

Gleichstrom – Batterie – Solarzelle

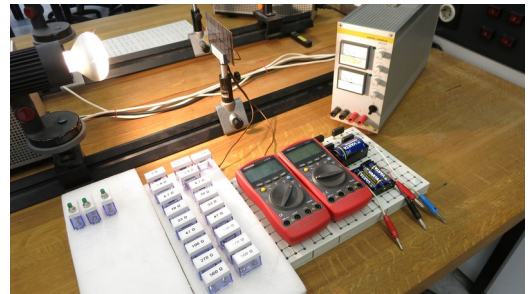
Der elektrische Strom I ist proportional zur Anzahl der Elektronen pro Sekunde, welche durch einen Leiter fließen. Eine Batterie/Solarzelle als Stromquelle mit der Klemmspannung U_K erzeugt ein elektrisches Feld im Leiter, welches die Elektronen antreibt. Über einen Widerstand fällt eine Spannung ab. Die abfallende Leistung ist $P = U \cdot I$. Die Summe der Spannungsabfälle ist die Klemmspannung der Batterie. Eine reale Batterie besitzt einen Innenwiderstand über dem ebenfalls etwas Spannung abfällt. Die Kenntnis des Innenwiderstandes von Stromquellen und Messgeräten ist essenziell für den effektiven Einsatz in der Praxis. Die maximale Leistung kann entnommen werden, wenn der Widerstand des Verbrauchers genau so groß ist, wie der Innenwiderstand der Stromquelle.

1 Lernziele

- Ohmsches Gesetz $R = U/I$
- Messung von Widerständen bei strom- und spannungsrichtiger Schaltung
- Reale Gleichspannungsquellen haben einen Innenwiderstand
- Der Innenwiderstand von Solarzellen ist viel größer als von Alkalibatterien.
- Die Leistungsentnahme aus einer Stromquelle ist vom Widerstand des Verbrauchers abhängig.

2 Experimenteller Aufbau

- Steckplatte, verschiedene elektronische Bauteile: zwei unbekannte Widerstände R_1 und R_2 , eine Reihe an bekannten Widerständen, ein Taster und Brücken
- zwei Multimeter
- Labornetzgerät als Gleichspannungsquelle
- Batterie als Alkali-Mangan-Zelle
- Beleuchtung und Solarzelle



3 | Messung - | Durchführung - | Auswertung

3.1 Strom- und spannungsrichtige Schaltung

Bestimmen Sie für zwei unbekannte Widerstände R_1 und R_2 den Widerstand durch Messung der angelegten Spannung U und des fließenden Stromes I mittels einer stromrichtigen und einer spannungsrichtigen Schaltung.

- 1) Bauen Sie die *stromrichtige* Widerstandsmessung mit dem unbekanntem R_1 , zwei Multimetern, einem Taster und der Gleichspannungsquelle auf. Beachten Sie die richtigen Anschlüsse am Messgerät für die Messung von mA/ μ A beziehungsweise Volt. Die Gleichspannungsquelle muss anfänglich auf 0 V eingestellt sein. Wenn die Schaltung vom Betreuer überprüft wurde, dürfen Sie die Spannung am Netzteil auf zirka 2 V erhöhen und den Taster betätigen. Es dürfen **keine Ströme über 400 mA** fließen, sonst löst die Schmelzsicherung im Multimeter aus. Notieren Sie den gemessenen Spannungsabfall U und Stromfluss I .
- 2) Ersetzen Sie R_1 durch R_2 und ermitteln Sie wiederum U und I .
- 3) Bauen Sie die Schaltung zur *spannungsrichtigen* Widerstandsmessung um und bestimmen Sie für R_1 und R_2 die zugehörigen Spannungs- und Stromwerte.

Auswertung

- a) Berechnen Sie aus Ihren vier Wertepaaren von {Spannung,Strom} zu den R_1 und R_2 , jeweils der strom- und spannungsrichtigen Schaltung die zugehörigen Widerstandswerte.
- b) Für die beiden Widerstände haben Sie jeweils zwei Widerstände ermittelt. Entscheiden Sie anhand der jeweiligen Widerstandswerte ob die Messwerte aus der spannungs- oder aus der stromrichtigen Schaltung den korrekten Widerstand ergeben.

