

## 2 Stationäre elektrische Ströme

- 2.1 Bewegung von Ladungsträgern
- 2.2 Elektrischer Widerstand, ohmsches Gesetz
- 2.3 Einfache Gleichstromkreise
- 2.4 Verzweigte Stromkreise
- 2.5 Strom in Flüssigkeiten
- 2.6 Strom in Festkörpern
- 2.7 Strom in Gasen

### 2.1 Bewegung von Ladungsträgern

- Ausgangsbetrachtung: Pendel mit Graphitkugel im Plattenkond.
- stationäre Ströme

- Def.: Elektrische Stromstärke

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

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

- Technische Stromrichtung: „+“ -> „-“

## 2.1 Bewegung von Ladungsträgern

### ■ Wirkungen des elektrischen Stromes

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

=> Messmöglichkeiten

## 2.1 Bewegung von Ladungsträgern

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

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

## 2.1 Bewegung von Ladungsträgern

### 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

nach Kamke, Walcher

© R. Girwidz

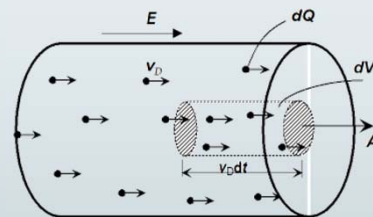
5

## 2.1 Bewegung von Ladungsträgern

### ■ Modell der Ladungsträgerdrift (mit mikroskopischen Größen)

Anzahldichte:

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



$$dQ = q \cdot n \cdot dV;$$

$$= q \cdot n \cdot v_D dt \cdot A; \quad v_D : \text{mittl. Driftgeschw.}$$

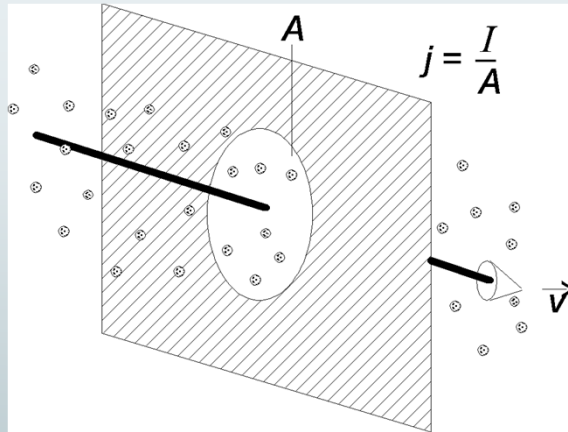
$$I = \frac{dQ}{dt} = n \cdot q \cdot A \cdot v_D;$$

© R. Girwidz

6

## 2.1 Bewegung von Ladungsträgern

### ■ Stromdichte



allgemein:

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

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

© R. Girwidz

7

## 2.1 Bewegung von Ladungsträgern

### ■ Kontinuitätsgleichung

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

Ladungserhaltung:

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

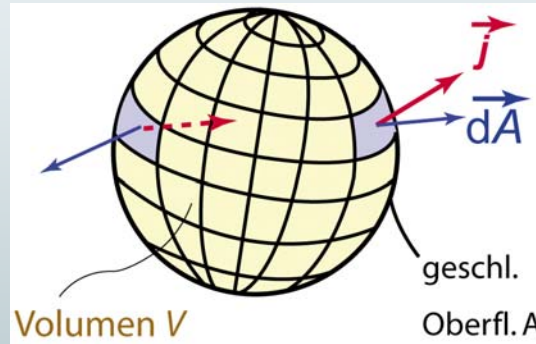
[und umgekehrt]

© R. Girwidz

8

## 2.1 Bewegung von Ladungsträgern

- Kontinuitätsgleichung



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

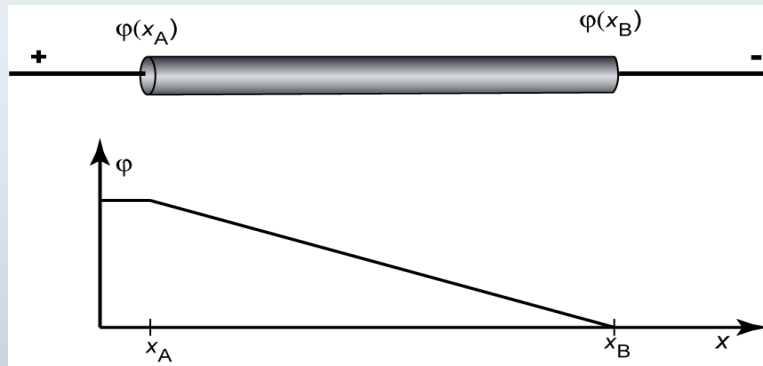
$$\oint \vec{j} \cdot d\vec{A} = \frac{d}{dt} Q$$

$$\oint \vec{j} \cdot d\vec{A} = \frac{d}{dt} \int_{V(A)} \rho_e dV$$

## 2.2 Elektrischer Widerstand, Ohmsches Gesetz



## 2.2 Elektrischer Widerstand, Ohmsches Gesetz



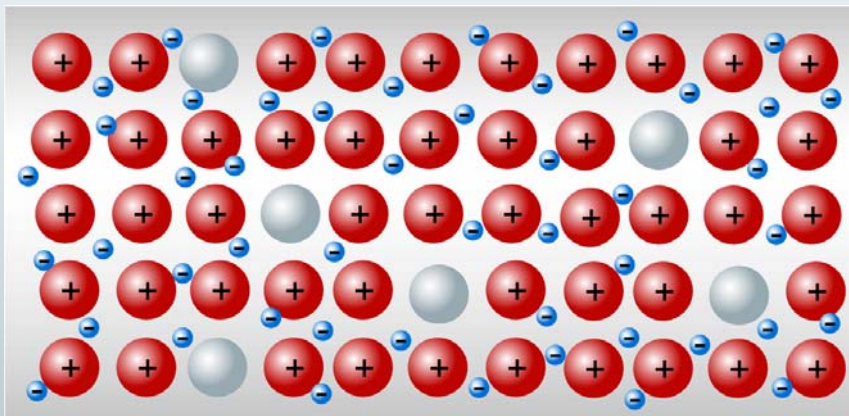
- Spannungsabfall am Draht  
Potentialdifferenz / E-Feld Ursache für Stromfluss

- Allg.:  $I = f(U)$

- Def.: Elektrischer Widerstand:

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

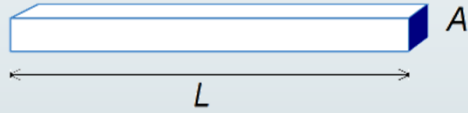
## 2.2 Elektrischer Widerstand, Ohmsches Gesetz



- Bildanalogie

## 2.2 Elektrischer Widerstand, Ohmsches Gesetz

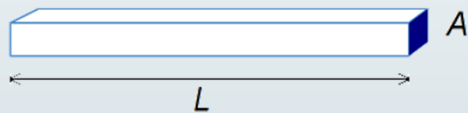
### Homogene Leiter



Widerstand $R(\Omega)$	Leitwert $G$ (S: Siemens)
Spezifischer Widerstand $\rho$	Leitfähigkeit $\sigma := \frac{1}{\rho}$

## 2.2 Elektrischer Widerstand, Ohmsches Gesetz

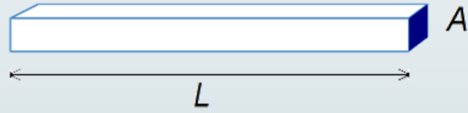
### Homogene Leiter



Doppelter Durchmesser ergibt vierfache Querschnittsfläche

## 2.2 Elektrischer Widerstand, Ohmsches Gesetz

### 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 $\sigma := \frac{1}{\rho}$
$[\rho] = \frac{\Omega m^2}{m} = \Omega m$	$[\sigma] = \Omega^{-1} m^{-1}$

## 2.2 Elektrischer Widerstand, Ohmsches Gesetz

### Spezifischer Widerstand (Resistivität) ausgewählter Materialien

( $[\rho]$  in  $\Omega m$ ):

Silber	Me	$1,47 \cdot 10^{-8}$
Kupfer	Me	$1,72 \cdot 10^{-8}$
Konstantan	Me	$4,9 \cdot 10^{-7}$
Kohle	HL	$3,5 \cdot 10^{-5}$
Germanium	HL	$6,0 \cdot 10^{-1}$
Silizium	HL	$2,3 \cdot 10^3$
Bernstein	I	$5,0 \cdot 10^{14}$
Teflon	I	$> 10^{13}$
Holz	I	$10^8 \dots 10^{11}$
Glas	I	$10^{10} \dots 10^{15}$
Blut	$I_0$	1,6
Muskeln	$I_0$	2,0
Fettgewebe	$I_0$	33

Me : Metall  
 HL : Halbleiter  
 I : Isolator  
 $I_0$  : Ionenleiter



## 2.2 Elektrischer Widerstand, Ohmsches Gesetz

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

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

$$I = \frac{U \cdot A}{\rho \cdot L} = A \cdot \frac{1}{\rho} \cdot \frac{U}{L}$$

$$I = A \cdot \sigma \cdot E$$

Stromdichte:  $\vec{j} = \sigma \vec{E}$

## 2.2 Elektrischer Widerstand, Ohmsches Gesetz

Beispiel: Cu-Draht

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

$$R =$$

## 2.2 Elektrischer Widerstand, Ohmsches Gesetz

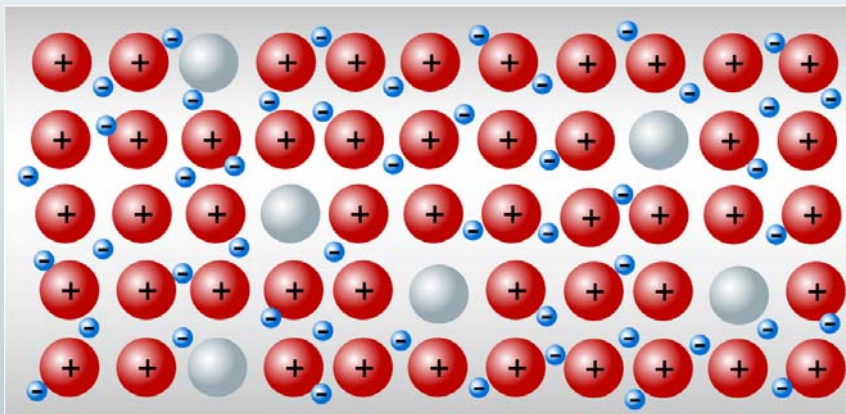
Beispiel: Cu-Draht

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

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A};$$

$$R = 1,72 \cdot 10^{-8} \frac{\text{V}}{\text{A}} \text{m} \cdot \frac{100 \text{ m}}{10^{-5} \text{ m}^2} = 0,172 \Omega$$

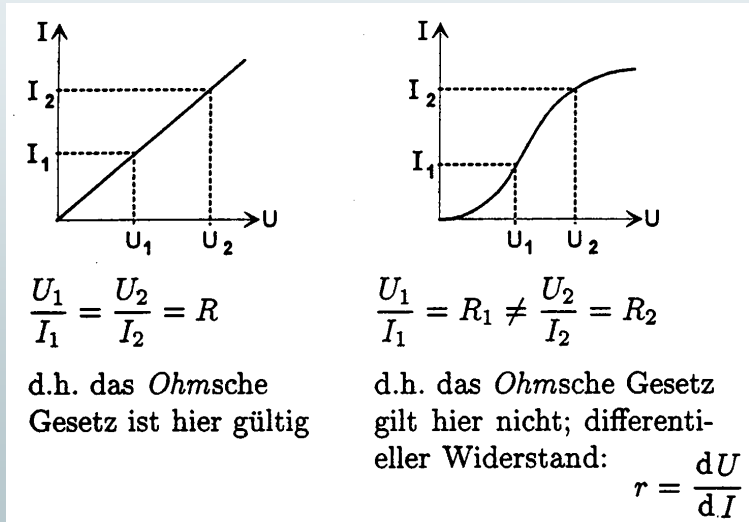
## 2.2 Elektrischer Widerstand, Ohmsches Gesetz



■ Bildanalogie

## 2.2 Elektrischer Widerstand, Ohmsches Gesetz

- Zum Gültigkeitsbereich des Ohmschen Gesetzes und differentieller Widerstand



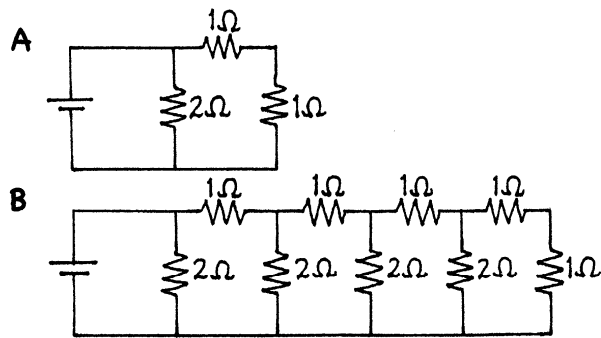
## 2.2 Elektrischer Widerstand, Ohmsches Gesetz

- Bildanalogie Gefahren und Grenzen



## 2.3 Einfache Gleichstromkreise

### Widerstände

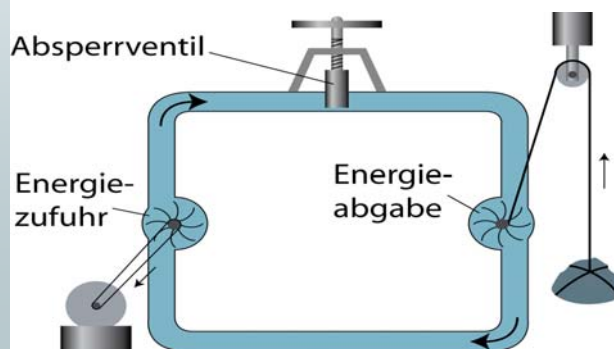
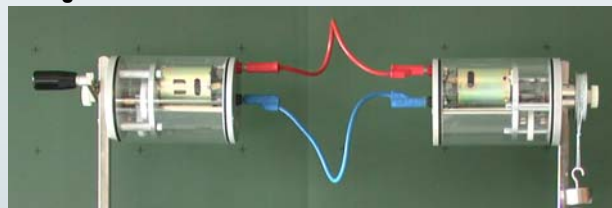


Which of these circuits draws the most current?

