

# **W1 - Elektrisches Wärmeäquivalent**

Julia Mariella Wiest

Gruppe A06

14.05.2025

---

*Mit der Abgabe dieses Protokolls wird bestätigt, dass es kein Plagiat ist. Falls es dennoch eindeutig als Plagiat erkannt werden sollte, ist bekannt, dass das einen Punktabzug von 20 Punkten zur Folge, ohne Möglichkeit der Nachbearbeitung, hat. Diese Bewertung wird ausnahmslos zur Gesamtnote im Anfängerpraktikum beitragen.*



# 1 Physikalische Grundlagen

Der nachstehende Versuch wurde mit dem Ziel durchgeführt, das elektrische Wärmeäquivalent beziehungsweise die Wärmekapazität von Wasser zu bestimmen.

Bei der Energieeinheit der Kalorie handelt es sich um eine historische Maßeinheit, welche genau diejenige Wärmemenge angibt, die notwendig ist, 1 g Wasser bei Normaldruck von 14,5 °C auf 15,5 °C zu erhitzen, wodurch die Einheit der Kalorie direkt an die Stoffeigenschaften des Wassers geknüpft ist und sich damit die Wärmekapazität des Wassers mit  $1 \text{ cal g}^{-1} \text{ K}^{-1}$  angeben lässt.

Mit der Einführung der SI-Einheiten wurde realisiert, dass die Wärmemenge nunmehr unabhängig von den Eigenchaften eines Stoffes bestimmt werden kann. Die Wärme wird heutzutage als Energieform mit der Maßeinheit Joule angegeben. Dies hat zur Folge, dass die Wärmemenge in Kalorien mit der entsprechenden elektrischen Energie in Form von Arbeit in der Einheit Joule in der Form

$$1 \text{ cal} = x \text{ J}$$

in Relation gesetzt wird (Walcher 1994, S. 106), (Universität Augsburg SoSe 2025).

Durch die vollständige Umwandlung von elektrischer Energie

$$W_{\text{el}} = U \cdot I \cdot t$$

mit der Spannung  $U$ , der Stromstärke  $I$  und der Zeit  $t$  in Wärme, welche vom Kalorimeter und dem darin befindlichen Wasser aufgenommen wird, kann das sogenannte elektrische Wärmeäquivalent bestimmt werden.

Die aufgenommene Wärme kann über den Zusammenhang

$$Q = (m + w) \cdot c_W \cdot \Delta T,$$

wobei  $m$  die Masse des Wassers,  $c_W$  die spezifische Wärmekapazität von Wasser,  $\Delta T$  die Temperaturerhöhung und  $w$  der Wasserwert des Kalorimeters ist, ausgedrückt werden. Der Wasserwert des Kalorimeters lässt sich über die Formel

$$w = \frac{m_w(T_w - T_M)}{(T_M - T_k)} - m_k$$

ermitteln, wobei die Mischartemperatur  $T_M$  über einen sogenannten Zwickelabgleich graphisch bestimmt wird (Universität Augsburg SoSe 2025).

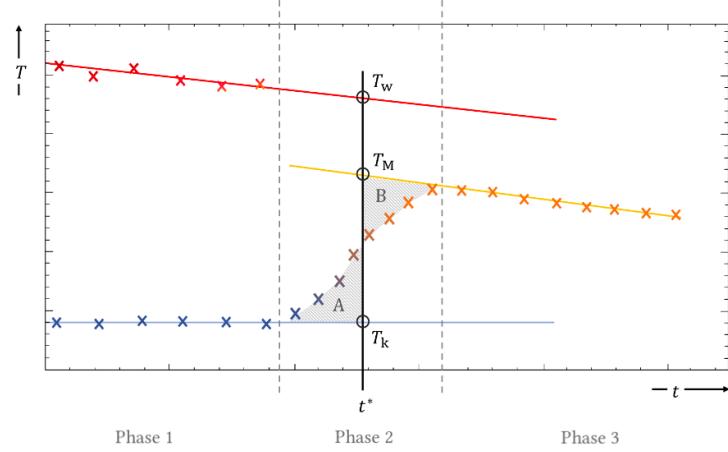
Der Zwickelabgleich wird verwendet, um Ungenauigkeiten aufgrund des Wärmeverlustes an die Umgebung zu minimieren. In Messphase 1 werden sowohl die Massen als auch die Temperaturen des kalten und warmen Wassers parallel ermittelt. In Messphase 2 wird der eigentliche gleichmäßige Mischvorgang des warmen und kalten Wassers unter Rühren realisiert, wobei der Temperaturanstieg in kleinen Abständen gemessen wird, bis sich die maximale Mischtemperatur einstellt. Zuletzt in Messphase 3 wird die Mischtemperatur über einen bestimmten Zeitraum weiterhin gemessen. Auf das genaue experimentelle Vorgehen für den Zwickelabgleich wird in der Versuchsdurchführung 2.1 genauer eingegangen. Die graphische Auswertung ist beispielhaft in Abbildung 1.1 zu sehen. Hierfür wurden die Messwerte des kalten und warmen Wassers beziehungsweise die Mischung beider über Ausgleichsgeraden approximiert. Anschließend wird eine parallele Gerade zur  $T$ -Achse zum Zeitpunkt  $t^*$  eingezeichnet, wobei der Zeitpunkt  $t^*$  den Moment abbildet, zu welchem der Wärmeaustausch des warmen und kalten Wassers abrupt geschehen würde. Dieser Zeitpunkt ist dann erreicht, wenn die Flächen A und B, wie in Abbildung 1.1 zu sehen, exakt gleich groß sind. Dies hat den Hintergrund, „dass die Wärmemenge, die dem kalten Wasser im Kalorimeter zugeführt wird, unverändert bleiben muss und lediglich der zeitliche Verlauf des Wärmeaustauschs idealisiert wird“ (Universität Augsburg SoSe 2025), (Walcher 1994, S. 107).

