

Kapitel 2: Der Elektrische Strom

2. Der elektrische Strom

2.1 Strom als Ladungstransport

2.2 Elektrischer Widerstand und Ohmsches Gesetz

Driftgeschwindigkeit und Stromdichte

Das Ohmsche Gesetz

Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes fester Körper; Supraleitung

2.3 Stromleistung und Joulesche Wärme

2.4 Netzwerke; Kirchhoffsche Regeln

2.5 Messverfahren für elektrische Ströme

2.6 Ionenleitung in Flüssigkeiten

2.7 Stromtransport in Gasen; Gasentladungen

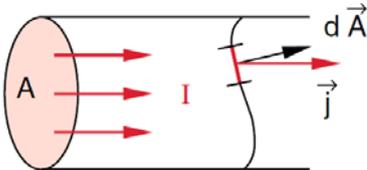
2.8 Stromquellen

2.9 Thermische Stromquellen

Der Seebeck-Effekt, Peltier-Effekt

Strom als Ladungstransport

Strom I $I = \frac{dQ}{dt}$ $[I] = 1 \text{ Ampere} = 1 \text{ A}$

Stromdichte j $I = \int_A j \cdot d\vec{A}$  $[j] = \text{A/m}^2$

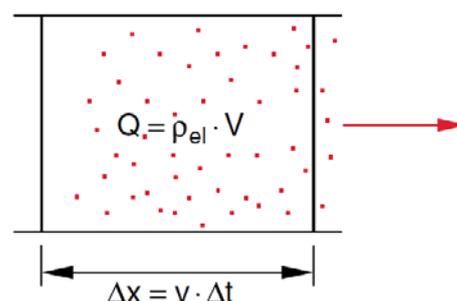
Strom I und Ladungsdichte ρ
 n Ladungen q pro Volumeneinheit mit
 Geschwindigkeit v

Strom $I = nqA \cdot v$

Stromdichte $j = nqv$

Ladungsdichte $\rho = nq$

Stromdichte $j = \rho_{el} v$



Strom als Ladungstransport

Kontinuitätsgleichung

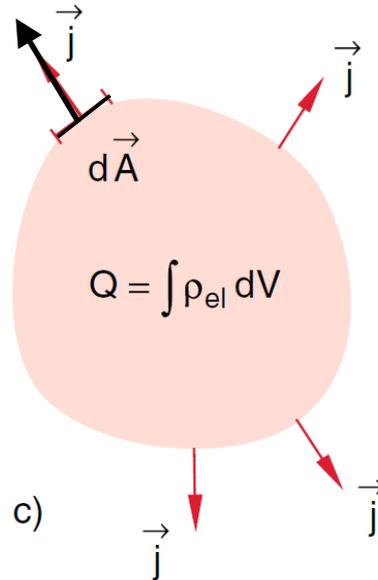
$$I = \oint \mathbf{j} \cdot d\mathbf{A}$$

$$= -\frac{dQ}{dt} = -\frac{d}{dt} \int \rho_{\text{el}} dV$$

$$\oint \mathbf{j} \cdot d\mathbf{A} = \int \text{div } \mathbf{j} dV$$

$$\text{div } \mathbf{j}(\mathbf{r}, t) = -\frac{\partial}{\partial t} \rho_{\text{el}}(\mathbf{r}, t)$$

Ladungsquelle: e.g., Entladung eines Kondensators



Elektrischer Widerstand

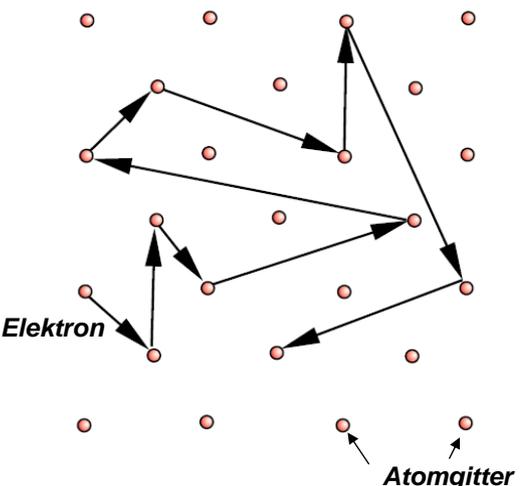
$\mathbf{E} = 0$ $\bar{v} = \langle |\mathbf{v}| \rangle = (8kT/\pi m)^{1/2}$
 thermische mittlere Geschwindigkeit
 Ionen in Flüssigkeit ~ 500 m/s
 Elektronen in Metall $\sim 10^6$ m/s

Stromdichte

$$\langle \mathbf{j} \rangle = n \cdot q \cdot \langle \mathbf{v} \rangle = \mathbf{0}$$

