



SS/WS 20.10./.....

Praktikum: (P1/P2) (Mo/Di/Mi/Do) Gruppe-Nr: 22.....

Name: Müller Vorname: Patrick

Name: Dottermsich Vorname: Stephan

Versuch: spezifische Wärmekapazität (mit/ohne) Fehlerrechnung

Betreuer: Brovchenko, Oksana Durchgeführt am: 20.05.10

Abgabe am: 27.05.10

Rückgabe am: .....

Begründung:

2. Abgabe am: .....

Ergebnis: (+ / 0 / -)

Fehlerrechnung: ja / nein

Datum: 27.05.10

Handzeichen: .....

Bemerkungen: gute Fehlererklärungen bei A1  
schöne Auswertung von A2  
⇒ sehr schön ☺



Bei diesem Versuch zur spezifischen Wärmekapazität fester Körper geht es in den beiden Versuchsteilen um unterschiedliche Lernziele.

Bei der Messung der spezifischen Wärmekapazität eines Metalls in der Nähe der Zimmertemperatur mit Hilfe von Mischungsversuchen im Kalorimeter soll durch möglichst geschicktes Vorgehen der Meßfehler minimiert werden. Das Meßprinzip ist von der Schule her längst bekannt.

Bei der Messung der Temperaturabhängigkeit der spezifischen Wärmekapazität von Aluminium über einen großen Temperaturbereich geht es einerseits um das Kennenlernen dieses den meisten Praktikanten noch unbekanntes Phänomens, das klassisch nicht erklärbar ist, und andererseits um das benutzte Meßverfahren.

### **Aufgaben:**

**1. Bestimmen Sie so genau, wie es mit den verfügbaren Geräten möglich ist, die spezifische Wärmekapazität von Aluminium und höchstens noch einem weiteren der Metalle Kupfer, Messing, Blei und Zinn. Finden Sie durch Überlegung und durch Vergleichsexperimente heraus, wie ein solcher Versuch durchzuführen ist.**

Wichtige Fragen sind beispielsweise: Benützt man ein kompaktes Metallstück oder Granulat, heißes Metall und kaltes Wasser oder umgekehrt? Ist Wasser oder eine andere Flüssigkeit geeigneter? Was sind günstigste Anfangs- bzw. günstigste Endtemperatur? Was für Massen (Wasser und Metall) benutzt man und wie und wann bestimmt man sie? Muß man den Massenfehler durch anhaftendes Wasser oder die an das Kalorimeter und Zubehör abgegebene Wärmemenge berücksichtigen? Geeignetes Thermometer (Genauigkeit, Ablesbarkeit, störende Masse)? Jeweils eine Temperaturablesung oder Messung der Temperatur-Zeit-Abhängigkeit? Sind Vorexperimente mit bekannten Sollergebnissen (z.B. Wasser-Wasser-Mischung) sinnvoll?

Beschreiben und begründen Sie Ihre Versuchsplanung. Messen Sie sehr sorgfältig. Wiederholen Sie Messungen. Variieren Sie das Verfahren. Äußern Sie sich am Ende der Auswertung noch einmal zum Verfahren und geben Sie mit Begründungen an, welche besten Versuchsbedingungen Sie jetzt wählen würden.

**2. Messen Sie die spezifische Wärmekapazität von Aluminium in Abhängigkeit von der Temperatur zwischen etwa 100K und 300K.**

Kühlen Sie dazu den Aluminium-Hohlzylinder mit flüssiger Luft (flüssigem Stickstoff) in einem kleinen Styroporkasten ab. Dabei ist das Tragen einer **Schutzbrille** vorgeschrieben! Heizen Sie dann mit Hilfe der im Zylinder eingebauten Heizwicklung den Alu-Zylinder innerhalb des Styropor-Isolierbehälters bei konstanter Heizleistung (ca. 20-30W; Spannung am Versorgungsgerät, Strom am Meßgerät DVM M818 ablesen!) wieder auf und registrieren Sie mit Hilfe eines X/t-Schreibers die Aufwärmkurve, also die Temperatur über der Zeit. Als Sonde für die Temperatur dient ein NiCr-Ni-Thermoelement, als Referenztemperatur Eiswasser. Diese Messung kann schon gestartet werden, bevor mit den Arbeiten zu Aufgabe 1 begonnen wird. Sie läuft ja, abgesehen von gelegentlichen Kontrollen der Heizleistung, automatisch ab. Für die Berücksichtigung der dem Aluminium-Zylinder trotz Isolierung von der Umgebung zugeführten Wärme wird eine zweite, gleichartige Messung benötigt, bei der die elektrische Heizung ausgeschaltet bleibt. Eine solche Messung würde am Versuchstag zu lange dauern. Sie erhalten deshalb leihweise eine entsprechende X/t-Schreiber-Aufwärmkurve für Ihre Auswertung.

