

# Versuch 232

## Gleichströme, Spannungsquellen und Widerstände

**Lernziel:** Der Versuch behandelt die Themen „Spannungsquelle“ und „Widerstand“ und verwendet Kompensations- und Brückenschaltungen.

Er soll mit charakteristischen Eigenschaften von Spannungsquellen wie Leerlaufspannung, Innenwiderstand und Klemmenspannung vertraut machen. Als wichtiges Beispiel für die Modifizierung einer vorhandenen Spannungsquelle zur Erfüllung äußerer Anforderungen wird die Spannungsteilerschaltung vorgestellt. Das Verhalten eines Spannungsteilers unter Belastung wird gemessen. Eine Spannungsquelle mit variabler Klemmenspannung wird zur Messung der Leerlaufspannung einer Batterie mit Hilfe einer Kompensationsschaltung genutzt.

Die Messung ohmscher Widerstände, sowohl absolut mit Strom- und Spannungsmessgeräten und den erforderlichen Korrekturen als auch relativ mit der Wheatstoneschen Brückenschaltung, soll geübt werden. Zudem sollen charakteristische Leitertypen durch Messung der Temperaturabhängigkeit ihres elektrischen Widerstandes unterschieden und verstanden werden.

**Kenntnisse:** Ohmsches Gesetz, Kirchhoffsche Gesetze, Stromrichtige und Spannungsrichtige Messung, elektrische Leitfähigkeit von Leitern, Halbleitern und Isolatoren, Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes, Leitungsmechanismen

Ideale und reale Spannungsquelle, Innenwiderstand von Spannungsquellen, Leerlauf- und Klemmenspannung, Aufbau und Wirkungsweise eines Normalelementes und einer Batterie, Spannungsteiler, Lastanpassung

Ampère- und Voltmeter, Innenwiderstand dieser Messgeräte, Veränderung des Messbereichs durch Parallel- bzw. Serien-/Vorwiderstand und deren Einfluss auf die Messung;

Potentiometerschaltung, Wheatstonesche Brückenschaltung, Kompensationsschaltung

**Sicherheitshinweise:** Die Thermostatbecken (inklusive Deckel) werden bis zu 100 °C heiß (Verbrennungsgefahr!).

Das Wasser im Thermostatbecken sollte mindestens 2 cm über dem Ausgangsrohr und maximal bis 2 cm unter der Oberkante des Thermostatbeckens stehen. Das Wasserbecken darf nur durch ihre(n) Tutor(in) aufgefüllt werden, falls der Füllstand dies erfordert.

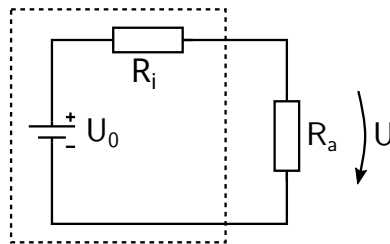


Abbildung 232.1: Ersatzschaltbild einer realen Spannungsquelle

- Geräte:**
- Helipot
  - Mavometer
  - Drehspulmessgerät
  - Nullinstrument
  - Digitalmultimeter
  - Referenzwiderstände
  - Board mit unterschiedlichen Widerständen
  - Thermostat mit Heizung

## 232.1 Erläuterungen

### 232.1.1 Spannungs- und Stromquellen

Eine **ideale Spannungsquelle** liefert eine vom entnommenen Strom unabhängige Spannung  $U_0$ . Eine **reale Spannungsquelle** liefert eine stromabhängige Spannung. Sie lässt sich in einem Ersatzschaltbild als ideale Spannungsquelle mit einem in Reihe geschalteten **Innenwiderstand**  $R_i$  darstellen (Abb. 232.1). Die **Klemmenspannung**  $U$  beträgt

$$U = U_0 - R_i I = U_0 \cdot \frac{R_a}{R_a + R_i} = U_0 \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_i}{R_a}}. \quad (232.1)$$

Sie ist lastabhängig. Mit abnehmender Belastung, d.h.  $R_a \rightarrow \infty$ , gilt  $U \rightarrow U_0$ . Daher heißt  $U_0$  **Leerlaufspannung**. Für eine gegebene Spannungsquelle sind  $U_0$  und  $R_i$  i.a. Konstanten.  $R_i$  ist differentiell definiert:  $R_i := \frac{\partial U}{\partial I}$ .

