

Skriptteil 2

WWW: Blitze

<http://thunder.msfc.nasa.gov/>

<http://www.usatoday.com/weather/thunder/wlightning.htm>

<http://www.meteoros.de/light/blitz.htm>

<http://www.wetteronline.de/eurobli.htm>

Nachdenken/Nachlesen:

- Gesundheitsgefahren durch elektrische Spannung und elektrischen Strom
- Wie kann man auf einfache Weise mit einem Halbleiter die Boltzmannkonstante messen ?

Mitbringsel:

Glimmlampe, Leuchtstoffröhre

2. Elektrischer Strom

Bewegen sich viele Ladungsträger innerhalb einer Substanz oder auch im Vakuum in einer Richtung, spricht man von einem elektrischen Strom. Man unterscheidet ferner zwischen Gleichstrom und Wechselstrom; bei letzterem ändern sich Stärke und Richtung (meist periodisch) mit der Zeit.

Wir betrachten zunächst nur Gleichströme, obwohl viele Aussagen auch bei Wechselströmen ihre Gültigkeit behalten.

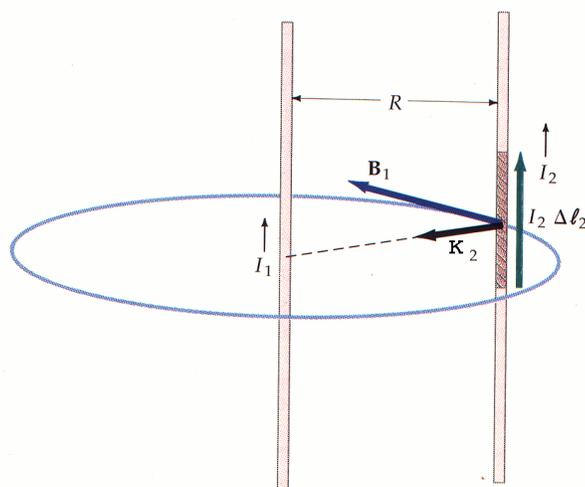
2.1. Einheit; Ladung und Strom

Die Stromstärke ist der Ladungsfluss pro Zeit:

$$I = \frac{dQ}{dt} \quad (1)$$

Die Einheit **A** = Ampere ist benannt nach A.M. Ampere, der vor etwa 200 Jahren entdeckte, dass zwischen elektrischen Leitern Kräfte auftreten:

1 Ampere ist die Stromstärke **I**, die zwischen 2 unendlich langen parallelen leitenden Drähten, die beide vom Strom **I** durchflossen werden und einen Abstand von **R** = 1 m haben, eine Kraft von $2 \cdot 10^{-7}$ N/m hervorruft.



Die Richtung ist (aus historischen Gründen) als die Bewegungsrichtung der positiven Ladungsträger definiert!

VERSUCH 4.4.1: Kraft zwischen Leitern.

Den Zusammenhang zwischen Strömen, Magnetfeldern und Kräften werden wir später studieren.

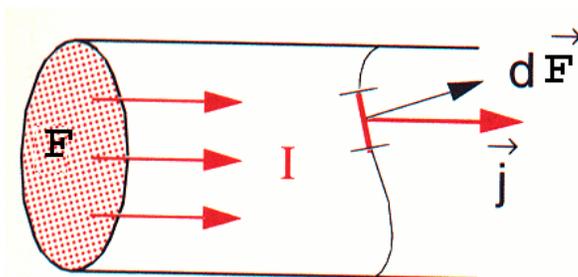
Beispiel:

In einem kreisförmigen Teilchenbeschleuniger des Umfangs $L = 10 \text{ m}$ fliegen $N = 10^{10}$ hochrelativistische Elektronen. Der mittlere Strahlstrom in Flugrichtung ist

$$\langle I \rangle = -\frac{Ne}{L/c} = -0.05 \text{ A} \quad (2)$$

Die Stromdichte \vec{j} ist definiert als Strom pro Fläche F . Den Strom durch einen Leiter bekommt man dann durch Integration über eine Querschnittsfläche:

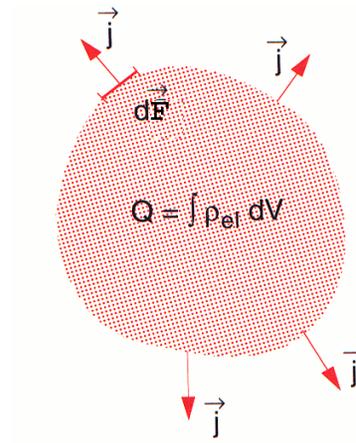
$$I = \int \vec{j} \cdot d\vec{F} \quad (3)$$



Die elektrische Ladung ist eine Erhaltungsgröße. Die an einer Stromquelle sitzende Ladung(sdicke) muss also entsprechend zeitlich abnehmen. Dies drückt die Kontinuitätsgleichung aus:

$$\boxed{\vec{\nabla} \cdot \vec{j} + \frac{\partial \rho_e}{\partial t} = 0} \quad (4)$$

wobei ρ_e die auf das Volumen bezogene elektrische Ladungsdichte ist: 'Zeitlich veränderliche Ladungen sind Stromquellen'. Integral über eine geschlossene Oberfläche (Satz von Gauss!):



$$\oint_F \vec{j} d\vec{F} + \frac{\partial Q}{\partial t} = 0 \quad (5)$$

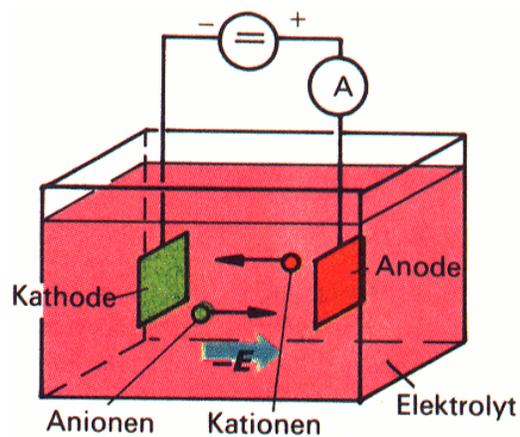
‘Was aus dem Inneren verschwindet muss draußen ankommen!’

2.2. Mechanismen der Stromleitung in Materie - Übersicht

Stromleitung kann es in Festkörpern, Flüssigkeiten und Gasen (Plasmen) geben.

Die Ladungsträger sind

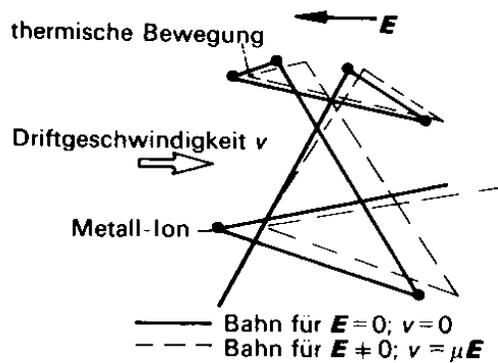
- Elektronen (Metalle, Halbleiter)
- Ionen (elektrolytische Flüssigkeiten) [Elektrolyse]



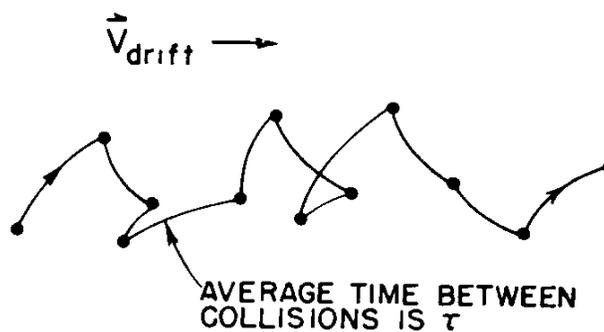
- beide gleichzeitig (Plasma= ionisiertes Gas) [Funkenentladung, Blitz in Atmosphäre].



