

Fakultät für Physik der Ludwig-Maximilians-Universität München
 Grundpraktikum in Experimentalphysik - Kurs P2
 Blockpraktikum vom 10. Aug. bis 07. Sept. 2020

Versuch:	APW	Gruppe:	F2-2							
Vorname:	YUDONG	Name:	SUN							
Mit Abgabe der Auswertung wird bestätigt, dass diese eigenständig erstellt wurde!										
Punkte der Vorbereitung:			2,0	1,6	1,2	0,8	0,4	0,0		
							1. Abgabe	2. Abgabe		
Alle Teilversuche vollständig ausgewertet?							Ja	Nein	Ja	Nein
Wurden immer korrekte Formeln angegeben und eigene Werte eingesetzt?							Ja	Nein	Ja	Nein
Wurde immer eine Fehlerrechnung durchgeführt?							Ja	Nein	Ja	Nein
Wurde immer eine aussagekräftige Diskussion geführt?							Ja	Nein	Ja	Nein
Sind Endergebnisse immer angegeben und korrekt gerundet?							Ja	Nein	Ja	Nein
Wurden alle Diagramme mit geeignetem Maßstab und Titel eingeklebt?							Ja	Nein	Ja	Nein
Enthalten die Diagramme alle Messwerte, Beschriftungen u. Konstruktionen?							Ja	Nein	Ja	Nein
Auswertung erhalten am:										
Auswertung zurückgegeben am:										
Nacharbeit notwendig bis:										nicht möglich
Wird eine der obigen Fragen bei der ersten Abgabe mit Nein beantwortet ist eine Nacharbeit erforderlich!										
Punkte:		Datum, Abtestat:								

Bitte bewahren Sie Ihre Hefte nach dem Praktikum unbedingt auf.

28
32 Blatt

BRUNNEN 

Schulheft A4
 Zellstoff chlorfrei gebleicht
 80 g/m²

28
32 Blatt

Stichwörter zu APW:

Wärme: statische Verteilung von Energie

Temperatur: Maß für die mittlere kinetische Energie und damit für den mittleren Geschwindigkeitsbetrag der Teilchen.

Wärmekapazität: Zusammenhang zwischen zugeführter Wärmenenge und Temperaturänderung.

Spezifische Wärmekapazität: Wärmekapazität pro Masse.

Prinzipielle Anordnung zur Bestimmung einer Wärmekapazität: / Kalorimetrie

→ Kalorimeter. ~~mit~~ (Höchstgenauigkeit)

① Wassermenge bestimmen ~~und~~

② Wasser im Katalyseer aufheizen und Temperaturänderung messen

Wärmeisolierten Gefäß, das einen Plastiktrichter enthält.

Aufheizen oder chemische Reaktion

⇒ ΔT ~~messen~~ der Kalorimeterhöchstgenauigkeit.

⇒ $Q = C \Delta T \Rightarrow C$ (Wärmekapazität) bestimmen.

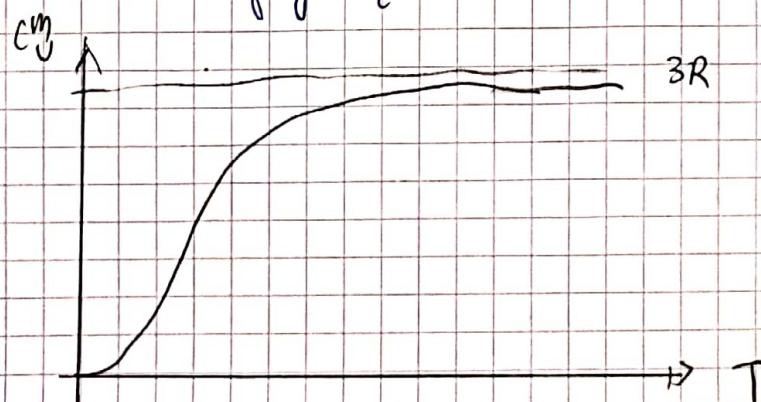
Regel von Dulong und Petit: $C_V^m = 3R$.

Wärmekapazität pro ~~je~~ Mol ~~zu~~ eines kristallinen Festkörpers

⇒ Gilt nur für hohe Temperaturbereich.

Temperaturabhängigkeit der Wärmekapazität von Festkörpern:

→ Gitterschwingung Quantisierung.

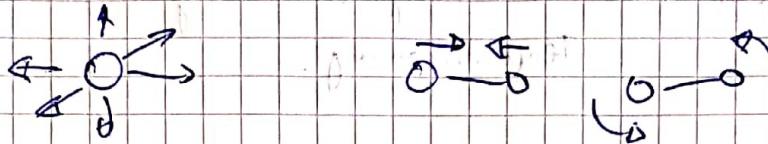


Ramsonsche Gleichung: $\rho V^\gamma = \text{const.}$

$$\gamma = \frac{C_p^m}{C_v^m} = \frac{f+2}{f}$$

$$C_p^m = C_v^m + R$$

$f \rightarrow$ Freiheitsgrade (Was ist ausgebaut)



Ursache der Wärmestrahlung:

Temperaturbewegung \Rightarrow Ladungen in Teilchen entfernen \rightarrow Beschleunigung
 \Rightarrow EM - Strahlung senden

Plancksche Strahlungsformel:

$$M_{\lambda s}(\lambda, T) = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(\frac{hc}{\lambda k_B T}) - 1}$$

Stefan - Boltzmannsche Gesetz:

$$M_s(T) = \int_0^{\infty} M_{\lambda s}(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4$$

$$\text{mit } \sigma \approx 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$$

Versuch : APW - Ausgewählte Phänomene der Wärmelehre

Name : Yudong Sun

Datum : 11. AUG 2020.

Teilversuch 1 : Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität von Wasser.

Versuchsziel : • Wassermut des Kalorimeter bestimmen bzw. überprüfen.

• Spezifische Wärmekapazität ~~des~~ ^{von} Wasser bestimmen

Messmethode : • Wassermut wird durch Mischung von Wasser von verschiedenen Temperatur untersucht.
• Spezifische Wärmekapazität α wird ~~durch~~ mittels eines Kalorimeters bestimmt.

Durchführung :

① Wassermut von Kalorimeter :

- Wasser im Temperierbad auf ca. 80°C aufheizen.
- Füll ~~ein~~ ca. 0.60 kg möglichst kaltes Leitungswasser im Messzylinder. Wiege ~~ein~~ und dann Wasser ins Kalorimeter eingießen.
- Leere Messzylinder (mit gefl. übergegangenem Wasser) wegen.
- Magnetrührer einschalten. Sobald die Temperatur konstant bleibt, Temperatur Θ_1 messen.
- Füll ca. 0.20 kg warmes Wasser vom Temperierbad in den Aluminiumtopf. Wiege mit. Temperatur Θ_2 des warmen Wassers messen, sobald diese konstant bleibt.
- Warmes Wasser aus dem Aluminiumtopf ins Kalorimetergefäß ~~schnüffeln~~ schüttern.
- Wenn die Temperatur nicht mehr ändert, Temperatur Θ_m messen.

- leerer ~~Zapf~~ Aluminiumtopf wegen.

② Spezifische Wärmekapazität von Wasser.

- Kalorimeter entleeren.
- Füllt ca. 0,60 kg möglichst kaltes Leitungswasser im Messzylinder wiegt.
- Wasser ins Kalorimeter gießen und leerer Messzylinder wiegen.

~~Temperatur~~

- Aufbau nach Abbildung 1, ohne das Netzgerät mit dem Kalorimeter zu verbinden. Beim Anmessen die Buchse für 10A benutzen. Wähle Gleichstrom aus.
- Netzgerät einschalten und Spannung begrenzt auf ca. 30V einstellen. Netzgerät mit Kalorimeter verbinden.
- Strom langsam auf ca. 1,6 A erhöhen.
- Strom und Spannung an den Multimeter notieren
- Stecker aus den Buchsen des Netzgeräts ziehen, aber eingeschaltet lassen.
- Warten und Auftakttemperatur ϑ_0 messen. $\text{24,5} \text{ } 25$
- Stromkreis schließen im Stoppuhr starten.
- Eine Minute Temperatur ϑ messen. für 15 Minuten
- Netzgerät ausschalten und Brückentest notieren.

Skizze:

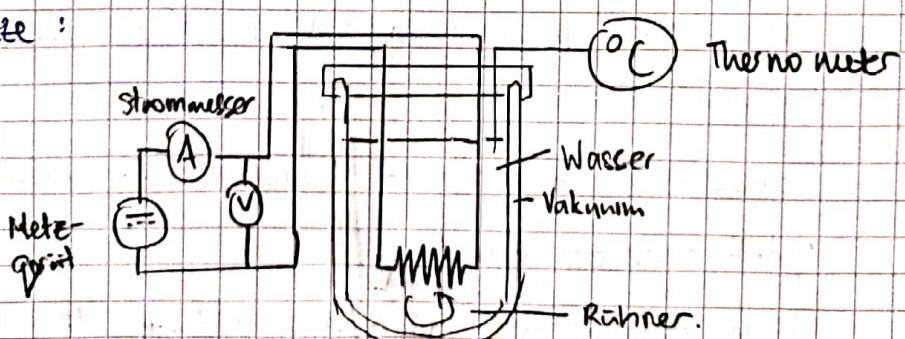


Abbildung 1 : Kalorimeter.

