

Grundpraktikum der Physik

Versuch XI

Spezifische Wärme von Festkörpern

Oliver Heinrich (oliver.heinrich@uni-ulm.de),
Bernd Kugler (bernd.kugler@uni-ulm.de)

Versuchsdatum: 05. Oktober 2006

Betreuer: Michael Holzwarth

13. Oktober 2006

Inhaltsverzeichnis

1	Theoretische Grundlagen	3
1.1	Definitionen und Begriffe	3
1.1.1	Das thermodynamische System	3
1.1.2	Zustandsgrößen	3
1.1.3	Freiheitsgrade	3
1.2	Zustandsgleichungen	4
1.2.1	Zustandsgleichung für das ideale Gas	4
1.2.2	Zustandsgleichung für das reale Gas	4
1.3	Die Wärmekapazität	4
1.3.1	C_p und C_V	5
1.3.2	Die Dulong-Petit Regel	5
1.4	Die Hauptsätze der Thermodynamik	6
1.4.1	Der 0. Hauptsatz	6
1.4.2	Der 1. Hauptsatz	6
1.4.3	Der 2. Hauptsatz	7
1.4.4	Der 3. Hauptsatz	7
1.5	Das Thermoelement	7
1.6	Kalorimetrie	8
2	Versuchsbeschreibung	9
2.1	Kalibrierung des Thermoelements	9
2.2	Bestimmung der Wärmekapazitäten	9
3	Versuchsauswertung	11
3.1	Kalibrierung des Thermoelements	11
3.2	Bestimmung der Wärmekapazitäten	12
4	Fehlerdiskussion	15
4.1	Kalorimeter	15
4.2	Kalibrierung des Thermoelements	15
4.3	Temperatur der Proben	15
4.4	Wiegen der Proben	16
5	Literaturverzeichnis	17

1 Theoretische Grundlagen

1.1 Definitionen und Begriffe

1.1.1 Das thermodynamische System

Ein **thermodynamisches System** ist ein System von Atomen oder Molekülen, das in Wechselwirkung zur Umgebung steht. Dabei wird Energie in Form von Wärme oder mechanischer Arbeit ausgetauscht. Solch ein System kann durch die Größen Temperatur, Druck, Volumen, Teilchendichte und weitere beschrieben werden. Ein thermodynamisches System kann *offen*, dh. ein Stoffaustausch mit der Umgebung ist möglich, wobei aber die Masse des Systems erhalten bleibt, *geschlossen*, dh. kein Stoffaustausch, jedoch ein Energieaustausch mit der Umgebung, ist möglich, *adiabatisch*, dh. kein Wärmeaustausch mit der Umgebung ist möglich, und *abgeschlossen*, dh. es besteht keine Wechselwirkung zwischen System und Umgebung, sein.

1.1.2 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*. Die drei Eigenschaften Volumen, Druck und Temperatur heißen **Zustandsgrößen**, weil durch sie ein Gleichgewichtszustand eindeutig bestimmt ist. Die Zustandsgrößen werden durch die Zustandsgleichungen verknüpft .

1.1.3 Freiheitsgrade

Die **Freiheitsgrade** f eines Systems sind Parameter, in denen es sich frei bewegen kann. Man unterscheidet Translations-, Rotations- und Schwingungsfreiheitsgrade. Die Freiheitsgrade der Translation sind die in die drei Raumrichtungen x, y, z . Der Rotationsfreiheitsgrad beschreibt die Anzahl der möglichen Drehrichtungen und der Schwingungsfreiheitsgrad bezeichnet die Anzahl der möglichen Schwingrichtungen. So hat zum Beispiel ein freier starrer Körper 6 Freiheitsgrade, 3 der Translation und 3 der Rotation. Ein einzelnes Heliumatom hat 3 Freiheitsgrade, 3 der Translation, 0 der Rotation, da die Masse der sich um den schweren Atomkern kreisenden Elektronen zu gering ist, um ein Trägheitsmoment zu erzeugen und 0 der Vibration. Ein Wasserstoffmolekül, das sich aus zwei Atomen zusammensetzt, hat hingegen 7 Freiheitsgrade. Drei der Translation in alle Raumrichtungen, 2 der Rotation in 2 Raumrichtungen, die Drehrichtung um die Verbindungsachse fällt, aus dem selben Grund, weshalb das Heliumatom keinen Rotationsfreiheitsgrad besitzt, raus, und zwei der Vibration, die sich aus der Schwingung der beiden Atome aufgrund elektromagnetischer Anziehung und Abstoßung gegeneinander ergeben. Die Energie verteilt sich nach dem *Äquipartitionsprinzip* gleichmäßig auf die einzelnen Freiheitsgrade.

