

Versuch 200

## Spezifische Kondensationswärme von Wasserdampf

### Aufgaben

- Bestimmen der spezifischen und molaren Kondensationswärme von Wasser mittels Temperatur-Zeitdiagramms.

### Vorbetrachtung

#### Ermitteln der Wärmekapazität eines Kalorimeters

Da wir Physiker immer wieder von unterschiedlichen Stellen aufgerufen sind, unsere Naturwissenschaft einer breiten Öffentlichkeit zugänglich zu machen und durch anschauliche Darstellungen dafür zu sorgen, dass das weite Verständnis und die gesellschaftliche Akzeptanz der naturwissenschaftlichen Arbeit gefördert wird, möchte ich hier an einem leicht verständlichen Beispiel die Funktionsweise und Bestimmung eines kalorimetrischen Gefäßes erläutern:

①



Was ist ein Kalorimeter? Ein Kalorimeter ist in erster Hinsicht nichts weiter als eine Gefäß, in dem Wärmetauschvorgänge unterschiedlich warmer Flüssigkeiten, Gase und Körper gemessen werden können. Ein einfaches Beispiel aus der Praxis: eine Kaffeetasse.



In diese Tasse, welche von nun an uns als Kalorimeter dienen soll, kann man eine Flüssigkeit einfüllen, und die Tasse nimmt ein Teil der Wärme der Flüssigkeit auf. Die Konsequenz ist, dass sich dabei die Flüssigkeit abkühlt. Man ist daran interessiert, diese Eigenschaften des Kalorimeters möglichst genau zu bestimmen, da mit diesen Werten dann genau die Mischexperimente berechnet werden können.

In dem Fall ist es aber aus experimentellen Gründen einfach nur Wasser mit Raumtemperatur. (Damit vermeiden wir später Wärmeschwankungen in der sog. Vorperiode.)

③



Wir überprüfen die sich einstellende Temperatur. Manchmal gibt es noch leichte Änderungen, da die Temperatur nicht exakt mit der Raumtemperatur übereinstimmt und es noch zur Wärme ab- oder -aufnahme kommt. Man spricht für das kommende Experiment von der Vorperiode (siehe auch: nächste Seite)

④



Man erhitzt gleichzeitig Wasser, so, dass man dann die Temperatur von diesem kennt (z.B. in dem man sie misst oder in dem man das Wasser zum Sieden bringt).

⑤



Dann mischt man die heiße und die dazu relativ „kalte“ Flüssigkeit, in dem man das heiße Wasser- vielleicht ein wenig eleganter als hier abgebildet- in das Kalorimeter leitet. Neben den Temperaturen der einzelnen Wasserportionen benötigen wir nämlich auch deren Massen.

Damit nimmt das Kalorimeter und das Wasser darin die Wärme auf, die das heiße Wasser abgegeben hat. Der Physiker schreibt das so:

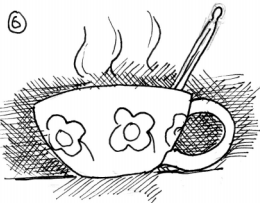
$$Q_{\text{aufnehm}} = (K + m_{\text{Kalt}} \cdot c_{\text{Wasser}}) \cdot (T_{\text{Misch}} - T_{\text{Kalt}})$$

$$Q_{\text{abgeb}} = m_{\text{Heiß}} \cdot c_{\text{Wasser}} \cdot (T_{\text{Heiß}} - T_{\text{Misch}})$$

Am Ende der Matscherei weiß dann der Physiker im Labor, da er wieder die (gemeinsame) Mischtemperatur  $T_{\text{Misch}}$  gemessen hat, dass seine Kalorimetertasse nach seiner „komplizierten und langen“ Rechnung eine Kalorimeterkonstante  $K$  von

$$K = \frac{c_{\text{Wasser}} \cdot [m_{\text{Heiß}} \cdot (T_{\text{Heiß}} - T_{\text{Misch}}) - m_{\text{Kalt}} \cdot (T_{\text{Misch}} - T_{\text{Kalt}})]}{T_{\text{Misch}} - T_{\text{Kalt}}}$$

haben muss- und freut sich darüber. (Jedenfalls so lange, bis er dazu die Fehlerrechnung auszuführen hat...)



