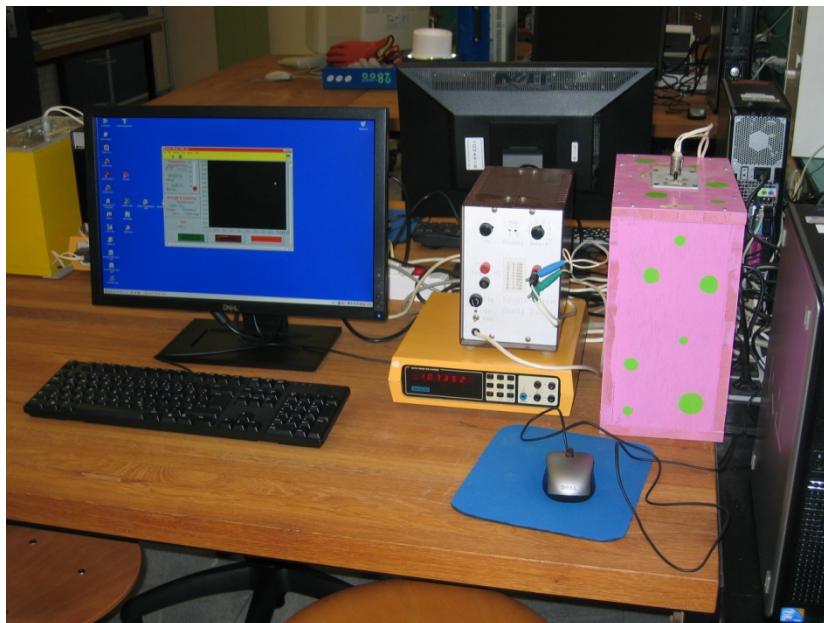


# Physikalisches Grundpraktikum für Physiker/innen

## Teil II

### Spezifische Wärmekapazität und Phasenumwandlungen



**Grundpraktikum Physik:** <http://grundpraktikum.physik.uni-saarland.de/>

**Kontaktadressen der Praktikumsleiter:**

PD Dr. Manfred Deicher  
Zimmer: 1.11, Gebäude E 2.6  
e-mail: [manfred.deicher@tech-phys.uni-sb.de](mailto:manfred.deicher@tech-phys.uni-sb.de)  
Telefon: 0681/302-58198

Dr. Herbert Wolf  
Zimmer: 1.13, Gebäude E2.6  
e-mail: [herbert@tech-phys.uni-sb.de](mailto:herbert@tech-phys.uni-sb.de)  
Telefon: 0681/302-2038



## 1 Stoffgebiet

- Hauptsätze der Wärmelehre
- Wärmekapazität
- Kalorimeter
- Joule'sche Wärme
- Gleichverteilungssatz
- Spezifische Wärmekapazität von Gasen
- Spezifische Wärmekapazität von Festkörpern
- Dulong-Petit'sches Gesetz
- Phasenumwandlungen
- Umwandlungswärme
- Clausius-Clapeyron'sche Gleichung
- Phasendiagramme
- Reale Gase
- Kritischer Punkt

## 2 Literatur

- D. Meschede  
*Gerthsen Physik*  
23., überarb. Aufl. 2006, Springer-Verlag  
Kap. 5
- H.-J. Eichler, H.-D. Kronfeldt, J. Sahn  
*Das Neue Physikalische Grundpraktikum*  
2., erw. u. aktualisierte Aufl. 2006, Springer-Verlag  
Kap. 5

### 3 Fragen

1. Wie sind die spezifischen Wärmekapazitäten  $c_v$  und  $c_p$  definiert und was bedeuten sie? Warum ist  $c_v = (dU/dT)_v$ ? Warum ist bei idealen Gasen  $c_p > c_v$ ? Berechnen Sie die Differenz der Molwärmern  $c'_p - c'_v$ .
2. Erläutern Sie den Begriff Übergangsentropie.
3. Was versteht man unter Dampfdruck; von welchen Zustandsgrößen ist er abhängig? Beschreiben Sie eine Methode zur Aufnahme eines Dampfdruckdiagramms.
4. Erklären Sie den Unterschied zwischen Phasenübergängen erster und zweiter Art. Welche Phasenübergänge treten typischerweise erst bei tiefen Temperaturen auf?
5. Was versteht man unter der Leerkapazität eines Kalorimeters und wie kann sie gemessen werden? Wie funktioniert ein Mischungskalorimeter?
6. Wie ist ein Festkörper aufgebaut? Was versteht man unter Gitterschwingungen? Wie lautet der Gleichverteilungssatz? Wie teilt sich die Zahl der bei Zimmertemperatur angeregten Freiheitsgrade in einem ein- oder zweiatomigen Gas auf, wie bei einem Festkörper?
7. Geben Sie eine Definition für die Umwandlungswärme. Erklären Sie anhand des 1. Hauptsatzes, wozu die Umwandlungswärme dient. Welcher Zusammenhang besteht zwischen der Umwandlungswärme und den molekularen Bindungskräften?
8. Erklären Sie das Dulong-Petit'sche Gesetz mit Hilfe des Gleichverteilungssatzes. Erläutern Sie die Neumann-Kopp'sche Regel. Leiten Sie die Clausius-Clapeyron'sche Gleichung her. Leiten Sie unter Gültigkeit der elementaren Gastheorie die Molwärme von idealen Gasen her.
9. Geben Sie in einer Schaltskizze an, wie man Strom und Spannung an einem Widerstand messen muss, wenn man die erzeugte Heizleistung bestimmen will.