1.2 Zustandsgleichungen

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

1.2.1 Zustandsgleichung für das ideale Gas

Das ideale Gas besteht aus Massepunkten, die aufeinander keine Wechselwirkung haben. Als Vertreter des idealen Gases werden gern einatomige Gase wie Helium (He) oder Edelgase herangezogen. 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 $R = 8,31 \frac{\text{J}}{\text{K} \cdot \text{mol}}$

$\nu = \frac{N}{N_A}$

1.2.2 Zustandsgleichung für das reale Gas

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

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

Hierbei wurde die Zustandsgleichung 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

1.3 Die Wärmekapazität

Die **Wärmekapazität** gibt das Vermögen eines Körpers mit Masse M an, Energie in Form von thermischer Energie zu speichern. Sie ist nach Definition diejenige Wärmemenge Q (in J), die einem Körper zugeführt werden muss, um eine Erhöhung der Temperatur T (in K) zu erreichen. Also: $C = \frac{\delta Q}{dT}$. Die Wärmekapazität ist eine Materialkonstante. Häufiger verwendet man die **spezifische Wärmekapazität** c , die die Wärmekapazität masseunabhängig macht.

$$c = \frac{\delta Q}{dT \cdot M} = \frac{C}{M}$$

Die Wärmekapazität ist abhängig von der Art der Erwärmung. Deshalb unterscheidet man zwischen der Erwärmung bei konstantem Druck (C_p) und bei konstantem Volumen (C_V).

1.3.1 C_p und C_V

Per Definitionem gilt:

$$C_p = \left(\frac{\delta Q}{dt} \right)_p$$

Nach dem 1. Hauptsatz:

$$C_p = \frac{dU}{dT} - \frac{\delta W}{dT} = \frac{dU}{dT} + \frac{pdV}{dT}$$

Für dU gilt:

$$dU = \left(\frac{\partial U}{\partial S} \right)_V dS + \left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_S dV$$

Nach einsetzen folgt:

$$C_p = \frac{\left(\frac{\partial U}{\partial S} \right)_V dS}{dT} + \left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_S + p \cdot \frac{dV}{dT}$$

Weil

$$\delta Q = \left(\frac{\partial U}{\partial S} \right)_V dS$$

, folgt

$$C_p = \left(\frac{\partial Q}{dT} \right)_V + \left[\left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_S + p \right] \frac{dV}{dT} = C_V + \left[\left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_S + p \right] \frac{dV}{dT}$$

Für Festkörper ist $\frac{dV}{dT}$ sehr klein, weshalb folgendes angenommen werden kann:

$$C_p \approx C_V$$

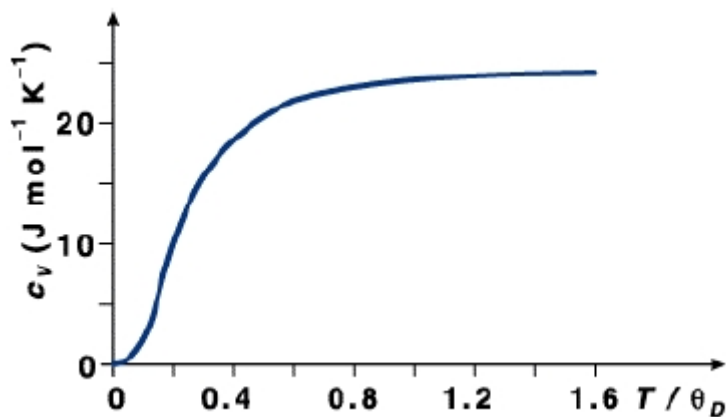
1.3.2 Die Dulong-Petit Regel

Die **Dulong-Petit Regel** besagt, dass die molare Wärmekapazität $C_{V,mol}$ eines Festkörpers den konstanten Wert $3R$ annimmt. Diese Regel gilt erst ab der *Debye-Temperatur* Θ_D , die stoffabhängig ist.

