Versuch 44

Elektrische Leitfähigkeit

Wir messen die elektrische Leitfähigkeit bzw. den spezifischen Widerstand eines Metalldrahts mit verschiedenen Schaltungen und verschiedenen Messgeräten.

44.1 Physikalische Grundlagen

Stichpunkte: Strom, Spannung, Widerstand, spezifischer Widerstand, elektrische Leitfähigkeit, Ohmsches Gesetz, Knoten- und Maschenregel, Reihen- und Parallelschaltung, Voltmeter, Amperemeter.

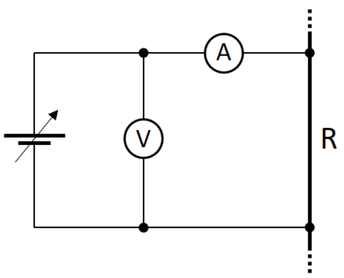
Literaturvorschlag: Gerthsen, Physik
http://www.redi-bw.de/start/unifr/EBooks-springer/10.1007/978-3-662-45977-5
Abschnitt 7.3 „Gleichströme“ bis einschließlich 7.3.4 a) „Messgeräte“

44.2 Versuchsaufbau

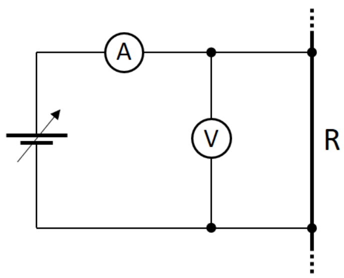
https://omnibus.uni-freiburg.de/~phypra/ap/44/

44.3 Experimente

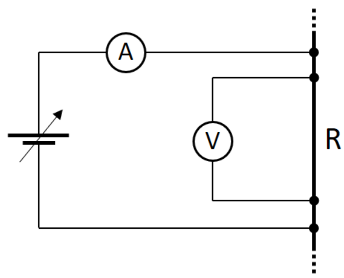
1. Bestimmen Sie den spezifischen Widerstand eines Metalldrahts mit drei verschiedenen Schaltungen. Verwenden Sie dabei ein analoges und ein digitales Multimeter jeweils als Spannungs- und Strommessgerät, so dass sich insgesamt sechs Schaltungen ergeben:



Schaltung 1,2



Schaltung 3,4



Schaltung 5,6

Messen Sie mit jeder Schaltung den Widerstand $R = U/I$ und die relevante Drahtlänge L.

Messen Sie den Durchmesser d des verwendeten Drahts.

Berechnen Sie für jede Schaltung den spezifischen Widerstand ϱ.

Vergleichen Sie die Ergebnisse und diskutieren Sie die Unterschiede.

2. Überprüfen Sie die erwartete Abhängigkeit von der Drahtlänge.

Wählen Sie für diese Messung eine der sechs Schaltungen aus.

Messen Sie den Widerstand R für verschiedene Drahtlängen L.

Auftragung $R(L)$, Überprüfung der Hypothese $R \propto L$

3. Bestimmen Sie ein Endergebnis für den spezifischen Widerstand ϱ.

Bestimmen Sie ein Endergebnis durch Auswahl der „besten“ Schaltung (mit Begründung) oder durch eine geeignete Mittelung der einzelnen Ergebnisse.

Geben Sie explizit an, welche Beiträge zur Unsicherheit $\Delta\varrho$ die Ablesungen von d, L, U, I und die Kalibrationstoleranzen der Multimeter leisten.

Vergleichen Sie das Endergebnis mit dem Literaturwert.

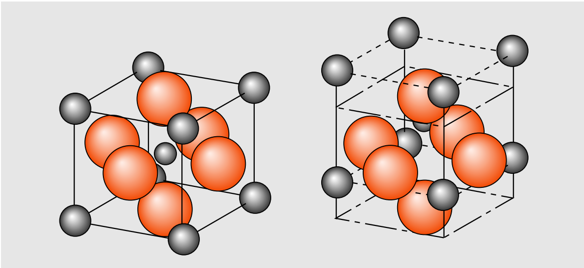


Abbildung 7.53 Bariumtitanat, eines der wichtigsten Ferroelektrika und Piezoelektrika. Die kubische Perowskit-Struktur ohne polare Achse deformiert sich unterhalb des ferroelektrischen Curie-Punktes spontan in die tetragonale Struktur (*rechts*), in der Anionen und Kationen in einer der sechs möglichen Richtungen verschoben sind und eine spontane elektrische Polarisation erzeugen. Einen anderen Mechanismus der Ferroelektrizität zeigt Abb. 7.35

