



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

Fakultät Physik

Physikalisches Grundpraktikum

Versuch: **TH1**

Aktualisiert: am 12.06. 2019

Thermoelement

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung	2
2	Allgemeine Grundlagen	2
2.1	Thermospannung, Seebeckeffekt	2
2.2	Abkühlungskurven	3
2.2.1	Newton'sches Abkühlungsgesetz	3
2.2.2	Abkühlungskurven im Temperaturbereich mit Phasenübergängen	4
2.3	Temperaturabhängigkeit der Thermospannung	4
3	Experimente	5
3.1	Messung mit Thermoelementen	5
3.1.1	Messmodul zur Temperaturmessung mit Thermoelementen	5
3.1.2	Differentielle Thermoanalyse	5
3.2	Kalibrierung von Thermoelementen/der Messanordnung	5
4	Anhang	6
4.1	Transportphänomene und Thermokraft	6
4.2	Zur Ursache der Thermospannung	7
5	Fragen	8

1 Aufgabenstellung

1. Mit Hilfe der vorgegebenen Versuchsanordnung ist die Abkühlkurve eines Stahlkörpers in einem Temperaturbereich von 300°C bis ca. 100°C aufzunehmen. Das newtonsche Abkühlungsgesetz ist zu bestätigen und die Parameter sind zu bestimmen.
2. Die Temperaturmessung mit der vorgegebenen Versuchsanordnung ist mit Hilfe der Erstarrungstemperaturen von Blei, Zinn, Wismut und dem Siedepunkt von Wasser zu überprüfen und zu kalibrieren. Die Konstanten einer linearen Regression über die Messpunkte sind zu bestimmen und eine Kalibrierungskurve ist zu erstellen.
3. Für Zinn ist die Abkühlkurve von einer Temperatur oberhalb des Schmelzpunktes bis zu etwa 60°C aufzunehmen und unterhalb des Erstarrungspunktes bezüglich des Wärmeübergangskoeffizienten auszuwerten. Vergleichen Sie das Ergebnis mit dem des Stahlkörpers.

2 Allgemeine Grundlagen

2.1 Thermospannung, Seebeckeffekt

Seebeck-, Peltier- und Thomson-Effekt sind die wichtigsten thermoelektrischen Erscheinungen (s. Anhang). Besteht zwischen den zwei Kontaktstellen ("Lötstellen") der Leiter aus dem Material 1 und dem Material 2 eines elektrischen Stromkreises eine Temperaturdifferenz, so entsteht eine Thermospannung (Seebeck-Effekt), welche auf Grund eines Temperaturgefälles entlang eines metallischen Leiters auftritt. Diese elektrische Spannung oder Potentialdifferenz ist eine Funktion der Temperaturdifferenz entlang des Leiters und hängt vom Material des Leiters ab.

Der Betrag und das Vorzeichen der Thermospannung werden durch das Produkt aus dem Temperaturunterschied ΔT und der differentiellen Thermospannung $S = \frac{\partial U}{\partial T}(T)$ mit S als Seebeckkoeffizient bestimmt ($U_{th} = S \cdot \Delta T$; Beispiele s. Tab. 1).

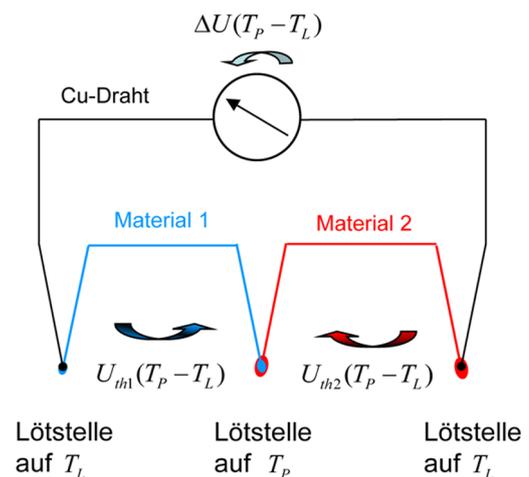


Abb. 1a:
Nachweis des Seebeck-Effekts einer Kombination aus 2 Metallen

Der Seebeckkoeffizient S hängt vom Material (meist Metall oder -legierung), der absoluten Temperatur sowie von der Reinheit (Gitterstörungen, Verunreinigungen) der Materialien ab. (Die hohen differentiellen Thermospannungen von Halbleitern können zur thermoelektrischen Energiewandlung genutzt werden). Bei einem einfachen Versuchsaufbau zum Nachweis des Seebeck-Effekts entsprechend Abb. 1a wird die gemeinsame Lötstelle eines Thermoelements auf eine Proben-Temperatur T_p und die Lötstellen der Verbindungen desselben Thermoelements auf eine Bezugstemperatur, beispielsweise $T_L = 0^\circ\text{C}$, gebracht und die Spannungsdifferenz als Differenz der unterschiedlichen Thermospannungen U_{th1} und U_{th2} gemessen.

