

**A 7**

**Molare Wärmekapazität von  
Festkörpern**

18.12.2019

Gruppe 39

Lorenzo Wormer und Louis Kontschak

Betreuer: Lucas Fabian Spiske

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Grundlagen</b> . . . . .	1
1.1 Molare Wärmekapazität . . . . .	1
1.2 $\bar{c}_p$ -Bestimmung mittels Flüssigstickstoffverdampfung . . . . .	2
<b>2 Aufgabenstellung</b> . . . . .	3
<b>3 Methoden</b> . . . . .	3
3.1 Versuchsaufbau . . . . .	3
3.2 Durchführung der Messung . . . . .	3
3.3 Auswertung der Daten . . . . .	4
3.3.1 Berechnung der Molmenge Stickstoff in der Messzylinder-Gasphase . . . . .	6
3.3.2 Berechnung des Partialdrucks von Stickstoff . . . . .	6
3.3.3 Berechnung der verdampften Stoffmenge an Stickstoff . . . . .	6
3.3.4 Berechnung der molaren Wärmekapazität jeder Probe . . . . .	8
<b>4 Ergebnisse</b> . . . . .	9
<b>5 Diskussion</b> . . . . .	11

# 1 Grundlagen

## 1.1 Molare Wärmekapazität

Die molare Wärmekapazität  $c_p$  ist die Wärmemenge die man *einem* Mol eines Stoffs zuführen muss um die Temperatur dieses Stoffs um *einen* Kelvin zu erhöhen, wobei der Druck im Stoff konstant bleibt. Sie hat die Einheit  $\frac{J}{mol \cdot K}$ . Die Wärmekapazität ist eine Stoffeigenschaft und macht eine Aussage darüber wie gut eine Stoff Wärme speichern kann, also welche Wärmemenge er innerhalb einer Temperaturerhöhung von *einem* Kelvin in seiner Struktur 'unterbekommt'. Um bei konstantem Druck die Temperatur eines Stoffs der Stoffmenge  $n$  um  $\Delta T$  zu erhöhen ist die Wärmemenge  $\Delta Q$  nötig:

$$\Delta Q = n \cdot \int_{T_1}^{T_2} c_p dT \quad (1)$$

$$\Delta Q = n \cdot \bar{c}_p \cdot \Delta T \quad (2)$$

Dabei ist  $\bar{c}_p$  die mittlere molare Wärmekapazität im Temperaturbereich  $\Delta T$ . Die zugeführte Wärmemenge  $\Delta Q$  entspricht gerade der Enthalpieänderung  $\Delta H$  des Stoffs.

Gibt man sich mit dem Mittelwert der molaren Wärmekapazität nicht zufrieden und möchte stattdessen das Integral aus Gleichung (1) lösen, eignen sich für Festkörper die Modelle von Einstein und Debye, die die Temperaturabhängigkeit von  $c_p$  bei sehr niedrigen Temperaturen beschreiben. Grundlage der beiden Modelle ist die Annahme, dass die Wärmespeicherung im Festkörper ausschließlich in Form von Gitterschwingungen des Festkörperkristalls erfolgt,<sup>1</sup> wobei die Gitterschwingungen als quantenharmonische Oszillatoren modelliert werden. Bei ausreichend hohen Temperaturen lässt sich die empirische Regel von Dulong und Petit anwenden. Sie besagt, dass die molare Wärmekapazität von aus Einzelatomen bestehenden Festkörpern der dreifachen universellen Gaskonstante entspricht, beziehungsweise, dass für Festkörper, die aus zweiatomigen Molekülen bestehen, sich die molare Wärmekapazität zu  $6 \cdot R$  berechnet. Zusammenfassend lässt sich schreiben:

---

<sup>1</sup> Wärmeenergie wird tatsächlich hauptsächlich in Form von Gitterschwingungen im Festkörper gespeichert.