**Aufgabe 232.A:** Definieren Sie eine ideale Stromquelle. Zeichnen Sie das Ersatzschaltbild für eine reale Stromquelle.

**Aufgabe 232.B:** Leiten Sie die Gleichung für die Klemmenspannung  $U$  in (Gleichung 232.1) her.

**Aufgabe 232.C:** Geben Sie eine Messvorschrift zur Bestimmung der Leerlaufspannung  $U_0$  und des Innenwiderstands  $R_i$  einer realen Spannungsquelle an.

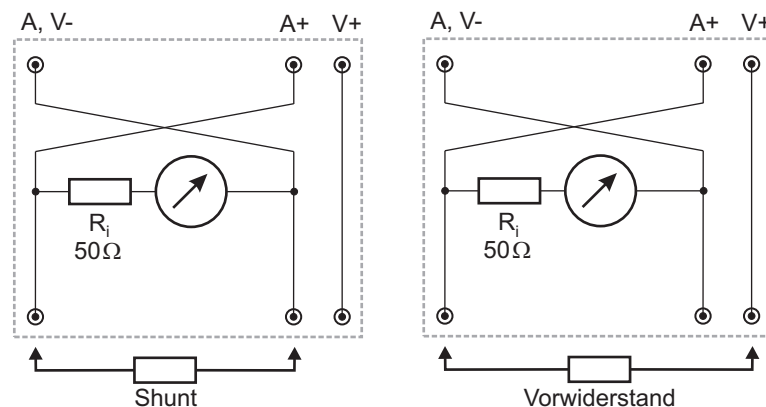


Abbildung 232.2: Aufbau eines Mavometers: Innenwiderstand  $R_i = 50 \Omega$ ; Bei Vollausschlag:  $I = 2 \text{ mA}$  bzw.  $U = 0,1 \text{ V}$ .

### 232.1.2 Messgeräte

Ströme lassen sich direkt mithilfe von Drehspulgalvanometern messen; wird die Spule von einem elektrischen Strom durchflossen, kommt es zu einer Auslenkung des Zeigerinstruments, die proportional zur Stromstärke ist. Durch das Nutzen bekannter Widerstände lässt sich der gemessene Strom in Spannung umrechnen.

Häufig wird zur Messung elektrischer Größen ein sog. Mavometer verwendet (**Mavometer** = **Milliampere-Volt-Meter**). Dabei handelt es sich um ein Drehspulgalvanometer, das je nach Verschaltung Strom oder Spannung messen kann (Abb. 232.2). Durch die Kenndaten des Geräts ist sein Innenwiderstand bekannt und somit der Maximalstrom und die Maximalspannung, welche durch die Spule fließen bzw. an ihr anliegen dürfen. Sollen größere Ströme gemessen werden, muss ein entsprechend großer Anteil des Stromes über einen parallel geschalteten Widerstand („Shunt“) an der Spule vorbei geleitet werden. Demnach muss zur Messung größerer Spannungen ein entsprechend großer Spannungsanteil über einem in Serie geschalteten Vorwiderstand abfallen. Drehspulmessinstrumente, deren Messbereich sich umschalten lässt (bspw. mittels eines Drehknopfs), haben entsprechende Vorwiderstände bzw. Shunts eingebaut.

Im Vergleich zu den im Praktikum meistens verwendeten „analogen“ Messgeräten (Ablesen von Zeigerinstrumenten) suggerieren „digitale“ Messgeräte (Ablesen einer Zahl) wegen ihrer fehlenden Ablesungenauigkeiten eine höhere Messgenauigkeit, funktionieren aber auf dem gleichen Prinzip.

### 232.1.3 Spannungsteiler- und Potentiometerschaltung

Häufig möchte man sich mit einer vorhandenen Spannungsquelle  $U_0$  eine geeignete Klemmenspannung  $U_K$  herstellen. Dies kann man entweder durch eine Spannungsteilerschaltung ( $R_1$  und  $R_2$  fest) oder durch eine Potentiometerschaltung, bei der sich der Gesamtwiderstand  $R = R_X + R_Y$  kontinuierlich teilen lässt (Abb. 232.3) realisieren. Einstellbare Spannungsteiler sind häufig so ausgebildet, dass man statt der Widerstandswerte  $R_X$  (oder  $R_Y$ ) dazu proportionale Größen wie z.B. eine Länge  $x$  (beim Schiebewiderstand) oder Skalenteile (beim **Helipot** = **helixförmig** gewickeltes Langdraht**potentiometer**) abliest.