Die freien Ladungsträger führen thermische Bewegungen mit der mittleren Geschwindigkeit v_{th} aus, die durch ein äußeres E-Feld so beeinflusst werden, dass *im Mittel* die Ladungsträger sich in (bzw. entgegen) der Feldrichtung bewegen:



Die Teilchen werden beschleunigt und dann in Stößen wieder abgebremst. Bei angelegtem Feld könnte eine Elektronbahn so aussehen:



Die mittlere freie Wegstrecke beträgt einige Dutzend Atomabstände (in einem Metall)

Wir entwickeln ein einfaches Modell für den Leitungsmechanismus:

Die mittlere Geschwindigkeit, mit der sie sich entlang des Feldes bewegen, ist die Driftgeschwindigkeit v_D :

$$\vec{v}_D \approx \vec{a} \cdot \tau_s = \frac{\vec{E}q}{m} \cdot \tau_s \quad (6)$$

τ_s ist die mittlere Zeit zwischen zwei Stößen. v_D hängt vom Material, von der Temperatur und natürlich von der Feldstärke ab. Durch das Abbremsen ('Reibung', 'Widerstand') wird Energie an den Leiter abgegeben, der sich entsprechend erwärmt. Die Beweglichkeit μ ist definiert durch

$$\boxed{\mu = \frac{q}{m} \cdot \tau_s} \quad (7)$$

Diese Größe ist temperaturabhängig, aber in guter Näherung unabhängig von der Feldstärke, also ergibt sich bei fester Temperatur folgende Proportionalität:

$$\boxed{\vec{v}_D = \mu \cdot \vec{E}} \quad (8)$$

Beispiele:

a) Elektronen in Kupfer bei Zimmertemperatur: $v_{th} \sim 10^6$ m/s, $v_D \sim 1$ mm/s

b) Ionen in Lösung: $v_{th} \approx 10^3$ m/s, $v_D \approx 10^{-4}$ mm/s,

Die Driftgeschwindigkeiten gelten für eine Feldstärke von 1 V/m.

2.3. Elektrischer Widerstand und Ohmsches Gesetz

Wir nehmen an, dass nur eine Ladungsträgersorte der Ladung q mit der Volumendichte n in einem Leiter zum Ladungstransport beiträgt. Die Stromdichte ist dann

$$\vec{j} = n \cdot q \cdot \vec{v}_D = \frac{q^2}{m} \cdot n \cdot \tau_s \cdot \vec{E} \quad (9)$$

Der Faktor ist die elektrische Leitfähigkeit

$$\boxed{\sigma_e = \frac{q^2}{m} \cdot n \cdot \tau_s} \quad (10)$$

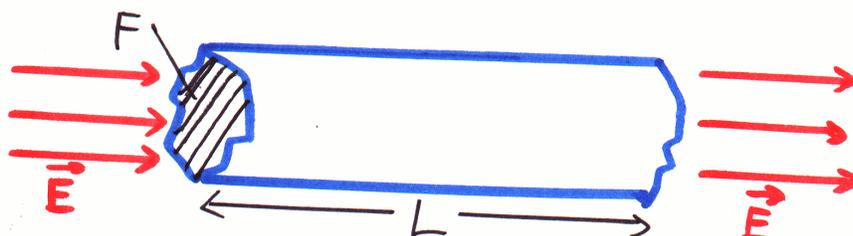
die vom Material und der Temperatur abhängt. In vielen Fällen (Metalle) ist σ_e **nicht** (oder kaum) vom angelegten E-Feld abhängig, d.h. Stromdichte und Feldstärke sind proportional:

'Ohmsches Gesetz':

$$\boxed{\vec{j} = \sigma_e \cdot \vec{E}} \quad \sigma_e = \text{const} \quad (11)$$

($\sigma_e = \text{const}$ bezieht sich nur auf die E-Abhängigkeit!)

Damit ist auch der Gesamtstrom durch einen homogenen Leiter der angelegten Spannung proportional:



$$E = U/L \quad j = I/F \quad (12)$$

Also:

$$I = \frac{U}{R} \quad (13)$$

mit dem elektrischen Widerstand

$$R = \frac{1}{\sigma_e} \cdot \frac{L}{F} = \rho_e \cdot \frac{L}{F} \quad (14)$$

Einheit:

$$\Omega = \text{Ohm} = \text{V/A}$$

zu Ehren des Entdeckers des nach ihm benannten Gesetzes, G.S. Ohm (1826). ρ_e ist der spezifische Widerstand.

VERSUCH 4.5.1: Ohmsches Gesetz

VERSUCH 4.5.1: Widerstand von Metalldrahnten

Entlang des Leiters sind Widerstand und Spannungsabfall proportional zur Länge $l < L$

Beispiele für ρ_e bei Zimmertemperatur:

Glas	$10^{11} - 10^{12}$	Ωm
Destilliertes Wasser	10^4	Ωm
Salzsäure (10%)	10^{-2}	Ωm
Blei	$2 \cdot 10^{-7}$	Ωm
Kupfer	$1.7 \cdot 10^{-8}$	Ωm

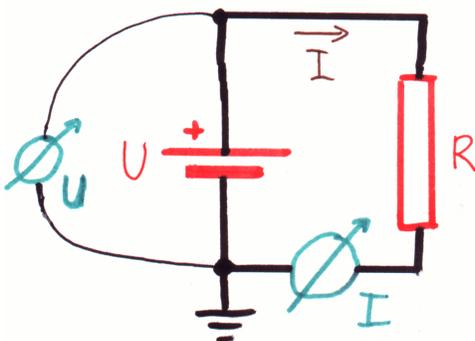
Beispiel:

Kupferdraht, $L = 1 \text{ km}$, $F = 1 \text{ mm}^2$: $R = 17 \Omega$.

Im folgenden betrachten wir zunächst nur 'Ohmsche Widerstände'.

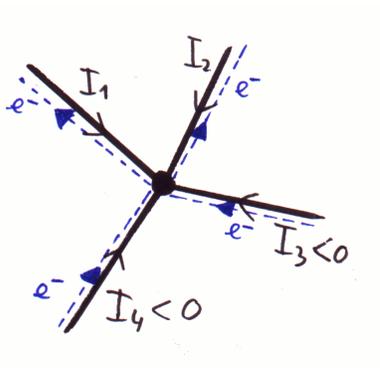
2.4. Einfache Schaltungen

Das folgende Schaltbild führt das Symbol für den elektrischen Widerstand, eine Gleichspannungsquelle und die 'Erde' (Potential $\equiv 0$) ein:



Die Zuleitungen haben den Widerstand null; Die Spannungs- und Strommessgeräte sollen die Spannungen und Ströme nicht beeinflussen (Idealisierungen!).

1. Kirchhoffsche Regel = Knotenregel:

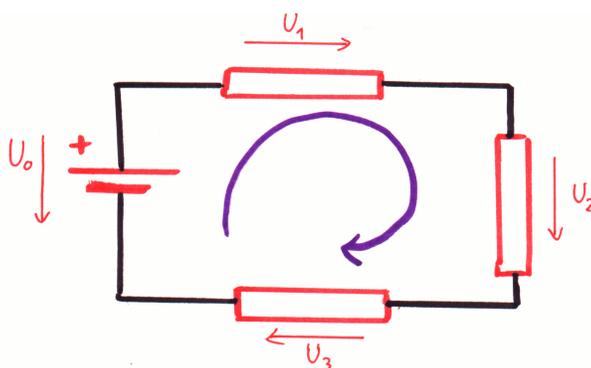


$$\boxed{\sum I_i = 0} \quad (15)$$

Vorzeichen beachten: positiv = einlaufende positive Ladung, negativ = auslaufende positive Ladung! Regel folgt aus der Kontinuitätsgleichung (Ladungserhaltung).

2. Kirchhoffsche Regel = Maschenregel:

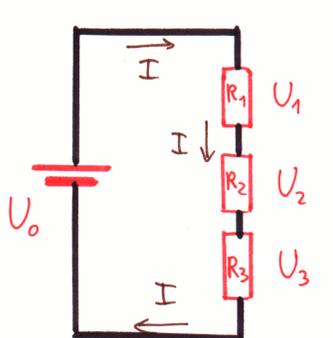
Masche = Schleife = geschlossener Stromkreis



$$\boxed{\sum U_i = 0} \quad (16)$$

Vorzeichen: an Widerstand wie I, Spannungsquelle: von '+' nach '-'. Ursache: E-Feld ist konservativ. Diese Regel gilt ganz allgemein, auch bei Vorhandensein anderer Elemente wie Kondensatoren.