- a) Circuit A.
- b) Circuit B.
- c) Both the same.

## 2.3 Einfache Gleichstromkreise

### Elektrische Arbeit / Leistung



## 2.3 Einfache Gleichstromkreise

### ▣ Elektrische Leistung / Wärmeleistung

$$P = \frac{W}{t} = \frac{Q \cdot U}{t} = I \cdot U = I^2 \cdot R = \frac{U^2}{R}$$

$$[P] = A \cdot V = 1W \text{ (Watt)}$$

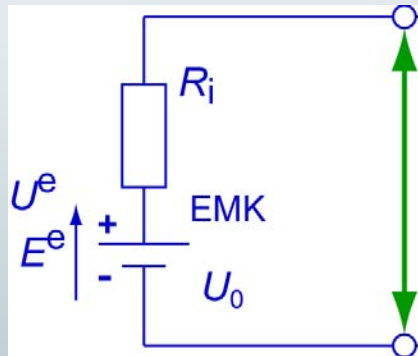
In einem Ohm'schen Widerstand  
wird die gesamte elektrische Leistung in Wärme umgesetzt.

## 2.3 Einfache Gleichstromkreise

### ▣ Modell für reale Spannungsquellen (Klemmenspannung, Leerlaufspannung, EMK, eingeprengte Spannung, eingeprengtes Feld)

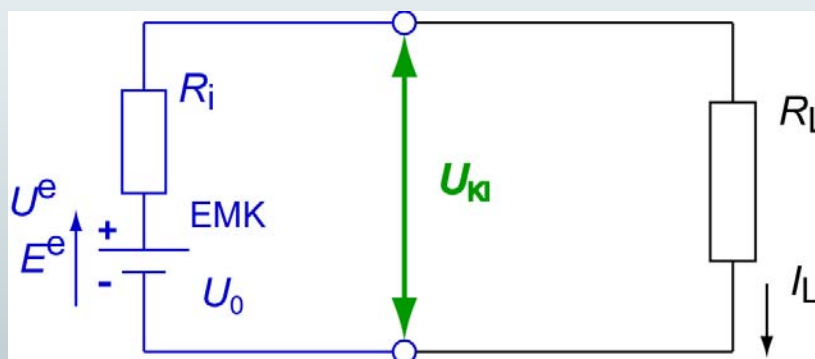
## 2.3 Einfache Gleichstromkreise

- Modell für reale Spannungsquellen  
(Klemmenspannung, Leerlaufspannung, EMK, eingepögte Spannung, eingepögted Feld)



## 2.3 Einfache Gleichstromkreise

- Modell für reale Spannungsquellen  
(Klemmenspannung, Leerlaufspannung, EMK, eingepögte Spannung, eingepögted Feld)



- Innenwiderstand realer Spannungsquellen
- Leistungsanpassung (siehe Zusatzrechnung)

## 2.4 Verzweigte Stromkreise

- Leistungsanpassung (Maximalleistung) bei realer Quelle

$$P = U_K \cdot I_L$$
$$= \frac{U_0}{1 + \frac{R_i}{R_L}} \cdot \frac{U_0}{R_i + R_L} = U_0^2 \frac{R_L}{(R_i + R_L)^2}$$

Extremwert?

$$\frac{dP}{dR_L} \stackrel{!}{=} 0$$

Quotientenregel:  $\frac{d}{dx} \left( \frac{u}{v} \right) \rightarrow \frac{u'v - v'u}{v^2}$

$$P = U_K \cdot I_L = U_0^2 \frac{R_L}{(R_i + R_L)^2}$$

$$\frac{dP}{dR_L} = U_0^2 \frac{(R_i + R_L)^2 - 2(R_i + R_L) \cdot R_L}{(R_i + R_L)^4} \stackrel{!}{=} 0$$

$$R_i + R_L - 2R_L = 0$$

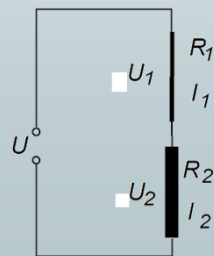
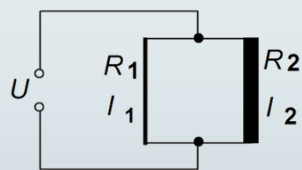
$$\Rightarrow R_i = R_L$$

$$P_{\max} = \frac{U_0^2}{4R_i} = \frac{U_0^2}{4R_v}$$

Gleiche Leistung an  $R_i$  und  $R_v$   
! Thermische Belastung der Quelle !

### 2.3 Einfache Gleichstromkreise

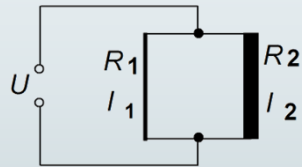
- Anwendung: Experiment mit dicken und dünnen Drähten





## 2.3 Einfache Gleichstromkreise

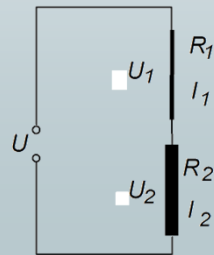
- Anwendung: Experiment mit dicken und dünnen Drähten



$$R_1 > R_2$$

dünn                      dick

$$U_1 = U_2 = U$$

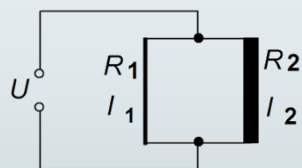


© R. Girwidz

33

## 2.3 Einfache Gleichstromkreise

- Anwendung: Experiment mit dicken und dünnen Drähten



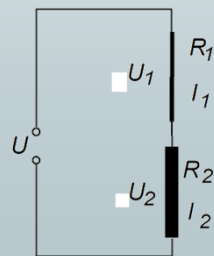
$$R_1 > R_2$$

dünn                      dick

$$U_1 = U_2 = U$$

$$I_1 < I_2$$

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

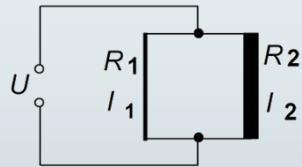


© R. Girwidz

34

## 2.3 Einfache Gleichstromkreise

- Anwendung: Experiment mit dicken und dünnen Drähten



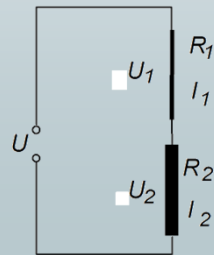
$$R_1 > R_2$$

dünn                  dick

$$U_1 = U_2 = U$$

$$I_1 < I_2$$

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



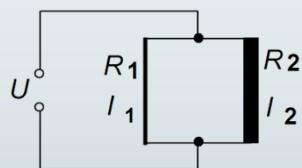
$$I_1 = I_2 = I$$

© R. Girwidz

35

## 2.3 Einfache Gleichstromkreise

- Anwendung: Experiment mit dicken und dünnen Drähten



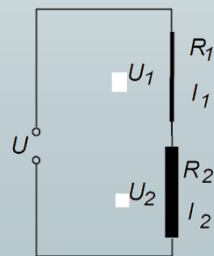
$$R_1 > R_2$$

dünn                  dick

$$U_1 = U_2 = U$$

$$I_1 < I_2$$

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



$$I_1 = I_2 = I$$

$$U_1 > U_2$$

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

© R. Girwidz

36

## 2.3 Einfache Gleichstromkreise

- Berechnung zu Verlusten in Hochspannungsleitungen

## 2.3 Einfache Gleichstromkreise

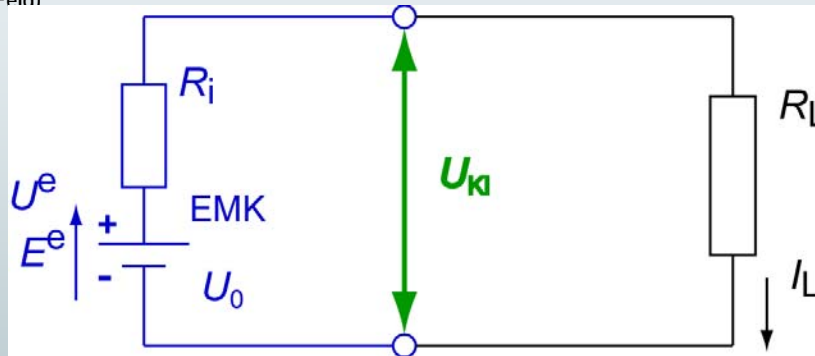
- Verbrauchswerte moderner Haushaltsgeräte

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) 95°C	1,65 kWh	ca. 0,61 €
Kochwäsche 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

## 2.3 Einfache Gleichstromkreise

- Modell für reale Spannungsquellen  
(Klemmenspannung, Leerlaufspannung, EMK, eingepreiste Spannung, eingepreistes Feld)



- Innenwiderstand realer Spannungsquellen

## 2.4 Verzweigte Stromkreise

- Leistungsanpassung (Maximalleistung) bei realer Quelle

$$P = U_K \cdot I_L$$
$$= \frac{U_0}{1 + \frac{R_i}{R_L}} \cdot \frac{U_0}{R_i + R_L} = U_0^2 \frac{R_L}{(R_i + R_L)^2}$$

Extremwert?

$$\frac{dP}{dR_L} \stackrel{!}{=} 0 \quad \text{Quotientenregel: } \frac{d}{dx} \left( \frac{u}{v} \right) \rightarrow \frac{u'v - v'u}{v^2}$$

$$P = U_K \cdot I_L = U_0^2 \frac{R_L}{(R_i + R_L)^2}$$

$$\frac{dP}{dR_L} = U_0^2 \frac{(R_i + R_L)^2 - 2(R_i + R_L) \cdot R_L}{(R_i + R_L)^4} \stackrel{!}{=} 0$$

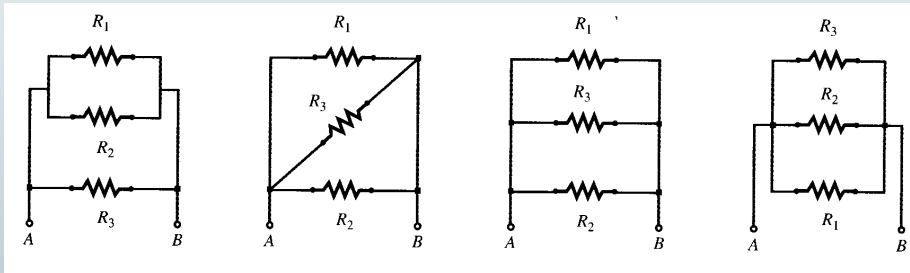
$$R_i + R_L - 2R_L = 0$$

$$\Rightarrow R_i = R_L$$

$$P_{\max} = \frac{U_0^2}{4R_i} = \frac{U_0^2}{4R_v}$$

Gleiche Leistung an  $R_i$  und  $R_v$   
! Thermische Belastung der Quelle !

