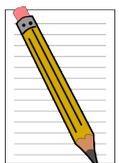


## Spezifische Wärme

Wie viel Energie ist nötig, um die Luft im Raum oder einen Topf mit Wasser zu erwärmen? Und wie viel Energie, um das Wasser zu verdampfen? In diesem Versuch sollen Sie solche Fragen experimentell untersuchen.

### Schriftliche VORbereitung:

- Was ist ein Dewargefäß? Wie ist es konstruiert und welche Vorteile bietet dieser Aufbau?
- In der Thermodynamik werden die Temperaturen üblicherweise in K (Kelvin) gemessen. Wie ist diese Skala festgelegt und wie hängt sie mit unserer °C-Skala zusammen?
- In welcher Einheit misst man in der Physik die Wärme? Welche Maßeinheit hat daher die Wärmekapazität?
- Beim Verdampfen von Wasser dient die zugeführte Wärme offensichtlich nicht zur Erhöhung der mittleren kinetischen Energie der Wassermoleküle, sondern ... ?
- Um 1 kg Wasser um 1 °C zu erwärmen sind 4.18 kJ erforderlich. Diese Energiemengen wurde früher als eigene Einheit (Kalorie) benutzt, die *Kalorientabllen* erinnern noch an diese alte Bezeichnung. Ist das viel oder wenig Energie?
- Die Temperaturen in diesem Versuch werden mit Thermoelementen gemessen. Skizzieren und erklären Sie dieses Messverfahren. Muss man die Wärmekapazität des Thermoelements in der Fehlerrechnung berücksichtigen?
- Der Arbeitspreis beträgt 2022 für 1 kWh (Kilowattstunde) 36 ct. Wie teuer ist es, einen Liter Wasser von 20 °C zum Kochen zu bringen (100 °C)? Um wie viel Grad könnte man mit dieser Energie die Luft, und nur sie, in einem Raum 50 m<sup>3</sup> Raum (4 m × 5 m × 2.5 m) erhöhen? Die Dichte der Luft beträgt  $\rho = 1.28 \text{ kg/m}^3$ .
- Erläutern Sie den 1. Hauptsatz der Thermodynamik. Welche Energie, versteht man unter innerer Energie, was stellen Sie sich darunter vor?
- Bei Gasen gibt es eine Einschränkung für die spezifische Wärmekapazität. Was bezeichnen die Größen  $c_p$  und  $c_V$ . Warum ist diese Einschränkung notwendig?
- Setzen Sie die Inhalte dieses Versuchs in Zusammenhang mit der Klimakrise. Was bedeutet eine Erhitzung der Weltmeere und das Schmelzen der Gletscher aus thermodynamischer Perspektive



# 1 Grundlagen

## Spezifische Wärme

Führt man einem Körper die Wärme  $\Delta Q$  zu, so erhöht sich seine Temperatur um  $\Delta T$ :

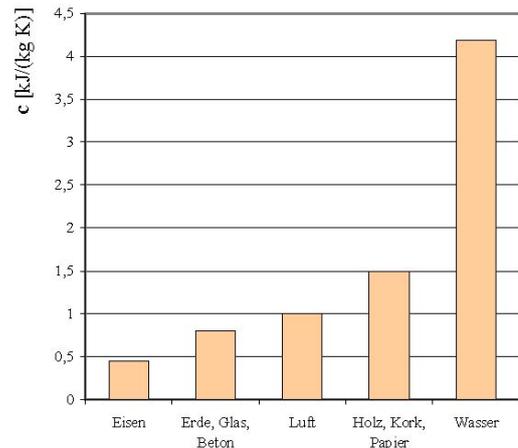
$$\Delta Q = C \cdot \Delta T$$

Die *Wärmekapazität*  $C$  ist von dem Material und der Masse  $m$  des Körpers abhängig. Bei homogenen Körpern, die nur aus einem Stoff bestehen, definiert man über

$$\Delta Q = c m \Delta T \quad (1)$$

die *spezifische Wärme* des Stoffes.