$$c_p^{eiatomig} = 3 \cdot R \approx 25 \frac{J}{mol \cdot K} \quad (3)$$

$$c_p^{zweiatomig} = 6 \cdot R \approx 50 \frac{J}{mol \cdot K} \quad (4)$$

## 1.2 $\bar{c}_p$ -Bestimmung mittels Flüssigstickstoffverdampfung

Zur experimentellen Bestimmung der molaren Wärmekapazität von Festkörpern lässt sich der geringe Siedepunkt von Stickstoff nutzen: Bringt man einen Festkörper in Kontakt mit flüssigem Stickstoff wird Wärme vom Festkörper an den Stickstoff übertragen und es kommt zur Verdampfung. Gelingt es durch einen geschickten Versuchsaufbau die verdampfte Menge an Stickstoff zu messen, lässt sich über die Verdampfungsenthalpie die Enthalpie des verdampften Stickstoffs bestimmen. Diese Enthalpie entspricht dann gerade der vom Festkörper auf den Stickstoff übertragenen Enthalpie, bzw. dem Enthalpieverlust des Festkörpers bei seiner Temperaturänderung von Raumtemperatur auf die Temperatur des Flüssigstickstoffs am Siedepunkt (-196 °C). Zusammengefasst lässt sich ein Energieerhaltungssatz formulieren:

$$\Delta H_{FK} = \Delta H_{v,N_2} \cdot \Delta n_{N_2} \quad (5)$$

Dabei steht der Index *FK* für 'Festkörper'.  $\Delta n_{N_2}$  bezeichnet die Stoffmenge des verdampften Stickstoffs. Mit Gleichung (2) ergibt sich:

$$n \cdot \bar{c}_p \cdot \Delta T = \Delta H_{v,N_2} \cdot \Delta n_{N_2} \quad (6)$$

Durch Umstellen lässt sich die mittlere molare Wärmekapazität des Feststoffs bei Kenntnis der Feststoffstoffmenge, der Temperaturänderung und der Stoffmenge an verdampftem Stickstoff berechnen:

$$\bar{c}_p = \frac{\Delta H_{v,N_2} \cdot \Delta n_{N_2}}{n \cdot \Delta T} \quad (7)$$

## 2 Aufgabenstellung

Im Rahmen des hier protokollierten Versuchs sollten die Werte der mittleren molaren Wärmekapazität von Aluminium (Al), Kaliumbromid (KBr), Zinn (Sn) und Zink (Zn) im Temperaturbereich von der Raumtemperatur zur Siedetemperatur von flüssigem Stickstoff bestimmt werden.