Serienschaltung = Reihenschaltung von Widerständen:



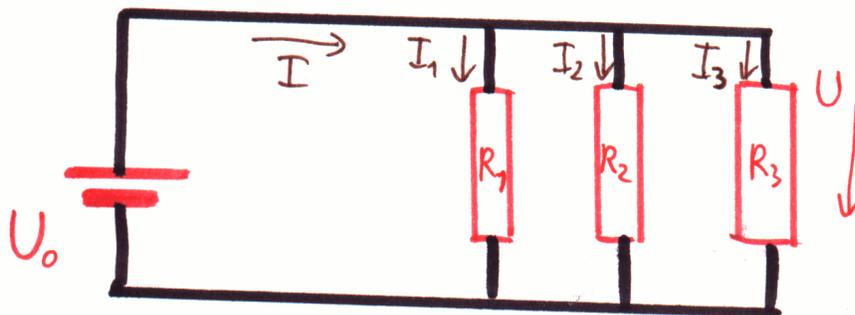
Der Strom durch alle Widerstände ist gleich:

$$I \cdot R = |U_0| = \sum U_i = \sum R_i \cdot I \quad (17)$$

also

$$\boxed{R = \sum R_i} \quad (18)$$

Parallelschaltung von Widerständen:



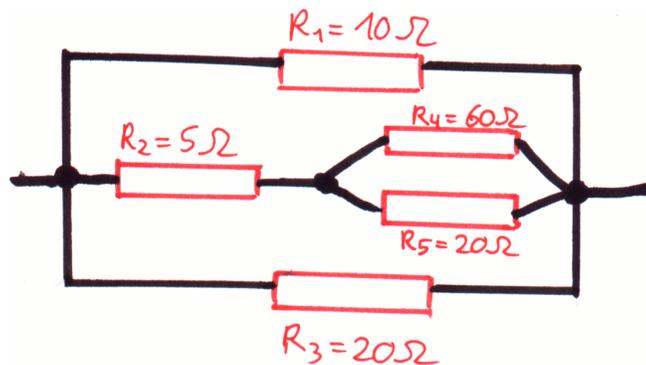
Jetzt ist die Spannung überall gleich:

$$U/R = I = \sum I_i = \sum U/R_i \quad (19)$$

also

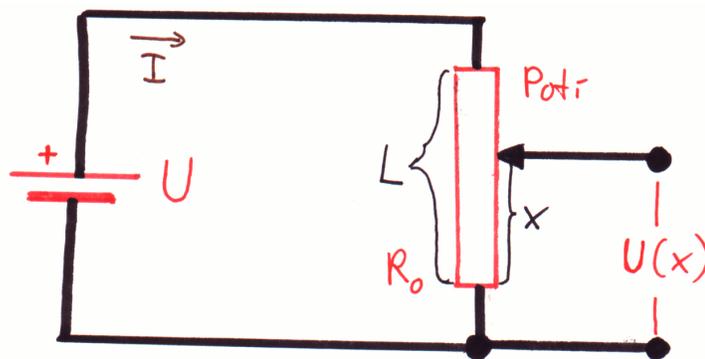
$$\boxed{R^{-1} = \sum R_i^{-1}} \quad (20)$$

Beispiel:



R_4 und R_5 haben zusammen den Widerstand $15\ \Omega$, dieser zusammen mit R_2 ergibt $R'_2 = 20\ \Omega$. Die Parallelschaltung von R_1 , R'_2 , R_3 hat den Gesamtwiderstand $R = 5\ \Omega$.

Spannungsteiler= Potentiometer:

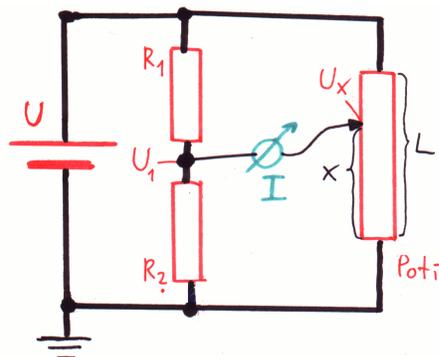


Der Widerstand wächst linear mit der abgegriffenen Länge: $R(x) = x/L \cdot R_0$. Der Strom durch R ist davon unabhängig. Die abgegriffene Spannung ist

$$U(x) = I \cdot R(x) = \frac{x}{L} \cdot I \cdot R_0 = \frac{x}{L} \cdot U_0 \quad (21)$$

VERSUCH: Spannungsteiler

Wheatstone'sche Brückenschaltung:



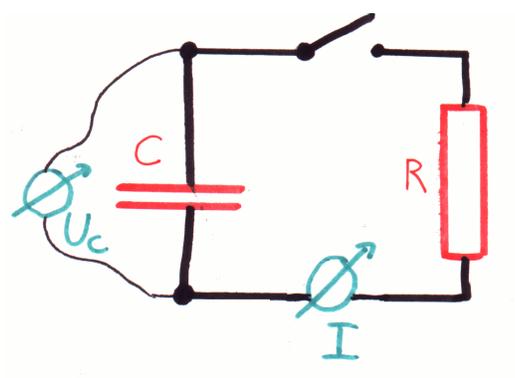
Erlaubt genaue (relative) Widerstandsmessung durch Nullabgleich: Wenn $I = 0$ gilt $U_1 = U_x$ und damit

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{x}{L-x} \quad (22)$$

VERSUCH 4.5.2: Wheatstone'sche Brückenschaltung

SAMMLUNG VON WIDERSTÄNDEN UND POTENTIOMETERN

Kondensatorentladung:



Annahme: 'langsamer' \approx quasistatischer Prozess (sonst: elektromagnetische Wellen!). Kondensator sei auf Spannung U_0 aufgeladen. Er spielt die Rolle einer Spannungsquelle. Bei Schließen des Schalters:

$$0 \equiv U_C + U_R = Q(t)/C + RI(t) \quad (23)$$

Zeitableitung:

$$0 = I(t)/C + R\dot{I}(t) \quad (24)$$

Lösung: Exponentieller Abfall

$$I(t) = \frac{U_0}{R} \cdot e^{-t/\tau} \quad U_C(t) = U_0 \cdot e^{-t/\tau} \quad (25)$$

mit Zeitkonstante

$$\tau = RC \quad (26)$$

Aufladen:

VERSUCH: Kondensator

→ ÜBUNG!

2.5. Elektrische Leistung

Eine (konstante) Spannungsquelle verrichtet bei ‘Durchpressen’ des Stromes durch den Widerstand Arbeit, der Leiter erwärmt sich: Joulesche Wärme. Bewegt sich die Ladung Q so, dass die Potentialdifferenz U beträgt, so beträgt die freigesetzte Arbeit $\dot{W} = U \cdot \dot{Q}$. Die Heizleistung ist also

$$P = \dot{W} = U \cdot \dot{Q} \quad (27)$$

$$P = U \cdot I = \frac{U^2}{R} = I^2 \cdot R \quad (28)$$

VERSUCH: Joulesche Wärme

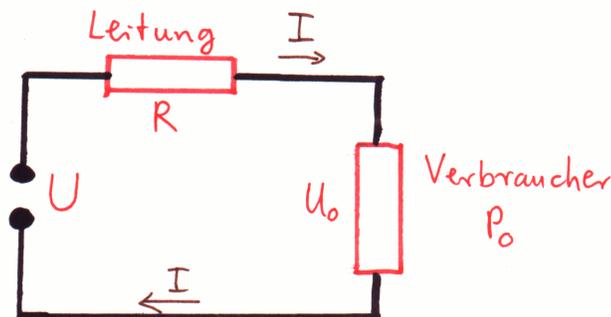
Beispiel:

Ein Widerstand $R = 22 \Omega$ für eine elektronische Schaltung kann max. $1/8 \text{ W}$ vertragen. Welche Spannung darf man maximal anlegen ?

$$U_{max} = \sqrt{P \cdot R} = 1.7 \text{ V} \quad (29)$$

Anwendung: Hochspannungsleitung

Je höher die Spannung (bei gegebenem Leitungswiderstand R und gegebener Verbraucherleistung P_0), desto kleiner die Verlustleistung P_V . ‘Ersatzschaltbild’:



$$P_V = I^2 \cdot R \quad P_0 = U_0 \cdot I = (U - IR) \cdot I \approx U \cdot I \quad (30)$$

Hier wurde genähert, dass $P_V \ll P_0$. Also:

$$P_V \approx R \cdot \frac{P_0^2}{U^2} \quad (31)$$

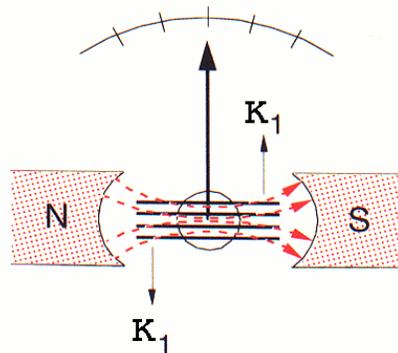
Da hohe Spannungen für den Endverbraucher ungeeignet sind, muss man sie - möglichst ohne Energieverluste - ‘heruntertransformieren’ (durch Transformatoren, Wechselspannung).

2.6. Strom- und Spannungsmessung

Man kann die verschiedenen Wirkungen des elektrischen Stromes wie Wärmeerzeugung, elektrolytische Effekte etc. ausnutzen.

