

Versuch 11: Messverfahren in Gleichspannungsschaltungen / Kirchhoffsche Regeln

Anhand von elektrischen Gleichspannungsschaltungen werden in diesem Versuch die Kirchhoffschen Regeln experimentell nachvollzogen. Zudem werden die Größen verschiedener Widerstände über eine Strom-Spannungs-Messung mit Hilfe von Multimetern bestimmt, wobei insbesondere auf die strom- und die spannungsrichtige Schaltung eingegangen wird. Eine weitere Messmethode zur Widerstandsbestimmung stellt eine sogenannte Kompensationsmessmethode dar: In diesem Versuchsteil werden unbekannte Widerstände mit Hilfe einer Wheatstoneschen Messbrücke bestimmt. Als Beispiel für eine Abweichung von einem Ohmschen Verhalten wird der Widerstand einer Glühlampe in Abhängigkeit von der Betriebsspannung untersucht. In einem weiteren Versuchsteil wird die Kennlinie einer Halbleiterdiode aufgenommen.

Vorkenntnisse

elektrische Ladung – elektrischer Strom – Erhaltungssatz – Messung und Einheit der elektrischen Ladung – Coulomb-Gesetz – technische und physikalische Stromrichtung – elektrische Spannung, Potentialdifferenz – Kirchhoffsche Regeln – elektrischer Widerstand – Ohmsches Gesetz – Gesamtwiderstand in Reihen- und Parallelschaltungen – Leitfähigkeit – spezifischer Widerstand (insbesondere von Metallen und Halbleitern) – Leitungsmechanismen in Festkörpern – Wiedemann-Franzsches Gesetz – Messung von Spannungen und Strömen – Messung von Widerständen (u.a. Wheatstonesche Messbrücke) – Halbleiterdiode – Kennlinie (Widerstand, Diode, ...)

Literatur

T. Mühl – Einführung in die elektrische Messtechnik: Grundlagen, Messverfahren, Geräte
W. Demtröder – Experimentalphysik 2: Elektrizität und Optik
...

Physikalische Grundlagen

Das Ohmsche Gesetz

Der Quotient aus der über einem Leiter abfallenden Spannung U und dem durch diesen fließenden Strom I ist definiert als der elektrische Widerstand R mit:

$$R = \frac{U}{I}. \quad (1)$$

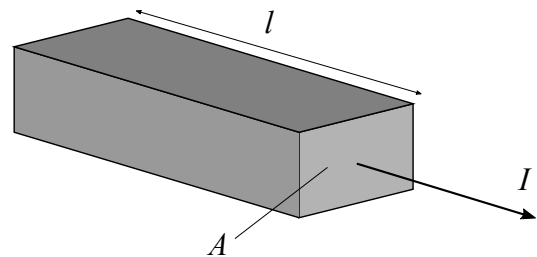
Die Einheit des elektrischen Widerstands ist $[R] = 1 \Omega = 1 \text{ V/A}$. Für viele Materialien ist der elektrische Widerstand (bei gegebener Temperatur) konstant und hängt nicht von Spannung oder Stromstärke ab. Dies bezeichnet man als Ohmsches Gesetz, wonach

$$R = \frac{U}{I} = \text{const.} \quad (2)$$

gilt. Ohmsches Verhalten eines Leiters zeichnet sich also durch eine lineare Strom-Spannungskennlinie aus.

Im einfachen Fall eines homogenen, stabförmigen Leiters der Länge l mit konstantem Querschnitt A ist der ohmsche Widerstand proportional zur Länge und reziprok zum Querschnitt mit

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (3)$$



Hierbei ist ρ der spezifische Widerstand des Materials. Häufig genutzte Einheiten für den spezifischen Widerstand sind $[\rho] = 1 \Omega \frac{\text{mm}^2}{\text{m}} = 10^{-6} \Omega \text{ m} = 10^2 \mu\Omega \text{ cm}$. Der Kehrwert dieses Materialwertes ist die Leitfähigkeit $\sigma = \rho^{-1}$. Die allgemeine Form des Ohmschen Gesetzes betrachtet die Stromdichte \vec{j} und die elektrische Feldstärke \vec{E} . Es gilt

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}. \quad (4)$$

Allgemein ist die elektrische Leitfähigkeit ein Tensor zweiter Stufe, dessen Einträge die elektrischen Leitfähigkeiten in die entsprechenden Raumrichtungen angeben.

