

2 Der elektrische Strom

2.1 Einführung

Definition $I = \frac{dQ}{dt} \quad [I] = 1 \frac{\text{C}}{\text{s}} = 1 \text{ A}$

Zur Erinnerung: 1 A ist die Stromstärke, bei der zwei parallele Leiter (unendlich dünn, unendlich lang) pro Meter eine Kraft von $2 \cdot 10^{-7} \text{ N}$ aufeinander ausüben.

Beispiele

- freie Ladungen im Vakuum (z.B. Elektronen, Protonen, Ionen in Beschleunigern)
- bewegliche Elektronen in Leitern und Halbleitern
- Ionen in Elektrolyten
- Elektronen und Ionen in Plasmen
- Bewegung von Ladungen durch mechanischen Transport (z.B. Van-de-Graaf-Generator)

Definition: "Technische" Stromrichtung = Richtung der Bewegung positiver Ladungen
 \neq Bewegungsrichtung der Elektronen in einem Leiter (!)

Stromdichte

Strom / Fläche $j = \frac{I}{A} \quad [j] = 1 \frac{\text{A}}{\text{m}^2}$



André-Marie Ampère
(1775-1836)

Experimente zum elektrischen Strom

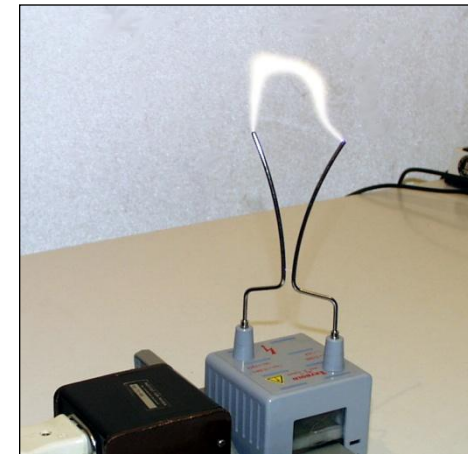
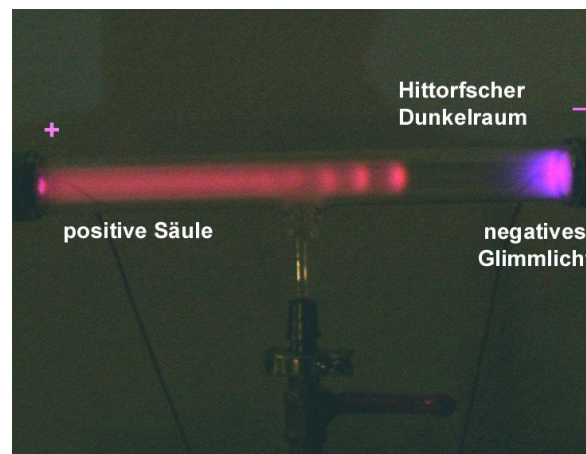
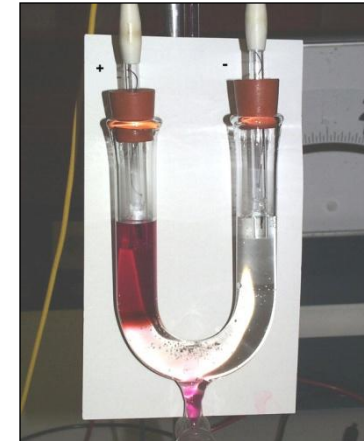
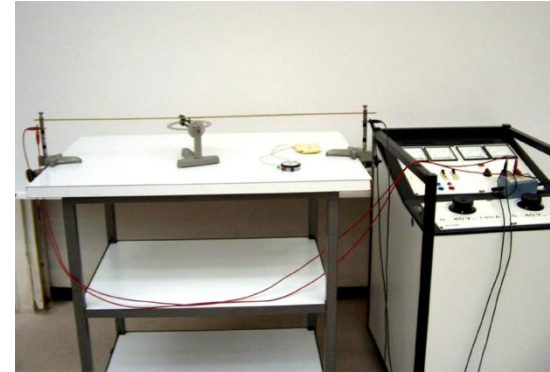
Strom durch einen Draht lenkt eine Magnetnadel ab.