Messungen:

$$\Delta M = \begin{cases} 0,03 \text{ g} & (\text{bis } 600 \text{ g}) \\ 0,13 \text{ g} & (\text{ab } 600 \text{ g}) \end{cases}$$

①

[Gewicht]

Kalt (M_K)

Warm (M_W)

(min. Wäser)

Vor / ~~mg~~

908,6

~~509,03~~

~~509,03~~

(leer)

Nach / ~~mg~~

306,92

294,31

[Temperatur]

$$\text{Kalt } (\vartheta_1) = (24,0 \pm 0,1)^\circ\text{C}$$

$$\text{Warm } (\vartheta_2) = (74,2 \pm 0,1)^\circ\text{C}$$

$$\text{Mischung } (\vartheta_m) = (36,5 \pm 0,1)^\circ\text{C}$$

~~Max. VH~~

②

~~Mwasser~~

~~Mleer~~

~~Δm~~

$$m_w^* = \frac{m_w(\vartheta_2 - \vartheta_m)}{(\vartheta_m - \vartheta_1)} - m_K$$

=

$$= 45,8352$$

$$\Delta((\vartheta_2) - (\vartheta_m)) = \sqrt{(\Delta\vartheta_2)^2 + (\Delta\vartheta_m)^2} = \sqrt{2}\Delta\vartheta = \Delta(\vartheta_m - \vartheta_1)$$

$$\Delta m_w^* = m_w^* \sqrt{\left(\frac{\Delta(\vartheta_m - \vartheta_1)}{\vartheta_m - \vartheta_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta(\vartheta_2 - \vartheta_m)}{\vartheta_2 - \vartheta_m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta m_w}{m_w}\right)^2}$$

$$= m_w^* \sqrt{2(\Delta\vartheta)^2 \left(\frac{1}{\vartheta_m - \vartheta_1} + \frac{1}{\vartheta_2 - \vartheta_m}\right) + \left(\frac{\Delta m_w}{m_w}\right)^2}$$

(2)

$$M_{\text{Wasser}} = 903,2 \pm 0,13 \text{ g}$$

~~$$M_{\text{Fe}} M_{\text{Leer}} = (306,83 \pm 0,03) \text{ g}$$~~

~~Max Min~~

$$\begin{array}{l} \text{PGr: } 25 \text{ mV} \\ 0,06 \text{ A} \end{array} \left\{ \begin{array}{l} \text{Spannung V} = (21,5 \pm 0,5) \text{ V} \\ \text{Strom A} = (1,60 \pm 0,01) \text{ A} \end{array} \right.$$

$$[\text{Messreihe}] \quad \Delta t = \quad \Delta \theta =$$

Conversion

$$t / \frac{\text{Sek.}}{\text{min.}} \quad \Theta / {}^\circ \text{C}$$

~~1000~~

C

Teilversuch Q: Bestimmung der Wärmekapazitäten von Testkörpern

Vorschlagsziel: Die spezifische Wärmekapazitäten von Q_1 und Q_2 verschiedener Probekörper bestimmen.

Messmaßlochen: Erwärmte Probekörper zum Temperaturausgleich in das kältere Kalorimeterwasser bringen.

~~Skizze~~

Skizze:

Durchführung: Für jeden Probekörper ($i = 1, 2$):

- Masse m_i ~~trocken~~ bestimmen. (trocken)
- Füllt Messzylinder mit 0,8kg kaltem Wasser. Wiege.

Und dann Wasser ins Kalorimetergefäß

Messwerten aus Labor.

Teilversuch ②:

(a) [Gemeldet]

(mit Wasser)
Vor/g
(leer)
Nach/g

$$\Delta M = \pm 0,03 \text{ g} \quad (\text{bis } 600 \text{ g})$$

$$\Delta M = \pm 0,13 \text{ g} \quad (\text{ab } 600 \text{ g})$$

Kalt (M_K)

908,6

306,92

Warm (M_W)

509,03

294,31

[Temperatur]

$$\text{Kalt } (\theta_1) = (24,0 \pm 0,1)^\circ\text{C}$$

$$\text{Warm } (\theta_2) = (74,2 \pm 0,1)^\circ\text{C}$$

$$\text{Messung } (\theta_m) = (36,5 \pm 0,1)^\circ\text{C}$$

$$M_W^* = \frac{M_W (\theta_2 - \theta_m)}{(\theta_m - \theta_1)} - M_K = \left[\frac{(509,03 - 294,31)(74,2 - 36,5)}{(36,5 - 24,0)} - (908,6 - 306,92) \right] \text{g}$$

$$= 45,8352 \text{ g} = 45,8 \text{ g} \quad (3 \text{ s.z.})$$

(b) $M_{\text{Wasser}} = (903,2 \pm 0,13) \text{ g}$

~~ausrechnen~~

$$M_{\text{gear}} = (306,83 \pm 0,03) \text{ g}$$

$$\text{Spannung } V = (21,5 \pm 0,21) \text{ V}$$

$$\text{Strom } A = (1,60 \pm 0,6) \text{ A}$$

Messreihe: $\Delta t = \pm 0,25$, $\Delta \theta = 0,3^\circ\text{C}$

t/Min	0	1	2	3	4	5
$\theta/^\circ\text{C}$	25,6	26,5	26,7	27,0	27,6	28,1

t/Min	6	7	8	9	10	11
$\theta/^\circ\text{C}$	28,6	29,1	29,5	30,2	30,8	31,2

t/Min	12	13	14	15
$\theta/^\circ\text{C}$	31,6	32,0	32,9	33,1

$$\text{Endtemperatur} = (33,1 \pm 0,3)^\circ\text{C}$$

Teilversuch ②

[Probekörper ①]

$$\text{Masse } M_1 = (485,25 \pm 0,03) \text{ g}$$

$$M_{\text{Wasser} + \text{Zylinder}} = (125,00 \pm 0,13) \text{ g}$$

$$M_{\text{Zylinder}} = (307,57 \pm 0,03) \text{ g}$$

$$\theta_1 = (80,0 \pm 0,5)^\circ\text{C}$$

Messreihe $\Delta\theta = (\pm 0,5^\circ\text{C})$, $\Delta t = (\pm 0,5)\text{s}$

t/s	-20	-15	-10	-5
-----	-----	-----	-----	----

$\theta/\text{°C}$	26,5	26,7	26,3	26,3
--------------------	------	------	------	------

t/s	5	10	15	20	25	30
-----	---	----	----	----	----	----

$\theta/\text{°C}$	32,3	32,8	32,4	32,3	31,8	31,6
--------------------	------	------	------	------	------	------

t/s	35	40	90	120	150	193
-----	----	----	----	-----	-----	-----

$\theta/\text{°C}$	32,2	31,2	31,6	31,7	32,0	32,1
--------------------	------	------	------	------	------	------

t/s	232	240	270	300	335	370
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

$\theta/\text{°C}$	31,6	31,6	31,1	31,7	31,5	31,2
--------------------	------	------	------	------	------	------

[Probekörper ②]

$$\text{Masse } M_2 = (1945,80 \pm 0,13) \text{ g}$$

$$M_{\text{Wasser} + \text{Zylinder}} = (1095,4 \pm 0,13) \text{ g}$$

$$M_{\text{Zylinder}} = (307,11 \pm 0,03) \text{ g}$$

$$\theta_2 = (77,7 \pm 0,5)^\circ\text{C}$$

Messreihe $\Delta\theta = (\pm 0,5^\circ\text{C})$, $\Delta t = (\pm 0,5)\text{s}$

t/s	-20	-15	-10	-5
-----	-----	-----	-----	----

$\theta/\text{°C}$	25,0	24,5	24,2	24,7
--------------------	------	------	------	------

t/s	2	5	10	15	20
-----	---	---	----	----	----

$\theta/\text{°C}$	27,2	30,2	29,1	28,7	28,4
--------------------	------	------	------	------	------

t/s	25	30	35	40	45
-----	----	----	----	----	----

$\theta/\text{°C}$	28,5	28,5	28,5	28,4	28,5
--------------------	------	------	------	------	------

t/s	75	105	135	165	195
-----	----	-----	-----	-----	-----

$\theta/\text{°C}$	28,3	28,2	28,1	28,4	28,3
--------------------	------	------	------	------	------

t/s	225	255	285	315
$\Theta/^\circ\text{C}$	28,4	28,3	28,2	28,4

Teilversuch (3)

$$\begin{cases} M_{\text{Wasser+Alu}} = (717,30 \pm 0,13) \text{ g.} \\ M_{\text{Alu}} = (295,06 \pm 0,03) \text{ g.} \end{cases}$$

$$\Theta_{\text{warm}} = (47,8 \pm 0,1) {}^\circ\text{C}$$

$$\Theta_{\text{Eis}} = (1,5 \pm 0,1) {}^\circ\text{C}$$

$$\begin{cases} M_{\text{ECS+Alu}} = (505,14 \pm 0,03) \text{ g.} \\ M_{\text{Alu}} = (296,65 \pm 0,03) \text{ g.} \end{cases}$$

$$\Theta_{\text{Omsch}} = (16,8 \pm 0,2) {}^\circ\text{C}$$

Teilversuch (4)

[Ohne Kolben]

<u>7 Schwingungen</u>		$\Delta t = (\pm 0,4 \text{ s})$
T/s	① 8,18	② 8,18
7,95	⑤ 7,98	③ 7,96
T/s	⑦ 8,26	④ 8,40

[Mit Kolben]

<u>7 Schwingungen</u>		$\Delta t = (\pm 0,4 \text{ s})$
T/s	① 5,52	② 5,63
T/s	⑤ 5,47	③ 5,83
		④ 5,72
		⑥ 5,46
		⑦ 5,47

$$V_{\text{air}} = 1 \cdot n = V$$

[Messung von Volumen]

$$\begin{aligned} \text{Ohne Wasser } M &= (397,35 \pm 0,03) \text{ g} \\ \text{Mit Wasser } M &= (1504,50 \pm 0,13) \text{ g} \end{aligned} \quad \left. \right\} \text{Kolben.}$$

$$D = (17 \pm 1) \text{ mm} \quad \text{Höhe} = (139 \pm 1) \text{ mm}$$

$$P_0 = (958,2 \pm 0,1) \text{ hPa}$$

Teilversuch ⑤

$$\tau_0 = (29,0 \pm 0,1)^\circ\text{C}$$

Messreihe: $\Delta V = (\pm 0,002) \text{ mV}$, $\Delta \theta = (\pm 0,1)^\circ\text{C}$

$\theta / {}^\circ\text{C}$	80	100	130	160
V/mV	0,010	0,018	0,025	0,052

$\theta / {}^\circ\text{C}$	190	210	240	270
V/mV	0,063	0,079	0,108	0,139

$\theta / {}^\circ\text{C}$	300	330	350
V/mV	0,174	0,222	0,250

LMU München
Physikalische Praktika

Versuch: APW

Datum: 11.08.2020

Betreuer: Günif

APW – Ausgewählte Phänomene der Wärmelehre

Auswertung

Yudong Sun
Gruppe F2-2

13. August 2020

Teilversuch 1: Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität von Wasser

