



ulm university universität
uulm

Versuch XII

Latente Wärme

Oliver Heinrich

oliver.heinrich@uni-ulm.de

Bernd Kugler

berndkugler@web.de

24.11.2006

1. Abgabe: 13.12.2006

Betreuer: Dominik Schmid-Lorch

Inhaltsverzeichnis

1	Theoretische Grundlagen	3
1.1	Die Hauptsätze der Thermodynamik	3
1.1.1	Der 0. Hauptsatz	3
1.1.2	Der 1. Hauptsatz	3
1.1.3	Der 2. Hauptsatz	3
1.1.4	Der 3. Hauptsatz	4
1.2	Phase - Aggregatzustand	4
1.3	Das Phasendiagramm	4
1.3.1	Zustandsgrößen	6
1.4	Die Zustandsgleichungen	7
1.4.1	Zustandsgleichung für das ideale Gas	7
1.4.2	Zustandsgleichung für das reale Gas	7
1.5	Die Gibbssche Phasenregel	8
1.6	Die thermodynamischen Potentiale	8
1.7	Die Clausius-Clapeyron-Gleichung	9
1.8	Der Wasserwert	9
1.9	Mischkalorimetrie	9
2	Versuchsbeschreibung	9
2.1	Wärmekapazität des Kalorimeters	9
2.2	Spezifische Schmelzwärme von Eis	10
2.3	Spezifische Verdampfungswärme von Wasser mit der Kondensationsmethode	10
2.4	Spezifische Verdampfungswärme von Wasser mit der Verdampfungsmethode	11
3	Versuchsauswertung	12
3.1	Wärmekapazität des Kalorimeters	12
3.2	Spezifische Schmelzwärme von Eis	14
3.3	Spezifische Verdampfungswärme von Wasser mit der Kondensationsmethode	16
3.4	Spezifische Verdampfungswärme von Wasser mit der Verdampfungsmethode	17
3.5	Änderungen der Zustandsfunktion	19
3.5.1	Schmelzmethode	19
3.5.2	Kondensationsmethode	19
3.5.3	Verdampfungsmethode	19
4	Fehlerdiskussion	19
4.1	Wasserwertbestimmung	19
4.2	Schmelzwärmebestimmung	20
4.3	Kondensationsmethode	20
4.4	Verdampfungsmethode	20
5	Literaturverzeichnis	21

1 Theoretische Grundlagen

1.1 Die Hauptsätze der Thermodynamik

1.1.1 Der 0. Hauptsatz

Befinden sich zwei Körper im thermischen Gleichgewicht zu einem dritten, so stehen sie auch untereinander im thermischen Gleichgewicht.

1.1.2 Der 1. Hauptsatz

Der erste Hauptsatz ist ein Energieerhaltungssatz und lautet:

$$dU = \delta Q + \delta W$$

In Worten: Die Summe der einem System von außen zugeführten Wärme und der zugeführten Arbeit ist gleich der Zunahme seiner inneren Energie.

Die innere Energie kann auch so angegeben werden:

$$U = \frac{1}{2} \cdot \nu \cdot f \cdot R \cdot T$$
$$\nu = \frac{N}{N_A}$$

Aus dem ersten Hauptsatz folgt die Unmöglichkeit, ein *Perpetuum Mobile erster Art*, also eine Maschine, die mehr Energie abgibt, als ihr zugeführt wird, zu bauen.

Bei idealen Gasen gilt für die Arbeit, die gegen den Druck p eine Expansion um dV leistet:

$$dW = -p \cdot dV$$

Somit gilt für den **ersten Hauptsatz idealer Gase**:

$$dU = \delta Q - p \cdot dV$$

Die Größe Q ist keine Zustandsgröße, weil sich der Zustand eines Systems nicht durch Q eindeutig definieren lässt, da sich sowohl U als auch V ändern können. Das bedeutet, dass δQ kein totales Differential ist ($dQ \neq \delta Q$).

1.1.3 Der 2. Hauptsatz

Der **zweite Hauptsatz der Thermodynamik** besagt, dass es eine extensive Zustandsgröße *Entropie* S gibt, die in einem abgeschlossenen System niemals abnimmt. Die Entropie ist ein Maß für die Realisierungstendenz eines Zustands. Der 2. Hauptsatz lautet also: Bei in einem (isolierten) System von selbst ablaufenden Vorgang kann das System nur in solche Zustände übergehen, deren Entropie größer ist, als die des vorherigen Zustands. Es gilt in einem abgeschlossenen System:

$$dS \geq 0$$

Der 2. Hauptsatz schließt die Möglichkeit eines *Perpetuum Mobile zweiter Art*, also eine Maschine, die die Umgebungswärme mittels lokaler Abkühlung vollständig in mechanische Arbeit umwandelt, aus.

1.1.4 Der 3. Hauptsatz

Der **dritte Hauptsatz der Thermodynamik** besagt, dass es unmöglich ist, den absoluten Nullpunkt ($T = 0K$) zu erreichen. Es gilt:

$$\lim_{T \rightarrow 0} S = S_0$$

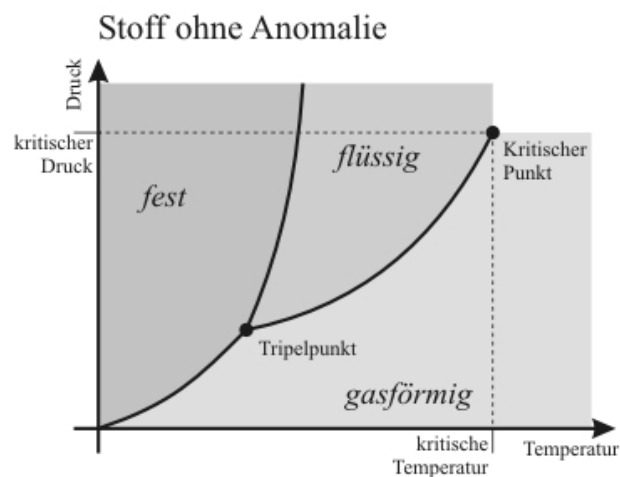
Das heißt also, dass die Entropie S für die gegen $0K$ gehende Temperatur einen festen Wert S_0 annimmt.