In der Praxis kommen zwei Arten von Amperemetern vor:

- elektromechanische Zeigerinstrumente. Hier wird (s. Definition des Amperes) die magnetische Kraftwirkung von elektrischen Strömen ausgenutzt: Drehspulinstrument:

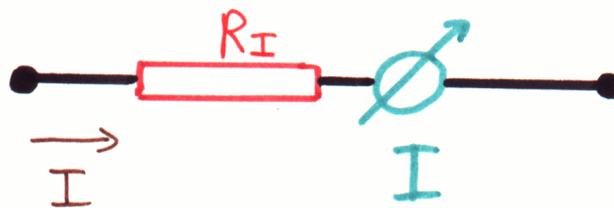


Eine Spiralfeder zieht den Zeiger im stromlosen Zustand wieder auf 'null'. Mit den empfindlichsten Geräten kann man noch Ströme im nA-Bereich messen (Spiegelgalvanometer). Wechselströme muss man zur Messung gleichrichten.

VERSUCH 4.9.1: Drehspulmessinstrument

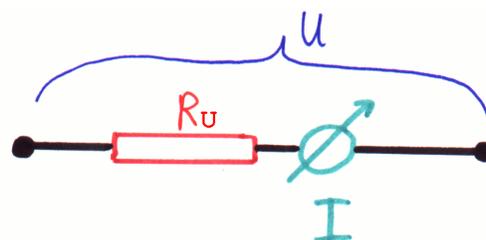
- elektronische Verstärker mit nachgeschalteter Analog-Digital-Konvertierung und numerischer Anzeige. Man erreicht eine etwa millionenfach höhere Empfindlichkeit als mit Drehspulinstrumenten.

Ein ideales Strommessgerät hat keinen Widerstand, um die Messung nicht zu verfälschen. Das ist aber nicht zu realisieren. Man kann ein reales Amperemeter durch folgendes Ersatzschaltbild beschreiben:



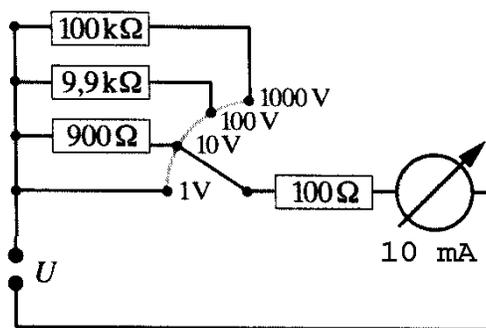
Der Innenwiderstand R_I sollte möglichst klein sein. Wenn man ihn kennt, kann man eine entsprechende Korrektur einrechnen.

Spannungsmessungen kann man auch mit einem Amperemeter durchführen, wenn man einen großen Vorwiderstand in Serie schaltet:



$$U = R_U \cdot I \quad (32)$$

R_U sollte möglichst groß sein. Verschiedene Messbereiche erhält man durch Umschalten zwischen verschiedenen in Serie geschalteten Vorwiderständen:

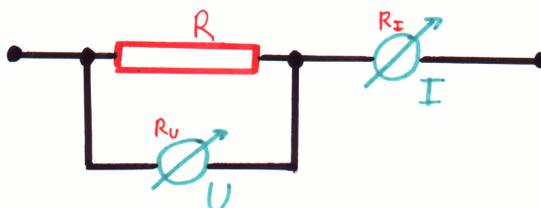


Auf ähnliche Weise kann man durch Parallelschaltung von Widerständen Amperemeter mit unterschiedlichen Messbereichen konstruieren.

Typische Werte bei einem einfachen digitalen Vielfachmessinstrument sind $R_I = 0.01 \Omega$, $R_U = 10 \text{ M}\Omega$.

Beispiel:

Ein Widerstand R soll mit folgender Schaltung gemessen werden:



Man findet $I = 0.00182 \text{ A}$, $U = 196 \text{ V}$. Die Innenwiderstände seien $R_I = 0.1 \Omega$ und $R_U = 1 \text{ M}\Omega$.

Bei Annahme idealer Messinstrumente erhält man

$$R^* = U/I = 108 \text{ k}\Omega \quad (33)$$

Berücksichtigung von R_U gibt den exakten Wert:

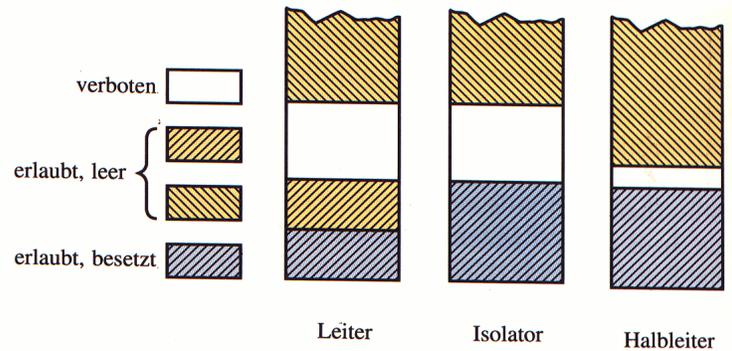
$$\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R_U}\right)^{-1} = \frac{U}{I} \quad R = 121 \text{ k}\Omega \quad (34)$$

FRAGE: WELCHE ALTERNATIVE MESSANORDNUNG GIBT ES ? VOR- UND NACHTEILE ?

2.7. Elektrische Leitung in verschiedenen Materialien

In einem leitenden Festkörper nehmen nur die 'äußeren' Elektronen an der Leitung teil, die inneren sind fest an 'ihren' Kern gebunden.

Die Energieniveaus in Festkörpern haben eine 'Bandstruktur', zu deren Verständnis die Quantentheorie notwendig ist:



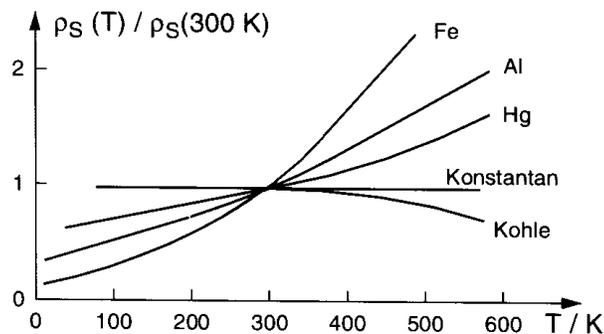
Auf der vertikalen Achse ist die Energie der Elektronen aufgetragen, auf der horizontalen ihr Ort. Beweglich und damit zur Leitung beitragend sind nur Elektronen im gelben Band, denn in den darunterliegenden Bändern sind alle 'Zustände' besetzt (Pauli-Prinzip: Nur ein Elektron pro 'Platz'). Bei Metallen ist das Valenzband nur teilweise gefüllt und es reicht eine sehr kleine Anregungsenergie aus, um ein Elektron 'leitend' zu machen. Bei Nichtleitern ist das Leitungsband einige eV weit vom Valenzband entfernt und damit unerreichbar hoch.

2.7.1. Metalle

Die elektrische Leitfähigkeit ist

$$\sigma_e = \frac{q^2}{m} \cdot n \cdot \tau_s = \frac{1}{\rho_e} \quad (35)$$

Bei Metallen ist n praktisch unabhängig von der Temperatur, während die Zahl der Stöße meist leicht mit T zunimmt (also τ_s abnimmt), wegen der stärkeren Schwingungen der Atomkerne:



Oft ist die Abhängigkeit von der Temperatur im Bereich der Zimmertemperatur linear:

$$\rho(T) = \rho(T_0) \cdot [1 + \alpha(T_0) (T - T_0)] \quad (36)$$

mit materialabhängigem Temperaturkoeffizienten α .

Beispiel:

Kupfer, Zimmertemperatur: $\alpha = 0.004/\text{K}$.

VERSUCH 4.5.3: Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit eines Eisendrahtes.

Für spezielle Legierungen wie Konstantan hängt ρ_e kaum von T ab. Anwendung: Widerstandsnormale.

Die Abhängigkeit von der Temperatur kann andererseits auch zur Messung von T ausgenutzt werden, da elektrische Größen sehr leicht gemessen werden können. Entsprechende Sensoren heißen ‘NTC-Widerstände’ oder ‘PTC-Widerstände’ (negative/positive temperature coefficient) und können aus Metallen, Halbleitern oder anderen Materialien hergestellt werden.

2.7.2. Halbleiter

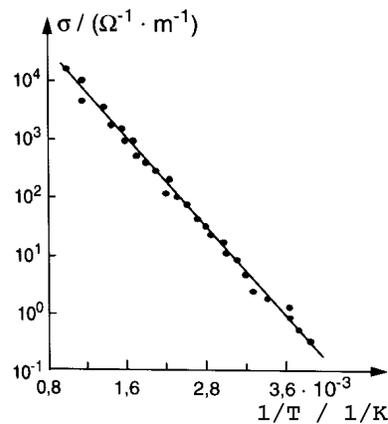
Die thermische Energie ermöglicht es einigen Elektronen, den relativ kleinen Bandabstand ΔE zum Leitungsband zu überwinden. Die Ladungsträgerdichte ist damit stark temperaturabhängig:

$$n \sim e^{-\Delta E/(kT)} \quad (37)$$

Die in den anderen Faktoren von σ auftretenden Abhängigkeiten von der Temperatur sind dagegen vernachlässigbar und es gilt auch näherungsweise

$$\sigma_e \sim e^{-\Delta E/(kT)} \quad (38)$$

Die wichtigsten Halbleitermaterialien (Elektronik!) sind Germanium und Silizium. Die folgende Messkurve demonstriert für reines Germanium die exponentielle Temperaturabhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit:



FRAGE: WIE GROSS IST ΔE ?

