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)	$(24{,}0 \pm 0{,}1)$ °C
Warm	(θ_2)	$(74{,}2 \pm 0{,}1)$ °C
Mischung	(θ_m)	$(36{,}5 \pm 0{,}1)$ °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:

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

Aus der Anleitung ist der Wasserwert des Kalorimeters gegeben durch:

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

und der Fehler:

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

$$\begin{aligned}(\Delta m_w^*)^2 &= \left(\frac{M_w(\theta_2 - \theta_m)}{(\theta_m - \theta_1)}\sqrt{\left(\frac{\Delta(\theta_2 - \theta_m)}{(\theta_2 - \theta_m)}\right)^2 + \left(\frac{\Delta(\theta_m - \theta_1)}{(\theta_m - \theta_1)}\right)^2 + \left(\frac{\Delta M_w}{M_w}\right)^2}\right)^2 \\ &\quad + (\Delta M_k)^2 \qquad (1.4)\\ &= \left(\frac{M_w(\theta_2 - \theta_m)}{(\theta_m - \theta_1)}\sqrt{2(\Delta\theta)^2\left(\frac{1}{(\theta_2 - \theta_m)^2} + \frac{1}{(\theta_m - \theta_1)^2}\right) + \left(\frac{\Delta M_w}{M_w}\right)^2}\right)^2 \\ &\quad + (\Delta M_k)^2 \qquad (1.5)\\ &= \left(\frac{M_w(\theta_2 - \theta_m)}{(\theta_m - \theta_1)}\right)^2 \cdot \left(2(\Delta\theta)^2\left(\frac{1}{(\theta_2 - \theta_m)^2} + \frac{1}{(\theta_m - \theta_1)^2}\right) + \left(\frac{\Delta M_w}{M_w}\right)^2\right) \\ &\quad + (\Delta M_k)^2 \qquad (1.6)\end{aligned}$$

Wir substituieren die Werten:

$$\begin{aligned} m_w^* &= \frac{(214{,}72\,\mathrm{g})(74{,}2\,^\circ\mathrm{C} - 36{,}5\,^\circ\mathrm{C})}{(36{,}5\,^\circ\mathrm{C} - 24{,}0\,^\circ\mathrm{C})} - 601{,}68\,\mathrm{g} \\ &= \frac{(214{,}72\,\mathrm{g})(37{,}7\,^\circ\mathrm{C})}{(12{,}5\,^\circ\mathrm{C})} - 601{,}68\,\mathrm{g} \\ &= 647{,}595\,52\,\mathrm{g} - 601{,}68\,\mathrm{g} \\ &= 45{,}915\,52\,\mathrm{g} \\ (\Delta m_w^*)^2 &= (647{,}595\,52\,\mathrm{g})^2 \cdot \left(2(0{,}1\,^\circ\mathrm{C})^2\left(\frac{1}{(37{,}7\,^\circ\mathrm{C})^2} + \frac{1}{(12{,}5\,^\circ\mathrm{C})^2}\right) + \left(\frac{0{,}04\,\mathrm{g}}{214{,}72\,\mathrm{g}}\right)^2\right) \\ &\quad + (0{,}14\,\mathrm{g})^2 \\ \Delta m_w^* &= 29{,}8919\,\mathrm{g} \qquad \text{(6 sig. Zif.)} \end{aligned}$$

Somit ist $m_w^* = (50 \pm 30)$ g. Der im Kapitel 1.4 gegebene Literaturwert $m_w^* = 80$ 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 $\Delta t = 0{,}2\,\mathrm{s}$
Fehler bei Messung der Temperatur $\Delta x = 0{,}3\,°\mathrm{C}$

Messreihe

t/min	0	60	120	180	240	300	360	420
$\theta/°\mathrm{C}$	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
$\theta/°\mathrm{C}$	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.

