

Elektrischer Widerstand

Vorbereitung:

Messung von elektrischem Strom und elektrischer Spannung, Definition elektrischer Widerstand, Ohm'sches Gesetz, Kirchhoff'sche Gesetze, spezifischer Widerstand, Diode (pn-Übergang)

Stellen Sie die Zusammenhänge zu den o.g. Stichpunkten dar. Wie kann man Spannungen, wie kann man Ströme messen? Zeichnen Sie eine Schaltung mit Spannungsquelle und zwei in Reihe geschalteten Widerständen. Ergänzen Sie ein Spannungsmessgerät, um die Spannung an einem der beiden Widerständen zu messen, und ein Strommessgerät, um den Strom durch diesen Widerstand zu messen. Wie groß ist jeweils der Strom durch das jeweilige Messgerät und wie groß ist dementsprechend sein Widerstand?

Das Ohm'sche Gesetz verknüpft die an einem Leiter anliegende Spannung U mit dem fließenden Strom I mit Hilfe des Widerstands R : $U = RI$. Man kann dieses Gesetz auch so interpretieren, dass, wenn durch einen Leiter (ein Widerstand) ein Strom I fließt, „über dem Leiter/Widerstand“ eine Spannung U abfällt. Das Ohm'sche Gesetz und der spezifische Widerstand entsteht aus folgender Überlegung: Im Leiter befinden sich frei bewegliche Elektronen diese bilden ein Elektronengas mit einer bestimmten Dichte n (Einheit Anzahl pro Volumen, also $1/m^3$). Legt man an einen Leiter der Länge l eine Spannung U an, so führt das zu einem elektrischen Feld $E = U/l$, welches eine Kraft auf die Elektronen ausübt (Coulomb-Kraft $F = qE$, q ist die Ladung der Elektronen $q = -e$ mit der Elementarladung e). Diese konstante Kraft beschleunigt die Elektronen, die wiederum durch Stöße abgebremst werden, so dass sie im stationären Zustand eine konstante mittlere (Drift-)Geschwindigkeit v_D besitzen, die proportional zum wirkenden elektrischen Feld ist: $v_D = \mu E$, mit der Beweglichkeit μ . (Dies ist so ähnlich wie beim freien Fall in Luft. Ein Körper wird zwar fortwährend durch die Schwerkraft beschleunigt, wenn er aber schnell genug ist kompensiert der Luftwiderstand die Schwerkraft und der Körper fällt mit konstanter Geschwindigkeit.) Die Beweglichkeit ist proportional zur Wahrscheinlichkeit, dass ein Elektron einen Streuprozess erleidet. Diese Wahrscheinlichkeit wird um so höher, je stärker der Kristall von seiner Idealstruktur abweicht, sei es weil Defekte (Fremdatome, Kristallfehler etc.) auftreten oder (bei Raumtemperatur entscheidend) weil die Atome eine thermische Bewegung um ihre Gleichgewichtsposition ausführen. Die thermische Bewegung ist umso größer je höher die Temperatur ist, d.h. die Beweglichkeit nimmt mit steigender Temperatur ab.

Man findet nun, dass die Stromdichte $j = I/A$ (Strom I pro Querschnittsfläche des Leiters A) im homogenen Leiter sich schreiben lässt als $j = qn v_D = qn \mu E = \sigma E$, womit die spezifische Leitfähigkeit σ eingeführt wird, die der Kehrwert des spezifischen Widerstands ρ ist: $\sigma = 1/\rho$. Betrachtet man nun nicht die Stromdichte, die durch eine Querschnittsfläche des Leiters fließt, sondern den Gesamtstrom so findet man: $I = jA = 1/\rho UA/l$ Man erhält so einen Ausdruck für den elektrischen Widerstand eines Leiters $R = U/I = \rho l/A$, d.h. der Widerstand eines Leiters ist das Produkt aus einer (temperaturabhängigen) Materialkonstante und einem Geometriefaktor l/A .

Der lineare Zusammenhang zwischen Strom und Spannung ist dann nicht mehr gegeben, wenn der spezifische Widerstand ρ von der Spannung oder dem fließenden Strom abhängt. Beispiele für Situationen in denen das Ohmsche Gesetz **nicht** gilt:

- Widerstände erwärmen sich bei nicht ausreichender Kühlung durch die freiwerdende Stromwärme der Leistung W ($W = U \cdot I$). Dadurch wird der Widerstand warm, die Beweglichkeit μ nimmt ab, es ändert sich der spezifische Widerstand $\rho = \rho(T)$.
- in Halbleitern kann sich aus verschiedenen Gründen die Dichte der Elektronen n ändern indem weitere Elektronen aus der Bindung ihrer angestammten Atome gelöst werden. Dies kann durch eine Temperaturerhöhung geschehen (wenn die Beweglichkeit sich nicht so stark ändert, leitet ein Halbleiter bei höheren Temperaturen besser), oder auch durch die Einstrahlung von Licht.
- Halbleiter-Bauelemente: Der Widerstand z.B. einer Diode hängt von der Polung der angelegten Spannung ab und ändert sich stark nichtlinear mit der Spannung; es ist daher sinnvoll den differentiellen elektrischen Widerstand R_{diff} , z.B. für die Spannung U_0 , zu definieren:

$$R_{diff} = \left. \frac{\Delta U}{\Delta I} \right|_{U=U_0}$$

In einer Diode wird ein Halbleiter mit zu vielen Elektronen (n-dotierter Halbleiter) in Kontakt zu einem Halbleiter mit zu wenigen Elektronen gebracht (p-dotierter Halbleiter). An der Grenzfläche diffundieren Elektronen vom n-Bereich in den p-Bereich und laden diesen negativ auf. Dadurch entsteht an der Grenzfläche ein elektrisches Feld, welches verhindert, dass weitere Elektronen von „n“ nach „p“ diffundieren. Wird jetzt durch die außen angelegte Spannung dafür gesorgt, dass die Elektronen aus dem p-Bereich wieder abfließen (Pluspol der Spannung an „p“ Minuspol an „n“) dann fließen weitere Elektronen nach. Ein Strom fließt und die Diode hat einen kleinen Widerstand. Kehrt man die Polarität der äußeren Spannung um, dann werden immer mehr Elektronen in den p-Bereich gebracht und das Feld an der Grenzfläche verhindert einen Stromfluss, d.h. die Diode hat einen hohen Widerstand.

Für die Auswertung des Versuchs benötigen Sie folgende Formeln:
 Ohm'sches Gesetz, Reihen- u. Parallelschaltung von Widerständen, Widerstand eines Drahtes als Funktion von Länge, Querschnitt und spez. Widerstand
 Stellen sie kurz die Funktionsweise einer Diode (pn-Übergang) dar, Erläutern Sie die Begriffe „Sperrrichtung“ und „Durchlassrichtung“.

1 Aufgaben

Bei jeder Messung mit einem der (Digital-)multimeter ist stets auf korrekte Betriebsart achten (Strom, Spannung, Widerstand) und insbesondere bei der Verwendung als Amperemeter im höchsten Meßbereich zu beginnen!

- Bestimmen Sie den Widerstandswert eines handelsüblichen Widerstandes und bestätigen Sie das Ohmsche Gesetz.

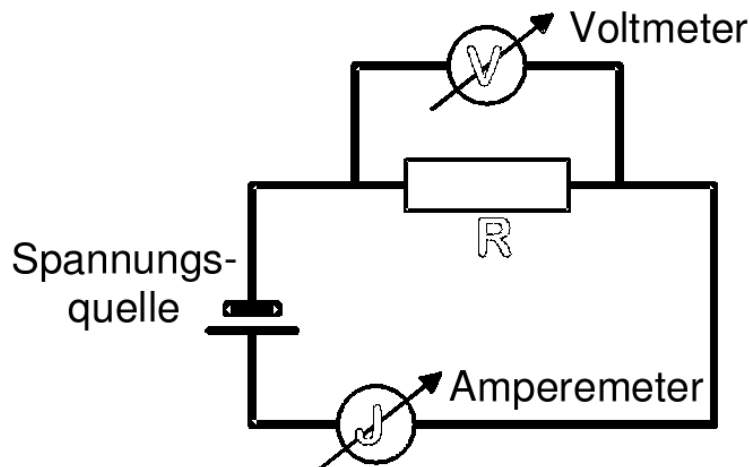


Abbildung 1: Schaltung

Welche Eigenschaften müssen das Amperemeter bzw. das Voltmeter besitzen?

- Man prüfe nach, daß bei der Reihenschaltung von Widerständen der Gesamtwiderstand gleich der Summe der Einzelwiderstände ist. Man schalte dafür die Widerstände

$$R_1 = 1 \text{ k}\Omega \text{ und } R_2 = 470 \Omega$$

in Reihe und messe zum Strom I den Spannungsabfall über R_1 und R_2 und vergleiche die Summe der Spannungen U_1 und U_2 mit der anliegenden Spannung U .

- Man prüfe experimentell, daß bei Parallelschaltung von Widerständen der reziproke Gesamtwiderstand $1/R_g$ gleich der Summe der reziproken Einzelwiderstände ist. Man schalte dafür die Widerstände $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$ und $R_2 = 470 \Omega$ parallel und messe die Ströme I_1 und I_2 durch die entsprechenden

Widerstände R_1 und R_2 und ermittle daraus den Gesamtstrom $I = I_1 + I_2$. Überprüfen Sie an Hand dieses Ergebnisses, daß der Gesamtwiderstand ($R_g = U/I$) gleich

$$\frac{1}{R_g} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

ist.

