

# PraktIES: Schnellkurs Elektrotechnik



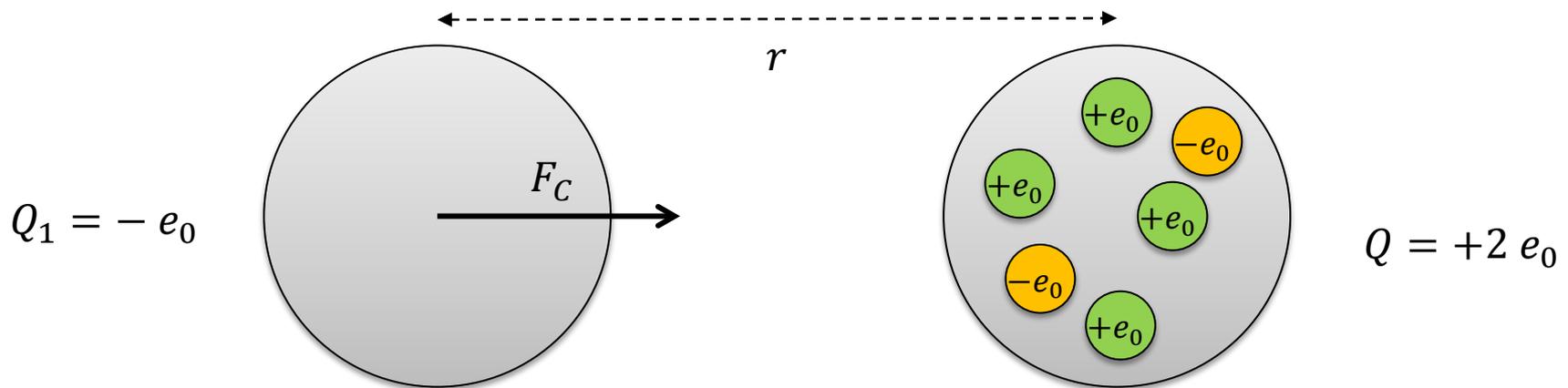
TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

Prof. Dr. Andreas Koch, Dipl. Inform. Andreas Engel

- Grundbegriffe der Elektrostatik / Elektrodynamik
- Passive Bauelemente in elektrischen Schaltkreisen
- Halbleiter und aktive Bauelemente
- Abgrenzung:
  - Sachliche Ungenauigkeiten (Vektorgrößen, Differentiale)
  - Keine Wechselspannungen (Hoch-/Tiefpass, Phasenverschiebung,...)
  - Keine Transistoren

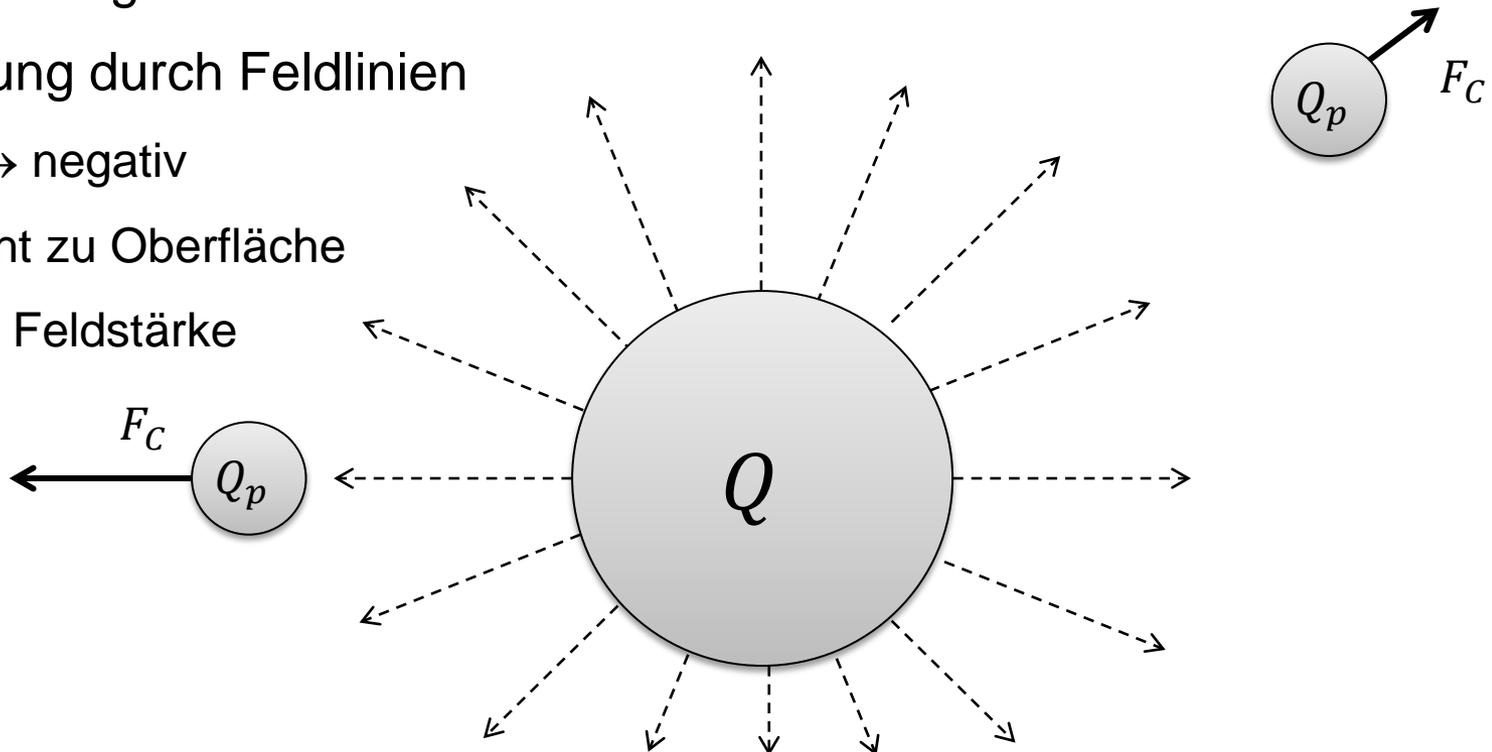
- **Grundbegriffe der Elektrostatik / Elektrodynamik**
- Passive Bauelemente in elektrischen Schaltkreisen
- Halbleiter und aktive Bauelemente

- Grundeigenschaft vom Materie
- Vielfaches von Elementarladung  $Q = z \cdot e_0$ ,  $z \in \mathbb{Z}$ ,  $e_0 = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{As}$
- Übertragbar (bspw. durch Reibung)
- Ladungserhaltung:  $\sum_i Q_i = \text{const}$
- Wechselwirkung:  $F_C \propto Q_1 Q_2 r^{-2}$