Die *spezifische Wärme* eines Stoffes gibt an, wie viel Energie zur Temperaturerhöhung von 1 kg dieses Stoffes um 1 °C erforderlich ist.



**Abbildung 1:** Die spezifische Wärme einiger Stoffe bei 20 °C. Die spez. Wärme ist jedoch nicht konstant, sondern temperaturabhängig. Um die Temperatur von 1 kg trockener Luft um 1 °C zu erhöhen sind etwa 1 kJ erforderlich.

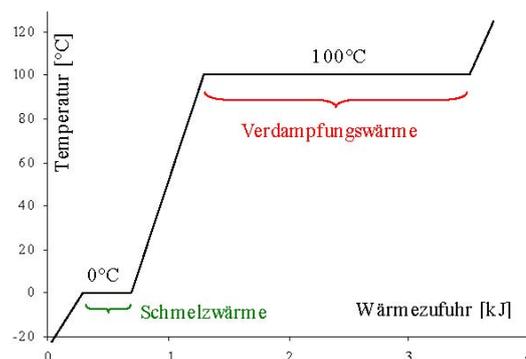
Die *spezifische Wärme* des Wassers ist extrem groß (Abb. 1). Dies erklärt z.B. den Unterschied zwischen dem milden Meeresklima und den starken Temperaturschwankungen des Kontinentalklimas. Das Meer speichert im Sommer in Folge seiner hohen *spezifischen Wärme* bedeutende Energiemengen, ohne seine Temperatur dabei selbst stark zu erhöhen. Diese Energie wird im Winter wieder abgegeben. Die hohe *spezifische Wärme* des Wassers ist u.a. auch der Grund, weshalb wir Wasser in unserer Zentralheizung benutzen.

## Schmelzwärme und Verdampfungswärme

Wenn einer Substanz am Schmelz- bzw. Siedepunkt Wärme zugeführt wird, bewirkt diese keine Erhöhung der Temperatur, sondern eine Änderung des Aggregatzustandes.

Die *spezifische Schmelzwärme*  $S$  ist die Wärmemenge, die benötigt wird, um bei konstantem Druck ohne Temperaturänderung 1 kg einer festen Substanz in den flüssigen Zustand zu überführen.

Die *spezifische Verdampfungswärme*  $Q$  ist die Wärmemenge, die zugeführt werden muss, um bei konstantem Druck ohne Temperaturänderung 1 kg einer Flüssigkeit zu verdampfen.



**Abbildung 2:** Der Temperaturanstieg von H<sub>2</sub>O bei konstanter Wärmezufuhr. Schmelz- und Verdampfungswärme sind leicht zu erkennen.

## Dies ist die Idee für alle Messungen hier

Berühren sich zwei Körper verschiedener Temperatur oder werden zwei Flüssigkeiten gemischt und kann man gegenüber der Umgebung eine ausreichende Wärmeisolation gewährleisten, gilt der Energiesatz:

$$\Delta Q_{\text{abgegeben}} = \Delta Q_{\text{aufgenommen}}$$

Setzt man hier die Definition (1) ein, so erhält man:

$$(m \cdot c \cdot \Delta T)_{\text{abgegeben}} = (m \cdot c \cdot \Delta T)_{\text{aufgenommen}}$$

Daraus folgt für zwei Körper (mit  $T_m$  als Mischtemperatur) die Mischungsregel:

$$m_1 \cdot c_1 \cdot (T_1 - T_m) = m_2 \cdot c_2 \cdot (T_m - T_2)$$

Ist die *spezifische Wärme* eines Körpers bekannt, so kann man hieraus durch Messen der Massen und der Temperaturen die des anderen ermitteln (*Mischungskalorimetrische Ermittlung der spezifischen Wärme*).

In der Literatur findet man für die spezifische Wärme von Wasser den Wert  $c_{\text{H}_2\text{O}} = (4.182 \pm 0.004) \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$  im Bereich von 15 °C bis 65 °C. Rechnen Sie bitte in der Auswertung mit  $c_{\text{H}_2\text{O}} = 4.18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$ .

