

# **Versuch 42 - Wärmekapazität**

## **PAP 1**

18.9.2025

Teilnehmender Student: **Paul Saß**

Gruppe: 9

Kurs: Vormittags

Tutor/in : Dimitrij Bathauer

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation . . . . .	1
1.2 Ziel des Versuchs . . . . .	1
1.3 Messverfahren . . . . .	1
1.4 Grundlagen der Physik . . . . .	1
1.4.1 Wärmekapazität . . . . .	1
1.4.2 Klassischer Festkörper/ Dulong-Petit . . . . .	2
1.4.3 Verbesserung nach Einstein . . . . .	2
1.4.4 Das Debye Modell . . . . .	2
1.4.5 Wasserkalorimeter . . . . .	2
1.4.6 Wärmekapazität im Kalorimeter . . . . .	3
1.4.7 Siedetemperatur Wasser . . . . .	3
1.4.8 Wärmekapazität Stickstoff . . . . .	3
<b>2 Durchführung</b>	<b>4</b>
2.1 Messprotokoll . . . . .	4
<b>3 Auswertung</b>	<b>8</b>
3.1 Aufgabe I . . . . .	8
3.2 Aufgabe II . . . . .	9
3.2.1 Vergleiche . . . . .	10
3.3 Aufgabe III . . . . .	10
<b>4 Zusammenfassung und Diskussion</b>	<b>12</b>
4.1 Wasserwert . . . . .	12
4.2 Spezifische Wärme Kalorimeter . . . . .	12
4.3 Spezifische Wärme Stickstoff . . . . .	12
4.4 Debye-Temperaturen . . . . .	12
4.5 Zusammenfassung . . . . .	13

# 1. Einleitung

## 1.1 Motivation

Bei der Energiegewinnung durch Sorazellen stellt bislang der Energiespeicher eine Begrenzung der Effizienz dar. Da Solarzellen nur Tagsüber und bei gutem Wetter effizient funktionieren, muss die Energie gut gespeichert werden um auch Nachts oder bei Regen Energie liefern zu können. Ein Konzept für einen Energiespeicher ist das Speichern der erzeugten Wärme in Salzschnmelzen. Diese sind besonders effizient aufgrund ihrer hohen Wärmekapazität. Das bedeutet, dass sie viel Wärme aufnehmen können, bevor sich ihre Temperatur drastisch erhöht. Doch gibt es noch effizientere Wärmespeicher? Dieses Experiment vermittelt die Größe der Wärmekapazität um ein anschauliches Verständnis dieser zu erlangen.

## 1.2 Ziel des Versuchs

Das Ziel des Versuchs ist es die Größen der Wärmekapazität kennen zu lernen. Durch das bestimmen der Wärmekapazität verschiedener Materialien bei verschiedenen Temperaturen wird vermittelt, dass Wärmekapazitäten Stoff und Temperaturabhängig sind.

## 1.3 Messverfahren

Verwendet wird in dem ersten Teil der Versuchs ein Wasserkalorimeter. Um am Ende die Wärmekapazitäten der Stoffe zu bestimmen werden die Gewichte dieser benötigt und zunächst der Wasserwert, also die Wärmekapazität des Kaloriometers, bestimmt. Dafür wird das Kalorimeter mit etwa  $50^{\circ}\text{C}$  warmen Wasser befüllt und in regelmäßigen Zeitabständen die Temperatur bestimmt.

Im zweiten Teil werden die großen Massen auf die Siedetemperatur von Wasser erhitzt. Anschließend werden sie in das Kalorimeter gelassen, welches mit Wasser auf Zimmertemperatur gefüllt wird. Darauf wird die sich einstellende Maximaltemperatur abgelesen und daraus mithilfe des Wasserwerts die Wärmekapazität der einzelnen Proben bestimmt.

Zuletzt wird ein ähnliches Prinzip in Stickstoff angewandt. Die kleinen Proben befinden sich auf Zimmertemperatur. Diese werden in ein abgewogenes Dewargefäß mit flüssigem Stickstoff gelassen. Hört der Stickstoff auf zu sieden ist die Gleichgewichtstemperatur erreicht. Abschließend wird die Massendifferenz des Dewargefässes bestimmt, welche der Menge des verdunsteten Stickstoffs entspricht. Damit werden erneut die Wärmekapazitäten berechnet.

## 1.4 Grundlagen der Physik

### 1.4.1 Wärmekapazität

Fügt man einem Körper eine Wärme Mengenge  $Q$  zu, erhöht sich seine Temperatur um  $\Delta T$ . Der Zusammenhang wird als Wärmekapazität  $C$  beschrieben. Daraus abgeleitet werden die spezifische Wärmekapazität  $c_m$  und die Molwärme  $c_{mol}$ .

$$C = \frac{Q}{\Delta T} \quad (1.1)$$

$$c_m = \frac{C}{m} \quad (1.2)$$

$$c_{mol} = \frac{CM}{m} \quad (1.3)$$

Mit  $m$  als Masse und  $M$  als molarer Masse.