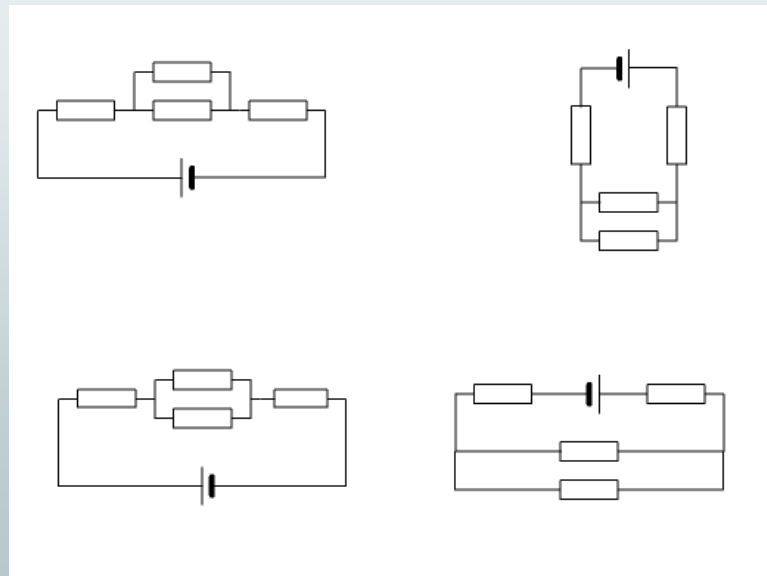
## 2.4 Verzweigte Stromkreise



© R. Girwidz

5

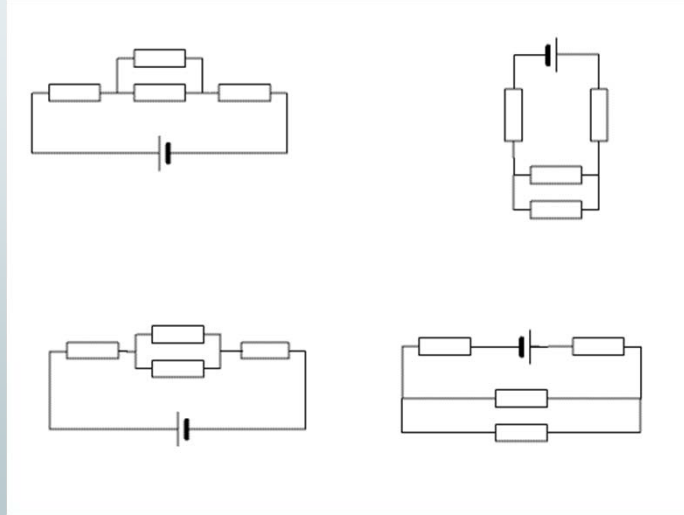
## 2.4 Verzweigte Stromkreise



© R. Girwidz

6

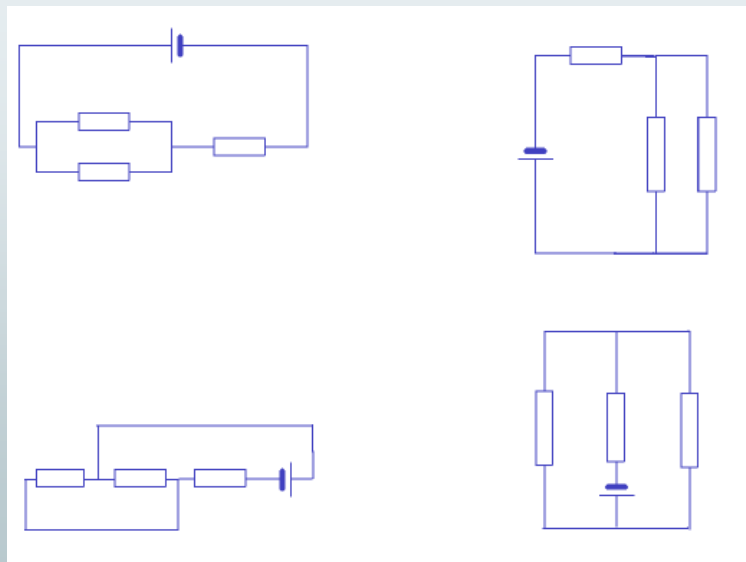
## 2.4 Verzweigte Stromkreise



© R. Girwidz

7

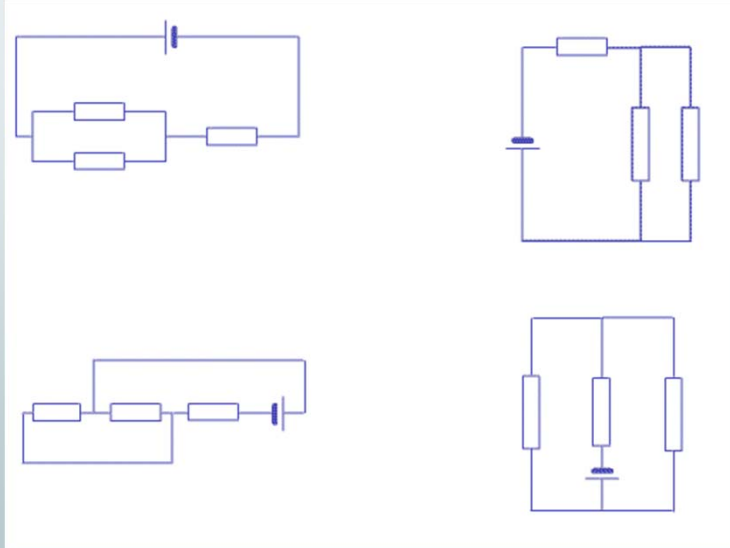
## 2.4 Verzweigte Stromkreise



© R. Girwidz

8

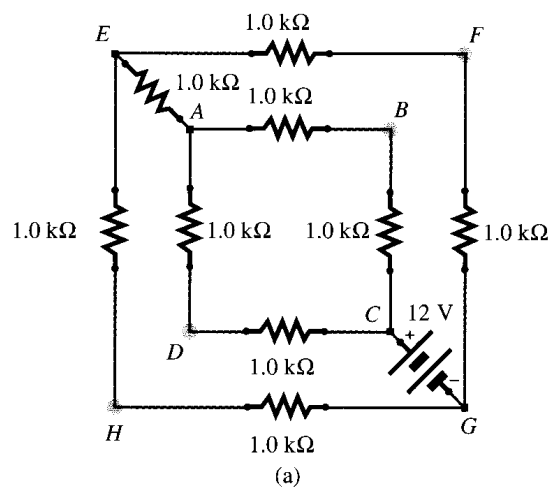
## 2.4 Verzweigte Stromkreise



© R. Girwidz

9

## 2.4 Verzweigte Stromkreise

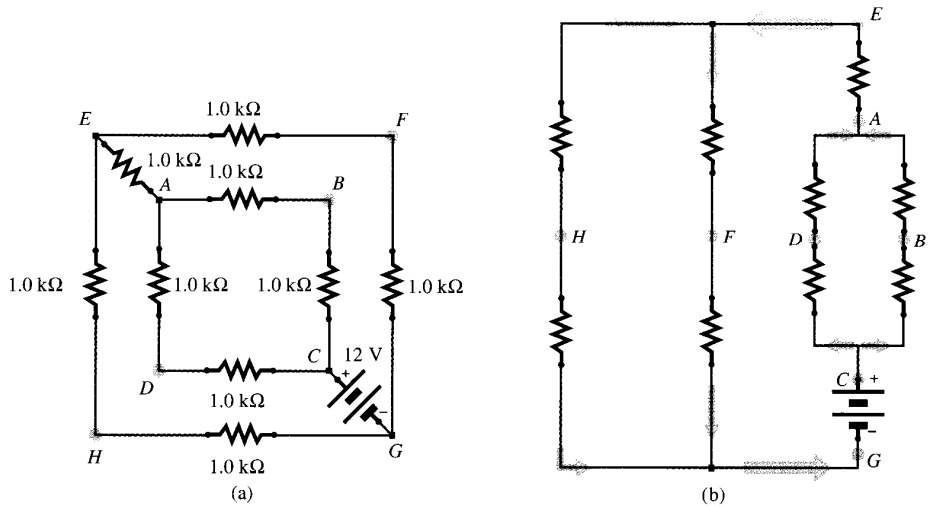


© R. Girwidz

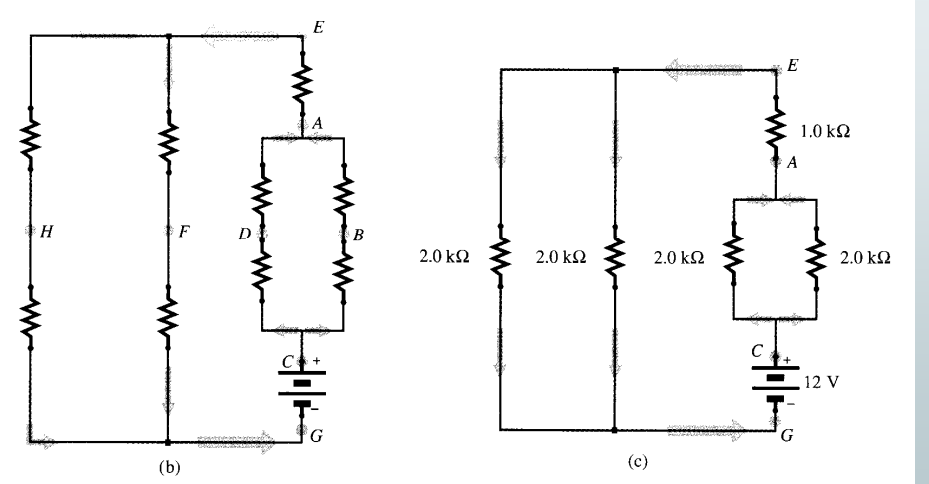
10



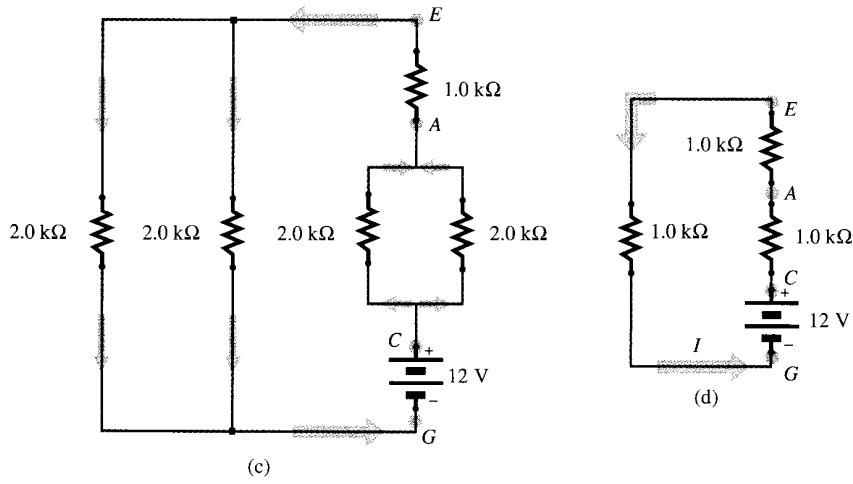
## 2.4 Verzweigte Stromkreise



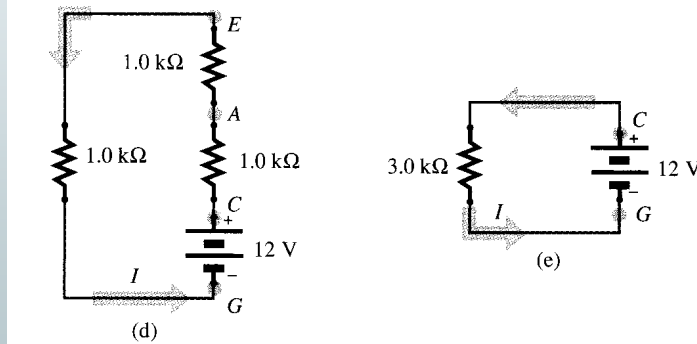
## 2.4 Verzweigte Stromkreise



## 2.4 Verzweigte Stromkreise

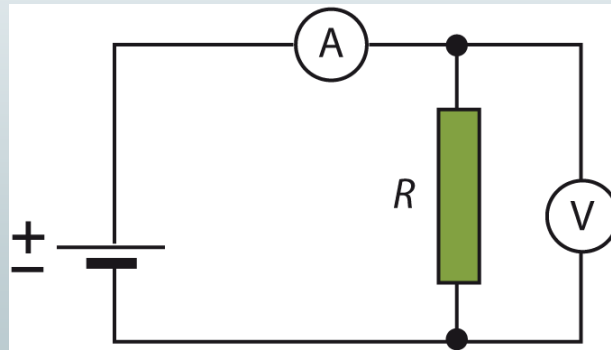


## 2.4 Verzweigte Stromkreise



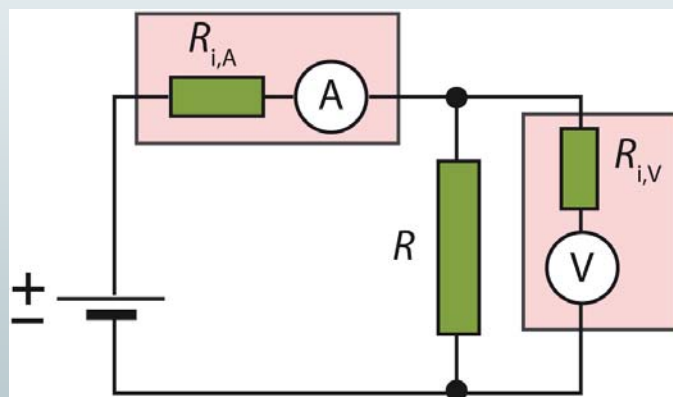
## 2.4 Verzweigte Stromkreise

Messung von Strom und Spannung für die Bestimmung von  $R$



## 2.4 Verzweigte Stromkreise

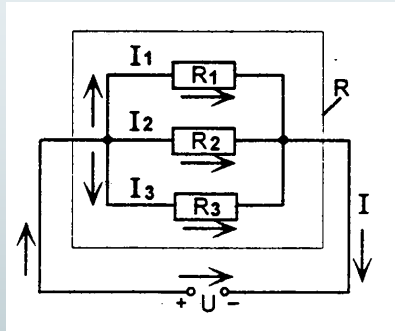
Messung von Strom und Spannung für die Bestimmung von  $R$



Der Wert ist nur akzeptabel, wenn  $R_{i,V}$  des Voltmeters sehr groß ist gegen  $R$

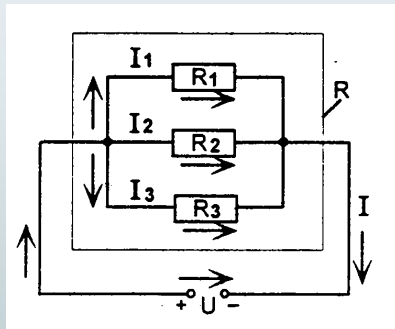
## 2.4 Verzweigte Stromkreise

- Parallelschaltung von Widerständen



## 2.4 Verzweigte Stromkreise

- Parallelschaltung von Widerständen



Knotenregel:

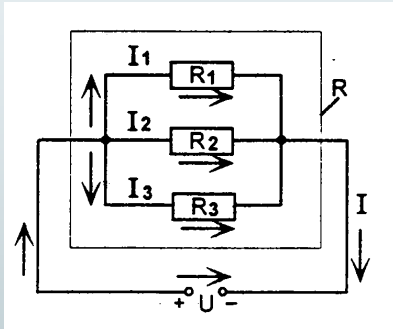
$$I = I_1 + I_2 + I_3 ;$$

Maschenregel:

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

## 2.4 Verzweigte Stromkreise

### 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:

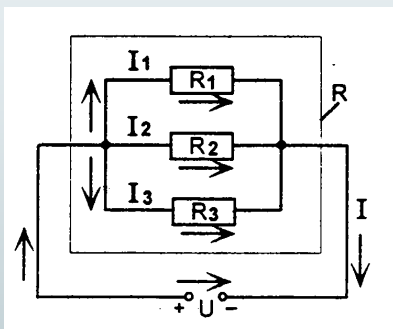
$$I_1 = \frac{U}{R_1} ; I_2 = \frac{U}{R_2} ; I_3 = \frac{U}{R_3} ;$$

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

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

## 2.4 Verzweigte Stromkreise

### 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:

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

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

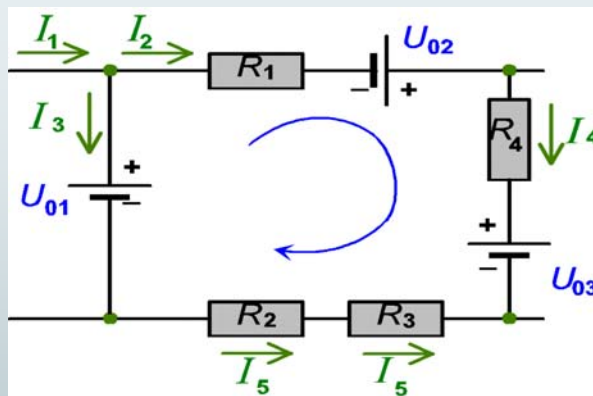
$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