$$C = \frac{dQ}{dT}$$

$$C_{V,mol} = \left(\frac{dQ}{dT} \right)_V = \left(\frac{dU}{dT} \right)_V = \frac{d(N_A \cdot \frac{f}{2} \cdot k_B \cdot T)}{dT} = N_A \cdot \frac{f}{2} \cdot k_B = R \cdot \frac{f}{2} = R \cdot \frac{6}{2} = 3R$$

Das folgende Schaubild zeigt die spezifische Wärmekapazität c_V eines Festkörpers nach dem Debye-Modell. Im Bereich von 0 bis ungefähr $0,1 \Theta_D$ entspricht der Verlauf der Kurve dem von T^3 .



1

1.4 Die Hauptsätze der Thermodynamik

1.4.1 Der 0. Hauptsatz

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

1.4.2 Der 1. Hauptsatz

Der erste Hauptsatz ist ein Energieerhaltungssatz und lautet:

$$dU = \delta Q + dW$$

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:

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

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

¹Protokoll von Andreas Josef Birnesser und Sascha Wagner (2000)

Q eindeutig definieren lässt, da sich sowohl U als auch V ändern können. Das bedeutet, dass δQ kein totales Differential ist ($dQ \neq \delta Q$).

1.4.3 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:

$$dS \geq 0$$

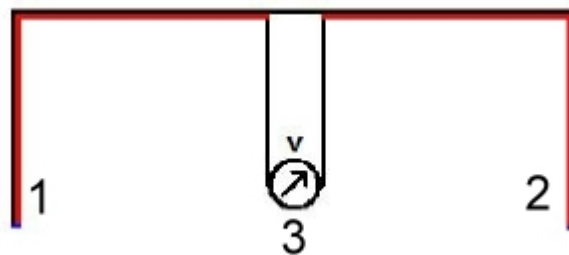
Der 2. Hauptsatz schließt die Möglichkeit eines *Perpetuum Mobile zweiter Art*, also eine Maschine, die die Umgebungswärme mittels lokaler Abkühlung vollständig in mechanische Arbeit umwandelt, aus.

1.4.4 Der 3. Hauptsatz

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

1.5 Das Thermoelement

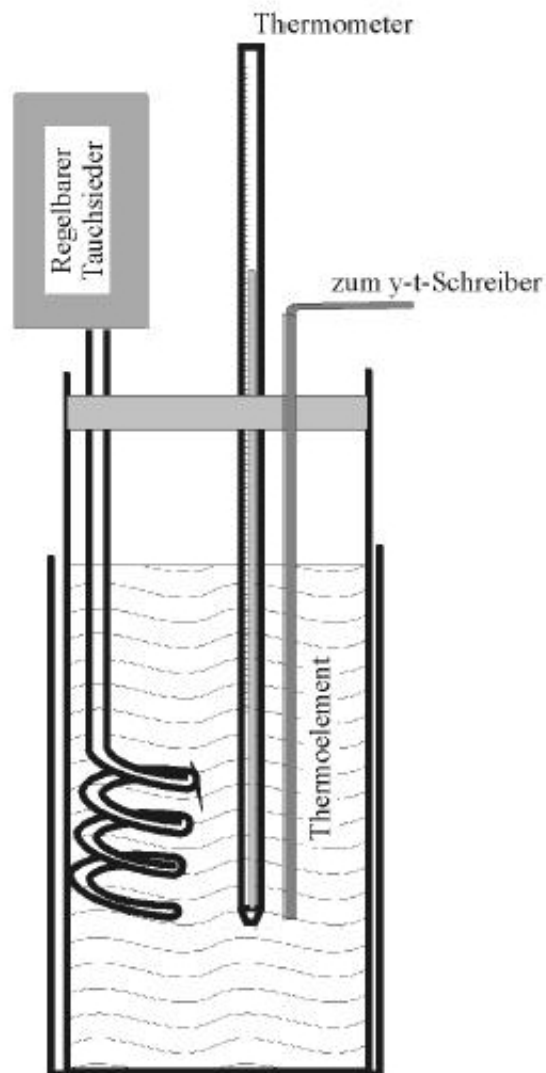
Ein **Thermoelement** ist ein Bauteil aus zwei unterschiedlichen und an einem Ende miteinander verbundenen Metallen oder Halbleitern. Sind die Enden 1 und 2 (siehe Bild) unterschiedlichen Temperaturen ausgesetzt, so wird in 3 (siehe Bild) aufgrund des Seebeckeffekts, auf den nicht weiter eingegangen wird, eine elektrische Spannung erzeugt. Die erzeugte Spannung bewegt sich in dem Bereich von mV pro K Temperaturunterschied. Aufgrund dieser Eigenschaft kann das Thermoelement zur Temperaturmessung herangezogen werden. Eine Skizze vom Thermoelement:



2

²Protokoll von Konrad Steible und Anne Götz (2005)

Der Versuchsaufbau:



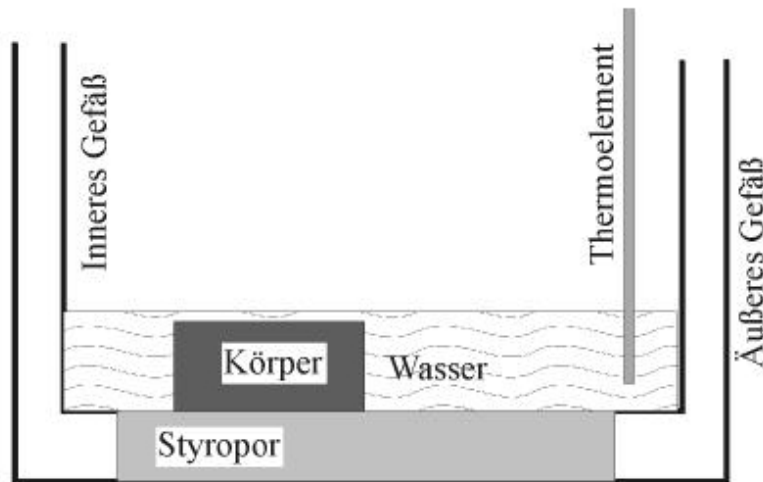
3

1.6 Kalorimetrie

Zur Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität eines Festkörpers oder einer Flüssigkeit kann man das Verfahren der **Mischkalorimetrie** nutzen. Hierzu nutzt man das Kalorimeter, ein wärmeisoliertes Gefäß. Im Idealfall ein Dewar-Gefäß, also ein verspiegelter doppelwandiger und innen evakuierter Becher. Will man die Wärmekapazität eines Gegenstandes wissen, gibt man ihn mit bekannter Temperatur in ein mit bekannter Wassermenge befülltes Kalorimeter und misst die Temperaturänderung. Aus dieser lässt sich

³Protokoll von Andreas Josef Birnesser und Sascha Wagner (2000)

die spezifische Wärmekapazität berechnen.



4

2 Versuchsbeschreibung

2.1 Kalibrierung des Thermoelements

Um das Thermoelement benutzen zu können, muss es erst kalibriert werden. Hierzu benötigt man einen Vergleichswert, der mit einem geeigneten Thermometer gemessen wird. Man erwärmt langsam Wasser in einem Behältnis mit einem Tauchsieder und achtet auf eine ständige Durchmischung mithilfe eines Magnetrührstäbchens. In dem Behältnis befindet sich außerdem noch das Ende 1 (siehe Bild Seite 7) des Thermoelements und ein Flüssigkeitsthermometer. Das Ende 2 ist in dem Dewar-Gefäß mit Eiswasser, um ständig einen konstanten Referenzwert (hier $0\text{ }^{\circ}\text{C}$) zu haben. Das Ende 3 des Thermoelements ist verbunden mit einem y-t-Schreiber. Der y-t-Schreiber trägt die Spannung im Thermoelement auf ein Blatt. Auf diesem entsteht dann die zeitabhängige Temperaturkurve. Nach dem Auftragen des Nullpunkts, der durch Halten der Enden 1 und 2 des Thermoelements in Eiswasser gewonnen wurde, muss man das circa $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ warme Wasser langsam auf etwa $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ erhitzen. Jedes Ansteigen der Temperatur um ein halbes $^{\circ}\text{C}$ wurde auf dem y-t-Schreiber durch einen Strich vermerkt. Jetzt kann man das Thermoelement zur Temperaturmessung im Bereich von $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ verwenden.