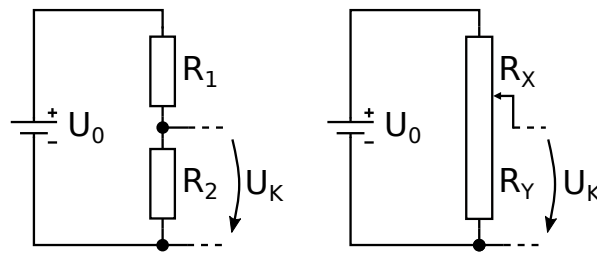


Abbildung 232.3: Spannungsteiler- bzw. Potentiometerschaltung

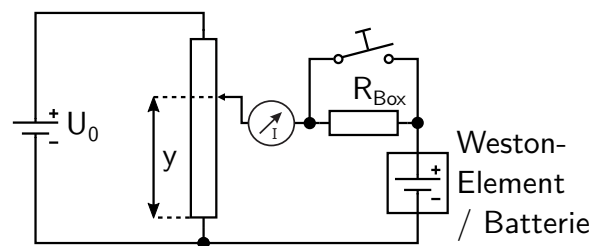


Abbildung 232.4: Kompensationsschaltung nach Poggendorff

### 232.1.4 Kompensationsschaltung

Mit einer Kompensationsschaltung nach Poggendorff kann stromlos gemessen, und daher die Leerlaufspannung einer unbekannten Spannungsquelle ermittelt werden, ohne diese zu belasten (Abb. 232.4).

Mithilfe des Potentiometers wird die Kompensationsspannung so lange variiert, bis das Strommessgerät keinen Ausschlag mehr zeigt. Diese Stromlosigkeit wird mit einem Nullinstrument (Galvanometer mit Nullpunkt in Skalenmitte) festgestellt. Zum Nullabgleich genügt es nicht, wenn der Zeiger auf null zeigt; vielmehr darf der Zeiger beim Betätigen des Tasters nicht mehr zucken.

Ist dieser Zustand erreicht, muss die angelegte Spannung gleich der unbekannten Spannung (hier: der Batterie) sein. Da die Messung der unbekannten Spannung durch diese Methode stromlos funktioniert (das Strommessgerät zeigt keinen Ausschlag mehr!) kann so vergleichsweise einfach die Leerlaufspannung einer Spannungsquelle gemessen werden. Das Weston-Element mit bekannter Spannung dient zur Kalibration des Spannungsteilers.

### 232.1.5 Wheatstonesche Brücke

Die „Wheatstonesche Brücke“ kann für jegliche Messungen von elektrischen Widerständen gebraucht werden.

Dabei werden zwei Spannungsteiler parallel geschaltet und durch ein Strommessgerät miteinander „verbunden“ (Abb. 232.5). Ist das Verhältnis der Widerstände der Spannungsteiler gleich groß, herrscht auf beiden Seiten das gleiche Potential und es fließt kein Strom.

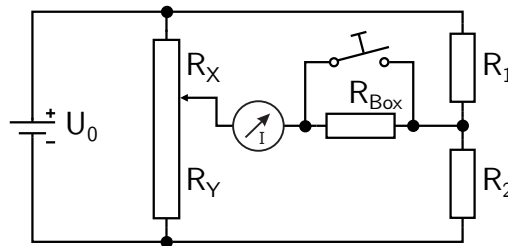


Abbildung 232.5: Wheatstonesche Brücke

Aus den Verhältnissen können nun beliebige (die Widerstände betreffende) Größen berechnet werden (z.B. die Größe eines unbekannten Widerstands oder relative Widerstandsänderungen).

Die Wheatstonesche Brückenschaltung wird bspw. oft bei Sensoren o.ä. eingesetzt, da schon kleine Temperatur- oder Längenänderungen relative Widerstandsänderungen bewirken.

**Aufgabe 232.D:** Leiten Sie die Beziehung  $R_X = \frac{R_1}{R_2} \cdot R_Y$  für die abgegliche Schaltung ( $I = 0$ ) ab (Abb. 232.5).

**Aufgabe 232.E:** Sie wollen mit einem Ampèremeter mit Vollausschlag 1 mA und Innenwiderstand  $R_i = 1 \Omega$  einen Strom von 4 A messen. Schlagen Sie eine geeignete Schaltung dafür vor.