- Kraft pro Probeladung
- Vektorielle Feldgröße
- Visualisierung durch Feldlinien
  - Positiv  $\rightarrow$  negativ
  - Senkrecht zu Oberfläche
  - Dichte  $\propto$  Feldstärke

$$E = \frac{F_C}{Q_p}$$

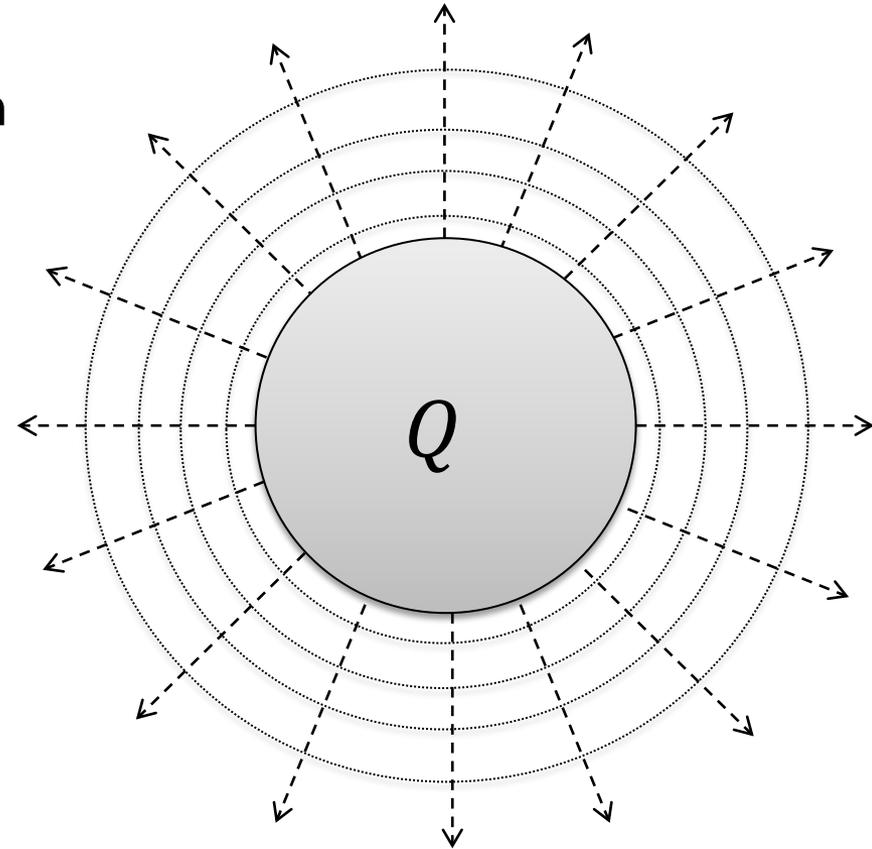


# Elektrisches Potential $\varphi$ [V]

- notwendige spezifische Energie, um Probeladung ins Feld zu verschieben

$$\varphi = \frac{W}{Q_p}$$

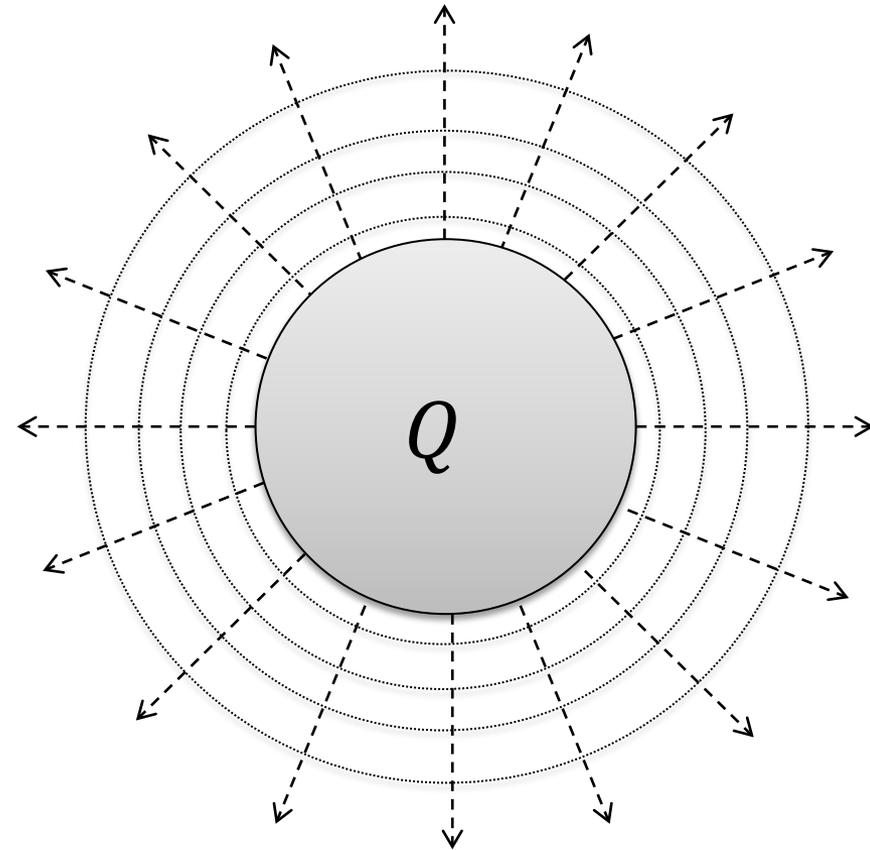
- Skalare Feldgröße
- Visualisiert durch Äquipotentiallinien



# Elektrische Spannung $U$ [V]

- notwendige spezifische Energie, um Probeladung im Feld zu verschieben

$$U = \Delta\varphi = \frac{\Delta W}{Q_p}$$



# Elektrische Kapazität

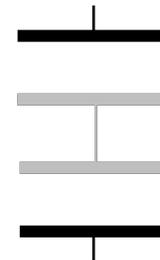
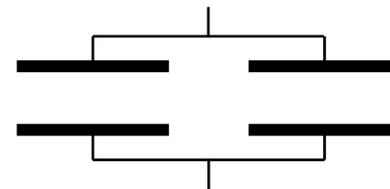
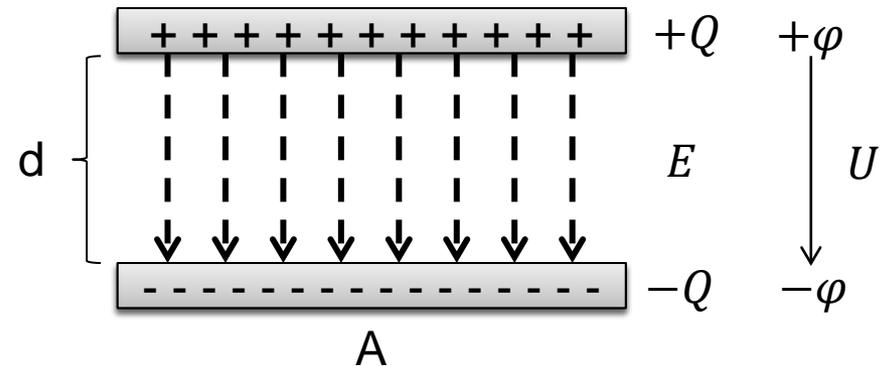
**C [As/V bzw. Farad]**