2.2 Bestimmung der Wärmekapazitäten

Bevor die Wärmekapazitäten der Metallproben bestimmt werden können, müssen das Kalorimeter und die einzelnen Proben in trockenen und nassem Zustand gewogen werden, sowie der Luftdruck zur Bestimmung der davon abhängigen Kochtemperatur des

⁴Protokoll von Andreas Josef Birnesser und Sascha Wagner (2000)

Wassers gemessen werden. Anschließend wird das Kalorimeter mit einer bekannten Wassermenge befüllt und die Metallproben, im Einzelnen ein Aluminium-, ein Eisen- und ein Messingzylinder, in das kochende Wasser gehängt, bis sie die Wärme des kochenden Wassers angenommen haben. Nun wurden die Proben einzeln in das Kalorimeter gegeben und der Temperaturverlauf mit dem y-t-Schreiber aufgezeichnet bis sich die Temperatur nicht mehr änderte. Während sich die Proben im Kalorimeter befanden, wurde das Wasser in diesem auch ständig umgerührt. Dies wurde mit allen drei Proben und jeweils drei unterschiedlichen Wassermengen durchgeführt. Die Proben müssen deshalb auch nass gemessen werden, weil beim Geben der heißen Proben in das Kalorimeter auch noch heißes Wasser anhaftet, das berücksichtigt werden muss. Die Wärmekapazität kann wie folgt berechnet werden:

$$\begin{aligned}
 Q_{auf} &= c_K \cdot m_K \cdot (T_M - T_A) + c_W \cdot m_W \cdot (T_M - T_A) \\
 Q_{ab} &= c_P \cdot m_P \cdot (T_S - T_M) + c_W \cdot m_{Tr} \cdot (T_S - T_M) \\
 Q_{auf} &= Q_{ab} \\
 \Rightarrow c_P &= \frac{(c_K m_K + c_W m_W)(T_M - T_A)}{m_P(T_S - T_M)} - \frac{m_{Tr} c_W}{m_P}
 \end{aligned}$$

