

# 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 aneinandergelöten 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  $\phi$  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,

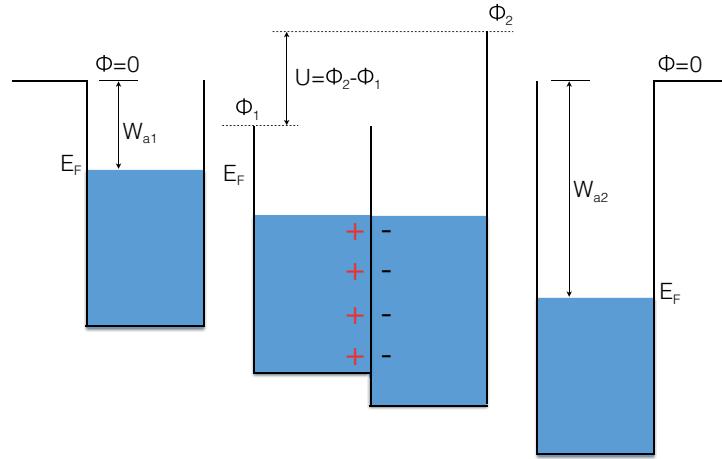


Abbildung 1.1: Schematische Darstellung der Kontaktspannung  $U = \phi_2 - \phi_1$  zweier Metalle 1 und 2 mit Austrittsarbeiten  $W_{a1}$  und  $W_{a2}$ .

wenn man die Teilchenkonzentrationen  $n_1$  und  $n_2$  betrachtet. Im thermischen Gleichgewicht lassen sich die beiden Elektronengase näherungsweise durch die Boltzmann-Statistik beschreiben<sup>1</sup>. 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

<sup>1</sup>Auf 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  $\Delta T$ . Allgemeiner ausgedrückt erhält man unter der Verwendung der Fermi-Verteilung den folgenden, auch für höhere Potenzen von  $\Delta T$  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

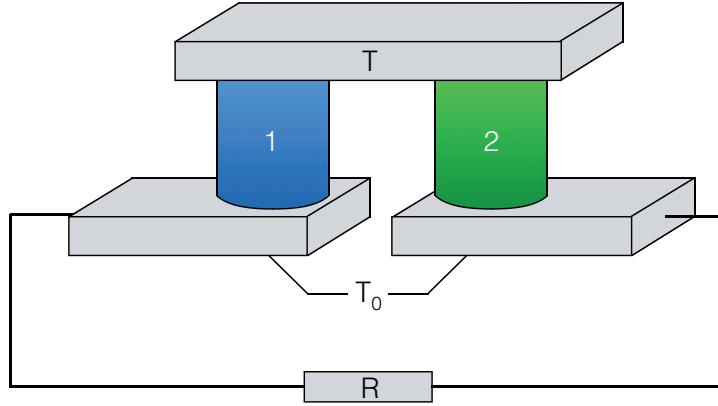


Abbildung 1.2: Schematische Darstellung eines Thermogenerators.

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 erzeugt Wärmeleistung ist dabei proportional zum Strom  $I$ , gemäss:

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

wobei  $\Pi_A$ , bzw.  $\Pi_B$  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  $\Pi$  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  $\Pi$  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  $\sigma$  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
Stopuhr, 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. Beachte daher folgende Regeln:

- Gehe im Umgang mit dem Wasser bedacht vor, arbeite langsam und vorsichtig.
- Wenn du Wasser in die Behälter füllst oder diese leerst, versichere dich vorher, dass der Strom ausgeschaltet ist.
- Fülle beziehungsweise leere die Wasserbehälter ausschliesslich über dem Spülbecken.

### Arbeiten zur Vorbereitung

Schau dir den Versuchsaufbau sowie die Abbildung 1.3 aufmerksam an und überlege dir Antworten zu folgenden Fragen:

- Wo ist der Thermogenerator? Wo sind die Seiten A und B? Wo kannst du die Spannung, wo den Strom für den Thermogenerator einstellen?

- Wo ist die Spule? Was ist die Funktion der Spule? Wie kann die an der Spule angelegte Spannung und der Strom durch die Spule angepasst werden?
- Wo ist der variable Widerstand? Wie lässt sich der Widerstand ändern?
- Welches sind die Digitalmultimeter, welche zu  $I_{text{ther}}$ ,  $U_{ther}$ ,  $I_{Spule}$  und  $U_{Spule}$  gehören? In welchem Betriebsmodus muss sich welches Digitalmultimeter befinden? Tipp: Achte auf Gleichstrom oder Wechselstrom, Gleichspannung oder Gleichstrom.

