

Peltier-Wärmepumpe

1. Ziel

Peltier-Wärmepumpen werden häufig als aktive Kühlelemente für elektrische Schaltungen, Detektoren usw. eingesetzt. Da sie keine mechanisch bewegten Bauteile besitzen zeichnen sie sich durch Robustheit und lange Lebensdauer aus, sind aber nicht besonders effizient. In diesem Versuch soll die Kälteleistung, Wärmeleistung und Leistungsziffer einer Peltier-Wärmepumpe unter verschiedenen Betriebsbedingungen bestimmt werden.

2. Theorie

2.1. Seebeck- und Peltier-Effekt

Bei einer Leiterschleife aus zwei unterschiedlichen Materialien, deren Kontakte unterschiedliche Temperaturen haben, kann ein elektrischer Strom beobachtet werden. Dieser Effekt ist auch im geöffneten Stromkreis messbar^[1] und wurde von Thomas Johann Seebeck 1821 entdeckt und nach ihm benannt^[2]. Ursache für den Seebeck-Effekt ist die temperaturabhängige und damit in diesem Falle auch ortsabhängige thermische Geschwindigkeitsverteilung der Ladungsträger, wobei sich zum Beispiel Elektronen aus dem warmen Bereich schneller bewegen als welche aus dem kalten.^[1, 2] Die resultierende Thermodiffusion führt daher in einem Leiter, der einem Temperaturgefälle ausgesetzt ist, zu einer leichten Verschiebung der Ladungen, die bei einem offenen Stromkreis zu einer messbaren Spannung führt, wenn die beiden Materialien unterschiedliche Seebeck-Koeffizienten besitzen (siehe auch Abb. 1 a). Kontakte aus Drähten mit unterschiedlichen Materialien mit möglichst verschiedenen Seebeck-Koeffizienten werden daher gerne als Thermometer (Thermoelemente) eingesetzt.

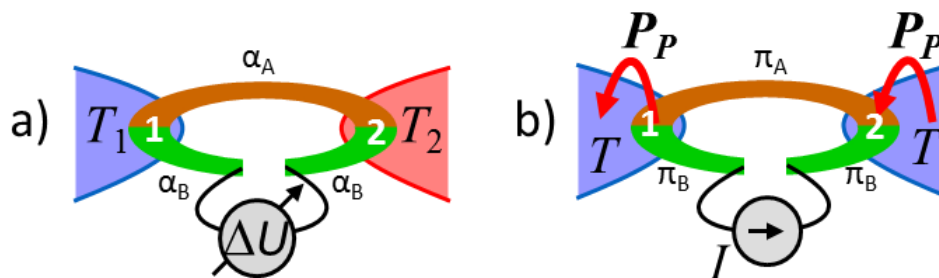


Abb. 1: **a) Seebeck-Effekt:** Leiterschleife aus zwei verschiedenen Materialien (braun und grün, jeweils mit den Seebeck-Koeffizienten α_A und α_B). Gesetzt, dass die Seebeck-Koeffizienten α_A und α_B verschieden sind und an Kontaktstelle 1 eine andere Temperatur vorliegt als an Kontaktstelle 2, ist eine Spannung ΔU messbar. **b) Peltier-Effekt:** Stromkreis aus zwei verschiedenen elektrisch leitenden Materialien (braun und grün, mit den Peltierkoeffizienten π_A und π_B). Im Kreis fließt der elektrische Strom I . Gesetzt, dass der Peltierkoeffizient des Materials A größer ist als der Peltierkoeffizient des Materials B ($\pi_A > \pi_B$), muss an der Kontaktstelle 1 die Wärmemenge pro Zeiteinheit $P_P = (\pi_A - \pi_B) \cdot I$ abgeführt und an der Kontaktstelle 2 die entsprechende Wärmemenge zugeführt werden, wenn die Temperatur im Stromkreis konstant bleiben soll.

Der verwandte Peltiereffekt beschreibt den Zusammenhang zwischen dem Strom- und Wärmetransport in einem Leiterkreis, der aus zwei verschiedenen Materialien besteht und überall die gleiche Temperatur hat. Soll die Bedingung der konstanten Temperatur aufrechterhalten werden, so muss an den Kontaktstellen zwischen den beiden Materialien Wärme zugeführt beziehungsweise abgeführt werden wie in Abbildung 1 b) dargestellt. Andernfalls wärmt sich der Kontakt 1 auf und der Kontakt 2 kühlt sich ab. Dieser Effekt ist 1834, also 13 Jahre nach dem Seebeck-Effekt, von Jean Peltier entdeckt und nach ihm benannt worden.

