

# Grundlagen der Elektrotechnik ausgewählte Kapitel

ergänzende Beiträge zur Vorlesung  
zum Thema

## Experimente in der Elektrotechnik

Doz. Wolfgang Stuchlik  
DLR Lampoldshausen, Abt. VEA

DHBW - MOS WiSe 2017

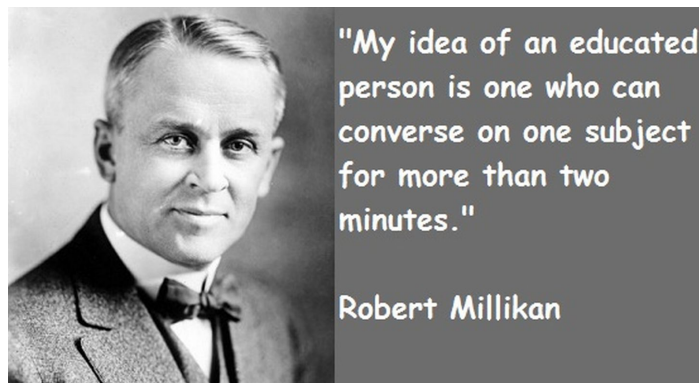


Abbildung 1: Robert Andrews Millikan



Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
74239 Hardthausen  
Langer Grund  
Wolfgang.Stuchlik@dlr.de

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Die Bestimmung der Ladung eines Elektrons</b>	<b>4</b>
1.1	Die Vorbereitung des Millikan-Versuchs	4
1.1.1	Das Jahr 1910	4
1.1.2	Die Kräftebilanz	4
1.1.3	Eliminierung des Radius	5
1.1.4	Die unbekannte Masse $m_Q$ des Öltröpfchens	5
1.2	Die Lösung	6
1.3	Der Aufbau des Experiments	6
<b>2</b>	<b>Die Bestimmung der Elektronenmasse</b>	<b>7</b>
2.1	Das Tolman Experiment	7
2.2	Ein Elektron auf Fahrt bringen	7
2.3	Die kinetische Energie eines Elektrons	7
2.4	Die Beschleunigung des Elektrons im magnetischen Feld	8
2.5	Die Lösung	9
<b>3</b>	<b>Wie schnell fließt der elektrische Strom?</b>	<b>9</b>
3.1	Elektronen im leitenden Werkstoff	9
3.2	Geschwindigkeit und Stromdichte	10
3.3	Der Elektronenflug im Vakuum	12
<b>4</b>	<b>Galvanotechnik</b>	<b>13</b>
4.1	Stromfluss und Stofftransport	13
4.2	Oberflächenveredlung ohne Elektrizität	13
4.3	Oberflächenveredlung mit Elektrizität	14
<b>5</b>	<b>Ferromagnetismus</b>	<b>15</b>
5.1	Einteilung von magnetischen Stoffen	15
5.2	Die Ursache des Magnetismus	15
5.3	Ein Experiment	16
5.4	Das Induktionsexperiment von Alfred Recknagel	17
<b>6</b>	<b>Supraleitung</b>	<b>18</b>
6.1	Der elektrische Widerstand und die Temperaturabhängigkeit	18
6.2	Was versteht man unter Supraleitung?	19
6.3	Der historische Werdegang	19
6.4	Das passende Experiment	20

# Abbildungsverzeichnis

1	Robert Andrews Millikan . . . . .	1
2	abstrakte Versuchsanordnug, der Kondensator ist ungeladen . . . . .	4
3	abstrakte Versuchsanordnug, der Kondensator ist geladen . . . . .	5
4	Das Experimentiergerät von Millikan . . . . .	6
5	Der innere Aufbau des Gerätes . . . . .	6
6	Glühkathode mit Lochanode . . . . .	7
7	Die Kreisbahn des Elektrons ist rot eingezeichnet. . . . .	8
8	Bei negativer Ladung gilt die linke Hand-Regel für die Wirkungsrichtungen der drei Größen $F$ , $B$ und $v$ im Magnetfeld. . . . .	8
9	Die Lorentzkraft wirkt senkrecht zur Bewegungsrichtung. Die Geschwindigkeit der Ladung bleibt konstant. . . . .	8
10	Elektronen bewegen sich vom höheren zum niederen Potenzial sehr langsam, sie driften. . . . .	10
11	Das betrachtete Teilvolumen, die Stromdichte als Quotient von Teilstrom und Teilfläche. . . . .	11
12	Die Braunsche Röhre wie man sie in einem Oszilloskop findet. . . . .	12
13	Ionenbewegung im Elektrolyten bei angelegter Gleichspannung $E$ . . . . .	13
14	Oberflächenveredelung . . . . .	14
15	von links nach rechts: dia-, para- und ferromagnetische Wirkung . . . . .	15
16	Bether-Slater Diagramm . . . . .	16
17	Durch Wärmezufuhr wird die innere Ausrichtung der Weißschen Bezirke aufgehoben. . . . .	16
18	Scheibe im kalten Zustand . . . . .	16
19	Scheibensegment wird erhitzt . . . . .	16
20	Die rotierende Scheibe dank Hitze. . . . .	17
21	Der Versuchsaufbau nach Recknagel . . . . .	17
22	Kamerlingh-Onnes Diagramm . . . . .	18
23	qualitativ betrachtet: Widerstandsverhalten bei tiefen Temperaturen . . . . .	18
24	Das LH2/LOX Triebwerk „Vulcain2“ und die Feststoffbooster der Ariane5 beim Start . . . . .	19
25	Nobelpreis für Onnes . . . . .	20
26	Kristallstruktur des YBCO . . . . .	20

# 1 Die Bestimmung der Ladung eines Elektrons

## 1.1 Die Vorbereitung des Millikan-Versuchs

### 1.1.1 Das Jahr 1910

Was wissen wir bereits? Es ist eine rhetorische Frage, wenn wir in das Jahr 1910 zurückblicken ...

- Die Gesamtladung einer betrachteten Masse kann wie folgt bestimmt werden:  $Q = n \cdot e^-$ . Die Existenz der Elektronen war bekannt. Bereits Ampere deutete auf möglich Ringströme hin, die verantwortlich für den Magnetismus sein könnten. Das Bohrsche Atommodell wurde erst 1913 veröffentlicht.
- Das Verhältnis  $\frac{Q}{m}$  ist materialabhängig. Die Masse eines Elektrons war unbekannt, daher musste diese Größe in der Berechnung eliminiert werden.
- Sehr kleine Tropfen haben eine ideale Kugelform.
- Die Masse eines Öltröpfchens ist auch schwer, d.h. nur ungenau bestimmbar und wird in den folgenden Betrachtungen mit  $m_Q$  dargestellt.
- Warum Öl? Öl verdampft nicht so schnell wie Wasser, daher bleibt die Masse  $m$  während des Experiments konstant.
- Die geladenen Öltröpfchen reiben an den Luftmolekülen - es ist eine Luftreibungskraft für sphärische Körper nach **Stokes** [1819-1903] bestimmbar.
- In einem Elektrischen Feld wirkt eine Kraft, die elektrische Feldstärke  $E = \frac{U}{d}$  entlang der Feldlinien vom positiven zum negativen Potenzial. Die Feldlinienlänge wird mit der Größe  $d$  dargestellt.

### 1.1.2 Die Kräftebilanz

Wir stellen uns einen Plattenkondensator vor. Die Platten sind nicht geladen. Mit einem Zerstäuber werden Öltröpfchen zwischen die Kondensatorplatten gesprüht. Durch die Gravitation sinken die Öltröpfchen nach unten. Es wirkt die Gewichtskraft:  $F_G = m_Q \cdot g$ .

Die Öltröpfchen sinken nicht im freien Fall, sondern werden durch die Luftmoleküle „aufgehalten“. Zwischen den Öltröpfchen und Luftmolekülen entsteht Reibung. Die Reibungskraft wird nach Stokes für sphärische Körperformen mit  $F_R = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot v$  bestimmt. Die Größe  $r$  ist der Radius des sphärischen Körpers und somit der Radius des Tröpfchens.

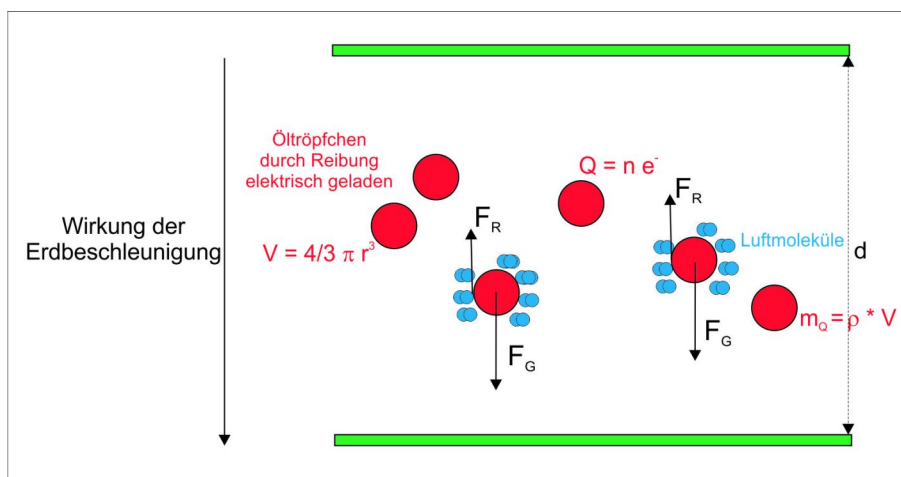


Abbildung 2: abstrakte Versuchsanordnung, der Kondensator ist ungeladen

Die Kraft, die durch die elektrische Feldkraft  $E$  [exakt: die elektrische Feldstärke] erzeugt wird, muss noch bestimmt werden:

$$Q = n \cdot e^- \Rightarrow \text{As}$$

$$E = \frac{U}{d} \Rightarrow \frac{\text{V}}{\text{m}}$$

$$E \cdot Q \Rightarrow \frac{\text{VAs}}{\text{m}} = \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{m}} = \text{N} !$$

Das Produkt aus elektrischer Feldstärke  $E$  und Ladung  $Q$  ergibt die elektrische Kraft  $F_Q$ . Das „Rechnen“ mit den physikalischen Einheiten ist der Beweis.