Elektrische Leistung

In einem Leiter mit dem Widerstand R , der vom Strom I durchflossen wird, setzt man elektrische Leistung P u.a. in Wärme um. Es ist

$$P = U I = I^2 R = \frac{U^2}{R}. \quad (5)$$

Die Kirchhoffschen Regeln

Richtungsregeln

Für die Beschreibung von elektrischen Schaltungen ist die Aufstellung von Richtungsregeln für die Anwendung der Kirchhoffschen Regeln sinnvoll.

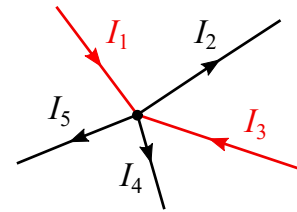
- Der Richtungspfeil (auch: Zählpfeil) der elektrischen Spannung zeigt immer von + nach –.
- Gemäß dem Ohmschen Gesetz müssen U und I gleichgerichtet sein (außerhalb von Spannungs- oder Stromquellen).
- Innerhalb von Strom- und Spannungsquellen sind I und U entgegengesetzt gerichtet.

Kirchhoffsche Knotenregel

Für jeden Knotenpunkt (Verzweigungspunkt) einer elektrischen Schaltung ist die Summe der zufließenden Ströme gleich der Summe der abfließenden Ströme. Es gilt

$$\sum_n I_n = 0, \quad (6)$$

wobei alle Ströme, deren Richtungspfeile zum Knoten hin zeigen, mit positivem Vorzeichen, alle Ströme, deren Richtungspfeile vom Knoten weg zeigen, mit negativem Vorzeichen einzusetzen sind. In keinem Punkt einer elektrischen Schaltung kann also Strom verschwinden oder entstehen. In dem abgebildeten Beispiel gilt: $I_1 - I_2 + I_3 - I_4 - I_5 = 0$.

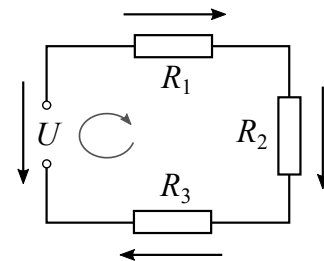


Kirchhoffsche Maschenregel

Für jeden beliebigen geschlossenen Umlauf (Masche) innerhalb einer elektrischen Schaltung ist die Summe aller Spannungen gleich Null. Es gilt

$$\sum_n U_n = 0. \quad (7)$$

In dem abgebildeten Beispiel gilt: $-U + U_1 + U_2 + U_3 = 0$.



Serien- und Parallelschaltung von Widerständen

Für die Berechnung von Gesamt Widerständen R in elektrischen Schaltungen, die sich durch die Serien- und Parallelschaltung von mehreren Einzelwiderständen ergeben, werden die folgende Gleichungen verwendet:

Serienschaltung von Widerständen

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_i \quad (8)$$

Parallelschaltung von Widerständen

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_i} \quad (9)$$

In einer Parallelschaltung ist der Gesamt widerstand R also stets kleiner als jeder der Einzelwiderstände.

Messung von Spannungen und Strömen

Aufgabe eines Messgerätes ist die Erfassung einer Messgröße (Strom, Spannung, ...) und Anzeige des Messwerts. Bei anzeigenden Messinstrumenten erfolgt die Ausgabe über eine analoge oder digitale Anzeige. Zu Beginn der elektrischen Messtechnik wurden hauptsächlich direkt wirkende, elektromechanische Messwerke eingesetzt, bei denen mit Hilfe eines physikalischen Effekts durch die zu messende Größe eine mechanische Kraft erzeugt wird, diese auf einen Zeiger wirkt und der Messwert als Zeigerausschlag auf einer Skala abgelesen werden kann. Durch den schnellen Fortschritt in der Digitaltechnik werden heute vielfach auf digitaler Basis arbeitende Messgeräte eingesetzt. Dabei wird die zu messende Größe elektronisch vorverarbeitet, digitalisiert und als Ziffernwert auf der digitalen Anzeige ausgegeben.