## 4 Grundlagen

### 4.1 Spezifische Wärmekapazität

Führt man einem Körper eine Wärmemenge  $\Delta Q$  zu, erhöht sich seine Temperatur um  $\Delta T$ , wenn nicht gerade ein Phasenübergang 1. Ordnung vorliegt. In diesem Fall ist dann  $\Delta T = 0$ , und zwar solange, bis die Umwandlung vollständig stattgefunden hat. Die Wärmezufuhr kann unter verschiedenen Randbedingungen erfolgen, z. B. bei konstant gehaltenem Volumen oder Druck. Dementsprechend wird  $\Delta T$  verschieden groß werden, und man definiert als Wärmekapazität des Körpers bei konstantem Volumen:

$$C_v := \left( \frac{\partial Q}{\partial T} \right)_v \quad \text{bzw. bei konstantem Druck:} \quad C_p := \left( \frac{\partial Q}{\partial T} \right)_p \quad (1)$$

Die Dimension der Wärmemenge ist J (Joule), die der Temperatur K (Kelvin). Oft findet man jedoch noch für die Wärmemenge die veraltete Dimension cal (Kalorie: 1 cal = 4,1868 J).

Die spezifische Wärmekapazität ist die Wärmekapazität bezogen auf 1 kg eines Stoffes, also die Wärmeenergie, die benötigt wird, um 1 kg eines Stoffes um 1 Grad zu erwärmen:

$$c_{v,p} := \frac{C_{v,p}}{m} \quad \left( \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \right) \quad (2)$$

$m$  = Masse des Körpers. Unter Atom- oder Molwärme versteht man die Wärmekapazität eines Grammatoms oder Mols eines Stoffes:

$$c'_{v,p} := \frac{C_{v,p}}{n} = c_{v,p} \frac{m}{n} = c_{v,p} M \quad \left( \frac{\text{J}}{\text{Mol K}} \right) \quad (3)$$

$n$  = Anzahl der Mole,  $M$  = Atom- oder Molekulargewicht..

Aus dem 1. Hauptsatz der Wärmelehre

$$dU = dQ - pdV \quad \text{bzw.} \quad dQ = dU + pdV \quad (4)$$

lässt sich abschätzen, dass stets gilt:

$$c_p > c_v \quad (5)$$

Betrachten wir z.B. den Fall des idealen Gases, wo  $U$  vom Volumen unabhängig ist, so finden wir, dass die bei konstantem Volumen ( $dV = 0$ ) in das System gesteckte Wärmemenge nur der Erhöhung der inneren Energie  $U$  dient. Führt man dagegen die Wärme bei konstantem Druck  $p$  zu, dehnt sich das Gas mit steigender Temperatur aus, und ein Teil der Wärmemenge wird zum Verrichten der Ausdehnungsarbeit  $+pdV$  benötigt.

Beim Festkörper unterscheiden sich  $c_p$  und  $c_v$  nur wenig, da die thermische Ausdehnung und der Kompressionsmodul klein sind.

Für die Thermodynamik ist vor allem die Atom- oder Molwärme von Interesse. Bezogen auf 1 Mol folgt aus Gl. (4):

$$c'_v = \left( \frac{\partial Q}{\partial T} \right)_v / n = \left( \frac{\partial U_{\text{Mol}}}{\partial T} \right)_v \quad (6)$$

Hier wird die messbare Größe  $c'_v$  mit der molaren inneren Energie  $U_{\text{Mol}}$  verknüpft, die sich aus theoretischen Modellen errechnen lässt. Dadurch bietet sich eine wichtige Möglichkeit, atomistische Modelle experimentell zu überprüfen.

Dazu zwei Beispiele:

*Ideales Gas mit  $f$  Freiheitsgraden:*

Nach dem Gleichverteilungssatz besitzt ein Gasteilchen im Mittel die kinetische Energie  $\bar{\varepsilon}_{\text{kin}} = (f/2)k_{\text{B}}T$  ( $k_{\text{B}}$  = Boltzmannkonstante). 1 Mol enthält  $N$  Teilchen ( $N$  = Avogadro-Konstante) und damit wird die innere Energie zu  $U_{\text{Mol}} = N(f/2)k_{\text{B}}T = (f/2)RT$  ( $R$  = Gas-konstante).

Daher wird:  $c'_v = (f/2)R$ , was auch für viele reale Gase gut erfüllt ist.