Tab. 1: Seebeck-Koeffizienten einiger Metalle relativ zu Platin bei $T = 273\text{ K}$

Metall	$S/\frac{\mu\text{V}}{\text{K}}$
Konstantan *	-35
Nickel	-15
Aluminium	3,5
Kupfer	6,5
Silber	6,5
Nickel-Chrom	25

(Für die Angabe des absoluten Seebeck-Koeffizienten der Metalle muss der absolute Seebeck-Koeffizient von Platin ($-4,04\frac{\mu\text{V}}{\text{K}}$ bei 273 K) addiert werden)

Die Messung der absoluten Temperatur mit nur einem Thermoelement ist ebenfalls möglich, erfordert jedoch die genaue Kenntnis der Temperatur T_L der Lötstellen der Materialien des Thermoelements mit dem Verbindungsdraht (Kupfer) zum Messgerät. Zur absoluten Temperaturmessung muss diese Anordnung bei konstanter Temperatur dieser Lötstellen kalibriert werden.

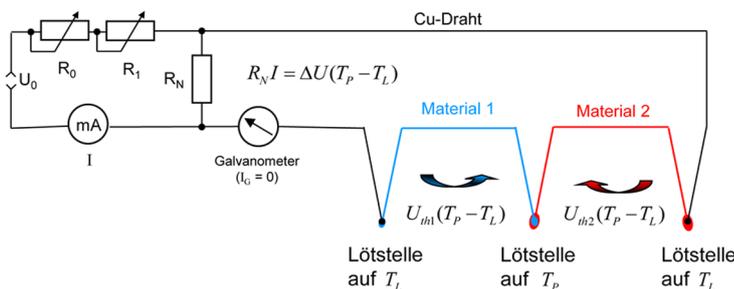


Abb. 1b: genaue Messung der Thermospannung eines Thermoelements, verbunden mit zwei Lötstellen im Kompensationsverfahren

Um keine Spannungsabfälle über die Verbindungsdrähte und an den Übergangswiderständen an den Kontakten beachten zu müssen ("spannungsrichtige" Messung), bedient man sich einer Kompensationsschaltung nach Abb. 1b. Dabei werden die Widerstände R_0 und R_1 (Grob- und Feinregelung) so eingestellt, dass das Galvanometer keinen Ausschlag anzeigt, also kein Strom über die Verbindungsdrähte und durch die Kontakte des Thermoelements fließt und $R_N I = U = U(T_P - T_L)$ gilt.

2.2 Abkühlungskurven

2.2.1 Newtonsches Abkühlungsgesetz

Ein Körper wird auf eine Temperatur T , höher als die Umgebungstemperatur T_u aufgeheizt und die zeitliche Abnahme der Temperatur aufgenommen ($T(t)$ -Kurve). Durch die gleichzeitige Wirkung der Wärme-Leitung, -Konvektion, -Strahlung (s. Versuch KW), erfasst durch den Abkühlungskoeffizienten K , kühlt sich der Körper ab.

Die Abkühlungskurve $T(t)$ ist eine monoton abfallende Exponentialfunktion. Sie folgt aus der Energiebilanz bzw. der Gleichheit der Wärmeströme: $I_w^{(1)}$ als abgeleitete Wärme und $I_w^{(2)}$ als bei der Abkühlung frei werdende Wärme mit $C = mc$ als Wärmekapazität (thermodynamisches Gleichgewicht) und Integration:

$$I_w^{(1)} = \frac{\lambda A (T - T_u)}{l} = K (T - T_u) = K T' \quad (a) \quad \text{und} \quad I_w^{(2)} = -C \frac{dT'}{dt} \quad (b) \quad \text{zu} \quad (1)$$

$$T'(t) = T(t) - T_u = (T(t_0) - T_u) e^{-\frac{K}{C} (t-t_0)} \quad . \quad (2)$$

$(T - T_u) = T'$; $T(t_0) =$ Ausgangs-, $T_u =$ Umgebungs-, $T(t) =$ Messtemperatur.