1.2 Phase - Aggregatzustand

Unter der *Phase* versteht man den Bereich homogener physikalischer und chemischer Eigenschaften, wie Dichte oder elektrischer Leitfähigkeit. Als Beispiel für ein Element, das in unterschiedlichen Phasen vorkommen kann, ist der Kohlenstoff. Er kann entweder weiches Graphit oder extrem harter Diamant sein. Jedoch sind auch die *Aggregatzustände* Phasen. Als Aggregatzustände bezeichnet man unterschiedliche, temperatur- und druckabhängige Zustände von Stoffen. Die Zustände sind fest, flüssig oder gasförmig.

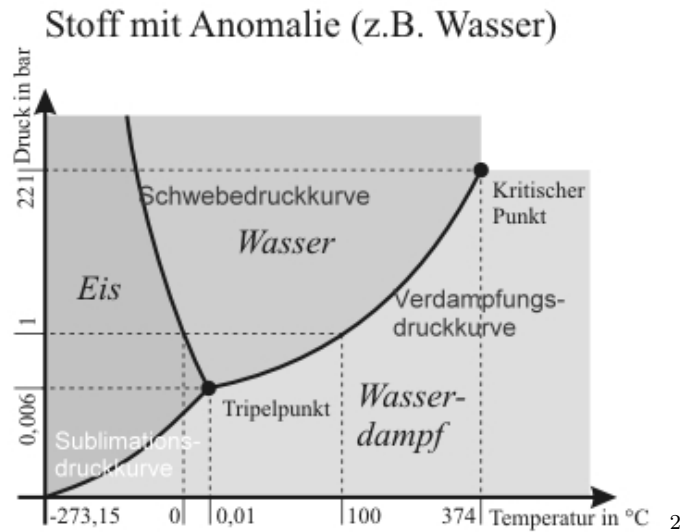
1.3 Das Phasendiagramm

Das *Zustandsdiagramm* zeigt die Gleichgewichtskurven verschiedener Zustandsänderungen. Beschrieben wird es durch die Clausius-Clapeyron-Gleichung. Es sieht folgendermaßen aus:



1

¹<http://de.wikipedia.org/wiki/Phasendiagramm>



Besondere Punkte im Diagramm sind:

- der **Tripelpunkt** (auch *Dreiphasenpunkt*) ist der Punkt, an dem alle drei Phasen einer Komponente gleichzeitig vorkommen, also im Gleichgewicht sind.
- der **Kritische Punkt** ist ein thermodynamischer Zustand, oberhalb dieses keine Verflüssigung des Stoffes mehr möglich ist.

1.3.1 Zustandsgrößen

Der Zustand eines Systems beschreibt die Gesamtheit seiner Eigenschaften, die durch die äußeren Bedingungen festgelegt sind. Es ist vollständig bestimmt durch seine chemische Zusammensetzung, den Druck p , das Volumen V und die Temperatur T . Sind diese Größen zeitlich konstant, so ist das System im *Gleichgewichtszustand* und es heißt *stationär*. Man unterscheidet folgende zwei Arten von Zustandsgrößen:

- **extensive**: mengenabhängig, z.B.: Stoffmenge n , Volumen V und Entropie S
- **intensive**: mengenunabhängig, z.B.: Druck p und Temperatur T

Die Zustandsgrößen werden durch die Zustandsgleichungen verknüpft.

1.4 Die Zustandsgleichungen

Zustandsgleichungen sind der funktionale Zusammenhang zwischen den thermodynamischen Zustandsgrößen. Durch sie lässt sich der Zustand eines thermodynamischen Systems beschreiben.

²<http://de.wikipedia.org/wiki/Phasendiagramm>

1.4.1 Zustandsgleichung für das ideale Gas

Das ideale Gas besteht aus Massepunkten (kein Eigenvolumen), die aufeinander keine Wechselwirkung haben. Die Zustandsgleichung für das ideale Gas lautet:

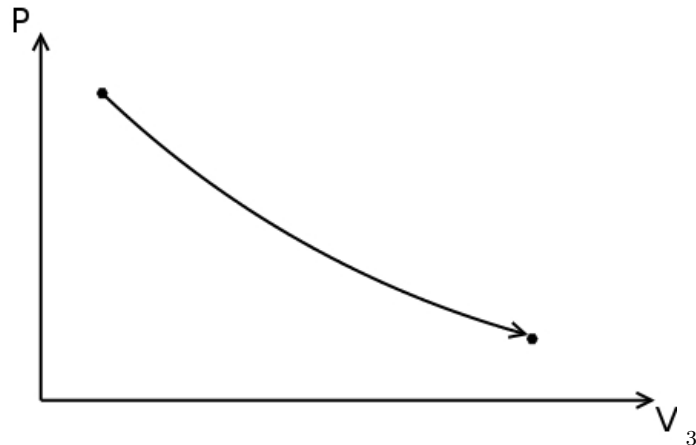
$$p \cdot V = \nu \cdot R \cdot T$$

N : Anzahl der Moleküle

N_A : Avogadrokonstante $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

R : allgemeine Gaskonstante $R = 8,31 \frac{\text{J}}{\text{K} \cdot \text{mol}}$