Wasserwert des Kalorimeters

Als Messungen haben wir:

Temperaturen		
Kalt	(θ_1)	$(24,0 \pm 0,1)^\circ\text{C}$
Warm	(θ_2)	$(74,2 \pm 0,1)^\circ\text{C}$
Mischung	(θ_m)	$(36,5 \pm 0,1)^\circ\text{C}$

Gewichten			
	M_0/g	M_1/g	M_i/g
Kalt (M_k)	$908,60 \pm 0,13$	$306,92 \pm 0,03$	$601,68 \pm 0,14$
Warm (M_w)	$509,03 \pm 0,03$	$294,31 \pm 0,03$	$214,72 \pm 0,04$

wobei M_0 das Gewicht der Wasser plus Gefäß und M_1 das Gewicht der Gefäß mit ggf. übriges Wasser ist. Die jeweiligen Massen von Wasser M_i sind gegeben durch $M_i = M_1 - M_0$, mit dem entsprechenden Fehler:

$$\Delta M_i = \sqrt{(\Delta M_0)^2 + (\Delta M_1)^2} \quad (1.1)$$

Aus der Anleitung ist der Wasserwert des Kalorimeters gegeben durch:

$$m_w^* = \frac{M_w(\theta_2 - \theta_m)}{(\theta_m - \theta_1)} - M_k \quad (1.2)$$

und der Fehler:

$$\Delta(\theta_2 - \theta_m) = \sqrt{(\Delta\theta_1)^2 + (\Delta\theta_m)^2} = \sqrt{2}\Delta\theta = \Delta(\theta_m - \theta_1) \quad (1.3)$$

$$(\Delta m_w^*)^2 = \left(\frac{M_w(\theta_2 - \theta_m)}{(\theta_m - \theta_1)} \sqrt{\left(\frac{\Delta(\theta_2 - \theta_m)}{(\theta_2 - \theta_m)} \right)^2 + \left(\frac{\Delta(\theta_m - \theta_1)}{(\theta_m - \theta_1)} \right)^2 + \left(\frac{\Delta M_w}{M_w} \right)^2} \right)^2 \\ + (\Delta M_k)^2 \quad (1.4)$$

$$= \left(\frac{M_w(\theta_2 - \theta_m)}{(\theta_m - \theta_1)} \sqrt{2(\Delta\theta)^2 \left(\frac{1}{(\theta_2 - \theta_m)^2} + \frac{1}{(\theta_m - \theta_1)^2} \right) + \left(\frac{\Delta M_w}{M_w} \right)^2} \right)^2 \\ + (\Delta M_k)^2 \quad (1.5)$$

$$= \left(\frac{M_w(\theta_2 - \theta_m)}{(\theta_m - \theta_1)} \right)^2 \cdot \left(2(\Delta\theta)^2 \left(\frac{1}{(\theta_2 - \theta_m)^2} + \frac{1}{(\theta_m - \theta_1)^2} \right) + \left(\frac{\Delta M_w}{M_w} \right)^2 \right) \\ + (\Delta M_k)^2 \quad (1.6)$$

Wir substituieren die Werten:

$$m_w^* = \frac{(214,72 \text{ g})(74,2 \text{ }^\circ\text{C} - 36,5 \text{ }^\circ\text{C})}{(36,5 \text{ }^\circ\text{C} - 24,0 \text{ }^\circ\text{C})} - 601,68 \text{ g}$$

$$= \frac{(214,72 \text{ g})(37,7 \text{ }^\circ\text{C})}{(12,5 \text{ }^\circ\text{C})} - 601,68 \text{ g}$$

$$= 647,595 \text{ } 52 \text{ g} - 601,68 \text{ g}$$

$$= 45,915 \text{ } 52 \text{ g}$$

$$(\Delta m_w^*)^2 = (647,595 \text{ } 52 \text{ g})^2 \cdot \left(2(0,1 \text{ }^\circ\text{C})^2 \left(\frac{1}{(37,7 \text{ }^\circ\text{C})^2} + \frac{1}{(12,5 \text{ }^\circ\text{C})^2} \right) + \left(\frac{0,04 \text{ g}}{214,72 \text{ g}} \right)^2 \right) \\ + (0,14 \text{ g})^2$$

$$\Delta m_w^* = 29,8919 \text{ g} \quad (6 \text{ sig. Zif.})$$

Somit ist $m_w^* = (50 \pm 30) \text{ g}$. Der im Kapitel 1.4 gegebene Literaturwert $m_w^* = 80 \text{ g}$ liegt im Fehlerintervall des experimental bestimmten Wert, also stimmt die beide Werten miteinander überein. Es ist hier zu bemerken, dass der experimental bestimmte Wert eine sehr große Unsicherheit hat.

Spezifische Wärmekapazität von Wasser

Fehler bei Messung der Zeit $\Delta t = 0,2\text{ s}$

Fehler bei Messung der Temperatur $\Delta x = 0,3\text{ }^\circ\text{C}$

Messreihe								
t/min	0	60	120	180	240	300	360	420
$\theta/\text{ }^\circ\text{C}$	25,6	26,5	26,7	27,0	27,6	28,1	28,6	29,1
t/min	480	540	600	660	720	780	840	900
$\theta/\text{ }^\circ\text{C}$	29,5	30,2	30,8	31,2	31,6	32,0	32,9	33,1

Die Daten wurden dann mit `gnuplot` geplottet und es wurde eine Kurvenanpassung zur $\theta = bt + c$ durchgeführt.

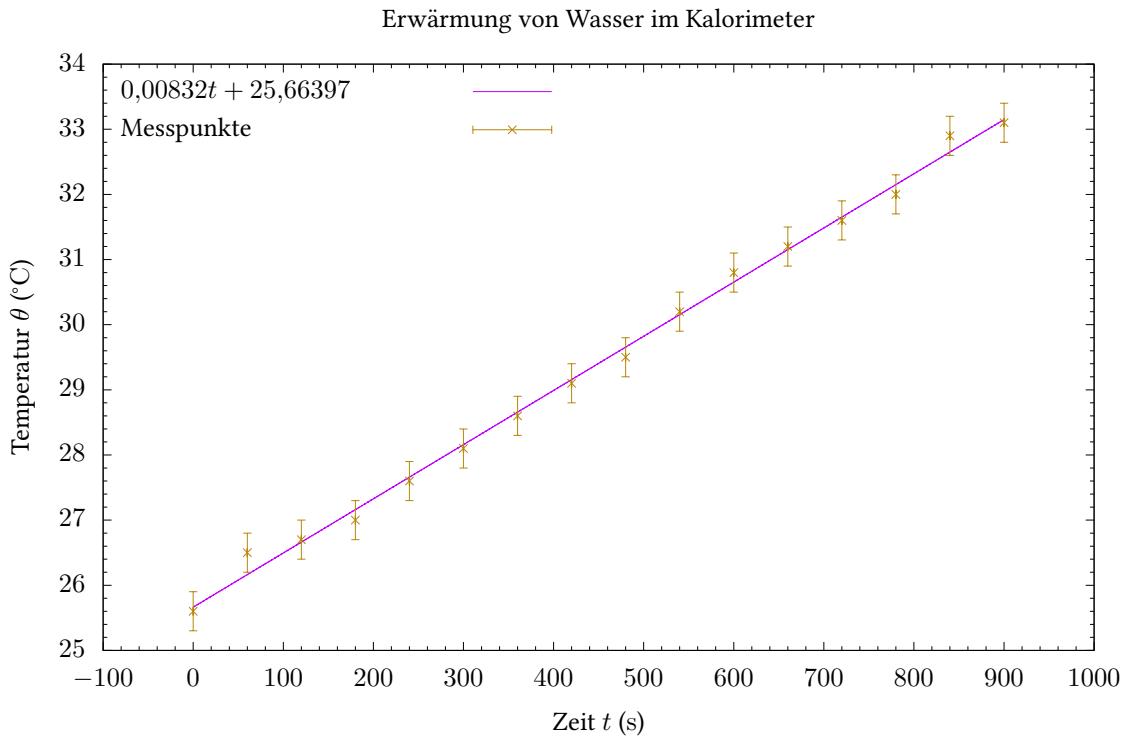


Abbildung 1.1: Temperaturverlauf bei der Erwärmung von Wasser im Kalorimeter
 $\chi^2_{\text{red}} = 0,237\,306 \implies$ Gute Anpassung

Als Endergebnis erhalten wir:

$$\begin{array}{ll} b & (8,3162 \pm 0,1321) \cdot 10^{-3} \text{ K s}^{-1} \\ c & (25,664 \pm 0,070) \text{ }^\circ\text{C} \end{array}$$

Gerundet haben wir $b = (8,32 \pm 0,14) \cdot 10^{-3} \text{ K s}^{-1}$, da eine 1 K Änderung die gleiche wie eine $1\text{ }^\circ\text{C}$ Änderung ist.