Nach der Zeit $\tau = C/K$ hat sich der Körper also um $1/e$ monoton abgekühlt (Abb. 2 a).

Treten jedoch Phasenübergänge auf, so sind die gemessenen Abkühlungskurven $T(t)$ nicht monoton und weisen z.B. einen Haltepunkt (Fall b) oder Knick (Fall c der Abb. 2) auf.

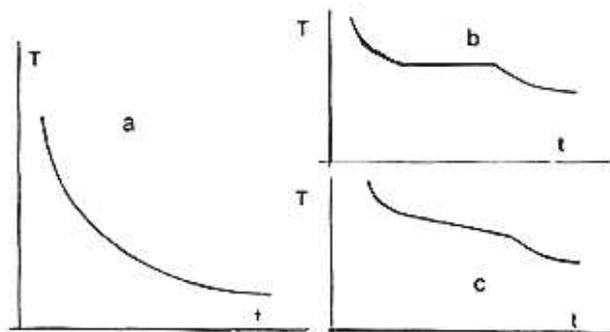


Abb. 2:
 $T(t)$ -Kurven: monotone Abkühlung nach Newton (a); mit dem Haltepunkt erstarrt eine reine homogene Schmelze kongruent (b); (gestrichelt mit Verunreinigungen). Am Knick beginnt die inkongruente Ausscheidung einer Phase (c)

2.2.2 Abkühlungskurven im Temperaturbereich mit Phasenübergängen

Eine kongruent erstarrende Schmelze (z.B. ein Element) zeigt in der $T(t)$ -Kurve am Schmelzpunkt bei $T = T_s$ einen Haltepunkt (Abb. 2 b). Hier herrscht energetisches Gleichgewicht zwischen abgeleitetem Wärmestrom und dem beim Erstarren frei werdendem Kondensationswärmestrom. Dabei erstarrt in der Zeiteinheit Δt gerade so viel des Metalls Δm , dass die (Erstarrungs-) Temperatur konstant bleibt. Kongruente Phasenübergänge von reinen Metallen eignen sich besonders gut zum Kalibrieren von Thermoelementen.

Erstarrt nur eine von mehreren Phasen in der Flüssigkeit (inkongruente Erstarrung), so zeigt die $T(t)$ -Kurve eine Änderung im Kurvenverlauf (Abb. 2 c).

2.3 Temperaturabhängigkeit der Thermospannung

Im allgemeinen ist die Temperaturabhängigkeit der gemessenen integralen Thermospannung $U_{th}(T) = \int_{T_0}^{T_1} S(T)dT$ nicht linear und kann mit einer Parabel durch den Nullpunkt (0°C) angenähert werden:

$$U^{th} = a T + b T^2 \quad . \quad (3)$$

Hier sind a und b thermoelektrische Materialkonstanten und T die Temperaturdifferenz bezogen auf die Bezugstemperatur T_0 (meist 0°C).

3 Experimente

3.1 Messung mit Thermoelementen

3.1.1 Messmodul zur Temperaturmessung mit Thermoelementen

Für die Messung der Temperaturen im Bereich zwischen 0°C und 400°C findet ein Thermoelement vom Typ K (NiCr-Ni) Verwendung. Dieses Thermoelement ist mit Verbindungsdrähten und nicht vertauschbaren Steckverbindungen aus genau diesen Materialien mit einem Messmodul Abb. 3 verbunden, dessen grundlegende Funktionsweise mit der Kompensationsschaltung aus Abb. 1b vergleichbar ist.

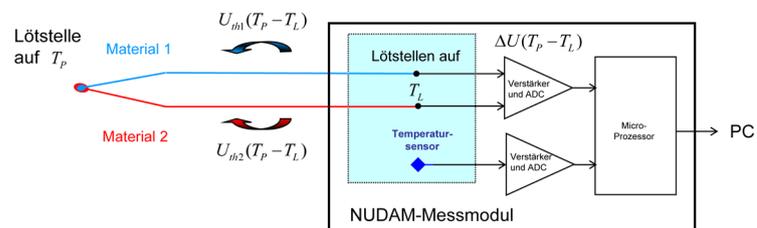


Abb. 3: Prinzipieller Aufbau der Temperatureinheit

Die Spannung U an den Lötstellen der Verbindungsdrähte des Thermoelements vom Typ K im Messmodul wird "spannungsrichtig" verstärkt und im Analog-Digitalwandler (ADC) digitalisiert. Parallel wird die Temperatur T_L dieser Lötstellen sehr genau mit einem Halbleiterwiderstand gemessen und ebenfalls digitalisiert. Mit dem Wert der Spannung U und der Temperatur T_L berechnet ein Mikroprozessor die Temperatur T_P am Thermoelement anhand vom Hersteller programmierter Kalibrierkurven. Die Übertragung dieser Temperaturwerte zum PC erfolgt seriell, die Darstellung der Messergebnisse zweier Thermoelemente am PC übernimmt ein spezielles LabView-Programm.

