

Universität Freiburg
Physiklabor für Anfänger
Ferienpraktikum im Sommersemester 2023

Versuch 31

Kalorimeter



7. November 2024

Datum der Durchführung: 9. Oktober 2023

Tutor: 

Inhaltsverzeichnis

1 Ziel des Versuches	3
2 Versuchsdurchführung	3
3 Auswertung und Fehleranalyse	4
3.1 Wärmekapazität des Kalorimeters	4
3.2 Spezifische Wärmekapazitäten der Proben	6
3.2.1 Aluminium	7
3.2.2 Messing	8
4 Diskussion der Ergebnisse	9
4.1 Übersichtliche Angabe der Endergebnisse	9
4.2 Vergleich mit erwarteten Ergebnissen	10
4.3 Verbesserte Methoden	10
5 Anhang	12
5.1 Rohdaten mit Vortestat	12
Literatur	14

1 Ziel des Versuches

Ziel des Versuches ist es, die spezifischen Wärmekapazitäten von Aluminium c_A und Messing c_M mit einem Kalorimeter zu bestimmen.

2 Versuchsdurchführung

In Abb. 1 ist das, für diesen Versuch, verwendete Kalorimeter skizziert. Dieses besteht aus einem gut isolierendem Dewar-Gefäß mit abnehmbarem Deckel. Durch zwei Löcher können ein Rührer und ein Thermoelement in das Gefäß eingeführt werden. Der Rührer sorgt für eine Durchmischung der Flüssigkeit und das Thermoelement wird verwendet, um die Temperatur des Wassers im Gefäß zu bestimmen.

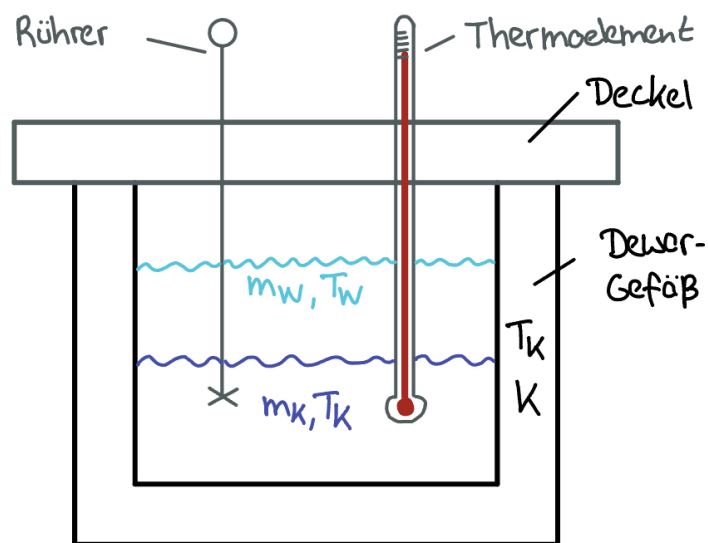


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Kalorimeters mit den Größen zur Bestimmung der Wärmekapazität des Kalorimeters

In einem Vorversuch soll die Wärmekapazität K des Kalorimeters ermittelt werden. Hierzu wird Wasser in einem Topf erhitzt und mit dem Wasser des Kalorimeters vermischt. Das Wasser im Kalorimeter hat dabei die gleiche Temperatur wie das Gefäß. Mit dem Thermoelement und einer Stoppuhr wird die Temperatur im Gefäß, vor, während und nach der Durchmischung, in Abhängigkeit von der Zeit, gemessen und notiert. Für die Bestimmung der spezifischen Wärmekapazitäten wird ähnlich vorgegangen. Die zu untersuchende Probe wird in einem Topf mit kochendem Wasser erhitzt und anschließend in das Gefäß mit kälterem Wasser gelegt. Es wird wieder die Temperatur als Funktion der Zeit gemessen. Die Massen werden für alle am Experiment beteiligten Stoffe gemessen und notiert.

