

Physikalisches Grundpraktikum

Praktikum für Mediziner		
E1 Der Gleichstromkreis		
Name:	Versuchsgruppe:	Datum:
Mitarbeiter der Versuchsgruppe:		lfd. Versuchs-Nr:

Aufgaben

Vorbereitungsaufgaben

1. Erhöht sich die an einem Heizgerät mit dem Widerstand von $15\ \Omega$ liegende Spannung um $3\ \text{V}$, so nimmt die Leistung um $88,5\ \text{W}$ zu. Wie groß sind die ursprüngliche Spannung und Leistung?
2. Die Klemmspannung einer Spannungsquelle wird von einem Voltmeter mit einem Innenwiderstand von $800\ \Omega$ zu $15\ \text{V}$ bestimmt, von einem anderen Voltmeter mit einem Innenwiderstand von $500\ \Omega$ zu $10\ \text{V}$. Wie groß sind Innenwiderstand und Leerlaufspannung der Spannungsquelle?

Messaufgaben

1. Bestimmen Sie bei 5 unterschiedlichen Positionen des Drehknopfes des Spannungsteilers die Teilspannungen U_1 und U_2 .
2. Messen Sie mit dem Digitalmultimeter Ihren Körperwiderstand zwischen linker und rechter Hand.
3. Messen Sie die Strom-Spannungs-Charakteristik des Widerstandes R_1 und bestimmen Sie aus dem dazugehörigen Diagramm den Wert des Widerstandes R_1 .
4. Bestimmen Sie den Widerstand einer Parallelschaltung und einer Serienschaltung von zwei unbekanntem Widerständen. Errechnen Sie aus den Messwerten die Teilwiderstände.
5. Ermitteln Sie die Strom-Spannungskennlinie einer Glühlampe im Spannungsbereich $0 \dots 1\ \text{V}$

Geräteliste:

Grundplatine, Netzteil, Spannungsregler, 2 Multimeter, 8 Laborschnüre

Motivation

Bekanntermaßen können durch den menschlichen Körper sowohl ein Gleich- als auch ein Wechselstrom fließen (Abb.1). Dieses setzt neben einer Spannungsquelle einen endlichen Widerstand voraus. Bedingt durch die Struktur des menschlichen Körpers kann man sich den

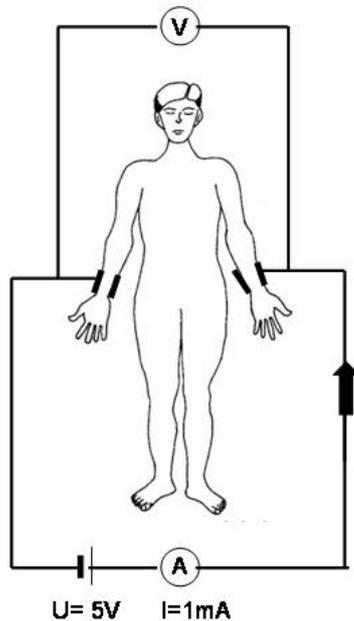


Abb. 1

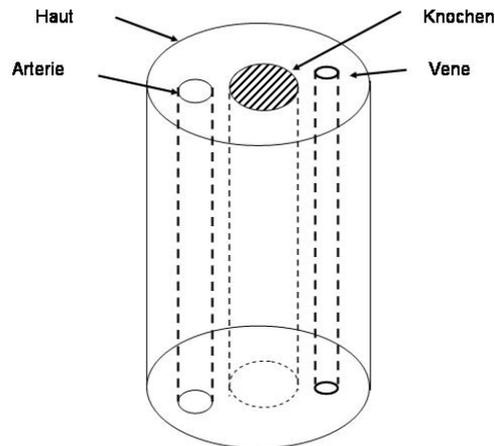


Abb. 2

Stromfluss als Fluss durch ein Gebiet mit unterschiedlichsten elektrischen Widerständen vorstellen. Durch Gliedmaßen z.B. erfolgt der Stromfluss durch eine Parallelschaltung der Widerstände von Haut, Arterie, Vene, Knochen und Muskel-, Fett- und Bindegewebe,... (Abb.2)

Alle Gewebe sind aus Zellen aufgebaut, die von einer etwa 6 nm dicken Zellmembran mit einem sehr hohen spezifischen Widerstand (Resistivität) umgeben sind. Die intrazelluläre Flüssigkeit besitzt eine Resistivität von rund $0,6 \Omega m$, die extrazelluläre Flüssigkeit eine solche von rund $1 \Omega m$. Die Resistivität der intakten Zellmembran hängt auch vom Zustand der penetrierenden Proteine ab. Wegen des größeren Membranwiderstands fließt Gleichstrom praktisch nur durch den extrazellulären Raum.