*Einatomige Festkörper:*

In der harmonischen Näherung (der Potentialansatz enthält Glieder bis zur quadratischen Ordnung) hängt die Schwingungsenergie der Gitterteilchen im Festkörper nur von der Temperatur ab. Da die Teilchen zu dreidimensionalen Gitterschwingungen (Phononen) angeregt werden können, entfällt nach dem Gleichverteilungssatz auf die mittlere kinetische Energie eines Teilchens der Anteil  $\bar{\varepsilon}_{\text{kin}} = 3/2k_{\text{B}}T$ . Da die potentielle Energie im Mittel gleich der kinetischen Energie ist, wird die Gesamtenergie des Teilchens zu  $\bar{\varepsilon} = 3k_{\text{B}}T$ . Dann ist  $U_{\text{Mol}} = 3RT$ , und

$$c'_v = 3R \quad (\text{Dulong-Petit'sches Gesetz}) \quad (7)$$

Dieses Gesetz ist jedoch nur für höhere Temperaturen und abseits von Phasenumwandlungen richtig; bei tieferen Temperaturen ( $< 250 \text{ K}$ ) verliert der Gleichverteilungssatz seine Gültigkeit, da dann gewisse Schwingungstypen wegen der geringeren thermischen Anregungsenergie ausfallen (Quantentheorie des Festkörpers). Die Atomwärme nimmt daher mit fallender Temperatur ab und geht nahe dem absoluten Nullpunkt mit  $T^3$  gegen 0 (Debye'sches  $T^3$ -Gesetz). Bei Metallen ist außerdem der thermische Energieanteil der Leitungselektronen zu berücksichtigen, der jedoch bei höheren Temperaturen vernachlässigt werden kann.

Eine leicht abzuleitende Folge des Dulong-Petit'schen Gesetzes ist die Neumann-Kopp'sche Regel: Die Molwärme eines mehratomigen Festkörpers ist gleich der Summe der Atomwärmen der Einzelkomponenten.

## 4.2 Phasenumwandlungen

Existieren von einem Stoff unter entsprechenden Voraussetzungen mehrere verschiedene Zustände (Phasen), so spricht man bei der Übergangsstelle von einem Phasenübergang (Phasenumwandlungspunkt). Solche Phasenübergänge treten z. B. zwischen den Zuständen fest - flüssig, flüssig - dampfförmig, normalleitend - supraleitend, paramagnetisch - ferromagnetisch, paraelektrisch - ferroelektrisch und zwischen verschiedenen Kristallstrukturen vieler Festkörper auf.

Die Phasenübergänge sind stets mit Anomalien in charakteristischen Größen (wie spezifische Wärmekapazität, Kompressibilität, u. a.) verbunden. Meist lässt sich die Phasenumwandlung durch eine Anomalie in einer einzigen Größe, dem Ordnungsparameter, erklären. Durch den Einfluss des Ordnungsparameters lässt sich dann die gesamte Abweichung des thermodynamischen Verhaltens der Tieftemperaturphase im Vergleich zur Hochtemperaturphase beschreiben. Beim Phasenübergang flüssig - gasförmig ist der Ordnungsparameter die Dichte  $\rho$ , beim Übergang ferromagnetisch - paramagnetisch ist es die Magnetisierung  $M$ . Besitzt der Ordnungsparameter eine Sprungstelle an der Umwandlungstemperatur, spricht man von einem Phasenübergang erster Art. Erfolgt der Übergang von einem in den anderen Zustand ste-

tig (aber nicht beliebig oft differenzierbar), so spricht man von einem Übergang höherer Ordnung.

Wir beschränken uns nur auf die Phasenübergänge erster Ordnung, die am bekanntesten sind; z. B. fallen die Übergänge flüssig - gasförmig und flüssig - fest darunter. Da die Phase höherer Temperatur ungeordneter ist, muss am Phasenübergang eine charakteristische Wärmemenge, die „Umwandlungswärme“ oder „latente Wärme“, zugeführt werden, um die neue Phase zu erreichen. Die Umwandlungswärme wird beim Abkühlen bei der Umwandlungstemperatur wieder freigesetzt. Die Thermodynamik der Phasenumwandlung kann durch die Clausius-Clapeyron'sche Gleichung beschrieben werden, die z. B. für den Schmelzvorgang lautet:

$$\lambda_s = T_s \left. \frac{dp}{dT} \right|_{T_s} (v_{fl} - v_f) \quad (8)$$

$\lambda_s$  = spezifische Schmelzwärme

$T_s$  = Schmelztemperatur

$p$  = Druck beider Aggregatzustände im Gleichgewicht

$v_{fl}, v_f$  = spezifisches Volumen der Flüssigkeit, bzw. des Festkörpers (bzw. reziproke Dichte:  $1/\rho_{fl}, 1/\rho_f$ )

Für die Verdampfungswärme gilt die Clausius-Clapeyron'sche Gleichung in analoger Form.

Aus der Clausius-Clapeyron'schen Gleichung und der Definition der Entropie

$$dS = \frac{dQ}{T} \quad (9)$$

ergibt sich für die spezifische Schmelzentropie

$$S_s = \frac{dp}{dT} (v_{fl} - v_f) = \frac{\lambda_s}{T_s} \quad (10)$$

Die Gesamtentropie ist demnach mit  $c = dQ/dT$

$$S = S_0 + \int_{T_0}^{T_s} \frac{c_{p,f}}{T} dT + S_s + \int_{T_s}^{T_0} \frac{c_{p,fl}}{T} dT \quad (11)$$

wobei für die spezifische Schmelzentropie der einfache Ausdruck

$$S_s = \frac{\lambda_s}{T_s} \quad (12)$$

steht (Gl. (10)).