Na gut, das war wohl des Guten ein Wenig zu viel. Deshalb gehe ich direkt zu der Problematik des Phasenüberganges und der daraus resultierenden kalorimetrischen Effekte über. Der wissbegierigen Öffentlichkeit empfehle ich ab diesem Punkt die Lektüre populärwissenschaftlicher, bunter Heftchen, falls das folgende ihr zu kompliziert erscheinen sollte.

**Versuchsprotokolle**

**Phasenübergänge**

Ein Stoff liegt immer in einem bestimmaren Aggregatzustand, einer sogenannten Phase, vor. Durch genügend große Druck- oder Temperaturänderung kann man diesen von dem einen in den anderen Zustand überführen. Ausgehend davon, dass jedes Teilchen eine gewisse Eigengeschwindigkeit besitzt (außer bei 0 K, wo keine Geschwindigkeit mehr existieren kann) und von zwischenatomaren Kräften (van der Waals- Kräfte und Polarisationskräfte) bzw. von elektrostatisch- anziehenden Kräften (bei Ionenverbindungen) in ihren Bewegungsfreiheiten eingeschränkt sind, kann man dem Kräftegleichgewicht  $F_{Newton} = mg$  und  $F_{Teilchen}$  den klassischen Aggregatzustand herleiten: fest, flüssig, gasförmig. Damit ein Übergang von einer Phase zur nächsten möglich ist, muss man dem Körper eines Stoffes eine gewisse Wärmemenge zuführen, die zur Überwindung der innerstofflichen Kräfte benötigt wird. Diese führt also zu einer Form, aber keinerlei Temperaturänderung des Körpers. Die gleiche Energie wird beim reversen Prozess wieder frei.

In Anlehnung an die Gleichung für die Wärmeaufnahme folgt die Gleichung:

$$Q_{Phase} = q_{Stoff, Phasenübergang} \cdot m_{Stoff}$$

**Bestimmen der Kondensationswärme von Wasserdampf**

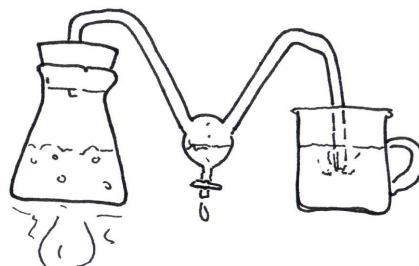


ABB I.1: Aufbau der Apparatur zur Bestimmung der Kondensationswärme von Wasser

Wasser wird zum Sieden gebracht (links) und über einen Kondensatfänger (runde Kugel) gasförmig in ein Kalorimeter eingeleitet. Dabei kondensiert der Dampf zu Wasser und erwärmt das bereits vorhandenen Wasser im Kalorimeter (rechts). Die Energiebilanz sieht folgendermaßen aus:

aufgenommene Wärme

$$Q = Q_{Wasser} + Q_{Kalorimeter} \\ = (m \cdot c_{H_2O} + K) \cdot \Delta T_{kalt \rightarrow misch}$$

abgegebene Wärme

$$Q = -Q_{Kondensat} + Q_{Verdampf} \\ = \Delta m \cdot (c_{H_2O} \cdot -\Delta T_{misch \rightarrow heiß} + q_v)$$

$$(m \cdot c_{H_2O} + K) \cdot \Delta T_{kalt \rightarrow misch} = \Delta m \cdot c_{H_2O} \cdot \Delta T_{heiß \rightarrow misch} + \Delta m \cdot q_v \\ q_v = \frac{(c_{H_2O} \cdot m + K) \cdot (\vartheta_{misch} - \vartheta_{kalt}) + \Delta m \cdot c_{H_2O} \cdot (\vartheta_{misch} - \vartheta_{heiß})}{\Delta m} \\ q_v = \frac{c_{H_2O} \cdot m + K}{\Delta m} \cdot (\vartheta_{misch} - \vartheta_{kalt}) + c_{H_2O} \cdot (\vartheta_{misch} - \vartheta_{heiß})$$

Da der Mischungsvorgang in einer unendlich kurzen Zeit (ohne Wärmeverlust an die Umwelt und mit idealisiert schnellen Mischungsvorgang) angenommen wurde, muss mittels eines Temperatur- Zeit- Diagrammes eine Ausgleichskonstruktion geschaffen werden (siehe ABB II.1 und II.2).