### Wir laden den Kondensator und erzeugen ein statisches, elektrisches Feld.

Abhängig von der Größe der Öltröpfchen wirken die Kräfte  $F_G$ ,  $F_R$  und  $F_Q$ . Abhängig von der Stärke des elektrischen Feldes bewegen sich die Öltröpfchen nach oben zur positiv geladenen Kondensatorfläche, manche Öltröpfchen schweben und manche bewegen sich nach unten.

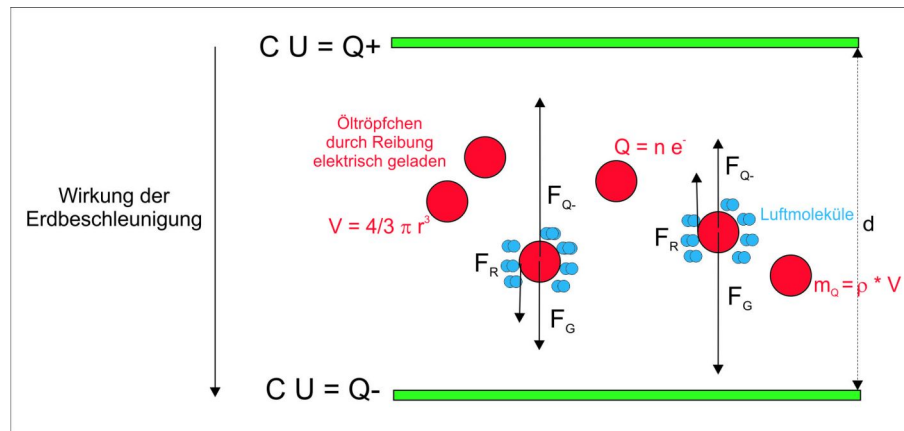


Abbildung 3: abstrakte Versuchsanordnung, der Kondensator ist geladen

$$F_R = F_Q - F_G$$

$$F_R = F_Q + F_G$$

$$6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot v = n \cdot e^- \cdot E - m_Q \cdot g$$

$$v_1 = \frac{n \cdot e^- \cdot E - m_Q \cdot g}{6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r} = \frac{Q \cdot E - g \cdot m_Q}{6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r}$$

$$6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot v = n \cdot e^- \cdot E + m_Q \cdot g$$

$$v_2 = \frac{n \cdot e^- \cdot E + m_Q \cdot g}{6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r} = \frac{Q \cdot E + g \cdot m_Q}{6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r}$$

**Erstes Fazit:** Die Größe  $r$  [Größe der Öltröpfchen] ist nicht genau messbar!

#### 1.1.3 Eliminierung des Radius

$$r = \frac{Q \cdot E - g \cdot m_Q}{6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot v_1}$$

$$v_2 = \frac{(Q \cdot E + g \cdot m_Q)(6 \cdot \pi \cdot \eta)}{6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot (Q \cdot E - g \cdot m_Q)} \cdot v_1$$

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{Q \cdot E + g \cdot m_Q}{Q \cdot E - g \cdot m_Q}$$

$$Q = \frac{g \cdot m_Q}{E} \cdot \frac{(v_1 + v_2)}{(v_2 - v_1)}$$

#### 1.1.4 Die unbekannte Masse $m_Q$ des Öltröpfchens

Wir erinnern uns, dass das Öltröpfchen einer perfekten Kugel entspricht und somit können wir für das Volumen  $V = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3$  ansetzen. Für die Masse des Öltröpfchens erhalten wir:

$$m_Q = \rho \cdot V = \rho \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 .$$

Gehen wir davon aus, dass die Dichte  $\rho$  des Öls bekannt ist.

$$\text{Letztendlich erhalten wir für: } Q = \frac{g \cdot m_Q}{E} \cdot \frac{(v_1+v_2)}{(v_2-v_1)} = \frac{g \cdot d}{U} \cdot \frac{(v_1+v_2)}{(v_2-v_1)} \cdot m_Q$$

$$Q = \frac{g \cdot d}{U} \cdot \frac{(v_1+v_2)}{(v_2-v_1)} \cdot \rho \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3$$

Jetzt muss nochmals für das  $r$  der Ausdruck  $r = \frac{Q \cdot E - g \cdot m_Q}{6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot v_1}$  eingesetzt werden. Wir sehen jedoch, dass wieder die Masse in der Formel enthalten ist, daher benötigen wir für  $r$  den Ausdruck:  $r = \frac{Q \cdot E}{3 \cdot \pi \eta [v_1+v_2]}$ . Diesen Ausdruck erhält man, wenn die beiden Geschwindigkeiten  $v_1, v_2$  addiert werden.

$$Q = \frac{g \cdot d}{U} \cdot \frac{(v_1+v_2)}{(v_2-v_1)} \cdot \rho \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \left[ \frac{Q \cdot E}{3 \cdot \pi \cdot \eta \cdot [v_1+v_2]} \right]^3$$

$$Q = \frac{g \cdot d}{U} \cdot \frac{(v_1+v_2)}{(v_2-v_1)} \cdot \rho \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \frac{Q^3 \cdot U^3}{3^3 d^3 \cdot \pi^3 \cdot \eta^3 \cdot [v_1+v_2]^3}$$

$$Q = \frac{g}{(v_2-v_1)} \cdot \rho \cdot \frac{4}{3} \cdot \frac{Q^3 \cdot U^2}{3^3 d^3 \cdot \pi^2 \cdot \eta^3 \cdot [v_1+v_2]^2}$$

$$\frac{Q}{Q^3} = \frac{1}{Q^2} = \frac{4 \cdot U^2}{[v_1+v_2]^2 \cdot 81 \cdot \pi \cdot d^2} \cdot \frac{g \cdot \rho}{[v_2-v_1] \cdot \eta^3}$$

$$Q = \sqrt{\frac{[v_1+v_2]^2 \cdot 81 \cdot \pi^2 \cdot d^2}{4 \cdot U^2} \cdot \frac{[v_2-v_1] \cdot \eta^3}{g \cdot \rho}}$$

## 1.2 Die Lösung

$$Q = \frac{9}{2} \cdot \frac{[v_1 + v_2] \cdot \pi \cdot d}{U} \cdot \sqrt{\frac{[v_2 - v_1] \cdot \eta^3}{g \cdot \rho}} \tag{1}$$

$$Q = n \cdot e^- \Rightarrow e^- = \frac{Q}{n}$$

Die Avogadro-Konstante  $N_A \approx 6,022 \cdot 10^{23}$  pro mol ist der Proportionalitätsfaktor zwischen Stoffmenge und Teilchenzahl. Die Stoffmenge **mol** bezieht sich auf das Element Kohlenstoff C12 und das bedeutet, dass ein **mol** C12 einer Masse von 12g entspricht und es beinhaltet  $6,022 \cdot 10^{23}$  Teilchen. Für das verwendete Öl müsste es entsprechend angepasst werden.

## 1.3 Der Aufbau des Experiments



Abbildung 4: Das Experimentiergerät von Millikan

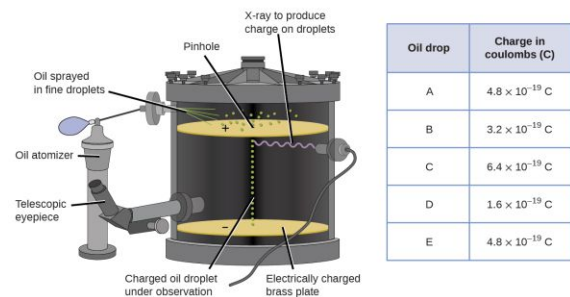


Abbildung 5: Der innere Aufbau des Gerätes

## 2 Die Bestimmung der Elektronenmasse

### 2.1 Das Tolman Experiment

Die Bestimmung der Masse von freien Ladungsträgern war eine Aufgabe, mit der sich der in den USA arbeitende Physiker Richard C. Tolman beschäftigte. Zwischen 1916 und 1923 wurden mehrere Versuche durchgeführt und unterschiedliche Versuchskonzepte ausprobiert.

#### Haben Elektronen eine Masse?

Im Jahr 1916 wurde der Tolman-Stewart-Versuch durchgeführt. Der primäre Grundgedanke bestand darin, die freien Ladungsträger in Metallen nachzuweisen. Metalle wurden beschleunigt und die auftretenden Strom- und Spannungsstöße wurden dabei gemessen. Wenn die freien Ladungsträger eine Masse besitzen, dann haben sie auch eine Trägheit. Die Elektronen führen ihre Bewegung beim Abbremsen weiter aus und werden somit gegen die positiven Atomrümpfe im Kristallgitter verschoben. Zwischen diesen Raumladungen entsteht ein elektrisches Kraftfeld und somit bildet sich eine messbare Spannung aus.

In dem folgenden Gedankenexperiment wird ein Elektron im Magnetfeld beschleunigt. Aus dem Radius der Kreisbahn des Elektrons im Magnetfeld kann die Masse des Elektrons berechnet werden.