### **Zubehör:**

**Dewar-Kalorimeter** (250cm<sup>3</sup>), Plexiglasdeckel mit Einfüllöffnung, Trichter Thermometerdurchführungen; **diverse Messing-, Aluminium- und Kupferzylinder**, Aluminium-, Blei-, Zinn- und Kupfergranulat;

**Quecksilberthermometer** (-3 bis +50°C mit 0,2°C-Teilung),

**Quecksilberthermometer** (-10 bis +150°C mit 1°C-Teilung oder besser);

**Halbleiterthermometer** mit Digitalanzeige (0,1°C-Schritte);

**Heißwasserbereiter**, elektrisch beheizt, max. 300cm<sup>3</sup>,

**Präzisionsschnellwaage;**

**diverse Meßzylinder**, Erlenmeyerkolben, Bechergläser, Dewar-Gefäß für flüssige Luft, Dewar-Gefäß für Eiswasser;

**Aluminium-Hohlzylinder** (376g) mit eingebauter Heizwicklung (max.3A) und mit Bohrung für Thermoelement;

**Ni-CrNi-Thermoelement** (Befestigungsschraube nur **ganz zart anziehen!** Thermospannungen siehe unten.);

**Styropor-Isolierbehälter;**

Aufwärmkurve des Alu-Zylinders ohne Heizung, leihweise für die Auswertung . Die Daten sind auf der Praktikums homepage verfügbar;

**Millivoltmeter** (Knick);

**Vielfachmeßgerät** (DVM M818);

**Gleichstromversorgungsgerät** (max. 16V, 5A);

**Computer mit Picoscope** als Datenlogger;

**Schutzbrillen, Pinzette.**

**Thermospannungen des NiCr-Ni-Thermoelements in Millivolt:**

°C	0	2	4	6	8	10
-190	-5,60	-5,63	-5,67	-5,70	-5,73	-5,75
-180	-5,43	-5,46	-5,50	-5,53	-5,57	-5,60
-170	-5,24	-5,28	-5,32	-5,35	-5,39	-5,43
-160	-5,03	-5,08	-5,12	-5,16	-5,20	-5,24
-150	-4,81	-4,86	-4,90	-4,95	-4,99	-5,03
-140	-4,58	-4,62	-4,67	-4,72	-4,77	-4,81
-130	-4,32	-4,37	-4,42	-4,48	-4,52	-4,58
-120	-4,06	-4,11	-4,16	-4,22	-4,27	-4,32
-110	-3,78	-3,84	-3,89	-3,95	-4,00	-4,06
-100	-3,49	-3,55	-3,61	-3,66	-3,72	-3,78
-90	-3,19	-3,25	-3,31	-3,37	-3,43	-3,49
-80	-2,87	-2,93	-3,00	-3,06	-3,12	-3,19
-70	-2,54	-2,61	-2,67	-2,74	-2,80	-2,87
-60	-2,20	-2,27	-2,34	-2,41	-2,47	-2,54
-50	-1,86	-1,93	-2,00	-2,07	-2,13	-2,20
-40	-1,50	-1,57	-1,64	-1,72	-1,79	-1,86
-30	-1,14	-1,21	-1,28	-1,36	-1,43	-1,50
-20	-0,77	-0,84	-0,92	-0,99	-1,06	-1,14
-10	-0,39	-0,46	-0,54	-0,62	-0,69	-0,77
0	0,00	-0,08	-0,16	-0,23	-0,31	-0,39
0	0,00	0,08	0,16	0,24	0,32	0,40
10	0,40	0,48	0,56	0,64	0,72	0,80
20	0,80	0,88	0,96	1,04	1,12	1,20
30	1,20	1,28	1,36	1,44	1,53	1,61
40	1,61	1,69	1,77	1,85	1,94	2,02

**Literatur:**

Walcher: *Praktikum der Physik*

Hellwege: *Einführung in die Festkörperphysik*

Dekker: *Solid State Physics*

Kittel: *Elementary solid state physics, a short course*

Gerthsen, Kneser, Vogel: *Physik*

Einstein: *Annalen der Physik*, Band 39 (1907)

# Vorbereitung zu P2-33 Spezifische Wärmekapazität

Stephan Dottermusch, Patrick Müller  
Gruppe Do-22

25. Juni 2010

## Inhaltsverzeichnis

1	Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität	2
2	Spezifische Wärmekapazität von Aluminium	3

## Allgemeines

Unter der spezifischen Wärmekapazität  $c$  eines Stoffes versteht man die Menge an Energie (Wärmemenge)  $\Delta Q$ , die benötigt wird, eine bestimmte Masse  $m$  des Stoffes um eine gewisse Temperatur  $\Delta T$  zu erhöhen. Sie stellt also ein Maß für die in einem Körper durch dessen Temperatur gespeicherte Wärmemenge dar.

$$c = \frac{\Delta Q}{m \cdot \Delta T}$$

Die spezifische Wärmekapazität ist temperaturabhängig (vgl. Aufgabe 2).

## 1 Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität

In diesem Versuch soll über ein einfaches Verfahren die spezifische Wärmekapazität  $c_{Al}$  von Aluminium gemessen werden. Hierzu erwärmen wir das Metall auf eine höhere Temperatur und bringen es in das kältere Wasserbad. Nach einiger Zeit wird sich eine konstante Mischungstemperatur  $T_M$  einstellen. Aus ihr und weiteren bekannten Angaben lässt sich anschließend die spezifische Wärmekapazität berechnen.

$$\begin{aligned}\Delta Q_{Al} &= \Delta Q_{H_2O} \\ c_{Al} \cdot m_{Al} \cdot (T_{Al} - T_M) &= c_{H_2O} \cdot m_{H_2O} \cdot (T_M - T_{H_2O}) \\ \Rightarrow c_{Al} &= \frac{c_{H_2O} \cdot m_{H_2O}}{m_{Al}} \cdot \frac{T_M - T_{H_2O}}{T_{Al} - T_M}\end{aligned}$$

Die Genauigkeit des Versuchs hängt stark von der Durchführung ab. Deshalb seien im Folgenden einige Überlegungen hierzu:

**Metallform:** Das Metall wird am besten in Form eines Granulats verwendet, da dann aufgrund der größeren Kontaktfläche der Wärmeaustausch mit dem Wasserbad schneller geschieht als bei einem einzelnen Stück. So wird weniger Wärme an die Umgebung abgegeben und die Messung somit verbessert. Außerdem kann man bei einem einzelnen Stück schwer feststellen, ob es innen schon komplett ausgekühlt ist.