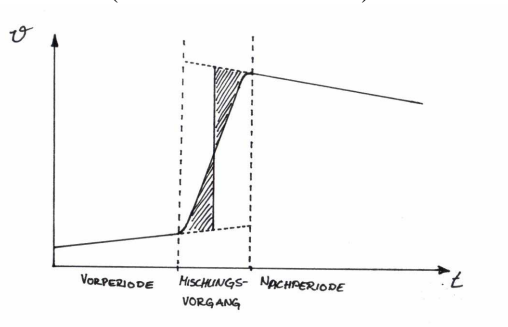


ABB I.2: Schematische Abbildung eines Temperatur- Zeit- Diagramms. Die beiden schraffierten Flächen müssen gleich groß sein.

## Versuchsprotokolle

Eine anderes Problem ist, dass bereits kondensiertes Wasser in das Gefäß gelangt. Dies wäre durch eine konstruktive (ABB I.3) oder eine rechnerische Lösung, in dem man die Menge des Kondenswassers experimentell bestimmt, als linear annimmt und in die Rechnung oben einbezieht, möglich.

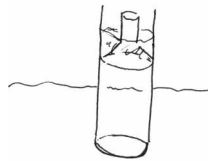


ABB I.3: Eine Möglichkeit, Kondenswasser aus dem System auszuschließen, in dem man das Kondensat von den Gefäßwänden abfängt.

### Durchführung

#### Versuchsobjekt:

Erhitzerapparat mit Wasserdampf ( $\theta_{\text{heiß}}$ ), Kalorimeter mit kaltem, destillierten Wasser ( $\theta_{\text{kalt}}$ ), Termometer, Waage

#### mögliche systematische Fehler:

1. Es ist eine kontinuierliche Wärmeabgabe die umgebende Luft bzw. den Raum zu verzeichnen, selbst während des Mischungsprozesses und den Transport der Massen durch die Luft.
2. Kondensatwasser gelangt in geringen Mengen in das Kalorimeter und verfälscht die Messung nach unten.
3. Bei hohen Temperaturen treten verstärkt Oberflächenverdunstungen auf..

#### Versuchsablauf:

- Bestimmung der Kalorimeterkonstante
- Bestimmung der Kondensationswärme

#### Fehlerquellen:

$$\vartheta_{\text{Heiß}}, \vartheta_{\text{Misch}}, \vartheta_{\text{Kalt}}, m_{\text{H}_2\text{O}}, c_{\text{H}_2\text{O}}, K$$

### Messwerte

$$p_L = 759 \text{ thor}$$

#### Bestimmung des Kalorimeters

$$m_{\text{kalt}} = 207 \text{ g}$$

$$m_{\text{heiß}} = 187,7 \text{ g}$$

t in sek	0	60	120	180	240	300	330	360	390	420	480	540	600
T in °C	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2	50,2	53,8	53,6	53,5	53,4	53,2	53,1	53,1

#### Bestimmung der Siedewärme

$$m = 339,3 \text{ g}$$

$$m_{\text{kond}} = 40,5 \text{ g}$$

t in sek	0	60	120	150	180	210	240	270	300	330	360	390	420
T in °C	21,6	21,6	21,6	22	24	29	33,8	38,8	39,6	44,4	44,2	54,2	59

t in sek	450	480	510	540	570	600	630	660	690	720	750	780	810
T in °C	60,2	61,4	64,2	68,6	72,2	74,4	77,2	80,6	81,2	87,8	88,8	90,4	92

t in sek	840	870	900	930	990	1020	1080	1140	1200	1260	1320	1380	1440
T in °C	91,6	91	90,6	90	89,8	89	88,8	88	87,2	86,2	85,6	84,6	83,8

t in sek	1500	1560	1620	1680	1740	1800	1860	1920	2100
T in °C	83,2	82,6	81,8	81,4	80,8	80,2	79,6	79	77,6

## Versuchsprotokolle

### Auswertung

#### Stoffspezifische Konstanten & Werte

$$M_{H_2O} = 18 \frac{g}{mol}$$

$$c_{H_2O} = 4,18 \pm 0,05 \frac{J}{g \cdot K}$$

$$\vartheta_{Hei\beta} = \vartheta_{Siede} = \vartheta_{(Luftdruck)} = 99,78 \pm 0,2^\circ C$$

$$\Delta m = 0,1 g$$

$$\Delta \vartheta = 0,5^\circ C$$

#### Berechnung Kalorimeter

Temperaturwerte aus ABB. II.1.