Q_{auf} : aufgenommene Wärme

c_K : spezifische Wärmekapazität des Kalorimeters

m_K : Masse des Kalorimeters

T_M : Mischtemperatur im Kalorimeter

T_A : Anfangstemperatur im Kalorimeter

c_W : spezifische Wärmekapazität des Wassers

m_W : Masse des Wassers im Kalorimeter

Q_{ab} : abgegebene Wärme

c_P : spezifische Wärmekapazität der Probe

m_P : Masse der Probe

T_S : Siedetemperatur des Wassers

m_{Tr} : Masse des an der Probe anhaftenden Wassers

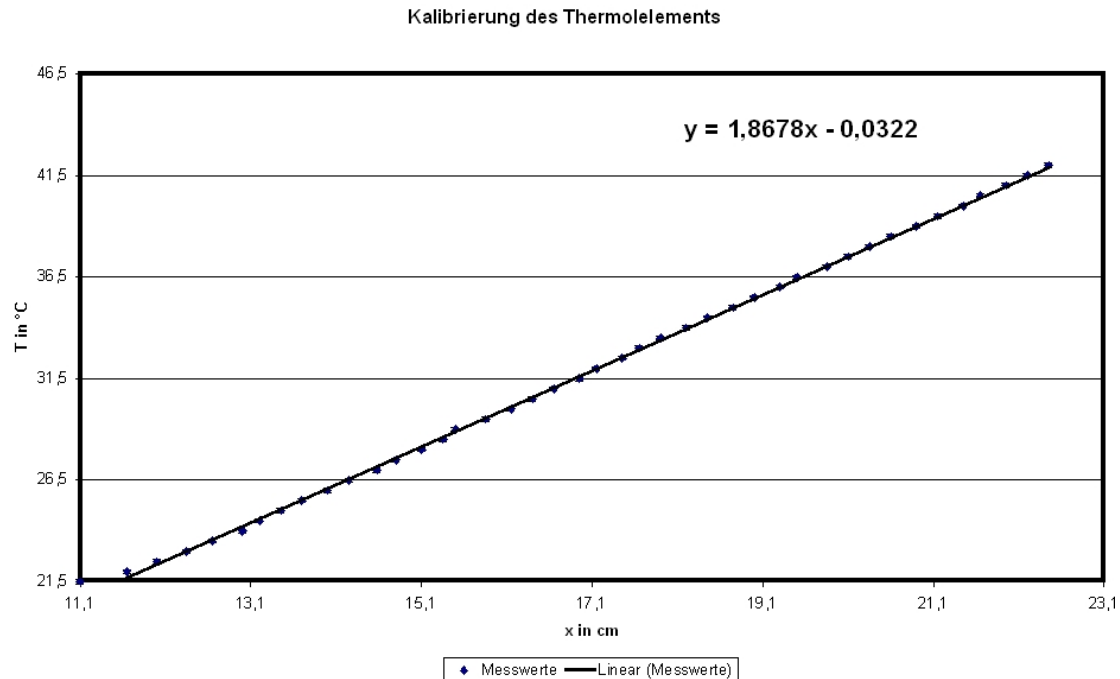
3 Versuchsauswertung

3.1 Kalibrierung des Thermoelements

Folgende Messwerte ergaben sich bei der Kalibrierung des Thermoelements:

Temperatur/°C	x/cm
0	0
21,5	11,1
22	11,65
22,5	12
23	12,35
23,5	12,65
24	13
24,5	13,2
25	13,45
25,5	13,7
26	14
26,5	14,25
27	14,58
27,5	14,8
28	15,1
28,5	15,35
29	15,5
29,5	15,85
30	16,15
30,5	16,4
31	16,65
31,5	16,95
32	17,15
32,5	17,45
33	17,65
33,5	17,9
34	18,2
34,5	18,45
35	18,75
35,5	19
36	19,3
36,5	19,5
37	19,85
37,5	20,1
38	20,35
38,5	20,6
39	20,9
39,5	21,15
40	21,45
40,5	21,65
41	21,95
41,5	22,2
42	22,45

Aus dieser Tabelle folgt folgendes x-T-Diagramm:



Die Regressionsgerade:

Lineare Regression		
$T = mx + c$	Steigung m	Offset c
	1,8678	0,0322

3.2 Bestimmung der Wärmekapazitäten

Die Siedetemperatur des Wassers wird anhand des während des Versuchs herrschenden Luftdrucks ermittelt. Bei 1 bar Luftdruck siedet Wasser genau bei 100 °C. Gemessen wurden 711,5 torr was 948,5718 hPa entspricht. Aus der Formel

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

⁵ ergibt sich für die Siedetemperatur $T_S = 98,2^\circ\text{C}$.

Die Bestimmung der Gewichte der Metallproben ergab folgendes:

Gewichte der Metallproben in g			
	trocken	benetzt	Differenz
Aluminium	108,0	108,4	0,4
Eisen	115,6	115,9	0,3
Messing	106,9	107,1	0,2

Bestimmt man die Mittelwerte der spezifischen Wärmekapazitäten, ergibt sich:

Mittelwerte der Wärmekapazitäten			
Aluminium	0,825	J/K g	
Eisen	0,405	J/K g	
Messing	0,408	J/K g	

Den Fehler errechnet man nun mit der *Fehlerfortpflanzung nach Gauß*:

$$|\Delta f| = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i \right)^2}$$

Dazu muss die folgende Formel zur Berechnung der spezifischen Wärmekapazität nach allen fehlerbehafteten Parametern abgeleitet werden:

$$c_P = \frac{(c_K m_K + c_W m_W)(T_M - T_A)}{m_P(T_S - T_M)} - \frac{m_{Tr} c_W}{m_P}$$