Mit zunehmender Frequenz nimmt der kapazitive Widerstand der Zellmembran ab (siehe Aufgabe Wechselstrom). Wegen der im Allgemeinen größeren Querschnittsfläche des intrazellulären Raums und der etwas niedrigeren Resistivität der intrazellulären Flüssigkeit beginnt damit ein Strom zu dominieren, der weitgehend unabhängig von der Zellstruktur verläuft.

Eine besondere Rolle spielt bei allen elektromedizinischen Methoden die hohe elektrische Impedanz bzw. der hohe elektrische Widerstand der Haut. Dieser ist vor allem durch das Stratum corneum (Hornschicht) bedingt. Dies ist eine Schicht aus mehreren Lagen verhornter, hauptsächlich aus hochohmigem Keratin (hoch polymeres Molekülgerüst aus Skleroproteinen) bestehender Corneozyten ohne Interzellularraum. Die Dicke beträgt rund $40 \mu m$. Die Hautimpedanz kann bei Gleichstrom bis zu $1 M\Omega$ für $1 cm^2$ Hautfläche betragen.

Weiter ist der Hautwiderstand abhängig von der Durchblutung, hauptsächlich geregelt vom vegetativen Nervensystem und vom Feuchtigkeitsgrad und damit von der Tätigkeit der Schweißdrüsen, wobei die Widerstandsänderung der Haut nicht unbedingt mit dem Auftreten sichtbaren Schweißes verknüpft sein muss. Die Tätigkeit der Schweißdrüsen der Haut unterliegt neben Einflüssen der Wärmehaushaltsregelung und tageszeitlichen Schwankungen auch emotionalen Einflüssen wie Angst (Lügendetektor). Wegen des großen elektrischen Widerstandes der Hornschicht treten Verbrennungen bei Stromfluss immer zuerst an der Haut auf.

In den meisten biologischen Geweben dominiert Stromleitung durch Flüssigkeiten, es

handelt sich um elektrolytische Leiter. Am Stromtransport nehmen allerdings sehr unterschiedliche Ionen teil. In der Zellflüssigkeit dominieren K^+ , Mg^{++} und verschiedene Proteinanionen, in der Interstitialflüssigkeit dominieren Na^+ und Cl^- bei weitem.

Biologische Spannungsquellen

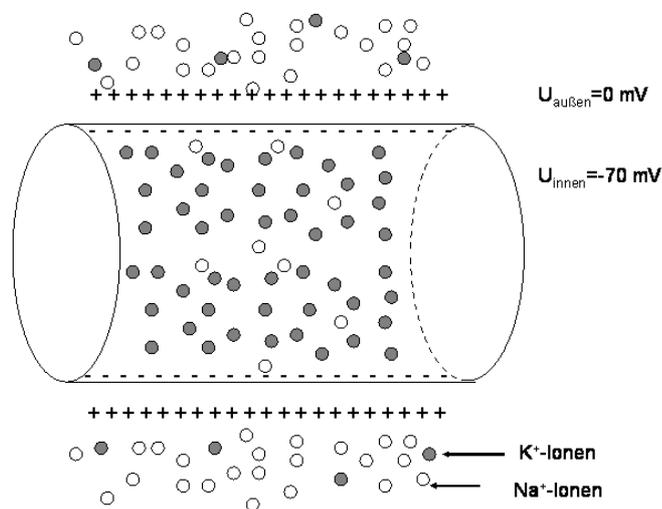


Abb.3 Entstehung des Membranpotentials

In allen lebenden Zellen - also auch in Nervenzellen - sorgt die Zellmembran dafür, dass im Inneren einer Zelle andere Bedingungen herrschen als im extrazellulären Bereich. Eine wichtige Voraussetzung für das Funktionieren einer Nervenzelle ist ein leichter Überschuss an negativen Ionen auf der Innenseite und ein leichter Überschuss an positiven Ionen auf der Außenseite der Zellmembran (Abbildung 3).