**Temperaturen:** Das Wasser sollte kälter als das Metall sein, nicht umgekehrt, da wir erwarten, dass es eine höhere Wärmekapazität als das Aluminium haben wird. Die engültige Mischungstemperatur dürfte also (bei unseren Masseverhältnissen) näher an der Wassertemperatur liegen. Liegt diese nun merklich höher als die Umgebungstemperatur, so hätten wir hier wesentlich größere Wärmeverluste an die Umgebung.

Des Weiteren sollte daher auch für die Anfangstemperatur des Wasserbads die Zimmertemperatur gewählt werden. Das Metall sollte zudem nicht so heiß sein, dass es eine nennenswerte Menge Wasser zum Sieden bringen würde. Ideal wäre eine Temperatur knapp unterhalb von 100°C.

**Flüssigkeit:** Es wäre auch denkbar, andere Flüssigkeiten als Wasser zu verwenden. Jedoch zeigt sich beim Wasser eine in unserem Temperaturbereich annähernd konstante Wärmekapazität, was wir in unserer Berechnungsformel auch voraussetzen.

**Massen:** Da die Messung in einem Kalorimeter durchgeführt wird, bestimmt man die Wassermasse am besten durch eine Differenzmessung zwischen leerem und vollem Kalorimeter. So kann man auch eventuell vorhandenen Fehlern durch Wasserrückstände in der Heizvorrichtung vorbeugen. Die Masse des Aluminiums misst man mit einer Waage.

**Thermometer:** Das verwendete Thermometer sollte möglichst genau sein und selbst eine sehr geringe Masse aufweisen, damit wenig Wärme an es abgegeben werden kann. Für eine Korrekturrechnung wäre es von Vorteil, seine spezifische Wärmekapazität zu kennen.

Mit dem Kalorimeter kann die Wärme, die an den Versuchsaufbau abgegeben wurde, näherungsweise bestimmt werden.

**Messung:** Eine zeitabhängige Temperaturmessung wäre, wenn überhaupt, nur automatisiert sinnvoll, da sich die Mischungstemperatur relativ schnell einstellen wird. Bei „händischer“ Messung wäre es evtl. sinnvoll, mehrere Messpunkte im Abstand einiger Sekunden zu nehmen, um besser feststellen zu können, wann sich die endgültige Mischungstemperatur eingestellt hat.

Eventuell können einige Vormessungen mit bekanntem Ergebnis durchgeführt werden, um Messfehler besser abschätzen und das Messverfahren optimieren zu können.

## 2 Spezifische Wärmekapazität von Aluminium

Um die temperaturabhängige spezifische Wärmekapazität eines Aluminium-Hohlzylinders zu bestimmen, wird dieser zunächst mittels flüssigem Stickstoff auf 100 K abgekühlt. Anschließend wird der Aluminium-Zylinder wieder auf 300 K erhitzt. Hierzu wird ein Heizdraht verwendet, der eine konstante Leistung im Bereich von 20 bis 30 W bringt.

Während des Heizvorgangs wird in Zeitintervallen die Temperatur an einem NiCr-Ni-Thermoelement abgelesen. Das Thermoelement besteht im Grunde aus zwei Metallplättchen, eines aus NiCr und das Andere aus Ni. Die Plättchen berühren sich sowie den Stoff, dessen Temperatur bestimmt werden soll, nur an einem Ende. Beide Plättchen sind gleich lang, zwischen ihren beiden anderen Enden kann eine Spannung gemessen werden. Diese kommt zustande auf Grund des Seebeck-Effektes, da die beiden Plättchen Wärme unterschiedlich gut leiten. Die gemessene „Thermospannung“ kann aus einer Tabelle auf die Temperatur des Stoffes umgerechnet werden. Die Eichung erfolgt mittels der Referenztemperatur von Eiswasser, dessen Temperatur liegt auch auf lange Sicht konstant auf 273 K.

Anstatt für den recht langen Erwärmungsprozess viele Messpunkte aufzunehmen, wird ein X/t-Schreiber verwendet, der konstant eine Kurve der Temperatur über die Zeit aufträgt. Da die Leistung (P) der „Heizung“ konstant ist und keine Arbeit verrichtet wird, lässt sich folgende Gleichung aufstellen:

$$\delta Q = \delta U = P \cdot \Delta t = c(T) \cdot m \cdot \Delta T$$

$c(T)$  ist hierbei die temperaturabhängige spezifische Wärmekapazität und  $m$  die Masse der Zylinders. Wir können die Gleichung nun nach  $c(T)$  umstellen und erhalten:

$$c(T) = \frac{P}{m} \cdot \frac{1}{\dot{T}(T)}$$

Somit ist die erhalten wir die spezifische Wärmekapazität durch ableiten der Temperatur-Kurve nach der Zeit, bzw. aus der Steigung der Kurve.