### 1.4.2 Klassischer Festkörper/ Dulong-Petit

In einem klassischen Festkörper sind alle Atomrumpf schwingungen nahezu harmonisch. Jeder Atomrumpf hat 3 Schwingungsfreiheitsgrade, weshalb ein mol  $3N_A$  Freiheitsgrade besitzt, mit  $N_A$  als Avogadrokonstante.+

Daraus gilt nach dem Äquipartitionsprinzip, dass jeder Freiheitsgrad die mittlere Energie  $\langle E \rangle = kT$  besitzt, wobei  $k$  die Boltzmannkonstante beschreibt. Daraus folgt für gesamte innere Energie eines mols  $U = 3kTN_A = 3RT$ .  $R = 8,314 \frac{\text{J}}{\text{molK}}$  beschreibt hier die universelle Gaskonstante. Daraus folgt für die molare Wärmekapazität:

$$c_{mol,DP} = 3R \quad (1.4)$$

### 1.4.3 Verbesserung nach Einstein

Einstein quantisierte das Modell, da es bereits bei leichten Elementen bei Zimmertemperatur fehlerhaft war. Oszillatoren besitzen gequantelte Energiezustände und eine Wahrscheinlichkeit  $w$ , dass ein Zustand bei einer bestimmten Temperatur angeregt ist. Nun wurde für die Wärmekapazität pro mol  $N_A$  unabhängige 3-dimensionale Oszillatoren mit derselben Eigenfrequenz betrachtet. Diese Sicht erklärte die Abhängigkeit der Wärmekapazität von der Temperatur.

### 1.4.4 Das Debye Modell

Debye erkannte, dass die Oszillatoren nicht als unabhängig betrachtet werden konnten, sondern stark gekoppelt waren. Die Schwingungsmoden werden heute Phononen genannt. Das heißt ein mol hat  $3N_A$  unterschiedliche Schwingungsfrequenzen, welche bei der Grenzfrequenz  $\omega_D$  bei  $3N_A$  Schwingungszuständen abgeschnitten wurden. Nach Debyes Modell gab es nur noch einen materialabhängigen Parameter, die Debye Temperatur  $\Theta_D = \frac{\hbar\omega_D}{k}$  mit  $\hbar$  als reduziertes Wirkungsquantum. Dementsprechend war die Wärmekapazität nur noch von  $\frac{T}{\Theta_D}$  abhängig. Daher ist die Debye Temperatur die charakterisierende Eigenschaft der Wärmekapazität.

### 1.4.5 Wasserkalorimeter

Das Wasserkalorimeter besitzt eine eigene Wärmekapazität, den sog. Wasserwert. Dieser lässt sich durch folgenden Ausdruck berechnen.

$$W = \frac{c_w (\bar{T} - T_1) (m_w - m_k)}{T_2 - \bar{T}} \quad (1.5)$$

Dabei gelten die Bezeichnungen:

- $c_w$  Wärmekapazität von Wasser
- $m_w$  Masse befülltes Kalorimeter
- $m_k$  Masse leeres Kalorimeter

- $\bar{T}$  Gleichgewichtstemperatur
- $T_1$  Anfangstemperatur Wasser
- $T_2$  Anfangstemperatur Kalorimeter (Raumtemperatur)

#### 1.4.6 Wärmekapazität im Kalorimeter

Für die Wärmekapazität gemessen im Kalorimeter gilt:

$$c_x = \frac{(m_W c_W + W)(\bar{T} - T_2)}{m_x(T_1 - \bar{T})} \quad (1.6)$$

Dabei gelten die gleichen Bezeichnungen. Nur  $T_1$  ist hier die Anfangstemperatur der Probe.

#### 1.4.7 Siedetemperatur Wasser

Die Siedetemperatur von Wasser ist abhängig vom Umgebungsdruck. Ausgangspunkt sind  $100^\circ C$  bei 1013 hPa.

$$T = 100^\circ C + 0,0276 \frac{^\circ C}{hPa} (p - 1014 hPa) \quad (1.7)$$

#### 1.4.8 Wärmekapazität Stickstoff

Die Wärmekapazität bei der Stickstoffmessung kann durch die Massendifferenz  $m_V$  des Stickstoffs bestimmt werden.  $Q_V$  bezeichnet die Verdunstungsenergie,  $m_x$  ist die Masse der Probe.  $T_1$  ist die Temperatur der Probe und  $T_2$  die Temperatur des Stickstoffs. Dabei gilt  $Q_V = 199 \frac{J}{g}$  und  $T_2 = -195,8^\circ C$ .