### 2.2 Ein Elektron auf Fahrt bringen

Damit die Bewegung des Elektrons sichtbar wird, füllt man den Glaskolben mit Quecksilberdampf. Das Elektron stößt mit seiner kinetischen Energie gegen die Quecksilberatome und somit wird die Kreisbahn sichtbar und kann vermessen werden.

Was ist dafür nötig?

- Eine Glühkathode emittiert Elektronen.
- Eine Anode mit einem sehr hohen positiven Potenzial, gegenüber der Kathode, beschleunigt die Elektronen.
- In der Mitte der Anode befindet sich ein Loch. Nur wenige Elektronen (wir betrachten nur ein Elektron) schießen durch das Loch, was wie eine Blende für Elektronen wirkt, und sind dem Magnetfeld ausgesetzt.

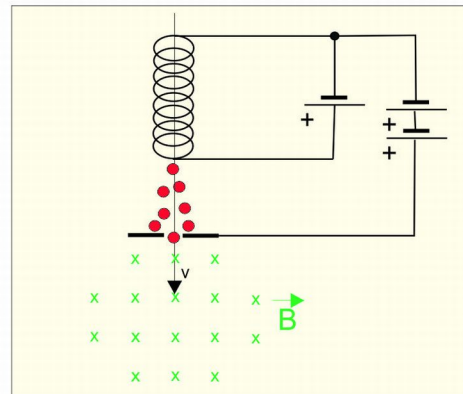


Abbildung 6: Glühkathode mit Lochanode

Durch die Wirkung des Magnetfeldes beschreibt „das Elektron“ eine Kreisbahn.

### 2.3 Die kinetische Energie eines Elektrons

Der Energieerhaltungssatz sagt aus, dass die Summe aller betrachteten Energien konstant ist. In unserem Fall ist der Betrag der potentiellen Energie  $W_{pot}$  gleich dem der kinetischen Energie  $W_{kin}$ . Wir betrachten ein Kathoden-Anoden-System einer Elektronenstrahlröhre. Die elektrische Potenzialdifferenz zwischen Anode und Kathode wird mit  $\Delta U$  bezeichnet :

$$W_{pot} = e^- \cdot \Delta U$$

$$W_{kin} = \frac{m_{e^-}}{2} \cdot v^2$$

$$W_{pot} = W_{kin}$$

$$e^- \cdot \Delta U = \frac{m_{e^-}}{2} \cdot v^2$$

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta U \cdot e^-}{m_{e^-}}}$$

## 2.4 Die Beschleunigung des Elektrons im magnetischen Feld

Wird ein geladenes Teilchen durch ein Magnetfeld beschleunigt, so bewegt sich das betrachtete Teilchen auf einer Kreisbahn mit dem Radius  $r$ .

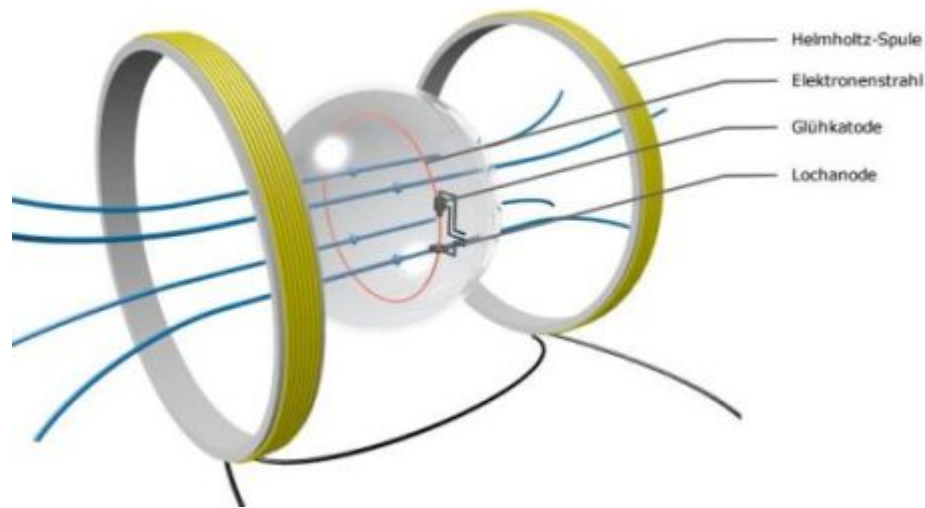


Abbildung 7: Die Kreisbahn des Elektrons ist rot eingezeichnet.

Der gedankliche Ansatz erfolgt über die Kräftebilanz. Wir haben eine Kreisbewegung des Elektrons, hervorgerufen durch die Lorentzkraft  $F_L$ . Auf das Elektron wirkt die Zentripetalkraft  $F_Z$ , die vom Betrag gleich der Lorentzkraft sein muss.

$$F_Z = \frac{m_{e^-} \cdot v^2}{r}$$

$$F_L = e^- \cdot B \cdot v$$

$$\frac{m_{e^-} \cdot v^2}{r} = e^- \cdot B \cdot v$$

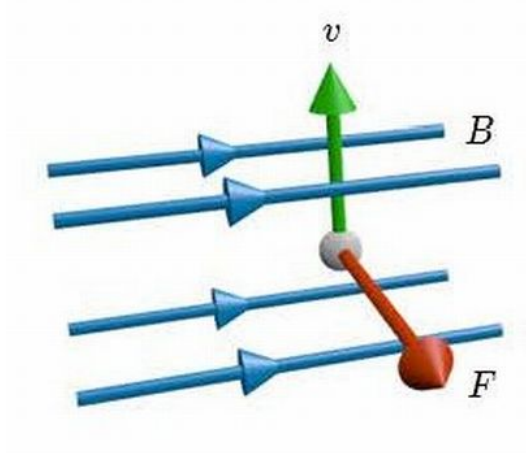


Abbildung 8: Bei negativer Ladung gilt die linke Hand-Regel für die Wirkungsrichtungen der drei Größen  $F$ ,  $B$  und  $v$  im Magnetfeld.

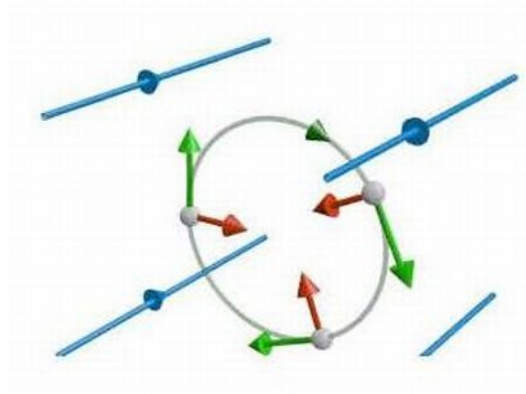


Abbildung 9: Die Lorentzkraft wirkt senkrecht zur Bewegungsrichtung.

Die Geschwindigkeit der Ladung bleibt konstant.

$$e^- \cdot B = \frac{m_{e^-} \cdot v}{r}$$



Wir prüfen anhand der physikalischen Einheiten, ob unsere Annahme plausibel ist.

$$As \frac{Vs}{m^2} = \frac{kg}{m} \cdot \frac{m}{s}$$

$$VAs \frac{s}{m^2} = \frac{kg}{s}$$

$$1VAs = 1Ws = 1J = 1Nm = 1 \frac{kg \cdot m^2}{s^2}$$

$$\frac{kg \cdot m^2}{s^2} \cdot \frac{s}{m^2} = \frac{kg}{s}$$

$$\frac{kg}{s} = \frac{kg}{s}!$$

Wenn wir die physikalischen Einheiten interpretieren, dann stellen wir fest, dass es sich um Massenströme handelt. Dies ist jedoch nicht von Bedeutung, da sich die Geschwindigkeiten auf beiden Seiten kürzen.

$$e^- \cdot B = \frac{m_{e^-}}{r} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta U \cdot e^-}{m_{e^-}}}$$

$$[e^- \cdot B]^2 = \left[ \frac{m_{e^-}}{r} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta U \cdot e^-}{m_{e^-}}} \right]^2$$

$$e^- \cdot B^2 = \frac{m_{e^-}}{r^2} \cdot 2 \cdot \Delta U$$

$$\frac{e^-}{m_{e^-}} = \frac{2 \cdot \Delta U}{r^2 \cdot B^2}$$

## 2.5 Die Lösung

$$m_{e^-} = \frac{r^2 \cdot B^2}{2 \cdot \Delta U} \cdot e^- \quad (2)$$

## 3 Wie schnell fließt der elektrische Strom?

Wir bedienen einen Lichtschalter und stellen fest, dass die Glühlampe im Abstand von 10m verzögerungsfrei an bzw. aus geht. Bei Leuchtstoffröhren ist es etwas anders. Jedoch wissen wir auch, dass die Elektronen ihren Impuls verzögerungsfrei weitergeben und daher erscheint es uns, als ob die Elektronenbewegung, also der Transport einer Masse, recht schnell ist.

Die elektrische Basisgröße ist die Ladung  $Q$ . Sie ist das Produkt aus der Anzahl der Elektronen und der Elementarladung eines Elektrons. Der Strom ist die erste Ableitung der Ladung nach der Zeit. Fakt ist, wenn wir die Geschwindigkeit des massebehafteten Elektrons bestimmen wollen, dann müssen wir uns mit der Stromstärke und der Zeit festlegen. Um das Zahlenrechnen nicht zu verkomplizieren gehen von einem Ampere für die Stromstärke (1A) und einer Sekunde für die betrachtete Zeit (1s) aus.

$$I = \frac{dQ}{dt} = n \cdot \frac{de^-}{dt}$$

Wir erhalten zwei wichtige Aussagen: Der Wert der Stromstärke ist vom Material unabhängig und wenn die Ladung konstant ist, dann ist der Betrag der Stromstärke null.

