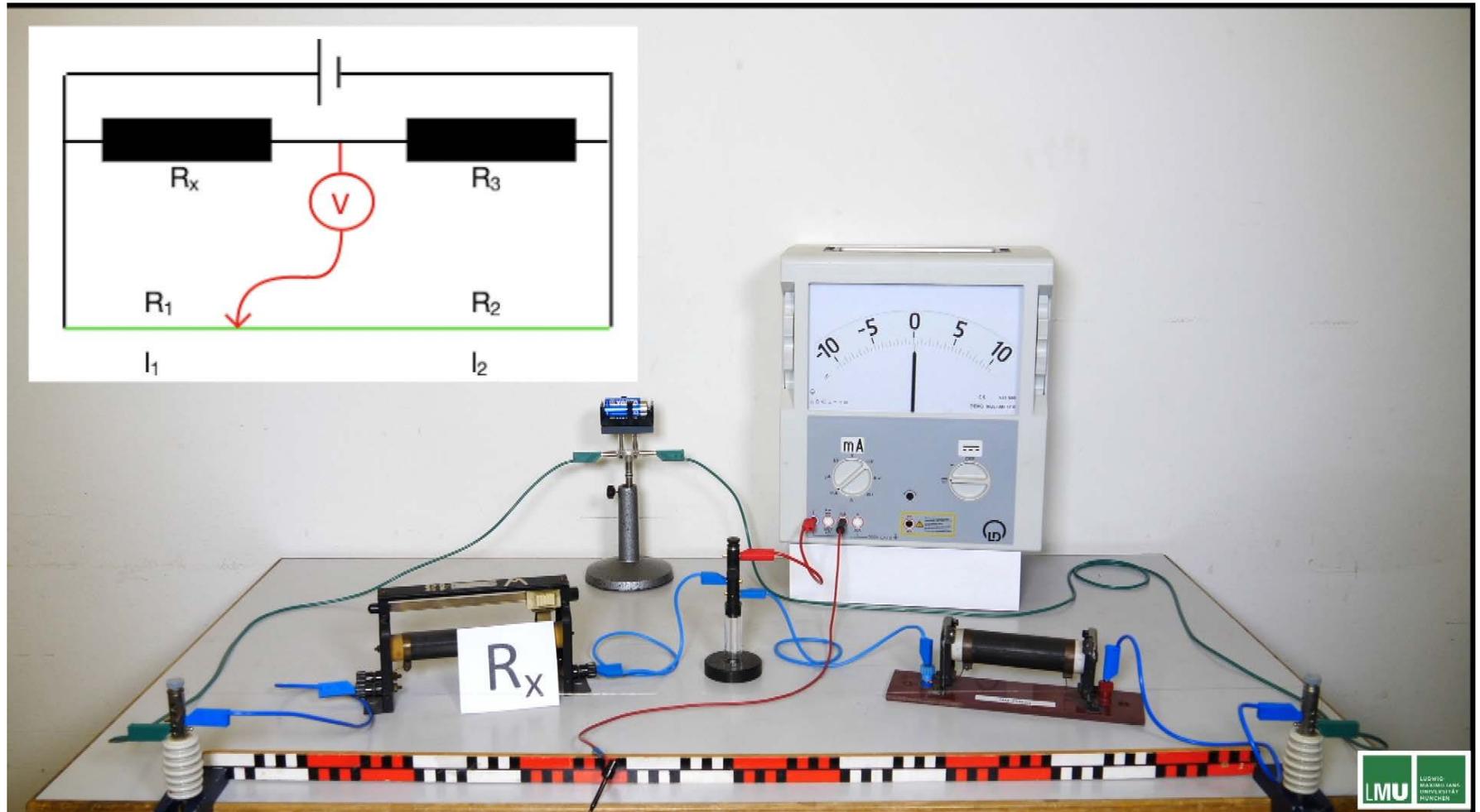
# Spezielle Schaltungen



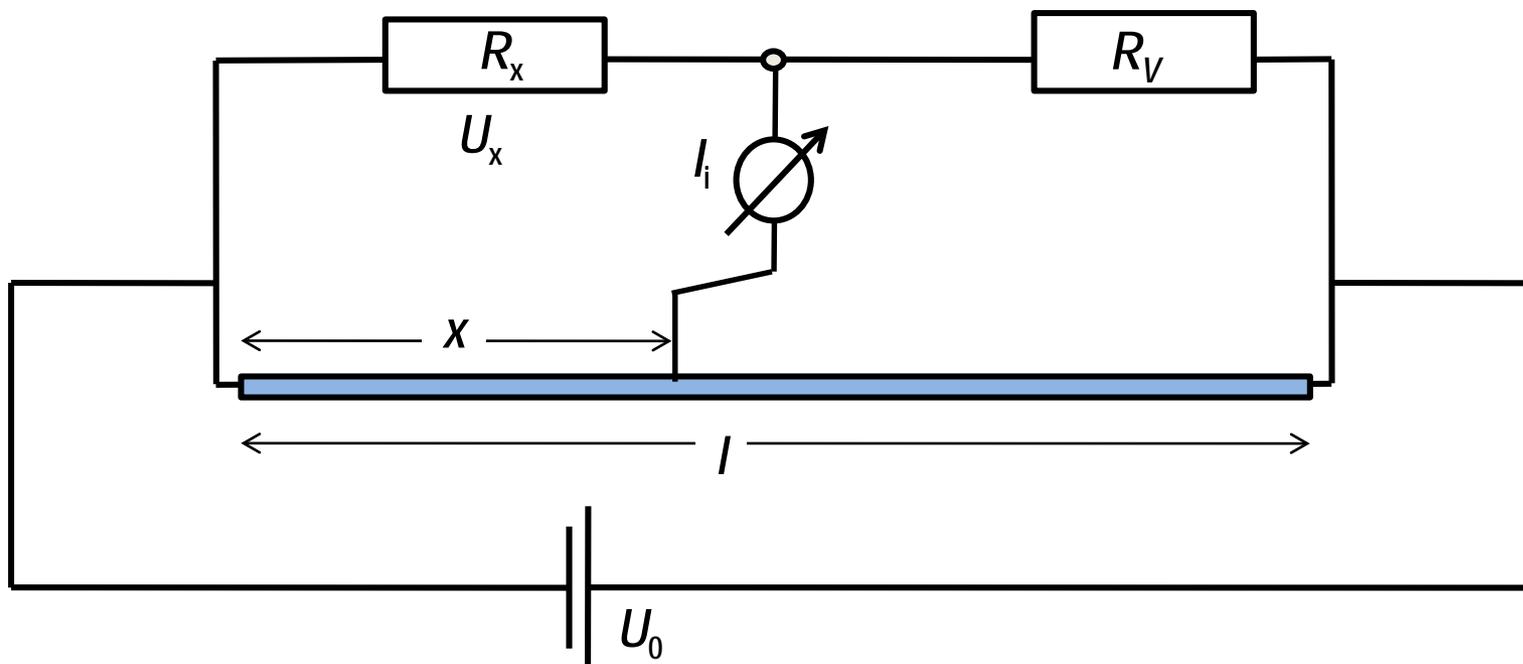
## ■ Potentiometerschaltung



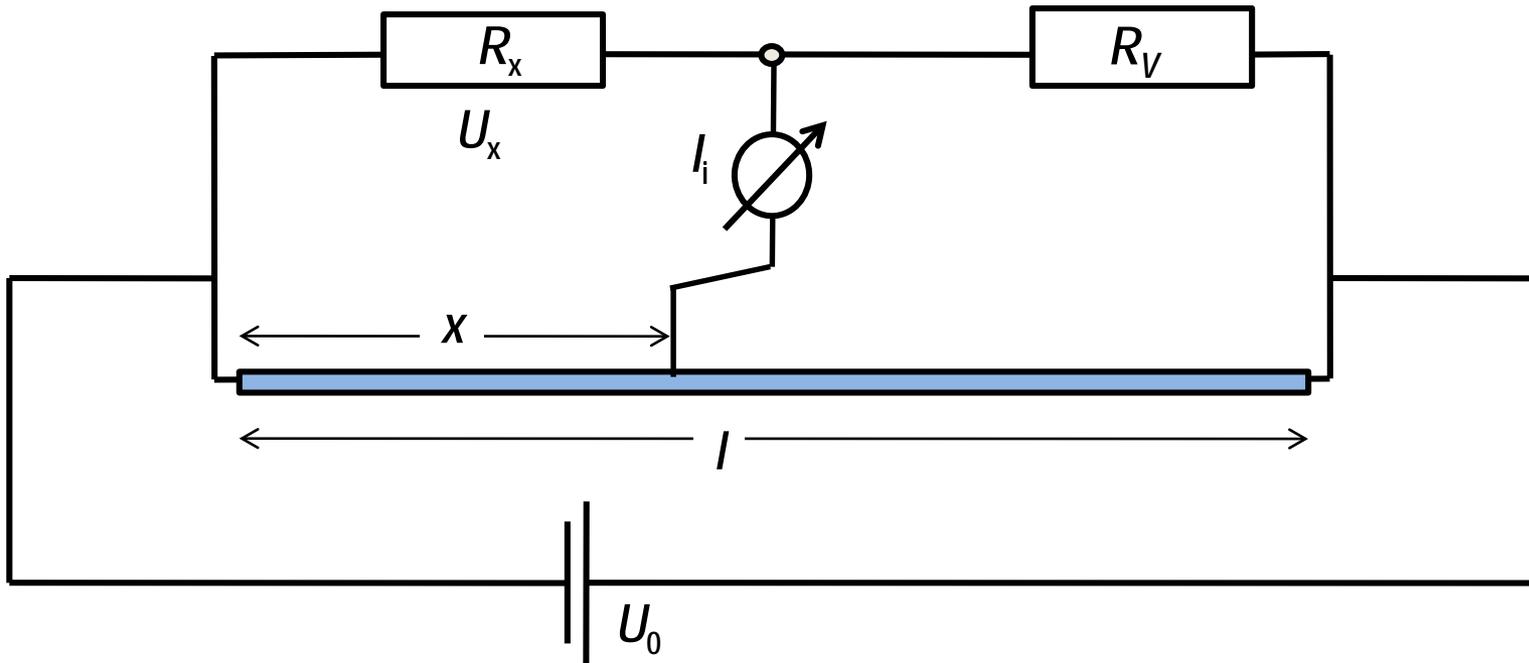
## Wheatstonesche Brückenschaltung



- **Wheatstonesche Brückenschaltung**  
(Bestimmung eines unbekannten Widerstandes)



## Wheatstonesche Brückenschaltung



Der Abgriff wird so lange verschoben,  
bis durch den Brückenzweig kein Strom mehr fließt.

Dann gilt:

$$\frac{U_x}{U_0 - U_x} = \frac{x}{l - x} = \frac{R_x}{R_V};$$



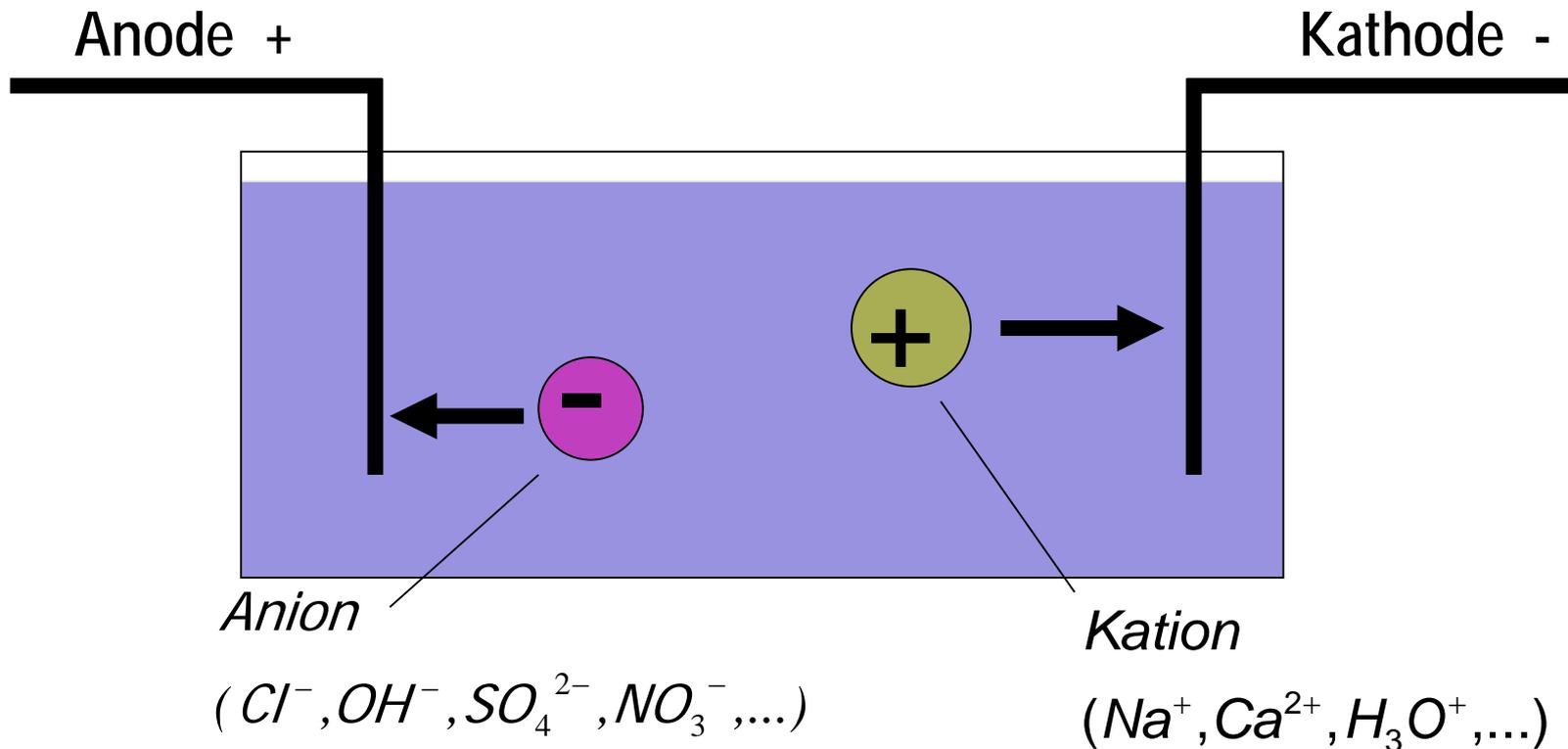


### Leitungsversuche:

- Destilliertes Wasser
- Leitungswasser
- NaCl im Wasser



[https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2\\_E\\_Video/2-5B-Leit-Kochsalz.m4v](https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/2-5B-Leit-Kochsalz.m4v)



Dissoziation: Elektrolyte zerfallen in der Flüssigkeit in Ionen.  
Die Ionen ermöglichen einen elektrischen Strom.

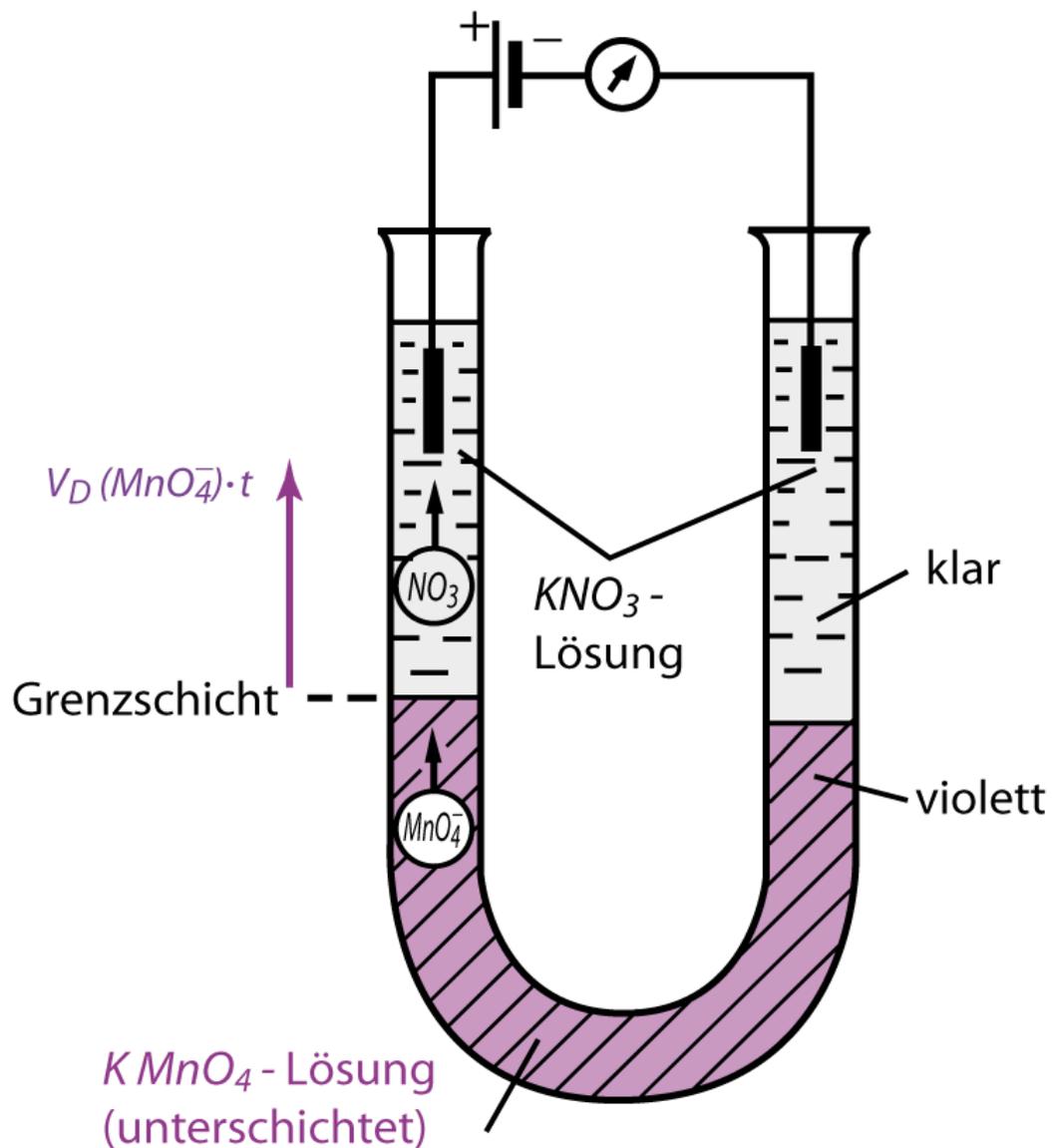


## Abhängigkeiten:

- Vorhandensein von Ladungsträgern
- Beweglichkeit der Ladungsträger ("Häufigkeit von Stößen", "Reibung")  
**temperaturabhängig**

## Leitfähigkeiten:

Dest. Wasser	$10^{-6} - 10^{-4}$	$\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$
NaCl (1 - molar)	7,4	$\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1,1	$\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$
verd. H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (1 - molar)	7,4	$\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$



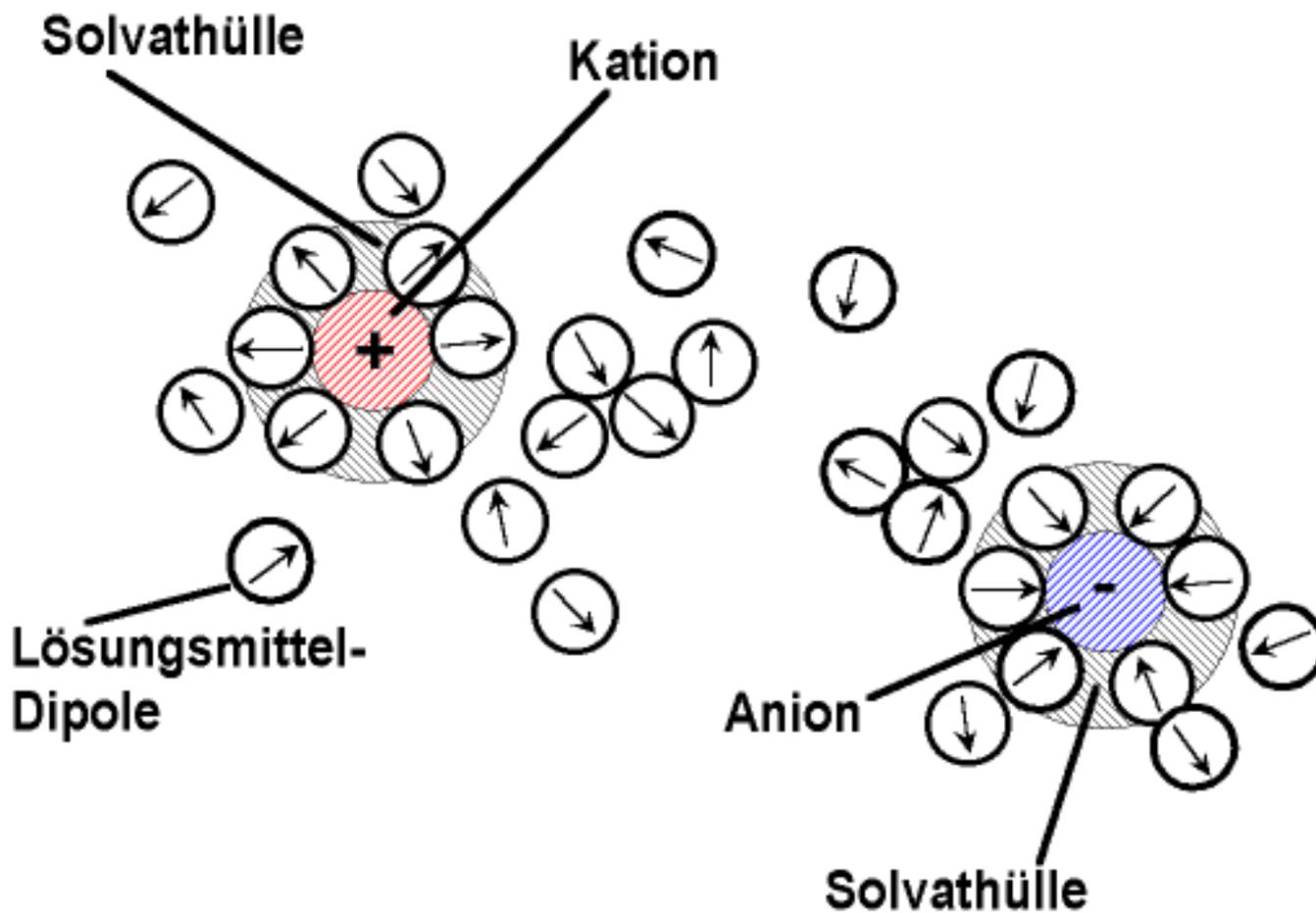
$$v = \frac{10 \text{ mm}}{180 \text{ s}} = 0,050 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$



- **Ladungsträger und Beweglichkeit - Beschreibungsgrößen**



- Solvathülle





- **Exkurs: Die STOFFMENGE (SI-Größe)**

Ein Maß für die Anzahl atomarer / molekularer Teilchen.

1 Mol enthält  $6,022 \cdot 10^{23}$  Teilchen ( $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ 1/mol}$ )



**Definition: Stoffmenge und deren Einheit 1 Mol:**

Eine Substanz hat die Stoffmenge von 1 mol,  
wenn die Anzahl der darin enthaltenen Teilchen (Atome, Moleküle)  
gleich der Anzahl der Kohlenstoffatome in 12g des Kohlenstoffnuklids  $^{12}\text{C}$  sind.

Diese Anzahl ist  $N_A = 6.022 \cdot 10^{23} \text{ 1/mol}$  (Avogadro-Konstante)



## Definition: Stoffmenge und deren Einheit 1 Mol:

Eine Substanz hat die Stoffmenge von 1 mol,  
wenn die Anzahl der darin enthaltenen Teilchen (Atome, Moleküle)  
gleich der Anzahl der Kohlenstoffatome in 12g des Kohlenstoffnuklids  $^{12}\text{C}$  sind.