$\nu = \frac{N}{N_A}$ Das V-p-Diagramm für ideale Gas bei konstanter Temperatur (isotherm) sieht so aus:



1.4.2 Zustandsgleichung für das reale Gas

Die Moleküle des realen Gases besitzen ein Eigenvolumen und haben Anziehungskräfte aufeinander. Die **van-der-Waals-Gleichung** für $n = 1$ lautet:

$$\left(p + \frac{a}{V^2}\right) \cdot (V - b) = R \cdot T$$

Hierbei wurde die Zustandsgleichung für ideale Gase um zwei Korrekturterme erweitert.

b ist das Vierfache der Eigenvolumina der N_A Teilchen

a ist eine Konstante, die von der Art und Stärke der anziehenden Wechselwirkung zwischen den Atomen bzw. Molekülen des realen Gases abhängt

1.5 Die Gibbsche Phasenregel

Die *Gibbsche Phasenregel* für Fluide, also Flüssigkeiten und Gase, lautet:

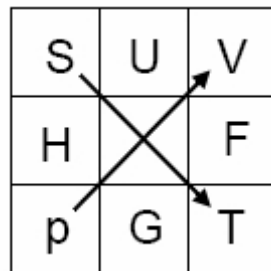
$$f = K + 2 - P$$

³<http://de.wikipedia.org/wiki/Isotherme>

f: Anzahl der Freiheitsgrade (= Anzahl der voneinander unabhängigen Zustandsgrößen)
 K: Anzahl der Komponenten im System
 P: Anzahl der Phasen (z.B. Aggregatzustände)
 Im Tripelpunkt z.B. hat ein System bestehend aus einer Komponente keinen Freiheitsgrad ($P = 3, K = 1, f = 0$).

1.6 Die thermodynamischen Potentiale

Der Zustand eines Systems lässt sich durch verschiedene, gleichwertige thermodynamische Potentiale beschreiben, die sich in den Zustandsgrößen unterscheiden von denen sie abhängen. Diese Zusammenhänge lassen sich aus dem Guggenheimer Quadrat entnehmen:



Mittig befinden sich die Potentiale umgeben von den Variablen, von denen sie abhängen. Also gilt:

- *Innere Energie* $U = U(S, V)$
- *Freie Energie* $F = F(T, V)$
- *Enthalpie* $H = H(S, p)$
- *Gibbs freie Enthalpie* $G = G(T, p)$

Aus dem Guggenheimer Quadrat lassen sich nun die Zustandsgleichungen bestimmen:

$$dU = TdS - pdV$$

$$dF = -pdV - SdT$$

$$dG = Vdp - SdT$$

$$dH = Vdp + TdS$$

1.7 Die Clausius-Clapeyron-Gleichung

Will man ein mol oder ein kg feste in flüssige Substanz bei der gleichen Temperatur überführen, ist eine bestimmte „latente“ Wärmemenge notwendig. Diese nennt man die (spezifische) Schmelzwärme λ . Sie muss beim Schmelzen dem System zugeführt und beim Gefrieren wieder entzogen werden. Sie wird verbraucht, um die potentielle Energie der Teilchen zu erhöhen, also um die Bindungen zwischen ihnen zu lösen. Die Abhängigkeit der Kurvensteigung von der Schmelztemperatur und dem Druck wird durch die Clausius-Clapeyron-Gleichung beschrieben:

$$\frac{dp}{dT} = \frac{\lambda}{T \cdot (V_{fluessig} - V_{fest})}$$

Und für den Übergang von flüssig zu gasförmig:

$$\frac{dp}{dT} = \frac{\lambda}{T \cdot (V_{gasfoermig} - V_{fluessig})}$$

1.8 Der Wasserwert

Der *Wasserwert* Γ ist definiert als die Wärmekapazität des Kalorimeters, also die Wärmemenge ΔQ , die zur Erhöhung der Temperatur ΔT , nötig ist.

$$\Gamma = \frac{\Delta Q}{\Delta T}$$

Der Wasserwert lässt sich mittels der Methode der Mischkalorimetrie bestimmen.

1.9 Mischkalorimetrie

Zur genauen Bestimmung des Wasserwerts nutzt man ein *Dewargefäß*. Dieses ist evakuiert (gegen Konvektion), verspiegelt (gegen Wärmestrahlung) und doppelwandig (gegen Wärmeleitung). Bei der Mischkalorimetrie gibt man einen Körper der Masse m_K und Temperatur T_K in das Wasser der Masse m_W und Temperatur T_W im Dewargefäß. Nun wartet man auf die Einstellung der Mischtemperatur T_M . Es gilt die Energieerhaltung:

$$Q_{auf} = Q_{ab}$$

$$c_K \cdot m_K \cdot T_K + c_W \cdot m_W \cdot T_W = c_K \cdot m_K \cdot T_M + c_W \cdot m_W \cdot T_M$$

Beim Schmelzen bzw. Verdampfen muss die Schmelz- bzw. Verdampfungswärme mit einbezogen werden.

2 Versuchsbeschreibung

2.1 Wärmekapazität des Kalorimeters

Zur Bestimmung des Wasserwerts verwenden wir die *Ausschüttmethode*. Dazu befüllen wir das Kalorimeter maximal mit heißem Wasser der Temperatur und warten, bis ab,

bis sich ein Gleichgewicht der Temperatur T_H eingestellt hat. Danach schütten wir das Wasser aus, und befüllen es mit kaltem Wasser der Temperatur T_K . Nun warten wir wieder, bis sich die die Mischtemperatur T_M eingestellt hat. Die Auswerteformel (3) ergibt sich durch Gleichsetzen von (1) und (2):

$$\Delta Q = \Gamma_K \cdot (T_H - T_M) \quad (1)$$

$$\Delta Q = c_W \cdot m_W \cdot (T_M - T_K) \quad (2)$$

$$\Gamma_K(m) = \frac{c_W \cdot m_W \cdot (T_M - T_K)}{T_H - T_M} \quad (3)$$

Da die Wärmekapazität des Kalorimeters abhängig von der Füllhöhe ist, wird die Messung bei vier Füllhöhen durchgeführt (bei 1/4, 2/4, 3/4 & 4/4).