$$c_x = \frac{Q_V m_V}{m_x(T_1 - T_2)} \quad (1.8)$$

## 2. Durchführung

### 2.1 Messprotokoll

Messprotokoll

18. 9. 25

### Versuch 42 - Wärmekapazität

9:30 - 12:30 Uhr

#### Geräte:

- Kalorimeter mit Magnetührer
- Heizplatte mit Glasbecher
- Stativ mit Drahthaken
- 3 große Versuchskörper (Graphit, Aluminium, Blei)
- 3 kleine Versuchskörper für den Versuch bei Stickstofftemperatur
- Dewargefäß für flüssigen Stickstoff
- elektronisches Thermometer, Fehler:  $\Delta T = \pm (0,2\%, \text{MW} + 1)^\circ\text{C}$
- elektronische Waage, Fehler: 0,01g
- Stoppuhr
- Schutzbrille und Schutzhandschuhe

#### Aufgabe 1: Vorbereiten des Wasserkalorimeters

Das Kalorimeter wird zuallererst zu drei Vierteln mit VE-Wasser gefüllt und auf dem Magnetührer so zentriert werden, dass ein Ratschen des Magneten zu hören ist.

Dadurch soll ein optimaler Führvorgang eingestellt werden.

#### Aufgabe 2:

Die Massen aller Probekörper werden bestimmt.

#### Tabelle 1: Massen der Probekörper

	groß [g]	klein [g]
Graphit	$122,05 \pm 0,01$	$43,55 \pm 0,01$
Aluminium	$155,66 \pm 0,01$	$34,31 \pm 0,01$
Blei	$601,67 \pm 0,01$	$137,99 \pm 0,01$

Abbildung 2.1: Messprotokoll Versuch 42 Seite 1

Aufgabe 3: Bestimmung des Wasserwerts

Zunächst wird die Masse des unbefüllten Kolorimeters ohne Deckel (aber mit Netz und Rührfisch) bestimmt:

$$m_k = (250,93 \pm 0,01) \text{ g}$$

Das Kolorimeter wird dann auf den Magnetrührer gestellt und zuerst mithilfe des Thermometers die Zimmertemperatur gemessen:

$$T_2 = 25,2^\circ\text{C}$$

Nun wird Wasser mit der Heizplatte auf  $T \approx 50^\circ\text{C}$  erhitzt, wonach die Platte abgeschaltet wird und sich die Temperatur unter ständigen Umrühren nicht mehr verändert.

Diese Temperatur beträgt:

$$T_1 = 51,2^\circ\text{C}$$

Danach wird die Uhr eingeschaltet während das erhitzte Wasser bis zur Hälfte in das Kolorimeter gefüllt wird, wobei der Deckel direkt draufgelegt und der Rührvorgang sofort gestoppt wird. Im Abstand von 30s wird nun fünf Minuten lang die Temperatur im Kolorimeter gemessen, bis die Temperatur linear abfällt.

Tabelle 2: Bestimmung des Wasserwerts

Nr.	+ [s]	Temperatur [ $^\circ\text{C}$ ]	(Fehler vom Thermometer (mit))
1	30	47,9	
2	60	48,6	
3	90	48,4	
4	120	48,3	
5	150	48,1	
6	180	48,0	
7	210	47,9	
8	240	47,8	
9	270	47,7	
10	300	47,6	

Abbildung 2.2: Messprotokoll Versuch 42 Seite 2

Dann wird das Gewicht des befüllten Kalorimeters ohne Deckel gemessen, um die Masse des Wassers zu ermitteln:

$$m_{K,W} = (454,57 \pm 0,01) \text{ g}$$

#### Aufgabe 4: Messung der spezifischen Wärmekapazitäten der Probekörper mit kochendem Wasser

Das Kalorimeter wird zunächst wieder zu drei Viertel mit frischem VE-Wasser befüllt und gewogen. Diese Messung wird mit den großen Probekörpern durchgeführt.

Der erste Probekörper wird in den Glasbecher mit siedendem Wasser mithilfe der Stäbchen gehängt. Der Körper soll sich dabei für 5min in dem kochenden Wasser befinden.

Um später die Temperatur  $T_1$  des kochenden Wassers bzw. die des Probekörpers zu bestimmen, wird der Luftdruck im Labor gemessen. Währenddessen wird die Anfangstemperatur  $T_2$  des Kalorimeters unmittelbar gemessen und der Magnetrührer eingeschaltet. Anschließend wird der Probekörper aus dem Wasserbad entfernt und zentralisch versetzt auf das Gitter im Kalorimeter gestellt, wonach der Deckel umgehend geschlossen wird. Nun soll durch Temperaturmessungen über eine gewisse Zeit das Temperaturmaximum  $\bar{T}$  gemessen werden, welches der Mischtemperatur entspricht.

Dasselbe wird für alle Probekörper gemacht.