Erwärmt man ein Metall mit gleichbleibender Heizleistung, steigt die Temperatur bis zum Schmelzpunkt an, dann bleibt sie trotz weiterer Wärmezufuhr (in etwa) konstant, bis die gesamte Metallmenge geschmolzen ist. Die Wärmemenge, die benötigt wird, um 1 g einer festen Substanz zu verflüssigen, wird Schmelzwärme  $\lambda_s$  genannt. Die Schmelzwärme wird dazu gebraucht, um die Gitterstruktur des Festkörpers aufzulösen bis hin zum flüssigen Aggregatzustand. Aus der Größe der Umwandlungswärme kann auf die Festigkeit der Bindung im Festkörper geschlossen werden.

Im Versuch sollen die Wärmekapazität, Schmelzwärme und Schmelzentropie einer Legierung aus 50 % Bi, 31 % Pb und 19 % Sn („Newton's Metal“) bestimmt werden.

### 4.3 Kalorimeter

Ein Gerät zur Messung der Wärmekapazität heißt Kalorimeter. Eine ziemlich ungenaue aber einfache Bestimmung lässt sich mit dem Mischungskalorimeter durchführen: Wenn zwei Körper mit den annähernd temperaturunabhängigen Wärmekapazitäten  $C_1$  und  $C_2$  und den Anfangstemperaturen  $T_1$  und  $T_2$  ( $T_1 > T_2$ ) in Wärmekontakt gebracht werden, gleichen sie nach dem 2. Hauptsatz ihre Temperatur einander an. Die entstehende Mischungstemperatur sei  $T_M$  (siehe auch 1. Hauptsatz). Für sie gilt nach dem Energieerhaltungssatz:

$$\text{Abgegebene Wärmemenge} = \text{Aufgenommene Wärmemenge}$$

also

$$C_1 (T_1 - T_M) = C_2 (T_M - T_2) \quad (13)$$

Zur Messung der spezifischen Wärmekapazität  $c_K$  eines wasserunlöslichen Körpers (Masse  $m_K$ ), den man auf die Temperatur  $T_K$  gebracht hat, benutzt man als zweiten Körper zweckmäßig eine Wassermenge der bekannten spezifischen Wärmekapazität  $c_W$ , der Masse  $m_W$  und der Temperatur  $T_W$ , die sich in einem „Dewargefäß“ (Thermosflasche) befindet, damit die Wärmeverluste möglichst gering gehalten werden. Die Messung wird dadurch kompliziert, dass der das Wasser enthaltende Innenteil des Dewargefäßes sowie Rührer und Thermometer am Wärmeaustausch mitbeteiligt sind, und deren Gesamtwärmekapazität  $C_{Kal}$  berücksichtigt werden muss. Dann wird Gl. (13) zu:

$$c_K m_K (T_K - T_M) = (c_W m_W + C_{Kal})(T_M - T_W) \quad (14)$$

Eine genauere und direktere Methode, die Wärmekapazität zu messen, lehnt sich eng an die Definitionsgleichungen (1) an: Dieses Verfahren wird auch in dem hier durchzuführenden Experiment angewendet. Dem thermisch (fast) ideal isolierten Versuchskörper wird durch eine elektrische Heizung (mit Spannung  $U$  und Strom  $I$ ) während der Zeit  $\Delta t$  die Wärmemenge

$$\Delta Q = UI \Delta t \quad (15)$$

zugeführt. Aus der Temperaturerhöhung des Körpers ergibt sich dann seine Wärmekapazität  $C_K$ :

$$C_K = \frac{\Delta Q}{\Delta T} \quad (16)$$

Analog ergibt sich dann auch die latente Wärme der Phasenumwandlung beim Schmelzen.

Die zu vermessende Probe befindet sich in einem Gefäß, dessen Wärmekapazität  $C_L$  bei der Messung mit gemessen wird:

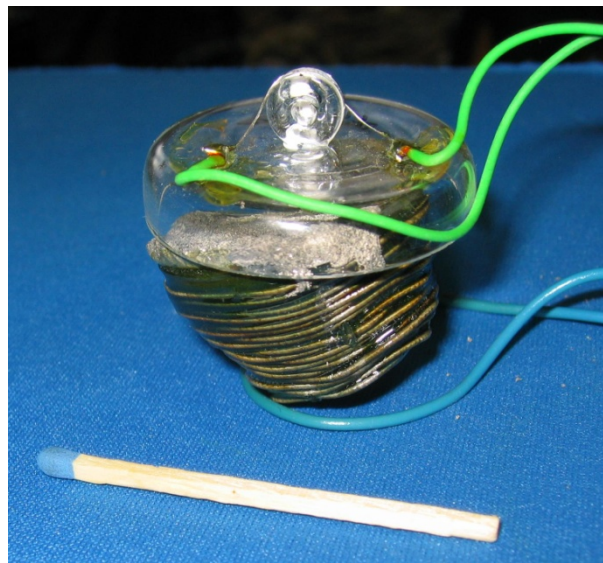
$$C_M = C_K + C_L$$

Um die Wärmekapazität  $C_L$  des Gefäßes von der Wärmekapazität der Probe  $C_K$  zu trennen, ist zunächst eine Bestimmung von  $C_L$  des Probengefäßes erforderlich. Anschließend wäre das Gefäß dann mit der Probe zu befüllen, so dass  $C_L$  bei der Messung berücksichtigt werden kann. Um nicht ständig die Probeniegel neu leeren und füllen zu müssen, ist beim vorliegenden Experiment dies dadurch gelöst, dass zunächst ein zum Probeniegel identisches leeres Gefäß mit Heizung und Thermometer vermessen wird, dessen Wärmekapazität  $C_L$  dann bei der Messung berücksichtigt wird.

