

ESK— Elektrische Stromkreise

P2 — Praktikum

9. August 2019

Ziele

Mit elektrischen Gleichstromkreisen sollen elementare Mess- und Schaltungstechniken studiert werden.

Teilversuche

1. Belastungsabhängigkeit zweier Spannungsquellen

Zur Untersuchung der Eigenschaften von Spannungsquellen werden deren Ausgangsspannungen in Abhängigkeit von der Belastung gemessen. Als Messinstrumente dienen digitale Multimeter. Bei einer galvanischen Zelle fällt die Ausgangsspannung linear mit der Belastungsstromstärke ab, der Betrag der Steigung der sich ergebenden Kennlinie ist gleich dem Innenwiderstand dieser Spannungsquelle. Ein mit elektronischen Mitteln stabilisiertes Netzgerät hat dagegen in einem großen Bereich eine Ausgangsspannung, die (fast) unabhängig von der Belastung ist.

2. Bestätigung des Ohmschen Gesetzes

Nach dem Ohmschen Gesetz ist die Stromstärke in einem Widerstand proportional zur angelegten Spannung. Die Messung der Kennlinie ergibt dementsprechend eine durch den Nullpunkt des Koordinatensystems gehende Gerade. Aus deren Steigung kann der Widerstandswert bestimmt werden.

3. Spannungsabfall und Potentiometer

Es ist oft zweckmäßig, den in einem Widerstand fließenden Strom als Ursache für die an Teilstücken des Widerstands abfallenden Spannungen anzusehen. Zur Anwendung dieser Betrachtungsweise werden durch einen geraden Draht bzw. ein Wendepotentiometer Ströme geschickt und die zwischen je zwei Punkten auftretenden Spannungsabfälle nachgewiesen.

4. Spannungsmessung durch Kompensation

Unbekannte Spannungen können durch Kompensation von bekannten Spannungen gemessen werden. Als Beispiel dafür wird mit der Kompensationsschaltung nach Du Bois-Reymond die Spannung einer galvanischen Zelle mit der Spannung eines elektronischen Spannungsnormalen verglichen.

5. **Bestätigung der Kirchhoffschen Sätze**

Die Kirchhoffschen Sätze machen Aussagen über Ströme und Spannungen in einem Widerstandsnetzwerk. Durch Messung derselben können sie bestätigt werden.

Inhaltsverzeichnis

1	Physikalische Grundlagen	4
1.1	Elektrische Stromstärke und Spannung	4
1.2	Das Ohmsche Gesetz	4
1.3	Spannungsabfall und Potential	5
1.4	Spannungsquellen	7
1.5	Spannungsmessung durch Kompensation	9
1.6	Kirchhoffsche Sätze	10
2	Technische Grundlagen	14
2.1	Gesamtaufbau	14
2.2	Spannungsquellen	14
2.3	Messinstrumente	16
2.4	Widerstände	19
3	Versuchsdurchführung	22
3.1	Teilversuch 1: Belastungsabhängigkeit zweier Spannungsquellen	22
3.2	Teilversuch 2: Bestätigung des Ohmschen Gesetzes	24
3.3	Teilversuch 3: Spannungsabfall und Potentiometer	25
3.4	Teilversuch 4: Spannungsmessung durch Kompensation	26
3.5	Teilversuch 5: Bestätigung der Kirchhoffschen Sätze	27
4	Auswertung	28
4.1	Teilversuch 1: Belastungsabhängigkeit zweier Spannungsquellen	28
4.2	Teilversuch 2: Bestätigung des Ohmschen Gesetzes	28
4.3	Teilversuch 3: Spannungsabfall und Potentiometer	28
4.4	Teilversuch 4: Spannungsmessung durch Kompensation	29
4.5	Teilversuch 5: Bestätigung der Kirchhoffschen Sätze	29

1 Physikalische Grundlagen

1.1 Elektrische Stromstärke und Spannung

Stromstärke

Es gibt elektrisch geladene Teilchen wie Elektronen, Ionen usw., die sich in Materie oder im Vakuum bewegen können. Der damit verbundene Transport elektrischer Ladung heißt elektrischer Strom. Die Stromstärke I ist gegeben durch die Ladungsmenge, die pro Zeiteinheit durch eine vorgegebene Fläche senkrecht zur Strömungsrichtung (z. B. den Querschnitt eines Drahtes) hindurchtritt. Die Einheit der Stromstärke, im SI das Ampere (A), wurde bis Mai 2019 nicht mehr durch diese elementare Definition, sondern aufgrund der magnetischen Kraftwirkung des elektrischen Stromes festgelegt. Mit dem Inkrafttreten der Neudefinition des SI-Systems am 20. Mai 2019 wurde die ursprüngliche Definition wieder aufgegriffen. Der Wert wurde über die Definition der Elementarladung $e = 1,602175634 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ auf einen Elektronenfluss von 6241509629152650000 Elektronen pro Sekunde festgelegt.¹:

Spannung

Die Kraft F , die massebehaftete elektrisch geladene Teilchen der Ladung Q in Bewegung setzt oder ihre Bewegung bei vorhandenen Reibungswiderständen aufrechterhält, ist durch die elektrische Feldstärke $E = F/Q$ gegeben. Das Feld E wirkt z. B. längs eines Drahtes, der von einem Strom I durchflossen wird. In der Praxis wird allerdings nicht die Feldstärke E selbst, sondern der Quotient $U = W/Q$ gemessen, wobei W die Arbeit ist, die das Feld E zur Verschiebung der Ladung Q von einem Drahtende zum anderen leistet. U heißt die an den Draht angelegte Spannung. Die SI-Einheit Volt (V) für die Spannung ist so definiert, dass die elektrische Energieeinheit VAs genauso groß wie die mechanische Energieeinheit Joule (J) wird.

1.2 Das Ohmsche Gesetz

Ohmsche Leiter

Die durch ein elektrisches Feld in Bewegung gesetzten Ladungsträger erfahren in bestimmten Arten von Leitern (z. B. homogenen Metallen, Halbleitern und Elektrolyten) eine zur Geschwindigkeit proportionale Reibung. Daraus folgt die Aussage des für diese Art von Leitern gültigen Ohmschen Gesetzes, dass die Stromstärke I zur angelegten Spannung U proportional ist:

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

¹Mehr zur Neudefinition des SI-Systems: https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/publikationen/masstaebe/mst14/mst14_pdf/PTB_Masstaebe_14_Masse_fuer_aller.pdf, insbesondere Seiten 24-27.

1 Physikalische Grundlagen

Dabei bleibt der durch

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

definierte elektrische Widerstand R bei Variation von U und I unter sonst gleich bleibenden Bedingungen unverändert. Die *Kennlinie* $I = f(U)$ eines ohmschen Widerstandes ist daher eine durch den Nullpunkt des Koordinatensystems gehende Gerade (Abbildung 1).

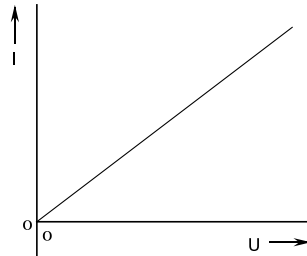


Abbildung 1: Lineare Abhängigkeit des Stromes von der Spannung bei Gültigkeit des Ohmschen Gesetzes

Nicht für alle elektrischen Leiter gilt das Ohmsche Gesetz. Ein Beispiel für einen nichtohmschen Widerstand ist die Halbleiterdiode mit einer exponentiell verlaufenden, d. h. nichtlinearen Kennlinie.

