

ALBERT-LUDWIGS-UNIVERSITÄT FREIBURG
PHYSIKLABOR FÜR ANFÄNGER*INNEN, TEIL 1
SOMMERSEMESTER 2021

VERSUCH 38 AM 05.10.2021

Spezifische Wärmekapazität von Wasser

Gruppe 213:
06.10.2021

Assistent:

Inhaltsverzeichnis

1 Ziel des Versuchs	2
2 Aufbau und Durchführung	2
3 Auswertung und Fehleranalyse	4
3.1 Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität von Wasser auf mechanischem Wege	4
3.2 Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität von Wasser auf elektrischem Wege	6
3.2.1 Extrapolation der Endtemperaturen aus den Messdaten	6
3.2.2 Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität durch lineare Regression	8
4 Diskussion der Ergebnisse	11
4.1 Zusammenstellung und Vergleich der Ergebnisse	11
4.2 Vergleich mit Literaturwert	11
4.3 Fehlerdiskussion	12
4.4 Vergleich und Verbesserung der Messmethoden	12
5 Literatur	14
6 Anhang	15
6.1 Tabellen und Grafiken	15
6.2 Laborbuch	20
6.3 Tabellenverzeichnis	24
6.4 Abbildungsverzeichnis	24

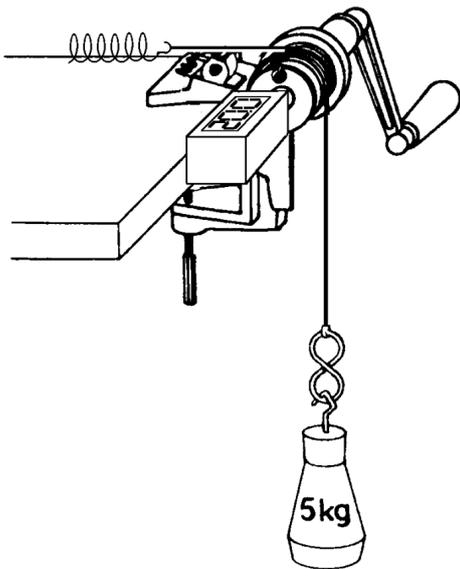
1 Ziel des Versuchs

In diesem Versuch wird die spezifische Wärmekapazität c_w von Wasser ermittelt. Hierfür werden mechanische und elektrische Energie in Wärme umgewandelt und die dadurch erreichten Temperaturanstiege gemessen. Dabei werden auch Verluste und Verzögerungen untersucht. Die hierdurch errechneten Werte für c_w werden mit Literaturwerten verglichen.

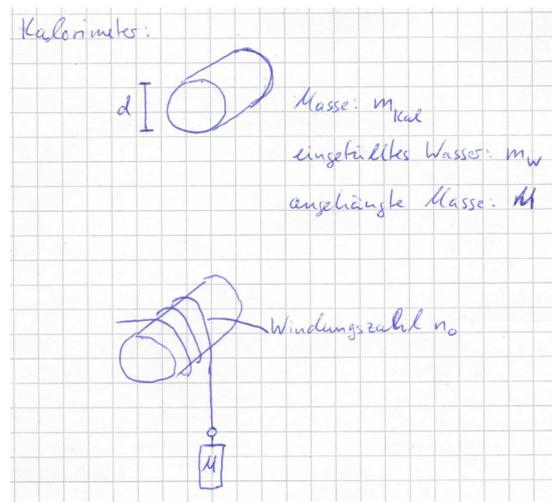
2 Aufbau und Durchführung

Um die oben genannten Ziele zu erreichen, werden die in [Abbildung 1](#) und [Abbildung 2](#) dargestellten Versuchsaufbauten verwendet.

Zuerst wird ein Schürholz-Apparat, der in [Abbildung 1a](#) abgebildet ist, verwendet, um mechanische Arbeit in Wärme umzuwandeln. In ein Kupferkalorimeter wird Wasser der Masse m gefüllt und ein Digitalthermometer angebracht, mit dem die Temperatur T gemessen wird. Das Kalorimeter hat den Durchmesser d und die Masse m_{Kal} . Ein Spanngurt wird n_0 -mal um das Kalorimeter gewickelt und an einer Seite an eine Feder gehängt. An der anderen Seite des Spanngurtes hängt ein Gewicht der Masse M . Dies ist in [Abbildung 1b](#) zu sehen. Das Kalorimeter wird über eine Kurbel so gedreht, dass die Feder entspannt ist, sodass die Reibungskraft genau der Gewichtskraft der Masse M entspricht.



(a) Abbildung des verwendeten Schürholz-Apparates aus [1].



(b) Gemessene Größen für die Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität c_w von Wasser mit dem Schürholz-Apparat aus [Abbildung 17](#).

Abb. 1: Skizzen aus der Versuchsbeschreibung [1] und dem Laborbuch ([Abbildung 17](#)) für das Vermessen der relevanten Größen für die Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität von Wasser mit einem Schürholz-Apparat.

Nun wird in regelmäßigen Abständen von $n = 30$ Umdrehungen die Temperatur T gemessen. Dabei wird vor dem Messen der Temperatur einige Sekunden gewartet, da die Temperaturanzeige hier noch etwas ansteigt. Die vor der Versuchsdurchführung ermittelten Messwerte befinden sich

hier:

$$m = \left(66,20 \pm \frac{0,01}{\sqrt{3}} \right) \text{ g},$$

$$d = \left(4,78 \pm \frac{0,01}{\sqrt{6}} \right) \text{ cm},$$

$$M = 5 \text{ kg}.$$

Die Ableseunsicherheiten werden bei analogen Skalen mit Dreiecks- und bei digitalen Skalen mit Rechtecksverteilung mit Formeln aus [2] ermittelt.

In einem weiteren Schritt wird die Wärme über einen elektrischen Widerstand zugeführt. Der Schaltplan ist in [Abbildung 2](#) zu sehen. Der Widerstand befindet sich in einem Behälter, das mit Wasser der Masse m befüllt ist. Ist das Netzgerät angeschlossen, wird alle 20 s die Temperatur mit einem analogen Thermometer gemessen. Außerdem werden die anliegende Spannung und der fließende Strom bestimmt. Nach einigen Minuten wird der Strom ausgeschaltet und die Temperaturmessung fortgesetzt. Diese Messreihe wird mit unterschiedlichen Wassermassen wiederholt.

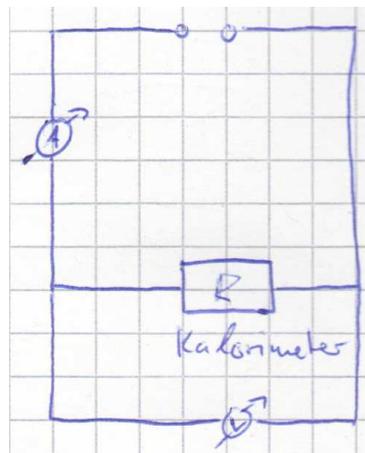


Abb. 2: Skizze der Schaltung aus dem Laborbuch ([Abbildung 18](#)) für die Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität c_w von Wasser.

Beim elektrischen Kalorimeter wird während des Versuchs beobachtet, dass nach Ausschalten des Stroms die Temperatur nur sehr langsam sinkt. Um diesen Effekt bei der hohen Ableseunsicherheit des analogen Thermometers von $\Delta T = 0,5/\sqrt{6}^\circ\text{C}$ besser beobachten zu können, wird im Verlauf des Versuchs eine höhere Anfangstemperatur und eine höhere Spannung verwendet, da dann der Temperaturunterschied zur Umgebung größer wird.

Außerdem wird auf eine längere Messung des Temperaturverlaufs nach Abschalten zugunsten einer größeren Anzahl von Messreihen verzichtet. Grund hierfür ist der, durch den langsamen Abfall zu vermutende, geringe Einfluss des Wärmeverlustes. Wichtiger erscheint es, viele Messreihen mit verschiedenen Wassermassen durchführen zu können.

3 Auswertung und Fehleranalyse

3.1 Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität von Wasser auf mechanischem Wege

Bei der Versuchsdurchführung werden die Temperaturen T des Wassers nach einer Anzahl von $n = 30$ Umdrehungen gemessen. Die Messwerte sind in [Abbildung 17](#) im Anhang dokumentiert und in [Abbildung 3](#) dargestellt.

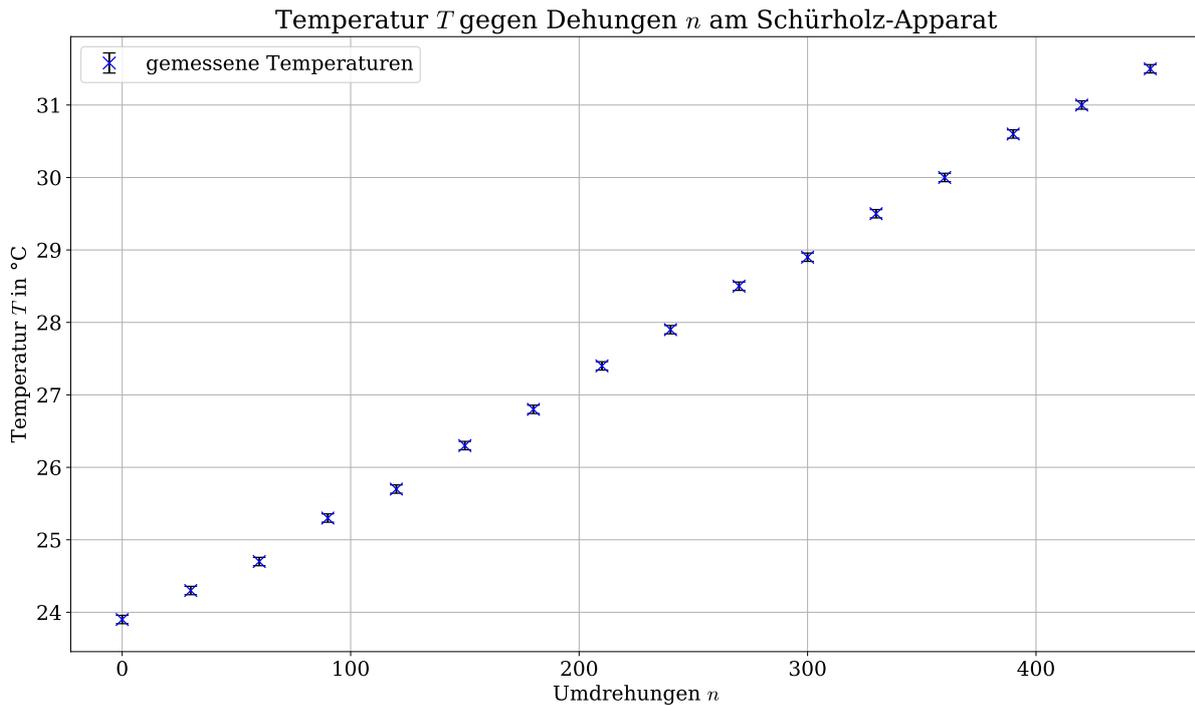


Abb. 3: Aufgetragen sind die im Abstand von $n = 30$ Umdrehungen gemessenen Temperaturen T in $^{\circ}\text{C}$ am Schürholz-Apparat. Zusätzlich sind die Fehlerbalken für T eingetragen.