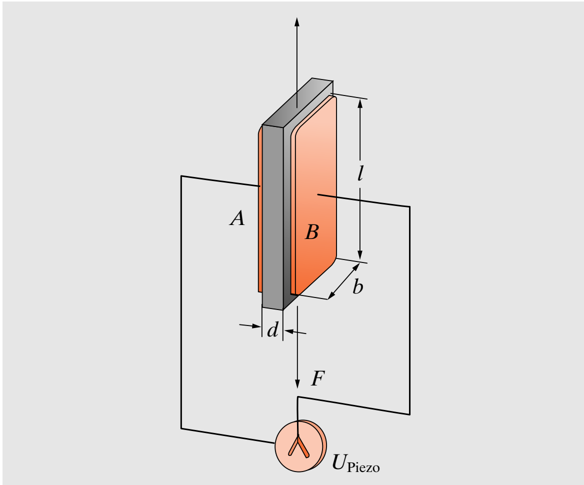


Abbildung 7.54 Transversaler Piezoeffekt

zwischen den Stirnflächen, die proportional zu Δx ist:

$$E = \delta\frac{\Delta x}{x} \quad \text{oder} \quad U = \delta\,\Delta x\,. \tag{7.55}$$

δ heißt piezoelektrischer Koeffizient und ist für die verschiedenen Kristallrichtungen oft sehr verschieden. Die Deformation beruht darauf, dass die in der Feldrichtung hintereinander liegenden Dipole einander anziehen. Benachbarte Schichten werden durch diese Kräfte so lange einander genähert, bis elastische Gegenkräfte die elektrischen kompensieren. Die Deformation erfolgt gegen die Coulomb-Felder zwischen Elementarladungen; diese Felder haben die Größenordnung $e/(4\pi\varepsilon_0 r^2)$, wo $r \approx 10^{-10}$–10^{-9} m ein typischer Teilchenabstand ist. Dieselbe Größenordnung des Feldes von 10^9–10^{11} V m^{-1} hat auch δ.

Die gebräuchlichsten Piezomaterialien sind **Quarz**, **Turmalin**, **Bariumtitanat** ($BaTiO_3$) in seiner tetragonalen Kristallform, Piezokeramiken meist aus Ba- und Ti-Salzen mit isotropem Piezoeffekt. Wichtig sind auch organische Salze wie NaK-Tartrat (**Seignette-Salz** und **Rochelle-Salz**), in denen die Polarisation nicht auf einer Verschiebung von Elektronen beruht, sondern von Protonen in Wasserstoffbrücken; gleichzeitig haben diese Salze eine sehr hohe DK und verhalten sich ferroelektrisch (Abschn. 8.2.8). Abbildung 7.54 zeigt den transversalen Piezoeffekt am Quarz (Feldrichtung senkrecht zur Deformationsrichtung; daneben gibt es auch einen longitudinalen Effekt).

Die Umkehr des Piezoeffekts besteht in einer Verlängerung oder Verkürzung der Quarzplatte, je nach der Polung der Spannung, die man an die Belegungen legt. Eine Wechselspannung, die in der Frequenz mit einer mechanischen Eigenschwingung der Quarzplatte übereinstimmt, regt diese zu Resonanzschwingungen an. Der Schwingquarz ist als Ultraschallsender und zur Stabilisierung der Frequenz von Schwingkreisen in Quarzuhren und Sendern sehr wichtig.

Ein Stoff ohne polare Achse kann keine zum äußeren Feld E proportionale Deformation zeigen, denn sonst müsste er in Umkehrung dieses Effekts auch piezoelektrisch sein. Die Deformation kann höchstens proportional zu E^2 sein. Eine solche quadratische Elektrostriktion ist viel kleiner als die lineare bei polaren Stoffen, denn die Felder E sind immer ins Verhältnis zu den mindestens 10^5 mal größeren Coulomb-Feldern zwischen den Kristallbausteinen zu setzen.