Nun ist noch zu beachten, dass nicht nur die Heizwendel das Aluminium erwärmt, sondern auch die Umgebung. Diese Erwärmung muss aus der oben genannten Gleichung noch herausgerechnet werden. Allerdings ist dieser Prozess temperaturabhängig und nicht linear, somit ist eine weitere Messung ohne Heizwendel nötig, so dass nur die Umgebung den Zylinder erwärmt. Da dieser weitere Versuch allerdings viel zu lange brauchen würde, wird uns eine entsprechende Kurve direkt zu Verfügung gestellt. Aus dieser Kurve kann die temperaturabhängige Leistung der Umgebung berechnet werden:

$$P_A(T) = c(T) \cdot m \cdot \dot{T}_A(T)$$

Letzten Endes ergibt sich folgende Gleichung für unsere Messung:

$$c(T) = \frac{P_A + P_H}{m \cdot \dot{T}(T)} = \frac{P_H}{m \cdot (\dot{T}(T) - \dot{T}_A(T))}$$

# Messprotokoll

Nr. 2

Heizung:  $U = 12,4 \text{ V}$   
 $I = 2,3 \text{ A}$

Nr. 1

1) Aluminium Granulat  $\rightarrow 13,2 \text{ g}$   
Kalorimeter leer:  $221,8 \text{ g}$   
mit Wasser:  $371,9 \text{ g}$

Anfangstemp - Wasser:  $22,3^\circ \text{C}$

Anfangstemp - Alu:  $98,0^\circ \text{C}$  (30s an Luft, bis es ins Wasserbad gelangte)

Mischungstemp.:  $23,2^\circ \text{C}$

2) Aluminium - Zylinder:  $30,6 \text{ g}$   
Kalorimeter mit Wasser:  $371,0 \text{ g}$

(kleiner Zylinder)

Anfangstemp  $\text{H}_2\text{O}$ :  $23,7^\circ \text{C}$

Anfangstemp Alu:  $96,2^\circ \text{C}$

Mischtemp:  $25,6^\circ \text{C}$

			1.	2.
3)	Masse	Kupferzylinder	<del>277 g</del>	271 g
	Masse	H <sub>2</sub> O + Bechle	<del>422 g</del>	422 g
	Anfangstemp	H <sub>2</sub> O	/	21,5 °C
	Anfangstemp	Cu	<del>97,0 °C</del>	95,6 °C
	Mischtemp		/	26,6 °C

4)	Masse	Cu-Granulat	86,6 g	(-0,9 g)
	Masse	H <sub>2</sub> O + Becher	391,0 g	
	Anfangstemp.	H <sub>2</sub> O	21,7 °C	
	Anfangstemp.	Cu	97,0 °C	
	Mischtemp.		24,7 °C	

5)	Masse	Pb	75,2 g	(-1 g)
	Masse	H <sub>2</sub> O + Bechle	377,4 g	
	A. T.	H <sub>2</sub> O	27,6 °	
	A. G.	Pb	96,0 °	
	Mischtemp.		23,4 °	

6)	Masse	Aluminium-Zylinder	51 g	(große Zylinder)
	Masse	H <sub>2</sub> O + Becher	413,7 g	
	Anfangstemp	H <sub>2</sub> O	21,7 °C	
	Anfangstemp	Al	95,0 °C	
	Mischtemp.		25,4 °C	

*[Handwritten signature]*

# Auswertung zu P2-33 Spezifische Wärmekapazität

Stephan Dottermusch, Patrick Müller  
Gruppe Do-22

25. Juni 2010

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität</b>	<b>2</b>
1.1	Aluminium . . . . .	2
1.2	Weitere Messungen . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Temperaturabhängigkeit der Wärmekapazität</b>	<b>5</b>

# 1 Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität

In diesem Versuch haben wir jeweils eine Metallmasse in einem separaten Wasserbad auf knapp unter 100°C erwärmt und in ein Wasserbad bei Raumtemperatur gebracht. Anschließend haben wir mit einem Thermometer die Temperatur des Wasserbads überwacht und, sobald sie sich eingestellt hatte, die Mischungstemperatur gemessen. Zusätzlich haben wir vorher die an dem Versuch beteiligten Massen von Wasser und Metall bestimmt. Die spezifische Wärmekapazität des Metalls lässt sich dann wie folgt berechnen:

$$c_{Met} = \frac{c_{H_2O} \cdot m_{H_2O}}{m_{Met}} \cdot \frac{T_{Misch} - T_{H_2O}}{T_{Met} - T_{Misch}}$$

Die Masse des Wassers wurde dabei jeweils durch eine Differenzmessung aus leerem und gefülltem Kalorimeter bestimmt, während das Metall mit einer Waage abgewogen wurde.

## 1.1 Aluminium

Zunächst haben wir mit mehreren Messungen Aluminium in verschiedenen Formen (Granulat, Zylinder) untersucht. Der Literaturwert liegt bei  $c_{Al} = 0,905 \frac{J}{g \cdot K}$  (bei  $T=0^\circ C$ ).

