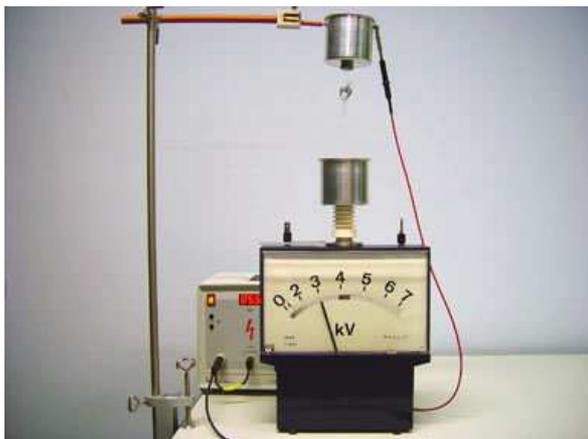


"Down a few volts yet Harry!"

Versuch: Ladung und Strom (geladene Wassertropfen)



1. Wasserbecher wird gegen Auffangbecher aufgeladen. Wassertropfen transportieren alle in etwa dieselbe Ladung dQ ,
→ gemessene Gesamtladung nach einiger Zeit: $Q = dQ T$
2. Strommessgerät wird angeschlossen. Gemessener Strom scheint proportional zur Tröpfchenrate, als $I \sim dQ / dt$

- elektrischer Strom = Transport elektrischer Ladungen (z.B. durch ein elektrisch leitendes Medium)

Beispiele für Ladungsträger:

- **Elektronen:** elektrische Leiter, Halbleiter, Elektronentransport durch Vakuum
- **Löcher:** Defektelektronen = „fehlende Valenzelektronen“ in Halbleiter
- **Ionen:** Transport in Elektrolyten, Gasentladungen, Plasmen

Historische Stromrichtung:

In der Elektrotechnik ist der elektrische Strom als Flussrichtung **positiver** Ladungsträger definiert.

- **Stromstärke I :** Ladungsmenge Q , die pro Zeiteinheit durch einen zur Stromrichtung senkrechten Querschnitt fließt:

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

- Einheit: $[I] = 1 \text{ Ampere} = 1 \text{ A}$
- Das Ampere ist eine SI-Basiseinheit.



André-Marie Ampère
(1775 – 1836)

Definition:

Ein Ampere ist die Stärke eines zeitlich unveränderlichen elektrischen Stromes, der, durch zwei im Vakuum parallel im Abstand 1 Meter voneinander angeordneten, geradlinigen, unendlich langen Leitern von vernachlässigbar kleinem, kreisförmigen Querschnitt fließend, zwischen diesen Leitern pro Meter Leiterlänge die Kraft 2×10^{-7} Newton hervorrufen würde.

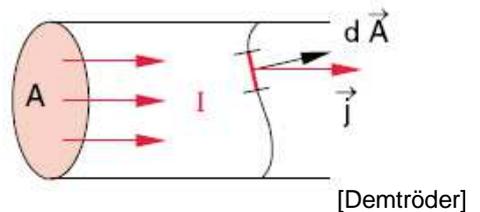
Beispiele:

- Strom bei einer LED: ca. 20 mA
- Taschenlampe: ca. 200 mA
- Zimmerbeleuchtung: ca. 0,2 – 1 A
- elektrischer Heizlüfter: ca. 10 A
- Autoanlasser: ca. 100 A
- Blitz: einige 10 – 100 kA
- Wahrnehmungsgrenze des menschlichen Körpers bei ca. 0,5 mA, dauerhafte Schäden ab ca. 100 mA

• **Stromdichte \vec{j} :** Strom pro Querschnittsflächen-Einheit

• der Gesamtstrom ist dann

$$I = \int_A \vec{j} \cdot d\vec{A}$$



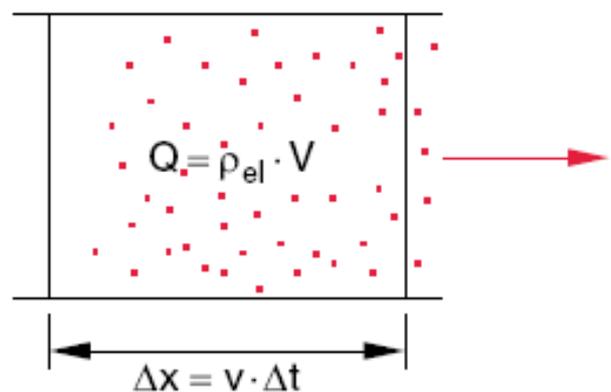
bzw. bei räumlich konst. Stromdichte $I = \vec{j} \cdot \vec{A}$

• Betrachte Leiter mit Ladungsdichte ρ .
Die Ladungen haben die
Geschwindigkeit \vec{v}

• Gesamtladung im Volumen: $Q = \rho V$

• Strom pro Zeiteinheit dt durch Fläche A :

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{\rho \vec{A} \cdot \Delta \vec{s}}{\Delta t} = \rho \vec{A} \cdot \vec{v}$$



• **Stromdichte:** $\vec{j} = \rho \vec{v}$

Der Strom durch eine geschlossene Fläche A muss gleich sein der zeitlichen Abnahme der eingeschlossenen Ladung:

$$I = \oint \vec{j} \cdot d\vec{A} \\ \equiv -\frac{dQ}{dt} = -\frac{d}{dt} \int \rho dV$$

mithilfe des Gaußschen Satzes

$$\oint \vec{j} \cdot d\vec{A} = \int \operatorname{div} \vec{j} dV$$

erhält man die

Kontinuitätsgleichung

$$\operatorname{div} \vec{j}(\vec{r}, t) = -\frac{\partial}{\partial t} \rho(\vec{r}, t)$$

1.2 Elektrischer Widerstand

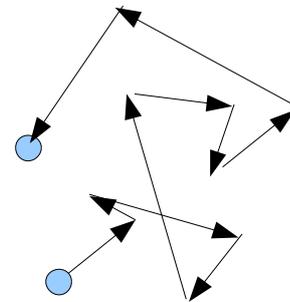
- **Ladungsträger im Leiter bewegen sich aufgrund ihrer Temperatur auch ohne äußeres elektrisches Feld**
- mittlere Geschwindigkeit: $\langle |\vec{v}| \rangle = \sqrt{8k_B T / (\pi m)}$
- Beispiel: Na-Ionen in einer Flüssigkeit bei RT: $\langle v \rangle \sim 500$ m/s
Leitungselektronen in Metallen: $\langle v \rangle \sim 10^6 - 10^7$ m/s
- Bei der Bewegung im Leiter kommt es zu Stößen mit Atomrümpfen & Molekülen

ohne äußeres Feld:

mittlerer Geschw.**vektor**: $\langle \vec{v} \rangle = 0$

mittlere Stromdichte: $\langle \vec{j} \rangle = nq \langle \vec{v} \rangle = 0$

mittlere Zeit zwischen zwei Stößen: τ_s



Beispiel Leitungselektronen in Cu: $\tau_s \approx 25$ fs

im elektrischen Feld \vec{E} :

zusätzliche Kraft $\vec{F} = q\vec{E}$ führt zu Beschleunigung $\vec{a} = \vec{F}/m$

→ während der Zeit τ_s zwischen zwei Stößen:

zusätzliche Geschwindigkeit $\vec{v}_D = \vec{a}\tau_s$ (**Driftgeschwindigkeit**)

(typischerweise ist $v_D \ll \langle |\vec{v}| \rangle$)

Dies führt zu der Stromdichte
$$\vec{j} = nq\vec{v}_D = \frac{nq^2\tau_s}{m}\vec{E}$$
$$\equiv \sigma_{el}\vec{E}$$

elektrische Leitfähigkeit: $\sigma_{el} = \frac{nq^2\tau_s}{m}$ $[\sigma_{el}] = 1 \text{ A} / (\text{V m})$

die Stromdichte der Ladungsträger in Materie wird durch Stöße mit der Materie begrenzt (beschrieben durch τ_s)

Beispiel Elektronenleitung in Kupfer bei RT:

- $n = 8,4 \cdot 10^{28}$ Elektronen / m^3 ; $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg und $q = -e = -1,6 \cdot 10^{-19}$ C
- $\sigma_{el} = 6 \cdot 10^7$ A/(V m)
- bei einer Feldstärke von $E = 0,1$ V/m
- $j = 6 \cdot 10^6$ A/ m^2
- es fließt durch einen Kupferleiter mit Querschnitt $A = 1$ cm^2 ein Strom von $I = 600$ A
- die Driftgeschwindigkeit ist aber nur $v_D = 0,4$ mm/s !
- die mittlere Geschwindigkeit aber $\langle v \rangle = 1,6 \cdot 10^6$ m/s

Leitfähigkeit einiger Materialien bei 300 K, in A/(V m):

Silber	$61,4 \cdot 10^6$
Kupfer	$58 \cdot 10^6$
Gold	$44,0 \cdot 10^6$
Aluminium	$36,6 \cdot 10^6$
Eisen	$10,0 \cdot 10^6$
Quecksilber	$1,04 \cdot 10^6$
Graphit	$3 \cdot 10^6$
Diamant	10^{-4}
Silizium	$2,51 \cdot 10^{-4}$
Meerwasser	5
Leitungswasser	0,05
reines Wasser	$\sim 5 \cdot 10^{-6}$

→ **Versuch:**
Leitfähigkeit von Wasser:



Die Gleichung

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

heißt

Ohmsches Gesetz

bei einem Ladungsträger mit Querschnitt A und der Länge L
erhalten wir aus $U = \int \vec{E} \cdot d\vec{s}$, $I = \int \vec{j} \cdot d\vec{A}$
und mit der Abkürzung $R = \frac{L}{\sigma_{\text{el}} A} = \rho_s \frac{L}{A}$

für das Ohmsche Gesetz:

$$U = RI$$

und den **elektrischen Widerstand R**

Einheit: $[R] = [U/I] = 1 \text{ Volt} / \text{Ampere} = 1 \text{ Ohm} = 1 \Omega$