• Plattenkondensator  $U \propto Q \frac{d}{A}$

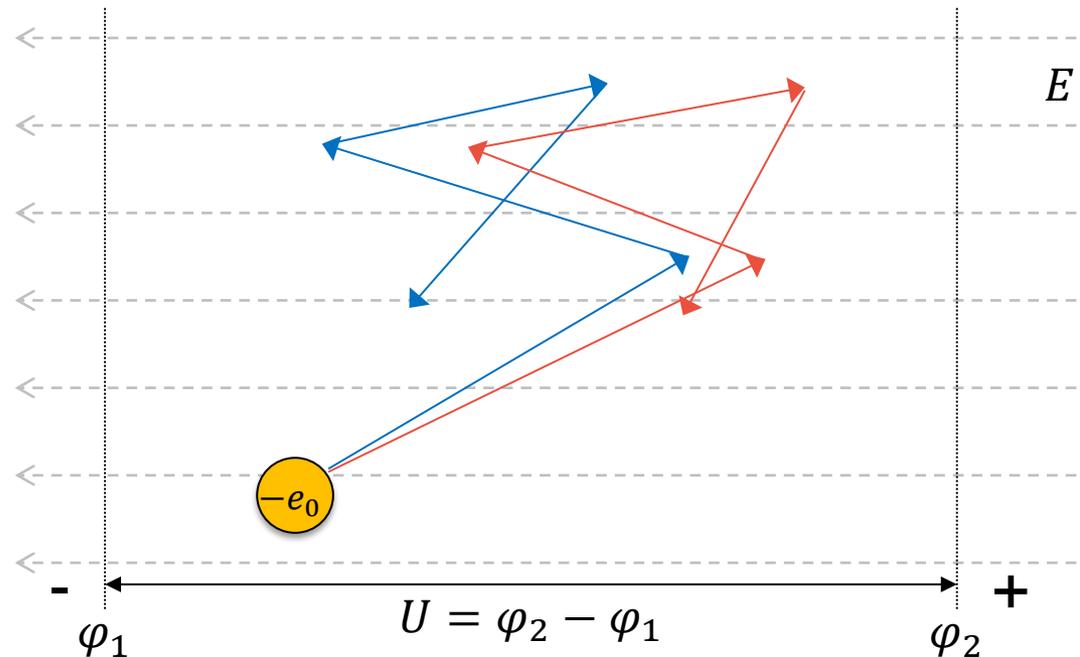
• Bauteilkonstante  $C = \frac{Q}{U} \propto \frac{A}{d}$

• Parallelschaltung  $C = C_1 + C_2$

• Reihenschaltung  $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$



- Freie Ladungsträger im Elektrischen Feld
  - Zufällige thermische Bewegung ( $\approx 10^5 \text{ m/s}$ )
  - Gerichtete Drift im E-Feld ( $\approx 10^0 \text{ m/s}$ )



$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

Stromfluss: +  $\rightarrow$  -  
Elektronen: -  $\rightarrow$  +

# Elektrischer Widerstand $R$ [ $\Omega$ ]

- Ladungsträgerbeweglichkeit & Potentialdifferenz  $\Rightarrow$  Stromfluss

$$\sigma \cdot U = I$$

- Ohm'sches Gesetz  $R = \frac{1}{\sigma} = \frac{U}{I}$

- Leitertypen

- Metallische Leiter  $R \propto T L A^{-1}$

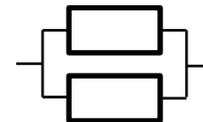
- Isolatoren  $R \rightarrow \infty$

- Halbleiter ???

- Reihenschaltung  $R = R_1 + R_2$



- Parallelschaltung  $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$

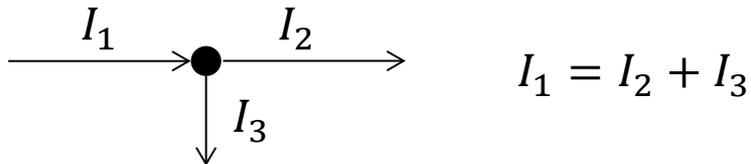


- Grundbegriffe der Elektrostatik / Elektrodynamik
- **Passive Bauelemente in elektrischen Schaltkreisen**
- Halbleiter und aktive Bauelemente

# Kirchhoffsche Gesetze

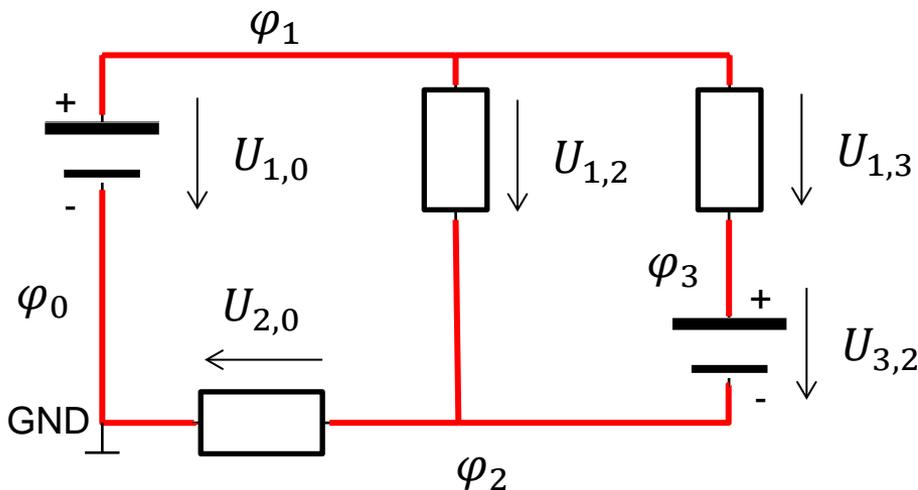
- Knotenregel (Ladungserhaltung)

$$\sum_k I_k = 0$$



- Maschenregel (konservative Coulombkraft)

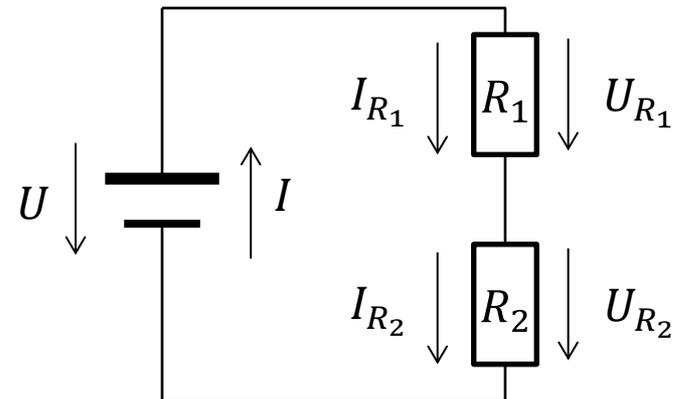
$$\sum_k U_k = 0$$



Masche 0-1-2:  $U_{1,0} = U_{1,2} + U_{2,0}$   
Masche 0-1-3-2:  $U_{1,0} = U_{1,3} + U_{3,2} + U_{2,0}$   
Masche 1-3-2:  $U_{1,2} = U_{1,3} + U_{3,2}$