Man betrachte hierfür den Fall, dass die Temperatur des kalten Wassers zu Beginn der Messungen konstant der Raumtemperatur entspricht. Wird das kalte Wasser nun um eine bestimmte Wärmemenge  $Q_+$  erhitzt, so wird diese zugeführte Wärmemenge so lange an die Umgebung abgegeben ( $t \rightarrow \infty$ ), wie der Temperaturunterschied  $T_{\text{Erhitzt}} - T_{\text{Umgebung}}$  besteht. Dieser Wärmeübergang lässt sich gemäß Konvektion durch die Gleichung

$$\frac{dQ_-}{dt} = \alpha(T_{\text{Erhitzt}} - T_{\text{Umgebung}})$$

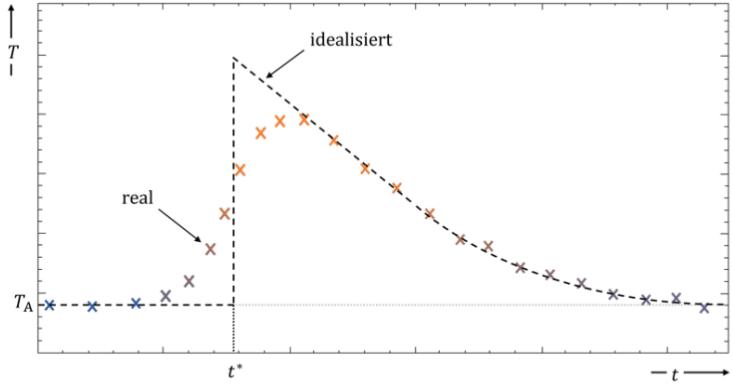
mit dem Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  beschreiben. Lässt sich idealerweise annehmen, dass der Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$  konstant ist, lässt sich die an die Umgebung abgegebene Wärmemenge folgendermaßen beschreiben

$$Q_+ = \int_0^t \alpha(T_{\text{Erhitzt}} - T_{\text{Umgebung}}) dt.$$



**Abb. 1.1:** Beispielhafter Zwickelabgleich mit Messphase 1, 2 und 3  
(Universität Augsburg SoSe 2025).

Werden nun der reale und der idealisierte Temperaturverlauf bei der graphischen Auswertung des Zwickelabgleichs, wie in Abbildung 1.2 zu sehen, beobachtet, stellt sich heraus, dass die zugeführte Wärmemenge  $Q_+$  in beiden Fällen exakt gleich groß sein muss und demnach auch die abgegebene Wärmemenge  $Q_-$  unverändert bleibt. Mathematisch lässt sich dies folgendermaßen ausdrücken:



**Abb. 1.2:** Graphische Darstellung des realen und idealisierten Temperaturverlaufs von Wasser der Anfangstemperatur  $T_{\text{Umgebung}}$  bei der Zufuhr einer Wärmemenge  $Q_+$  (Universität Augsburg SoSe 2025).

$$\underbrace{Q_-^1 = \alpha \int_0^\infty (T_{\text{erhitzt}}^1 - T_{\text{Umgebung}}^1) dt}_{\text{real}} = \underbrace{\alpha \int_0^\infty (T_{\text{erhitzt}}^2 - T_{\text{Umgebung}}^2) dt}_{\text{idealisiert}} = Q_-^2.$$

Somit muss der Zeitpunkt  $t^*$  so gewählt werden, dass die Flächen A und B, also die Fläche unter der idealisierten und der realen Kurve, gleich groß sind (Walcher 1994, S. 107–109), (Universität Augsburg SoSe 2025).