Aus der Anleitung gilt:

$$Q = mC_S \Delta\theta \quad \Leftrightarrow \quad IV \Delta t = mC_S \Delta\theta \quad \Leftrightarrow \quad \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{IV}{mC_S} \quad (1.7)$$

Also ist die Steigung $b = \frac{IV}{mC_S}$ und es gilt:

$$C_S = \frac{IV}{mb} = \frac{IV}{(m_w + m_w^*) b} = \frac{IV}{((m_{w+g} - m_g) + m_w^*) b} \quad (1.8)$$

Da wir nur die Unsicherheiten der Geradensteigung und die Unsicherheit des Wasserwertes berücksichtigen müssen, vernachlässigen wir die Unsicherheiten bei m_{w+g} , m_g , I und V . Der Fehler ist somit gegeben durch:

$$C_S = \sqrt{\left(\frac{\partial C_S}{\partial m_w^*} \Delta m_w^*\right)^2 + \left(\frac{\partial C_S}{\partial b} \Delta b\right)^2}$$

mit

$$\frac{\partial C_S}{\partial m_w^*} = -\frac{IV}{b(m_{w+g} - m_g + m_w^*)^2} \quad \frac{\partial C_S}{\partial b} = -\frac{IV}{b^2(m_{w+g} - m_g + m_w^*)}$$

Es gilt somit:

$$\Delta C_S = \sqrt{\left(\frac{IV \Delta m_w^*}{b(m_{w+g} - m_g + m_w^*)^2}\right)^2 + \left(\frac{IV \Delta b}{b^2(m_{w+g} - m_g + m_w^*)}\right)^2}$$

Wir haben als Messwerten:

Variable	Wert	Bedeutung
V	$(21,50 \pm 0,21) \text{ V}$	Spannung am Heizungselement
I	$(1,6 \pm 0,6) \text{ A}$	Strom am Heizungselement
m_{w+g}	$(903,20 \pm 0,13) \text{ g}$	Masse der Wasser und Gefäß
m_g	$(306,83 \pm 0,03) \text{ g}$	Masse des leeren Gefäß
m_w^*	$(50 \pm 30) \text{ g}$	Wasserwert des Kalorimeters
b	$(8,32 \pm 0,14) \cdot 10^{-3} \text{ K s}^{-1}$	Erhaltene Steigung

Damit:

$$C_S = \frac{(1,6 \text{ A})(21,50 \text{ V})}{(903,20 \text{ g} - 306,83 \text{ g} + 50 \text{ g})(8,32 \cdot 10^{-3} \text{ K s}^{-1})} \\ = 6,396\,67 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

$$\Delta C_S^2 = \left(\frac{(1,6 \text{ A})(21,50 \text{ V})(30 \text{ g})}{(8,32 \cdot 10^{-3} \text{ K s}^{-1})(903,20 \text{ g} - 306,83 \text{ g} + 50 \text{ g})^2} \right)^2 \\ + \left(\frac{(1,6 \text{ A})(21,50 \text{ V})(0,14 \cdot 10^{-3} \text{ K s}^{-1})}{(8,32 \cdot 10^{-3} \text{ K s}^{-1})^2(903,20 \text{ g} - 306,83 \text{ g} + 50 \text{ g})} \right)^2 \\ \Delta C_S = 0,316\,471 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

Somit erhalten wir $C_S = (6,4 \pm 0,4) \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

Für den Literaturwert benutzen wir den Mittelwert von den Temperaturen und verwenden die Wärmekapazität bei diesem Temperatur. Also $\sum_i \theta_i \text{ } ^\circ\text{C} = 29,406 \text{ } ^\circ\text{C} \approx 30 \text{ } ^\circ\text{C}$. Der Literaturwert von der Wärmekapazität des Wassers lautet $C_{S \text{ (lit)}} = 4,1801 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$ bei $30 \text{ } ^\circ\text{C}$ ¹.

Folglich unterscheiden sich die Werten signifikant voneinander.

Dieser Unterschied kann vielleicht darauf zurückgeführt werden, dass die tatsächliche Unsicherheiten von der Messung der Spannung nicht berücksichtigt würden. Während der Messungen wurde beobachtet, dass die Spannung sich im Verlauf des Experiments deutlich schwingt. Somit könnte die tatsächliche Unsicherheit bei der Messung deutlich größer sein als die, die der Hersteller ermittelt hat. Das hat vermutlich zu einer geringer Unsicherheit bei C_S geführt.

Weiterhin ist das Heizungselement höchstwahrscheinlich nicht 100% effizient, also könnte die berechnete Leistung $P = IV$ viel größer als die tatsächliche Leistung sein, was zu einem größeren C_S liefern würde.

Teilversuch 2: Bestimmung der Wärmekapazitäten von Festkörpern

Fehler bei Zeitmessungen $\Delta t = 0,5 \text{ s}$

Fehler bei Temperaturmessungen $\Delta \theta = 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$

Masse des Körpers 1 $M_1 = (485,25 \pm 0,03) \text{ g}$ (Al)

Masse des Körpers 2 $M_2 = (1945,80 \pm 0,13) \text{ g}$ (Pb)

Probekörper 1												
t/s	-20	-15	-10	-5	5	10	15	20	25	30	35	
$\theta/\text{ } ^\circ\text{C}$	26,5	26,2	26,3	26,3	32,3	32,8	32,4	32,3	31,8	31,6	32,2	
t/s	40	90	120	150	193	232	240	270	300	335	370	
$\theta/\text{ } ^\circ\text{C}$	31,2	31,6	31,7	32,0	32,1	31,6	31,6	31,1	31,7	31,5	31,2	
Probekörper 2												
t/s	-20	-15	-10	-5	2	5	10	15	20	25	30	35
$\theta/\text{ } ^\circ\text{C}$	25,0	24,5	24,2	24,7	27,2	30,2	29,1	28,7	28,4	28,5	28,5	28,5
t/s	40	45	75	105	135	165	195	225	255	285	315	
$\theta/\text{ } ^\circ\text{C}$	28,4	28,5	28,3	28,2	28,1	28,4	28,3	28,4	28,3	28,2	28,4	

Der Daten wurden dann mit gnuplot geplottet und Kurvenanpassungen durchgeführt.

¹www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-capacity-water-d_660.html

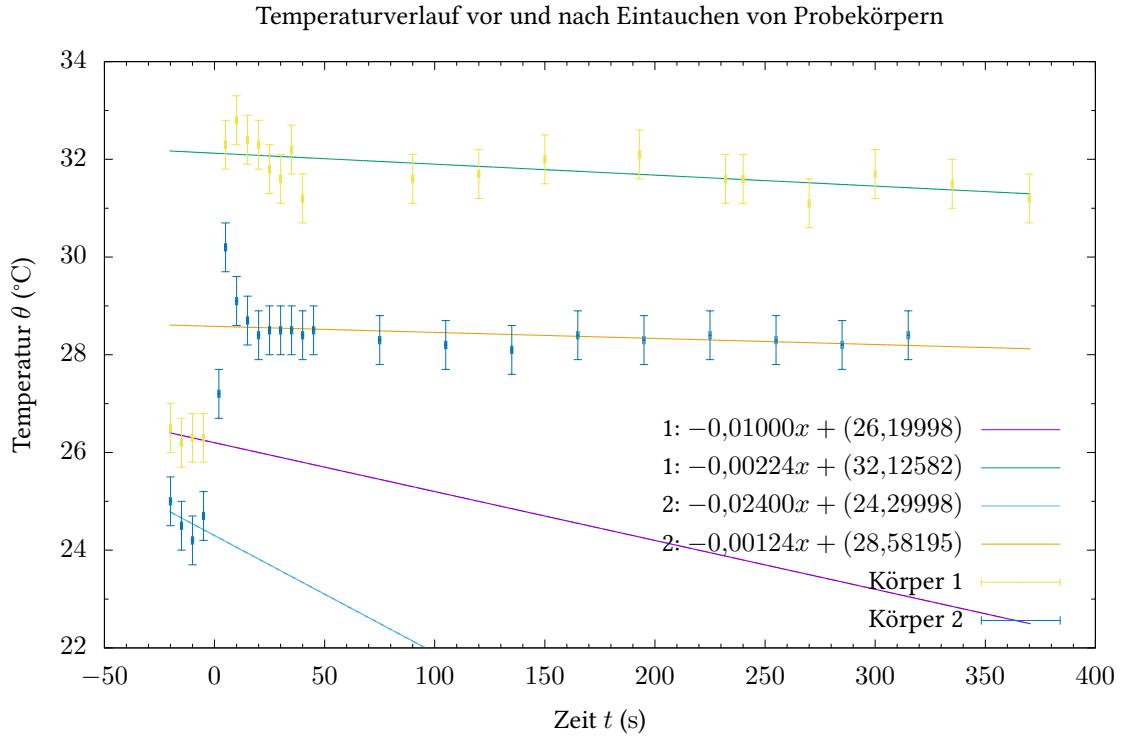


Abbildung 2.1: Temperaturverlauf nach Eintauchen von Probekörpern ins Wasser

Als Endergebnis erhalten wir:

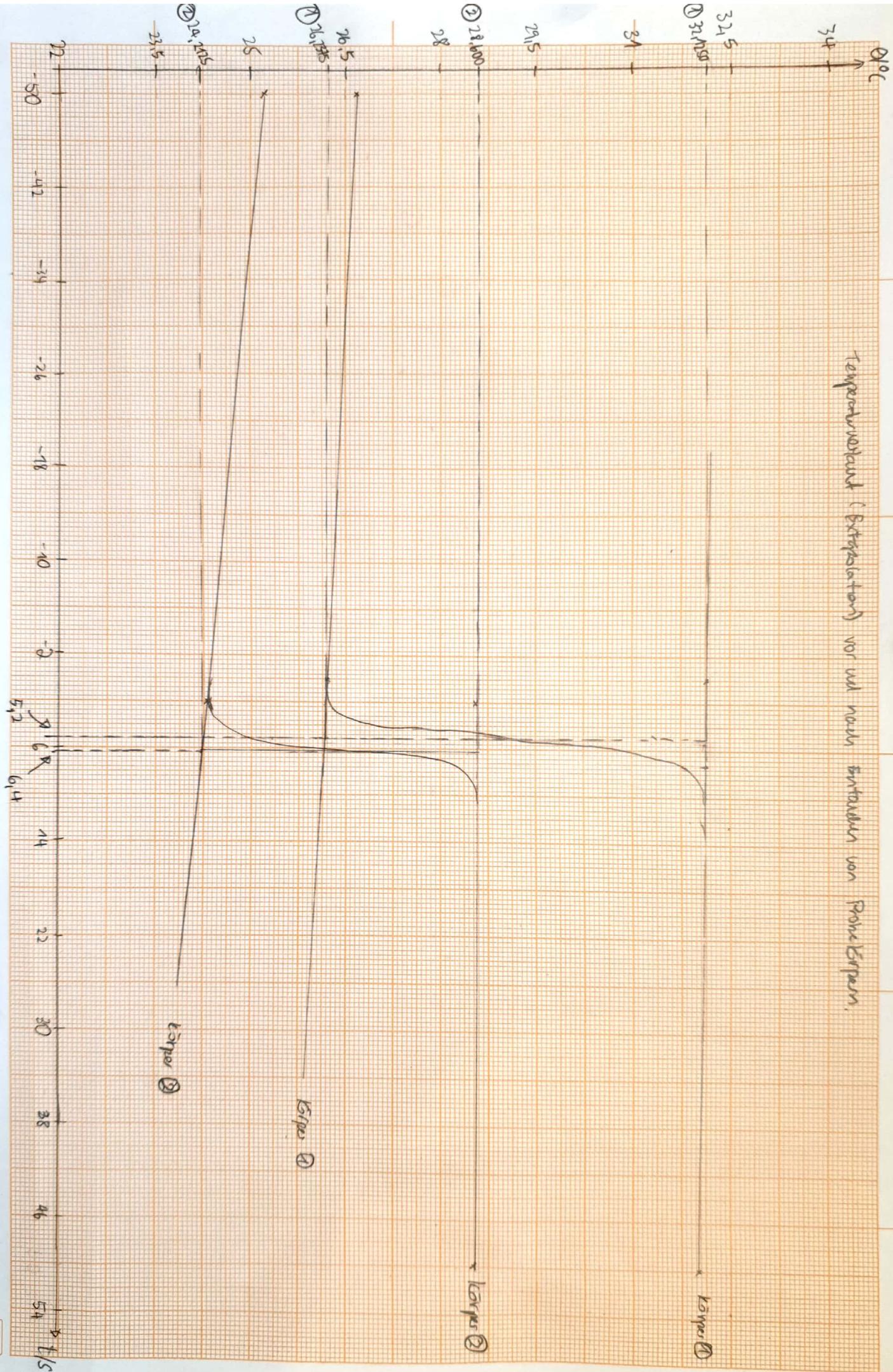
Körper 1	Vorlauf:	$\theta = ((-0,01000 \pm 0,01183) \text{ } ^{\circ}\text{Cs}^{-1})t + (26,200 \pm 0,162) \text{ } ^{\circ}\text{C}$
	Nachlauf:	$\theta = ((-0,0022438 \pm 0,0007261) \text{ } ^{\circ}\text{Cs}^{-1})t + (32,1258 \pm 0,1338) \text{ } ^{\circ}\text{C}$
Körper 2	Vorlauf:	$\theta = ((-0,02400 \pm 0,03274) \text{ } ^{\circ}\text{Cs}^{-1})t + (24,3000 \pm 0,4483) \text{ } ^{\circ}\text{C}$
	Nachlauf:	$\theta = ((-0,001240 \pm 0,001241) \text{ } ^{\circ}\text{Cs}^{-1})t + (28,5819 \pm 0,1808) \text{ } ^{\circ}\text{C}$