Tabelle 3: Massreihe zur spez. Wärmekapazität mit kochendem Wasser

Nr.	Probekörper	$m_{K,W} [\text{g}]$	$p [\text{kPa}]$	$T_2 [\text{°C}]$	$\bar{T} [\text{°C}]$
1	Graphit	$592,47 \pm 0,01$		24,3	28,7
2	Aluminium	$622,29 \pm 0,01$	$1012,3 \pm 0,1$	30,6	35,7
3	Blei	$623,28 \pm 0,01$		28,0	31,2

Abbildung 2.3: Messprotokoll Versuch 42 Seite 3

Aufgabe 6: Messung der spezifischen Wärmekapazitäten der Probekörper mit flüssigem Stickstoff

In dieser Messreihe werden die kleinen Probekörper verwendet.

Zunächst wird der Dewar zu  $\frac{2}{3}$  mit flüssigem Stickstoff befüllt und auf die Waage gestellt. Nach dem Temperaturanalogie wird das Gewicht notiert und der erste Probekörper über einen Faden langsam in das Gefäß hineingelassen. Nach Beendigung des Siedens wird der Probekörper entfernt und das Endgewicht gemessen.

Dies wird mit den anderen Probekörpern wiederholt.

Zimmertemperatur:  $T_1 = 24,7^\circ\text{C}$

Tabelle 6: Messreihe zur spez. Wärmekapazität mit flüssigem Stickstoff

Nr.	Probekörper	Anfangsgewicht $m_1$ [g]	Endgewicht $m_E$ [g]
1	Graphit	$516,70 \pm 0,01$	$482,10 \pm 0,01$
2	Aluminium	$523,57 \pm 0,01$	$494,22 \pm 0,01$
3	Blei	$492,31 \pm 0,01$	$472,45 \pm 0,01$