3.1.2 Differentielle Thermoanalyse

Zur genaueren Untersuchung von Phasenübergängen und zur Erhöhung der Auflösung ist es zweckmäßig, parallel ein zweites identisches Thermoelement-Paar unter gleichen Bedingungen und etwa gleicher Starttemperatur in einer zweiten Substanz (Referenzprobe) mit möglichst gleicher Wärmekapazität C jedoch ohne Phasenübergang (unterschiedlichem K) abzukühlen und die Temperaturverläufe parallel aufzunehmen. Bei rein Newtonscher Abkühlung beider Körper ist die Temperaturdifferenz nahezu konstant.

Aufgabe: Machen Sie sich die Verläufe der Temperaturen der Probe und Referenzprobe und der Differenztemperatur für den Fall klar, dass eine Substanz kongruent erstarrt!

3.2 Kalibrierung von Thermoelementen/der Messanordnung

Als Fixpunkte für die Kalibrierung von Thermoelementen bzw. zur Überprüfung der vom Messmodul übertragenen Temperaturwerte stehen folgende Stoffe mit den in Tab. 2 aufgelisteten Siede- bzw. Schmelzpunkten zur Verfügung:

Tab. 2: Fixpunkte zur Kalibrierung der Thermoelemente.

Stoff	Fixpunkt	Fixtemperatur/ °C
H ₂ O	Schmelzpunkt	0
H ₂ O	Siedepunkt	f(p)
Pb	Schmelzpunkt	327,4
Sn	Schmelzpunkt	231,9
Bi	Schmelzpunkt	271,3

Als Temperatur-Fixpunkte zur Kalibrierung von Thermometern werden reine Substanzen benutzt, deren Phasenumwandlung beim Abkühlen bei konstanten Druck und im thermodynamischen Gleichgewicht einen wohldefinierten horizontalen Bereich in der $T(t)$ -Kurve nach Abb. 2 b aufweisen, so dass die gemessene Umwandlungstemperatur nicht von der Zeit abhängt.

4 Anhang

4.1 Transportphänomene und Thermokraft

Sowohl elektrische Felder (\vec{E}) als auch Temperaturgradienten ($\vec{\nabla}T$) bewirken einerseits elektrische (\vec{j}_e) und andererseits Wärmeströme (\vec{j}_q), was formal mit (im kubischen System skalaren) 4 Koeffizienten beschrieben werden kann ($\vec{\nabla} = \text{Gradient}$):

$$\begin{aligned} \vec{j}_e &= \beta_{00} \vec{E} + \beta_{01} \vec{\nabla}T \\ \vec{j}_q &= \beta_{10} \vec{E} + \beta_{11} \vec{\nabla}T \end{aligned} \quad (4)$$

Bei Benutzung der 4 gemessenen physikalischen Größen:

ρ = spezifischer elektrischer Widerstand,

λ = thermische Leitfähigkeit,

S = (differentielle) Thermokraft (Seebeck-Koeffizient),

P = Peltierkoeffizient

lässt sich Gl. (4) umschreiben ($\vec{\nabla} = \text{Gradient}$):

$$\begin{aligned} \vec{E} &= \rho \vec{j}_e + S \vec{\nabla}T \\ \vec{j}_q &= P \vec{j}_e - \lambda \vec{\nabla}T. \end{aligned} \quad (5)$$

Bei der stromlosen Bestimmung der **Thermospannung** (U_{AB}^{th}) zwischen zwei Metallen A und B nach der Kompensations-Methode gilt daher für die elektrische Feldstärke und für die Thermokraft $S = dU_{AB}^{th}/dT$

$$\vec{\nabla}U_{AB}^{th} = \vec{E} = S \vec{\nabla}T \quad (a) \quad \text{oder} \quad |U_{AB}^{th}| = S T \quad (b). \quad (6)$$

Peltier-Effekt (Umkehrung des Seebeck-Effekts [4]):