Spezifischer Widerstand

G. S. Ohm hat nicht nur die Konstanz von $R = U/I$ entdeckt, sondern als Beweis dafür auch angegeben, wie R von Materialeigenschaften und der Geometrie des Leiters abhängt. Demnach ist R direkt proportional zur Länge L und umgekehrt proportional zur Querschnittsfläche A (Strom in Längsrichtung des Leiters):

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (2)$$

Der Proportionalitätsfaktor ρ heißt der spezifische Widerstand. Er ist charakteristisch für das Leitermaterial, variiert aber in Abhängigkeit von den thermodynamischen Zustandsgrößen (z. B. Temperatur, Druck, Magnetfeld).

1.3 Spannungsabfall und Potential

Spannungsabfall

Die im vorhergehenden Abschnitt skizzierte Betrachtungsweise lässt sich auch umkehren: Fließt durch einen Leiter mit dem Widerstand R ein Strom I , so tritt als dessen Wirkung an den Leiterenden die Spannung

$$U = RI \quad (3)$$

1 Physikalische Grundlagen

auf. Der Vorteil dieser Umkehr des kausalen Zusammenhangs zwischen Spannung und Strom liegt z. B. darin, dass mit (3) die Spannung U an einem Teilstück des Leitersystems mit bekanntem Widerstand R und Strom I berechnet werden kann. Nach der üblichen Redeweise „fällt an einem stromdurchflossenen Widerstand eine Spannung ab“. Diese Spannung wird daher auch kurz mit Spannungsabfall bezeichnet. In Teilversuch 3a ist der stromdurchflossene Leiter ein langer gerader Draht. Von ihm werden mit den Zuleitungen eines Spannungsmessers verschiedene Abschnitte abgegriffen. Die an ihnen abfallende Spannung ist gemäß (3) proportional zum Widerstand und somit nach (2) auch proportional zur Länge dieser Abschnitte.

Potential

Die Spannung zwischen einem beliebigen Punkt x eines Leiters und einem festen Bezugspunkt x_0 heißt das elektrische Potential $V(x)$ des Punktes x . Der Bezugspunkt hat nach dieser Definition das Potential $V(x_0) = 0$. Ist er mit dem elektrisch leitenden Teil der Erdoberfläche (z. B. dem Grundwasser) verbunden, wird er mit „Erde“ bezeichnet. Abbildung 2 zeigt den Potentialverlauf gemäß (3) in einem geraden stromdurchflossenen Leiter von konstantem Querschnitt:

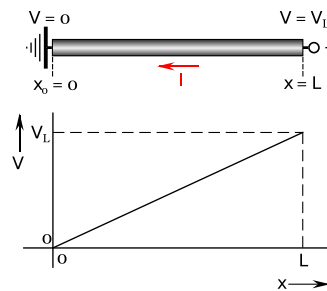


Abbildung 2: Potentialverlauf längs eines stromdurchflossenen Zylinders. Der Strom fließt entgegen der x -Richtung, d. h. vom höheren zum niedrigeren Potential („den Berg hinunter“). Das Symbol am linken Ende des Zylinders bedeutet Erde.

Spannungsteilung und Potentiometer

An den Teilen einer Widerstandskette fallen Einzelspannungen ab, welche zusammen die an die Kette angelegte Gesamtspannung ergeben. Die Kette wirkt daher als Spannungsteiler. Ein spezieller Spannungsteiler ist ein Widerstand, der einen Schleifkontakt besitzt, mit dem jeder Punkt längs des Widerstandskörpers abgegriffen werden kann. Er heißt Potentiometer. Seine Schaltung ist in Abbildung 3 dargestellt.

An die Enden des Potentiometerwiderstandes mit dem Widerstandswert R_0 werde eine feste Spannung U_0 angelegt, so dass in ihm nach (1) der Strom

$$I_0 = \frac{U_0}{R_0} \quad (4)$$

1 Physikalische Grundlagen

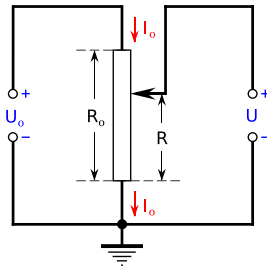


Abbildung 3: Schaltung eines Potentiometers (R_0 = Gesamtwiderstand, R = abgegriffener Widerstand, U_0 = feste Eingangsspannung, U = einstellbare Ausgangsspannung)

fließt. Wenn über den Schleifer kein Strom abgezweigt wird, dann hat der durch den abgegriffenen Teilwiderstand R fließende Strom ebenfalls den Wert I_0 . Die an R abfallende Spannung U ist daher nach (3) gegeben durch:

$$U = RI_0$$

Ersetzen von I_0 nach (4) ergibt:

$$U = \frac{R}{R_0} U_0 \quad (5)$$

Es besteht also eine lineare Abhängigkeit der Ausgangsspannung U des Potentiometers vom abgegriffenen Widerstand R , die in Abbildung 4 dargestellt ist.

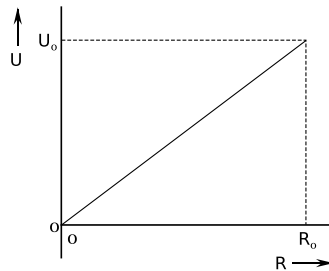


Abbildung 4: Lineare Abhängigkeit der Ausgangsspannung eines Potentiometers. Die Spannung U kann nach (5) durch Verschieben des Schleifers von 0 bis zum Maximalwert U_0 kontinuierlich verändert werden. Das ist die wichtigste Anwendung der Potentiometerschaltung. Hinter fast jedem Drehknopf eines elektronischen Geräts verbirgt sich ein Potentiometer, dessen Betätigung die Veränderung einer im Gerät benötigten Steuerspannung zur Folge hat.

1.4 Spannungsquellen

Eine auf getrennten Ladungen verschiedenen Vorzeichens beruhende Spannung nimmt mit der Zeit bis auf null ab, wenn durch sie ein Stromfluss bewirkt wird, da dieser die Ladungen wieder vereinigt. Als Beispiel sei die Entladung eines Kondensators über eine leitende Verbindung angeführt. Um die Spannung trotz des Stromflusses dauernd aufrechtzuerhalten (was in

elektrischen Stromkreisen erwünscht ist!), bedarf es eines nichtelektrischen Vorgangs, der Ladungen entgegen der auf sie wirkenden elektrischen Kraft verschiebt. Dieser Vorgang kann z. B. eine mechanische Bewegung von Körpern sein (Reibungselektrizität), die thermische Bewegung von Ladungsträgern (Thermoelement), das Eingehen einer chemischen Bindung (galvanische Zelle) oder die Bewegung von Leitern in einem Magnetfeld (Dynamomaschine). Eine Anordnung, die aufgrund eines solchen Vorgangs auch bei Stromentnahme eine möglichst stabile Spannung liefert, heißt eine Spannungsquelle.

Innenwiderstand einer Spannungsquelle

Bei jeder der genannten Spannungsquellen ist die an ihren Polen abnehmbare Klemmenspannung zwar bei einer festen Strombelastung zeitlich konstant, ihr Wert nimmt aber im Allgemeinen mit wachsender Belastungsstromstärke ab. Dieser Sachverhalt kann dadurch erklärt werden, dass die durch die Spannungsquelle fließenden Ladungsträger einen in ihr vorhandenen inneren Widerstand R_i überwinden müssen (Abbildung 5).

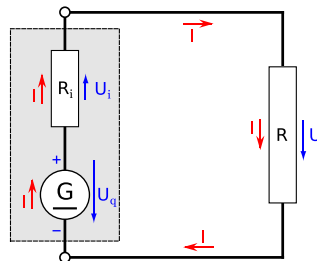


Abbildung 5: Ersatzschaltung einer Spannungsquelle (G) mit Innenwiderstand (R_i) und Belastungskreis (R)

Ein Teil U_i der ursprünglichen Spannung U_q wird nun dazu verbraucht, den Strom I durch diesen Widerstand R_i zu treiben (Abbildung 5). Die Klemmenspannung U ist also um U_i kleiner als die Quellenspannung U_q :

$$U = U_q - U_i \quad (6)$$

Für den inneren Widerstand gilt meistens in guter Näherung das Ohmsche Gesetz ((1)). Damit kann U_i in (6) durch $R_i I$ ersetzt werden:

$$U = U_q - R_i I \quad (7)$$

Nach (7) ergibt die grafische Darstellung von $U(I)$ eine abfallende Gerade mit dem Ordinatenabschnitt U_q , der der Leerlaufspannung entspricht, und der Steigung $-R_i$ (Abbildung 6).