Diese Anzahl ist  $N_A = 6.022 \cdot 10^{23} \text{ 1/mol}$  (Avogadro-Konstante)

Masse eines Mols (molare Masse)  $M$ :

$$\begin{aligned} M &= m_A \cdot N_A \\ &= A_r \cdot m_u \cdot N_A \\ &= A_r \cdot \frac{1}{12} m(^{12}\text{C}) \cdot N_A \end{aligned}$$

$$M = A_r \frac{g}{\text{mol}}$$



**Kohlenstoffisotop  ${}^{12}_6\text{C}$  (6 Protonen, 6 Neutronen, 6 Elektronen)**

**Als atomare Masseneinheit  $m_u$  wird der 12. Teil von  $m({}^{12}\text{C})$  genommen**

$$m_u = \frac{1}{12} m({}^{12}\text{C}) = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{kg}$$

**Als *relative Atommasse*  $A_r$  wird das Verhältnis einer Atommasse zur atomaren Masseinheit bezeichnet**

$$A_r = \frac{m_a}{m_u}$$

**Beispiele:**

$$H: \quad A_r = 1,0078$$

$${}^{12}\text{C}: \quad A_r = 12,0000$$

$$Ca: \quad A_r = 107,8680$$



Masse  $m$  und molare Masse  $M$ :

$$m = n \cdot M \quad \text{oder} \quad n = \frac{m}{M}$$

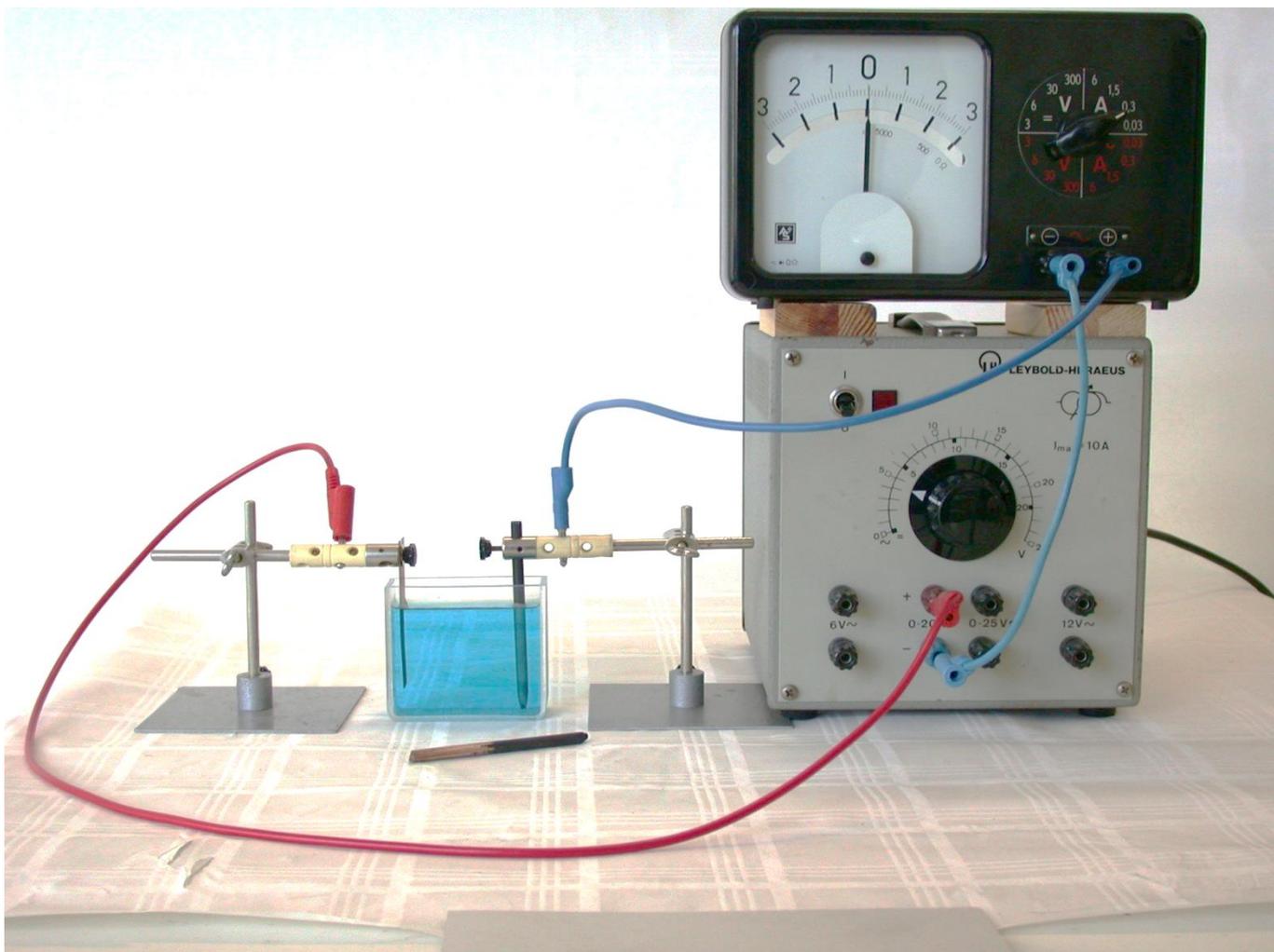
Die Stoffmengen von 10 g unterscheiden sich bei verschiedenen Substanzen:

10 g He	$n = 2,5 \text{ mol}$	da $M = 4,0026 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$
10 g $CO_2$	$n = 0,23 \text{ mol}$	da $M = 44,01 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$
10 g $N_2$	$n = 0,36 \text{ mol}$	da $M = 28,134 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$

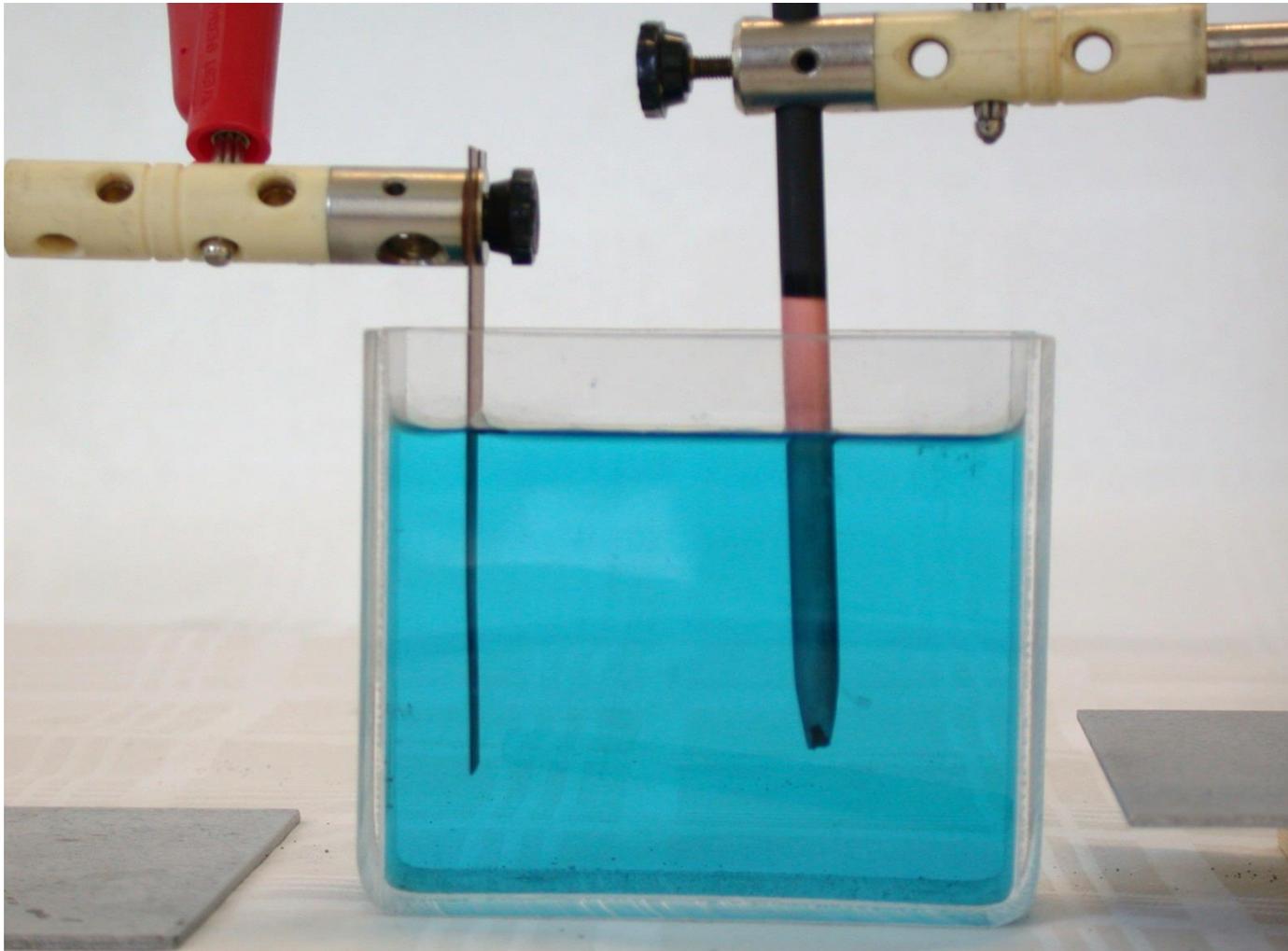


[https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2\\_E\\_Video/2-5d-Leitung-Kupfersulfat.m4v](https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/2-5d-Leitung-Kupfersulfat.m4v)

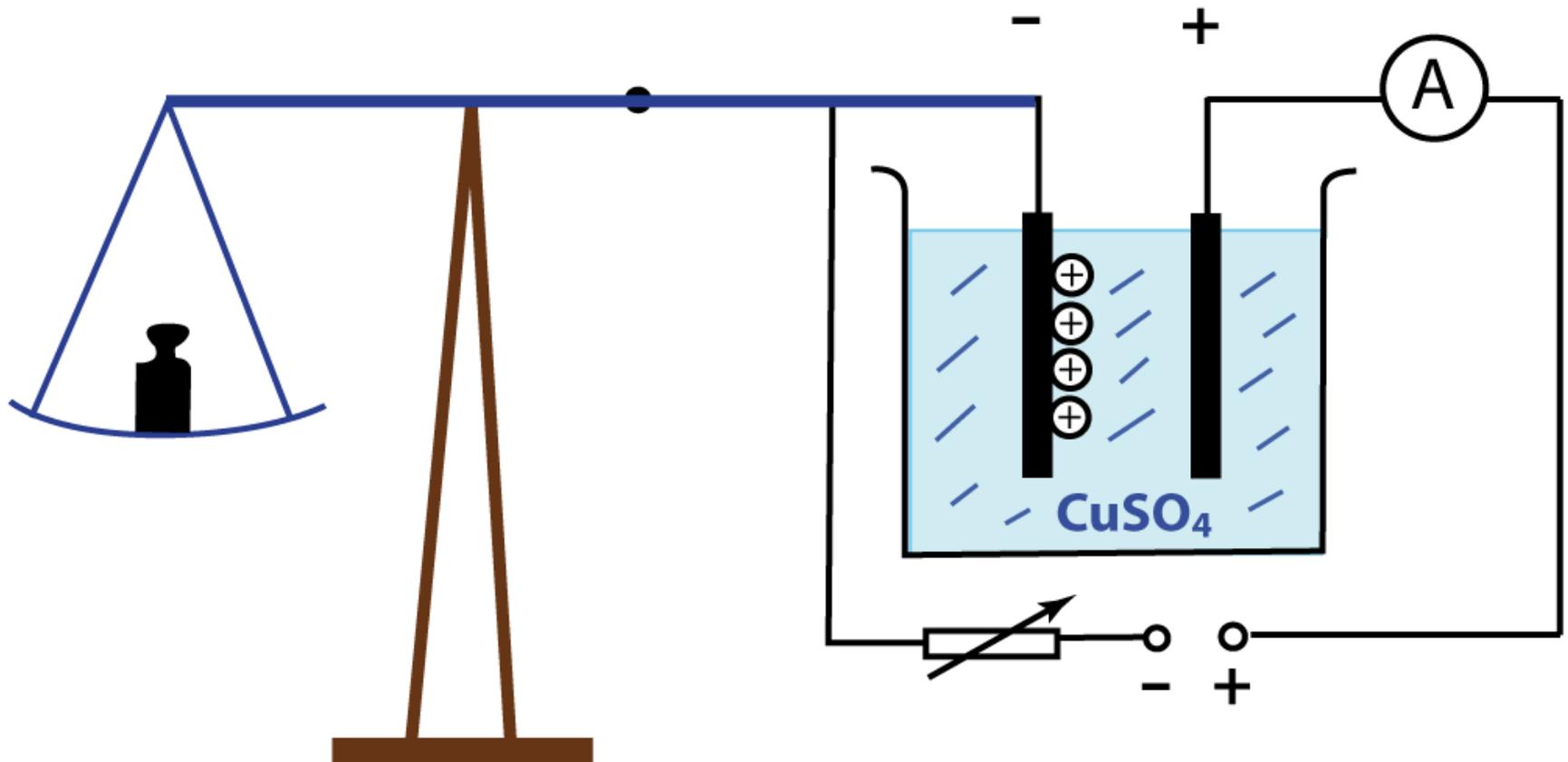
- Bei der Elektrolyse wird Materie transportiert (über pos. und neg. Ionen)



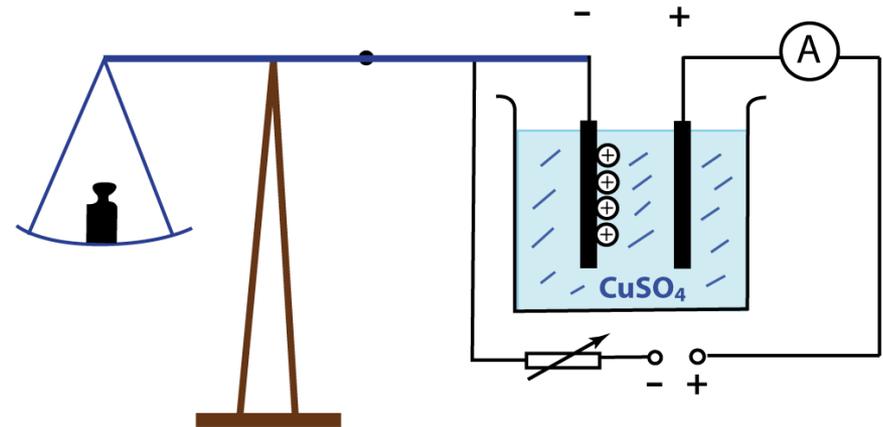
- Bei der Elektrolyse wird Materie transportiert (über pos. und neg. Ionen)



- Bei der Elektrolyse wird Materie transportiert (über pos. und neg. Ionen)



- Bei der Elektrolyse wird Materie transportiert



Bei diesem Experiment:  $I = 2 \text{ A}$  }  $\Rightarrow q = 600 \text{ C};$   $m = 150 \text{ mg};$   
 $t = 300 \text{ s}$

- Zusammenhang zwischen abgeschiedener Masse und transportierter Ladung:

$$m \sim q$$

$$\frac{m}{q} = 0,32 \frac{\text{mg}}{\text{C}};$$



## ■ Faradaysche Gesetze

1. Die abgeschiedene Masse ist proportional zu der transportierten Ladung.

$$m \sim q = I \cdot t$$

Das Produkt aus Elementarladung und Avogadrokonstante heißt **Faraday-Konstante:**

$$F = e \cdot N_A$$

Ein Mol eines z-wertigen Ions transportiert die Ladung:  $q = z \cdot F$



## ■ Faradaysche Gesetze

2. Die in gleichen Zeitintervallen bei gleicher Stromstärke (gleiche Ladung) abgeschiedenen Massen unterschiedlicher Stoffe verhalten sich wie die Molmassen pro Wertigkeit



*empirisch:*

*rechnerisch:*





## Faradaysche Gesetze

2. Die in gleichen Zeitintervallen bei gleicher Stromstärke (gleiche Ladung) abgeschiedenen Massen unterschiedlicher Stoffe verhalten sich wie die Molmassen pro Wertigkeit

empirisch:

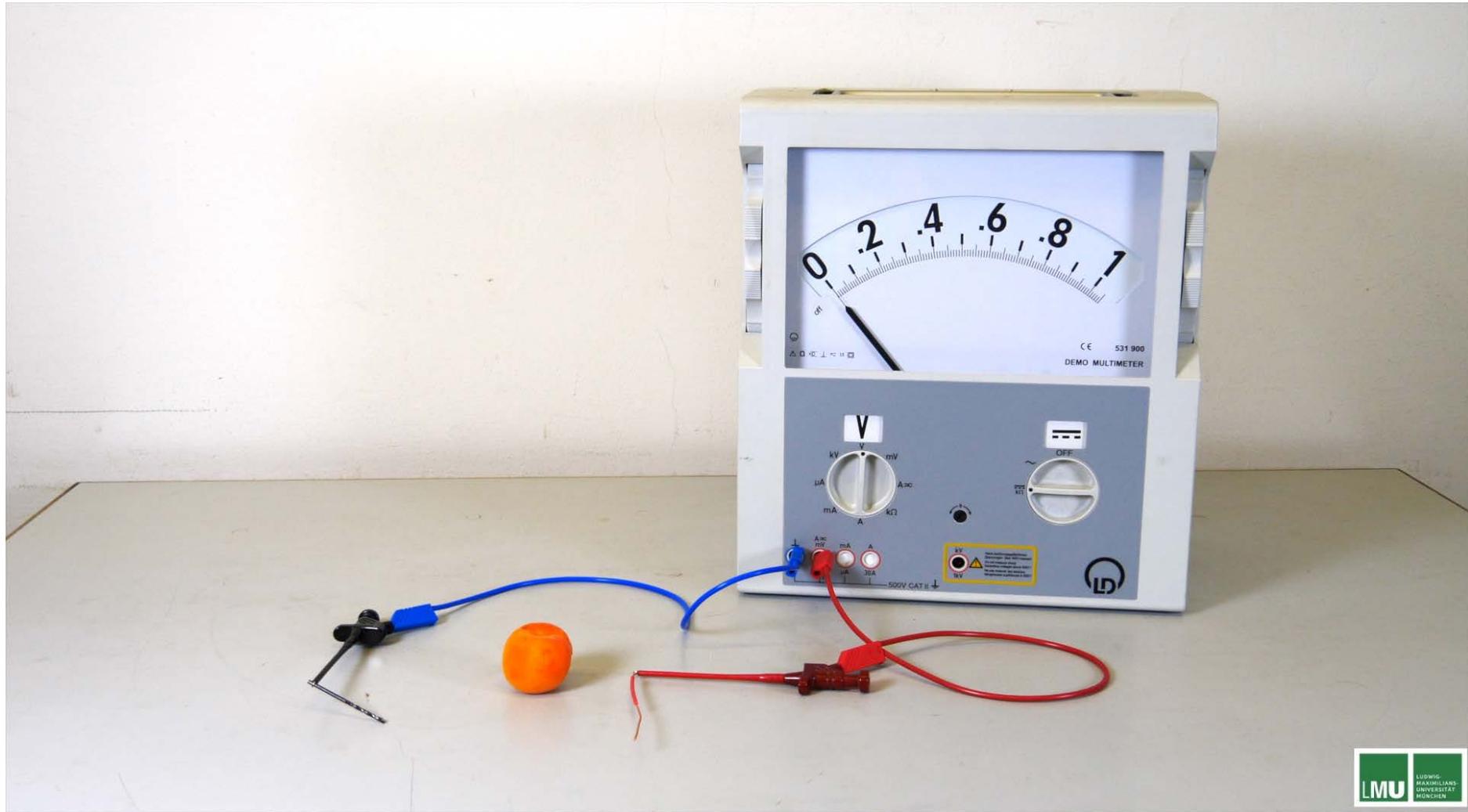
rechnerisch:

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{\frac{m_1}{q}}{\frac{m_2}{q}} = \frac{\frac{n_1 \cdot m_{1, \text{Ion}}}{n_1 \cdot z_1 \cdot N_A \cdot e}}{\frac{n_2 \cdot m_{2, \text{Ion}}}{n_2 \cdot z_2 \cdot N_A \cdot e}} = \frac{\frac{M_1}{z_1 \cdot F}}{\frac{M_2}{z_2 \cdot F}}$$

$$\alpha = \frac{m}{q} = \frac{M}{z \cdot N_A \cdot e} = \frac{M}{z \cdot F}$$

Elektrochemisches  
Äquivalent

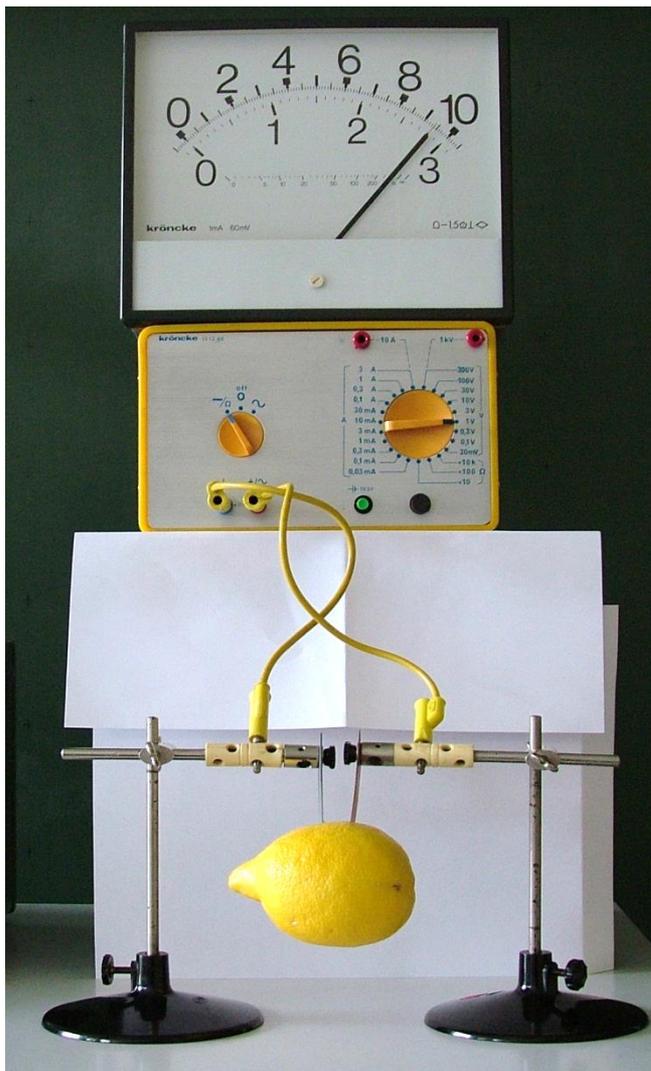
$$\left. \frac{m_1}{m_2} \right|_q = \frac{\alpha_1}{\alpha_2}$$



[https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2\\_E\\_Video/2-5G-Aprikosen-Batterie.m4v](https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/2-5G-Aprikosen-Batterie.m4v)

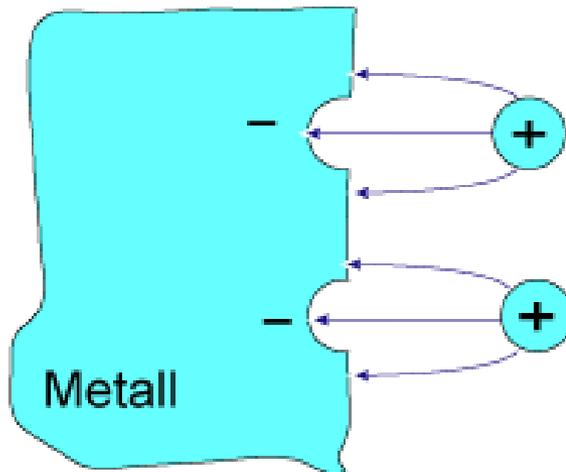
## ■ Elektrochemischen Spannungsreihe

Fruchtbatterie



## ■ Elektrochemische Spannungsquellen

Warum treten Polarisationsspannungen auf?



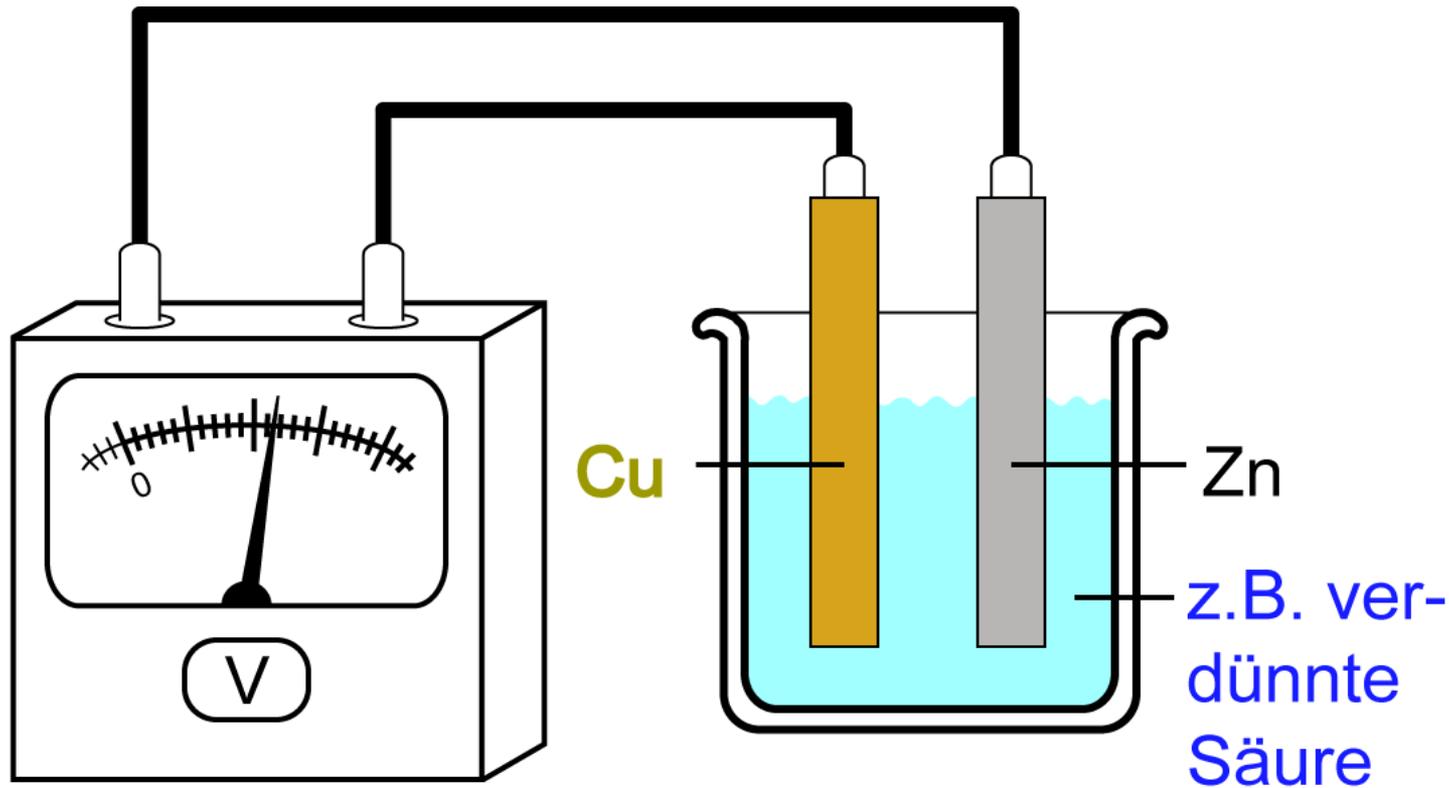
Aus der Metalloberfläche treten positive Metallionen in den Elektrolyt aus,

bis das entstehende elektrische Feld einen weiteren Austausch verhindert.