Fließt durch einen Kontakt (Lötstelle) zweier Metalle ein Strom, so wird unabhängig von der Jouleschen Wärme eine Peltier-Wärme aufgenommen oder abgegeben, die sich in einer Temperaturerhöhung der einen Lötstelle bzw. Abkühlung der anderen äußert und die proportional zum Strom (beachte: Joulesche Wärme $\sim I^2$) ist (P = Peltierkoeffizient):

$$\frac{dQ}{dt} = P \Delta T I. \quad (7)$$

Thomson-Effekt:

Fließt durch einen Leiter ein Strom I und besteht zwischen seinen Enden eine Temperaturdifferenz ΔT , so wird (neben der Jouleschen Wärme) der Wärmestrom aufgenommen oder abgegeben

(μ = Thomsonkoeffizient)

$$\frac{dQ}{dt} = \mu \Delta T I. \tag{8}$$

Für die Koeffizienten zweier Leiter untereinander gelten die Beziehungen [4]:

$$P_{AB} = T \int_0^T \frac{\mu_B - \mu_A}{T} dT \text{ (a); } U_{AB}^{th} = \int_{T_1}^{T_2} \frac{P_{AB}}{T} dT \text{ (b); } S_{AB} = \frac{dU^{th}}{dT} = \int_0^T \frac{\mu_B - \mu_A}{T} dT \text{ (c);} \tag{9}$$

Die Größe $S = \int \frac{\mu}{T}$ heißt absolute Thermospannung.

4.2 Zur Ursache der Thermospannung

In einer ganzen Reihe von Lehrbüchern wird die Temperaturabhängigkeit der Kontaktspannung zweier Metalle als Ursache der Entstehung der Thermospannung beschrieben. Die einfache Vorstellung, dass die Thermospannung lediglich der Kontaktspannungsdifferenz zweier Verbindungsstellen von Metallen unterschiedlicher Temperatur entspricht, widerlegt ein ausführlicher Artikel von Prof. Jäckle [6], auf den an dieser Stelle verwiesen werden soll. .

Tab. 3: Stellung einiger Metalle in der thermoelektrischen Spannungsreihe; absolute Thermokraft S und Fermi-Energie ε_F [5, 2, 4]

Metall	$S/(\mu\text{V}/\text{K})$	ε_F/eV
Sb	+ 20,6	
Fe	+ 17	
Cu	+ 1,7	7,0
Ag	+1,4	5,5

Metall	$S/(\mu\text{V}/\text{K})$	ε_F/eV
Au	+1,1	5,5
Al	-1,6	11,6
K	-15,6	2,1

Autorenschaft

Diese Versuchsanleitung wurde in ihrer ursprünglichen Form von L. Jahn und C.G. Oertel erstellt. Aktuelle Änderungen werden von der Praktikumsleitung durchgeführt.

5 Fragen

- Was sagen die Kirchhoffschen Gesetze, insbesondere der Maschensatz mit Innenwiderstand, Außenwiderstand, Urspannung und Klemmenspannung aus?
- Skizzieren und erläutern Sie die stromlose Spannungsmessung mit einer Kompensationsschaltung.
- Was versteht man unter Seebeck-, Peltier- und Thomson-Effekt?
- Wovon hängt die Thermospannung an der Lötstelle zweier Metalle (A;B) ab?
- Wie lautet die Bedingung für thermodynamisches Gleichgewicht a) im Gebiet monotoner Abkühlung und b) an einem Haltepunkt?
- Man erläutere die Newtonsche Abkühlungskurve (mathematisch, Skizze).
- Warum ist das thermodynamische Gleichgewicht bei einer Abkühlungskurve besser einzustellen als bei einer Aufheiz-Kurve?
- Nennen Sie Beispiele für nicht monotone Abkühlungskurven.

Literatur

- [1] W. Ilberg, M. Krötsch, D. Geschke, P. Kirsten, W. Schenk, A. Schneider, H. Schulze, Physikalisches Praktikum für Anfänger, Leipzig 1994
- [2] Gerthsen (H. Vogel), Physik, V. Springer 1995
- [3] W. Walcher, Praktikum der Physik, V. Teubner, Stuttgart 1989
- [4] F. Kohlrausch, Praktische Physik, Band 1, V. Teubner, Stuttgart 1996
- [5] G. E. R. Schulze, Metallphysik, Berlin 1967
- [6] J. Jäckle, Über die Ursache der Thermospannung,
<http://www.uni-konstanz.de/FuF/Physik/Jaeckle/papers/thermospannung/>