

W5 LATENTE WÄRMEMENGEN - SPEZIFISCHE WÄRMEKAPAZITÄTEN

28. Oktober 2010

Marcel Lauhoff - Informatik BA Matnr: xxxxxxxx

xxx@xxxx.xx

1	Einleitung	1
2	Theoretische Grundlagen	2
2.1	Wärme und thermische Energie	2
2.2	Wärmekapazität	2
2.3	Wärmekapazität von Metallen	3
2.4	Phasenübergänge und latente Wärme	3
2.5	Kalorimetrie	4
3	Aufbau und Durchführung	6
3.1	Aufbau	6
3.2	Durchführung	7
4	Ergebnisse	9
4.1	Auswertung der Messdaten	9
4.2	Diskussion der Ergebnisse	13
4.3	Fehlerbetrachtung	14
5	Literatur	16
6	Anhänge	17

1 Einleitung

In diesem Experiment sollten die Schmelz- und Verdampfungswärme von Wasser sowie die spezifische Wärmekapazität von Messing und Aluminium ermittelt werden.

Für die Messungen wird ein einfaches Kalorimeter mit Wasser als Kalorimeterflüssigkeit verwendet. Die Temperaturen werden mit einem Digitalen Thermometer gemessen.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Wärme und thermische Energie

Wärme ist die thermische Energie die zwischen Systemen ausgetauscht wird. Die thermische Energie eines Systems ist ein Teil seiner inneren Energie und besteht aus der kinetischen Energie der enthaltenen Atome und Moleküle. Für ideale Gase ergibt sich als mittlere kinetische Energie der Moleküle ([Tip09]):

$$\bar{E} = \frac{1}{2}m\bar{v}^2 \quad (1)$$

Ein Maß hierfür ist die Temperatur. Für jeden Freiheitsgrad den die Moleküle in ihrer Bewegung haben ergibt sich für jeweils die Energie:

$$E_{FG} = \frac{1}{2}k_B T \quad (2)$$

Wobei k_B die Boltzmann Konstante ist.

In Abhängigkeit von den Freiheitsgraden f ergibt sich dann für ein Molekül die Energie:

$$E_{\text{molekül}} = \frac{f}{2}k_B T \quad (3)$$

2.2 Wärmekapazität

Um die Temperatur eines Körpers zu verändern muss ihm Energie zugefügt werden. Die zur Temperaturerhöhung benötigte Wärmemenge ist proportional zur Masse m und des Temperaturanstiegs ΔT :

$$\Delta Q = m c \Delta T \quad (4)$$

Aus Formel (4) lässt sich nun das Verhältnis

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta T} \quad (5)$$

bilden. Dieses Verhältnis nennt man *Wärmekapazität* und es gibt die benötigte thermische Energie an, die eine Änderung der Temperatur verursacht. Bezieht man die Wärmekapazität auf die Masse des Stoffes, erhält man die *spezifische Wärmekapazität* die auch in

Formel 4 als Proportionalitätsfaktor enthalten ist.

$$c = \frac{\Delta Q}{m \Delta T} \quad (6)$$

Bezogen auf die Stoffmenge

$$C_{\text{mol}} = \frac{m c}{n} = m_{\text{Mol}} c \quad (7)$$

erhält man die molare Wärmekapazität mit n als Anzahl der Mole und $m_{\text{Mol}} = \frac{m}{n}$ der Molaren Masse.

2.3 Wärmekapazität von Metallen

Die molare Wärmekapazität von Metallen ist zueinander sehr ähnlich, wie auch in Tabelle 1 zu erkennen ist. Die Werte liegen alle in etwa bei $3R$, wobei R die Gaskonstante ist.

$$\frac{f}{2} R = C \approx 3R = 24,9 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad (8)$$

Substanz	spezifische Wärmekapazität $\frac{c}{\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}}$	molare Wärmekapazität $\frac{C}{\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}}$
Aluminium	0,900	24,3
Blei	0,128	26,4
Eis (bei -10°C)	2,05	36,9
Dampf (bei 1 bar)	2,02	36,4
Kupfer	0,386	24,5
Wasser	4,18	75,2
Silber	0,223	24,9

Tabelle 1: Wärmekapazitäten verschiedener Stoffe (Aus [Tip09])

Dieses Ergebnis wird auch *Dulong-Petit'sches Gesetz* genannt. Es fußt auf der Tatsache, dass Metall-Atome sechs Freiheitsgrade ($f = 6$) haben.

2.4 Phasenübergänge und latente Wärme

Als ein *Phasenübergang* wird der Vorgang bezeichnet, bei dem ein Stoff seinen Aggregatzustand ändert. Eis z.B. wird durch Schmelzen flüssig. Um eine Zustandsänderung herbeizuführen ist es nicht nur erforderlich den Stoff auf die spezifische Umwandlungstemperatur zu bringen. Es ist zusätzlich nötig weitere Wärmeenergie aufzubringen die sich nicht in einer Erhöhung der Temperatur widerspiegelt, sondern einzig dem Phasen-

übergang dient. Diese Wärmeenergie wird *latente Wärme* genannt. Sie variiert je nach Stoff und Phasenübergang.

2.5 Kalorimetrie

Die *Kalorimetrie* ist ein Verfahren um die Wärmekapazität eines Stoffes zu ermitteln.

Die Funktionsweise wird im Folgenden beschrieben. Ein gegen die Umwelt isoliertes Gefäß, das *Kalorimeter* wird mit mit einer bestimmten Menge an Wasser bekannter Temperatur gefüllt. In das Kalorimeter wird eine ebenso bekannte Masse eines auf eine beliebige Temperatur gebrachten Stoffes eingefüllt. Nach Einfüllen wartet man die sich ergebende Mischungstemperatur ab.