### 3.1 Elektronen im leitenden Werkstoff

Betrachten wir den Werkstoff, der in Elektrotechnik am häufigsten eingesetzt wird - Kupfer.

**Wieviele Elektronen sind in einem Kubikzentimeter Kupfer?**

$$\text{Antwort: } N = 8,6 \cdot 10^{22} \frac{e^-}{cm^3}$$

**Wieviele Elektronen benötigen wir, wenn ein Strom in einer Sekunde von 1A fließen soll?**

$$\text{Antwort: } I = \frac{dQ}{dt} \Rightarrow I = \frac{n \cdot e^-}{t} \Rightarrow n = \frac{I \cdot t}{e^-}$$

$$n = \frac{1A \cdot 1s}{1,6 \cdot 10^{-19} As} = 6,25 \cdot 10^{18}$$

$$\Delta V = \frac{n}{N} = \frac{6,25 \cdot 10^{18}}{8,6 \cdot 10^{22} \cdot cm^{-3}} = 7,27 \cdot 10^{-5} cm^3$$

Daraus folgt, das wir weniger als ein Kubikzentimeter Kupfer zur Verfügung stellen müssen, um 1A in einer Sekunde fließen zu lassen!

Betrachten wir ein Kupferkabel mit rundem Querschnitt und einem Durchmesser von 1mm, dann ergibt sich für die durchströmte Fläche:  $A = \frac{\pi}{4} d^2 = \frac{\pi}{4} 1mm^2 = 0,785mm^2 = 0,785 \cdot 10^{-2} cm^2$

Wenn wir davon ausgehen können, dass der durchströmte Querschnitt sich nicht ändert, dann muss sich die Wegstrecke bei verändertem Volumen ändern:

$$\Delta V = A \cdot \Delta l \Rightarrow \Delta l = \frac{\Delta V}{A} = \frac{7,27 \cdot 10^{-5} cm^3}{0,785 \cdot 10^{-2} cm^2} = 9,26 \cdot 10^{-3} cm = \Delta s$$

Die Größe  $\Delta s$  entspricht der Wegänderung der beteiligten Elektronen nach genau einer Sekunde!

Somit erhalten wir für die Geschwindigkeit der Elektronen einen Wert von:

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{9,26 \cdot 10^{-3} cm}{1s} = 92,6 \cdot 10^{-3} \frac{mm}{s}$$

Der Wert für die Geschwindigkeit ist recht unpraktisch, denn der Mensch hat Vorstellungen von Einheiten, wie  $\frac{m}{s}$  oder  $\frac{km}{h}$ . Aus diesem Grund berechnen wir die Zeit bei gegebener Geschwindigkeit für eine Leitungsstrecke vom Lichtschalter zur Glühlampe von  $s = 10m$ .

$$t = \frac{s}{v} = \frac{10^4 mm}{92,6 \cdot 10^{-3} mm/s} s \approx 108.000s \approx 30h.$$

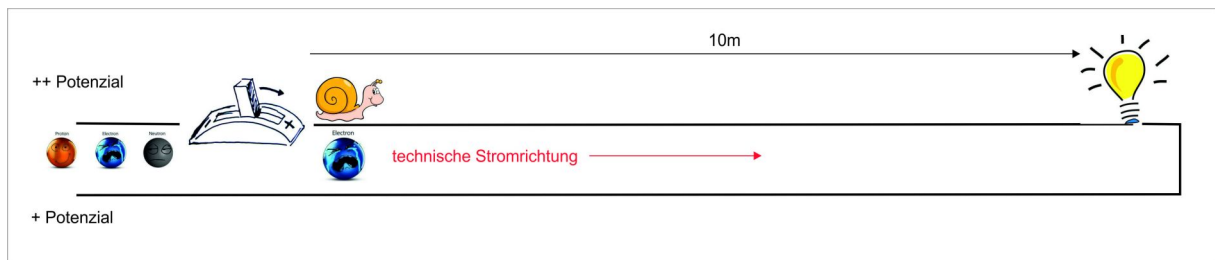


Abbildung 10: Elektronen bewegen sich vom höheren zum niederen Potenzial sehr langsam, sie driften.

Eine Weinbergschnecke erreicht eine Höchstgeschwindigkeit von 3 Metern pro Stunde (Quelle: Spektrum der Wissenschaften). Sie wäre in 3,3 Stunden an der Glühlampe - immerhin um mehr als den Faktor 9 schneller als ein Elektron.

**Fazit:** Die Fließbewegung des Stroms ist eine menschliche Vorstellung. Beim elektrischen Strom erfolgt kein Material- bzw. Stofftransport. Aus diesem Grund spricht man von der Elektronendrift.

### 3.2 Geschwindigkeit und Stromdichte

Der elektrische Strom kann in dreierlei Form auftreten, in Form von bewegten Ladungen (Konvektionsstrom), im Vakuum als Elektronenfluss zwischen Anode und Kathode und als Verschiebungsstrom. Betrachten wir ein Volumenelement  $\Delta V$  in dem sich  $\Delta N$  Ladungen gleichmäßig verteilt mit der Geschwindigkeit  $v$  bewegen. Im Kapitel 3.1 wurden zentral die Stromstärke betrachtet, die Zeit und das Material Kupfer. Aus diesen drei technischen Randbedingungen konnten wir die physische Geschwindigkeit der freien Elektronen bestimmen. Die Bewegung haben wir über die ganze Fläche betrachtet, daher war es notwendig den Durchmesser des Leiters zu kennen.

Wenn wir jedoch die Stromdichte gegeben haben, dann wäre es doch von Interesse aus diesem Wert die Driftgeschwindigkeit zu bestimmen. Wir reduzieren unsere geometrischen und elektrischen Größen auf

differenzielle. Da der leitende Werkstoff homogen ist, können wir unser punktueller Ergebnis auf das gesamte Volumen übertragen, ohne das wir die Originalgröße des Werkstoffs kennen.

Gegeben ist die Stromdichte  $S = 10 \frac{A}{mm^2}$ . Die maximal verfügbare Anzahl der freien Elektronen im Material beträgt:  $n = 8,6 \cdot 10^{22} \frac{e^-}{cm^3}$ .

**Die resultierende Frage lautet:** Kann eine Berechnungsformel hergeleitet werden, mit der die Driftgeschwindigkeit bestimmt werden kann?

Wie ist die Stromdichte definiert?  $S = \frac{dI}{dA}$

Wie ist die Stromstärke definiert?  $I = \frac{dQ}{dt} = \frac{d}{dt} \cdot n \cdot e^-$

Die Größe  $n$  ist die Anzahl der beteiligten Elektronen am betrachteten Vorgang, d.h. die Größe  $n$  gibt uns die Elektronen-Stückzahl pro Volumenelement [ $m^{-3}$ ] an, wogegen die Größe  $\rho = n \cdot e^-$  die Anzahl der Ladungen pro Volumenelement [ $\frac{As}{m^{-3}}$ ] angibt. Die Größe  $Q$  ist die betrachtete Gesamtladung, die den Gesamtstrom  $I$  erzeugt.

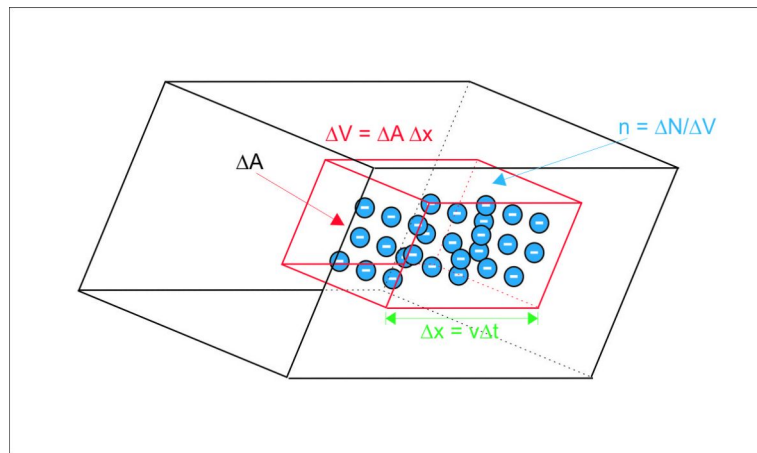


Abbildung 11: Das betrachtete Teilvolumen, die Stromdichte als Quotient von Teilstrom und Teilfläche.

Die Teilmenge  $\Delta N$  der Gesamtmenge  $n$  ergibt sich aus dem betrachteten Teilvolumen  $\Delta V$ . Allgemein können wir für das Volumen:  $V = A \cdot x$  schreiben und für das Teilvolumen:  $\Delta V = \Delta A \cdot \Delta x$ .

$$\Delta N = n \cdot \Delta V = n \cdot \Delta A \cdot \Delta x$$

Alle Ladungen fließen in der gleichen Zeit  $\Delta t$  die Wegstrecke  $\Delta x$  entlang. Somit können wir schreiben:

$$\Delta x = v \cdot \Delta t$$

Durch die Fläche  $\Delta A$  bewegt sich in der betrachteten Zeit die Ladung  $\Delta Q = \Delta N \cdot e^- = n \cdot e^- \cdot \Delta A \cdot \Delta x$

$$\text{Der Teilstrom: } \Delta I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

Wir betrachten den Übergang zu einem differentiellen kleinen Volumen:  $dI = \frac{dQ}{dt} = n \cdot e^- \cdot \frac{dx}{dt} \cdot dA$

Die Formel beinhaltet die Standardstückzahl der Ladungsträger pro standardisierter Volumeneinheit (Tabellenwert des leitenden Werkstoffes), alle Teilmengen- oder volumina sind aus der Lösungsgleichung eliminiert.