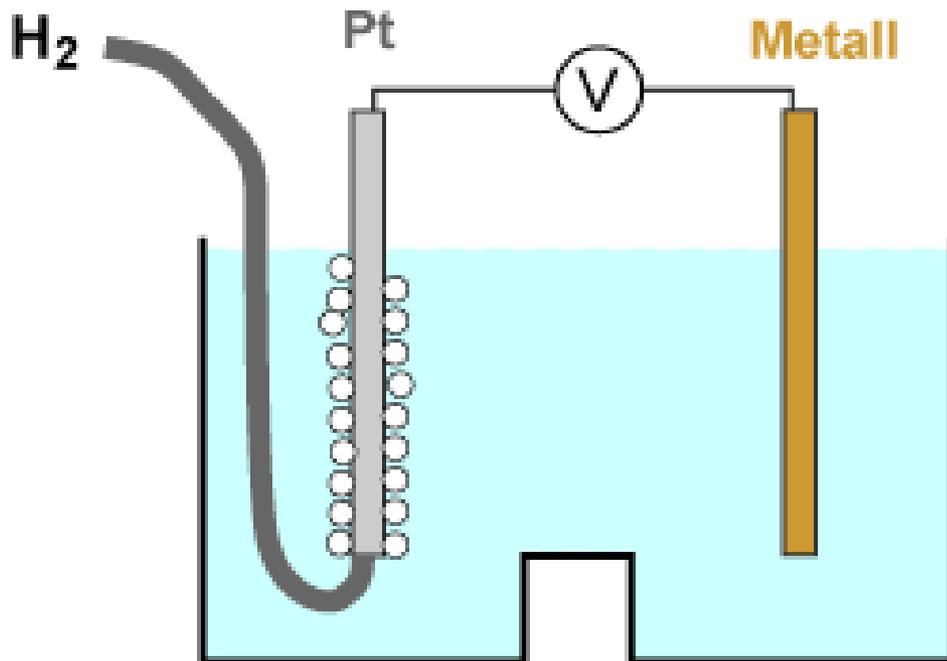
Es entsteht eine elektrische Doppelschicht mit einer materialtypischen Potentialdifferenz.

## Galvanisches Element

Luigi Galvani 1791, Alessandro Volta 1792



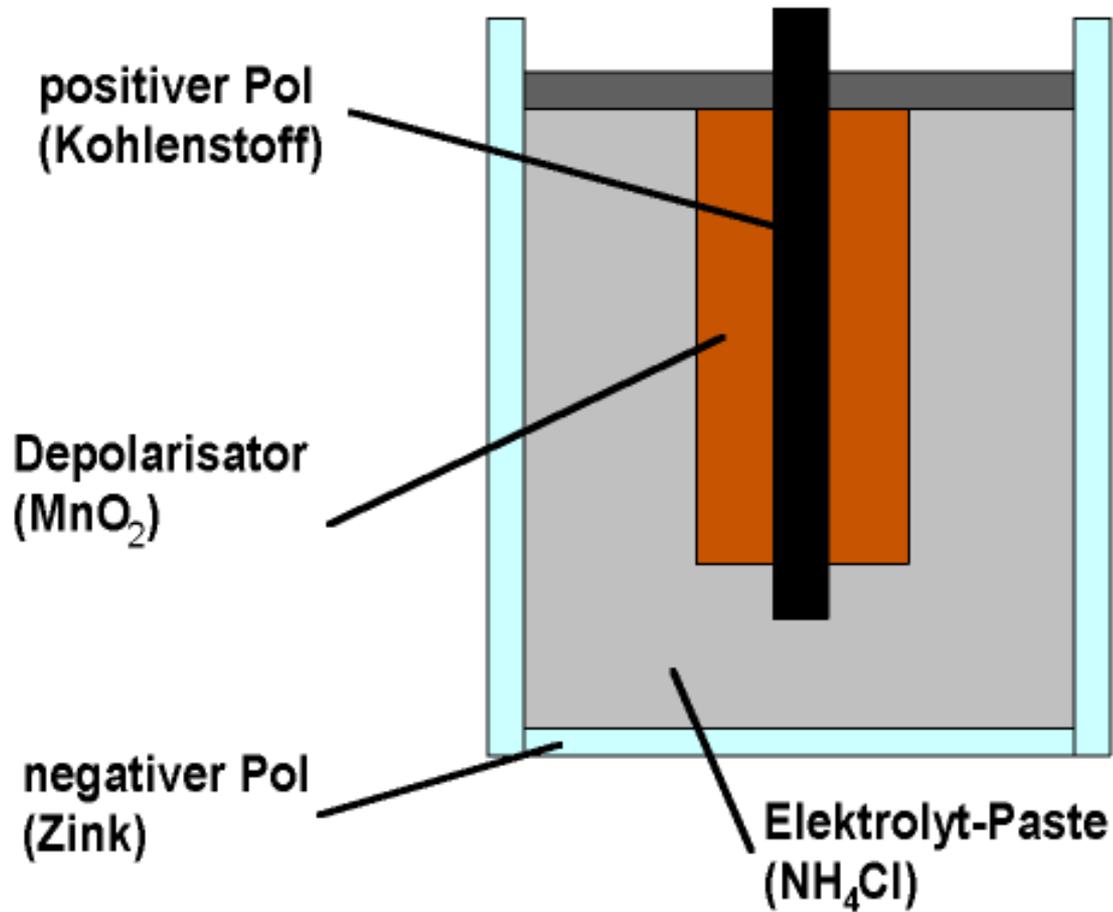
## ■ Messung der elektrochemischen Spannungsreihe



Bezugselektrode ist die Standardwasserstoffelektrode (poröses Platin mit Wasserstoff umspült).

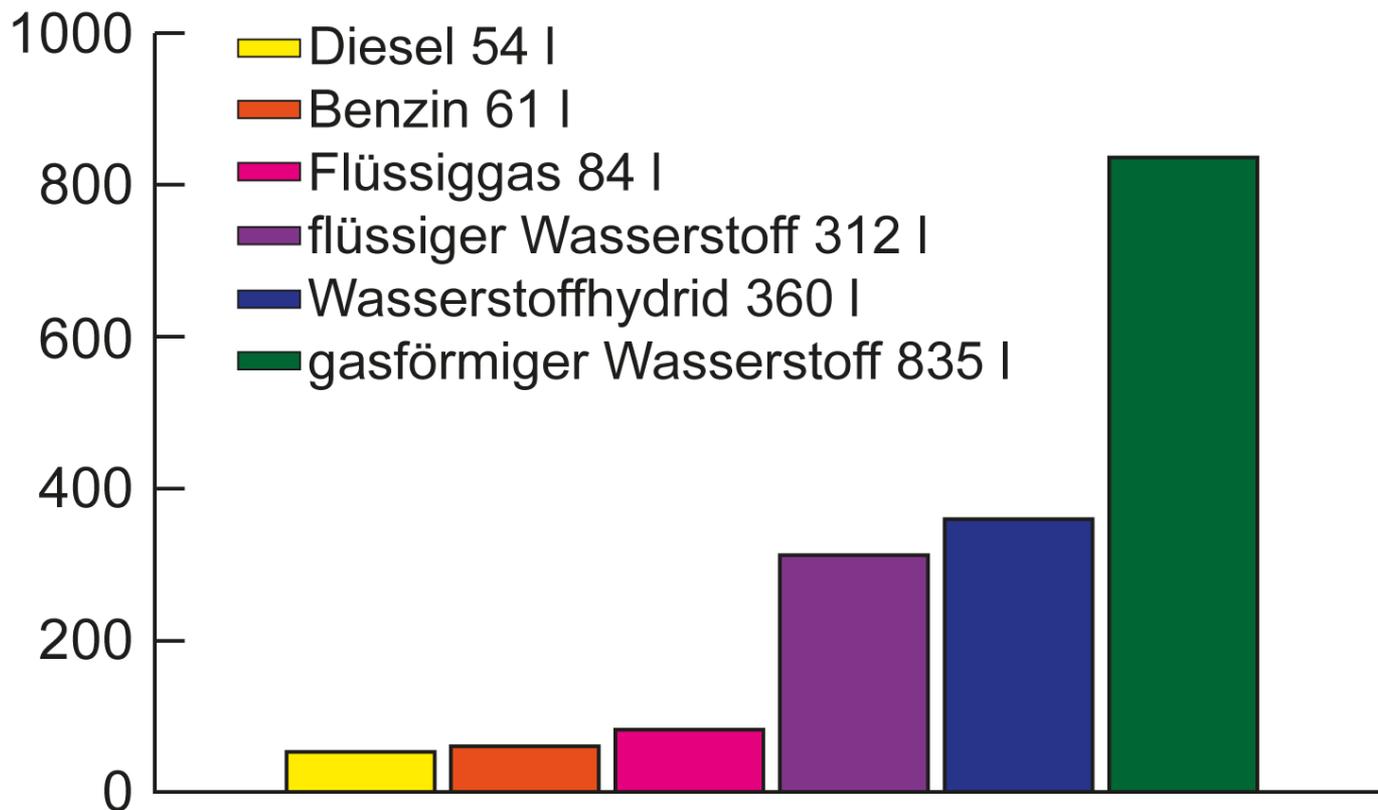
Metall	Pot. (in V)
Li/Li <sup>+</sup>	-3,02
Na/N <sup>+</sup>	-2,71
Al/Al <sup>3+</sup>	-1,66
Zn/Zn <sup>+</sup>	-0,76
Fe/Fe <sup>2+</sup>	-0,44
H/H <sup>+</sup>	0
Cu/Cu <sup>2+</sup>	+0,34
Pt/Pt <sup>2+</sup>	+1,2
Au/Au <sup>3+</sup>	+1,42

- Leclanché-Element / Zink-Kohle-Batterie

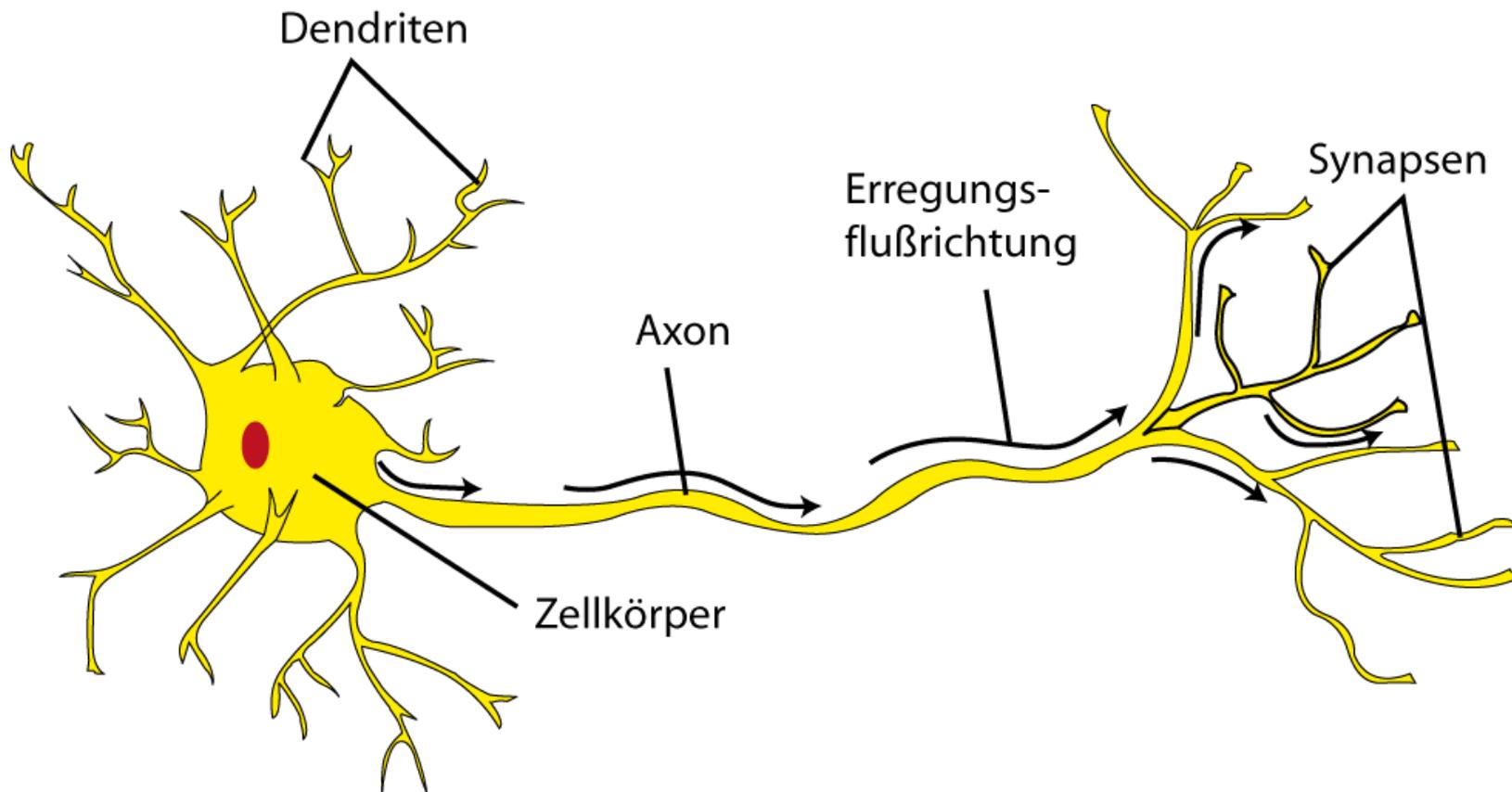




Volumen in Liter für Tank + Energieträger  
bei einem Energieäquivalent von 50 l Benzin

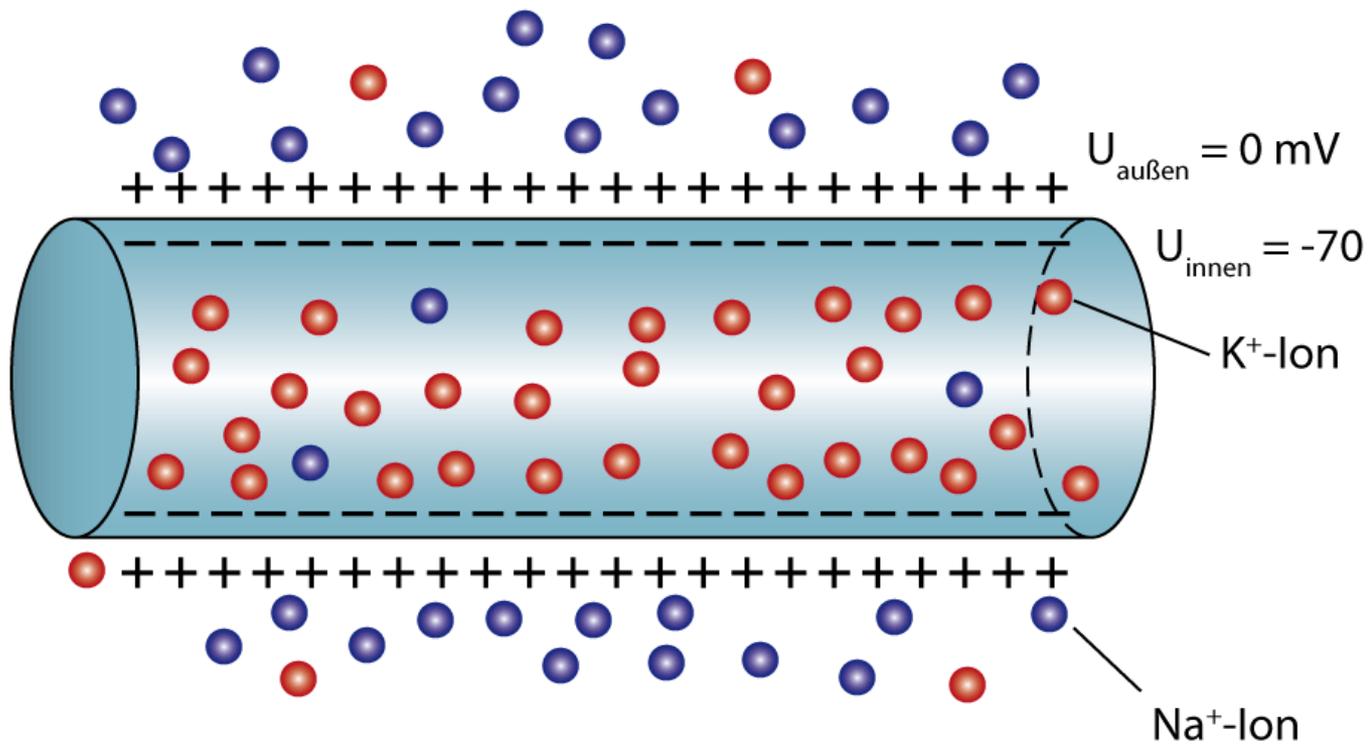


## ■ Elektrizität bei Nervenzellen



Aufbau einer Nervenzelle

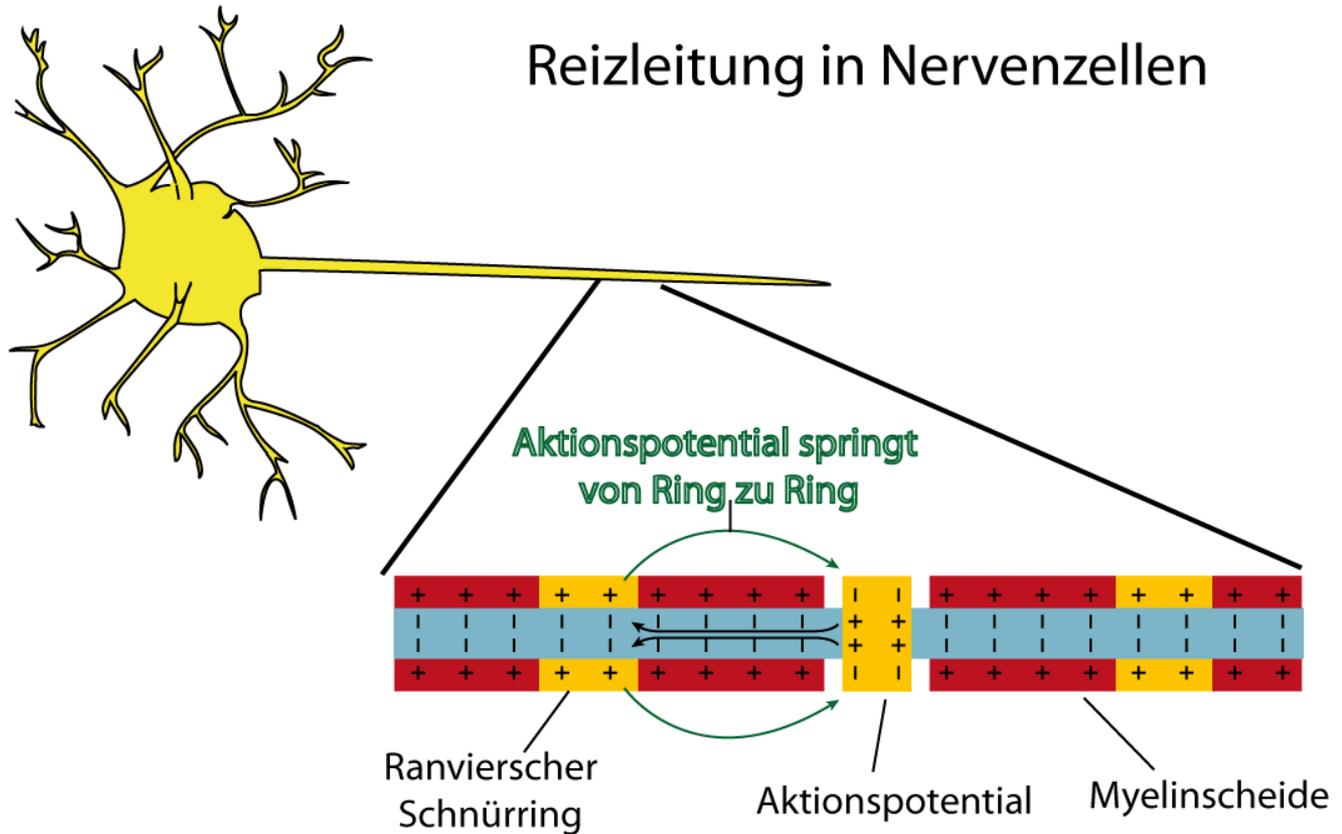
▪ **Elektrizität bei Nervenzellen**



Verteilung der  $\text{Na}^+$ - und  $\text{K}^+$ -Ionen entlang einer Nervenzellmembran im Ruhezustand

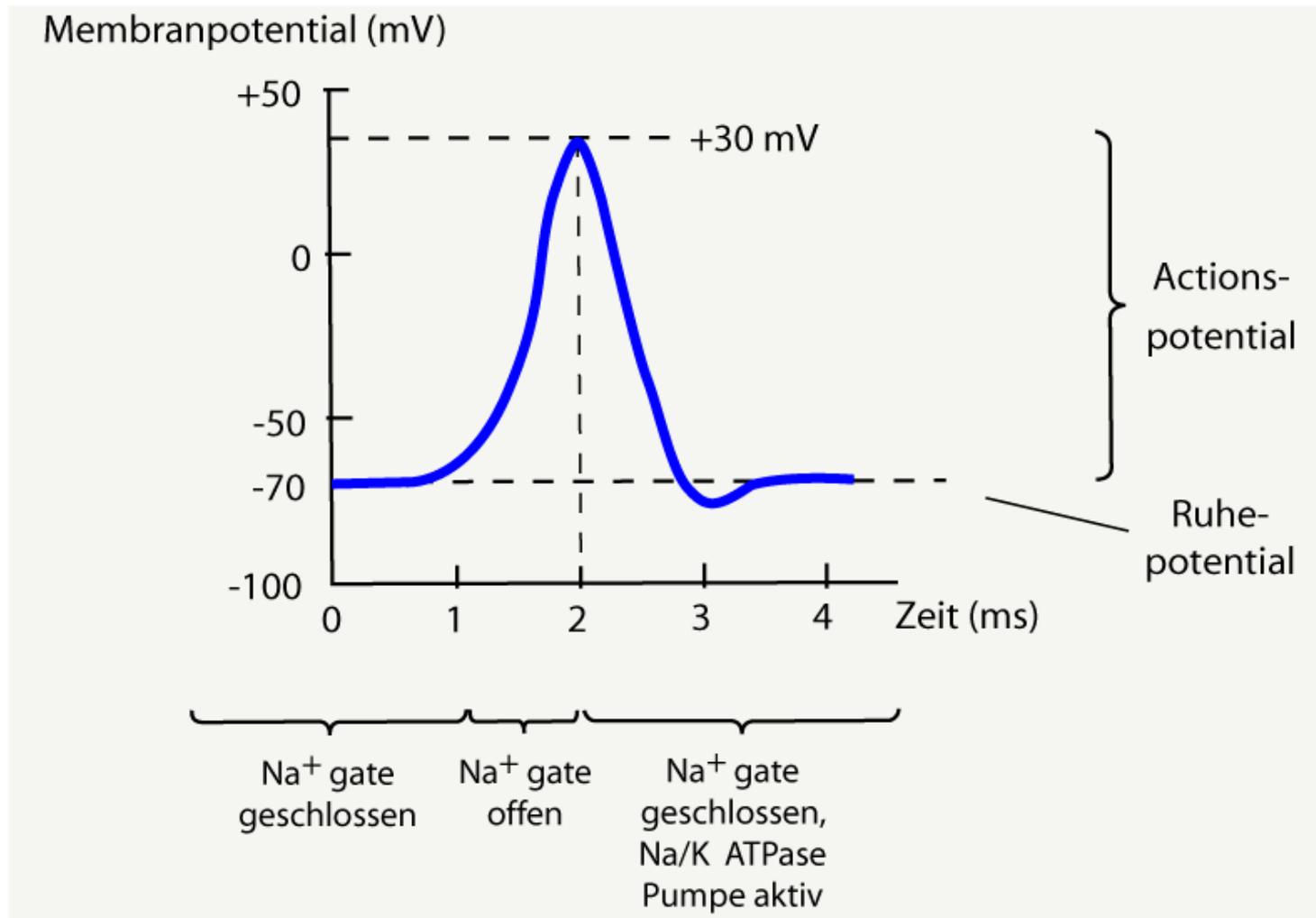


Elektrizität bei Nervenzellen



Ein Aktionspotential in einem myelinisierten Axon springt von Schnürring zu Schnürring. Dadurch wird die Reizleitung enorm beschleunigt. Dies ist ein großer Unterschied zur Reizleitung in einem normalen Axon.