Ursache für den Peltiereffekt ist, dass die mit dem elektrischen Strom verbundene Driftbewegung der Ladungsträger immer auch mit dem Transport von Energie einhergeht. Wie viel Energie mit dem Strom transportiert wird, hängt dabei davon ab, wie die Energieverteilung der Ladungsträger in dem Material ist. Insbesondere hängt die Richtung des Energietransports zum Beispiel vom Charakter der Ladungsträger im Festkörper haben. Da zum Beispiel Elektronen und Löcher in einem stromführenden Halbleiter entgegengesetzte Driftbewegungen haben, wird die Energie in n-dotierten Halbleitern (Elektronen als Ladungsträger) und p-dotierten Halbleitern (Löcher als Ladungsträger) in entgegengesetzte Richtung transportiert. Im Peltierelement wird dies geschickt in einer Anordnung ausgenutzt, in der n- und p-dotierte Halbleiter für den elektrischen Strom in Serie, für den Wärmetransport aber parallel geschaltet sind, wie in Abbildung 2 dargestellt ist. Je nach Stromrichtung wird die Wärmeenergie in den Halbleitern zu den oberen beziehungsweise unteren Metallelektroden transportiert, die die unterschiedlichen Halbleitersegmente miteinander verbinden.

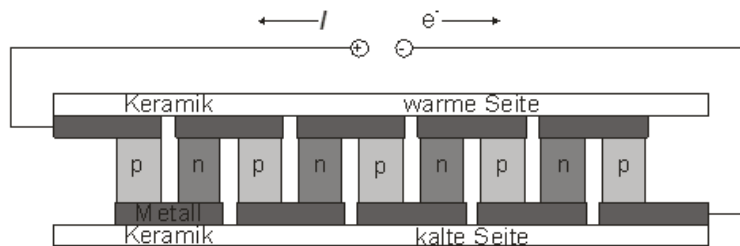


Abb. 2: Schematischer Aufbau eines Peltierelements, bei dem n- und p-Halbleiter für den elektrischen Strom in Serie und für den Wärmetransport parallel geschaltet sind.

Bei einem n-dotierten Halbleiter tragen die negativ geladenen Elektronen aus dem Leitungsband den elektrisch geladenen Strom und haben daher eine der technischen Stromrichtung entgegengesetzte Driftbewegung. Der Wärmestrom ist daher gegenläufig zum elektrischen Strom. Der Peltier-Koeffizient π (siehe Gleichung 1) ist dann negativ;^[2] in einem p-dotierten Halbleiter ist er hingegen positiv. Der Wärmestrom ist der Stromstärke I proportional.

$$\frac{Q}{t} = P_p = \pi \cdot I = \alpha \cdot T \cdot I \quad (1).$$

Dabei sind: Q die Wärmemenge,
 t die Zeit in der die Wärmemenge zwischen den Kontakten transportiert wird,
 P_p die Pumpleistung,
 π der Peltierkoeffizient des stromführenden Materials,
 I die Stromstärke,
 α der Seebeck-Koeffizient des Materials und
 T die Absoluttemperatur.

Beim reinen Peltiereffekt (siehe Abb. 3) steigt daher die Temperaturdifferenz zwischen kalter und warmer Seite bei konstantem Strom linear an. Zu beachten ist allerdings, dass der Peltiereffekt immer in Begleitung anderer Prozesse auftritt. Diese werden im Folgenden erläutert. Da der Seebeck- und der Peltier-Effekt sehr verwandt sind, ist der Peltierkoeffizient gerade das Produkt aus dem Seebeck-Koeffizienten und der absoluten Temperatur.

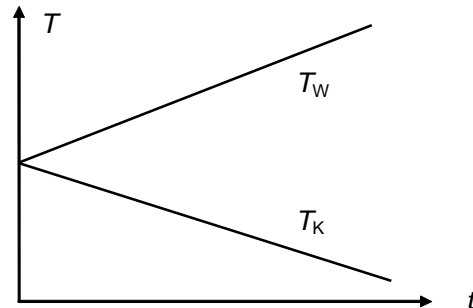


Abb. 3: Temperaturverlauf der kalten und warmen Seite eines Peltierelements beim reinen Peltiereffekt.