**Aufgabe 232.F:** Sie wollen mit einem Voltmeter mit Vollausschlag 1 V und Innenwiderstand  $R_i = 100 \text{ k}\Omega$  einen Strom von 10  $\mu\text{A}$  messen. Was müssen Sie tun?

**Aufgabe 232.G:** Können Sie mit einem Ampèremeter Spannungen messen? Welche Bedingungen müssen erfüllt sein?

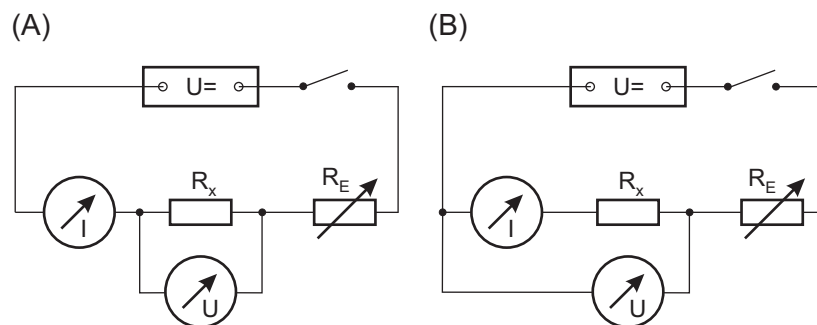


Abbildung 232.6: Schaltungen zur Bestimmung von Widerständen mit einer Strom- und Spannungsmessung.

**Aufgabe 232.H:** Geben Sie die Formeln für die Klemmenwiderstände  $R_A$  und  $R_B$  (in Abb. 232.6 (A) und (B)) über den Spannungsmesser an. Berücksichtigen Sie bei Ihrer Rechnung alle relevanten Widerstände, inklusive des einstellbaren Widerstandes  $R_E$ , sowie der Innenwiderstände  $R_I$  und  $R_U$  von Strom- und Spannungsmesser! Für welche Größen(-Ordnung) des zu bestimmenden Widerstandes  $R_x$  ist welche Schaltung (A oder B) geeignet?

### 232.1.6 Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes

Die Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes  $R$  ist für verschiedene Materialien charakteristisch und soll exemplarisch für

- einen reinen Halbleiter („Heißleiter“, oder NTC<sup>1</sup>-Widerstand)
- eine metallische Legierung (Konstantan-Widerstand)
- einen PTC<sup>2</sup>-Widerstand („Kaltleiter“)
- einen reinen metallischen Leiter (Platin)
- einen Kohleschicht-Widerstand

untersucht werden. Ihr grundlegendes Verhalten soll diskutiert und verstanden werden.

Es gibt folgende fundamentale Beziehung

$$\text{elektrische Leitfähigkeit: } \sigma = e \cdot (n^- z^- \mu^- + n^+ z^+ \mu^+), \quad (232.2)$$

mit:  $n^\pm$  = positive bzw. negative Ladungsträgerdichte (Anzahl pro Volumen),  
 $z^\pm$  = Wertigkeiten der pos. bzw. neg. Ladungsträger,  
 $\mu^\pm$  = Beweglichkeiten der pos. bzw. neg. Ladungsträger.

Im **metallischen Leiter** tragen ausschließlich die Elektronen zur Stromleitung bei. Dadurch vereinfacht sich der Ausdruck für die elektrische Leitfähigkeit (Gleichung 232.2) in Metallen zu  $\sigma = e \cdot n^- \mu^-$ . Die Zahl der beteiligten Elektronen im Metall ist durch die Zahl der Atome bestimmt: Jedes Atom stellt im Mittel ein Leitungselektron zur Verfügung, unabhängig von der Temperatur. Die Beweglichkeit der Elektronen wird durch ihre Streuung an den „Phononen“ auf dem Weg durch den Kristall bestimmt. Phononen sind als Quasi-Teilchen aufgefasste Gitterschwingungen, deren Anzahl von der Temperatur bestimmt wird: je höher die Temperatur, desto mehr Phononen, desto mehr Streuung und desto geringere Beweglichkeit. Eine komplizierte Rechnung zeigt:  $\mu \propto 1/T$ . Daraus folgt unmittelbar für die elektrische Leitfähigkeit  $\sigma$  in Metallen:

$$\sigma = e \cdot n^- \mu^-(T) \propto 1/T \quad \text{bzw.} \quad 1/\sigma = \rho \propto R \propto T. \quad (232.3)$$

Eine genaue Messung des Widerstandsverlaufs bei tiefen Temperaturen ergibt, dass mit sinkender Temperatur der spezifische Widerstand  $\rho$  einen temperaturunabhängigen Wert annimmt, der vom Reinheitsgrad des Metalls abhängt<sup>3</sup> (siehe Abb. 232.7). Je mehr Störstellen das Material aufweist, desto größer ist der spezifische Restwiderstand  $\rho_i$ .