- $\frac{\partial c_P}{\partial m_K} = \frac{c_K \cdot (T_M - T_A)}{m_P \cdot (T_S - T_M)}$
- $\frac{\partial c_P}{\partial m_W} = \frac{c_W \cdot (T_M - T_A)}{m_P \cdot (T_S - T_M)}$
- $\frac{\partial c_P}{\partial T_M} = \frac{(c_K m_K + c_W m_W) \cdot (T_S - T_A)}{m_P \cdot (T_S - T_M)^2}$
- $\frac{\partial c_P}{\partial T_A} = -\frac{c_K m_K + c_W m_W}{m_P \cdot (T_S - T_M)}$
- $\frac{\partial c_P}{\partial m_P} = -\frac{(c_K m_K + c_W m_W)(T_M - T_A)}{m_P^2 (T_S - T_M)} + \frac{m_{Tr} c_W}{m_P^2}$
- $\frac{\partial c_P}{\partial T_S} = -\frac{(c_K m_K + c_W m_W)(T_M - T_A)}{m_P (T_S - T_M)^2}$
- $\frac{\partial c_P}{\partial m_{Tr}} = -\frac{c_W}{m_P}$

⁵http://www.fh-merseburg.de/cza/Oberstufe/gewusst/gewusst_1.htm

Folgende Messungenauigkeiten sind aufgetreten:

Ungenauigkeiten					
Temperaturen			Massen		
ΔT_A	0,1	°C	Δm_K	0,1	g
ΔT_M	0,1	°C	Δm_P	0,1	g
ΔT_S	0,1	°C	Δm_W	0,1	g
			Δm_{Tr}	0,1	g

Für die Ungenauigkeit von ΔT_A und ΔT_M wurde 0,1 °C angenommen. Die Ungenauigkeit von T_S kommt aufgrund der Ungenauigkeit des Barometers zustande. Diese lag bei 0,1 torr. Mit Hilfe der Formel von Seite 12 unten lässt sich der Fehler wie folgt berechnen.

Gauß-Fehler:					
Aluminium	1. Messung	0,022	J/K g		
	2. Messung	0,029	J/K g		
	3. Messung	0,034	J/K g		
Eisen	1. Messung	0,021	J/K g		
	2. Messung	0,028	J/K g		
	3. Messung	0,032	J/K g		
Messing	1. Messung	0,023	J/K g		
	2. Messung	0,030	J/K g		
	3. Messung	0,035	J/K g		

Und gemittelt:

Gauß-Fehler Mittelwerte:			
Aluminium	0,029	J/K g	
Eisen	0,027	J/K g	
Messing	0,030	J/K g	

Insgesamt ergibt sich:

Spezifische Wärmekapazitäten					
Aluminium	0,825	±	0,024	J/g K	
Eisen	0,405	±	0,011	J/g K	
Messing	0,408	±	0,012	J/g K	

Laut Literatur:

Spezifische Wärmekapazitäten (Literaturwerte):		
Aluminium	0,896 J/g K	'Taschenbuch der Physik', Kuchling Fachbuchverlag Leipzig 18. Auflage 2004
Eisen	0,452 J/g K	
Messing	0,384 J/g K	

Vergleich: Literatur - Messung				
	gemessen	Literatur	relative Abweichung	
Aluminium	$0,825 \frac{J}{g \cdot K}$	$0,896 \frac{J}{g \cdot K}$	-8,6%	
Eisen	$0,405 \frac{J}{g \cdot K}$	$0,452 \frac{J}{g \cdot K}$	-11,6%	
Messing	$0,408 \frac{J}{g \cdot K}$	$0,384 \frac{J}{g \cdot K}$	+6,3%	

4 Fehlerdiskussion

Die Abweichung von bis zu - 11,6 % von dem Literaturwert kann selbst mit dem Gauß-Fehler nicht erklärt werden, da die Literaturwerte nicht im Intervall der Gauß-Fehler liegen.