## 2 Experimente

### Bestimmung der Wärmekapazität C des Dewargefäßes

Die Wärme des Dewargefäßes + Deckel wird nach der Mischmethode bestimmt. Zu einer gewogenen Menge kalten Wassers von etwa Zimmertemperatur  $T_k$  im Dewargefäß wird eine bestimmte Menge warmen Wassers (mit der Temperatur  $T_w$ ) hinzugefügt und unter Umrühren die Mischungstemperatur  $T_m$  ermittelt. Die Wärmekapazität  $C_1$  ergibt sich damit aus:

$$m_w \cdot c_{\text{H}_2\text{O}} \cdot (T_w - T_m) = (m_k \cdot c_{\text{H}_2\text{O}} + C_1) \cdot (T_m - T_k) \quad (2)$$

mit  $m_k$ : Masse des kalten Wassers

$m_w$ : Masse des warmen Wassers

Die vom warmen Wasser abgegebene Wärme (linke Seite der Gleichung) dient zur Erwärmung des kalten Wassers und des Dewargefäßes auf die Mischtemperatur (rechte Seite).

Ihr Vorgehen für diese Messung ist folgendermaßen:

- (I) Leergewicht des blauen Dewargefäß + Deckel bestimmen, im Wasserkocher etwas destilliertes Wasser zum Sieden bringen.
- (II)  $m_k$  destilliertes Wasser (Wert am Arbeitsplatz) im Dewargefäß einfüllen.  
Gefülltes Dewargefäß + Deckel wiegen. Aus der Differenz ergibt sich der genauere Wert von  $m_k$ .
- (III) Temperatur  $T_k$  des kalten Wassers und Temperatur  $T_w$  des siedenden Wassers messen.
- (IV)  $m_w$  siedendes Wasser hinzufügen, rühren und sofort Temperatur  $T_m$  messen.
- (V) Dewargefäß mit der Gesamtwassermenge + Deckel wiegen. Die Differenz ergibt den Wert von  $m_w$ .

- (M1) Berechnen Sie sofort die Wärmekapazität  $C_1$  nach Gl. (2). Zeigen Sie unbedingt Ihren Wert der Tutorin oder dem Tutor, bevor Sie weitermessen: Der Wert ist kritisch für die Auswertung der nächsten beiden Versuche.
- (A1) Bestimmen Sie die Wärmekapazität mitsamt Angabe der Messunsicherheiten (wird benötigt für die Auswerteaufgaben der nächsten beiden Versuche).

## Bestimmung der Schmelzwärme $S$ von Wasser

Im Dewargefäß befindet sich warmes Wasser der Temperatur  $T_w$ . Bei Zugabe von Eis der Temperatur  $T_k = 0^\circ\text{C}$  stellt sich nach dem Schmelzen eine Mischtemperatur  $T_m$  ein. Die Wärmebilanz ist hier:

$$(m_w \cdot c_{\text{H}_2\text{O}} + C_1) \cdot (T_w - T_m) = m_k \cdot c_{\text{H}_2\text{O}} \cdot (T_m - T_k) + m_k \cdot S \quad (3)$$

mit  $m_k$ : Masse des Eises

$m_w$ : Masse des warmen Wassers

Die vom Wasser und Dewargefäß abgegebene Wärme (linke Seite der Gleichung) dient zum Schmelzen des Eises und zur Erwärmung des Schmelzwassers von der Schmelztemperatur auf die Mischtemperatur (rechte Seite).

Ihr Vorgehen für diese Messung ist folgendermaßen:

- (I) Füllen Sie warmes Wasser (Werte am Arbeitsplatz) in das Dewargefäß und bestimmen Sie die Masse und die Temperatur des Wassers.
  - (II) Eis durch das Sieb kurz abtropfen lassen und erst dann in das Dewargefäß schütten und umrühren.
  - (III) Messen Sie die Mischtemperatur, sobald das Eis vollständig geschmolzen ist.
  - (IV) Anschließend messen Sie bitte die Gesamtmasse des Dewargefäßes, um die genaue Masse des hinzugefügten Eises zu ermitteln.
- (M2) Nehmen Sie nach dem obigen Vorgehen die notwendigen Messwerte auf.
- (A2) Bestimmen Sie mit diesen Werten über die Wärmebilanz (Gl. (3)) die Schmelzwärme  $S$  von Wasser.