2.2 Spezifische Schmelzwärme von Eis

Um die spezifische Schmelzwärme von Eis zu bestimmen, füllt man das Kalorimeter zu 3/4 mit lauwarmem Wasser (ca. 25 °C). Nun misst man fünf Minuten lang alle 30 Sekunden die Temperatur des Wassers. Es stellt sich eine Mischtemperatur ein. Daraufhin gibt man Eiswürfel in das Wasser und misst bis das Eis geschmolzen ist alle 30 Sekunden die Temperatur. Danach messen wir wieder alle 30 Sekunden fünf Minuten lang die Temperatur des Gemischs. Zusätzlich benötigt man die Gesamtmasse vor der Zugabe von Eis und die nach der Zugabe, zur Bestimmung der Masse des zugegebenen Eises.

Es gilt:

$$\Delta Q_{auf} = m_{Eis} \cdot c_{Wasser} \cdot (T_M - T_{Eis}) + \lambda_{Schmelz} \cdot m_{Eis}$$

$$\Delta Q_{ab} = (m_{wasser} \cdot c_{Wasser} + \Gamma_0)(T_W - T_M)$$

$$\lambda_{Dampf} = \frac{(c_{Wasser} \cdot m_{Wasser} + \Gamma_0) \cdot (T_{Wasser} - T_{Misch})}{m_{Eis}} - c_W \cdot (T_M - T_{Eis}) \quad (4)$$

2.3 Spezifische Verdampfungswärme von Wasser mit der Kondensationsmethode

Um die spezifische Verdampfungswärme mit der *Kondensationsmethode* zu ermitteln bringt man Wasser in einem großen Dewargefäß zum Sieden und leitet den entstehenden Dampf über isolierte Leitungen in ein Dewargefäß mit kaltem Wasser weiter. Gemessen wird die (ansteigende) Mischtemperatur alle 30 Sekunden fünf Minuten lang. Zusätzlich muss die Masse und Temperatur des kalten Wassers und die Masse des Wassers nach Bedampfung gemessen werden. Für die Temperatur des Dampfes nehmen wir die Siedetemperatur des Wassers an. Der Versuch wurde bei einer Stromstärke von 1,5 A und 1,7 A durchgeführt. Es gilt:

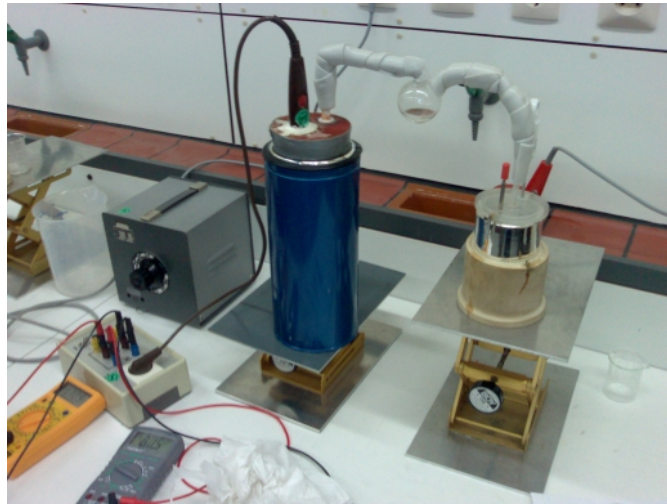
$$\Delta Q_{ab} = m_{Kondensat} \cdot c_{Wasser} \cdot (T_{Siede} - T_{Misch}) + \lambda_{Dampf} \cdot m_{Kondensat} \quad (5)$$

$$\Delta Q_{auf} = (m_{wasser} \cdot c_{Wasser} + \Gamma_0)(T_M - T_W) \quad (6)$$

Mit der Energieerhaltung ((4) = (5)):

$$\lambda_{Dampf} = \frac{(m_{Wasser} \cdot c_{Wasser} + \Gamma_0) \cdot (T_{Misch} - T_{Wasser})}{m_{Kondensat}} - c_{Wasser}(T_{Siede} - T_{Misch}) \quad (7)$$

Der Versuchsaufbau:



2.4 Spezifische Verdampfungswärme von Wasser mit der Verdampfungsmethode

Um die spezifische Verdampfungswärme mit der *Verdampfungsmethode* zu ermitteln, erhitzen wir wieder Wasser in einem großen Dewargefäß. Diesmal wird der Wasserdampf durch ein Kühlschwein in ein Becherglas geleitet. Das Kühlschwein kühlt den Dampf ab, indem kaltes Wasser den Dampf umgebend durch Glas von ihm getrennt im Gegenstromprinzip dem heißen Dampf entgegenfließt. Gemessen wird die Wassermenge, die in fünf Minuten bei bestimmter Leistung P verdampft. Deshalb ist es zusätzlich nötig alle 30 Sekunden die Stromstärke I und die Spannung U zu messen. Die dem Wasser zugeführte elektrische Leistung entspricht der vom Wasser aufgenommenen Wärmemenge. Es gilt:

$$\lambda_{Dampf} = \frac{P}{m_{Kondensat}} = \frac{U \cdot I \cdot \Delta t}{m_{Kondensat}}$$

Diese Messung wurde bei 1,5 A und 1,7 A durchgeführt.