**Lösung:**

$$S = n \cdot e^- \cdot v = \rho \cdot v \quad (3)$$

$$v = \frac{S}{n \cdot e^-} = \frac{10A}{mm^2} \cdot \frac{1}{8,6 \cdot 10^{22} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} As} = 0,727 \frac{mm}{s}$$

### 3.3 Der Elektronenflug im Vakuum

Die Braunsche Röhre, auch Kathodenstrahlröhre genannt, ist ein praktisches Bauelement, mit dem Elektronen Spannungsverläufe die auf den Ablenkplatten anliegen, auf einem fluoreszierendem Schirm sichtbar machen können.

Die Potenzialdifferenz zwischen Anode und Kathode bringen die Elektronen auf Geschwindigkeit.

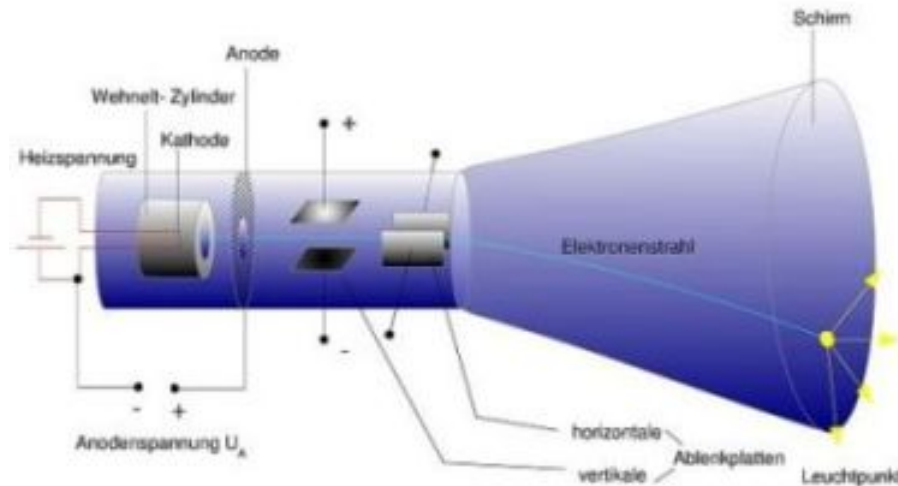


Abbildung 12: Die Braunsche Röhre wie man sie in einem Oszilloskop findet.

$$e^- \cdot \Delta U = \frac{m_{e^-}}{2} \cdot v^2$$

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot e^- \cdot \Delta U}{m_{e^-}}}$$

Wir setzen für  $\Delta U = 10\text{kV}$  ein.

Für die Elementarladung:  $e^- = 1,6 \cdot 10^{-19}\text{As}$

Für die Elektronenmasse:  $m_{e^-} = 9,1 \cdot 10^{-31}\text{kg}$

Wir setzen in die Formel für  $v$  nur die physikalischen Einheiten ein:

$$\sqrt{\frac{\text{VAs}}{\text{kg}}} = \sqrt{\frac{\text{Ws}}{\text{kg}}} = \sqrt{\frac{\text{Nm}}{\text{kg}}} = \sqrt{\frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} \cdot \frac{\text{m}}{\text{kg}}} = \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^4 \text{AsV}}{9,1 \cdot 10^{-31} \text{kg}}} \approx 59.200 \frac{\text{km}}{\text{s}}$$

**Fazit:** Immerhin, es ist ein Fünftel der Lichtgeschwindigkeit! ( $c \approx 300.000 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ )

Auf welchen Wert müsste die Anodenspannung erhöht werden, damit die Elektronen (bei konstanter Masse) auf Lichtgeschwindigkeit kommen?

$$\Delta U = \frac{m_{e^-}}{2 \cdot e^-} \cdot v^2 = \frac{9,1 \cdot 10^{-31} \text{kg}}{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{As}} \cdot 300.000^2 \left[ \frac{\text{km}}{\text{s}} \right]^2$$

$$\Delta U = \frac{9,1 \cdot 10^{-31}}{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} \cdot [3 \cdot 10^8]^2 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{As}} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \approx 256 \text{k} \frac{\text{Nm}}{\text{As}} = 256 \text{k} \frac{\text{Ws}}{\text{As}} = 256 \text{kV}$$

**Vorsicht!** Dieser Gedankengang übersteigt den Rahmen der Newton'schen Mechanik. Die Relativitätstheorie korrigiert die Annahme der konstanten Masse in Abhängigkeit der Geschwindigkeit.

**Merksatz:** Das Elektronenvolt ist eine Energieeinheit. Es definiert die Energie, die ein Teilchen mit der elektrischen Ladung eines Elektrons gewinnt, wenn es im Vakuum über eine Spannung von einem Volt beschleunigt wird. Ein Elektronenvolt, kurz: 1 eV entspricht  $1,6022 \cdot 10^{-19}$  Joule.

## 4 Galvanotechnik

Unter Galvanotechnik, oft auch Elektroplattieren genannt, versteht man die elektrochemische Abscheidung von metallischen Überzügen auf Gegenstände; in der Chemie hat sich der Begriff der Substrate durchgesetzt.

### 4.1 Stromfluss und Stofftransport

Mit der Bewegung von Ionen werden nicht nur Ladungen transportiert. Es erfolgt auch ein Stofftransport. Die positiven Ionen bewegen sich mit dem Strom zur Kathode, die negativen Ionen entgegen der positiven Stromrichtung zur Anode. Aus diesen Bewegungen leiten sich auch die Bezeichnungen ab – positive Ionen sind Kationen, negative Ionen werden als Anionen bezeichnet.

Wir können von einer bipolaren Stromleitung sprechen. Um das zu realisieren, benötigen wir einen Elektrolyten. Als Elektrolyt wird festes oder flüssiges Material bezeichnet, das bewegliche Ionen enthält. Die elektrische Leitfähigkeit solcher Ionenleiter ist geringer als es für Metalle typisch ist. Sie werden deshalb als Leiter 2. Klasse bezeichnet.

**Merksatz:** Ein Elektrolyt ist eine chemische Verbindung, die im festen, flüssigen oder gelösten Zustand in Ionen dissoziiert ist und die sich unter dem Einfluss eines elektrischen Feldes gerichtet bewegt.

Unter Dissoziation versteht man in der Chemie den angeregten oder selbsttätig ablaufenden Vorgang der Teilung einer chemischen Verbindung in zwei oder mehrere Moleküle, Atome oder Ionen.

Mit dem Strom transportierte Stoffe können nach Abgabe ihrer Ladungen:

1. an den Elektroden haften bleiben  $\Rightarrow$  die Metalle bleiben an der Kathode haften
2. als Gas an den Elektroden hochsteigen
3. als Feststoff in der Lösung absetzen
4. chemisch mit der Elektrode oder Elektrolyten reagieren.

Das einfachste Experiment ist der Stromfluss durch eine Kochsalzlösung ( $H_2O + NaCl$ ), hervorgerufen durch eine Gleichspannung  $E$ .

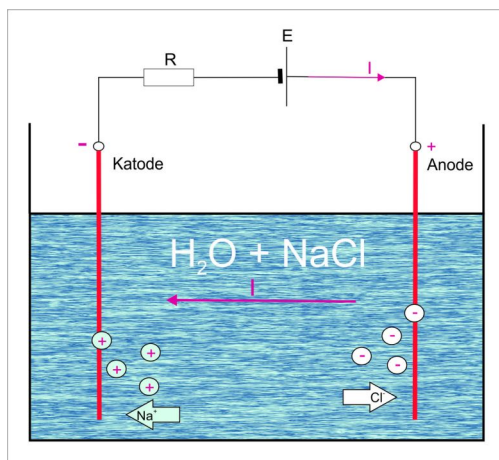


Abbildung 13: Ionenbewegung im Elektrolyten bei angelegter Gleichspannung  $E$

Die Leitfähigkeit des Elektrolyten ist nur in einem bestimmten Spannungsbereich konstant. Nur in diesem Bereich gilt das Ohmsche Gesetz.

Der Temperaturkoeffizient des spezifischen Widerstands ist negativ, d.h. der Widerstand wird mit zunehmender Temperatur kleiner. Der Grund liegt im zunehmenden Dissoziationsgrad des Elektrolyten.

### 4.2 Oberflächenveredlung ohne Elektrizität

Wir nehmen ein transparentes Becherglas und füllen es mit etwa 80ml Wasser. In das Wasser rühren wir Natriumhydroxid ( $NaOH$ ). Da  $NaOH$  nicht gut in Wasser löslich ist, bilden sich weiße Flocken. In diese

Lösung (80% Wasser, 20% NaOH) mischen wir einen halben Teelöffel Zink in Pulverform.



In diese Lösung wird eine 5 Euro-Cent Münze gelegt. Diese Münze ist 1,67 mm dick, 3,92 g schwer und besteht aus Stahl mit Kupferauflage.

Die Lösung wird etwa 5 Minuten erhitzt. Es wird beobachtet, dass sich das Zink auf der Kupferoberfläche der Münze abgelagert. Wir nehmen die Münze aus dem Gefäß und erhitzen sie auf etwa  $300^\circ\text{C}$ . Wir sehen eine goldfarbene Oberfläche - es ist **Messing**. Messing ist eine der bekanntesten Kupferlegierungen. Allen Messingarten ist gemeinsam, dass ihre Hauptbestandteile die Metalle Kupfer und Zink sind.