3.2 Messung von $R_{1,2}$ mit dem Multimeter

Messen Sie die Widerstände R_1 und R_2 direkt mit dem Multimeter, indem Sie den Messbereich auf Ω einstellen. Die Widerstände passen direkt in die Eingangsbuchsen des Multimeters. Vergleichen Sie diese Messwerte mit Ihren vorherigen Ergebnissen. Beachten Sie, dass die verwendeten Multimeter aufgrund des eigenen Innenwiderstandes für $R < 10 \Omega$ sehr ungenau werden.

3.3 Spannungs- und Stromteiler

- 1) Bauen Sie die Spannungs-Stromteiler-Schaltung aus Abschnitt '4 Vorbereitung' auf.
- 2) Messen Sie mit einem Multimeter die zwei Spannungsabfälle und vergleichen Sie diese mit Ihren Berechnungen aus der Vorbereitung.
- 3) Messen Sie mit einem Multimeter nacheinander die drei Stromflüsse und vergleichen Sie diese mit Ihren Berechnungen aus der Vorbereitung.

3.4 Spannungs-Strom-Kennlinie eines Widerstandes $U(I)$

- 1) Verwenden Sie den größeren der beiden Widerstände $R_{1,2}$.
- 2) Entscheiden Sie, ob Sie eine spannungs- oder stromrichtige Schaltung aufbauen müssen um gleichzeitig Strom und die abfallende Spannung zu messen.
- 3) Bestimmen Sie durch Verändern der Klemmspannung an der Gleichspannungsquelle fünf Spannungs-Strom Wertepaare.

Für die Auswertung stehen Computer mit der Software QtiPlot zur Verfügung.

- a) Erstellen Sie eine Tabelle mit Ihren Spannungs- und Strommesswerten und einen Scatter Plot.
- b) Führen Sie eine Anpassung an eine Ursprungsgerade (Fit Slope) durch, $U = R \cdot I$.
- c) Beschriften Sie die Achsen mit Einheiten und tragen Sie den ermittelten Widerstand mit der angegebenen Unsicherheit korrekt gerundet in der Abbildungslegende ein.
- d) Ist dieser Wert genauer als Ihre erste Bestimmung aus einem Spannungs-Stromwertepaar?

3.5 Spannungs-Strom-Kennlinie Batterie/Solarzelle $U(I)$

Ermitteln Sie die Spannungs-Strom-Kennlinie $U(I)$ einer Batterie durch Variation des Lastwiderstandes.

- 1) Erstellen Sie eine Tabelle in Ihrem Laborbuch mit 7 Spalten. Die erste Spalte beinhaltet die Lastwiderstände $R_L = R_n + R_S$. Benutzen Sie alle vorhandenen Widerstände R_n . Fangen Sie mit dem größten Widerstand an, die Widerstände $R_{1,2}$ entfallen und für $R_n = 0 \Omega$ können Sie eine Brücke verwenden. Die weiteren Spalten sind jeweils Strom und Spannung bei der Batterie und 2 Mal für die Solarzelle.
- 2) Bauen Sie die Schaltung aus Abschnitt '6 Zusatzmaterial' auf.
- 3) Messen Sie für alle Lastwiderstände jeweils die Klemmspannung U_K und die Spannung U_S über den Shunt (Messwiderstand). Der Stromfluss ergibt sich unmittelbar aus $I[A] = U_S[V] / (1 \Omega)$.
- 4) Ersetzen Sie die Batterie durch die Solarzelle, welche zirka 40 cm Abstand von der Lampe hat. Messen Sie wie bei der Batterie die Klemmspannung U_K und die Spannung U_S zu den jeweiligen Lastwiderständen.
- 5) Wiederholen Sie Messung noch einmal, wenn die Solarzelle zirka 20 cm Abstand von der Lampe hat.

Auswertung am Computer

Wir wollen sehen, wie die Klemmspannung der Batterie/Solarzelle mit kleiner werdenden Lastwiderständen (zunehmendem Stromfluss) immer kleiner wird. Außerdem ermitteln wir die entnommene Leistung.