3 Auswertung und Fehleranalyse

3.1 Wärmekapazität des Kalorimeters

Wird das Wasser mit höherer Temperatur T_W in das Kalorimeter mit geringerer Temperatur T_K eingeführt, kommt es zum Wärmeaustausch. Das warme Wasser gibt Wärme ab und das kalte Wasser sowie das Gefäß nehmen Wärme auf. Da diese beiden Wärmemengen identisch sind kann die Gleichung

$$Q_{\text{auf}} = Q_{\text{ab}}$$

aufgestellt werden. Q_{ab} ist dabei die von dem warmen Wasser abgegebene Wärmeenergie und Q_{auf} die von dem kalten Wasser und Kalorimeter aufgenommene Wärme. Da die Wärmeenergie jeweils das Produkt aus Wärmekapazität und Temperaturdifferenz ist, folgt

$$(m_K c_W + K)(T_M - T_K) = m_W c_W (T_W - T_M)$$

und umgestellt nach K erhält man

$$K = c_W \left(m_W \frac{T_W - T_M}{T_M - T_K} - m_K \right). \quad (1)$$

Hierbei ist c_W die spezifische Wärmekapazität von Wasser und wird mit dem Literaturwert¹

$$c_W = 4,182 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$

als exakt angenommen. Außerdem sind in der Formel die Massen des warmen Wassers m_W , des kalten Wassers m_K , sowie die Temperaturen des warmen Wassers T_W , des Kalorimeters T_K und der Mischung T_M aufgeführt. Diese Größen müssen gemessen werden. Die Masse m_K des kalten Wassers, wird mit der zuvor tarierten digitalen Waage (Auflösung 1g), bestimmt nachdem es dem Kalorimeter hinzugefügt wird. Es ergibt sich

$$m_K = (97,0 \pm 0,3)\text{g}.$$

Die Unsicherheit ist bedingt durch die Genauigkeit der digitalen Anzeige der Waage und wird mit einer Rechtecksverteilung ($a = 0,5\text{g}$) quantifiziert. Diese Unsicherheit soll im Folgenden für alle Messungen mit der Waage gelten. Die Masse m_W des warmen Wassers wird aus der Differenz des gemessenen Wertes m_W^* und der Masse m_K des kalten Wassers berechnet. Es folgt:

$$m_W = m_W^* - m_K = (137,0 \pm 0,4)\text{g}$$

Die Unsicherheit setzt sich dabei aus den beiden Unsicherheiten für die beiden Massen zusammen und wird mit der Gaußschen Fehlerfortpflanzung bestimmt. Die Temperatur T_W des warmen Wassers wird gemessen, kurz bevor es dem Gefäß hinzugefügt wird. Es ergibt sich

$$T_W = (81,0 \pm 0,3)^\circ\text{C}.$$

¹[Dem15]

Die Standardunsicherheit begründet sich in diesem Fall in der Genauigkeit der digitalen Anzeige des Thermoelements und wird mit einer Rechtecksverteilung ($a = 0,5^\circ\text{C}$) berechnet. Diese Unsicherheit soll ebenfalls für alle folgenden Temperaturmessungen gelten. Die Temperaturen T_K und T_M werden anhand des Verlaufs der Temperatur T gegen die Zeit t in Abb. 2 grafisch ermittelt. Es ist hinzuzufügen, dass zur besseren Auswertung, nicht alle Messwerte in Abb. 2 abgebildet sind. In der Vorlaufperiode, also vor dem Hinzufügen des warmen Wassers, ist die Temperatur in dem Kalorimeter konstant. Dies ist auch bei folgenden Messungen zu beobachten. Für die Messpunkte sind Fehlerbalken für die Temperatur T und die Zeit t eingezeichnet. Da die Fehler für die Zeit t so gering sind, verschwinden die Fehlerbalken in x-Richtung in den Messpunkten. Um