Solche elektrochemischen Gradienten spielen eine Schlüsselrolle bei der Weiterleitung von Impulsen. Die Konzentration von Kalium-Ionen (K^+) in der Zelle beträgt rund das 30fache der Konzentration im Außenraum, während die Konzentration von Natrium-Ionen (Na^+) außen rund 10fach größer ist als innen.

Auch Anionen, speziell Chlor-Ionen (Cl^-), sind in der Zelle nicht gleichmäßig verteilt. Um diese Konzentrationsgradienten aufrechterhalten zu können, nutzen die Zellen sowohl passive Diffusionsmechanismen als auch aktive Transportmechanismen. Speziell das Natrium-Kalium-Konzentrationsverhältnis wird durch eine „Ionenpumpe“ eingestellt, die Na^+ nach außen und K^+ nach innen transportiert. Das sich einstellende Ruhepotential kann näherungsweise alleine durch die Wirkung der K^+ -Ionen mit der Nernst'schen Gleichung berechnet werden:

$$U_{Ruhe} = \frac{RT}{Fz} \ln \frac{c_{außen}}{c_{innen}}$$

(R-Gaskonstante, T - Temperatur, F - Faradaykonstante, z - Wertigkeit, c - Konzentration)

Welche Feldstärken treten an Membranen auf?

Warum ist der Stromfluss bei trockener Haut geringer als bei feuchter Haut?

Warum fällt ein Spatz nicht von der Hochspannungsleitung?

Physikalische Grundlagen

Elektrischer Strom

Befinden sich in einem elektrischen Feld frei bewegliche Ladungsträger, z.B. Elektronen in einem Metall, so werden sie infolge der elektrischen Kraft bewegt. Der entsprechende Transport elektrischer Ladungen heißt elektrischer Strom. Die elektrische Stromstärke $I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$ ist

die Ladungsmenge ΔQ , die pro Zeiteinheit Δt durch einen elektrischen Leiter strömt. Das Vorzeichen (der Richtungssinn) der Stromstärke wird dem der Spannung über dem Leiter gleichgesetzt, sie ist also vom höheren zum niedrigeren Potential gerichtet. Die Einheit des Stromes ist Ampere: $[I]=1 \text{ A}$.

Elektrische Spannung

Gegeben sei ein Probekörper mit der elektrischen Ladung Q im elektrischen Feld $E(x)$. Man hält einen beliebigen Punkt x_0 im Raum als Bezugspunkt fest und definiert, dass hier die potentielle Energie des Probekörpers Null ist, $W(x_0) = 0$. Dieses Bezugspotential wird in der Technik auch Massepotential genannt. Verschiebt man nun eine Probeladung Q von x_0 zu einem beliebigen Punkt x , so hat sie die potentielle Energie $W(x) - W(x_0) = W(x)$. Diese hängt nur vom Endpunkt x ab, nicht aber vom Verlauf des Weges, auf dem die Probeladung von x_0 nach x gelangt. Man nennt das elektrische Feld ein *Potentialfeld*. Das elektrische Potential φ an der Stelle x ist dann definiert durch

$$\varphi(x) = \frac{W(x)}{Q}$$

Die Potentialdifferenz

$$U_{12} = \varphi(x_2) - \varphi(x_1)$$

heißt elektrische Spannung. Die Einheit von Potential und Spannung ist Volt $[U]=[\varphi]=1 \text{ V}$

Elektrischer Widerstand und Leitwert

Erweist sich bei einem stromdurchflossenen Körper der fließende Strom I proportional zur angelegten Spannung U , so gilt für ihn das **Ohmsche Gesetz**:

$$U = R I.$$

Der Proportionalitätsfaktor R heißt ohmscher Widerstand. Die Einheit des Widerstands ist das Ohm, $[R] = 1 \Omega = 1 \text{ V/A}$. Der Kehrwert $G = 1/R$ heißt Leitwert mit der Einheit Siemens, $[G] = 1 \text{ S} = 1 \text{ A/V}$. Metallische Leiter erfüllen das Ohmsche Gesetz in guter Näherung. Im Allgemeinen ändert sich I aber nicht proportional zu U .