### a) Aluminium-Granulat

Messwerte:

Masse Granulat:	13,2g	Anfangstemp. Wasser:	22,3°C
Masse Wasser:	50,1g	Anfangstemp. Aluminium:	98,0°C
		Mischungstemp.:	23,2°C

Es ergibt sich für die spezifische Wärmekapazität:

$$c_{Al,1} = 0,191 \frac{J}{g \cdot K}$$

Dieser Wert liegt leider deutlich unter dem zu erwartenden Wert.

### b) Aluminium-Zylinder (klein)

Messwerte:

Masse Zylinder:	30,6g	Anfangstemp. Wasser:	23,1°C
Masse Wasser:	49,2g	Anfangstemp. Aluminium:	96,2°C
		Mischungstemp.:	25,6°C

Es ergibt sich für die spezifische Wärmekapazität:

$$c_{Al,2} = 0,239 \frac{J}{g \cdot K}$$

Auch dieser Wert scheint viel zu tief zu liegen.

**c) Aluminium-Zylinder (groß)**

Messwerte:

Masse Zylinder:	51,0g	Anfangstemp. Wasser:	21,7°C
Masse Wasser:	191,9g	Anfangstemp. Aluminium:	95,0°C
		Mischungstemp.:	25,4°C

Es ergibt sich für die spezifische Wärmekapazität:

$$c_{Al,3} = 0,838 \frac{J}{g \cdot K}$$

Dieses Ergebnis stimmt nun relativ gut mit dem Literaturwert überein, es besteht lediglich eine Abweichung von 7%.

**Fazit**

Es scheint also, als wären die ersten beiden Messergebnisse von einem gravierenden systematischen Fehler behaftet. Bei näherer Untersuchung zeigt sich, dass vermutlich die relativ geringe Wassermenge in diesem Versuch zu den Verfälschungen führte. Dann nämlich spielen die Wärmeverluste eine Rolle, die an das Sieb verloren gingen, das wir bei allen drei Versuchen als Träger für das Aluminium eingesetzt haben. Dessen spezifische Wärmekapazität müsste zur Korrektur der Ergebnisse ebenfalls gemessen werden. Eine weitere Rolle spielen bei derart geringen Wassermengen natürlich auch die Verluste an das Kalorimeter und die weitere Umgebung. Dabei wurden von uns zu Beginn bewusst geringere Wassermengen gewählt, da wir hierdurch eine größere und deutlichere Temperaturdifferenz zur Anfangstemperatur erwarteten, damit Verluste an die Umgebung eben keine große Rolle spielten. Offensichtlich erwies sich diese Maßnahme jedoch als kontraproduktiv. Bei der dritten Messung wollten wir bewusst mehr Wasser einsetzen, was dann auch zu dem deutlich besseren Ergebnis geführt hat.

Weitere Fehlerquellen lagen sicherlich in der Bestimmung der Anfangstemperatur des Aluminiums. Dieses haben wir auf einer kleinen Herdplatte in einem Wasserbad erhitzt und dann jeweils, wenn das Wasser zu sieden begann, den Strom abgeschaltet, kurze Zeit gewartet, und dann die Wassertemperatur bestimmt. Es ist gut möglich, dass die Temperatur des Aluminiums hier nicht exakt mit der des Wassers übereinstimmte, da der Wärmeaustausch nicht beliebig schnell erfolgt. Auch war das Aluminium beim Umfüllen in das Kalorimeter bis zu 30 Sekunden an der Raumluft, was mit Sicherheit zu einer weiteren Abkühlung geführt hat. Besonders beim Granulat erwies sich das Umfüllen als schwierig und dauerte entsprechend länger. Auch die Oberfläche des Granulats ist wesentlich größer, was den Wärmeverlust zusätzlich erhöhte.

Der Fehler durch anhaftendes Wasser hingegen dürfte relativ unbedeutend sein, da wir die Aluminiumkörper stets abgeschüttelt haben und sich auch nicht sehr viel Wasser an ihnen ansammeln kann. Der Fehler für die Wassermasse dürfte so unter 1g liegen.

Da wir außerdem in den meisten weiteren Messungen (wie im Folgenden zu sehen) stets einen zu niedrigen Wert erhielten, liegt der Verdacht nahe, dass wir einen zusätzlichen systematischen Fehler in unserem System haben.

**1.2 Weitere Messungen**

Analog zu der Aluminium-Messung haben wir anschließend noch Kupfer- und Blei-Granulat, sowie einen Kupferzylinder untersucht

**Kupfer-Granulat**

Messwerte:

Masse Granulat:	85,7g	Anfangstemp. Wasser:	21,7°C
Masse Wasser:	169,2g	Anfangstemp. Kupfer:	97,0°C
		Mischungstemp.:	24,7°C

Es ergibt sich für die spezifische Wärmekapazität:

$$c_{Cu,1} = 0,339 \frac{J}{g \cdot K}$$

**Kupfer-Zylinder**

Messwerte:

Masse Zylinder:	271,0g	Anfangstemp. Wasser:	21,5°C
Masse Wasser:	200,2g	Anfangstemp. Kupfer:	95,6°C
		Mischungstemp.:	26,6°C

Es ergibt sich für die spezifische Wärmekapazität:

$$c_{Cu,2} = 0,229 \frac{J}{g \cdot K}$$

Der Literaturwert für Kupfer liegt bei  $c_{Cu} = 0,385 \frac{J}{g \cdot K}$ . Wir sehen also, dass die Messung mit dem Granulat hier ein besseres Ergebnis gebracht hat (Abweichung: 12,2%). Ein möglicher Grund hierfür wäre, dass der Zylinder auch hier wieder nicht exakt die Temperatur des Heizbades hatte bzw. er auch nicht seine gesamte Wärme an das Wasserbad abgeben konnte. Ein Blick auf die Masseverhältnisse offenbart noch eine weitere Schwäche der Messung: Die Masse des Kupferzylinders ist hier sogar größer als die des Wassers, wodurch die oben beim Aluminium bereits angeführten Probleme ebenfalls wieder eine große Rolle spielen. Beim Granulat ist das Verhältnis geschickter gewählt.