Die beiden Richtungen einer polaren Achse unterscheiden sich meist in der Anordnung der positiven und negativen Ionen im Kristall. Solche Stoffe wie Quarz und Turmalin haben daher eine spontane elektrische Polarisation. Die Aufladung der Oberflächen ist allerdings normalerweise durch freie Ladungen aus der Umgebung kompensiert. Bei plötzlicher Temperaturänderung tritt die Aufladung in Erscheinung (**Pyroelektrizität**), erstens weil sich die innere Polarisation geändert hat und nicht sogleich durch fremde Ladungen ausgeglichen wird, zweitens wegen des Piezoeffekts infolge der thermischen Längenänderung.

7.3 Gleichströme

Selbst der schwächste Gleichstrom, wie ihn die elektrochemischen Elemente von *Luigi Galvani* und *Alessandro Volta* lieferten (1794), transportiert in ganz kurzer Zeit viel mehr Ladung, als man in den größten Elektrisiermaschinen durch Reibung erzeugen konnte.

7.3.1 Stromstärke

In der **Elektrostatik**, wo Ladungen als ruhend, also im Gleichgewicht angenommen werden, ist es richtig, dass längs eines Leiters keine Potentialdifferenz bestehen kann. Im täglichen Leben legt man dagegen ständig Spannung an Leiter mit der Folge, dass sich die Ladungen bewegen, also Ströme fließen. Freilich können diese Ströme nur auf Kosten äußerer Energiequellen aufrechterhalten werden; sich selbst überlassen, würde der Leiter sehr schnell den von der Elektrostatik geforderten Zustand konstanten Potentials annehmen.

> Wenn während der Zeit $\mathrm{d}t$ durch den Querschnitt eines Leiters, z. B. einen Draht, die Ladungsmenge $\mathrm{d}Q$ fließt, so sagt man, es fließe ein Strom mit der **Stromstärke**
>
> $$I = \frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t} \,. \qquad (7.56)$$
>
> Im internationalen System ist die Einheit der Stromstärke dementsprechend $1\,\mathrm{C\,s^{-1}} = 1\,\mathrm{A}$ (Ampere).

Der Strom durch einen Leiter kann nur dann zeitlich konstant, also ein **Gleichstrom** sein, wenn die Spannung zwischen den Leiterenden und überhaupt zwischen je zwei Leiterpunkten konstant ist. Umgekehrt: In einem geschlossenen Stromkreis, in dem ein Gleichstrom fließt, ist die Stromstärke für jeden Querschnitt dieselbe, denn sonst gäbe es Teile des Leiters, wo ständig Ladung abgezogen wird oder sich anhäuft. Das wäre höchstens der Fall, wenn der betrachtete Querschnitt zwischen den Platten eines Kondensators durchliefe. Sieht man den Kondensator als ein Ganzes an, dann fließt auch durch ihn der gleiche Strom wie überall sonst im Stromkreis.

Bedenkt man, dass die Ladung einem Erhaltungssatz gehorcht und dass das elektrostatische Feld ein Potential besitzt, dann ergeben sich sofort die Grundregeln zur Analyse beliebiger Schaltungen:

> **Kirchhoffs Knotenregel**
>
> An jedem Verzweigungspunkt (Knoten) in einer Schaltung muss ebenso viel Ladung zu- wie abfließen. Die Summe aller Ströme in den einzelnen Zweigen, die in den Knoten münden, ist Null:
>
> $$\sum I_i = 0 \,. \qquad (7.57)$$

Man kann die Stromrichtungen auch beliebig festlegen, muss dann aber natürlich die Ströme, die dem Knoten zufließen, positiv zählen, die abfließenden negativ, oder umgekehrt.

Überall in einer Schaltung gilt der Satz von der Wegunabhängigkeit der Potentialdifferenz. Die Spannungen längs zweier verschiedener Zweige der Schaltung, die zwei Punkte A und B verbinden, müssen also gleich sein. Dies gilt auch, wenn Spannungsquellen dazwischenliegen.