Die für eine Spannungsquelle charakteristischen Größen U_q und R_i werden in Teilversuch 1 durch Messung von U bei Variation von I bestimmt. Die untersuchte Spannungsquelle ist eine galvanische Zelle.

1 Physikalische Grundlagen

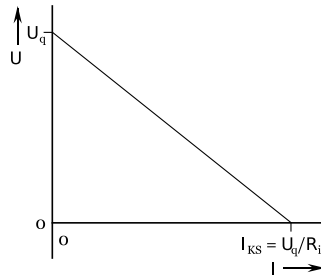


Abbildung 6: Lineares Absinken der Klemmenspannung einer Spannungsquelle mit zunehmender Belastung. Die Gerade schneidet bei dem (meist fiktiven) Kurzschlussstrom $I_{KS} = U_q/R_i$ die Abszisse.

Stabilisierte Spannungsquellen

Das Absinken der Klemmenspannung mit der Strombelastung ist oft von Nachteil. Es lässt sich vermeiden, wenn die Spannungsquelle mit Hilfe von elektronischen Mitteln geregelt wird. Dies ist bei dem im Versuch verwendeten Gleichspannungs-Netzgerät der Fall. Hier soll nur das Ergebnis, nämlich die nahezu geltende Unabhängigkeit der Ausgangsspannung vom Belastungsstrom festgestellt werden.

1.5 Spannungsmessung durch Kompensation

Messprinzip

Mit einem Potentiometer lässt sich nach (5) und Abbildung 4 jede beliebige Spannung U zwischen 0 und der an den Gesamtwidestand angelegten Spannung U_0 einstellen. Durch Ausmessen der Schleiferposition kann das Verhältnis R/R_0 des Potentiometers bestimmt werden. Der Wert von U ist bei bekanntem U_0 nach (5) aus dem Verhältnis R/R_0 berechenbar. Ist eine unbekannte Spannung gegeben, die ebenfalls zwischen 0 und U_0 liegt, so kann die am Potentiometer abgegriffene Spannung U durch Verschieben des Schleifers ihr gleich gemacht werden.

Kompensationsschaltung

Die für eine solche Kompensation angewandte Schaltung (Abbildung 7) wurde von dem Physiologen Du Bois-Reymond angegeben (sie wird oft fälschlicherweise nach Poggendorff benannt).

Als Detektor zur Feststellung der Potentialgleichheit wird zwischen den Punkt mit dem unbekannten Potential und den Potentiometerabgriff ein empfindlicher Spannungsmesser (der unkalibriert sein kann) geschaltet. Dieses „Nullinstrument“ (NI) schlägt nach richtigem Abgleich des Potentiometers nicht mehr aus, da keine Potentialdifferenz vorhanden ist. Damit ist der Wert der unbekannten Spannung durch den Wert von U gegeben.

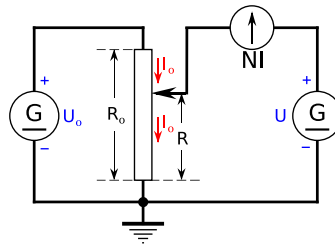


Abbildung 7: Kompensationsanordnung zur Messung von Spannungen nach Du Bois-Reymond. In der englischsprachigen Literatur wird diese Schaltung „potentiometer“ genannt, was korrekt und sinnvoll ist, denn mit ihr werden wirklich Potentiale gemessen. Im Deutschen bezeichnet man damit das zur Spannungsteilung verwendete Bauteil.

Ist die Spannung U_0 nicht sonderlich genau bekannt, kann die Anordnung durch ein sogenanntes Spannungsnormal kalibriert werden. Ein Spannungsnormal ist eine elektronische Einheit, die eine bekannte Spannung sehr genau (z. B. auf fünf Stellen) bereitstellt. Zur Kalibrierung der Anordnung (d. h. zur Bestimmung von U_0) wird zuerst diese bekannte Spannung U_N des Spannungsnormals kompensiert. Nach (5) gilt dafür speziell:

$$U_0 = \frac{R_0}{R_N} U_N$$

R_N = Widerstand, bei der die Spannung U_N kompensiert wird, R_0 = Gesamtwiderstand (entsprechend U_0)

Danach kann die Kompensation der unbekannten Spannung U erfolgen.

1.6 Kirchhoffsche Sätze

1. Kirchhoffscher Satz (Knotenregel)

Die Summe der auf eine Verzweigungsstelle (Knoten) zufließenden Ströme muss gleich der Summe der von ihr abfließenden Ströme sein. Das folgt aus dem Satz von der Erhaltung der elektrischen Ladung (siehe Abbildung 8, dort gilt $I_1 + I_2 + I_3 = I_4 + I_5 + I_6 + I_7 + I_8$).

Diese Beziehung beruht auf der Voraussetzung, dass sich im Knoten keine Ladungen anhäufen können, dieser also keine Kapazität besitzt. Wenn das doch der Fall ist, der Knoten also einen Kondensator enthält, so ist der 1. Kirchhoffsche Satz trotzdem für Gleichströme und langsam veränderliche Wechselströme erfüllt. Erst bei Frequenzen, für welche die Verhältnisse in der Schaltung nicht mehr als stationär angesehen werden können, treten Abweichungen auf.

2. Kirchhoffscher Satz (Maschenregel)

In einem geschlossenen Teilkreis (Masche) eines Widerstandsnetzwerks ist die (vorzeichenrichtige) Summe der Spannungen gleich null (siehe Abbildung 9, dort gilt $-U_{q1} + U_1 + U_2 - U_{q2} + U_3 - U_4 + U_5 = 0$). Das folgt aus dem Energieerhaltungssatz für das elektrostatische Feld.

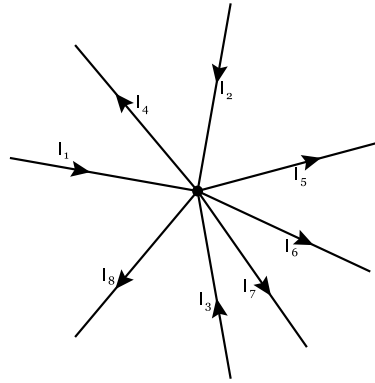


Abbildung 8: Stromverzweigungspunkt

Voraussetzung ist allerdings, dass kein Austausch mit anderen Energieformen wie z. B. durch ein zeitlich veränderliches Magnetfeld erfolgt.

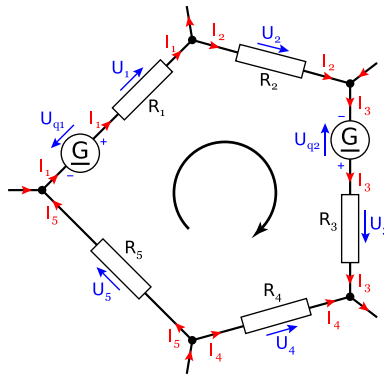


Abbildung 9: Masche - einfach geschlossener Stromkreis aus Spannungsquellen und Widerständen

Die Addition aller Quellenspannungen und Spannungsabfälle für ein vollständiges Umlaufen des Kreises muss null ergeben. Die Vorzeichen der Spannungen der Spannungsquellen sind durch deren Polungen festgelegt. Bei den Spannungsabfällen an den Widerständen ergeben sie sich daraus, dass der Strom in einem passiven Schaltelement stets von + nach – fließt.