$$K = c_{H_2O} \cdot \left( m_{Hei\beta} \frac{\vartheta_{Hei\beta} - \vartheta_{Misch}}{\vartheta_{Misch} - \vartheta_{Kalt}} - m_{Kalt} \right)$$

$$K = 4,18 \frac{J}{g \cdot K} \cdot \left( 186,7 g \cdot \frac{99,78^\circ C - 54,3^\circ C}{54,3^\circ C - 20,2^\circ C} - 207 g \right) = 175,5 \frac{J}{K}$$

$$\Delta K = \Delta c_{H_2O} \cdot \left( m_{Hei\beta} \frac{\vartheta_{Hei\beta} - \vartheta_{Misch}}{\vartheta_{Misch} - \vartheta_{Kalt}} - m_{Kalt} \right) + \Delta m \cdot c_{H_2O} \cdot \left( \frac{\vartheta_{Hei\beta} - \vartheta_{Misch}}{\vartheta_{Misch} - \vartheta_{Kalt}} - 1 \right)$$

$$+ m_{Hei\beta} \cdot c_{H_2O} \cdot \Delta \vartheta \cdot \frac{2(\vartheta_{Hei\beta} - \vartheta_{Kalt})}{(\vartheta_{Misch} - \vartheta_{Kalt})^2}$$

$$\Delta K = 0,05 \frac{J}{g \cdot K} \cdot \left( 186,7 g \frac{99,78^\circ C - 54,3^\circ C}{54,3^\circ C - 20,2^\circ C} - 207 g \right)$$

$$+ 0,1 g \cdot 4,18 \frac{J}{g \cdot K} \cdot \left( \frac{\vartheta_{Hei\beta} - \vartheta_{Misch}}{\vartheta_{Misch} - \vartheta_{Kalt}} - 1 \right)$$

$$+ 186,7 g \cdot 4,18 \frac{J}{g \cdot K} \cdot 0,5^\circ C \cdot \frac{2(99,78^\circ C - 20,2^\circ C)}{(54,3^\circ C - 20,2^\circ C)^2}$$

$$= 28,9 \frac{J}{K}$$

#### Berechnung spezifische Verdampfungswärme

Temperaturwerte aus ABB. II.2.

$$q_v = \frac{c_{H_2O} \cdot m + K}{m_{kond}} \cdot (\vartheta_{misch} - \vartheta_{kalt}) + c_{H_2O} \cdot (\vartheta_{misch} - \vartheta_{hei\beta})$$

$$q_v = \frac{4,18 \frac{J}{g \cdot K} \cdot 339,3 g + 175,5 \frac{J}{K}}{40,5 g} \cdot (95,8^\circ C - 99,78^\circ C) + 4,18 \frac{J}{g \cdot K} \cdot (95,8^\circ C - 99,78^\circ C)$$

$$= 2203,3 \frac{J}{g}$$

---

**Versuchsprotokolle**


---

$$\begin{aligned}
 \Delta q_v &= \Delta c_{H_2O} \left[ \frac{m}{m_{kond}} \cdot (\vartheta_{misch} - \vartheta_{kalt}) + (\vartheta_{misch} - \vartheta_{heiß}) \right] \\
 &+ \Delta m \cdot \left( \frac{1}{m_{kond}} + \frac{m}{m_{kond}^2} \right) \cdot c_{H_2O} \cdot (\vartheta_{misch} - \vartheta_{kalt}) \\
 &+ \Delta K \frac{1}{m_{kond}} \cdot (\vartheta_{misch} - \vartheta_{kalt}) \\
 &+ 2 \cdot \Delta \vartheta \cdot \left( \frac{c_{H_2O} \cdot m + K}{\Delta m} + c_{H_2O} \right) \\
 \Delta q_v &= 0,05 \frac{J}{g \cdot K} \left[ \frac{339,3g}{40,5g} \cdot (95,8^\circ C - 21,6^\circ C) + (95,8^\circ C - 99,78^\circ C) \right] \\
 &+ 0,1g \cdot \left( \frac{1}{40,5g} + \frac{339,3g}{(40,5g)^2} \right) \cdot 4,18 \frac{J}{g \cdot K} \cdot (95,8^\circ C - 21,6^\circ C) \\
 &+ 28,9 \frac{J}{K} \cdot \frac{1}{40,5g} \cdot (95,8^\circ C - 99,78^\circ C) \\
 &+ 2 \cdot 0,5^\circ C \cdot \left( \frac{4,18 \frac{J}{g \cdot K} \cdot 339,3g + 175,5 \frac{J}{K}}{40,5g} + 4,18 \frac{J}{g \cdot K} \right) \\
 &= 91,0 \frac{J}{g}
 \end{aligned}$$