> **Kirchhoffs Maschenregel**
>
> Die Gesamtspannung längs einer geschlossenen *Masche* einer Schaltung, d. h. die Summe aller Spannungsabfälle an den einzelnen Elementen, aus denen die Masche besteht, ist Null:
>
> $$\sum U_i = 0 \,, \qquad (7.58)$$

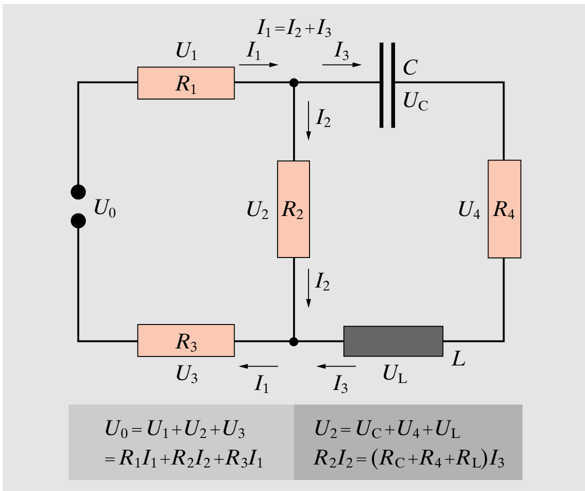


Abbildung 7.55 Die Kirchhoff-Regeln verknüpfen die Einzelspannungen und Einzelströme miteinander. Kennt man noch die Strom-Spannungs-Kennlinien der einzelnen Elemente, kann man alle Spannungen und Ströme durch U_0 ausdrücken. Allerdings sind U, I und R für C und L als komplexe Werte aufzufassen

sofern man in einem beliebigen, aber konstanten Sinn umläuft. Spannungsquellen, die in der Masche liegen, kann man auch ausschließen und erhält dann für den Rest der Elemente in der Masche eine Summe der Spannungsabfälle, die gleich der negativen Summe der Spannungen ist, die die Spannungsquellen liefern.

Spannungsquellen arbeiten entweder magnetisch und erzeugen elektrische Felder durch **Induktion**, also durch Änderung eines Magnetfeldes, oder sie arbeiten elektrochemisch, stellen also eine Art Kondensator mit ständiger chemischer Nachlieferung von Ladung dar.

Mit den beiden Kirchhoff-Regeln kann man jede beliebige Schaltung analysieren, wenn noch die **Strom-Spannungs-Kennlinien** $I(U)$ der einzelnen Elemente bekannt sind. Sie folgen häufig, aber durchaus nicht immer dem ohmschen Gesetz. Die Kirchhoff-Regeln gelten für die Momentanwerte von Strömen und Spannungen, sinngemäß also auch für Wechselströme.

Tabelle 7.2 Spezifische Widerstände einiger Metalle und Isolatoren bei 18 °C

Stoff	$\varrho/\Omega\,\mathrm{m}$
Silber	$0{,}016 \cdot 10^{-6}$
Kupfer	$0{,}017 \cdot 10^{-6}$
Aluminium	$0{,}028 \cdot 10^{-6}$
Eisen	$0{,}098 \cdot 10^{-6}$
Quecksilber	$0{,}958 \cdot 10^{-6}$
Konstantan	$0{,}50 \cdot 10^{-6}$
Manganin	$0{,}43 \cdot 10^{-6}$
Quarzglas	$5 \cdot 10^{16}$
Schwefel	$2 \cdot 10^{15}$
Hartgummi	$2 \cdot 10^{13}$
Porzellan	$\approx 10^{12}$
Bernstein	$> 10^{16}$

7.3.2 Das ohmsche Gesetz

Bei vielen wichtigen Leitern, z. B. Metalldrähten oder auch Elektrolytlösungen, beobachtet man eine Proportionalität zwischen dem Strom I, der durch den Leiter fließt, und der angelegten Spannung U. Der Proportionalitätsfaktor heißt Leitwert des Leiters, sein Kehrwert heißt sein Widerstand R:

$$I = \frac{U}{R} \qquad R = \frac{U}{I} \qquad U = RI\,. \tag{7.59}$$

Durchaus nicht alle Leiter folgen dem **ohmschen Gesetz** (7.59). Wichtige Ausnahmen sind Gasentladungsstrecken (Bogenlampe, Leuchtstoffröhren, Vakuumröhren) und viele Halbleiterelemente.