$\rho_s = \frac{1}{\sigma_{\text{el}}}$ heißt **spezifischer Widerstand** (Materialgröße)

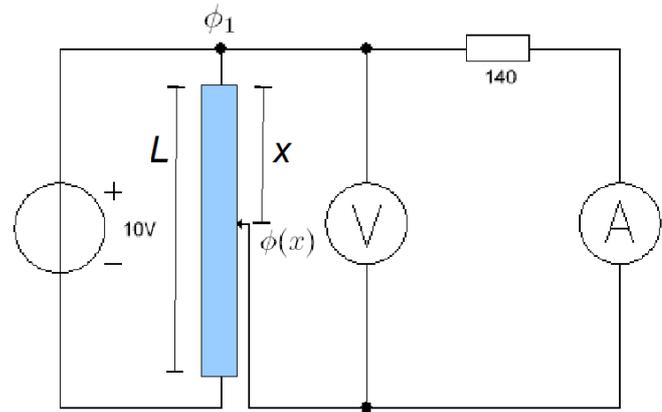


Georg Simon
Ohm
(1789 - 1854)

Versuch zum Ohmschen Gesetz:

Entlang einem Leiter mit Widerstand R , der vom Strom I durchflossen wird, tritt ein Potentialgefälle auf:

$$U(x) = \phi_1 - \phi(x) = R I \frac{x}{L}$$



Anmerkungen:

- nicht jeder Leiter gehorcht dem Ohmschen Gesetz. Dies ist der Fall, wenn der Widerstand von der Stromstärke selbst abhängt:

$$U = R(I) I \neq \text{konst.} \cdot I$$

- Der Widerstand ist auch für kompliziertere Leitergeometrien definiert als das Verhältnis $U = R / I$

Versuch: Kontinuierlicher Spannungsteiler (Potentiometer)

Hier wird der gleichmäßige Spannungsabfall an einem stromdurchflossenen Leiter ausgenutzt, um bei einer festen Quellenspannung U_0 eine variable Spannung $U < U_0$ zu erzeugen:

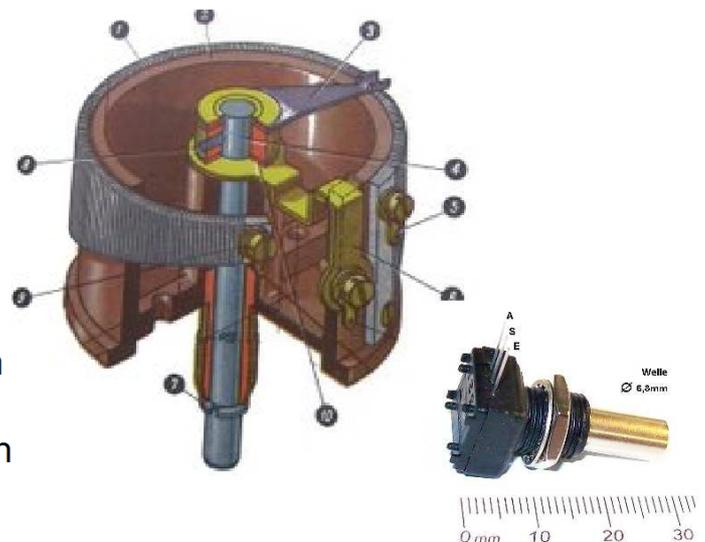
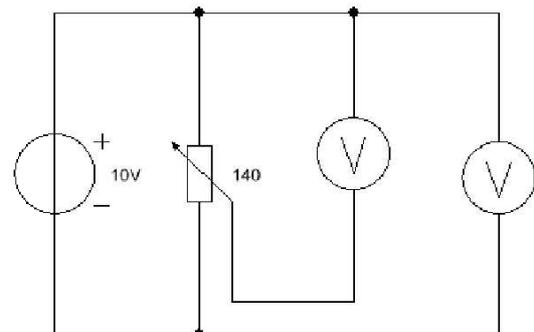
Auch hier ist wieder

$$U_1(x) = U_0 \frac{x}{L}$$

und

$$U_2(x) = U_0 \frac{x - L}{L}$$

in der Praxis: Widerstand aus einer dünnen leitenden Schicht auf einem Zylinder. Die variable Spannung wird an Schleifkontakten abgenommen



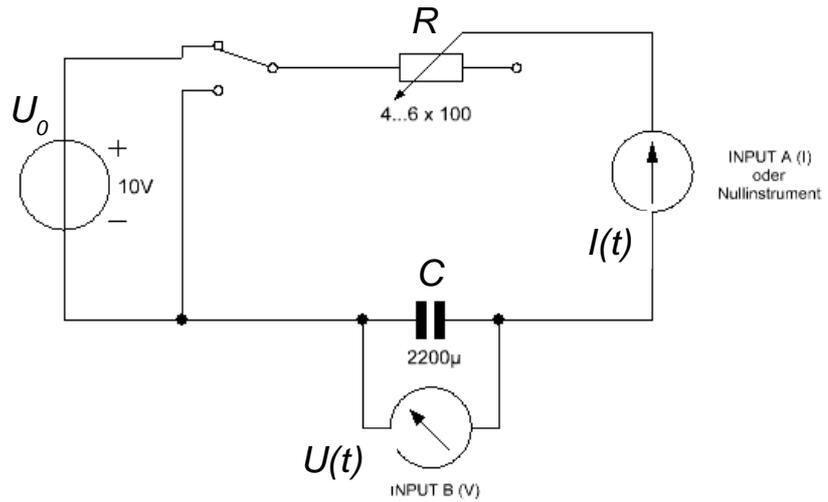
Versuch: Be- und Entladen eines Kondensators

Ein Kondensator mit Kapazität C wird über einen Widerstand R je nach Schalterstellung be- oder entladen

Ladestrom:

$$I(t) = \frac{U_0 - U(t)}{R}$$

$$= \frac{U_0}{R} - \frac{Q(t)}{RC}$$



nach Differenzieren und mit $I(t) = dQ / dt$ erhält man: $\frac{dI}{dt} = -\frac{1}{RC}I(t)$

Lösung der DGL: $I(t) = I_0 e^{-t/(RC)}$

und für die Spannung: $U(t) = U_0 \left(1 - e^{-t/(RC)}\right)$

Entladen:

Hier liegt zunächst die Spannung U_0 am Kondensator an. Kippt man den Schalter, so fließt durch den Widerstand der Strom

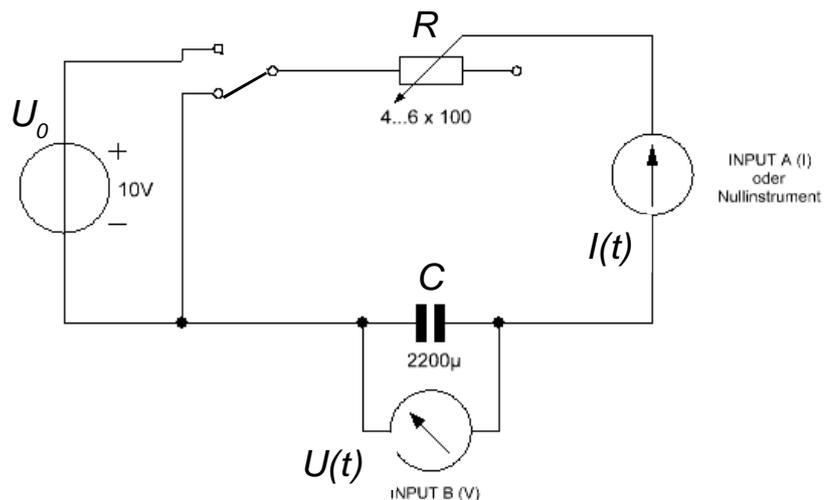
$$I(t) = \frac{U(t)}{R}$$

$$\equiv -\frac{dQ}{dt} = -\frac{C dU}{dt}$$

diese DGL lässt sich für U lösen:

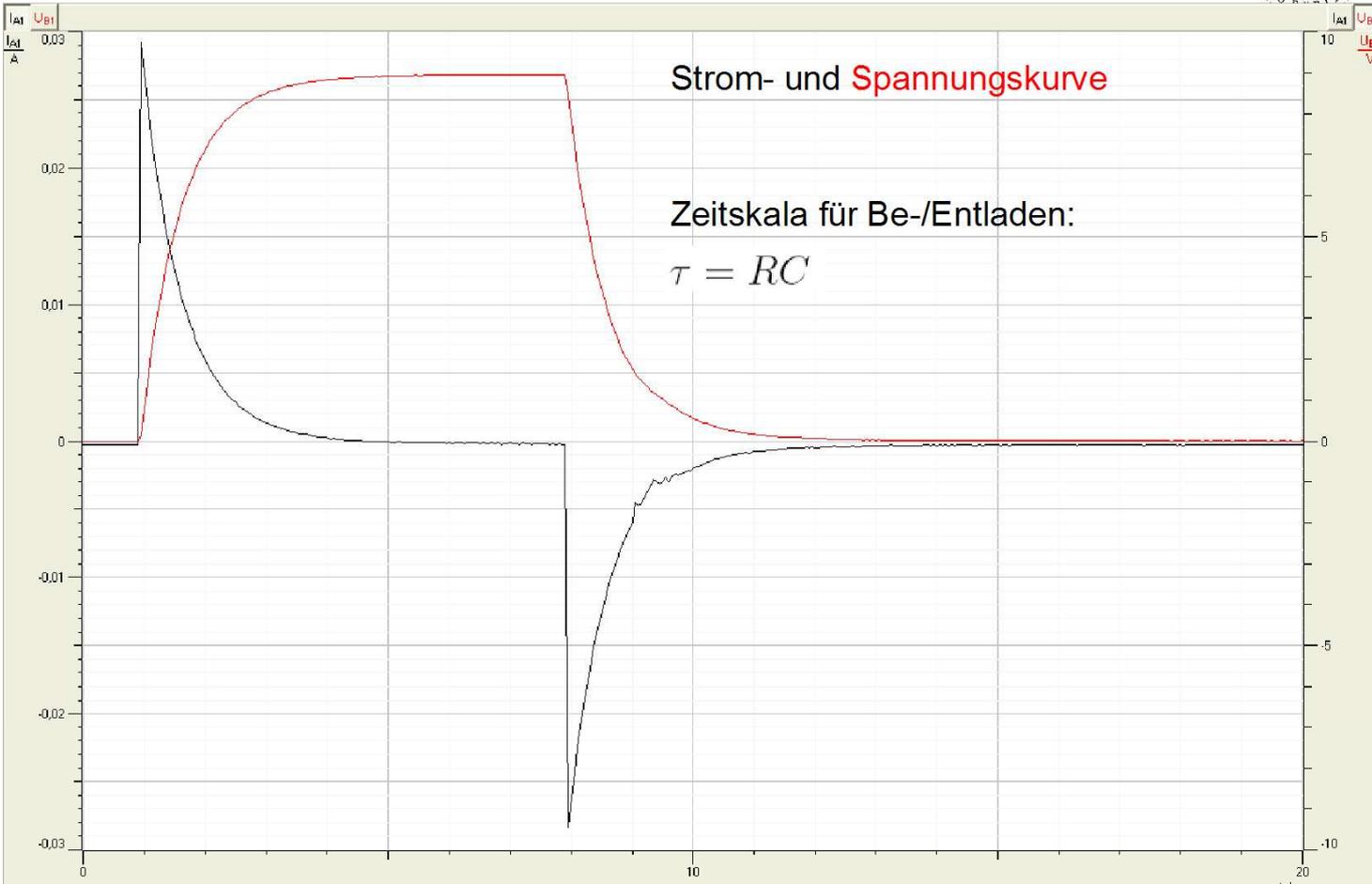
$$U(t) = U_0 e^{-t/(RC)}$$

und der Strom: $I(t) = I_0 e^{-t/(RC)}$



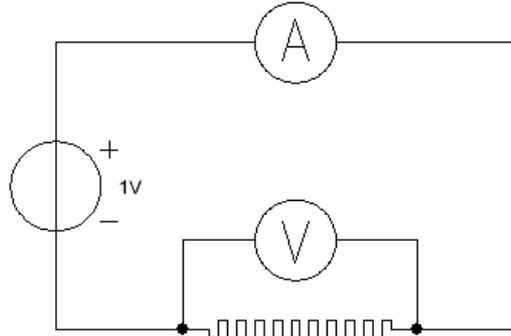
Beachte, dass der Strom hier in die entgegengesetzte Richtung fließt:

$$I_0^{\text{beladen}} = -I_0^{\text{entladen}}$$



Versuch: Widerstandsmessung

Man stellt für jede Widerstandsschaltung 1 V ein. Der Strom wird mit dem seriell geschalteten Amperemeter gemessen. Folgende Messeigenschaften können dargestellt werden: Querschnitts- und Materialabhängigkeit, Reihen- und Parallelschaltung des Widerstandes.



Versuch: Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstands



Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstands:

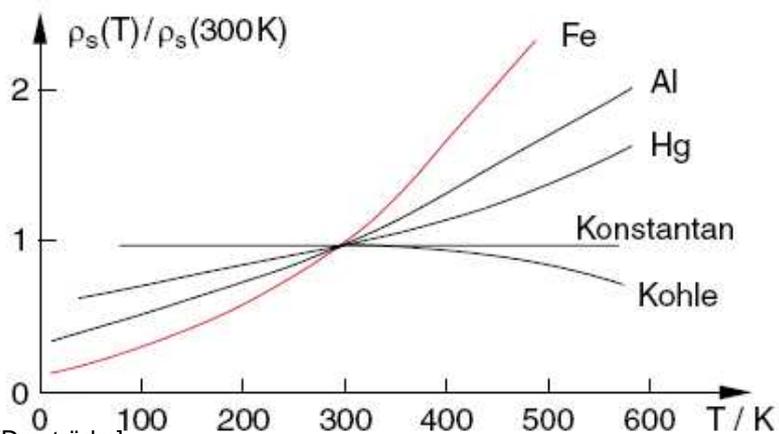
a) Metalle

mit zunehmender Temperatur wird die mittlere thermische Geschwindigkeit der Elektronen größer

→ mittlere Zeit zwischen zwei Stößen, τ_s , verringert sich und damit die Wahrscheinlichkeit, dass die Elektronen ihre Energie an Phononen und Atomrümpfe abgeben

→ Abnahme der Leitfähigkeit bzw. Zunahme des spez. Widerstands:

$$\rho_s(T) \approx \rho_{s,0}(1 + \alpha T + \beta T^2)$$



b) Temperaturverlauf bei Halbleiter

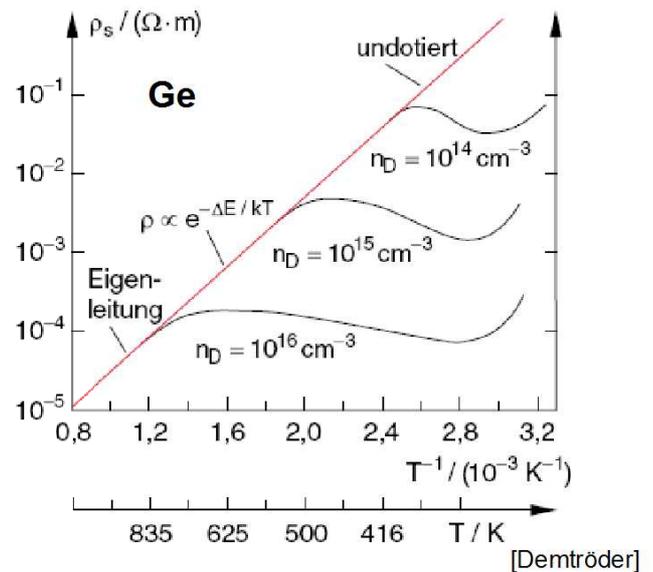
Bei Halbleitern wird Leitfähigkeit haupts. durch Dichte n der Leitungselektronen bestimmt. Diese kann durch Dotierung mit Fremdatomen (Donatoren) erhöht werden.

Dichte der freien Leitungselektronen erhöht sich gemäß

$$n(T) = n_0 e^{-\Delta E/k_B T}$$

ΔE = Energie zum Anheben der Elektronen vom gebundenen in den Leitungszustand.

Unterhalb einer Sättigungstemperatur T_s existieren noch nicht-ionisierte Donatoren, der spez. Widerstand wird unterhalb von T_s dominiert durch den Einfluss dieser Donatoren, es existiert ein negativer Temperaturkoeffizient α und ρ_s sinkt mit zunehmender Temperatur



c) Supraleitung

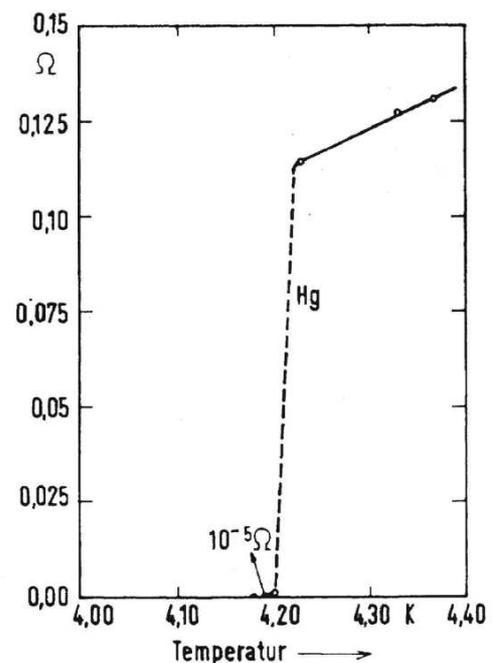
H. Kamerlingh Onnes (1911): unterhalb einer kritischen Temperatur (z.B. bei Quecksilber 4,15 K) sinkt der elektrische Widerstand von Metallen **sprungartig und vollständig auf Null**.