- a) Tragen Sie die jeweiligen Lastwiderstände, gemessenen Ströme und Klemmspannungen für die Batterie in eine Tabelle in QtiPlot ein. Setzen Sie die Stromspalte als X-Spalte, rechte Maustaste auf den Spaltenkopf und Set as... .
- b) Erstellen Sie ein Scatter-Plot $U(I)$.
- c) Da bei der Batterie die Klemmspannung linear mit dem Stromfluss abnimmt, können wir eine lineare Regression durchführen, rechte Maustaste auf den Plot und Analyse->Fitting->Fit Linear. Es gilt $U_k = A \cdot I + B$. Welche Einheiten haben A und B ?
- d) Die Leerlaufspannung U_0 der Batterie ist gegeben, wenn der Stromfluss $0 A$ wäre. Der Kurzschlussstrom I_{\max} ist der Strom, welcher fließen würde, wenn die Klemmspannung $0 V$ wäre. Berechnen Sie beide Werte aus Ihren ermittelten A und B von der Regression.
- e) Der Innenwiderstand der Batterie ist durch die Leerlaufspannung und den Kurzschlussstrom gegeben $R_{\text{Batt}} = U_0 / I_{\max}$. Tragen Sie diese drei Größen in Ihr Diagramm ein, beschriften Sie die Achsen korrekt und drucken Sie es für Ihr Laborbuch aus.
- f) Fügen Sie eine vierte Spalte in Ihrer Tabelle ein, um die entnommene Leistung $P = U \cdot I$ als Funktion des Lastwiderstandes zu berechnen, rechte Maustaste auf die freie Fläche und Add Column. Rechten Mausklick auf den Spaltenkopf und Set Column Values und in dem Eingabefeld $\text{col}(2) * \text{col}(3)$.

- g) Setzen Sie die Spalte mit den Lastwiderständen als X-Spalte und stellen Sie die berechneten Leistungswerte als Line+Symbol dar. Da sowohl die Leistung als auch die Lastwiderstände über viele Größenordnungen gehen, soll die Abbildung doppelt-logarithmisch dargestellt werden. Mit einem Doppelklick auf die jeweilige Achse, können Sie den Type von linear auf Log10 ändern. Für welchen Lastwiderstand wurde am meisten Leistung aus der Batterie entnommen? Drucken Sie die fertig formatierte Abbildung für Ihr Laborbuch aus.
- h) Für die Berechnungen zur Solarzelle, können Sie die Tabelle von der Batterie duplizieren, Windows -> Duplicate, die Strom-, Spannungs-, und Leistungswerte löschen und die jeweiligen Werte für die Solarzelle eintragen, sowie die Berechnung der Leistungswerte erneut durchführen. Erzeugen Sie so eine Tabelle für die Solarzelle bei 40 cm und eine Tabelle mit den Werten bei 20 cm Abstand von der Lampe. Setzen Sie zu Beginn die Spalten für den Strom als X-Spalten.
- i) Stellen Sie für die Solarzelle mit 40 cm Abstand die Klemmspannung als Funktion des Stromflusses dar $U_K(I)$. Diesmal als Line+Symbol, da der Zusammenhang nicht durch eine lineare Funktion angepasst werden kann.
- j) Fügen Sie den Zusammenhang $U_K(I)$ für die Solarzelle bei 20 cm Abstand in die gleiche Abbildung ein. Rechte Maustaste auf den Plot und Add -> Add/Remove curves. Mit einem Doppelklick auf die Kurven, können Sie diese formatieren. Mit der rechten Maustaste auf den Plot und Add -> Text können Sie die Kurven auch beschriften, oder Sie bearbeiten die Legende.
- k) Die Leerlaufspannungen und Kurzschlussströme können Sie näherungsweise direkt aus der Abbildung erfassen. Mit dem Tool Data-> Data Reader wird Ihnen die jeweilige Mausposition in der Abbildung ausgegeben. Tragen Sie die abgelesenen Werte als Text in der Abbildung ein und drucken Sie diese aus.
- l) Erstellen Sie analog zur Batterie ebenfalls das Diagramm entnommene Leistung als Funktion des Lastwiderstandes. Wiederum die beiden Kurven für 40 cm und 20 cm in ein Diagramm. Bei welchem Lastwiderstand ist die entnommene Leistung maximal? Drucken Sie Ihr Diagramm aus.