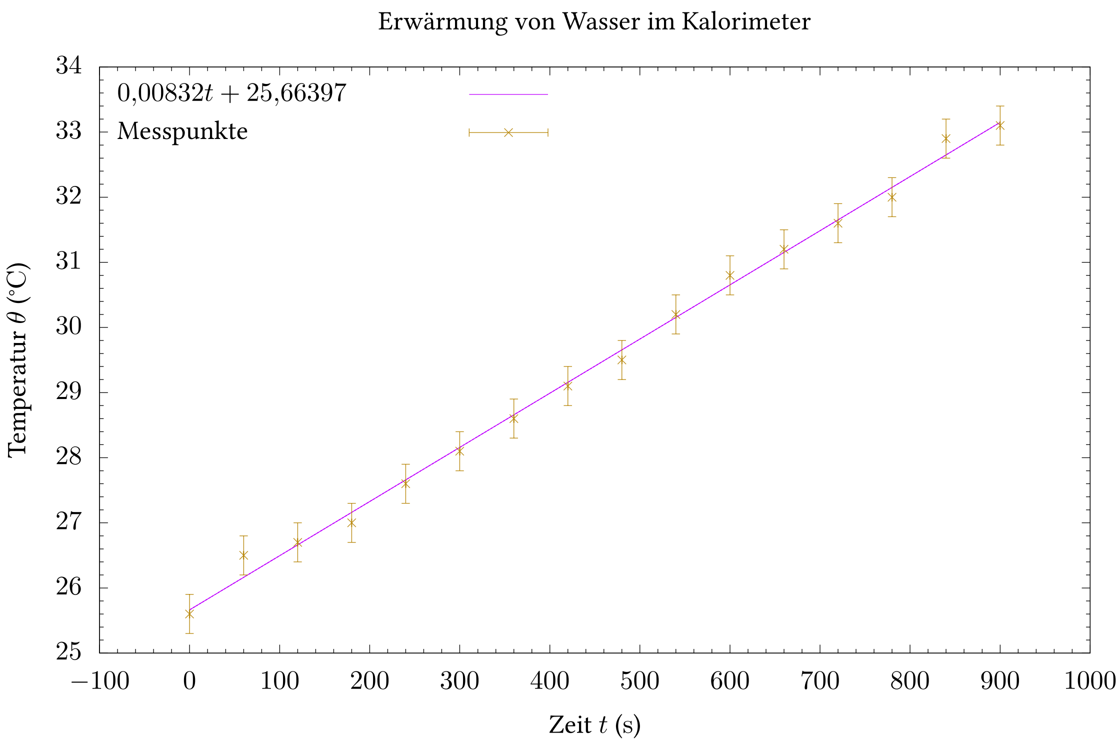


Abbildung 1.1: Temperaturverlauf bei der Erwärmung von Wasser im Kalorimeter
$\chi^2_{\mathrm{red}} = 0{,}237\,306 \implies$ Gute Anpassung

Als Endergebnis erhalten wir:

b	$(8{,}3162 \pm 0{,}1321) \cdot 10^{-3}\,°\mathrm{C\,s^{-1}}$
c	$(25{,}664 \pm 0{,}070)\,°\mathrm{C}$

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

Aus der Anleitung gilt:

$$Q = mC_S\Delta\theta \qquad \Leftrightarrow \qquad IV\Delta t = mC_S\Delta\theta \qquad \Leftrightarrow \qquad \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{IV}{mC_S} \tag{1.7}$$

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

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

Da wir nur die Unsicherheiten der Geradensteigung und die Unsicherheit des Wasserwertes berücksichtigen müssen, vernachlässigen wir die Unsicherheiten bei $m_{\text{w+g}}$, 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

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

Es gilt somit:

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

Wir haben als Messwerten:

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

Damit:

$$\begin{aligned} C_S &= \frac{(1{,}6\,\mathrm{A})(21{,}50\,\mathrm{V})}{(903{,}20\,\mathrm{g} - 306{,}83\,\mathrm{g} + 50\,\mathrm{g})\,(8{,}32 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{K\,s^{-1}})} \\ &= 6{,}396\,67\,\mathrm{J\,g^{-1}\,K^{-1}} \\ \Delta C_S^2 &= \left(\frac{(1{,}6\,\mathrm{A})(21{,}50\,\mathrm{V})(30\,\mathrm{g})}{(8{,}32 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{K\,s^{-1}})\,(903{,}20\,\mathrm{g} - 306{,}83\,\mathrm{g} + 50\,\mathrm{g})^2}\right)^2 \\ &\quad + \left(\frac{(1{,}6\,\mathrm{A})(21{,}50\,\mathrm{V})(0{,}14 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{K\,s^{-1}})}{(8{,}32 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{K\,s^{-1}})^2\,(903{,}20\,\mathrm{g} - 306{,}83\,\mathrm{g} + 50\,\mathrm{g})}\right)^2 \\ \Delta C_S &= 0{,}316\,471\,\mathrm{J\,g^{-1}\,K^{-1}} \end{aligned}$$

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

Für den Literaturwert benutzen wir den Mittelwert von den Temperaturen und verwenden die Wärmekapazität bei diesem Temperatur. Also $\sum_i \theta_i{}^\circ\mathrm{C} = 29{,}406\,^\circ\mathrm{C} \approx 30\,^\circ\mathrm{C}$. Der Literaturwert von der Wärmekapazität des Wassers lautet $C_{S\,\text{(lit)}} = 4{,}1801\,\mathrm{J\,g^{-1}\,K^{-1}}$ bei $30\,^\circ\mathrm{C}$ [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 Experiements deutlich schwingt. Somit könnte die tatsächliche Unsicherheit bei der Messung deutlich größer sein als die, die der Hersteller ermittelt hat. Das hat vermütlich 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 $\Delta t = 0{,}5\,\mathrm{s}$
Fehler bei Temperaturmessungen $\Delta\theta = 0{,}5\,^\circ\mathrm{C}$