J. Bardeen, L. Cooper & J. Schrieffer (1957), BCS-Theorie:

2 Elektronen bilden über Wechselwirkung mit dem Atomgitter sog. **Cooper-Paare**.

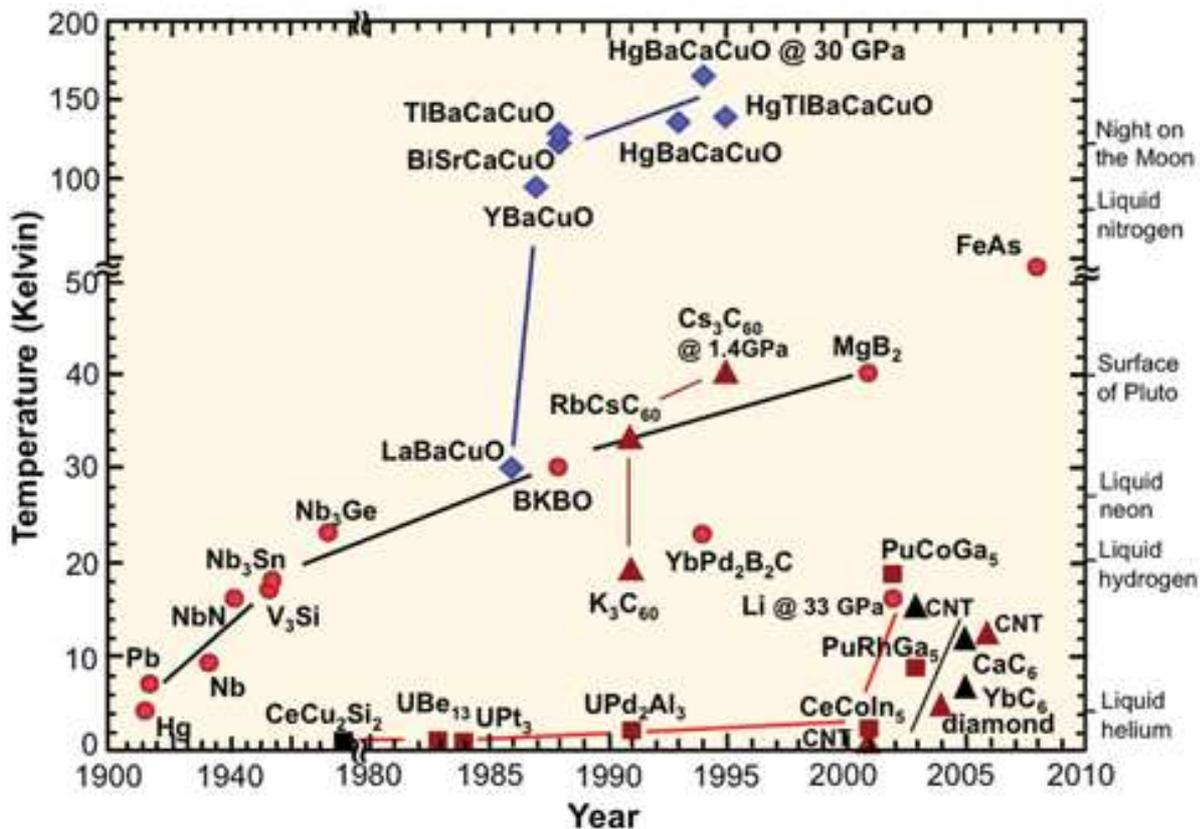
→ Bindungsenergie ΔE_c

Diese muss bei überwunden werden, um die Elektronen zu streuen, was bei tiefen Temperaturen aber nicht mehr möglich ist.



[www-solidstate.physik.uni-bremen.de]

Hochtemperatur-Supraleiter:



2.3 Stromleistung, Joulesche Wärme

- Arbeitsaufwand um Ladung gegen eine Potentialdifferenz zu bewegen: $W = q U$
- bei zeitlich konst. Spannung liefert Ladungsmenge dQ , die pro Zeit dt durch den Leiter fließt die **elektrische Leistung**

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

Einheit: $[P] = 1 \text{ Volt Ampere} = 1 \text{ Watt} = 1 \text{ W}$

- die während einer Zeit Δt verrichtete Arbeit ist (falls U, I zeitl. konst.)

$$W = \int_0^{\Delta t} U I dt = U I \Delta t$$

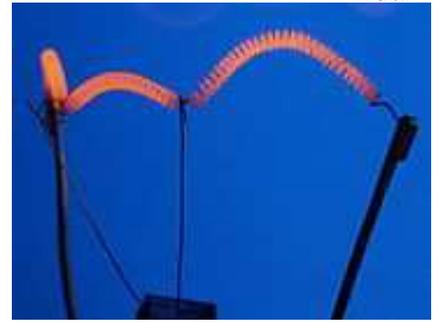
- diese Energie wird durch die Reibungskraft, die die Elektronen im Leiter erfahren in Wärme umgewandelt (\rightarrow **Joulesche Wärme**)

- in Ohmschen Leitern gilt

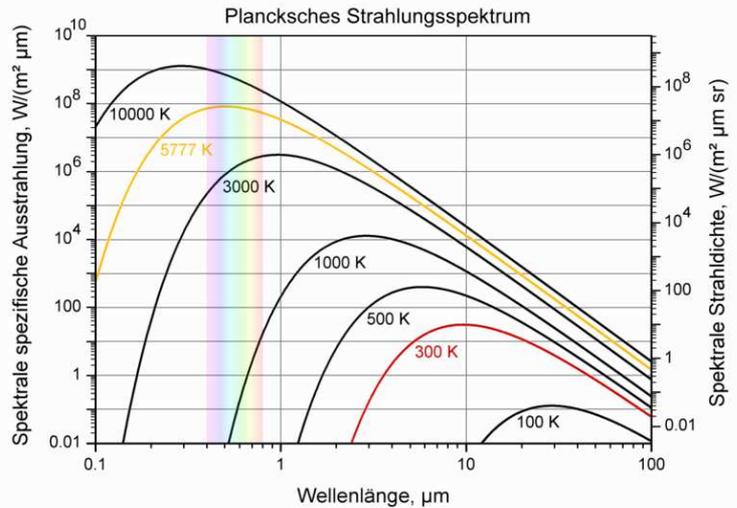
$$P = U I = I^2 R = \frac{U^2}{R}$$

Anwendungen:

- elektrische Kochplatten
- Glühlampen:
Wärmestrahlung (Glühfadentemperatur 2000-3000 K) besitzt einen gewissen Anteil im sichtbaren Spektralbereich.
Der Hauptanteil im Infrarotbereich wird als Wärme abgestrahlt.
→ geringe Lichtausbeuten um 3-5 %



- Versuch zur Jouleschen Wärme

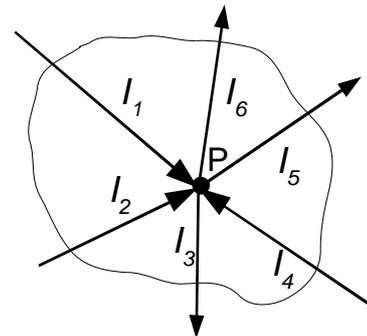


2.4 Kirchhoffsche Regeln

1. Kirchhoffsche Regel (Knotenregel):

Verzweigen sich mehrere Leiter in einem Punkt P, so muss die Summe der einlaufenden gleich der Summe der auslaufenden Ströme sein:

$$\sum_n I_n = 0$$



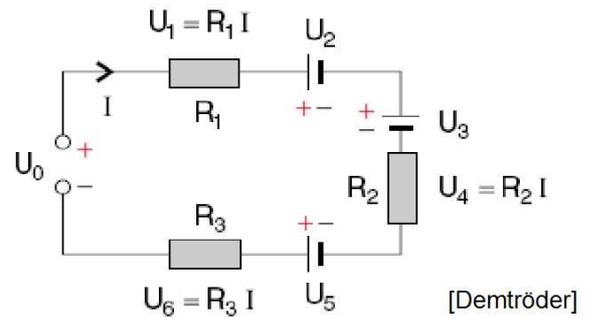
dies ergibt sich aus der Kontinuitätsgleichung, da in P keine Ladungen erzeugt oder vernichtet werden. Der Gesamtstrom durch eine umschlossene Fläche um P muss daher null sein:

$$\begin{aligned} 0 &= -\frac{dQ}{dt} = -\frac{d}{dt} \int_V \rho \, dV \\ &= \int_V \operatorname{div} \vec{j} \, dV = \int_A \vec{j} \cdot d\vec{A} = \sum_n I_n \end{aligned}$$

2. Kirchhoffsche Regel (Maschenregel):

In einem geschlossenen Stromkreis addieren sich die Teilspannungen zu Null:

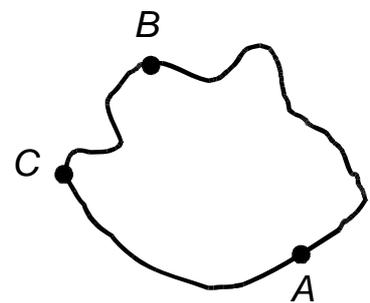
$$\sum_n U_n = 0$$



- erzeugte Spannungen haben hier ein **entgegengesetztes Vorzeichen** zu Verbrauchten
- gilt nur in Abwesenheit eines zeitl. veränderl. Magnetfelds

dies ergibt sich aus der **Energieerhaltung** für eine Ladungstransport auf einem geschlossenen Pfad:

$$W = \oint q \vec{E} \cdot d\vec{s} = 0$$

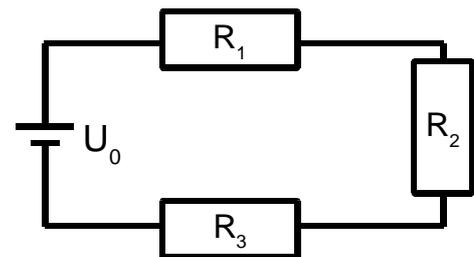


Mit dritten Punkt C gilt: $U_{AB} = U_{AC} + U_{CB}$

Reihenschaltung von Widerständen

- durch jeden Widerstand fließt derselbe Strom I
 - Spannungsabfall am n -ten Widerstand: $U_n = I R_n$
- aus Maschenregel:

$$U_0 = \sum_n U_n = I \sum_n R_n = I R_{\text{ges}}$$



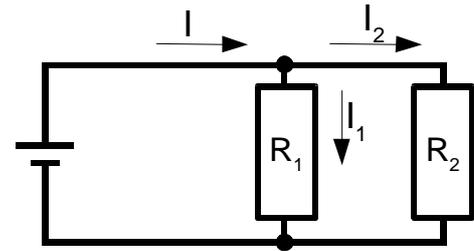
Bei einer Reihenschaltung von Widerständen addieren sich die Einzel-Widerstände zu einem Gesamt-Widerstand

$$R_{\text{ges}} = \sum_n R_n$$

Parallelschaltung von Widerständen:

hier ist laut Knotenregel:

$$\frac{U}{R} = I = I_1 + I_2 = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2}$$