Addition der Leitwerte :  $G = G_1 + G_2 + G_3 ;$

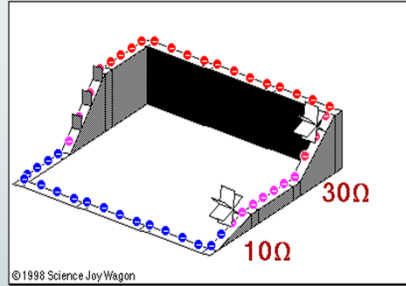
## 2.4 Verzweigte Stromkreise

Widerstandsnetze

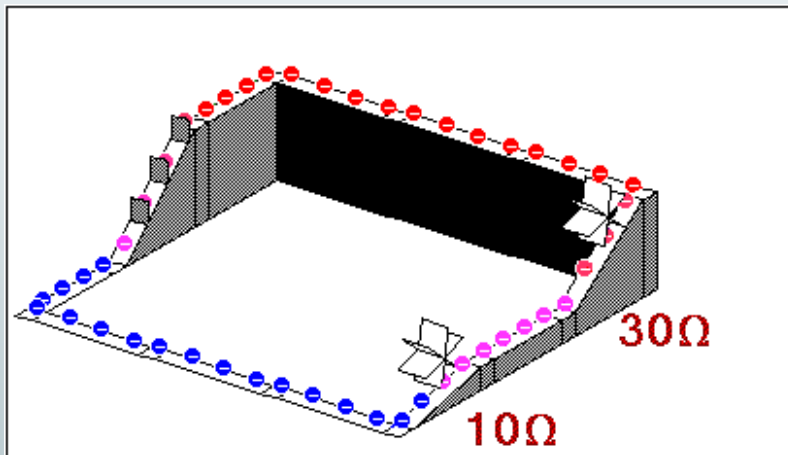
## 2.4 Verzweigte Stromkreise



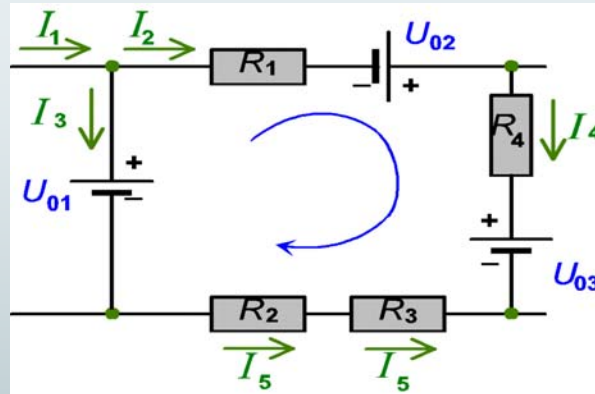
## 2.4 Verzweigte Stromkreise



## 2.4 Verzweigte Stromkreise



## 2.4 Verzweigte Stromkreise



- $\sum I_v = 0$ 
Knotenregel:
zufließend pos. zählen  
abfließend neg.

- $\sum_v U_{0v} + \sum_v R_v I_v = 0;$ 
Maschenregel:

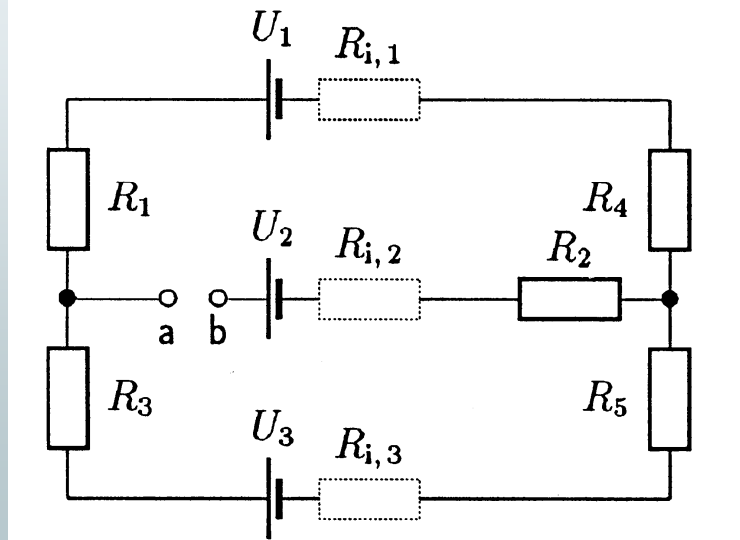
## 2.4 Verzweigte Stromkreise

- 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) ...



## 2.4 Verzweigte Stromkreise

- Berechnungen zu einem Gleichstromnetzwerk (Rechenübung)

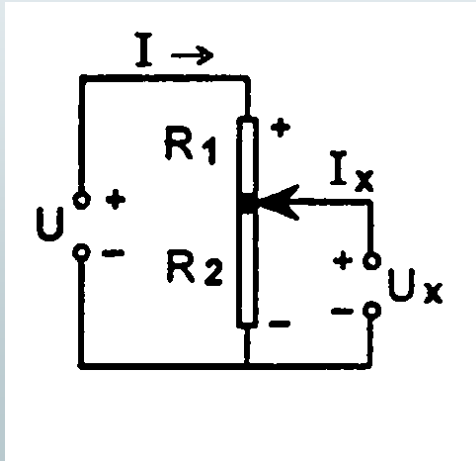


## 2.4 Verzweigte Stromkreise

Spezielle Schaltungen

## 2.4 Verzweigte Stromkreise

- Potentiometerschaltung (unbelastet) – "Spannungsteilung"

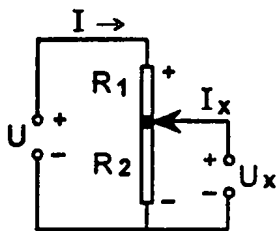


© R. Girwidz

29

## 2.4 Verzweigte Stromkreise

- Potentiometerschaltung (unbelastet) – "Spannungsteilung"



$$R = R_1 + R_2$$

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

$$U_x = I R_2 = U \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

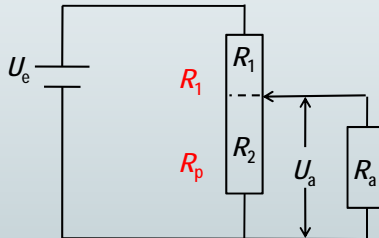
$$\text{falls } I_x \ll I$$

© R. Girwidz

30

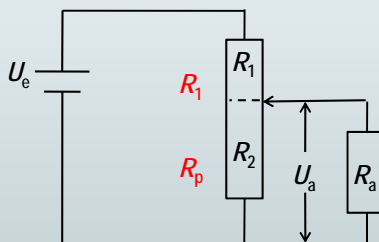
## 2.4 Verzweigte Stromkreise

### ■ Potentiometerschaltung



## 2.4 Verzweigte Stromkreise

### ■ Potentiometerschaltung



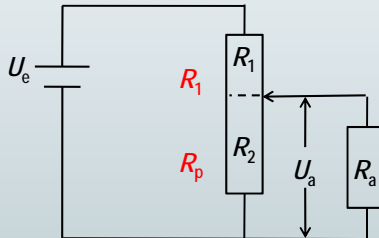
$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_a}$$

$$R_p = \frac{R_2 \cdot R_a}{R_2 + R_a}$$

$$U_a = U_0 \cdot \frac{R_p}{R_p + R_1}$$

## 2.4 Verzweigte Stromkreise

### ■ Potentiometerschaltung



$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_a}$$

$$R_p = \frac{R_2 \cdot R_a}{R_2 + R_a}$$

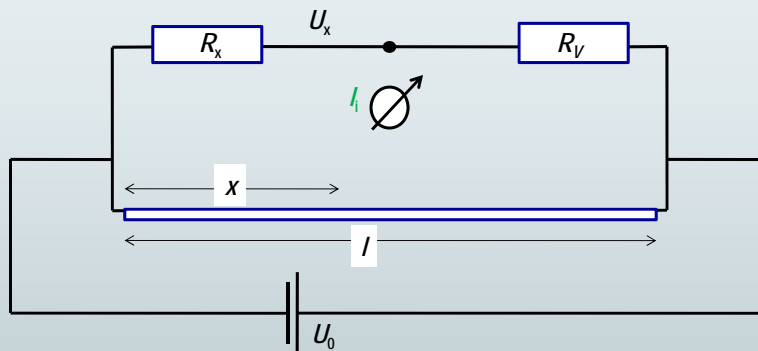
$$U_a = U_0 \cdot \frac{R_p}{R_p + R_1}$$

Potentiometerschaltung unter Last – siehe Übung

$$\text{Grenzfall: } R_a \gg R_2 \Rightarrow R_p \approx R_2 \Rightarrow U_a = U_0 \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

## 2.4 Verzweigte Stromkreise

### ■ Wheatstonesche Brückenschaltung



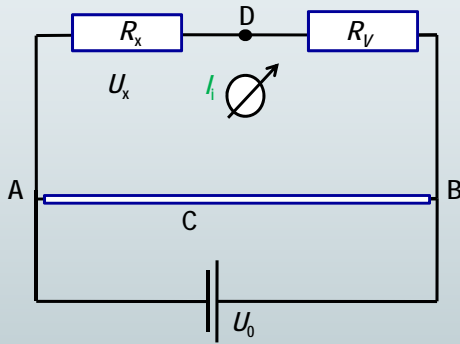
Der Abgriff wird so lange verschoben, bis durch den Brückenweig kein Strom mehr fließt.

Dann gilt:

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

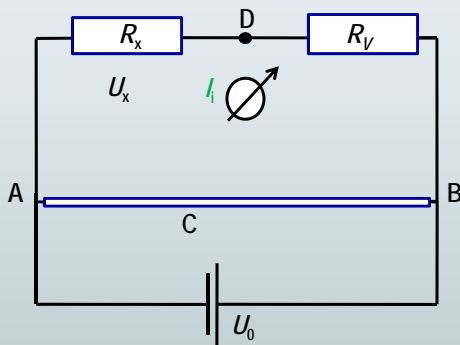
## 2.4 Verzweigte Stromkreise

- Wheatstonesche Brückenschaltung



## 2.4 Verzweigte Stromkreise

- Wheatstonesche Brückenschaltung



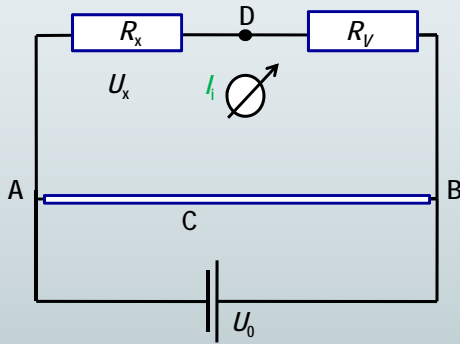
Knotenregel bei A:  $I = I_1 + I_x$

$$D: I_x = I_v$$

$$C: I_1 = I_2$$

## 2.4 Verzweigte Stromkreise

### Wheatstonesche Brückenschaltung



Knotenregel bei A:  $I = I_1 + I_x$   
 D:  $I_x = I_V$   
 C:  $I_1 = I_2$

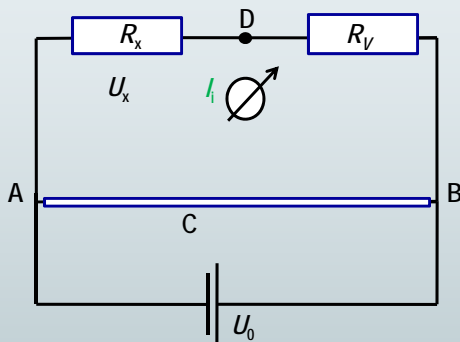
aus  $U_x = U_1$  folgt:  $I_x R_x = I_1 R_1$

aus  $U_V = U_2$  folgt:  $I_V R_V = I_2 R_2$

$$\Rightarrow \frac{I_x R_x}{I_V R_V} = \frac{I_1 R_1}{I_2 R_2}$$

## 2.4 Verzweigte Stromkreise

### Wheatstonesche Brückenschaltung



Knotenregel bei A:  $I = I_1 + I_x$   
 D:  $I_x = I_V$   
 C:  $I_1 = I_2$

aus  $U_x = U_1$  folgt:  $I_x R_x = I_1 R_1$

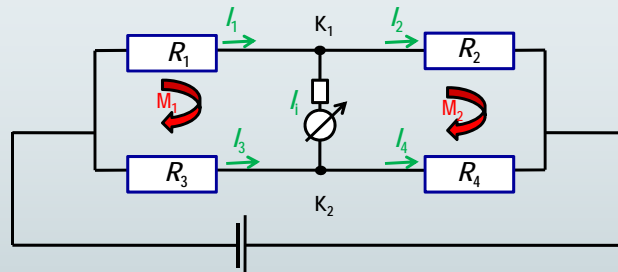
aus  $U_V = U_2$  folgt:  $I_V R_V = I_2 R_2$

$$\Rightarrow \frac{I_x R_x}{I_V R_V} = \frac{I_1 R_1}{I_2 R_2}$$

$$R_x = R_V \frac{R_1}{R_2} = R_V \frac{I_1}{I_2}$$

## 2.4 Verzweigte Stromkreise

- Wheatstonesche Brückenschaltung



$$K_1: I_1 = I_2 + I_i$$

$$K_2: I_3 + I_i = I_4$$

$$M_1: -R_1 I_1 - R_i I_i + R_3 I_3 = 0$$

$$M_2: -R_2 I_2 + R_4 I_4 + R_i I_i = 0$$

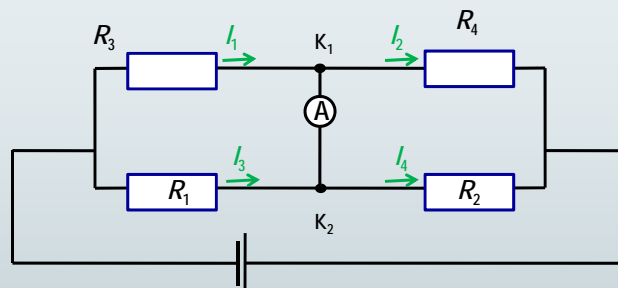
$$\text{Abgleich: } I_i = 0$$

$$R_3 I_3 = R_1 I_1; \quad R_4 I_4 = R_2 I_2;$$

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

## 2.4 Verzweigte Stromkreise

- Wheatstonesche Brückenschaltung



## 2.5 Strom in Flüssigkeiten

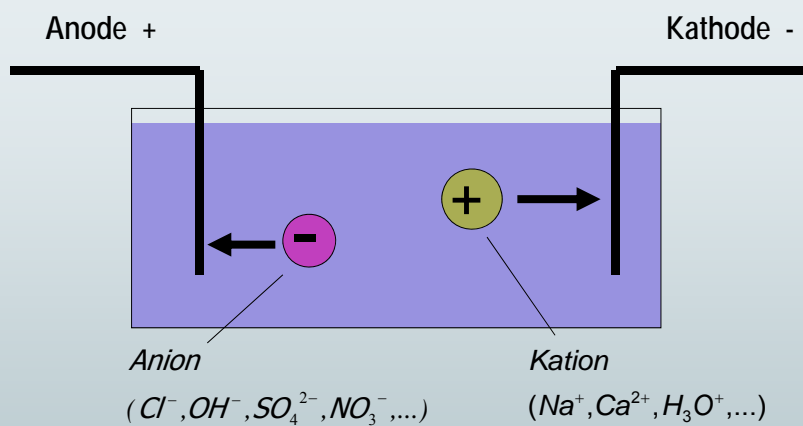
### Leitungsversuche:

- Destilliertes Wasser
- Leitungswasser
- NaCl im Wasser

### Abhängigkeiten:

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

## 2.5 Strom in Flüssigkeiten



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



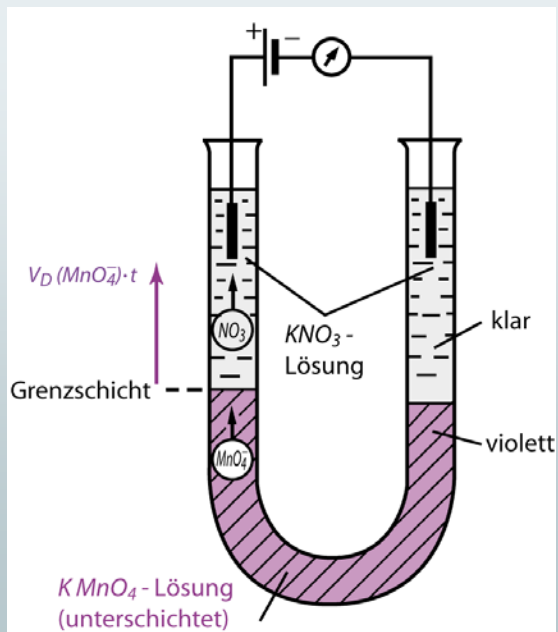
## 2.5 Strom in Flüssigkeiten

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	$\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$

temperaturabhängig !