Durch gezieltes ‘Verunreinigen’ (‘Doping’) mit Fremdatomen kann man die elektrischen Eigenschaften von Halbleitermaterialien in weiten Bereichen verändern.

2.7.3. Andere feste Stoffe

Auch andere feste Stoffe können elektrisch leitend sein, auch in diesem Fall hängt der Widerstand von der Temperatur ab.

VERSUC 4.5.4: Leitfähigkeit von Glas als Funktion der Temperatur

2.7.4. Flüssigkeiten

Elektrolyte sind leitende Flüssigkeiten; Ursache sind frei bewegliche geladene positive und negative Ionen (Kationen, Anionen; griechisch: 'Wanderer'). Taucht man Elektroden (Kathode = '-', Anode = '+') in die Flüssigkeit, fließt ein elektrischer Strom, der durch wandernde Anionen *und* Kationen getragen wird, die an den Elektroden Elektronen abgeben bzw. aufnehmen. Da jetzt Atome verschoben werden, kommt es beim Kontakt mit dem Elektrodenmaterial dort zu Ablagerungen oder auch zu chemischen Reaktionen mit den Flüssigkeitsmolekülen oder den Elektroden. Dabei entstehen neue Stoffe (auch Gase). Flüssigkeit und/oder Elektrode können so mit der Zeit zerstört werden.

Beispiel:

Beweglichkeit:

Elektronen in Kupfer bei Zimmertemperatur: $\mu = -4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/(\text{Vs})$.

H^+ in Wasser: $\mu = 3.3 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/(\text{Vs})$.

Elektronen im Gas: $\mu \sim -1 \text{ m}^2/(\text{Vs})$.

Die Gesamtstromdichte in einem Elektrolyten ist

$$\boxed{\vec{j} = \vec{j}^+ + \vec{j}^- = (n^+ Z^+ \mu^+ + n^- Z^- \mu^-) \cdot e \cdot \vec{E}} \quad (39)$$

Z^+ und Z^- sind die (positiven und negativen) Ladungszahlen der Ionen (=Q/e). Man beachte, dass beide Summanden das gleiche Vorzeichen haben!

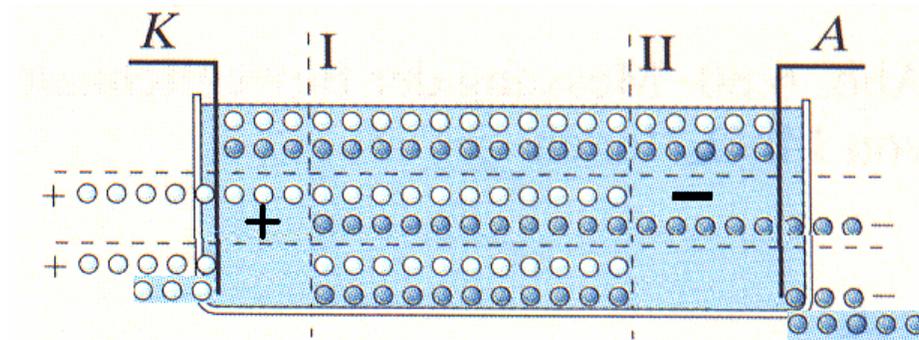
Oft sind die Konzentrationen von Anionen und Kationen und deren Ladungszahl (entgegengesetzt) gleich. Dann gilt betragsmäßig:

$$j = n Z \cdot (|\mu^+| + |\mu^-|) \cdot e \cdot E \quad (40)$$

Die Beweglichkeiten μ^+ und μ^- sind im allgemeinen verschieden! Die Feldstärke E ist $E = U/d$, wenn d der Elektrodenabstand ist.

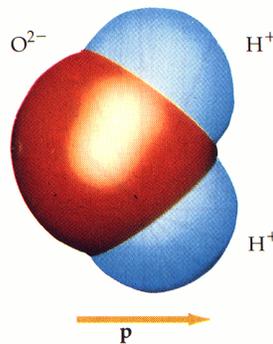
Wie kann man verstehen, dass sich die durch Kationen und Anionen hervorgerufenen Leitfähigkeiten addieren? Ist der Gesamtstrom nicht allein durch die Zahl der an der Kathode abgegebenen Elektroden = Kationenstrom bestimmt?

Prinzip:

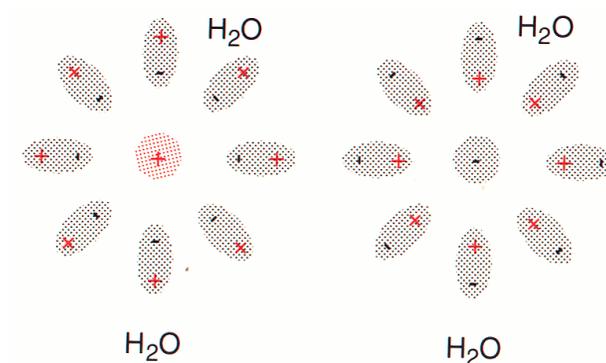


Wir nehmen an, die Ionen sind einfach geladen. Für jedes an der Anode ankommende Anion wird durch die entstehende Ladung und Feldstärke automatisch ein 'extra' Kation abgeschieden, unabhängig von der Kationenbeweglichkeit! Im obiger schematischer Darstellung: Wenn allein aufgrund der Beweglichkeit in einem bestimmten Zeitraum 5 Kationen zur Kathode und 3 Anionen zur Anode gewandert sind, werden aufgrund der entstehenden Felder insgesamt 8 Kationen und 8 Anionen abgeschieden, also 8 Ladungseinheiten zwischen den Elektroden transportiert.

Die wichtigste leitende Substanz ist Wasser, in dem Salze gelöst sind: Wassermoleküle haben ein großes permanentes Dipolmoment

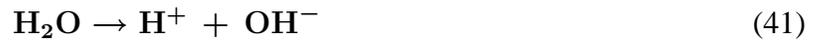


und können die Fremdmoleküle in ein positives und ein negatives Ion dissoziieren:



Diese Konfiguration ist energetisch günstiger!

Im reinen Wasser werden auf diese Weise auch einige Wasser-Moleküle aufgespalten:



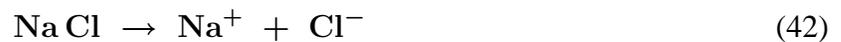
Die Konzentration (relative Anzahl) beträgt $1.8 \cdot 10^{-9} = 10^{-7}$ mol/l.

VERSUCH 4.5.5: Leitfähigkeit von Wasser

FRAGE: ZUSAMMENHANG LEITFÄHIGKEIT - pH-WERT ?

Beispiel:

Kochsalzlösung:



VERSUCH 4.5.5: Leitfähigkeit von Salzwasser

Beispiel:

elektrolytische Zerlegung von Wasser

Schwefelsäure + Wasser:

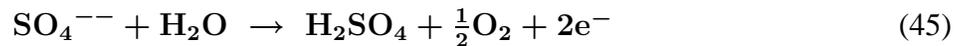


Reaktionen:

Kathode (z.B. Platin oder Kohle):

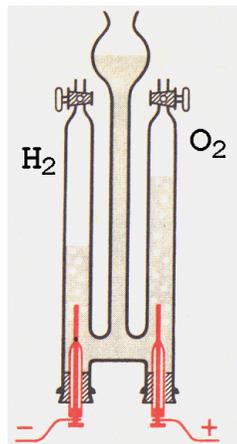


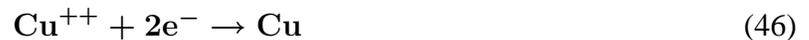
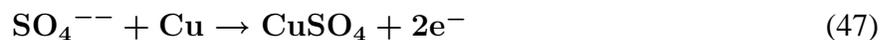
Anode (z.B. Platin oder Kohle):



Die Schwefelsäure wird also nicht verbraucht, nur das Wasser wird in die Gase H_2 und O_2 überführt, im Mengen- und Volumenverhältnis 2:1.