Berechnung molare Verdampfungswärme

$$\begin{aligned}
 q_{v,Mol} &= 18 \frac{g}{mol} \cdot 2203,3 \frac{J}{g} = 39659,4 \frac{J}{mol} \\
 \Delta q_{v,Mol} &= 18 \frac{J}{mol} \cdot 91,0 \frac{J}{mol} = 1638,0 \frac{J}{mol}
 \end{aligned}$$

## Versuchsprotokolle

### Ergebnisse

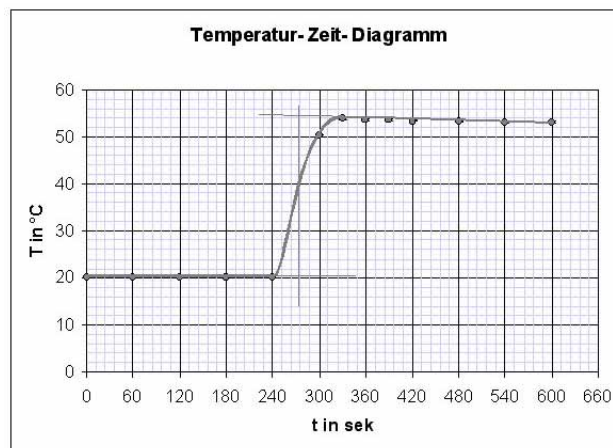


ABB. II.1: Temperaturkurve und Ausgleichskonstruktion für die Bestimmung des Kalorimeters.

$$K = 175,5 \pm 28,9 \frac{J}{K}$$

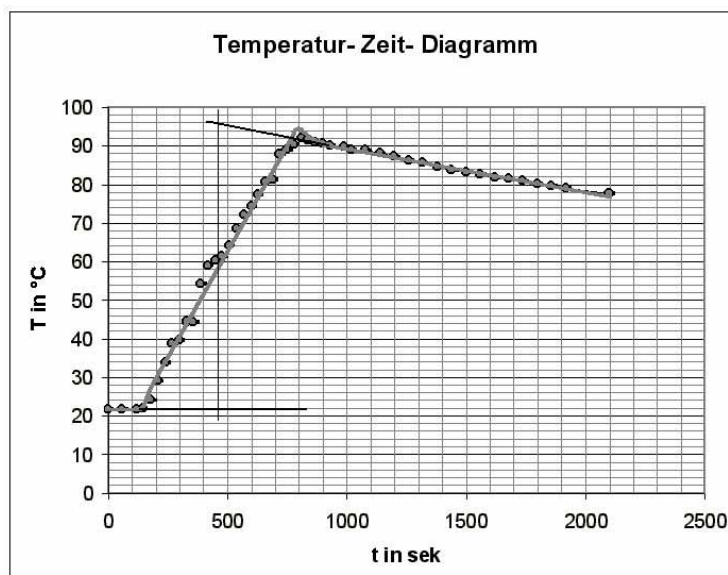


ABB. II.2: Temperaturkurve und Ausgleichskonstruktion für die Bestimmung der Verdampfungswärme.

$$q_V = 2203,3 \pm 91,0 \frac{J}{K}$$

$$q_{V, Mol} = 29659,4 \pm 1638,0 \frac{J}{mol}$$

### Diskussion

Der Versuch wies etliche Schwierigkeiten auf, auf welche ich im Folgenden eingehen werde. Zuerst das Phänomen des Kondensatwassers: Eine Nachmessung ergab, dass sich ca. 15 g Wasser während der Mischphase gebildet hat, welches das Ergebnis sichtbar nach unten verfälscht. Andererseits waren bei der Dampfeinleitung bzw. Charakterisierung des Kalorimeters große Temperaturschwankungen unumgänglich. Auf Grund dieser ist ein Temperaturintervall von einem halben Grad Celsius als Größtfehlerabschätzung durchaus gerechtfertigt.

Dennoch liefert ein Vergleich mit dem Tabellenwert Tabellenwert: 2260 J/K und den Nachweis, dass der Versuch erfolgreich verlaufen sein muss, da dieser Wert locker innerhalb der Größtfehlerabschätzung liegt. Die Ergebnisse sind hervorragend.

Abgezeichnete Messwerte sind im Anhang zu finden.

Jena, 20.01.02