Da bedingt durch die Isolierung des Kalorimeters mit der Umwelt nur Energie zwischen beiden Stoffen innerhalb des Gefäßes ausgetauscht werden gilt folgende Energiebilanz (Nach: [Tip09]):

$$dQ_{\text{ab}} = dQ_{\text{zu}} \quad (9)$$

Für einen Gegenstand der in das Kalorimeter getaucht wird ergibt sich:

$$Q_{\text{ab}} = (m_G c_G)(\Theta_m - \Theta_{A,G}) = (m_W c_W + m_B c_B)(\Theta_m - \Theta_{A,W}) = Q_{\text{zu}} \quad (10)$$

m_G Masse des eingebrachten Gegenstandes

c_G spezifische Wärmekapazität des eingebrachten Gegenstandes

Θ_m Mischungstemperatur im thermischen Gleichgewicht

$\Theta_{A,G}$ Anfangstemperatur des eingebrachten Gegenstands

m_W Masse des Wassers im Kalorimeter

c_W spezifisch Wärmekapazität von Wasser ($c_W = 4,18 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

m_B Masse des Kalorimeters

c_B spezifische Wärmekapazität des Kalorimeters

$\Theta_{A,W}$ Anfangstemperatur von Wasser und Behälter

Die Werte m_B und c_B lassen sich zusammenfassen zu C_{Kal} was für das verwendete Kalorimeter als eine Art Gerätekonstante dient. Die Formel lautet daraufhin:

$$Q_{ab} = (m_G c_G)(\Theta_m - \Theta_{A,G}) = (m_W c_W + C_{\text{Kal}})(\Theta_m - \Theta_{A,W}) = Q_{zu} \quad (11)$$

3 Aufbau und Durchführung

Mit einem Kalorimeter sind verschiedene Wärmemengen und Wärmekapazitäten zu messen. Diese sind:

1. Wärmekapazität des Kalorimeters
2. spezifische Wärmekapazität von Messing
3. spezifische Wärmekapazität von Aluminium
4. Schmelzwärme von Eis
5. Verdampfungswärme von Wasser

3.1 Aufbau

Der Hauptbestandteil des Experimentes ist das bereits erwähnte Kalorimeter. Bei dem verwendeten Modell handelt es sich um ein einfaches Flüssigkeitskalorimeter mit Wasser. Zusätzlich ist es mit einer Mischvorrichtung versehen. Der gesamte Aufbau ist in Abb. 1 dargestellt.



Abbildung 1: Fotografische Abbildung des Versuchsaufbaus W5 (aus [Prk10])

Weitere Mittel sind ein Wasserkocher zur Erhitzung der Metallgewichte und des Wassers, sowie eine Herdplatte mit Wassergefäß zur Dampferzeugung.

In diesem Experiment sind Messungen zweier Art von Nöten. Zum einen die Bestimmung der jeweiligen Massen von Gewichten und des Kalorimeters. Hierfür steht eine Waage bereit.

Zum anderen die jeweilige Temperatur. Sie wird mit einem Digitalthermometer, dessen Messspitze in das Kalorimeter eingelassen wird erhoben. Ein Computer mit passender Messsoftware nimmt diese Daten mit einer Auflösung von 0.1K und 0.5 sec Zeitintervallen auf.

3.2 Durchführung

Der Versuch gliedert sich in vier Phasen, die jeweils unabhängig von der vorherigen Messung durchgeführt werden. Die Phasen verfolgen jeweils folgende Zwecke:

- (a) Wärmekapazität des Kalorimeters
- (b) spezifische Wärmekapazitäten von Messing und Aluminium
- (c) Schmelzwärme von Eis
- (d) Verdampfungswärme von Wasser

Vorbereitende Messungen

Vorbereitend wird der Kalorimetertopf, der Messingkörper und der Aluminiumkörper gewogen.

(A) Wärmekapazität des Kalorimeters

Zu Beginn wird der Kalorimetertopf etwa halb voll mit Wasser gefüllt und gewogen. Danach wird etwa die gleiche Menge Wasser im Wasserkocher zum Kochen gebracht und der Kalorimetertopf mit dem Thermometer verbunden. Bevor das heiße Wasser in den Topf gefüllt wird und die Messsoftware gestartet. Ab dem Zeitpunkt des Startens ist darauf zu achten, die Flüssigkeit fortlaufend zu mischen. Ist nun das Wasser bereit, wird es in das Kalorimeter gefüllt und schnell mit dem Mischen begonnen. Nach Einstellen eines Gleichgewichts wird die Messung noch kurz weitergeführt. Nach Beendigung der Temperaturmessung wird das gesamte Kalorimeter gewogen.

(B) spezifische Wärmekapazitäten von Messing und Aluminium

Wie zuvor wird das Kalorimeter mit frischem Wasser gefüllt und gewogen. Nacheinander werden in frischem Wasser der erhitzte Messing und Aluminiumkörper getaucht. Die Messung der Temperatur erfolgt analog zu (A). Ein Messen des Kalorimetertopfes zusammen mit den Gewichten ist nicht nötig, da diese zuvor schon gewogen wurden.

(C) Schmelzwärme von Eis

Analog zu (A) wird Eis anstelle von 100 °C heißen Wassers verwendet. Das Eis ist dafür aus einem Kühlschrank mit einer Temperatur von -18 °C zu holen und abzutrocknen. Die Temperatur des Eises wird selbst nicht gemessen sondern die Temperatur von -18 °C wird als korrekt angenommen.

(D) Verdampfungswärme von Wasser

Wiederum analog zu (A) wird dieses mal Dampf aus dem Verdampfungsbehälter in das Kalorimeter eingeleitet. Da sich kein Temperaturgleichgewicht einstellt wird die Temperaturmessung nach hinreichender Zeit abgebrochen.

4 Ergebnisse

4.1 Auswertung der Messdaten

Einige vorbereitende Einzelmessungen wurden vorgenommen. Die Ergebnisse hieraus sind in Tabelle 2 abzulesen.

Die Weiteren Messungen und errechneten Werte sind im Folgenden unterteilt zu jedem Teilversuch aufgeführt.

