

## Thermoelement und Abkühlungsgesetz (T5)

### Ziel des Versuches

Im Versuch wird ein Thermoelement benutzt, um den Temperaturverlauf beim Erstarren eines Stoffes zu beobachten sowie das newtonsche Abkühlungsgesetz an zwei Proben mit gleicher Masse, aber unterschiedlicher Oberfläche zu bestätigen.

### Theoretischer Hintergrund

#### Prinzip der thermoelektrischen Temperaturmessung

Zur Temperaturmessung wird in diesem Versuch ein Thermoelement verwendet. Dieses besteht aus zwei unterschiedlichen Metallen, die an jeweils zwei Enden miteinander verbunden sind und somit einen Leiterkreis bilden (siehe Abb. 1). Unterscheiden sich die Temperaturen der beiden Verbindungsstellen voneinander, so fließt in dem Kreis ein elektrischer Strom. Dieser Strom ändert sich mit der Temperaturdifferenz zwischen den beiden Verbindungsstellen.

Die Funktion des Thermoelementes beruht auf dem thermoelektrischen Effekt (Seebeck 1822): In verschiedenen Metallen besitzen die Leitungselektronen unterschiedliche potentielle Energien, was sich in unterschiedlichen Austrittsarbeiten äußert. Bringt man nun zwei verschiedene Metalle miteinander in Kontakt, so treten aufgrund des Potentialgefälles Elektronen aus dem Metall mit geringerer Austrittsarbeit in das andere Metall über. Folglich wird das eine Metall negativ und das andere positiv aufgeladen. Der Übertritt von Elektronen erfolgt so lange, bis die aufgebaute Kontaktspannung  $U_K$  gerade der Differenz aus den beiden Austrittsarbeiten entspricht. Im Allgemeinen hängen die Austrittsarbeiten verschiedener Metalle unterschiedlich stark von der Temperatur ab. Demzufolge ändert sich auch die Kontaktspannung mit der Temperatur.

In einem Leiterkreis aus zwei unterschiedlichen Metallen treten an beiden Lötstellen Kontaktspannungen auf. Haben beide Lötstellen die gleiche Temperatur, dann heben sich die Spannungen gegeneinander auf. Dagegen entsteht bei einer Temperaturdifferenz eine Nettospannung  $U_T$ , die auch Thermospannung genannt wird. Diese kann in guter Näherung durch eine Funktion der Temperaturdifferenz  $\Delta T$  beschrieben werden, die einen linearen und oft einen zusätzlichen quadratischen Term enthält:

$$U_T = a\Delta T + b(\Delta T)^2 \quad . \quad (1)$$

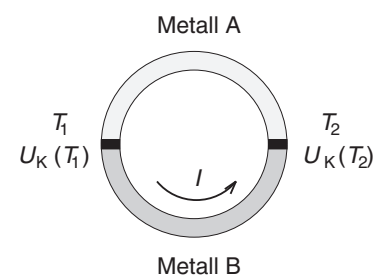


Abbildung 1: Aufbau eines Thermoelementes.

Hat eine Kontaktstelle des Thermoelements eine feste Referenztemperatur  $T_R$ , so ist  $U_T$  ein Maß für die Temperatur der anderen Kontaktstelle. Als Empfindlichkeit (auch Thermokraft oder Seebeck-Koeffizient genannt) eines Thermoelements definiert man die Größe

$$S = \frac{dU_T}{dT} \quad . \quad (2)$$

Der Seebeck-Koeffizient liegt bei Metallen in der Größenordnung von einigen zehn  $\mu\text{V}/\text{K}$  und ist bei Halbleitern etwa um den Faktor 10 größer. Die praktische Bedeutung des Thermoelements liegt vor allem im großen Messbereich, in der geringen Wärmekapazität und der elektrischen Anzeige. Die Umkehrung des thermoelektrischen Effektes, das heißt, das Anlegen einer Spannung führt zum Abkühlen oder Erwärmen einer Lötstelle, während die andere auf der Referenztemperatur gehalten wird, wird beim Peltier-Kühler angewendet.