2.2. Joulesche Wärme

Strom ist die Bewegung von Ladungsträgern. Dabei wird Wärme erzeugt, deren Leistung P_J quadratisch mit der Stromstärke I steigt. Von dieser Wärmezufuhr ist die kalte und warme Seite gleichermaßen betroffen.

$$P_J = U \cdot I = R \cdot I^2 \quad (2).$$

Dabei sind: P_J die Leistung der Jouleschen Wärme,
 U die Spannung am Peltierelement,
 I die Stromstärke und
 R der Widerstand des Peltierelements.

2.3. Wärmeleitung

Da die warme und kalte Seite in Kontakt zueinander stehen, wird die wachsende Temperaturdifferenz kompensiert. Die Leistung der Wärmeleitung P_L ist proportional zur Temperaturdifferenz $T_W - T_K$ und führt dazu, dass sich die Temperaturdifferenz einem konstanten Wert ΔT annähert. Dies ist in Abbildung 4 dargestellt.

$$P_L = \lambda \frac{A}{d} (T_W - T_K) \quad (3).$$

Dabei sind: P_L die Leistung der Wärmeleitung,
 λ die Wärmeleitfähigkeit des Materials,
 A, d jeweils die Fläche und Dicke des Peltierelements,
 T_W, T_K die Temperatur der warmen bzw. kalten Seite.

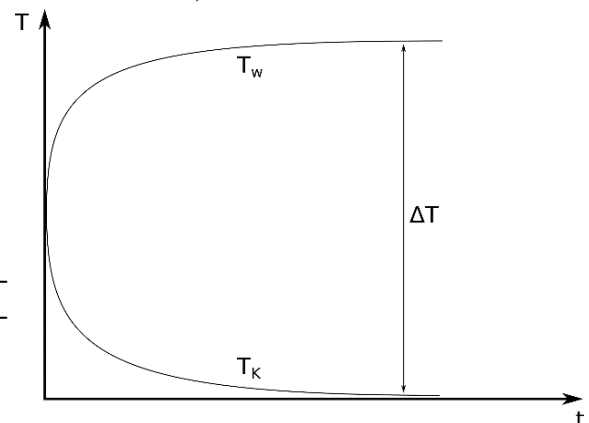


Abb. 4: Temperaturverlauf der Peltierelement-Seiten, wenn die Wärmeleitung berücksichtigt wird.

3. Praktischer Teil

3.1. Aufgaben

3.1.1. Versuchsteil 1

Aus der Temperatur-Zeit-Funktion auf der Warmseite und der Kaltseite werden die Pumpleistungen in Warm- und Kaltbetrieb (P_W , P_K) und die Leistungsziffern in Warm- und Kaltbetrieb (η_W , η_K) bestimmt.

3.1.2. Versuchsteil 2 und 3

Mit Wasser- (Teil 2) bzw. Luftkühlung (Teil 3) der Warmseite werden P_K und η_K jeweils bestimmt und die Endergebnisse miteinander verglichen.

3.2. Durchführung

3.2.1. Versuchsteil 1

Auf beiden Seiten der Wärmepumpe werden Wasserbehälter befestigt und mit Wasser gleicher Temperatur gefüllt (siehe Abb. 5). Es wird eine Stromstärke I_P zwischen 3 und 3,5 A eingestellt und die Temperaturänderungen in beiden Wasserbehältern werden als Funktionen der Zeit $T_W(t)$, $T_K(t)$ gemessen. Die Messung erstreckt sich über 15 Minuten, wobei alle 30 Sekunden die Messdaten (T_W , T_K , U_P , I_P) notiert werden sollen.