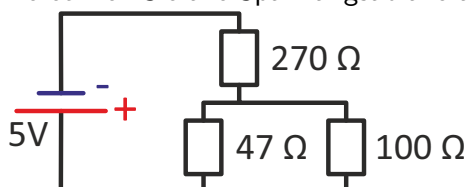
3.6 Glühlampe an Batterie und Solarzelle

Eine 6V-Glühlampe soll mit der Batterie und der Solarzelle betrieben werden.

- 1) Messen und notieren Sie die Klemmspannungen der Batterie und der beleuchteten Solarzelle direkt mit dem Multimeter.
- 2) Verbinden Sie die Glühlampe mit der Batterie und danach mit der Solarzelle. Was beobachten Sie?
- 3) Um Ihre Beobachtung zu erklären, messen Sie den Widerstand der Glühlampe direkt mit dem Multimeter.

4 Vorbereitung und Berechnungen vor Versuchsantritt

- 1) Zusammenhang, Formelzeichen und Einheit - Strom, Spannung, Widerstand
- 2) Spannungs-Strom-Kennlinie bei Heiß-, Kalt- und Ohmsche-Leiter?
- 3) Skizzieren Sie die Schaltungen für die strom- und spannungsrichtige Messung von Widerständen.
- 4) Was sind die Innenwiderstände von idealen Strom- und Spannungsmessgeräten (Ampere- und Voltmeter)?
- 5) Kenngrößen einer Gleichstromquelle: Kurzschlussstrom, Leerlaufspannung und Innenwiderstand
- 6) Skizze: Spannungs-Strom-Kennlinie einer Batterie im Vergleich zur Solarzelle
- 7) Bei einer punktförmigen Lichtquelle, um wie viel fällt die Beleuchtungsintensität ab, wenn der Abstand verdoppelt wird?
- 8) Leistung im Gleichstromkreis: Berechnung, Formelzeichen und Einheit
- 9) Bei welchem Lastwiderstand ist die maximale Leistungsentnahme aus einer Gleichstromquelle mit dem Innenwiderstand R_i ? Für Physiker: Herleitung
- 10) Berechnen Sie alle Spannungsabfälle und Stromflüsse in dieser Schaltung.



5 Literatur

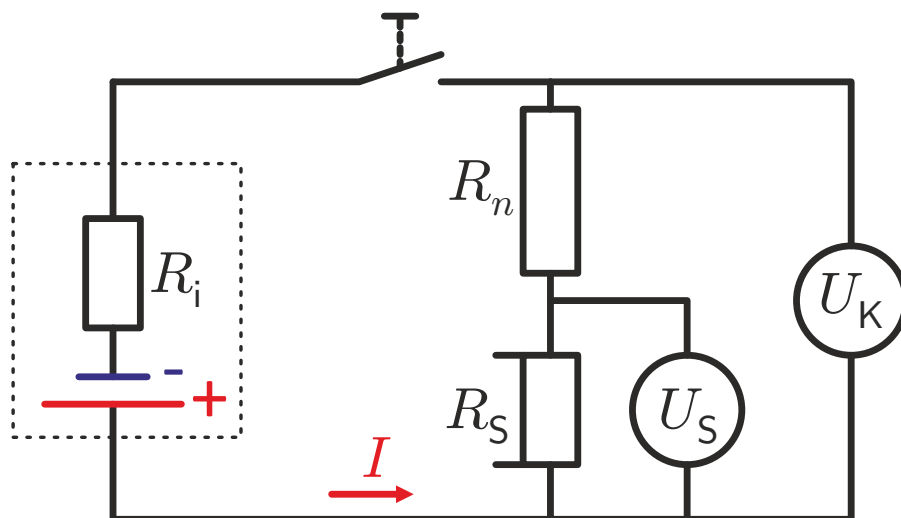
In der Referenz [1] finden Sie einen Überblick über reale Spannungsquellen, strom- und spannungsrichtiges Messen und der $U(I)$ Kennlinie eines ohmschen Widerstandes. Ebenfalls finden Sie im Kapitel 7.3 in [2] Hintergrundwissen über Gleichströme. Für Solarzellen sei auf Google und Wikipedia verwiesen.

