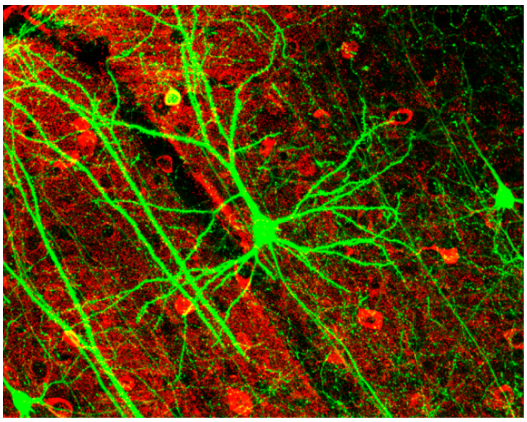
E-08: Kennlinien

(Version 1 – 15/11/2022)



Lee *et al.* doi:10.1371/journal.pbio.0040029

Die Bedeutung von Elektrizität für unsere moderne Gesellschaft ist unschätzbar. Neben faszinierenden Naturphänomenen und biologischen Vorgängen wie der Reizleitung in Nervenbahnen, sind es vor allem die technologischen Anwendungen, die in unserem Alltag allgegenwärtig und heutzutage unverzichtbar geworden sind. Elektronische Geräte erfüllen inzwischen die vielfältigsten und komplexesten Aufgaben. Ihre Funktionsweise basiert auf dem unterschiedlichen Verhalten verschiedener Materialien und daraus aufgebauter Schaltungen oder Bauteile.
In diesem Versuch lernen wir eine sehr grundlegende Methode kennen, die elektronischen Eigenschaften eines Bauteils zu untersuchen und zu charakterisieren, indem wir die sog. *Kennlinien* von drei unterschiedlichen Glühlampen aufnehmen und miteinander vergleichen.

Der Ohmsche Widerstand

Ein elektrischer Strom besteht aus elektrischen Ladungen, die sich durch einen Leiter bewegen. Sie werden angetrieben durch ein Potenzialgefälle, d. h. eine Spannung, z. B. eine Batterie. Die Stromstärke gibt dabei an, wie viele Ladungsträger sich pro Zeiteinheit durch den Leiter bewegen. Die meisten Materialien leiten elektrischen Strom mehr oder weniger gut. Metalle sind bekannt dafür, besonders gute Leiter zu sein. Dagegen bezeichnen wir einen Stoff, der den Strom nicht gut leitet, als Isolator. Um zu quantifizieren, wie *gut* ein bestimmter Stoff leitet, verwenden wir den Begriff des elektrischen *Widerstands*, der ein Maß dafür ist, wir groß die Stromstärke bei einer bestimmten Spannung wird, bzw. wie groß das Potenzialgefälle sein muss, um eine bestimmte Stromstärke zu erzeugen. Der Zusammenhang zwischen elektrischer Spannung U und Stromstärke I wird durch das *Ohmsche Gesetz* beschrieben,

$$U = R \cdot I \tag{1}$$

mit dem Ohmschen Widerstand R.
Die mikroskopische Ursache für den elektrischen Widerstand sind Streuprozesse der Leitungselektronen, z. B. Stöße mit den Atomen des Kristallgitters. Hierbei verlieren die Ladungsträger Energie an die Gitteratome und der Leiter erwärmt sich. Um den elektrischen Stromfluss aufrecht zu erhalten, muss daher Arbeit verrichtet werden, die durch eine Spannungsquelle zur Verfügung gestellt wird. Neben der Größe und Gestalt des Leiters bestimmt also in erster Linie sein Material die Größe seines elektrischen Widerstands.

