

Physikalisches Anfängerpraktikum
an der Universität Konstanz:

Thermospannung

Experiment durchgeführt am 12.05.2005

Jan Korger, Studiengang Physik-Diplom
Thomas Wurth, Studiengang Physik-Diplom

1 Theorie

1.1 Seebeck-Effekt und Thermospannung

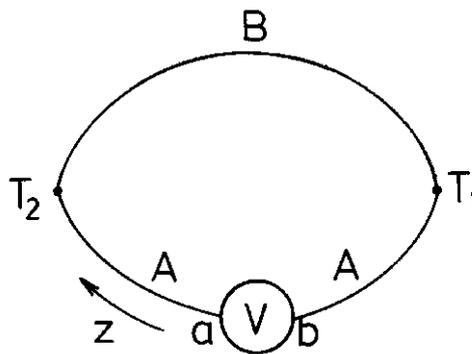


Abbildung 1: Thermoelement [Quelle: J. Jäckle – Über die Ursache der Thermospannung]

Der von Thomas Johann Seebeck experimentell entdeckte und nach ihm benannte Effekt lässt sich zur Konstruktion von Thermoelementen (siehe Abbildung 1) ausnutzen. Man findet experimentell die Seebeck-Koeffizienten Q (auch absolute Thermokräfte) der Metalle, mit denen gilt:

$$U_{\text{Th}} = (Q_A - Q_B)(T_1 - T_2) \quad (1)$$

Typische Werte für Q liegen zwischen 10^{-6} V/K (Metalle) und 10^{-2} V/K (Halbleiter). Berücksichtigt man die temperaturabhängig dieser Koeffizienten, wird (1) zu: (Integrationsgrenzen a und b sowie der Integrationsweg beziehen sich auf Abbildung 1.)

$$U_{\text{Th}} = - \int_a^b Q(T) \nabla T \cdot d\vec{s} \quad (2)$$

Wählt man einen zu Abbildung 1 ähnlichen Aufbau – jedoch ohne Messgerät oder sonstige Unterbrechung des Stromkreises – fließt ein konstanter Kreisstrom, welcher ein Magnetfeld induziert. Seine Stärke erhält näherungsweise mit dem ohmschen Widerstand R :

$$I_{\text{Th}} = \frac{U_{\text{Th}}}{R} \quad (3)$$

1.1.1 Erklärung durch Thermodiffusion

Der elektrische Strom in einem Leiter setzt sich aus zwei Komponenten zusammen. Neben dem altbekannten durch das Ohm'sche Gesetz beschriebene Strom handelt es sich um den sog. Thermodiffusionsstrom. Der Ohm'sche Strom ist bekannterweise der Spannungsdifferenz proportional, der letztgenannte jedoch der Temperaturdifferenz.

Liegt an einem Leiter keine äußere Spannung an, werden auf Grund der Thermodiffusion so lange Ladungen getrennt, bis der Effekt gerade durch den Ohm'schen Strom kompensiert wird. Dadurch baut sich entlang des Temperaturgradienten im Leiter ein Spannungsgradient auf. Die Thermospannung ist nun gerade die Differenz der beiden Spannungsgradienten.

1.2 weit verbreitete Lehr(buch)meinung

Damit ein Elektron einen metallischen Festkörper verlassen kann, muss die elementspezifische Austrittsarbeit aufgebracht werden. Berühren sich zwei Metalle entsteht ein (Brutto-)Elektronenstrom in Richtung des Metalls mit der größeren Austrittsarbeit, so lange bis das entstehende elektrische Feld groß genug ist, dass sich ein Gleichgewicht einstellt. Der Effekt ist temperaturabhängig. Haben beide Berührungspunkte (bzw. Lötstellen) unterschiedliche Temperaturen, so stellt sich eine Spannung innerhalb der Metalle ein.

1.3 Peltier-Effekt

1834 stellte der Franzose Jean Peltier den Seebeck auf den Kopf und fand: Ersetzt man in Abbildung 1 das Messgerät durch eine Gleichspannungsquelle, wobei weiterhin eine der Kontaktstellen auf einer konstanten Temperatur gehalten wird, ändert sich die Temperatur der anderen in Abhängigkeit von Stromstärke I und Richtung. Den Effekt kann man nicht alleine der Joule'schen Wärme zuschreiben. Die Änderung der Wärmeenergie $\frac{dQ}{dt}$ (Q ist hier kein Seebeck-Koeffizient) durch den Thomson-Effekt (der stets von der Erwärmung durch Joule'sche Wärme überlagert wird) hängt außerdem von den materialspezifischen Peltier-Koeffizienten Π ab:

$$\frac{dQ}{dt} = (\Pi_A - \Pi_b)I \quad (4)$$

Es handelt sich um einen reversiblen Prozess.