### *Newtonsches Abkühlungsgesetz*

Besitzt ein Körper eine Temperatur  $T$ , die größer ist als die Temperatur  $T_U$  seiner Umgebung, so gibt er über seine Oberfläche Wärme ab. Wird der Körper durch einen Luftstrom mit konstanter Temperatur  $T_U$  abgekühlt (Abkühlung durch Konvektionsströmung), so kann der Wärmestrom durch das newtonsche Abkühlungsgesetz beschrieben werden:

$$\delta Q = -\alpha(T - T_U) df dt \quad . \quad (3)$$

Hier ist  $|\delta Q|$  die in der Zeit  $dt$  durch die Oberfläche  $df$  abgegebene Wärme.  $\alpha$  wird Wärmeübergangskoeffizient genannt. Die Wärmemenge  $\delta Q$  muss durch Wärmeleitung aus dem Körperinneren an die Oberfläche gebracht werden.

Die Wärmeleitung im Körper soll so schnell ablaufen, dass die Temperaturverteilung im Körperinneren während des Abkühlvorganges nahezu homogen bleibt. Dann ergibt sich bei Integration von Gl. (3) über die Gesamtoberfläche  $F$  des Körpers die gesamte abgegebene Wärmemenge  $|\delta Q_{\text{ges}}|$  zu

$$\delta Q_{\text{ges}} = -\bar{\alpha}(T - T_U)F dt \quad , \quad (4)$$

wobei  $\bar{\alpha}$  der über die Körperoberfläche gemittelte Wärmeübergangskoeffizient ist. Die abgegebene Wärme führt zu einer Abnahme der Körpertemperatur gemäß

$$\delta Q_{\text{ges}} = C dT \quad . \quad (5)$$

Hier ist  $C$  die Wärmekapazität des Körpers.<sup>1</sup> Aus den Gln. (4) und (5) folgt:

$$\frac{dT}{T - T_U} = -\frac{\bar{\alpha}F}{C} dt = -\frac{dt}{\tau} \quad \text{mit} \quad \tau = \frac{C}{\bar{\alpha}F} \quad . \quad (6)$$

Mit anderen Worten heißt das: Die Abkühlungsgeschwindigkeit  $dT/dt$  des Körpers ist proportional zur Temperaturdifferenz  $T - T_U$ :

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{T - T_U}{\tau} \quad . \quad (7)$$

Nimmt man an, dass sowohl die Wärmekapazität  $C$  als auch der mittlere Wärmeübergangskoeffizient  $\bar{\alpha}$  unabhängig von der Temperatur sind, dann liefert die Integration von Gl. (6):

$$T(t) - T_U = [T(t=0) - T_U] \exp(-t/\tau) \quad . \quad (8)$$

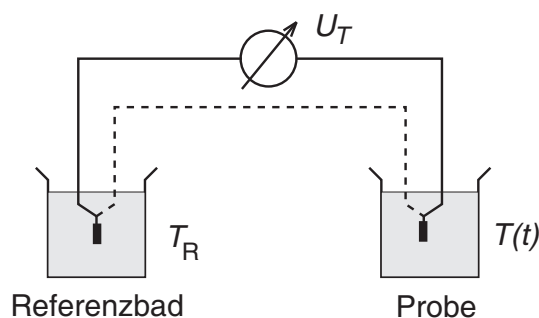
<sup>1</sup> Die Wärmekapazität  $C = m \cdot c$ , wobei  $c$  die spezifische Wärme und  $m$  die Masse des Körpers sind.