Gerundet:

Körper 1	Vorlauf:	$\theta = ((-0,010 \pm 0,012) \text{ } ^{\circ}\text{Cs}^{-1})t + (26,20 \pm 0,17) \text{ } ^{\circ}\text{C}$
	Nachlauf:	$\theta = ((-0,0022 \pm 0,0008) \text{ } ^{\circ}\text{Cs}^{-1})t + (32,13 \pm 0,14) \text{ } ^{\circ}\text{C}$
Körper 2	Vorlauf:	$\theta = ((-0,02 \pm 0,04) \text{ } ^{\circ}\text{Cs}^{-1})t + (24,3 \pm 0,5) \text{ } ^{\circ}\text{C}$
	Nachlauf:	$\theta = ((-0,0012 \pm 0,0013) \text{ } ^{\circ}\text{Cs}^{-1})t + (28,58 \pm 0,19) \text{ } ^{\circ}\text{C}$

Es ist hier zu bemerken, dass die Messpunkte große Abweichungen von der optimale Gerade haben. Außerdem ist die Gerade im Vorlaufbereich nicht in der richtige Richtung (nach unten statt nach oben). Die Daten sind also nicht besonders geeignet für diese Extrapolationsverfahren. Die optimale Geraden wurden trotzdem dann auf Milimeterpapier im Bereich $[-50,50]$ gezeichnet, um die benötigte Werte zu finden.

Temperaturverlust (Extrapolation) vor und nach Entzünden von Probenbergen.



x -skala : 1 cm : 4 s
 y -skala : 1 cm : 0,75 °C



Wir erhalten als Ergebnis die Temperaturen:

	θ_a	θ_e	t
Körper 1	26,2375 °C	32,1250 °C	5,2 s
Körper 2	24,2125 °C	28,6000 °C	6,4 s

Wir berechnen nun die Min und Max anhand der Fehler bei der optimale Geraden aus gnuplot am Zeitpunkt t und erhalten:

		θ_{\max}	θ_{\min}
Körper 1	Anfang	26,3804 °C	25,9156 °C
	Ende	32,26272 °C	31,9744 °C
Körper 2	Anfang	24,928 °C	23,416 °C
	Ende	28,77064 °C	28,374 °C

Also haben wir:

	θ_a	θ_e
Körper 1	(26,15 ± 0,23) °C	(32,12 ± 0,15) °C
Körper 2	(24,2 ± 0,8) °C	(28,57 ± 0,20) °C

θ_e ist in diesem Fall die Mischungstemperatur.

Aus der Anleitung gilt:

$$c_s = \frac{c_w(m_w + m_w^*)(\Theta_m - \Theta_k)}{m_s(\Theta_s - \Theta_m)} \quad (2.1)$$

Wir berechnen zunächst den Wert und den entsprechenden Fehler von m_w wie in Teilversuch 1:

	$M_{\text{Wasser+Zyl}}$	M_{Zyl}	m_w
Körper 1	(1125,00 ± 0,13) g	(307,57 ± 0,03) g	(817,43 ± 0,14) g
Körper 2	(1095,80 ± 0,13) g	(307,11 ± 0,03) g	(788,69 ± 0,14) g

Körper 1 (Al)

Mit der Werten:

Variable	Wert	Bedeutung
m_s	$(485,25 \pm 0,03) \text{ g}$	Masse des Festkörpers
m_w	$(817,43 \pm 0,14) \text{ g}$	Masse des Wassers
Θ_m	$(32,12 \pm 0,15) \text{ }^\circ\text{C}$	Mischungstemperatur
Θ_k	$(26,15 \pm 0,23) \text{ }^\circ\text{C}$	Temperatur des Wassers
Θ_s	$(80,0 \pm 0,5) \text{ }^\circ\text{C}$	Temperatur des Festkörpers
m_w^*	80 g	Wasserwert des Kalorimeters
c_w	$4,18 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$	Spezifische Wärmekapazität des Wassers

erhalten wir:

$$c_s = \frac{(4,18 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1})((817,43 \text{ g}) + (80 \text{ g}))(32,12 \text{ }^\circ\text{C} - 26,15 \text{ }^\circ\text{C})}{(485,25 \text{ g})(80,0 \text{ }^\circ\text{C} - 32,12 \text{ }^\circ\text{C})}$$

$$= 0,9639 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1} \quad (4 \text{ sig. Zif.})$$

Mittels der Min-Max-Methode erhalten wir:

Min	Max	Wert
$0,8901 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$	$1,0398 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$	$(0,96 \pm 0,08) \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$

Körper 2 (Pb)

Mit der Werten:

Variable	Wert	Bedeutung
m_s	$(1945,80 \pm 0,13) \text{ g}$	Masse des Festkörpers
m_w	$(788,69 \pm 0,14) \text{ g}$	Masse des Wassers
Θ_m	$(28,57 \pm 0,20) \text{ }^\circ\text{C}$	Mischungstemperatur
Θ_k	$(24,2 \pm 0,8) \text{ }^\circ\text{C}$	Temperatur des Wassers
Θ_s	$(77,7 \pm 0,5) \text{ }^\circ\text{C}$	Temperatur des Festkörpers
m_w^*	80 g	Wasserwert des Kalorimeters
c_w	$4,18 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$	Spezifische Wärmekapazität des Wassers

erhalten wir:

$$c_s = \frac{(4,18 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1})(788,69 \text{ g} + 80 \text{ g})(28,57 \text{ }^\circ\text{C} - 24,2 \text{ }^\circ\text{C})}{(1945,80 \text{ g})(77,7 \text{ }^\circ\text{C} - 28,57 \text{ }^\circ\text{C})}$$

$$= 0,1660 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1} \quad (4 \text{ sig. Zif.})$$

Mittels der Min-Max-Methode erhalten wir:

Min	Max	Wert
$0,126\,18 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$	$0,206\,97 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$	$(0,17 \pm 0,05) \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$

Zusammengefasst haben wir mit $C_m = C_s \times M_R$ (M_R molare Masse):

	C_s	C_m
Körper 1 (Al)	$(0,96 \pm 0,08) \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$	$(25,9 \pm 2,2) \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Körper 2 (Pb)	$(0,17 \pm 0,05) \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$	$(35 \pm 11) \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$

Nach Regel von Dulong und Petit gilt:

$$C_v^m = 3R = 3(8,31 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}) = 24,93 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1} \quad (2.2)$$

Dieser Literaturwert liegt in dem Fehlerintervall von beiden experimentell bestimmten Werten, also stimmen die Ergebnisse mit dem Literaturwert überein.