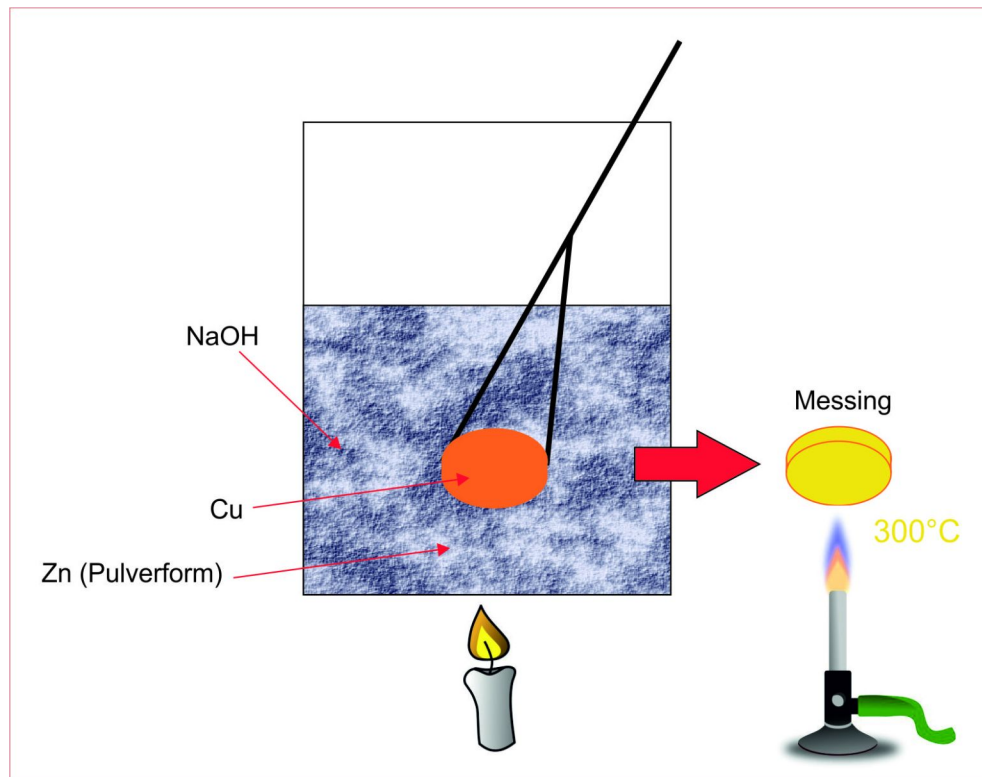


Abbildung 14: Oberflächenveredelung

Die Farbe von Messing wird vornehmlich vom Zinkgehalt bestimmt: Bei Zinkgehalten bis 20% ist Messing bräunlich bis bräunlich-rötlich, bei Gehalten über 36% hellgelb bis fast weißgelb.

### 4.3 Oberflächenveredelung mit Elektrizität

Bei der Galvanik wird durch ein elektrolytisches Bad Strom geleitet. Am Pluspol (der Anode) befindet sich das Metall, das aufgebracht werden soll, am Minuspol (der Kathode) der zu beschichtende Gegenstand. Der elektrische Strom löst dabei Metallionen von der Verbrauchselektrode (der Anode) ab und lagert sie durch Reduktion auf dem Werkstück (Substrat auf der Kathode) ab. So wird der zu veredelnde Gegenstand allseitig gleichmäßig mit einem anderen Metall beschichtet.

Je länger sich der Gegenstand (Substrat) im Bad befindet und je höher der elektrische Strom ist, desto stärker wird die Metallschicht.

## 5 Ferromagnetismus

Warum reagieren einige Materialien auf ein Magnetfeld und andere wiederum nicht? Diese Frage kann auch umformuliert werden: Warum verändern manche Materialien den Verlauf der magnetischen Feldlinien?

Die magnetische Feldstärke  $\vec{H}$  ist vom Material unabhängig! Außerhalb des elektrischen Leiters ist die magnetische Feldstärke indirekt proportional dem Abstand  $r$  von der Leiteroberfläche  $\Rightarrow \vec{H} \sim \frac{1}{r}$ .

### 5.1 Einteilung von magnetischen Stoffen

Als Bezugspunkt für das Verhalten gegenüber einem Magnetfeld nimmt man das Vakuum. Die relative Permeabilität  $\mu_r$  von Vakuum wurde mit 1 festgelegt. Wird Luft auf die Durchlässigkeit von magnetischen Feldlinien (exakt: magnetische Flussdichte  $\vec{B}$ ) untersucht, so stellt man fest, dass der Wert  $\mu_r = 1,0000004$  beträgt. Da der Wert größer ist als 1 nennt man dieses Verhalten paramagnetisch. Wir unterteilen das Verhalten in vier Klassen:

- **ideal diamagnetisch**  $\Rightarrow$  Supraleiter verdrängen vollständig die magnetischen Feldlinien. Der Wert für  $\mu_r = 0$ . Somit gilt für  $B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H = 0$ .
- **diamagnetisch**  $\Rightarrow$  die relative Permeabilität ist kleiner 1, d.h. ein Teil der magnetischen Feldlinien durchdringt den Stoff
- **paramagnetisch**  $\Rightarrow$  die relative Permeabilität ist größer als 1, d.h. die Magnetfeldlinien werden im Stoff gebündelt bzw. durch den Stoff konzentriert
- **ferromagnetisch**  $\Rightarrow$  die relative Permeabilität ist wesentlich größer als 1 (ab 100 bis 150.000), d.h. die Magnetfeldlinien werden vollständig im Stoff konzentriert, außerhalb des Materials werden keine Magnetfeldlinien wirksam; Eisen, Cobalt und Nickel sind typische ferromagnetische Stoffe

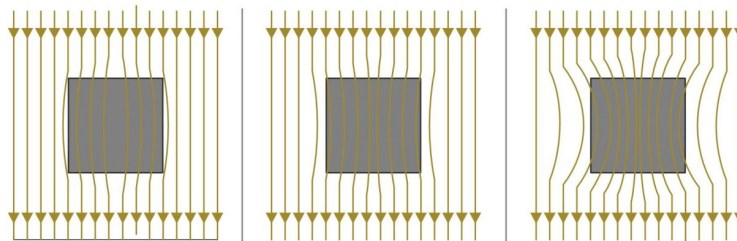


Abbildung 15: von links nach rechts: dia-, para- und ferromagnetische Wirkung

### 5.2 Die Ursache des Magnetismus

Woher kommt die magnetische Eigenschaft eines Materials? Betrachtet man ferromagnetische und diamagnetische Atome, so ist keine Besonderheit festzustellen. Der Atomkern hat ein magnetisches Moment und auch die Elektronen, die als Ringströme aufgefasst werden können. Erst wenn die Kristallstruktur betrachtet wird, ergeben sich Unterschiede, die die Bildung von Weiß'schen Bezirken fördern. Die Möglichkeit Weiß'sche Bezirke durch Kraftwirkung (die Ursache ist die Magnetische Feldstärke) ausrichten zu können, erklärt die Reaktion auf ein Magnetfeld.

Träger der elementaren magnetischen Momente sind die Elektronenspins (Ringströme). Die Dipol-Dipol-Wechselwirkung ist beim Ferromagnetismus zu schwach, um für die Ordnung der Spins allein verantwortlich zu sein. Sie hat aber, im Gegensatz zur Austauschwechselwirkung, eine sehr große Reichweite und ist deshalb für die Anwendungen auch wichtig.

Bei der ferromagnetischen Ordnung kommt hinzu, dass die parallele Ausrichtung magnetischer Momente für die Dipol-Dipol-Wechselwirkung energetisch ungünstig ist. Verantwortlich für die parallele Spinordnung des Ferromagneten ist die **quantenmechanische Austauschwechselwirkung** und das hängt mit dem Pauli-Prinzip (Orts- und Spinwellenfunktionen) zusammen. Es handelt sich also nicht um ein klassisches

Phänomen. Die spontane Parallelstellung der Spins und damit eine ferromagnetische Ordnung werden nur zustande kommen, wenn die Absenkung der potentiellen Energie die Erhöhung der kinetischen Energie überkompensiert. Das ist der Grund, weshalb nur wenige Materialien ferromagnetisch sind, die breite Mehrheit aber nicht.

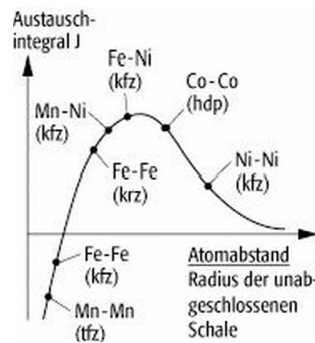


Abbildung 16: Bether-Slater Diagramm

Die Ordnung der magnetischen Momente wird durch die (quantenmechanische) Austauschwechselwirkung vermittelt, nicht durch (klassische) magnetische Wechselwirkung.

Die Bethe-Slater-Kurve ist eine graphische Darstellung des Integrals der Austauschwechselwirkung für Übergangsmetalle<sup>a</sup>. Das Austauschintegral  $J$  zwischen benachbarten Atomen in Kristallen wird dabei als Funktion des Verhältnisses ihres Abstandes  $a$  zum Durchmesser  $r$  der nicht aufgefüllten Schale aufgetragen.

<sup>a</sup>Die chemischen Elemente mit den Ordnungszahlen von 21 bis 30, 39 bis 48, 57 bis 80 und 89 bis 112 werden üblicherweise als Übergangselemente bezeichnet.

**Merksatz:** Alle Metalle mit positivem  $J$  sind ferromagnetisch, die mit negativem  $J$  sind dia- oder paramagnetisch.

Ein interessanter Umstand ist erwähnenswert, denn der Ferromagnetismus eines Stoffes ist abhängig von der Temperatur. Bei Eisen beträgt die Temperatur etwa  $T = 770^\circ C$ . In den Naturwissenschaften wird diese Temperatur, bei der ein Ferromagnet seine typische magnetische Eigenschaft verliert, **Curie-Temperatur** genannt.