Wenn du die obigen Fragen beantworten kannst, rufe die assistierende Person zur Besprechung. Anschliessend kannst du unter Aufsicht mit folgenden Aufgaben weiterfahren:

- Fülle das Wasserbad (Seite A) mit Leitungswasser, wobei du das kleinste Becherglas benutzt.
- Verbinde die Kabel mit dem Thermogenerator.
- Öffne den Wasserhahn und drücke den grünen Knopf auf der Sicherheitsschaltung, um den Wasserfluss zu starten.
- Platziere die beiden langen Thermometer in der jeweiligen Öffnung des Thermogenerators. Wenn nötig, benutze die Wärme leitende Paste, um besseren Kontakt zu haben.
- Schalte den Generator ein (Schalter befindet sich hinten am Gerät) und stelle kleine Werte für  $I_{ther}$  und  $U_{ther}$  ein.
- Betrachte  $T_A$  - wird es wärmer oder kälter? Wie steht es mit  $T_B$ ?
- Stelle den Strom auf null und vertausche nun die Kabel am Thermogenerator.
- Stelle den Strom wieder ein wie zuvor. Zeigt  $T_A$  noch immer das selbe Verhalten?
- Stelle den Generator aus und schliesse den Wasserhahn.

Merke dir gut, in welcher Konfiguration du welche Seite kühlst beziehungsweise heizt.

#### **Bestimmung der Kälteleistung $P_c$ der Pumpe in Abhängigkeit von der Stromstärke und Berechnung des Wirkungsgrades $\eta_c$ bei einer Leistung von $P_{ther}$**

- Leere das Wasserbad in das grosse Becherglas. Leere dieses ins Spülbecken.
- Fülle danach  $V = 350$  mL frisches Wasser in den Behälter.
- Verbinde die Kabel mit dem Thermogenerator auf die Weise, dass die Seite A gekühlt wird.
- Drehe den Wasserhahn auf und drücke den grünen Knopf auf der Sicherheitsschaltung, um den Wasserfluss zu starten.
- Überprüfe, dass  $T_A = T_B$ . Wenn dies nicht der Fall ist, warte einen Moment bis sich das System im Temperaturgleichgewicht befindet (nicht mehr als 5 bis 10 Minuten) oder wechsle das Wasser erneut, um den Prozess zu beschleunigen - in diesem Fall wäre beim obersten Punkt wieder anzufangen, das Wasserbad ins grosse Becherglas zu leeren etc.
- Vergewissere dich, dass der Strom der Heizspule ausgeschaltet ist. Bringe die Heizspule vorsichtig ins Wasserbad.

- Schalte die Stromversorgung an und wähle beliebige, nicht zu grosse Werte für  $I_{\text{ther}}$  und  $U_{\text{ther}}$ .
- Schalte den Strom der Heizspule ( $P = 15$ ) ein und benutze den variablen Widerstand, um die Heizleistung der Spule so anzupassen, das die Temperaturdifferenz zwischen der kalten und der warmen Seite vernachlässigbar ist, also  $T_A = T_B$ .
- Wiederhole die letzten beiden Schritte und führe so insgesamt fünf Messreihen durch für verschiedene Parameter  $I_{\text{ther}}$ ,  $U_{\text{ther}}$ ,  $I_{\text{Spule}}$ ,  $U_{\text{Spule}}$ ,  $T_A$  und  $T_B$ . Notiere jeweils die Messunsicherheiten der unterschiedlichen Größen.
- Stelle den Generator aus und schliesse den Wasserhahn.

