

IIW6

Modul Wärmelehre

Peltier-Wärmepumpe

In dem vorliegenden Versuch wird die Thermoelektrizität anhand einer Peltier-Wärmepumpe untersucht. Unter Thermoelektrizität versteht man die umkehrbaren Wechselwirkungen zwischen den physikalischen Größen Temperatur und Elektrizität. Diese werden durch den Seebeck-Effekt (auch thermoelektrischer Effekt genannt), Peltier-Effekt und Thomson-Effekt beschrieben.

In dem vorliegenden Versuch soll die Heiz- und Kühlleistung, sowie die Leistungszahl und der Wirkungsgrad einer Peltier-Wärmepumpe unter verschiedenen Betriebsbedingungen ermittelt werden.

Versuch IIW6 - Peltier-Wärmepumpe

In dem vorliegenden Versuch wird die Thermoelektrizität anhand einer Peltier-Wärmepumpe untersucht. Unter Thermoelektrizität versteht man die umkehrbaren Wechselwirkungen zwischen den physikalischen Grössen Temperatur und Elektrizität. Diese werden durch den Seebeck-Effekt (auch thermoelektrischer Effekt genannt), Peltier-Effekt und Thomson-Effekt beschrieben.

In dem vorliegenden Versuch soll die Heiz- und Kühlleistung, sowie die Leistungszahl und der Wirkungsgrad einer Peltier-Wärmepumpe unter verschiedenen Betriebsbedingungen ermittelt werden.

1.1 Fragen zur Vorbereitung

- Was ist die Ursache der Thermoelektrizität?
- Von was hängt die Grösse der Thermokraft ab?
- Wie funktioniert ein Thermogenerator?
- Wie lautet der Seebeck-Effekt und was beschreibt er?
- Wie lautet der Peltier-Effekt und was beschreibt er?
- Wie lautet der Thomson-Effekt und was beschreibt er?
- Was ist die Einheit der Seebeck-, Peltier- und Thomson-Koeffizienten?
- Was ist der Unterschied zwischen der Leistung nach Thomson und Joule?

1.2 Theorie

1.2.1 Thermoelektrizität

Werden zwei verschiedene Metalle in Kontakt zueinander gebracht, entsteht eine temperaturabhängige Kontaktspannung sowohl als eine Thermodiffusion der Leitungselektronen. Eine Temperaturdifferenz zwischen den beiden Kontaktstellen erzeugt einen elektrischen Strom (SEEBECK-EFFEKT). Ebenso führt der Fluss eines elektrischen Stromes - durch entlang der Flussrichtung verschiedenen aneinandergelöteten Metallen - dazu, dass sich der eine Kontakt, abhängig von der Flussrichtung des Stromes, abkühlt und sich der andere erwärmt (PELTIER-EFFEKT). Sogar in einem homogenen Leiter kann durch den Fluss eines Stromes Wärme erzeugt werden, wenn im Leiter ein Temperaturgradient aufrechterhalten wird (THOMSON-EFFEKT). Entscheidend dabei ist, dass, abhängig vom Metall, durch die Anwesenheit eines solchen Temperaturgradienten zwischen zwei Punkten mehr oder weniger Wärme transportiert werden kann, als allein durch die Wärmeleitfähigkeit, also ohne Stromfluss.

1.2.2 Kontaktpotential

Zwischen den sich in einem Metall befindenden Elektronen und positiven Ionen wirken anziehende Kräfte. Um die frei beweglichen Leitungselektronen aus dem Metall zu lösen, muss die sogenannte *Austrittsarbeit* W_a gegen diese Anziehungskräfte geleistet werden. Diese Austrittsarbeit entspricht der Tiefe der höchsten besetzten Elektronenzustände und ist daher abhängig von der Art des Festkörpers und im Allgemeinen für verschiedene Metalle unterschiedlich. Wird nun ein Kontakt zwischen zwei unterschiedlichen Metallen $a1$ und $a2$ mit Austrittsarbeit W_{a1} und W_{a2} (wobei $|W_{a1}| < |W_{a2}|$) hergestellt, so wandern die Elektronen vom Metall $a1$ in das Metall $a2$. Das Metall $a1$ wird daher positiv, das Metall $a2$ negativ. Die so entstehende Raumladung erzeugt ein elektrisches Gegenfeld, das dem Fluss entgegengerichtet ist und die Elektronen wieder zurück treibt. Sobald die Ströme in beiden Richtungen gleich gross sind, befindet sich das System im Gleichgewichtszustand. Die Potentiale ϕ der beiden Metalle werden durch die Raumladungen verschoben, so dass eine *Kontaktspannung* $U = \phi_2 - \phi_1$ entsteht (siehe Abbildung 1.1).