## 2.5 Strom in Flüssigkeiten



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

## 2.5 Strom in Flüssigkeiten

### ■ Ladungsträger und Beweglichkeit - Beschreibungsgrößen

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

$j = q \cdot n \cdot v_D$ ;  $v_D$  : mittl. Driftgeschw.

$j = \sigma \cdot E$ ;  $\sigma$  : Leitfähigkeit

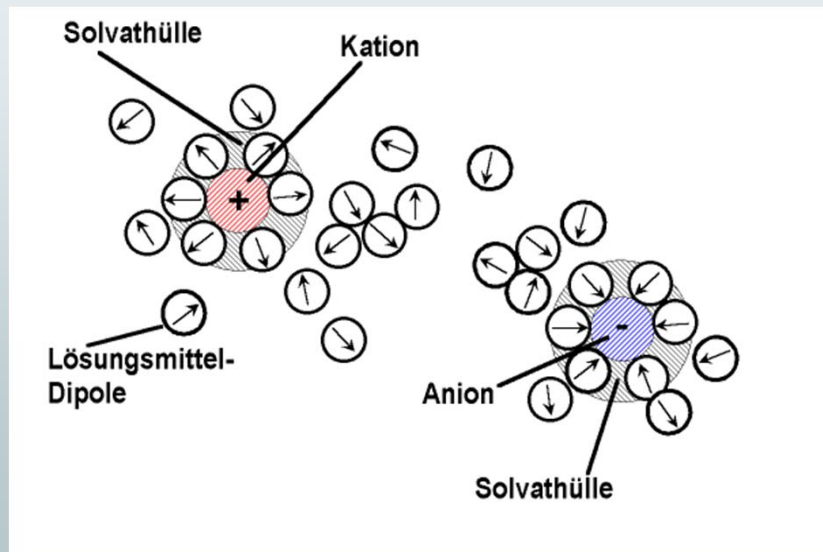
$v_D = u \cdot E$ ;  $u$  : Ladungsträgerbeweglichkeit

$\sigma = q \cdot n \cdot u = z \cdot e \cdot n \cdot u$ ;  $z$  : Wertigkeit der Ionen

$\sigma = e \cdot (n_+ \cdot z_+ \cdot u_+ + n_- \cdot z_- \cdot u_-)$ ;

## 2.5 Strom in Flüssigkeiten

### ■ Solvathülle



## 2.5 Strom in Flüssigkeiten

### ■ Exkurs: Die STOFFMENGE (SI-Größe)

Ein Maß für die Anzahl atomarer / molekularer Teilchen.

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

## 2.5 Strom in Flüssigkeiten

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)  $M$ :

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

## 2.5 Strom in Flüssigkeiten

Masse  $m$  und molare Masse  $M$ :

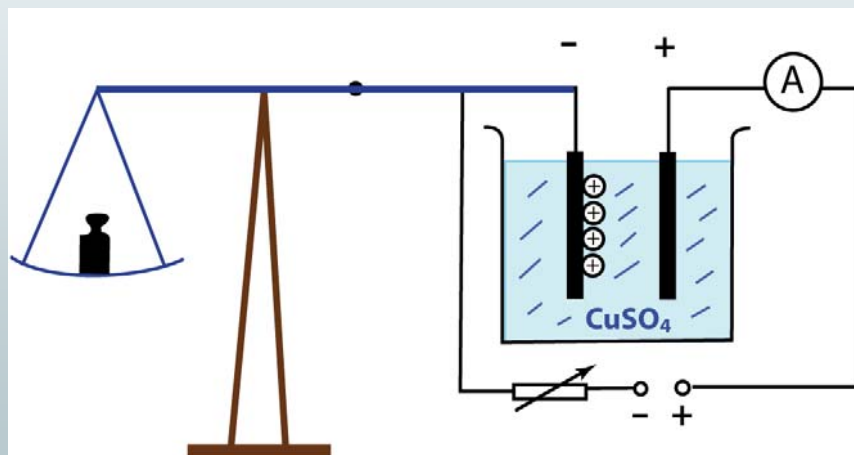
$$m = n \cdot M \quad \text{oder} \quad n = \frac{m}{M}$$

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 <sub>2</sub> :	$n = 0.23 \text{ mol}$ ,	da $M = 44.01 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$
10 g N <sub>2</sub> :	$n = 0.36 \text{ mol}$ ,	da $M = 28.134 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$

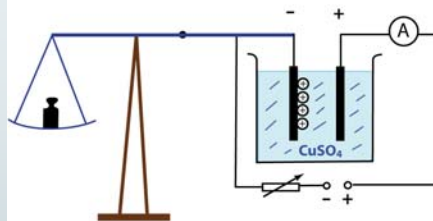
## 2.5 Strom in Flüssigkeiten

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



## 2.5 Strom in Flüssigkeiten

- Bei der Elektrolyse wird Materie transportiert



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

- Zusammenhang zwischen abgeschiedener Masse und transportierter Ladung:  $m \propto q$

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

## 2.5 Strom in Flüssigkeiten

- Faradaysche Gesetze

- Die abgeschiedene Masse ist proportional zu der transportierten Ladung.

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

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

$$F = e \cdot N_A$$

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

## 2.5 Strom in Flüssigkeiten

### 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:

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

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

Elektrochemisches Äquivalent

$$\frac{m_1}{m_2} \Big|_q = \frac{\alpha_1}{\alpha_2}$$

## 2.5 Strom in Flüssigkeiten

Das elektrochemische Äquivalent  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{m}{q} = \frac{m_{\text{Ion}}}{z \cdot e} = \frac{M}{z \cdot F}$$

Unser Experiment:  $\alpha_{\text{exp}} = 0.32 \frac{\text{mg}}{\text{C}}$

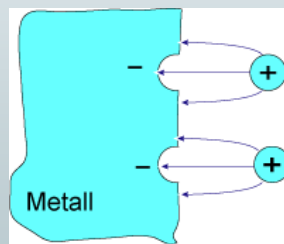
mit:  $M_m = 63.54 \text{ g/mol};$   
 $z = 2; F = 9,6485 \cdot 10^7 \text{ C kmol}^{-1};$

theoretisch:  $\alpha_{\text{theor}} = \frac{63.54 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{2 \cdot 9,6485 \cdot 10^7 \text{ C kmol}^{-1}}$   
 $= 0.33 \frac{\text{mg}}{\text{C}}$

## 2.5 Strom in Flüssigkeiten

### ■ Elektrochemische Spannungsquellen

Warum treten Polarisationsspannungen auf?



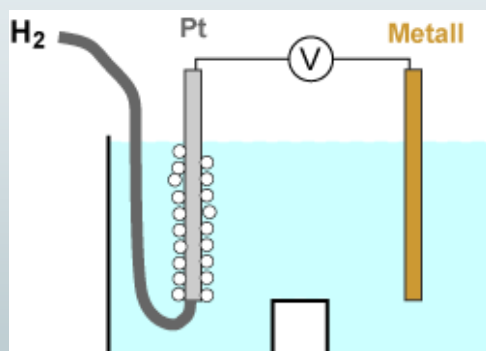
Aus der Metalloberfläche treten positive Metallionen in den Elektrolyt aus,

bis das entstehende elektrische Feld einen weiteren Austausch verhindert.

Es entsteht eine elektrische Doppelschicht mit einer materialtypischen Potentialdifferenz.

## 2.5 Strom in Flüssigkeiten

### ■ 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

## 2.5 Strom in Flüssigkeiten

- Messung der elektrochemischen Spannungsreihe

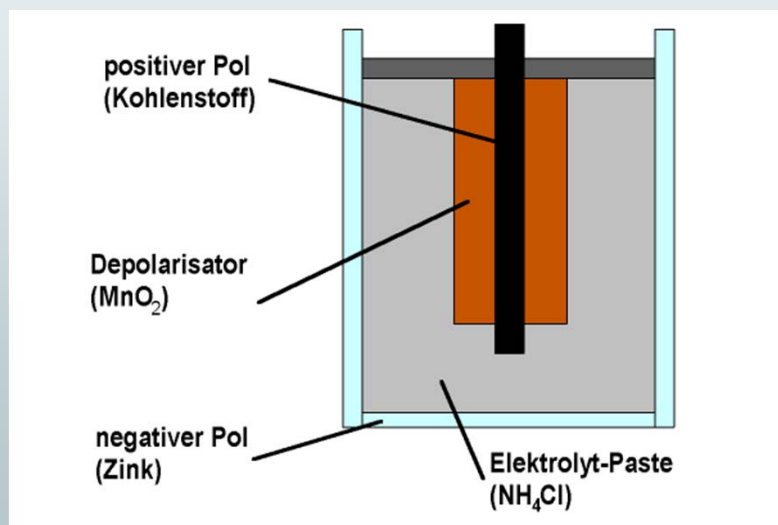
Fruchtbatterie

Metall	Pot. (in V)
Li/Li <sup>+</sup>	3,02
Na/Na <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

Die EMK ist aus der Differenz der Standardpotentiale bestimmbar.

## 2.5 Strom in Flüssigkeiten

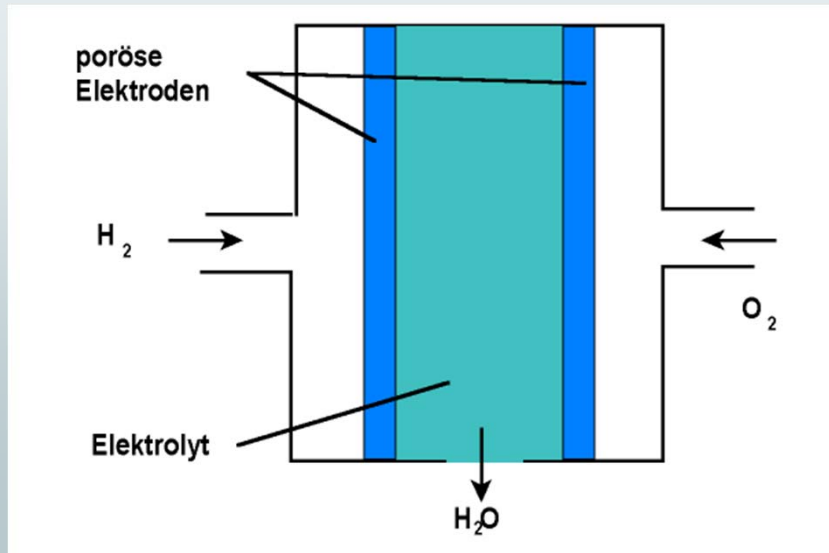
- Leclanché-Element / Zink-Kohle-Batterie





## 2.5 Strom in Flüssigkeiten

### ■ Brennstoffzelle

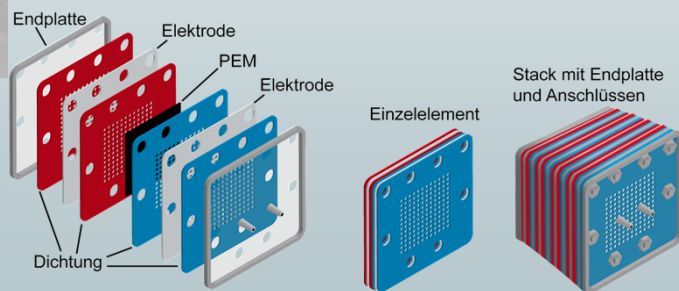


© R. Girwidz

19

## 2.5 Strom in Flüssigkeiten

### PEM-Brennstoffzelle (Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzelle)

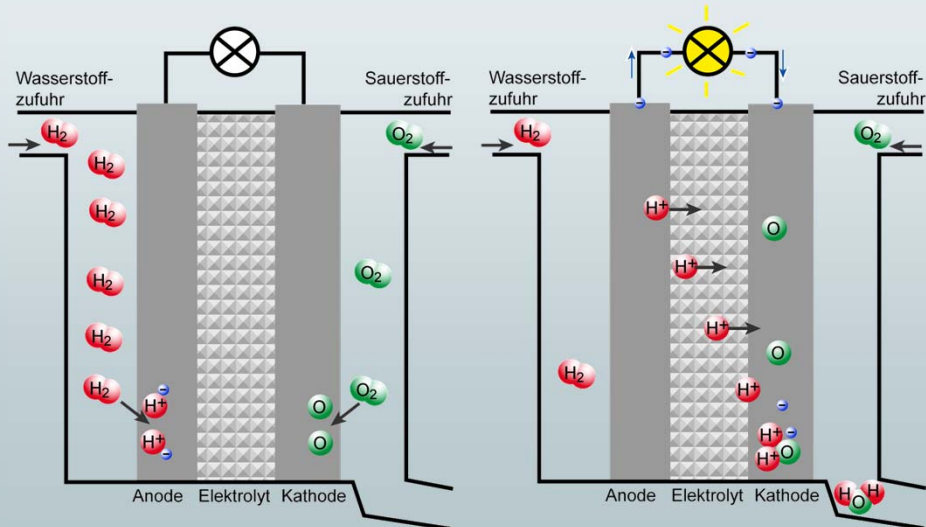


© R. Girwidz

20

## 2.5 Strom in Flüssigkeiten

PEM-Brennstoffzelle (Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzelle)