# Spannungsteiler

- Knotenregel  $I = I_{R_1} = I_{R_2}$
  - Ohm'sches Gesetz  $U_{R_x} = R_x \cdot I_{R_x}$
  - Reihenschaltung  $U = (R_1 + R_2) \cdot I$
  - Maschenregel  $U = U_{R_1} + U_{R_2}$
- ⇒ Teilungsverhältnis  $U_{R_x} = U \frac{R_x}{R_1 + R_2}$

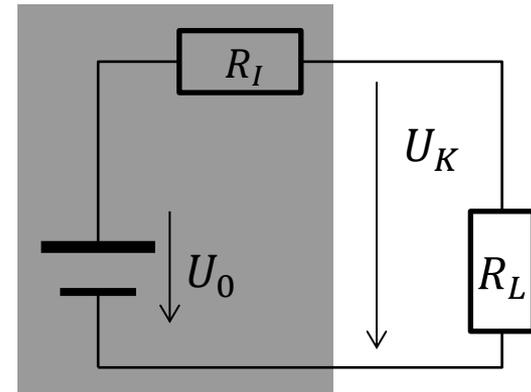


# Spannungsteiler: Reale Spannungsquelle

- Leerlaufspannung  $U_0$ ,
- Innenwiderstand  $R_I$ ,
- Last  $R_L$ ,
- Klemmenspannung  $U_K = U_0 \frac{R_L}{R_I + R_L}$

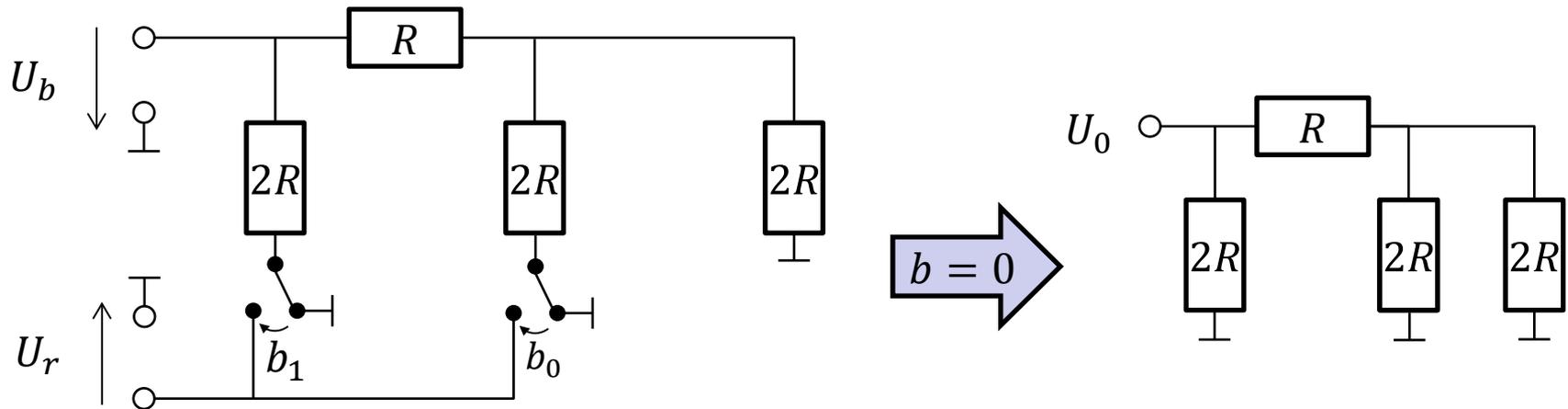
$$\Rightarrow U_K \approx U_0 \text{ für } R_L \gg R_I$$

$$\Rightarrow U_K = \frac{1}{2} U_0 \text{ für } R_L = R_I$$



# Spannungsteiler: Digital/Analog-Wandler

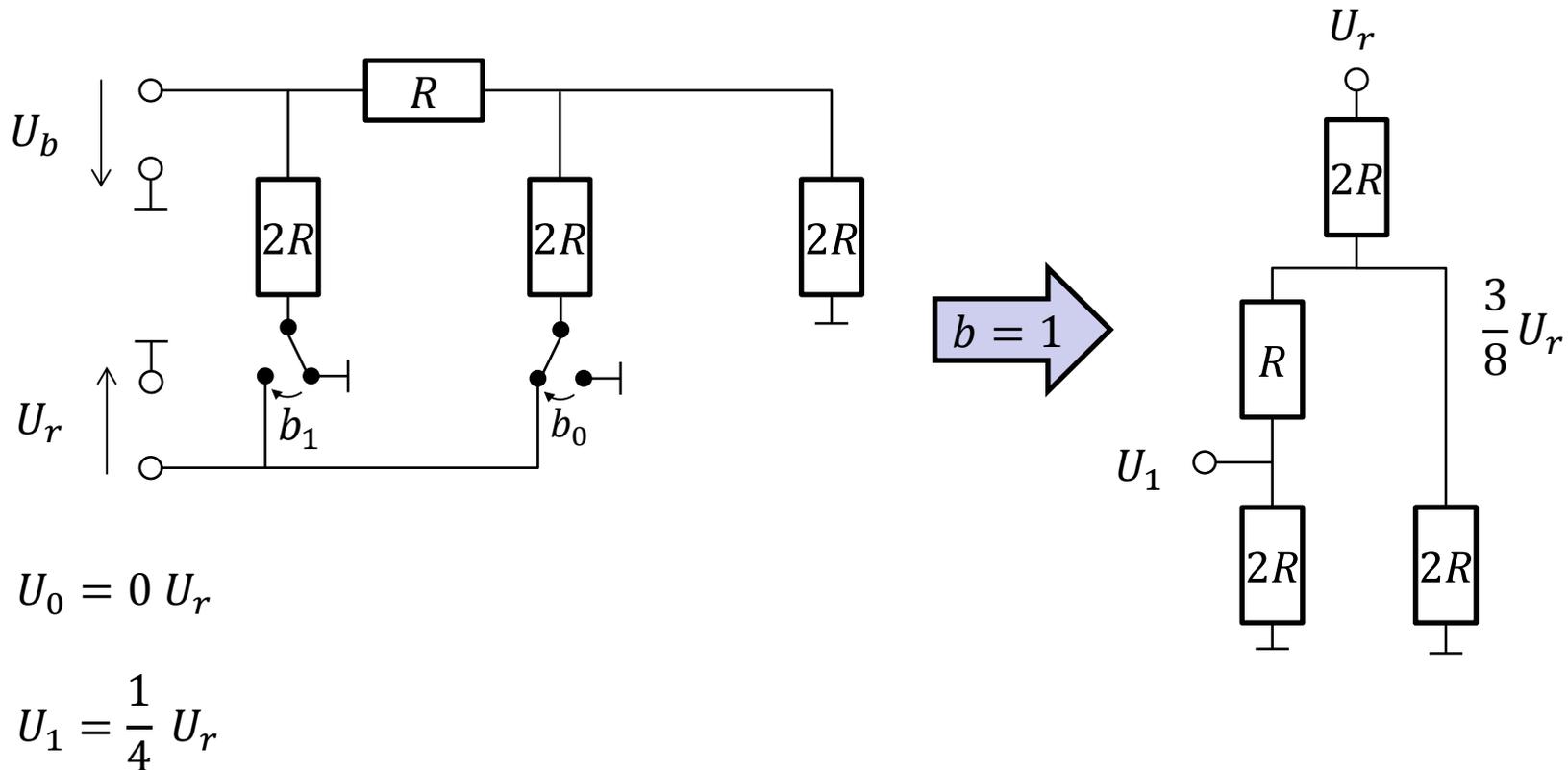
- R-2R-Widerstandsnetzwerk als einfachste Realisierung eines DAC