Der Versuchsaufbau:



3 Versuchsauswertung

Alle Literaturwerte stammen aus dem Stöcker.

3.1 Wärmekapazität des Kalorimeters

Es gelten die folgenden Bezeichnungen:

- m : Masse des Wassers im Kalorimeter in kg
- T_H : Temperatur des heißen Wassers in K
- T_M : Mischtemperatur in K
- c : Wärmekapazität des Wassers in $\frac{J}{K \cdot kg}$

Wollen wir den Wasserwert des Kalorimeters bestimmen, nutzen wir die Auswerteformel (3).

$$\Gamma_K(m) = \frac{c_W \cdot m_W \cdot (T_M - T_K)}{T_H - T_M}$$

Der Größtfehler berechnet sich wie folgt:

$$\Delta\Gamma = \left| \frac{c_W \cdot (T_M - T_K)}{T_H - T_M} \cdot \Delta m \right| + \left| \frac{m \cdot c \cdot (T_H - T_K)}{(T_H - T_M)^2} \cdot \Delta T_M \right| + \left| \frac{-c \cdot m}{T_H - T_M} \cdot \Delta T_K \right| + \left| \frac{c \cdot m (T_M - T_K)}{(T_H - T_M)^2} \cdot \Delta T_W \right|$$

Als Fehler wurden angenommen:

- $\Delta T_W = \Delta T_M = \Delta T_K = 0,1 \text{ °C} = 0,1 \text{ K}$; bedingt durch das Digitalthermometer
- $\Delta m = 0,1 \text{ g} = 0,0001 \text{ kg}$; bedingt durch die Waage

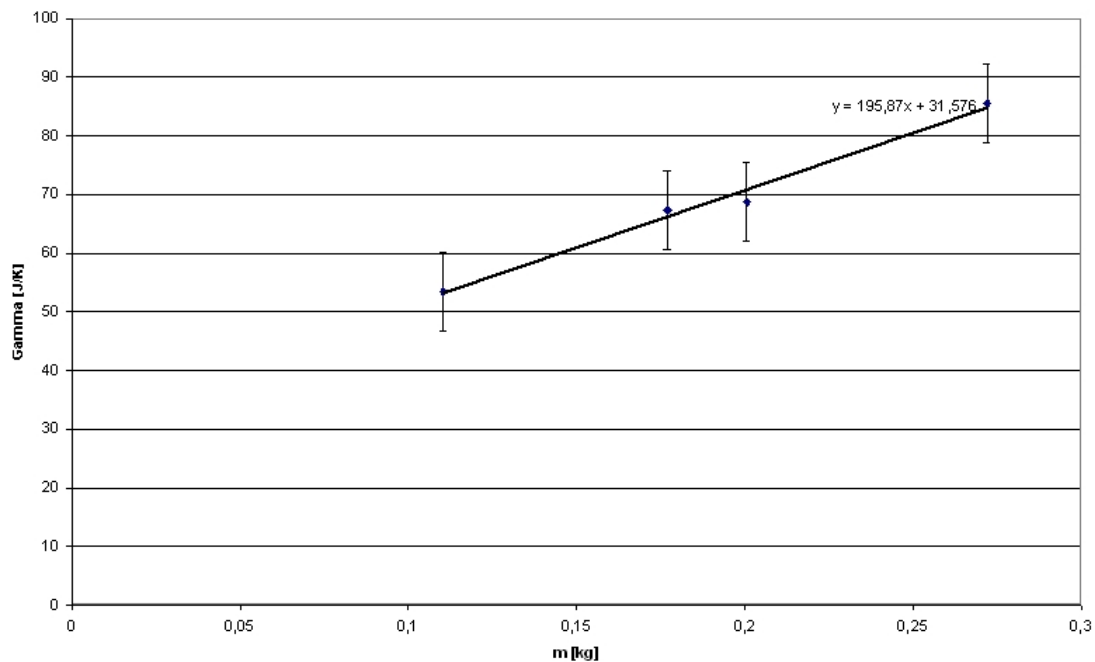
Alle Temperaturmessungen wurden mit einem Digitalthermometer durchgeführt. Dieses hat einen additiven systematischen Fehler, den so genannten *Offset*. Dieser wurde mittels einem Alkoholthermometer bestimmt. Er beträgt $+ 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$. Bei den hier aufgeführten Werten wurde der Offset bereits berücksichtigt.

Für die Wärmekapazität von Wasser entnehmen wir dem Stöcker folgenden Wert:

$$c = 4187 \frac{\text{J}}{\text{K} \cdot \text{kg}}$$

Füllhöhe in $\frac{1}{4}$	T_H	T_H in K	T_M	T_M in K	T_K in K	m in kg	c in $\frac{\text{J}}{\text{K} \cdot \text{kg}}$
1	67,9	340,9	24,0	297,0	293,7	0,2717	4187
2	61,7	334,7	23,8	296,8	293,7	0,2006	4187
3	47,1	320,1	22,9	295,9	293,7	0,1770	4187
4	58,3	331,3	24,6	297,6	293,7	0,1104	4187

Γ	85,5778927	J/K	$\Delta\Gamma$	5,60788949	J/K
	68,6999425	J/K		4,82903426	J/K
	67,3726364	J/K		6,71964741	J/K
	53,4942053	J/K		3,10922051	J/K



Die Geradengleichung der Regressionsgerade lautet:

$$\Gamma(m) = \Gamma_0 + \gamma \cdot m = 195,87 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot m + 31,576 \frac{\text{J}}{\text{K}} \quad (8)$$

Der Fehler für den y-Achsenabschnitt beträgt 3,13, der für die Steigung 15,75.