Messung	Messwert	Fehler
Masse Kalorimetertopf	389,4 g	0,5 g
Masse Messing Körper	300 g	0,5 g
Masse Aluminium Körper	101,2 g	0,5 g

Tabelle 2: Einzelmessungen

(A) Wärmekapazität C_{Kal} des Kalorimeters

In diesem Versuchsteil wird die Wärmekapazität des Kalorimeters ermittelt, welche als eine Art Apparatekonstante in den folgenden Versuchsteilen dienen wird. Die gemessenen Werte sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Messung	Messwert	Fehler
Masse Kalorimeter mit Wasser, Vorher	604,6 g	0,5 g
Masse Kalorimeter mit Wasser, Nachher	747,7 g	0,5 g
Masse Wasser, Vorher ($m_{W,a}$)	215,2 g	0,5 g
Masse Wasser, Mischung ($m_{W,m}$)	358,3 g	0,5 g
Temperatur Anfang (Θ_a)	22,0 °C	0,5 °C
Temperatur Gleichgewicht (Θ_m)	51,0 °C	0,5 °C
Temperatur hinzugefügtes Wasser (Θ_S)	100,0 °C	

Tabelle 3: Messungen im Versuchsteil (A)

Formel (11) mit $\Theta_G = \Theta_S$ wird umgestellt nach C_{Kal} :

$$C_{\text{Kal}} = \frac{c_W m_{W,a} (\Theta_m - \Theta_a) + c_W (m_{W,m} - m_{W,a}) (\Theta_m - \Theta_S)}{\Theta_a - \Theta_m} \quad (12)$$

Daraus ergibt sich ein Wert von $C_{\text{Kal}} = (0,111 \pm 0,001) \text{ kJ/K}$

(B) Wärmekapazität von Messing und Aluminium

In diesem Versuchsteil wurden zwei Messungen durchgeführt. Jeweils eine für Messing und eine für Aluminium. Die gemessenen Werte sind in Tabelle 4 und 5 aufgeführt.

Messung	Messwert	Fehler
Masse Kalorimeter mit Wasser	756,7 g	0,5 g
Masse Wasser (m_W)	367,3 g	0,5 g
Masse Messing-Körper (m_M)	300,0 g	0,5 g
Temperatur Anfang (Θ_a)	26,0 °C	0,5 °C
Temperatur Gleichgewicht (Θ_m)	31,0 °C	0,5 °C

Tabelle 4: Messungen im Versuchsteil (B) - Messinggewicht

Messung	Messwert	Fehler
Masse Kalorimeter mit Wasser	779,7 g	0,5 g
Masse Wasser (m_W)	390,3 g	0,5 g
Masse Aluminium-Körper (m_M)	101,2 g	0,5 g
Temperatur Anfang (Θ_a)	30,0 °C	0,5 °C
Temperatur Gleichgewicht (Θ_m)	33,0 °C	0,5 °C

Tabelle 5: Messungen im Versuchsteil (B) - Aluminiumgewicht

Für die Messungen folgt nach Formel (11) folgende Energiebilanz:

$$(m_W c_W + C_{\text{Kal}})(\Theta_m - \Theta_a) = m_M c_M (\Theta_M - \Theta_m) \quad (13)$$

Umgestellt nach c_M ergibt sich:

$$c_M = \frac{(m_W c_W + C_{\text{Kal}})(\Theta_m - \Theta_a)}{m_M (\Theta_M - \Theta_m)} \quad (14)$$

Durch Einsetzen der Messergebnisse ermitteln sich folgende Werte:

$$c_{\text{Messing}} = (0,40 \pm 0,01) \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

$$c_{\text{Aluminium}} = (0,77 \pm 0,06) \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

(C) Schmelzwärme von Eis

Die gemessenen Werte in diesem Versuchsteil sind in Tabelle 6 zu finden. Die Temperatur des Eises wird als gegeben betrachtet und hat keinen Fehlerwert.

Messung	Messwert	Fehler
Masse Kalorimeter mit Wasser, Vorher	680,6 g	0,5 g
Masse Kalorimeter mit Wasser, Eis, Nachher	712,7 g	0,5 g
Masse Wasser, Vorher (m_W)	291,2 g	0,5 g
Masse Eis (m_E)	32,1 g	0,5 g
Temperatur Anfang (Θ_a)	33,0 °C	0,5 °C
Temperatur Gleichgewicht (Θ_m)	22,0 °C	0,5 °C
Temperatur Eis (Θ_E)	-18,0 °C	

Tabelle 6: Messungen im Versuchsteil (C)

Aus Formel (11) folgt die Energiebilanz für das Kalorimeter:

$$(m_W c_W + C_{\text{Kal}})(\Theta_a - \Theta_m) = m_E L_f + m_E c_E (\Theta_M - \Theta_E) \quad (15)$$

Hierbei ist c_E die spezifische Wärmekapazität von Eis (Vgl. Tabelle 8)

Umgestellt nach L_f ergibt sich:

$$L_f = \frac{(m_W c_W + C_{\text{Kal}})(\Theta_a - \Theta_m) - m_E c_E (\Theta_M - \Theta_E)}{m_E} \quad (16)$$

Durch Einsetzen der gemessenen Werte folgt folgendes Ergebnis:

$$L_f = (373 \pm 16) \text{ kJ/kg} \quad (17)$$

(D) Verdampfungswärme von Wasser

Die Messergebnisse sind in Tabelle 7 dargestellt.

Messung	Messwert	Fehler
Masse Kalorimeter mit Wasser, Vorher	651,6 g	0,5 g
Masse Kalorimeter mit Wasser, Dampf, Nachher	656,6 g	0,5 g
Masse Wasser, Vorher (m_W)	262,2 g	0,5 g
Masse Dampf (m_D)	5,0 g	0,5 g
Temperatur Anfang (Θ_a)	28,0 °C	0,5 °C
Temperatur Gleichgewicht (Θ_m)	45,0 °C	0,5 °C
Temperatur Dampf (Θ_D)	100,0 °C	

Tabelle 7: Messungen im Versuchsteil (D)

Analog zu (C) ergibt sich eine Energiebilanz von:

$$(m_W c_W + C_{\text{Kal}})(\Theta_m - \Theta_a) = m_D L_d + m_D c_D (\Theta_D - \Theta_m) \quad (18)$$

Hierbei ist c_D die spezifische Wärmekapazität von Dampf (Vgl. Tabelle 8)

Umgestellt nach L_d ergibt sich:

$$L_d = \frac{(m_W c_W + C_{\text{Kal}})(\Theta_m - \Theta_a) - m_D c_D (\Theta_D - \Theta_m)}{m_D} \quad (19)$$

Durch Einsetzen der gemessenen Werte folgt folgendes Ergebnis:

$$L_d = (3992 \pm 831) \text{ kJ/kg} \quad (20)$$

4.2 Diskussion der Ergebnisse

Die durch die einzelnen Experimente gewonnenen Daten haben nur teilweise Übereinstimmung mit Werten aus der Literatur. Besonders die Messungen der Schmelz- und Verdampfungswärme erfüllen die Erwartungen nicht.