$$U_0 = 0 U_r$$

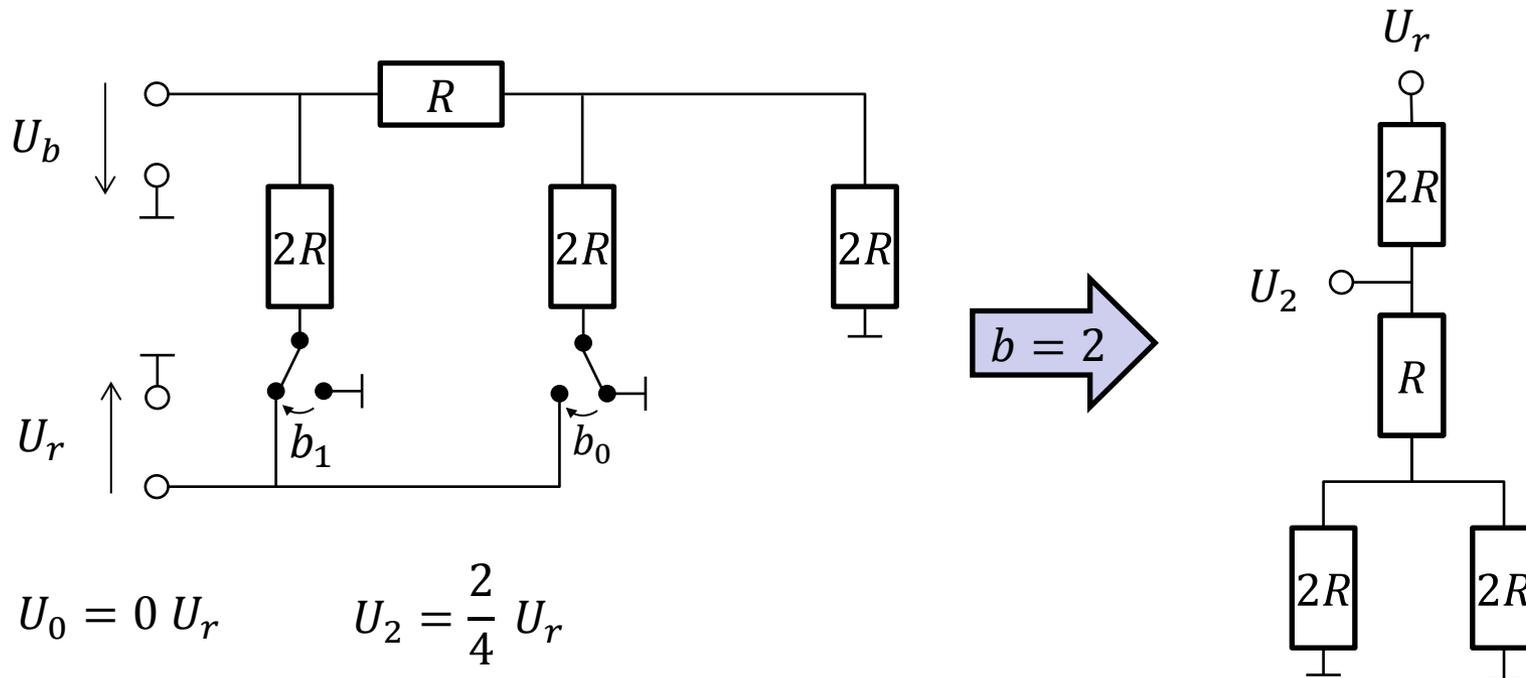
# Spannungsteiler: Digital/Analog-Wandler