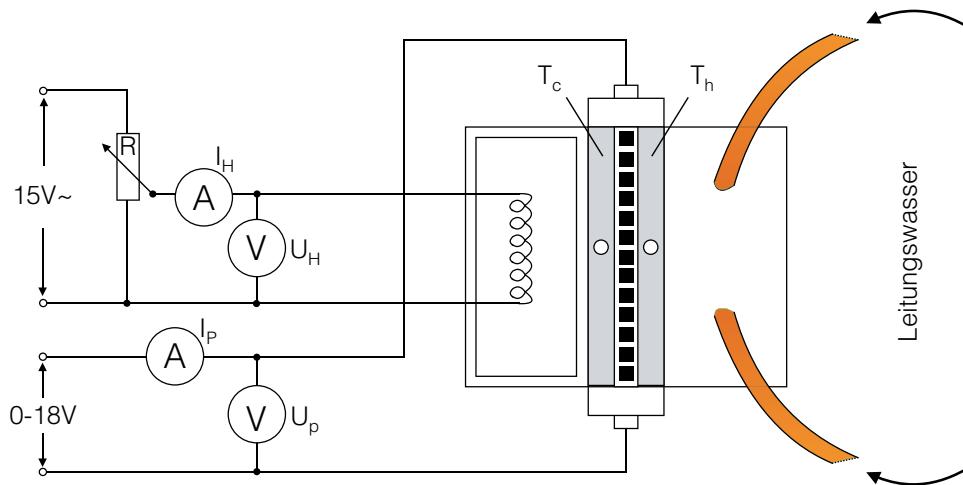


Abbildung 1.3: Setup zur Bestimmung der Kühlleistung.

### Bestimmung der Heizleistung $P_h$ der Pumpe und deren Wirkungsgrad $\eta_h$ bei konstanter Leistung $P_{\text{ther}}$ und konstanter Temperatur auf der kalten Seite

- Entferne vorsichtig die Heizspule.
- Leere das Wasser aus dem Behälter in das grosse Becherglas. Leere dieses danach ins Spülbecken.
- Fülle den Behälter mit  $V = 350$  mL frischem Wasser.
- Verbinde die Kabel mit dem Thermogenerator, so dass die Seite  $A$  geheizt wird.
- Drehe den Wasserhahn auf und drücke den grünen Knopf auf der Sicherheitsschaltung, um den Wasserfluss zu starten.
- Überprüfe, dass  $T_A = T_B$ . Wenn dies nicht der Fall ist, warte einen Moment bis sich das System im Temperaturgleichgewicht befindet (nicht mehr als 5 bis 10 Minuten) oder wechsle das Wasser erneut, um den Prozess zu beschleunigen - in diesem Fall wäre beim zweiten Punkt wieder anzufangen, das Wasserbad ins grosse Becherglas zu leeren etc.
- Schalte die Stromversorgung ein.
- Miss während 15 min den Temperaturanstieg des Wassers  $T_A$  als Funktion der Zeit bei konstantem Strom  $I_{\text{ther}}$  und Spannung  $U_{\text{ther}}$ . Miss ebenfalls  $T_B$ .

- Drehe beide Ströme und Spannungen auf null und schalte die Stromversorgung aus.
- Drehe das Leitungswasser zu.

### **Simultane Bestimmung von $P_c, \eta_c$ und $P_h, \eta_h$ aus der Beziehung zwischen Temperatur und Zeit**

- Leere das Wasser aus dem Behälter in das grosse Becherglas. Leere dieses danach ins Spülbecken.
- Fülle den Behälter mit  $V = 350$  mL frischem Wasser.
- Verbinde die Kabel mit dem Thermogenerator in beliebiger Konfiguration.
- Überprüfe, dass  $T_A = T_B$ . Wenn dies nicht der Fall ist, warte einen Moment bis sich das System im Temperaturgleichgewicht befindet (nicht mehr als 5 bis 10 Minuten) oder wechsle das Wasser erneut, um den Prozess zu beschleunigen - in diesem Fall wäre beim ersten Punkt wieder anzufangen, das Wasserbad ins grosse Becherglas zu leeren etc.
- Schalte die Stromversorgung ein.
- Miss während 15 min beide Temperaturen  $T_A$  und  $T_B$  als Funktion der Zeit bei beliebig gewähltem, konstantem Strom  $I_{\text{ther}}$  und beliebig gewählter, konstanter Spannung  $U_{\text{ther}}$ . Notiere die gewählten Werte für  $I_{\text{ther}}$  und  $U_{\text{ther}}$ .
- Drehe beide Ströme und Spannungen auf null und schalte die Stromversorgung aus.
- Drehe das Leitungswasser zu.