Masse des Körpers 1 $M_1 = (485{,}25 \pm 0{,}03)\,\mathrm{g}$ (Al)
Masse des Körpers 2 $M_2 = (1945{,}80 \pm 0{,}13)\,\mathrm{g}$ (Pb)

Probekörper 1												
t/s	−20	−15	−10	−5	5	10	15	20	25	30	35	
θ/°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	
θ/°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
θ/°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	
θ/°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.

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

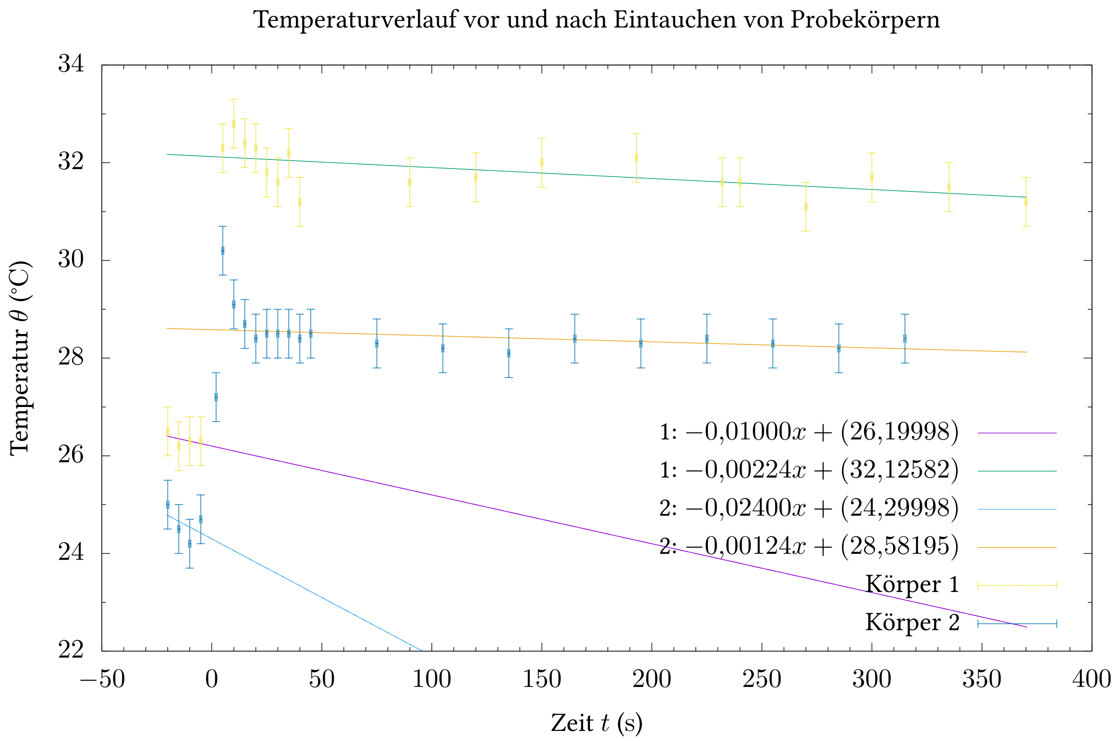


Abbildung 2.1: Temperaturverlauf nach Eintauchen von Probekörpern ins Wasser

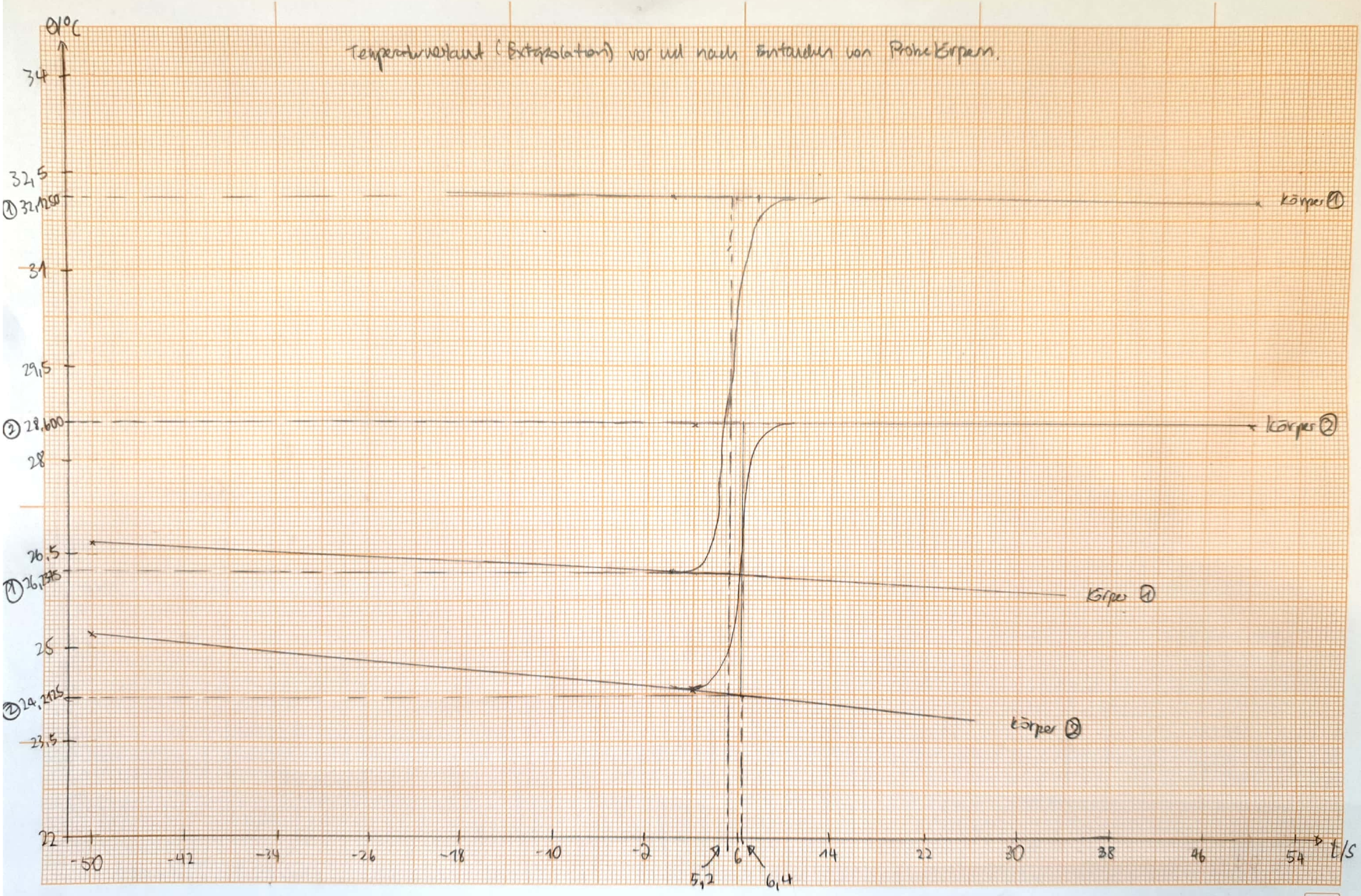
Als Endergebnis erhalten wir:

Körper 1	Vorlauf:	$\theta = ((-0{,}010\,00 \pm 0{,}011\,83)\,°\mathrm{C\,s^{-1}})t + (26{,}200 \pm 0{,}162)\,°\mathrm{C}$