Diese Kontaktspannung ist entgegengesetzt gleich der Differenz der beiden Fermi-Niveaus. In diesem Gleichgewichtszustand treten somit gleich viele Elektronen von 1 nach 2 durch Diffusion, wie von 2 nach 1 infolge des entstandenen elektrischen Feldes.

Dass die Kontaktspannung von der Temperatur des Kontaktes abhängt, lässt sich erklären,

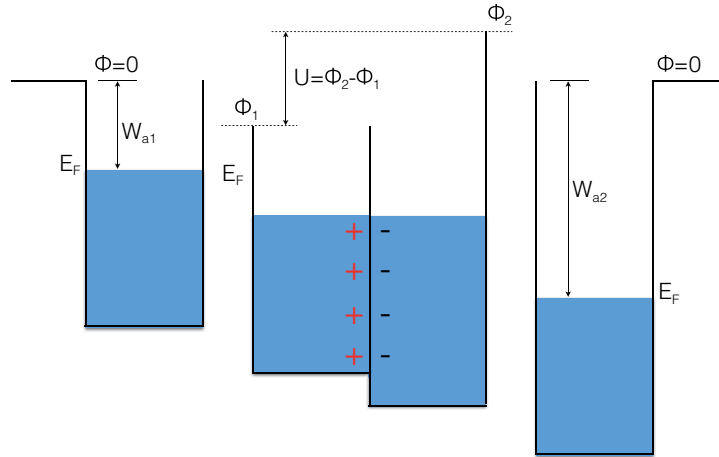


Abbildung 1.1: Schematische Darstellung der Kontaktspannung $U = \phi_2 - \phi_1$ zweier Metalle 1 und 2 mit Austrittsarbeiten W_{a1} und W_{a2} .

wenn man die Teilchenkonzentrationen n_1 und n_2 betrachtet. Im thermischen Gleichgewicht lassen sich die beiden Elektronengase näherungsweise durch die Boltzmann-Statistik beschreiben¹. Die Kontaktspannung ergibt sich dann aus dem Verhältnis der Teilchenzahldichten:

$$\begin{aligned} \frac{n_2}{n_1} &= \exp\left(-\frac{\Delta E}{k_B T}\right) = \exp\left(-\frac{(E_2 - E_1)}{k_B T}\right) \\ &= \exp\left(-\frac{e(\phi_2 - \phi_1)}{k_B T}\right) = \exp\left(-\frac{eU}{k_B T}\right) \end{aligned} \quad (1.1)$$

und ist gegeben durch:

$$U = \frac{k_B T}{e} \ln\left(\frac{n_1}{n_2}\right) \quad (1.2)$$

1.2.3 Seebeck-Effekt

Formen wir nun die beiden verbundenen Metalle zu einem Ring. Lassen wir den Ring offen, so bildet sich zwischen den beiden offenen Enden ein elektrisches Feld aus, verbindet man die beiden Enden, so bildet sich dort dieselbe Kontaktspannung aus. Es fließt jedoch kein Strom, da die beiden Spannungen gegeneinander geschaltet sind. Erst durch das Erwärmen einer Kontaktstelle sind die beiden Kontaktspannungen (trotz identischem Verhältnis n_2/n_1) verschieden, so dass ein *Thermostrom* fließt. Die dazu benötigte Energie entstammt dabei der Wärmequelle.

Diese Eigenschaft wird bei sogenannten *Thermoelementen* genutzt. Schaltet man in einem geschlossenen Ring aus zwei verschiedenen Metallen in das eine Metall ein Spannungs-Messgerät, kann man die *Thermospannung* messen. Diese hängt nach den vorigen Überlegungen nebst den charakteristischen Eigenschaften der beiden Metalle nur von der Temperaturdifferenz zwischen den beiden Kontaktstellen ab. Bringt man die eine Kontaktstelle auf eine konstante Temperatur, lässt sich die Schaltung als sehr empfindliches Thermometer mit grosser Wärmekapazität und sehr geringer Trägheit verwenden.

