

E-15 – Leitfähigkeit von Metallen

Zwei- und Vierpunktmessung

(Version 1 – 15. April 2014)

In diesem Versuch soll die Leitfähigkeit verschiedener Metalle mit zwei unterschiedlichen Methoden gemessen werden. Dabei zeigt sich, dass selbst eine scheinbar simple Aufgabe wie die Messung eines Widerstands experimentelle Tücken hat und nicht so trivial ist, wie sie theoretisch zu sein scheint.

Der elektrische Widerstand ist die zentrale Größe der Elektrizität. Die Leitfähigkeit bzw. ihr Kehrwert, der *spezifische Widerstand* gibt nicht nur Aufschluss über die Eignung eines Materials als elektrischer Leiter, sondern erlaubt auch Einblick in seinen mikroskopischen Aufbau. Die Messung des Widerstands einer Probe dient somit der präzisen Charakterisierung der elektrischen, thermodynamischen und kristallografischen Eigenschaften, und kann in einer Vielzahl von Anwendungen benutzt werden, z. B. für Thermometer, Präzisionswaagen, Magnetfeldsensoren, im medizinischen Bereich und der Laboranalytik. Auch in Festplatten wird die Änderung des elektrischen Widerstands der einzelnen Bits beim Lese- und Schreibzugriff ausgenutzt.

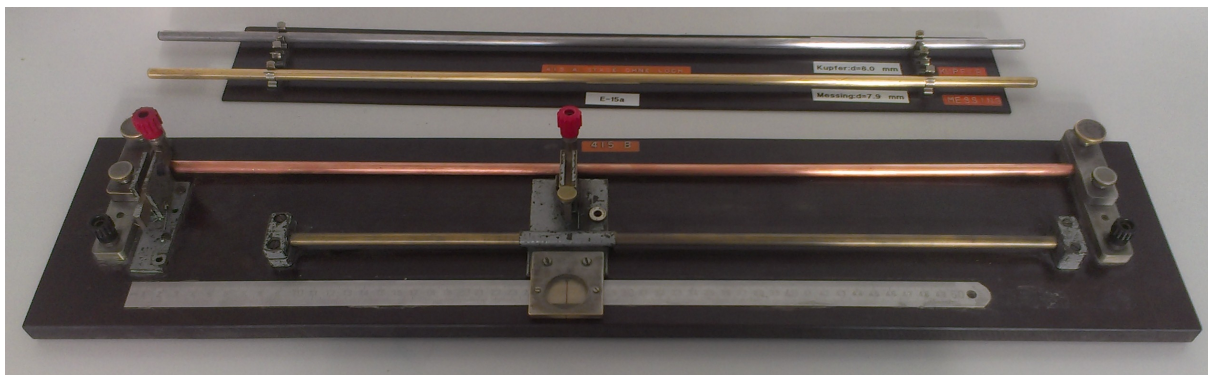


Abbildung 1: Kontaktbrett für die Messungen an den Metallstäben.

Leitfähigkeit und spezifischer Widerstand

Ein metallischer Leiter besitzt immer einen elektrischen Widerstand. Die Ursache dafür 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. Der Zusammenhang zwischen elektrischer Spannung U und Stromstärke I wird durch das *Ohmsche Gesetz* beschrieben,

$$U = R \cdot I \quad (1)$$

mit dem elektrischen Widerstand R .

Der Widerstand eines Leiters wächst proportional zur Länge des Leiters an und nimmt umgekehrt proportional zu dessen Querschnittsfläche ab. Damit ergibt sich für den ohmschen Widerstand

eines Leiters der Länge l und der (konstanten) Querschnittsfläche A

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

mit dem spezifischen Widerstand ρ , einer Materialkonstanten mit der Einheit $[\rho] = \Omega m$. Sein Kehrwert ist die elektrische Leitfähigkeit des Materials, $\sigma = \frac{1}{\rho}$.

Widerstandsmessung

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.

Schaltung

Eine einfache Schaltung zur Bestimmung des Widerstands ist in Abb. 2 gezeigt. Diese Schaltung bezeichnet man als *Zweipunktmessung*, da der zu messende Widerstand nur an zwei Kontaktpunkten angeschlossen wird, von denen sowohl die Zuleitungen der Spannungsversorgung (bzw. der Potischaltung, s. u.) als auch des Messgeräts für den Spannungsabfall abgehen. Das Amperemeter zur Messung der Stromstärke wird in Reihe geschaltet, damit es vom zu messenden Strom durchflossen wird. Das Spannungsmessgerät wird parallel zum zu messenden Widerstand geschaltet.