Badhaar

Abbildung 2.4: Messprotokoll Versuch 42 Seite 4

### 3. Auswertung

#### 3.1 Aufgabe I

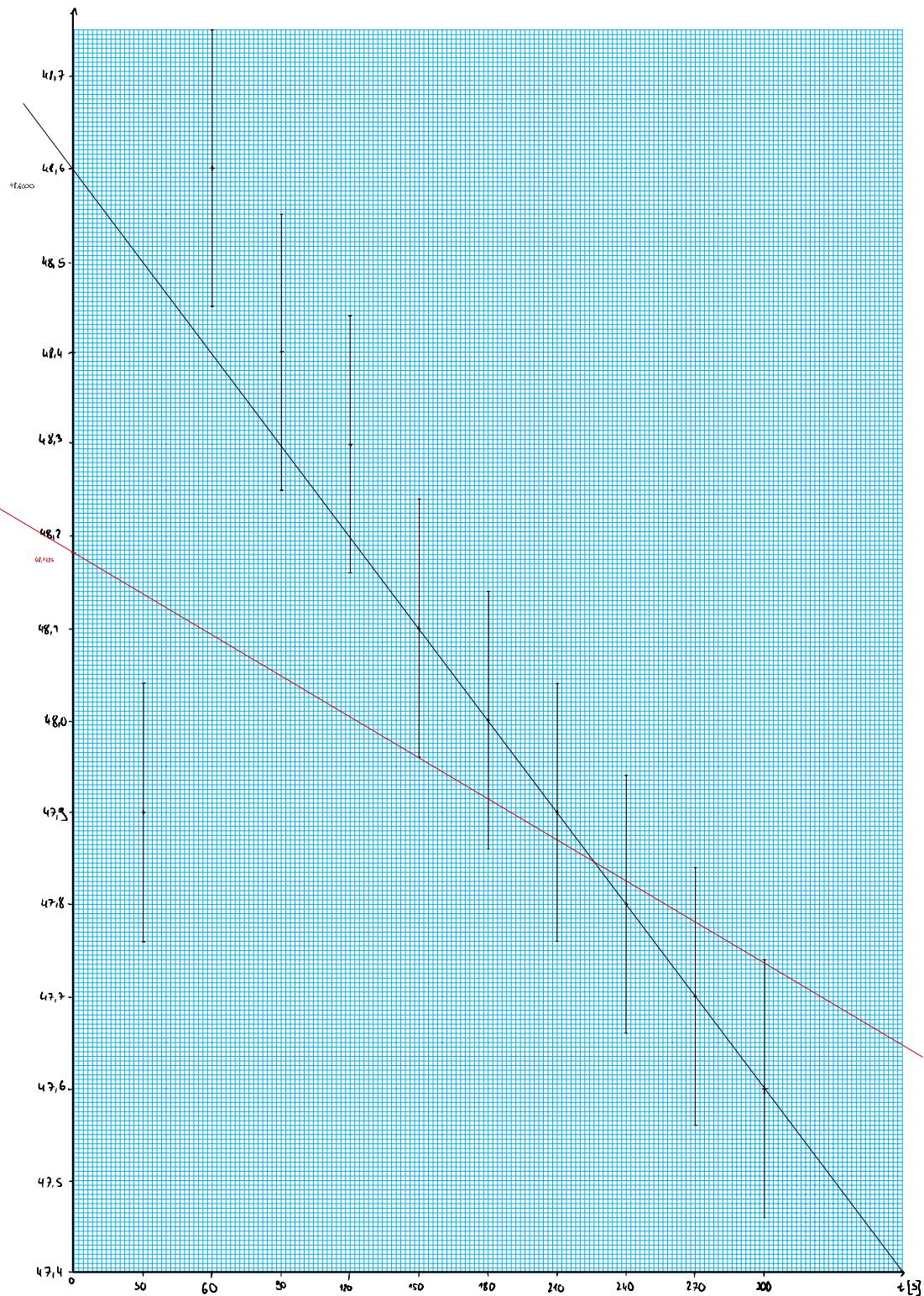


Abbildung 3.1: Diagramm 1

In Diagramm 1 wurden die gemessenen Temperaturen im Kalorimeter gegen die vergangene Zeit aufgetragen. Die Werte stammen aus Tabelle 2. Durch Verlängerung des linearen Anteils zum Anfangszeitpunkt  $t = 0\text{ s}$  konnte die Gleichgewichtstemperatur  $\bar{T}$  abgelesen werden. Der Fehler wird mithilfe einer Fehlergeraden bestimmt. Durch die Differenz der Werte bei  $t = 0$  ergibt sich der Fehler:

$$\underline{\bar{T} = (48,6 \pm 0,4)^\circ\text{C}}$$

$$\Delta\bar{T} = \bar{T} - \bar{T}_{Fehler} \quad (3.1)$$

Aus der Gleichgewichtstemperatur  $\bar{T}$  lässt sich die Wärmekapazität des Kalorimeter also der Wasserwert mit Gleichung 1.5 berechnen:

$$\underline{\underline{W = (95 \pm 17) \frac{\text{J}}{\text{K}}}}$$

Der Fehler folgt nach dem Fehlerrechner aus dem Skript:

$$\frac{\Delta W}{W} = \sqrt{\frac{\Delta T^2 (T_2 - T_1)^2}{(T - T_1)^2 (T - T_2)^2} + \frac{\Delta T_1^2}{(T - T_1)^2} + \frac{\Delta T_2^2}{(T - T_2)^2} + \frac{\Delta m_k^2}{(m_k - m_w)^2} + \frac{\Delta m_w^2}{(m_k - m_w)^2} + \frac{\Delta c_w^2}{c_w^2}} \quad (3.2)$$

Vergleicht man den erhaltenen Wert mit dem Literaturwert von  $70 \frac{\text{J}}{\text{K}}$  so ergibt sich eine Abweichung des Messwerts von  $1,5 \sigma$

### 3.2 Aufgabe II

Für die Berechnung der spezifischen Wärme muss zuerst die Siedetemperatur des Wassers bei gemessenem Luftdruck berechnet werden. Dabei gilt nach Gleichung 1.7 für die Siedetemperatur  $T_1$  mit einem gemessenen Luftdruck von  $1012,3\text{ hPa}$ :

$$T_1 = (99,9806 \pm 0,0028)^\circ\text{C}$$

Daraus ergibt sich für die spezifische Wärmekapazität  $c_m$  nach Gleichung 1.6 und die Molwärme  $c_{mol} = c_m \cdot M$  mit  $M$  als molarer Masse:

Material	$m_{kw}[\text{g}]$	$T_{vor}[\text{ }^\circ\text{C}]$	$T_{nach}[\text{ }^\circ\text{C}]$	$c_m[\text{J/gK}]$	$c_{mol}[\text{J/molK}]$
Graphit	$592,47 \pm 0,01$	$24,30 \pm 0,07$	$28,70 \pm 0,09$	$0,77 \pm 0,02$	$9,25 \pm 0,24$
Alu.	$622,29 \pm 0,01$	$30,6 \pm 0,1$	$35,7 \pm 0,1$	$0,84 \pm 0,03$	$22,7 \pm 0,8$
Blei	$623,28 \pm 0,01$	$28,00 \pm 0,08$	$31,20 \pm 0,09$	$0,13 \pm 0,01$	$27 \pm 2$

**Tabelle 3.1:** Wärmekapazitäten gemessen im Kalorimeter

Dadurch, dass beim Thermometer ein systematischer Fehler vorhanden ist, wird zuerst die Differenz  $A = \bar{T} - T_2$  berechnet, da sich dort dieser Fehler aufhebt. Bei der restlichen Fehlerrechnung

wurde der systematische Fehler berücksichtigt.