4.1 Kalorimeter

Ein großer Fehler kommt aufgrund der mangelnden Wärmeisolierung des Kalorimeters zustande. Zwar ist das Gefäß doppelwandig, aber dennoch leitet es die Wärme nach außen. Auf dem Boden war es nur durch ein Stück Styropor isoliert, was sicherlich nicht zur perfekten Isolierung beiträgt. Insgesamt kann man also nicht von einem abgeschlossenen System sprechen. Die Wärmeabgabe ist bei höherer Temperatur größer. Somit tritt bei T_A nicht so ein großer Fehler auf, als bei T_M . Auch beim Umrühren des Wassers im Kalorimeter während der Messung würde ständig Wärme über den Rührer nach außen transportiert. Diese Wärmeverluste sind die Hauptursache dafür, dass die experimentell bestimmten Wärmekapazitäten geringer sind (außer bei Messing), als der Literaturwert.

4.2 Kalibrierung des Thermoelements

Bei der Kalibrierung des Thermoelements wurde auch ein Fehler gemacht. Dieser kam dadurch zustande, dass das Thermometer nicht vollständig von dem Wasser umgeben war. Da bei der Kalibrierung Temperaturen von 21,5 bis 42 °C gemessen wurden, und die Lufttemperatur bei etwa 22 °C lag, ergab die Messung also niedrigere Werte, als tatsächlich vorlagen. Dadurch ergibt sich eine geringfügige Vergrößerung der ermittelten Wärmekapazitäten.

Eine Verkleinerung der ermittelten Wärmekapazitäten folgt aus der inhomogenen Temperaturverteilung. Da das Wasser mit einem Tauchsieder erwärmt wurde, ist es sehr wahrscheinlich, dass mit dem Thermometer größere Temperaturen gemessen wurden, als tatsächlich vorlagen. Auch der Rührfisch kann diesen Effekt nicht vollständig kompensieren. Dieser Effekt wird maßgeblich an der Abweichung von den Literaturwerten beteiligt sein.

4.3 Temperatur der Proben

Bei Messing ist der experimentell bestimmte Wert größer als der aus der Literatur. Dies kann man nur durch zu langsames Geben der Probe in das Kalorimeter erklären. Dadurch

konnte mehr Wasser verdunsten und gleichzeitig die Temperatur des Messings absinken. Beides führt zu einer Vergrößerung der gemessenen spezifischen Wärmekapazität.

4.4 Wiegen der Proben

Das Problem beim Wiegen der Proben war weniger die Ungenauigkeit der Waage, sondern vielmehr, die Bestimmung der der Probe anhaftenden Wassermasse. Diese wurde zwar vor dem eigentlichen Versuch bestimmt, jedoch kann man nicht sicherstellen, ob genau soviel Wasser mit in die Messung miteinbezogen wurde, wie zuvor abgewogen wurde. Da die Fäden, an denen die Proben befestigt wurden, damit man sie wieder aus dem Kalorimeter bekommt, aus Baumwolle bestehen, sind sie in der Lage Wasser aufzusaugen. Beim Wiegen wurden die Proben und die Schnur zwar auch mit Wasser benetzt, aber während dem Erhitzen im Wasserbad befinden sie sich längere Zeit im Wasser und konnten deshalb mehr Wasser aufsaugen.

5 Literaturverzeichnis

- www1.physik.uni-greifswald.de/lehre/thermodynamik/Grundbegriffe-Thermodynamik.pdf
- [http://de.wikipedia.org/wiki/Wärmekapazität](http://de.wikipedia.org/wiki/W%C3%A4rmekapazit%C3%A4t)
- <http://de.wikipedia.org/wiki/Thermoelement>
- http://www.fh-merseburg.de/cza/Oberstufe/gewusst/gewusst_1.htm
- <http://de.wikipedia.org/wiki/Thermodynamik>
- Protokoll von Andreas Josef Birnesser und Sascha Wagner (2000)
- Protokoll von Konrad Steible und Anne Götz (2005)
- Demtröder: Experimentalphysik 1; Springer Verlag, 3. Auflage (2003)
- Kuchling: Taschenbuch der Physik; Fachbuchverlag Leipzig, 18. Auflage (2004)