



# Physikalisches Praktikum I

Bachelor Physikalische Technik: Lasertechnik, Biomedizintechnik

Prof. Dr. H.-Ch. Mertins, MSc. M. Gilbert

## TH 01 Wärmekapazität und Wirkungsgrad (Pr\_PhI\_TH01\_Wärmekapazität\_6, 14.07.2014)

Name	Matr. Nr.	Gruppe	Team
1.			
2.			
<b>Protokoll ist ok</b>	<b>O</b>	<b>Datum</b>	<b>Abtestat</b>
<b>Folgende Korrekturen nötig</b>	<b>O</b>		
<b>Teilnahme erfordert erfolgreiches Beantworten der Zulassungsfragen am Versuchstag (siehe Anleitung).</b>			

## 1. Ziel

Kenntnisse der Thermodynamik sind nicht nur für die Entwicklung von Wärmekraftmaschinen oder Heizkraftanlagen notwendig, sondern ebenso für die Beherrschung modernen Verfahren der Halbleitertechnologie. Hier werden u.a. dünne Metall- oder Halbleiterschichten aufgedampft um elektronische Bauteile herzustellen. Entscheidend für die Qualität der Bauteile ist die gezielte Kontrolle der während der Herstellung ablaufenden thermodynamischen Prozesse: welche Energie ist z.B. nötig, um Gold oder GaAs-Kristalle zu verdampfen? Welche Temperatur haben die Substrate dabei? Welche Wärme wird wieder frei, wenn sie auf dem Siliziumchip kondensieren und werden dadurch bestehende Strukturen zerstört?

In diesem Praktikum werden wir zwei der wichtigen thermodynamischen Größen, Wärmekapazität und Wirkungsgrad untersuchen. Im ersten Teil wird die Wärmekapazität eines Metalls bestimmt, im zweiten Teil der Wirkungsgrad des verwendeten Wasserkochers. Zudem lernen Sie die computer-gestützte Messwerterfassung kennen.

## 2. Theorie

Die folgenden Betrachtungen beziehen sich zum Teil auf ein ideales Gas, sind aber im Rahmen unseres Praktikums auch auf unser Experiment mit einer Flüssigkeit anwendbar.

### 2.1 Temperatur

Die Temperatur  $T$  ist nur ein anderes Maß für die mittlere Bewegungsenergie  $E_{kin}$  der Moleküle. Sie bestimmt sich pro Molekül aus dessen Translations-, Rotations- und Schwingungsenergie zu

$$(1) \quad E_{kin} = (f/2) kT \quad k = 1,381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$

$k$  = Boltzmann-Konstante,  $f$ : Freiheitsgrade

wobei die Temperatur in Kelvin gemessen wird. Bei einem Gas mit  $n$  Molen tragen alle  $nN_A$  Moleküle zur gesamten inneren Energie  $E_{in}$  des Gases bei

$$(2) \quad E_{in} = (f/2) n N_A k = (f/2) nRT \quad R = 8,31 \text{ J/(mol K)} \text{ Gaskonstante für ideale Gase}$$

$N_A$ =Avogadrozahl

### 2.2 Erster Hauptsatz

Die innere Energie  $E_{in}$  eines Gases ändert sich um  $dE_{in}$ , wenn Energie in Form von ausgetauschter Wärme  $dQ$  zu- oder abgeführt wird und wenn mechanische Arbeit  $dW$  geleistet wird. Bei thermodynamischen Prozessen hängen die einzelnen Größen  $dW$  und  $dQ$  vom speziellen Prozessweg ab. Aber die Größe  $(dQ - dW)$  ist wegunabhängig. Sie hängt nur von Anfangs- & Endzustand des Prozesses ab und stellt somit eine Erhaltungsgröße dar. Dieser Sachverhalt ist im ersten Hauptsatz der Thermodynamik, einem Energieerhaltungssatz, folgendermaßen formuliert:

$$(3) \quad dE_{in} = dQ - dW \quad (\text{erster Hauptsatz})$$

Beachte, dass nach Gl. 2 die Temperatur das Maß für die innere Energie  $E_{in}$  eines Systems ist! Die Wärme  $dQ$  beschreibt nur die *ausgetauschte* Energie. Ein Körper besitzt also innere Energie, aber er *hat* keine Wärme!