Messung von Gleichspannungen

Die Messung einer Spannung kann beispielsweise über die Kompensationsmethode nach Poggendorf erfolgen. Mit Hilfe einer Potentiometerschaltung erzeugt man mit einer Spannungsquelle (U_{ref}) über einem veränderlichen Widerstand R_1 eine Spannung U_1 und gleicht diese Spannung mit der zu messenden Spannung U_x über ein Nullinstrument ab. Im Falle der abgeglichenen Spannungen ($U_1 = U_x, I = 0$) gilt

$$U_x = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{\text{ref}}. \quad (10)$$

Eine weitere Methode der Spannungsmessung ist über eine Strommessung: Hierbei wird ein durch einen hohen (bekanntem) Widerstand fließender Strom mit einem empfindlichen Amperemeter gemessen. Ein solches Gerät ist umso besser geeignet, je geringer der zur Messung notwendige Strom ist. Sehr empfindlich sind Galvanometer (Innenwiderstand ca. $100 \text{ k}\Omega/\text{V}$) und Digitalvoltmeter (Innenwiderstand ca. $10 \text{ M}\Omega$ konstant).

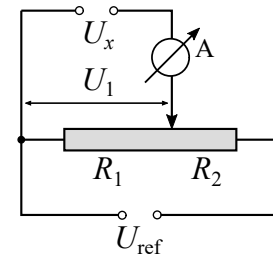


Abb. 1: Poggendorfsche Kompensationsschaltung

Messung von Gleichströmen

Zur Messung von Strömen kann man sich seine Wirkungen zu Nutze machen. Dazu zählen magnetische Wirkungen (Drehspul- und Nadelgalvanometer), Wärmewirkungen (Hitzdrahtinstrumente) und chemische Wirkungen (Voltmeter). Zudem kann eine Strommessung über das Ohmsche Gesetz auch auf eine Spannungsmessung zurückgeführt werden.

- Drehspulgalvanometer: Das analoge Drehspulgalvanometer (s.Abb. 2) nutzt die Kraftwirkung in einem magnetischen Feld zur Messung von Strömen aus. Eine drehbar aufgehängte Spule befindet sich dabei in einem radialen, homogenen Feld eines Dauermagneten. Die Spule ist starr mit einem Zeiger und einer Drehfeder verbunden. Der zu messende Strom I fließt durch die Spule, wobei auf diese im Magnetfeld des Dauermagneten die Lorentzkraft wirkt. Die Spule wird dadurch aus ihrer Ruhelage gedreht, bis die Rückstellkraft durch die Drehfeder entgegengesetzt gleich groß wie die Lorentzkraft ist. Der Zeigerausschlag ist proportional zum fließenden Strom I .
- Dreheisenmessinstrument: Das analoge Dreheisenmessinstrument besteht aus einer feststehenden Spule, in deren annähernd homogenen Feld sich zwei Eisenplättchen befinden.

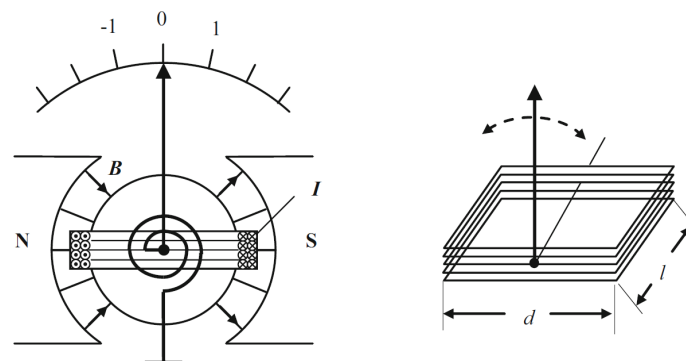


Abb. 2: Schematischer Aufbau des Drehspulgalvanometers. (Bildquelle: T. Mühl, Einführung in die elektrische Messtechnik: Grundlagen, Messverfahren, Geräte, 5. Auflage, Springer Verlag)

Eines davon ist unbeweglich, eines beweglich. Der Zeiger ist mit dem beweglichen Eisenplättchen starr verbunden. Durch das Magnetfeld der stromdurchflossenen Spule werden beide ferromagnetische Eisenplättchen gleichartig magnetisiert und stoßen sich ab. Dies führt zu einer Drehung des Zeigers, das Gegenmoment wird durch eine Drehfeder realisiert. Im Gleichgewichtszustand sind die Momente gleich groß.