Der Peltier-Effekt lässt sich im Rahmen der kinetischen Theorie für die Leitungselektronen erklären. Wir begnügen uns hier mit der Erkenntnis, dass der Effekt daher rührt, dass mit dem elektrischen Strom stets auch ein Wärmestrom fließt – auch unter isothermen Verhältnissen.

Der Effekt findet seine Anwendung als ineffizientes aber kleines Kühlelement, z.B. in elektrischen Kühltaschen oder zur Kühlung von CCDs in Digitalkameras.

1.4 Thomson-Effekt

In einem stromdurchflossenen homogenen Leiter, entlang dessen ein Temperaturgefälle existiert, tritt ein weiterer Effekt auf: Zusätzlich zu der Leistung, die am ohm'schen Widerstand verbrannt wird, tritt der Thomsonwärme in Erscheinung. Für deren Leistung gilt mit der materialspezifischen Konstante σ :

$$P_{\text{Thomson}} = -\sigma I dT \quad (5)$$

Sie bewirkt eine Verschiebung der Temperatur mit oder gegen die Stromrichtung.

1.5 thermoelektrische Spannungsreihe

1.6 Fragen und Aufgaben

1.6.1 Auswahl der Materialkombination

Die Thermospannung ist bei jeder Materialkombination in einem bestimmten Bereich linear von der Temperatur abhängig. Dieser Bereich ist für Messungen besonders geeignet, da zur Kalibrierung oder Justierung hier zwei Fixpunkte genügen.

1.6.2 Vorteil der Kompensationsmessung

Jedes Voltmeter hat einen endlichen Innenwiderstand durch den Strom fließt. Dies verfälscht die Messung – bei kleinen Spannungen besonders stark. Bei der Kompensationsmessung fließt kein Strom, daher wird der Fehler vermieden.

1.6.3 systematischer Fehler durch thermoelektrischen Effekt

Thermoelektrische Effekte treten möglicherweise nicht nur im Thermoelement, sondern auch an den Zuleitungen, dem Messgerät und den jeweiligen Kontaktstellen auf.

1.6.4 Welche Lötstelle kühlt sich ab?

Übt man auf ein System im thermodynamischen Gleichgewicht einen “Zwang” aus, so reagiert es so, dass sich der Zwang verkleinert. Zwang meint hier einen z.B. Temperatur-, Konzentrations- oder Druckgradienten.

Da die für den Wärmetransport zumindest mitverantwortlichen Elektronen negativ geladen sind, also vom negativeren Potential zum positiveren wandern, wird sich der näher am Minuspol gelegene Pol abkühlen. Das Gegenteil widerpräche dem Prinzip vom kleinsten Zwang.¹

1.6.5 Bosonen statt Fermionen

Die thermoelektrischen Effekte basieren auf der Diffusion von Elektronen von einem Metall in ein anderes. Für Fermionen gilt das Pauli-Prinzip, woraus folgt, dass es einfach besetzte Zustände gibt. Dies führt dazu, dass die Austrittsarbeit (bzw. die Tiefe des höchsten besetzten Elektronenzustandes) geringer ist als bei Bosonen, für die das Pauli-Prinzip keine Gültigkeit hat. Bosonen können zumindest nicht so leicht in ein anderes Metall diffundieren. Vermutlich würde man wenn überhaupt einen geringeren Effekt beobachten, aber zum Glück sind Elektronen keine Bosonen.

2 Experiment

2.1 Durchführung

Wir möchten den Seebeck-Effekt an Hand eines einfachen Thermoelementes experimentell nachprüfen. Da wir nur geringe Spannungen erwarten verwenden wir eine Kompensationsmethode zu deren Nachweis.

Das Thermoelement besteht aus zwei metallische Drähten, die an ihren Enden mit Lötstellen verbunden sind. Die eine Lötstelle, befindet sich in einem Wasserbad, das konstant auf 0°C gehalten wird. Die Temperatur des Wasserbads, in dem sich die andere befindet, wird nach und nach erhöht, so dass wir die Thermospannung in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz messen können.

¹naja: Ich fürchte, das kann man nur im Jäckle-Modell gut erklären.