Teilversuch 3: Bestimmung der spezifischen Schmelzwärme von Eis

Wir berechnen zunächst die Masse von Wasser und Eis, die im Experiment verwendet wurden:

$$m_1 = m_{\text{wasser}} = m_{\text{Wasser+Alu}} - m_{\text{Alu}} = 717,30 \text{ g} - 295,06 \text{ g} = 422,24 \text{ g} \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} \Delta m_1 &= \sqrt{(\Delta m_{\text{Wasser+Alu}})^2 + (\Delta m_{\text{Alu}})^2} = \sqrt{(0,13 \text{ g})^2 + (0,03 \text{ g})^2} \\ &= 0,14 \text{ g} \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$m_{\text{Eis}} = m_{\text{Eis+Alu}} - m_{\text{Alu}} = 505,14 \text{ g} - 296,65 \text{ g} = 208,49 \text{ g} \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} \Delta m_{\text{Eis}} &= \sqrt{(\Delta m_{\text{Eis+Alu}})^2 + (\Delta m_{\text{Alu}})^2} = \sqrt{(0,03 \text{ g})^2 + (0,03 \text{ g})^2} \\ &= 0,05 \text{ g} \end{aligned} \quad (3.4)$$

$$(3.5)$$

Aus der Anleitung gilt:

$$c_w m_{\text{Eis}}(T_M - T_0) + \lambda m_{\text{Eis}} = c_w(m_1 + m_w^*)(T_1 - T_M) \quad (3.6)$$

$$\begin{aligned} \Leftrightarrow \lambda &= \frac{c_w [(m_1 + m_w^*)(T_1 - T_M) - m_{\text{Eis}}(T_M - T_0)]}{m_{\text{Eis}}} \\ &= \frac{c_w}{m_{\text{Eis}}} (m_1 + m_w^*)(T_1 - T_M) - c_w(T_M - T_0) \end{aligned} \quad (3.7)$$

mit dem Fehler:

$$\Delta \lambda = \sqrt{\left(\frac{\partial \lambda}{\partial m_1} \Delta m_1\right)^2 + \left(\frac{\partial \lambda}{\partial T_1} \Delta T_1\right)^2 + \left(\frac{\partial \lambda}{\partial T_M} \Delta T_M\right)^2 + \left(\frac{\partial \lambda}{\partial T_0} \Delta T_0\right)^2 + \left(\frac{\partial \lambda}{\partial m_{\text{Eis}}} \Delta m_{\text{Eis}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \lambda}{\partial m_w^*} \Delta m_w^*\right)^2} \quad (3.8)$$

wobei:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \lambda}{\partial m_1} &= \frac{c_w}{m_{\text{Eis}}} (T_1 - T_M) = \frac{\partial \lambda}{\partial m_w^*} \\ \frac{\partial \lambda}{\partial T_1} &= \frac{c_w}{m_{\text{Eis}}} (m_1 + m_w^*) \\ \frac{\partial \lambda}{\partial T_M} &= -\frac{c_w}{m_{\text{Eis}}} (m_1 + m_w^*) - c_w \\ \frac{\partial \lambda}{\partial T_0} &= c_w \\ \frac{\partial \lambda}{\partial m_{\text{Eis}}} &= \frac{c_w}{m_{\text{Eis}}^2} (m_1 + m_w^*)(T_1 - T_M) \end{aligned}$$

somit:

$$\begin{aligned} \Delta \lambda &= \left[\left(\frac{c_w}{m_{\text{Eis}}} (T_1 - T_M) \Delta m_1 \right)^2 + \left(\frac{c_w}{m_{\text{Eis}}} (m_1 + m_w^*) \Delta T_1 \right)^2 + \left(\left(-\frac{c_w}{m_{\text{Eis}}} (m_1 + m_w^*) - c_w \right) \Delta T_M \right)^2 \right. \\ &\quad \left. + (c_w \Delta T_0)^2 + \left(\frac{c_w}{m_{\text{Eis}}^2} (m_1 + m_w^*)(T_1 - T_M) \Delta m_{\text{Eis}} \right)^2 + \left(\frac{c_w}{m_{\text{Eis}}} (T_1 - T_M) \Delta m_w^* \right)^2 \right]^{1/2} \end{aligned}$$

Mit der Werten:

Variable	Wert	Bedeutung
m_1	$(422,24 \pm 0,14) \text{ g}$	Masse des Wassers
m_{Eis}	$(208,49 \pm 0,05) \text{ g}$	Masse des Eises
m_w^*	$(50 \pm 30) \text{ g}$	Wasserwert des Kalorimeters
T_1	$(47,8 \pm 0,1) \text{ }^\circ\text{C}$	Temperatur des Wassers
T_M	$(16,8 \pm 0,2) \text{ }^\circ\text{C}$	Temperatur des Mischung
T_0	$(1,5 \pm 0,1) \text{ }^\circ\text{C}$	Temperatur des Eises
c_w	$4,18 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$	Spezifische Wärmekapazität des Wassers

haben wir:

$$\begin{aligned}\lambda &= \frac{4,18 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}}{208,49 \text{ g}} (422,24 \text{ g} + 80 \text{ g})(47,8 \text{ }^\circ\text{C} - 16,8 \text{ }^\circ\text{C}) - (4,18 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1})(16,8 \text{ }^\circ\text{C} - 1,5 \text{ }^\circ\text{C}) \\ &= 229,551 \text{ J g}^{-1} \quad (\text{6 sig. Zif.}) \\ \Delta\lambda &= 18,8730 \text{ J g}^{-1} \quad (\text{6 sig. Zif.}) \\ \Rightarrow \lambda &= (230 \pm 19) \text{ J g}^{-1}\end{aligned}$$

Sodass die Ergebnisse überschaubar bleiben, sind die Substitution hier nicht explizit hingeschrieben.

Im Vergleich zum Literaturwert von 333 J g^{-1} unterscheidet sich die zwei Werten signifikant voneinander. Diese Unterschied könnte daran liegen, dass die Masse von dem benutzten Eis schwer bestimmbar ist. Es gibt oft immer noch ein bisschen geschmolzene Eis (Wasser), ob wir das Tauwasser schon gegossen haben. Das soll zu einer größeren Unsicherheit bei der Masse der Eis führen, was in diesem Fall nicht berücksichtigt geworden ist. Mit weniger Eis, wird die Temperaturunterschied $(T_1 - T_M)$ kleiner sein, was weiter zu einer niedrigeren Schmelzwärme führen wird.

Es ist auch beobachtet, dass die Temperatur des Eises nicht $0 \text{ }^\circ\text{C}$ ist. Das könnte entweder aus einem Fehler im Thermometer entstehen, oder es gibt Verunreinigungen im Eis, was die Schmelzwärme ändern werden. Außerdem könnte es auch noch Wärmeaustausch mit der Umgebung geben, was schwer zu messen ist. Alle diese Gründe werden zu einer niedrigeren Schmelzwärme führen, was hier erhalten ist.

Teilversuch 4: Adiabatische Zustandsänderung

Fehler bei der Zeitmessung $\Delta T = 0,4\text{ s}$,

Für 7 Schwingungen ist die gesamte Schwingungsdauer T gemessen als:

Versuch i	1	2	3	4	5	6	τ
Ohne Kolben T_i/s	8,18	8,18	7,96	8,40	7,98	8,26	$\tau_0 = 1,1657$
Mit Kolben T_i/s	5,52	5,63	5,83	5,72	5,47	5,46	$\tau_k = 0,8007$

wobei τ die Zeit für eine Schwingung ist, berechnet durch:

$$\tau = \frac{1}{6 \times 7} \sum_{i=1}^6 T_i = \frac{1}{42} \sum_{i=1}^6 T_i \quad (4.1)$$

mit dem Fehler:

$$\Delta\tau = \frac{1}{42} \sqrt{6(\Delta T)^2} = \frac{1}{7\sqrt{6}} \Delta T = 0,024\text{ s} \quad (4.2)$$

Wir berechnen zunächst die Volumen V :

$$\begin{aligned} V &= \frac{(M_{\text{Wasser+Kolben}} - M_{\text{Kolben}})}{\rho_{\text{Wasser}}} + \pi h \left(\frac{d}{2} \right)^2 \\ &= \frac{(1504,50\text{ g} - 397,35\text{ g})}{9,97 \cdot 10^{-4}\text{ g mm}^{-3}} + \pi(139\text{ mm}) \left(\frac{17\text{ mm}}{2} \right)^2 \\ &= 1\,142\,031,674\text{ mm}^3 \quad (\text{10 sig. Zif.}) \end{aligned}$$

Mit dem Fehler:

$$\Delta V = \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial M_{\text{Wasser+Kolben}}} \Delta M_{\text{Wasser+Kolben}} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial M_{\text{Kolben}}} \Delta M_{\text{Kolben}} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial h} \Delta h \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial d} \Delta d \right)^2} \quad (4.3)$$

wobei

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial M_{\text{Wasser+Kolben}}} &= -\frac{\partial V}{\partial M_{\text{Kolben}}} = \frac{1}{\rho_{\text{Wasser}}} \\ \frac{\partial V}{\partial h} &= \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2 \\ \frac{\partial V}{\partial d} &= 2\pi h \left(\frac{d}{2} \right) \times \frac{1}{2} = \pi h \left(\frac{d}{2} \right) \end{aligned}$$

Somit ist der Fehler wegen $\Delta x := \Delta h = \Delta d$:

$$\begin{aligned} \Delta V &= \sqrt{\left(\frac{(\Delta M_{\text{Wasser+Kolben}})^2 + (\Delta M_{\text{Kolben}})^2}{(\rho_{\text{Wasser}})^2} \right) + \pi^2(\Delta x)^2 \left(\left(\frac{d}{2} \right)^4 + h^2 \left(\frac{d}{2} \right)^2 \right)} \\ &= \sqrt{\left(\frac{(0,13\text{ g})^2 + (0,03\text{ g})^2}{(9,97 \cdot 10^{-4}\text{ g mm}^{-3})^2} \right) + \pi^2(1\text{ mm})^2 \left(\left(\frac{17\text{ mm}}{2} \right)^4 + (139\text{ mm})^2 \left(\frac{17\text{ mm}}{2} \right)^2 \right)} \\ &= 3718,73\text{ mm}^3 \quad (\text{6 sig. Zif.}) \end{aligned}$$

Folglich haben wir $V = (1\,142\,000 \pm 4000) \text{ mm}^3 = (1,142 \pm 0,004) \cdot 10^6 \text{ mm}^3$