- R-2R-Widerstandsnetzwerk als einfachste Realisierung eines DAC



# Spannungsteiler: Digital/Analog-Wandler

- R-2R-Widerstandsnetzwerk als einfachste Realisierung eines DAC

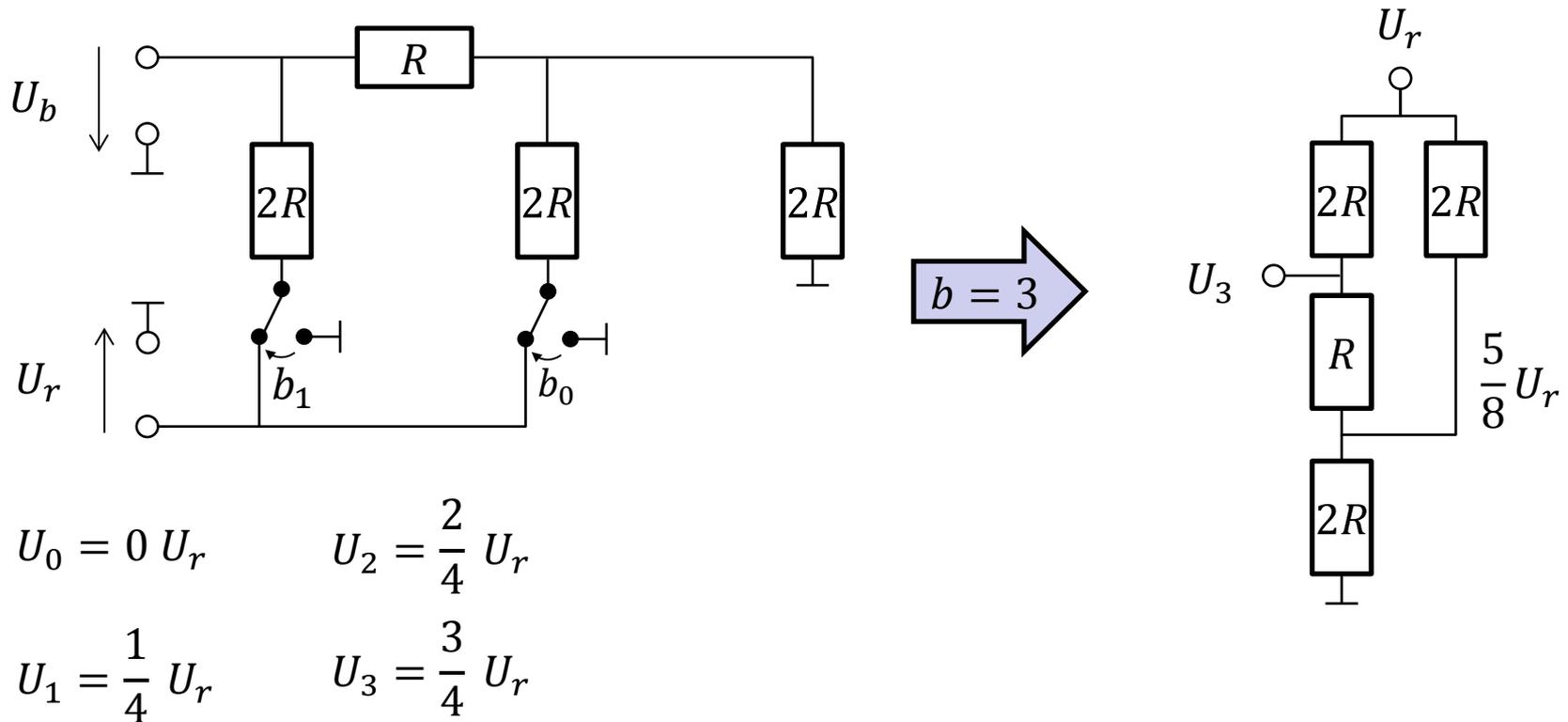


$$U_0 = 0 U_r \quad U_2 = \frac{2}{4} U_r$$

$$U_1 = \frac{1}{4} U_r$$

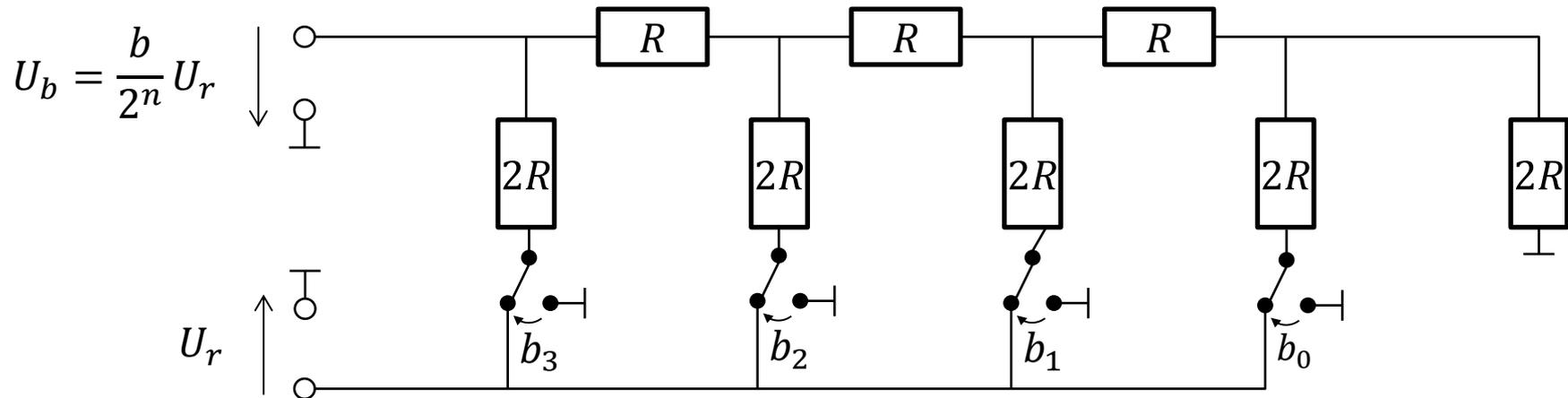
# Spannungsteiler: Digital/Analog-Wandler

- R-2R-Widerstandsnetzwerk als einfachste Realisierung eines DAC



# Spannungsteiler: Digital/Analog-Wandler

- R2R-Widerstandsnetzwerk als einfachste Realisierung eines DAC



- Vereinfachte Schaltungsanalyse:
  - Superposition
  - Thevenin Theorem

# Aufladen eines Kondensators

- Maschenregel  $U_0 = U_R(t) + U_C(t)$

- Kondensator  $U_C(t) = \frac{1}{C} \cdot Q(t)$

- Ohm'sches Gesetz  $U_R(t) = R \cdot I(t)$

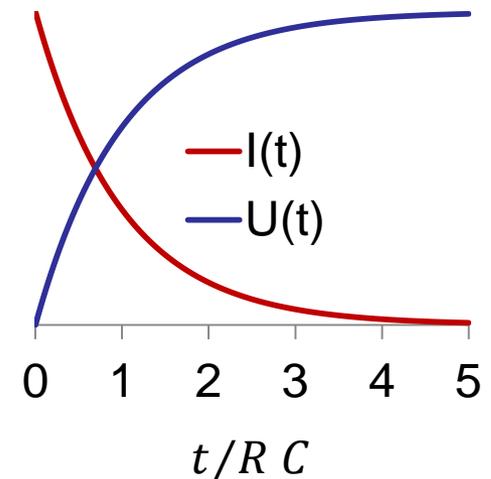
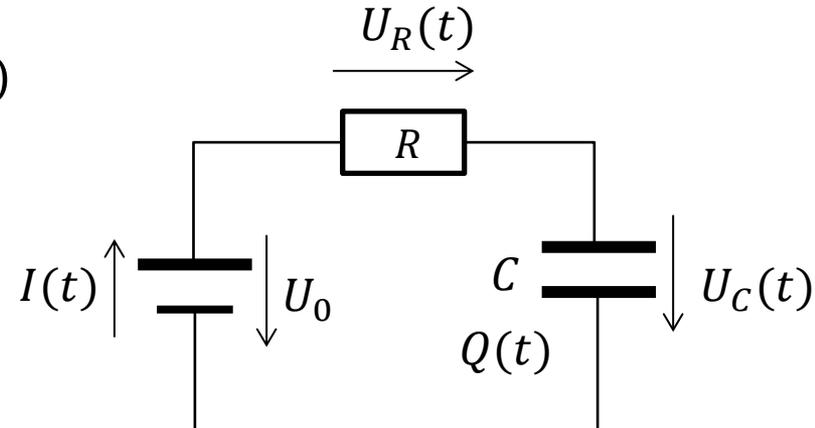
- Stromfluss  $I(t) = \frac{\Delta Q(t)}{\Delta t}$

- Einsetzen  $\frac{U_0}{R} = \frac{\Delta Q(t)}{\Delta t} + \frac{Q(t)}{R C}$

- Differentialgleichung  $Q(t) = C \cdot U_0 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{RC}})$