## 2.2 Wärmekapazität

Um einen Körper der Masse  $M$  um die Temperatur  $dT = (T_2 - T_1)$  zu erwärmen, kann man ihm Energie in Form von Wärme  $dQ$  zuführen. Dabei gilt die kalorische Grundgleichung:

$$(4) \quad C = dQ/dT \quad C: \text{ Wärmekapazität eines Körpers} \quad (\text{Einheit J/K})$$

$$c = C/M \quad \text{spezifische Wärmekapazität} \quad (\text{Einheit J/(kgK)})$$

Die Wärmekapazität  $C$  beschreibt die Energieaufnahme eines ganz bestimmten Körpers, die spezifische Wärmekapazität  $c$  (kleines  $c$ ) dagegen die Wärmekapazität eines Materials, normiert auf seine Masse.

Über den ersten Hauptsatz (3) können wir die Wärmekapazität mit der inneren Energie verbinden. Anders als bei Gasen können wir für unser Kalorimeterexperiment mit einem Festkörper (hier Metall) die mechanische Arbeit  $dW$  vernachlässigen, da er sein Volumen bei Erwärmung nur geringfügig ändert. Man erhält den Zusammenhang zwischen ausgetauschter Wärme  $Q$  und Änderung der inneren Energie

$$(5a) \quad dQ = dE_{in}$$

$$(5b) \quad \rightarrow \quad C = dU/dT$$

Die Energieaufnahme des Körpers wird durch das kinematische Verhalten der Moleküle bestimmt. Das folgt direkt aus Gl. 1. Wenn man die Zahl der Moleküle (bzw. Mol) des Körpers kennt, kann man durch die Messung der spezifischen Wärmekapazität Informationen über die Molekülstruktur des Körpers gewinnen. Ein homogener Körper der Masse  $M$  besitzt  $N = M/m$  gleiche Moleküle der Masse  $m$ . Jedes Molekül braucht die Energie  $\frac{1}{2}fk(T_2 - T_1)$ , um seine Temperatur von  $T_1$  auf  $T_2$  zu erhöhen. Der ganze Körper benötigt dann die Energie

$$(6) \quad dE_{in} = \frac{1}{2}f(M/m)k dT$$

$$(7) \quad dE_{in} = \frac{1}{2}fR dT \quad \text{für } n = 1 \text{ Mol des Stoffs}$$

Wir sehen, dass entscheidend für die Energieaufnahme  $dE_{in}$  die Zahl der Freiheitsgrade  $f$  einer Substanz sind. Diese sind aber nichts weiter als die Zahl der prinzipiellen Bewegungsmöglichkeiten des Moleküls. Für ein Gas sind dies 3 Translationsbewegungen (in x-, y- und z-Richtung, sowie die Rotation um maximal 3 zueinander orthogonale Achsen). In einem Festkörper sind es im Wesentlichen die Schwingungen der Atome im Kristallgitter und wir erhalten  $f = 6$  (je 3 für kinetische u. potenzielle Energie). Aus den Gleichungen 4, 5 und 7 folgt dann die Regel von Dulong und Petit für ein Mol eines Festkörpers

$$(8) \quad C_{mol} = 3R \approx 25 \text{ J/(mol K)} \quad (\text{Regel von Dulong und Petit})$$

Dies lässt sich in der Tat experimentell bestätigen, z.B. von Ihnen in diesem Praktikum.