## Bestimmung der Verdampfungswärme $Q$ von Wasser

Im Dewargefäß befindet sich kaltes Wasser der Temperatur  $T_k$ . Beim Einleiten von Wasserdampf der Temperatur  $T_w \approx 100^\circ\text{C}$  stellt sich nach dem Kondensieren eine Mischtemperatur  $T_m$  ein.

Die Wärmebilanz lautet hierfür:

$$m_w \cdot c_{\text{H}_2\text{O}} \cdot (T_w - T_m) + m_w \cdot Q = (m_k \cdot c_{\text{H}_2\text{O}} + C_1) \cdot (T_m - T_k) \quad (4)$$

mit  $m_k$ : Masse des kalten Wassers

$m_w$ : Masse des Wasserdampfes

Ihr Vorgehen für diese Messung ist folgendermaßen:

- (I) Füllen Sie destilliertes Wasser ( $m_k$  am Arbeitsplatz) in das kalte Dewargefäß und wiegen Sie das gefüllte Dewargefäß.
  - (II) Füllen Sie den Dampferzeuger höchstens halbvoll mit Wasser. Die „Siede“-Steinchen in ihm verhindern den Siedeverzug.
  - (III) Dampferzeuger und Heizplatte (Vorsicht– kann noch heiß sein) unter den am Wasserabscheider hängenden Deckel schieben. Deckel fest verschließen, so dass während des Versuchs kein Wasserdampf am Deckel austreten kann.
  - (IV) Bringen Sie das Wasser zum Sieden. Um sicher zu sein, dass der erzeugte Dampf die Luft aus der Apparatur verdrängt hat, halten Sie bitte das Glasrohr zunächst in ein mit Wasser gefülltes Becherglas. Erst wenn die aufsteigenden Blasen anfangen zu kondensieren, leiten Sie den Dampf in das Dewargefäß.
  - (V) Lassen Sie so lange den Dampf kondensieren, bis die Temperatur des Wassers im Dewargefäß die am Arbeitsplatz angegebene Temperatur erreicht hat. Danach messen Sie bitte erneut das Gewicht des Dewargefäßes.
- (M3) Nehmen Sie nach dem obigen Vorgehen die notwendigen Messwerte auf.
- (A3) Bestimmen Sie mit diesen Werten die Verdampfungswärme  $Q$  mit Gl. (4).

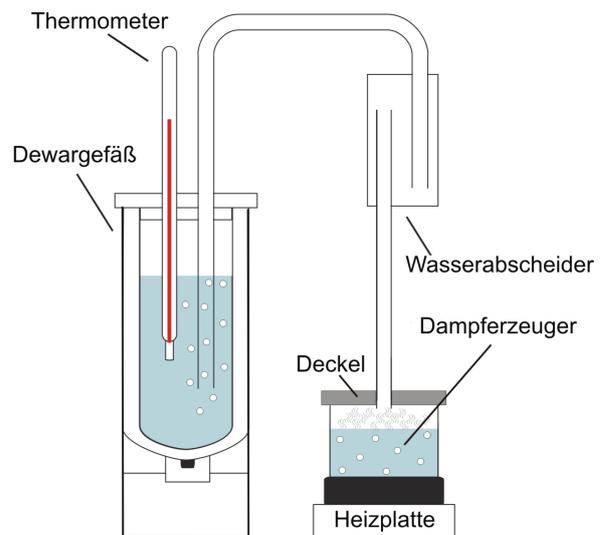


Abbildung 3: Versuchsanordnung zur Messung der Verdampfungswärme

### Hinweise zur Durchführung

- Achten Sie darauf, dass das Glasrohr im Dewargefäß auch wirklich ins Wasser ragt.