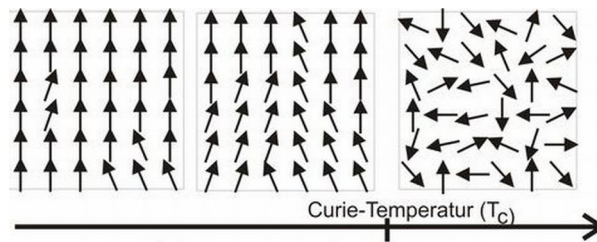


Abbildung 17: Durch Wärmezufuhr wird die innere Ausrichtung der Weickschen Bezirke aufgehoben.

### 5.3 Ein Experiment

Wir nehmen einen hartmagnetischen Stabmagneten, eine dünne, runde Scheibe aus ferromagnetischem Material (Eisen) und einen Bunsenbrenner. Der Bunsenbrenner kann punktuell die Scheibe auf mindestens  $770^\circ C$  erhitzen. Der Stabmagnet wird so platziert, dass er möglich nah an der Scheibe befestigt wird und eine Kraftwirkung zwischen den beiden Elementen entsteht.

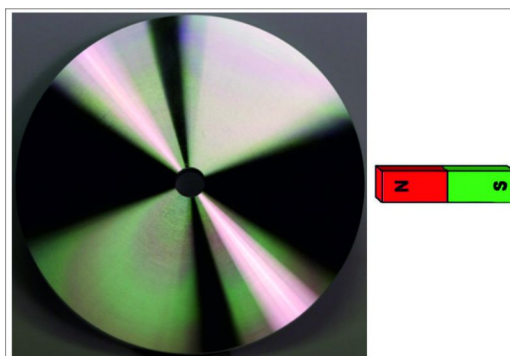


Abbildung 18: Scheibe im kalten Zustand

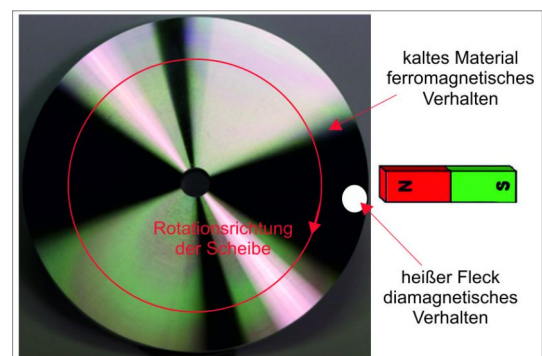


Abbildung 19: Scheibensegment wird erhitzt



Die Scheibe wird so installiert, dass sie sich reibungsfrei drehen könnte, wenn ein Drehimpuls die Scheibe in Bewegung setzen würde. Die Scheibe und der Stabmagnet ziehen sich an. Die ganze Anordnung verbleibt in Ruhe, da die wirksamen symmetrisch wirkenden Kräfte keine Scheibendrehung zulassen.

Mit dem Bunsenbrenner erhitzen wir die ferromagnetische Scheibe, so dass der Hitzeleck nur zur Hälfte (unsymmetrisch) dem Stabmagneten ausgesetzt ist. Die Scheibe wird heiß und verliert an dieser Stelle die magnetische Eigenschaft. Die Scheibe beginnt sich zu drehen, so dass der kalte und somit ferromagnetische Bereich der Scheibe sich dem Stabmagneten entgegenstellt.

Dieser Vorgang wiederholt sich durch das Erhitzen und Abkühlen des Scheibensegments. Die Scheibe wird in eine Drehbewegung versetzt.

Durch die Abkühlung wird das Scheibenmaterial nicht automatisch wieder ferromagnetisch, jedoch richten sich die Weisschen Bezirke neu aus. Soweit es möglich ist (bedingt durch die Reibung der Blochwände), wird an den kalten Stellen die Scheibe paramagnetisch.

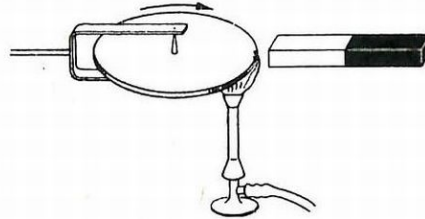


Abbildung 20: Die rotierende Scheibe dank Hitze.

## 5.4 Das Induktionsexperiment von Alfred Recknagel

Eine Feldspule (F) und eine Induktionsspule (S) sind übereinander geschoben. Die Feldspule ist um einen zylinderförmigen Kunststoffkörper gewickelt. Im Innern der Feldspule verläuft ein beheizbarer Stab aus Eisen, in ihm ein Draht aus Eisen.

### Die drei Versuche:

1. Gemessen wird der Induktionsstoß beim Einschalten des Feldes ohne Eisenkern.
2. Gemessen wird der Induktionsstoß beim Einschalten des Feldes mit Eisenkern.
3. Gemessen wird der Induktionsstoß beim Einschalten des Feldes mit heißem Eisenkern.

### Die Ergebnisse:

1. Der Induktionsstoß beim Einschalten des Feldes ohne Eisenkern beträgt 10%.
2. Der Induktionsstoß beim Einschalten des Feldes mit Eisenkern beträgt 100%.
3. Der Induktionsstoß beim Einschalten des Feldes mit heißem Eisenkern beträgt 10%.

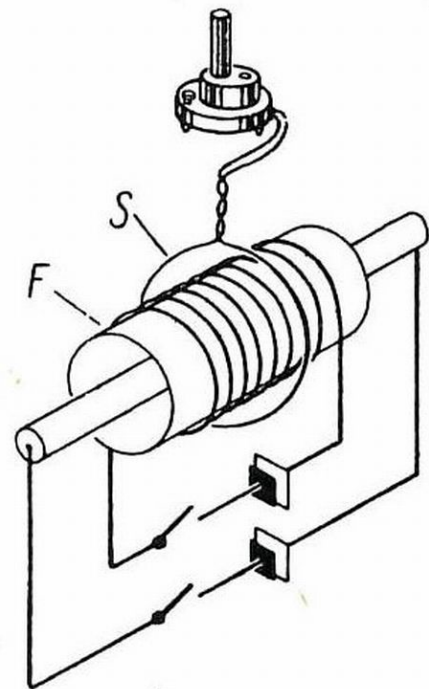


Abbildung 21: Der Versuchsaufbau nach Recknagel

Die Versuche ergeben folgende Erkenntnisse: Der heiße Eisenkern hat die gleiche Permeabilität wie kein Eisenkern - also wie der normale Draht. Wir stellen fest, dass die magnetische Durchlässigkeit (Permeabilität) von der Temperatur abhängig ist.

## 6 Supraleitung

### 6.1 Der elektrische Widerstand und die Temperaturabhängigkeit

Wir stellen uns ein Metall vor, als Beispiel Kupfer und experimentieren damit, in dem wir es erwärmen und abkühlen. Wenn wir alle Messwerte mittels linearer Regressionsrechnung verarbeiten, dann erhalten wir ein mathematisches Modell der Form:

$$R_\theta = R_0 \cdot [1 + \alpha \cdot \Delta\theta] \quad \Rightarrow \quad R_\theta = R_0 + R_0 \cdot \alpha \cdot \Delta\theta$$

Wir erkennen, dass der Wert des temperaturabhängigen Widerstandes  $R_\theta$  sich aus einem Referenzwert  $R_0$  und einem durch die Wärme- bzw. Kälteeinwirkung veränderten Widerstandsanteil  $\alpha \cdot \Delta\theta$  des Referenzwertes  $R_0$  zusammensetzt. Die Größe  $\alpha$  ist der Temperaturkoeffizient des Materials, die Größe  $\Delta\theta$  die Temperaturdifferenz  $\Delta\theta = T_2 - T_1$ . Die Temperatur  $T_2$  ist die Temperatur, die nach der Wärme- bzw. Kälteeinwirkung gemessen wurde. Die Temperatur  $T_1$  ist der gemessene Wert zum Zeitpunkt des Beginns des Versuchs. Somit können wir feststellen, dass zum Beginn des Versuchs  $R_\theta = R_0$  sein muss.

Wird statt der linearen die quadratische Regression benutzt, so erhalten wir das mathematische Modell:

$$R_\theta = R_0[1 + \alpha \cdot \Delta\theta + \beta^1 \cdot \Delta\theta^2]$$

Wie verändert sich der elektrische Widerstand, wenn wir die die Temperatur bis auf 0K verändern?

Es gab mindestens drei Annahmen:

- **Lord Kelvin glaubte**, dass der elektrische Widerstand gegen unendlich strebt, da die freien Elektronen einfrieren  $T \sim W_{kin}$  (die kinetische Energie wird null)
- **H. F. Matthiessen nahm an**, das ein konstanter Restwiderstand übrig bleibt
- **J. Deware vermutete**, dass der elektrische Widerstand weiter abnehmen würde und am absoluten Nullpunkt selbst zu null wird (der Widerstand verschwindet)

Erst experimentell konnte bewiesen werden, dass beim Erreichen einer speziellen Temperatur (Sprungtemperatur) der Widerstandswert des Quecksilbers auf einen sehr kleinen Wert ( $15^{-5}\Omega$ ) springt. Dieses Verhalten wurde im Kamerlingh-Onnes Diagramm im Jahre 1911 veröffentlicht.