- Hitzdrahtmesswerk: Hierbei wird die Längenänderung eines durch den zu bestimmenden Strom erhitzten Leiters auf einen Zeigerausschlag umgesetzt. Die Längenänderung ist ein Maß für den Effektivwert des Stroms.
- Digitalmultimeter: Um analoge Stromwerte (oder auch Spannungswerte) digital verarbeiten und anzeigen lassen zu können, müssen diese Signale in digitale Werte überführt, d.h. diskretisiert, werden. Dazu werden sogenannte Analog-Digital-Wandler (kurz: AD-Wandler) eingesetzt.
- Vielfachmessinstrumente: In gebräuchlichen (Hand-)Multimetern werden heutzutage Digitalmultimeter eingesetzt. Je nach Komplexität des Messinstrumentes sind integriert:
 - Gleichspannungs- und Gleichstrommessung mit Bereichswahl,
 - Wechselspannungs- und -strommessung und Bereichswahl,
 - Effektivwertmessung,
 - weitere Funktionen wie z.B. Widerstandsmessung, Durchgangsprüfung und Kapazitätsmessung.

Die Innenwiderstände sind dabei jeweils vom Messbereich abhängig.

Beeinflussung des Messergebnisses durch das Messinstrument

Bei einer Messung wie beispielsweise einer Widerstandsmessung durch gleichzeitiges Messen von Strom und Spannung soll das Hinzuschalten des Messinstrumentes den zu messenden Wert möglichst wenig beeinflussen. Durch die gewöhnlichen Instrumente zur Strom- oder Spannungsmessung fließt ein Strom, woraus ein Spannungsabfall am Messgerät resultiert. Dieser Tatsache trägt man Rechnung durch Berücksichtigung des Innenwiderstands des Instruments R_i . Für einen Strommessgerät muss R_i möglichst klein, für einen Spannungsmessgerät hingegen möglichst groß sein.

Den Fehler, der durch das Hinzuschalten des Instrumentes entsteht, demonstriert folgendes Beispiel: An dem in Abb. 3 (a) dargestellten ohmschen Widerstand R_1 soll (b) der fließende Strom

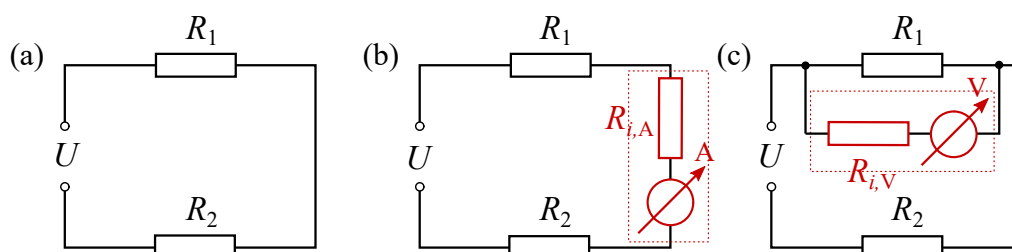


Abb. 3: (a) Elektrische Reihenschaltung zweier ohmscher Widerstände R_1 und R_2 , wobei an R_1 (b) eine Strom- und (c) eine Spannungsmessung durchgeführt werden. Die rot gestrichelten Teile der Schaltungen sind die Ersatzschaltbilder des Ampere- bzw. Voltmeters, bei denen die Innenwiderstände des jeweiligen Geräts $R_{i,A}$ und $R_{i,V}$ berücksichtigt werden.

und (c) der Spannungsabfall über R_1 gemessen werden. Durch Hinzuschalten des Messinstruments ist in