### **Untersuchung des Temperaturverhaltens, wenn der kühlende Teil des Thermogenerators mit einem Haartrockner erwärmt wird**

- Leere das Wasser aus dem Behälter in das grosse Becherglas. Leere dieses danach ins Spülbecken.
- Fülle den Behälter mit  $V = 350$  mL frischem Wasser.
- Verbinde die Kabel mit dem Thermogenerator, so dass die Seite  $A$  gekühlt wird.
- Drehe den Wasserhahn auf und drücke den grünen Knopf auf der Sicherheitsschaltung, um den Wasserfluss zu starten.
- Überprüfe, dass  $T_A = T_B$ . Wenn dies nicht der Fall ist, warte einen Moment bis sich das System im Temperaturgleichgewicht befindet (nicht mehr als 5 bis 10 Minuten) oder wechsle das Wasser erneut, um den Prozess zu beschleunigen - in diesem Fall wäre beim ersten Punkt wieder anzufangen, das Wasserbad ins grosse Becherglas zu leeren etc.
- Schalte die Stromversorgung ein.
- Miss für ein gegebenes  $I_{\text{ther}}$  und  $U_{\text{ther}}$  die Temperatur  $T_A$  während 15 min als Funktion der Zeit, einmal bei Normalbedingungen, und einmal während der kühlende Behälter mit einem Haartrockner erwärmt wird. Notiere die Werte für die von dir gewählten Parameter  $I_{\text{ther}}$  und  $U_{\text{ther}}$ .
- Drehe beide Ströme und Spannungen auf null und schalte die Stromversorgung aus.

- Stelle den Thermogenerator ab und drehe das Leitungswasser zu.
- Stecke die Kabel aus und verpacke die Thermometer vorsichtig in die dafür vorgesehnen Behältnisse.
- Leere das Wasser aus den Behältern in das grosse Becherglas und leere dieses im Spülbecken aus. Trockne die Gefäße mit Küchenpapier.
- Reinige deinen Arbeitsplatz und geniesse den Rest des Tages!

### 1.3.3 Aufgaben zur Auswertung

#### Berechnung des Wirkungsgrades $\eta_c$ und Bestimmung der Kühlleistung $P_c$ als Funktion der thermischen Leistung $P_{\text{ther}}$

- Wenn man sagt, dass eine Maschine (irgendeine, vom Computer über ein Auto bis hin zu einem Thermogenerator in unserem Fall hier) einen guten Wirkungsgrad hat, meint man, dass die Maschine die hineingesteckte Energie gut in Arbeit umwandelt.

In vielen Fällen interessiert die *absolute Energie* nicht, sondern man möchte wissen: Wenn man  $X$  Energieeinheiten pro Sekunde hineinstickt, wie viel Energie pro Sekunde in Form von Arbeit genutzt werden kann. Per Definition ist *Energie pro Sekunde* die Leistung.

Allgemein kann man definieren

$$\eta = \frac{P_{\text{nützlich}}}{P_{\text{hineingesteckt}}}$$

- (a) Definiere damit den Wirkungsgrad für die Kühlung  $\eta_c$  des Thermogenerators.
- (b) Berechne den Wirkungsgrad der Kühlung  $\eta_c$  abhängig von den verschiedenen Werten von  $P_{\text{ther}}$  unter Berücksichtigung der Fehler.
- Stelle die Kühlleistung  $P_c$  (d.h. die für die Kühlung des Systems aufgebrachte Leistung) als Funktion der an den Thermogenerator angelegten Leistung  $P_{\text{ther}}$  dar. Benutze anschliessend die Fehlerfortpflanzungsformel und bestimme damit die Fehler. Vergiss nicht, diese bezüglich *beider* Achsen einzuziehen.
- Diskutiere deine Ergebnisse. Beantworte zu Beispiel:
  - Entspricht das Resultat den Erwartungen? Warum?
  - Erhältst du einen Wirkungsgrad grösser als 1? Wenn ja, wie ist das möglich?
  - ...

#### Bestimmung der Heizleistung $P_h$ des Thermogenerators und dessen Wirkungsgrad $\eta_h$ bei einer konstanten angelegten Leistung $P_{\text{ther}}$ und konstanter Temperatur auf der gekühlten Seite

- Die Massen seien wie folgt gegeben:  $m_{Cu} = 200 \text{ g}$ ,  $m_{Al} = 100 \text{ g}$  und  $m_{H_2O} = 350 \text{ g}$ . Berechne die Wärmekapazität des Kupferblocks  $C_1$ , des Metallgefäßes  $C_2$  und des Wassers  $C_3$  und daraus schliesslich die totale Wärmekapazität<sup>2</sup>.