Bei einem homogenen ohmschen Material ist der **Widerstand** R proportional zur Länge l und umgekehrt proportional zum Querschnitt A des Leiters:

$$R = \frac{\varrho l}{A}\,. \tag{7.60}$$

ϱ heißt **spezifischer Widerstand** des Materials (Tabelle 7.2), sein Kehrwert $\sigma = 1/\varrho$ heißt elektrische Leitfähigkeit (Einheiten $\Omega\,\mathrm{m}$ bzw. $\Omega^{-1}\mathrm{m}^{-1}$).

Liegt an einem Draht der Länge l die Spannung U, dann misst man an einem Teilstück der Länge l' die kleinere Spannung $U' = Ul'/l$. Das ist die Grundlage der **Kompensationsmethode** und des **Potentiometers** (Abschn. 7.3.4e). Mit dem Begriff der Feldstärke ist dieser Zusammenhang sofort klar: Im homogenen Draht ist die Feldstärke $E = U/l = U'/l'$ überall gleich.

Die Feldstärke erleichtert auch die Behandlung von Strömen in Leitern komplizierter Gestalt oder Flüssigkeiten, ebenso in Fällen, wo die elektrischen Eigenschaften von Ort zu Ort verschieden sind. Hier muss man eine ebenfalls von Ort zu Ort wechselnde **Stromdichte** $\vec{j}$ definieren.

$\vec{j}$ ist ein Vektor, der die Richtung des Ladungstransports angibt, und verhält sich zum Strom I wie die Strömungsgeschwindigkeit $\vec{v}$ zum Volumenstrom $\dot{V}$ oder wie die Feldstärke $\vec{E}$ zum elektrischen Fluss ϕ:

$$\mathrm{d}I = \vec{j}\cdot \mathrm{d}\vec{A} \quad \text{bzw.} \quad I = \int \vec{j}\cdot \mathrm{d}\vec{A}\,. \tag{7.61}$$

Erstreckt man das Integral über den ganzen Leiterquerschnitt, kommt der ganze Strom durch den Leiter heraus. Man kann dann das ohmsche Gesetz, falls es überhaupt gilt, nur noch für sehr kleine Bereiche formulieren, z. B. für einen kleinen Würfel, dessen Kanten der Länge a parallel bzw. senkrecht zur Feldrichtung an dieser Stelle liegen. Wenn die Feldstärke E ist, liegt zwischen den Stirnflächen des Würfels die Spannung $U = aE$. Der Strom durch den Würfel ist dann $I = \sigma a^2 U/a = \sigma a^2 E$, die Stromdichte ist

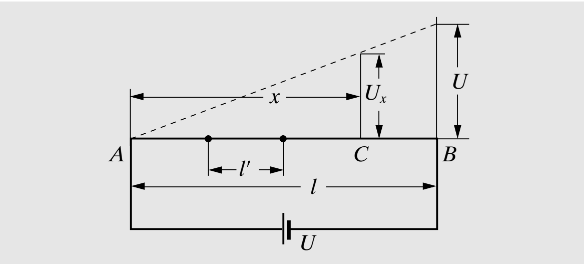


Abbildung 7.56 In einem homogenen Draht herrscht konstante Feldstärke, also lineare Spannungsverteilung

$j = I/a^2 = \sigma E$. Dies gilt ganz allgemein:

$$j = \sigma E \ . \tag{7.62}$$

Eigentlich muss dies vektoriell geschrieben werden, denn das Feld könnte schief zum Würfel stehen. Jedenfalls folgt die Stromrichtung in einem homogenen isotropen Medium der Feldrichtung, also

$$\boxed{\vec{j} = \sigma \vec{E}}\ . \tag{7.63}$$

Vielfach ist die gesamte Ladungsdichte ϱ (nicht zu verwechseln mit dem spezifischen Widerstand), die sich an einer Stelle befindet, in Bewegung. Strömt sie mit der Geschwindigkeit $\vec{v}$, dann ergibt sich die Stromdichte