- Bei diesem Versuchsteil ist es besonders wichtig, dass Sie während sie darauf warten, dass das Wasser die gewünschte Temperatur erreicht ständig umrühren.
- Nehmen Sie bitte unbedingt das Glasrohr nach der Durchführung aus dem Wasser (nicht zurück ins Becherglas hängen lassen) und achten Sie darauf, dass der Schlauch keinen Knick hat. Wenn der Wasserdampf wieder kondensiert entsteht ein starker Unterdruck der entweder dazu führt, dass das Wasser eingesaugt wird oder dass sich der Deckel am Dampferzeuger festsaugt.



## Bestimmung der spezifischen Wärme eines Probekörpers

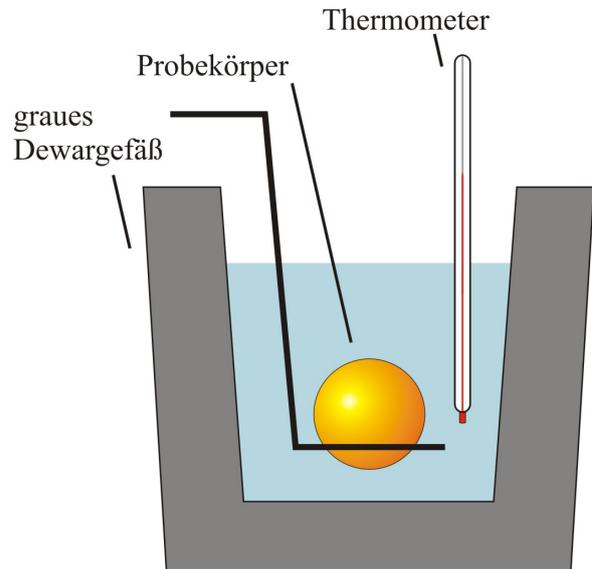
Der zu messende Körper mit der unbekanntem spezifischen Wärme wird in siedenden Wasser auf die Temperatur  $T_w \approx 100^\circ\text{C}$  erhitzt. Anschließend wird er in ein Dewargefäß mit kaltem Wasser der Temperatur  $T_k$  getaucht und die Mischtemperatur  $T_m$  bestimmt. Nicht nur das Wasser nimmt dabei Wärme auf, sondern auch das Dewargefäß.

Aus der Wärmebilanz des Mischungsprozesses ergibt sich die spezifische Wärme  $c_{\text{Probe}}$  des Probekörpers aus:

$$c_{\text{Probe}} = \frac{(c_{\text{H}_2\text{O}} \cdot m_k + C_2) \cdot (T_m - T_k)}{m_{\text{Probe}} \cdot (T_w - T_m)} \quad (5)$$

mit  $m_k$ : Masse des kalten Wassers

$m_{\text{Probe}}$ : Masse des Probekörpers



Der Versuch wird nach etwas langatmiger Anlaufzeit sehr plötzlich recht stressig. Eine Person sollte immer die Zeit sekundengenau im Auge behalten, während die andere das Thermometer abliest.

Ihr Vorgehen für diese Messung ist folgendermaßen:

- (I) Die Wärmekapazität  $C_2$  des grauen Dewargefäßes finden Sie am Arbeitsplatz angegeben.
- (II) Füllen Sie das Gefäß mit Wasser leicht unterhalb der Raumtemperatur. Der Probekörper muss in jedem Fall vollständig von Wasser bedeckt sein.
- (III) Entnehmen Sie den Probekörper und erhitzen Sie diesen direkt im bereitgestelltem Wasserkocher.
- (IV) Während Sie den Probekörper in dem siedenden Wasser belassen, notieren Sie 5 Minuten alle 30 Sekunden die Temperatur des Wassers in dem Dewargefäß. Abhängig von der Raumtemperatur wird man einen leichten Anstieg feststellen. Vergessen Sie nicht stetig umzurühren.
- (V) Achten Sie weiterhin auf die Zeit, damit Sie den Temperatur-Zeit-Verlauf protokollieren können.
- (VI) Messen Sie die Siedetemperatur  $T_w$  und tauchen Sie dann den Probekörper in das kalte Wasser. Sofort nach Einbringen des Körpers lesen Sie alle 5 Sekunden unter ständigen Umrühren die Wassertemperatur ab.
- (VII) Auch nach Erreichen der Mischtemperatur muss noch 5 Minuten lang alle 30 Sekunden die Temperatur weiter gemessen werden, bis sich ein linearer Temperaturabfall (s. Abb. 4) ergibt.
- (VIII) Bestimmen Sie zuletzt bitte noch die Massen vom Dewargefäß mit Wasser + Probekörper und vom trockenen Probekörper allein.