Versuch	Gemessene Werte	Literaturwerte
(B)	$c_{\text{Messing}} = (0,40 \pm 0,01) \text{ kJ}/(\text{kg K})$	0,38 kJ/(kgK)
	$c_{\text{Aluminium}} = (0,77 \pm 0,06) \text{ kJ}/(\text{kg K})$	0,90 kJ/(kg K)
(C)	$L_f = (373 \pm 16) \text{ kJ}/\text{kg}$	333,5 kJ/kg
(D)	$L_d = (3992 \pm 831) \text{ kJ}/\text{kg}$	2257 kJ/kg

Tabelle 8: Vergleich zwischen gemessenen Werten und Werten aus der Literatur. (Aus: [Tip09], außer c_{Messing} aus [Wal10])

Die Messung zur Verdampfungswärme in Teil (D) liegt mit ihrem Wert deutlich über dem Literaturwert, was auf Probleme beim Experiment zurückzuführen ist. Während des Versuches zu Teil (D) stellte es sich als problematisch heraus den benötigten Dampf mittels des Dampfbehälters bereitzustellen. Auch das Wasser im Kalorimeter, sowie Kalorimeter selbst hätten zwischen den Wieder-Versuchen abgekühlt werden sollen.

Die Messungen der Metall-Körper sind erfreulich nahe an den Literaturwerten. Der Vergleich des Messings mit dem Literaturwert ist allerdings teilweise problematisch, da die Messing-Legierung des Gewichtes unbekannt ist.

4.3 Fehlerbetrachtung

Grundsätzlich fehlerbehaftete Werte sind die jeweils gemessenen Temperaturen sowie die Massen. Weiterhin werden einige Werte als korrekt angenommen, wo das Messen nicht möglich war. Hierzu gehört die Temperatur des Eises, sowie die Temperatur der durch den Wasserkocher erhitzten Stoffe.

Die jeweiligen Anfangs- und Mischungstemperaturen (Θ_a und Θ_m) wurden jeweils berechnet, indem eine Lineare Regressionsgerade über Anfangs- und Auslaufäste gelegt und eine Senkrechte zwischen den beiden Geraden ermittelt wurde. Die Senkrechte wurde ermittelt durch ein selbstgeschriebenes Programm, welches $A_1 - A_2$ minimiert, wobei A_1 und A_2 die durch die steigenden Messwerte gebildeten Flächen sind. Die Flächen werden jeweils als diskretes Integral über die Messpunkte berechnet. Die linearen Regressionsgeraden wurden jeweils mit *Gnuplot* durchgeführt. Ergebnisse der *fit*-Läufe sind im Anhang. Ebenso sind in Anhang Graphen der Temperaturmessungen mit eingezeichneten Senkrechten und Ausgleichsgeraden.

(A)

Der Maximalfehler für C_{Kal} wird abgeschätzt nach Formel (13) aus [Upb09]:

$$\frac{\Delta C_{\text{Kal}}}{C_{\text{Kal}}} = \frac{\Delta c_W}{c_W} + \frac{\Delta m}{m} + 2 \frac{\Delta \Theta}{\Theta} \quad (21)$$

$$\frac{\Delta C_{\text{Kal}}}{C_{\text{Kal}}} = 0,006 \text{ kJ/K} \quad (22)$$

Da in der Literatur ([Tip09]) der Wert für c_W bei einer Temperatur von 20°C angegeben ist, wurde und wird im folgenden $\Delta c_W = 0,005 \text{ kJ/K}$ angenommen

(B)

Der Maximalfehler für c_{Messing} und $c_{\text{Aluminium}}$ wird berechnet durch:

$$\frac{\Delta c_M}{c_M} = \frac{\Delta C_{\text{Kal}}}{C_{\text{Kal}}} + 2 \frac{\Delta \Theta}{\Theta} + \frac{\Delta m_M}{m_M} \quad (23)$$

Hierbei wurde zugunsten einer einfacheren Fehlerberechnung nur der Teil-Term C_{Kal} aus $c_W m_W + C_{\text{Kal}}$ verwendet, da er deutlich $c_W m_W$ überwiegt.

(C)

Der Maximalfehler für L_f wird berechnet durch:

$$\frac{\Delta L_f}{L_f} = \frac{\Delta C_E}{C_E} + 2 \frac{\Delta m_E}{m_E} + \frac{\Delta \Theta}{\Theta} \quad (24)$$

Hierbei wurde zugunsten einer einfacheren Fehlerberechnung nur der Teil-Term $c_W m_W$ aus $c_W m_W + C_{\text{Kal}}$ verwendet, da er C_{Kal} überwiegt. Für c_E wurde analog zur Fehlerbetrachtung in (A) ein Fehler von $\Delta c_E = 0,005$ angenommen, da der Literaturwert für c_E mit -10°C angegeben ist.

(D)

Die Berechnung des Maximalfehlers für L_d erfolgt analog zu (D):

$$\frac{\Delta L_d}{L_d} = \frac{\Delta C_D}{C_D} + 2 \frac{\Delta m_D}{m_D} + \frac{\Delta \Theta}{\Theta} \quad (25)$$

Hierbei wurde zugunsten einer einfacheren Fehlerberechnung nur der Teil-Term $c_W m_W$ aus $c_W m_W + C_{\text{Kal}}$ verwendet, da er C_{Kal} überwiegt. Für c_D wurde analog zur Fehlerbetrachtung in (C) ein Fehler von $\Delta c_D = 0,005$ angenommen.