Besitzt das verwendete Kalorimeter einen sehr kleinen Wasserwert, kann dieser im Verhältnis zur eingefüllten Masse des Wassers vernachlässigt werden, sodass sich letztendlich die spezifische Wärmekapazität von Wasser über folgenden Zusammenhang bestimmt werden kann:

$$c_W = \frac{U \cdot I \cdot t}{m \cdot \Delta T}$$

(Universität Augsburg SoSe 2025).

*Die Erklärung des Zwickelabgleiches und der Aufbau des Mischungsversuches wurde teilweise aus den vorangehenden Protokollen zum Versuch W4 - Spezifische Wärmekapazität fester Körper vom 06.12.2024 und zum Versuch W3 - Kondensationswärme von Wasser vom 07.05.2025 entnommen.*



## 2 Elektrisches Wärmeäquivalent

### 2.1 Versuchsaufbau und -durchführung

#### Mischungsversuch zur Bestimmung des Wasserwerts des Dewar-Gefäßes

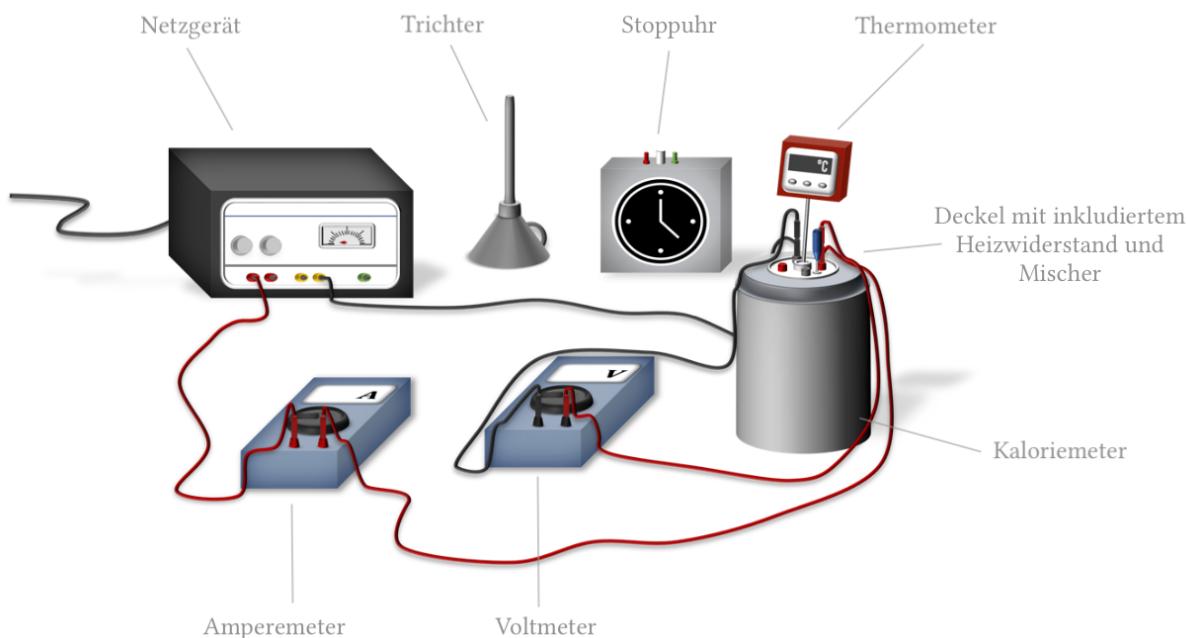
Damit später der dem Dewar-Gefäß zugrundeliegende Wasserwert bestimmt werden kann, wird zunächst ein sogenannter Mischungsversuch durchgeführt. Dafür wird zuerst destilliertes Wasser auf einer Heizplatte erwärmt. Während des Erhitzen des Wassers wird das Leergewicht des Dewar-Gefäßes, auch Kalorimeter genannt, aufgenommen. Anschließend wird das Kalorimeter mit circa 50 g kaltem destilliertem Wasser befüllt und erneut gewogen. Die Differenz aus dem Gesamtgewicht und dem Leergewicht des Dewars ergibt die Masse des kalten Wassers  $m_k$  für die Auswertung. Für das warme Wasser wird ein Glasmessbecher zunächst ebenfalls leer gewogen und anschließend mit circa 120 g warmem Wasser befüllt. Die Masse des warmen Wassers  $m_w$  wird analog zu der des kalten Wassers ermittelt.