Wie in [1] hergeleitet, gilt folgender Zusammenhang zwischen der zu ermittelnden spezifischen Wärmekapazität c_w , der Temperatur T und der Umdrehungsanzahl n . Dabei ist $\Gamma_{\text{Kal}} = m_{\text{Kal}}c_{\text{Cu}}$ die Wärmekapazität des Kupferkalorimeters und Γ_{T} ein Korrekturterm, der die Wärmekapazität aller weiteren Bauteile berücksichtigt:

$$Mgn\pi d = (\Gamma_{\text{Kal}} + \Gamma_{\text{T}} + mc_w)(T - T_0), \quad (1)$$

$$T = \frac{Mg\pi d}{\Gamma_{\text{Kal}} + \Gamma_{\text{T}} + mc_w} \cdot n + T_0. \quad (2)$$

Dieser lineare Zusammenhang wird durch lineare Regression näher untersucht. Die lineare Regression ist in [Abbildung 4](#) zu sehen.

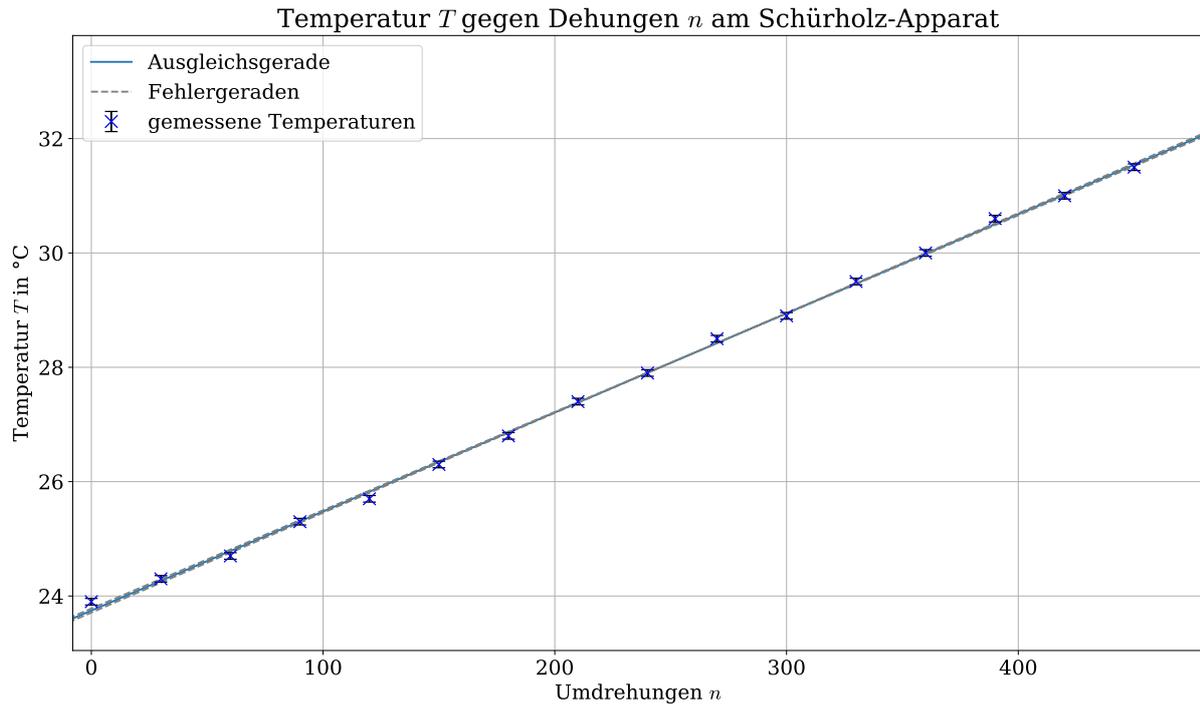


Abb. 4: Aufgetragen sind die im Abstand von $n = 30$ Umdrehungen gemessenen Temperaturen T in $^{\circ}\text{C}$ am Schürholz-Apparat. Es sind zusätzlich die Ausgleichsgerade und die Fehlergeraden der linearen Regression mit eingetragen, die Fehlergeraden sind dabei nur minimal von der Ausgleichsgeraden verschieden.

Die Steigung b , der y-Achsenabschnitt a und ihre Unsicherheiten Δa und Δb werden mit Formeln aus [2] berechnet. Es ergeben sich folgende Werte:

$$b = (0,017\,33 \pm 0,000\,13) \text{ K},$$

$$a = (23,74 \pm 0,04) \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Aus [Gleichung 2](#) lässt sich nun die spezifische Wärmekapazität von Wasser c_w berechnen:

$$b = \frac{Mg\pi d}{\Gamma_{\text{Kal}} + \Gamma_{\text{T}} + mc_w}, \quad (3)$$

$$c_w = \frac{\frac{Mg\pi d}{b} - \Gamma_{\text{Kal}} - \Gamma_{\text{T}}}{m}, \quad (4)$$

$$= \frac{\frac{Mg\pi d}{b} - m_{\text{Kal}}c_{\text{Cu}} - \Gamma_{\text{T}}}{m}. \quad (5)$$

Die Unsicherheit Δc_w von c_w wird mit Fehlerfortpflanzung wie folgt berechnet:

$$\Delta c_w = \sqrt{\left(\frac{Mg\pi}{bm} \Delta d\right)^2 + \left(\frac{-Mg\pi d}{mb^2} \Delta b\right)^2 + \left(\frac{\frac{Mg\pi d}{b} - \Gamma_{\text{Kal}} - \Gamma_{\text{T}}}{m^2} \Delta m\right)^2 + \left(\frac{c_{\text{Cu}}}{m} \Delta m_{\text{Kal}}\right)^2}. \quad (6)$$

Mit $g = 9,808 \text{ m s}^{-2}$ aus [3], $\Gamma_T = 5 \text{ J K}^{-1}$ und $c_{\text{Cu}} = 380 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ aus [1] ergibt sich für die spezifische Wärmekapazität von Wasser:

$$c_{w1} = (5380 \pm 50) \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}.$$

3.2 Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität von Wasser auf elektrischem Wege

3.2.1 Extrapolation der Endtemperaturen aus den Messdaten

Zur Berechnung der spezifischen Wärmekapazität von Wasser auf elektrischem Wege, muss neben der zugeführten Wärme der Temperaturanstieg ΔT bekannt sein. Dazu wird die Temperatur ab dem Anschalten der Spannungsquelle alle 20 s für fünf verschiedene Messreihen, in denen unterschiedliche Wassermassen verwendet werden, gemessen. Auch nach dem Abschalten werden weitere Temperaturmessungen vorgenommen. Im Folgenden wird exemplarisch die erste Messreihe mit $m = (143,390 \pm 0,006) \text{ g}$ betrachtet. Der gemessene Temperaturverlauf dieser Messreihe ist in [Abbildung 5](#) zu finden:

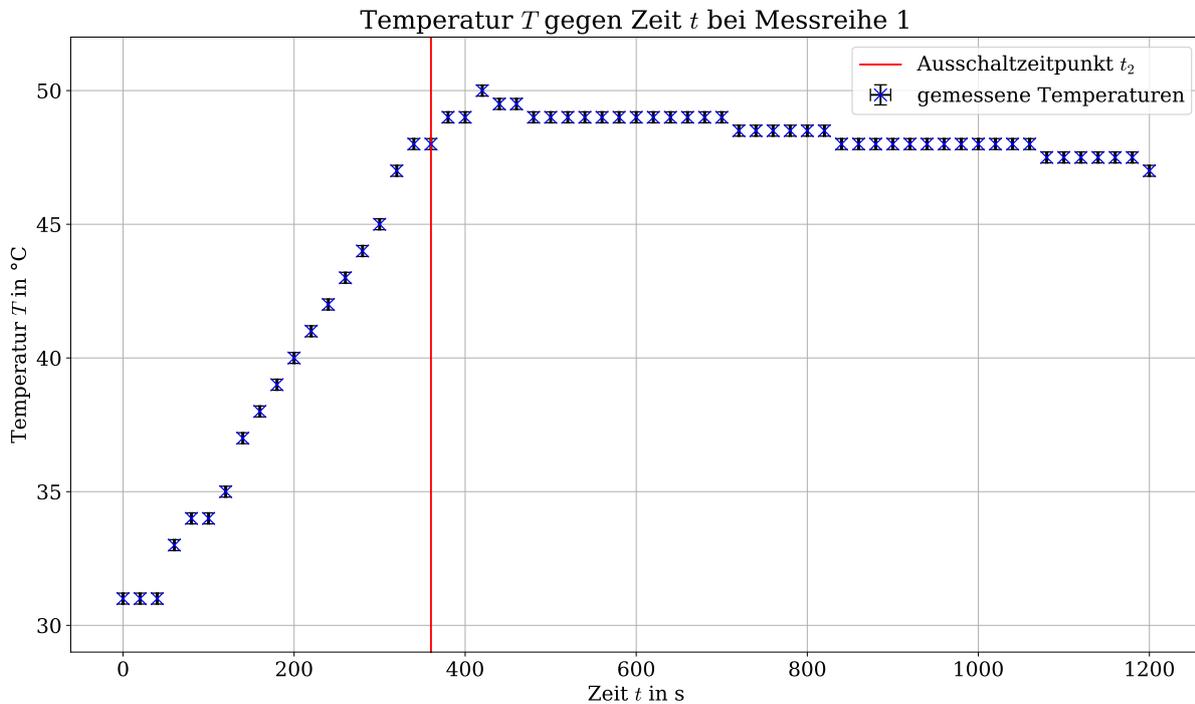


Abb. 5: Aufgetragen sind die gemessenen Temperaturen T in °C gegen die Zeiten t in s von Messreihe 1 bei der Bestimmung der Wärmekapazität von Wasser auf elektrischem Wege. Zusätzlich sind die Fehlerbalken eingetragen; da die Zeiten jedoch kleine Unsicherheiten haben, sind die Fehlerbalken schlecht zu erkennen. Es ist außerdem der Zeitpunkt markiert, an dem die Spannungsquelle abgeschaltet wurde.