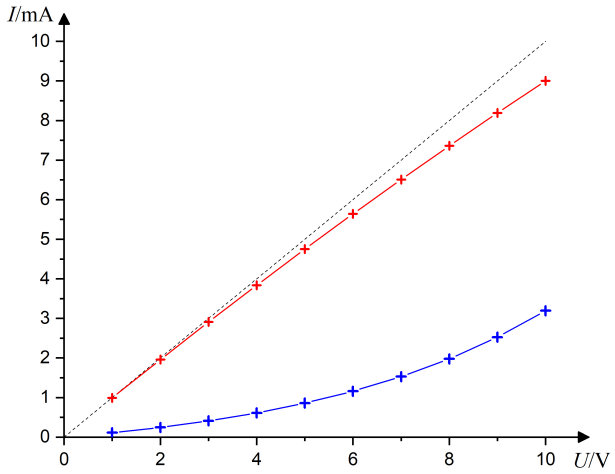


Abbildung 1: Die Kennlinie eines Materials beschreibt die charakteristische Abhängigkeit der Stromstärke von der angelegten Spannung. Sie kann für unterschiedliche Materialien sehr verschieden aussehen.

Wie wir in diesem Versuch sehen werden, ändert sich der Widerstand eines Leiters aber auch mit den Umgebungsbedingungen wie z. B. der Temperatur oder äußeren Feldern. So zeigen Metalle u. a. eine vollkommen andere Temperaturabhängigkeit des Widerstands als Isolatoren: für beide sorgt ein Anstieg der Temperatur zu einer Zunahme von Streuprozessen wie Gitterschwingungen, was bei Metallen dafür sorgt, dass der Widerstand mit der Temperatur zunimmt. Im Gegensatz dazu überwiegt bei Isolatoren ein anderer Prozess, der den Widerstand senkt: hier werden mit steigender Temperatur zunehmend freie Ladungsträger erzeugt, die zum elektrischen Transport beitragen können. In Metallen ist von vorn herein bereits eine große Zahl freier Ladungsträger vorhanden, so dass die thermische Zunahme hier kaum ins Gewicht fällt.

Kennlinien

Offensichtlich können wir also durch eine Messung des Widerstands eines Materials viel über seinen mikroskopischen Aufbau und seine physikalischen Eigenschaften lernen. Ausgehend vom Ohmschen Gesetz (1) besteht die einfachste Möglichkeit, den Widerstand eines Leiters zu bestimmen, darin, den Spannungsabfall über diesen sowie die ihn durchfließende Stromstärke zu messen. Da sich der Leiter aber erwärmt, wenn ein Strom fließt, und der Widerstand sich mit der Temperatur ändert, müssen wir erwarten, dass wir verschiedene Werte für den Widerstand messen, wenn wir die Stromstärke variieren. Diese Änderung im Verhalten des Materials können wir im Experiment beobachten, indem wir die Stromstärke durch eine Probe des Materials für einen weiten Bereich von Spannungen messen. Die grafische Auftragung der Wertepaare (U, I) nennen wir die *Kennlinie* des Materials, s. Abb. 1, die uns auf den ersten Blick die generellen elektronischen Eigenschaften der Probe zeigt. Besondere Bedeutung hat die Kennlinie bei Halbleitern und für technologische Anwendungen.

> *Selbststudium*: Wie hängt die Steigung der Kennlinie mit dem Widerstand zusammen? Was ist der Unterschied zwischen den Kennlinien von Isolatoren und von Metallen? Welche Bedeutung hat die gestrichelte Linie in Abb. 1?