## Elektrizität bei Nervenzellen

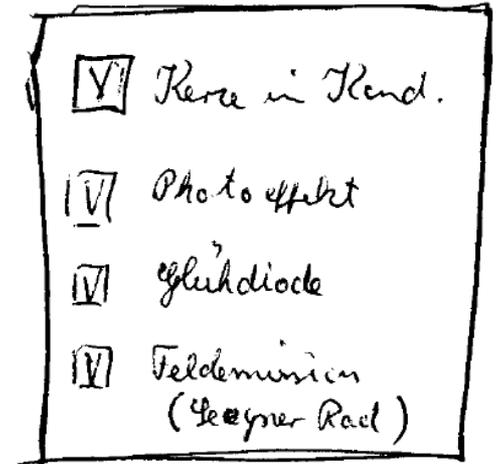




# Strom im Vakuum und in Gasen



- Gase sind im allgemeinen schlechte Leiter, da Atome / Moleküle neutral
- Für die Ionisation sind 4 – 25 eV nötig (thermisch bei 300 K: 0,25 eV)





## A) Unselbständige Entladung

**Ladungsträger werden durch externe Prozesse erzeugt**

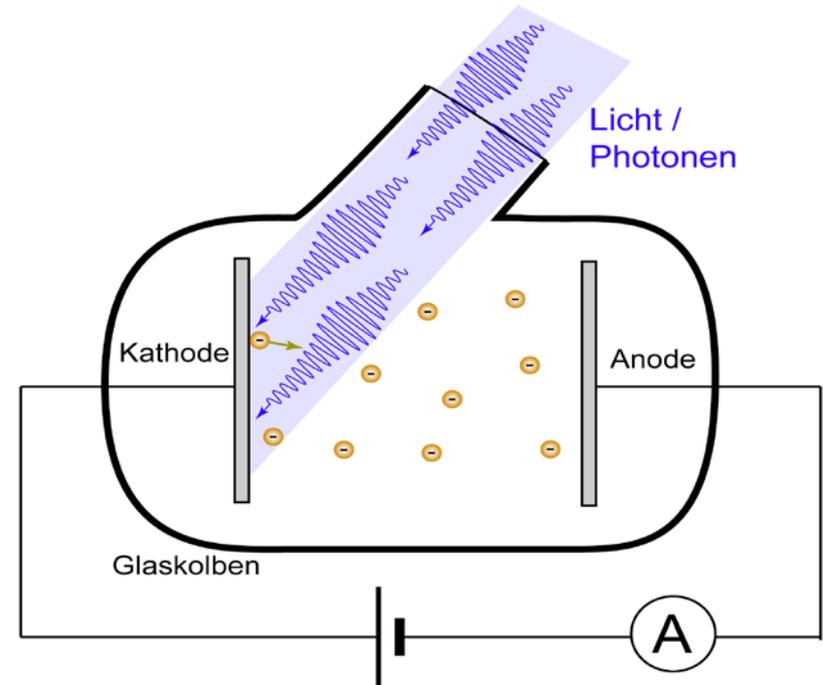
- **Volumenionisation - erfolgt in einem Raumbereich**
  - Röntgenstrahlung, radioakt. Strahlung
  - Flamme / TemperaturionisationBeispiele: Zählrohr, Ionisationskammer
  
- **Oberflächenionisation - erfolgt an Oberflächen**
  - Lichtelektrischer Effekt
  - Glühemission
  - FeldemissionBeispiel: Feldelektronenmikroskop



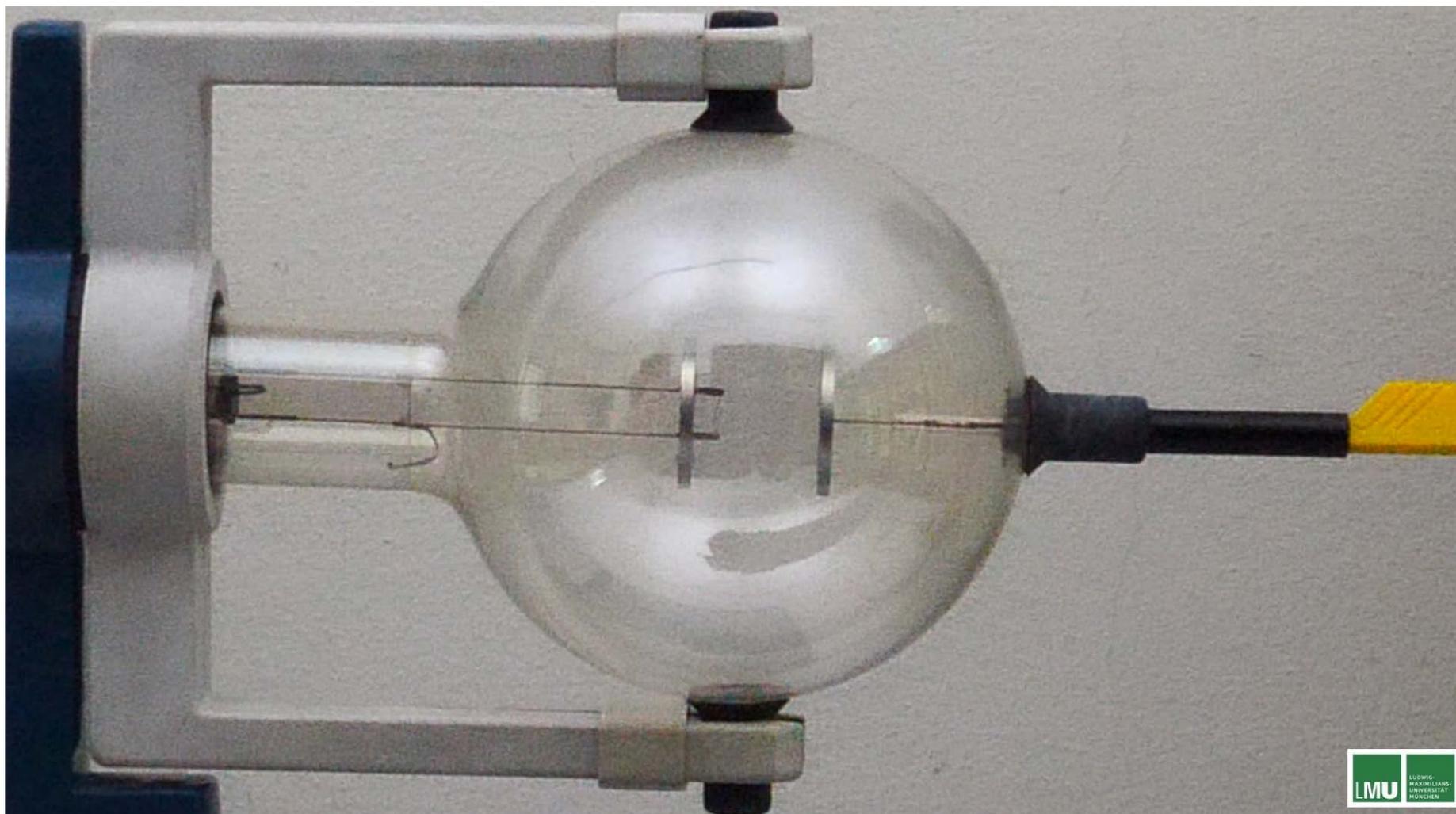
[https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2\\_E\\_Video/2-6L-Lichtel-Effekt.m4v](https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/2-6L-Lichtel-Effekt.m4v)

## A) Unselbständige Entladung

- a) Photoeffekt  
(lichtelektrischer Effekt)



$$h \cdot f = W_A + E_{kin}$$

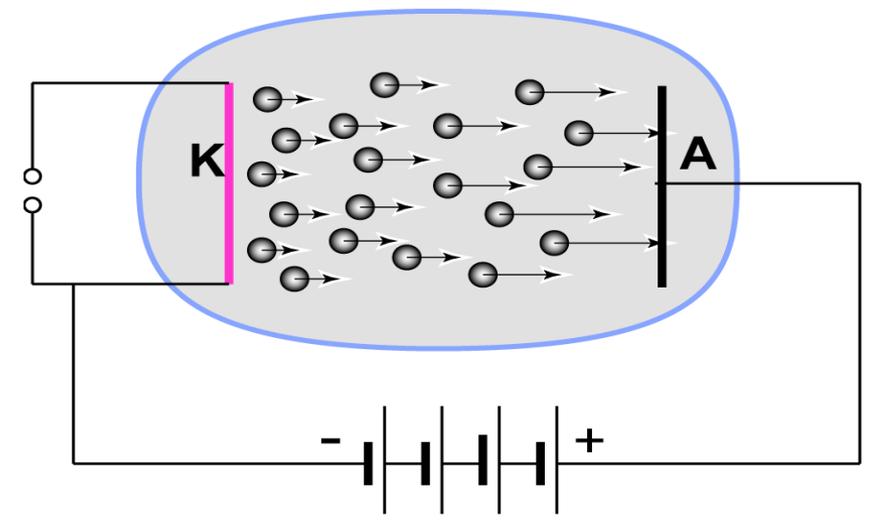


[https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2\\_E\\_Video/2-6B-Diode-Gluehel-Effekt.m4v](https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/2-6B-Diode-Gluehel-Effekt.m4v)

# A) Unselbständige Entladung

- b) Glühemission  
 („Abdampfen von Elektronen aus Glühdraht“)

$$j = C \cdot T^2 \cdot e^{-\frac{W_A}{kT}}$$

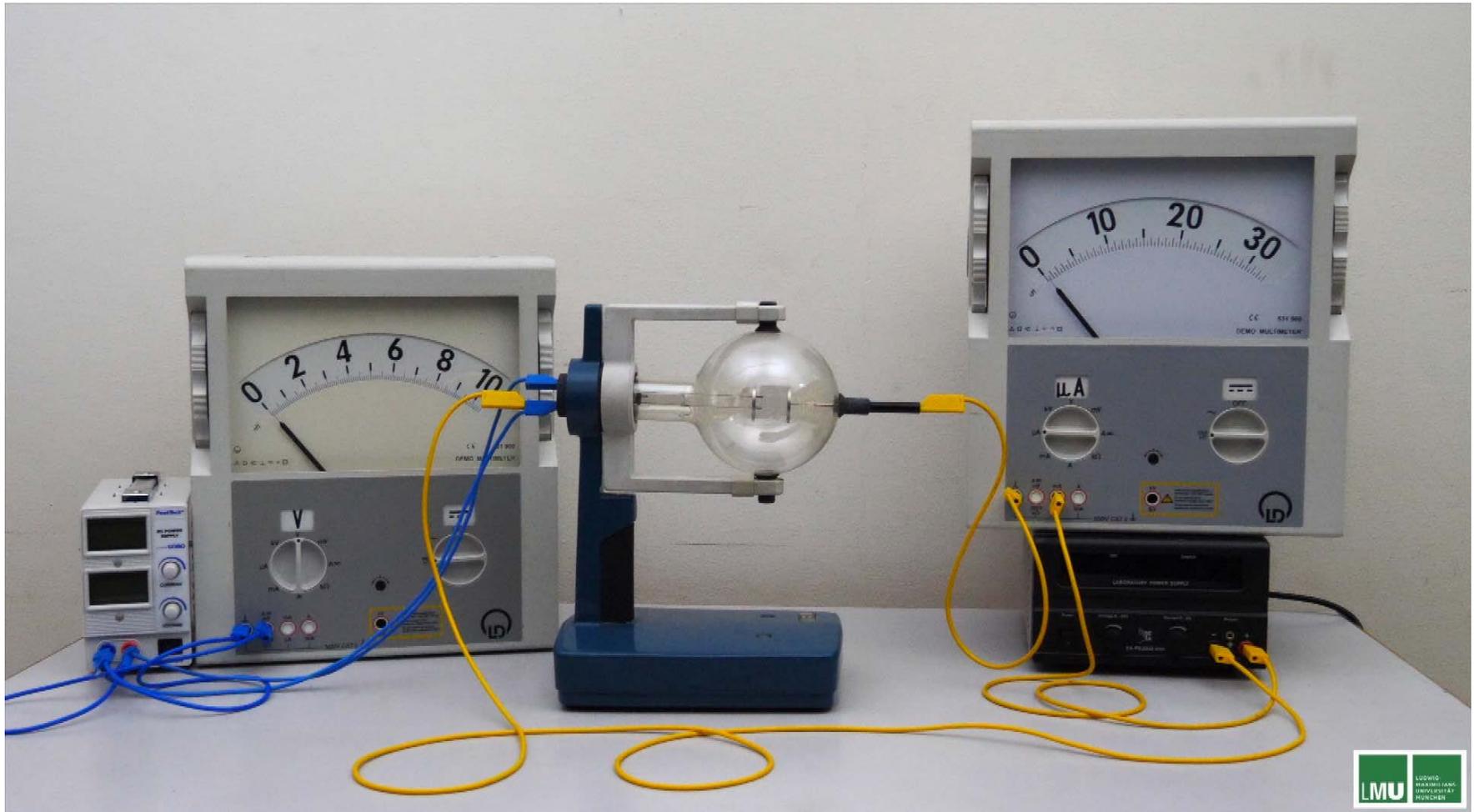


## Richardson-Gleichung für die Stromdichte

$k$ : Boltzmannkonstante

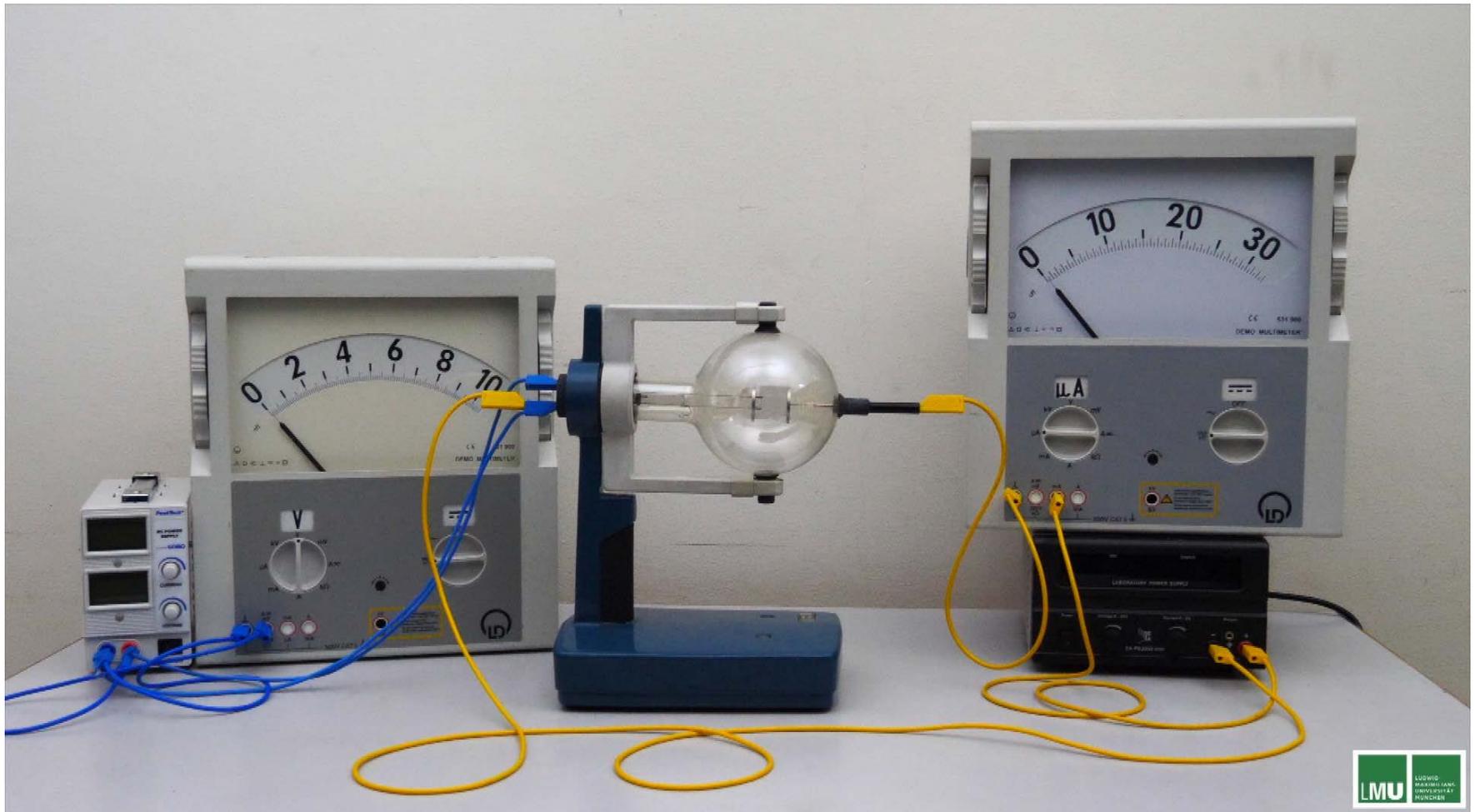
$W_A$ : Auslöseenergie, z. B. bei CS-Film auf Wolfram:  $W_A = 1,36 \text{ eV} = 2,2 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

## Durchlassrichtung



[https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2\\_E\\_Video/2-6D-Diode-Richtung.m4v](https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/2-6D-Diode-Richtung.m4v)

## Kennlinie



[https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2\\_E\\_Video/2-6F-Diode-Kennlinie.m4v](https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/2-6F-Diode-Kennlinie.m4v)



## A) Unselbständige Entladung

c) Feldemission (Durchschlagfeldstärke in Luft ca.  $10^6 \text{ V/cm}$ )

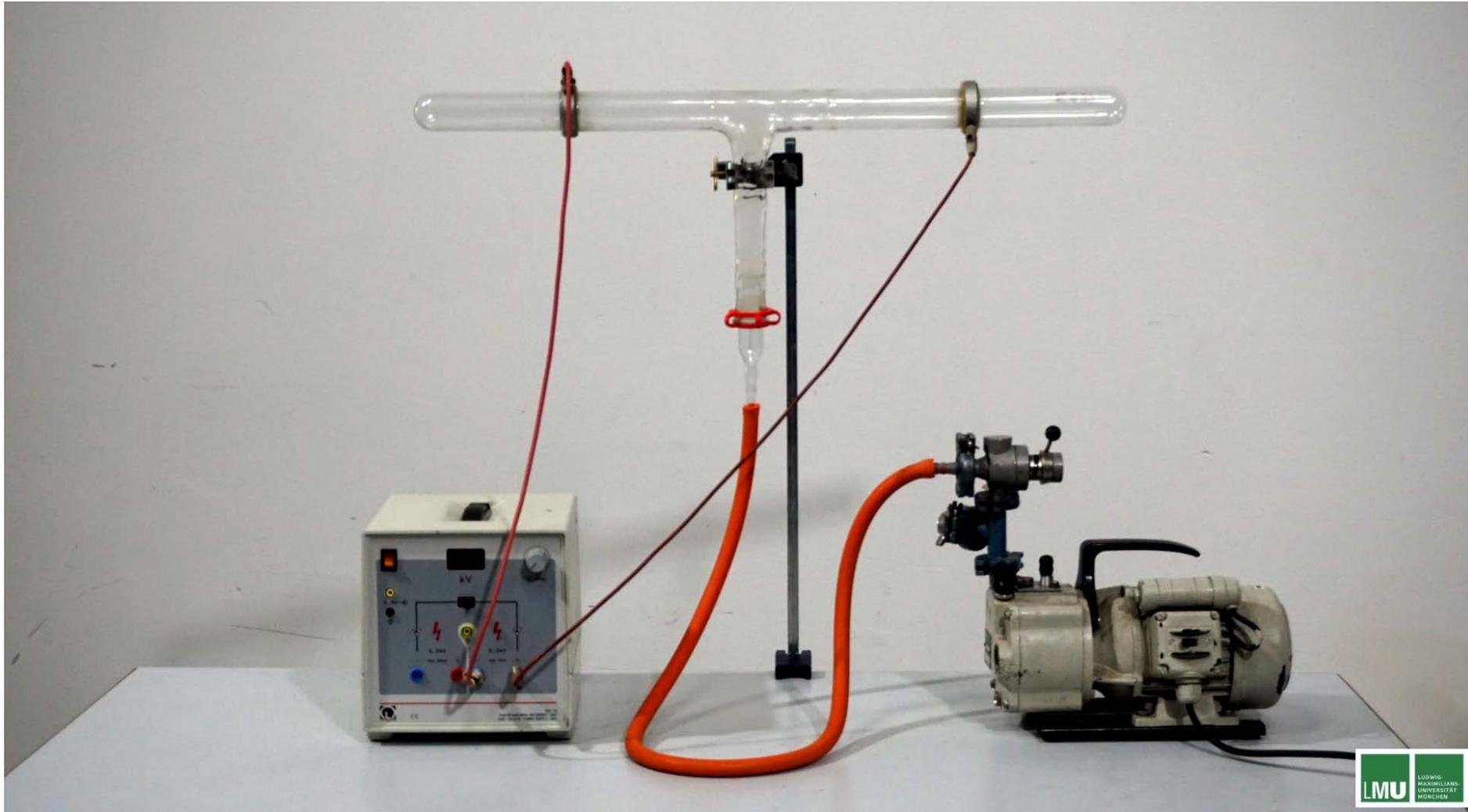
Beispiele:

Corona-Entladung an Hochspannungsleitungen > 110 kV (Knistern), Elmsfeuer, Blitzableiter

d) Erhitzung / "Temperaturionisation"

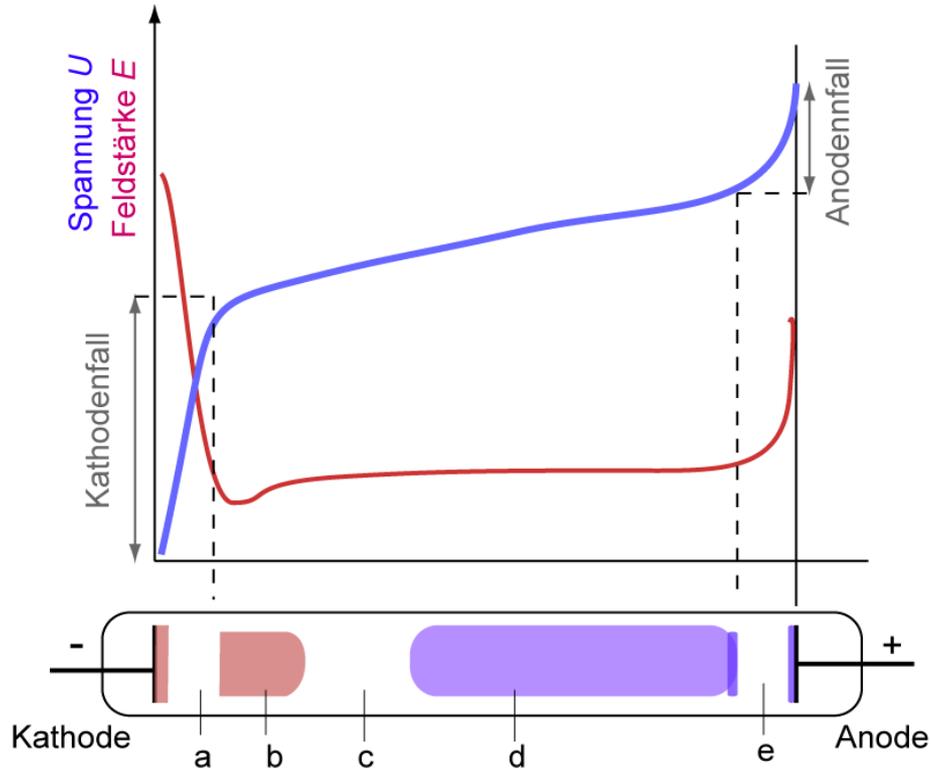
Beispiele:

Kerzenflamme



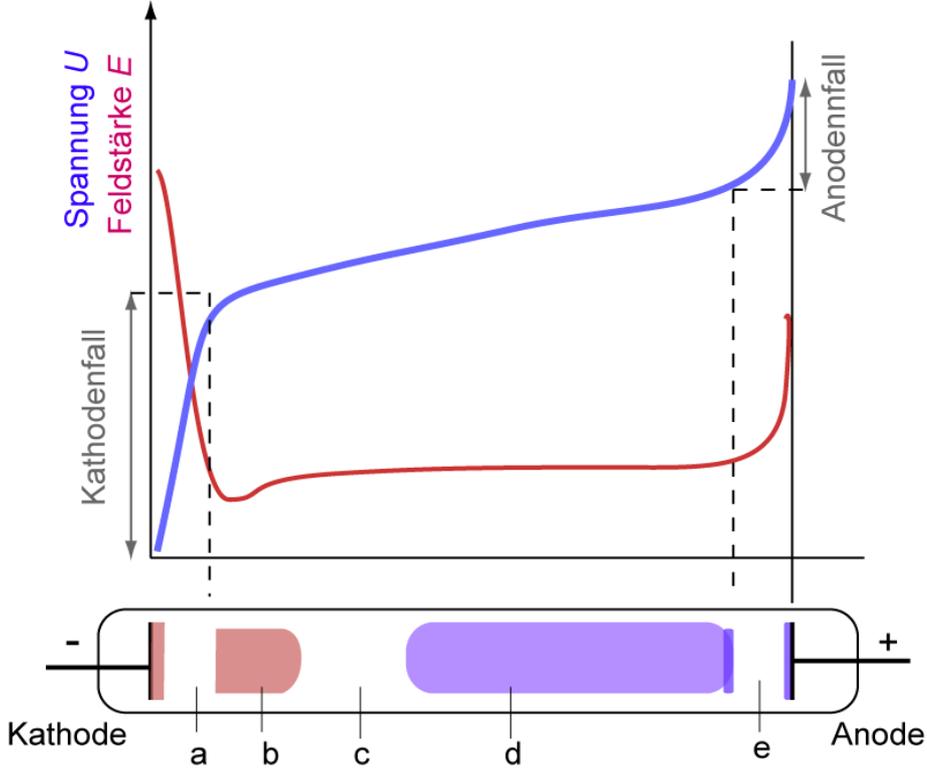
[https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2\\_E\\_Video/2-6H-Gasentladung.m4v](https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/2-6H-Gasentladung.m4v)

## ■ Spannung und Feldstärke bei einer Glimmentladung



- a: Hittorfscher Dunkelraum
- b: neg. Glimmlicht
- c: Faradayscher Dunkelraum
- d: positive Säule
- e: Anodendunkelraum

# Spannung und Feldstärke bei einer Glimmentladung



- a: Hittorfscher Dunkelraum
- b: neg. Glimmlicht
- c: Faradayscher Dunkelraum
- d: positive Säule
- e: Anodendunkelraum

Kathodenglimmlicht: Gasionen prallen auf Kathode und schlagen EI. heraus  
 – im Abstand einer freien Weglänge intensives neg. Glimmlicht

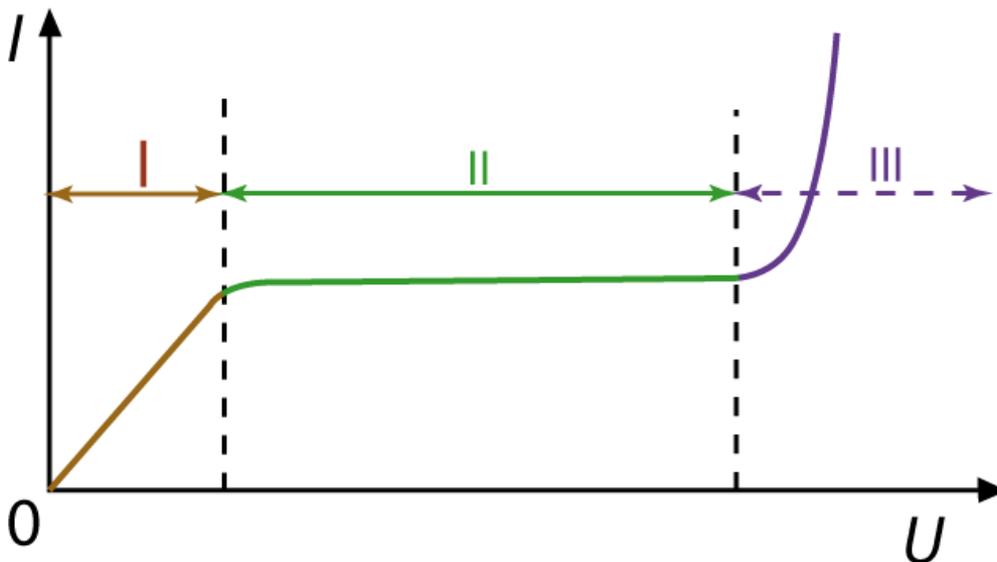
a, c) Dunkelraum (Elektronen zu langsam für Ionisation)

d) Stoßionisation (leuchtende Scheibchen zeigen freie Weglänge)



## ■ Gasentladung

Strom-Spannungskennlinie einer unselbständigen Gasentladung.



I: Rekombinationsbereich,

II: Sättigungsbereich,

III: Proportionalbereich,

IV: Übergang zur  
selbständigen Gasentladung

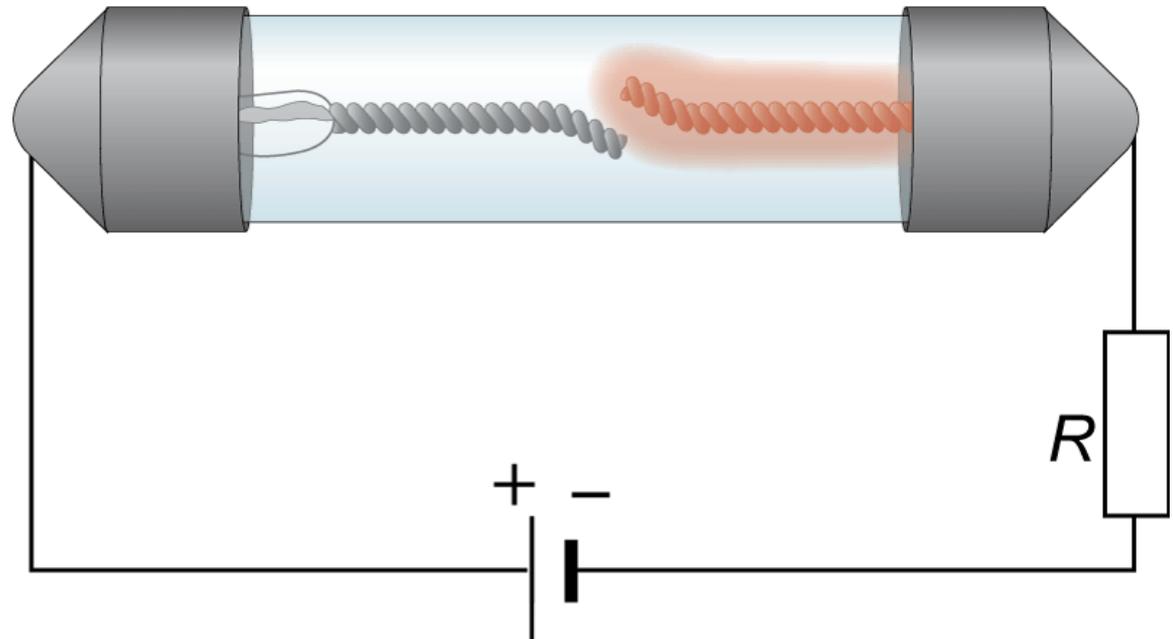


[https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2\\_E\\_Video/2-6J-Glimmlampe.m4v](https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/2-6J-Glimmlampe.m4v)

## B) Selbständige Entladung

Ladungsträger sorgen selbst durch Stoßionisation für Ersatz

Beispiel: Glimmentladung, Phasenprüfer





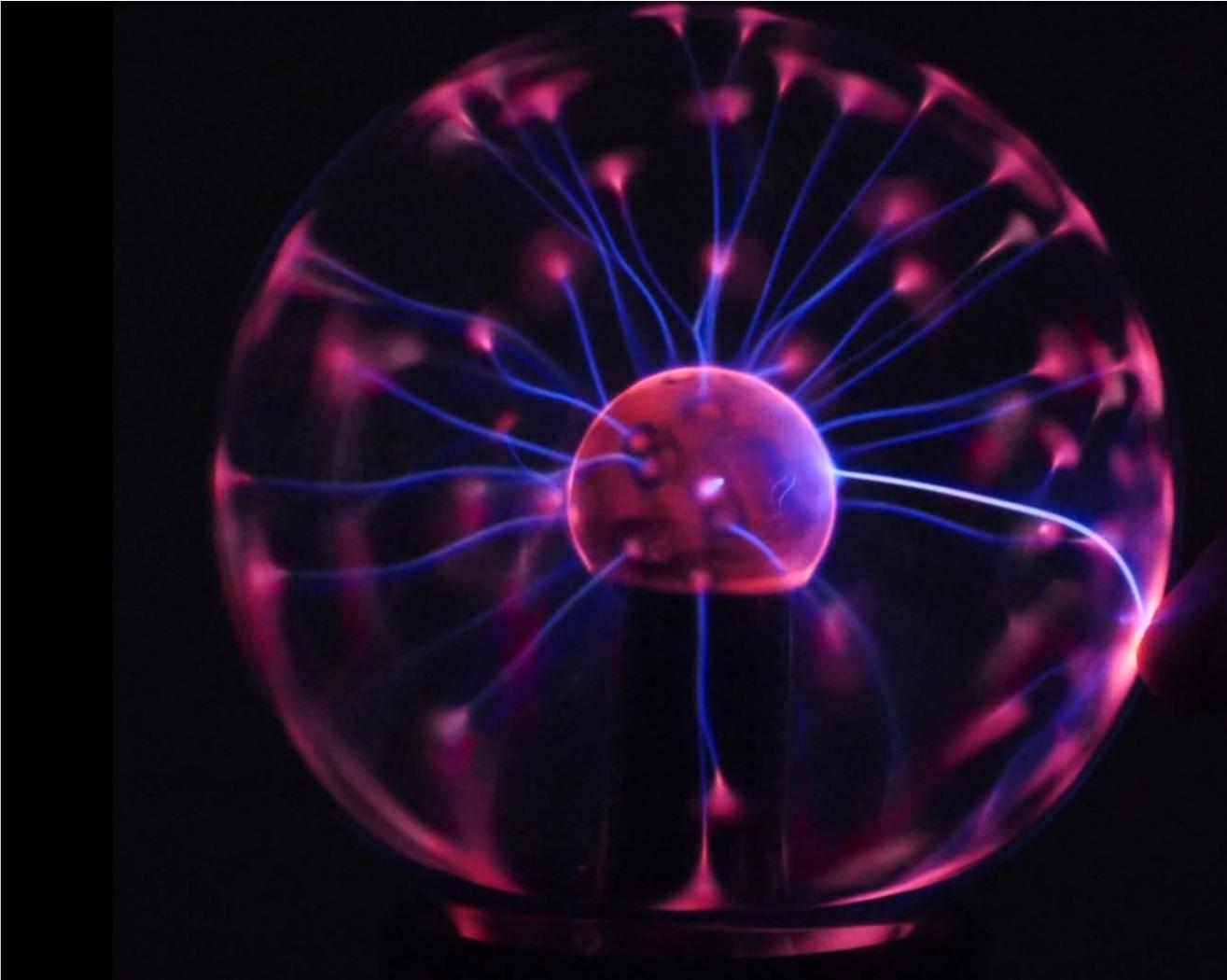
- **Gasentladung – Erzeugung und Rekombination**

Änderung der Anzahldichte = Erzeugungsrate - Rekombinationsrate

$$\dot{n} = \alpha - \beta \cdot n^2$$

„Plasmakugel“





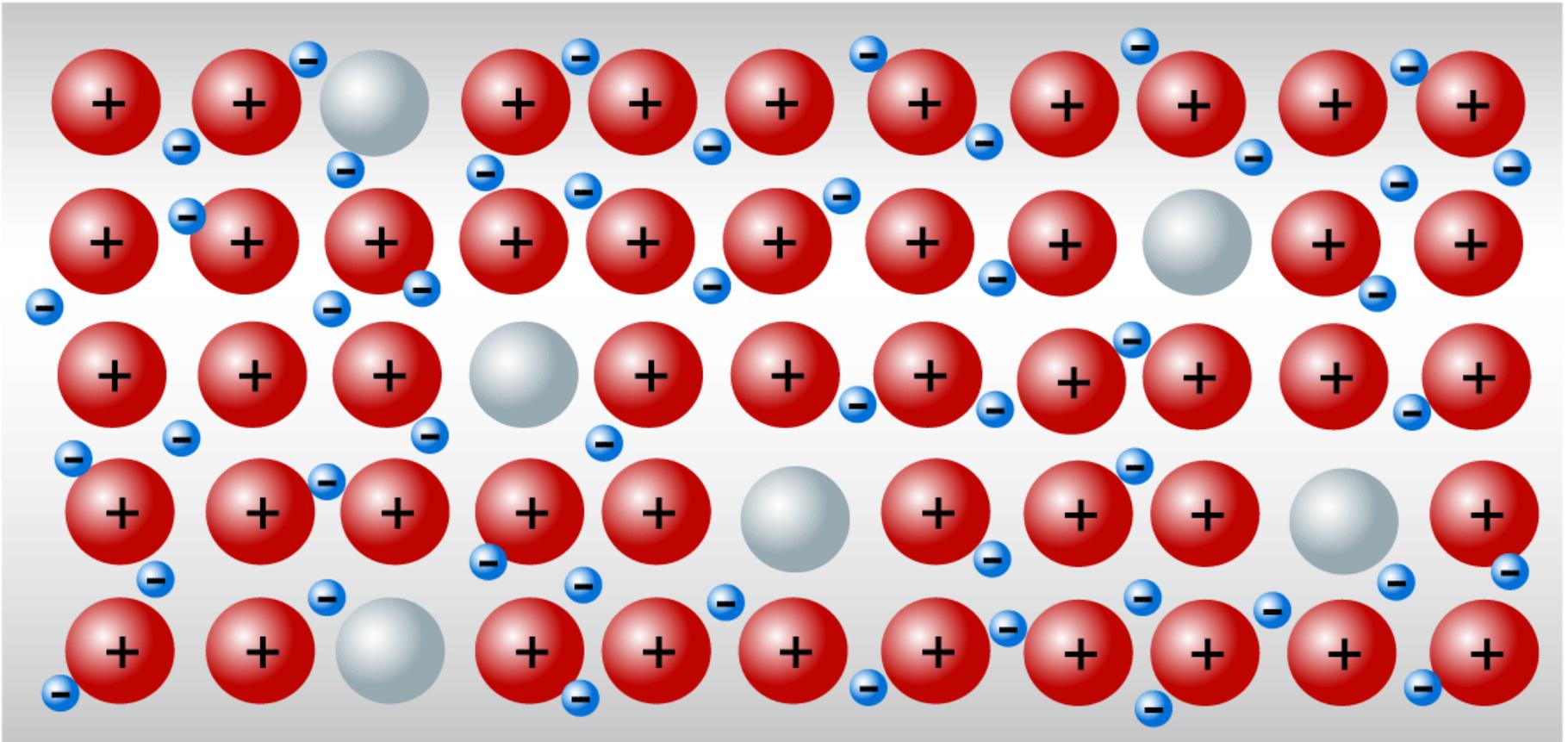
[https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2\\_E\\_Video/2-6P-Plasmakugel.m4v](https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/2-6P-Plasmakugel.m4v)



# Strom in Festkörpern



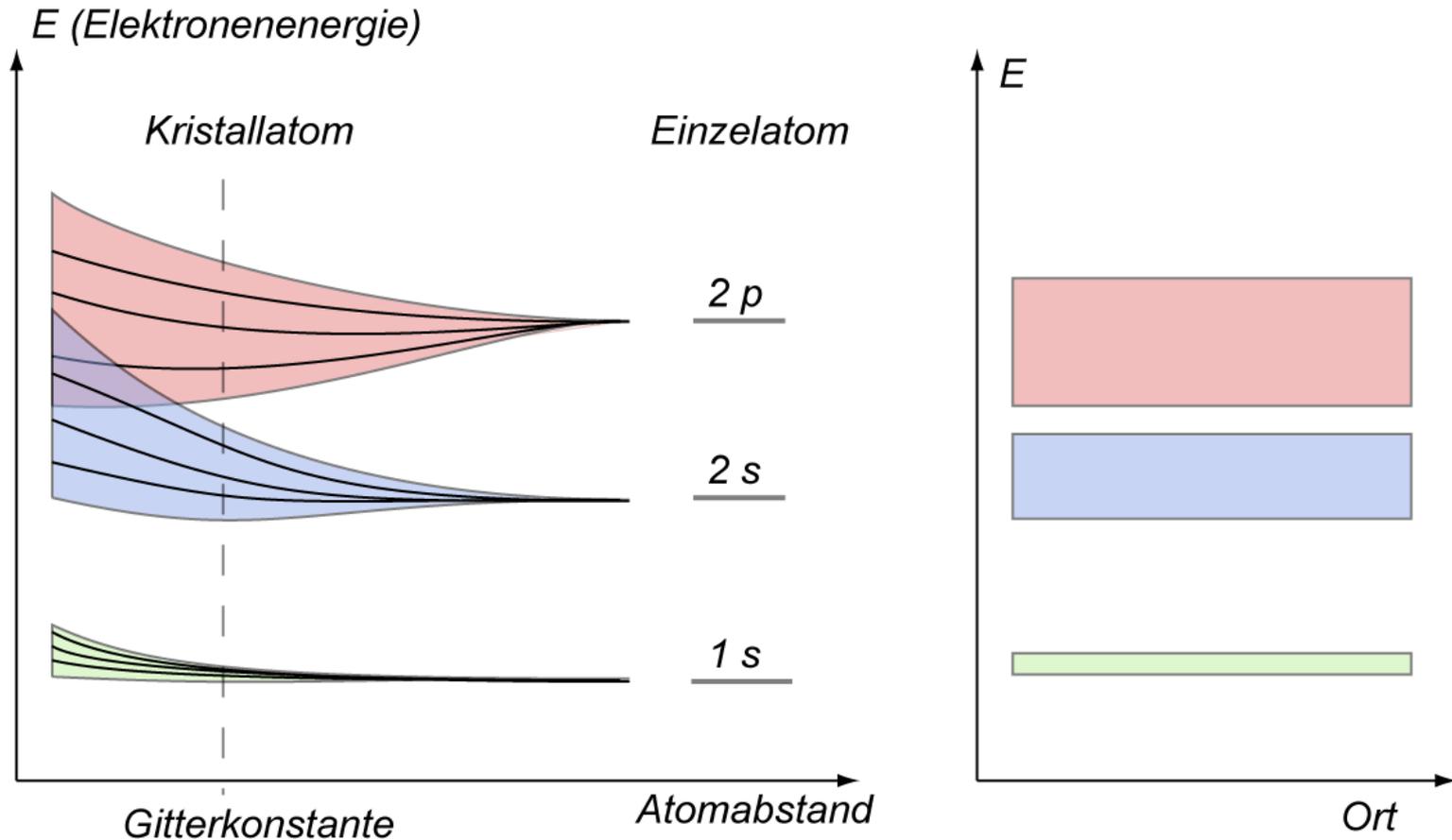
[https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2\\_E\\_Video/2-7B-Drude-Modell.m4v](https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/2-7B-Drude-Modell.m4v)



## ■ Bildanalogie

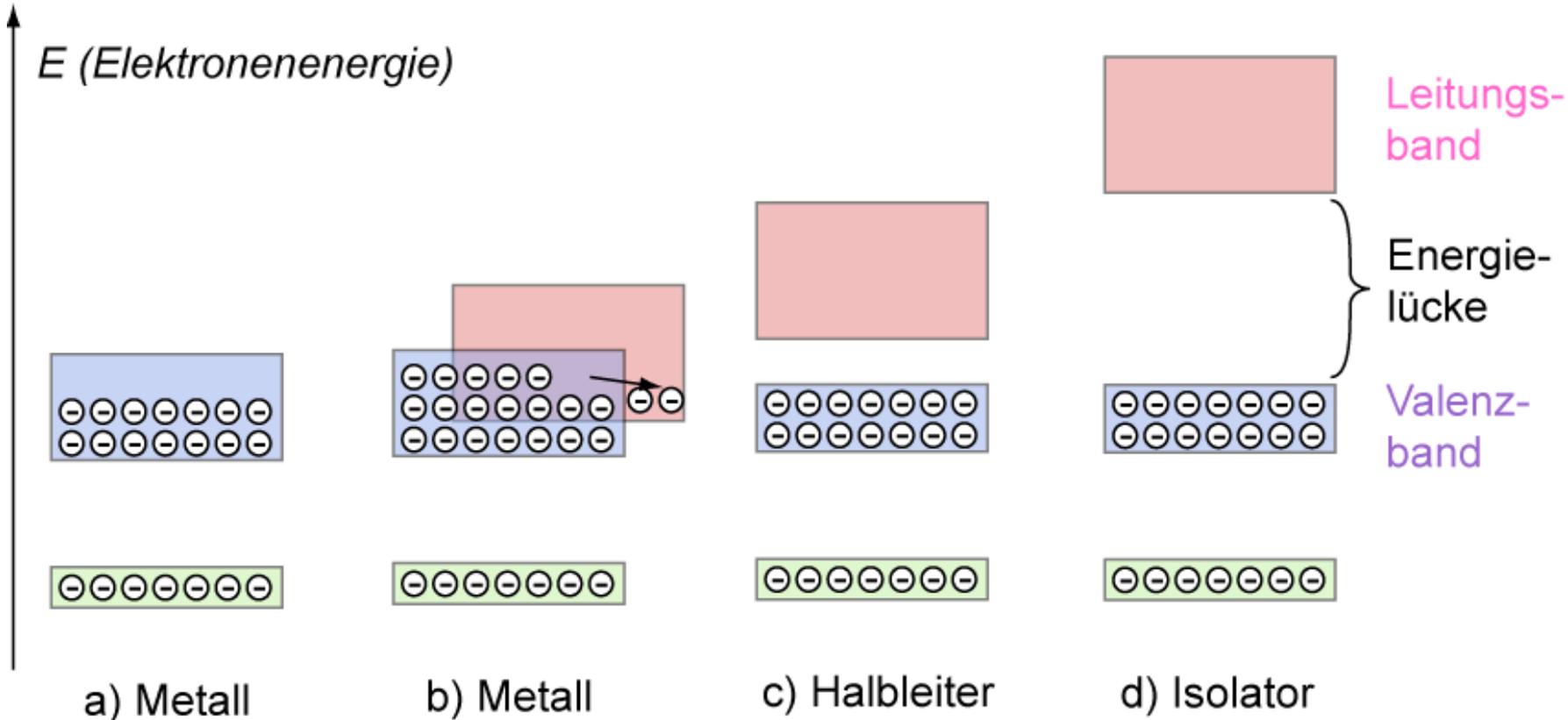


■ **Bändermodell**



Die aufgespalteten, diskreten Energieniveaus isolierter Atome ergeben beim Zusammenführen der Atome im Festkörper quasikontinuierliche Energiebänder.

■ **Bändermodell**



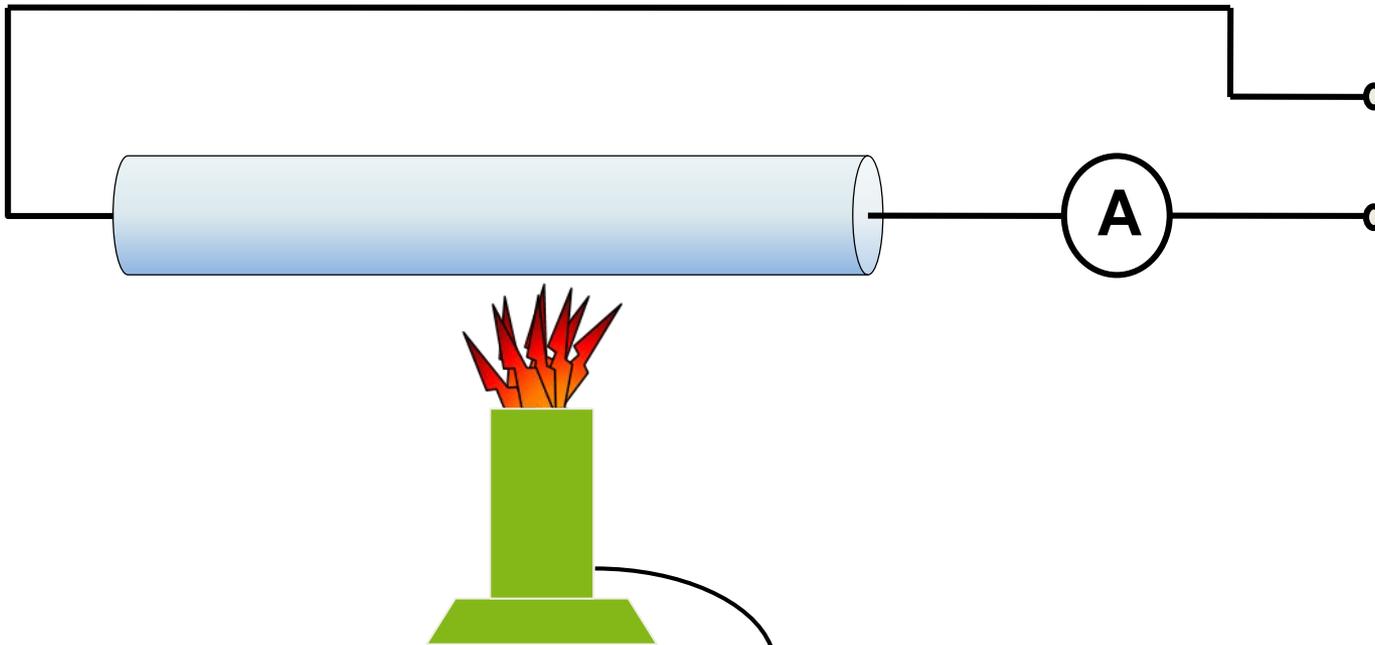
Nur in unvollständig besetzten Bändern – Leitungsbandern – können die Ladungsträger leicht Energie aufnehmen und zum Stromfluss beitragen.