	Nachlauf:	$\theta = ((-0{,}002\,243\,8 \pm 0{,}000\,726\,1)\,°\mathrm{C\,s^{-1}})t + (32{,}1258 \pm 0{,}1338)\,°\mathrm{C}$
Körper 2	Vorlauf:	$\theta = ((-0{,}024\,00 \pm 0{,}032\,74)\,°\mathrm{C\,s^{-1}})t + (24{,}3000 \pm 0{,}4483)\,°\mathrm{C}$
	Nachlauf:	$\theta = ((-0{,}001\,240 \pm 0{,}001\,241)\,°\mathrm{C\,s^{-1}})t + (28{,}5819 \pm 0{,}1808)\,°\mathrm{C}$

Gerundet:

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

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.



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	32,262 72 °C	31,9744 °C
Körper 2	Anfang	24,928 °C	23,416 °C
	Ende	28,770 64 °C	28,374 °C

Also haben wir:

	θ_a	θ_e
Körper 1	$(26{,}15 \pm 0{,}23)$ °C	$(32{,}12 \pm 0{,}15)$ °C
Körper 2	$(24{,}2 \pm 0{,}8)$ °C	$(28{,}57 \pm 0{,}20)$ °C

θ_e ist in diesem Fall die Mischungstemperatur.