Strom durch mechanischen Transport wurde am Beispiel des Van-de-Graaf-Generators gezeigt.

Strom durch einen Elektrolyten: Kaliumpermanganat in einer Harnstofflösung, Die Wanderung der MnO_4^- -Ionen ist an der purpurnen Farbe zu erkennen.

Stromfluss im Plasma: Verschiedene Leuchterscheinungen in einer Gasentladungsröhre (angelegte Spannung 6 kV), die vom jeweiligen Gasdruck abhängen.

Gasentladung an Luft bei 10,6 kV mit Hörnerelektroden. Die ionisierte Luft erwärmt sich und steigt nach oben, wo der Lichtbogen aufgrund des größeren Elektronenabstands abreißt.



2.2 Das Ohmsche Gesetz

Angenommen, die Stromdichte j (Strom/Fläche) ist proportional zu einem elektrischen Feld.

elektrische Leitfähigkeit

$$j = \sigma_{el} \cdot E \quad [\sigma_{el}] = 1 \frac{\text{A}}{\text{m}^2} \cdot \frac{\text{A} \cdot \text{s}}{\text{N}} = 1 \frac{\text{A} \cdot \text{C}}{\text{J} \cdot \text{m}} = 1 \frac{\text{A}}{\text{V} \cdot \text{m}}$$

Das ist z.B. beim Stromfluss durch Metalle oder in Elektrolyten der Fall, nicht aber z.B. beim mechanischen Transport von Ladungen (kein E -Feld) oder bei Teilchenstrahlen (bewegte Ladungen im Vakuum bewegen sich auch ohne E -Feld weiter und der Strom nicht bei konstantem E -Feld und nicht-relativistischen Ladungen zeitlich zu.



Georg Simon Ohm
(1789-1854)

Leiter mit Querschnitt A und Länge L

$$I = j \cdot A = \sigma_{el} \cdot E \cdot A = \underbrace{\frac{1}{\rho_{el}} \cdot \frac{A}{L}}_{1/R} \cdot U \quad \leftarrow \quad U = E \cdot L$$

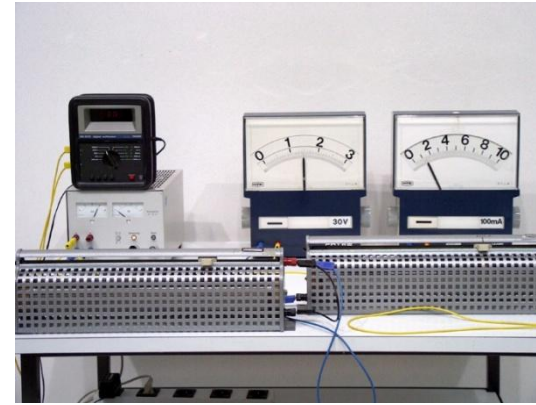
$$\rho_{el} = \frac{1}{\sigma_{el}} \quad [\rho_{el}] = 1 \frac{\text{V}}{\text{A}} \text{m} = 1 \Omega \text{m} \quad \text{spezifischer Widerstand (z.B. Kupfer } 1,7 \cdot 10^{-8} \Omega \text{ m)}$$

$$R = \rho_{el} \frac{L}{A} \quad [R] = 1 \frac{\text{V}}{\text{A}} = 1 \Omega \text{ (Ohm)} \quad \text{elektrischer Widerstand}$$

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

Experimente zum Ohmschen Gesetz

- Der Strom durch einen 1000-Ohm-Widerstand ist der angelegten Spannung proportional (10 mA bei 10 V).
- Der Strom halbiert sich beim Durchgang durch zwei in Reihe geschaltete 1000-Ohm-Widerstände.
- Der gemessene Widerstand durch zwei in Reihe geschaltete 80-Ohm-Widerstände beträgt 160 Ohm.
- Der gemessene Widerstand durch zwei parallel geschaltete 80-Ohm-Widerstände beträgt 40 Ohm.