Nach den vorigen Überlegungen lässt sich diese Thermospannung somit mit Hilfe der Formel

¹Auf Grund der hohen Dichte des Elektronengases im Metall folgen die Elektronen eigentlich einer Fermi-Verteilung. Im Limit $\Delta E \gg k_B T$ gilt für sie jedoch trotzdem näherungsweise Gleichung (1.1)

(1.2) ausdrücken:

$$\begin{aligned} U_{th} &= \Delta U = U_2 - U_1 \\ &= \frac{k_B}{e} \ln \left(\frac{n_1}{n_2} \right) \Delta T \end{aligned} \quad (1.3)$$

Die materialabhängigen Eigenschaften werden zudem in den sogenannten *Seebeck-Koeffizienten* S_A, S_B ($[S_i] = V/K$) zusammengefasst, gemäss:

$$U_{th} = (S_A - S_B)(T_1 - T_2) \quad (1.4)$$

Die Seebeck-Koeffizienten sind temperaturabhängig und bei Halbleitern stark von der Dotierung mit Fremdatomen abhängig.

Je nach Metallkombination gilt Gleichung (1.3) in einem geringen oder weiteren Bereich von ΔT . Allgemeiner ausgedrückt erhält man unter der Verwendung der Fermi-Verteilung den folgenden, auch für höhere Potenzen von ΔT gültigen, Ausdruck

$$U_{th} = a \cdot \Delta T + b \cdot \Delta T^2 \quad (1.5)$$

Die Empfindlichkeit eines solchen Thermoelementes wird durch die *Thermokraft* ausgedrückt, die durch die Änderung der Thermospannung mit der Temperatur gegeben ist:

$$F_{th} = \frac{dU_{th}}{dT} = a + 2B\Delta T \quad (1.6)$$

Im Rahmen der Direktumwandlung von Wärmeenergie in elektrische Energie, bieten die *Thermogeneratoren* den klaren Vorteil, dass mit ihnen kein Umweg über die mechanische Energie dazwischenliegt.

1.2.4 Der Thermogenerator

Der Thermogenerator besteht aus zwei Materialien 1 und 2, die die Wärme über einen grossflächigen Brückenkontakt auf ihrer Oberseite aufnehmen. Die Unterseite beider Materialien wird dabei auf derselben Temperatur T_0 gehalten. Nun kann ein Verbraucher (durch seinen Widerstand R gekennzeichnet) angeschlossen werden, der die elektrische Energie aus der generierten Thermospannung erhält. Im Gegensatz zu anderen Wärmekraftmaschinen ist allerdings der Wirkungsgrad aus thermodynamischen Gründen viel kleiner als $(T - T_0)/T$. Die Wirkungsgrade von p -, resp. n -leitenden Halbleitern liegen zwischen 8 und 10%. In dem vorliegenden Experiment steht ein solcher Thermogenerator zur Verfügung. Im Generatorblock befinden sich zwischen zwei vernickelten Kupferplatten 142 Halbleiter-Thermoelemente. Die zur Wärmeübertragung dienenden, 10mm starken Kupferplatten sind mit je einer 7mm-Bohrung zur Aufnahme eines Thermometers versehen. Elektrisch sind die Thermoelemente zur Erhöhung der Ausgangsspannung in Reihe geschaltet.

1.2.5 Peltier-Effekt

Der sogenannte Peltier-Effekt stellt die Umkehrung der Erzeugung eines Thermostromes dar. Stellt man zwischen zwei Materialien A und B ein Kontakt in der Reihenfolge ABA her und lässt einen Strom hindurchfliessen, so kühlt sich die eine Kontaktstelle ab, die andere erwärmt