## 2.4 Kalorimeter

Die spezifische Wärmekapazität kann mit dem Mischungskalorimeter bestimmt werden. In einem Gefäß (Kalorimeter) mit bekannter Wärmekapazität  $C_G$  befindet sich eine Wassermasse  $m_1$  mit der Temperatur  $T_1$ . Der Probekörper, dessen spezifische Wärme  $c_2$  gemessen werden soll hat die Masse  $m_2$  und die Temperatur  $T_2$ . Lässt man ihn in das Wasser fallen, so stellt sich nach gewisser Zeit die Mischtemperatur  $T_m$  ein. Der Erhaltungssatz fordert die Gleichheit von abgegebener und aufgenommener Wärme  $Q = \int dQ$ .

Ist das System abgeschlossen und isoliert, d.h. Wasserdampf geht nicht verloren und die thermische Isolierung nach außen ist perfekt, erhalten wir:

$$(8) \quad Q_2 = c_2 m_2 (T_2 - T_m) = (c_1 m_1 + C_G)(T_m - T_1) = Q_1$$

$$c_2 = \frac{c_1 m_1 + C_G}{m_2} \cdot \frac{T_m - T_1}{T_2 - T_m} \quad \text{spezifischen Wärme Wasser: } c_1 = 4184 \text{ J/(kg K)}$$

Damit können wir die spezifische Wärme des Probekörpers direkt ermitteln.

## 2.5 Verdampfungswärme

Phasenübergänge zwischen zwei Aggregatzuständen wie z.B. flüssig nach gasförmig erfolgen in der Regel bei konstanter Temperatur unter Zufuhr oder Abgabe von Wärme. Die spezifischen Verdampfungswärme  $\lambda$

$$(9) \quad \lambda = Q/M$$

ist die Wärmemenge  $Q$ , die zum Verdampfen der Masse  $M$  der Flüssigkeit bei konstanter Siedetemperatur benötigt wird. Wollen wir also die Energie berechnen, die nötig ist eine bestimmte Menge Wasser zu verdampfen, so tun wir das in 2 Schritten. Zuerst müssen wir das Wasser auf  $100^\circ\text{C}$  erhitzen und die nötige Energie nach Gl. 4 berechnen. Im zweiten Schritt berechnen wir mit Gl. 9 die zur Verdampfung der Masse  $M$  nötige Wärmemenge  $Q$ .

## 2.6 Wirkungsgrad

Der Wasserkocher wandelt elektrische Energie in Wärme um. Sein Wirkungsgrad  $\eta$  soll durch Erwärmen bzw. Verdampfen einer Wassermenge bestimmt werden. Als Wirkungsgrad ist definiert:

$$(10) \quad \eta = \frac{\text{Nutzleistung}}{\text{Aufgewendete Leistung}} = \frac{\text{Energie zur Erwärmung (Verdampfung) des Wassers}}{\text{zugeführte elektrische Energie}}$$

$$(11) \quad \eta = \frac{m_{H_2O} \cdot c_{H_2O} (T_2 - T_1)}{U \cdot I \cdot t} \quad \text{gilt während des Erwärmens.}$$

$$(12) \quad \eta = \frac{\lambda \cdot M}{U \cdot I \cdot t_{\text{Siede}}} \quad \text{gilt während des Siedens.}$$

wobei:

- $\lambda = 2255,5 \text{ Ws/g}$  Verdampfungswärme des Wassers
- $M =$  Masse des verdampften Wassers
- $t_{\text{Siede}} =$  Dauer des Siedevorgangs

Die elektrische Leistung  $P$  des Wasserkochers bestimmt sich aus dem Produkt der angelegten Spannung  $U$  in Volt und dem fließenden Strom  $I$  in Ampere

$$(13) \quad P = UI.$$

Es wird nahezu 100% der aufgewendeten elektrischen Leistung in Wärme gewandelt, so dass wir einen Wirkungsgrad von eins erwarten. Wir werden aber  $\eta < 1$  messen, was aus Wärmeverlusten folgt. Streng genommen bestimmen wir also nicht den Wirkungsgrad, sondern eine praktische Größe, die man Effizienz nennen könnte.