- (b) der gemessene fließende Strom gegenüber dem Fall ohne Amperemeter verringert und anstelle $I_{\text{richtig}} = I = \frac{U}{R_1 + R_2}$ wird gemessen $I_{\text{gemessen}} = \frac{U}{R_1 + R_2 + R_{i,A}} < I_{\text{richtig}}$. Je kleiner $R_{i,A}$, desto geringer also der Einfluss des Amperemeters.
- (c) der gemessene Spannungsabfall an R_1 gegenüber dem Fall ohne Voltmeter verringert und anstelle $U_{1,\text{richtig}} = U$ wird gemessen $U_{1,\text{gemessen}} = U \cdot \frac{R_1^*}{R_1^* + R_2}$ mit $R_1^* = \frac{R_1 \cdot R_{i,V}}{R_1 + R_{i,V}} < R_1$. Also $U_{1,\text{gemessen}} < U_{1,\text{richtig}}$. Je größer $R_{i,V}$, desto geringer also der Einfluss des Voltmeters.

Stromrichtige und spannungsrichtige Schaltung

Zur Strommessung in Abhängigkeit von einer angelegten Spannung, welche zeitgleich gemessen wird, (beispielsweise für eine Kennlinienaufnahme) ist das Durchführen einer stromrichtigen und einer spannungsrichtigen Messung möglich. Beide Messverfahren sind in Abb. 4 (a) und (b) dargestellt.

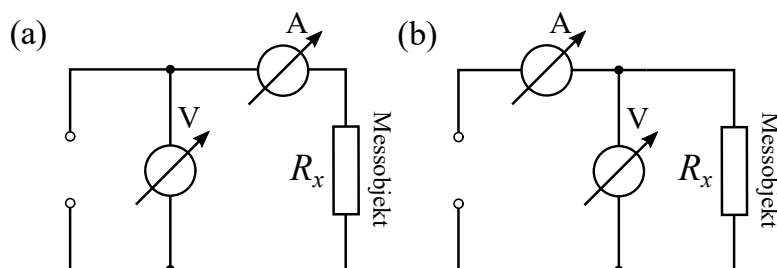


Abb. 4: Elektrische Schaltungen zur Messung des Stroms in Abhängigkeit einer anliegenden Spannung (Strom-Spannungs-Messung). Möglich sind das Durchführen einer (a) stromrichtigen und einer (b) spannungsrichtigen Messung.

Im Fall der **stromrichtigen Messung** misst das Voltmeter die über Messobjekt R_x und Amperemeter (bzw. dessen Innenwiderstand $R_{i,A}$) abfallende Spannung, durch das Amperemeter fließt der gleiche Strom wie durch das Messobjekt. Die Bestimmung des Widerstandswerts über $R = U_{\text{gemessen}}/I_{\text{gemessen}}$ enthält eine systematische Messabweichung, denn

$$R_{\text{gemessen}} = \frac{U_{\text{gemessen}}}{I_{\text{gemessen}}} = \frac{I_{\text{gemessen}} \cdot (R_x + R_{i,A})}{I_{\text{gemessen}}} = R_x + R_{i,A}. \quad (11)$$

Die systematische Messabweichung ist somit

$$R_{\text{gemessen}} - R_x = R_{i,A}. \quad (12)$$

Ist der Innenwiderstand des Strommessgeräts bekannt, kann die systematische Messabweichung durch eine Korrektur eliminiert werden und der korrigierte Messwert ist dann

$$R_{\text{korrigiert}} = \frac{U_{\text{gemessen}}}{I_{\text{gemessen}}} - R_{i,A}. \quad (13)$$

Im Fall der **spannungsrichtigen Messung** misst das Amperemeter die Summe der Ströme, die durch Messobjekt und Voltmeter fließen, über dem Voltmeter (bzw. dessen Innenwiderstand $R_{i,V}$) und dem Messobjekt mit Widerstand R_x fällt die gleiche Spannung ab. Auch bei dieser

Schaltung erhält man bei der Widerstandsberechnung über $R = U_{\text{gemessen}}/I_{\text{gemessen}}$ eine systematische Messabweichung, denn

$$R_{\text{gemessen}} = \frac{U_{\text{gemessen}}}{I_{\text{gemessen}}} = \frac{U_{\text{gemessen}}}{\frac{U_{\text{gemessen}}}{\frac{R_x R_{i,V}}{R_x + R_{i,V}}}} = \frac{R_x R_{i,V}}{R_x + R_{i,V}} \quad (14)$$