5 Literatur

[Prk10] Versuchsbeschreibung (2010-05-13)

<http://groups.uni-paderborn.de/physik/studieninfos/praktika/versuch.php?versuch=w05>

[Upb09] Kurzanleitung Fehlerrechnung (2009-12-14)

<http://physik.upb.de/fileadmin/physik/studieninfos/praktika/dokumente/fehlerrechnung.pdf>

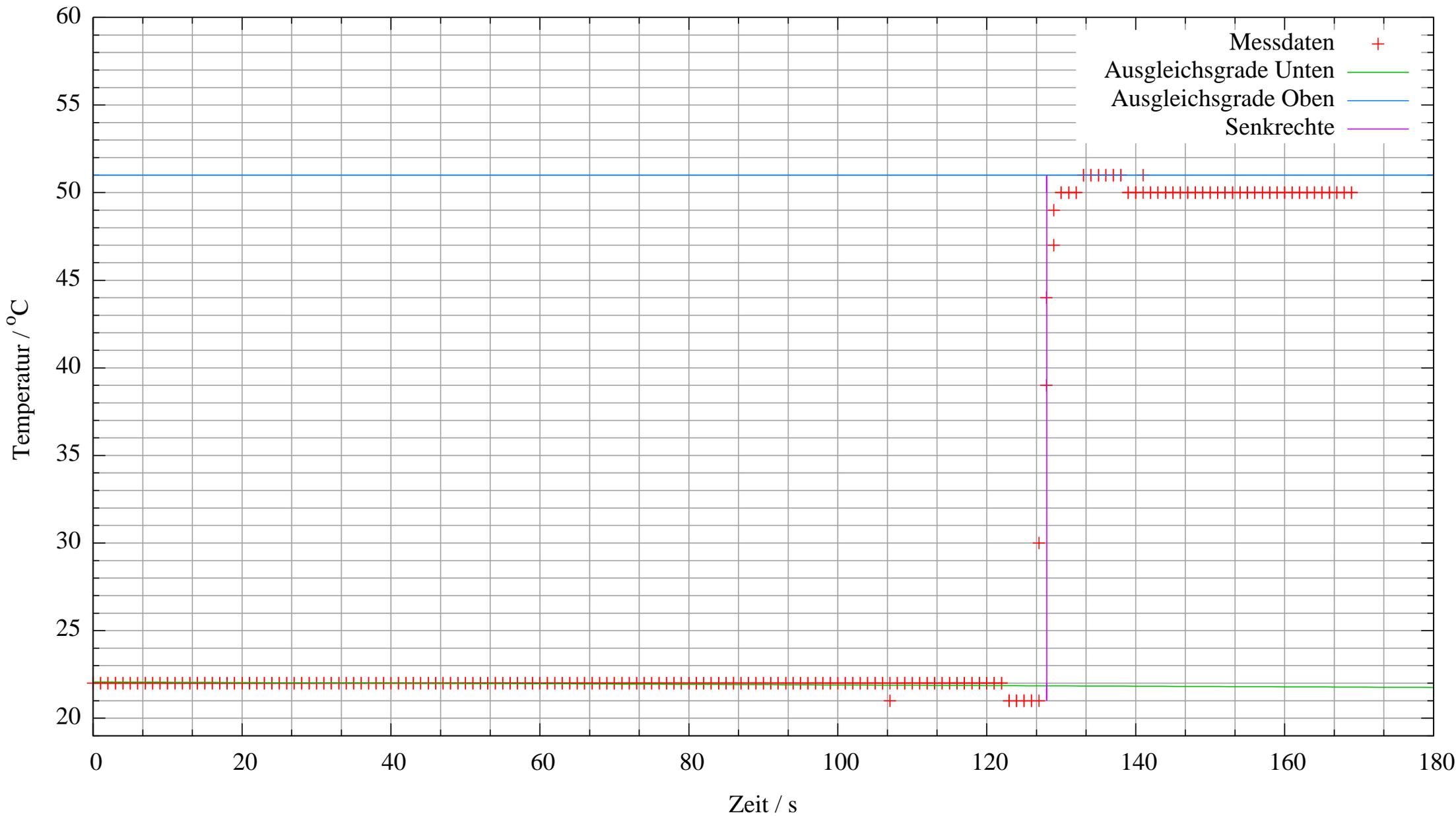
[Tip09] Paul A. Tipler: *Physik - für Wissenschaftler und Ingenieure*,
Spektrum Akademischer Verlag (2009).

[Wal10] WolframAlpha computational knowledge engine - *Brass heat capacity* (2010-05-15)