## 5 Versuchsdurchführung

### 5.1 Versuchsaufbau

In dem am Messplatz stehenden Holzkasten befinden sich zwei identische Dewargefäße. In beiden eingebaut ist jeweils ein verschlossener Quarztiegel, der mit Konstantendraht zur Heizung umwickelt ist. Zur Messung der Temperatur befindet sich in jedem Tiegel ein Platinwiderstand (Pt-100 bzw. Pt-50). Das mit „LEER“ bezeichnete Dewargefäß enthält einen leeren Tiegel mit Heizung und Pt-Widerstand und dient zur Bestimmung der Wärmekapazität der Probenhalterung (Leerkapazität). In dem mit „PROBE“ gekennzeichneten Gefäß ist ein identischer Tiegel mit zusätzlich ca. 60 g (genaue Werte sind jeweils auf dem Kasten angegeben) der Legierung aus 50 % Bi, 31 % Pb und 19 % Sn (Abb. 1).



*Abb. 1: Quarztiegel gefüllt mit etwa 60 g einer Legierung aus 50 % Bi, 31 % Pb und 19 % Sn. Der Tiegel ist mit einem Heizdraht umwickelt (blaue Anschlussdrähte), die Temperaturmessung erfolgt über einen Pt-50- oder Pt-100-Widerstand im Tiegel (grüne Anschlussdrähte).*

Geheizt wird mit einer Konstantstromquelle, die einen festen voreingestellten Strom liefert. Für die Heizleistung ergibt sich dann:

$$\begin{aligned}
 P_H &= UI \\
 I &= \frac{U}{R_H} \\
 P_H &= \frac{U^2}{R_H}
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

Da  $I$  und  $R_H$  im zu messenden Temperaturbereich bis etwa 120 °C als nahezu konstant anzusehen sind, genügt es, den Spannungsabfall am Heizwiderstand zu messen, um die Leistung zu bestimmen.

Zur Temperaturmessung steckt ein Platinwiderstand in der Probe, der bei 0 °C einen Widerstand von 100,0 Ω und bei 100 °C von 138,5 Ω (bzw. 50 Ω und 69,25 Ω) besitzt. Das Temperaturverhalten des Widerstandes gehorcht in diesem Temperaturbereich der Beziehung:



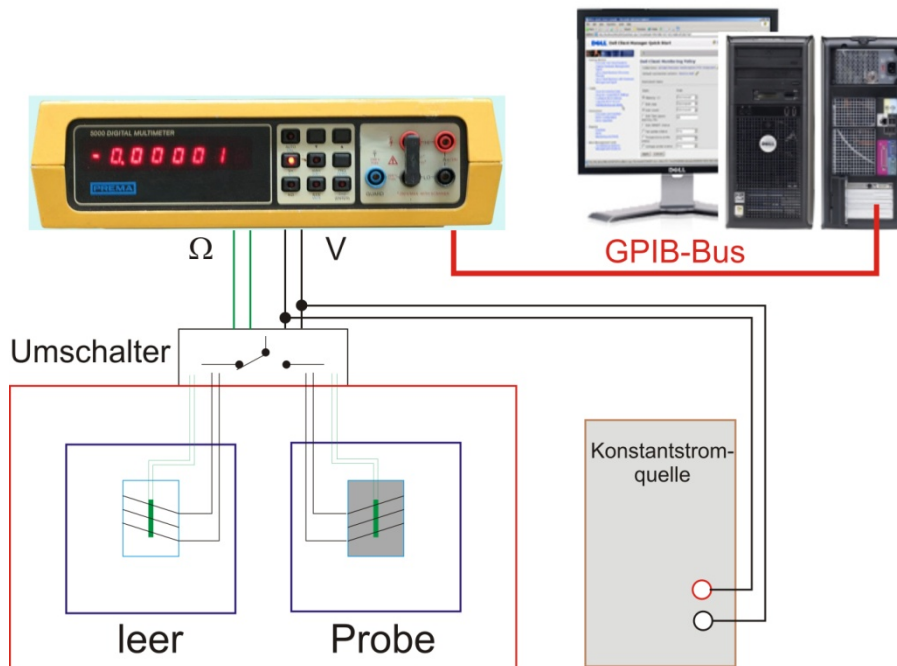
$$R(T) = R_0 (1 + AT + BT^2) \quad (18)$$

mit

$$A = 3,9083 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$B = -5,775 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$$

Bei kleinen Temperaturintervallen bzw. weniger genauen Messungen kann der  $T^2$ -Term vernachlässigt werden (s. Anhang).