## 3 Methoden

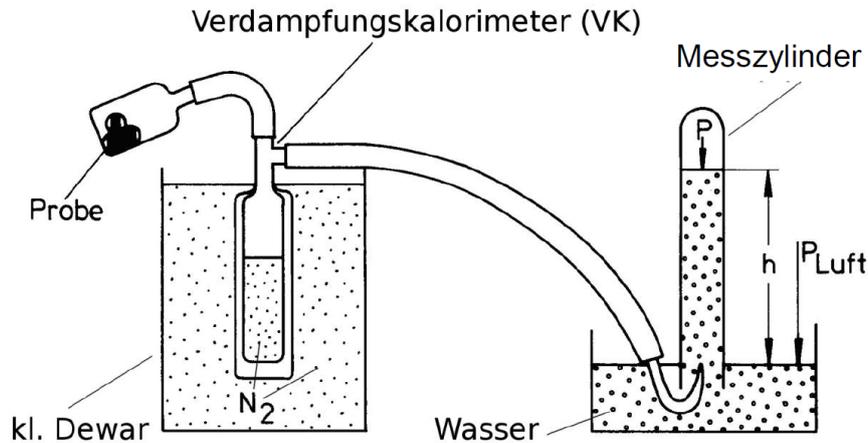
### 3.1 Versuchsaufbau

Zur Bestimmung der gesuchten  $\bar{c}_p$ -Werte für Al, KBr, Sn und Zn wurde eine Kombination aus Messzylinder und Verdampfungskalorimeter eingesetzt. Das Kalorimeter wurde dabei mit flüssigem Stickstoff ( $N_2$ ) befüllt und in ein kleines Dewar mit ebenfalls flüssigem  $N_2$  getaucht. Während der Versuchsdurchführung wurde stets darauf geachtet, dass der Flüssigkeitsstand innerhalb der Kalorimeters unterhalb dem des Dewars lag. Der Messzylinder wurde komplett mit Wasser befüllt und mit der Öffnung nach unten in ein wassergefülltes Becherglas gestellt, sodass sich eine statische Wassersäule im Messzylinder ausbildete. Über einen Schlauch wurde dann die Gasphase des Kalorimeters mit dem Messzylinder unterhalb des Wasserspiegels verbunden, wodurch aus dem Kalorimeter austretendes  $N_2$  Gas in dem Messzylinder aufgefangen werden konnte. Mit einem weiteren Schlauch wurde die obere Öffnung des Kalorimeters mit einem Gefäß für die jeweilige Probe verbunden. Dieser Aufbau ist in Abbildung 1 noch einmal schematisch dargestellt.

### 3.2 Durchführung der Messung

Für jeden untersuchten Stoff wurden je zwei Proben nacheinander abgewogen (Ergebnisse in Tabelle 2) und direkt gemessen. Vor Beginn der Messung wurde jede Probe in das dafür vorgesehene Gefäß vorgelegt, welches daraufhin dicht mit der oberen Öffnung des Kalorimeters verbunden wurde.

Durch Abdichten dieser Öffnung wurde der Fluss an verdampftem  $N_2$  über den zweiten Schlauch in den Messzylinder umgeleitet. Sobald aufsteigende Blasen innerhalb des Messzylinders sichtbar wurden, wurde das aktuelle Volumen am Messzylinder abgenommen und eine Stoppuhr gestartet. Weitere



**Abb. 1:** Aufbau des Versuchs mit Dewar, Kalorimeter und Messzylinder

Volumen-Werte wurden dann alle 10 Sekunden bis zum Ende der Messung notiert.

Nach 5 abgenommenen Volumen-Werten wurde die Probe aus dem verbundenen Probengefäß in das Kalorimeter gekippt, was zu einem sprunghaften Anstieg des Gas-Flusses in den Messzylinder führte. Sobald sich der Gasfluss wieder normalisiert hatte, wurden 5 weitere Volumen-Werte abgenommen und die Messung dann beendet, indem das Probengefäß wieder vom Kalorimeter entfernt wurde.

Diese im 10 s Takt abgelesenen Volumen finden sich für die Messung jeder Probe in Tabelle 3.

### 3.3 Auswertung der Daten

Abgesehen von abgewogenen Massen (Tabelle 2) und am Messzylinder abgelesenen Volumen (Tabelle 3) wurden für die Berechnung der endgültigen  $\bar{c}_p$ -Werte einige weitere, über die Messdauer konstante Werte verwendet, welche sich aus Versuchsaufbau, Umgebungsbedingungen und Materialeigenschaften ergeben. Diese sind in Tabelle 1 aufgelistet.

**Tab. 1:** In der Berechnung verwendete Konstanten. Quelle: Skript, wenn nicht anders vermerkt

Größe	Symbol	Wert	Einheit
Dichte $H_2O$	$\rho_{H_2O}$	1	$\frac{g}{cm^3}$
Dampfdruck $H_2O$ (Raumtemperatur)	$p_{H_2O}^*$	17,5	Torr
Erdbeschleunigung	$g$	9,81	$\frac{m}{s^2}$
Verdampfungsenthalpie $N_2$ <sup>(1)</sup>	$\Delta H_{N_2}^{lv}$	5,57	$\frac{kJ}{mol}$
Siedetemperatur $N_2$	$T_s$	77,5	K
Molmasse Al <sup>(2)</sup>	$M_{Al}$	26,98	$\frac{g}{mol}$
Molmasse KBr <sup>(2)</sup>	$M_{KBr}$	119	$\frac{g}{mol}$
Molmasse Sn <sup>(2)</sup>	$M_{Sn}$	118,71	$\frac{g}{mol}$
Molmasse Zn <sup>(2)</sup>	$M_{Zn}$	65,4	$\frac{g}{mol}$
Ideale Gaskonstante	$\bar{R}$	8,314	$\frac{J}{mol \cdot K}$
Raumtemperatur <sup>(3)</sup>	$T_{Raum}$	22	$^{\circ}C$
Atmosphärendruck <sup>(3)</sup>	$p_{Luft}$	1,090	bar
Querschnitt Messzylinder <sup>(3)</sup>	$A$	2	$cm^2$
Wert Volumenskala bei $h = 0$ <sup>(3)</sup>	$V_0$	115	$mL$