In **reinen Halbleitern** (Ge, Si, Cu<sub>2</sub>O, GaAs, usw.) wird die elektrische Leitfähigkeit mit Hilfe des Bändermodells (siehe Abb. 232.8) wie folgt beschrieben: Bei sehr tiefen Temperaturen sind alle Zustände im Valenzband (VB) gefüllt, das Leitungsband (LB) ist völlig leer; zwischen beiden

<sup>1</sup> NTC: Negative Temperature Coefficient

<sup>2</sup> PTC: Positive Temperature Coefficient

<sup>3</sup> Einige Materialien, sog. Supraleiter, zeigen ein hiervon abweichendes Verhalten: Unterhalb einer gewissen Temperatur verschwindet deren elektrischer Widerstand vollständig.

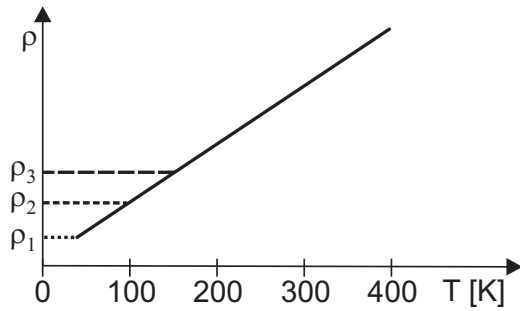


Abbildung 232.7: Metallische Leitung: Spezifischer Widerstand  $\rho$  als Funktion der Temperatur  $T$ , exemplarisch für drei Materialien mit unterschiedlichen Restwiderständen  $\rho_i$ .

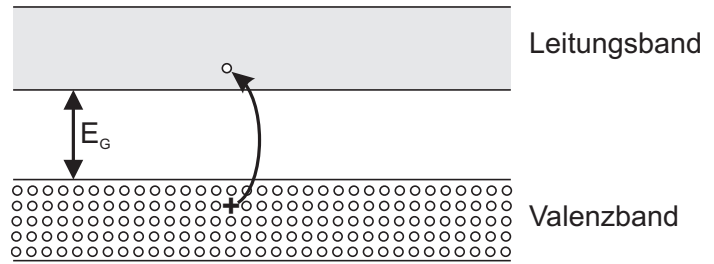


Abbildung 232.8: Bändermodell eines Halbleiters

Bändern gibt es ein verbotenes Gebiet, in dem es bei reinen Halbleitern keine möglichen Zustände gibt. Die Breite dieses verbotenen Gebietes wird als „Gap“-Energie  $E_G$  bezeichnet. Bei sehr tiefen Temperaturen ( $T \approx 0$  K) ist ein reiner Halbleiter ein perfekter Isolator. Wird die Temperatur erhöht, werden einzelne Elektronen in das LB angeregt, wobei sie Löcher im VB hinterlassen; diese Löcher entsprechen positiven Ladungen. Beide Ladungsträgerarten zusammen sorgen für die sogenannte **Eigenleitung**. Die Anzahldichten der negativen und positiven Ladungen  $n^-$  und  $n^+$  sind gleich groß und gleich  $n$ . Die quantenmechanische Berechnung von  $n$  ergibt:

$$n(T) \propto T^{+\frac{3}{2}} \cdot e^{-\frac{E_G}{2kT}}. \quad (232.4)$$

Die Größe  $k$  kennzeichnet hierbei für die Boltzmann-Konstante. Die Beweglichkeiten  $\mu^-$  und  $\mu^+$  sind im Allgemeinen einander ähnlich und von der Temperatur abhängig. Die Beweglichkeit wird wie im Fall der metallischen Leitung durch Phononenstreuung bestimmt, und die Berechnung ergibt für den Fall des Halbleiters:

$$\mu(T) \propto T^{-\frac{3}{2}}. \quad (232.5)$$

Damit kann die elektrische Leitfähigkeit  $\sigma$  wie folgt berechnet werden:

$$\sigma = 2e \cdot n(T) \cdot \mu(T) \propto T^{+\frac{3}{2}} \cdot e^{-\frac{E_G}{2kT}} \cdot T^{-\frac{3}{2}} = e^{-\frac{E_G}{2kT}}. \quad (232.6)$$