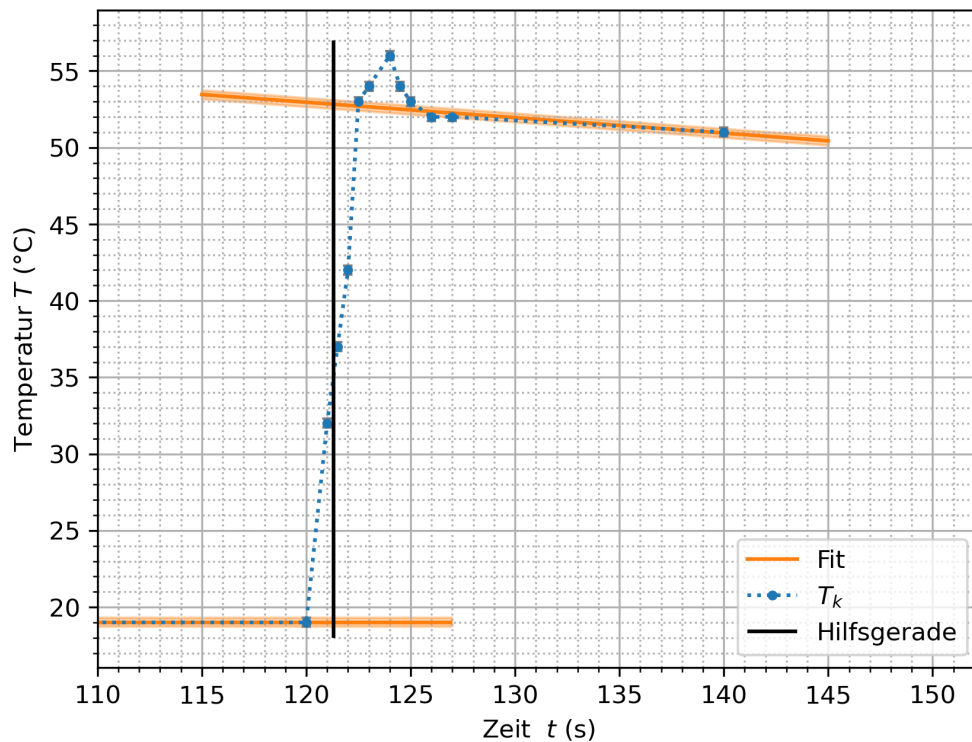


Abbildung 2: Temperatur T des Wassers im Kalorimeter gegen die Zeit t mit Fehlerbalken, einer Hilfsgerade sowie zwei Ausgleichsgeraden zur Auswertung.

die beiden Temperaturen T_K und T_M zu bestimmen, werden die Temperatur-Messwerte vor dem Hinzufügen des warmen Wasser und die Messwerte bei denen die Temperatur im Gefäß wieder sinkt, extrapoliert. Anschließend wird eine Hilfsgerade eingezeichnet, sodass die beiden dreieckigen Flächen, die von den orangenen Ausgleichsgeraden, der Hilfsgerade und dem Verlauf der Messwerte eingeschlossen werden, in etwa gleich groß sind. Der y-Wert des Schnittpunkts der unteren Ausgleichsgerade mit der Hilfsgerade entspricht dann der Temperatur T_K . Analog entspricht der y-Wert des oberen Schnittpunkts der zweiten Ausgleichsgerade und Hilfsgerade dem Wert T_M . Die Schnittpunkte

und y -Werte werden dabei mit dem Computer ausgelesen, der x -Wert der senkrechten wird allerdings optisch bestimmt. Die Unsicherheiten für diese beiden Werte ergeben sich aus den ebenfalls in Abb. 2 eingezeichneten Konfidenzbändern und deren Schnittpunkte mit der Ausgleichsgerade. Die herausstechende Erhöhung bei ungefähr $t = 124\text{s}$ wird bei der Auswertung vernachlässigt, da es hierbei wohl zu einem Kontakt zwischen einer Schicht heißen Wassers mit dem Thermoelement kam und höchst wahrscheinlich nicht die allgemeine Temperatur des Wassers im Gefäß widerspiegelt. Durch diese grafische Bestimmung von T_K und T_M werden Wärmeverluste, die während des Mischvorgangs stattfinden, ausgeglichen. Es ergeben sich die Werte