$\mathbf{E} \neq 0$, $\mathbf{F} = q \mathbf{E}$

$$\mathbf{j} = \frac{n \cdot q^2 \cdot \tau_s}{m} \mathbf{E} = \sigma_{\text{el}} \cdot \mathbf{E}$$



Ohmsche Gesetz

$$\sigma_{\text{el}} = \frac{n \cdot q^2 \cdot \tau_s}{m} \quad \text{mit} \quad [\sigma] = 1 \text{ A} \cdot \text{V}^{-1} \text{ m}^{-1} \quad \text{elektrische Leitfähigkeit}$$

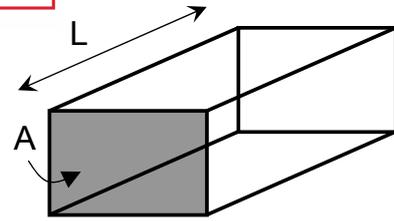
Elektrischer Widerstand

Ohmsche Gesetz

$$j = \frac{n \cdot q^2 \cdot \tau_s}{m} E = \sigma_{el} \cdot E$$

bei homogenem Leiter,
(Querschnitt A, Länge L, Spannung $U = E \cdot L$, $I = j \cdot A$)

$$I = \frac{\sigma_{el} A}{L} \cdot U$$



elektrische
Widerstand

$$R = \frac{L}{\sigma_{el} \cdot A} = \rho_s \cdot \frac{L}{A}$$

$$[R] = \left[\frac{U}{I} \right] = \frac{1 \text{ Volt}}{1 \text{ Ampere}} = 1 \text{ Ohm} = 1 \Omega$$

spezifische
Widerstand

$$\rho_s = \frac{1}{\sigma_{el}}$$

$$\rho = R \cdot A / L, [\rho] = 1 \Omega \cdot m$$

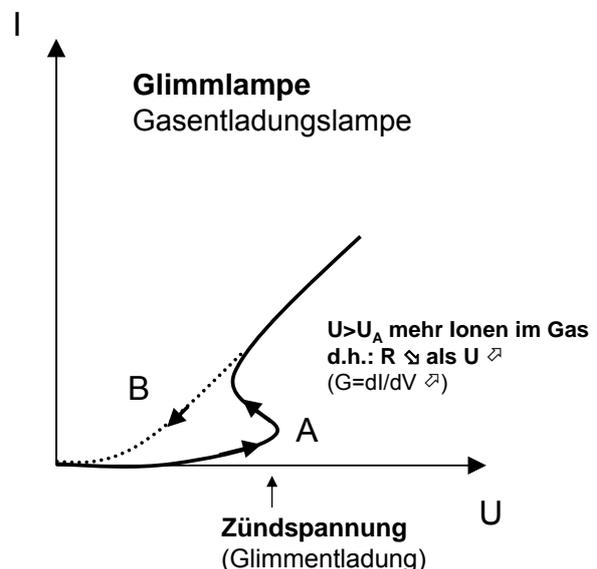
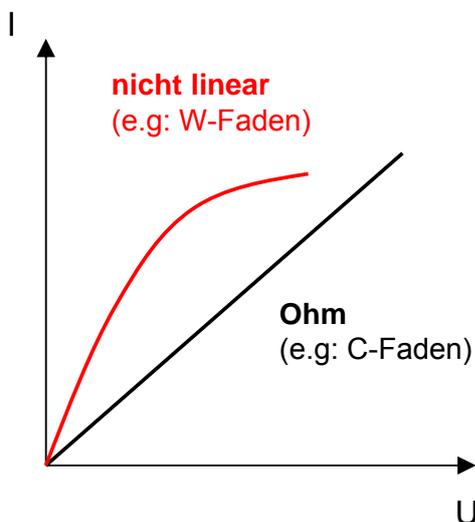
Strom – Spannung Proportionalität

Ohmsche Leiter

$$U = R \cdot I$$

$$j = \sigma \cdot E$$

Bei Leitern, für die ρ **unabhängig von I oder U** ist, sind Strom I und Spannungsabfall $U = R \cdot I$ entlang des Leiters einander proportional ($U =$ linear Funktion von I).



Strom – Spannung Proportionalität

Ohmsche Leiter

$$U = R \cdot I$$

$$\mathbf{j} = \sigma \cdot \mathbf{E}$$

Bei Leitern, für die ρ **unabhängig von I oder U ist**, sind Strom I und Spannungsabfall $U = R \cdot I$ entlang des Leiters einander proportional ($U = \text{linear Funktion von } I$).