<sup>1</sup> Quelle: Haynes, W.M. (ed.). CRC Handbook of Chemistry and Physics. 95th Edition. CRC Press LLC, Boca Raton: FL 2014-2015, p. 6-130

<sup>2</sup> Quelle: Computed by PubChem 2.1 (PubChem release 2019.06.18)

<sup>3</sup> Nach Versuchsdurchführung gemessen

### 3.3.1 Berechnung der Molmenge Stickstoff in der Messzylinder-Gasphase

Für jedes wie in Abschnitt 3.2 abgelesene Volumen  $V_{Mess}$  wurde über das ideale Gasgesetz die jeweilige Stoffmenge an Stickstoff in der Gasphase des Messzylinders berechnet. Die Formel dazu zeigt Gleichung (8).

$$N = \frac{p_{N_2} \cdot V_{Mess}}{\bar{R} \cdot T_{Raum}} \quad (8)$$

Dabei musste für jeden einzelnen Messwert der Wert des Partialdrucks von Stickstoff  $p_{N_2}$  wie im nächsten Abschnitt beschrieben berechnet werden.

### 3.3.2 Berechnung des Partialdrucks von Stickstoff

Der Partialdruck des Stickstoff im Kopfraum bzw. der Gasphase des Messzylinders ergibt sich durch Gleichung (9), welche aus hydrostatischen sowie thermodynamischen Überlegungen hervorgeht.

$$p_{N_2} = p_{Luft} - p_{H_2O}^* - \rho_{H_2O} \cdot g \cdot h \quad (9)$$

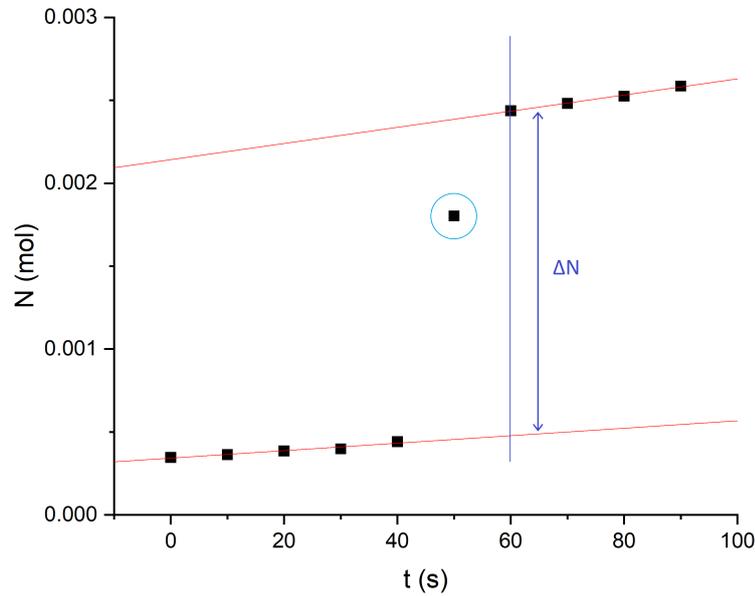
Die Höhe  $h$  in Gleichung (9) entspricht dabei der Differenz des Wasserstands im Messzylinder zu dem im äußeren Messbecher. Dies ist auch in Abbildung 1 eingezeichnet.