Formt man aus einem leitfähigen Material einen Stab mit der Querschnittsfläche A und der Länge l , so beträgt der elektrische Widerstand zwischen seinen Enden

$$R_{\text{Stab}} = \rho l / A$$

Die Konstante ρ ist der spezifische Widerstand, sie charakterisiert das elektrische Leitvermögen des Materials.

Energieumsatz

Fällt über dem Widerstand R die Spannung U ab, so fließt durch ihn im Zeitintervall Δt die Ladungsmenge $\Delta Q = I \cdot \Delta t$. Die Ladungsträger verlieren dabei die potentielle Energie $\Delta W = U \Delta Q = U I \Delta t$, die in Wärme umgewandelt wird. Die pro Zeiteinheit gewandelte Energie, die Leistung P , ist dann $\Delta W / \Delta t$, und folglich

$$P = U I.$$

Ihre Einheit der elektrischen Leistung ist das Watt, $[P] = 1 \text{ W} = 1 \text{ VA}$.

Damit ein technischer Widerstand durch den Stromfluss nicht zu stark erwärmt und letztlich zerstört wird, muss er die Wärme rasch genug an die Umgebung abgeben können, wozu er

eine hinreichend große Oberfläche braucht. Neben dem Ω -Wert ist deshalb die maximal zulässige Leistung eines technischen Widerstandes wichtig.

Nichtlineare U/I-Kennlinie

Verkleinert sich der Widerstand bei Erwärmung, so nennt man das Material Heißeiter oder auch Thermistor. Der Widerstand von Hand zu Hand eines menschlichen Körpers beträgt bei einer angelegten Spannung von 10 V etwa 10 k Ω und sinkt bei 1 kV auf etwa 2 k Ω . Damit verhält er sich wie ein Heißeiter. Verhält sich ein Material jedoch umgekehrt, wie z.B. Metalle, so nennt man ihn Kaltleiter. Der Wolframdraht einer Glühlampe ist ein Kaltleiter, bei ansteigender Spannung steigt der Leistungsumsatz P, was ihn bis hin zur Glut erwärmt. Sein Widerstand nimmt dabei zu, was näherungsweise durch

$$\frac{U(T)}{I} = R(T) = R_0(1 + \beta(T - T_0))$$

beschrieben wird, mit $R_0 = R(T_0)$, dem Widerstandswert bei der Bezugstemperatur T_0 (z.B. Zimmertemperatur) und dem Temperaturkoeffizient β , $[\beta] = \text{K}^{-1}$. Im Unterschied zum ohmschen Widerstand wächst nun U nicht proportional mit I, vielmehr vergrößert sich der Anstieg der U/I-Kennlinie mit wachsender Stromstärke. Dies wird durch den differentiellen Widerstand r ausgedrückt

$$r(I) = \Delta U / \Delta I .$$

Er beschreibt, wie stark sich bei einer kleinen Stromänderung von I auf I + ΔI der Spannungsabfall ändert. Für einen ohmschen Widerstand R gilt, $r(I) = \text{const.} = R$. Setzt man die Leistung proportional zur Temperaturdifferenz $T - T_0$, so erhält man

$$R = R_0 (1 + \gamma P) ,$$

mit dem Temperaturkoeffizienten γ , $[\gamma] = \text{W}^{-1}$. Fasst man also $R = U/I$ als Funktion der Leistung $P = UI$ auf, so erhält man eine Gerade mit γR_0 als Anstieg,

$$R = R_0 + \gamma R_0 P .$$

Reihen- und Parallelschaltung von Widerständen

Werden zwei Widerstände R_1 und R_2 in Reihe (Serie) geschaltet, so berechnet sich der Gesamtwiderstand R_g aus der Summe der Einzelwiderstände

$$R_g = R_1 + R_2 .$$

Für zwei Stäbe gleichen Materials (also gleichem ρ), gleicher Querschnittsfläche A und den Längen l_1 bzw. l_2 ist dieser Zusammenhang unmittelbar einsichtig $R = \rho \frac{l_1 + l_2}{A}$.