**Blei-Granulat**

Messwerte:

Masse Granulat:	74,2g	Anfangstemp. Wasser:	21,6°C
Masse Wasser:	149,6g	Anfangstemp. Blei:	96,0°C
		Mischungstemp.:	23,4°C

Es ergibt sich für die spezifische Wärmekapazität:

$$c_{Pb} = 0,209 \frac{J}{g \cdot K}$$

Dieser Wert entspricht einer Abweichung von 64% zum Literaturwert von  $c_{Pb} = 0,127 \frac{J}{g \cdot K}$ . Auch dieses Ergebnis ist leider eher schlecht, es liegt zu hoch. Die Abweichung nach oben können wir uns eventuell damit erklären, dass das Blei eine höhere Anfangstemperatur, als die von uns gemessene Wassertemperatur besaß, evtl. durch einen direkten Kontakt zum Boden des Heizbeckers.

## 2 Temperaturabhängigkeit der Wärmekapazität

Für diese Aufgabenstellung ist zunächst folgende Tabelle notwendig:

°C	0	2	4	6	8	10
-190	-5,60	-5,63	-5,67	-5,70	-5,73	-5,75
-180	-5,43	-5,46	-5,50	-5,53	-5,57	-5,60
-170	-5,24	-5,28	-5,32	-5,35	-5,39	-5,43
-160	-5,03	-5,08	-5,12	-5,16	-5,20	-5,24
-150	-4,81	-4,86	-4,90	-4,95	-4,99	-5,03
-140	-4,58	-4,62	-4,67	-4,72	-4,77	-4,81
-130	-4,32	-4,37	-4,42	-4,48	-4,52	-4,58
-120	-4,06	-4,11	-4,16	-4,22	-4,27	-4,32
-110	-3,78	-3,84	-3,89	-3,95	-4,00	-4,06
-100	-3,49	-3,55	-3,61	-3,66	-3,72	-3,78
-90	-3,19	-3,25	-3,31	-3,37	-3,43	-3,49
-80	-2,87	-2,93	-3,00	-3,06	-3,12	-3,19
-70	-2,54	-2,61	-2,67	-2,74	-2,80	-2,87
-60	-2,20	-2,27	-2,34	-2,41	-2,47	-2,54
-50	-1,86	-1,93	-2,00	-2,07	-2,13	-2,20
-40	-1,50	-1,57	-1,64	-1,72	-1,79	-1,86
-30	-1,14	-1,21	-1,28	-1,36	-1,43	-1,50
-20	-0,77	-0,84	-0,92	-0,99	-1,06	-1,14
-10	-0,39	-0,46	-0,54	-0,62	-0,69	-0,77
0	0,00	-0,08	-0,16	-0,23	-0,31	-0,39
0	0,00	0,08	0,16	0,24	0,32	0,40
10	0,40	0,48	0,56	0,64	0,72	0,80
20	0,80	0,88	0,96	1,04	1,12	1,20
30	1,20	1,28	1,36	1,44	1,53	1,61
40	1,61	1,69	1,77	1,85	1,94	2,02

Quelle: P-2 Seite der Uni

Sie zeigt die Umrechnung der thermischen Spannung, welche das Messgerät gemessen hat, in die Temperatur.

Wir haben zunächst das Aluminium innerhalb eines Styroporgefäßes mittels flüssigem Stickstoff abgekühlt. Als es zu keiner nennenswerten Temperaturänderung mehr kam, bei  $-5,70\text{mV} \equiv -196^\circ\text{C}$ , nahmen wir den Aluminiumzylinder heraus und platzierten ihn in die Box, in welcher die eigentlich Messung stattfand. Wir stellten für die Messung eine konstante Leistung ein:

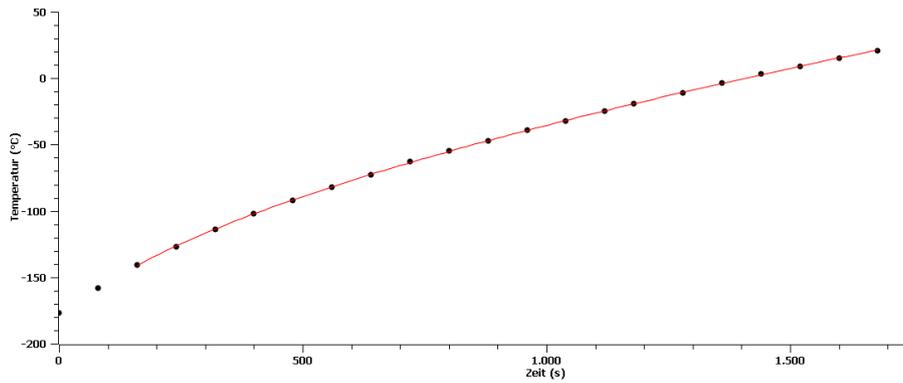
$$P = U \cdot I = 12,4\text{V} \cdot 2,3\text{A} = 28,52\text{W}$$