Hier ist die systematische Messabweichung

$$R_{\text{gemessen}} - R_x = \frac{R_x R_{i,V}}{R_x + R_{i,V}} - R_x = -\frac{R_x}{1 + \frac{R_{i,V}}{R_x}}. \quad (15)$$

Auch hier kann bei Kenntnis über den Innenwiderstand des Voltmeters wieder eine Korrektur des Widerstandswerts durchgeführt werden mit

$$R_{\text{korrigiert}} = \frac{U_{\text{gemessen}}}{I_{\text{gemessen}}} + \frac{R_x}{1 + \frac{R_{i,V}}{R_x}} = \frac{R_x R_{i,V}}{R_x + R_{i,V}} + \frac{R_x}{1 + \frac{R_{i,V}}{R_x}} = \frac{U_{\text{gemessen}}}{I_{\text{gemessen}} - \frac{U_{\text{gemessen}}}{R_{i,V}}}. \quad (16)$$

Bei der stromrichtigen Messung kann die Abweichung des gemessenen Stroms vom tatsächlichen Strom 100 % überschreiten, wenn der Widerstand des Messobjekts und der Innenwiderstand des Voltmeter ungefähr gleich groß sind: In diesem Fall lässt sich jedoch der Wert wie oben gezeigt noch rechnerisch korrigieren. Wird aber der Widerstand des Messobjekts viel größer als der Innenwiderstand des Voltmeters, so kann man den Strom durch das Messobjekt auch nicht mehr als Differenz des gemessenen Stromes und des Stromes durch das Voltmeter erhalten, weil die Differenz in die Größenordnung der Anzeigegenauigkeit kommt. In diesem Fall sollte man die Schaltung (b) wählen. Auch hierbei kann der Fehler mehr als 100 % betragen, wenn der Widerstand des Messobjekts kleiner ist als der Innenwiderstand des Amperemeters. Bei der Aufnahme von Kennlinien kann durch Nichtbeachtung dieser Einflüsse auf die Messung ein falscher Strom-Spannungs-Verlauf vorgetäuscht werden. Informationen über die Innenwiderstände von Messgeräten liefern oft die zugehörigen Gerätebeschreibungen.

Messung von Widerständen mit einer Wheatstoneschen Brückenschaltung

Die Bestimmung eines ohmschen Widerstands durch die gleichzeitige Messung von Strom und Spannung in einer elektrischen Schaltung liefert ohne aufwendige Kompensationsschaltungen oder Korrekturrechnungen oft nur unzureichend genaue Ergebnisse. An dieser Stelle soll die Methode einer Brückenschaltung nach Wheatstone erklärt werden, mit der eine Präzisionsmessung von Widerständen möglich ist. Da diese Messung durch eine Potentialkompensation stromlos erfolgt und mit einer beliebigen Spannung durchgeführt werden kann, werden die Einflüsse von Messgeräten umgangen und einzig die drei Vergleichswiderstände müssen exakt bekannt sein. Die Abb. 5 zeigt den Schaltplan einer Wheatstoneschen Messbrücke mit einer Gleichspannungsquelle U , den drei Vergleichswiderständen R_1 , R_2 und R_3 und dem gesuchten Widerstand R_x . Die Punkte B und D sind durch eine Brücke über ein Strommessgerät verbunden, durch das bei angelegter Spannung U im allgemeinen Fall ein Strom I_{BD} zwischen B und D fließt. Die Ursache für diesen Strom ist eine Potentialdifferenz zwischen den Punkten B und D. Durch die Variation der Widerstände R_1 und R_2 kann diese Potentialdifferenz zu Null abgeglichen werden und somit wird auch $I_{BD} = 0$. Dies hat zur Folge, dass sowohl an den Widerständen R_1 und R_x , als auch an R_2 und R_3 jeweils die gleichen Spannungen abfallen. Zusammen mit den beiden Strömen I_{ABC} und I_{ADC} ergeben sich aus dem Ohmschen Gesetz Bestimmungsgleichungen für die Widerstände.