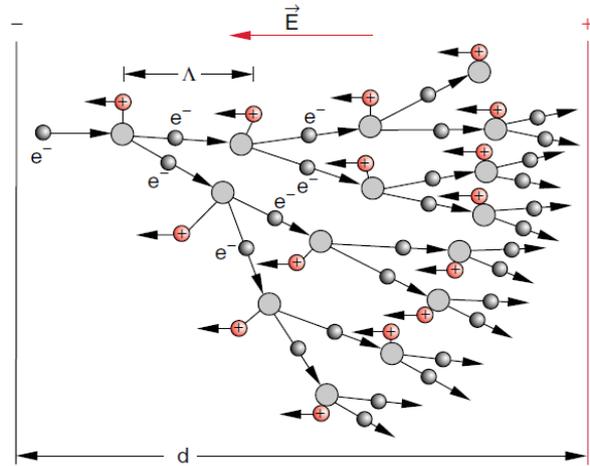
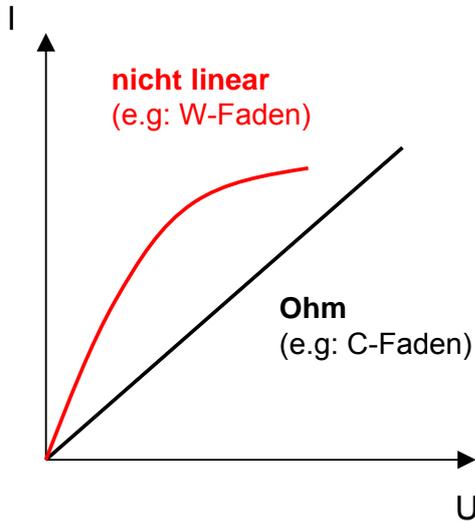


Abb. 2.38. Multiplikationseffekt bei der Erzeugung von Ladungsträgern in einer Gasentladung

Strom – Spannung Proportionalität

Ohmsche Leiter

$$U = R \cdot I$$

$$\mathbf{j} = \sigma \cdot \mathbf{E}$$

Bei Leitern, für die ρ **unabhängig von I oder U ist**, sind Strom I und Spannungsabfall $U = R \cdot I$ entlang des Leiters einander proportional ($U = \text{linear Funktion von } I$).

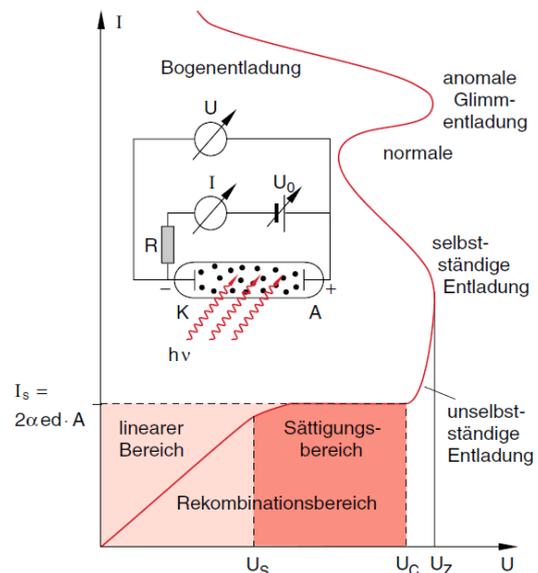
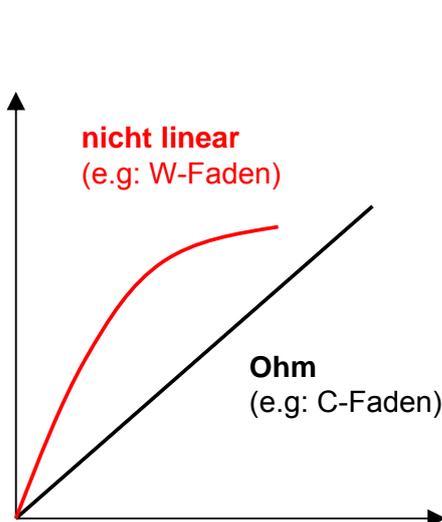
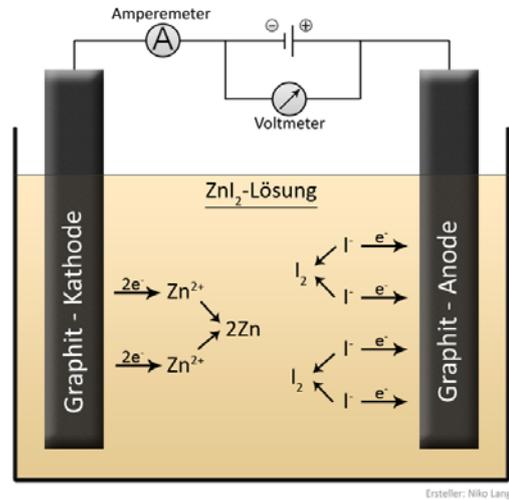
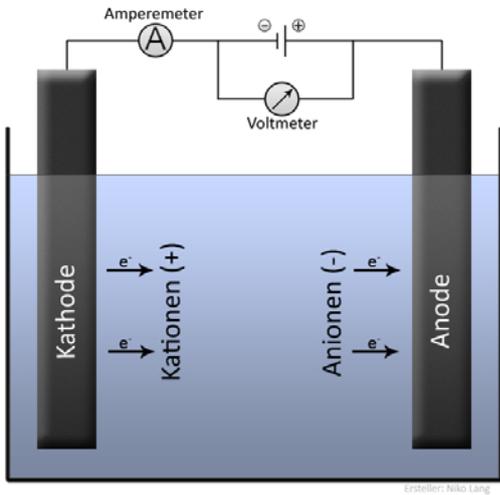