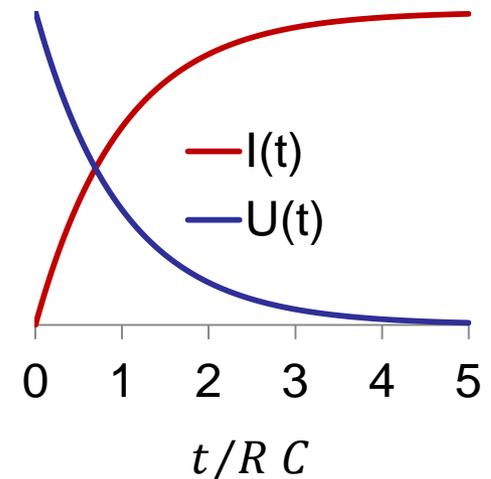
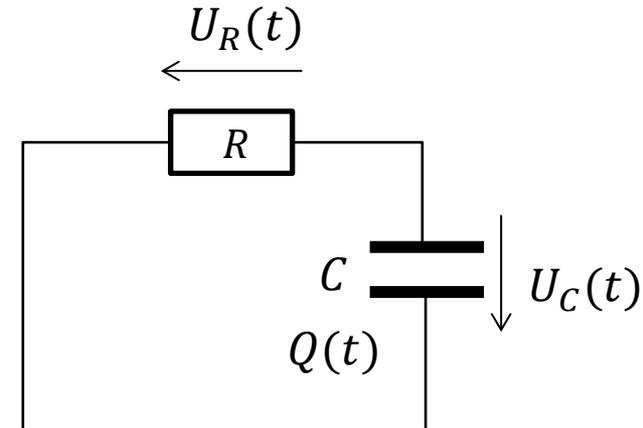
- Ladespannung  $U_C(t) = U_0 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{RC}})$

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



# Entladen eines Kondensators

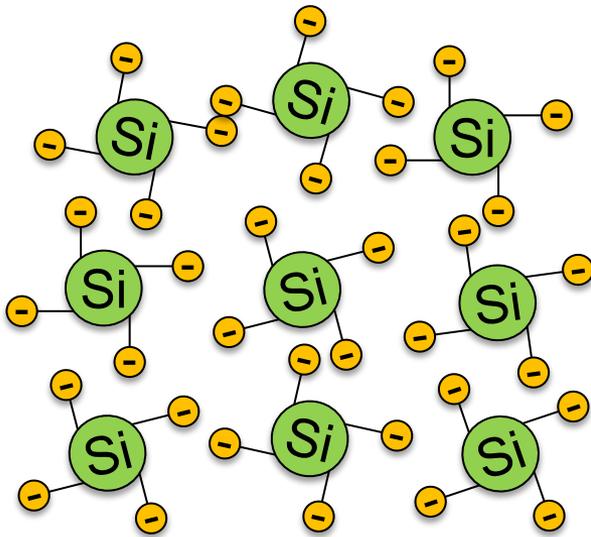
- Maschenregel  $U_R(t) = U_C(t)$
- Kondensator  $U_C(t) = \frac{1}{C} \cdot Q(t)$
- Ohm'sches Gesetz  $U_R(t) = R \cdot I(t)$
- Stromfluss  $I(t) = \frac{\Delta Q(t)}{\Delta t}$
- Einsetzen  $0 = \frac{\Delta Q(t)}{\Delta t} + \frac{Q(t)}{R C}$
- Differentialgleichung  $Q(t) = C \cdot U_C(0) \cdot e^{-\frac{t}{R C}}$
- Ladespannung  $U_C(t) = U_C(0) \cdot e^{-\frac{t}{R C}}$
- Ladestrom  $I(t) = \frac{U_C(0)}{R} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{R C}})$



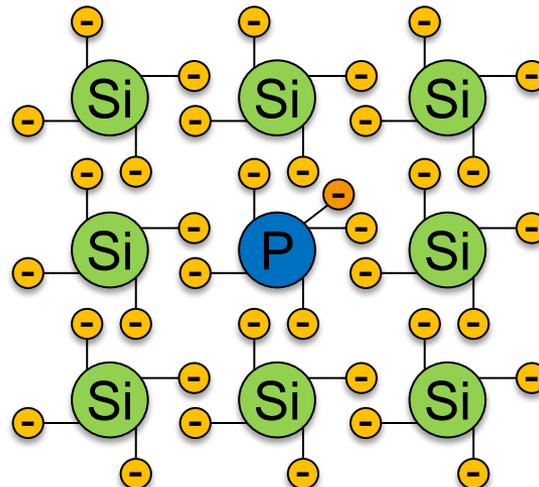
- Grundbegriffe der Elektrostatik / Elektrodynamik
- Passive Bauelemente in elektrischen Schaltkreisen
- **Halbleiter und aktive Bauelemente**

# Halbleiter

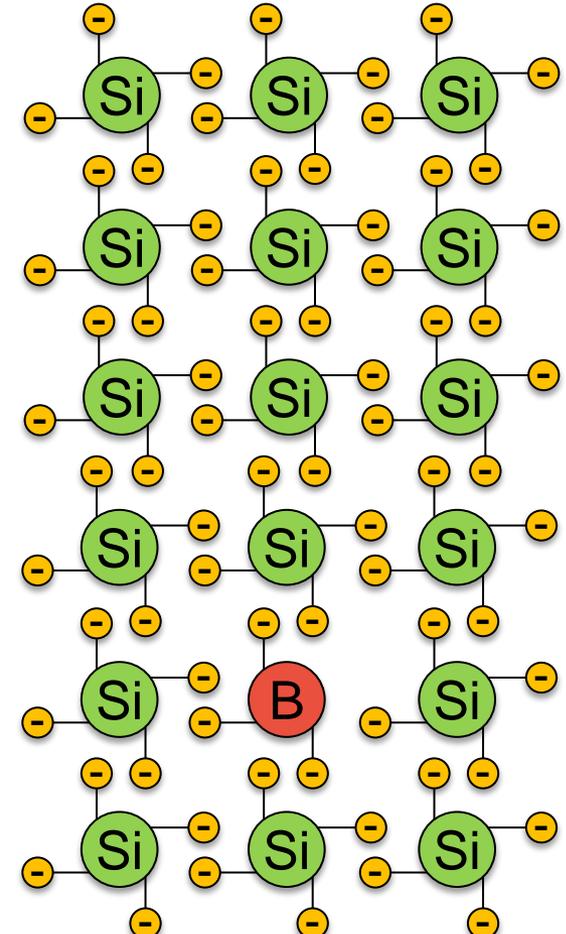
- Silizium, Germanium, ...
- Starke Elektronenpaarbindung („Edelgas“)
- ⇒ Keine freien Ladungsträger für Stromleitung
- Elektrische Leitfähigkeit steigt bei