[1] W. Schenk and F. Kremer (Hrsg.), *Physikalisches Praktikum*. Springer, 14. Auflage, 2014, <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-00666-2>.

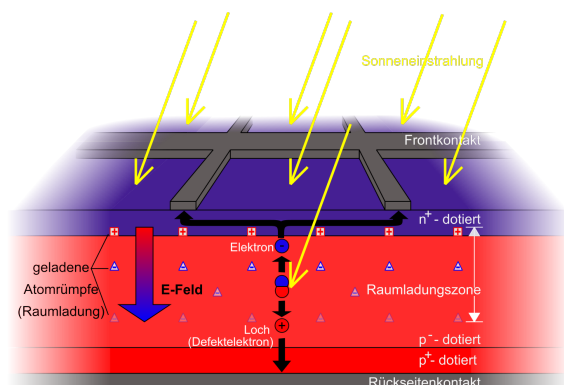
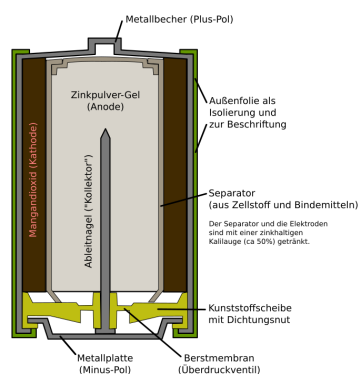
[2] D. Meschede, *Gerthsen Physik*. Springer, 25. Auflage, 2015, <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-45977-5>.

6 Zusatzmaterial

- Schaltung zur Messung der Spannungs-Strom-Kennlinie $U(I)$ einer Batterie/Solarzelle
 Die Lastwiderstände sind R_n . Der Shunt-Widerstand dient zur Messung des fließenden Stroms. Es ist relativ klein und hat exakt den Widerstand $R_S = 1\Omega$. Da $I = U/R$ gilt, folgt direkt $I[\text{A}] = U_S[\text{V}]/(1\Omega)$. Somit ist der abgelesene Spannungswert in V auch gleichzeitig der Stromfluss in A. Die Batterie/Solarzelle hat auch einen Innenwiderstand R_i , welcher bei der Batterie kleiner als 1Ω ist und bei der Solarzelle mehrere hundert Ω beträgt. Hinweis, die Elektronen in einem Leiter bewegen sich vom „-“ Pol zum „+“ Pol, aber die Stromrichtung ist entgegengesetzt definiert. Als man diese Definition aufstellte, wusste man noch nicht, dass die Elektronen den Stromfluss verursachen.



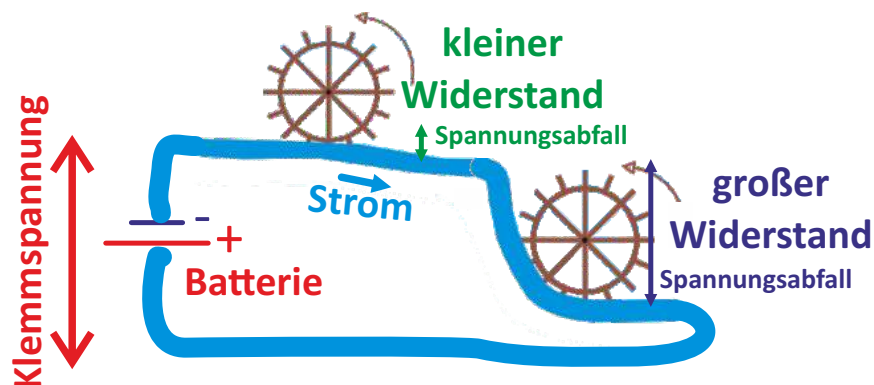
- Aufbau einer Zink-Kohle-Batterie und einer Solarzelle (Quelle:Wikipedia)