Abb. 2.37. Strom-Spannungs-Charakteristik eines ionisierten Gases

Ionenleitung



source: wiki

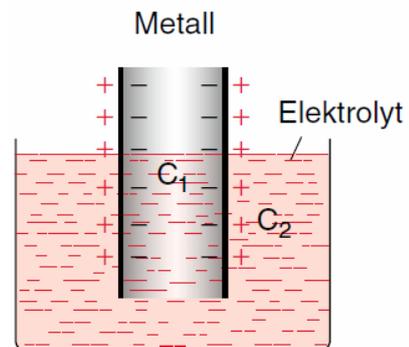
Ch 2: Strom

Ref: Experimentaphysik II, W. Demtröder (2009)

Physik II, mc

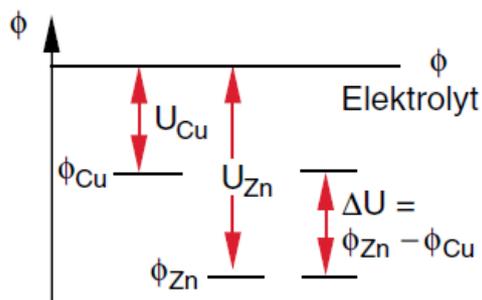
Galvanische Elemente

Metallelektrode in eine Elektrolytflüssigkeit
 ⇒ Potential Unterschied U zwischen Elektrode und Elektrolyt

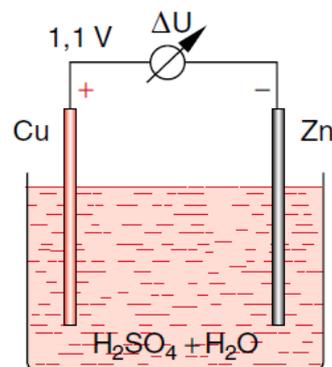


galvanisches Element

2 Metallelektroden im Elektrolyt



$$\Delta U = U_1 - U_2 = \Delta\phi_1 - \Delta\phi_2$$



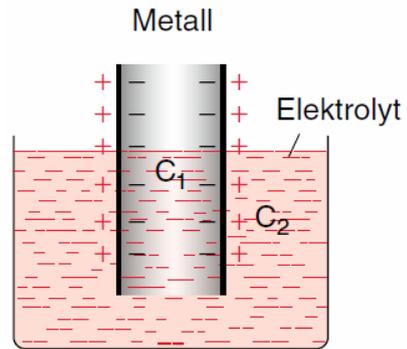
Ch 2: Strom

Ref: Experimentaphysik II, W. Demtröder (2009)

Physik II, mc

Galvanische Elemente

Metallelektrode in eine Elektrolytflüssigkeit
 ⇒ Potential Unterschied U zwischen Elektrode und Elektrolyt



galvanisches Element

2 Metallelektroden im Elektrolyt

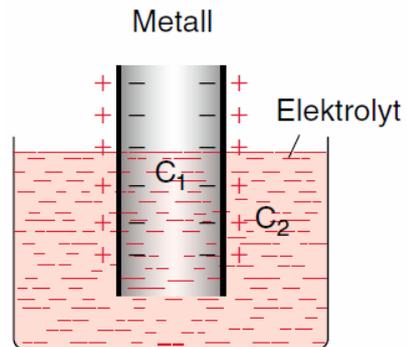
Tabelle 2.6. Galvanische Spannungsreihe (\neq Kontakt Spannungsreihe, für Elektronen) einiger Metalle, gemessen gegen die Normal-Wasserstoff-Elektrode bei einer Konzentration von 1 Mol Ionen pro Liter Elektrolytflüssigkeit bei $T = 293 \text{ K}$

Elektrode	U/V	Elektrode	U/V
Li^+/Li	-3,02	Ni^{++}/Ni	-0,25
K^+/K	-2,92	Pb^{++}/Pb	-0,126
Na^+/Na	-2,71	$\text{H}_2/2\text{H}^+$	0
Zn^{++}/Zn	-0,76	Cu^+/Cu	+0,35
Fe^{++}/Fe	-0,44	Ag^+/Ag	+0,8
Cd^{++}/Cd	-0,40	Au^{3+}/Au	+1,5

NB: Die Absolutwerte U der Potentialdifferenzen $\Delta\phi$ sind nicht messbar, nur die Differenzen ΔU zwischen verschiedenen Metallen / Elektroden.