**Fragen: Zulassung**

- Wie lautet der erste Hauptsatz der Thermodynamik, was ist innere Energie?
- Was ist mechanische Energie und Wärmeenergie (Formel)?
- Was ist der Unterschied zwischen Wärmekapazität und der spezifischen Wärme?
- Was ist ein Kalorimeter?
- Was ist Verdampfungswärme?
- Wie ist in der Physik die Leistung, beziehungsweise die elektrische Leistung definiert.
- Wie ist der Wirkungsgrad definiert?

### 3. Durchführung

#### 3.1 Bestimmung der Wärmekapazität

Die Temperaturmessung erfolgt automatisch mit Temperatursensor und angeschlossener Messwerterfassung am Computer.

- a) Zur Bestimmung der Wassermasse wird das Kalorimeter leer gewogen, mit Wasser gefüllt und erneut gewogen. Der Temperatursensor wird in das gefüllte Gefäß eingehängt.
- b) Der Metallzylinder wird im Wasserdampf des Kochers auf  $T = 100^\circ\text{C}$  erhitzt (ca. 10 min).
- c) Die Messwerterfassung wird gestartet ( $\rightarrow$  Vorperiode). Nach ca. 2min wird der Metallzylinder in den Dewar gegeben ( $\rightarrow$  Hauptperiode). Die Messung wird ca. 7 min später gestoppt ( $\rightarrow$  Nachperiode). *Während der Messung muss das Wasser ständig umgerührt werden!* Die Wassertemperatur wird automatisch in festen Zeitabständen gemessen und gespeichert, so dass der gesamte Temperaturverlauf mit dem Computer aufgenommen wird.
- d) Exportieren Sie die jeweiligen Messkurven als Textdatei (\*.txt) auf einen Datenträger.
- e) Notieren Sie die Nr. und die Wärmekapazität  $C_G$  des Kalorimeters (Betreuer fragen) und die Messgenauigkeiten.

Es ist möglich, dass der Ablauf des Experiments nicht auf Anhieb gelingt – es ist genug Zeit, den Ablauf zu wiederholen.

#### 3.2 Wirkungsgrad bei Erwärmung

Der Wasserkocher wird leer und mit Wasser gewogen. Der gefüllte Kocher wird angeschaltet und Strom und Spannung werden notiert. Notieren Sie Starttemperatur und die Zeit, die benötigt wird um das Wasser bis zur Endtemperatur von ca.  $85^\circ\text{C}$  zu erwärmen. Rühren Sie das Wasser ständig.

#### 3.3 Wirkungsgrad bei Verdampfung

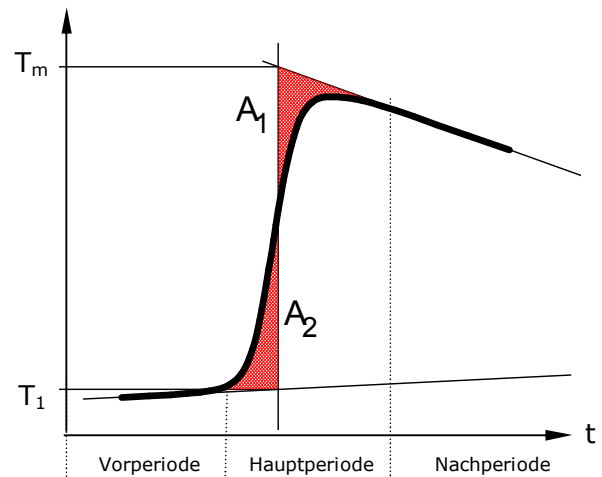
Messen Sie die Temperatur  $T(t)$  vom Beginn des Siedens bis zum Ende, d.h. wenn eine merkliche Wassermenge verdampft ist. Nach Beendigung ist die verdampfte Wassermenge durch Wägung zu ermitteln. Während des Versuchs immer gut umrühren. Wasser darf beim Kochen nicht „überschwappen“. Falls dies doch passiert, wiederholen Sie die Messung.