Für den Gesamtwiderstand der Reihenschaltung von beliebig vielen Widerständen R_1, \dots, R_N gilt

$$R_g = \sum_{n=1}^N R_n$$

Die Parallelschaltung zweier Widerstände R_1 und R_2 (Schreibweise: $R_1 || R_2$) liefert den Gesamtwiderstand

$$R_g = R_1 || R_2 = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)^{-1} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

Unter Verwendung der Leitwerte erhält man $R^{-1} = G = G_1 + G_2$.

Für zwei Stäbe gleichen Materials, gleicher Länge l und den Querschnittsflächen A_1 bzw. A_2 ist dieser Zusammenhang unmittelbar einsichtig

$$G = \frac{1}{\rho} \frac{A_1 + A_2}{l}.$$

Daraus folgt für den Gesamtwiderstand der Parallelschaltung von beliebig vielen Widerständen

$$\frac{1}{R_g} = \sum_{n=1}^N \frac{1}{R_n} \quad \text{bzw.} \quad G_{ges} = \sum_{n=1}^N G_n$$

Spannungsquelle

Jede reale Spannungsquelle hat einen nicht verschwindenden *Innenwiderstand* $R_i > 0$, den man sich immer mit einem äußeren Widerstand R in Reihe geschaltet vorstellen muss und über den ein Teil der Spannung abfällt:

$$U_i = \frac{R_i}{R + R_i} U_0$$

Dabei ist U_0 die *Urspannung*, welche zwischen den Polen der Spannungsquelle für $R = \infty$ abfällt, also ohne Verbraucher (ohne Last). Sie wird auch *elektromotorische Kraft* oder *Leerlaufspannung* genannt.

Im Allgemeinen fällt über dem Verbraucher R nur die *Klemmenspannung* $U = U_0 - U_i$ ab. Verschwindet der äußere Widerstand ($R = 0$), so spricht man vom Kurzschluss der Spannungsquelle. Der entsprechende Kurzschlussstrom wird nur noch durch den Innenwiderstand begrenzt

$$I_K = \frac{U_0}{R_i}.$$

In elektrischen Schaltungen wird der Innenwiderstand einer Spannungsquelle häufig nicht eingezeichnet. Man nimmt dann an, dass bei der Realisierung der Schaltung der konkrete Innenwiderstand klein genug ist, so dass er keinen merklichen Einfluss ausübt oder einfach zum Lastwiderstand R dazugerechnet werden kann.

Das Potentiometer

Bei einem Potentiometer (Abb. 6) lässt sich ein Gleitkontakt entlang einer Widerstandsfläche verschieben. Somit verändert sich die Aufteilung des Gesamtwiderstandes R in zwei Teilwiderstände R_1 und R_2 . Für die Teilspannungen U_1 und U_2 in dieser Spannungsteilerschaltung gilt:

$$U_1 = \frac{R_1}{R} U \quad ; \quad U_2 = \frac{R_2}{R} U.$$

Folglich ist die Summe der Teilspannungen gleich der anliegenden Spannung.

Strom- und Spannungsmessung

Bei idealen Strommessinstrumenten sollte $R_i \rightarrow 0$, bei idealen Spannungsmessinstrumenten $R_i \rightarrow \infty$ gehen.

Reale Messinstrumente haben einen endlichen Innenwiderstand, der bei den Messungen berücksichtigt werden muss.