Aus der Anleitung gilt:

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

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	$(1125{,}00 \pm 0{,}13)$ g	$(307{,}57 \pm 0{,}03)$ g	$(817{,}43 \pm 0{,}14)$ g
Körper 2	$(1095{,}80 \pm 0{,}13)$ g	$(307{,}11 \pm 0{,}03)$ g	$(788{,}69 \pm 0{,}14)$ g

Körper 1 (Al)

Mit der Werten:

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

erhalten wir:

$$\begin{aligned} c_s &= \frac{(4{,}18\,\mathrm{J\,g^{-1}\,K^{-1}})((817{,}43\,\mathrm{g}) + (80\,\mathrm{g}))(32{,}12\,°\mathrm{C} - 26{,}15\,°\mathrm{C})}{(485{,}25\,\mathrm{g})(80{,}0\,°\mathrm{C} - 32{,}12\,°\mathrm{C})} \\ &= 0{,}9639\,\mathrm{J\,g^{-1}\,K^{-1}} \qquad \text{(4 sig. Zif.)} \end{aligned}$$

Mittels der Min-Max-Methode erhalten wir:

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

Körper 2 (Pb)

Mit der Werten:

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

erhalten wir:

$$\begin{aligned} c_s &= \frac{(4{,}18\,\mathrm{J\,g^{-1}\,K^{-1}})(788{,}69\,\mathrm{g} + 80\,\mathrm{g})(28{,}57\,°\mathrm{C} - 24{,}2\,°\mathrm{C})}{(1945{,}80\,\mathrm{g})(77{,}7\,°\mathrm{C} - 28{,}57\,°\mathrm{C})} \\ &= 0{,}1660\,\mathrm{J\,g^{-1}\,K^{-1}} \qquad \text{(4 sig. Zif.)} \end{aligned}$$

Mittels der Min-Max-Methode erhalten wir:

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

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

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

Nach Regel von Dulong und Petit gilt:

$$C_\mathrm{v}^\mathrm{m} = 3R = 3(8{,}31\,\mathrm{J\,mol^{-1}\,K^{-1}}) = 24{,}93\,\mathrm{J\,mol^{-1}\,K^{-1}} \tag{2.2}$$

Dieser Literaturwert liegt in dem Fehlerintervall von beiden experimental 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:

$$
\begin{aligned}
m_1 &= m_{\text{wasser}} = m_{\text{Wasser+Alu}} - m_{\text{Alu}} = 717{,}30\,\text{g} - 295{,}06\,\text{g} = 422{,}24\,\text{g} && (3.1)\\
\Delta m_1 &= \sqrt{(\Delta m_{\text{Wasser+Alu}})^2 + (\Delta m_{\text{Alu}})^2} = \sqrt{(0{,}13\,\text{g})^2 + (0{,}03\,\text{g})^2}\\
&= 0{,}14\,\text{g} && (3.2)\\
m_{\text{Eis}} &= m_{\text{Eis+Alu}} - m_{\text{Alu}} = 505{,}14\,\text{g} - 296{,}65\,\text{g} = 208{,}49\,\text{g} && (3.3)\\
\Delta m_{\text{Eis}} &= \sqrt{(\Delta m_{\text{Eis+Alu}})^2 + (\Delta m_{\text{Alu}})^2} = \sqrt{(0{,}03\,\text{g})^2 + (0{,}03\,\text{g})^2}\\
&= 0{,}05\,\text{g} && (3.4)\\
& && (3.5)
\end{aligned}
$$

Aus der Anleitung gilt:

$$
\begin{aligned}
c_{\text{w}} m_{\text{Eis}}(T_M - T_0) + \lambda m_{\text{Eis}} &= c_{\text{w}}(m_1 + m_w^*)(T_1 - T_M) && (3.6)\\
\Leftrightarrow \lambda &= \frac{c_{\text{w}}\left[(m_1 + m_w^*)(T_1 - T_M) - m_{\text{Eis}}(T_M - T_0)\right]}{m_{\text{Eis}}}\\
&= \frac{c_{\text{w}}}{m_{\text{Eis}}}(m_1 + m_w^*)(T_1 - T_M) - c_{\text{w}}(T_M - T_0) && (3.7)
\end{aligned}
$$

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:

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

somit:

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

Mit der Werten:

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

haben wir:

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

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

Im Vergleich zum Literaturwert von $333\ \text{J}\,\text{g}^{-1}$ 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 geschmolzte 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 niedriger Schmelzwärme führen wird.

Es ist auch beobachtet, dass die Temperatur des Eises nicht 0 °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 niedriger Schmelzwärme führen, was hier erhalten ist.

Teilversuch 4: Adiabatische Zustandsänderung

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

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:

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

mit dem Fehler:

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

Wir berechnen zunächst die Volumen V:

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

Mit dem Fehler:

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

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 $\Delta x \coloneqq \Delta h = \Delta d$:

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

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

Aus der Anleitung gilt:

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

mit dem Fehler:

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

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:

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

Mit den Werten:

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

erhalten wir:

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

Sodass die Ergebnisse überschaubar bleiben, sind die Subtitution 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 vermütlich daran, dass die Zeitmessungen wegen der Eigenarbeit nicht so genau waren.