Galvanische Elemente

Metallelektrode in eine Elektrolytflüssigkeit
 ⇒ Potential Unterschied U zwischen Elektrode und Elektrolyt



galvanisches Element

2 Metallelektroden im Elektrolyt

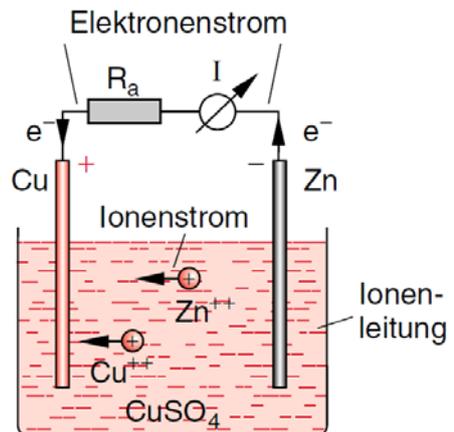


Abb. 2.48. Galvanisches Element mit CuSO_4 -Elektrolyt

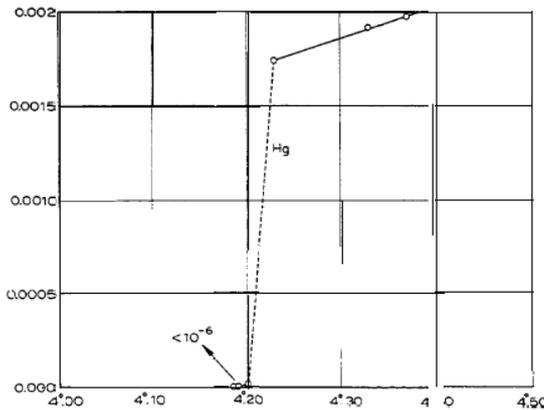
superconductivity: zero resistance

- **1911, H.K. Onnes (Nobel: 1913)**
(1908: liquefaction of He)



"...the experiment left no doubt that, as far as accuracy of measurement went, the resistance disappeared. (...) The disappearance did not take place gradually but *abruptly*. (...) At the lowest temperature, 1.5K, it could be established that the resistance had become less than a thousand-millionth part of that at normal temperature.

Thus the mercury at 4.2K has entered a new state, which, owing to its particular electrical properties, can be called the state of superconductivity."



normal metal

$$\rho(T) = \rho_0 + \rho_{e-ph} + \rho_{e-e}$$

H. K. Onnes, *Commun. Phys. Lab.* 12,120, (1911); **Nobel lecture**, 1913.

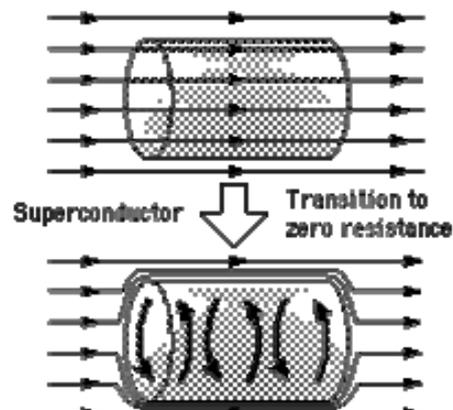
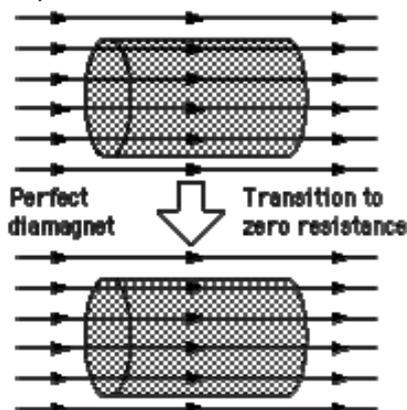
superconductivity: perfect diamagnetism

- **1933, Meissner-Ochsenfeld**



W. Meissner

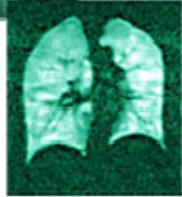
- bulk SC **expels** mag. flux ($H < H_c(T)$)
- reversible effect: thermodynamics
- screening supercurrent within layer, thickness λ (London penetration depth)



superconductivity: applications



MRI image of a human brain
The resolution in magnetic resonance imaging (MRI) is partly dependent on the strength of the magnetic field. Nowadays strong superconducting magnets, all type II, are used.