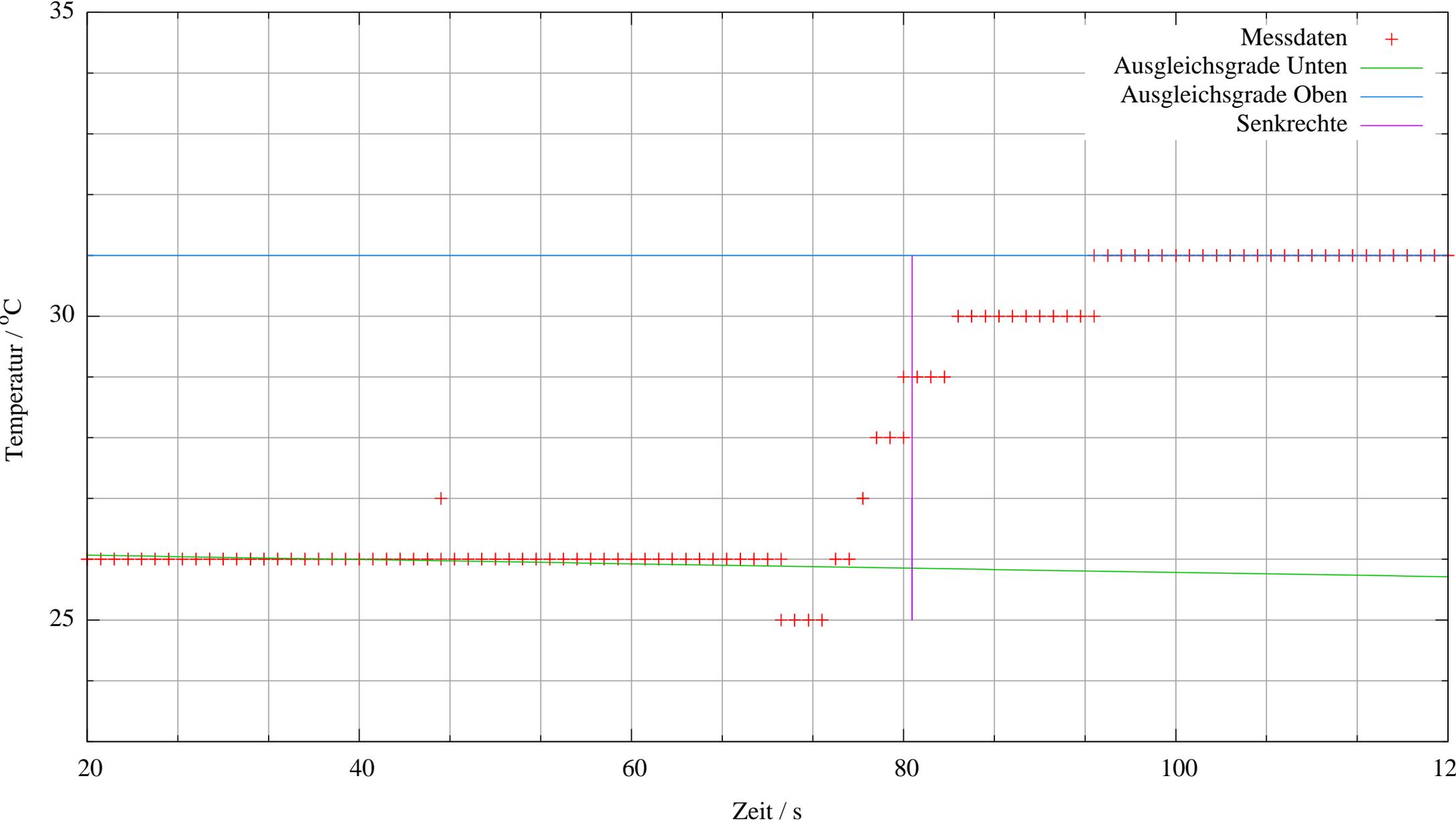
<http://www.wolframalpha.com/input/?i=Brass+heat+capacity>

6 Anhänge

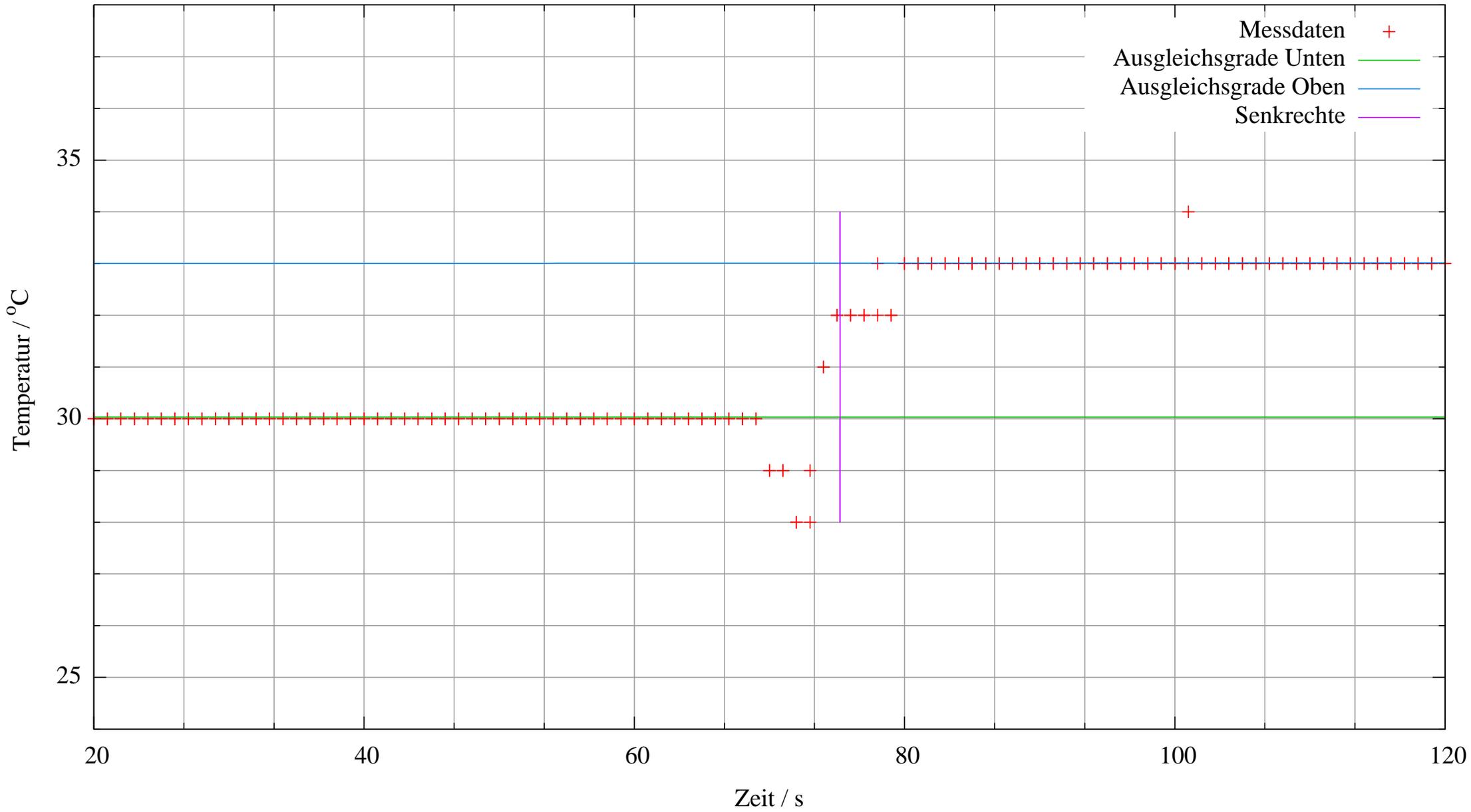
(A) Wärmekapazität des Kalorimeters - Temperaturverlauf Wasser