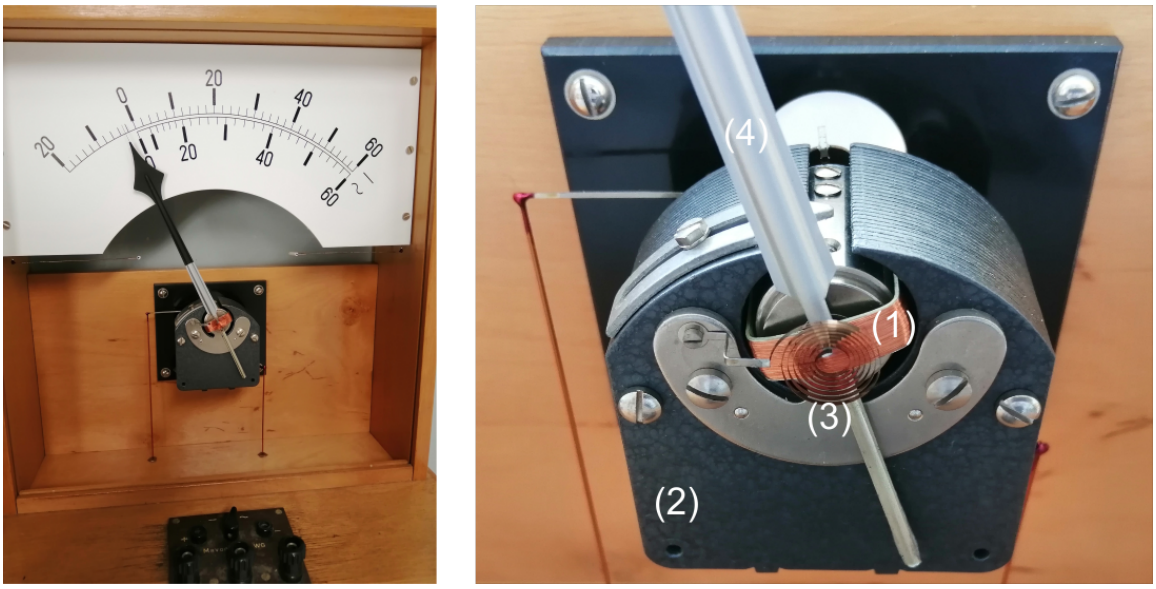


Abbildung 2: Aufbau eines Drehspulinstruments: (1) Messspule, (2) Permanentmagnet, (3) Rückstellfeder, (4) Zeiger.

Drehspulinstrumente

Die physikalischen Größen, die wir im Experiment messen wollen, sind Stromstärke und Spannung. Dafür verwenden wir sog. Drehspulinstrumente, die über einen Zeigerausschlag die zu messende Größe auf einer Skala anzeigen. In Abbildung 2 ist ein Demonstrationsgerät für didaktische Zwecke gezeigt, in dem das Messwerk zu sehen ist. Es besteht aus einer Spule (1), welche um einen Eisenkern gewickelt ist und drehbar im Feld eines Permanentmagneten (2) aufgehängt ist. Fließt ein zu messender Strom durch die Spule, so erzeugt die Lorentzkraft ein Drehmoment, das proportional zur Stromstärke ist und die Messspule so weit auslenkt, bis es von einem entgegengesetzten Drehmoment durch eine Rückstellfeder (3) kompensiert wird. Ein Zeiger (4), der fest mit der Messspule verbunden ist und sich mit ihr dreht, zeigt damit die Stromstärke in der Spule an.
Schaltet man das Drehspulinstrument also *in Reihe* mit einem Verbraucher, dann misst es die Stromstärke, die durch diesen fließt. Man kann es aber auch zur Messung der Spannung verwenden, die über dem Verbraucher abfällt, indem man es *parallel* dazu schaltet. Nach der Maschenregel fällt nämlich dabei über dem Messgerät dieselbe Spannung U ab wie über dem Verbraucher, und diese hängt gemäß dem Ohmschen Gesetzt (1) über den Innenwiderstand R_i des Messgeräts unmittelbar mit dem Strom zusammen. Vielfach wird daher bei Drehspulinstrumenten einfach angegeben, welcher Strom bei Maximalausschlag des Zeigers durch das Messgerät fließt, und wie groß sein Innenwiderstand ist, bzw. welche Spannung bei maximalem Zeigerausschlag abfällt. Damit kann das Gerät sowohl für die Messung der Stromstärke als auch der Spannung verwendet werden.