The magnetism in ^3He can be made uniform (hyperlansation). If this gas is inhaled, cavities such as the lungs can be imaged in a magnetic camera.



Particle accelerators
Powerful superconducting magnets are used in the LHC particle accelerator at CERN. They are cooled with superfluid helium (^4He), which makes its way into all the cavities in the casing.



MAGLEV: levitating train



Yamanashi Maglev Test Line, Japan



2003

- Longest traveled distance 2,876 km in a day was attained.
- MLX01 arranged in a three-car train set attained 581 km/h (manned).

2004

- Number of passengers for Maglev trial ride exceeded 80,000 persons.
- Cumulative traveled distance exceeded 400,000 km.
- Test of two trains passing each other at a maximum relative speed of 1,026 km/h.

2005

- HTS technology validated



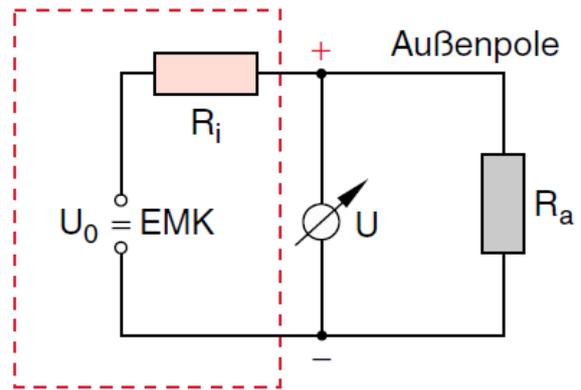
Stromquelle

U_0 elektromotorische Kraft (EMK)
 U Klemmenspannung
 R_i Innenwiderstand

$$U = U_0 - I \cdot R_i \quad I = U_0 / (R_i + R_a)$$

$$= U_0 \cdot \left(1 - \frac{R_i}{R_i + R_a} \right)$$

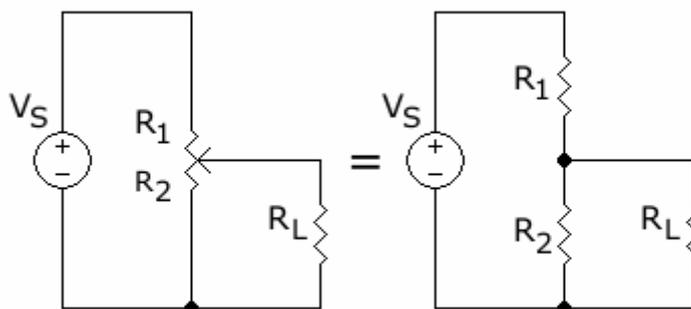
$$= U_0 \frac{R_a}{R_i + R_a}$$



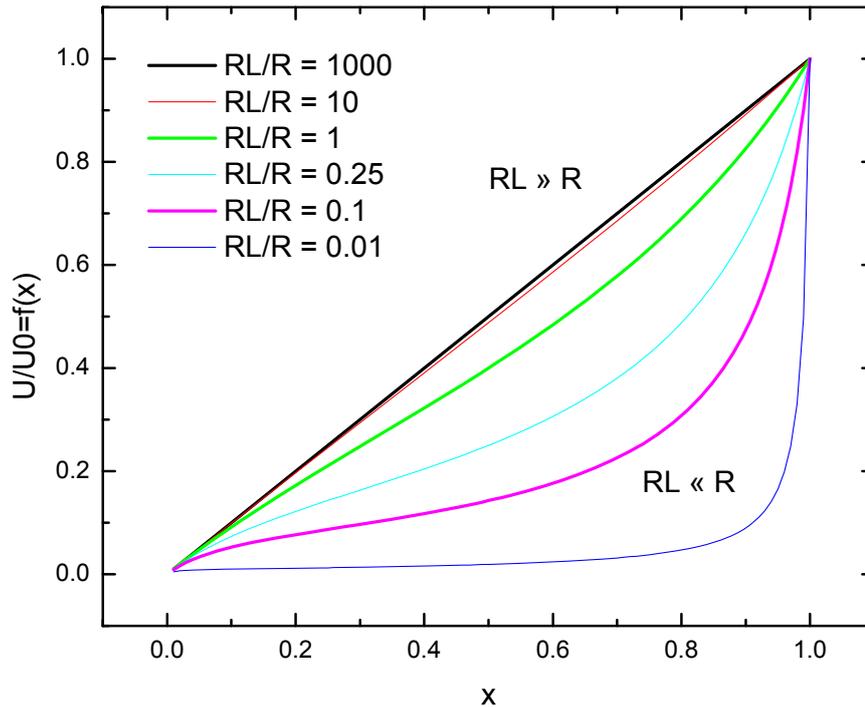
d.h. die Klemmenspannung ist abhängig vom Verbraucherwiderstand.