$$\begin{aligned}
 \left(\frac{\Delta c_m}{c_m}\right)^2 &= \frac{c_w^2 \Delta m_k^2}{(W - c_w m_k + c_w m_w)^2} + \frac{c_w^2 \Delta m_w^2}{(W - c_w m_k + c_w m_w)^2} \\
 &+ \frac{\Delta T^2}{(T - T_2)^2} + \frac{\Delta T_2^2}{(T - T_2)^2} + \frac{\Delta W^2}{(W - c_w m_k + c_w m_w)^2} \\
 &+ \frac{\Delta c_w^2 (m_k - m_w)^2}{(W - c_w m_k + c_w m_w)^2} + \frac{\Delta m_x^2}{m_x^2} + \frac{\Delta A^2}{A^2}
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

### 3.2.1 Vergleiche

Die Werte werden nun mit den Literaturwerten verglichen. Zusätzlich wird die spezifische Wärmekapazität mithilfe Dulong-Petit berechnet:

$$c_{DP} = 3 \frac{R}{M} \tag{3.4}$$

Mit  $R = 8,314 \frac{\text{J}}{\text{molK}}$  als universelle Gaskonstante und  $M$  als molare Masse. Daraus lässt sich folgende Tabelle erstellen.

Material	$c_m [\text{J/gK}]$ gemessen	$c_m [\text{J/gK}]$ Literatur	$\sigma_{Lit}$	$c_{DP}$	$\sigma_{DP}$
Graphit	$0,77 \pm 0,02$	0,709	3	2,077	70
Alu.	$0,84 \pm 0,03$	0,90	2	0,925	2,8
Blei	$0,13 \pm 0,01$	0,129	0,1	0,120	1

**Tabelle 3.2:** Vergleiche der Wärmekapazitäten

### 3.3 Aufgabe III

Im letzten Teil werden die Molwärmen und spezifischen Wärmekapazitäten mithilfe Gleichung 1.8 bei der Temperatur von Siedendem Stickstoff berechnet.

Material	$c_m [\text{J/gK}]$	$c_{mol} [\text{J/molK}]$
Graphit	$0,5098 \pm 0,0023$	$6,123 \pm 0,027$
Alu.	$0,759 \pm 0,003$	$20,48 \pm 0,08$
Blei	$0,1298 \pm 0,0006$	$26,89 \pm 0,12$

**Tabelle 3.3:** Wärmekapazitäten gemessen mit Stickstoff

Dabei gilt der folgende Fehler.

$$\frac{\Delta c_m}{c_m} = \sqrt{\frac{\Delta T_1^2}{(T_1 - T_2)^2} + \frac{\Delta m_x^2}{m_x^2}} \tag{3.5}$$

Abschließend wird des Verhältnis der Molwärmen bei beiden Temperaturen bestimmt woraus die Debye-Wärme bestimmt werden kann. Für den Fehler des Verhältnisses gilt:

$$\frac{\Delta \left( \frac{c_{molN_2}}{c_{molH_2O}} \right)}{\left( \frac{c_{molN_2}}{c_{molH_2O}} \right)} = \sqrt{\left( \frac{\Delta c_{molN_2}}{c_{molN_2}} \right)^2 + \left( \frac{\Delta c_{molH_2O}}{c_{molH_2O}} \right)^2} \tag{3.6}$$

Zuletzt lassen sich die Ergebnisse in folgender Tabelle zusammenfassen.

Eigenschaft	Graphit	Aluminium	Blei
Kaloriemeter			
spez. Wärme. $c_m[\text{J/gK}]$	$0,77 \pm 0,02$	$0,84 \pm 0,03$	$0,12 \pm 0,03$
Molwärme $c_{mol}[\text{J/molK}]$	$9,25 \pm 0,24$	$22,7 \pm 0,8$	$27 \pm 2$
In Stickstoff			
spez. Wärme. $c_m[\text{J/gK}]$	$0,5098 \pm 0,0023$	$0,759 \pm 0,003$	$0,1298 \pm 0,0006$
Molwärme $c_{mol}[\text{J/molK}]$	$6,123 \pm 0,027$	$20,48 \pm 0,08$	$26,89 \pm 0,12$
$\frac{c_{molN_2}}{c_{molH_2O}}$	$0,66 \pm 0,17$	$0,93 \pm 0,03$	$1,00 \pm 0,07$
Debye-Temp. $\Theta[\text{K}]$	$630 \pm 30$	$210 \pm 10$	$80 \pm 18$
Abweichung $\sigma$ von $\Theta$	50	22	0,8

