Energie und Leistung des elektrischen Stromes

Bei einer Kondensatorentladung, beispielsweise durch verbinden der beiden Platten mit einem Draht, fließt die gespeicherte Ladung von einer Kondensatorplatte durch den Draht zur anderen. Die vor dem Entladen im Kondensator gespeicherte Energie geht bei den Stößen der Elektronen mit dem Metallgitter des Drahtes in Wärme über. Zwischen den Enden des Drahtes besteht die Potenzialdifferenz $\varphi_2 - \varphi_1 = U$, die von der Ladung $\mathrm{d}Q = I\,\mathrm{d}t$ durchlaufen wird. Dadurch wird die Energie

$$W = U\,\mathrm{d}Q = U\,I\,\mathrm{d}t \tag{3.17}$$

als Wärme frei. Man nennt sie **JOULEsche Wärme**. Die elektrische Energie kann also in Wärme umgewandelt werden, aber auch in jede andere Form der Energie wie Arbeit, mechanische, kinetische oder potenzielle Energie.
Allgemein wird in der Physik die pro Zeiteinheit verrichtete Arbeit als **Leistung** bezeichnet. Damit ist die

$$\textbf{elektrische Leistung} \qquad \boxed{P = \frac{\mathrm{d}W}{\mathrm{d}t} = U\,I.} \tag{3.18}$$

Die Einheiten von Energie und Leistung des elektrischen Stroms sind:

$$[P] = \mathrm{V\,A} = \mathrm{Watt} = \mathrm{W} = \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{s}}, \tag{3.19}$$

$$[W] = \mathrm{Ws\ (Wattsekunde)} = \mathrm{J} = \mathrm{Nm}. \tag{3.20}$$

Beispiel:
In einer 100 W Lampe, die eine Betriebsspannung von 220 V hat, fließt also ein Strom $I = 0,45\mathrm{A}$.

3.4 Widerstand

Im letzten Kapitel haben wir gesehen, dass der Ladungstransport durch verschiedene Phänomene gehemmt wird. Man sagt, dass der Leiter dem elektrischen Feld oder dem Strom einen **Widerstand** entgegensetzt. Man definiert:

$$\textbf{elektrischer Widerstand} \qquad \boxed{R = \frac{U}{I} = \frac{\text{Spannung}}{\text{Strom}}.} \tag{3.21}$$

Die Einheit des Widerstandes ist das Ohm, benannt nach G. S. OHM (1798 - 1854), der diesen Zusammenhang 1826 als erster entdeckt hat.

$$[R] = \frac{[U]}{[I]} = \frac{\mathrm{V}}{\mathrm{A}} = \Omega = \mathrm{Ohm}. \tag{3.22}$$

Definition: Der elektrische Widerstand R beträgt 1 Ohm, wenn zwischen zwei Punkten eines Leiters beim Spannungsabfall von 1 Volt genau 1 Ampere fließt.
Der Kehrwert des Widerstandes R heißt

$$\textbf{elektrischer Leitwert} \qquad \boxed{G = \frac{1}{R} = \frac{I}{U}.} \tag{3.23}$$

Seine Einheit ist

$$[G] = \frac{[1]}{[R]} = \Omega^{-1} = \text{Siemens} = \text{S}. \tag{3.24}$$

3.4.1 Widerstand eines Metalldrahtes

Wir wollen nun für einfache metallische Leiter die Abhängigkeit des Widerstandes von der Länge l und des Querschnitts A bei konstanter Temperatur T experimentell bestimmen.

Versuch 3.2

> Im ersten Versuchsteil messen wir bei konstantem Strom die Spannung an einem Einfachdraht, einem Zweifachdraht und einem Vierfachdraht, also an Drähten mit einfachem, doppeltem und vierfachem Querschnitt A.
> Im zweiten Teil messen wir bei konstantem Strom die Spannung am Einfachdraht mit voller, halber und viertel Länge l.

Wir beobachten folgende Zusammenhänge:

$$R \sim l \qquad \text{und} \qquad R \sim 1/A. \tag{3.25}$$

Dies lässt sich zusammenfassen zu

$$R \sim \frac{l}{A}. \tag{3.26}$$

Die Proportionalität wird mit der Konstanten ϱ beschrieben, die **spezifischer Widerstand** heißt. Damit ist

$$\boxed{R = \varrho \, \frac{l}{A}}. \tag{3.27}$$

Der spezifische Widerstand ist eine Materialkonstante. In der folgenden Tabelle ist der spezifische Widerstand einiger Materialien bei Zimmertemperatur aufgeführt:

Leiter	Silber	$1,47 \cdot 10^{-8}\,\Omega\text{m}$
	Kupfer	$1,72 \cdot 10^{-8}\,\Omega\text{m}$
	Aluminium	$2,63 \cdot 10^{-8}\,\Omega\text{m}$
	Konstantan	$4,9 \cdot 10^{-7}\,\Omega\text{m}$
Halbleiter	Germanium	$6,0 \cdot 10^{-1}\,\Omega\text{m}$
	Silizium	$2,3 \cdot 10^{+3}\,\Omega\text{m}$
Isolatoren	Bernstein	$5,0 \cdot 10^{14}\,\Omega\text{m}$
	Glas	$10^{10} - 10^{15}\,\Omega\text{m}$
	Holz	$10^{8} - 10^{11}\,\Omega\text{m}$

Analog zum Leitwert ist der Kehrwert des spezifischen Widerstands die

$$\textbf{elektrische Leitfähigkeit} \quad \boxed{\sigma = \frac{1}{\varrho} = \frac{l}{RA}} \quad . \tag{3.28}$$

Damit können wir schreiben

$$U = R \cdot I = \varrho\,\frac{l}{A}\,I \qquad \text{und} \qquad E = \frac{U}{l} = \varrho\,\frac{I}{A} = \varrho \cdot j, \tag{3.29}$$

vektoriell gilt dann:

$$\boxed{\vec{E} = \varrho \cdot \vec{j} \qquad \text{oder} \qquad \vec{j} = \sigma \cdot \vec{E}} \qquad \textbf{Ohmsches Gesetz} \tag{3.30}$$

Für Metalle gilt

$$j = n \cdot e \cdot v_D = \sigma\,E \quad \Leftrightarrow \quad \sigma = n \cdot e\,\frac{v_D}{E} = n \cdot e \cdot \mu. \tag{3.31}$$

Bei konstanter Beweglichkeit μ folgt dann:

$$\mu = const. \Rightarrow \sigma = const. \Rightarrow R = const. \tag{3.32}$$

Das OHMsche Gesetz ist ein **empirisches Materialgesetz**! Es gilt sehr gut für Metalle und Elektrolyte bei konstanten Temperaturen. Die Proportionalität von Strom und Spannung $U = RI$ (Gleichung 3.21) heißt **integrale Form des OHMschen Gesetzes**. Oft wird sie aber vereinfachend nur als OHMsches Gesetz bezeichnet. Im Prinzip sind (3.21) und (3.30) zwei verschiedene Schreibweisen für das gleiche Gesetz, wobei in (3.30) der vektorielle Charakter der gerichteten Strombewegung berücksichtigt wird. Die Proportionalität von U und I ist jedoch kein grundlegendes Naturgesetz und keinesfalls allgemein gültig.