- Anschaulich Strom, Spannung und Widerstand

Der elektrische Strom ist die Bewegung der Ladungsträger. In Metalleitern sind dies die Elektronen. Es können auch Ionen (positiv oder negativ) in einer Flüssigkeit sein. Die Stromrichtung ist vom „+“ zum „-“ Pol definiert. Die Spannung ist physikalisch der Potenzialunterschied für die Ladungsträger. Durch die Spannung wird im Leiter ein elektrisches Feld aufgebaut, welches die Ladungsträger in Bewegung versetzt. Achtung, dieses Feld breitet sich mit Lichtgeschwindigkeit aus, daher ist das Licht sofort an, wenn wir den Schalter betätigen. Die Ladungsträger im Metalleiter bewegen sich aber nur mit 0.1 mm/s, siehe [Link](#). Im Leiter sind schon immer freie Elektronen vorhanden und neu hinzukommende Elektronen schieben die vorhandenen vor sich her. Ein Widerstand bremst die Bewegung der Elektronen ab, dadurch kommt es zu einem Spannungsabfall. Je größer der Widerstand ist, desto größer ist der Spannungsabfall. Ein großer Widerstand sorgt aber auch dafür, dass weniger Elektronen pro Sekunde in den Leiter einfließen, der Stromfluss wird kleiner. Der Stromfluss ist die Anzahl der Ladungsträger, welche pro Sekunde ein- und auch wieder ausströmen. Die Batterie als Spannungsquelle hebt die Elektronen wieder auf das anfängliche Potenzial.

Eine mögliche, stark vereinfachte Veranschaulichung ist das Wasserflussmodell, siehe Bild. Der Wasserfluss ist der Elektronenfluss und somit der Strom. Die Spannung ist der Höhenunterschied. Die Batterie hebt das Wasser kontinuierlich auf die anfängliche Ausgangshöhe (Klemmspannung), dies kostet Arbeit. Einen Widerstand veranschaulichen wir als Wasserrad. Durch den Wasserstrom wird das Rad angetrieben und wir können Leistung entnehmen. Ein kleiner Widerstand ist mit einem kleinen Höhenunterschied verbunden und umgekehrt. Die abfallende Leistung setzt sich aus dem Höhenunterschied *und* dem Stromfluss zusammen, daher $P = U \cdot I$. Die Summe der Spannungsabfälle ist die Klemmspannung. Nun wissen Sie, warum es Spannungsabfälle aber keine Stromabfälle gibt, dies hat auch nichts mit Abfall/Müll zu tun ☺.



Wasserräder von <https://www.kreativekiste.de/bastelideen/wasserraeder-bauart-und-bauanleitung>

Dies entspricht der Reihenschaltung von zwei Widerständen, der Strom ist überall gleich und die Spannungsabfälle addieren sich zur Klemmspannung. Sie können sich selber überlegen, was in diesem Wasserflussmodell eine Parallelschaltung von zwei ungleich großen Widerständen wäre und wie da die Spannungsabfälle und die Stromflüsse sind. ☺

- Ein paar Dinge zu Solarzellen und Strom und Leistung: Die Sonne strahlt in der Entfernung der Erde mit 1.4 kW/m^2 , der Solarkonstante. Durch Tag und Nacht verbleibt nur die Hälfte dieser Leistung. Weiterhin absorbiert die Atmosphäre einen Teil der Strahlung, es bleiben in Deutschland 115 W/m^2 und somit die mittlere jährliche Globaleinstrahlung in von 1000 kWh/m^2 , siehe nebenstehende Abbildung. Solarzellen sind meist fest montiert und nicht immer optimal in Richtung zu Sonne ausgerichtet, weiterhin ist der Wirkungsgrad leider nur bei zirka 20%. So werden für 1000 kWh im Jahr zirka 10 m^2 Solarzellenfläche auf dem Dach benötigt. Zum Vergleich, eine vierköpfige Familie benötigt zirka 4000 kWh pro Jahr. Aber man beachte, die Energy-Payback-Time, also die Zeit bis die Solaranlage genau so viel Strom produziert hat, wie zur Herstellung aufgewendet werden musste, beträgt nur 1 Jahr und das bei 20 Jahren Lebensdauer, wow. Der Herstellungsstrom ist fast der alleinige CO_2 -Faktor bei der Herstellung.