**Abb. 2:** Versuchsaufbau: Zwei identische Dewargefäßen mit einem leeren und einem mit der Probe gefüllten Tiegel, Digitalmultimeter mit Messkanalumschalter („Scanner“) zur automatischen Messwertaufnahme und eine Konstantstromquelle. Die Daten werden mit einem LabVIEW-Programm über einen GPIB-Bus von einem PC ausgelesen.

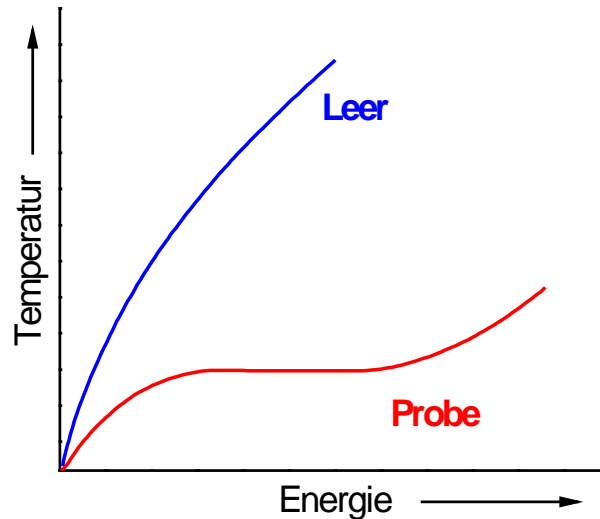
Der Versuch soll (fast) vollautomatisch mit Hilfe eines Computers durchgeführt werden (Abb. 2), dazu wurde ein Messprogramm mit LabVIEW entwickelt. Zur Messung der Spannungen und der Widerstände steht ein Digitalmultimeter mit Scanner (PREMA 5000) zur Verfügung, das über eine GPIB-Schnittstelle durch einen PC gesteuert wird und die Messdaten an den PC überträgt.

## 5.2 Versuchsvorbereitung

Bitte bereiten Sie sich durch die Bearbeitung der folgenden Aufgaben auf den Versuch vor und sprechen Sie Ihre Lösungen mit dem/der Betreuer/in durch.

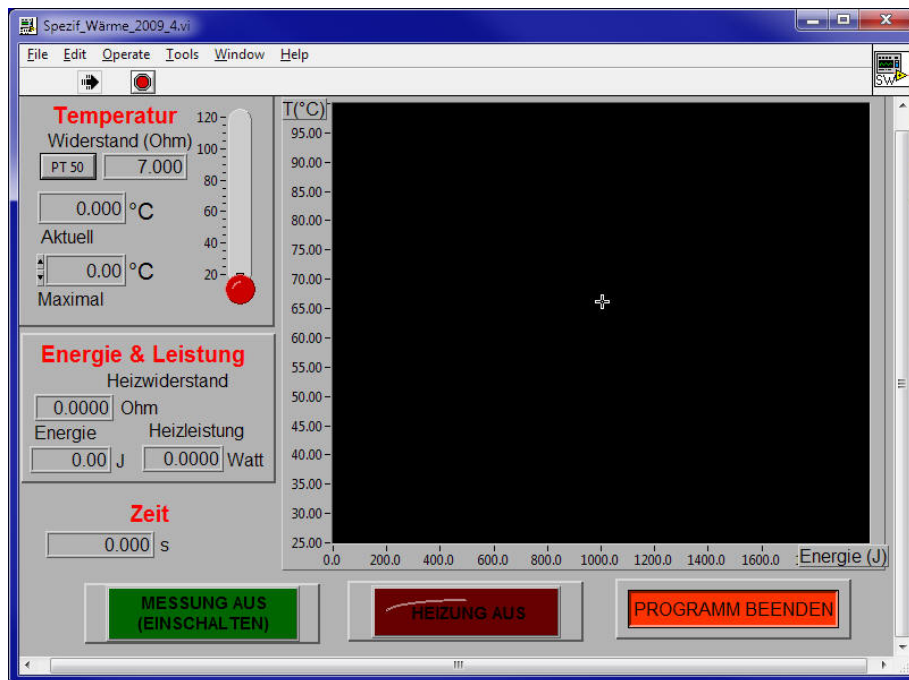
1. In der Abb. 3 ist mit „Leer“ die Kurve der Leermessung (nur Tiegel) und mit „Probe“ die Kurve der Probenmessung (Probe mit Tiegel) bezeichnet. Das Ausgleichspolynom für „Leer“ kann als Polynom 2. Grades ( $y = a_0 + a_1x + a_2x^2$ ) dargestellt werden. Geben Sie an, wie Sie mathematisch vorgehen müssen, um mit Hilfe des Ausgleichspolynoms für die Leermessung die Probenmessung um den Anteil „Leer“ zu korrigieren.
2. Bestimmen Sie theoretisch aus der Zusammensetzung der Probe mit Hilfe des Dulong-Petit'schen Gesetzes die spezifische Wärmekapazität im Bereich von ca. 30 °C bis 40 °C.