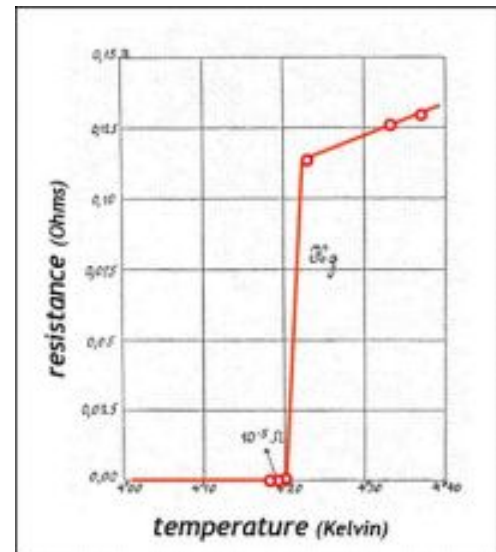


Abbildung 22: Kamerlingh-Onnes Diagramm

Metalle die keine Supraleitfähigkeit zeigen, besitzen einen Restwiderstand. Die Ursachen sind nur erklärbar, wenn wir die Materialien mikroskopisch betrachten.

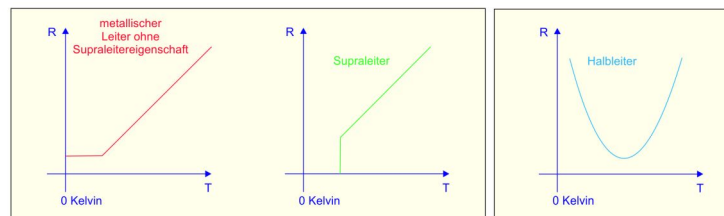


Abbildung 23: qualitativ betrachtet: Widerstandsverhalten bei tiefen Temperaturen

<sup>1</sup>Der Faktor  $\beta$  ist ein Temperaturkoeffizient der speziell bei tiefen Temperaturen korrigierend auf den Wert von  $R_\theta$  wirkt.

## 6.2 Was versteht man unter Supraleitung?

Die charakteristischen Eigenschaften der Supraleitung sind der verschwindende elektrische Widerstand, verbunden mit einem eigenstabilen Magnetfeld um den Supraleiter mit dem Radius  $r$  herum:  $\vec{H} = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot r}$ .

Das Phänomen lässt sich mit der von Bardeen, Cooper und Schrieffer 1957 aufgestellten **BCS-Theorie** erklären.

Ausgangspunkt ist die Kristallgitterstruktur der Metalle. In diesem Gitter sorgen die Elektronen für den Zusammenhalt der Atome. Die Elektronen können sich von den Atomen lösen. Die Atome bleiben positiv geladen zurück. Die Elektronen bewegen sich frei durch das Gitter und leiten den elektrischen Strom durch den Impuls weiter.

Unter normalen Bedingungen stoßen die Elektronen auf ihrem Weg gegen Hindernisse, dies bezeichnen wir als elektrischen Widerstand – genauer gesagt als Ohmschen Widerstand. Der Begriff Ohmscher Widerstand ist ein Eigenname. Der Ohmsche Widerstand ist der Gleichstromwiderstand und von der Frequenz unabhängig. Der Begriff elektrischer Widerstand kann verwendet werden, wenn die Frequenzabhängigkeit mit betrachtet wird.

Ein Hindernis sind die anderen Elektronen, denn sie sind gleich geladen und stoßen sich ab. Ein anderes Hindernis ist die Wärmebewegung (Wimmelbewegung) der Atome, das Kristall „wackelt“ permanent. Je tiefer nun die Temperatur wird, desto langsamer werden die Schwingungen.

Aus dem Kristallgitter wird so etwas wie eine weiche Matratze, auf der unweigerlich zwei Elektronen zu einem Paar, dem „**Cooper-Paar**“, in einer Kuhle zusammenrollen. Nun können sie als „Fahrgemeinschaft“ reibungslos durch das Kristallgitter reisen. Das genaue Phänomen lässt sich nur mit Hilfe der Quantentheorie erklären.

## 6.3 Der historische Werdegang

Bei der Verflüssigung von Luft müssen tiefe Temperatur erreicht werden. Bei Sauerstoff (LOX) sind das 90K, bei Stickstoff 77K und bei Wasserstoff (LH2) 20K. Diese Kältetechnologie, auch Kryotechnik genannt, ist sehr anspruchsvoll und es wird sehr viel elektrische Energie dafür benötigt. Nicht selten wird extra ein Kraftwerk benötigt, um die Produktion der kryogenen Medien zu ermöglichen.

Wasserstoff und Sauerstoff im flüssigen Zustand (Dichte von LOX bei 1bar etwa 1141kg pro Kubikmeter) sind Energieträger der Zukunft. In der Raumfahrt werden seit Jahrzehnten Triebwerke damit betrieben, da der spezifische Impuls dieser exothermen Reaktion sehr hoch und das ausströmende Heißgas ökologisch vertretbar ist.



Abbildung 24: Das LH2/LOX Triebwerk „Vulcain2“ und die Feststoffbooster der Ariane5 beim Start

Bei der Verflüssigung von Helium muss eine Temperatur von 4K erreicht werden. Dieses Ziel hat sich der niederländische Physiker **Heike Kamerlingh Onnes** gestellt. 1911 beobachtete Onnes, das Quecksilber bei Temperaturen unterhalb von minus  $269^{\circ}\text{C}$  den elektrischen Strom verlustfrei leitet.

Er hatte somit die Supraleitung entdeckt.

Der Ohmsche Widerstand, so zeigten es seine Messinstrumente an, schien unterhalb dieser Temperatur auf einmal zu verschwinden und der elektrische Strom wurde vom Quecksilber völlig verlustfrei übertragen.

1913 erhielt Heike Onnes für seine Forschung den Nobelpreis für Physik. In den folgenden Jahrzehnten fanden sich viele weitere Materialien, in denen sich diese „Supraleitung“ ab einer gewissen, sogenannten Sprungtemperatur, einstellte.

Bereits zu jener Zeit hatten die Physiker technische Anwendungen der Supraleitung im Blick, vor allem um extrem starke Magnetfelder zu erzeugen.

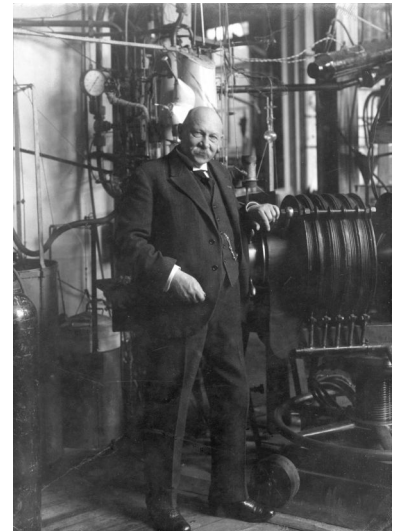


Abbildung 25: Nobelpreis für Onnes

Es war ökonomisch nicht vertretbar mit den **Tiefemperatur-Supraleitern** Maschinen und Anlagen in Serie zu bauen. Aus diesem Grund war man auf der Suche nach Materialien mit höheren Sprungtemperaturen. Überraschend fanden Georg Bednorz und Alex Müller im Jahr 1986 dann eine Verbindung aus Lanthan, Strontium, Kupfer und Sauerstoff, die bei einer wesentlich höheren Sprungtemperatur supraleitend wird, nämlich bei 46 Kelvin. Endlich wurde ein **Hochtemperatur-Supraleiter** geschaffen. Mit ihrer Entdeckung, die 1987 mit dem Nobelpreis ausgezeichnet wurde, öffneten die beiden Forscher neue Wege auf der Suche nach Materialien mit noch höheren Sprungtemperaturen.

1987 wurde Yttriumkuprat, eine Verbindung aus Yttrium, Barium, Kupfer und Sauerstoff, mit einer Sprungtemperatur von 93 Kelvin gefunden. 1988 folgten die Wismutkuprate, Verbindungen aus Wismut, Strontium, Kalzium, Kupfer und Sauerstoff, mit Sprungtemperaturen um 125 Kelvin und 1993 Quecksilberkuprat mit 134 Kelvin.

## 6.4 Das passende Experiment

### Wir backen uns einen Supraleiter

Man nehme:

- $\text{Y}_2\text{O}_3$  - Yttriumoxid
- $\text{BaCO}_3$  - Bariumcarbonat (Mineral Witherit)
- $\text{CuO}$  - Kupfer(II)-oxid

Die drei Komponenten  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{BaCO}_3$  und  $\text{CuO}$  sehr fein zerreiben und im stöchiometrischen Verhältnis mischen.

Die Pulvermischung in ca. 45 Minuten auf  $950^{\circ}\text{C}$  erhitzen.

Jetzt muss die Temperatur für 12 Stunden konstant gehalten werden.

Anschließend wird über mehrere Stunden die erhitzte Masse auf Raumtemperatur abgekühlt.

Wurde nicht zu schnell abgekühlt, dann bildet sich ein anthrazitfarbenes Pulver. Erfolgte die Abkühlung zu schnell, dann sieht das Pulver grünlich aus - es ist  $\text{Y}_2\text{BaCuO}_5$  geworden.

Es ist empfehlenswert das ganze Experiment in einem Raum, der mit reinem Sauerstoff gefüllt ist, durchzuführen.

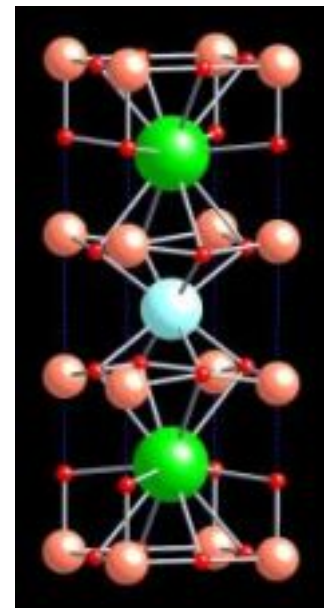


Abbildung 26: Kristallstruktur des YBCO