Dies gilt für reine Halbleiter ohne Dotierung, also reine Eigenleitung (intrinsic conduction). Der elektrische Widerstand nimmt mit steigender Temperatur ab, daher der Name „Heißeleiter“ bzw. „negative temperature coefficient“-Widerstand oder kurz NTC-Widerstand. Zur Auswertung des Experimentes wird der Widerstand  $R$  wegen  $R \propto \rho = 1/\sigma$  angesetzt zu:

$$R = R_0 \cdot e^{\frac{E_G}{2kT}}. \quad (232.7)$$

Um einen Eindruck von der Größenordnung der Gap-Energien  $E_G$  zu bekommen, hier ein paar Beispiele:

Material:	InSb	Ge	Si	GaAs	Cu <sub>2</sub> O	Diamant
$E_G$ [eV]:	0.18	0.7	1.1	1.42	2.1	6

Die meisten **PTC-Widerstände** bestehen aus dotierten polykristallinen Keramiken. Die Keramiken weisen einen hohen elektrischen Widerstand auf, durch die Dotierung bekommen die Materialien jedoch gewisse Halbleitereigenschaften. Unterhalb und oberhalb der sog. materialspezifischen Curie-Temperatur sind die elektrischen Eigenschaften stark verschieden. Bei kleinen Temperaturen zeigen PTC-Widerstände ein NTC-Verhalten. Nach Durchschreiten eines minimalen Widerstandwertes, kommt es jedoch wieder zu einem Anstieg. Nähert man sich der Curie-Temperatur, kommt es durch den Phasenübergang zu einem rasenten Anstieg des elektrischen Widerstandes mit der Temperatur. Nach Erreichen eines Maximalwertes stellt sich schließlich wieder NTC-artiges Verhalten ein. Insgesamt ergibt sich also ein hochgradig nichtlineares Verhalten.

## 232.2 Versuchdurchführung

### 232.2.1 Widerstandsbestimmung durch Strom- und Spannungsmessung

**Aufgabe 232.a:** Messen und zeichnen Sie die  $U$ - $I$ -Abhängigkeit in einer der beiden Schaltungen aus Abb. 232.6. Benutzen Sie hierbei zwei Mavometer, deren Messbereiche Sie mit Parallel- bzw. Vorwiderständen geeignet einstellen (Abb. 232.2). Bestimmen sie aus der  $U$ - $I$ -Kurve zu Schaltung A bzw. B deren effektiven Widerstand  $R_A$  bzw.  $R_B$ , über den  $U$  und  $I$  verknüpft sind.

**Aufgabe 232.b:** Bestimmen Sie den Wert des Widerstandes  $R_x$  unter Berücksichtigung der Innenwiderstände der Messinstrumente. Tragen Sie dann zusätzlich die Gerade  $U = R_x \cdot I$  in das Diagramm ein.

**Aufgabe 232.c:** Überprüfen Sie den Wert des Widerstandes  $R_x$  mit einem Digitalmultimeter.

### 232.2.2 Belastete Potentiometerschaltung

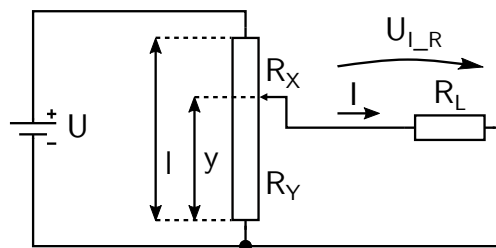


Abbildung 232.9: Belastete Potentiometerschaltung

Die vorhandene Spannungsquelle ((2 – 4) V) ist stabilisiert, und daher ist  $R_i \approx 0 \Omega$ . Bauen Sie damit und aus  $R_X = 20 \Omega$ ,  $R_Y = 50 \Omega$  eine Spannungsteilerschaltung auf (Abb. 232.9). Als Last



verwenden Sie die Widerstandskaskade ( $R_L = (0 - 130) \Omega$ ). Der Spannungsmesser hat einen relativ hohen Widerstand und stellt somit eine kleine Last dar.

**Aufgabe 232.d:** Messen Sie für verschiedene Lastwiderstände  $R_L$  (maximal 10 verschiedene  $R_L$ ) den Strom  $I$  durch den Lastwiderstand und die Spannung  $U_{L,R}$  über dem Lastwiderstand und dem Ampèremeter. Verwenden Sie das Mavometer zur Strommessung und zur Spannungsmessung. Der Innenwiderstand des Mavometers ist bekannt und soll berücksichtigt werden (Abb. 232.2).