3.2 Spezifische Schmelzwärme von Eis

Bezeichnungen:

- T_M : Mischtemperatur, die sich nach Zugabe des Eises und einer gewissen Zeit einstellt
- T_W : Wassertemperatur vor der Zugabe des Eises
- c_W : Wärmekapazität des Wassers
- m_{Eis} : Masse des zugegebenen Eises

Folgende Fehler wurden gemacht:

- $\Delta T_W = \Delta T_M = 0,1$ K
- $\Delta m = 0,0001$ kg

Folgende Angaben wurden ermittelt:

Bei der ersten Durchführung:

- $m_{ohneEis}$: 0,7731 kg
- m_{mitEis} : 0,8003 kg
- $m_{Kalorimeter}$: 0,5347 kg

Bei der zweiten Durchführung:

- $m_{ohneEis}$: 0,7624 kg
- m_{mitEis} : 0,7953 kg
- $m_{Kalorimeter}$: 0,5347 kg

Um T_W und T_M zu erhalten, werden Rekursionsgeraden in das Schaubild gelegt. Nun wird eine zur y-Achse parallele Gerade so in den Graphen gelegt, dass die beiden eingeschlossenen Flächen gleich groß sind. Der Schnittpunkt stellt T_W , der zweite T_M dar (siehe Schaubild weiter unten). Die Auswerteformel lautet:

$$\lambda_{Schmelz} = \frac{(c_W \cdot m_W + \Gamma(m)) \cdot (T_W - T_M)}{m_{Eis}} - c_W \cdot (T_M - T_{Eis})$$

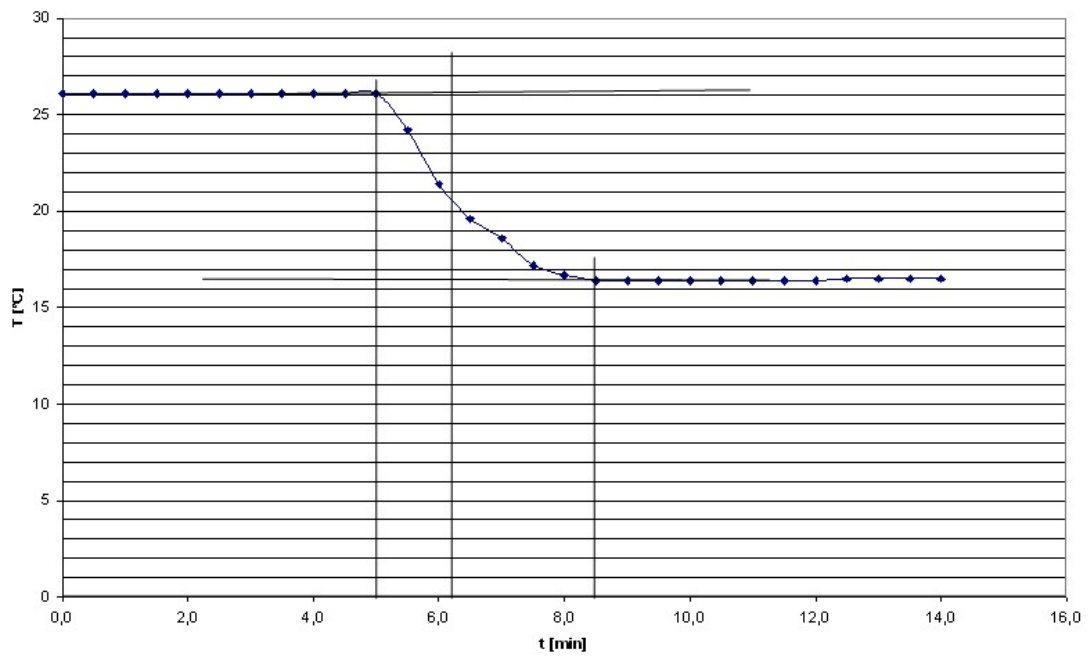
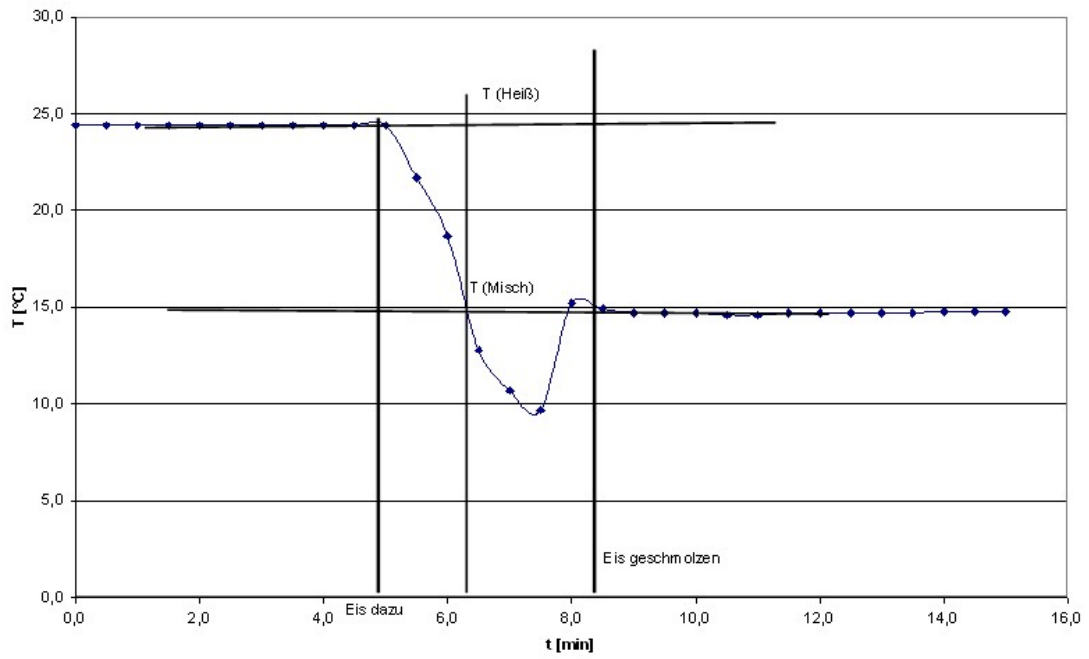
Der Fehler berechnet sich so:

$$\Delta \lambda_{Schmelz} = \left| \frac{c_W \cdot (T_W - T_M)}{m_{Eis}} \cdot \Delta m_W \right| + \left| \frac{T_W - T_M}{m_{Eis}} \cdot \Delta \Gamma(m) \right| + \quad (9)$$

$$\left| \frac{(c_W \cdot m_W + \Gamma(m)) \cdot (T_W - T_M)}{m_{Eis}^2} \cdot \Delta m_{Eis} \right| + \quad (10)$$

$$\left| \frac{c_W \cdot m_W + \Gamma(m)}{m_{Eis}} \cdot \Delta T_W \right| + \quad (11)$$

$$\left| \left(\frac{c_W m_W + \Delta(m)}{m_{Eis}} + c_W \right) \cdot \Delta T_M \right| \quad (12)$$



		1. Messung	2. Messung
$\lambda_{Schmelz}$	in J/kg	311805	223631
$\Delta\lambda$	in J/kg	10678	8379
Literaturwert	λ	334000	
rel. Abweichung		-0,066	-0,330
Massen	in kg	0,2384	0,2277
Wasserwert	in $\frac{J}{K}$	78,271	76,176

3.3 Spezifische Verdampfungswärme von Wasser mit der Kondensationsmethode

Bezeichnungen:

- T_S : Sidetemperatur des Wassers
- T_0 : Anfangstemperatur des Wassers
- T_M : Mischtemperatur nach Zugabe des Wasserdampfes
- $m_{Kondensat}$: Masse des zugegebenen Wasserdampfes

Gemessene Werte:

- Stromstärke $I = 1,515 \text{ A} \pm 0,001 \text{ A}$
- Spannung $U = 71,4 \text{ V} \pm 0,1 \text{ V}$
- Luftdruck $p = (702 \pm 1) \text{ torr}$

Da wir die Sidetemperatur nicht messen, berechnen wir diese aus dem Luftdruck. Dieser betrug während den Messungen $(702 \pm 1) \text{ torr}$. Die Formel zur Berechnung der Sidetemperatur lautet:

$$\frac{T_S}{^\circ\text{C}} = \frac{1730,6}{7,1962 - \log_{10}(p/kPa)} - 233,41^4$$

Damit ergibt sich:

$$T_S = (97,81 \pm 0,039)^\circ\text{C}$$

Die Auswerteformel lautet:

$$\lambda_{Dampf} = \frac{(c_W \cdot m_W + \Gamma(m)) \cdot (T_{Misch} - T_0)}{m_{Kondensat}} - c_W \cdot (T_S - T_M)$$

⁴http://www.fh-merseburg.de/cza/Oberstufe/gewusst/gewusst_1.htm

Der Fehler berechnet sich so:

$$\Delta\lambda_{Schmelz} = \left| \frac{c_W \cdot (T_M - T_0)}{m_K} \cdot \Delta m_W \right| + \quad (13)$$

$$\left| \frac{T_W - T_M}{m_K} \cdot \Delta\Gamma(m) \right| + \quad (14)$$

$$\left| \frac{-(c_W \cdot m_W + \Gamma(m)) \cdot (T_M - T_0)}{m_K^2} \cdot \Delta m_K \right| + \quad (15)$$

$$\left| \frac{c_W \cdot m_W + \Gamma(m)}{m_K} \cdot \Delta T_M \right| + \quad (16)$$

$$\left| -\frac{c_W \cdot m_W - \Delta\Gamma(m)}{m_K} \cdot \Delta T_0 \right| + \quad (17)$$

$$|c_W \cdot \Delta T_S| + |c_W \cdot \Delta T_M| \quad (18)$$

		1. Messung	2. Messung
λ_{Dampf}	in J/kg	1623544	2155415
$\Delta\lambda$	in J/kg	38885	32717
Literaturwert	λ	2257000	J/kg
rel. Abweichung		-0,2807	-0,0450
Massen	in kg	0,2604	0,2124
Wasserwert	in $\frac{J}{K}$	82,581	73,179

3.4 Spezifische Verdampfungswärme von Wasser mit der Verdampfungsmethode

Die Auswerteformel lautet:

$$\lambda_{Dampf} = \frac{U \cdot I \cdot \Delta t}{m_{Kondensat}}$$

Der Fehler berechnet sich so:

$$\Delta\lambda_{Dampf} = \left| \frac{I \cdot \Delta t}{m_K} \cdot \Delta U \right| + \left| \frac{U \cdot \Delta t}{m_K} \cdot \Delta I \right| + \left| \frac{U \cdot I \cdot \Delta t}{m_K^2} \cdot \Delta m_K \right| + \left| \frac{U \cdot I}{m_K} \cdot \Delta t \right|$$

Gemessene Werte:	m (Becher)	0,0428	kg
	m (danach)	0,0558	kg
	m (Kondensat)	0,0130	kg

Der Fehler bei der Massenbestimmung beträgt 0,0001 kg.

t [min]	I [A]	U [V]
0,0	1,507	71,0
0,5	1,506	71,0
1,0	1,506	71,0
1,5	1,507	71,0
2,0	1,504	70,9
2,5	1,506	70,9
3,0	1,502	70,9
3,5	1,500	70,7
4,0	1,501	70,9
4,5	1,503	70,8
5,0	1,505	71,0
5,2	1,505	71,0
Mittelwert:	1,504	70,9
Sandartabw	0,002	0,097

Aus diesen Werten ergibt sich für λ_{Dampf} :

$$\lambda_{Dampf} = 2560676,2 \frac{J}{kg} \pm 28126,1 \frac{J}{kg}$$

Das entspricht einer Abweichung vom Literaturwert von +13,5 %.