Eiswasser diente als  $0^\circ\text{C}$  Referenz. Das "PicoScope" empfing die Daten des Thermoelementes, am PC konnten wir dann die Messung starten. Für 1700 Sekunden, wurde alle 10 Sekunden ein Messpunkt aufgetragen. Die Messung startete bei  $-5,38\text{mV} \equiv -177^\circ\text{C}$  und endete bei  $0,89\text{mV} \equiv 22^\circ\text{C}$ .

Da es keine Möglichkeit gibt, die Werte schnell umzurechnen, werden wir nur 22 Messpunkte verwenden:

t (s)	U (mV)	T (°C)	t (s)	U (mV)	T (°C)
0	-5,38	-177	880	-1,75	-47
80	-4,98	-158	960	-1,46	-39
160	-4,60	-141	1040	-1,20	-32
240	-4,25	-127	1120	-0,94	-25
320	-3,90	-114	1180	-0,74	-19
400	-3,56	-102	1280	-0,41	-11
480	-3,25	-92	1360	-0,14	-3,5
560	-2,93	-82	1440	0,11	3
640	-2,63	-73	1520	0,35	9
720	-2,32	-63	1600	0,59	15
800	-2,031	-55	1680	0,84	21

Es ergibt sich somit für die Temperaturzunahme über die Zeit folgendes Schaubild:



Das Schaubild wurde mittels SciDavis erstellt. Die ersten zwei Messpunkte konnten wir nicht in die Interpolation mit einbeziehen, da sonst das numerische Interpolationsverfahren aus uns nicht bekannten Gründen versagte. Die eingezeichnete Anpassungs-Funktion lautet:

$$T(t) = 2,9059 \cdot t^{0,5816} - 197,0430$$

Wie können mach  $t(T)$  umstellen:

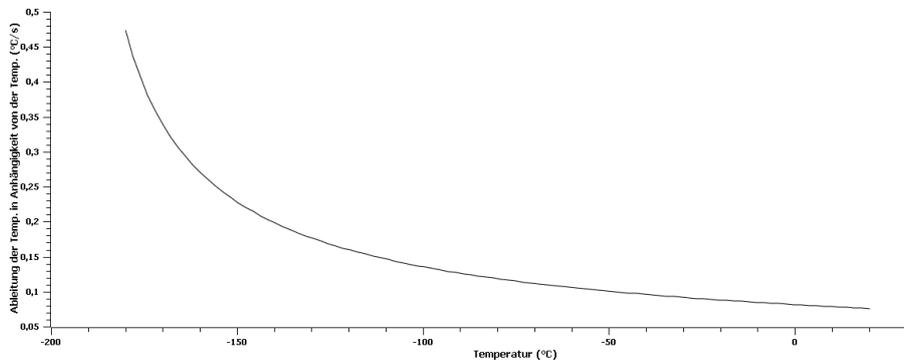
$$t(T) = \left( \frac{T + 197,0430}{2,9059} \right)^{\frac{1}{0,5816}}$$

Außerdem benötigen wir noch die zeitliche Ableitung von  $T(t)$ , diese wurde um Rundungsfehler auszuschließen auch mittels SciDavis bestimmt:

$$\dot{T}(t) = 1,6932 \cdot t^{-0,4186}$$

Und letzten Endes:

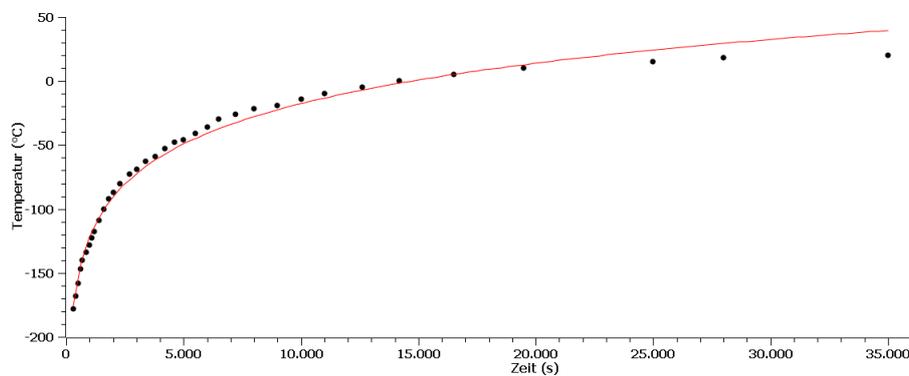
$$\dot{T}(T) = 1,6932 \cdot \left( \frac{T + 197,0430}{2,9059} \right)^{-0,7197}$$