---

<sup>2</sup>Die spezifische Wärmekapazität von Kupfer, Aluminium und Wasser ist bei Raumtemperatur und Normaldruck wie folgt gegeben:  $c_{H_2O} = 4186 \text{ JK}^{-1}\text{kg}^{-1}$ ,  $c_{Cu} = 385 \text{ JK}^{-1}\text{kg}^{-1}$ ,  $c_{H_2O} = 897 \text{ JK}^{-1}\text{kg}^{-1}$ .

- Gesucht ist die Wärmeleistung  $P_h$  des Thermogenerators. Anders als bei der Kühlleistung  $P_c$  können wir hier bei der Berechnung nicht einfach die Spule als Puffer verwenden.  
Man definiert:  $E(t)$  ist die totale Wärmeenergie nach der Zeit  $t$ , die Anfangstemperatur ist  $T_i$  ( $i$  steht für *initial*) und  $T_A(t)$  ist die Temperatur des Systems A zum Zeitpunkt  $t$ .
  - Stelle die Temperatur  $T_A$  als Funktion der Zeit  $t$  graphisch dar.
  - Finde den Zusammenhang zwischen  $E(t)$ ,  $C_{\text{tot}}$ ,  $T_A(t)$  und  $T_i$ .
  - Benutze den Graphen aus Teilaufgabe (a), um einen Ausdruck für  $T_A(t)$  für  $t \gg 1$  min.
  - Leite die Formel ab, um  $P_h$  zu erhalten und führe dann eine numerische Berechnung durch, um schliesslich einen Wert für  $P_h$  zu bekommen. Führe danach eine Fehlerabschätzung durch.
- Berechne den Wirkungsgrad  $\eta_h$  des Thermogenerators.
- Diskutiere deine Ergebnisse. Beantworte beispielsweise die Fragen:
  - Hast du das Ergebnis erwartet? Warum?
  - Hängt der Wirkungsgrad für die Kühlung von der Zeit  $t$  ab? Wenn ja, warum hast du einen einzigen, festen Wert bestimmt?
  - ...

### Simultane Bestimmung von $P_c$ , $\eta_c$ und $P_h$ , $\eta_h$ aus der Beziehung zwischen der Temperatur und der Zeit

- Stelle im selben Graphen die Temperaturen  $T_A$  und  $T_B$  als Funktion der Zeit dar.
- Benutze die selbe Methode, wie im vorherigen Abschnitt, um die Heizleistung  $P_h$  und die Kühlleistung  $P_c$  zu berechnen.
- Berechne die beiden Wirkungsgrade  $\eta_c$  und  $\eta_h$ .
- Diskutiere deine Ergebnisse. Beantworte beispielsweise folgende Fragen:
  - Ist dein Graph symmetrisch? Warum?
  - Hast du für  $\eta_c$  und  $\eta_h$  die selben Ergebnisse erhalten wie zuvor? Wenn nicht, wie lässt sich das erklären?
  - ...

### Untersuchung des Temperaturverhaltens wenn der kühlende Teil des Thermogenerators mit einem Haartrockner erwärmt wird

- Zeichne für beide Messreihen die Temperatur  $T_A$  als Funktion der Zeit auf.
- Berechne die Kühlleistung  $P_c$  während der ersten Messreihe.
- Beantworte folgende Fragen zur zweiten Messreihe:
  - Wurde das System erwärmt oder gekühlt?
  - Berechne die scheinbare Kühl- oder Heizleistung  $P_{\text{app}}$  ( $app$  steht für engl. *apparent*, es geht um eine Scheinleistung).

- (c) Unter Berücksichtigung der zwei vorherigen Fragen, finde einen Zusammenhang zwischen  $P_c$ ,  $P_{\text{app}}$  und der Wärmeleistung durch den Haartrockner  $P_{\text{air}}$ .
- (d) Berechne  $P_{\text{air}}$ .

Diskutiere deine Ergebnisse. Beantworte beispielsweise folgende Fragen:

- Hast du für  $P_{\text{air}}$  einen Wert in dieser Größenordnung erwartet? Ist dies vergleichbar mit der Leistung eines gewöhnlichen Haartrockners?
- Was wäre der (ungefähre) Wirkungsgrad eines solchen Systems, bei dem man etwas mit einem Haartrockner erwärmt?
- ...

## 1.4 Literatur

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