Um $\Delta T = T_{\text{End}} - T_{\text{Anf}}$ bestimmen zu können, wird neben der Anfangstemperatur $T_{\text{Anf}} = T(0)$ auch die Endtemperatur T_{End} benötigt. Wie in [1] beschrieben, entspricht die Endtemperatur jedoch nicht dem gemessenen Maximum von T . Stattdessen wird eine Extrapolation der abfallenden Geraden nach dem Ausschaltvorgang durchgeführt. Durch Einsetzen des Zeitpunkts

$t_2/2$ in die Extrapolation, erhält man T_{End} . Es wird daher eine lineare Regression dieser Werte durchgeführt und deren Wert zum Zeitpunkt $t_2/2$ ermittelt. In [Abbildung 6](#) ist diese Extrapolation für Messreihe 1 abgebildet. Es wurden dabei alle Werte ab dem Maximum bei der linearen Regression berücksichtigt:

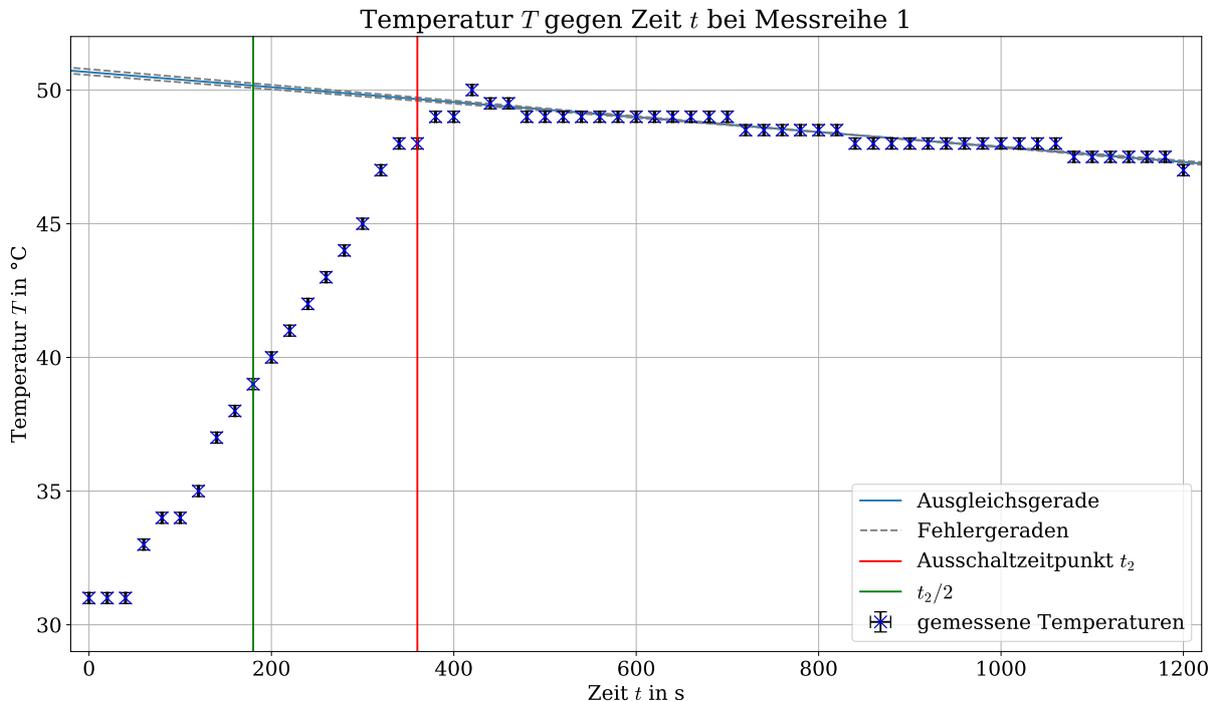


Abb. 6: Aufgetragen sind die gemessenen Temperaturen T in $^{\circ}\text{C}$ gegen die Zeiten t in s von Messreihe 1 bei der Bestimmung der Wärmekapazität von Wasser auf elektrischem Wege. Zusätzlich ist der Zeitpunkt markiert, an dem die Spannungsquelle abgeschaltet wurde, sowie der Zeitpunkt $t_2/2$, der nach der Extrapolation den Wert für T_{End} liefert.

Zur Bestimmung von T_{End} und der Unsicherheit ΔT_{End} können dann folgende Formeln verwendet werden. Die Werte für den y-Achsenabschnitt a und die Steigung b ergeben sich aus der linearen Regression. Diese wird, ebenso wie die Fehlerfortpflanzung, mit Formeln aus [\[2\]](#) bestimmt:

$$T_{\text{End}} = a + b \cdot \frac{t_2}{2}, \quad (7)$$

$$\Delta T_{\text{End}} = \sqrt{(\Delta a)^2 + \left(\Delta b \cdot \frac{t_2}{2}\right)^2 + \left(b \cdot \frac{\Delta t_2}{2}\right)^2}. \quad (8)$$

Für a und b ergeben sich bei dieser Messreihe folgende Werte:

$$a = (50,67 \pm 0,11) ^{\circ}\text{C},$$

$$b = (-0,00280 \pm 0,00013) \text{ K s}^{-1}.$$

Aus diesen Messwerten lässt sich nun die Endtemperatur T_{End} berechnen:

$$T_{\text{End}} = (50,16 \pm 0,11) ^{\circ}\text{C}.$$

Bei den anderen vier Messreihen wird analog vorgegangen. Die jeweiligen Grafiken und Extrapolationen finden sich im Anhang in [Abbildung 9](#) bis [Abbildung 16](#) und die aus der linearen Regression gewonnenen Werte für a und b in [Tabelle 4](#) im Anhang. Die ermittelten Endtemperaturen T_{End} aller Messreihen sind in [Tabelle 1](#) zusammen mit den Anfangstemperaturen aufgelistet:

Tab. 1: Zusammengestellt sind alle Starttemperaturen und die durch Extrapolation bestimmten Endtemperaturen in $^{\circ}\text{C}$ der fünf Messreihen. Die Unsicherheit der Starttemperatur beträgt $0,2^{\circ}\text{C}$.

Name der Messreihe	Starttemperatur T_{Anf} in $^{\circ}\text{C}$	Endtemperatur T_{End} in $^{\circ}\text{C}$
Messreihe 1	31,0	$50,16 \pm 0,11$
Messreihe 2	23,0	$32,0 \pm 0,0$
Messreihe 3	30,5	$47,8 \pm 0,2$
Messreihe 4	34,5	$56,72 \pm 0,19$
Messreihe 5	38,0	$52,76 \pm 0,10$

Es fällt auf, dass die durch die lineare Regression erhaltenen Endtemperaturen eine kleinere Unsicherheit haben, als die auf die Temperaturen geschätzte Unsicherheit. Insbesondere bei Messreihe 2, die nach mehreren Minuten warten ohne Temperaturänderung abgebrochen wurde, ist die berechnete Unsicherheit nicht realistisch. Es wird daher im Folgenden auch für alle Endtemperaturen T_{End} die anfangs geschätzte Unsicherheit $\Delta T = 0,2^{\circ}\text{C}$ verwendet.

3.2.2 Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität durch lineare Regression

Nun wird die spezifische Wärmekapazität von Wasser berechnet. Diese wird aus den Ergebnissen der Messreihen mit verschiedenen Massen, die in [Tabelle 1](#) zusammengefasst sind, bestimmt. Zunächst wird untersucht, wie die Wassermasse mit der Temperaturdifferenz zusammenhängt. Dabei wird berücksichtigt, dass verschiedene Spannungen und damit Leistungen verwendet werden. Für die elektrische Energie E_{el} und die Wärme Q gelten folgende Zusammenhänge [1]:

$$E_{\text{el}} = Pt_2 = UI t_2, \quad Q = (\Gamma_{\text{Kal}} + mc_w)(T_{\text{End}} - T_{\text{Anf}}), \quad (9)$$

Aus der Energieerhaltung ergibt sich:

$$UI t_2 = (\Gamma_{\text{Kal}} + mc_w)(T_{\text{End}} - T_{\text{Anf}}), \quad (10)$$

$$\frac{UI t_2}{(T_{\text{End}} - T_{\text{Anf}})} = \Gamma_{\text{Kal}} + mc_w. \quad (11)$$

Aufgrund dieses Zusammenhangs wird nun $UI t_2/\Delta T$ gegen m aufgetragen. Alle Messwerte hierzu finden sich in [Tabelle 5](#). Die Unsicherheiten von $UI t_2/\Delta T$ werden durch Fehlerfortpflanzung mit folgender Formel berechnet:

$$\Delta \left(\frac{UI t_2}{(T_{\text{End}} - T_{\text{Anf}})} \right) = \sqrt{\left(\frac{It_2 \Delta U}{(T_{\text{End}} - T_{\text{Anf}})} \right)^2 + \left(\frac{Ut_2 \Delta I}{(T_{\text{End}} - T_{\text{Anf}})} \right)^2 + \left(\frac{IU \Delta t_2}{(T_{\text{End}} - T_{\text{Anf}})} \right)^2 + 2 \left(\frac{IU t_2 \Delta T}{(T_{\text{End}} - T_{\text{Anf}})^2} \right)^2}. \quad (12)$$

Es ergeben sich die in [Tabelle 2](#) zusammengestellten Werte:

Tab. 2: Zusammengestellt sind die berechneten Werte für $UIt_2/\Delta T$ in JK^{-1} der fünf Messreihen, die für die lineare Regression benötigt werden. Zusätzlich ist die Wassermasse m der jeweiligen Messreihe angegeben. Diese besitzt eine Unsicherheit von 0,0006 g.