$$T_K = (19,0 \pm 0,3)^\circ\text{C}$$

und

$$T_M = (52,8,0 \pm 0,3)^\circ\text{C}$$

Da nun alle benötigten Größen bekannt sind, kann die Wärmekapazität K des Kalorimeters mit Gleichung (1) berechnet werden. Es ergibt sich

$$K = (72 \pm 11) \frac{\text{J}}{\text{K}}.$$

Die Standardunsicherheit ΔK folgt aus den Unsicherheiten für die einzelnen Messgrößen und wird mittels Gaußscher Fehlerfortpflanzung berechnet. Dominierend sind dabei die Beiträge mit den Unsicherheiten für die Temperaturen T . Die Unsicherheiten für die Massen können somit vernachlässigt werden.

3.2 Spezifische Wärmekapazitäten der Proben

Wird eine der beiden erhitzten Proben, Aluminium oder Messing, in das kältere Kalorimeter eingesetzt, kommt es wieder zu einem Wärmeaustausch. Es gilt analog zu Abschnitt 3.1

$$Q_{\text{auf}} = Q_{\text{ab}}.$$

In diesem Fall ist Q_{ab} die abgegebene Wärmeenergie der heißen Probe. Es folgt

$$(m_K c_W + K)(T_M - T_K) = m_P c_P (T_P - T_M)$$

und umgestellt nach c_P ergibt sich

$$c_P = \frac{(m_K c_W + K)(T_M - T_K)}{m_P (T_P - T_M)}. \quad (2)$$

Hierbei werden die Massen, des Wassers m_W im Kalorimeter und der Probe m_P , sowie die Temperaturen des Kalorimeters T_K , der Probe T_P und der Mischung T_M verwendet. Für die spezifische Wärmekapazität c_W des Wassers wird der Literaturwert verwendet. Für die Wärmekapazität K wird das Ergebnis aus Abschnitt 3.1 verwendet.

3.2.1 Aluminium

Zunächst wird die Masse m_P der Aluminiumprobe mit der Waage gemessen. Es ergibt sich

$$m_P = (71 \pm 0,3)\text{g}.$$

Die Masse des Wassers m_K im Kalorimeter wird ebenfalls bestimmt:

$$m_K = (50 \pm 0,3)\text{g}.$$

Die Temperatur T_P der Probe, kurz vor dem Einsetzen in das Kalorimeter, beträgt

$$T_P = (98,0 \pm 0,3)^\circ\text{C}.$$

Die Temperaturen T_W und T_M werden analog zu Abschnitt 3.1 grafisch ermittelt. Der