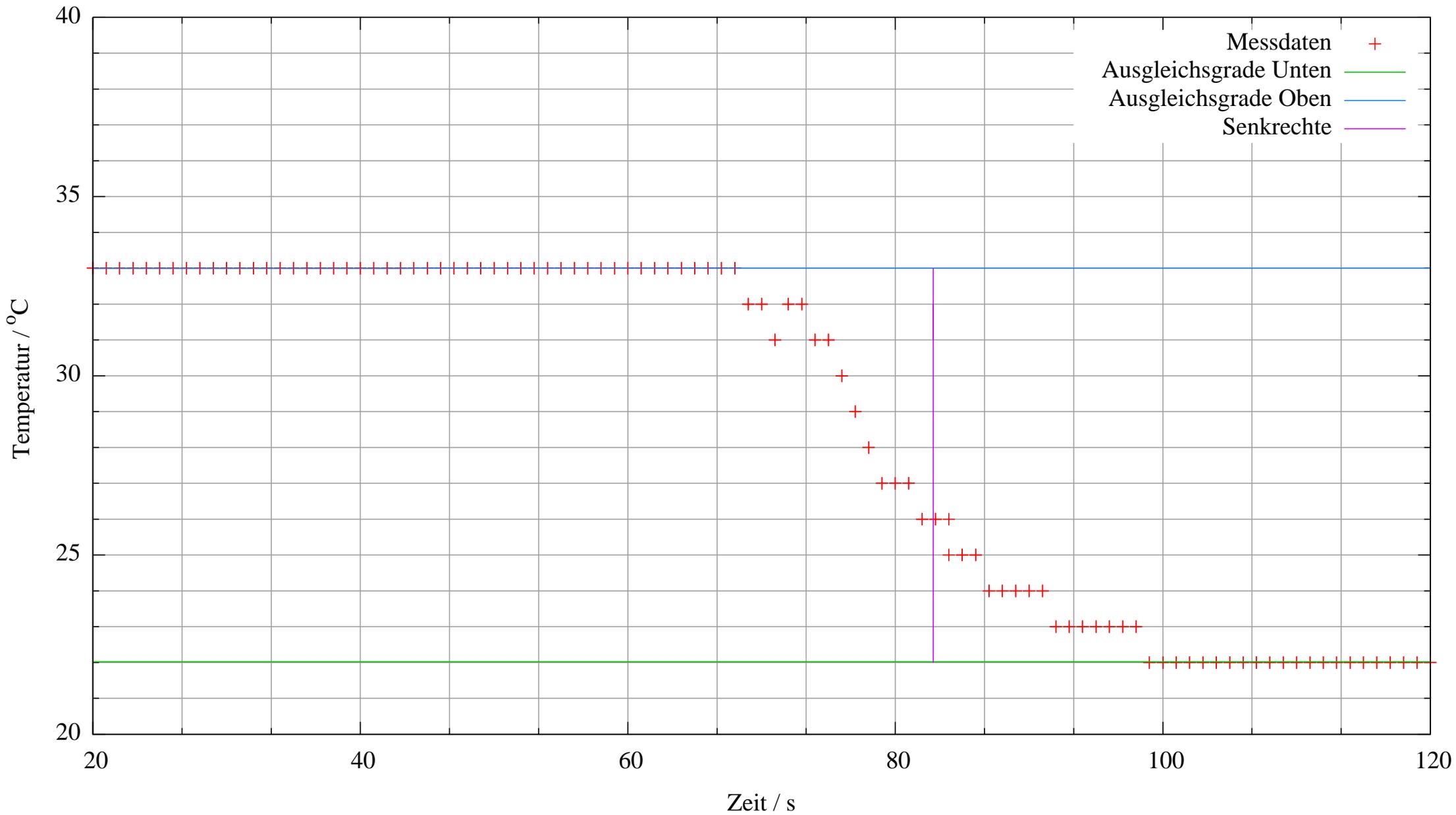
(B) spezifische Wärmekapazität von Messing - Temperaturverlauf