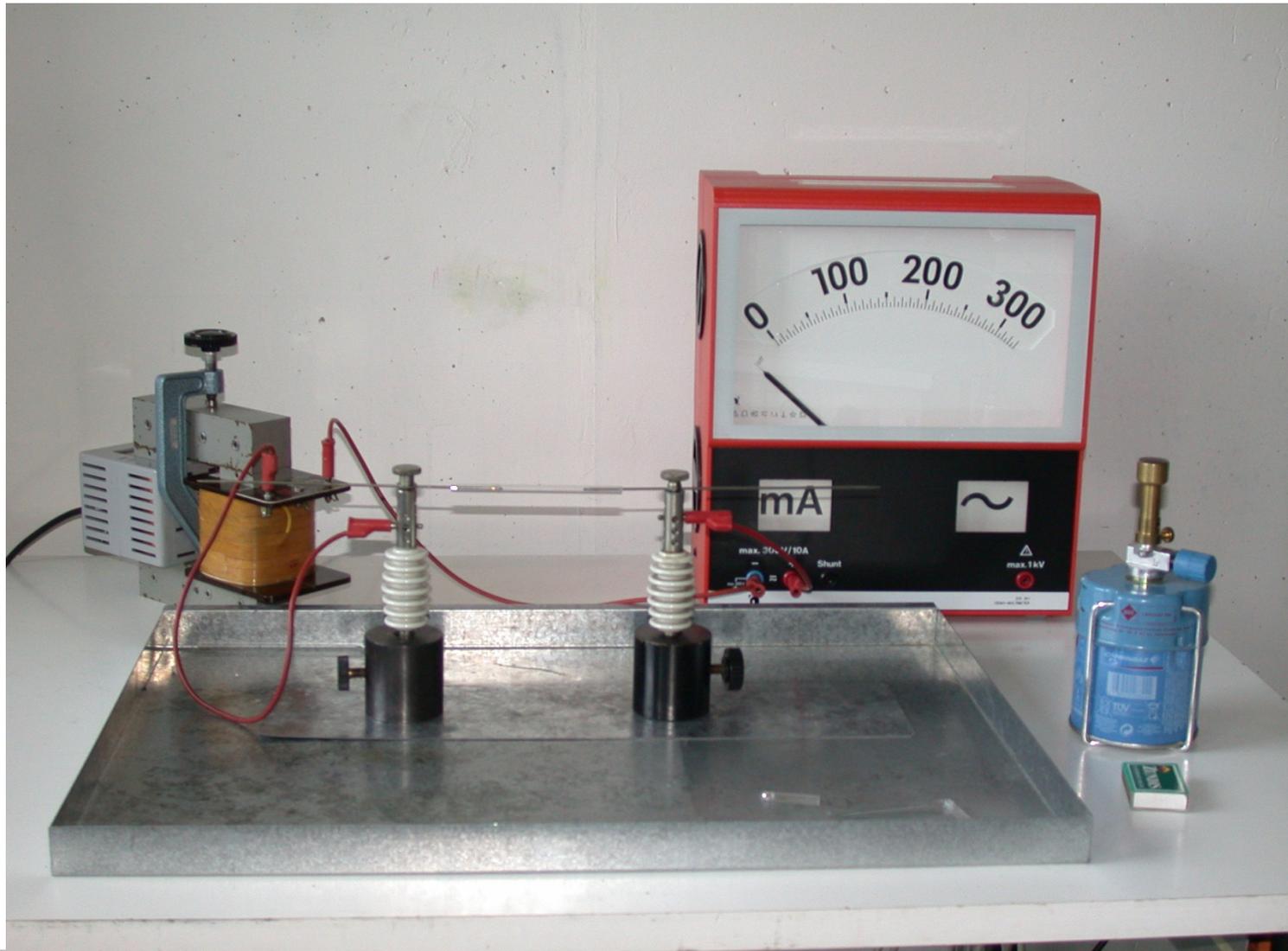
[https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2\\_E\\_Video/2-7D-Glas.m4v](https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/2-7D-Glas.m4v)

## A) Isolator / Ionenleiter

Alle Valenzelektronen sind fest in chemischen Bindungen.  
Sehr hohe Temperaturen sind nötig, um einige Elektronen und / oder Ionen beweglich zu machen (vor allem an Gitterdefekten).



## A) Isolator / Ionenleiter

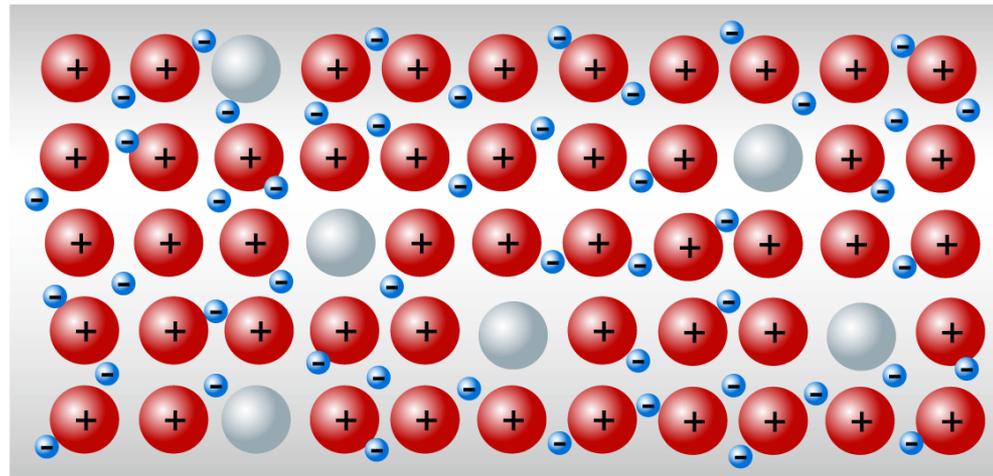


## B) Metalle

Ca. 1 bewegliches Elektron pro Atom.

Die Anzahl ist praktisch unabhängig von der Temperatur (bei Zimmertemp.)

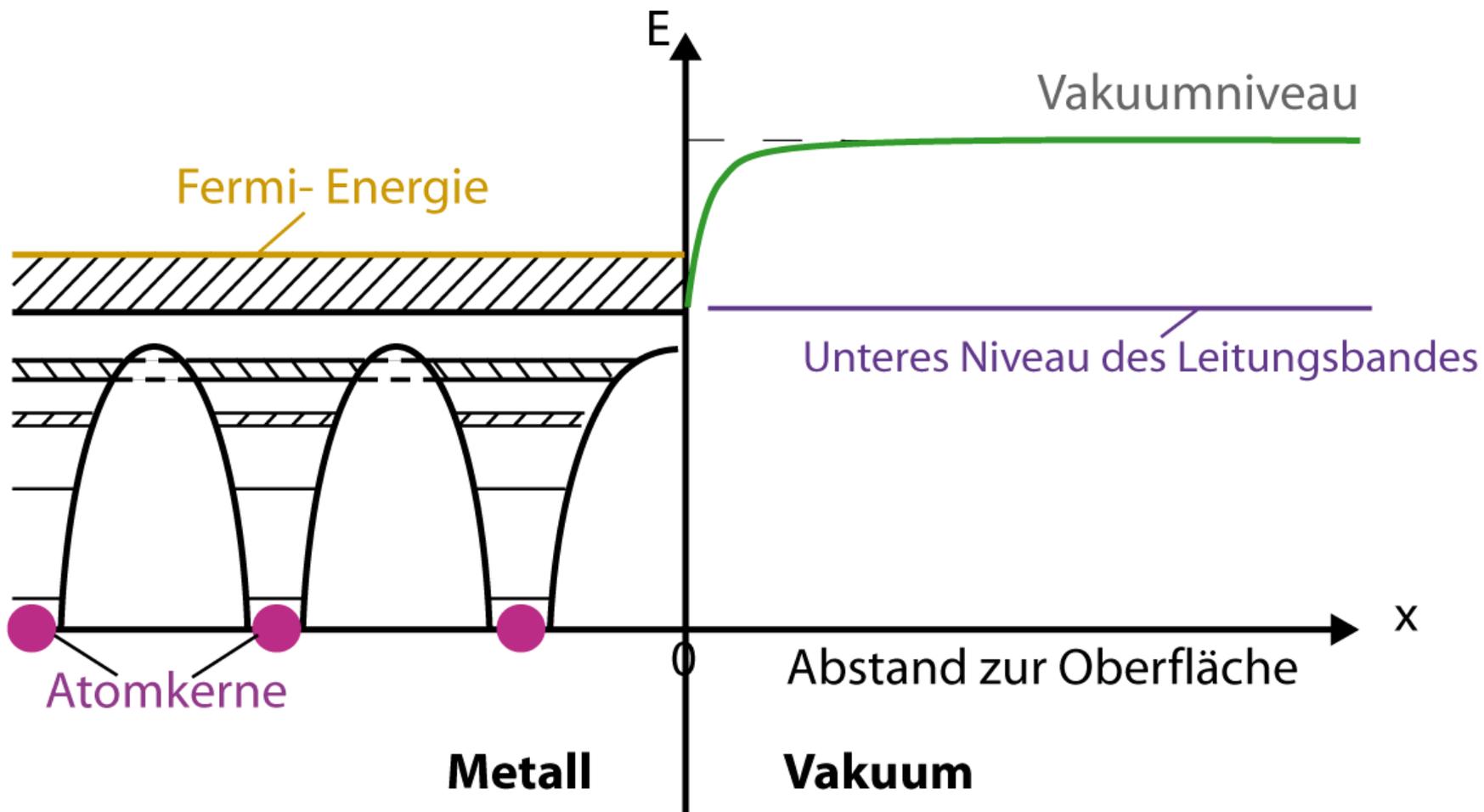
Aber: Die Elektronenbeweglichkeit nimmt mit steigender Temperatur ab.  
(„Reibungswiderstand“ der Elektronen im Gitter nimmt zu)



Elektronen sind im Leitungsband quasi leicht beweglich

→ Modell des freien Elektronengases

## B) Metalle

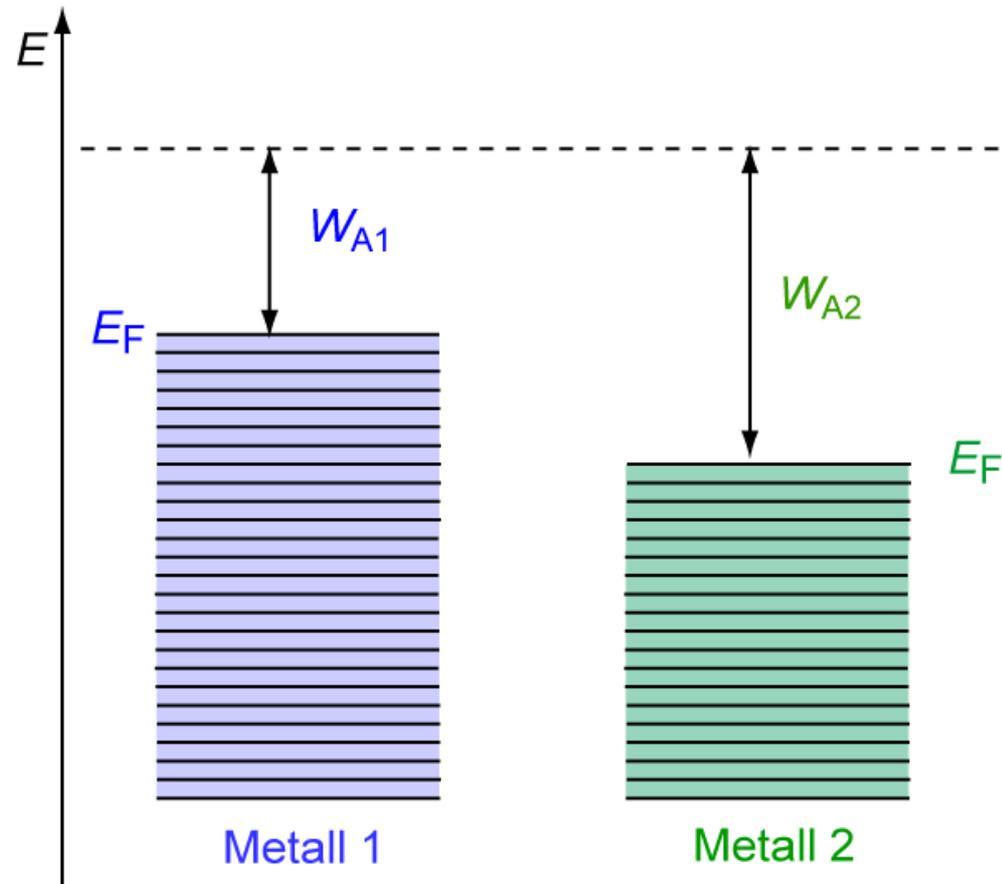




## B) Metalle

Elektronen sind im Leitungsband leicht beweglich  
=> Modell des freien Elektronengases

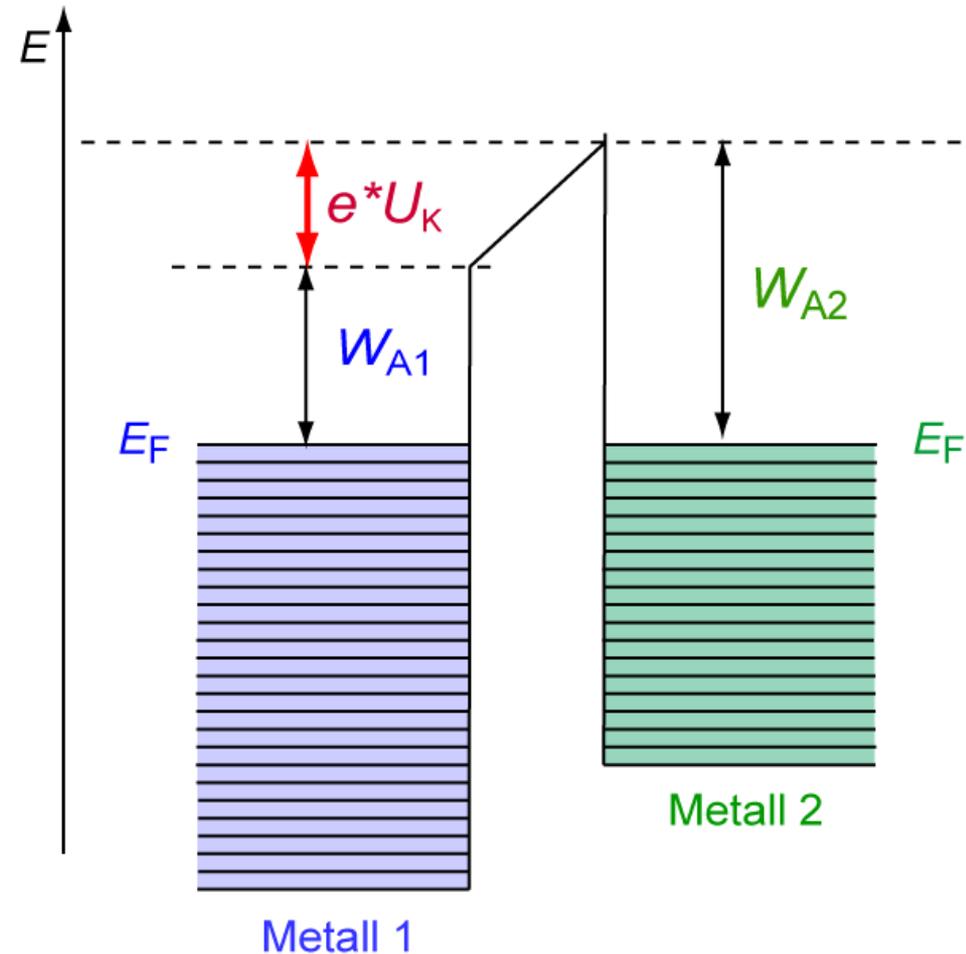
Die Elektronen liegen bei unterschiedlichen Metallen auf verschiedenen Energieniveaus (die Fermi-Grenzen unterscheiden sich).



## B) Metalle

Die Elektronen liegen bei unterschiedlichen Metallen auf verschiedenen Energieniveaus (die Fermi-Grenzen unterscheiden sich).

Bei Kontakt diffundieren Elektronen bis eine sog. Kontaktspannung aufgebaut ist, die der Diffusion entgegenwirkt.





## ■ Seebeck-Effekt, Peltier-Effekt

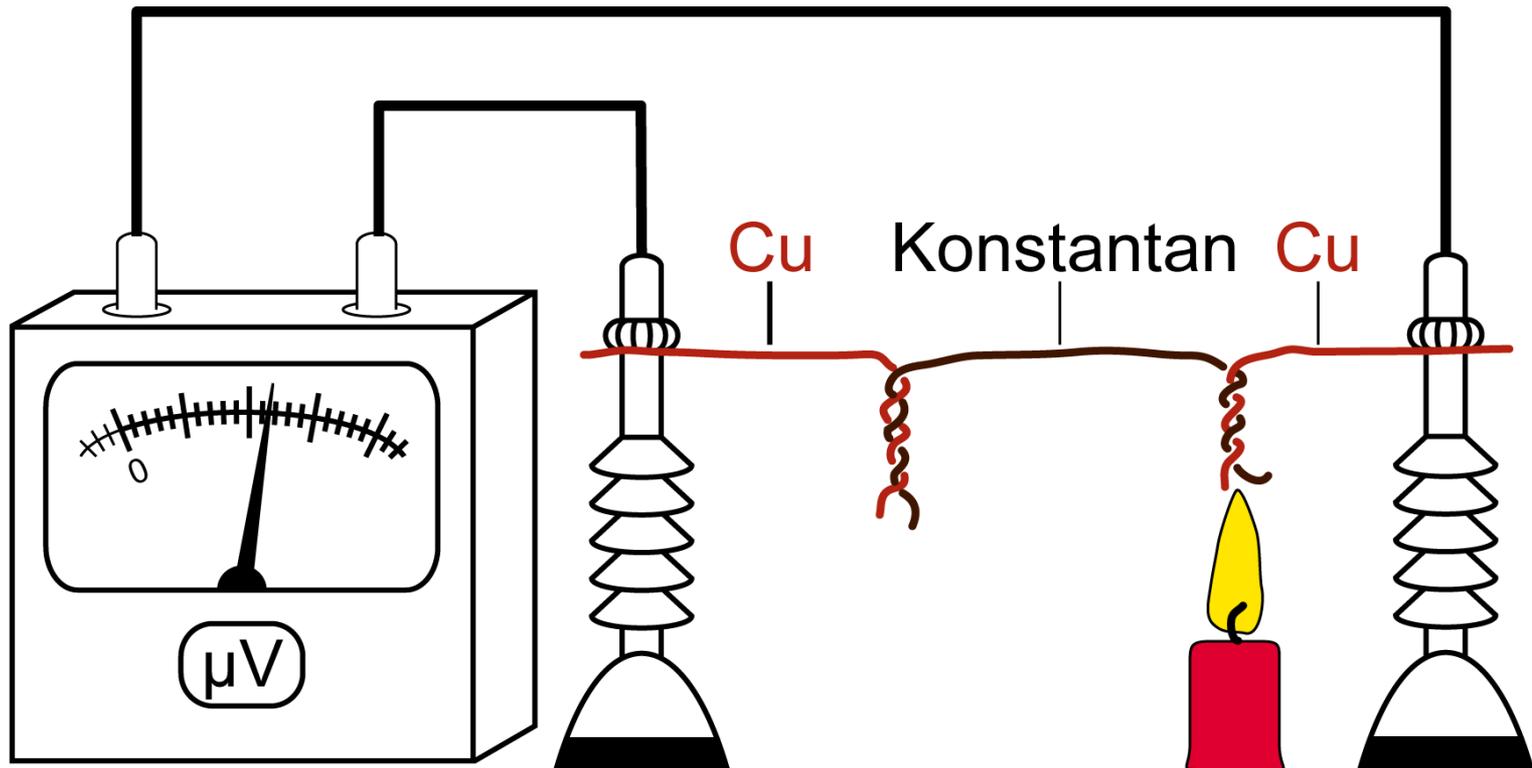
Haben zwei verbundene Kontakte unterschiedliche Temperaturen, führt dies zu einer Thermospannung (Seebeck-Effekt)



**Fließt ein Strom, so kühlt eine Lötstelle ab, die andere erwärmt sich (Peltier-Effekt).**

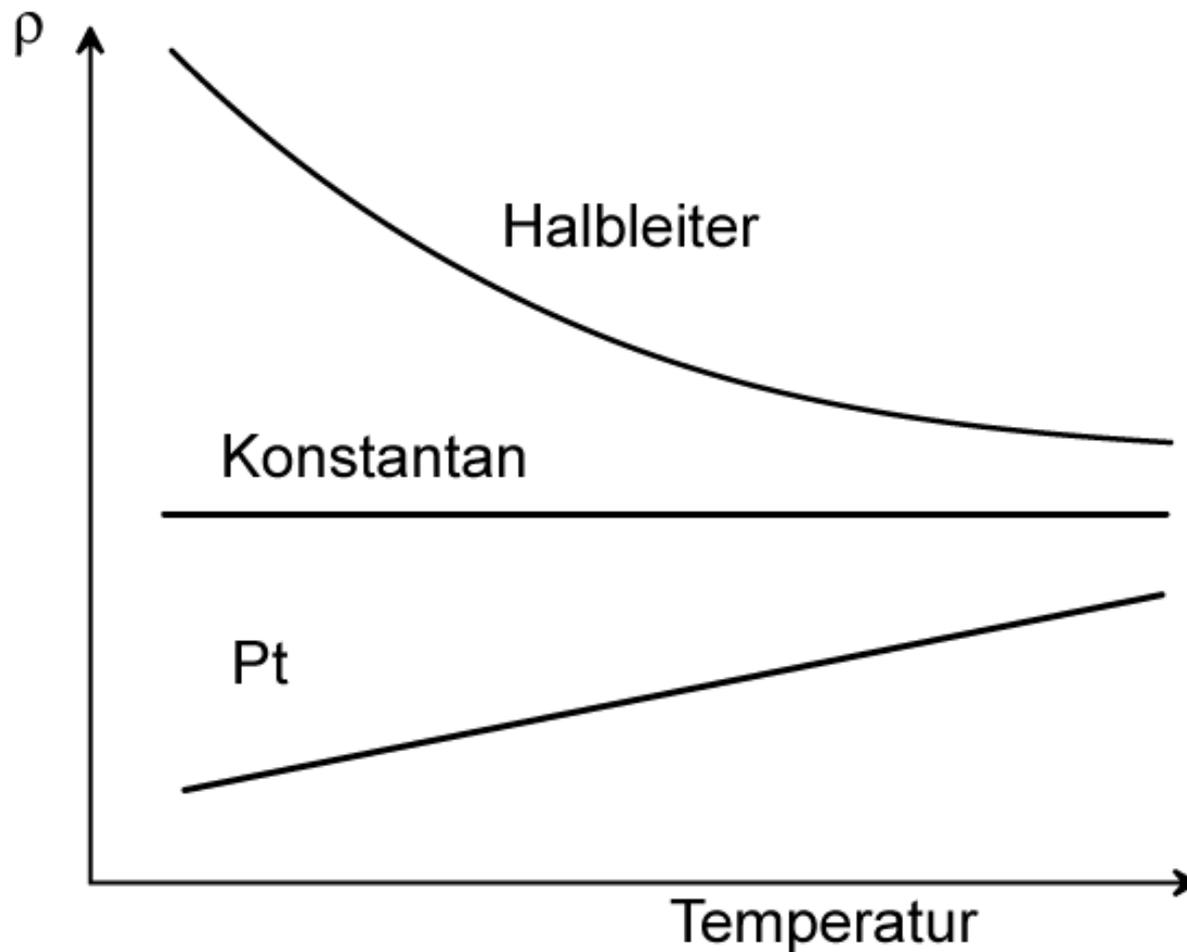
- **Thermoelement, Thomas Johann Seebeck 1821**