Name der Messreihe	Wassermasse m in g	$UIt_2/\Delta T$ in JK^{-1}
Messreihe 1	143,390	720 ± 4
Messreihe 2	206,880	1018 ± 10
Messreihe 3	173,520	806 ± 4
Messreihe 4	155,580	697 ± 17
Messreihe 5	194,250	910 ± 20

Diese Werte sind in [Abbildung 7](#) aufgetragen.

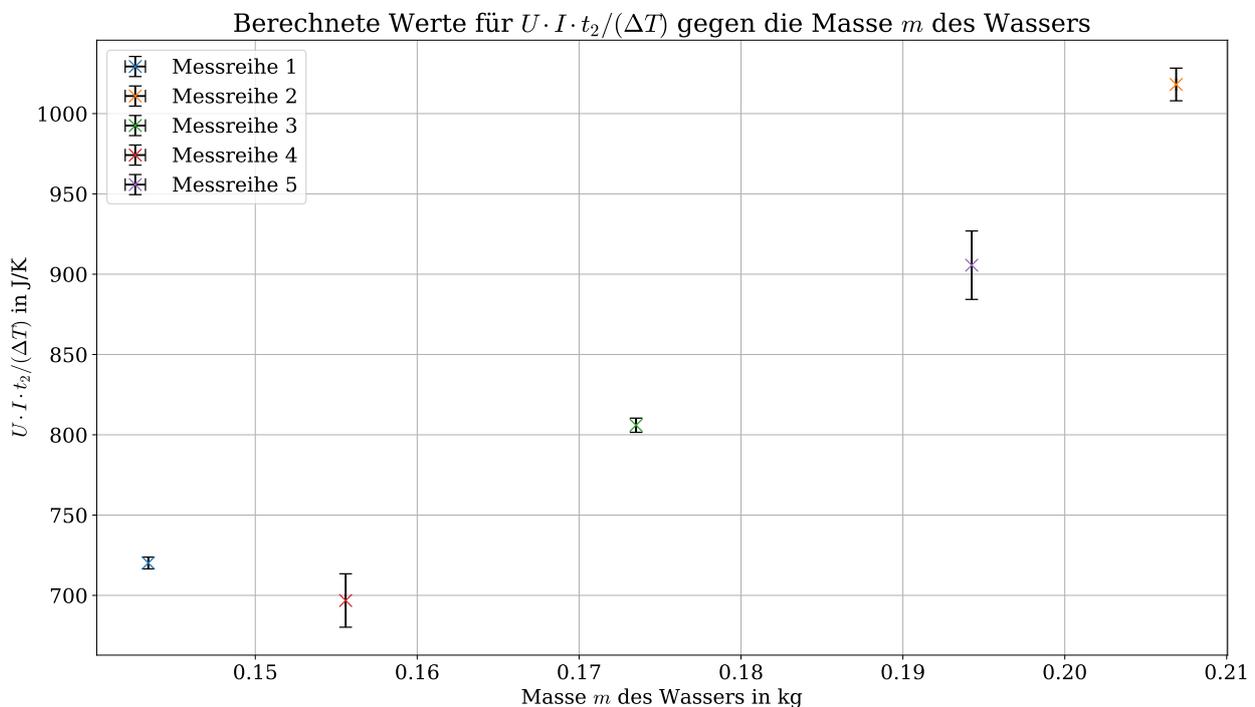


Abb. 7: Aufgetragen sind die berechnete Werte für $U \cdot I \cdot t_2 / \Delta T$ in JK^{-1} der fünf Messreihen gegen die jeweils verwendeten Wassermassen m in kg bei der Bestimmung der Wärmekapazität von Wasser auf elektrischem Wege. Zusätzlich sind die Fehlerbalken eingetragen.

Um die spezifische Wärmekapazität von Wasser zu bestimmen, wird eine lineare Regression durchgeführt. Dabei ergibt sich eine Ausgleichsgerade, bei der die Steigung b und der y-Achsenabschnitt a nach [Gleichung 11](#) folgenden Größen entsprechen sollten:

$$b = c_w, \quad (13)$$

$$a = \Gamma_{\text{Kal}}. \quad (14)$$

Die lineare Regression ist in [Abbildung 8](#) dargestellt.

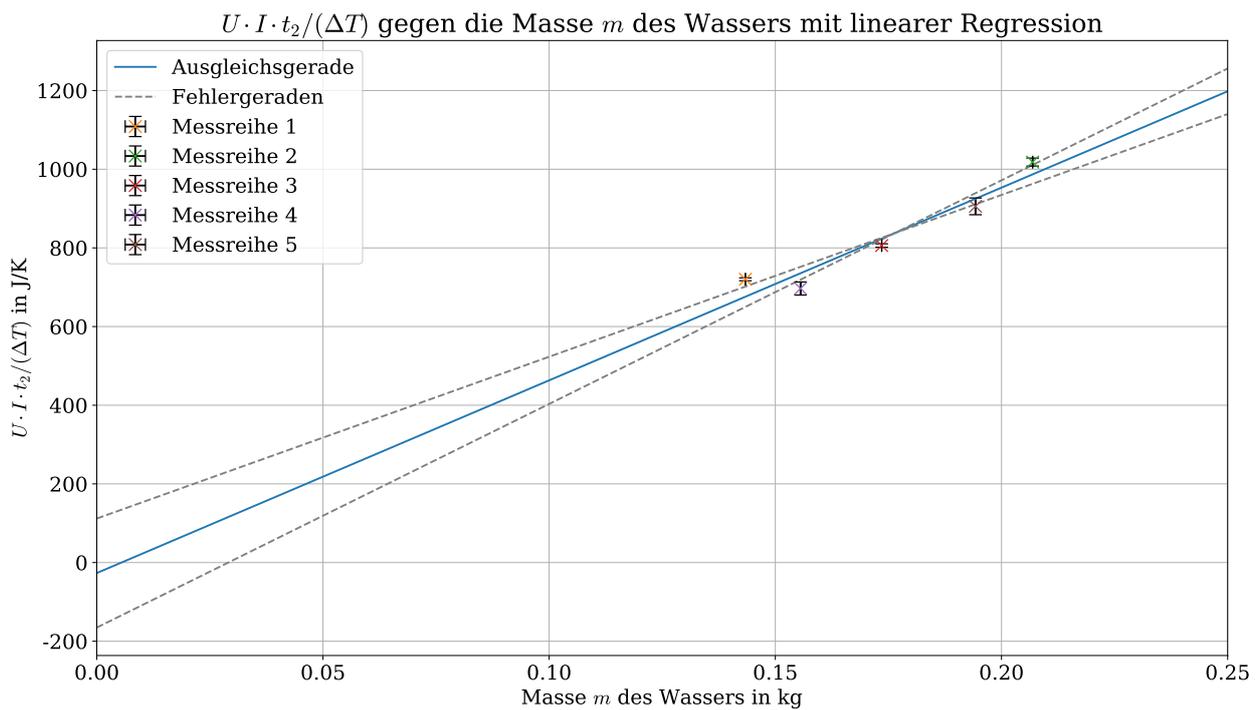


Abb. 8: Aufgetragen sind die berechnete Werte für $U \cdot I \cdot t_2 / \Delta T$ in JK^{-1} der fünf Messreihen gegen die jeweils verwendeten Wassermassen m in kg bei der Bestimmung der Wärmekapazität von Wasser auf elektrischem Wege. Zusätzlich sind die aus der linearen Regression erhaltenen Ausgleichs- und Fehlergeraden eingezeichnet.

Die Steigung b , der y-Achsenabschnitt a und ihre Unsicherheiten werden mit Formeln aus [2] berechnet und sind hier zusammengefasst:

$$b = (4900 \pm 800) \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1},$$

$$a = (-30 \pm 140) \text{ J K}^{-1}.$$

Daraus ergibt sich auch für die spezifische Wärmekapazität von Wasser:

$$c_{w2} = b = (4900 \pm 800) \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}.$$

4 Diskussion der Ergebnisse

4.1 Zusammenstellung und Vergleich der Ergebnisse

Bei der Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität von Wasser mithilfe des Schürholz-Apparats konnte folgender Wert ermittelt werden:

$$c_{w1} = (5380 \pm 50) \text{ J kg}^{-1} \text{ K}.$$

Bei der Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität auf elektrischem Wege wurden erst die T_{End} -Werte aller Messreihen durch Extrapolation bestimmt, die in [Tabelle 1](#) zusammengestellt sind und anschließend folgender Wert für die Wärmekapazität ermittelt:

$$c_{w1} = (4900 \pm 800) \text{ J kg}^{-1} \text{ K}.$$

Die beiden ermittelten Werte sind mit einem t -Wert [2] von 0,6 deutlich miteinander verträglich. Dies mag insbesondere an dem hohen relativen Fehler der zweiten Messung von 16,0% liegen. Der relative Fehler der ersten Messung beträgt 0,9% und ist damit um einiges genauer. Bei der zweiten Messung wurde außerdem ein Wert für die Wärmekapazität des Kalorimeters ermittelt:

$$\Gamma_{\text{Kal}} = (-30 \pm 140) \text{ J K}^{-1}.$$

Dieser hat mit 519% einen extrem hohen relativen Fehler.