Spannungsteiler

Um die Kennlinie eines Verbrauchers aufnehmen zu können, wird im Experiment eine Schaltung benötigt, die es erlaubt, die angelegte Spannung kontinuierlich zu verändern. Eine einfache und weit verbreitete Realisierung dafür liefert das sog. Potentiometer. Es basiert auf einer *Spannungsteilerschaltung*, die schematisch in Abb. 3 a) gezeigt ist. Eine feste Spannung U_0 wird über zwei

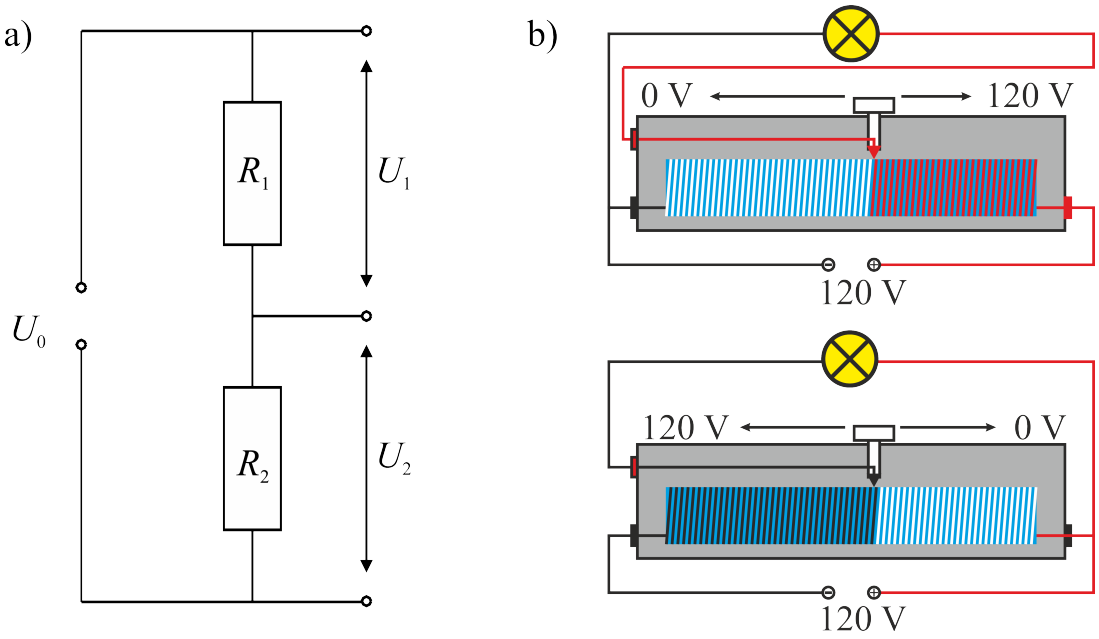


Abbildung 3: a) Schaltbild eines unbelasteten Spannungsteilers. b) Die zwei verschiedenen Schaltungen des Potentiometers.

in Reihe geschaltete Widerstände R_1 und R_2 angelegt, wobei über den beiden Widerständen jeweils Teilspannungen U_1 und U_2 nach dem Verhältnis ihrer Größe abfallen. Im *unbelasteten Fall* sieht man mithilfe der Kirchhoffschen Regeln leicht ein, dass derselbe Strom I durch beide Widerstände fließen muss, und folglich für die Teilspannungen gelten muss:

$$U_0 = U_1 + U_2 = (R_1 + R_2) \cdot I$$

$$\Rightarrow U_{1,2} = R_{1,2} \cdot I = \frac{R_{1,2}}{R_1 + R_2} U_0$$

Schaltet man parallel zu einem der beiden Teilerwiderstände, z. B. R_2 (s. Abb. 3 a), einen Verbraucher mit dem Widerstand R_L, so fällt gemäß der Maschenregel über beiden dieselbe Spannung ab.*

<u>*Selbststudium*</u>: Wie lauten die Kirchhoffschen Regeln und wie wendet man sie an?