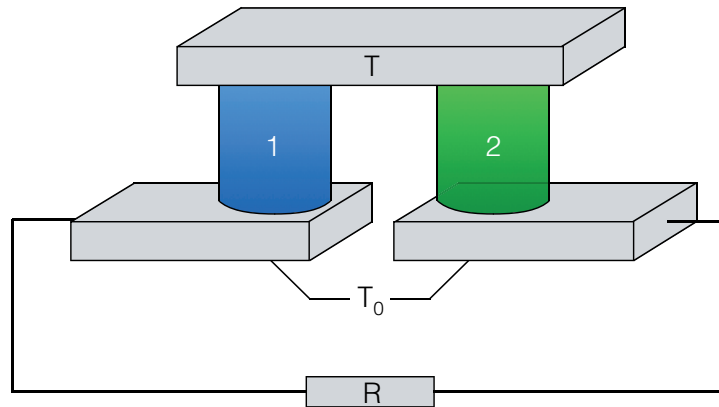


Abbildung 1.2: Schematische Darstellung eines Thermogenerators.

sich. Diese Temperaturänderung ist dabei um einiges stärker als man durch *Joule-Wärme* erwarten würde. Umpolen des Stromes führt ebenso zur Umkehrung der Vorzeichen der Temperaturänderungen $\Delta T_{1,2}$ an den beiden Kontaktstellen. Die an der Kontaktstelle erzeugte Wärmeleistung ist dabei proportional zum Strom I , gemäß:

$$P = \frac{dW}{dt} = (\Pi_A - \Pi_B) \cdot I \quad (1.7)$$

wobei Π_A , bzw. Π_B die *Peltier-Koeffizienten* der Materialien A , bzw. B sind. Das Vorzeichen der Wärmeleistung P hängt dabei von der Stromrichtung ab. Für $P > 0$ wird Wärme erzeugt, für $P < 0$ wird der Kontaktstelle Wärme entzogen, sie kühlt ab. Zwischen Thermospannung U_{th} und Peltier-Koeffizient Π besteht der folgende Zusammenhang:

$$U_{th} = \frac{\Pi}{T} \cdot \Delta T \quad (1.8)$$

und zwischen der Thermokraft F_{th} und dem Peltier-Koeffizienten Π der folgende Zusammenhang:

$$\Pi = F_{th} \cdot T \quad (1.9)$$

1.2.6 Thomson-Effekt

Die Erzeugung von Wärme bei einem Stromfluss in einem homogenen Leiter ist ebenfalls möglich, wenn darin ein Temperaturgradient $\Delta T/l$ aufrechterhalten wird. Die Wärmeleistung ist in diesem Fall durch

$$P = -\sigma \cdot I \cdot \Delta T \quad (1.10)$$

gegeben, wobei σ dem *Thomson-Koeffizienten* entspricht. Im Gegensatz zur Wärmeleistung nach Thomson ist die *Joule Leistung* proportional zu I^2 . Der Thomson-Koeffizient ist durch die *Thomson-Relationen* eng mit dem Peltier-Koeffizient, dem Seebeck-Koeffizienten und der Thermokraft verknüpft:

$$\begin{aligned} \Pi &= S \cdot T \\ \sigma &= T \cdot \frac{dS}{dT} \end{aligned} \quad (1.11)$$

1.3 Experiment

1.3.1 Versuchszubehör

Komponente	Anzahl
Thermogenerator, mit 2 Wasserbehältern	1
Netzgerät, universal	1
Schiebewiderstand 33 Ohm, 3,1 A	1
Durchflusswärmetauscher	1
Kühlkörper	1
Dreifuss	1
Digitalmultimeter	4
Heiss-/Kaltluftgebläse	1
Verteiler	1
Heizspule mit Buchsen	1
Thermometer -10...+50 °C	2
Stoppuhr, digital	1
Stativstange	1
Doppelmuffe	1
Wärmeleitpaste	1
Universalklemme, Stellschraube an beweglicher Seite	1
Verbindungsstecker	2
Laborthermometer, -10...+100°C	1
Verbindungsleitung, 32 A, 750 mm, blau	2
Verbindungsleitung, 32 A, 750 mm, rot	1
Verbindungsleitung, 32 A, 500 mm, rot	3
Verbindungsleitung, 32 A, 500 mm, blau	2
Verbindungsleitung, 32 A, 250 mm, rot	3
Gummischlauch , Innen-d = 6 mm	1

1.3.2 Versuchsaufbau und Durchführung

Achtung: In diesem Versuch wird mit Wasser UND elektrischen Geräten hantiert. Gehe im Umgang mit dem Wasser stets vorsichtig vor und fülle, resp. leere die Wasserbehälter ausschliesslich über dem Spülbecken.