Anwendung auf eine Parallelschaltung von Widerständen

Ein Netzwerk mit einer Spannungsquelle und mehreren parallel geschalteten Widerständen ist in Abbildung 10 dargestellt.

Die Summe der in den einzelnen Zweigen fließenden Teilströme ist gleich dem Gesamtstrom:

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

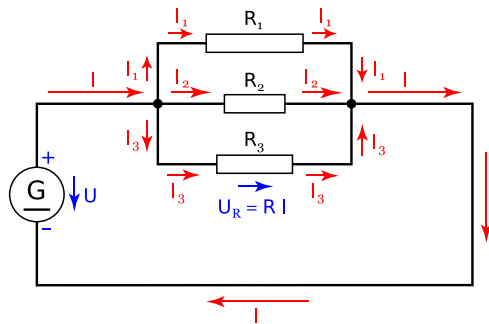


Abbildung 10: Parallelschaltung von Widerständen mit Stromverzweigung. Die Längen der Widerstände und der Strom- bzw. Spannungspfeile wurde hier proportional zu den entsprechenden Größen gezeichnet.

Da die an den Widerständen anliegende Spannung jeweils gleich U ist, kann diese Gleichung nach dem Ohmschen Gesetz auch folgendermaßen geschrieben werden:

$$\frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3}$$

Nach Dividieren durch U folgt daraus:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

R hat dabei die Bedeutung eines Ersatzwiderstandes, der in den Stromkreis stellvertretend eingesetzt den Wert I liefern würde.

Anwendung auf eine Serienschaltung von Widerständen

Ein Netzwerk, das aus einer einzigen Masche mit einer Spannungsquelle und mehreren in Serie geschalteten Widerständen besteht, ist in Abbildung 11 dargestellt. Beachten Sie, dass der Strom in der Spannungsquelle entgegengesetzt zur Feldrichtung fließt („den Berg hinauf“).

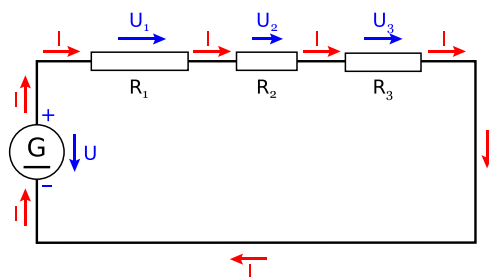


Abbildung 11: Serienschaltung von Widerständen mit Addition der Teilspannungen. Die Längen der Widerstände und der Strom- und Spannungspfeile wurden proportional zu den entsprechenden Größen gezeichnet.

1 Physikalische Grundlagen

Verbindet man eine Spannungsquelle der Spannung U mit mehreren hintereinander geschalteten Widerständen, so ergibt sich für die Summe der gemessenen Teilwiderstände

$$U = U_1 + U_2 + U_3$$

Da hier nach dem 1. Kirchhoffschen Satz I im gesamten Stromkreis gleich bleibt, kann man die Gleichung mit dem Ohmschen Gesetz umformen zu:

$$RI = R_1I + R_2I + R_3I$$

Nach Division durch I erhält man hier als Ersatzwiderstand:

$$R = R_1 + R_2 + R_3$$

2 Technische Grundlagen

2.1 Gesamtaufbau

Auf einer Rastersteckplatte (siehe Abbildung 12) werden elektrische Schaltungen aufgebaut, die an eine Spannungsquelle angeschlossen werden. Auf der Rastersteckplatte werden mit Messinstrumenten Ströme und Spannungen gemessen. Sie ist mit einem Gitter von Buchsen versehen, in die Steckelemente (Widerstände, Kondensatoren usw.) eingesteckt werden können. Mit schwarzen Linien verbundene Buchsen haben im Inneren der Platte eine elektrische Verbindung. Weitere Verbindungen werden durch Kurzschlussstecker hergestellt.

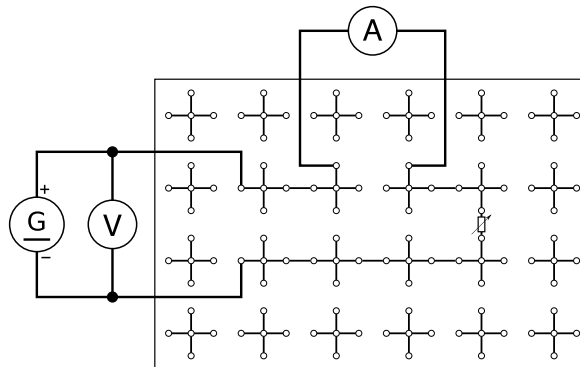


Abbildung 12: Aufbau mit Schaltung auf einer Rastersteckplatte, einer Spannungsquelle (G) und Messinstrumenten für Spannung (V) und Strom (A)

2.2 Spannungsquellen

Gleichspannungs-Netzgerät

Das Gleichspannungs-Netzgerät, siehe Abbildung 13, wandelt die Netzwechselspannung mit dem Effektivwert 230 V in eine im Bereich von 0 V bis 20 V einstellbare Gleichspannung um. Ein Netzgerät ist in der Regel stabilisiert, d. h. es liefert unabhängig von der Belastung eine konstante Spannung. Die Konstanz kann sich aber nicht bis zu beliebig hohen Belastungsströmen erstrecken, da die Leistung begrenzt ist. Oberhalb einer Grenzstromstärke fällt die Spannung rasch bis auf null ab.

Galvanische Zelle

In einer galvanischen Zelle wird der Ladungsaustausch bei einer chemischen Reaktion zur Erzeugung einer elektrischen Spannung ausgenutzt. In Abbildung 14 ist der innere Aufbau einer Alkali-Mangan-Zelle dargestellt.

Die in den (eingedickten) Elektrolyten ragende spitze Metallelektrode gibt positive Ionen ab, wodurch sie sich selbst durch negative Elektronen auflädt. Ein MnO_2 -Molekül hat die

2 Technische Grundlagen

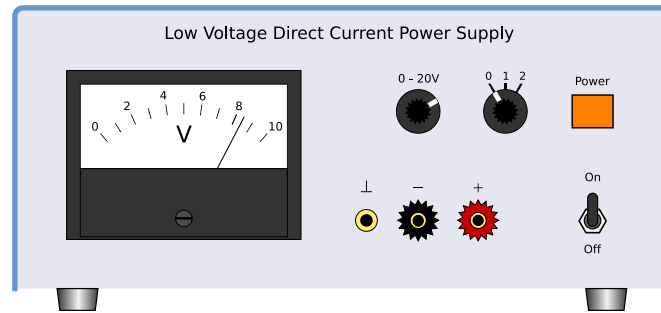


Abbildung 13: Gleichspannungs-Netzgerät. Die Spannung wird mit dem Drehknopf (0 V bis 20 V) eingestellt und ihr ungefährender Wert am eingebauten Zeigerinstrument abgelesen. Dessen Anzeigebereich kann mit dem Drehschalter (Reading) erweitert werden, die Ablesung ist mit dem jeweils gewählten Faktor zu multiplizieren.

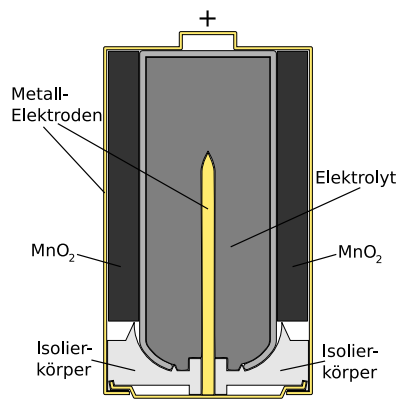


Abbildung 14: Innerer Aufbau einer Alkali-Mangan-Zelle

Tendenz, eines der beiden Sauerstoffatome, welches nur schwach gebunden ist, abzugeben, sodass stabiles MnO zurückbleibt. Das abgespaltene (sehr aktive!) O-Atom holt sich aus dem Metall der äußeren Hülle zwei Elektronen und lagert sich dann an ein H_2O -Molekül an, wodurch zwei OH^- -Ionen entstehen. Durch den Elektronenentzug lädt sich das Metall der äußeren Hülle positiv auf. Bei keinem dieser Vorgänge wird Gas freigesetzt. Die beiden Elektroden der Zelle können aus dem gleichen Metall bestehen.