**Aufgabe 232.e:** Betrachten Sie die Spannungsteilerschaltung (Spannungsquelle + Spannungsteiler) (Abb. 232.3) als neue Spannungsquelle (die die über  $R_2$  abfallende Spannung liefert) und das entsprechende Ersatzschaltbild (Abb. 232.1). Bestimmen Sie aus den gemessenen Werten die Größen Innenwiderstand  $R_i^S$  und Leerlaufspannung  $U_0^S$ . Zeichnen Sie hierzu ein  $U$ - $I$ -Diagramm und verifizieren Sie die Relation:

$$U = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_0 - \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \cdot I = U_0^S - R_i^S \cdot I. \quad (232.8)$$

Hierbei bezeichnet  $U_0$  die Spannung der Spannungsquelle, die am Spannungsteiler angeschlossen ist. Was könnten Sie tun, um unter Beibehaltung des Wertes von  $U_0^S$  den Innenwiderstand  $R_i^S$  zu verkleinern?

Warum kann man das nicht beliebig weit treiben?

**Aufgabe 232.f:** Setzen Sie nun anstelle des Spannungsteilers das Potentiometer (Helipot) ein (Abb. 232.9, es werden jeweils nur die Messinstrumente in die Schaltung eingebaut, die benötigt werden.) Bestätigen Sie ohne Last ( $R_L = \infty \Omega$ ) die lineare Relation

$$U_{IL} = \frac{R_Y}{R_X + R_Y} \cdot U_0 = \frac{x}{\ell} \cdot U_0. \quad (232.9)$$

Beim Helipot werden die Größen  $x$  und  $\ell$  in Skalenteilen abgelesen und angegeben. Wiederholen Sie die Messung für die Lastwiderstände  $R_L = 20 \Omega$  und  $R_L = 50 \Omega$ . Zeichnen Sie alles zusammen in ein Diagramm ein und diskutieren Sie das Ergebnis.

### 232.2.3 Messung der Leerlaufspannung einer Batterie mit Hilfe einer Kompensationsschaltung (nach Poggendorf)

Ein Weston-Element dient als Spannungsnormalelement. Seine Spannung beträgt  $U = (1,0190 \pm 0,0005) \text{ V}$  in unbelastetem Zustand,  $I \leq 10^{-5} \text{ A}$ . Das Nullinstrument ist ein Galvanometer mit Nullpunkt in der Skalenmitte.

**Aufgabe 232.g:** Unter Verwendung eines stabilisierten Netzgeräts wird eine Hilfsspannungsquelle (Spannungsteiler) durch das Weston Element (Abb. 232.4) kalibriert. Als Potentiometer wird ein Schleifdrahtpotentiometer verwendet.

Zum Schutz des Normalelements und des Nullinstruments muss zu Beginn ein relativ hoher Widerstand vorgeschaltet werden. Nach erfolgtem groben Abgleich wird dieser zur Erhöhung

der Empfindlichkeit mit dem Taster überbrückt. Widerstand und Taster sind in einem Kästchen eingebaut.

**Aufgabe 232.h:** Messen Sie die Leerlaufspannung einer Batterie (mit unbekannter Spannung) mit Hilfe der kalibrierten Anordnung (Abb. 232.4).

Wie variiert der Messfehler mit dem  $y$ -Wert?

Wäre es gut, ein Spannungselement von 10 V zu verwenden?

**Aufgabe 232.i:** Messung der Leerlaufspannung derselben Batterie mit Mavometer und mit Digitalmessgerät. Erklären Sie, warum das Mavometer die Batteriespannung nicht richtig misst.

### 232.2.4 Widerstandsmessung mit der Wheatstoneschen Brücke

Bauen Sie die Wheatstonesche Brücke gemäß Abb. 232.5 auf. Als Nullinstrument dient wieder das Pultgalvanometer im grünen Gehäuse mit der Ruhestellung des Zeigers in der Mitte der Skala. Seine Daten sind: Spannung bei Vollausschlag: 4 mV, Innenwiderstand: 100  $\Omega$ . **Es darf höchstens zehnfach überlastet werden.**

**Aufgabe 232.j:** Bestimmen Sie hiermit einen unbekannten Widerstand  $R_1$ . Als Potentiometer wird ein „Helipot“ (Präzisions-Potentiometer mit 1000 Skalenteilen) benutzt.