Der Wert der Höhe  $h$  ergibt sich wiederum aus abgelesenem Volumen  $V_{Mess}$  unter Kenntniss der Querschnittsfläche  $A$  des Messzylinders sowie des Werts der Volumenskala auf Höhe des äußeren Wasserstands im Messbecher ( $V_0$ ), also bei  $h = 0$ . Damit ergibt sich die in Gleichung (10) dargestellte Formel zur Berechnung der Höhe  $h$ .

$$h = \frac{V_0 - V_{Mess}}{A} \quad (10)$$

### 3.3.3 Berechnung der verdampften Stoffmenge an Stickstoff

Für jedes abgelesene Volumen wurde zunächst die Höhe  $h$  berechnet, daraus der Druck  $p_{N_2}$  und damit wiederum die Stoffmenge  $N$ . Diese Stoffmenge wurde für jede einzelne Probe über die Zeit der Messung aufgetragen, wodurch sich ein Schaubild ähnlich der beispielhaften Abbildung 2 ergab.



**Abb. 2:** Konstruktion und Berechnung der verdampften Menge an Stickstoff  $\Delta N$

In Abbildung 2 sind zwei lineare Bereiche zu erkennen. Der erste Bereich entspricht der sogenannten *Vorlaufphase* vor Einfüllen der Probe in das Kalorimeter. Der zweite lineare Bereich entspricht der *Nachlaufphase*, in der die Probe im Kalorimeter vollständig auf die Siedertemperatur des  $N_2$  abgekühlt ist. Der Sprung zwischen beiden Phasen ergibt sich durch den Übergang von Wärme in die siedende  $N_2$  Phase durch Abkühlen der Probe.

Zur Auswertung eines solchen  $N$ - $t$  Diagramms muss zunächst Vor- und Nachlaufphase identifiziert werden. Über lineare Regression wird eine Ausgleichsgerade durch die Vorlaufphase erstellt und bis zum Zeit-Wert des ersten Datenpunkts der Nachlaufphase verlängert. Daraus können dann die Werte der Vorlaufphase zu allen Zeitpunkten während der Nachlaufphase extrapoliert werden. Die gesuchte Menge  $\Delta N$  an verdampftem Stickstoff ergibt sich aus der Differenz der gemessenen Stoffmenge im ersten Punkt der Nachlaufphase und der extrapolierten Stoffmenge der Vorlaufphase zur selben Zeit  $t$ . Dieses Vorgehen ist in Abbildung 2 als geometrische Konstruktion dargestellt. Datenpunkte zwischen beiden linearen Phasen fließen nicht in die

Berechnung mit ein (siehe eingekreister Punkt in Abbildung 2).

Über diese Methode wurden alle erstellten N-t Diagramme ausgewertet und damit  $\Delta N$  für jede Probe berechnet.

### 3.3.4 Berechnung der molaren Wärmekapazität jeder Probe

Durch Einsetzen von  $\Delta N$ , den abgewogenen Massen  $m$ , der Molmasse  $M$  des jeweiligen Stoffes sowie den gegebenen Temperaturen  $T_{Raum}$  und  $T_s$  in die Theorie-Gleichung (7) ließ sich für jede Probe die molare Wärmekapazität nach Formel (11) berechnen.

$$\bar{c}_p = \frac{\Delta H_{N2}^{lv} \cdot \Delta N}{M \cdot m \cdot (T_{Raum} - T_s)} \quad (11)$$

Die Ergebnisse dieser Berechnung sind in Ergebnistabelle 4 dargestellt.

## 4 Ergebnisse

In Tabelle 2 sind die eingewogenen Massen aller Proben aufgelistet.

**Tab. 2:** Einwaage der untersuchten Stoffe in mg, je zwei Proben pro Stoff

Probe	m(Al)	m(KBr)	m(Sn)	m(Zn)
1	71	85	84	85
2	56	84	85	87

Tabelle 3 zeigt die Rohdaten aller Messungen, also die während der Messung jeder Probe im 10 s Takt am Messzylinder abgenommenen Volumina. Eine genaue Beschreibung der zugehörigen Messmethode findet sich in Abschnitt 3.2.