Bei der Parallelschaltung von Widerständen addieren sich die Kehrwerte der Widerstände:

$$\frac{1}{R_{\text{ersatz}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

Der Gesamtwiderstand ist also kleiner als jeder Einzelwiderstand:

$$R_{\text{ersatz}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

Beispiel: Ermitteln des Gesamtwiderstands

Sei $R_1 = 10 \Omega$,

$R_2 = 10 \Omega$,

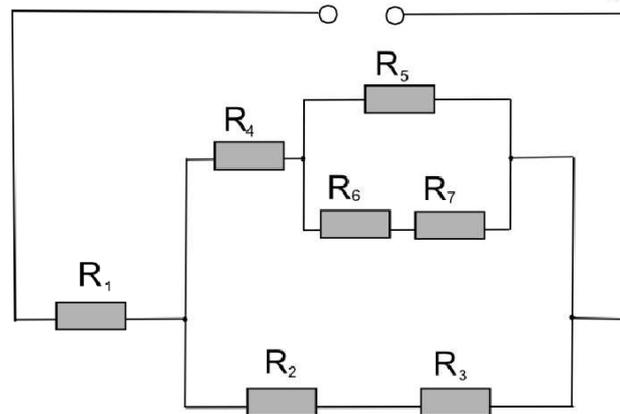
$R_3 = 30 \Omega$

$R_4 = 40 \Omega$

$R_5 = 50 \Omega$

$R_6 = 60 \Omega$

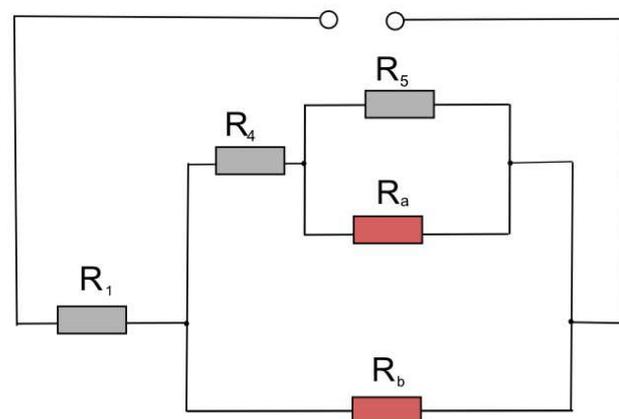
$R_7 = 70 \Omega$



(1) Ersetze die in Reihe geschalteten Widerstände durch Ersatzwiderstände

$R_a = 150 \Omega$

$R_b = 50 \Omega$



(2) Ersetze die parallel geschalteten Widerstände

$$1/R_c = 1/R_5 + 1/R_a$$

$$R_c = 37,5 \Omega$$

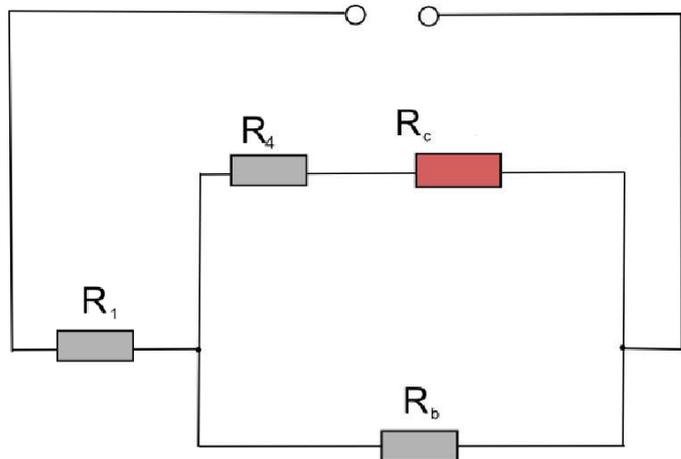
(3) analog:

$$R_d = R_4 + R_c = 77,5 \Omega$$

$$1/R_e = 1/R_b + 1/R_d$$

$$R_e = 30,39 \Omega$$

$$R_{\text{gesamt}} = R_1 + R_e = 40,39 \Omega$$



2.5 Elektrische Messverfahren

a) Versuch: Wheatstonesche Messbrücke:

Diese wird zur genauen Messung eines unbekanntes Widerstands R_x benutzt.

Der Schiebewiderstand wird so eingestellt, dass der gemessene Strom I genullt wird.

Es gilt
$$U_{CB} = U_0 \frac{R_x}{R_1 + R_x}$$

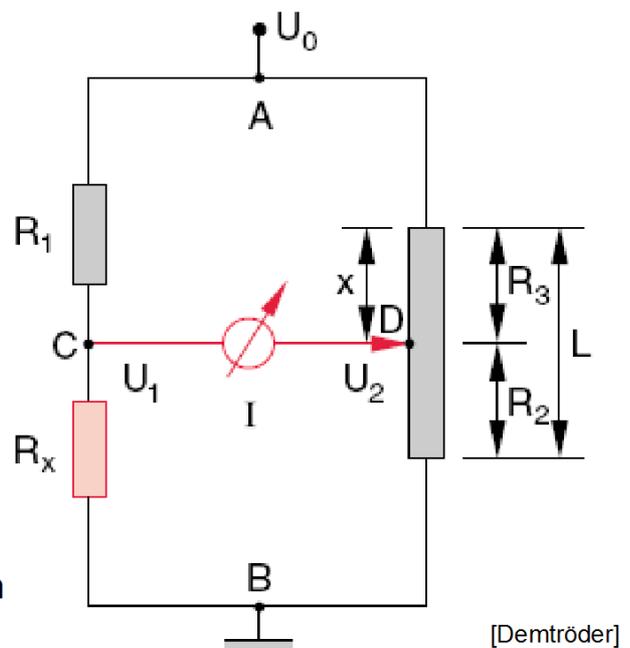
und
$$U_{DB} = U_0 \frac{R_2}{R_2 + R_3}$$

diese Spannungen sind gleich (und $I = 0$), wenn

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

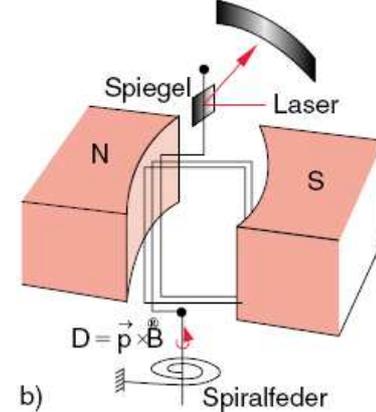
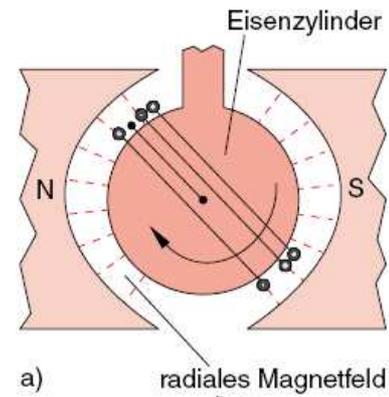
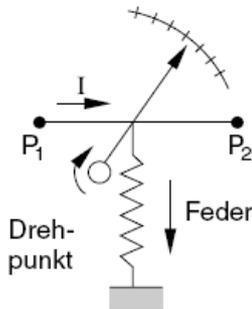
mit $R_2 \sim L - x$ und $R_3 \sim x$ folgt daraus

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



b) Hitzedraht-Amperemeter:

- Widerstand erzeugt Joulesche Wärme
→ Erhitzen und Wärmeausdehnung eines Metalldrahts



c) Strommessung durch Ausnutzung magnetischer Wirkungen:

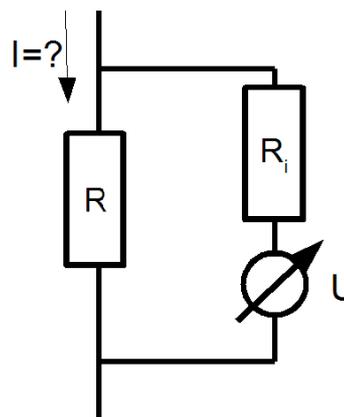
- Ströme erzeugen Magnetfelder
→ Kraft auf Leiter in einem externen Magnetfeld
- Bsp: Drehspul-Amperemeter,

[Bilder: Demtröder]

d) Voltmeter als Strommesser

Spannungsmessung U an bekanntem Widerstand R → $I = U / R$

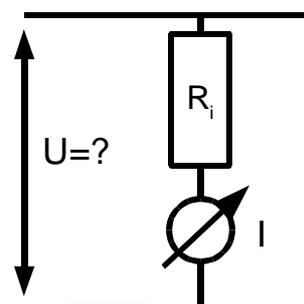
Wichtig: Innenwiderstand R_i des Voltmeters muss sehr groß vgl. mit R sein



e) Strommessgerät als Voltmeter

analog gibt der Strom durch einen bekannten, kleinen Widerstand die Spannung eines parallel geschalteten Verbrauchers: $U = R I$

auch hier: Innenwiderstand muss möglichst groß sein, damit der Messstrom gegen den Gesamtstrom vernachlässigt werden kann



2.6 Elektrolyse



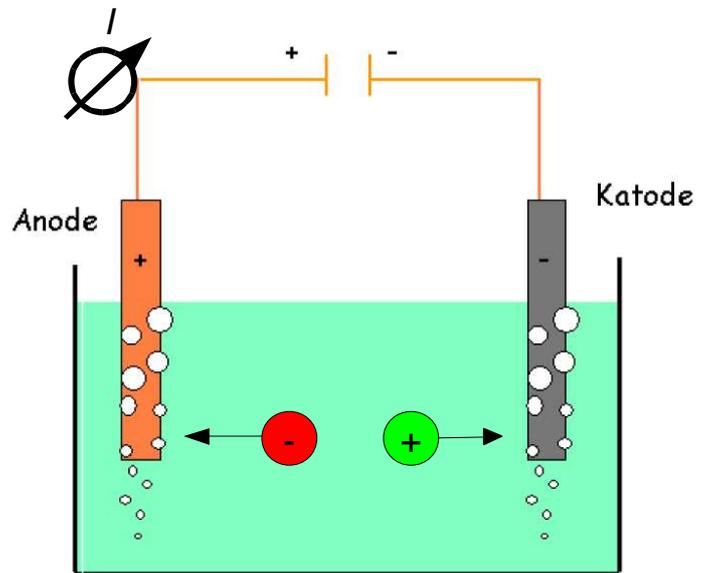
Elektrolyse: Elektrische Leitung in ionischen Schmelzen und Flüssigkeiten (**Elektrolyte**)

Spannung U an zwei Metallelektroden in einer Flüssigkeit mit gelösten Säuren/Laugen/Salzen

→ Stromfluss I durch chemische Zersetzung des Elektrolyts.