#### 3.4 Notieren Sie die nominelle Leistung des Wasserkochers (Betreuer fragen) sowie die Messgenauigkeit für Strom und Spannung.

#### 4. Auswertung

Das System ist nicht perfekt isoliert und Wärme wird an die Umgebung auch während der Hauptperiode abgegeben. Deshalb liefert die als Funktion der Zeit  $t$  gemessene Temperatur  $T(t)$  nicht unmittelbar die Temperaturen  $T_1$  (Anfangstemperatur) und  $T_m$  (Mischtemperatur). Der Wärmeaustausch mit der Umgebung kann nur dann vernachlässigt werden, wenn der Temperaturübergang während der Hauptperiode sprunghaft erfolgen würde. Es stellt sich somit die Aufgabe, die Temperaturen  $T_1$  und  $T_m$  durch eine Extrapolation auf denselben Zeitpunkt zu bestimmen, ohne dass jedoch die Wärmebilanz mit der Umgebung geändert wird.

Eine Überlegung, auf die hier nicht näher eingegangen werden kann, zeigt, dass die Wärmebilanz nicht geändert wird, wenn man die Temperaturkurven der Vor- und Nachperiode in die Hauptperiode extrapoliert und eine Parallele zur Temperaturachse so legt, dass die Flächen  $A_1$  und  $A_2$  gleich groß werden. Die Schnittpunkte der Parallelen mit den extrapolierten Temperaturkurven liefern die gesuchten Temperaturen  $T_1$  und  $T_m$  (die dadurch erzielte Sprungfunktion des Temperaturverlaufes entspricht einem "unendlich schnellen" Wärmeaustausch).



- 4.1 Importieren Sie die Daten aus 3.1 in eine Software zum Anfertigen des Diagramms und Drucken Sie das Diagramm auf etwa eine ganze DIN-A4 Seite. Beschriften Sie die Achsen.
- 4.2 Verlängern (extrapolieren) Sie die Temperaturkurven für die Vor- und die Nachperiode durch Geraden und legen Sie eine Parallele zur Temperaturachse, so dass die Flächen  $A_1$  und  $A_2$  gleich groß werden. Entnehmen Sie  $T_1$  und  $T_m$  dem Diagramm.
- 4.3 Die spezifische Wärmekapazität des Materials wird mit den Messdaten berechnet und mit Literaturwerten verglichen (Gl.8).
- 4.4 Zur Fehlerrechnung sollen Sie bei diesem Versuch nur den Einfluss des Fehlers in der Temperaturmessung auf die spezifischen Wärmekapazitäten berücksichtigen. Schätzen Sie den Fehler in der Temperaturdifferenz ( $T_m - T_1$ ) ab, indem Sie die Steigung der extrapolierten Geraden variieren und eine maximale und eine minimale realistische Temperaturdifferenz bestimmen. Zur Fehlerrechnung ist Gl.8 hier nur nach dem Term ( $T_m - T_1$ ) abzuleiten. Daraus berechnen Sie den absoluten Fehler der Wärmekapazität.
- 4.5 Bestimmen Sie die molare spezifische Wärmekapazität und vergleichen Sie das Ergebnis mit dem Literaturwert und der Regel von Dulong & Petit.

- 4.6 Berechnen Sie die elektrische Leistung  $P$  des Wasserkochers und vergleichen Sie diese mit der Geräteangabe. Keine Fehlerrechnung.
- 4.7 Berechnen Sie mit Hilfe der Daten aus 3.2 den Wirkungsgrad des Wasserkochers beim Erwärmen des Wassers (Gl.11). Keine Fehlerrechnung
- 4.8 Berechnen Sie den Wirkungsgrad des Wasserkochers beim Verdunsten des Wassers. Keine Fehlerrechnung
- 4.9 Unterscheiden sich die Werte der Wirkungsgrade aus 4.7 und 4.8? Warum?