Teilversuch 5: Strahlung eines Hohlraumstrahers

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

Fehler bei Messung der Spannung $\Delta V = 2\,\mu\mathrm{V}$
Fehler bei der Temperatur $\Delta\theta = 0{,}1\,^\circ\mathrm{C} = 0{,}1\,\mathrm{K}$

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

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

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

mit

$$\frac{\partial x}{\partial T} = 4T^3 \qquad\qquad \frac{\partial x}{\partial T_0} = -4T_0^3 \tag{5.2}$$

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

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

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.

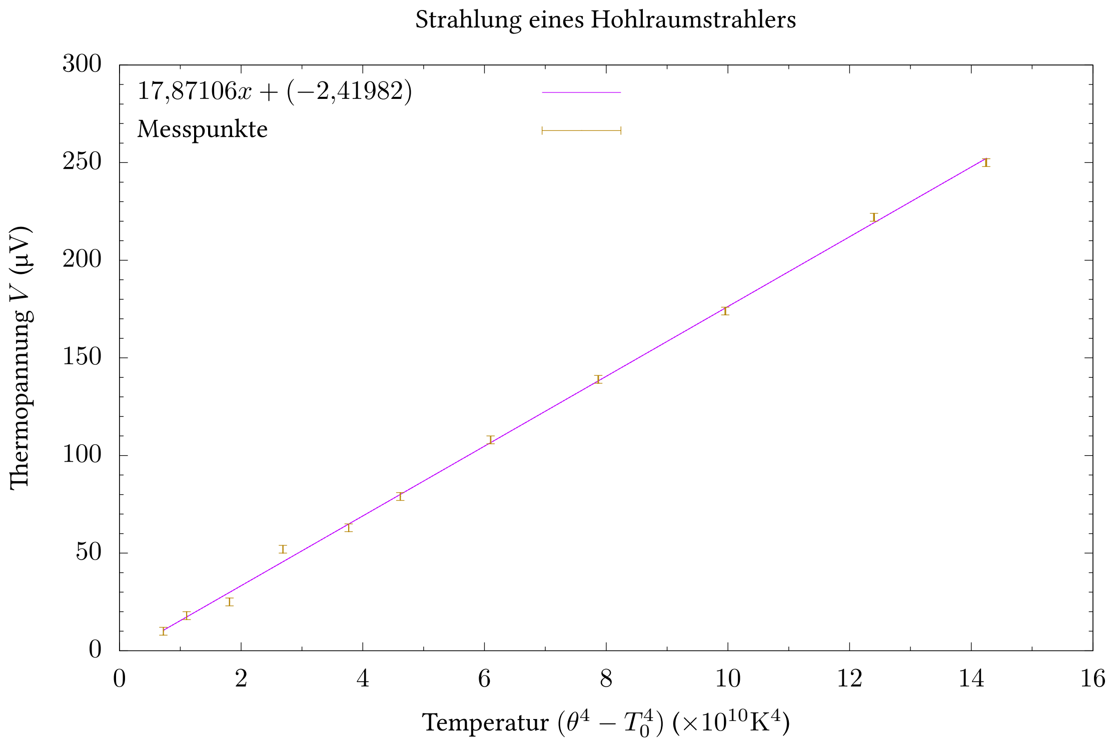


Abbildung 5.1: Überprüfung des Stefan-Boltzmannschen Gesetzes
$\chi^2_{\text{red}} = 2{,}438\,32$

Als Endergebnis erhalten wir:

b	$(17{,}8711 \pm 0{,}2133) \cdot 10^{-10}\,\mu\mathrm{V/K}^4$
c	$(-2{,}420 \pm 1{,}577)\,\mu\mathrm{V}$

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 Gerade ist wahrscheinlich wegen der nicht konstante Temperatur des Räumes während des Experiments.