Tabelle 3.4: Relavante Ergebnisse zusammengefasst

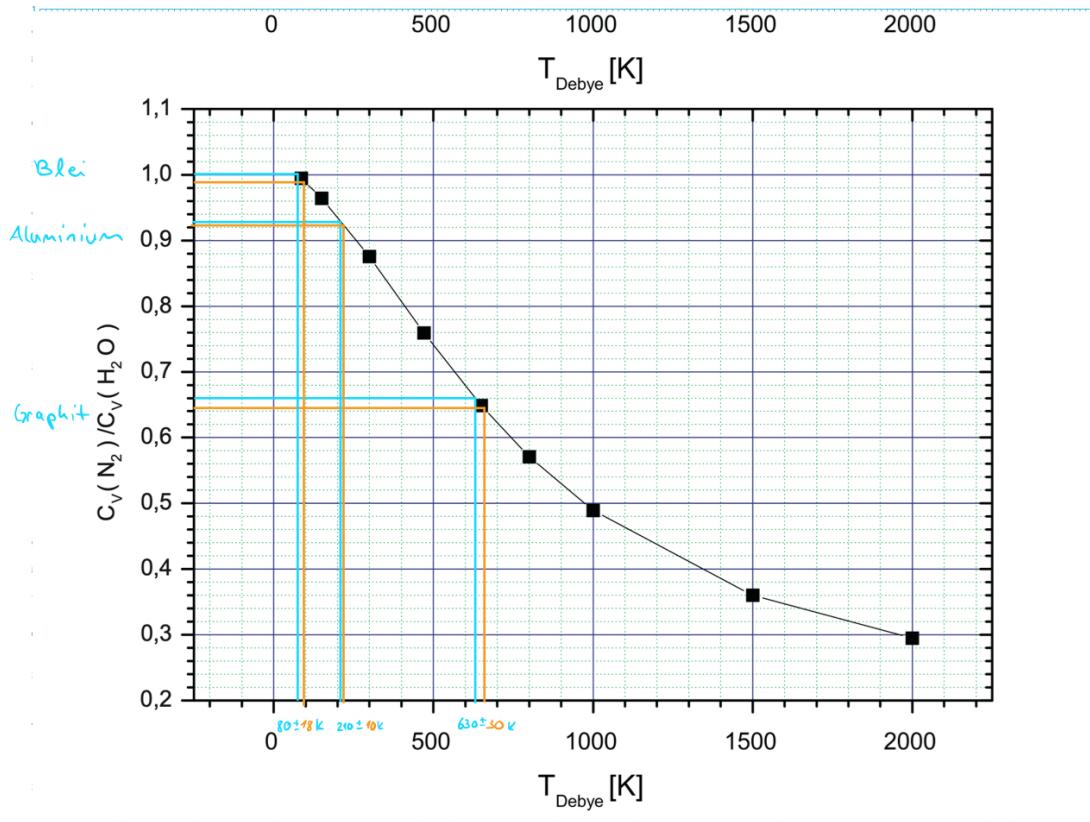


Abbildung 3.2: Diagramm 2

## 4. Zusammenfassung und Diskussion

### 4.1 Wasserwert

Der berechnete Wasserwert liegt bei  $W = (95 \pm 17) \frac{\text{J}}{\text{K}}$ . Verglichen mit dem angegebenen Wert von  $70 \frac{\text{J}}{\text{K}}$  ergibt sich eine Abweichung von  $1,5\sigma$ . Der gemessene Wert liegt noch gut im  $3\sigma$  Bereich. Deshalb ist der Wert mit dem angegebenen vereinbar und kann als genau anerkannt werden. Die größte Fehlerquelle liegt höchstwahrscheinlich in der genauen bestimmung der Wassertemperatur vo der Messung. Durch den Einschüttvorgang konnte das Wasser Wärme an die Umgebungsluft abgeben wodurch es kälter als erwartet im Kalorimeter angelangt ist. Daraus resultierte eine kühlere Gleichgewichtstemperatur und dementsprechend ein höherer Wasserwert. Allerdings schwangt die Wärmeisolierung von Gerät zu Gerät weshalb der Vergleich nicht für alle Geräte Sinnvoll ist.

### 4.2 Spezifische Wärme Kalorimeter

Die Ergebnisse von Aluminium mit  $c_m = 0,84 \pm 0,03 \frac{\text{J}}{\text{gK}}$  und Blei  $c_m = 0,13 \pm 0,01 \frac{\text{J}}{\text{gK}}$  sind mit Abweichungen von  $2\sigma$  und  $0,1\sigma$  als Erfolgreich zu bewerten. Bei der Blei Messung hätten die Fahlerabschätzungen verringert werden können um das Ergebnis genauer eingrenzen zu können. Auffällig ist hingegen das Ergebnis von Graphit  $c_m = 0,77 \pm 0,02 \frac{\text{J}}{\text{gK}}$ . Dieses erzielt eine Abweichung von  $3\sigma$ . Dieser Bereich gilt zwar als akzeptabel jedoch muss das Ergebnis kritisch betrachtet werden. Einen Fehler könnte der Wasserwert sein, jedoch müsste dieser Fehler auch auf die anderen Werte zutreffen. Es muss auf einen systematischen Fehler geschlossen werden, bei welchem kleine Fehler in der Versuchsdurchführung passiert sind.