Die Gase kann man getrennt sammeln und nachweisen:



VERSUCH 4.5.6: Knallgaserzeugung*Beispiel:**Oberflächenveredlung = galvanische Beschichtung (hier: Nickel mit Kupferoberfläche)**Kupfersulfatlösung CuSO_4 , Nickelkathode:**Reaktionen:**Kathode (Nickel):**überzieht Nickel-Oberfläche.**Anode (Kupfer!):**Die Anode wird zersetzt, aber die Kupfersulfatkonzentration bleibt konstant, Kupfer wird also von der Anode zur Kathode transportiert.**FRAGE: WIE VERHÄLT SICH EINE PLATIN-ANODE ?***VERSUCH 4.5.7:** Galvanisches VerkupfernKennt man die Ionenladung Z (z.B. einfach geladen), gibt es eine direkte Proportionalität zwischen der an den Elektroden entstehenden Stoffmenge N und der transportierten Ladung Q :

$$Q = N \cdot Z \cdot e \quad (48)$$

Das Produkt von Avogadro-Konstante und Elementarladung

$$F = N_A \cdot e = 9.65 \cdot 10^4 \text{ C} \quad (49)$$

ist die Faraday-Konstante. Sie gibt die Ladung an, die ein mol einwertige Ionen transportieren.Die chemische Veränderung von Stoffen durch elektrischen Strom heißt Elektrolyse. Den umgekehrten Prozess, die Gewinnung von Strom aus chemischen Reaktionen, nutzt man in Batterien und in der Brennstoffzelle, s. u.2.7.5. GaseWenn die Gasatome - teilweise - in (einfach oder mehrfach geladene) Ionen und Elektronen aufgespalten sind, spricht man von einem Plasma.

Die Ionisierung kann man auf verschiedene Weisen erzeugen:

a Thermische Anregung:Bei 'heftigen' Stößen der neutralen Moleküle untereinander können sich Elektronen lösen. Erforderlich sind Anregungsenergien von einigen eV, die bei Zimmertemperatur ($kT \approx 0.025 \text{ eV}$) nicht erreicht werden. Selbst auf der Sonnenoberfläche ($T = 6000 \text{ K}$) sind nur 10^{-4} der Wasserstoff-Moleküle ionisiert.**VERSUCH 4.5.8:** Entladung mittels Flamme

b Stoßionisation:

Geladene Teilchen oder Photonen hinreichend hoher Energie (mehrere eV) können in Stoßreaktionen Elektronen aus einem Gasmolekül herausschlagen. Viele Teilchendetektoren nutzen dies aus (Teilchendurchgang → elektrisches Signal).

VERSUCH: Entladung mit ionisierender Strahlung

c Glühemission:

Aus heißer Kathode treten Elektronen (aber keine Ionen!) aus. Wurde in Elektronenröhren und wird immer noch in Monitoren angewandt.

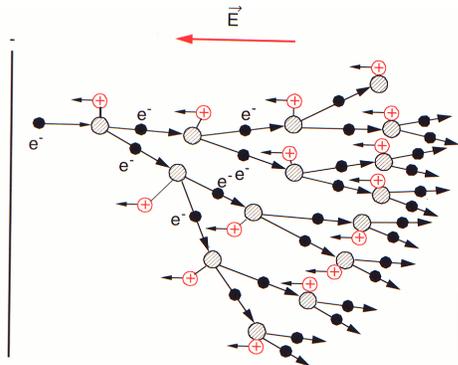
d Photoeffekt und Ionenstoßionisation:

Beim Auftreffen von Photonen oder Ionen auf die Kathode können Elektronen abgelöst werden.

Ionen-Elektron-Paare rekombinieren wieder zu neutralen Molekülen. Es stellt sich ein Gleichgewicht zwischen Erzeugung und Vernichtung ein.

In einem elektrischen Feld fließt in einem Plasma also ein Strom, getragen von Elektronen und positiven Ionen. Die Vorgänge sind recht komplex aus folgenden Gründen:

- Ionisierungsmechanismus b) kann auch durch die im Feld beschleunigten Elektronen aktiviert werden (bei hohem E und kleinem Druck → große freie Weglänge λ). Bedingung: $\lambda E e > E_{ion}$ = Ionisierungsenergie. Bei hinreichend hoher Feldstärke entsteht eine ‘Lawine’:



Ionen tragen dazu nicht bei (bei Stößen wird nur wenig Energie auf die *Elektronen* übertragen, Kinematik!).

- Durch die unterschiedlichen Driftgeschwindigkeiten von Elektronen und Ionen entstehen Raumladungen, die die Feldstärke lokal ändern.

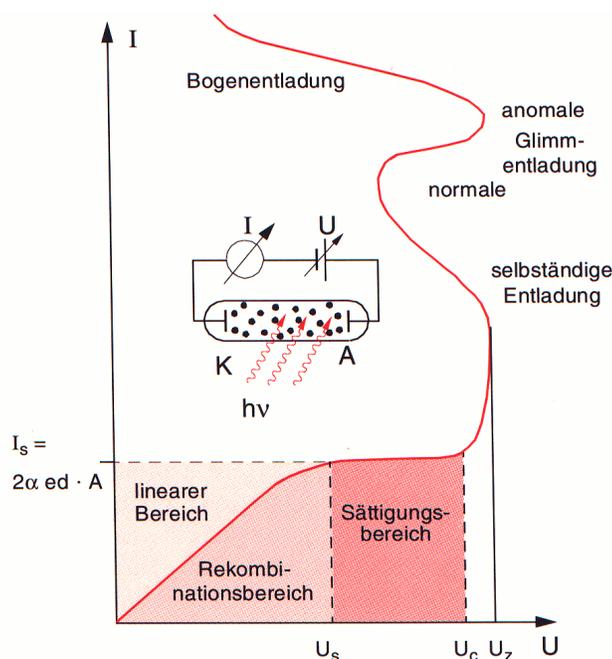
Außer Ionisationen treten Anregungsprozesse auf; bei Rekombination bzw. Übergang zum Grundzustand wird Licht ausgesandt; dieser Effekt hat wichtige technische Anwendungen (Leuchtstoffröhre, Bogenlampe). Auch: Blitz.

Die Elektroden und das Gas werden durch den Strom erwärmt. Die resultierenden Druckänderungen nehmen wir beim Gewitter als Donner wahr. Bei hohen Stromstärken schmelzen die Elektroden; Anwendung: Elektroschweißen.

Den Ionenstrom kann man als Kanalstrahlen nachweisen: geladene Teilchen, die auf die Kathode zufliegen:

VERSUCH 4.5.9: Kanalstrahlen

Die folgende Kennlinie stellt den Zusammenhang zwischen Strom und Spannung für eine Gasentladung bei allmählicher **Stromerhöhung** dar (Spannung wird entsprechend geregelt):



Man unterscheidet die folgenden Bereiche:

Linearer Bereich

Abflussrate der Ladungsträger durch den Strom klein gegen Erzeugungs- und Rekombinationsrate:

$n = \text{const}$, $v_D \sim E$: Ohmsches Gesetz

Abnahme Rekombination

Ein großer Teil der primär erzeugten Ladungen wird schnell abgesaugt, die Rekombinationswahrscheinlichkeit nimmt ab.

Sättigung

Praktisch alle erzeugten Ladungen fließen über die Elektroden ab.

Stoßionisation, Sekundärelektronenemission

Die Energie der Elektronen reicht aus, neutrale Moleküle zu ionisieren. Die auf die Kathode auftreffenden Ionen erzeugen weitere Elektronen. Der Strom steigt rapide an.

Selbständige Gasentladung

Die Zahl der Sekundärelektronen übersteigt die Zahl der Primärelektronen. Ein einzelnes ionisiertes Molekül löst eine Gasentladung aus, die Stromstärke 'explodiert' und ist nur durch die äußeren Randbedingungen begrenzt. Durch Zunahme der Ladungsträgerdichte n nimmt der Widerstand und damit die Spannung ab! Anwendung: Geiger-Müller-Zählrohr zum Teilchennachweis.

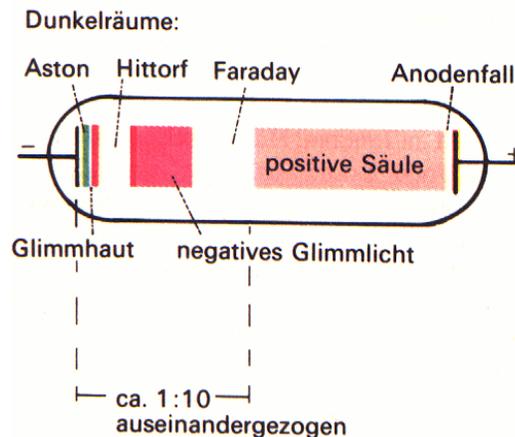
Glimmentladung

Bei weiterer Stromzunahme entstehen Raumladungszonen durch unterschiedliche Driftgeschwindigkeiten von Ionen und Elektronen, der Widerstand nimmt zu.

Bogenentladung

Die Elektroden werden so heiß, dass Elektronen emittiert werden.