Haben zwei verbundene Kontakte unterschiedliche Temperaturen, führt dies zu einer Thermospannung (Seebeck-Effekt)





- Temperaturabhängigkeit von elektrischen Widerständen





## C) Halbleiter

Valenz- und Leitungsband sind durch eine "verbotene Zone" / Bandlücke getrennt:

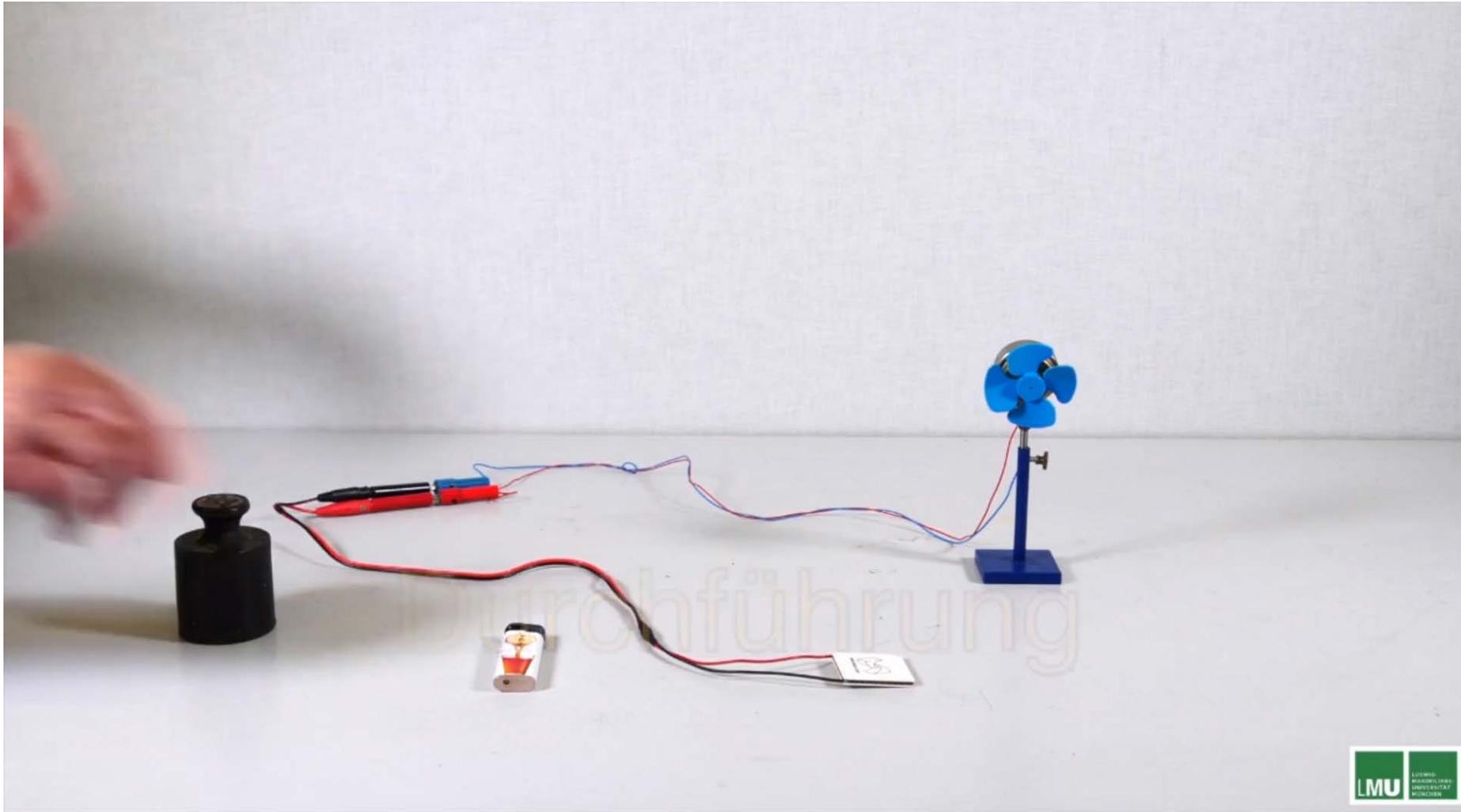
$$\begin{aligned} E_{\text{Gab}} &= 0,7 \text{ eV} && \text{bei Ge} \\ E_{\text{Gab}} &= 1,1 \text{ eV} && \text{bei Si} \end{aligned}$$

Halbleiter besitzen bei tiefen Temperaturen keine beweglichen Elektronen; d.h. alle Elektronen der äußeren Atomhülle sitzen fest in chemischen Bindungen.

2 - 6 Halbleiter	:	ZnSe
3 - 5 Halbleiter	:	GaAs
4 - 4 Halbleiter	:	SiC, SiGe

- Si







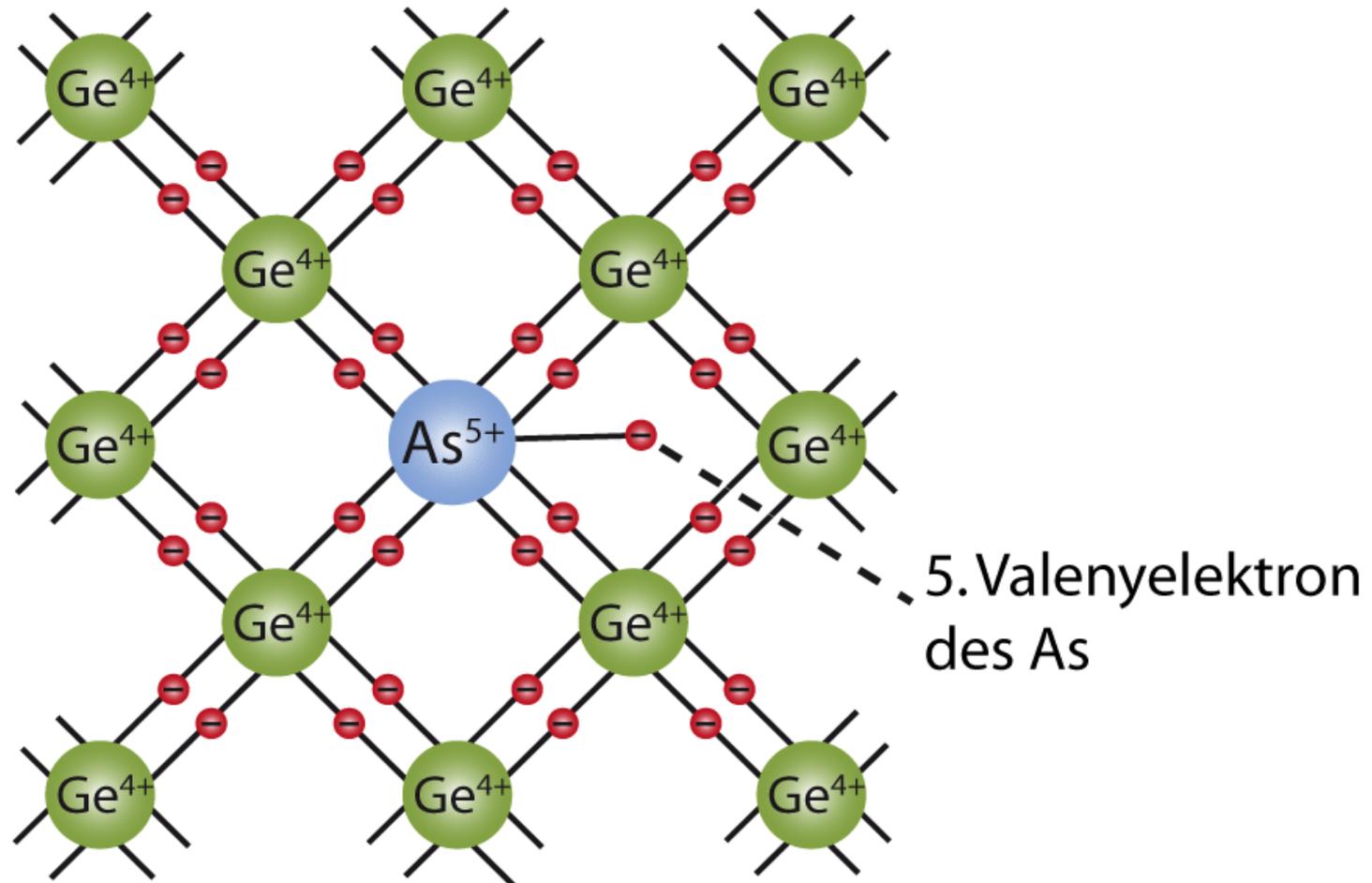
## C) Halbleiter

Im Halbleiter lassen sich bewegliche Elektronen erzeugen?

- Temperaturerhöhung  
(Valenzelektronen können ins Leitungsband springen)  
→ Eigenleitung
- Fremdatomeinbau  
(z.B. 5-wertiges As im 4-wertigen Ge erzeugt Störstelle: 1 Elektron zu viel!)  
→ Störstellenleitung

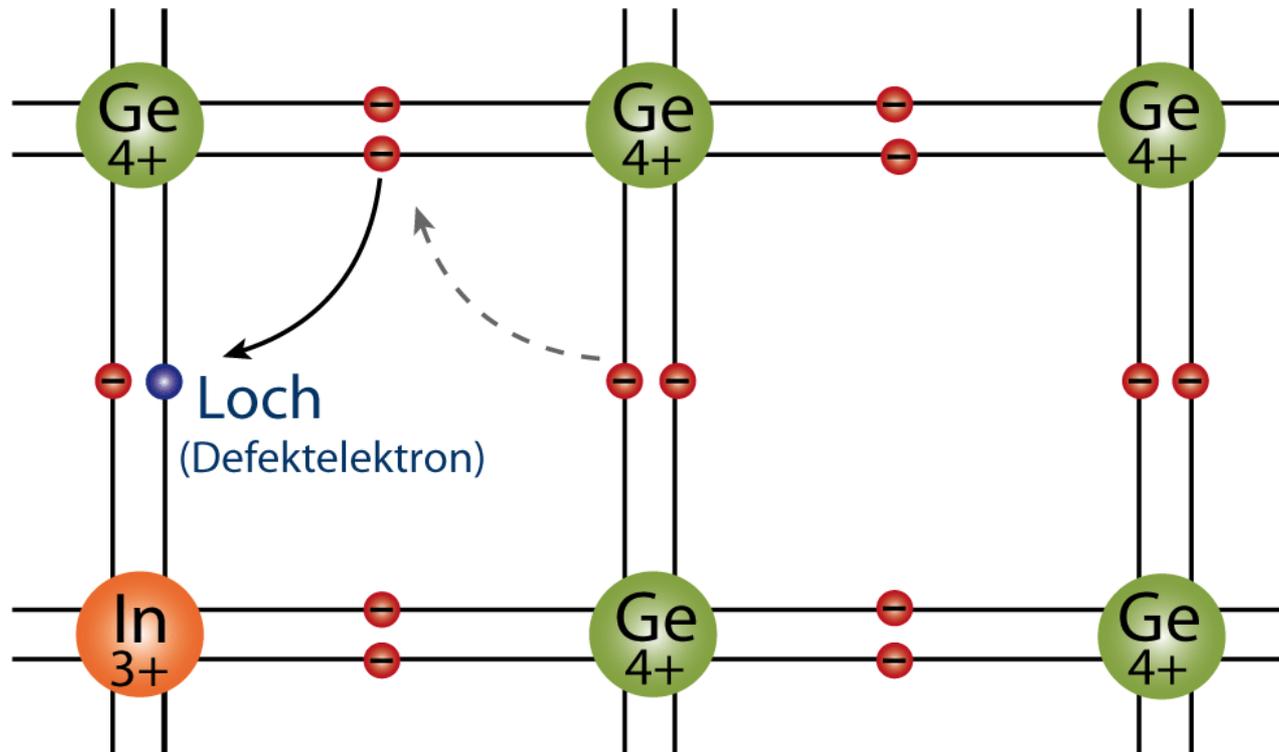


## C) Halbleiter



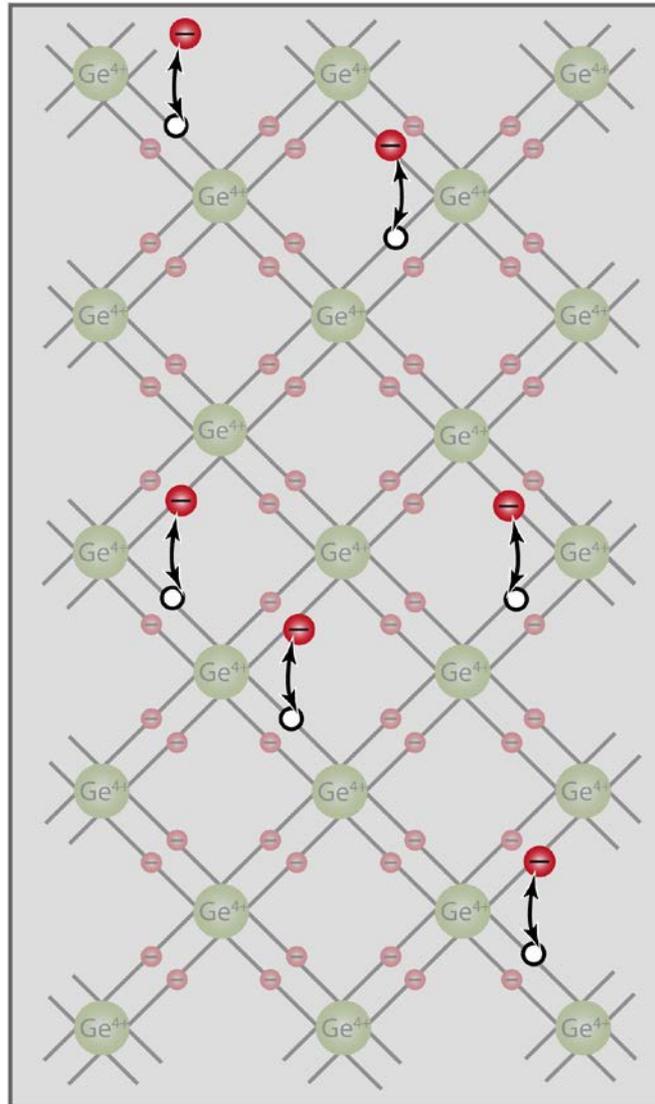


## C) Halbleiter

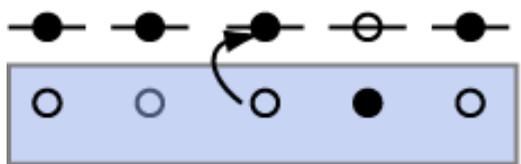


Mit Indium dotiertes Germanium-Atomgitter  
(Störstellenleitung durch Akzeptoren)

## C) Halbleiter



■ **Bänderschema eines Halbleiters mit Donatoren bzw. Akzeptoren**

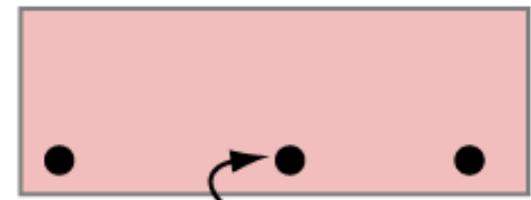


p-Leitung

Leitungsband

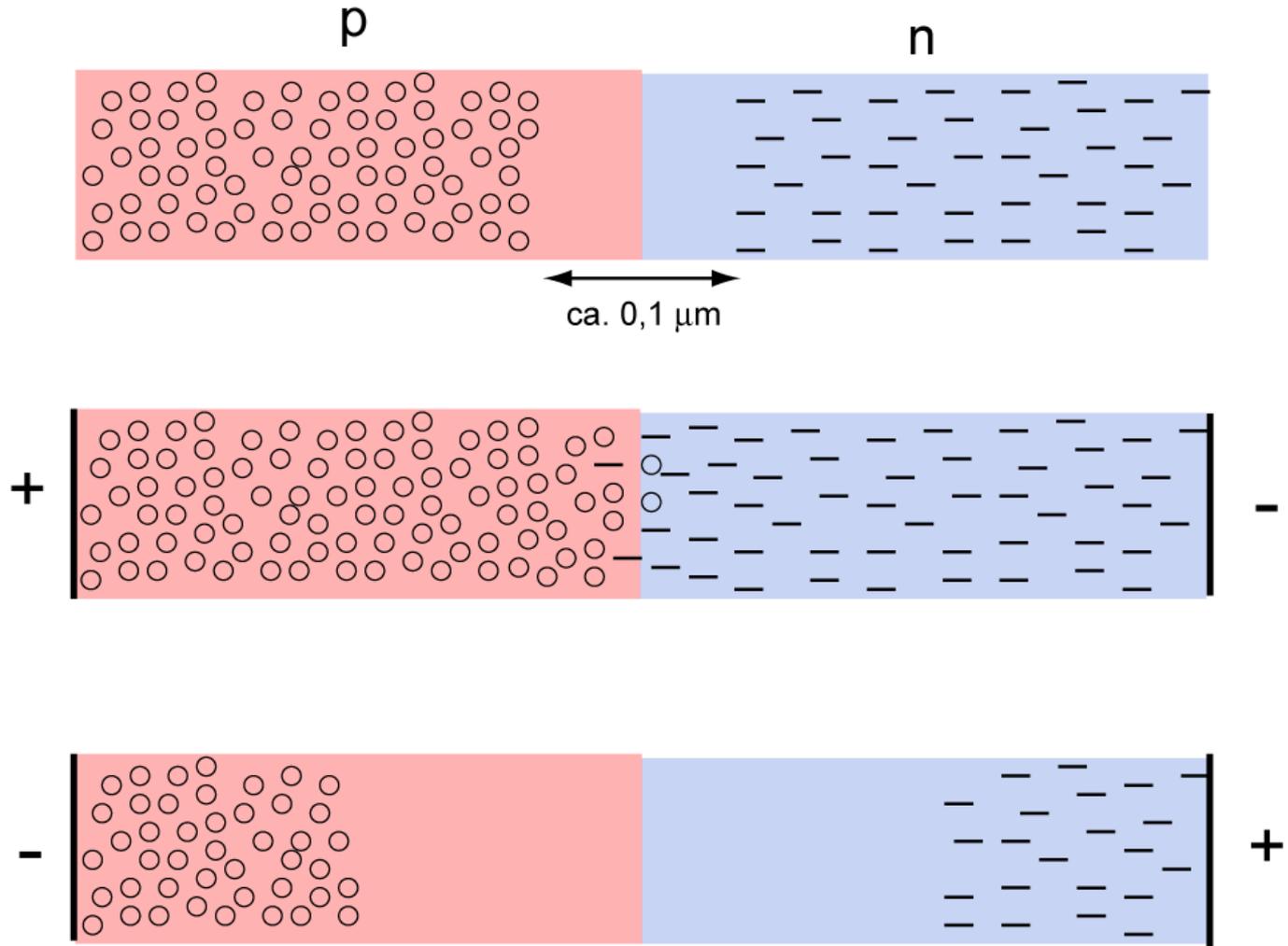
Donatoren  
Akzeptoren

Valenzband  
(voll besetzt)