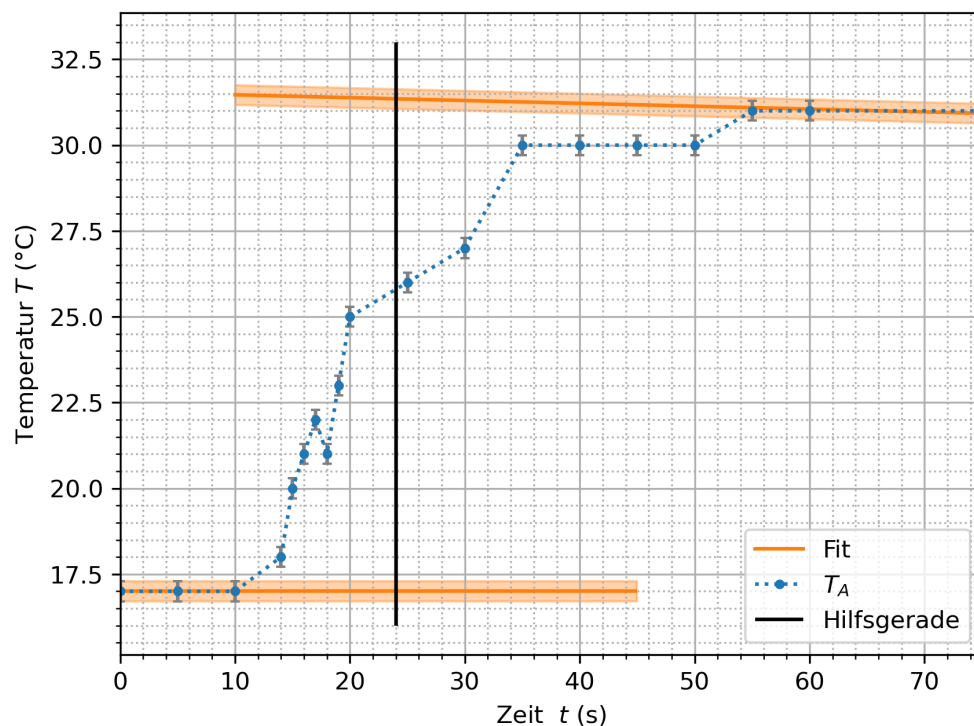


Abbildung 3: Temperatur T des Wassers im Kalorimeter gegen die Zeit t beim Hinzufügen der Aluminiumprobe mit Fehlerbalken, einer Hilfsgerade sowie zwei Ausgleichsgeraden zur Auswertung.

Verlauf der Temperatur T im Gefäß gegen die Zeit t ist in Abb. 3 dargestellt. Wiederum sind, zur besseren Auswertung, nicht alle Messwerte vor und nach dem Hinzufügen der Probe eingezeichnet. Aus den Schnittpunkten der Geraden lassen sich wieder die Temperaturen T_K und T_M bestimmen. Es folgt

$$T_K = (17,0 \pm 0,3)^\circ\text{C}$$

und

$$T_M = (31,4 \pm 0,3)^\circ\text{C}.$$

Nun sind alle Werte bekannt und es kann in Gleichung (2) eingesetzt werden. Es ergibt sich

$$c_A = (0,85 \pm 0,04) \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}.$$

Die Standardunsicherheit Δc_A wird dabei mit der Gaußschen Fehlerfortpflanzung berechnet. Die Beiträge mit den Unsicherheiten für die Temperaturen sowie der Fehler für die Wärmekapazität K sind dominierend.

3.2.2 Messing

Die Masse m_P der Messingprobe wird wieder mit der Digitalwaage gemessen. Es ergibt sich

$$m_P = (213 \pm 0,3)\text{g}.$$

Die Masse m_K des Wassers wird ebenfalls bestimmt:

$$m_K = (52 \pm 0,3)\text{g}.$$

Die Temperatur T_M der Probe, kurz vor dem Einsetzen in das Kalorimeter, beträgt

$$T_M = (98,0 \pm 0,3)^\circ\text{C}.$$

Die Temperaturen T_W und T_M werden wiederum analog zu Abschnitt 3.1 grafisch ermittelt. Abb. 4 stellt den Temperaturverlauf dar. Diesmal ist ein deutlicher, nicht zu erwartender Temperaturschlag bei $t = 16\text{s}$ zu erkennen. Dies ist kurz nach Hinzufügen der Probe und kann wahrscheinlich auf eine Berührung der heißen Probe mit dem Thermoelement zurückgeführt werden. Die zwei erhöhten Messwerte entsprechen damit höchstwahrscheinlich nicht der eigentlichen Temperatur des Wassers im Gefäß, kurz nach Hinzufügen der Probe. Trotz dieser Messschwierigkeit kann eine Hilfsgerade eingezeichnet werden und die Schnittpunkte bestimmt werden. Aus den Schnittpunkten kann wieder eine Temperatur

$$T_K = (18,0 \pm 0,3)^\circ\text{C}$$

für das Wasser im Kalorimeter zu Beginn und

$$T_M = (35,0 \pm 0,3)^\circ\text{C}$$

für die Mischtemperatur abgeleitet werden. Diese Werte eingesetzt in Gleichung (2) liefert:

$$c_M = (0,343 \pm 0,016) \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$

Die Standardunsicherheit wird wieder mittels Gaußscher Fehlerfortpflanzung bestimmt. Dominierend sind wieder die Beiträge mit den bestimmten Temperaturen T und der in Abschnitt 3.1 ermittelten Wärmekapazität K .