⇒ R_i so klein wie möglich machen (siehe Ch. 5)

Potentiometer



Potentiometer



$$f(x) = \frac{xR_L/R}{R_L/R - x - x^2}$$

Wheatstone Brückenschaltung

Genauere Messung von R_x

falls R_1, R_2, R_3 bekannt

Spannungen U_1 und U_2 (gegen B)

$$U_1 = U_0 \cdot \frac{R_x}{R_1 + R_x}$$

$$U_2 = U_0 \cdot \frac{R_2}{R_2 + R_3}$$

Potentiometer so einstellen dass $I = 0$

d.h. $U_1 = U_2$

und

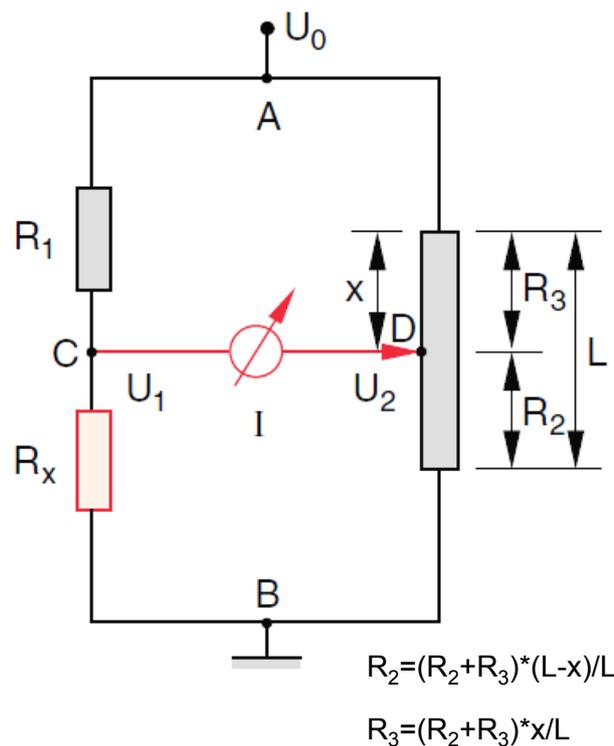
$$R_x = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_3}$$

Potentiometer

$$\frac{R_2}{R_3} = \frac{L-x}{x}$$

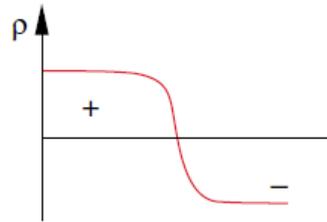
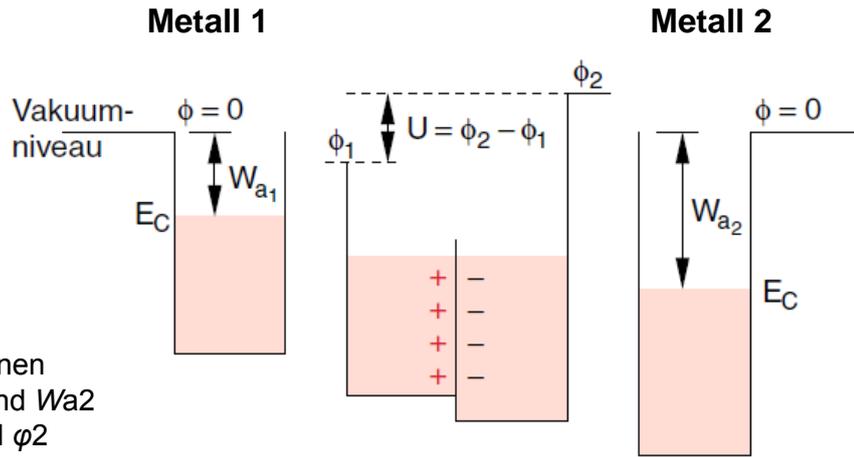
Es folgt dann