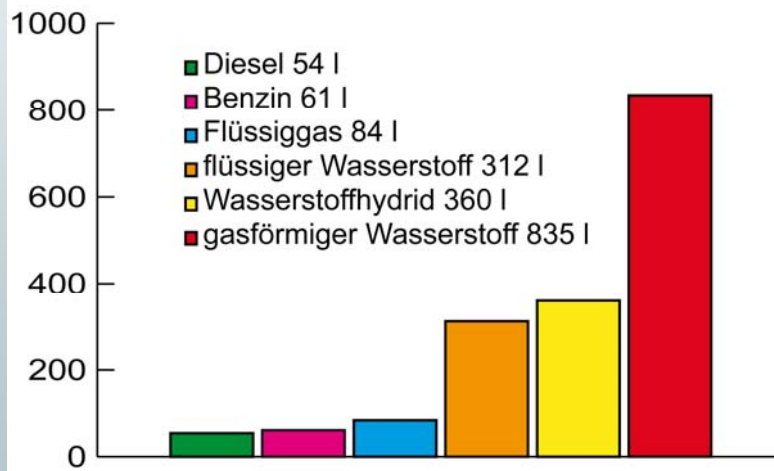


© R. Girwidz

21

## 2.5 Strom in Flüssigkeiten

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

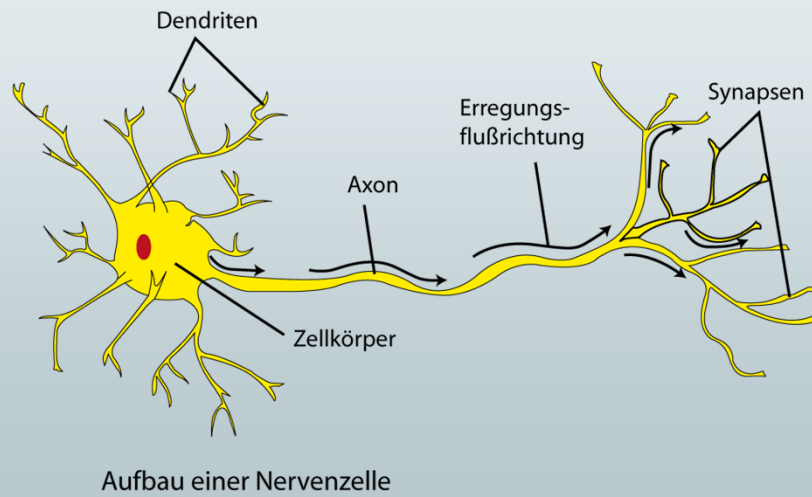


© R. Girwidz

22

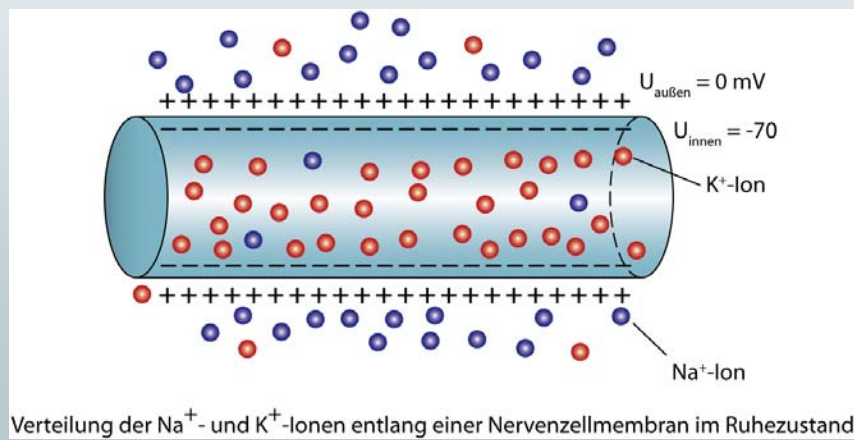
## 2.5 Strom in Flüssigkeiten

### ■ Elektrizität bei Nervenzellen



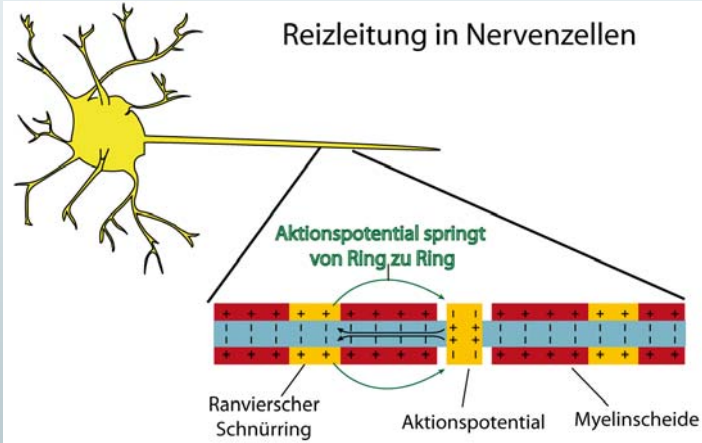
## 2.5 Strom in Flüssigkeiten

### ■ Elektrizität bei Nervenzellen



## 2.5 Strom in Flüssigkeiten

### Elektrizität bei Nervenzellen



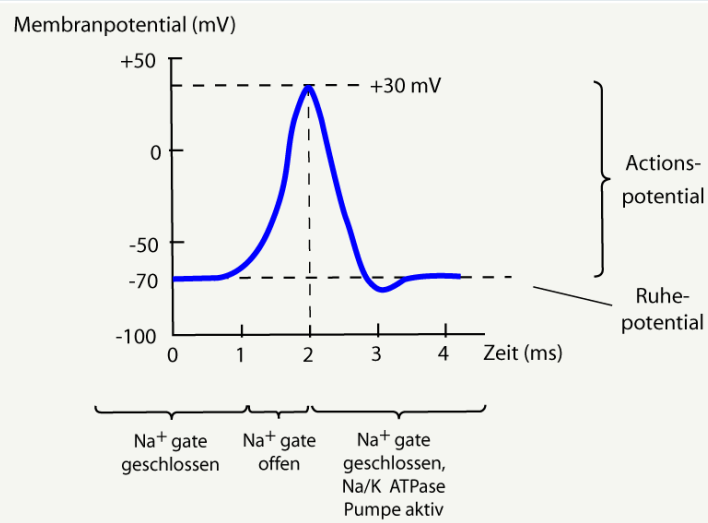
Ein Aktionspotential in einem myelinisierten Axon springt von Schnürring zu Schnürring. Dadurch wird die Reizleitung enorm beschleunigt. Dies ist ein großer Unterschied zur Reizleitung in einem normalen Axon.

© R. Girwidz

25

## 2.5 Strom in Flüssigkeiten

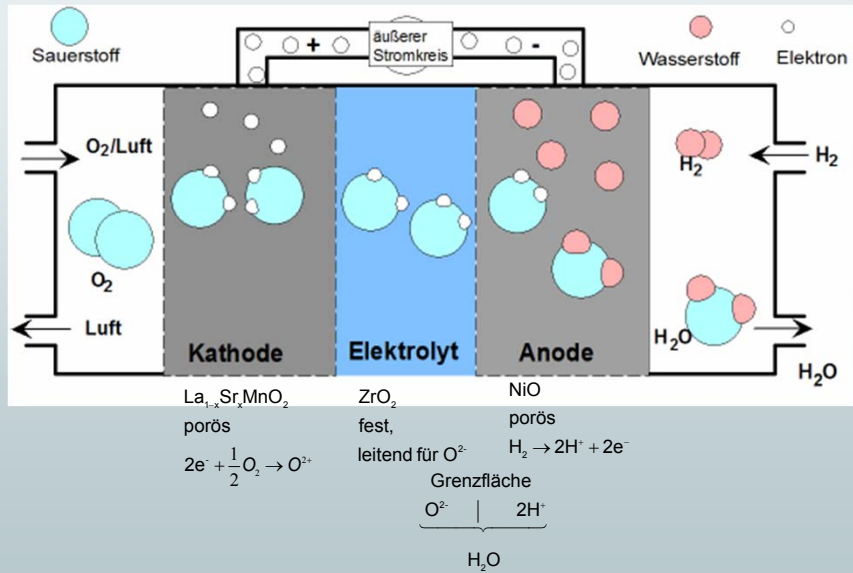
### Elektrizität bei Nervenzellen



© R. Girwidz

26

## 2.5 Strom in Flüssigkeiten



Prinzip einer Festkeramik-Hochtemperatur Brennstoffzelle (nach W. Gajewski)

## 2.6 Strom im Vakuum und in Gasen

Strom im Vakuum  
und in Gasen

## 2.6 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)

## 2.6 Strom im Vakuum und in Gasen

### A) Unselbständige Entladung

Ladungsträger werden durch externe Prozesse erzeugt

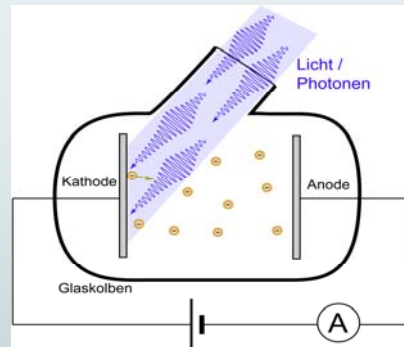
Arten der Ionisation

- Volumenionisation - erfolgt in einem Raumbereich
  - Röntgenstrahlung, radioakt. Strahlung
  - Flamme / TemperaturionisationBeispiele: Zählrohr, Ionisationskammer

- Oberflächenionisation - erfolgt an Oberflächen
  - Lichtelektrischer Effekt
  - Glühemission
  - FeldemissionBeispiel: Feldelektronenmikroskop

## 2.6 Strom im Vakuum und in Gasen

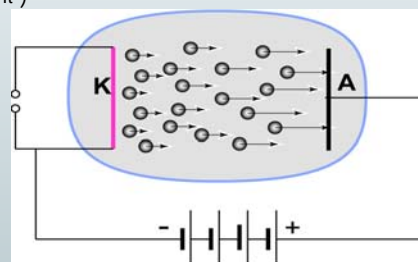
- A) Unselbständige Entladung
- a) Photoeffekt  
(lichtelektrischer Effekt)



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

## 2.6 Strom im Vakuum und in Gasen

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



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

Richardson-Gleichung für die Stromdichte

k: Boltzmannkonstante

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

## 2.6 Strom im Vakuum und in Gasen

### A) Unselbständige Entladung

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

Beispiele:

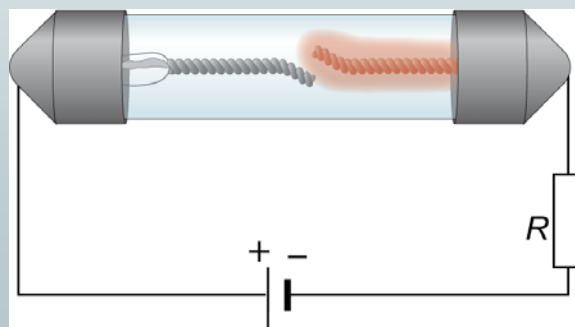
Corona-Entladung an Hochspannungsleitungen  $> 110 \text{ kV}$  (Knistern), Elmsfeuer, Blitzableiter

## 2.6 Strom im Vakuum und in Gasen

### B) Selbständige Entladung

Ladungsträger sorgen selbst durch Stoßionisation für Ersatz

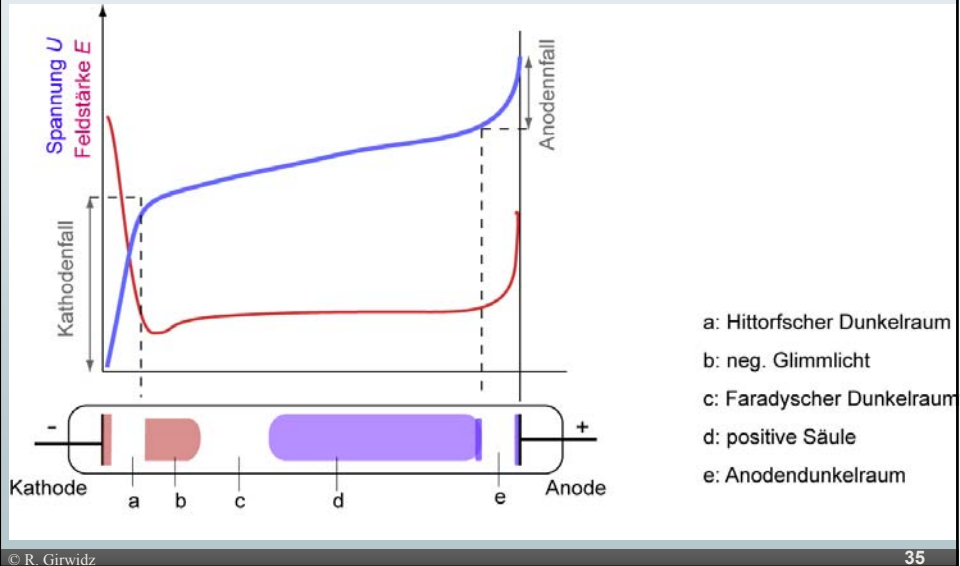
Beispiel: Glimmentladung





## 2.6 Strom im Vakuum und in Gasen

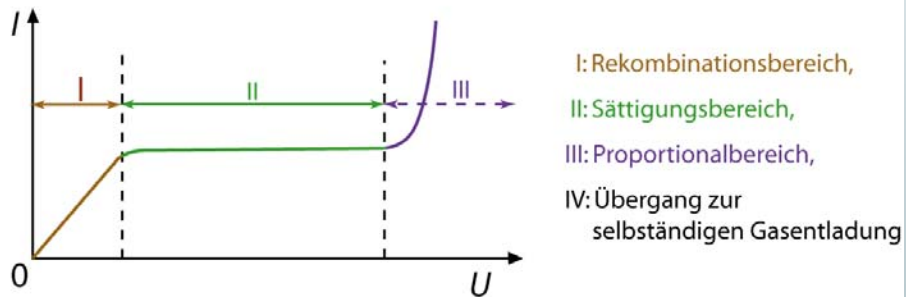
### Spannung und Feldstärke bei einer Glimmentladung



## 2.6 Strom im Vakuum und in Gasen

### Gasentladung

Strom-Spannungskennlinie einer unselbständigen Gasentladung.