**Aufgabe 232.k:** Welchen Wert sollte der Widerstand  $R_{Box}$  ungefähr haben, wenn er – bei nicht gedrücktem Taster  $T$  – einerseits das Nullinstrument  $U$  ausreichend vor Überlastung schützen, andererseits die Empfindlichkeit nicht übermäßig reduzieren soll?

### 232.2.5 Messung der Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes

In einem Thermostaten mit einstellbarer elektrischer Heizung befindet sich Wasser. In dieses Wasserbad ist eine Platine mit fünf verschiedenen Widerständen eingetaucht:

1. NTP-Widerstand
2. Konstantan-Widerstand
3. PTC-Widerstand
4. Platin-Widerstand
5. Kohleschichtwiderstand

Es soll der Widerstand  $R(T)$  für die fünf Leiter im Bereich von Raumtemperatur bis knapp 100 °C gemessen und in geeigneter Weise grafisch dargestellt werden. Die Widerstände sind mit einem Digitalmultimeter zu messen. Die elektrische Leitfähigkeit des Wassers kann im Vergleich zu den Leitfähigkeiten der eingebauten Leiter als vernachlässigbar angesehen werden.

Der Widerstand des metallischen Leiters soll durch

$$R(T) = R_0(1 + \alpha\vartheta), \quad (232.10)$$

$R_0$  = Widerstand bei 0 °C,  
 $\vartheta$  = Temperatur in Celsius,  
 $\alpha$  = Temperaturkoeffizient,

der Widerstand des Halbleiters durch

$$R(T) = R_0 e^{\frac{E_G}{2kT}}, \quad (232.11)$$

$R_0$  = Konstante ohne besondere physikalische Bedeutung,  
 $E_G$  = charakteristische Gap-Energie, die von der Art des Halbleiters abhängig ist,  
 $k$  = Boltzmann-Konstante,  
 $T$  = Temperatur in Kelvin,

dargestellt werden.

Die Versuche werden grafisch, auf zwei verschiedene Arten ausgewertet, so dass durch eine geschickte Wahl der Darstellung die gesuchten Parameter  $\alpha$  und  $E_G$  gewonnen werden können. Aus der Gap-Energie des Halbleiters soll die Art des Halbleiters bestimmt werden.

**Aufgabe 232.l:** Heizen Sie mit dem Thermostaten die Temperatur im Reagenzglas langsam von Raumtemperatur auf knapp 100 °C auf und messen Sie dabei immer abwechselnd die Widerstände der fünf Leiter: Bei jeder Widerstandsmessung lesen Sie auch das Temperaturanzeige des Thermostaten ab und tragen die Werte in eine Tabelle ein. Achtung: Die Wasserbecken nie ohne oder mit zu wenig Wasser betreiben! Um eine Beschädigung der Platine zu vermeiden, stecken Sie bitte beim Wechsel von einem Widerstand zum nächsten die Kabel am Multimeter um. Die Stecker in den Platinenbuchsen sollen nicht entfernt werden.

**Aufgabe 232.m:** Berechnen Sie aus diesen Daten  $R(T)$  und tragen Sie auf:

- Für die metallischen Leiter und den Kohleschichtwiderstand:  
 $R$  als Funktion von  $\vartheta$  (Celsius-Temperatur) auf Millimeter-Papier. Berechnen Sie  $\alpha$  einschließlich einer Fehlerabschätzung und diskutieren Sie das Verhalten von  $R$  bei der Annäherung an den absoluten Nullpunkt der Temperatur.
- Für den Halbleiter:  
Den natürlichen Logarithmus des Widerstands  $\ln(R/\Omega)$  als Funktion von  $1/T$  ( $T$  = absolute Temperatur) auf Millimeter-Papier, oder einfacher:  $R$  als Funktion von  $1/T$  auf halblogarithmischem Papier. Bestimmen Sie die Gap-Energie  $E_G$  in eV einschließlich einer Fehlerabschätzung.
- Für den PTC-Widerstand: Tragen Sie den natürlichen Logarithmus des Widerstandes  $\ln(R/\Omega)$  als Funktion von  $\vartheta$  (Celsius-Temperatur) auf. Schätzen Sie aus dem Graphen die Lage der Curie-Temperatur ab (inklusive Angabe der Unsicherheit)!