Die Leuchterscheinungen einer Glimmentladung (Druck typ. 10^{-3} bar \rightarrow mittlere freie Weglänge Elektronen: $\lambda \sim 1$ mm, Spannung einige kV \rightarrow Strom $I \sim 1$ mA):

**VERSUCH 4.5.10: Glimmentladung**

Aus der Kathode werden durch auftreffende Ionen Elektronen losgeschlagen und auf die Anode hin beschleunigt. Wenn ihre Energie hoch genug ist, regen sie Moleküle zum Leuchten an ('Glimmhaut', 'negatives Glimmlicht').

Bei noch höherer Energie findet Ionisation statt (ohne Lichterzeugung): 'Dunkelräume'. Dort bildet sich wegen der Trägheit der Ionen eine positive Raumladung und deshalb im rechten Bereich eine kleinere Feldstärke.

Schließlich kommt es in der positiven Säule bei moderater Feldstärke wieder zu Anregungen und Leuchterscheinungen.

Vorgänge kompliziert, abhängig von Gas, Druck, Spannung, Geometrie, Temperatur!

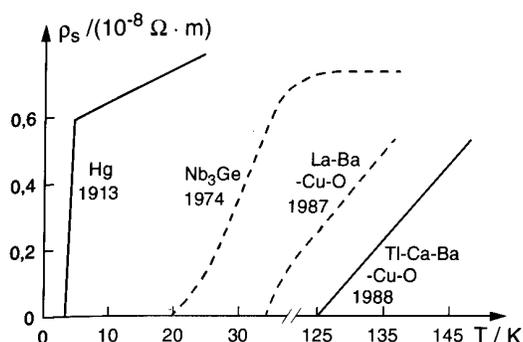
VERSUCH 4.5.10: Glimmlampe

Anwendung: Spannungsprüfer

VERSUCH 4.5.11: Leuchtstofflampe2.7.6. Supraleitung

1911 wurde in Holland von H.K. Onnes die Supraleitung von (festem) Quecksilber unterhalb einer Temperatur von 4 K (Siedetemperatur Helium) entdeckt. Diese Experimente wurden möglich durch die neu entwickelten Kältemaschinen.

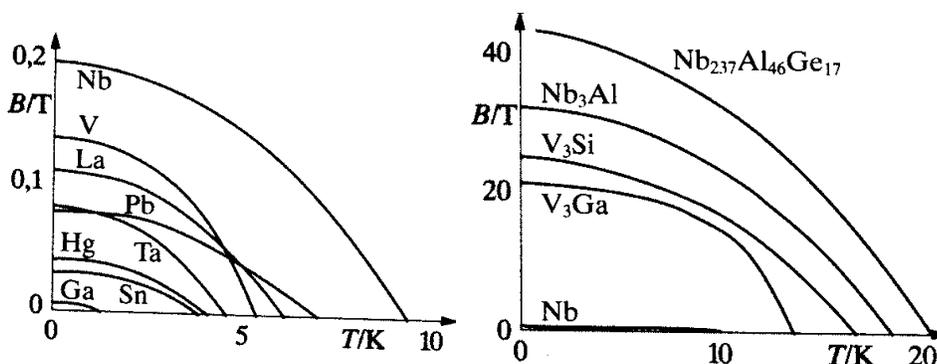
Seitdem wurden viele supraleitende Materialien gefunden, in den letzten Jahren auch solche mit Sprungtemperaturen T_C von über 100 K:



Phänomenologie:

Bei Abkühlung sinkt bei manchen (aber keineswegs allen!) Stoffen der spezifische Widerstand allmählich oder sprunghaft auf 0. Das heißt ein einmal vorhandener Strom fließt ohne Widerstand/Wärmeentwicklung immer weiter. Experimente haben dies über Zeiträume von mehr als einem Jahr bestätigt.

Der Effekt tritt nur bei kleinen Temperaturen und kleinen Magnetfeldern auf:



Bei Supraleitern vom Typ I (reine Metalle) ist das kritische Magnetfeld B_C sehr klein, für Anwendungen benutzt man meist Legierungen (oft Niob enthaltend): Supraleiter Typ II. Ferromagnetische Stoffe wie Eisen sind keine Supraleiter.

BCS-Theorie (Bardeen, Cooper, Schrieffer):

Quantentheorie! Bei tiefen Temperaturen bilden die Elektronen im Gitter Cooper-Paare (mit Gesamtspin 0; deshalb können beliebig viele Paare denselben Quantenzustand einnehmen). Durch Wechselwirkung eines Elektrons mit den Gitteratomen kann keine Energie übertragen werden, da dies ein Aufbrechen der Paarbindung bewirken würde; die dazu nötige Energie ist aber erst bei höheren Temperaturen (thermische Anregung) verfügbar.

Anwendungen:

- empfindliche Messinstrumente (e.g. für Magnetfelder)
- supraleitende große Magnete (keine Wärmeverluste)

VERSUCH 4.5.12: Supraleitender Elektromagnet

2.8. Gleichstrom- und Gleichspannungsquellen

Die Begriffe Spannungsquellen und Stromquellen werden in dieser Vorlesung synonym verwendet. In

diesen werden positive und Ladungsträger getrennt (\rightarrow Spannung), die über einem Stromkreis (\rightarrow Strom) dann wieder zusammengeführt werden.

Die in der Technik bei weitem wichtigste Methode der (Wechsel-)Stromerzeugung ist die der Generatoren=Dynamos, die wir später studieren werden.

Gleichstrom kann direkt durch

- chemische Prozesse (Batterie)
- elektromagnetische Strahlung (Solarzelle)
- Temperaturdifferenzen (Thermoelement)

erzeugt werden.

Die an diesen Elementen anliegende Spannung hängt vom Strom ab. Man kann diesen Effekt insbesondere bei Batterien durch eine 'Ersatzschaltung' aus Hintereinanderschaltung von idealer Spannungsquelle (Spannung = const) und einem (Innen-)Widerstand beschreiben.

2.8.1. Chemische Stromerzeugung

Als galvanisches Element bezeichnet man ein System aus zwei Metallelektroden, die in einen Elektrolyten tauchen. Sind die Metalle unterschiedlich, misst man zwischen ihnen eine Spannung der Größenordnung 1 V. Bezieht man die Potentialdifferenz der verschiedenen Metalle auf eine H_2 -Elektrode (Wasserstoff umspült Platinelektrode!), so bekommt man die elektrochemische Spannungsreihe (für saure Elektrolyte mit 1 mol Ionen pro l):

Lithium	−3.01 V
Zink	−0.76 V
Eisen	−0.44 V
Kupfer	+0.35 V
Gold	+1.5 V

Ursache ist das Diffundieren einiger Metallionen der Elektrode in die Flüssigkeit, wodurch sich eine Potentialdifferenz U_i gegen den Elektrolyten aufbaut, bis ein Gleichgewichtszustand erreicht ist. Die Höhe dieses Potentials hängt von der Metallsorte ab, bei zwei Elektroden ist die zwischen beiden gemessene Spannung $U = |U_1 - U_2|$.

VERSUCH 4.7.1: Galvanische Elemente

Verbindet man die beiden Elektroden durch einen Widerstand, so fließt ein Strom. Dabei wandern positive Ionen von der negativen Elektrode zur positiven (!) und scheiden sich dort ab. Die Batterie wird verbraucht!

Beispiel:

Zink und Kupfer: Zn^{++} -Ionen wandern zur Cu-Elektrode.

Beispiel:

Kupfer- und Zinkstift in Zitrone: Spannung knapp 1.0 V im unbelasteten Zustand.

Erklärung: Zink geht in Lösung, aber positive Kupferionen können nicht an der Kupferelektrode abgeschieden werden, da nicht vorhanden, stattdessen werden dort Wasserstoffionen neutralisiert. Also ist Spannung nur durch das elektrochemische Potential (0.76 V) von Zn bestimmt, dieses ist ja gerade relativ zu einer Wasserstoffelektrode definiert.

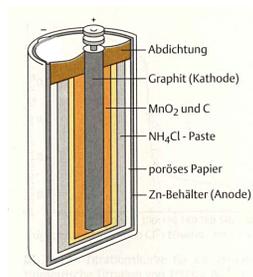
Ausserdem muss die Kontaktspannung zwischen Zink und Kupferdraht (zum Spannungs-Messinstrument) addiert werden, etwa 0.2 V, siehe folgendes Kapitel.

Beachte: Die Wanderung von positiven Zn-Ionen zur anderen Elektrode dauert sehr lange: $v_D = \mu \cdot E \sim 10^{-7} \cdot 10^2 \text{ m/s} \sim \text{einige cm/h}$

Nachlesen: 'Daniell-Element'.