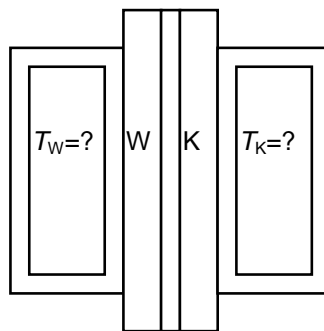


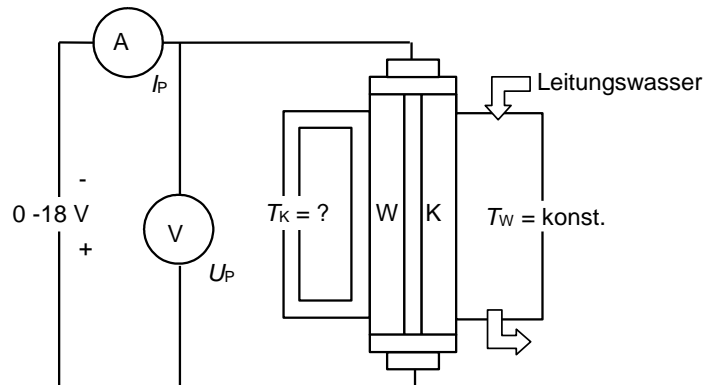
Abb. 5: Schematischer Versuchsaufbau mit Wasserbehältern an beiden Seiten des Peltierelements.

Versuchsteile 2 und 3 werden abgesehen von der Änderung im Aufbau jeweils analog zu Teil *Versuchsteil 1* durchgeführt und ausgewertet, wobei lediglich die Messung von P_W entfällt.

3.2.2. Versuchsteil 2

Der Wasserbehälter auf der Warmseite wird durch einen Durchflusswärmetauscher ausgetauscht, durch welchen Leitungswasser strömt (siehe Abb. 6). Der Betriebsstrom wird so gepolt wie in Versuchsteil 1.

Abb. 6: Schematischer Versuchsaufbau mit Wasserbehälter an der Kaltseite und Durchflusswärmetauscher an der Warmseite des Peltierelements.



3.2.3. Versuchsteil 3

Der Durchflusswärmetauscher auf der Warmseite wird durch einen Kühlkörper, der sich in ruhender Umgebungsluft befindet, ausgetauscht (siehe Abb. 7). Der Betriebsstrom wird so gepolt wie in den vorherigen Versuchsteilen.

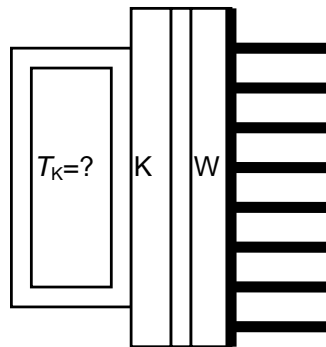


Abb. 7: Schematischer Versuchsaufbau mit Wasserbehälter an der Kaltseite und Kühlkörper an der Warmseite des Peltierelements.

3.3. Auswertung

Zur Auswertung werden die Temperaturen T_W (nur im ersten Teilversuch) und T_K (alle drei Teilversuche) gegen die Zeit t aufgetragen. Die Steigung $\Delta T_i / \Delta t$ dieses Verlaufes ist ein Maß für die Wärmepumpleistung P_i , $i \in \{W, K\}$. Aus dem linearen Bereich der Kurve (siehe Anhang, Abb. 8) lassen sich

$$P_i = C_{ges} \frac{\Delta T_i}{\Delta t} \quad (4)$$

und die Leistungskennziffern

$$\eta_i = \frac{P_i}{P_{el}} \quad \text{mit} \quad P_{el} = I_P \cdot U_P \quad (5)$$

berechnen. Dabei sind

C_{ges} die spezifische Wärmekapazität des Gesamtsystems, bestehend aus Wasser, Messingbehälter und Kupferblock ($C_{\text{ges}} = 1121 \text{ J/K}$),

ΔT_i und Δt jeweils der Temperatur- beziehungsweise der Zeitabschnitt des Steigungsdreiecks im linearen Bereich,

P_{el} die elektrische Leistung sowie

I_P der Strom im Peltierelement und

U_P die Spannung am Peltierelement.

Die erhaltenen Ergebnisse sind zu diskutieren.

4. Quellen

[1] Pelster, R.; Pieper, R.; Hüttl, I. *Thermospannungen – viel genutzt und fast immer falsch erklärt!* PhyDid 1/4 (2005) S. 10–22.

[2] <http://www.uni-konstanz.de/FuF/Physik/Jaeckle/papers/thermospannung/> (abgerufen am 27.6.2018).

5. Anhang

5.1. Hinweis zur Auswertung

Wie bei der Durchführung schon erwähnt, soll der lineare Teil der Kurve ausgewertet werden, wobei weder der Anfangs- noch der Endbereich gewählt werden sollte, sondern der Bereich mit der betragsmäßig größten Steigung. In der untenstehenden Abbildung 8 ist ein Beispiel dazu zu sehen.