Da wir im Experiment eine *kontinuierlich* veränderliche Spannung benötigen, verwendet man hier keine festen Widerstände R_1 und R_2, sondern ein sog. Potentiometer. Dieses besteht in der Regel aus einem Widerstandsdraht fester Länge ℓ mit einem Widerstand R_p, über welchem die gesamte Spannung U_0 abfällt. Ein verschiebbarer Abgriff teilt den Draht in zwei Segmente der Längen ℓ_1 und ℓ_2 mit den Widerständen

$$R_{1,2} = \frac{\ell_{1,2}}{\ell} \cdot R_\mathrm{p} \; .$$

Über einem der beiden Segmente kann nun die Schaltung mit dem zu untersuchenden Verbraucher angeschlossen werden, so dass darüber die Spannung mit der Position des Abgriffs variiert werden kann, s. Abb. 3 b).

*Beim *belasteten* Spannungsteiler stimmt der obige Ausdruck für diese Spannung U_2 nicht mehr exakt, da der Strom I nun im Knoten vor dem Widerstand R_2 verzweigt und nur ein Teilstrom durch den Teilerwiderstand fließt. Dementsprechend fällt hier eine geringere Spannung als im unbelasteten Fall ab.

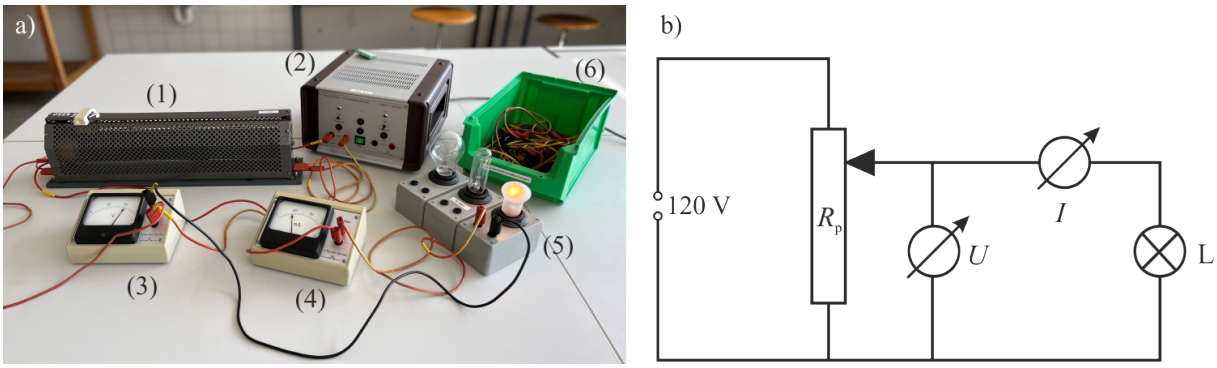


Abbildung 4: a) Versuchsaufbau – (1) Schiebewiderstand, (2) Netzgerät, (3) & (4) Drehspulinstrumente (5) drei Glühlampen, (6) Messleitungen. b) Schaltplan.

Versuchsaufbau

In diesem Versuch werden die Kennlinien von drei Verbrauchern aufgenommen. Es handelt sich dabei um drei Glühlampen unterschiedlicher Art, die wir anhand ihrer Kennlinien untersuchen wollen. Der Versuchsaufbau ist in Abb. 4 zu sehen. Er besteht neben den Glühlampen selbst aus zwei Drehspulinstrumenten zur Messung der Spannung und Stromstärke, einem Schiebewiderstand als Potentiometer, sowie einem Netzgerät, das eine Spannung von 120 V liefert. Das Netzgerät hat zwei getrennte Kanäle und kann somit zwei Versuchsaufbauten gleichzeitig und unabhängig versorgen. Die Schaltung ist ebenfalls in Abb. 4 zu sehen und besteht aus einem Spannungsteiler sowie einer einfachen Masche mit der Glühlampe und den Messgeräten.
Da der Schiebewiderstand symmetrisch aufbaut ist, kann man beide Abschnitte des Spannungsteilers für die Masche des Verbrauchers verwenden, s. Abb. 3 b). Dabei ändert sich aber die Wirkungsweise des Schiebereglers: Benutzt man z. B. für die Testmasche den Kontakt am Schiebewiderstand, der sich auf derselben Seite wie der Kontakt des Schieberabgriffs befindet (Abb. 3 b) oben), so verschwindet die Spannung über der Glühlampe, wenn der Abgriff an diesen Rand geschoben wird, und nimmt zur anderen Seite hin zu. Für die andere Schaltung (Abb. 3 b) unten) ist es umgekehrt. Da der Widerstand der Glühlampen sehr niedrig sein kann, wenn sie noch kalt sind, kann der Strom bei Anlegen einer hohen Spannung sehr groß werden und das Netzteil überlasten. Deswegen sollte man bereits beim Aufbau des Versuchs darauf achten, welche der beiden Varianten man gewählt hat, und sich die Wirkungsweise des Abgriffs klarmachen. Die Messung jeder Kennlinie soll stets bei niedriger Spannung beginnen. Tatsächlich verfälscht eine umgekehrte Vorgehensweise auch die Ergebnisse, da die Glühlampe dabei eine höhere Temperatur hat, als der angelegten Spannung entspricht.