**Tab. 3:** Im 10 s Takt am Messzylinder abgelesenes Flüssigkeitsvolumen in mL

Zeit	Al(1)	Al(2)	KBr(1)	KBr(2)	Sn(1)	Sn(2)	Zn(1)	Zn(2)
0	26,0	8,0	5,5	10,5	3,9	46,8	11,7	13,6
10	26,6	8,4	6,0	12,7	4,3	47,0	12,0	14,1
20	27,0	8,9	6,3	15,0	4,6	47,2	12,4	14,4
30	27,6	9,2	6,6	17,5	5,0	47,4	12,8	14,8
40	87,0	10,2	7,2	17,4	5,4	47,6	13,2	15,2
50	94,2	41,6	7,5	19,7	5,8	47,7	13,5	15,6
60	95,2	56,2	77,0	21,7	27,3	70,3	49,3	50,5
70	96,2	57,2	77,7	24,2	27,9	71,2	50,4	51,4
80	97,0	58,2	78,4	108,0	28,3	71,5	51,3	52,3
90	97,4	59,6	78,9	109,1	28,7	71,9	52,1	52,8
100			79,6	110,0	29,2	72,1	52,7	53,4
110			80,1	111,2	29,5	72,3	53,3	53,9
120				112,8				

## 4 ERGEBNISSE

---

Die nach Methoden-Abschnitt 3.3.4 berechneten molaren Wärmekapazitäten finden sich für alle Proben in Tabelle 4. Von den berechneten Wärmekapazitäten der beiden Proben jedes untersuchten Stoffes wurde zudem ein Mittelwert  $\bar{c}_{p,mittel}$  gebildet und ebenfalls in Tabelle 4 aufgelistet.

**Tab. 4:** Verdampfte Stoffmenge an Stickstoff  $\Delta N$  und daraus berechnete  $\bar{c}_p$ -Werte

Stoff	Probe	$\Delta N [mol]$	$\bar{c}_p \left[ \frac{J}{mol \cdot K} \right]$	$\bar{c}_{p,mittel} \left[ \frac{J}{mol \cdot K} \right]$
Al	1	0,002 85	27,73	$25,96 \pm 1,78$
	2	0,001 96	24,18	
KBr	1	0,003 00	107,55	$118,90 \pm 11,34$
	2	0,003 59	130,24	
Sn	1	0,000 916	33,15	$33,98 \pm 0,82$
	2	0,000 973	34,80	
Zn	1	0,001 54	30,34	$29,61 \pm 0,73$
	2	0,001 50	28,88	

## 5 Diskussion

Bei Betrachtung der experimentell ermittelten  $\bar{c}_{p,mittel}$ -Werte aus Tabelle 4 fällt zunächst einmal der um ein Vielfaches höhere KBr-Wert auf, wobei die Werte von Al, Sn und Zn alle in einer Größenordnung liegen. Vereinfacht gesagt liegt das daran, dass im KBr-Gitter zusätzlich zu den drei Freiheitsgraden der Gitterschwingung auch Molekülschwingungen auftreten und damit mehr Energie in der Gitterstruktur 'untergebracht' werden kann, sprich die Wärmekapazität entsprechend hoch ist.

Zunächst sollen die experimentell ermittelten Werte mit den Voraussagen der Dulong-Petit'schen Regel verglichen werden. Die prozentualen Abweichungen der Regel von den experimentellen Werten sind in Tabelle 5 dargestellt.

Zur Abweichung der Dulong-Petit'schen Regel vom experimentell ermittelten Zinn-Wert trägt die sogenannte 'Zinnpest' bei. Der Begriff bezeichnet die Strukturumwandlung von Zinn in Abhängigkeit von der Temperatur. Dabei wandelt sich die  $\beta$ -Gitterstruktur des Zinn bei geringen Temperaturen zur  $\alpha$ -Form um, die eine geringere Dichte besitzt und damit die Struktur instabil werden lässt. Makroskopisch gesehen entsteht dann Zinnpulver. Da die Wärmekapazität mit sinkender Dichte steigt ist es nicht verwunderlich, dass der experimentelle Wert deutlich über dem Wert der Dulong-Petit'schen Regel liegt, die die Strukturänderung des Zinns nicht berücksichtigt.