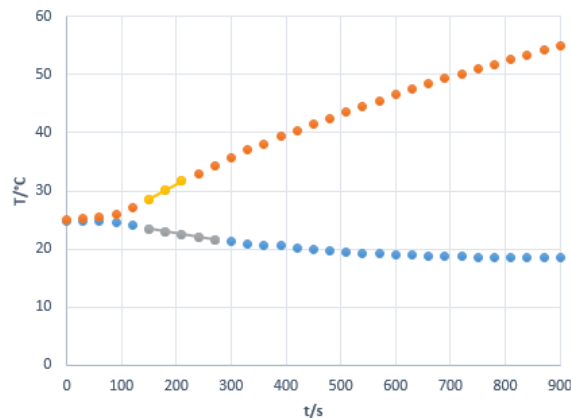


Abb. 8: Temperatur-Zeit-Verlauf an der Warm- (orange) und Kaltseite (blau) eines Peltierelements mit Kennzeichnung der linearen Bereiche.

5.2. Thomsoneffekt

Zusätzlich zur Jouleschen Wärme und der Wärmeleitung gibt es noch einen dritten Effekt der dem Peltiereffekt entgegenwirkt, jedoch nicht im Versuch beobachtet wird. Dieser soll hier erläutert werden.

Fließt ein Strom in einem Leiter mit einem Temperaturgefälle so kann er je nach Material Wärme aufnehmen oder abgeben. Die Richtung des Wärmeflusses hängt von der Strom-

richtung, von dem Vorzeichen des Thomsonkoeffizienten τ und von der Richtung des Temperaturgradienten dT/dx ab. Er wird beschrieben durch

$$P_T = \tau \cdot I \cdot \frac{dT}{dx} \approx \tau \cdot I \cdot \frac{\Delta T}{d} \quad (6).$$

Dabei sind: P_T die Leistung des Thomsons effekts
 I die Stromstärke
 und ΔT die Temperaturdifferenz.

Die Temperaturdifferenz bleibt konstant.

5.3. Leistungsbilanz

Im Folgenden werden die unterschiedlichen Einflüsse auf das Temperaturverhalten betrachtet. So erhält man für die Wärmepumpleistung auf der Kaltseite mit $\Delta T = T_W - T_K$:

$$-P_K = P_{P,K} \mp \frac{P_T}{2} - \frac{P_J}{2} - P_L = \alpha T_K I \mp \frac{\tau I \Delta T}{2d} - \frac{I^2 R}{2} - \frac{\lambda A \Delta T}{d} \quad (7)$$

bzw. für die Warmseite:

$$+P_W = P_{P,W} \pm \frac{P_T}{2} + \frac{P_J}{2} - P_L = \alpha T_W I \pm \frac{\tau I \Delta T}{2d} + \frac{I^2 R}{2} - \frac{\lambda A \Delta T}{d} \quad (8).$$

Die zugeführte elektrische Leistung ist

$$+P_{el} = P_P + P_J + P_T = U_P \cdot I_P \quad (9).$$

Die Leistungsbilanz ist graphisch in Abbildung 9 dargestellt:

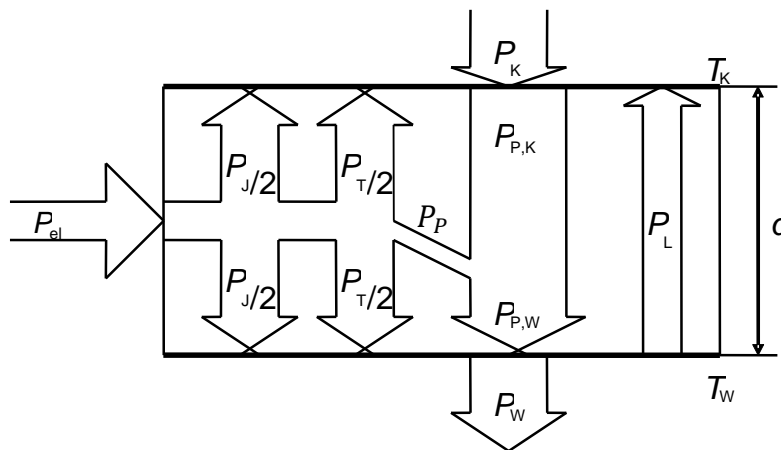


Abb. 9: Leistungsbilanz eines Peltierelements.