Durchführung

1. Bauen Sie den Versuch wie oben beschrieben auf, vgl. Schaltplan in Abb. 4 b). Beginnen Sie den Versuch mit einer beliebigen der drei zur Verfügung stehenden Glühlampen.

2. Achten Sie darauf, wie das Potentiometer geschaltet ist und stellen Sie den Abgriff so ein, dass keine Spannung an der Testmasche anliegt. Lassen Sie die Schaltung von Ihrem Betreuer abnehmen, bevor Sie die Spannung einschalten.

   Vorsicht – 120 V! Verwenden Sie ausschließlich die Messleitungen mit berührungssicheren Steckern, die beim Versuch liegen, und achten Sie darauf, keine unisolierten Kontakte zu berühren. Verbinden Sie das Netzgerät als letztes mit der übrigen Schaltung und schalten

Sie die Spannung erst ein, wenn die Sie mit dem Aufbau fertig sind.

3. Erhöhen Sie nun in Schritten von ca. 5 V die anliegende Spannung und notieren Sie in Ihr Messprotokoll die gemessenen Werte der Spannung und der Stromstärke, jeweils mit Unsicherheit, bis der Maximalwert der Spannung erreicht ist.
4. Schieben Sie den Abgriff am Potentiometer wieder zurück, bis die Spannung an der Glühlampe verschwindet.
5. Nehmen Sie nun die gemessene Lampe aus der Schaltung und bauen statt dessen eine der beiden anderen Lampen ein.
6. Wiederholen Sie die Messung der Kennlinie genauso wie bei der ersten Lampe.
7. Bauen Sie nun die letzte Glühlampe in die Schaltung ein und nehmen Sie wie vorher die Kennlinie auf.

Bauen Sie den Versuch nach Abschluss der Messreihe wieder ab und räumen Sie die Geräte und Messleitungen auf. Hinterlassen Sie den Messplatz in ordentlichem Zustand.

Auswertung

1. Tragen Sie die Wertepaare (U, I) als Kennlinie für alle drei untersuchten Glühlampen grafisch in einem *gemeinsamen* Diagramm auf. Tragen Sie die Unsicherheiten der Messwerte als Fehlerbalken im Diagramm ein.
2. Berechnen Sie für jedes Wertepaar den Widerstand der drei Glühlampen und die umgesetzte Leistung jeweils mit Unsicherheit.
3. Tragen Sie für alle drei Glühlampen in einem weiteren *gemeinsamen* Diagramm die errechneten Werte für den Widerstand als Funktion der Leistung erneut inkl. Fehlerbalken auf.

Diskussion und Zusammenfassung

Der Versuchsbericht soll mit der Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse sowie einem Fazit abgeschlossen werden. Diskutieren Sie die Unterschiede im Verlauf der Kennlinien sowie die Widerstandscharakteristiken der einzelnen Glühlampen und ziehen Sie daraus Schlussfolgerungen auf die physikalischen Eigenschaften der verschiedenen Materialien. Welche Erkenntnisse hat dieses Experiment geliefert?