$$U_1 = U_x \Rightarrow R_1 \cdot I_{ADC} = R_x \cdot I_{ABC} \quad (17)$$

$$U_2 = U_3 \Rightarrow R_2 \cdot I_{ADC} = R_3 \cdot I_{ABC} \quad (18)$$

Verhältnisbildung liefert

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_x}{R_3} \quad \text{bzw.} \quad R_x = R_3 \cdot \frac{R_1}{R_2} \quad (19)$$

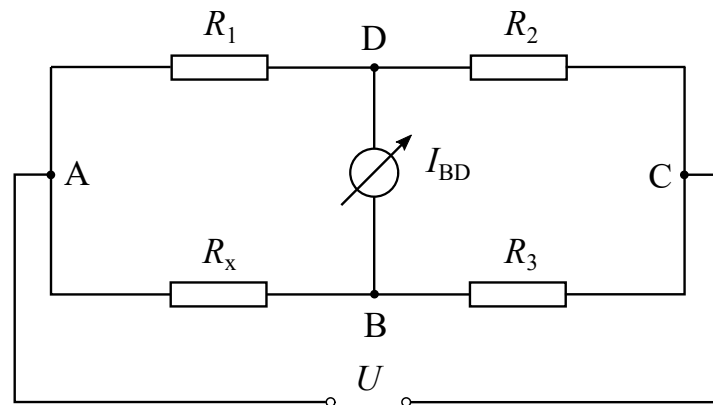


Abb. 5: Aufbau einer Wheatstoneschen Messbrücke zur Bestimmung des Widerstands R_x . Durch einen Abgleich der Brücke ($I_{BD} = 0$), kann der unbekannte Widerstand R_x bestimmt werden.

Experiment

Für diesen Versuch steht als Spannungsquelle ein DC-Netzgerät 0 ... 15 V von Leybold Didactic zur Verfügung. Das Gerät liefert an zwei hintereinander geschalteten Ausgängen mit Mittelabgriff eine Gleichspannung, die von 0 bis ± 15 V bzw. von 0 bis 30 V kontinuierlich eingestellt werden kann. Die Anzeige der Spannungsquelle zeigt die Potentialdifferenz zwischen Plus- bzw. Minus-Pol und dem Null-Potential des Netzgerätes an. Durch eine Strombegrenzung (rote Leuchtdiode) wird sichergestellt, dass die Stromentnahme 1,5 A nicht übersteigt.

Versuchsaufgaben

1. Kirchhoffsche Regeln in elektrischen Schaltungen

Verifizieren Sie die Gleichungen (8) und (9) für den Gesamtwiderstand in und Reihen- und Parallelschaltungen, indem Sie geeignete Schaltungen mit jeweils zwei, drei und vier Widerständen aufbauen. Übertragen Sie zudem die Schaltskizzen für die aufgebauten Schaltungen.

Verifizieren Sie mit Hilfe einer geeigneten elektrischen Schaltung aus mehreren Widerständen die Kirchhoffsche Knotenregel. Übernehmen Sie wieder die Schaltskizze. *Warum ist – abgesehen von der trivialen Schaltung – mit den am Versuchsplatz zur Verfügung gestellten Mitteln keine Verifizierung der Kirchhoffschen Maschenregel möglich?*

2. Widerstandsmessung in Gleichspannungsschaltungen

Bestimmen Sie die Widerstandswerte mehrerer Schichtwiderständen (Kohle- bzw. Metall-Schichtwiderstände). Wählen Sie fünf der am Versuchsplatz ausliegenden Widerstände aus und bestimmen Sie diese jeweils über strom- und spannungsrichtige Schaltung. Notieren Sie die Schwankungen der Messwerte ΔU und ΔI , um Messunsicherheitsintervalle der Messgrößen zu erhalten. Vergleichen Sie die Ergebnisse der strom- und spannungsrichtigen Messung mit dem Wert, der durch den Farbcode des Widerstands angezeigt wird. *In welchen Fällen ist eine strom-, in welchen spannungsrichtige Messung sinnvoll?*