Aus der Anleitung gilt:

$$\gamma = \frac{2\rho g V}{pA} \left[\frac{\tau_0^2}{\tau_k^2} - 1 \right] = \frac{2\rho g V}{\pi p \left(\frac{d}{2} \right)^2} \left[\frac{\tau_0^2}{\tau_k^2} - 1 \right] = \frac{8\rho g V}{\pi p d^2} \left[\frac{\tau_0^2}{\tau_k^2} - 1 \right] \quad (4.4)$$

mit dem Fehler:

$$\Delta\gamma = \sqrt{\left(\frac{\partial\gamma}{\partial V} \Delta V \right)^2 + \left(\frac{\partial\gamma}{\partial p} \Delta p \right)^2 + \left(\frac{\partial\gamma}{\partial d} \Delta d \right)^2 + \left(\frac{\partial\gamma}{\partial \tau_0} \Delta \tau_0 \right)^2 + \left(\frac{\partial\gamma}{\partial \tau_k} \Delta \tau_k \right)^2} \quad (4.5)$$

wobei:

$$\begin{aligned} \frac{\partial\gamma}{\partial V} &= \frac{8\rho g}{\pi p d^2} \left[\frac{\tau_0^2}{\tau_k^2} - 1 \right] = \frac{\gamma}{V} \\ \frac{\partial\gamma}{\partial p} &= -\frac{8\rho g V}{\pi p^2 d^2} \left[\frac{\tau_0^2}{\tau_k^2} - 1 \right] = -\frac{\gamma}{p} \\ \frac{\partial\gamma}{\partial d} &= (-2) \frac{8\rho g V}{\pi p d^3} \left[\frac{\tau_0^2}{\tau_k^2} - 1 \right] = -\frac{2\gamma}{d} \\ \frac{\partial\gamma}{\partial \tau_0} &= 2 \times \frac{8\rho g V}{\pi p d^2} \left[\frac{\tau_0}{\tau_k^2} \right] = \frac{16\rho g V}{\pi p d^2} \left[\frac{\tau_0}{\tau_k^2} \right] \\ \frac{\partial\gamma}{\partial \tau_k} &= (-2) \times \frac{8\rho g V}{\pi p d^2} \left[\frac{\tau_0^2}{\tau_k^3} \right] = -\frac{16\rho g V}{\pi p d^2} \left[\frac{\tau_0^2}{\tau_k^3} \right] \end{aligned}$$

Somit ist der Fehler:

$$\Delta\gamma = \sqrt{\gamma^2 \left[\left(\frac{\Delta V}{V} \right)^2 + \left(\frac{\Delta p}{p} \right)^2 + \left(\frac{\Delta d}{d} \right)^2 \right] + \left(\frac{16\rho g V}{\pi p d^2} \left[\frac{\tau_0^2}{\tau_k^2} \right] \right)^2 \left[\left(\frac{\Delta \tau_0}{\tau_0} \right)^2 + \left(\frac{\Delta \tau_k}{\tau_k} \right)^2 \right]} \quad (4.6)$$

Mit den Werten:

Variable	Wert	Bedeutung
V	$(1,142 \pm 0,004) \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$	Volumen der Luft
p	$(9,582 \pm 0,001) \cdot 10^4 \text{ Pa}$	Atmosphärendruck
d	$(1,7 \pm 0,1) \cdot 10^{-2} \text{ m}$	Durchmesser des Rohres
τ_0	$(1,166 \pm 0,024) \text{ s}$	Schwingungsdauer ohne Kolben
τ_k	$(0,801 \pm 0,024) \text{ s}$	Schwingungsdauer mit Kolben
ρ	997 kg m^{-3}	Wasserdichte
g	$9,81 \text{ m s}^{-2}$	Erdbeschleunigung

erhalten wir:

$$\begin{aligned}\gamma &= \frac{8(997 \text{ kg m}^{-3})(9,81 \text{ m s}^{-2})(1,142 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3)}{\pi(9,582 \cdot 10^4 \text{ Pa})(1,7 \cdot 10^{-2} \text{ m})^2} \left[\frac{(1,166 \text{ s})^2}{(0,801 \text{ s})^2} - 1 \right] \\ &= 1,149\,34 \quad (6 \text{ sig. Zif.}) \\ \Delta\gamma &= 0,172\,120 \quad (6 \text{ sig. Zif.}) \\ \Rightarrow \gamma &= 1,15 \pm 0,18\end{aligned}$$

Sodass die Ergebnisse überschaubar bleiben, sind die Substitution hier nicht explizit hingeschrieben.

Als Literaturwert haben wir $\gamma_{\text{lit}} = 1.4$. Da γ_{lit} in dreifaches des Fehlerintervalls von γ liegt, ist also das Ergebnis verträglich mit dem Vergleichswert γ_{lit} . Die Unterschied liegt vermutlich daran, dass die Zeitmessungen wegen der Eigenarbeit nicht so genau waren.

Teilversuch 5: Strahlung eines Hohlraumstrahlers

Raumtemperatur $T_0 = (29,0 \pm 0,1)^\circ\text{C}$

Fehler bei Messung der Spannung $\Delta V = 2 \mu\text{V}$

Fehler bei der Temperatur $\Delta\theta = 0,1^\circ\text{C} = 0,1 \text{ K}$

$\theta / ^\circ\text{C}$	80	100	130	160	190	210	240	270	300	330	350
$V / \mu\text{V}$	10	18	25	52	63	79	108	139	174	222	250

Fehler für $x = (T^4 - T_0^4)$ ist gegeben durch:

$$\Delta x = \Delta(T^4 - T_0^4) = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial T} \Delta T\right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial T_0} \Delta T_0\right)^2} \quad (5.1)$$

mit

$$\frac{\partial x}{\partial T} = 4T^3 \quad \frac{\partial x}{\partial T_0} = -4T_0^3 \quad (5.2)$$

Somit gilt wegen $\Delta T_0 = \Delta T = \Delta\theta = 0,1 \text{ K}$:

$$\begin{aligned}\Delta x &= \sqrt{(4T^3 \cdot \Delta T)^2 + (-4T_0^3 \cdot \Delta T_0)^2} \\ &= 4\Delta\theta \sqrt{T^6 + T_0^6}\end{aligned}$$

In diesem Fall ist die Energieverlustrate wegen Strahlung aus den Hohlraum proportional zu T^4 und die Energiegewinnrate des Hohlraums aus der Umgebung proportional zu T_0^4 . Somit ist die Nettoverlust an Energie, die wir im Experiment gemessen haben, proportional zu $T^4 - T_0^4$. Deshalb ist T_0^4 hier abgezogen.

Die Daten wurden dann mit gnuplot geplottet und es wurde eine Kurvenanpassung zur $V = bx + c$ durchgeführt. Die Berechnung der jeweiligen Fehler erfolgt dann direkt im gnuplot. Siehe Appendix C für die genaue Berechnung im Skript.

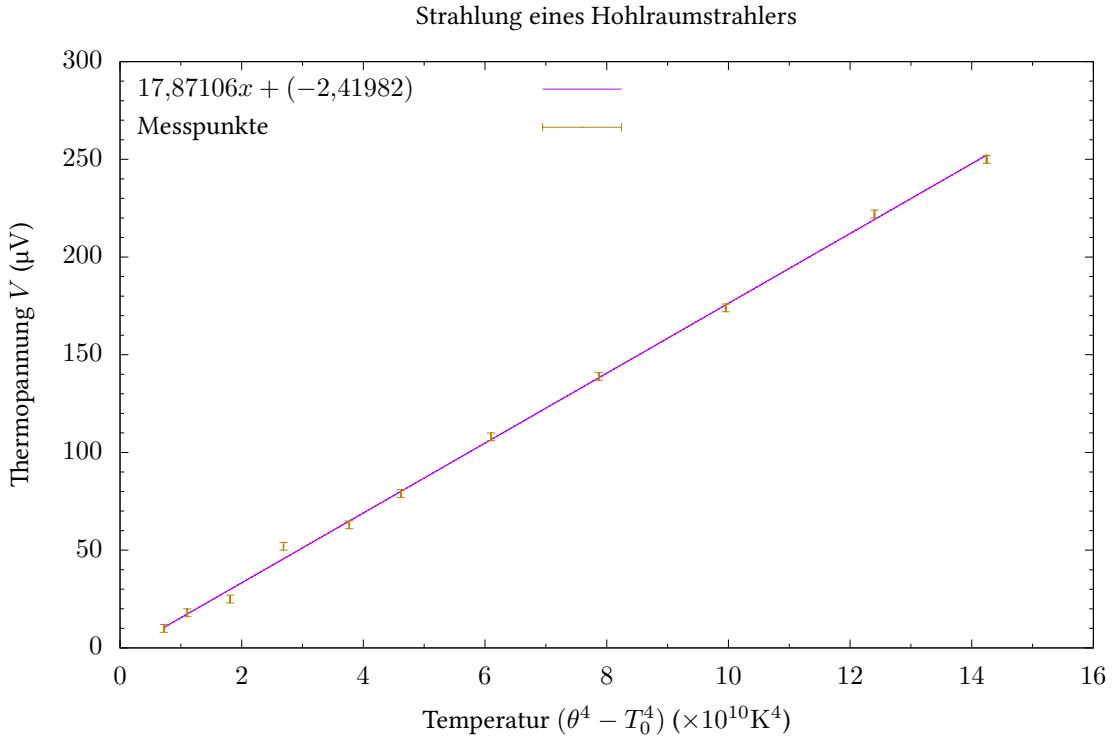


Abbildung 5.1: Überprüfung des Stefan-Boltzmannschen Gesetzes
 $\chi_{\text{red}}^2 = 2,438\,32$

Als Endergebnis erhalten wir:

$$\begin{array}{ll} b & (17,8711 \pm 0,2133) \cdot 10^{-10} \mu\text{V}/\text{K}^4 \\ c & (-2,420 \pm 1,577) \mu\text{V} \end{array}$$

Da die Auswertung mittels gnuplot erfolgt, sind die Fehlerstriefen nicht gezeichnet, sondern nur als die Unsicherheit in b protokolliert.

Aus der guten Kurveanpassung sieht man, dass das Stefan-Boltzmannsche Gesetz tatsächlich stimmt. Die Abweichungen der Punkten von der optimalen Geraden ist wahrscheinlich wegen der nicht konstanten Temperatur des Raumes während des Experiments.