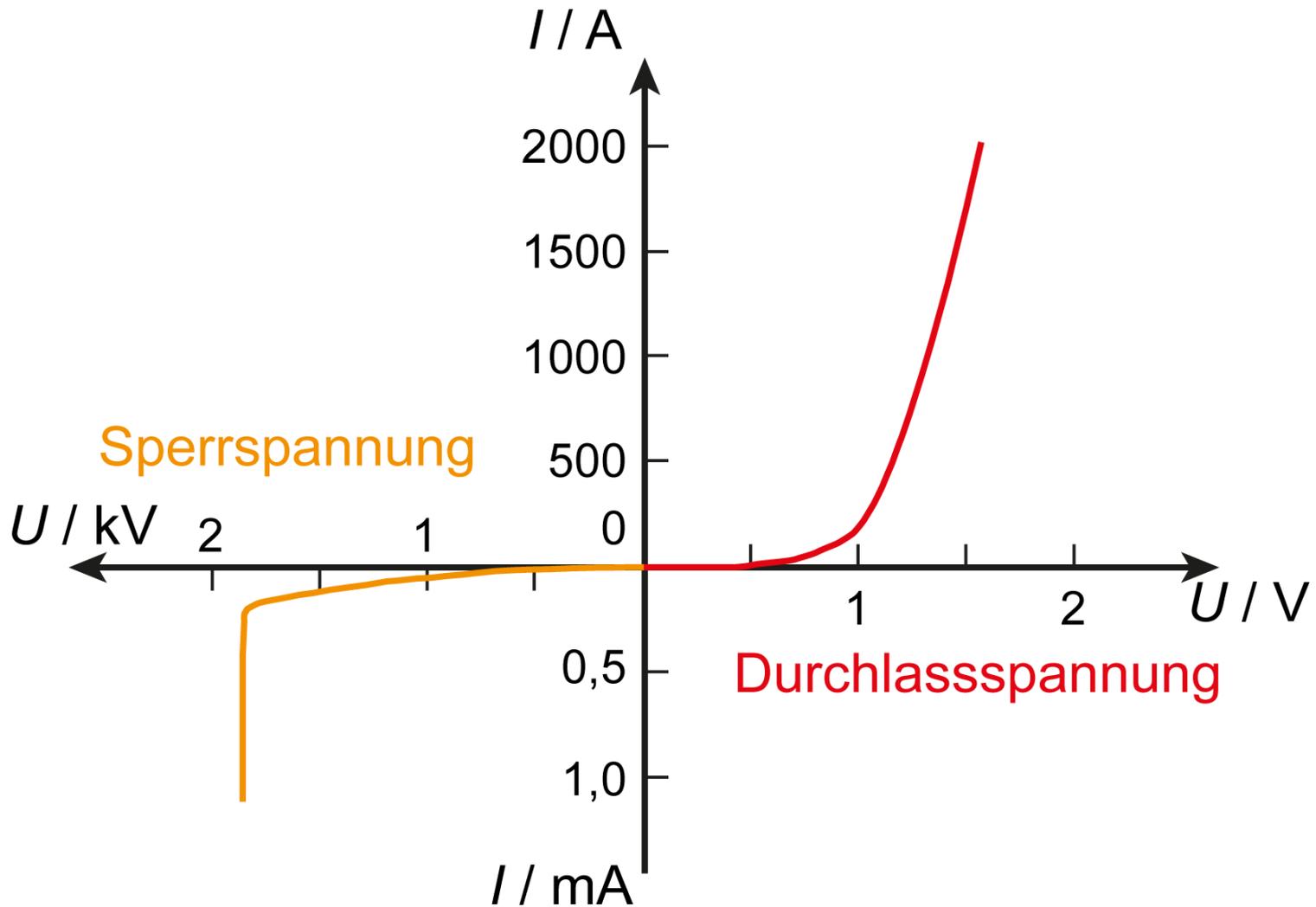
n-Leitung

Halbleiter – p-n-Übergang – Durchlassrichtung und Sperrrichtung

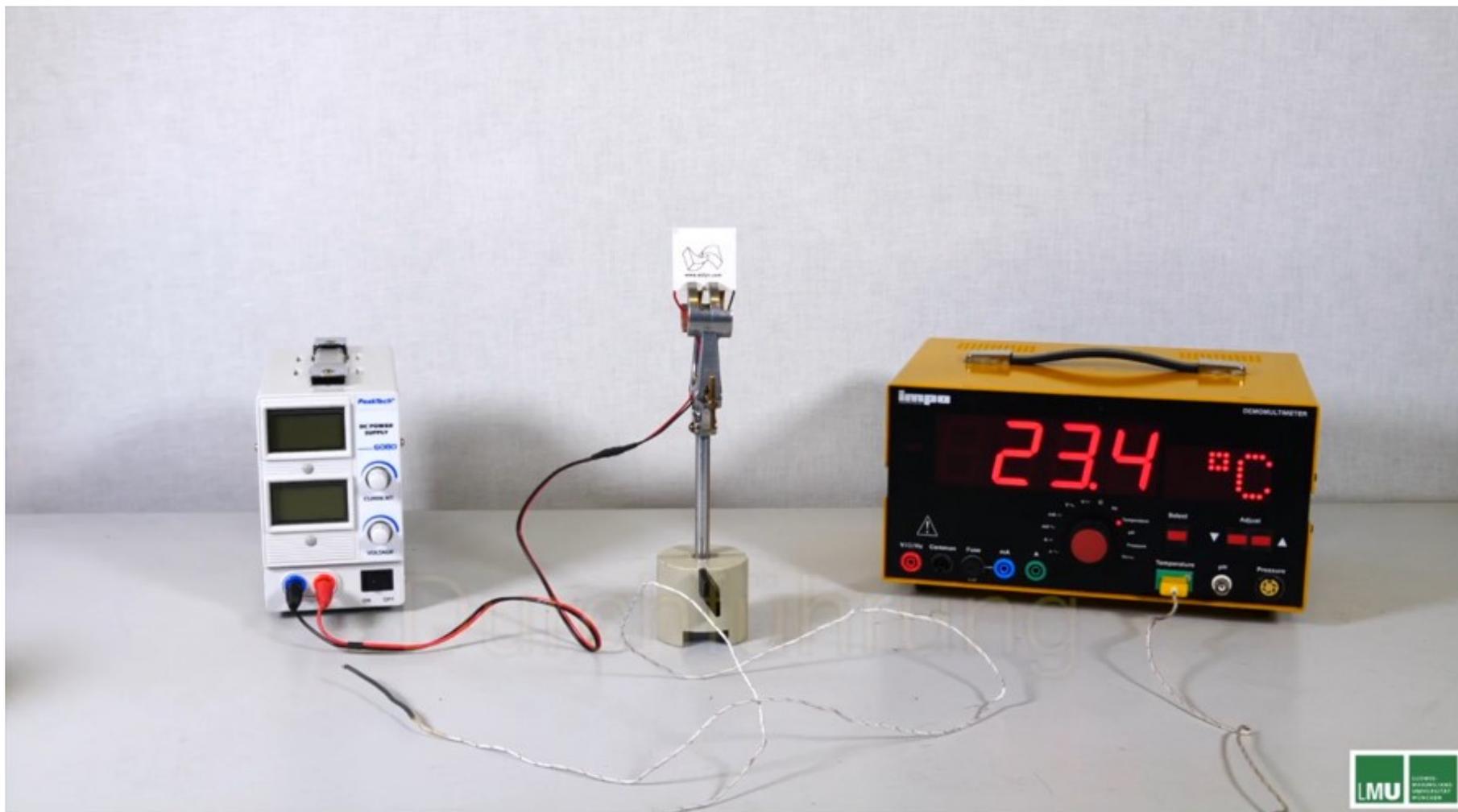




## Halbleiterdiode



## Peltier-Effekt

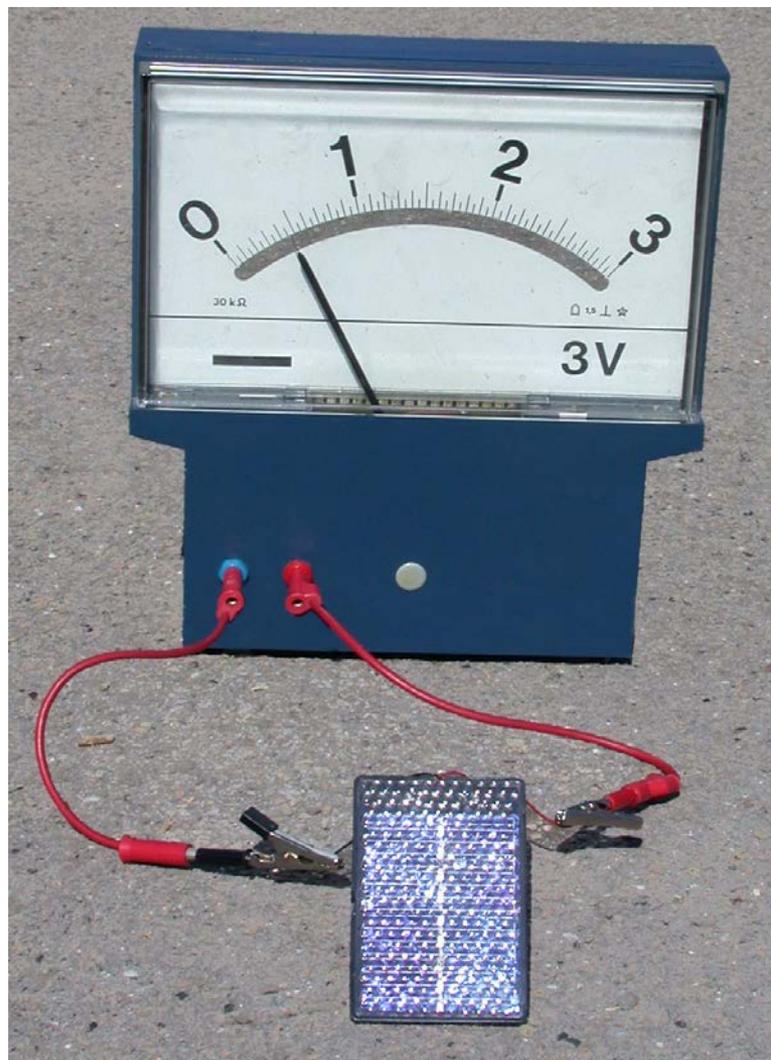


[https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2\\_E\\_Video/2-7H-Peltier-Element.m4v](https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/2-7H-Peltier-Element.m4v)

- **Solarzelle**



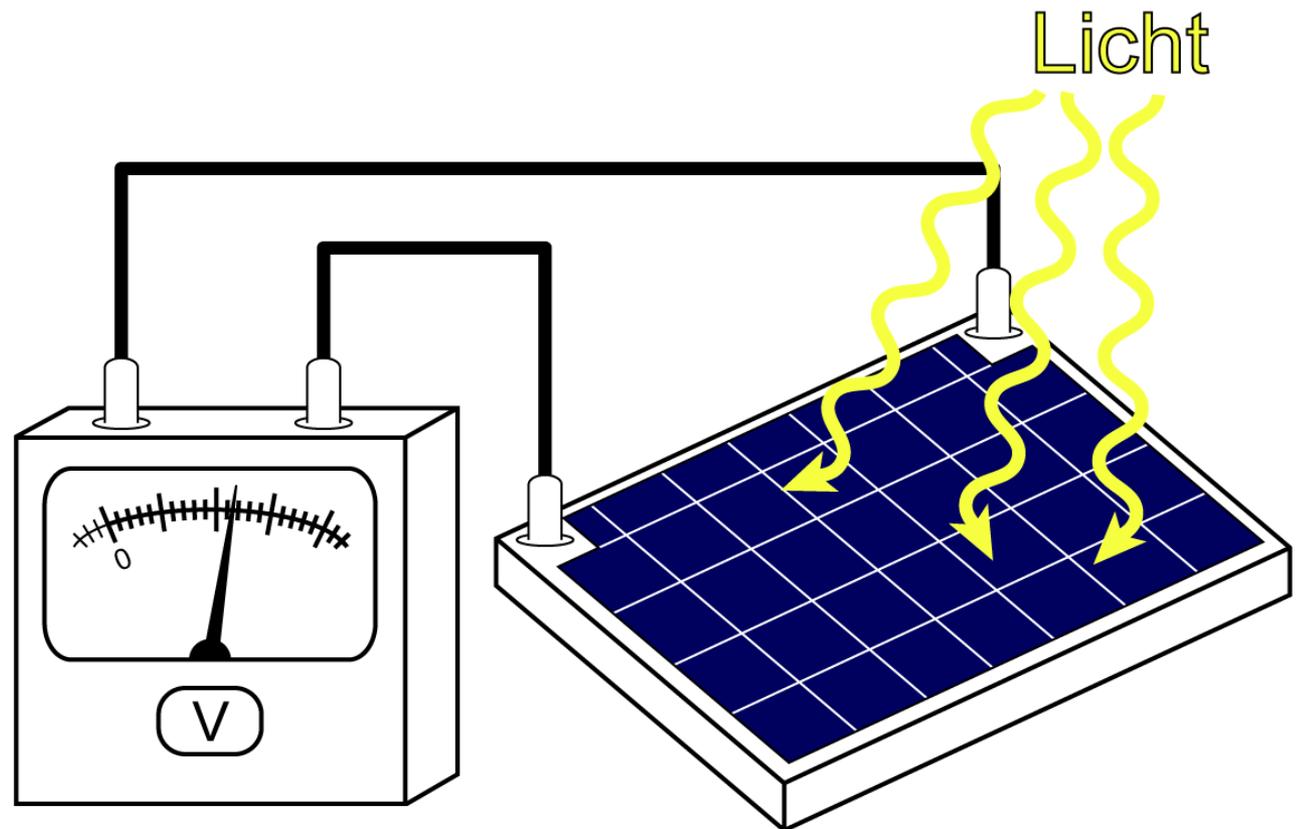
- Solarzelle



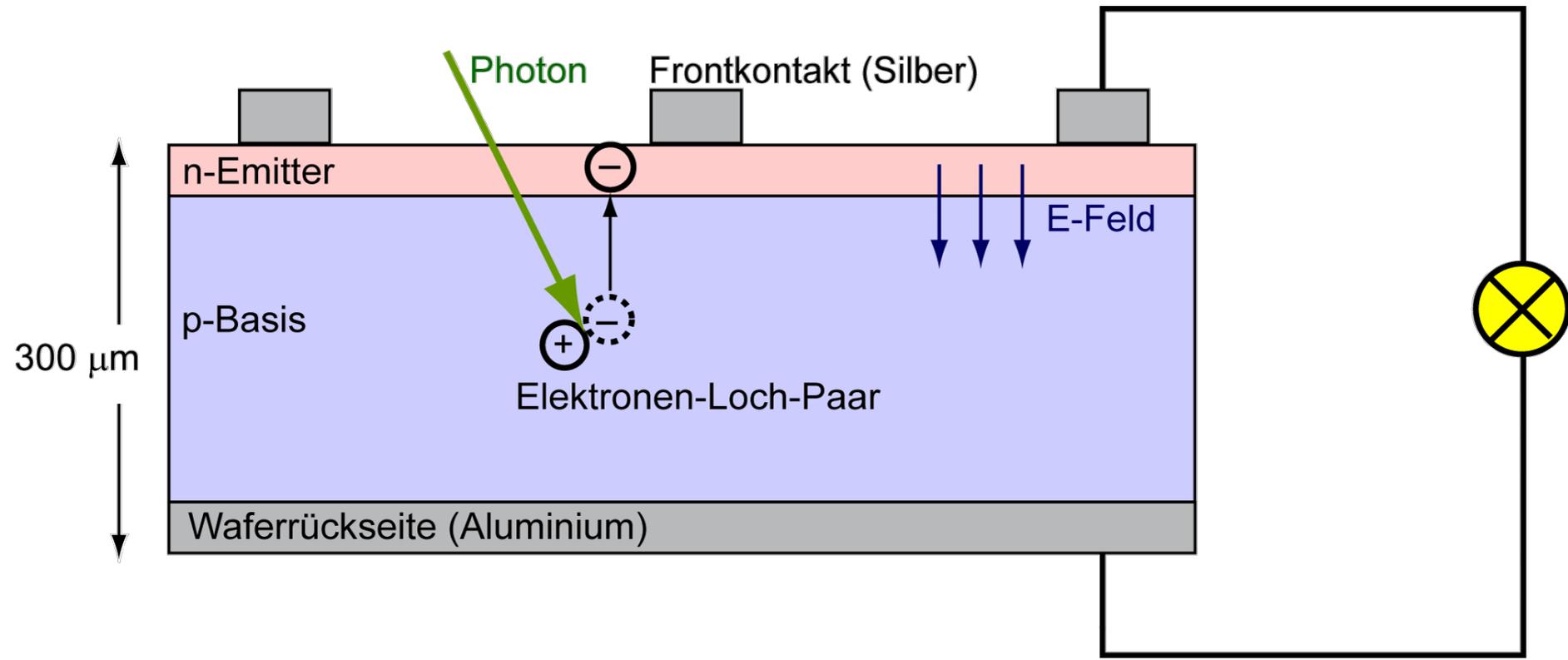
[https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2\\_E\\_Video/2-7N-Photozelle.m4v](https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/2-7N-Photozelle.m4v)

## Photoelement

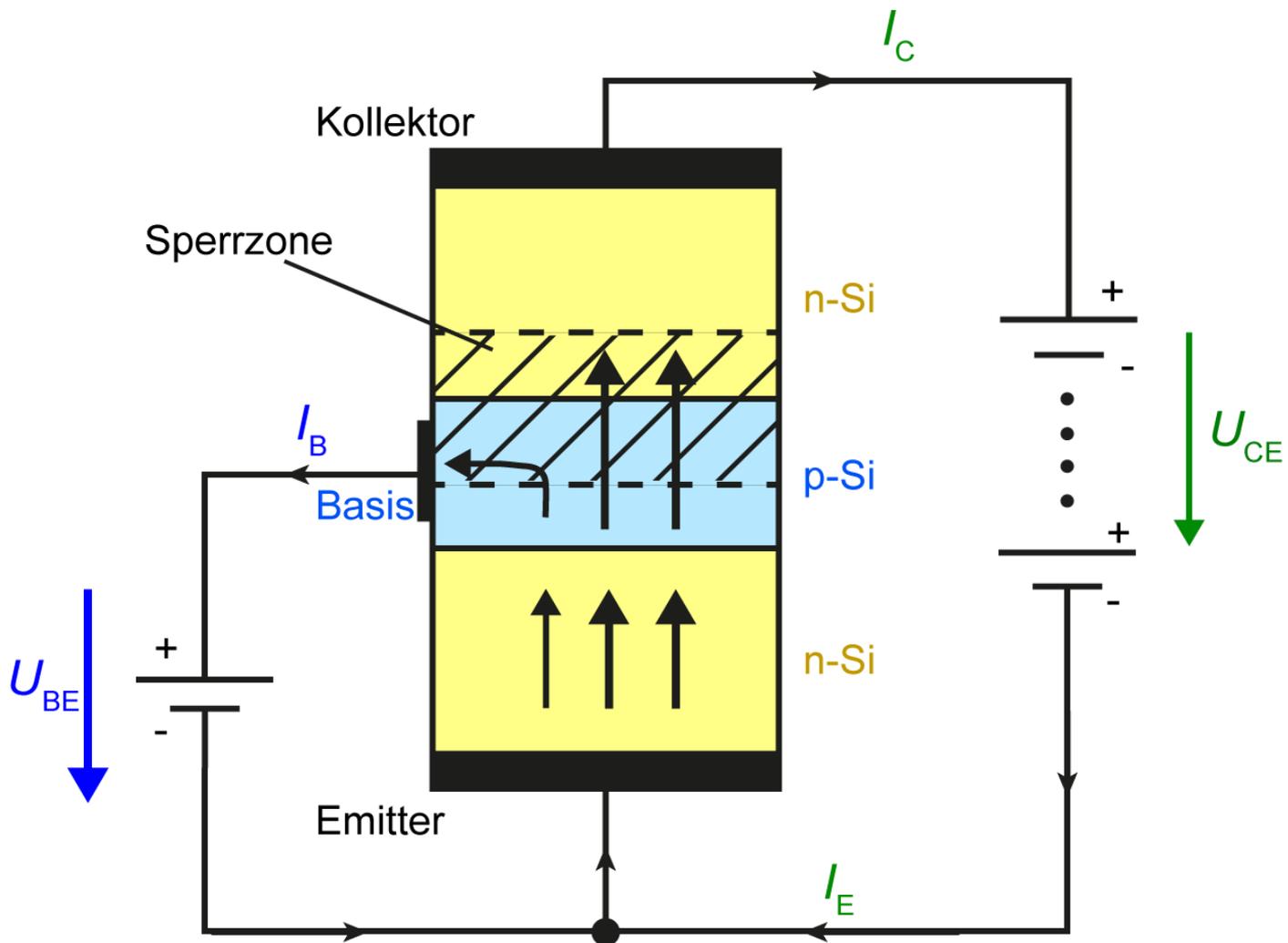
A. E. Becquerel 1839, Willoughby Smith 1873, R. E. Day / W. G. Adams 1875



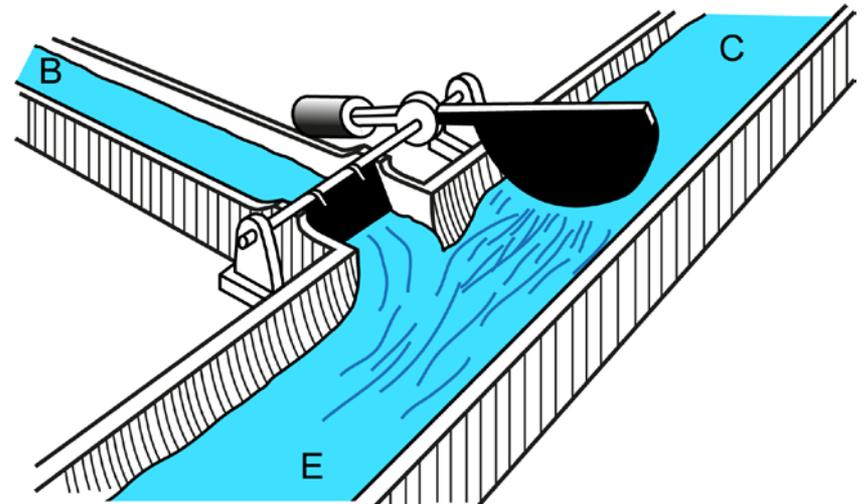
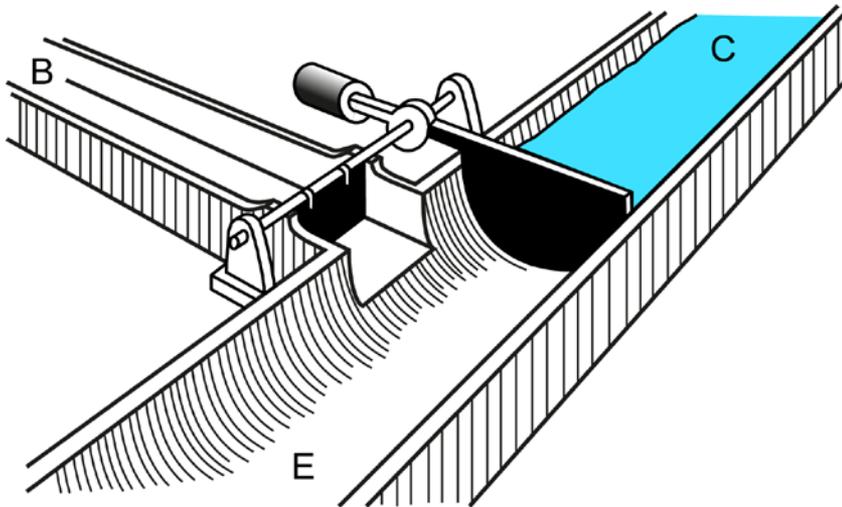
## ■ Solarzelle



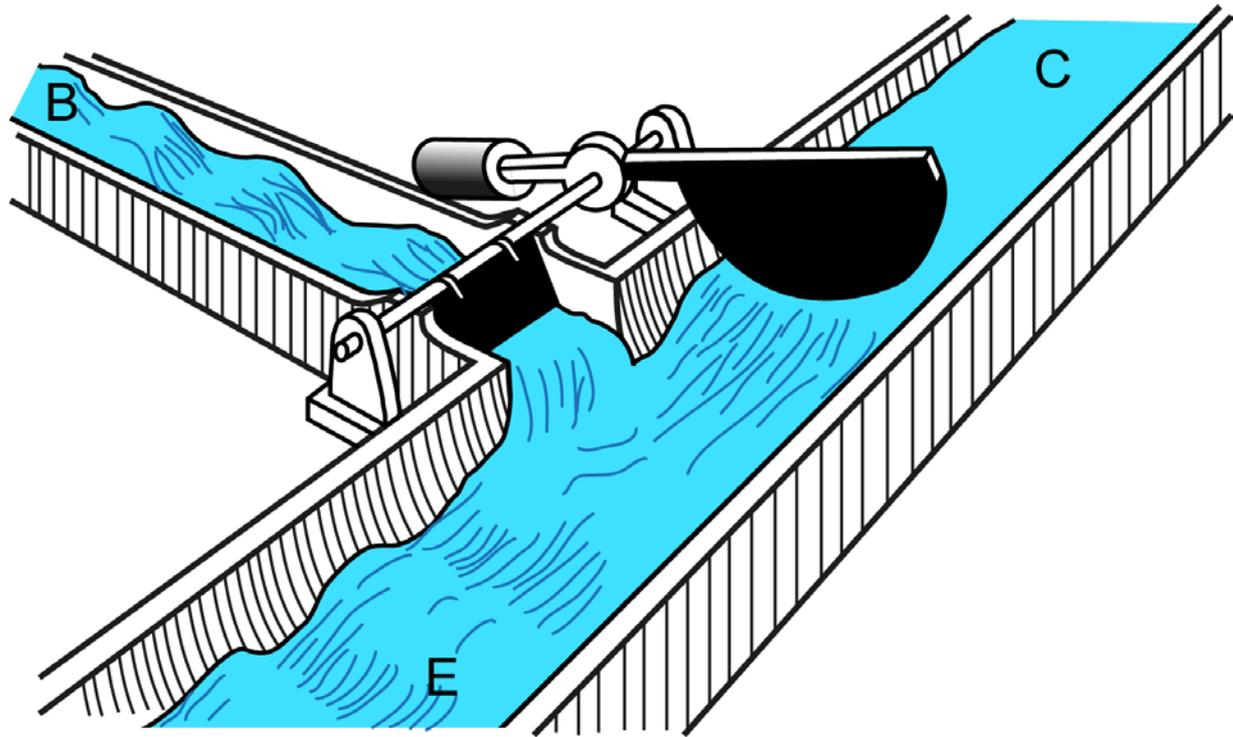
## ■ Transistor



## ■ Transistor

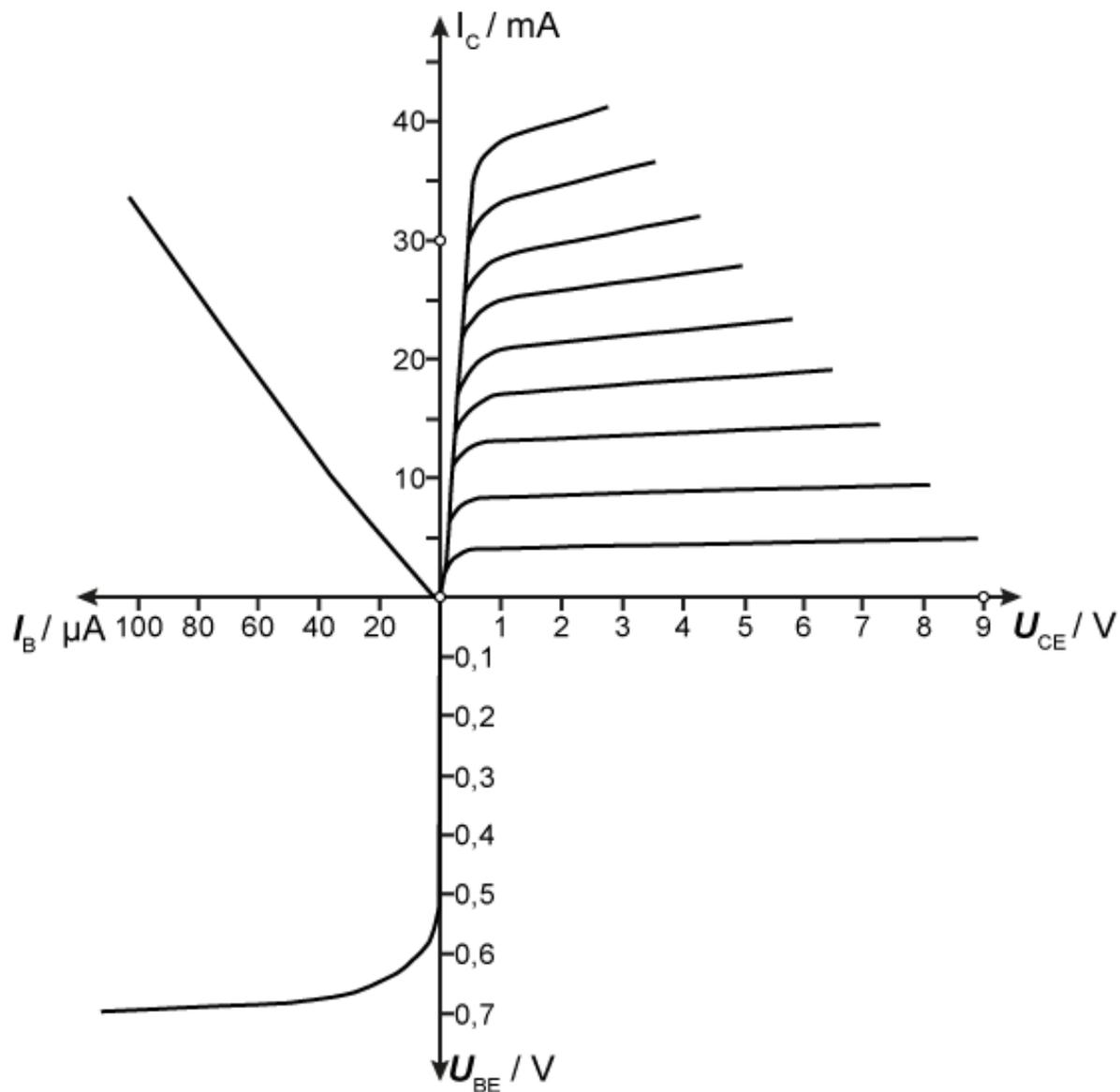


- Transistor





## ■ Transistor





## ■ Transistor