Spannungsnormal

Die aus einem Gleichrichter kommende wellige Gleichspannung wird über einen Widerstand einer in Sperrrichtung geschalteten Präzisions-Zener-Diode zugeführt. Da die Eingangsspannung so gewählt wurde, dass sie stets über der Durchbruchspannung liegt, fällt an der Zener-Diode dauernd die Durchbruchspannung ab, wodurch eine sehr gute Glättung erzielt wird. Der Spannungsteiler am Ausgang dient nur dazu, die Ausgangsspannung auf den Wert 1 V einzustellen. Eine Zeichnung hierzu findet sich in Abbildung 15.

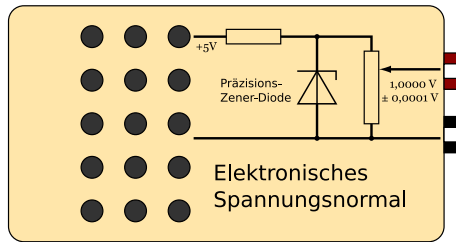


Abbildung 15: Elektronisches Spannungsnormal

2.3 Messinstrumente

Spannungsmessung

Elektrische Spannungen werden heute fast ausschließlich mit elektronischen Hilfsmitteln gemessen. Für den hier durchzuführenden Versuch sind digital anzeigende Instrumente gegeben. Ein solches enthält im Wesentlichen einen Analog-Digital-Wandler. Dieser funktioniert bei elektronischen Spannungsmessern üblicherweise nach dem so genannten Dual-Slope-Verfahren (Abbildung 16).

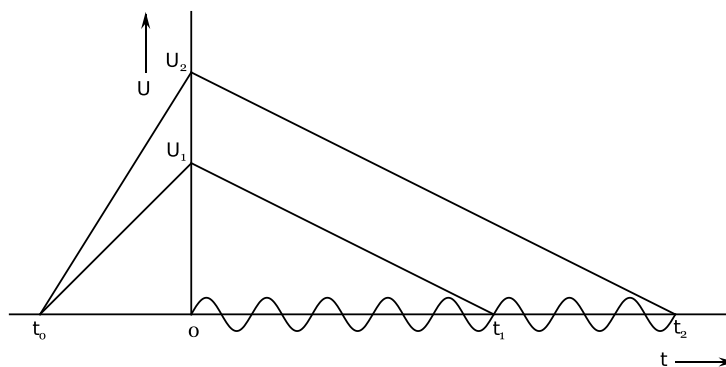


Abbildung 16: Digitalisierung von Spannungen nach dem Dual-Slope-Verfahren

Ein Kondensator wird innerhalb der festen (relativ kurzen) Zeit t_0 auf die zu messende Spannung U aufgeladen. Es folgt eine langsame Entladung, bei der durch elektronische Regelung bewirkt wird, dass die Spannung linear mit stets gleicher Steigung bis auf null absinkt. Die dafür benötigte Zeit t ist nach Abbildung 16 proportional zu U (ähnliche Dreiecke). Zu ihrer Bestimmung werden die in der Zeit t ablaufenden Schwingungen eines Oszillators gezählt.

Messprinzipien für Strom und Widerstand

Die heute gebräuchlichen elektronischen Multimeter sind in der Regel primär Spannungsmesser. Sie können aber auch Strom und Widerstand messen. Zur Strommessung wird dem Spannungsmesswerk ein bekannter Widerstand parallel geschaltet, durch den der zu messende Strom fließt. Aus dem Widerstandswert und der am Widerstand abfallenden Spannung

ergibt sich die Stromstärke nach (1). Das ist aber nur dann richtig, wenn der Spannungsmesser selbst praktisch stromlos bleibt, er also einen sehr hohen Innenwiderstand besitzt. Diese Forderung ist im Allgemeinen bei elektronischen Spannungsmessern erfüllt, so haben z. B. die hier im Versuch verwendeten Vielfachinstrumente in ihren Gleichspannungsbereichen einen Eigenwiderstand von einigen $M\Omega$.

Für die Widerstandsmessung besitzt ein Multimeter eine Konstantstromquelle. Werden an sie Widerstände angeschlossen, so fließt durch diese unabhängig von ihrer Größe stets derselbe Strom. Der Spannungsmesser misst die an einem Widerstand abfallende Spannung, die unter dieser Voraussetzung nach (3) ein Maß für den Widerstandswert ist. Auch hierfür muss der Innenwiderstand des Spannungsmessers sehr hoch sein.

Schaltung von Messinstrumenten

In Schaltungen sind Ströme und Spannungen so zu messen, dass sie durch den Einbau der Messinstrumente möglichst wenig verfälscht werden. Wir betrachten als Beispiel eine Reihenschaltung von zwei Widerständen R_0 und R , die an eine Spannungsquelle mit konstanter Spannung U_0 angeschlossen sind. Zu bestimmen sind der Strom I , der durch den Widerstand R fließt, und die an ihm abfallende Spannung U .

1. Strommessung (siehe Abbildung 17)

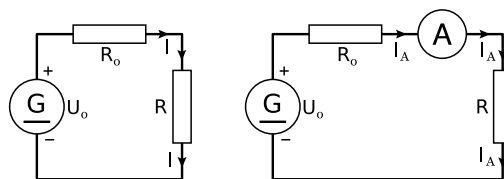


Abbildung 17: Schaltung zur Messung des durch den Widerstand R fließenden Stroms

Der mit dem Amperemeter gemessene Strom I_A wäre mit dem ohne Instrument durch den Widerstand fließenden Strom I identisch, wenn der Innenwiderstand des Instruments den Wert 0 hätte. Das ist aber bei elektronischen Strommessern nicht zu realisieren, da sie die am Innenwiderstand abfallende Spannung messen, die nicht beliebig klein werden kann.

2. Spannungsmessung (siehe Abbildung 18)

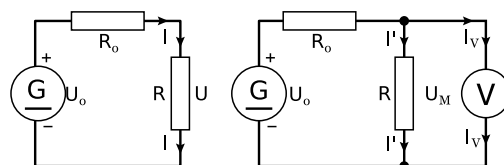


Abbildung 18: Schaltung zur Messung der am Widerstand R abfallenden Spannung

Bei elektronischen Spannungsmessern kann der Innenwiderstand fast beliebig hoch gemacht werden, sodass der Messstrom I_V durch das Instrument gegenüber dem Strom I'

durch den Widerstand zu vernachlässigen ist. Daher wird die gemessene Spannung U_M gegenüber der ursprünglichen Spannung U praktisch nicht verfälscht.

Beschreibung eines typischen Multimeters

In Abbildung 19 ist ein typisches Multimeter (Vielfachmessgerät) dargestellt. Einige der verwendeten Multimeter sehen anders aus, die hier gegebene Beschreibung lässt sich aber auf sie übertragen.