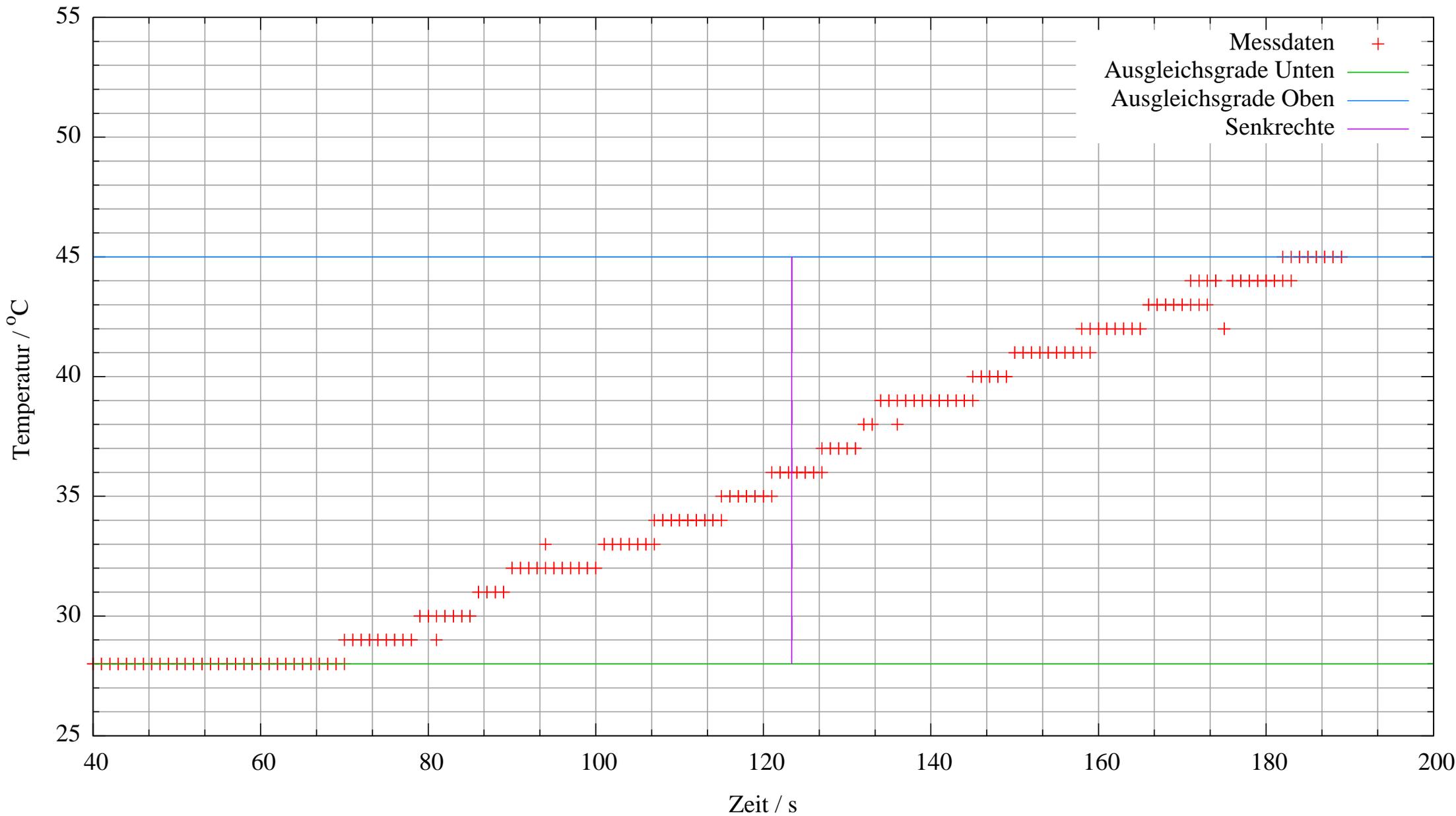
(B) spezifische Wärmekapazität von Aluminium - Temperaturverlauf



(C) Schmelzwärme von Eis - Temperaturverlauf



(D) Verdampfungswärme von Wasser - Temperaturverlauf



```
1 #!/usr/bin/env python
2 # -*- coding: utf-8 -*-
3
4 from itertools import *
5 from operator import add, sub, itemgetter
6 from pprint import pprint
7
8 # (m,b) — experiment A
9 #unten = ( -0.00174262, 22.0713 )
10 #oben = ( 1.56782e-13, 51 )
11 #filename = "../ergebnisse/ml_a_wasser1.txt"
12 #range = ( 23, 50)
13
14 # experiment B - messing
15 #unten = ( -0.00232051, 26.0701)
16 #oben = ( 8.63771e-16, 31)
17 #filename = "../ergebnisse/ml_b_messing1.txt"
18 #range = (28, 30.5)
19 # experiment B - alu
20 #unten = ( 8.92448e-15, 30 )
21 #oben = ( 0.000105791, 33.0015 )
22 #filename = "../ergebnisse/ml_b_alu1.txt"
23 #range = ( 31, 33.5)
24
25 # experiment C - eis
26 oben= ( -5.67999e-14, 22)
27 unten = ( 5.2022e-14, 33)
28 filename = "../ergebnisse/ml_c_eis.txt"
29 range = (21, 33)
30
31 # experiment D - dampf
32 #oben = (1.13775e-13, 45)
33 #unten = (-1.77665e-14, 28)
34 #filename = "../ergebnisse/ml_d_dampf5.txt"
35 #range = (29, 45)
36
37 delta_t = 0.5
38
39 def f(mb, x):
40     m, b = mb
41     return m*x + b
42
43 def area(m1, m2):
44     return 0.5 * (m1+m2) * delta_t
45
46 file = open(filename, "r")
47
48 mess = []
49 for line in file:
50     if line[0] == "#": continue
51     time, temp = map(float, line.replace(",","").split())
52
53     if range[0] <= temp <= range[1]:
54         mess.append( (time, temp))
55
```

```
56 mess.append( (mess[-1][0], f(oben, mess[-1][0])) )
57 mess.insert( 0, (mess[0][0], f(unten, mess[0][0])) )
58 # untere
59 unten_areas = []
60 for pair in izip(mess[:-1], mess[1:]):
61     first, second = pair
62     a = area(first[1] - f(unten, first[0]), second[1] - f(unten, second[1])
63             )
64     unten_areas.append( (a, first[0], second[0]) )
65
66 # obere
67 oben_areas = []
68 for pair in izip(mess[:-1], mess[1:]):
69     first, second = pair
70     a = area(f(oben, first[0]) - first[1], f(oben, second[0]) - second[1])
71
72     oben_areas.append( (a, first[0], second[0]) )
73
74
75 a_sum = []
76 for i in xrange(len(unten_areas)):
77     a_sum.append( reduce(add, map(itemgetter(0), unten_areas[0:i+1])))
78
79 b_sum = []
80 for i in xrange(len(oben_areas)):
81     b_sum.append( reduce(add, map(itemgetter(0), oben_areas[i:])) )
82
83 print "Messpunkte"
84 pprint(mess)
85
86
87 print "Summen Unten"
88 pprint(a_sum)
89 print "Summen Oben"
90 pprint(b_sum)
91
92 comparison = []
93 for pair in izip(a_sum[:-1], b_sum[1:]):
94     comparison.append(abs(reduce(sub, pair)))
95
96 print "Vergleichsuebersicht \Sum(unten) - \Sum(oben)"
97 pprint(comparison)
98
99 m = min(izip(comparison, xrange(len(comparison))))
100
101 print "Minima"
102 print m
103
104 result = mess[m[1]+1]
105
106 print "Ergebniss: (t/sec, T/\celsius) ", result
107
108 print "Untere Temperatur:", f(unten, result[1])
```

```
109| print "Obere Temperatur:", f(oben, result[1])  
                                temps.py
```