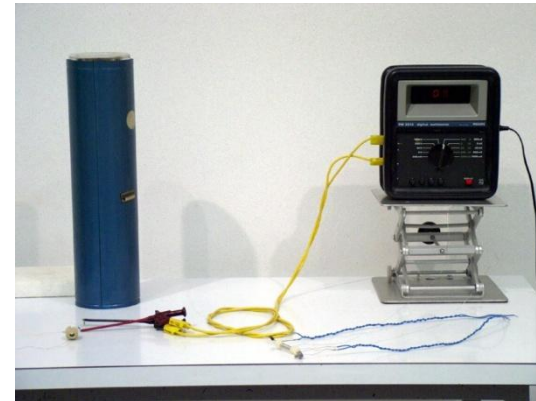


Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstands

$$\rho_{el}(T) = \rho_0 \cdot (1 + \alpha \cdot T + \beta \cdot T^2) \approx \rho_0 \cdot (1 + \alpha(T) \cdot T)$$

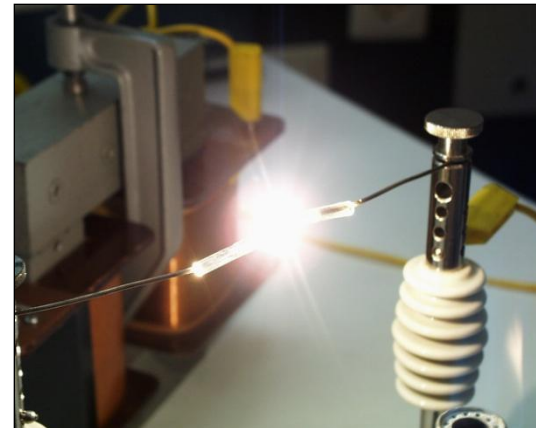
z.B. Kupfer: Temperaturkoeffizient $\alpha = 4 \cdot 10^{-3} \text{ 1/K}$ ($T_0 = 0^\circ\text{C}$)

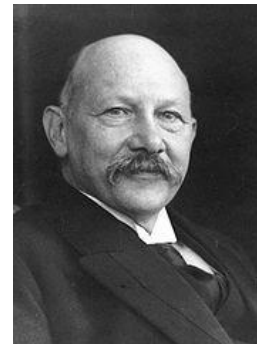
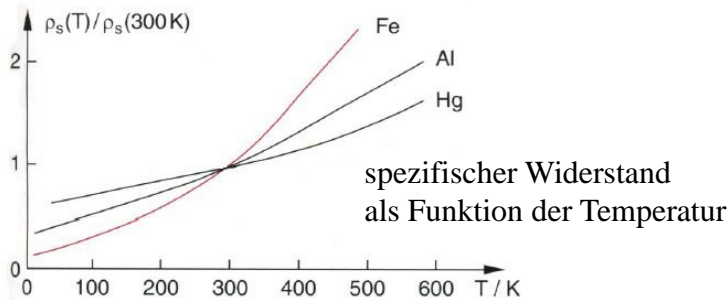
Experiment: Der Widerstand von Kupfer sinkt deutlich in flüssigem Stickstoff (77 K), der von Konstantan sinkt nur wenig, der eines sog. NTC-Widerstands steigt.



Leitfähigkeit von Glas bei hohen Temperaturen

Hochspannung (460 V) an einem Glasröhrchen, das mit einer Bunsenbrennerflamme erhitzt wird. Bei ausreichend hoher Temperatur steigt die Leitfähigkeit und damit der Strom durch das Glas, das dadurch weiter erhitzt wird und bei einem Strom von ca. 3 A schließlich schmilzt.