Vorbereitung: Wie werden die Innenwiderstände der unterschiedlichen Messgeräte dimensioniert und weshalb ist das sinnvoll? (Tipp: Kirchhoffsche Regeln anwenden)

Zur Versorgung der Schaltung wird ein Netzteil mit fester Spannung U_0 verwendet, das über ein sog. *Potenzimeter* R_P an den Widerstand angeschlossen wird. Das Poti ist ein Spannungsteiler, mit dem der Spannungsabfall über der Messanordnung eingestellt werden kann.

Vorbereitung: Wie ergibt sich aus dem Abgriff am Poti der Wert der Spannung über der Messanordnung?

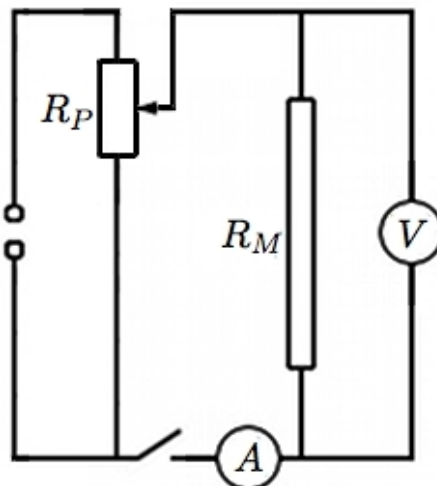


Abbildung 2: Schaltbild der Zweipunktmessung mit Spannungsteiler.

Messung

- Zunächst wird die Schaltung für die Zweipunktmessung (vgl. Abb. 2) aufgebaut.
- Als erstes wird das Digitalmultimeter zur Messung der Spannung eingeschaltet und ggf. ein Nullpunktsabgleich durchgeführt, **bevor das Netzgerät eingeschaltet wird**, da sonst die Kalibration verfälscht wird.
- Für die drei Stäbe aus Messing, Kupfer und Stahl wird jeweils der Spannungsabfall und die Stromstärke gemessen. Für die Auswertung müssen die Stablänge und alle Messunsicherheiten notiert werden.
- Für einen der Stäbe werden 5 - 6 Werte bei verschiedenen Stromstärken aufgenommen.

Auswertung

Aus den Messwerten ermittelt man die Leitfähigkeit der drei Stabmaterialien mit experimenteller Unsicherheit. Für den Stab, der mehrfach gemessen wurde, muss ein *sinnvoller* Mittelwert gebildet werden.

Kontakt- und Zuleitungswiderstände

Die Bestimmung der Leitfähigkeit aus den Ergebnissen einer einfachen Zweipunktmessung liefert – wie sich zeigen wird – keine besonders zuverlässigen Resultate. Der Grund dafür liegt in erster Linie in bisher nicht berücksichtigten Widerständen an Zuleitungen und Kontaktstellen, die in die Messung eingehen und insbesondere dann einen großen Einfluss auf das Messergebnis haben, wenn der Probenwiderstand selbst klein ist.

Zuleitungswiderstände ergeben sich aus der Tatsache, dass auch jedes Kabel usw. nur ein Leiter mit einem (kleinen, aber endlichen) Widerstand ist. Kontaktwiderstände dagegen treten an allen Kontaktstellen auf, z. B. von Zuleitung zu Probe oder Messgerät, und sind durch die Oberflächenbeschaffenheit der Kontaktflächen bedingt. Auf mikroskopischer Skala sind Oberflächen niemals eben und nur ein kleiner Anteil der scheinbaren Kontaktfläche trägt zur Leitung des Stroms bei (s. Abb. 3). Effektiv verringert sich dadurch der Leiterquerschnitt, so dass gemäß Gleichung (2) der Widerstand zunimmt. Auch Korrosion und Verschmutzung der Oberflächen vergrößern den Kontaktwiderstand.

Vorbereitung: Was ist der Grund dafür?