## 2.7 Strom im Festkörper

### Strom in Festkörpern

© R. Girwidz

1

## 2.7 Strom im Festkörper

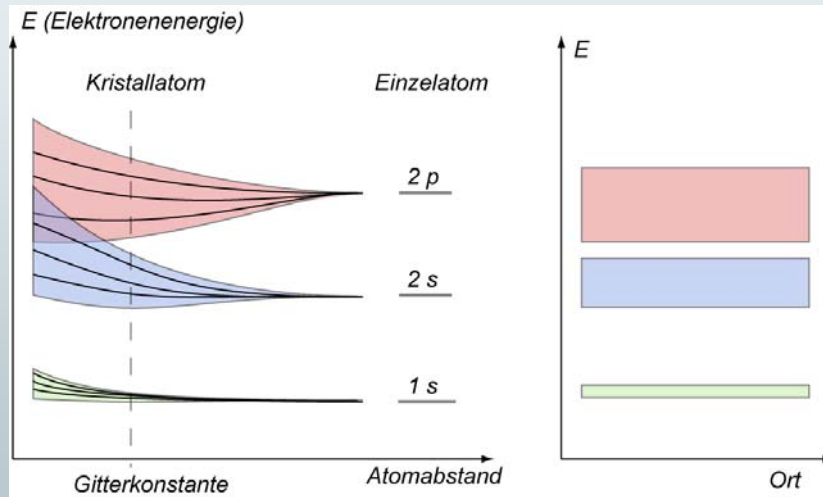


© R. Girwidz

2

## 2.7 Strom im Festkörper

### ■ Bändermodell



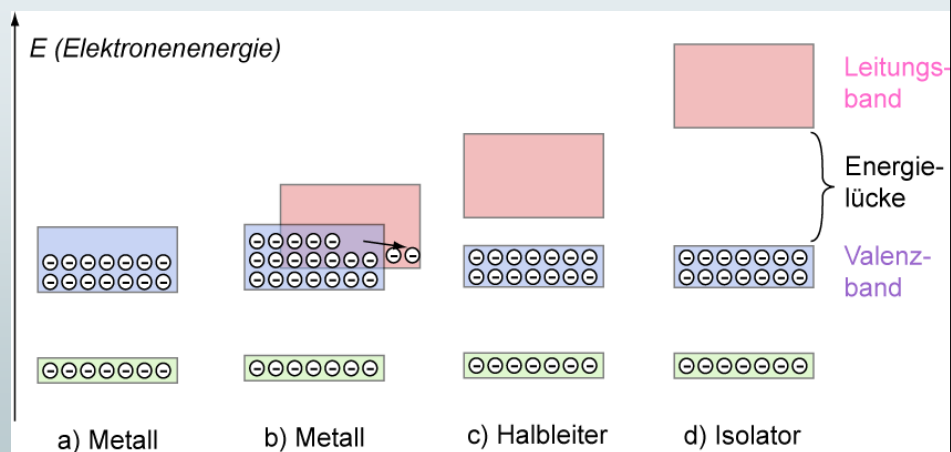
Die aufgespaltenen, diskreten Energieniveaus isolierter Atome ergeben beim Zusammenführen der Atome im Festkörper quasikontinuierliche Energiebänder.

© R. Girwidz

3

## 2.7 Strom im Festkörper

### ■ Bändermodell



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

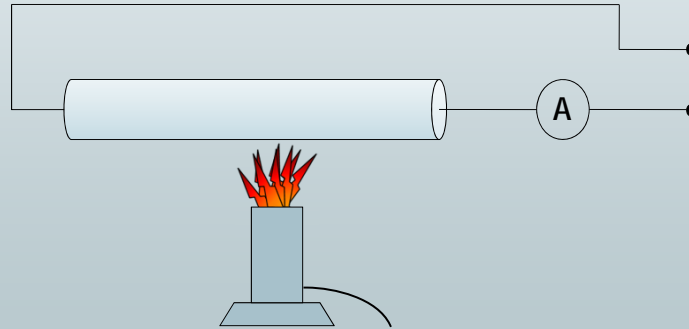
© R. Girwidz

4

## 2.7 Strom im Festkörper

### 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).



© R. Girwidz

5

## 2.7 Strom im Festkörper

### A) Isolator / Ionenleiter



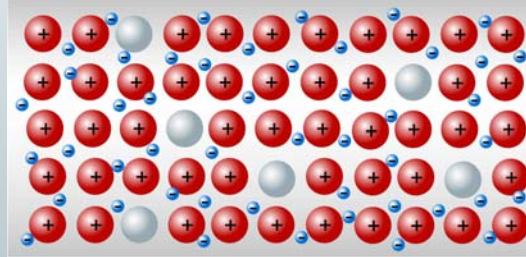
© R. Girwidz

6

## 2.7 Strom im Festkörper

### 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

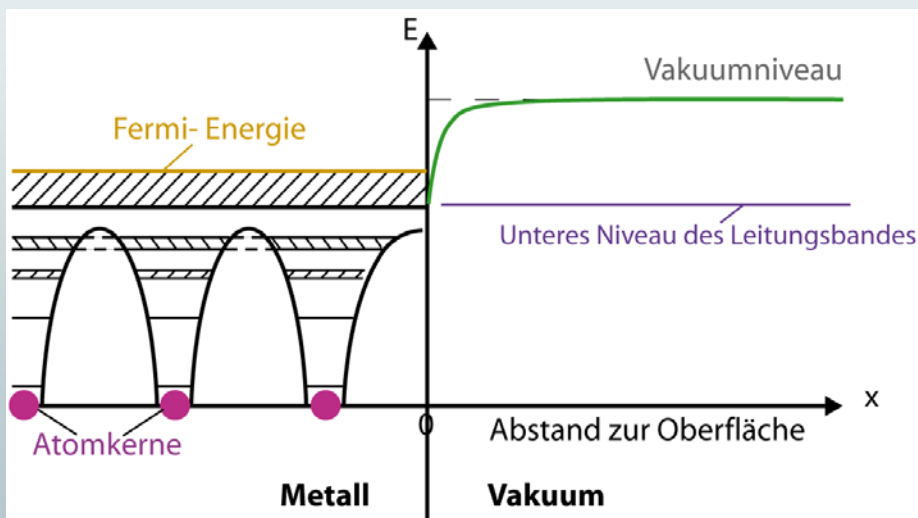
→ Modell des freien Elektronengases

© R. Girwidz

7

## 2.7 Strom im Festkörper

### B) Metalle



© R. Girwidz

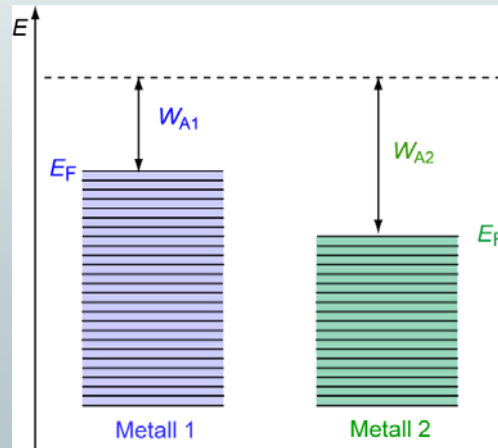
8

## 2.7 Strom im Festkörper

### 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).



© R. Girwidz

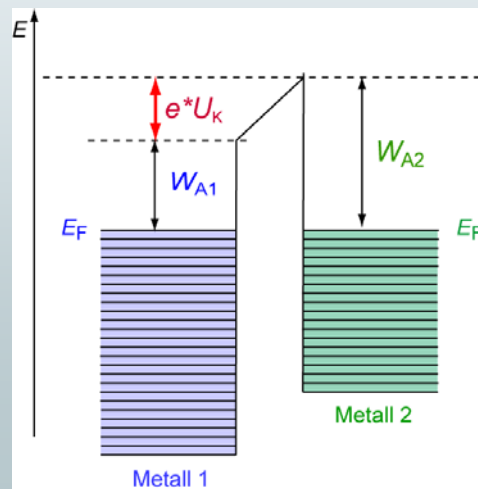
9

## 2.7 Strom im Festkörper

### 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.



© R. Girwidz

10

## 2.7 Strom im Festkörper

### ■ Seebeck-Effekt, Peltier-Effekt

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



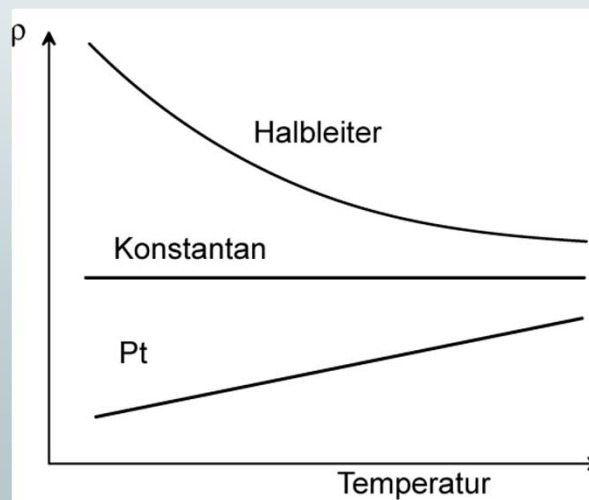
Fließt ein Strom, so kühlt eine Lötstelle ab, die andere erwärmt sich (Peltier-Effekt).

© R. Girwidz

11

## 2.7 Strom im Festkörper

### ■ Temperaturabhängigkeit von elektrischen Widerständen



© R. Girwidz

12

## 2.7 Strom im Festkörper

### C) Halbleiter

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

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

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

## 2.7 Strom im Festkörper

### ■ Si





## 2.7 Strom im Festkörper

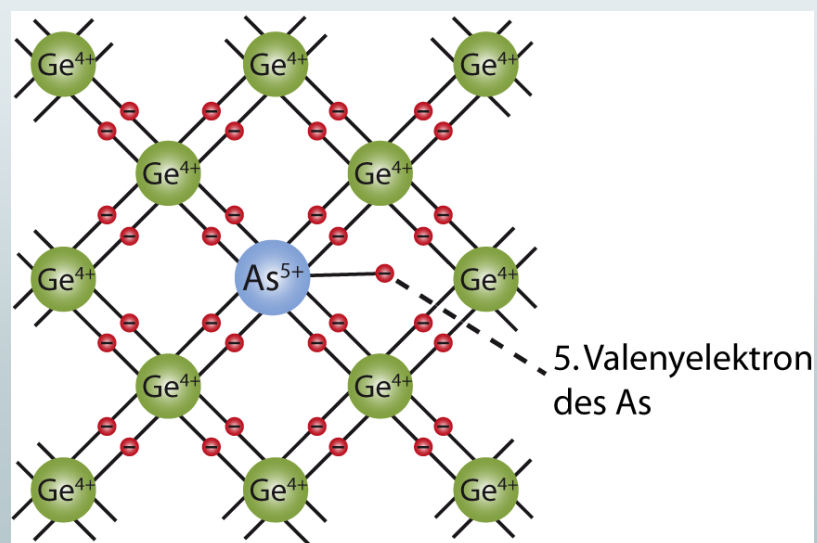
### C) Halbleiter

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

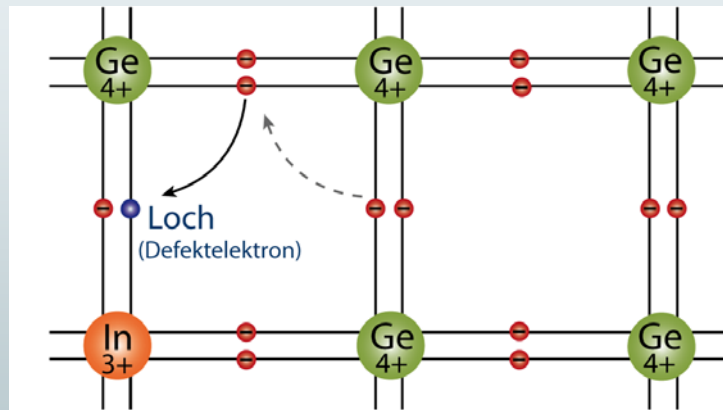
## 2.7 Strom im Festkörper

### C) Halbleiter



## 2.7 Strom im Festkörper

### C) Halbleiter



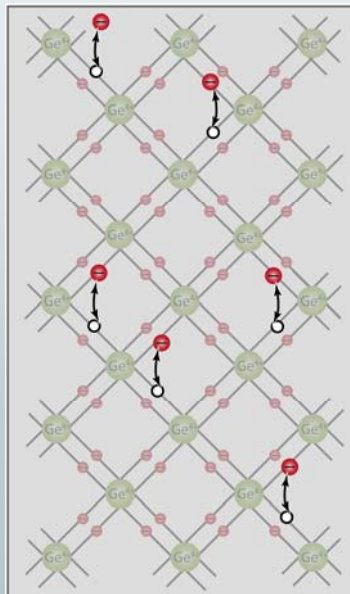
Mit Indium dotiertes Germanium-Atomgitter  
(Störstellenleitung durch Akzeptoren)