Wie an den in Tabelle 5 aufgelisteten Abweichungen sichtbar, stellt die Dulong-Petit'sche Regel im betrachteten Temperaturbereich, außer bei Aluminium, keine besonders gute Näherung für die experimentellen Werte dar. Die Ursache

**Tab. 5:** Vergleich der experimentell ermittelten  $\bar{c}_{p,mittel}$ -Werte [ $\frac{J}{mol \cdot K}$ ] mit der Dulong-Petit'schen Regel. Die letzte Spalte zeigt die prozentuale Abweichung der Regelwerte von den experimentellen Werten.

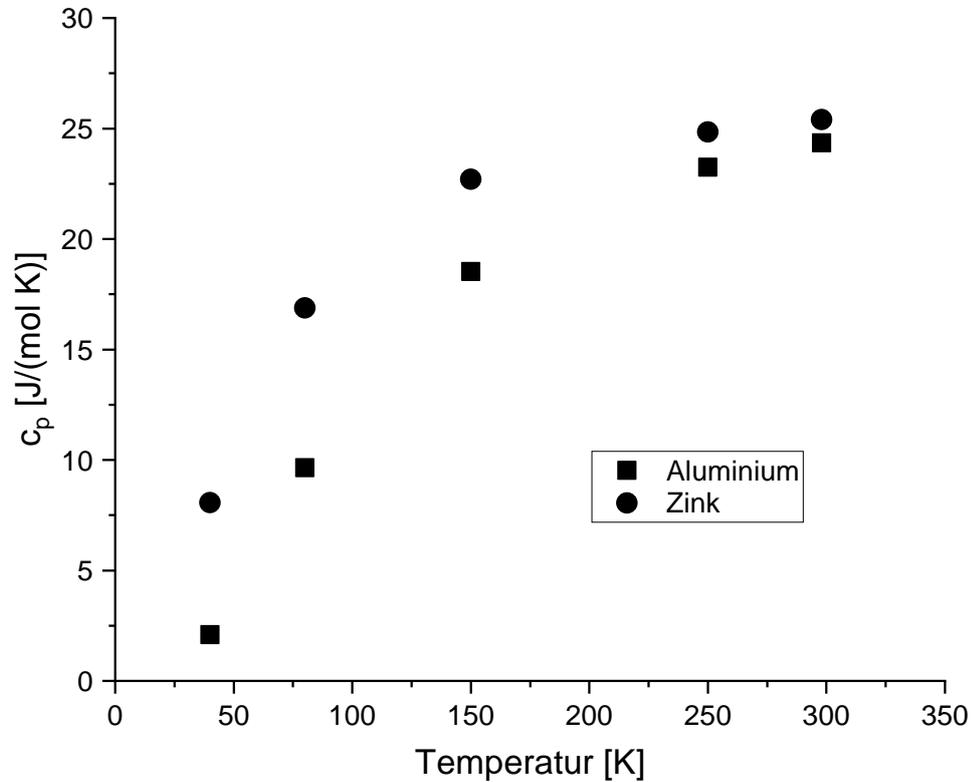
Stoff	Experiment	Dulong-Petit	Abweichung
Al	25,96	24,942	3,92 %
KBr	118,9	49,884	58,05 %
Sn	33,98	24,942	26,60 %
Zn	29,61	24,942	15,76 %

dafür liegt in der Tatsache, dass die Dulong-Petit'sche Regel nur oberhalb der Debye-Temperatur des jeweiligen Stoffs gilt, die im Experiment jedoch unterschritten wurde. Unterhalb der Debye-Temperatur ist die thermische Energie nämlich so gering, dass nicht alle möglichen Schwingungsmoden der Gitterstruktur angeregt werden können. Mit sinkender Temperatur 'frieren' immer mehr Schwingungsmoden 'ein'. Unter diesen Bedingungen gilt die Dulong-Petit'sche Regel nicht mehr, da hier davon ausgegangen wird, dass alle potenziell möglichen Schwingungsmoden des Gitters auch angeregt sind. In der Theorie gilt, dass mit steigender Debye-Temperatur des jeweiligen Stoffs ist, die Abweichung des realen  $\bar{c}_{p,mittel}$ -Werts von der Dulong-Petit'schen Regel ebenfalls zunimmt.