4.2 Vergleich mit Literaturwert

Die beiden ermittelten Werte für die spezifische Wärmekapazität werden nun noch mit dem Literaturwert $c_{w,\text{lit}}$ aus [1] verglichen. Der Literaturwert für Wasser ist:

$$c_{w,\text{lit}} = 4182 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}.$$

Um die Verträglichkeit der berechneten Werte mit dem Literaturwert beurteilen zu können, werden die zugehörigen t -Werte mit Formeln aus [2] berechnet. Die errechneten spezifischen Wärmekapazitäten mit ihren t -Werten sind in [Tabelle 3](#) zusammengestellt.

Tab. 3: Vergleich der bestimmten Messwerte für c_w mit dem Literaturwert

$c_{w,\text{lit}} = 4182 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ aus [1] mithilfe des t -Werts.

c_{w1} in $\text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ mit mechanischer Energie bestimmt	t -Wert von c_{w1}	c_{w2} in $\text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ mit elektrischer Energie bestimmt	t -Wert von c_{w2}
5380 ± 50	24,3	4900 ± 800	0,9

Der mit dem Schürholz-Apparat ermittelte Wert für die spezifische Wärmekapazität ist sehr schlecht mit dem Literaturwert verträglich. Der zweite Versuchsteil mit der Umwandlung elektrischer Energie in Wärme ergibt einen gut verträglichen Wert. Hier ist allerdings die Unsicherheit mit einem relativen Fehler von 16% sehr viel größer.

Für die bestimmte Wärmekapazität des Kalorimeters liegt zwar kein Literaturwert vor, es ist jedoch mit Sicherheit zu sagen, dass der ermittelte Wert unphysikalisch ist. Allein schon das negative Vorzeichen und der extrem hohe relative Fehler sind ein Indiz dafür, dass dieser Wert keineswegs mit dem wirklichen Wert übereinstimmen kann.

4.3 Fehlerdiskussion

Der Wert für die spezifische Wärmekapazität, der mit dem Schürholz-Apparat berechnet wurde, ist mit einem t -Wert von 24,3 außergewöhnlich schlecht. Dabei ist der relative Fehler mit 0,9% recht klein, was einen systematischen Fehler nahe legt.

Ein Grund hierfür ist vermutlich, dass die Korrektur Γ_T für diesen Versuchsaufbau nicht zutreffend ist. Deswegen konnte zwar ein genauer Wert für die spezifische Wärmekapazität berechnet werden, dieser entspricht aber nicht der wahren Wärmekapazität von Wasser, da die anderen Bauteile wie der Spanngurt nicht richtig ausgeglichen wurden. Γ_T ist in [1] zusammen mit dem Hinweis angegeben, dass dies ein Ausgleich für die Nylonschnur sei. Bei unserer Versuchsdurchführung wurde allerdings kein Nylonband, sondern ein Spanngurt verwendet. Das deutet ebenfalls darauf hin, dass Γ_T bei diesem Versuch hätte anders gewählt werden müssen.

Auf diesen systematischen Fehler deuten auch die kleinen Unsicherheiten des y -Achsenabschnitts a und der Steigung b bei der linearen Regression hin. Demnach sind die Messwerte deutlich linear, was größere Messfehler unwahrscheinlich macht. Mögliche andere Fehler können durch Wärmeverluste aufgrund der langen Versuchsdauer oder eine nicht vollständige Umsetzung der Gewichtskraft in Reibungskraft auftreten.

Zwar ist der über den elektrischen Weg ermittelte Wert für die spezifische Wärmekapazität von Wasser mit einem t -Wert von 0,9 gut mit dem Literaturwert verträglich, es fällt jedoch auf, dass dieser mit 16,0% einen extrem hohen relativen Fehler besitzt.

Eine der Hauptursachen für diese große Unsicherheit liegt wahrscheinlich in der geringen Anzahl an Messreihen bei der linearen Regression. Dabei genügen die fünf gesammelten Messwerte hier nicht. Das ist an den großen Unsicherheiten in a und b zu erkennen, die auch für den großen relativen Fehler der ermittelten spezifischen Wärmekapazität verantwortlich sind. Dies erklärt auch den offensichtlich falschen Wert für Γ_{Kal} , der oben angemerkt wurde.

Ein weiterer wichtiger Punkt, der bereits die Genauigkeit der einzelnen Messwerte deutlich verschlechtert, ist der zu frühe Abbruch der einzelnen Messreihen. Besonders in der zweiten Messreihe wurde nach einigen Minuten abgebrochen, ohne einen erneuten Abfall der Temperatur gemessen zu haben, was in [Abbildung 10](#) im Anhang deutlich zu erkennen ist. Eine Extrapolation der Werte im Anschluss ist dann deutlich ungenauer, was zu einer Verschlechterung der einzelnen Messdaten führt. Die Ungenauigkeit der Extrapolation kommt auch durch die Verwendung eines analogen Thermometers zustande, wodurch leichte Temperaturschwankungen nicht mehr messbar waren.

Bereits während des Versuchs wurde die beschriebene Ungenauigkeit zugunsten weiterer Messreihen in Kauf genommen. Da der größte Fehler durch die zu geringe Anzahl an Messwerten bei der linearen Regression entsteht, die Extrapolation der Temperatur aber nur in einem vergleichbar kleinen Bereich liegt, ist es bei Zeitmangel sinnvoll, lieber mehr Messreihen zu nehmen, anstatt die Abkühlphase noch länger zu beobachten.

Da die Problematik des langen Abkühlzeitraums erst während des Versuchs zu erkennen war, wurden die Leistungen und die Starttemperaturen variiert. Dies sollte zwar bei der Auswertung keine Rolle spielen, da die Leistung bei jedem Wert berücksichtigt wurde. Um mögliche Effekte trotzdem ausschließen zu können, wäre es sinnvoll gewesen, die Messreihen stets unter gleichen Voraussetzungen durchzuführen.

4.4 Vergleich und Verbesserung der Messmethoden

Da zwei verschiedene Methoden zur Bestimmung der Wärmekapazität c_w genutzt wurden, bietet sich ein Vergleich an. Der Vorteil der mechanischen Methode ist, dass diese relativ schnell durchzuführen ist und einen relativ kleinen Fehler ergibt.

Die Nachteile dieser Methode sind, dass man weder Verluste noch Verzögerungen exakt bestimmen kann und dass es nicht einfach festzustellen ist, ob die Feder immer komplett entspannt ist und die Reibungskraft der Gewichtskraft entspricht. Dadurch ist es nicht sicher, ob die komplette Arbeit in Wärme umgesetzt oder das Ergebnis verfälscht wird. Außerdem haben wir in unserer Messung einen systematischen Fehler, da wie schon in der Fehlerdiskussion erwähnt, der Korrekturterm Γ_T wahrscheinlich unpassend ist.

Die elektrische Methode hat den Vorteil, dass sie exakt wiederholbar ist, da die Spannung und somit auch die Leistung exakt einstellbar ist. Außerdem können Korrekturterme für die Wärmekapazität des Kalorimeters Γ_{Kal} und Verluste an die Umgebung durch die durchgeführte lineare Regression, sowie die Extrapolation, berücksichtigt werden. Durch mehr Zeit und damit mehr Messwerte wäre diese lineare Regression exakter geworden und die Korrekturterme genauer. Damit wird die berechnete spezifische Wärmekapazität c_w des Wassers akkurater.

Der Nachteil dieser Methode ist, dass es sehr viel Zeit braucht, die Messwerte präzise zu bestimmen. Bei unserer Durchführung hatten wir sowohl zu wenige, als auch unpräzise Messwerte, was zu einem ungenauen Wert für c_w führte. Dies liegt vor allem an der großen Unsicherheit $\Delta\Gamma_{\text{Kal}}$ von Γ_{Kal} , die aber durch mehr Zeit und dadurch mehr Messreihen hätte verbessert werden können.

Um diese Nachteile auszugleichen können folgende Verbesserungen durchgeführt werden. Für die mechanische Methode wäre eine Wärmeisolation der gesamten Schürholz-Apparatur eine Verbesserung. Dadurch könnten Verluste durch Wärmeabgabe an die Umgebung möglichst klein gehalten werden.

Eine Möglichkeit um sicherzustellen, dass die Feder in Ruhe ist und somit die gesamte Arbeit in Wärme umgesetzt wird, wäre ein Elektromotor. Dieser würde die Kurbel gleichmäßig drehen und somit sicherstellen, dass immer gleich viel Arbeit in Wärme umgesetzt wird. Da dies beim Kurbeln von Hand nicht möglich ist, wäre diese Methode durch diese Verbesserung auch besser reproduzierbar.

Um bei der elektrischen Methode die Temperatur exakter zu bestimmen, wäre es sinnvoll auch hier ein digitales Thermometer zu nutzen, da dies zum einen zu einem genaueren Wert der Temperatur führt und zum anderen eine kleinere Ablesunsicherheit hat. Deshalb ergibt sich ein weniger sprunghafter Temperaturverlauf und die Extrapolation und dadurch die Korrekturterme werden deutlich exakter. Bei Verwendung eines analogen Thermometers könnte man hingegen argumentieren, dass die Extrapolation hinfällig ist, da die berechneten Endtemperaturen in die Unsicherheit des Temperaturmaximums fallen.

Eine Möglichkeit, die Aufwärmphase zu verkürzen und einen deutlicheren Temperaturabfall nach dem Ausschalten beobachten zu können, ist es, die Leistung zu erhöhen. Dabei sollte allerdings darauf geachtet werden, dem Siedepunkt nicht zu nahe zu kommen, da durch den Phasenübergang das Ergebnis erheblich verfälscht würde.