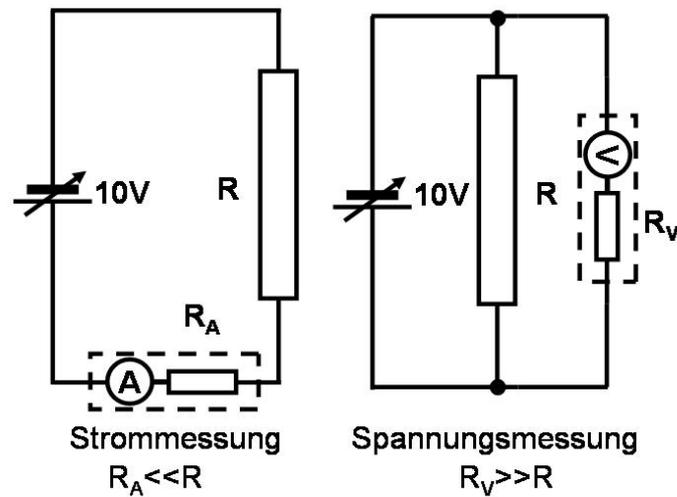


Abb.4 Strom- und Spannungsmessungen

Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Geräteliste

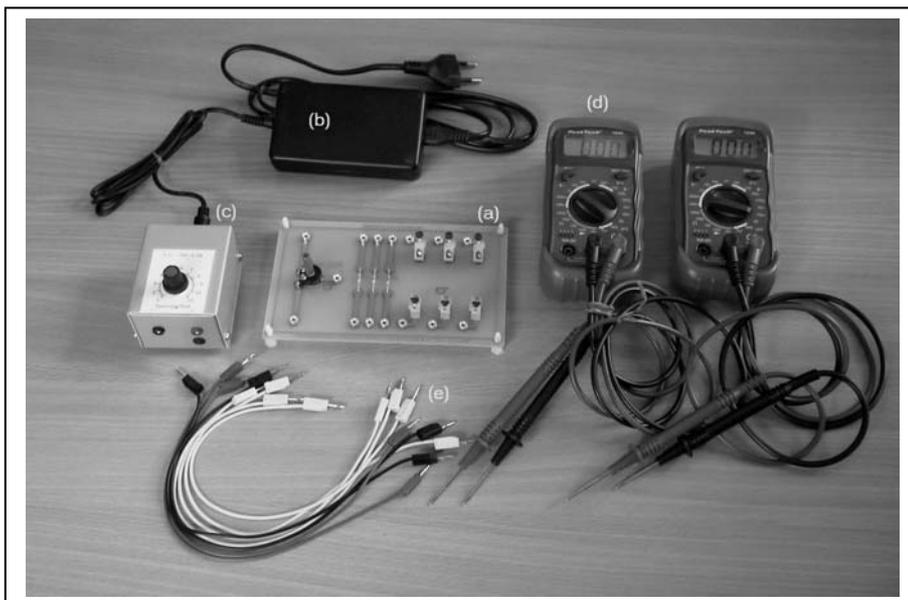


Abb. 5 (a)Grundplatine, (b) Netzteil, (c) Spannungsregler, (d) 2 Multimeter, (e) Laborschnüre

Hinweise

- ! Bauen Sie elektrische Schaltungen grundsätzlich **ohne** angelegte Betriebsspannung auf. Lassen Sie die Schaltung vor dem Anlegen der Betriebsspannung vom Betreuer prüfen. Vor Änderungen an einer Schaltung sollte grundsätzlich zunächst die Betriebsspannung abgeschaltet werden.
- ! Besondere Vorsicht ist bei Strommessungen geboten. Wählen Sie zunächst immer den unempfindlichsten Messbereich (200 mA)! Stromstärken deutlich oberhalb des Messbereichsendwertes lassen die Feinsicherung im Gerät schmelzen.

- ! Angaben der Werte von Widerständen oder Kapazitäten auf den Bauelementen (Nennwerte) sind immer nur Näherungen der tatsächlichen Werte. Deshalb müssen z.B. Widerstandswerte immer mit dem Ohmmeter (Bestandteil des Multimeters) ausgemessen werden.
- ! Legen Sie an den Schleifer des **Potentiometers auf der Grundplatine** keine Lasten unter $1\text{ k}\Omega$. Dieses führt bei hohen Spannungen zu allzu großen Strömen (Energieumsätzen) im Potentiometer und zerstört es schließlich infolge zu großer Erwärmung.
- ! Schalten Sie zum Versuchsende die Multimeter zur Schonung der Batterien aus (Schalter auf OFF).

Zu den Messaufgaben

1. Spannungsteiler

Bauen Sie die in Abb. 6 dargestellte Schaltung auf und bestimmen Sie die Teilspannungen U_1 und U_2 des Spannungsteilers für 5 unterschiedliche Positionen des Drehknopfes. Was ändert sich beim Drehen des Knopfes am Spannungsteiler? Im Experiment wird die Spannungsquelle (1-10V) durch ein Netzteil und einen dazugehörigen Spannungsregler realisiert (siehe Geräte-liste)