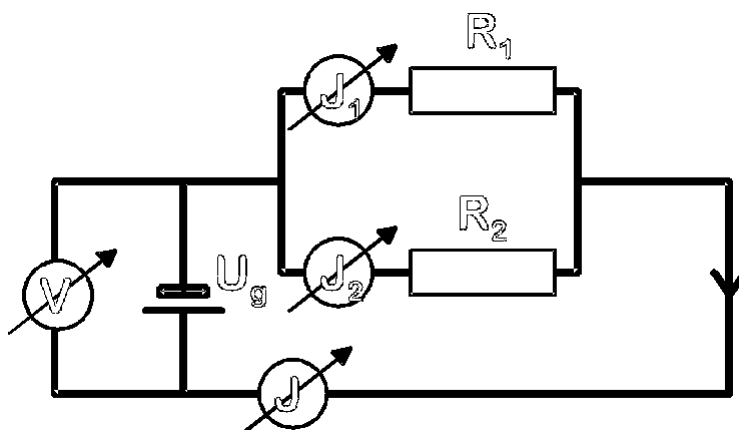


Abbildung 2: Parallelschaltung der Widerstände R_1 und R_2

4. Potentiometerschaltung:

Mit einem Potentiometer (3 Watt, $R_g = 220 \Omega$, linear unterteilt) soll eine Spannungsteilung vorgenommen werden. Benutzen Sie dafür die Spannung 2 V als Gesamtspannung am Potentiometer und messen Sie die Teilspannung U_L für die Lastwiderstände

$R_L = \infty, 1 \text{ k}\Omega, 470 \Omega$ und 22Ω . In welchem Verhältnis muß R_L zu R_g stehen, damit näherungsweise ein linearer Zusammenhang zwischen U_L und R_X besteht?

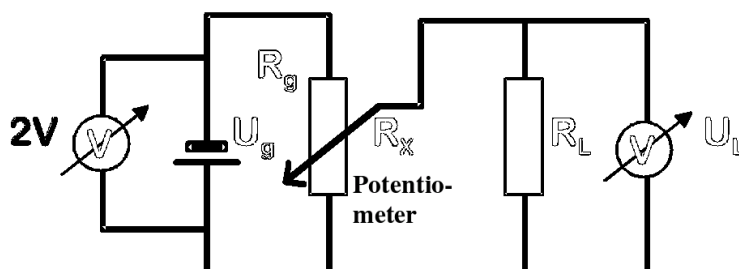


Abbildung 3: Potentiometerschaltung

5. Bestimmen Sie den spezifischen Widerstand von Konstantan und Messing. Messen Sie dazu für drei verschiedene Ströme (**max. 1 A !!!**) die am Draht abfallende Spannung und bilden sie den Mittelwert der Widerstandswerte.

Drahtlänge der vorgegebenen Drähte sind 1 m, die Durchmesser für Konstantan sind

$\varnothing = 1; 0,7; 0,5 \text{ mm}$.

Der Durchmesser des Messingdrahtes ist

$\varnothing = 0,5 \text{ mm}$.

6. Bestimmen Sie die Strom-Spannungskennlinie für folgende Bauelemente, indem Sie das Bauelement mit einem 220Ω -Widerstand in Reihe schalten (Vorwiderstand) und die Spannung, die über dem Bauelement abfällt, und den Strom durch das Bauelement messen.

- (a) Silizium-Diode:
Verwenden Sie das Netzteil im Betriebsmodus „konstanter Strom“ und messen Sie die an der Diode in Durchlassrichtung abfallende Spannung für Ströme 1,2,4,10,20,50,100,200 mA. Legen Sie an die Diode in Sperrrichtung eine Spannung von -3V und bestimmen Sie den fließenden Strom.
Tragen Sie die Kennlinie $I(U)$ auf. Wie groß ist der differentielle Widerstand der Diode bei einer Spannung von 0.4V und bei einer Spannung von 0.7V?
- (b) Temperaturabhängiger Widerstand
(PTC [engl.: Positive Temperature Coefficient], wird bei Erwärmung hochohmig):
Bei angelegter Spannung erwärmt sich der PTC durch seine Verlustleistung. Verwenden Sie das Netzteil im Modus „konstante Spannung“ und messen Sie die Ströme für die am Bauelement anliegenden Spannungen 0.4, 0.5 und 0.6 V, sowie ab 1V in 1V-Schritten bis 8V. Was passiert, wenn Sie dem Bauelement kühle Luft zufächern oder es anblasen? Tragen Sie die Kennlinie $I(U)$ auf und markieren Sie den Spannungsbereich in dem das Ohmsche Gesetz noch näherungsweise gilt.