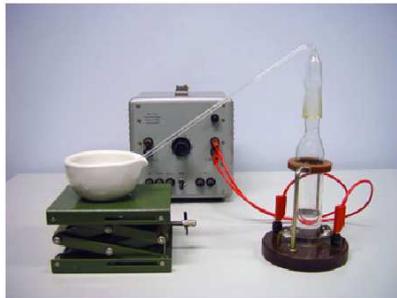
→ Abscheidung der Ionen an den Elektroden

Elektrolyte: Moleküle mit unsymmetrischer Elektronenverteilung

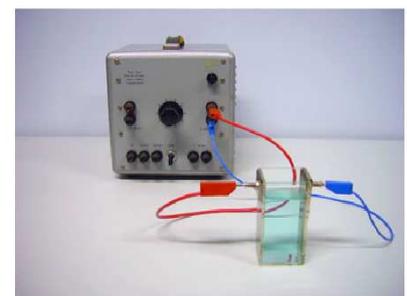


Versuche zur Elektrolyse:

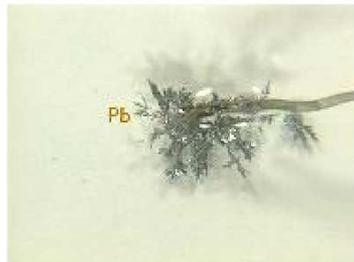
1. Erzeugung von Knallgas



2. Verkupfern einer Nickelelektrode



3. Bleibaum



4. Verkupfern und Versilbern eines Eisenstabes

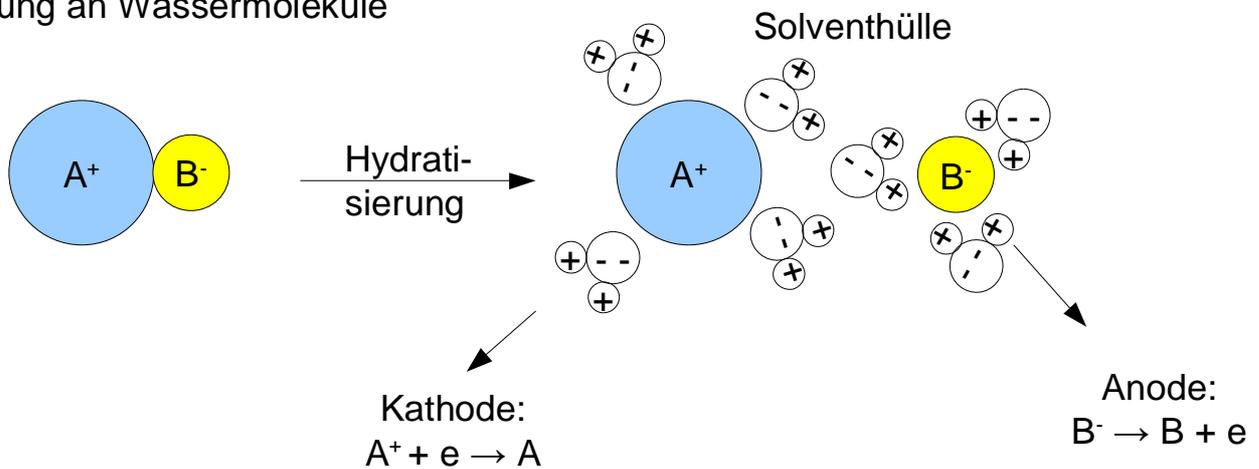


Hydratisierung des Moleküls in Wasser

bereits ohne Spannung Dissoziation der Moleküle

Beispiel Kupfersulfatlösung in Wasser: $\text{CuSO}_4 \rightarrow \text{Cu}^{++} + \text{SO}_4^{--}$

Anlagerung an Wassermoleküle



→ bipolarer Stromfluss $\vec{j} = \vec{j}_+ + \vec{j}_- = e (Z_+ \mu_+ n_+ + Z_- \mu_- n_-) \vec{E}$

(Z : Wertigkeit der Ionen, μ : Mobilität (Beweglichkeit),
 n : Konzentration)

Chemische Reaktion der Ionen an den Elektroden abhängig von Molekülen und Elektrodenmaterial.

a) Beispiel verdünnte Schwefelsäure und Pt-Elektroden:

Hydratisierung: $\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow 2\text{H}^+ + \text{SO}_4^{--}$

A: $2\text{SO}_4^{--} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{e} + 2\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{O}_2$

K: $4\text{H}^+ + 4\text{e} \rightarrow 2\text{H}_2$

→ es wird also das Wasser zersetzt

b) Beispiel Kupfersulfat und Cu-Elektroden:

Hydratisierung: $\text{CuSO}_4 \rightarrow \text{Cu}^{++} + \text{SO}_4^{--}$

A: $\text{SO}_4^{--} + \text{Cu} \rightarrow 2\text{e} + \text{CuSO}_4$

K: $\text{Cu}^{++} + 2\text{e} \rightarrow \text{Cu}$

→ Kupfer wird von der Anode zur Kathode transportiert

Erstes Faraday-Gesetz: Die abgeschiedene Stoffmenge ist proportional zur geflossenen el. Ladung durch den Elektrolyten

$$\text{Masse } m = A Q = A I t$$

(A: **elektrochemisches Äquivalent**, I: Strom, t: Zeit)

$$1 \text{ mol: } N_A = 6,02214 \cdot 10^{23} \text{ Teilchen}$$

Zur Abscheidung von ein Mol eines einwertigen Elements ist die Ladung $e \cdot N_A$ erforderlich → **Faraday-Konstante**

$$F = e N_A = 96485,3 \text{ C/mol}$$

für Ionen mit Molmasse M und Wertigkeit Z :
$$A = \frac{M}{Z F}$$

Zweites Faraday-Gesetz: Die durch eine bestimmte Ladungsmenge abgeschiedene Masse m eines Elements ist proportional zur Atommasse des abgeschiedenen Elements und umgekehrt proportional zu seiner Wertigkeit

oder: das elektrochemische Äquivalent
$$A \propto \frac{M_1}{Z_1} = \frac{M_2}{Z_2}$$

Galvanische Elemente

Wir betrachten eine Metallelektrode in einer elektrolytischen Lösung, ohne äußere Spannung

- Zwischen Elektrode und Elektrolyt:
Beim Auslösen des Metalls in das Elektrolyt (Hydratisierung) wird Energie frei

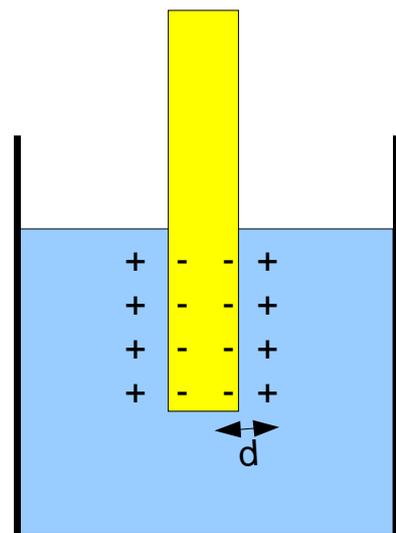
→ Diffusion von Metallionen in die Flüssigkeit, es entsteht ein Konzentrationsgefälle

→ Aufbau einer negativen Raumladungzone in der Elektrode & einer positiven Rz. im Elektrolyten

→ elektrisches Feld (Spannung U/d) das der Diffusion entgegenwirkt

- Gleichgewicht, wenn für die Konzentrationen c_1 & c_2 in der Elektrode/im Elektrolyt gilt:

$$\frac{c_1}{c_2} = e^{-eU/(k_B T)}$$



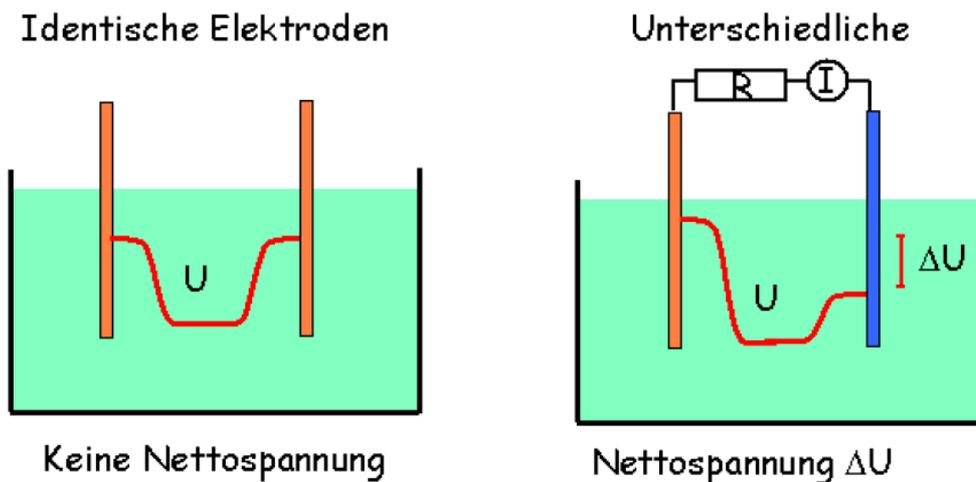
Die Spannung herrscht zunächst einmal nur zwischen Elektrode & Elektrolyt