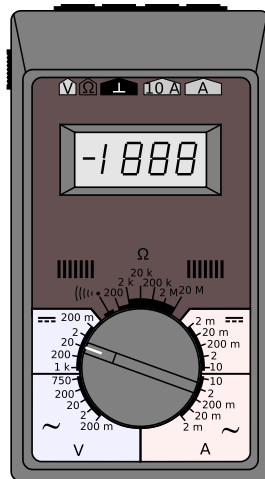


Abbildung 19: Multimeter mit Digitalanzeige

Mit dem Drehschalter wird der gewünschte Messbereich gewählt. Die ihm zugeordnete Einheit (Vorsilben milli, kilo, Mega beachten) ergibt zusammen mit dem angezeigten Wert das Messergebnis. Die angegebenen Bereichsendwerte sind aufgerundet. Da in der Anzeige links höchstens eine Eins und danach höchstens drei Neunen erscheinen können, spricht man hier von einer „3 1/2 stelligen“ Anzeige. In die mit dem Massesymbol versehene Buchse wird bei Gleichspannungs- oder Gleichstrommessungen der Minuspol gesteckt. Für Spannungs/Widerstands- bzw. Strommessungen sind verschiedene Buchsen vorgesehen. Für die Strommessung sind die entsprechenden Buchsen meist mit einem A (für Ampere) gekennzeichnet. Häufig sind sogar zwei Buchsen für unterschiedliche Strommessbereiche vorhanden, z. B. ist bei dem Messgerät in Abbildung 19 die A-Buchse für maximal 2 A vorgesehen, während die Buchse 10 A entsprechend Messungen bis 10 A zulässt.

Das Gerät zeigt positive wie auch negative Werte an. Eine Beschädigung durch Verpolung ist nicht möglich. Das Messgerät besitzt für die Gleichspannungsbereiche einen Eingangswiderstand von 10 MΩ. Zur Spannungsmessung werden die betreffenden Buchsen einfach an die beiden Punkte der Schaltung gelegt, zwischen denen die Spannung gemessen werden soll (Spannungsmesser parallel). Zur Strommessung muss die stromführende Verbindung in der Schaltung aufgetrennt und die Verbindung durch das Messinstrument wiederhergestellt werden (Strommesser in Serie).

Überlegen Sie:

- Warum ist es günstig, ein Multimeter bei einer Messung auf den kleinstmöglichen Messbereich zu schalten?
- Warum ist bei Multimetern der Fehler für die Strommessung größer angegeben als der für die Spannungsmessung?

Nullinstrument

Ein Nullinstrument ist ein Indikator dafür, dass die am Eingang liegende Spannung null ist. Digitale Instrumente sind dafür weniger geeignet, da sie nur in bestimmten Zeitabständen den Messwert abfragen, was mit langen Wartezeiten verbunden ist. Von den analogen Geräten sind außer Zeigerinstrumenten (Abbildung 20) auch Elektronenstrahloszilloskope geeignet.

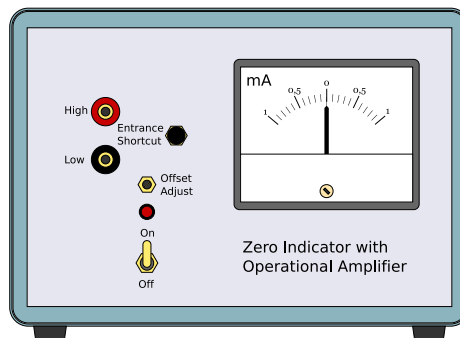


Abbildung 20: Nullinstrument mit Kurzschlussstaste. Durch Drücken der Kurzschlussstaste und Drehen an der Justierschraube kann ein evtl. vorhandener Offset der Anzeige abgeglichen werden.

2.4 Widerstände

Schichtwiderstände

In Abbildung 21 ist ein Schichtwiderstand dargestellt. Ein Schichtwiderstand wird durch Aufdampfen einer dünnen Schicht aus einer Metalllegierung auf einen zylindrischen Keramikkörper hergestellt. Die Schichtdicke bestimmt den Widerstandswert. Dieser wird durch Farbringe angegeben. Im vorliegenden Fall ergibt sich die Ziffernfolge 3 (orange), 3 (orange), 2 (rot), 00 (rot)², d. h. $33200\Omega = 33,2\text{k}\Omega$. Der braune Ring an letzter Stelle bedeutet die Toleranz 1%. Das Beherrschen dieses Farbcodes ist in der Praxis sehr nützlich. Sie können sich die Systematik im Praktikum von ihrem Betreuer erklären lassen.

²Der 4. Ring gibt den Multiplikator an, in diesem Fall $\cdot 10^{2(\text{rot})} \rightarrow 00$.

2 Technische Grundlagen

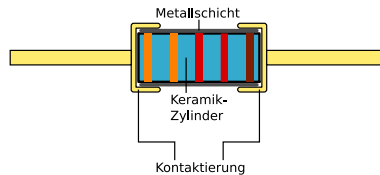


Abbildung 21: Aufbau eines Schichtwiderstandes

Schleifdraht-Potentiometer

Die einfachste Form eines kontinuierlich variablen Widerstandes ist ein gerader Draht, auf dem ein Schleifer gleitet. Der variable Widerstand tritt zwischen einem Drahtende und dem Schleifer auf.

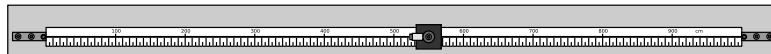


Abbildung 22: Schleifdraht-Potentiometer

Drehpotentiometer

Da ein gerader Draht viel Platz einnimmt (Länge 1 m im Versuch), ist es günstig, ihn auf einem ringförmigen Körper zu einer Spule zu wickeln (siehe Abbildung 23). Mit dem Schleifer wird ein Punkt auf dem kreisförmigen Widerstandskörper abgegriffen. Der Widerstand kann außer durch eine Drahtspule (wie hier) auch durch eine Schicht gebildet sein. Bei einem linearen Potentiometer ist der abgegriffene Widerstand direkt proportional zum Skalenwert. In vielen Fällen der Elektrotechnik wie zum Beispiel der Lautstärkeregelung wird jedoch ein logarithmisches Verhalten benötigt. Das lässt sich bei einem Schichtpotentiometer durch eine variable Breite der Schicht erreichen.

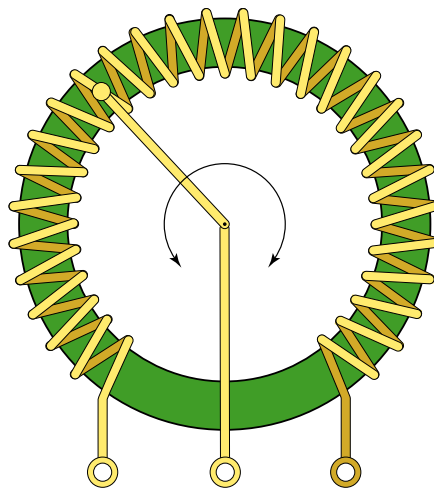


Abbildung 23: Schema eines Drehpotentiometers

Wendelpotentiometer (Helipot)

Eine größere Auflösung erhält man, wenn die Leiterbahn (Drahtspule oder Schicht) längs einer Schraubenlinie verläuft, entlang derer sich der Schleifer beim Drehen des Einstellknopfes bewegt (siehe Abbildung 24). Meist werden zehn Gänge genommen. Beim Drehen der Achse gleitet der Schleifer entlang der schraubenförmigen Wendel. Er wird durch die auf der Achse angebrachte Schiene geführt.

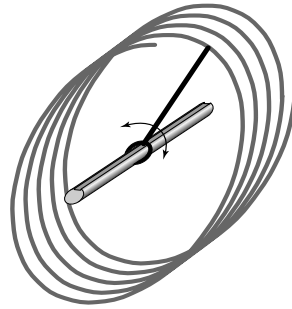


Abbildung 24: Funktionsprinzip eines Wendelpotentiometers

Wendelpotentiometer haben häufig einen Digitaldrehknopf (siehe Abbildung 25).

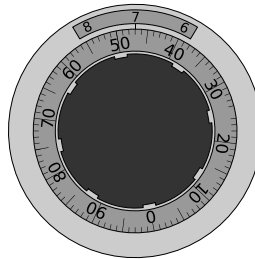


Abbildung 25: Digitaldrehknopf, aktuelle Einstellung: 747 Skalenteile (Skt.).