A gnuplot Quellcode zur Auswertung von Teilversuch 1

```
#!/usr/bin/env gnuplot

set term epslatex color size 6in, 4in
set output "tv1-plot.tex"
set decimalsign locale 'de_DE.UTF-8'

set title "Erwärmung von Wasser im Kalorimeter"
set ylabel "Temperatur $\\theta$ ($\\si{\\celsius}$)"
set xlabel "Zeit $t$ ($\\si{\\second}$)"

set mxtics
set mytics
set samples 10000

f(x) = m*x + c

# (x, y, xdelta, ydelta)
fit f(x) "tv1.dat" u 1:2:(0.2):(0.3) xyerrors via m,c

# Linien
set key top left Left spacing 1.3

titel = "$".gprintf("%.5f", m)."t + ".gprintf("%.5f", c)."$"
plot f(x) title titel lc rgb 'dark-magenta', \
        "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
0      25,6
60     26,5
120    26,7
180    27,0
240    27,6
300    28,1
360    28,6
420    29,1
480    29,5
540    30,2
600    30,8
660    31,2
720    31,6
780    32,0
840    32,9
900    33,1
```

Rohausgabe:

```
final sum of squares of residuals : 3.32228
rel. change during last iteration : -3.25589e-08

degrees of freedom    (FIT_NDF)                        : 14
rms of residuals      (FIT_STDFIT) = sqrt(WSSR/ndf)    : 0.487141
variance of residuals (reduced chisquare) = WSSR/ndf   : 0.237306
p-value of the Chisq distribution (FIT_P)              : 0.998351

```

```
Final set of parameters            Asymptotic Standard Error
=======================            ==========================
m               = 0.00831618       +/- 0.0001321    (1.588%)
c               = 25.664           +/- 0.06977      (0.2719%)

correlation matrix of the fit parameters:
                m      c
m               1.000
c              -0.852  1.000
```

B gnuplot Quellcode zur Auswertung von Teilversuch 2

```
#!/usr/bin/env gnuplot

set term epslatex color size 6in, 4in
set output "tv2-plot.tex"
set decimalsign locale 'de_DE.UTF-8'

set title "Temperaturverlauf vor und nach Eintauchen von Probekörpern"
set ylabel "Temperatur $\\theta$ ($\\si{\\celsius}$)"
set xlabel "Zeit $t$ ($\\si{\\second}$)"

set mxtics
set mytics
set samples 10000

f(x) = m*x + c
g(x) = n*x + d

# (x, y, xdelta, ydelta)
fit [-20:0] f(x) "tv2-1.dat" u 1:2:(0.5):(0.5) xyerrors via m,c
fit [0:400] g(x) "tv2-1.dat" u 1:2:(0.5):(0.5) xyerrors via n,d

titelaone = "1: $".gprintf("%.5f", m)."x + (".gprintf("%.5f", c).")$"
titelatwo = "1: $".gprintf("%.5f", n)."x + (".gprintf("%.5f", d).")$"

h(x) = p*x + o
q(x) = j*x + k

fit [-20:0] h(x) "tv2-2.dat" u 1:2:(0.5):(0.5) xyerrors via p,o
fit [0:400] q(x) "tv2-2.dat" u 1:2:(0.5):(0.5) xyerrors via j,k

titelbone = "2: $".gprintf("%.5f", p)."x + (".gprintf("%.5f", o).")$"
titelbtwo = "2: $".gprintf("%.5f", j)."x + (".gprintf("%.5f", k).")$"

# Linien
set key bottom right spacing 1.3

```

```
set yrange [22:34]

plot f(x) title titelaone, \
     g(x) title titelatwo, \
     h(x) title titelbone, \
     q(x) title titelbtwo, \
    "tv2-1.dat" u 1:2:(0.5):(0.5) with xyerrorbars title "Körper 1" pointtype 0, \
    "tv2-2.dat" u 1:2:(0.5):(0.5) with xyerrorbars title "Körper 2" pointtype 0
```

mit `tv2-1.dat`:

```
# t/s   Theta/deg C
-20 26,5
-15 26,2
-10 26,3
-5  26,3
5   32,3
10  32,8
15  32,4
20  32,3
25  31,8
30  31,6
35  32,2
40  31,2
90  31,6
120 31,7
150 32,0
193 32,1
232 31,6
240 31,6
270 31,1
300 31,7
335 31,5
370 31,2
```

und `tv2-2.dat`:

```
# t/s   Theta/deg C
-20 25,0
-15 24,5
-10 24,2
-5  24,7
2   27,2
5   30,2
10  29,1
15  28,7
20  28,4
25  28,5
30  28,5
35  28,5
40  28,4
45  28,5
75  28,3
105 28,2
135 28,1
165 28,4
195 28,3
225 28,4
255 28,3
285 28,2
315 28,4
```