Temperaturerhöhung



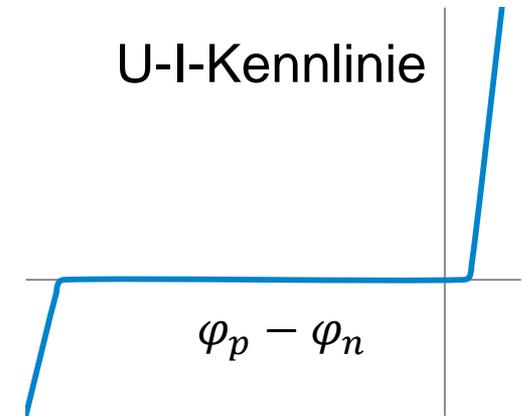
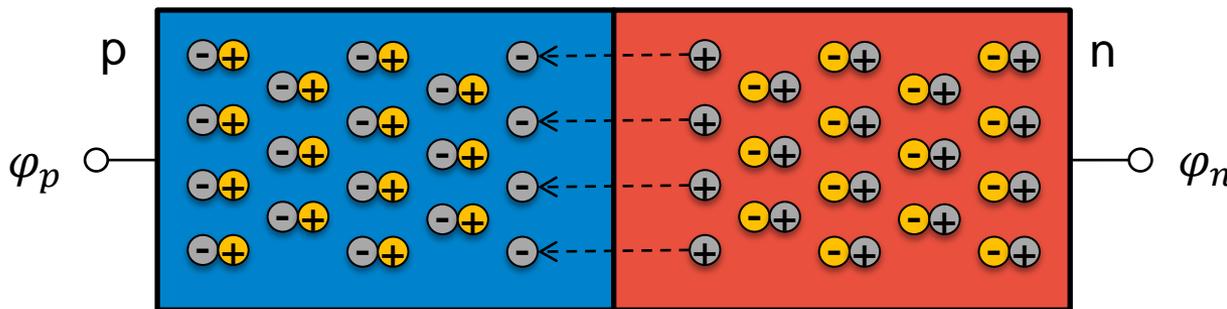
(n-)Dotierung mit Donatoren



(p-)Dotierung mit Akzeptoren

# Halbleiterdiode

= Kombination aus p- und n-dotiertem Halbleiter



- Rekombination freier Ladungsträger in Grenzschicht
  - Verbliebene Ionen (Atomrümpfe) bilden Sperrschicht (E-Feld)
  - Muss durch externes E-Feld überwunden werden, bevor Strom fließt
- ⇒ Stromfluss in Vorzugsrichtung ab Durchlassspannung und Durchbruch in Sperrrichtung ab Durchbruchspannung

# Halbleiterdiode: LED

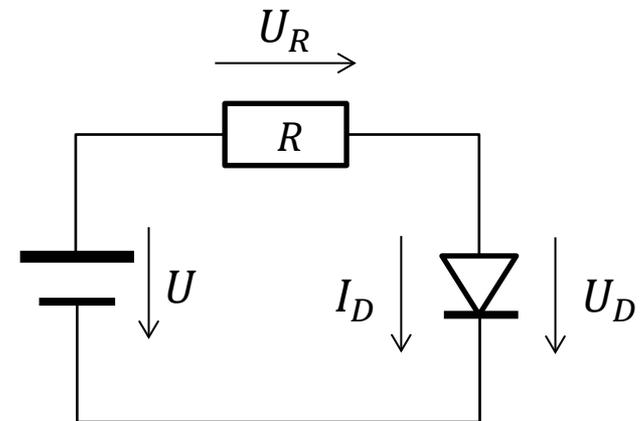
- Bspw. MULTICOMP - 703-0090

- Durchlassspannung  $1,8\text{ V}$
- Betriebsstrom  $20\text{ mA}$
- Durchbruchspannung  $4\text{ V}$



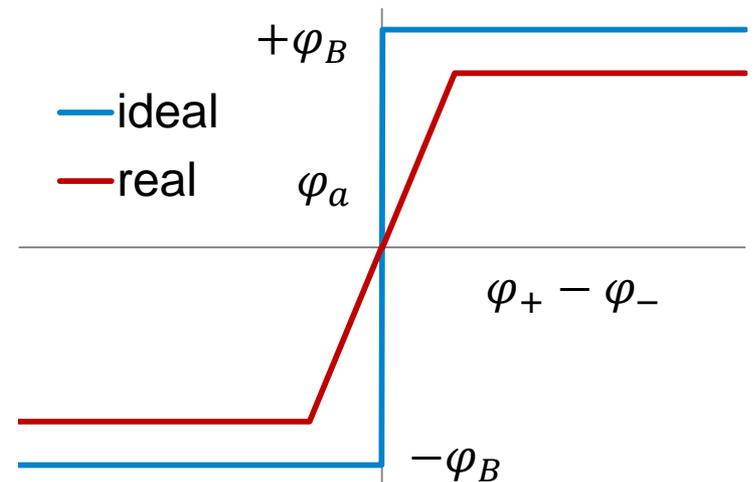
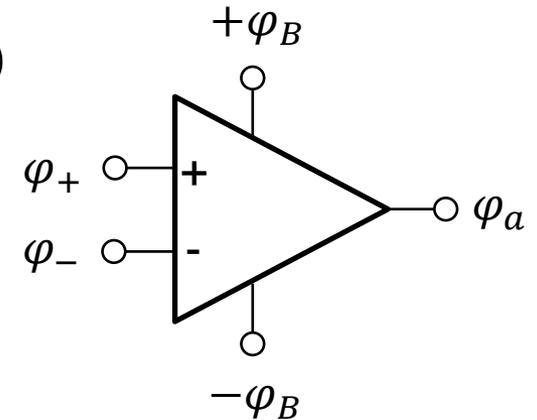
- Notwendiger Vorwiderstand bei  $U = 5\text{ V}$

$$R = \frac{U_R}{I_D} = \frac{U - U_D}{I_D} = 160\ \Omega$$



# Operationsverstärker

- Verstärkt Potentialdifferenzen  $\varphi_a = G \cdot (\varphi_+ - \varphi_-)$
- Ideales Verhalten
  - Unendlich hoher Eingangswiderstand
  - Kein Ausgangswiderstand
  - Unendlich großer Verstärkungsfaktor  $G$
  - Ausgang durch (symmetrische) Versorgungsspannung begrenzt
- Als Komparator verwendbar
- Als Verstärker unbrauchbar



# Gegenkopplung von Operationsverstärkern

- Nicht invertierender Verstärker
  - Spannungsteiler  $\varphi_- = \varphi_a \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$
  - Rückkopplung von Ausgang auf Eingang
  - + Unendliche Verstärkung
  - $\Rightarrow \varphi_- = \varphi_e$
  - $\Rightarrow \varphi_a = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot \varphi_e$
- Invertierender Verstärker
  - $\varphi_- = \varphi_{GND}$  (Virtuelle Masse)
  - Unendlich hoher Eingangswiderstand
  - $\Rightarrow I_1 = -I_2$
  - $\Rightarrow \frac{\varphi_e}{R_1} = -\frac{\varphi_a}{R_2}$  bzw.  $\varphi_a = \left(-\frac{R_2}{R_1}\right) \cdot \varphi_e$