Nach Gl. (8) nimmt die Temperaturdifferenz zwischen dem Körper und der Umgebung exponentiell mit der Zeit ab. Die charakteristische Zeit für diese Abkühlung ist der Parameter  $\tau$ . Nach der Halbwertszeit  $t_{1/2} = \tau \ln 2$  ist die Temperaturdifferenz  $T(t = 0) - T_U$  auf den halben Wert abgesunken. Die Halbwertszeit  $t_{1/2}$  bzw. der Parameter  $\tau$  hängt (bei gleichen Abkühlbedingungen) vom Material und dessen Masse (Wärmekapazität) sowie von dessen Oberfläche ab.

### Versuchsaufbau und -durchführung

Die Anordnung zur Messung mit dem Thermoelement ist in Abb. 2 dargestellt. Als Referenztemperatur  $T_B$  wird die Temperatur von Eiswasser<sup>2</sup> (273 K) gewählt, die sich während aller Messungen nicht ändern sollte (rechtzeitig Eis nachlegen). Üblicherweise wird der große Temperaturbereich eines Thermoelementes mit Hilfe der Erstarrungspunkte von Schwermetallen geeicht. Da wir im Praktikum keine Schwermetalldämpfe erzeugen wollen, verzichten wir auf die Durchführung dieser Kalibrierung. Wir verwenden ein Thermoelement mit einem nahezu linearen Verlauf im Bereich von 273 bis 573 K. Der Seebeck-Koeffizient des Thermoelementes in  $\mu\text{V/K}$  kann von Ihnen aus der Messung in siedendem Wasser bestimmt werden.

Zur Messung des Temperaturverlaufs beim Erstarren von Kerzenwachs (Stearinsäure) wird das Wachs, das sich in einem Reagenzglas befindet, in einem Wasserbad bis über seinen Schmelzpunkt erhitzt. Wenn das Wachs geschmolzen ist, wird das Wasserbad ausgetauscht (anderes Becherglas mit Wasser von ca. 288 K) und das Thermoelement abgesenkt. Während der Abkühlungsphase des Wachses nehme man alle 15 Sekunden einen Messwert auf. Beim Erstarren muss eine deutliche zeitliche Konstanz der Temperatur auftreten (Warum?).



<sup>2</sup> Solange schmelzendes Eis und Wasser koexistieren wird die aus der Umgebung zugeführte Wärme zum Schmelzen benötigt. Daher bleibt die Temperatur konstant.

Abbildung 2: Aufbau zur Messung mit einem Thermoelement.

Zur Prüfung des newtonschen Abkühlungsgesetzes wird der entsprechende Messingkörper auf den Brennering gelegt und die Lötstelle des Thermoelementes in die Bohrung gesteckt. Der Messingkörper wird auf etwa 593 K erhitzt und dann mit dem Lüfter gekühlt. Die Abkühlung sollte bis etwa 323 K beobachtet werden. Dazu lese man die Temperatur alle 30 Sekunden ab. Mit dem zweiten Messingkörper wird die Messung unter den gleichen Bedingungen wiederholt. Für die Aufnahme einer Abkühlungskurve werden ca. 15 bis 20 min benötigt.

### *Aufgabenstellung*

1. Bestimmen Sie den Seebeck-Koeffizienten aus einer Messung im siedenden Wasser.
2. Messen Sie mit dem Thermoelement den zeitlichen Temperaturverlauf der Abkühlung der Wachsprobe (Stearinsäure) und bestimmen Sie aus der grafischen Darstellung  $T = f(t)$  den Erstarrungspunkt. Begründen Sie das beobachtete Zeitverhalten.
3. Messen Sie mit dem Thermoelement den zeitlichen Temperaturverlauf der Abkühlung der beiden Messingkörper gleicher Masse, aber unterschiedlicher Oberfläche. Überprüfen Sie die Gültigkeit von Gl. (8) durch eine halblogarithmische Auftragung. Bestimmen Sie die Zeitkonstanten  $\tau$  der Abkühlung und geben Sie die Halbwertzeiten an.
4. Vergleichen Sie Ihre experimentellen mit den theoretisch erwarteten Ergebnissen (Berücksichtigen Sie dabei das Oberflächenverhältnis beider Körper und Gl. (6)).