3. Skizzieren Sie den Verlauf der spezifischen Wärmekapazität in Abhängigkeit von der Temperatur eines Festkörpers mit Phasenumwandlung 1. Ordnung.
4. Skizzieren Sie das  $C$ - $T$ -Diagramm eines Festkörpers ohne Phasenumwandlung ab  $T = 0$  K.
5. Zeichnen Sie das  $Q$ - $T$ - und das  $C$ - $T$ -Diagramm von Wasser im Bereich von festem Eis bis zur Dampfphase. Erläutern Sie im Anschluss an den Versuch die Unterschiede zu Ihrer Messung.



**Abb. 3:** Temperatur als Funktion der zugeführten Energie für eine Leermessung und eine Probe mit Phasenübergang fest – flüssig.

### 5.3 Hinweise



**Abb. 4:** LabVIEW-Programm zur Bestimmung der spezifischen Wärme und des Phasenübergangs fest-flüssig.

Überprüfen Sie die Verkabelung und schalten Sie das Digital-Multimeter und den PC ein, keinesfalls jedoch die Konstantstromquelle. Die Stromquelle wird nicht vom PC kontrolliert und beginnt nach dem Einschalten sofort den Leer- oder Probeniegel zu heizen. Falls Sie das Proben- bzw. Leergefäß irrtümlich aufheizen, verlieren Sie viel Zeit durch das notwendige Abkühlen.

Starten Sie das LabVIEW-Programm „Spez. Wärme“. Nach dem Starten des Programms (Abb.4) wird das Multimeter initialisiert und in den Remote-Betrieb umgestellt. Das Programm erkennt automatisch, ob Pt-50- oder Pt-100-Widerstände zur Temperaturmessung benutzt werden und zeigt den Widerstand und die Temperatur an. Schalten Sie zwischen „Leer“ und „Probe“ um und testen Sie, ob beide Widerstände funktionieren und Raumtemperatur anzeigen. Vor dem Start einer Messung muss eine Maximaltemperatur von  $< 120\text{ °C}$  eingegeben werden.

Die Bestimmung der Energie aus der Heizleistung geschieht mit Hilfe der im PC integrierten Uhr, und eine Unterbrechung der Messung würde die Messwerte verfälschen. Nach dem Einschalten der Konstantstromquelle (Heizung) wird die Messung durch Drücken des Knopfes *MESSUNG AUS (EINSCHALTEN)* gestartet. Die Datenaufnahme wird nach Erreichen der Maximaltemperatur vom Programm beendet. Danach bitte sofort die Stromquelle für die Heizung ausschalten.

Nach dem Beenden der Messung werden die Daten (Temperatur und Energie) automatisch an das Programm Origin übergeben, in ein Worksheet eingetragen und als Diagramm dargestellt. Jetzt kann die Messung von Origin aus abgespeichert werden. Origin kann erst geschlossen werden, wenn das LabVIEW-Programm beendet wurde.

#### 5.4 Messungen und Auswertung

Stellen Sie im Messprogramm eine Maximaltemperatur von  $115\text{ °C}$  ein und führen Sie nacheinander eine „Leermessung“ und eine „Probenmessung“ durch. Speichern Sie nach jeder Messung die Daten in Origin ab.

Korrigieren Sie die Probenmessung mit Hilfe der Leermessung. Bestimmen Sie nun die spezifische Wärmekapazität der Probe (im Temperaturbereich bis etwa  $40\text{ °C}$ ) und vergleichen Sie sie mit den in 5.2 berechneten Werten.

In der Probenmessung können Sie nun einen bzw. zwei (warum?) Temperaturbereiche erkennen, bei denen eine Phasenumwandlung vorliegt. Bestimmen Sie jeweils folgende Größen:

- Spezifische Wärmekapazität kurz vor der Phasenumwandlung
- Spezifische Wärmekapazität kurz nach der Phasenumwandlung
- Umwandlungstemperatur
- Umwandlungswärme und spezifische Umwandlungswärme
- Übergangsentropie