$$R_x = R_1 \frac{L-x}{x}$$



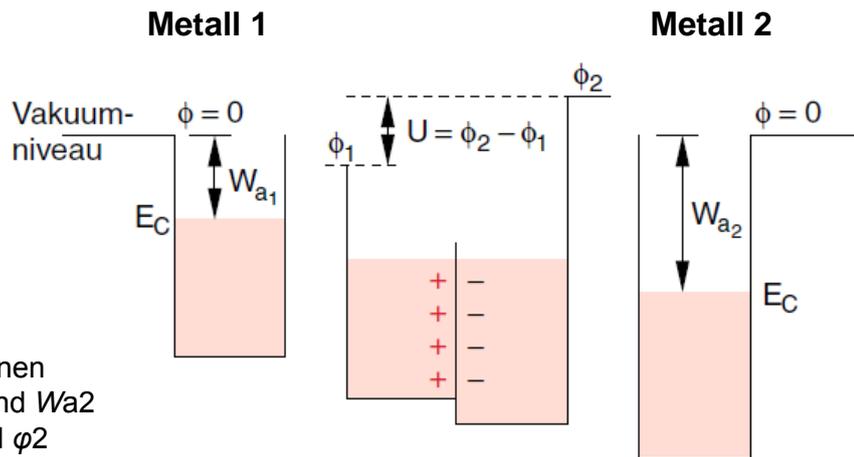
Seebeck Effekt

Kontaktspannung und Raumladungsverteilung beim Kontakt zwischen Metallen mit verschiedenen Austrittsarbeiten W_{a1} und W_{a2} bzw. Potentialen ϕ_1 und ϕ_2



Seebeck Effekt

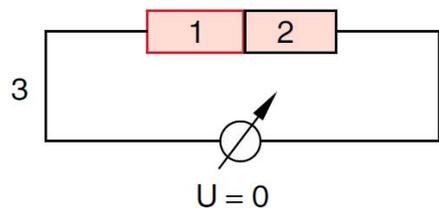
Kontaktspannung und Raumladungsverteilung beim Kontakt zwischen Metallen mit verschiedenen Austrittsarbeiten W_{a1} und W_{a2} bzw. Potentialen ϕ_1 und ϕ_2



$$U_1 = \phi_2 - \phi_1$$

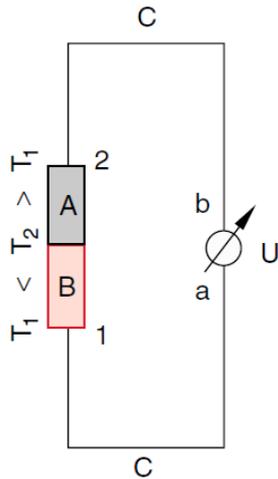
$$U_2 = \phi_1 - \phi_3$$

$$U_3 = \phi_3 - \phi_2$$

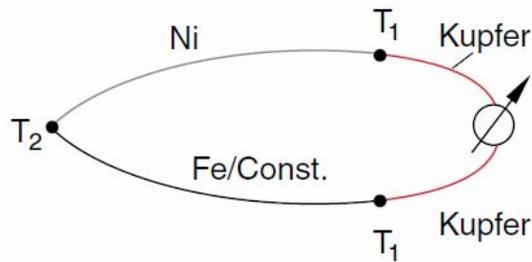


$$\sum_{i=1}^3 U_i = 0$$

Seebeck Effekt



Thermoelement



Thermospannung

$$U = (S_A - S_B)(T_1 - T_2)$$

S Seebeck Koeffizient

$$[S] = V/K$$

Ursache Thermospannung: Diffusionsströme
(thermisch, Konzentrationsgradient & Drift)

Seebeck Effekt

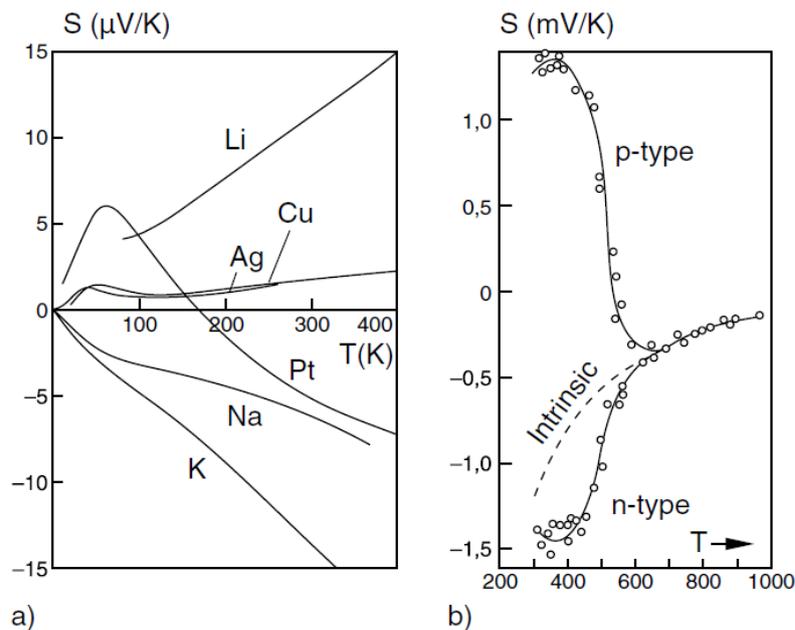


Abb. 2.58. Temperaturabhängigkeit der Seebeck-Koeffizienten (a) für einige Metalle, (b) für verschieden dotiertes Silizium. Man beachte die unterschiedlichen Ordinatenkalen