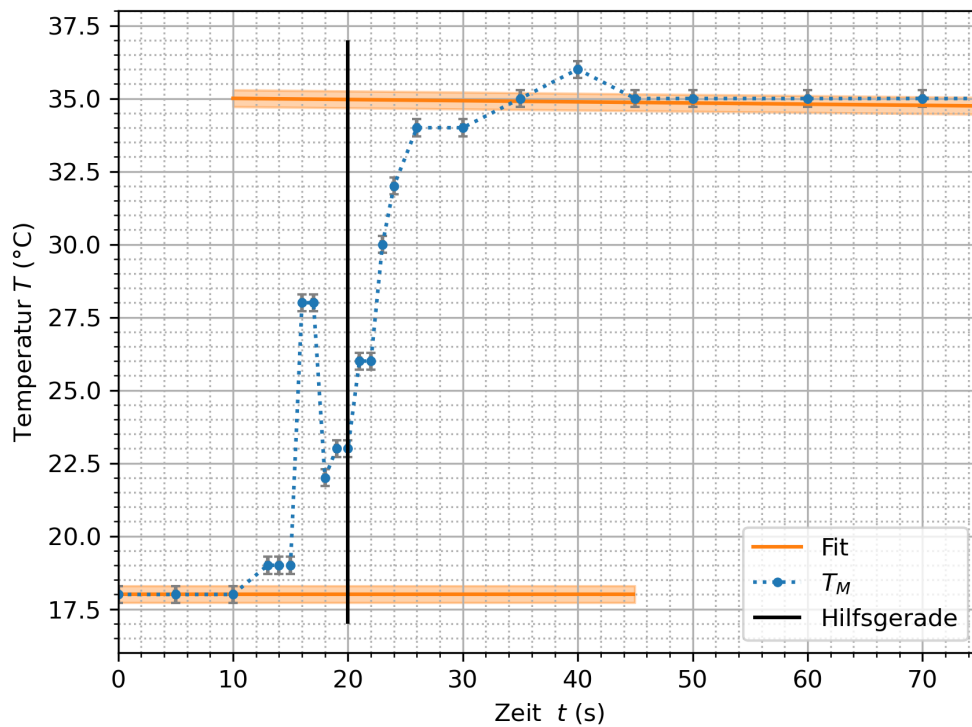


Abbildung 4: Temperatur T des Wassers im Kalorimeter gegen die Zeit t beim Hinzufügen der Messingprobe, mit Fehlerbalken, einer Hilfsgerade sowie zwei Ausgleichsgeraden zur Auswertung.

4 Diskussion der Ergebnisse

4.1 Übersichtliche Angabe der Endergebnisse

Die erste Messung, zur Bestimmung der Wärmekapazität K liefert das Ergebnis:

$$K = (72 \pm 11) \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

Aus den darauffolgenden Messungen folgt für die spezifische Wärmekapazität von Aluminium

$$c_A = (0,85 \pm 0,04) \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$

und für Messing

$$c_M = (0,343 \pm 0,016) \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}.$$

4.2 Vergleich mit erwarteten Ergebnissen

Für Aluminium ist ein Wert² von

$$c_A^* = 0,896 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$

zu erwarten, bei einer Temperatur von 20°C und einem Druck von 1013,25hPa. Um die Verträglichkeit des experimentell bestimmten Wertes mit dem Literaturwert zu überprüfen, kann der t-Wert berechnet werden:

$$t = \frac{|\hat{c}_A - c_A^*|}{\Delta c_A} = 1,2$$

Bei einem zuvor festgelegten Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$ ist die Abweichung des bestimmten Wertes somit nicht signifikant und mit dem Literaturwert verträglich.