A gnuplot Quellcode zur Auswertung von Teilversuch 1

```

1 #!/usr/bin/env gnuplot
2
3 set term epslatex color size 6in, 4in
4 set output "tv1-plot.tex"
5 set decimalsign locale 'de_DE.UTF-8'
6
7 set title "Erwärmung von Wasser im Kalorimeter"
8 set ylabel "Temperatur  $\theta$  ( $\text{celsius}$ )"
9 set xlabel "Zeit  $t$  ( $\text{second}$ )"
10
11 set mxtics
12 set mytics
13 set samples 10000
14
15 f(x) = m*x + c
16
17 # (x, y, xdelta, ydelta)
18 fit f(x) "tv1.dat" u 1:2:(0.2):(0.3) xyerrors via m,c
19
20 # Linien
21 set key top left Left spacing 1.3
22
23 titel = "$".gprintf("%.5f", m)."t + ".gprintf("%.5f", c).""
24 plot f(x) title titel lc rgb 'dark-magenta', \
25     "tv1.dat" u 1:2:(0.2):(0.3) with xyerrorbars title "Messpunkte"
→     pointtype 2 lc rgb 'dark-goldenrod'
```

mit tv1.dat:

# t/s	theta/degC	10	480	29,5
0	25,6	11	540	30,2
60	26,5	12	600	30,8
120	26,7	13	660	31,2
180	27,0	14	720	31,6
240	27,6	15	780	32,0
300	28,1	16	840	32,9
360	28,6	17	900	33,1
420	29,1			

Rohausgabe:

```

1 final sum of squares of residuals : 3.32228
2 rel. change during last iteration : -3.25589e-08
3
4 degrees of freedom (FIT_NDF) : 14
5 rms of residuals (FIT_STDFIT) = sqrt(WSSR/ndf) : 0.487141
6 variance of residuals (reduced chisquare) = WSSR/ndf : 0.237306
7 p-value of the Chisq distribution (FIT_P) : 0.998351
8
```

```

9   Final set of parameters           Asymptotic Standard Error
10  =====
11  m          = 0.00831618      +/- 0.0001321    (1.588%)
12  c          = 25.664         +/- 0.06977    (0.2719%)
13
14  correlation matrix of the fit parameters:
15          m       c
16  m       1.000
17  c      -0.852  1.000

```

B gnuplot Quellcode zur Auswertung von Teilversuch 2

```

1  #!/usr/bin/env gnuplot
2
3  set term epslatex color size 6in, 4in
4  set output "tv2-plot.tex"
5  set decimalsign locale 'de_DE.UTF-8'
6
7  set title "Temperaturverlauf vor und nach Eintauchen von Probekörpern"
8  set ylabel "Temperatur $\\theta$ ($\\text{\\si{\\celsius}}$)"
9  set xlabel "Zeit $t$ ($\\text{\\si{\\second}}$)"
10
11 set mxtics
12 set mytics
13 set samples 10000
14
15 f(x) = m*x + c
16 g(x) = n*x + d
17
18 # (x, y, xdelta, ydelta)
19 fit [-20:0] f(x) "tv2-1.dat" u 1:2:(0.5):(0.5) xyerrors via m,c
20 fit [0:400] g(x) "tv2-1.dat" u 1:2:(0.5):(0.5) xyerrors via n,d
21
22 titelaone = "1: $".gprintf("%.5f", m)."x + (" .gprintf("%.5f", c).")$"
23 titelatwo = "1: $".gprintf("%.5f", n)."x + (" .gprintf("%.5f", d).")$"
24
25 h(x) = p*x + o
26 q(x) = j*x + k
27
28 fit [-20:0] h(x) "tv2-2.dat" u 1:2:(0.5):(0.5) xyerrors via p,o
29 fit [0:400] q(x) "tv2-2.dat" u 1:2:(0.5):(0.5) xyerrors via j,k
30
31 titelbone = "2: $".gprintf("%.5f", p)."x + (" .gprintf("%.5f", o).")$"
32 titelbtwo = "2: $".gprintf("%.5f", j)."x + (" .gprintf("%.5f", k).")$"
33
34 # Linien
35 set key bottom right spacing 1.3
36

```

```

37 set yrang [22:34]
38
39 plot f(x) title titelaone, \
40     g(x) title titelatwo, \
41     h(x) title titelbone, \
42     q(x) title titelbtwo, \
43     "tv2-1.dat" u 1:2:(0.5) with xyerrorbars title "Körper 1" pointtype
44     ↵ 0, \
45     "tv2-2.dat" u 1:2:(0.5) with xyerrorbars title "Körper 2" pointtype
46     ↵ 0

```

mit tv2-1.dat:

1	# t/s	Theta/deg	C	9	20	32,3	17	193	32,1
2	-20	26,5		10	25	31,8	18	232	31,6
3	-15	26,2		11	30	31,6	19	240	31,6
4	-10	26,3		12	35	32,2	20	270	31,1
5	-5	26,3		13	40	31,2	21	300	31,7
6	5	32,3		14	90	31,6	22	335	31,5
7	10	32,8		15	120	31,7	23	370	31,2
8	15	32,4		16	150	32,0			

und tv2-2.dat:

1	# t/s	Theta/deg	C	9	15	28,7	17	105	28,2
2	-20	25,0		10	20	28,4	18	135	28,1
3	-15	24,5		11	25	28,5	19	165	28,4
4	-10	24,2		12	30	28,5	20	195	28,3
5	-5	24,7		13	35	28,5	21	225	28,4
6	2	27,2		14	40	28,4	22	255	28,3
7	5	30,2		15	45	28,5	23	285	28,2
8	10	29,1		16	75	28,3	24	315	28,4

Rohausgabe:

```

1 final sum of squares of residuals : 0.139986
2 rel. change during last iteration : 0
3
4 degrees of freedom      (FIT_NDF)          : 2
5 rms of residuals        (FIT_STDFIT) = sqrt(WSSR/ndf)   : 0.264562
6 variance of residuals (reduced chisquare) = WSSR/ndf    : 0.069993
7 p-value of the Chisq distribution (FIT_P)       : 0.9324
8
9 Final set of parameters           Asymptotic Standard Error
10 ======                      ======
11 m                  = -0.0100012      +/- 0.01183      (118.3%)
12 c                  = 26.2          +/- 0.162        (0.6184%)
13
14 correlation matrix of the fit parameters:

```

```

15          m      c
16          m      1.000
17          c      0.913  1.000
18
19 -----
20
21 final sum of squares of residuals : 9.08037
22 rel. change during last iteration : -5.8453e-13
23
24 degrees of freedom (FIT_NDF) : 16
25 rms of residuals (FIT_STDFIT) = sqrt(WSSR/ndf) : 0.753341
26 variance of residuals (reduced chisquare) = WSSR/ndf : 0.567523
27 p-value of the Chisq distribution (FIT_P) : 0.910067
28
29 Final set of parameters      Asymptotic Standard Error
30 =====      =====
31 n      = -0.00224382      +/- 0.0007261   (32.36%)
32 d      = 32.1258         +/- 0.1338     (0.4163%)
33
34 correlation matrix of the fit parameters:
35          n      d
36          n      1.000
37          d      -0.748  1.000
38
39 -----
40
41 final sum of squares of residuals : 1.07138
42 rel. change during last iteration : 0
43
44 degrees of freedom (FIT_NDF) : 2
45 rms of residuals (FIT_STDFIT) = sqrt(WSSR/ndf) : 0.731909
46 variance of residuals (reduced chisquare) = WSSR/ndf : 0.535691
47 p-value of the Chisq distribution (FIT_P) : 0.585264
48
49 Final set of parameters      Asymptotic Standard Error
50 =====      =====
51 p      = -0.024001      +/- 0.03274   (136.4%)
52 o      = 24.3           +/- 0.4483    (1.845%)
53
54 correlation matrix of the fit parameters:
55          p      o
56          p      1.000
57          o      0.913  1.000
58
59 -----
60
61 final sum of squares of residuals : 20.581
62 rel. change during last iteration : -9.95489e-07
63

```

```

64 degrees of freedom      (FIT_NDF)          : 17
65 rms of residuals        (FIT_STDFIT) = sqrt(WSSR/ndf)    : 1.10029
66 variance of residuals  (reduced chisquare) = WSSR/ndf   : 1.21064
67 p-value of the Chisq distribution (FIT_P)       : 0.245597
68
69 Final set of parameters           Asymptotic Standard Error
70 =====
71 j          = -0.00123965      +/- 0.001241      (100.1%)
72 k          = 28.5819         +/- 0.1808       (0.6325%)
73
74 correlation matrix of the fit parameters:
75          j      k
76 j      1.000
77 k      -0.716  1.000

```

C gnuplot Quellcode zur Auswertung von Teilversuch 5

```

1 #!/usr/bin/env gnuplot
2
3 set term epslatex color size 6in, 4in
4 set output "tv5-plot.tex"
5 set decimalsign locale 'de_DE.UTF-8'
6
7 set title "Strahlung eines Hohlraumstrahlers"
8 set ylabel "Thermopannung $V$ ($\si{\micro\volt}$)"
9 set xlabel "Temperatur $(\theta^4 - T_0^4)$ ($\times 10^{10}$"
10   $\rightarrow \si{\kelvin^4}$)"
11
12 set mxtics
13 set mytics
14 set samples 10000
15
16 f(x) = m*x + c
17
18 # (x, y, xdelta, ydelta)
19 fit f(x) "tv5.dat" u (((\$1 + 273.15)**4 -
20   (\$2+273.15)**4)/10**10):2:(((4*0.1*sqrt((\$1+273.15)**6 +
21   (\$2+273.15)**6))/10**10):(2) xyerrors via m,c
22
23 # Linien
24 set key top left Left spacing 1.3
25
26 titel = "$".gprintf("%.5f", m)."x + (" .gprintf("%.5f", c).")$"
27 plot f(x) title titel lc rgb 'dark-magenta', \
28   "tv5.dat" u (((\$1 + 273.15)**4 -
29   (\$2+273.15)**4)/10**10):2:(((4*0.1*sqrt((\$1+273.15)**6 +
30   (\$2+273.15)**6))/10**10):(2) with xyerrorbars title "Messpunkte"
31   pointtype 0 lc rgb 'dark-goldenrod'

```

mit tv5.dat:

```

1 #T/C Spannung
2 80 10
3 100 18
4 130 25
5 160 52
6 190 63
7 210 79
8 240 108
9 270 139
10 300 174
11 330 222
12 350 250

```

Rohausgabe:

```

1 final sum of squares of residuals : 21.9449
2 rel. change during last iteration : -7.37544e-09
3
4 degrees of freedom (FIT_NDF) : 9
5 rms of residuals (FIT_STDFIT) = sqrt(WSSR/ndf) : 1.56151
6 variance of residuals (reduced chisquare) = WSSR/ndf : 2.43832
7 p-value of the Chisq distribution (FIT_P) : 0.00905537
8
9 Final set of parameters Asymptotic Standard Error
10 ===== =====
11 m = 17.8711 +/- 0.2133 (1.193%)
12 c = -2.41982 +/- 1.577 (65.15%)
13
14 correlation matrix of the fit parameters:
15 m c
16 m 1.000
17 c -0.801 1.000

```