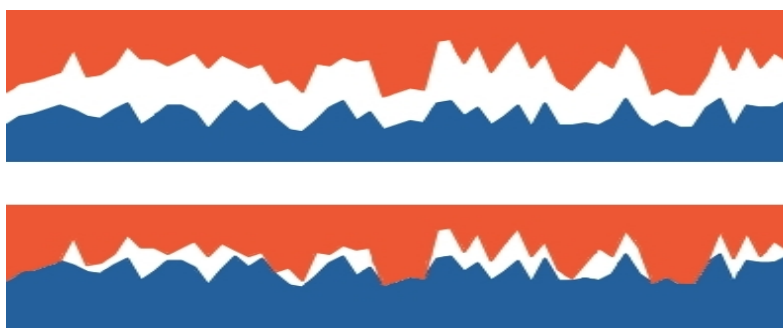


Abbildung 3: Schematische Darstellung zweier Kontaktflächen vor (oben) und nach dem Zusammenführen (unten).

Vierpunktmessung

Man kann den Einfluss der Leitungs- und Kontaktwiderstände auf die Spannungsmessung erheblich verringern, indem man die Probe an insgesamt vier Punkten kontaktiert, wovon zwei für die Zuleitung des Stroms (d. h. das Netzgerät bzw. das Poti) benötigt werden, und zwei weitere für die Anschlüsse des Digitalmultimeters zur Messung der Spannung.

Vorbereitung: Warum kümmert man sich nur um die Spannungsmessung und nicht um den Strom?

Schaltung

Die Schaltung für eine Vierpunktmessung ist in Abb. 4 gezeigt. Die Abgriffe für die Spannungsmessung befinden sich auf beweglichen Tastern, die den Metallstab über scharfe Klingen kontaktieren. Abgesehen davon ist die Schaltung identisch mit der Zweipunktmessung.

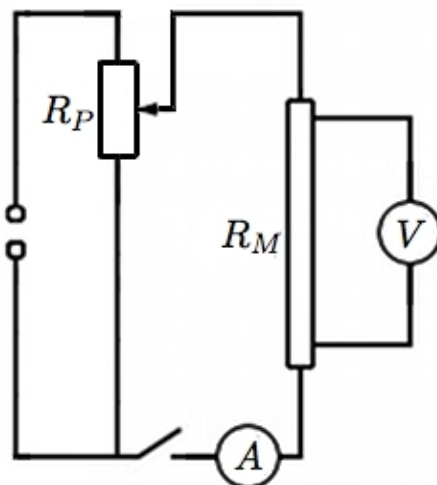


Abbildung 4: Schaltbild der Vierpunktmessung.

Vorbereitung: Anhand der Ersatzschaltbilder für beide Schaltungen, in denen Zuleitungs- und Kontaktwiderstände eingezeichnet werden, soll mit Hilfe der Maschenregel der jeweilige Ausdruck für die vom Voltmeter angezeigte Spannung hergeleitet werden (man betrachtet dabei nur diese eine Masche!).

Unter der Voraussetzung, dass der Innenwiderstand des Voltmeters viel größer ist als alle übrigen Widerstände in der Schaltung, begründet man die Vierpunktmethode. Wann bricht diese Methode zusammen?

Messung

- Die Schaltung wird für die Vierpunktmessung umgebaut (vgl. Abb. 4).
- Für jeden Metallstab wird bei **konstanter Stromstärke** der Spannungsabfall über 15 verschieden lange Stababschnitte gemessen.
- Für alle Größen werden die Messunsicherheiten protokolliert.

Auswertung

- Zunächst wird für alle Stäbe aus den Messwerten $U(x)$ und $I(x)$ bei der Länge x der zugehörige Widerstand $R(x)$ mit experimenteller Unsicherheit berechnet.
- Der Widerstand $R(x)$ wird als Funktion der Länge x für alle Materialien grafisch aufgetragen.
- Mittels *grafischer* Geradenanpassung wird unter Verwendung von Gleichung (2) die Leitfähigkeit der Metalle erneut bestimmt.
- Aus den Ergebnissen der Zweipunkt- und Vierpunktmessung wird die Größenordnung der Kontaktwiderstände abgeschätzt.

Zusammenfassung und Diskussion

Der Bericht soll mit einer Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse abgeschlossen werden. Dazu gehört hier insbesondere die Diskussion der beiden experimentellen Methoden und der Vergleich mit Literaturwerten. Welche Erkenntnisse hat das Experiment gebracht? Nebenfachstudenten sollen einen Bezug herstellen zu ihrem Hauptfach, Lehramtsstudenten zur Erfahrungswelt eines Schülers.