Literatur

- [1] Dr. Christof Bartels, Dr. Lukas Bruder, Dr. Thomas Pfohl: *Versuch 38 - Spezifische Wärmekapazität von Wasser, Versuchsbeschreibung des Physiklabors für Anfänger*innen*, (2021)
- [2] Dr. Christof Bartels, Dr. Lukas Bruder, Dr. Thomas Pfohl: *Datenanalyse - Skript zur Vorlesung am 06.09.2021*, (2021)
- [3] Dr. Dr. Jens Simon: *Normalschwereformel für Freiburg, Breitengrad 48°, Höhe 278 m, Physikalisch-Technische Bundesanstalt*, www.ptb.de, (aufgerufen am: 06.10.2021)

6 Anhang

6.1 Tabellen und Grafiken

Tab. 4: Aufgetragen sind die Werte für a und b der fünf Messreihen mit ihren jeweiligen Unsicherheiten. Diese werden mit einer linearen Regression des abfallenden Temperaturverlaufs bestimmt.

Name der Messreihe	a -Wert in °C	b -Wert in K s ⁻¹
Messreihe 1	50,67 ± 0,11	-0,00280 ± 0,00013
Messreihe 2	32,0 ± 0,0	-0,0 ± 0,0
Messreihe 3	48,5 ± 0,2	-0,0038 ± 0,0004
Messreihe 4	57,28 ± 0,18	-0,0047 ± 0,0004
Messreihe 5	52,98 ± 0,10	-0,0023 ± 0,0002

Tab. 5: Zusammengefasst sind alle Messwerte, die zur Berechnung von c_w benötigt werden: Wassermasse m in g, Spannung U in V, Stromstärke I in A, Start- und Endtemperatur in °C, Stoppzeit t_{stopp} in s. Die Unsicherheit der Start- und Endtemperatur beträgt 0,2 °C. Die Masse hat eine Unsicherheit von 0,006 g. Die Unsicherheit der Stoppzeit ist 1,0 s.

Name der Messreihe	Wassermasse m in g	Anglegte Spannung U in V	Stromstärke I in A	Starttemperatur T_{Anf} in °C	Endtemperatur T_{End} in °C	Stoppzeit t_{stopp} in s
Messreihe 1	143,390	19,520 ± 0,006	1,9640 ± 0,0006	31,0	50,2	360
Messreihe 2	206,880	19,470 ± 0,006	1,9610 ± 0,0006	23,0	32,0	240
Messreihe 3	173,520	19,610 ± 0,006	1,9780 ± 0,0006	30,5	47,8	360
Messreihe 4	155,580	25,80 ± 0,06	2,50 ± 0,06	34,5	56,7	240
Messreihe 5	194,250	25,70 ± 0,06	2,60 ± 0,06	38,0	52,8	200

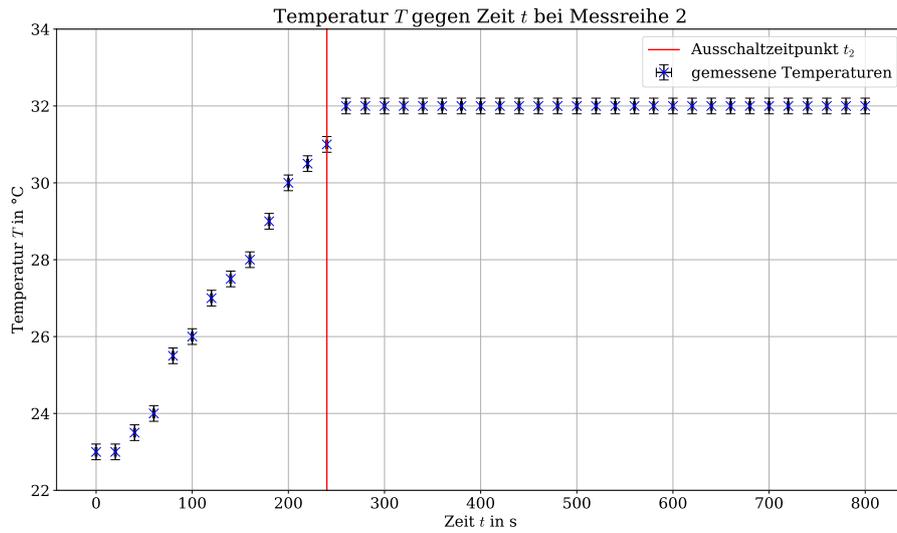


Abb. 9: Aufgetragen sind die gemessenen Temperaturen T in $^{\circ}\text{C}$ gegen die Zeiten t in s von Messreihe 2 bei der Bestimmung der Wärmekapazität von Wasser auf elektrischem Wege. Zusätzlich sind die Fehlerbalken eingetragen; da die Zeiten jedoch kleine Unsicherheiten haben, sind die Fehlerbalken schlecht zu erkennen. Es ist außerdem der Zeitpunkt markiert, an dem die Spannungsquelle abgeschaltet wurde.

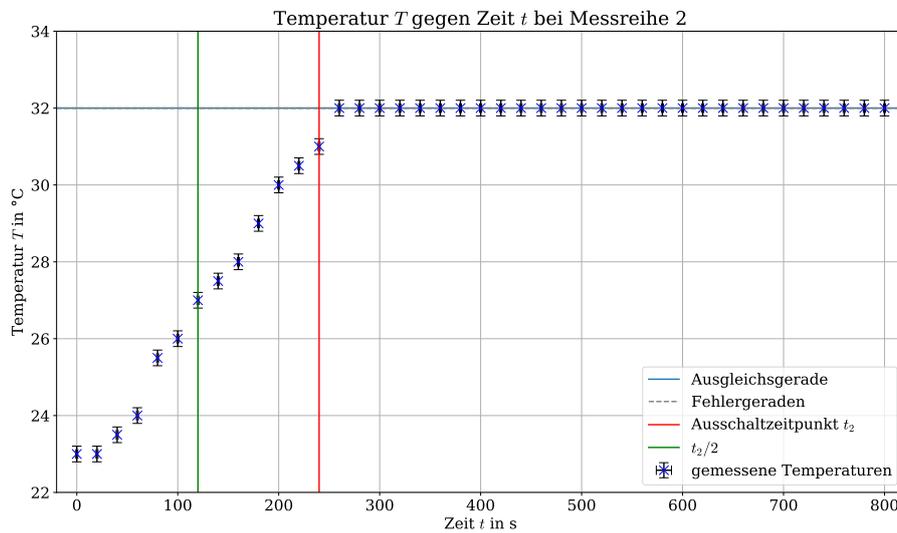


Abb. 10: Aufgetragen sind die gemessenen Temperaturen T in $^{\circ}\text{C}$ gegen die Zeiten t in s von Messreihe 2 bei der Bestimmung der Wärmekapazität von Wasser auf elektrischem Wege. Zusätzlich ist der Zeitpunkt markiert, an dem die Spannungsquelle abgeschaltet wurde, sowie der Zeitpunkt $t_2/2$, der nach der Extrapolation den Wert für T_{End} liefert.

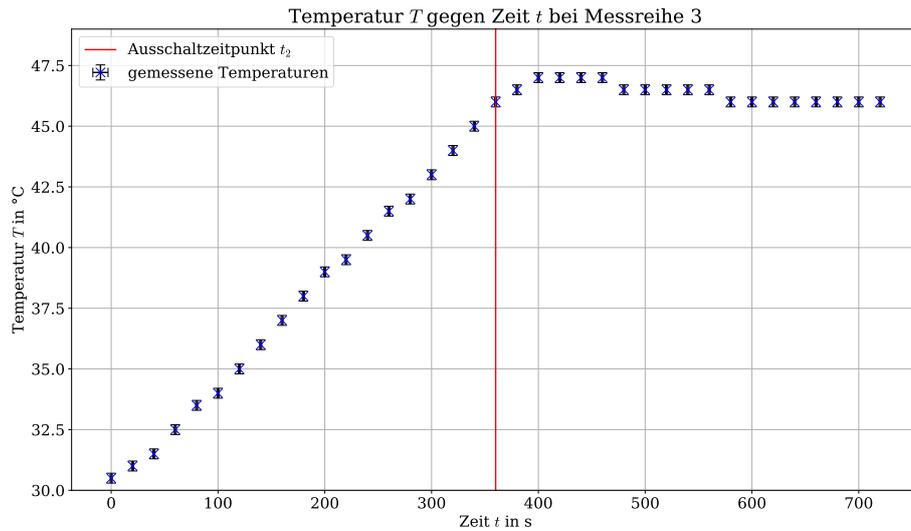


Abb. 11: Aufgetragen sind die gemessenen Temperaturen T in $^{\circ}\text{C}$ gegen die Zeiten t in s von Messreihe 3 bei der Bestimmung der Wärmekapazität von Wasser auf elektrischem Wege. Zusätzlich sind die Fehlerbalken eingetragen; da die Zeiten jedoch kleine Unsicherheiten haben, sind die Fehlerbalken schlecht zu erkennen. Es ist außerdem der Zeitpunkt markiert, an dem die Spannungsquelle abgeschaltet wurde.

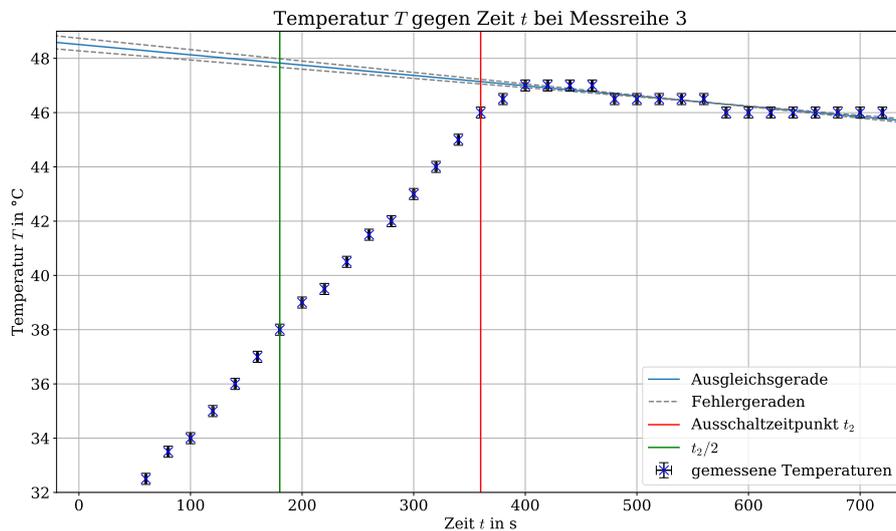


Abb. 12: Aufgetragen sind die gemessenen Temperaturen T in $^{\circ}\text{C}$ gegen die Zeiten t in s von Messreihe 3 bei der Bestimmung der Wärmekapazität von Wasser auf elektrischem Wege. Zusätzlich ist der Zeitpunkt markiert, an dem die Spannungsquelle abgeschaltet wurde, sowie der Zeitpunkt $t_2/2$, der nach der Extrapolation den Wert für T_{End} liefert.