Für Messing ist ein ungefährender Wert³ von

$$c_M^* = 0,377 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$

zu erwarten. Dieser Wert ist wieder von Temperatur und Luftdruck abhängig und kann je nach Zusammensetzung der Legierung variieren. Der t-Wert lässt sich folgendermaßen berechnen:

$$t = \frac{|\hat{c}_M - c_M^*|}{\Delta c_M} = 2,1$$

Die Abweichung ist damit signifikant und lässt sich nicht mehr auf eine statistische Abweichung zurückführen. Jedoch kann die Abweichung möglicherweise mit einer anderen Zusammensetzung der im Versuch verwendeten Legierung als die für den Literaturwert verwendeten Legierung in Verbindung gebracht werden. Mit diesem Wissen ist eine Abweichung, wie sie hier vorliegt, nicht mehr überraschend oder unerwartet.

4.3 Verbesserte Methoden

Aus der Fehleranalyse für die Wärmekapazität K und für die spezifischen Wärmekapazitäten ging hervor, dass die Unsicherheiten in der Bestimmung der Temperaturen dominierend sind. Für eine höhere Genauigkeit der Endergebnisse sollte somit versucht werden diese Unsicherheiten zu reduzieren. Ein offensichtlicher Ansatz wäre, ein genaueres Temperaturmessgerät zu verwenden. Ein Messgerät, das ein Wert für die erste Nachkommastelle der Temperatur in °C angeben könnte würde ein deutlich genaueres Ergebnis liefern als das verwendete Messgerät welches nur ganze Grad Schritte anzeigen kann. Eine weitere Möglichkeit die Genauigkeit in den Temperaturbestimmungen zu erhöhen, wäre zwei Messgeräte zu verwenden. Vorallem für die Messung des warmen

²[Dem15]

³[che23]

Wassers beziehungsweise der warmen Probe wäre dies hilfreich. Denn diese sollte so kurz wie möglich vor dem Hinzufügen in das Gefäß bestimmt werden. Bei nur einem Thermoelement muss das Gerät nach der Messung des warmen Wassers zunächst in das Gefäß transferiert werden und es braucht ein paar Sekunden bis das Messgerät eine vertrauenswürdige Temperatur anzeigt.

Darüber hinaus hat die Präzision mit der man die Hilfsgerade einzeichnen kann, einen Einfluss auf die bestimmte Mischtemperatur T_M . Diese Präzision ist wiederum abhängig davon, wie die Messwerte verlaufen. Unerwartete Ausschläge, wenige Sekunden nach dem Hinzufügen der heißen Proben, machen die Auswertung schwierig. Um dies zu Vermeiden sollte möglichst kein Kontakt zwischen Thermoelement und heißer Probe während der Messung vorhanden sein, wenn das Ziel ist die Wassertemperatur zu messen. Dies könnte möglicherweise leichter erreicht werden, wenn sich das Loch zum Einführen des Thermoelements näher am Rand befinden würde. Außerdem könnte ein größeres Kalorimeter, beziehungsweise eine kleinere Aluminium- oder Messingprobe, die Messung erleichtern.