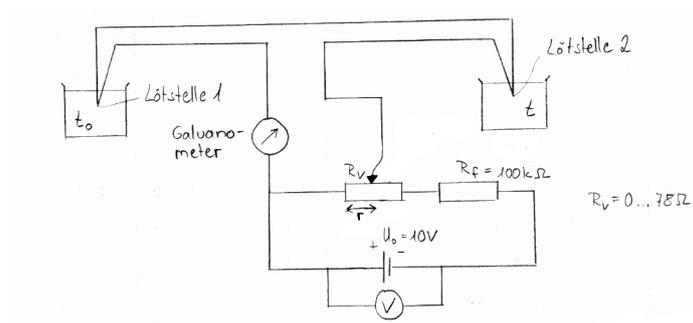


Abbildung 2: Versuchsaufbau

Zur Kompensationsmessung (siehe Abbildung 2) verwenden wir eine Gleichstromquelle mit konstant $U_0 = (10.0 \pm 0.2) \text{ V}$. Den als Spannungsteiler genutzte Widerstand R_{ST} stellen wir stets so ein, dass durch den Galvanometer kein Strom fließt. Die Spannung am Thermoelement ist dann gleich der Spannung, die am in der Skizze linken Teil des Spannungsteiler (Widerstand $R_V = \frac{\text{Skalenteile}}{1000} R_{ST} =: r R_{ST}$) abfällt. Mit Schulphysik findet man:

$$R_{\text{ges}} = R_f + R_{ST} = \frac{U_0}{I} \quad (6)$$

$$R_V = \frac{U_V}{I} \iff U_V = IR_V = \frac{r R_{ST}}{R_{ST} + R_f} U_0 \quad (7)$$

Offensichtlich ist die Thermospannung $U_{Th} = U_V$.

2.2 Auswertung

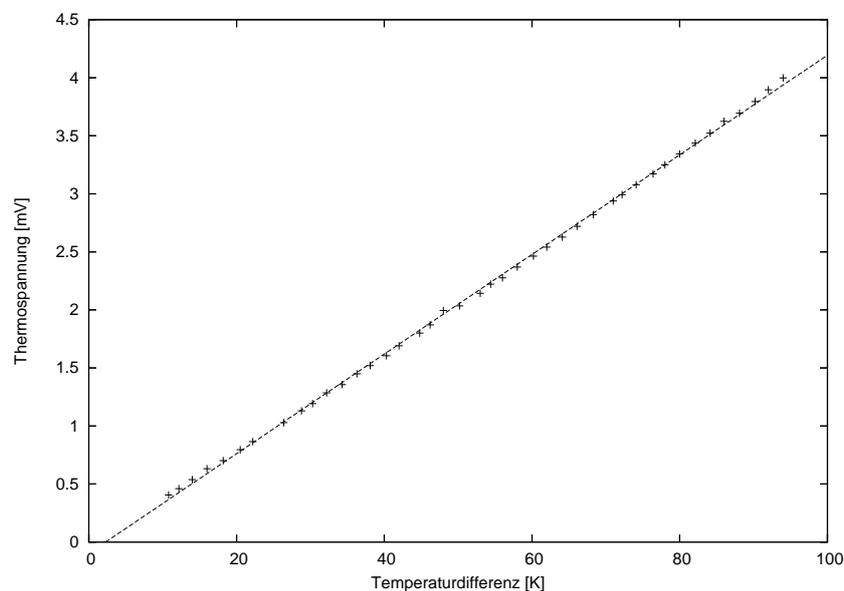


Abbildung 3: Messdaten

Die Messdaten können Abbildung 3 entnommen werden. Die Empfindlichkeit des Thermoelementes erhält man aus der Steigung der Ausgleichgeraden:

$$\frac{dU_{Th}}{dT} = (0.0429 \pm 0.0002) \frac{\text{mV}}{\text{K}} \quad (8)$$

2.3 Fehlerdiskussion

- Die extrapolierte Ausgleichsgerade geht nicht exakt durch den Nullpunkt. Die gering erscheinende Abweichung ist deutlich größer als auf Grund der statistischen Fehler zu erwarten. Es handelt sich folglich entweder um einen systematischen Fehler – d.h. z.B. ein Fehler der Messgeräte – oder weist darauf hin, dass das Thermoelement sich im entsprechenden Bereich nicht linear verhält.
- Auch die Kompensationsmethode zur Spannungsmessung ist fehlerbehaftet, insbesondere weil die verwendeten Widerstände nicht exakt bestimmt worden sind. Einfach Widerstände haben oft Toleranzen zwischen 5% und 10%. Auch der Innenwiderstand der Spannungsquelle blieb vollkommen unberücksichtigt.
- Die Empfindlichkeit des altertümlichen Galvanometers ist unbekannt.
- Der Magnetrührer erzeugt ein zeitlich variables Magnetfeld...

A Literatur

- Wikipedia, die freie Enzyklopädie
<http://de.wikipedia.org>
- J. Jäckle: Über die Ursache der Thermospannung
<http://www.uni-konstanz.de/physik/Jaeckle/papers/thermospannung/>
- Dieter Meschede: Gerthsen – Physik
21. Auflage, 2002, Springer
- Bernd-Uwe Runge: Versuchsanleitungen zum physikalischen Anfängerpraktikum
<http://ap.physik.uni-konstanz.de/Anleitungen.html>