© R. Girwidz

17

## 2.7 Strom im Festkörper

### C) Halbleiter

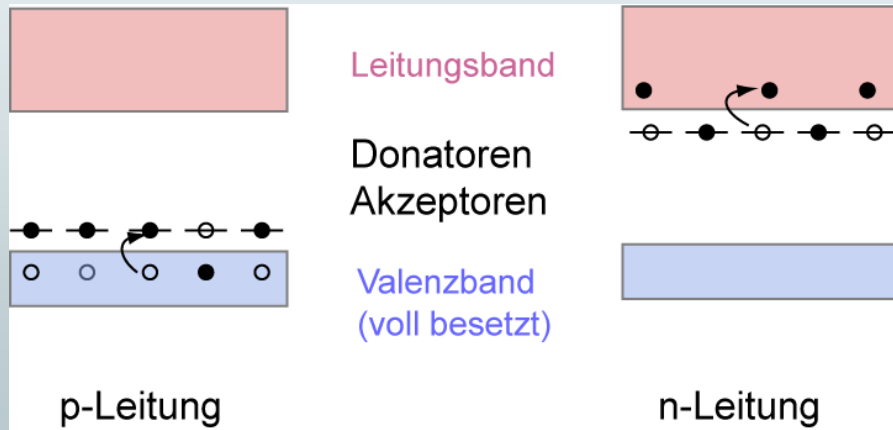


© R. Girwidz

18

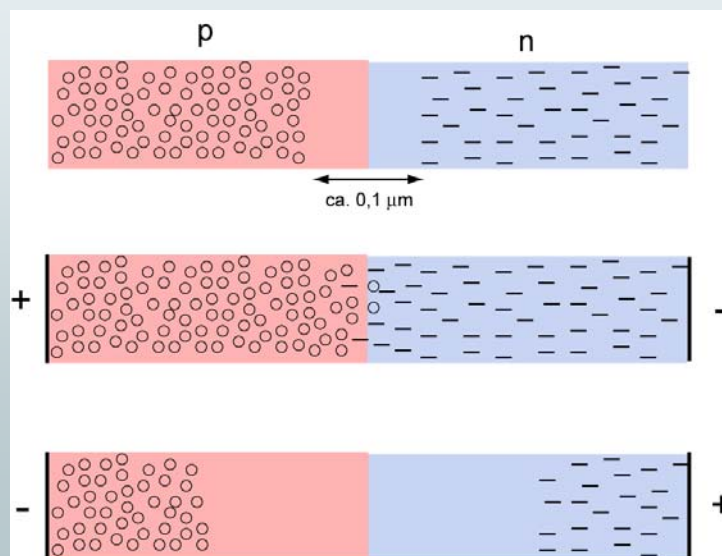
## 2.7 Strom im Festkörper

- Bänderschema eines Halbleiters mit Donatoren bzw. Akzeptoren



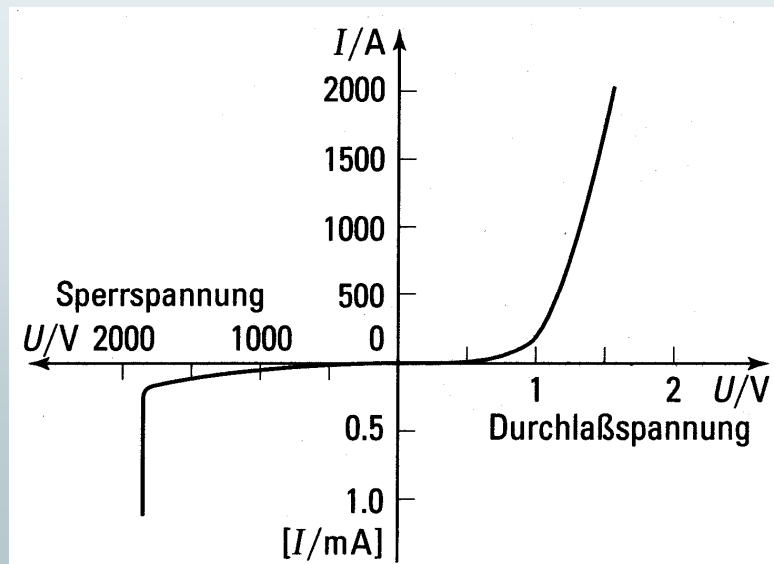
## 2.7 Strom im Festkörper

- Halbleiter – p-n-Übergang – Durchlassrichtung und Sperrrichtung



## 2.7 Strom im Festkörper

### Halbleiterdiode



© R. Girwidz

21

## 2.7 Strom im Festkörper

### Solarzelle

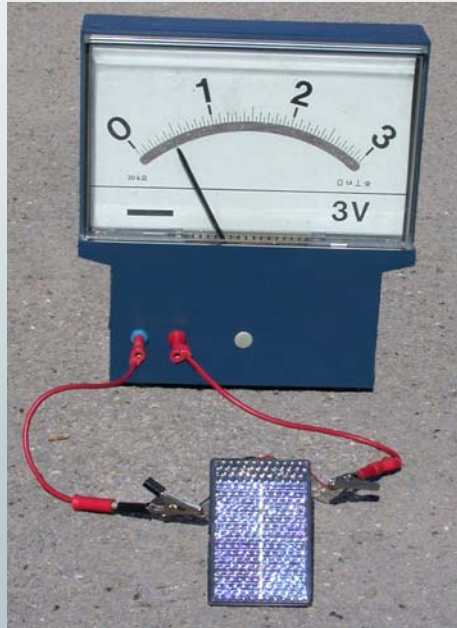


© R. Girwidz

22

## 2.7 Strom im Festkörper

### ■ Solarzelle

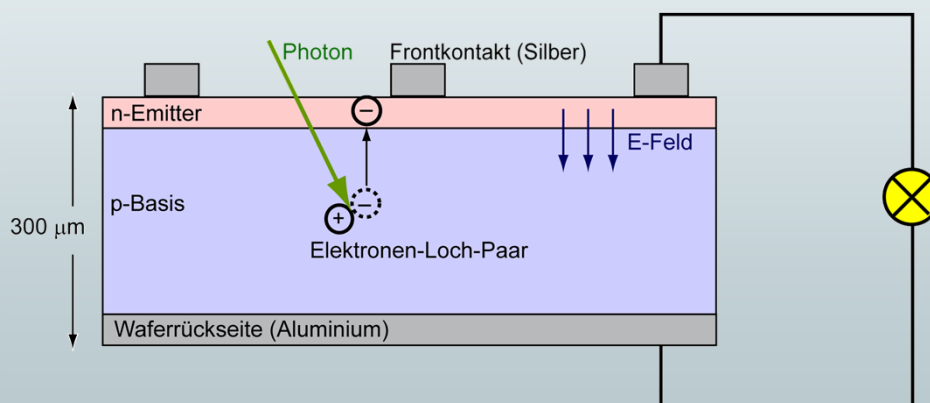


© R. Girwidz

23

## 2.7 Strom im Festkörper

### ■ Solarzelle

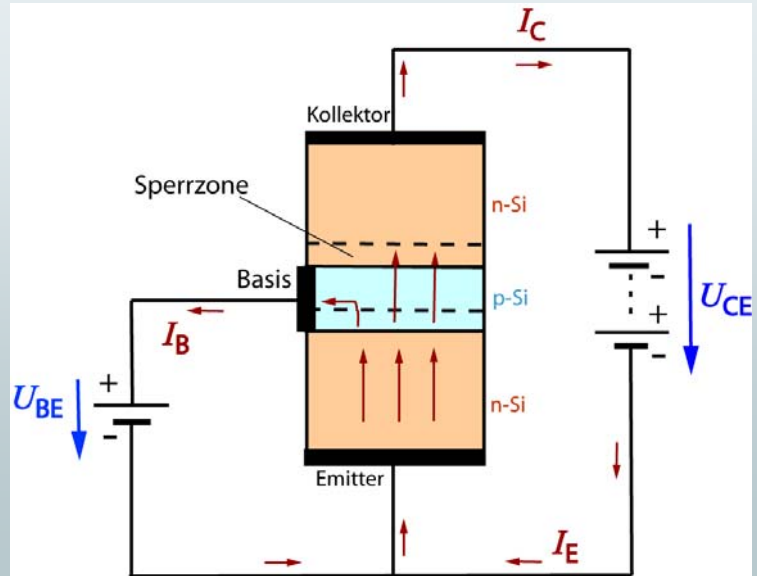


© R. Girwidz

24

## 2.7 Strom im Festkörper

### Transistor

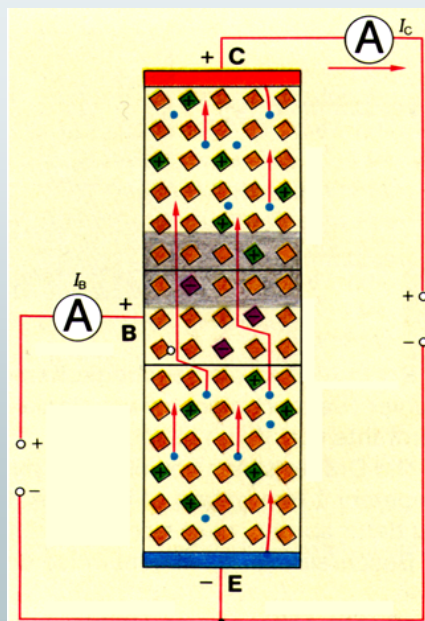


© R. Girwidz

25

## 2.7 Strom im Festkörper

### Transistor

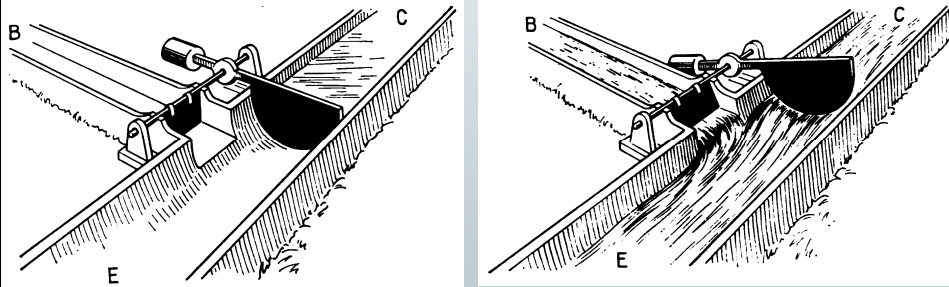


© R. Girwidz

26

## 2.7 Strom im Festkörper

### ■ Transistor

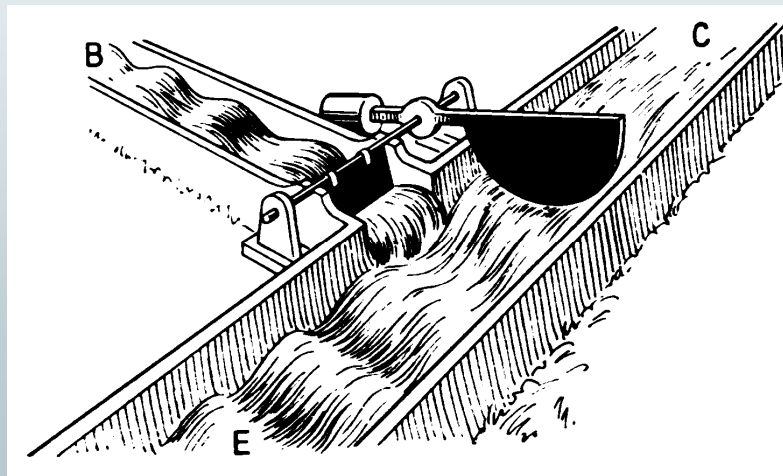


© R. Girwidz

27

## 2.7 Strom im Festkörper

### ■ Transistor

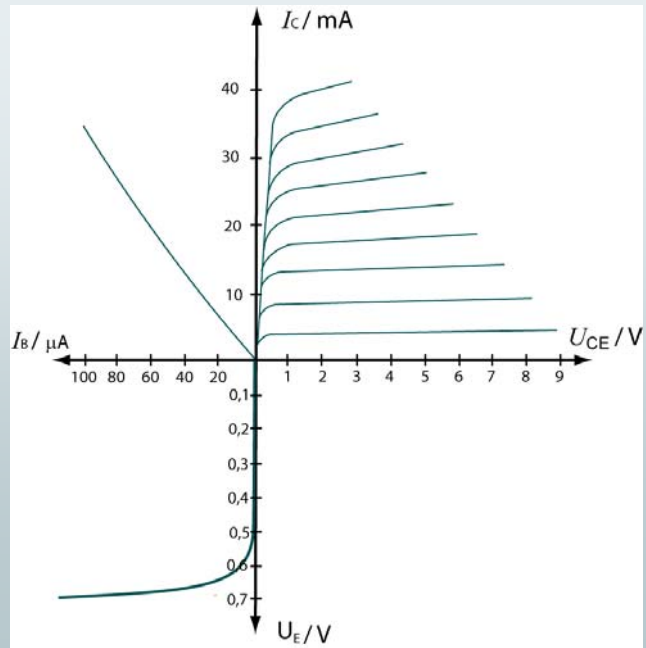


© R. Girwidz

28

## 2.7 Strom im Festkörper

### Transistor

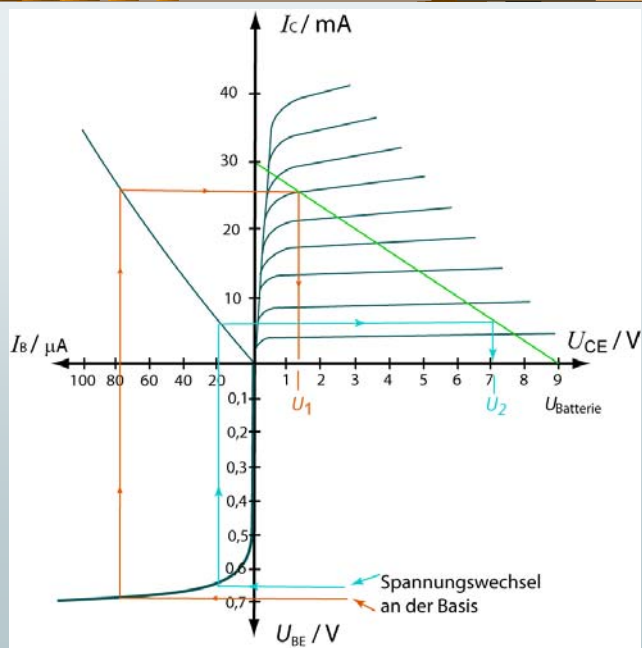


© R. Girwidz

29

## 2.7 Strom im Festkörper

### Transistor



© R. Girwidz

30