5 Anhang

5.1 Rohdaten mit Vortestat

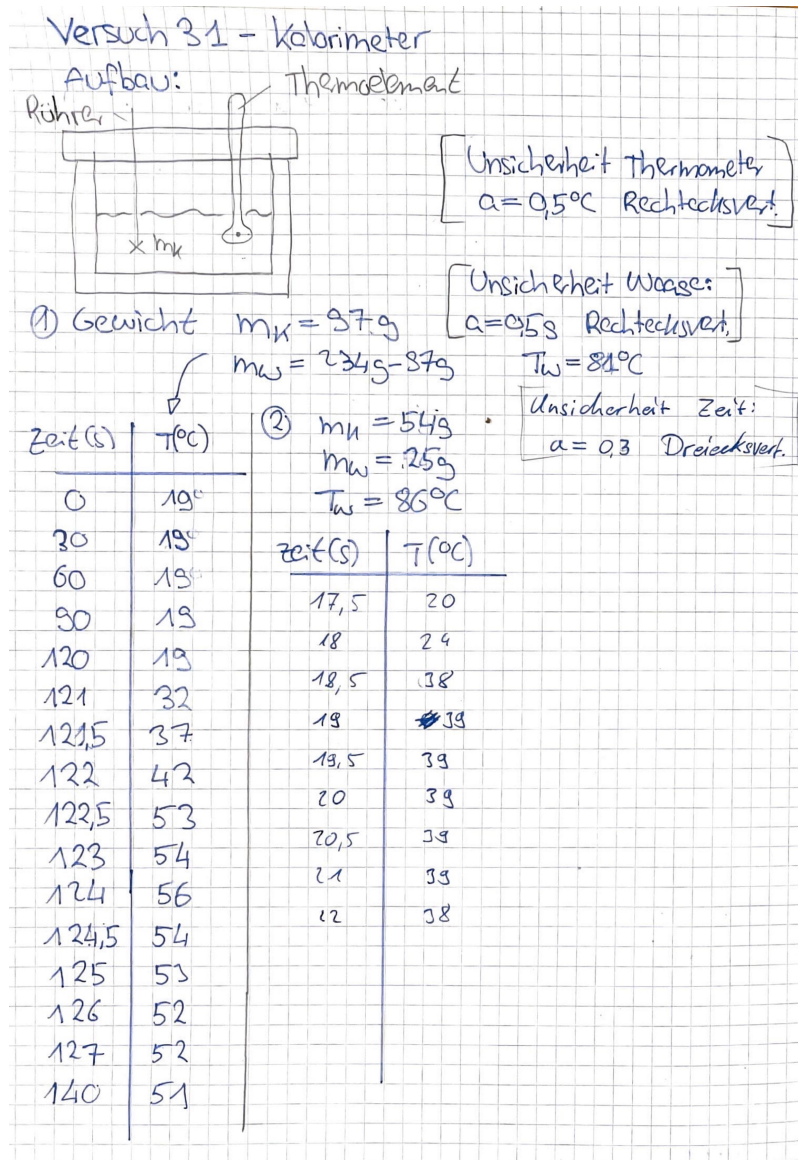


Abbildung 5: Rohdaten erste Seite

Aluminium:		Messung:	
$m_A = 71 \text{ g}$		$m_M = 213 \text{ g}$	
$m_W = 50 \text{ g}$		$m_W = 52 \text{ g}$	
$T_A = 98^\circ\text{C}$		$T_M = 98^\circ\text{C}$	
Zeit (s)	T (°C)	Zeit (s)	T (°C)
0	17	0	18
5	17	5	18
10	17	10	18
14	18	13	19
15	20	14	19
16	21	15	19
17	22	16	28
18	21	17	28
19	23	18	22
20	25	19	23
25	26	20	23
30	27	21	26
35	30	22	26
40	30	23	30
45	30	24	32
50	30	26	34
55	31	30	34
60	31	35	35
120	31	40	36
150	30	45	35
		50	35
		60	35
		70	35
		80	35
		180	34

Abbildung 6: Rohdaten zweite Seite

Literatur

- [che23] chemie.de. *Spezifische Wärmekapazität*. 2023. URL: https://www.chemie.de/lexikon/Spezifische_W%C3%A4rmekapazit%C3%A4t.html (besucht am 09.10.2023).
- [Dem15] Wolfgang Demtroeder. *Experimentalphysik 1*. Springer Spektrum, 2015.