$$\boxed{\vec{j} = \varrho \vec{v}}\ . \tag{7.64}$$

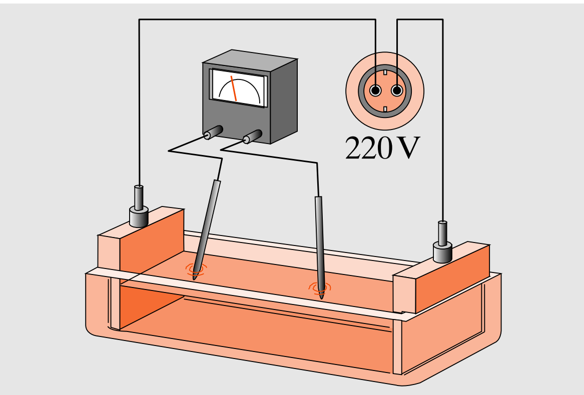


Abbildung 7.57 Auch in einer rechteckigen Elektrolytlösung ist das Feld konstant und die Spannungsverteilung linear

Kommt aus einem Volumen mehr Strom heraus als hineinfließt, dann nimmt die eingeschlossene Ladung ab. An jeder Stelle gilt daher die **Kontinuitätsgleichung**

$$\boxed{\operatorname{div} \vec{j} = -\dot{\varrho}} \tag{7.65}$$

(vgl. Abschn. 3.4). Wenn die Ladungsverteilung zeitlich konstant bleibt, muss das $\vec{j}$-Feld divergenzfrei sein. Die kirchhoffsche Knotenregel ist ein Spezialfall hiervon.

Kombination von Widerständen. Wir betrachten jetzt wieder Schaltungen der klassischen Form, wo einzelne Elemente (hier Widerstände) durch Drähte verbunden sind, deren Widerstand vernachlässigbar ist. Solche Widerstände können hintereinander (in Reihe oder in Serie) liegen oder parallel zueinander. Zur Behandlung genügen die Kirchhoff-Regeln.

Durch reihengeschaltete Widerstände fließt der gleiche Strom I. Die Spannungen U_i an den Einzelwiderständen ergeben sich als Spannungsabfälle $U_i = IR_i$ und addieren sich zur Gesamtspannung

$$U = \sum U_i = \sum IR_i \ . \tag{7.66}$$

Damit folgt als Gesamtwiderstand der Schaltung

$$\boxed{R = \frac{U}{I} = \sum R_i}\ . \tag{7.67}$$

In der **Reihenschaltung** addieren sich die Widerstände.

An parallel geschalteten Widerständen liegt die gleiche Spannung U. Der Strom durch den i-ten Widerstand ist $I_i = U/R_i$. Im Ganzen fließt der Strom

$$I = \sum I_i = \sum \frac{U}{R_i} \ . \tag{7.68}$$

Damit folgt der Gesamtwiderstand der Schaltung

$$\boxed{R = \frac{U}{I} = \frac{1}{\sum R_i^{-1}}}\ . \tag{7.69}$$

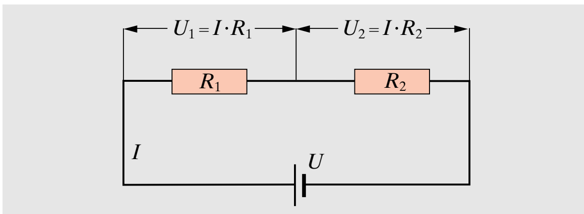


Abbildung 7.58 Hintereinander geschaltete Widerstände addieren sich, weil die Spannungsabfälle sich addieren

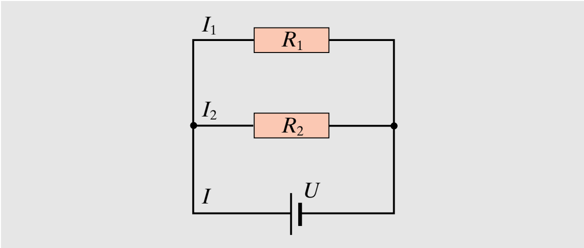


Abbildung 7.59 Bei Parallelwiderständen addieren sich die Ströme, also die Leitwerte