Die gleiche Messung wurde nochmal, mit einer erhöhten Stromstärke durchgeführt.

m (Becher)	0,0558	kg
m (danach)	0,0727	kg
m (Kondensat)	0,0169	kg

Der Fehler bei der Massenbestimmung beträgt 0,0001 kg.

t [min]	I [A]	U [V]
0,0	1,707	80,8
0,5	1,709	80,7
1,0	1,710	80,7
1,5	1,712	80,9
2,0	1,711	80,8
2,5	1,715	80,9
3,0	1,716	81,0
3,5	1,713	80,9
4,0	1,709	80,8
4,5	1,704	80,6
5,1	1,709	80,2
Mittelwert:	1,710	80,8
Sandartabw	0,003	0,216

Aus diesen Werten ergibt sich für λ_{Dampf} :

$$\lambda_{Dampf} = 2491189,5 \frac{J}{kg} \pm 27287,1 \frac{J}{kg}$$

Das entspricht einer Abweichung vom Literaturwert von +10,4 %.

3.5 Änderungen der Zustandsfunktion

Bei all diesen Versuchen blieben sowohl die Temperatur, als auch der Druck konstant.
Nach Kapitel 1.5 gilt:

$$dU = \lambda m - pm(\rho_{nachher}^{-1} - \rho_{vorher}^{-1})$$

$$dF = -pm(\rho_{nachher}^{-1} - \rho_{vorher}^{-1})$$

$$dG = 0$$

$$dH = \lambda m$$

Es folgt dann für die einzelnen Versuche:

3.5.1 Schmelzmethode

$\lambda = 311805 \text{ J/kg}$, $m_{Eis} = 0,0272 \text{ kg}$, $\rho_{Wasser} = 998,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, $\rho_{Eis} = 916,8 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, $p = 93529,6 \text{ Pa}$

$$dU = 8481,2 \text{ J}$$

$$dF = 0,228 \text{ J}$$

$$dH = 8481,1 \text{ J}$$

3.5.2 Kondensationsmethode

$\lambda = 2155415,0 \text{ J/kg}$, $m_{Kondensat} = 0,0176 \text{ kg}$, $\rho_{Wasser} = 998,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, $\rho_{Dampf} = 0,804 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
, $p = 93529,6 \text{ Pa}$

$$dU = 35889,5 \text{ J}$$

$$dF = -2045,8 \text{ J}$$

$$dH = 37935,3 \text{ J}$$

3.5.3 Verdampfungsmethode

$\lambda = 2491189,5 \text{ J/kg}$, $m_{Kondensat} = 0,0169 \text{ kg}$, $\rho_{Wasser} = 998,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, $\rho_{Dampf} = 0,804 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
, $p = 93529,6 \text{ Pa}$

$$dU = 40136,7 \text{ J}$$

$$dF = -1964,4 \text{ J}$$

$$dH = 42101,1 \text{ J}$$

4 Fehlerdiskussion

4.1 Wasserwertbestimmung

Bei der Bestimmung des Wasserwerts ist trotz des Dewargefäßes Wärme entwichen. Und zwar am meisten über den Deckel. Ein weiterer Fehler ergibt sich daraus, dass etwas Zeit zwischen dem Ausschütten des heißen Wassers und der Befüllung mit kaltem Wasser

verging. Somit ist T_H etwas niedriger, als in der Rechnung angenommen. Also ist der tatsächliche Wert von Γ etwas höher. Dennoch kann hier von einem geringen Fehler ausgegangen werden.

4.2 Schmelzwärmebestimmung

Diese Messung wurde zweimal durchgeführt. Aus beiden Versuchen resultieren unterschiedliche Schaubilder. Das wird damit zusammenhängen, dass während beiden Durchführungen unterschiedlich stark umgerührt wurde. Somit hat sich die Temperatur unterschiedlich verteilt.

Beide Messwerte liegen unterhalb des Literaturwerts und außerhalb dem Intervall des Größtfehlers. Dem System muss also Wärme verloren gegangen sein. Doch die relative Abweichung bei einem Versuch von -6,6 % ist schon recht zufriedenstellend.

4.3 Kondensationsmethode

Auch hier liegen beide Messwerte unter dem Literaturwert und außerhalb dem Intervall des Größtfehlers. Es muss also vor allem über die isolierte Leitung zum Dewargefäß Wärme entwichen sein. Trotzdem wurde bei einer Messung der recht gute Wert mit einer relativen Abweichung von nur -4,5 % erreicht.

4.4 Verdampfungsmethode

Auch bei diesem Versuch ist der gemessene Wert außerhalb des Größtfehlerintervalls. Doch hier liegt der gemessene Wert über dem Literaturwert. Man muss also davon ausgehen, dass nicht das gesamte kondensierte Wasser auch in den Messbecher gelangte. Es wird also teilweise in dem Kühlschwein verblieben sein.

5 Literaturverzeichnis

- Stöcker: „Taschenbuch der Physik“, Verlag Harri Deutsch, Thun und Frankfurt am Main, 2. Auflage, 1994
- <http://de.wikipedia.org/wiki/Phasendiagramm>
- <http://de.wikipedia.org/wiki/Isotherme>
- http://www.fh-merseburg.de/cza/Oberstufe/gewusst/gewusst_1.htm