Bringt man aber zwei verschiedene Metalle in das Elektrolyt, so hat man i.A. auch zwei Spannungswerte relativ zum Niveau des Elektrolyten

→ Spannungsdifferenz zwischen den Elektroden

→ Bei Belastung (z.B. über Widerstand R) fließt ein Strom $I = \frac{U}{R + R_i}$

man erhält eine **Batterie** (R_i : Innenwiderstand)



Elektrochemische Spannungsreihe: Spannungen werden relativ zu einer Referenzelektrode (Pt umspült von H_2 in HCl-Säure) vermessen d.h. Spannung erzeugt durch $H_2 \rightarrow 2 H^+ + 2 e^-$ wird (willkürlich) auf Null gesetzt

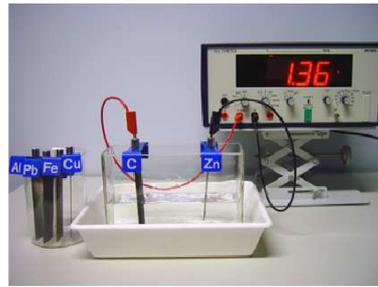


die Differenzen geben die zu erwartende Spannung der Batterie an.

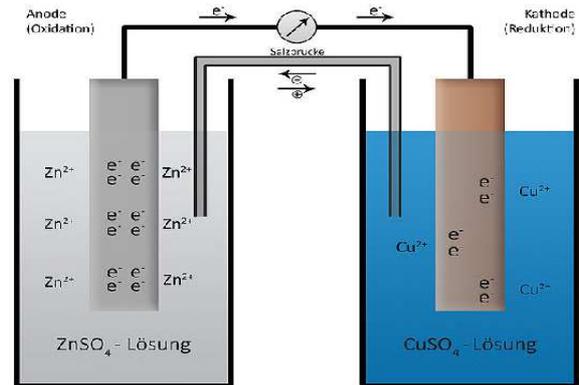
Oxidierter Form + $x e^-$	reduzierte Form	Standardpotential in V
$F_2 + 2e^-$	2F	2,87
$H_2O_2 + 2H^+ + 2e^-$	2H ₂ O	1,78
$MnO_4^- + 8H^+ + 5e^-$	$Mn^{2+} + 4H_2O$	1,51
$Cl_2 + 2e^-$	2Cl ⁻	1,36
$Cr_2O_7^{2-} + 14H^+ + 6e^-$	$2Cr^{3+} + 7H_2O$	1,33
$O_2 + 4H^+ + 4e^-$	2H ₂ O	1,23
$Br_2 + 2e^-$	2Br	1,09
$Ag^+ + e^-$	Ag	0,80
$Fe^{3+} + e^-$	Fe^{2+}	0,77
$O_2 + 2H^+ + 2e^-$	H ₂ O ₂	0,70
$I_2 + 2e^-$	2I ⁻	0,53
$O_2 + 2H_2O + 4e^-$	4OH ⁻	0,40
$Cu^{2+} + 2e^-$	Cu	0,34
$Sn^{4+} + 2e^-$	Sn^{2+}	0,15
$2H^+ + 2e^-$	H ₂	0
$Pb^{2+} + 2e^-$	Pb	-0,13
$Ni^{2+} + 2e^-$	Ni	-0,26
$Cd^{2+} + 2e^-$	Cd	-0,40
$Fe^{2+} + 2e^-$	Fe	-0,45
$Zn^{2+} + 2e^-$	Zn	-0,76
$2H_2O + 2e^-$	$H_2 + 2OH^-$	-0,83
$Al^{3+} + 3e^-$	Al	-1,66
$Mg^{2+} + 2e^-$	Mg	-2,37
$Na^+ + e^-$	Na	-2,71
$Li^+ + e^-$	Li	-3,04

Versuche:

1. Galvanische Elemente



2. Daniell-Element



[wikipedia]

Versuch: Obstbatterie

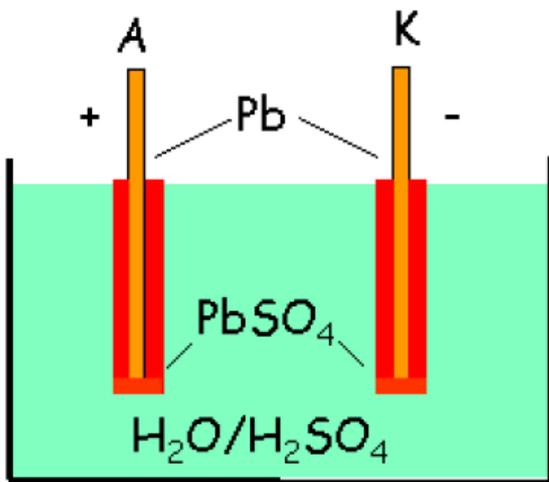


J. Beuys, „Capri-Batterie“, 1985
Pinakothek der Moderne, München

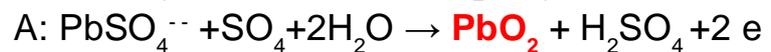
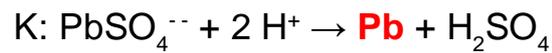
Akkumulatoren:

Basieren auf Polarisationsspannung zwischen identischen Elektroden.
Sie müssen zuvor aufgeladen werden.

Beispiel Pb-Akku: Pb-Elektroden in verdünnter Schwefelsäure



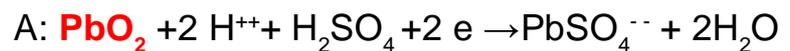
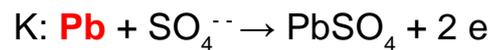
Aufladen:



Spannungsreihe:

$$U_p = 2,02 \text{ V zwischen Pb (-) und PbO}_2 \text{ (+)}$$

Entladen:

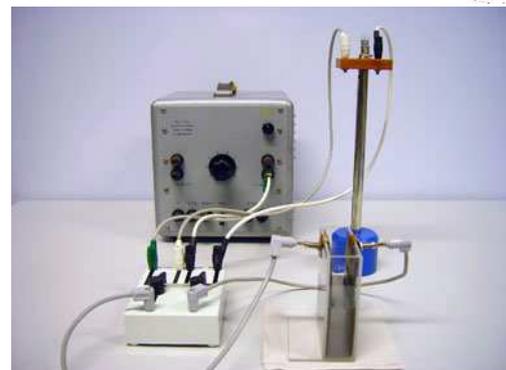


→ Akkumulatoren sind (begrenzt)
wiederaufladbar

Versuch: Blei-Akkumulator-Modell

weitere Beispiele:

- Ni/Cd-Akkus: Ni und Cd Elektroden in Kalilauge KOH:H₂O
- NiMH-Akkus: Ni & Metallhydrid (zB aus La_{0,8}Nd_{0,2}Ni_{2,5}Co_{2,4}Si_{0,1})
in Kalilauge



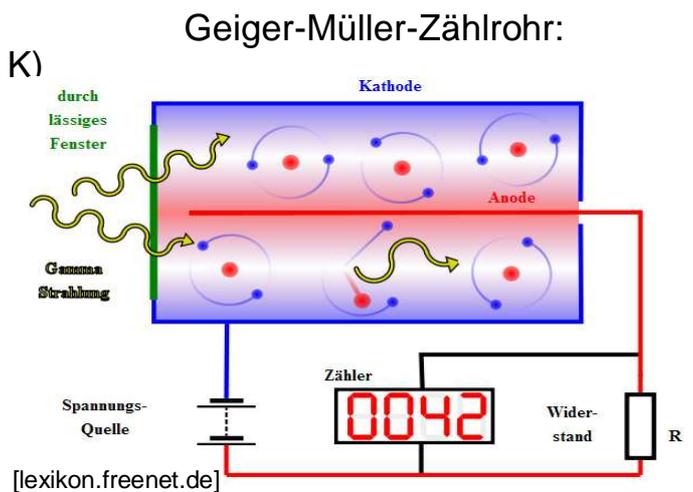
2.7 Stromtransport in Gasen



- Teilweise oder vollständig ionisierte Gase: **Plasmen**
- Ladungstransport durch Elektronen und pos. & neg. Ionen
- meist sind Plasmen über ein typ. Volumen $V \approx r_D^3$ (r_D : Debye-Länge) neutral

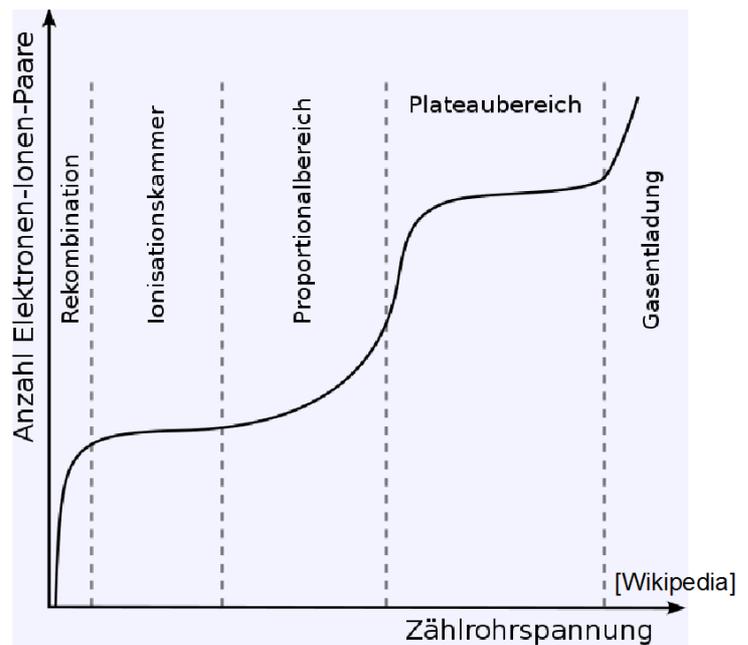
Ladungsträger können in Gasen erzeugt werden durch:

- Thermische Ionisation: durch Stöße untereinander werden die Atome im Gas ionisiert (Bsp: Sonnenoberfläche $T = 5800$ K)
- Stoßionisation von Elektronen in hohen Feldern: $e^- + A \rightarrow A^+ + e^- + e^-$
- Photoionisation, Auslösen der Elektronen durch kurzwellige Strahlung ($\sim 5-25$ eV) (vgl. Photoeffekt in Festkörpern)



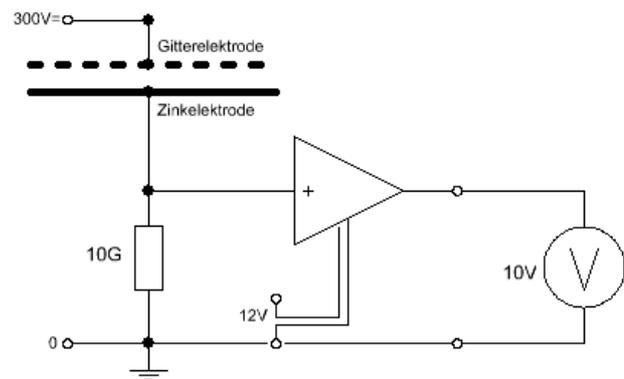
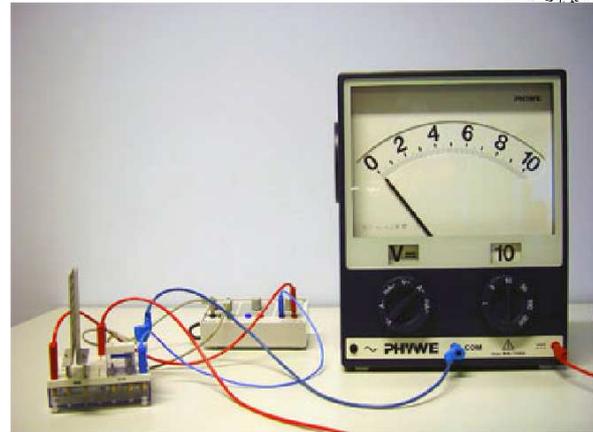
Strom-Spannungs-Kennlinie:

- Rekombinationsbereich: Ladungen werden im elektr. Feld beschleunigt, rekombinieren aber auch mit Gasatomen vor Erreichen der Elektroden; es gilt das Ohmsche Gesetz $U \sim I$;
- Sättigungsbereich: Rekombination findet nicht mehr statt, da Ladungsträger zu schnell die Elektroden erreichen. Strom $I \sim$ Energie der Teilchen
- Proportionalbereich: bei noch höherer Spannung kommt es zu Stoßionisationsprozessen
- Plateaubereich: Energie der Elektronen reicht aus um eine Ionisations-Lawine zu erzeugen. $\rightarrow 1$ Strompuls pro Teilchen \rightarrow Zählbereich



Versuch: Ionisation von Luft durch Radioaktivität und Flammengase

Ionisation der Luft zwischen den Elektroden durch eine Flamme bzw. ein radioaktives Präparat (Radium).



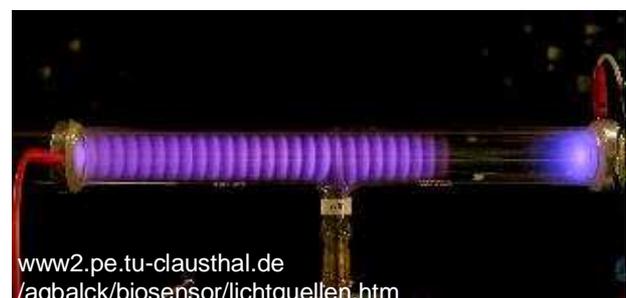
Versuch Gasentladungsröhre:

Beim Abpumpen werden verschiedene Leuchterscheinungen beobachtet:

mittlerer Druck: dicker werdender Leuchtfaden durch Stoßionisation

niedriger Druck:

- Leuchtsäule zerfällt in scheibchenförmige Strukturen → mittlere freie Weglänge, innerhalb der die Elektronen genügend Energie zur Anregung der Atome erlangen
- auf der Kathode aufprallende Ionen erzeugen Sekundärelektronen, die stark zur Anode beschleunigt werden und Atome ionisieren → bläulicher Lichtfleck
- **weitere Druckerniedrigung:** Lichtsäule verschwindet; grünliche Fluoreszenz durch die Kathodenstrahlung wird sichtbar



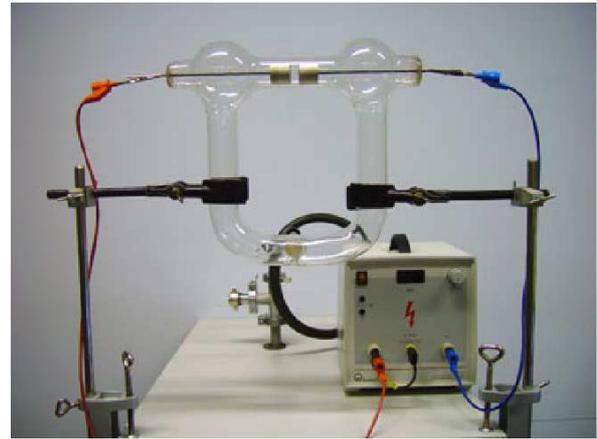
Versuch Hittdorfsches Umwegrohr:

Zwischen Anode und Kathode wird Hochspannung angelegt.

Dann wird mit der Vakuumpumpe das Rohr evakuiert. Nach einiger Zeit wechselt die Glimmentladung vom Bereich der kurzen Verbindung zwischen Anode und Kathode in den U-förmigen Bereich.

Der verminderte Luftdruck lässt dann nicht mehr genügend Stoßionisation auf dem kurzen Weg zu, so dass sich dort keine Entladung ausbilden kann.

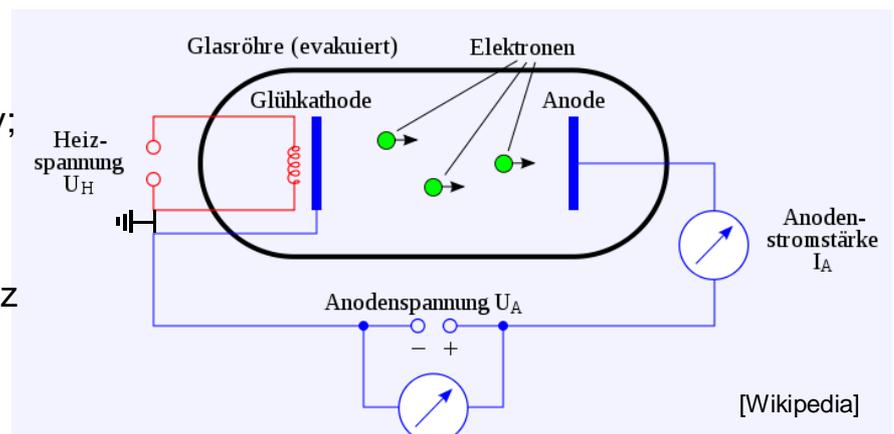
Auf dem langen Weg durch das Umwegrohr kann aber noch genügend Stoßionisation stattfinden.



Versuche mit einer Röhrendiode

Es werden folgende Eigenschaften der Röhrendiode demonstriert:

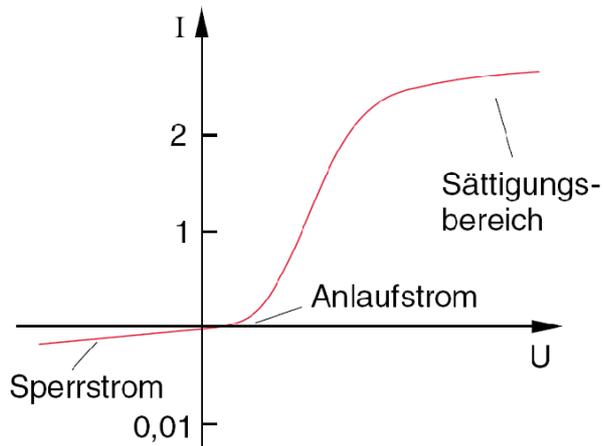
1. Ohne Heizspannung kein Stromfluss
2. Geheizte Kathode ohne Anodenspannung:
 - bei negativer Kathodenheizspannung ist das Potential der Anode gegenüber der Glühkathode positiv; aus der Kathode werden Elektronen emittiert, es fließt ein Strom zur Anode (Edison-Effekt)
 - bei positiver Heizspannung ist das Potential der Anode gegenüber der Kathode negativ; aus der Kathode werden einige Elektronen emittiert, die genügend kinetische Energie haben, um die Potentialdifferenz zu überwinden, es fließt ein kleiner Strom



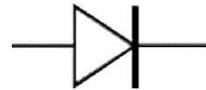
3. Geheizte Kathode mit Anodenspannung:

- positive Anodenspannung saugt die emittierten Elektronen zur Anode ab, es fließt ein Strom zur Anode;
- bei negativer Anodenspannung ist der Stromfluss sehr gering, die Diode sperrt den Strom.

Kennlinie einer Diode:



Symbol:



[Demtröder]