Rohausgabe:

```
final sum of squares of residuals : 0.139986
rel. change during last iteration : 0

degrees of freedom    (FIT_NDF)                        : 2
rms of residuals      (FIT_STDFIT) = sqrt(WSSR/ndf)    : 0.264562
variance of residuals (reduced chisquare) = WSSR/ndf   : 0.069993
p-value of the Chisq distribution (FIT_P)              : 0.9324

Final set of parameters            Asymptotic Standard Error
=======================            ==========================
m               = -0.0100012       +/- 0.01183      (118.3%)
c               = 26.2             +/- 0.162        (0.6184%)

correlation matrix of the fit parameters:
```

```
                m      c
m               1.000
c               0.913  1.000

-----------------------------------------------------------------------

final sum of squares of residuals : 9.08037
rel. change during last iteration : -5.8453e-13

degrees of freedom    (FIT_NDF)                        : 16
rms of residuals      (FIT_STDFIT) = sqrt(WSSR/ndf)    : 0.753341
variance of residuals (reduced chisquare) = WSSR/ndf   : 0.567523
p-value of the Chisq distribution (FIT_P)              : 0.910067

Final set of parameters            Asymptotic Standard Error
=======================            ==========================
n               = -0.00224382      +/- 0.0007261    (32.36%)
d               = 32.1258          +/- 0.1338       (0.4163%)

correlation matrix of the fit parameters:
                n      d
n               1.000
d              -0.748  1.000

-----------------------------------------------------------------------

final sum of squares of residuals : 1.07138
rel. change during last iteration : 0

degrees of freedom    (FIT_NDF)                        : 2
rms of residuals      (FIT_STDFIT) = sqrt(WSSR/ndf)    : 0.731909
variance of residuals (reduced chisquare) = WSSR/ndf   : 0.535691
p-value of the Chisq distribution (FIT_P)              : 0.585264

Final set of parameters            Asymptotic Standard Error
=======================            ==========================
p               = -0.024001        +/- 0.03274      (136.4%)
o               = 24.3             +/- 0.4483       (1.845%)

correlation matrix of the fit parameters:
                p      o
p               1.000
o               0.913  1.000

-----------------------------------------------------------------------

final sum of squares of residuals : 20.581
rel. change during last iteration : -9.95489e-07
```

```
degrees of freedom    (FIT_NDF)                        : 17
rms of residuals      (FIT_STDFIT) = sqrt(WSSR/ndf)    : 1.10029
variance of residuals (reduced chisquare) = WSSR/ndf   : 1.21064
p-value of the Chisq distribution (FIT_P)              : 0.245597

Final set of parameters            Asymptotic Standard Error
=======================            ==========================
j               = -0.00123965      +/- 0.001241     (100.1%)
k               = 28.5819          +/- 0.1808       (0.6325%)

correlation matrix of the fit parameters:
                j      k
j               1.000
k              -0.716  1.000
```

C gnuplot Quellcode zur Auswertung von Teilversuch 5

```
#!/usr/bin/env gnuplot

set term epslatex color size 6in, 4in
set output "tv5-plot.tex"
set decimalsign locale 'de_DE.UTF-8'

set title "Strahlung eines Hohlraumstrahlers"
set ylabel "Thermopannung $V$ ($\\si{\\micro\\volt}$)"
set xlabel "Temperatur $(\\theta^4 - T_0^4)$ ($\\times 10^{10}
↪ \\si{\\kelvin^4}$)"

set mxtics
set mytics
set samples 10000

f(x) = m*x + c

# (x, y, xdelta, ydelta)
fit f(x) "tv5.dat" u ((($1 + 273.15)**4 -
↪ (29+273.15)**4)/10**10):2:((4*0.1*sqrt(($1+273.15)**6 +
↪ (29+273.15)**6))/10**10):(2) xyerrors via m,c

# Linien
set key top left Left spacing 1.3

titel = "$".gprintf("%.5f", m)."x + (".gprintf("%.5f", c).")$"
plot f(x) title titel lc rgb 'dark-magenta', \
    "tv5.dat" u ((($1 + 273.15)**4 -
    ↪ (29+273.15)**4)/10**10):2:((4*0.1*sqrt(($1+273.15)**6 +
    ↪ (29+273.15)**6))/10**10):(2) with xyerrorbars title "Messpunkte"
    ↪ pointtype 0 lc rgb 'dark-goldenrod'
```

mit `tv5.dat`:

```
#T/C Spannung
80   10
100  18
130  25
160  52
190  63
210  79
240 108
270 139
300 174
330 222
350 250
```

Rohausgabe:

```
final sum of squares of residuals : 21.9449
rel. change during last iteration : -7.37544e-09

degrees of freedom    (FIT_NDF)                        : 9
rms of residuals      (FIT_STDFIT) = sqrt(WSSR/ndf)    : 1.56151
variance of residuals (reduced chisquare) = WSSR/ndf   : 2.43832
p-value of the Chisq distribution (FIT_P)              : 0.00905537

Final set of parameters            Asymptotic Standard Error
=======================            ==========================
m               = 17.8711          +/- 0.2133       (1.193%)
c               = -2.41982         +/- 1.577        (65.15%)

correlation matrix of the fit parameters:
                m      c
m               1.000
c              -0.801  1.000
```