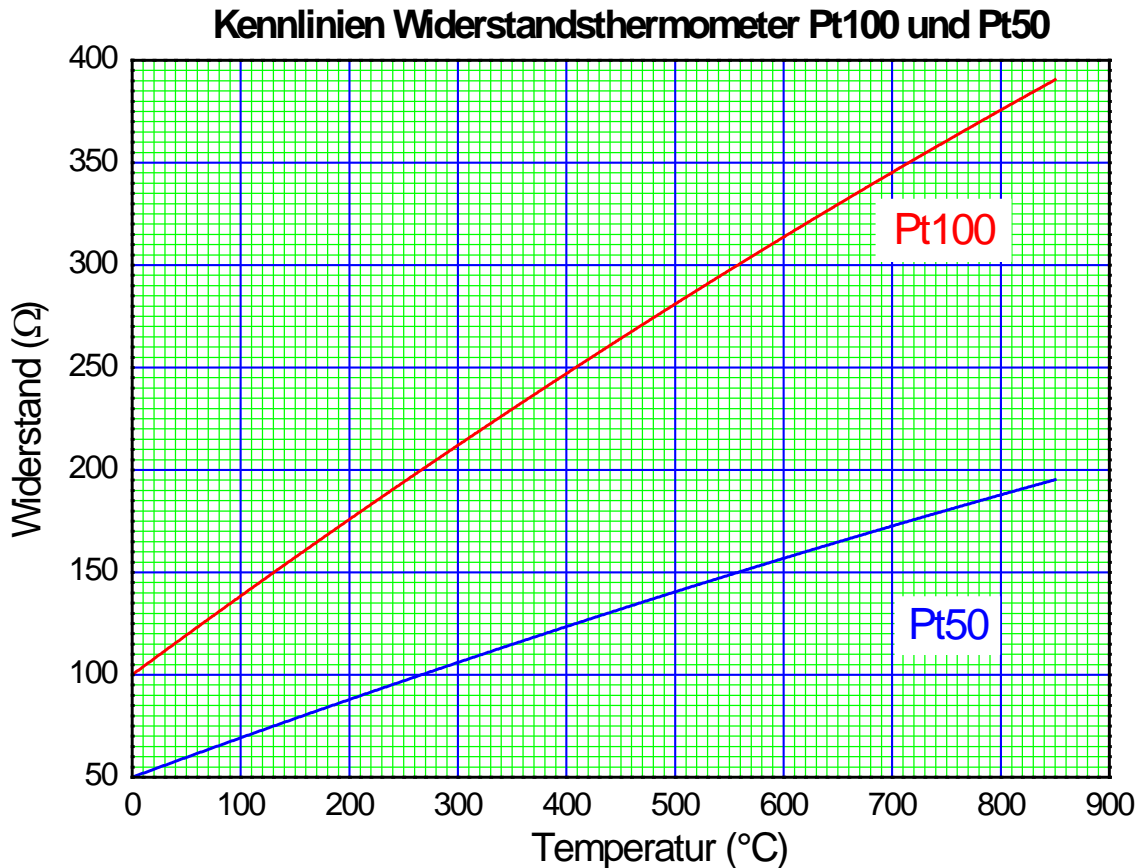
Welcher Ordnung sind die beobachteten Phasenumwandlungen? Begründen Sie Ihre Aussage.

Die dem Experiment zugrundeliegenden Überlegungen gehen davon aus, dass man sich im thermodynamischen Gleichgewicht befindet. Wenn man aber dem System über eine längere Zeit ständig Wärme zuführt, ist dies natürlich nicht gewährleistet. Überlegen Sie sich, wieso trotzdem sinnvolle Ergebnisse möglich sind und was man tun könnte, um das Messverfahren besser an die Voraussetzungen anzupassen.

## Anhang

### Platin-Widerstandsthermometer

Die Normierung DIN IEC 751 legt für den Platin-Widerstand zwei Temperaturbereiche fest und definiert diese durch verschiedene Polynome.



*Abb. 5:* Nach Norm berechnete Widerstände als Funktion der Temperatur für einen Pt50- und einen Pt100-Widerstand.

Der erste **Temperaturbereich (-200 °C bis 0 °C)** wird festgelegt durch

$$R(T) = R_0 \left( 1 + AT + BT^2 + C(T - 100^\circ\text{C})T^3 \right)$$

und der zweite **Temperaturbereich (0 °C bis 850 °C)** durch (Abb. 5)

$$R(T) = R_0 \left( 1 + AT + BT^2 \right)$$

Die Koeffizienten sind:

$$A = 3,9083 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$B = -5,775 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$$

$$C = -4,183 \times 10^{-12} \text{ } ^\circ\text{C}^{-3}$$

$R_0$  ist der sogenannte Nennwiderstand und wird bei 0 °C gemessen. Entsprechend der Norm beträgt der Widerstand beim PT100, dem gängigsten Platin-Widerstand, 100 Ω bzw. beim

PT50 50  $\Omega$ , beim PT500 500  $\Omega$  und beim PT1000 sogar 1k $\Omega$ . Je höher der Nennwiderstand, umso empfindlicher reagiert das Widerstandsthermometer auf Temperaturänderungen und desto weniger fallen die Widerstände der Zuleitungen ins Gewicht.

**Temperaturkoeffizient:**

Die Norm definiert für den Platin-Widerstand einen mittleren Temperaturkoeffizienten  $\alpha$  von 0  $^{\circ}\text{C}$  bis 100 $^{\circ}\text{C}$ . Er definiert die mittlere Widerstandsänderung bezogen auf  $R_0$  (Nennwert bei 0  $^{\circ}\text{C}$ ). Dieser  $\alpha$ -Wert beträgt

$$\alpha = 3,850 \times 10^{-3} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$$

Der  $\alpha$ -Wert von spektralreinem Platin beträgt allerdings

$$\alpha = 3,925 \times 10^{-3} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$$

Der Unterschied ergibt sich durch die gezielte Verunreinigung des Platin mit anderen Stoffen, um das Widerstandsthermometer unempfindlicher gegen unabsichtliche Verunreinigungen von außen zu machen.

**Temperaturberechnung:**

Aus dem gemessenen Widerstand  $R$  des Thermometers wird auf die entsprechende Temperatur geschlossen. Entsprechend den Formeln zur Darstellung des Platin-Widerstandes lässt sich aus der sich ergebenden Kennlinie für **Temperaturen über 0  $^{\circ}\text{C}$**  eine Formel zur Berechnung der Temperatur ableiten:

$$T = \frac{-AR_0 + \sqrt{(AR_0)^2 - 4BR_0(R_0 - R)}}{2BR_0}$$