In der **Parallelschaltung** addieren sich die Leitwerte R_i^{-1}

$$\frac{1}{R} = \sum \frac{1}{R_i} \,. \tag{7.69'}$$

7.3.3 Energie und Leistung elektrischer Ströme

Wenn eine Ladung Q sich zwischen zwei Orten verschiebt, zwischen denen die Spannung U herrscht, wenn sie also im Potential um U absinkt, wird eine Energie

$$\boxed{E = QU} \tag{7.70}$$

frei. Diese Energie kann der Ladung selbst zugutekommen und ihre kinetische Energie erhöhen. Das ist allerdings nur bei ganz ungehinderter Bewegung der Fall, d. h. vor allem im Vakuum. Dort lässt sich die Energie eines geladenen Teilchens, z. B. eines Elektrons oder Protons ($Q = e$ Elementarladung) sehr einfach durch die vom Ruhezustand aus durchlaufene Spannung in Volt ausdrücken, d. h. in der Einheit eV (Elektronvolt). Da $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C, ergibt sich

$$\boxed{1\,\text{eV} = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\,\text{J}} \,. \tag{7.71}$$

In einem üblichen Leiter dient die Energie W nicht oder so gut wie nicht zur Beschleunigung der Ladungsträger. Deren Geschwindigkeit ist fast immer sehr klein gegen die thermische, und die thermische Energie ist ihrerseits nur ein kleiner Bruchteil eines eV. Vielmehr geht die Energie $E = QU$, falls keine mechanische oder chemische Arbeit verrichtet wird, ganz in Wärmeenergie des Leiters oder seiner Umgebung über. Die entsprechende Heizleistung ergibt sich aus der Definition des Stromes:

Gesetz von Joule

$$\boxed{P = \dot{E} = U\dot{Q} = UI} \,. \tag{7.72}$$

Dieses Gesetz gilt auch für Wechselströme, nur muss man es dort durch die Momentanwerte der ständig wechselnden Größen Strom und Spannung ausdrücken (Abschn. 8.3.3). Für einen ohmschen Leiter kann man auch schreiben

$$\boxed{P = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R}} \,. \tag{7.73}$$

Bei ortsabhängiger Leitfähigkeit muss man das Joule-Gesetz differentiell formulieren. Die Leistungsdichte (Leistung/Volumen) ist dann

$$\boxed{p = \vec{j} \cdot \vec{E}} \,, \tag{7.74}$$

für ohmsche Leiter

$$p = \sigma E^2 = \frac{j^2}{\sigma} \,.$$

7.3.4 Gleichstromtechnik

a) Messgeräte; Messbereichsumschaltung. Da die wichtigsten Amperemeter und Voltmeter auf magnetischen Kräften beruhen, besprechen wir ihre Wirkungsweise erst in Abschn. 8.3.5. Hier behandeln wir einige Prinzipien, die für alle Typen und ebenso für **Gleich**- wie für **Wechselstrom** gelten. Der Zeigerausschlag der meisten Messgeräte (Drehspul- und Weicheiseninstrument) hängt nur von dem Strom ab, der durch die Messspule fließt. Eine Spannung muss erst in einen entsprechenden Strom übersetzt werden. Das geschieht mittels des Innenwiderstandes R_i. Wenn die Spannung U an den Klemmen des **Voltmeters** liegt, fließt der Strom $I = U/R_\text{i}$ durch die Messspule. Übergang zu einem höheren Spannungsmessbereich

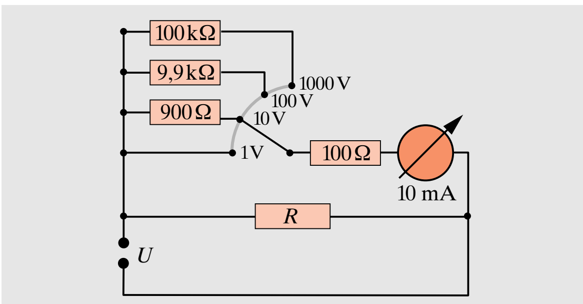


Abbildung 7.60 Ein umschaltbares Voltmeter (verschiedene Vorwiderstände) misst die Spannung am Verbraucher R

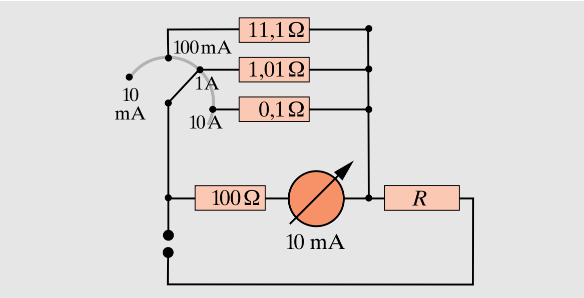


Abbildung 7.61 Ein umschaltbares Amperemeter (verschiedene Parallelwiderstände oder Shunts) misst den Strom durch den Verbraucher R