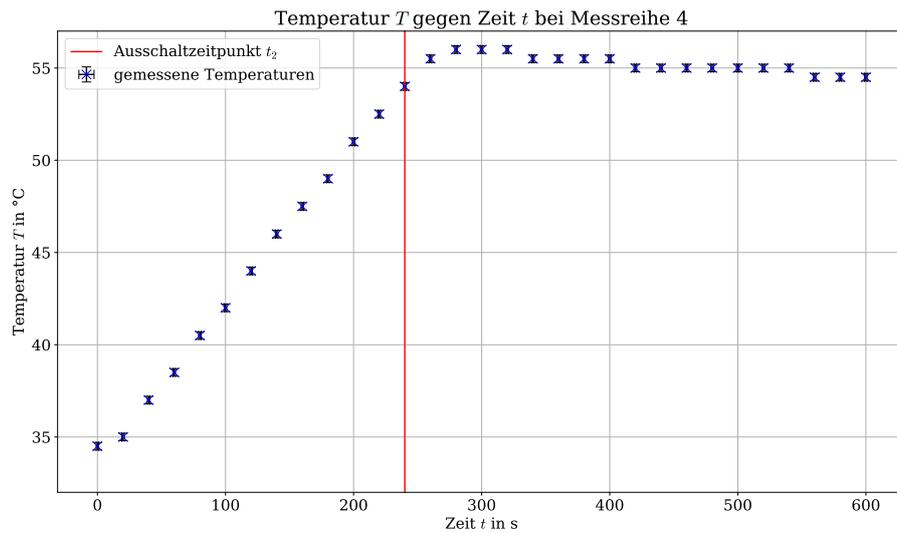


Abb. 13: Aufgetragen sind die gemessenen Temperaturen T in $^{\circ}\text{C}$ gegen die Zeiten t in s von Messreihe 4 bei der Bestimmung der Wärmekapazität von Wasser auf elektrischem Wege. Zusätzlich sind die Fehlerbalken eingetragen; da die Zeiten jedoch kleine Unsicherheiten haben, sind die Fehlerbalken schlecht zu erkennen. Es ist außerdem der Zeitpunkt markiert, an dem die Spannungsquelle abgeschaltet wurde.

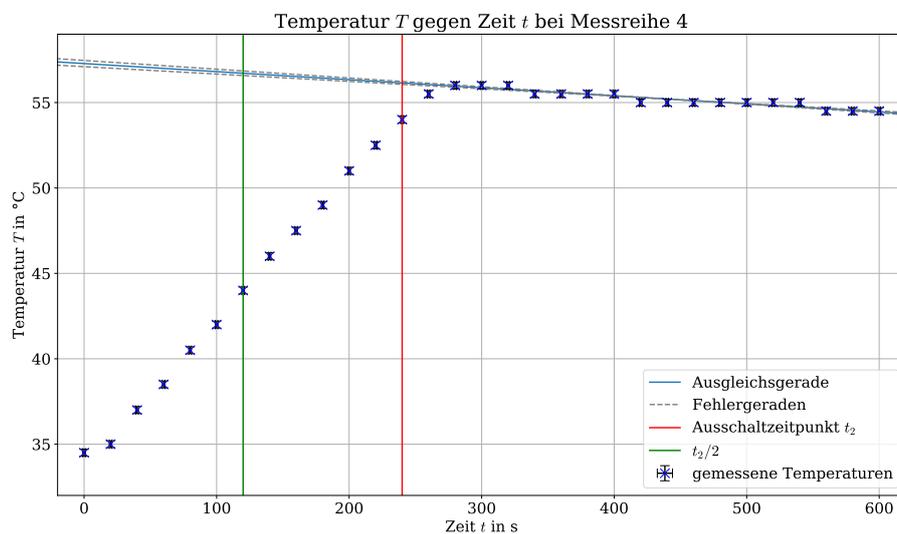


Abb. 14: Aufgetragen sind die gemessenen Temperaturen T in $^{\circ}\text{C}$ gegen die Zeiten t in s von Messreihe 4 bei der Bestimmung der Wärmekapazität von Wasser auf elektrischem Wege. Zusätzlich ist der Zeitpunkt markiert, an dem die Spannungsquelle abgeschaltet wurde, sowie der Zeitpunkt $t_2/2$, der nach der Extrapolation den Wert für T_{End} liefert.

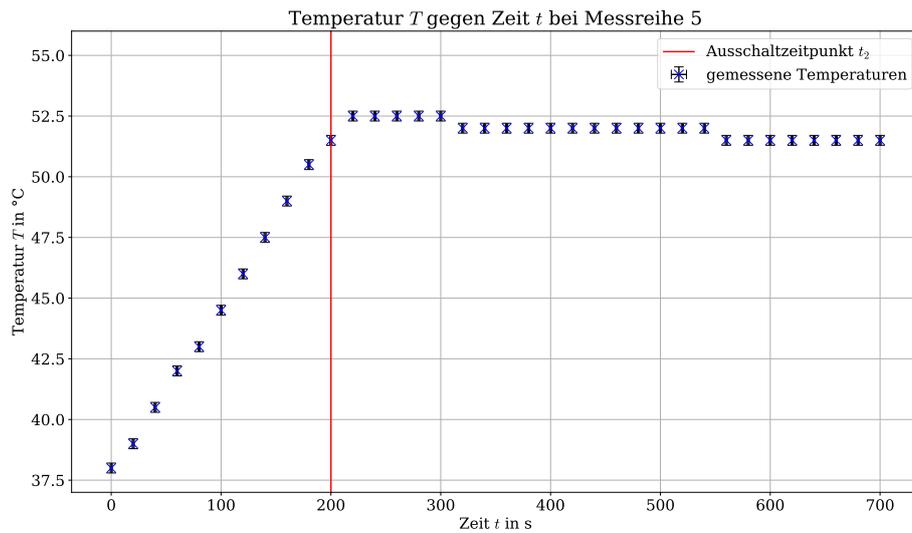


Abb. 15: Aufgetragen sind die gemessenen Temperaturen T in $^{\circ}\text{C}$ gegen die Zeiten t in s von Messreihe 5 bei der Bestimmung der Wärmekapazität von Wasser auf elektrischem Wege. Zusätzlich sind die Fehlerbalken eingetragen; da die Zeiten jedoch kleine Unsicherheiten haben, sind die Fehlerbalken schlecht zu erkennen. Es ist außerdem der Zeitpunkt markiert, an dem die Spannungsquelle abgeschaltet wurde.

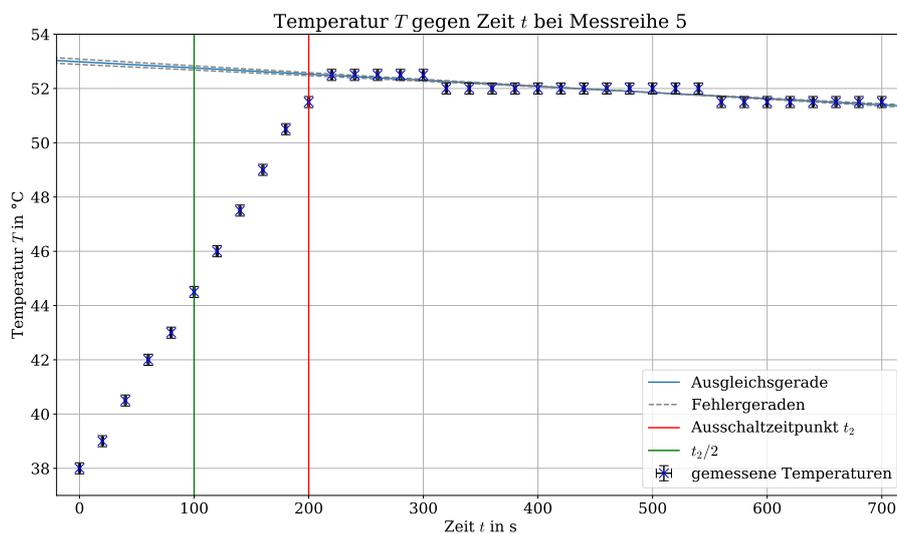


Abb. 16: Aufgetragen sind die gemessenen Temperaturen T in $^{\circ}\text{C}$ gegen die Zeiten t in s von Messreihe 5 bei der Bestimmung der Wärmekapazität von Wasser auf elektrischem Wege. Zusätzlich ist der Zeitpunkt markiert, an dem die Spannungsquelle abgeschaltet wurde, sowie der Zeitpunkt $t_2/2$, der nach der Extrapolation den Wert für T_{End} liefert.