Mit der 100 Teile umfassenden runden Skala lässt sich die Position des Schleifers auf der betreffenden Windung ablesen. In der Mitte des Fensters (oberhalb der Skala) wird die Nummer der Windung, auf der sich der Schleifer gerade befindet, angezeigt. Nach jeder Umdrehung springt diese Nummer auf den nächstfolgenden Wert. Bei 10 Windungen wird eine Auflösung von 1000 Skalenteilen erreicht.

Spannungseinstellung mit einem Potentiometer

Auf der Skala eines Potentiometers ist eine zur Drahtlänge L proportionale Größe x abzulesen, die nach (2) auch proportional zum abgegriffenen Widerstand R ist. Da es nach (5) nur auf das Verhältnis R/R_0 der Widerstände R und R_0 ankommt, in dem sich ein konstanter Proportionalitätsfaktor herauskürzt, kann die Spannung U direkt aus den entsprechenden Ablesungen x und x_0 berechnet werden:

$$U = \frac{x}{x_0} U_0$$

3 Versuchsdurchführung

Vorbemerkung:

Das Spannungsnorm und das Nullinstrument sind bereits zu Beginn in eine Netzsteckdose zu stecken, damit sie sich für die Benutzung genügend stabilisiert haben.

3.1 Teilversuch 1: Belastungsabhängigkeit zweier Spannungsquellen

Praxisbezug

Vielleicht kennen Sie die Erscheinung, dass das Licht kurz dunkler wird, sobald ein großer Verbraucher an das elektrische Netz angeschlossen wird. Welche physikalischen Grundlagen damit verbunden sind, soll in dieser Aufgabe verdeutlicht werden.

Inhalt

Messung der Ausgangsspannung von Spannungsquellen in Abhängigkeit von der Belastung und Zeichnen der sich daraus ergebenden Belastungskennlinien. Bestimmung des Innenwiderstandes.

Belastung einer galvanischen Zelle

Aufbau der Schaltung

Bauen Sie den Belastungskreis für die galvanische Zelle (Batterie) nach Abbildung 26 auf der Steckplatte auf. Überlegen Sie, warum mit dieser Schaltung die Spannung der galvanischen Zelle richtig, die Stromstärke aber nur näherungsweise richtig gemessen wird.

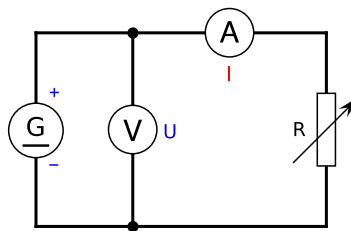


Abbildung 26: Schaltung zum Nachweis der Belastungsabhängigkeit einer Spannungsquelle. Machen Sie sich klar, dass der variable Widerstand R nur ein Hilfsmittel zur Einstellung des Belastungsstromes I ist, die an ihm angebrachte Skala daher nicht abgelesen werden muss.

Hinweis: Stellen Sie Messinstrumente jetzt (und bei allen folgenden Ablesungen) auf den Bereich mit der größten Anzahl von Dezimalen in der Anzeige ein!

3 Versuchsdurchführung

Für den variablen Widerstand in Abbildung 26 soll das kleine Potentiometer benutzt werden. Wenn Sie es genau ansehen, können Sie feststellen, dass die zu einem Kreisring gebogene Drahtspule und der Schleifer hier offen sind. Der vorgeschaltete Festwiderstand und die Sicherung verhindern ein Schmelzen des Widerstandsdrahtes durch zu hohen Strom.

Messungen

- Messen Sie die Leerlaufspannung.
- Regeln Sie nun den Strom in zehn äquidistanten Schritten vom kleinsten bis zum größten Wert hoch und messen sie jeweils Strom und Spannung. Überlegen Sie sich dazu, wie Sie im zugänglichen Intervall für die Werte der Stromstärke 10 näherungsweise äquidistante Werte einstellen können, welchen Regler Sie dazu bedienen müssen und welche Größe Sie während der Bedienung des Reglers betrachten müssen. Die galvanische Zelle entlädt sich durch die Belastung, daher sollten Sie den Stromkreis nur während der Messung schließen und die Messwerte möglichst rasch ablesen. Sonst erhalten Sie verfälschte Messergebnisse.
- Messen Sie am Schluss noch einmal die Leerlaufspannung.

Belastung eines Netzgeräts

Vorbereitung

Schalten Sie das Netzgerät in den Bereich 0 V bis 10 V und stellen Sie eine Spannung von zunächst null Volt ein. Tauschen Sie in Ihrer Schaltung die galvanische Zelle durch das Netzgerät aus. Verwenden Sie als variablen Widerstand nun das große Potentiometer, das zunächst auf maximalen Widerstand einzustellen ist. Stellen Sie die Spannung nun auf etwa 10 V ein. Messen Sie die Stromstärke zusätzlich mit Hilfe einer Stromzange. Ihr Betreuer erklärt Ihnen deren Verwendung.

Hinweis: Das Netzgerät wegen der bei allen elektronischen Geräten notwendigen Aufwärmzeit nicht zwischendurch ausschalten.

Messungen

Erhöhen Sie den Belastungsstrom durch Erniedrigung des Potentiometerwiderstandes. Notieren Sie Spannung und Stromstärke (am Multimeter). Notieren Sie den Wert der Stromstärke (am Multimeter), bei dem die Spannung gerade noch nicht abzusinken beginnt.

Beobachtung

Vergleichen Sie während der Messung die angezeigten Stromstärken der beiden Messgeräte (Stromzange und Multimeter).

3.2 Teilversuch 2: Bestätigung des Ohmschen Gesetzes

Inhalt

In dieser Aufgabe sollen Sie eine Schaltung zur Messung eines Widerstandes entwerfen und an diesem Widerstand die Stromstärke in Abhängigkeit von der angelegten Spannung messen. Als Bestätigung des Ohmschen Gesetzes ergibt sich eine lineare Beziehung.

Aufgabe

Entwerfen Sie eine Schaltung zur gleichzeitigen Messung von Strom und Spannung an einem Widerstand, mit der beide Größen möglichst wenig verfälscht werden. Verwenden Sie dafür das Netzgerät, einen Spannungsmesser, einen Strommesser sowie einen Widerstand. Zeigen Sie Ihren Schaltungsentwurf (Schaltskizze) Ihrem Betreuer. Bauen Sie nun die Schaltung mit dem Widerstand R_1 auf.

Messungen

Variieren Sie die Spannung in zehn äquidistanten Schritten von 0 bis etwas unterhalb 20 V und messen Sie jeweils Strom und Spannung. Notieren Sie die für die gewählten Bereiche angegebenen Fehler (beim Wechseln des Messbereiches auf die sich ändernden Fehler achten). Sie sollten wissen, wie die Angaben zu Messunsicherheiten in der technischen Dokumentation eines Multimeters zu interpretieren sind (siehe AMW „Beispiele für die Abschätzung von Messunsicherheiten - Digitalmultimeter“).

Lesen Sie den Widerstandswert von R_1 mit Hilfe der ausliegenden Farbringtablette ab, und messen Sie ihn dann zusätzlich direkt mit einem der Multimeter.