3. Wheatstonesche Widerstandsmessbrücke

Bestimmen Sie drei unbekannte Widerstände mit Hilfe der in Abb. 6 dargestellten Wheatstoneschen Widerstandsmessbrücke. Im Experiment werden die Vergleichswiderstände R_1 und R_2 durch einen Nickel-Chrom-Draht ($\varnothing = 0,2$ mm) ersetzt (s. Abb. 6), bei dem der Knotenpunkt D durch einen Kontaktschlitten realisiert wird, der entlang des Drahts verschoben werden kann. Im anderen Spannungsabzweig werden der unbekannte Widerstand R_x und ein Vergleichswiderstand R_{ref} bekannter Größe geschaltet. Der Abgleich der Brücke geschieht über ein Strommessgerät, das zwischen die Knotenpunkte B und D geschaltet ist: Mit dem Kontaktschlitten wird solange das Verhältnis R_1/R_2 verändert, bis der Strom $I_{\text{BD}} = 0$ ist. Berühren Sie den Nickel-Chrom-Draht während des Experimentierens nicht – dieser ist nicht isoliert.

Führen Sie die Bestimmung der drei unbekanntes Widerstände für jeweils eine ausgewählte Betriebsspannung durch. Bestimmen Sie im zweiten Teil des Versuchs den Widerstand einer Glühlampe in Abhängigkeit von der Betriebsspannung $U_{\text{Glühlampe}}$. Wählen Sie für die Messung an der Glühlampe den Lastwiderstand $R_{\text{ref}} = 2,7 \Omega$ als Referenzwiderstand. Betreiben Sie die Glühlampe mit Spannungen bis ca. 12 V und wählen Sie für die Messung 0,5 V als Schrittweite zwischen den Messpunkten. Bestimmen Sie die über der Glühlampe abfallende Spannung rechnerisch aus der Gesamtspannung U und nicht über eine Messung über der Glühlampe mit einem Multimeter. *Warum?* Tragen Sie die Ergebnisse graphisch auf und diskutieren Sie diese.

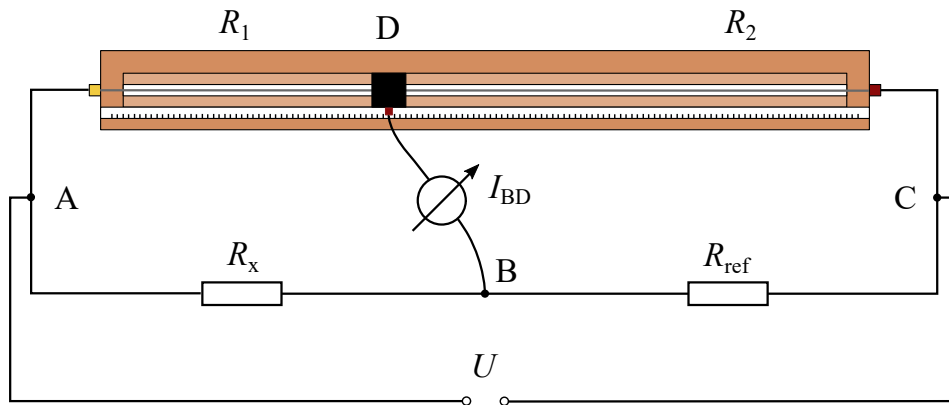


Abb. 6: Versuchsaufbau der Wheatstoneschen Messbrücke für die Widerstandsbestimmung. Durch Variieren des Spannungsabgriffs D kann das Verhältnis R_1/R_2 bestimmt und die Brücke abgeglichen werden, sodass kein Strom I_{BD} fließt.

4. Aufnahme einer Diodenkennlinie

Nehmen Sie die Kennlinie einer Halbleiterdiode vom Typ 1N 4002 in Durchlass- und Sperrrichtung mit spannungs- und stromrichtiger Schaltung auf. Schalten Sie einen geeigneten Widerstand vor die Diode, damit der in Durchlassrichtung fließende Strom nicht zu groß wird. Nehmen Sie die Kennlinien für Diodenspannungen bis etwa 1 V in 0,1 V-Schritten auf. Regeln Sie die Spannung unabhängig von der Messmethode anhand des Spannungsmessgeräts.

Stellen Sie die gemessenen Kennlinien graphisch dar. Führen Sie eine Korrektur der Messergebnisse für die strom- und die spannungsrichtige Messung durch und tragen Sie Ihre Ergebnisse ebenfalls auf. Diskutieren Sie die Ergebnisse.