6.2 Laborbuch

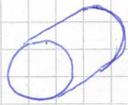
Versuch 38 - Wärmekapazität 05.10.21

1. Versuchsaufbau Mechanisch

1.1 mechanisch Versuchsaufbau

Gesamtaufbau: siehe Versuchsbeschreibung

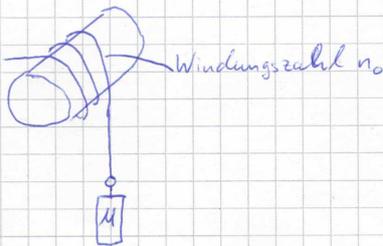
Kalorimeter:

d | 

Masse: m_{kal}

eingefülltes Wasser: m_w

angehängte Masse: M



Windungszahl n_0

1.2. Messung

$d = (4,78 \pm \frac{0,01}{\sqrt{6}}) \text{ cm}$

$M = 5 \text{ kg}$

$m_{kal} = (167,45 \pm \frac{0,01}{\sqrt{3}}) \text{ g}$

$m_w = (66,14 \pm \frac{0,01}{\sqrt{3}}) \text{ g}$

$n_0 = 3\frac{1}{4} \pm \frac{1}{8}$

$T_{Auf} = (22,2 \pm \frac{0,1}{\sqrt{3}}) ^\circ\text{C}$

$T_{End} = 30,8 \pm (30,9 \pm \frac{0,1}{\sqrt{3}}) ^\circ\text{C}$

$n = 500$

$m_w = (66,20 \pm \frac{0,01}{\sqrt{3}}) \text{ g}$

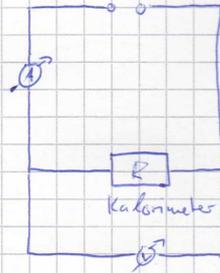
$n_0 = 3\frac{1}{4} \pm \frac{1}{8}$

Anzahl Windungen n	Temperatur T in $^\circ\text{C}$ mit $\Delta T = \frac{0,1}{\sqrt{3}}$
0	23,9
30	24,23
60	24,7
90	25,3
120	25,7
150	26,3
180	26,8
210	27,4
240	27,9
270	28,5
300	28,9
330	29,5
360	30,0
390	30,6
420	31,0
450	31,5

Abb. 17: Laborbuch, Seite 1

2. ~~AA, Z~~ elektrisch

2.1 Versuchsaufbau



m_w Wassermasse

2.2 Messung

Spannung U in V mit $\Delta U = \frac{0,01}{\sqrt{3}} V$	Stromstärke I in A mit $\Delta I = \frac{0,001}{\sqrt{3}} A$	Wassermasse m_w in g mit $\Delta m_w = \frac{0,01}{\sqrt{3}} g$
19,52	1,964	148,85 143,39

~~Heizen~~ Abschalten: ✓

~~Abkühlen~~

Zeit t in s mit $\Delta t = 1s$	Temperatur T in $^{\circ}C$ mit $\Delta T = \frac{1}{10}^{\circ}C$	Zeit t in s mit $\Delta t = 1s$	Temperatur T in $^{\circ}C$ mit $\Delta T = \frac{1}{10}^{\circ}C$
0	24,0	340	48,0
30	24	360	48,0
0	31,0		
20	31,0	380	49,0
40	31,0	400	49,0
60	33,0	420	50,0
80	34,0	440	49,5
100	34,0	460	49,5
120	35,0	480	49,0
140	37,0	500	49,0
160	38,0	520	49,0
180	39,0		
200	40,0		
220	41,0		
240	42,0		
260	43,0		
280	44,0		
300	45,0		
320	47,0		

Messzeit falsch eingestellt

360

Abb. 18: Laborbuch, Seite 2

t in s mit $\Delta t = 1s$	Temperatur in $^{\circ}C$ mit $\Delta T = \frac{1}{10}^{\circ}C$	t in s mit $\Delta t = 1s$	T in $^{\circ}C$ mit $\Delta T = \frac{1}{10}^{\circ}C$
540	49,0	180	29,0
560	49,0	200	30,0
580	49,0	220	30,5
600	49,0	240	31,0
620	49,0	260	32,0
640	49,0	280	32,0
660	49,0	300	32,0
680	49,0	320	32,0
700	49,0	340	32,0
720	48,5	360	32,0
740	48,5	380	32,0
760	48,5	400	32,0
780	48,5	420	32,0
800	48,5	440	32,0
820	48,5	460	32,0
840	48,0	480	32,0
860	48,0	500	32,0
880	48,0	520	32,0
900	48,0	540	32,0
920	48,0	560	32,0
940	48,0	580	32,0
960	48,0	600	32,0
980	48,0	620	32,0
1000	48,0	640	32,0
1020	48,0	660	32,0
1040	48,0	680	32,0
1060	48,0	700	32,0
1080	47,5	720	32,0
1100	47,5	740	32,0
1120	47,5	760	32,0
1140	47,5	780	32,0
1160	47,5	800	32,0
1180	47,5		
1200	47,0		

$$U = (19,47 \pm \frac{0,04}{\sqrt{3}}) V = (1,967 \pm \frac{0,004}{\sqrt{3}}) m_w = (206,82 \pm \frac{0,1}{\sqrt{3}}) g$$

t in s mit $\Delta t = 1s$	Temperatur T in $^{\circ}C$ mit $\Delta T = \frac{1}{10}^{\circ}C$	t in s mit $\Delta t = 1s$	T in $^{\circ}C$ mit $\Delta T = \frac{1}{10}^{\circ}C$
0	23,0	0	30,5
20	23,0	20	31,0
40	23,5	40	31,5
60	24,0	60	32,5
80	25,5	80	33,5
100	26,0	100	34,0
120	27,0	120	35,0
140	27,5	140	36,0
160	28,0	160	37,0
		180	38,0
		200	39,0
		220	39,5
		240	40,5

Abb. 19: Laborbuch, Seite 3

t in s mit $\Delta t = 1s$	T in $^{\circ}C$ mit $\Delta T = \frac{1}{\sqrt{6}}^{\circ}C$	t in s mit $\Delta t = 1s$	T in $^{\circ}C$ mit $\Delta T = \frac{1}{\sqrt{6}}^{\circ}C$
260	41,5	420	55,0
280	42,0	440	55,0
300	43,0	460	55,0
320	44,0	480	55,0
340	45,0	500	55,0
360	46,0	520	55,0
380	46,5	540	55,0
400	47,0	560	54,5
420	47,0	580	54,5
440	47,0	600	54,5
460	47,0		
480	46,5		
500	46,5		
520	46,5		
540	46,5		
560	46,5		
580	46,0		
600	46,0		
620	46,0		
640	46,0		
660	46,0		
680	46,0		
700	46,0		
720	46,0		

t in s mit $\Delta t = 1s$	T in $^{\circ}C$ mit $\Delta T = \frac{1}{\sqrt{6}}^{\circ}C$
0	38,0
20	39,0
40	40,5
60	42,0
80	43,0
100	44,5
120	46,0
140	47,5
160	49,0
180	50,5
200	51,5
220	52,5
240	52,5
260	52,5
280	52,5
300	52,5
320	52,0
340	52,0
360	52,0
380	52,0
400	52,0
420	52,0
440	52,0
460	52,0
480	52,0
500	52,0
520	52,0
540	52,0
560	51,5
580	51,5
600	51,5
620	51,5
640	51,5
660	51,5
680	51,5
700	51,5

t in s mit $\Delta t = 1s$	T in $^{\circ}C$ mit $\Delta T = \frac{1}{\sqrt{6}}^{\circ}C$
0	34,5
20	35,0
40	37,0
60	38,5
80	40,5
100	42,0
120	44,0
140	46,0
160	47,5
180	49,0
200	51,0
220	52,5
240	54,0
260	55,5
280	56,0
300	56,0
320	56,0
340	55,5
360	55,5
380	55,5
400	55,5

$U = (25,8 \pm \frac{0,1}{\sqrt{3}}) V$
 $I = (2,5 \pm \frac{0,1}{\sqrt{3}}) A$
 $m_w = (155,58 \pm \frac{0,01}{\sqrt{3}}) g$

$U = (25,7 \pm \frac{0,1}{\sqrt{3}}) V$
 $I = (2,6 \pm \frac{0,1}{\sqrt{3}}) A$
 $m_w = (156,25 \pm \frac{0,01}{\sqrt{3}}) g$

05.10.2021

Abb. 20: Laborbuch, Seite 4

Tabellenverzeichnis

1	Zusammenstellung der durch Extrapolation bestimmten Endtemperaturen	8
2	Zusammenstellung der berechneten $UIt_2/\Delta T$	9
3	Vergleich der bestimmten Messwerte für c_w mit dem Literaturwert $c_{w,\text{lit}}$	11
4	Zusammenstellung der a - und b -Werte der linearen Regression für die Extrapolation	15
5	Zusammenstellung aller Messwerte zur Berechnung von c_w	15

Abbildungsverzeichnis

1	Messungen zur Bestimmung des Volumens	2
2	Schaltplan für die Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität auf elektrischem Wege	3
3	Temperatur T gegen Drehungen n am Schürholz-Apparat	4
4	Temperatur T gegen Drehungen n am Schürholz-Apparat mit linearer Regression	5
5	Temperatur T gegen Zeit t von Messreihe 1 bei der Bestimmung auf elektrischem Wege	6
6	Temperatur T gegen Zeit t von Messreihe 1 mit Extrapolation	7
7	Berechnete Werte für $U \cdot I \cdot t_2/\Delta T$ gegen die Masse m des Wassers	9
8	Berechnete Werte für $U \cdot I \cdot t_2/\Delta T$ gegen die Masse m des Wassers mit linearer Regression	10
9	Temperatur T gegen Zeit t von Messreihe 2 bei der Bestimmung auf elektrischem Wege	16
10	Temperatur T gegen Zeit t von Messreihe 2 mit Extrapolation	16
11	Temperatur T gegen Zeit t von Messreihe 3 bei der Bestimmung auf elektrischem Wege	17
12	Temperatur T gegen Zeit t von Messreihe 3 mit Extrapolation	17
13	Temperatur T gegen Zeit t von Messreihe 4 bei der Bestimmung auf elektrischem Wege	18
14	Temperatur T gegen Zeit t von Messreihe 4 mit Extrapolation	18
15	Temperatur T gegen Zeit t von Messreihe 5 bei der Bestimmung auf elektrischem Wege	19
16	Temperatur T gegen Zeit t von Messreihe 5 mit Extrapolation	19
17	Laborbuch, Seite 1	20
18	Laborbuch, Seite 2	21
19	Laborbuch, Seite 3	22
20	Laborbuch, Seite 4	23