3.3 Teilversuch 3: Spannungsabfall und Potentiometer

Inhalt

Messung der an einem stromdurchflossenen Draht bzw. einem Wendelpotentiometer abfallenden Spannung als Funktion der Drahtlänge.

a) Spannungsabfall am stromdurchflossenen Draht

- Lassen Sie durch den Schleifdraht (siehe Abbildung 22) auf der gesamten Länge einen Strom von etwa 0,5 A fließen (Strommesser in Reihe).
- Stellen Sie nach vorübergehender Erhöhung der Stromstärke auf 1 A durch Berühren fest, dass der Draht sich durch den Stromfluss erwärmt.
- Messen Sie an (mindestens) drei Stellen den Spannungsabfall an 10 cm Draht, indem Sie durch Drücken der beiden zum Multimeter führenden Kabelenden der Messleitungen auf den Draht einen Kontakt herstellen.
- Messen Sie für (mindestens) fünf verschiedene Längen den Spannungsabfall.

b) Spannungsteilung am Potentiometer

Aufbau der Schaltung

- Bauen Sie die Schaltung nach Abbildung 27 auf. Verwenden Sie für den einstellbaren Widerstand das Wendelpotentiometer (Helipot). Schließen Sie an deren Eingang eine feste Spannung von etwa 10 V an.
- Das Innere des Helipots kann an dem geöffneten Musterexemplar angeschaut werden.

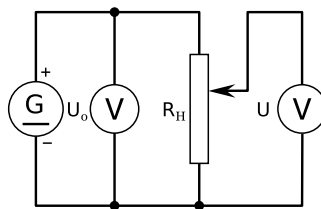


Abbildung 27: Potentiometerschaltung zur Variation von Spannungen

Messungen

- Erhöhen Sie den Skalenwert am Helipot von null beginnend in zehn äquidistanten Schritten bis zum Maximalwert (1000 Skt.). Messen Sie jeweils die abfallende Spannung. Zuletzt sollten beide Instrumente die gleiche Spannung anzeigen.

3.4 Teilversuch 4: Spannungsmessung durch Kompensation

Inhalt

Eine Kompensationsanordnung wird mit einem elektronischen Spannungsnormal kalibriert, um dann die Spannung einer Galvanischen Zelle belastungsfrei zu bestimmen (Leerlaufspannung).

a) Kalibrieren der Kompensationsanordnung

Aufbau der Schaltung

- Bauen Sie die Kompensationsschaltung nach Abbildung 28 auf. Achten Sie dabei auf die richtige Polung des Netzgeräts (NG) und des Spannungsnormals (SN)!
- Überprüfen Sie die Offseteinstellung des Nullinstruments (Hineindrücken der dafür vorgesehenen Taste; falls sich ein deutlicher Ausschlag zeigt, vom Betreuer korrigieren lassen).
- Stellen Sie am Netzgerät eine Spannung von etwa 2 V ein. Diese darf von da ab nicht mehr verändert werden!

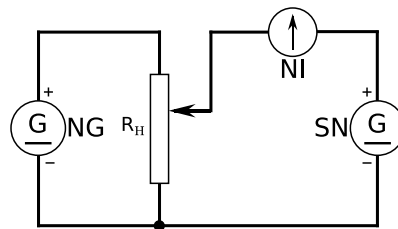


Abbildung 28: Kompensationsschaltung zur belastungsfreien Messung einer Spannung. Die beiden Spannungsquellen müssen gleichsinnig gepolt werden, sonst kann kein Abgleich zustande kommen.

Messung

- Führen Sie die Kompensation aus.
- Notieren Sie die resultierende Helipotstellung.
- Schätzen Sie den Einstellfehler des Helipots ab.
- Überlegen Sie sich, welche Werte (und Unsicherheiten) Sie für die Auswertung benötigen werden.

b) Klemmenspannung einer galvanischen Zelle:

Messung

- Ersetzen Sie das Spannungsnormale (SN) durch die galvanische Zelle.
- Kompensieren Sie die Spannung der galvanischen Zelle.
- Notieren Sie die Einstellung des Helipot.

3.5 Teilversuch 5: Bestätigung der Kirchhoffschen Sätze

Inhalt

Ströme und Spannungen in einem Widerstandsnetzwerk werden gemessen und die beiden Kirchhoffschen Sätze überprüft.

Aufbau der Schaltung

- Bauen Sie das Widerstandsnetzwerk nach Abbildung 29 auf. **Tipp:** Stecken Sie vor jedem Widerstand einen zusätzlichen Verbindungsstecker ein, um für die Strommessung ein Multimeter einfügen zu können.
- Stellen Sie die Spannung am Netzgerät auf 10 V ein.

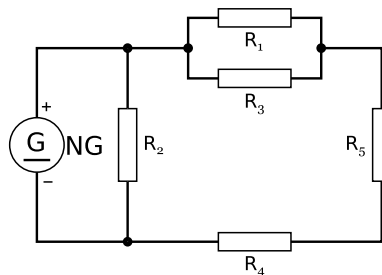


Abbildung 29: Widerstandsnetzwerk zur Überprüfung der Kirchhoffschen Sätze

Messungen

- Übertragen Sie die Zeichnung in Ihr Protokoll.
- Messen Sie nun nacheinander alle Ströme und Spannungen in den verschiedenen Zweigen.
- Ermitteln Sie die richtigen Vorzeichen der Messwerte.
- Kennzeichnen Sie dementsprechend in der Zeichnung die Richtungen der Ströme und die Polungen der Spannungen.

4 Auswertung

4.1 Teilversuch 1: Belastungsabhängigkeit zweier Spannungsquellen

- Tragen Sie die an der galvanischen Zelle gemessene Klemmenspannung gegen den Belastungsstrom auf.
- Legen Sie eine optimale Gerade durch alle Messpunkte. Ignorieren Sie dabei zunächst den Wert für $I = 0$ (Begründung später).
- Ermitteln Sie aus der Geraden den Innenwiderstand der galvanischen Zelle (ohne Fehler).
- Extrapolieren Sie die Gerade auf $I = 0$. Das liefert meistens eine höhere Leerlaufspannung als die am Anfang gemessene. Aus dem am Ende gemessenen Wert ergibt sich, dass die Leerlaufspannung durch die Belastung kleiner geworden ist. Nach genügend langer Wartezeit würde sich wieder der ursprüngliche Wert einstellen. Durch den Stromfluss wird das chemische Gleichgewicht an den Elektroden gestört und stellt sich nur langsam wieder ein.
- Diskutieren Sie das Verhalten des Netzgeräts. Worin besteht der Unterschied zur galvanischen Zelle?

4.2 Teilversuch 2: Bestätigung des Ohmschen Gesetzes

- Tragen Sie die gemessenen Werte in einem Diagramm auf.
- Bestimmen Sie aus dem Diagramm den Widerstandswert. Fehlerbestimmung aus der Grafik.
- Vergleichen Sie den berechneten Wert mit dem direkt gemessenen Wert und den Angaben des Herstellers (mit Toleranz).

4.3 Teilversuch 3: Spannungsabfall und Potentiometer

- Tragen Sie die Ausgangsspannungen des Helipots gegen die Skalenwerte des Helipots auf.
- Diskutieren Sie Ihr Ergebnis (sowohl die Beobachtungen bei Teilversuch 3a „Spannungsabfall am stromdurchflossenden Draht“ als auch die Ergebnisse bei Teilversuch 3b „Spannungsteilung am Potentiometer“).

4.4 Teilversuch 4: Spannungsmessung durch Kompensation

a) Kalibrieren der Kompensationsanordnung

- Berechnen Sie die Spannung des Netzgerätes.
- Prüfen Sie, ob der (angegebene) Fehler des Spannungsnormals zu vernachlässigen ist.

b) Klemmenspannung einer galvanischen Zelle:

- Berechnen Sie die Spannung der galvanischen Zelle.
- Vergleichen Sie Ihr Ergebnis mit dem aus Teilversuch 1.
- Warum kann man die in Teilversuch 4 bestimmte Spannung als Leerlaufspannung bezeichnen?

4.5 Teilversuch 5: Bestätigung der Kirchhoffschen Sätze

Überprüfen Sie für alle Knoten und alle Maschen, ob die Kirchhoffschen Sätze durch die Messergebnisse bestätigt werden.