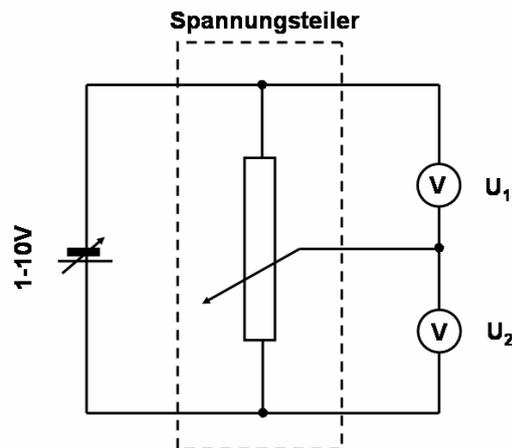


Abb. 6 Spannungsteiler

2. Bestimmung des Hautwiderstandes

Bestimmen Sie Ihren Hautwiderstand mit dem Digitalmultimeter. Schalten Sie das Instrument dazu in den Ohmbereich. Nehmen Sie eine der beiden Messspitzen zwischen Daumen und Zeigefinger der linken Hand, die andere Messspitze zwischen Daumen und Zeigefinger der rechten Hand. Ändert sich der Widerstand, wenn Sie beide Messspitzen mit einer Hand halten?

Ab welcher Stromstärke bzw. Spannung würde ein solcher Versuch gefährlich? Warum?

3. Das Ohmsche Gesetz

Ersetzen Sie in der Schaltung Abb. 6 den Spannungsteiler durch den Widerstand R_1 auf der Platine sowie ein Amperemeter wie in Abb. 7 gezeigt wird. Variieren Sie am Spannungsregler die Spannung und messen Sie für zehn Spannungen U den Strom I durch den Widerstand R_1 . Tragen Sie die Messwerte in ein Strom-Spannungs-Diagramm ein. Welchen Zusammenhang gibt es zwischen I und U ?

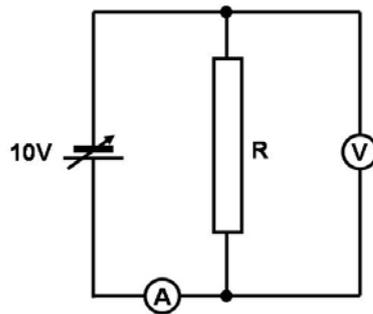


Abb. 7 Bestimmung der Strom-Spannungs-Kennlinie

4. Bestimmung der Widerstände R_2 und R_3

Bestimmen Sie mit Hilfe des Aufbaus in Abb. 7 die ohmschen Widerstände der Reihenschaltung R_2+R_3 und der Parallelschaltung $R_2||R_3$ zweier unbekannter Widerstände! Benutzen Sie eine feste Spannung von ca. 5V.

Berechnen Sie die Widerstandswerte R_2 und R_3 der unbekanntenen Teilwiderstände!

5. Bestimmung der Strom-Spannungs-Kennlinie einer Glühlampe

Wiederholen Sie die Messung aus Versuchsteil 4 und ersetzen Sie dabei den Widerstand durch die Glühlampe (12V, 2A). Um den geforderten Spannungsbereich von ca. 0 V . . . 1 V gut messbar zu realisieren, schalten Sie einen Widerstand von ca. 130 Ω (1 W) in Reihe zur Glühlampe und nehmen etwa 10 Messwertpaare (I_n , U_n) auf.

Fertigen Sie hierzu vor der Messung eine Schaltskizze an!

Messen Sie mit dem Multimeter(Ohmmeter) den **Kaltwiderstand R_0** . Tragen Sie die Messwerte für I_{Lampe} und U_{Lampe} (Spannungsbereich 0 . . . 1 V) in ein U-I-Diagramm ein.

Beschreiben und erklären Sie den Unterschied zum Ergebnis von Aufgabe 3.

Auswertung: Stellen Sie die Abhängigkeit U über I graphisch dar. Entscheiden Sie, ob Wolfram ein Heiß- oder Kaltleiter ist. Warum sollte hier keine lineare Regression erfolgen? Stellen Sie $R = U/I$ als Funktion der Leistung $P = UI$ dar. Der Anstieg b des linearen Teils der Kurve ist gleich dem Faktor γR_0 , der Schnittpunkt a mit der Ordinate liefert den Kaltwiderstand R_0 . Ermitteln Sie a und b graphisch. Bestimmen Sie daraus schließlich den Temperaturkoeffizienten $\gamma = b/a$.