Nun muss all dies noch für die vorgegebene Messung, diejenige unter dem Einfluss der Umwelt, vorgenommen werden. Da diese Tabelle länger ist, nutzen wir 33 Werte:

t (s)	U (mV)	$T_U$ (°C)	t (s)	U (mV)	$T_U$ (°C)	t (s)	U (mV)	$T_U$ (°C)
300	-5,39	-178	2000	-3,09	-87	7200	-0,97	-26
400	-5,20	-168	2300	-2,86	-80	8000	-0,84	-22
500	-4,99	-158	2700	-2,64	-73	9000	-0,72	-19
600	-4,75	-147	3000	-2,51	-69	10000	-0,55	-14
700	-4,57	-140	3400	-2,31	-63	11000	-0,40	-10
850	-4,42	-134	3800	-2,15	-59	12600	-0,20	-5
1000	-4,27	-128	4200	-1,96	-53	14200	0,00	0
1100	-4,13	-123	4600	-1,81	-48	16500	0,21	5
1200	-4,01	-118	5000	-1,71	-46	19500	0,41	10
1400	-3,76	-109	5500	-1,55	-41	25000	0,62	15
1600	-3,51	-100	6000	-1,34	-36	28000	0,71	18
1800	-3,25	-92	6500	-1,15	-30	35000	0,82	20

Der zugehörige Graph:



Die Funktion wurde ermittelt zu:

$$T_U(t) = 6564,6622 \cdot x^{0,00653} - 6989,4938$$

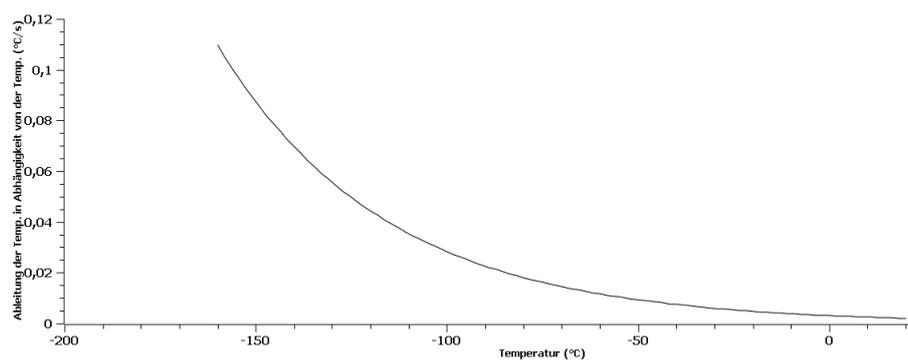
$$\Rightarrow t(T) = \left( \frac{t + 6989,4938}{6564,6622} \right)^{\frac{1}{0,00653}}$$

Die Ableitung:

$$\dot{T}_U(t) = 49,9994 \cdot x^{-1,0110}$$

$$\Rightarrow \dot{T}_U(T) = 49,9994 \cdot \left( \frac{T + 6989,4938}{6564,6622} \right)^{-154,824}$$

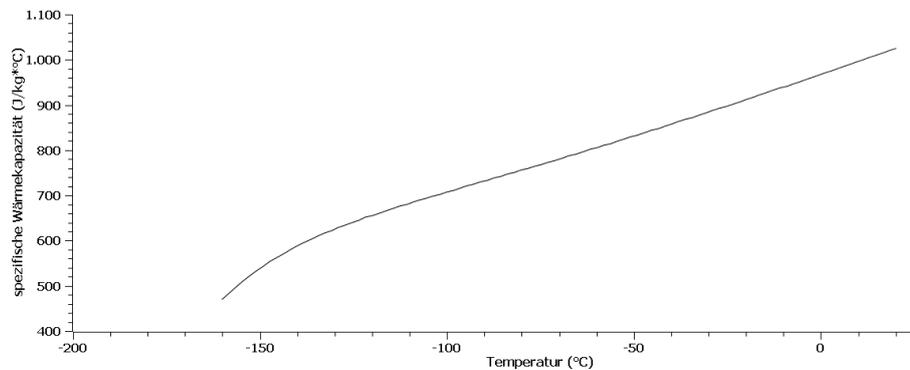
Hier das Schaubild zu dieser Abhängigkeit:



Mittels der Formel aus der Vorbereitung:

$$c(T) = \frac{P}{m \cdot (\dot{T}(T) - \dot{T}_U(T))}$$

kann unter Verwendung von  $m = 0,376 \text{ kg}$  die temperaturabhängige spezifische Wärmekapazität  $c(T)$  bestimmt werden:



Wie zu erwarten war, zeigt sich bei der spezifischen Wärmekapazität eine deutliche Temperaturabhängigkeit. Diese verläuft im Bereich zwischen  $-120^\circ\text{C}$  und  $20^\circ\text{C}$  annähernd linear. Zwischen  $-160^\circ\text{C}$  und  $120^\circ\text{C}$  macht die Kurve einen Knick: Der zunächst stärkere Anstieg der Wärmekapazität sinkt in diesem Bereich auf das Niveau des linearen Anstiegs ab. Um eine bessere Aussage über diesen nicht-linearen Bereich zu gewinnen, müsste man allerdings den Versuch bei tieferen Temperaturen beginnen und tiefergehende festkörperphysikalische Betrachtungen machen.

Bei einer Temperatur von  $0^\circ\text{C}$  erhielten wir bei dieser Messung eine spezifische Wärmekapazität von ca.  $c = 0,97 \frac{\text{J}}{\text{g}\cdot\text{K}}$ . Dies stimmt relativ gut mit dem Literaturwert von  $0,91 \frac{\text{J}}{\text{g}\cdot\text{K}}$  überein.