Bestimmung der Kälteleistung P_c der Pumpe in Abhängigkeit von der Stromstärke und Berechnung des Wirkungsgrades η_c bei maximaler Leistung.

- Befestige ein Wasserbad auf der kalten und den Durchflusswärmetauscher, durch den Leitungswasser fliesst, auf der warmen Seite des Thermogenerators. Achte darauf, dass die Gummidichtung exakt platziert ist und dass die Schrauben fest aber nicht zu fest angezogen sind.
- Versichere Dich, dass der Rückfluss-Schlauch in das Spülbecken reicht.
- Schliesse die Heizspule, den Thermogenerator und die Multimeter gemäss Abbildung 1.3 an das Netzgerät an.
- Platziere die beiden grossen Thermometer in den dafür vorgesehenen Öffnungen des Thermogenerators. Falls nötig, verwende etwas Wärmeleitpaste, um einen besseren Kontakt herzustellen.

- Fülle das Wasserbad vorsichtig mit Leitungswasser aus dem Becherglas.
- Drehe das Leitungswasser vorsichtig auf und warte, bis der Durchflusswärmetauscher gefüllt ist und das Wasser aus dem Schlauch in den Abfluss fließt.
- Tauche die Heizspule vorsichtig in das Wasserbad.
- Schalte das Netzteil ein.
- Wähle eine Stromstärke und passe die Heizleistung mit dem Schiebewiderstand derart an, dass der Temperaturunterschied zwischen der kalten und der warmen Seite vernachlässigbar ist. Die Leistung entspricht dann exakt der Kühlleistung. Miss je 5 Werte des Heizstroms I_H , der Heizspannung U_H , Stromstärke I_p und Spannung U_p sowie die beiden Temperaturen T_h und T_c .
- Drehe beide Stromstärken und Spannungen auf null und schalte das Netzteil aus.

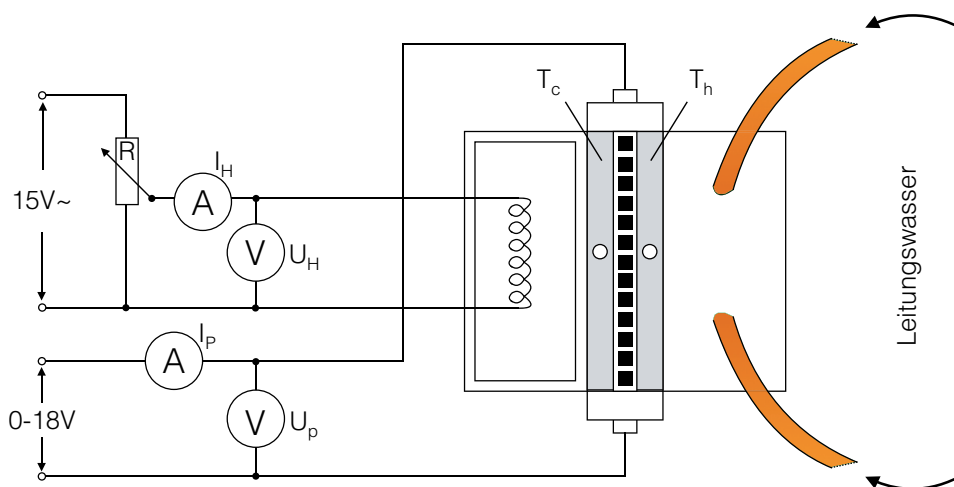


Abbildung 1.3: Setup zur Bestimmung der Kühlleistung.

Bestimmung der Heizleistung P_w der Pumpe und deren Wirkungsgrad η_c bei konstantem Strom und konstanter Temperatur auf der kalten Seite.

- Entferne vorsichtig die Heizspule.
- Warte etwa 10min bis sich die Temperatur stabilisiert hat.
- Kehre den Stromfluss um, so dass sich das Wasser im Bad nun erhitzt.
- Schalte das Netzteil ein.
- Miss während 20min den Temperaturanstieg des Wassers T_w als Funktion der Zeit bei konstantem Strom I_p . Miss ebenfalls I_p , U_p und T_c .
- Drehe beide Stromstärken und Spannung auf null und schalte das Netzteil aus.
- Wäge einen Kupferblock, das Blechbad sowie das Wasser ab.
- Drehe das Leitungswasser ab.
- Entferne den Thermogenerator vom Schaltkreis und bewege ihn vorsichtig, ohne Wasser auszuschütten, in das Spülbecken.