Besonders auffällig ist ebenfalls die hohe Abweichung von  $70\sigma$  bei Graphit von der Dulong-Petit Methode. Das Problem bei der Dulong Petit methode ist, dass sie bei leichten Elementen wie Kohlenstoff versagt. Das kommt, da die Schwingungen sehr Hochfrequent sind und deshalb die Energiezustände nicht vollständig angeregt sondern quantisiert sind.

### 4.3 Spezifische Wärme Stickstoff

Zu erwarten ist, dass die gemessenen Kapazitäten etwas zu hoch sind. Der ausschlaggebendste Grund dafür wäre eine Verdunstung des Stickstoffs aufgrund des Kontaks zur Luft mit Zimmertemperatur. Dadurch steigt die Massendifferenz und demnach auch die berechnete Wärmekapazität. Ebenfalls kann Stickstoff beim Sieden aus dem Dewargefäß heraussprudeln, was ebenfalls zu einem erhöhten Massenverlust führt. Dieser Effekt ist auch bei dieser Messung zu erkennen:

$$c_C = 0,5098 \pm 0,0023 \frac{\text{J}}{\text{gK}} \quad c_{Al} = 0,759 \pm 0,003 \frac{\text{J}}{\text{gK}} \quad C_{Pb} = 0,1298 \pm 0,0006 \frac{\text{J}}{\text{gK}} \quad (4.1)$$

Da diese Werte zu klein sind erkennt man aber nicht direkt, da keine Literaturwerte als Referenz angegeben sind. Daher müssen dafür die Debye-Temperaturen betrachtet werden.

### 4.4 Debye-Temperaturen

Die abgelesenen Debye Temperaturen sind:

$$\Theta_C = 80 \pm 18 \text{ K} \quad \Theta_{Al} = 210 \pm 10 \text{ K} \quad \Theta_{Pb} = 630 \pm 30 \text{ K} \quad (4.2)$$

Die Debye-Temperaturen sind direkt abhängig von dem Verhältnis der Wärmekapazitäten bei den beiden Messtemperaturen. Die Debye Temperatur von Blei kann mit einer Abweichung von  $0,8\sigma$  als genau betrachtet werden. Da dort ebenfalls der Wert der spezifischen Wärme als erfolgreich gemessen betrachtet wird, gilt hier auch für den Messwert bei Stickstoff, dass dieser erfolgreich gemessen wurde. Dies kann angenommen werden, da die Messtemperatur bei Stickstoff direkt abhängig von der Debye-Temperatur und der Wärmekapazität im Kalorimeter abhängt.

Auffällig sind die Debye-Temperaturen von Aluminium und Graphit. Die Abweichungen betragen hier  $22\sigma$  und  $50\sigma$ . Beim Aluminium ist auf einen Messfehler in der Stickstoffmessung zu schließen welcher auf die oben genannten systematischen Fehlerquellen zurückzuführen sein muss, da auch hier der Messwert aus dem Kalorimeter genau ist.

Bei Graphit ist die Ermittlung der Fehlerquelle etwas komplexer wobei natürlich die gleichen systematischen Fehler wie für das Aluminium gelten. Jedoch gilt der Literaturwert zum Vergleich für Diamant, da Graphit keine einheitliche Debye-Temperatur festgesetzt ist. Aufgrund dessen ist als Fehlerquelle hier auch der Literaturwert zu berücksichtigen. Diamant besteht zwar aus den gleichen Beusteinen wie Graphit besitzt jedoch eine grundlegend andere Kristallstruktur. Daraus resultiert eine andere Wärmekapazität. Deshalb sind die Materialien in ihrer Wärmekapazität nicht vergleichbar.

#### 4.5 Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Versuch im allgemeinen erfolgreich war. Die Werte lagen meist in dem  $3\sigma$  der Literaturwerte. Daher können diese als Bestätigung der Literaturwerte angesehen werden. Jedoch sollte die Messung der Werte des Graphits kritisch betrachtet werden, da dort der Wert der Debye-Temperatur sehr stark von dem Referenzwert abweicht.

Zu verbessern an der Vrsuchsdurchführung wäre das verwenden größerer Dewargefäße um einerseits die Isolation gegen die Umluft zu verbessern und andererseits das Risiko eines Massenverlustes durch das Überschwappen des siedenden Stickstoffs zu minimieren.

Dazu kommt, dass das Thermometer teilweise sehr lang gebraucht hat um eine konstante Temperatur anzuzeigen. Dies könnte besonders in der Messung des Wasserwerts Fehlerr hinterlassen haben. Demenstprechend wäre ein Thermometer besser geeignet, dass sich schneller einstellt.