Heike Kamerlingh Onnes
(1853-1926)

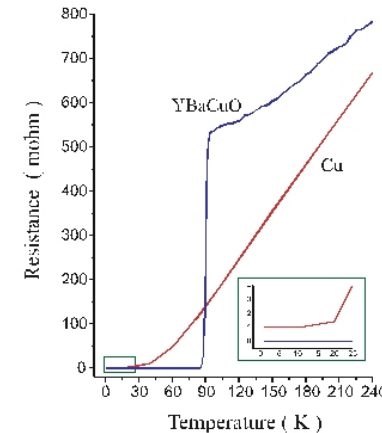
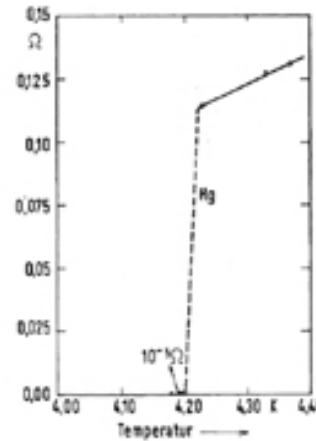


Georg Bednorz (*1950)
Alexander Müller (*1927)

Supraleitung

Unterhalb einer "Sprungtemperatur" von typisch 10-20 K verschwindet bei vielen Materialien der elektrische Widerstand (er wird nicht nur klein, sondern null!). Dieser quantenmechanische Effekt wurde 1911 zuerst an Quecksilber beobachtet und erst in den 1950er Jahren erklärt (BCS-Theorie). Im Jahr 1986 wurden "Hochtemperatur"-Supraleiter entdeckt (damals bei 85 K, also oberhalb der Temperatur von flüssigem Stickstoff), für die noch keine vollständige theoretische Erklärung vorliegt.

In Medizin und Technik werden supraleitende Magnete zur Erzeugung besonders hoher Magnetfelder (um 10 T) verwendet z.B. für die Magnetresonanztomografie (MRT) oder Magnetfelder in Teilchenbeschleunigern.


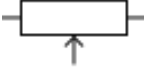




Bei DELTA wird ein supraleitender "Wiggler" eingesetzt, der aus abwechselnd gepolten Magneten besteht (hoher Strom = hohes Magnetfeld = intensive Synchrotronstrahlung bei kurzer Wellenlänge)
Die Zuleitung für die Spulen, die sich in flüssigem Helium befinden, bestehen aus Hochtemperatur-Supraleitern.

Widerstand als elektrisches Bauelement

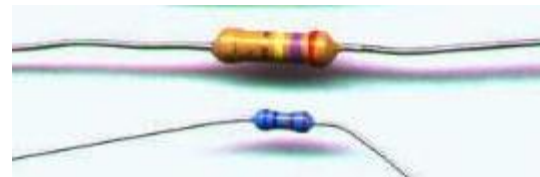
- Widerstände mit einem festen Wert
- Widerstände mit einstellbarem Wert (Dreh- und Schiebewiderstände, Potentiometer)
- Widerstände, die von der Umgebungstemperatur oder Lichteinwirkung abhängen

Schaltzeichen

	Widerstand (2 Kontakte)	Potentiometer (3 Kontakte)
nach DIN		
alternativ (ältere Schaltpläne, Ausland)		

Farbcode für Widerstände (4 Ringe):

1. und 2. Ring	3. Ring	4. Ring	
1. und 2. Ziffer	Multiplikator		Toleranz
silber	0,01	10%	
gold	0,1	5%	
schwarz 0	1.e0		
braun 1	1.e1	1%	
rot 2	1.e2	2%	
orange 3	1.e3		
gelb 4	1.e4		
grün 5	1.e5	0,5%	
blau 6	1.e6	0,25%	
violett 7	1.e7	0,1%	
grau 8	1.e8	0,05%	
weiß 9	1.e9		



(einige Widerstände haben einen weiteren Ring für die 3. Ziffer)