### Hinweise zur Auswertung

Die Wassertemperatur  $T_k$  und die Mischtemperatur  $T_m$  müssen graphisch aus der Temperatur-Zeit-Kurve wie in Abb. 4 ermittelt werden. Da der Ausgleich nicht schlagartig erfolgt und keine ausreichende Wärmeisolation besteht, wird Wärme mit der Umgebung ausgetauscht. Das Wasser erreicht daher nicht die wahre Mischungstemperatur.

Eine gute Näherung für die wahren Temperaturen  $T_k$  und  $T_m$  erreicht man durch graphische Extrapolation des (linearen) Anfangs- bzw. Endteils der Kurve, wobei eine vertikale Gerade  $g$  so gelegt wird, dass die Flächenstücke  $A_1$  und  $A_2$  ungefähr gleich groß sind.

*Begründung:* In einer Temperatur-Zeit-Darstellung entspricht die Fläche unter der Kurve der mit der Umgebung ausgetauschten Wärme. Um die unvermeidlichen Verluste an die Umgebung zu korrigieren, simuliert man mit der eingezeichneten vertikalen Geraden einen schlagartigen Temperatursprung von  $T_k$  auf  $T_m$ , sodass das Dewargefäß „keine Zeit hat“, Wärme an die Umgebung abzugeben. Die beiden Flächenstücke  $A_1$  und  $A_2$  müssen jedoch gleich groß sein, damit die Gesamtfläche unter der wahren und der simulierten Kurve gleich groß bleibt. Die Schnittpunkte ergeben die gesuchten Temperaturen  $T_k$  und  $T_m$ .

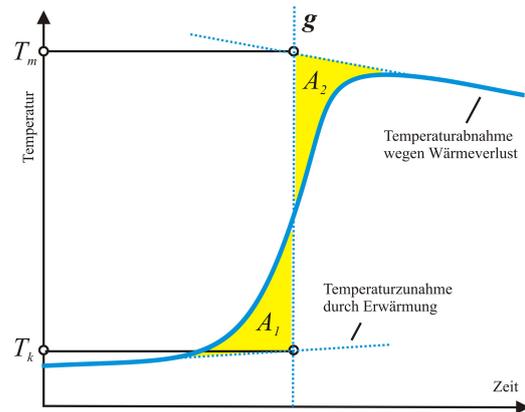


Abbildung 4: Temperatur-Zeit-Verlauf des Wassers

- (A4) Zeichnen Sie den Verlauf wie in Abb. 4 in Ihren Temperatur-Zeit-Verlauf ein und bestimmen Sie aus den daraus erhaltenen Werten für  $T_k$  und  $T_m$  die spezifische Wärme des Probekörpers nach Gl. (5).

### Betrachtung der Unsicherheit

Nehmen Sie als Unsicherheit für alle Temperaturen  $\pm 0.1^\circ\text{C}$  und für alle Massen  $\pm 0.01\text{ g}$  an.