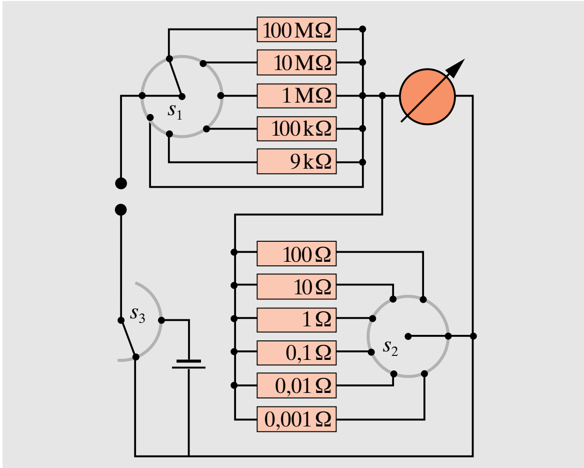


Abbildung 7.62 Vielfachmesser für Strom, Spannung, Widerstand (schematisch)

erfolgt also einfach durch Vergrößerung von R_i (Verzehnfachung von U durch Vorschalten des neunfachen Vorwiderstandes). Will man mit einem **Amperemeter** größere Ströme messen, als die Messspule verträgt, muss man einen Teil des Stroms durch einen Parallelwiderstand (Shunt) vorbeileiten. Verzehnfachung des I-Messbereichs heißt Parallelschalten eines neunmal kleineren Widerstandes.

BEISPIEL

Ein Vertreter bietet Ihnen einen elektrischen Durchlauferhitzer an, der 8 l heißes Wasser pro Minute liefern soll. Der Hauptvorteil sei, dass Sie nicht einmal Ihre 10 A-Sicherung auszuwechseln brauchen. Kaufen Sie das Gerät oder werfen Sie den Kerl hinaus (beides mit technischer Begründung)?

Wenn die 10 A-Sicherung nicht durchbrennen soll, kann man höchstens 2,2 kW entnehmen. Das entspricht 2,2 kJ/s ≈ 130 kJ/min. Die 8 l/min würden also bei Verlustfreiheit höchstens um 3,5 °C „aufgeheizt“ werden. Elektrische Durchlauferhitzer sind im normalen Haushalt kaum realisierbar.

Der Einbau des Messgeräts in die auszumessende Schaltung soll die Größen, die man bestimmen will, möglichst wenig beeinflussen. Für ein Amperemeter trifft das zu, wenn sein Gesamtwiderstand R_i (einschließlich eventueller Shunts) sehr klein gegen den Gesamtwiderstand R der zu messenden Schaltung ist. Der Strom wird durch Einbau des Amperemeters um den Faktor $R/(R + R_i)$ verringert.

Amperemeter müssen *niederohmig* sein.

Umgekehrt darf ein Voltmeter den Gesamtstrom aus der Spannungsquelle möglichst wenig beeinflussen, denn sonst würde sich wegen des Innenwiderstandes der Spannungsquelle auch deren Klemmenspannung ändern (Abschn. 7.3.4d). Der Innenwiderstand R_i des Voltmeters muss also groß gegen den Widerstand R des Verbrauchers sein, längs dessen die Spannung gemessen wird.

Voltmeter müssen *hochohmig* sein.

b) Brückenschaltungen. Im Prinzip kann man einen Widerstand messen, indem man die Spannung U an ihm und den Strom I durch ihn bestimmt und beide durcheinander teilt. Die endlichen Innenwiderstände der Messgeräte würden ein solches Verfahren aber sehr ungenau machen. Man vermeidet diesen Einfluss, wenn man *stromlos* misst. In einer **Wheatstone-Brücke** schaltet man den zu bestimmenden Widerstand R_x mit drei anderen bekannten Widerständen zusammen (Abb. 7.63), von denen mindestens einer verstellbar ist. Man stellt R_3 so ein, dass durch das Instrument G kein Strom fließt (**Abgleich der Brücke**). Das