Bestimmung von P_w , η_w und P_c , η_c aus der Beziehung zwischen Temperatur und Zeit auf der warmen und kalten Seite.

- Öffne die Schrauben am Thermogenerator im Spülbecken und leere die beiden Behälter aus. Trockne sie sodann mit Küchenpapier ab.
- Befestige nun auf beiden Seiten des Thermogenerators je ein Wasserbad, schliess den Thermogenerator wieder am Schaltkreis an und fülle beide Bäder vorsichtig mit Leitungswasser aus dem Becherglas.
- Warte etwa 10min bis sich die Temperatur stabilisiert hat.
- Schalte das Netzteil ein.
- Miss während 20min bei konstantem Strom I_p die Temperaturen T_h und T_c als Funktion der Zeit und notiere Dir die Werte von I_p und U_p .
- Drehe beide Stromstärken und Spannung auf null und schalte das Netzteil aus.
- Entferne den Thermogenerator vom Schaltkreis und bewege ihn vorsichtig ohne Wasser auszuschütten in das Spülbecken.

Untersuchung des Temperaturverhaltens, wenn die Pumpe zur Kühlung der luftgekühlten heissen Seite eingesetzt wird.

- Öffne die Schrauben am Thermogenerator im Spülbecken und leere die beiden Behälter aus. Trockne sie sodann mit Küchenpapier ab.
- Befestige nun auf der kalten Seite ein Wasserbad und auf der warmen Seite den Kühlkörper und schliess den Thermogenerator wieder am Schaltkreis an. Fülle sodann das Wasserbad mit Wasser aus dem Becherglas.
- Warte etwa 10min bis sich die Temperatur stabilisiert hat.
- Schalte das Netzteil ein.
- Miss während 20min die Temperatur auf der kalten Seite als Funktion der Zeit, einmal in statischer atmosphärischer Luft und einmal währenddem zusätzlich mit kalter Luft aus dem Föhn gekühlt wird.
- Drehe beide Stromstärken und Spannung auf null und schalte das Netzteil aus.
- Entferne den Thermogenerator vom Schaltkreis und bewege ihn vorsichtig ohne Wasser auszuschütten in das Spülbecken.
- Öffne die Schrauben am Thermogenerator im Spülbecken und leere die beiden Behälter aus. Trockne sie sodann mit Küchenpapier ab.

1.3.3 Aufgaben zur Auswertung

Bestimmung der Kälteleistung P_c der Pumpe in Abhängigkeit von der Stromstärke und Berechnung des Wirkungsgrades η_c bei maximaler Leistung.

- Trage die Kühlleistung P_H gegen die Stromstärke I_p auf.
- Bestimme den Wirkungsgrad η_c bei maximaler Leistung.
- Diskutiere Deine Beobachtungen.

Bestimmung der Heizleistung P_w der Pumpe und deren Wirkungsgrad η_c bei konstantem Strom und konstanter Temperatur auf der kalten Seite.

- Berechne die Wärmekapazitäten des Kupferblockes, des Blechbades sowie des Wassers und daraus die totale Wärmekapazität.
- Trage die Temperatur T_w gegen die Zeit auf.
- Bestimme die Heizleistung P_w der Pumpe.
- Berechne den Wirkungsgrad η_c .
- Diskutiere Deine Beobachtungen.

Bestimmung von P_w , η_w und P_c , η_c aus der Beziehung zwischen Temperatur und Zeit auf der warmen und kalten Seite.

- Trage die Temperaturen T_c und T_w gegen die Zeit auf.
- Berechne die Heiz- und Kühlleistung.
- Berechne beide Wirkungsgrade η_c und η_w .
- Diskutiere Deine Beobachtungen.

Untersuchung des Temperaturverhaltens, wenn die Pumpe zur Kühlung der luftgekühlten heißen Seite eingesetzt wird.

- Trage für beide Messreihen die Temperatur T_c als Funktion der Zeit auf.
- Diskutiere Deine Beobachtungen.

1.4 Literatur

- D. Meschede, "Gerthsen Physik", Springer Verlag, Berlin Heidelberg
- W. Demtröder, "Experimentalphysik 2", Springer Verlag, Berlin Heidelberg