Beispiel:

'Zink-Kohle'-Batterie:



Das Mangandioxid (Braunstein) bildet den Pluspol¹; der Kohlestift dient nur als Kontakt.

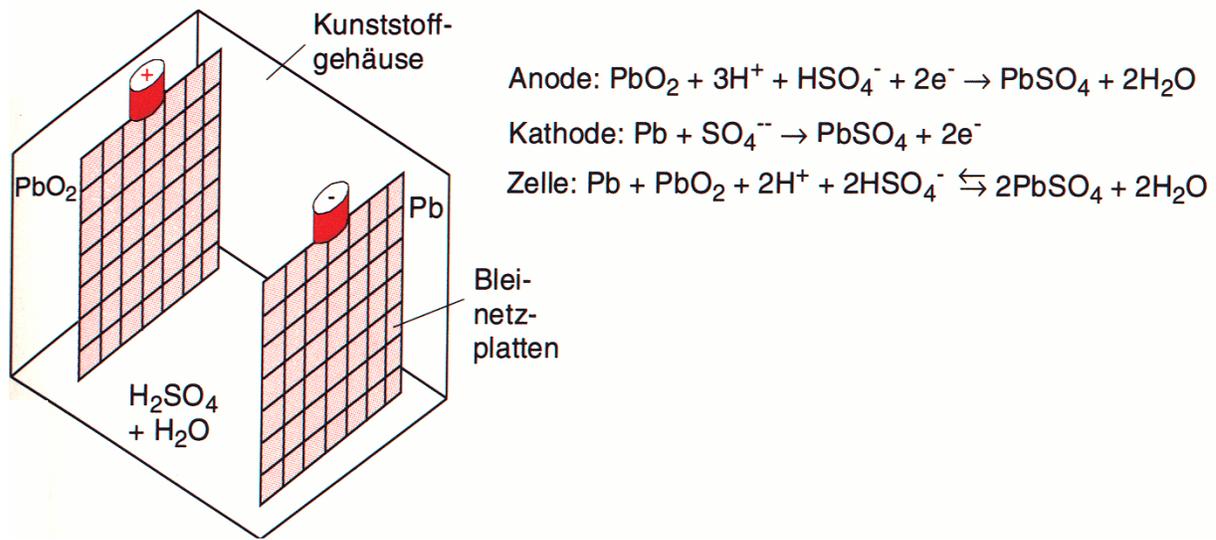
Energieinhalt einer handelsüblichen Batterie:

$$1.5 \text{ V} \cdot 1 \text{ Ah} \sim 5000 \text{ J}$$

Beispiel:

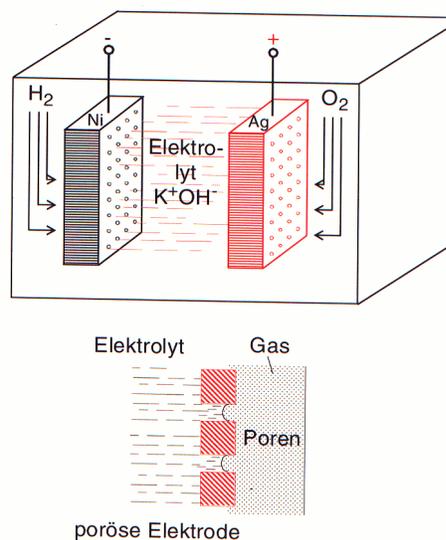
Bleiakkumulator.

¹Wir bezeichnen bisher den Pluspol als Anode. In der Elektrochemie, in der man sich mehr für die Ionenbewegung interessiert, bezeichnet man die Elektroden aber 'andersherum', also Kathode = Pluspol; am besten spricht man deshalb einfach von den (negativen und positiven) Elektroden



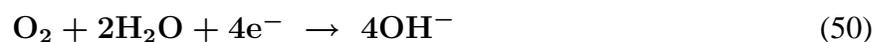
Prozess umkehrbar, wieder aufladbar!

‘Kalte Verbrennung’: Brennstoffzelle

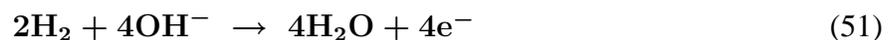


Die porösen Metalle dienen als Katalysatoren.

positive Elektrode:



negative Elektrode:



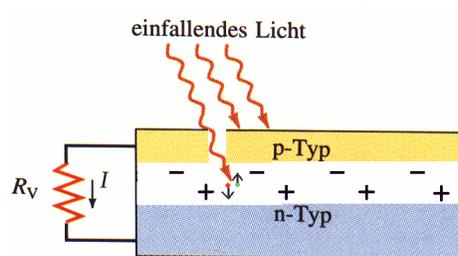
Es entsteht Wasser und insgesamt wurden 4 Elektronen außerhalb der Zelle und 4 OH⁻-Ionen durch den Elektrolyten transportiert! Die Reaktionen spielen sich dort ab, wo Gas, Elektrolyt und Metall zusammenkommen. Die Elektronen sind im Metall gebunden und wandern deshalb nicht durch die Flüssigkeit. Die wässrige Elektrolytlösung und die Elektroden werden nicht verbraucht!

Erste Auto-Prototypen existieren: Vorteile: Hoher Wirkungsgrad (keine Carnot-Limitierung), 'Abgase' = Wasser!

VERSUCH 4.7.2: Brennstoffzelle (Methan-Brennstoffzelle mit Protonen-Membran)

2.8.2. Solarzellen

In einem Halbleitermaterial können Photonen Elektronen in das Leitungsband anheben. In einer Di-odenübergangszone zwischen den beiden Schichten (\rightarrow Festkörperphysik!) gibt es ein elektrisches Feld, das aus den dort freigesetzten Ladungsträgern einen Strom werden lässt:



Die Spannungsdifferenz beträgt etwa 0.6 V pro Solarzelle, der Wirkungsgrad ist von der Größenordnung 10%.

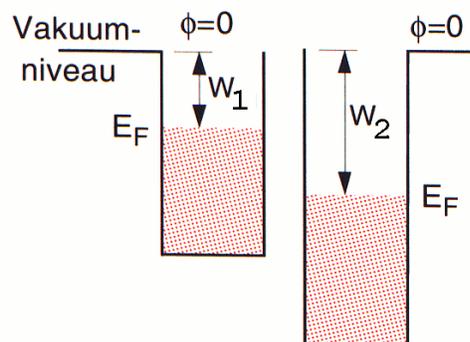
VERSUCH 4.7.3: Solarzelle

Umkehrung: Leuchtdiode!

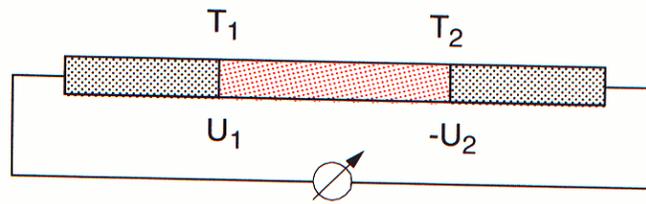
2.8.3. Thermoelemente

Mit Austrittsarbeit W_i bezeichnet man die Energie, die notwendig ist, aus einem Leiter der Sorte i ein Elektron zu entfernen. Typische Werte sind einige eV.

Bringt man zwei unterschiedliche Leiter zusammen, so sind die Austrittsarbeiten i.A. verschieden:



Deshalb fließen Elektronen vom 'linken' Material zum rechten, bis sich eine feste (rücktreibende) Spannungsdifferenz aufgebaut hat. In einem geschlossenen Stromkreis gibt es zwei entgegengesetzte Kontakte dieser Art, so dass die Summe der Kontaktspannungen $U = U_1 + U_2$ null ist:



Die Kontaktspannung hängt von der Temperatur ab, so dass bei unterschiedlichen Temperaturen an den Kontaktstellen eine thermoelektrische Spannung $U \neq 0$ auftritt: Seebeck-Effekt. Ähnlich wie bei der Elektrolyse kann man hier eine thermoelektrische Spannungsreihe für die verschiedenen Materialien aufstellen.

VERSUCH 4.8.1: Kupfer-Konstantan-Thermoelement

VERSUCH 4.8.2: Thermomagnet

Die auftretenden Spannungen (typ. 10^{-5} V/K) und Wirkungsgrade sind klein, so dass der Seebeck-Effekt für großtechnische Anwendungen ungeeignet ist, wohl aber zu Messzwecken benutzt wird.

Das 'inverse' Phänomen ist der Peltier-Effekt: Bei Anlegen einer äußeren Spannung fließt ein Strom, der eine Kontaktstelle erwärmt (Elektronen 'fallen runter') und die andere abkühlt (Elektronen müssen Potentialwall überwinden). Anwendung: Kühlung!

VERSUCH 4.8.3: Peltiereffekt