Es sollen nun die experimentell ermittelten  $\bar{c}_{p,mittel}$ -Werte mit wahren (also für jeweils *eine* Temperatur und nicht einen Temperaturbereich)  $c_p$ -Literaturwerten verglichen werden. Die Literaturwerte sind in Tabelle 6 gegeben. Da die experimentell ermittelten Werte sich jeweils auf ein Temperaturintervall (von 77,35 K  $N_2$ -Siedetemperatur bis 295,15 K Raumtemperatur) beziehen, ist kein direkter Vergleich mit den Literaturwerten möglich. Es lässt sich jedoch feststellen, dass die experimentellen Werte durchweg höher liegen als die wahren Literaturwerte bei  $T = 298\text{ K}$ . Das ist insofern kritisch zu betrachten, als dass die niedrigen Wärmekapazitätswerte bei niedrigen Temperaturen den experimentell ermittelten Mittelwert eigentlich 'runterziehen' müssten. Die experimentellen Werte müssten theoretisch also kleiner sein als die wahren Werte bei 298 K in Tabelle 6. Eventuell ist dieses Verhalten auf Ungenauigkeiten bei der Versuchsdurchführung zurückzuführen.

**Tab. 6:**  $c_p$ -Literaturwerte aus der Versuchsanleitung A7.

Stoff	40 K	80 K	150 K	250 K	298 K
Al	2,09	9,65	18,52	23,25	24,35
Zn	8,06	16,87	22,70	24,84	25,40
$\alpha$ -Sn	12,8	20,5	24,48	26,11	26,36
KBr	-	-	-	-	52,51



**Abb. 3:** Temperaturabhängigkeit der molaren spezifischen Wärmekapazität von Aluminium und Zink. Werte aus der Literaturwertetabelle in der Versuchsbeschreibung A7.

Im Folgenden soll nun auch die Temperaturabhängigkeit der Wärmekapazität am Beispiel von Aluminium und Zink betrachtet werden. Dazu wurden die Literaturwerte aus Tabelle 6 über die Temperatur in Abbildung 3 aufgetragen. Vergleicht man die in Abbildung 3 dargestellten Verläufe der spezifischen molaren Wärmekapazitäten von Aluminium und Zink in Abhängigkeit von der Temperatur, fällt auf, dass die Werte sich zu höheren Temperaturen hin annähern. Je geringer die Temperatur, desto weiter liegen die Werte jedoch auseinander, wobei der  $c_p$ -Wert von Aluminium stets unter dem des Zinks

liegt. Die beiden Verläufe lassen sich mit dem Debye-Modell erklären, das für Temperaturen unterhalb der Debye-Temperatur ein  $C \propto T^3$ -Verhalten voraussagt. Beim Debye-Modell werden die thermischen Gitterschwingungen eines Feststoffs mit ebenen transversalen und longitudinalen Wellen modelliert. Dass die Aluminium-Werte stets unterhalb der Zink-Werte liegen kann damit erklärt werden, dass im Zink höhere Phononenfrequenzen vorherrschen als im Aluminium. Das Zink-Gitter kann also im Niedrigtemperaturbereich bei der gleichen Temperatur mit mehr Schwingungsmoden als das Aluminium-Gitter schwingen und hat damit eine höhere Wärmekapazität. Die Debye-Temperatur, also die Temperatur bei der größtmöglichen Phononenfrequenz des Materials, liegt daher für Aluminium (428 K) deutlich über der Debye-Temperatur für Zink (308 K). Das bedeutet, dass dem Aluminium-Gitter mehr Energie zugeführt werden muss als dem Zink-Gitter, damit es in allen möglichen Schwingungsmoden schwingt.