Beispiel:

$$C = \underbrace{c_{\text{H}_2\text{O}} \cdot m_w}_{C_1} \frac{T_w - T_m}{T_m - T_k} - \underbrace{c_{\text{H}_2\text{O}} \cdot m_k}_{C_2}$$

Zur Berechnung der Unsicherheit zerlegen Sie die Formel in die beiden Summanden  $C_1$  und  $C_2$ . Sie können Sie die Größtfehlerabschätzung über die relativen Unsicherheiten vornehmen:

$$(I) \frac{u(C_1)}{C_1} = \frac{u(m_w)}{m_w} + \frac{u(T_w - T_m)}{T_w - T_m} + \frac{u(T_m - T_k)}{T_m - T_k} \text{ und}$$

$$(II) \frac{u(C_2)}{C_2} = \frac{u(m_k)}{m_k}$$

Die absolute Unsicherheit erhalten aus

$$u(C) = \frac{u(C_1)}{C_1} \cdot \underbrace{C_1}_{\text{gemessen}} + \frac{u(C_2)}{C_2} \cdot \underbrace{C_2}_{\text{gemessen}}$$

- (A5) Ermitteln Sie mit einer analogen Rechnung die Messabweichungen aller Ihrer Endergebnisse. Vergleichen Sie Ihre Ergebnisse für die Schmelz- und Verdampfungswärme mit den Literaturwerten.

## Materialbestimmung durch die Atommasse des Probekörpers

Die molare Wärme ist definiert als:

$$c_{\text{mol}} = \frac{1}{n} \cdot \frac{\Delta U}{\Delta T} \left[ \frac{\text{J}}{\text{mol K}} \right] \quad \text{mit } n = \text{Stoffmenge} \quad (6)$$

Der Zusammenhang mit der Wärmekapazität  $C$  ist gegeben durch:

$$C = m \cdot c = n \cdot c_{\text{mol}}. \quad (7)$$

Die Stoffgrößen  $c$  bzw.  $c_{\text{mol}}$  hängen von der Möglichkeit der Teilchen ab, mechanische Energie zu speichern:

$$W_{FG} = \frac{1}{2} \cdot \frac{R \cdot T}{N_A} \quad (\text{pro Freiheitsgrad}) \quad (8)$$

Feste Körper besitzen *maximal*  $f = 6$  Freiheitsgrade aus den Schwingungsmöglichkeiten der Gitterbausteine um ihre Ruhelagen. Für die innere Energie  $U$  von 1 Mol eines Körpers gilt also:

$$U = W_{FG} \cdot f \cdot N_A \quad (9)$$

Unter Verwendung von Gleichung Gl. (8) folgt daraus:

$$U = \frac{R \cdot T \cdot 6 \cdot N_A}{2 \cdot N_A} = 3 \cdot R \cdot T \quad (10)$$

Für die *maximale* molare Wärme ( und die Stoffmenge  $n = 1$ ) nach der Definition (6) ist somit:

$$c_{\text{mol}} = \frac{\Delta U}{\Delta T} = 3 \cdot R = 24.9 \frac{\text{J}}{\text{mol K}} \quad (11)$$

Dieser (theoretische) Wert ist stoffunabhängig und gilt für alle festen Körper bei hohen Temperaturen. Diese Regel ist auch als *Dulong-Petitsches Gesetz* bekannt:

*Für alle festen Stoffe ist bei ausreichend hoher Temperatur die molare Wärme  $c_{\text{mol}}$  annähernd gleich und beträgt  $24.9 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$*

Durch (7) in (11) folgt:

$$n \cdot c_{\text{mol}} = m \cdot c = n \cdot 24.9 \frac{\text{J}}{\text{mol K}} \quad (12)$$

(A6) Bestimmen Sie über die Gl. (12) die molare Masse  $M = \frac{m}{n}$ .

(A7) Der Zahlenwert der molaren Masse  $M$  entspricht nahezu dem Atomgewicht  $A_u$  in der atomaren Einheit u. Suchen Sie in einem Periodensystem nach Elementen mit einer entsprechenden Atommasse  $A_u$ . Welches Metall haben Sie vermutlich untersucht?

## Literatur

- [1] Demtröder, W. (2012): *Experimentalphysik 1* Springer Verlag
- [2] Bergmann und Schäfer. (2008): *Experimentalphysik Band 1* de Gruyter Verlag