Das Kalorimeter wird mit einem dazugehörigen Deckel, welcher eine Öffnung zum Durchfädeln des Thermometers und eines Trichters enthält, verschlossen. Nun wird mit zwei Stabthermometern simultan die Temperatur des warmen und kalten Wassers für fünf Minuten lang in 30 Sekunden-Intervallen aufgezeichnet. Anschließend wird das warme Wasser in einer Zeitspanne von circa einer Minute gleichmäßig nach und nach durch den Trichter in das Kalorimeter mit dem kalten Wasser gegossen. Um die Homogenität des warmen und kalten Wassers bei der Temperaturmessung während des Mischversuches zu gewährleisten, wird während dieses Vorgangs durchgehend mit der im Deckel inkludierten Mischer gerührt. Die Temperatur des Wassergemischs wird dabei alle zehn Sekunden vom Stabthermometer abgelesen und notiert. Nach dem Erreichen des Temperaturmaximums wird weiterhin für eine Minute alle zehn Sekunden die Temperatur aufgeschrieben. Im Anschluss daran wurde die weitere Temperaturabnahme für weitere fünf Minuten in 30 Sekunden-Schritten festgehalten.

Der beschriebene Mischungsversuch wurde zwei Mal mit jeweils neuem warmem und kaltem Wasser gleichermaßen durchgeführt.

## Mischungsversuch zur Bestimmung des elektrischen Wärmeäquivalents

Um das elektrische Wärmeäquivalent experimentell bestimmen zu können, wird zunächst das Kalorimeter leer gewogen. Anschließend werden circa 50 g kaltes destilliertes Wasser in das Dewar-Gefäß gefüllt und das Vollgewicht bestimmt, damit später die Masse des kalten Wassers im Kalorimeter wie bereits bei den ersten beiden Mischungsversuchen bestimmt werden kann. Nun wird der Deckel mit inkludiertem Heizwiderstand aufgesetzt und folgendermaßen mit einem Netzgerät, einem Voltmeter und Amperemeter über Steckverbindungen verkabelt: Der Deckel weist zwei Ausgänge mit einem Heizwiderstand von  $6\ \Omega$  auf. Einer davon wird mit dem Amperemeter mit dem Ausgang 0 A verbunden. Auf das Verbindungskabel mit dem Amperemeter wird ein weiteres Kabel aus dem Deckel in den Ausgang 0 V mit dem Voltmeter gesteckt. In den danebenliegenden Ausgang des Deckels wird ein Kabel zum Ausgang 15 V des Voltmeters geführt. Auf dieses Kabel wiederum wird ein weiteres mit dem Netzgerät zum Eingang mit der Beschriftung Volt geführt. Somit befinden sich nun vier Kabel, wobei jeweils zwei übereinanderstecken, in den Ausgängen für den  $6\ \Omega$  Heizwiderstand im Deckel. Mit einem fünften Kabel wird zuletzt der Ausgang 5 A des Amperemeters mit dem Eingang mit der Beschriftung Ampere des Netzgerätes verbunden. Dieser Aufbau ist ebenfalls in Abbildung 2.1 zu sehen. Am Netzgerät wird eine Spannung von  $U = 12,0\text{ V}$  und die Stromstärke auf



**Abb. 2.1:** Darstellung des Versuchsaufbaus zur Bestimmung des elektrischen Wärmeäquivalents (Universität Augsburg SoSe 2025).

ihr Maximum, in diesem Versuch  $I = 1,85\text{ A}$ , eingestellt. Bevor nun das Wasser mithilfe des Widerstandes im Deckel des Kalorimeters durch das Einschalten des Stroms erwärmt wird, wird wie bereits beim Mischungsversuch für fünf Minuten in 30-Sekundenintervallen die Wassertemperatur  $T_k$  des kalten Wassers aufgenommen. Durch das anschließende Einschalten

des Stroms erwärmt sich der Widerstand aufgrund der Joulschen Wärme und damit auch das Wasser. Unter Betätigen des Mischers, um eine homogene Erwärmung des Wassers zu gewährleisten, wird weiterhin alle 30 Sekunden die Temperatur des Wassers festgehalten, bis sich diese um circa 10 °C erhöht hat. Zu diesem Zeitpunkt wird der Strom wieder abgestellt und für weitere fünf Minuten die Wassertemperatur in 30-Sekundenschritten notiert.

## 2.2 Auswertung der Messergebnisse

Auf Grundlage der im vorherigen Kapitel beschriebenen Versuchsdurchführung werden die damit erlangten Messergebnisse nun ausgewertet.

### Mischungsversuch zur Ermittlung des Wasserwerts

*Die Auswertung der folgenden zwei Zwickelabgleiche erfolgt analog zur Auswertung aus dem Protkoll zum Versuch W3 - Kondensationswärme von Wasser vom 07.05.2025.*

Die Bestimmung des Wasserwerts erfolgt anhand eines graphischen Verfahrens namens Zwickelabgleich aus den Messergebnissen des Mischungsversuchs. Es wurden Ergebnisse aus zwei Mischungsversuchen erzielt, welche im Folgenden ausgewertet werden.

Für den ersten Zwickelabgleich ergeben sich folgende Massen der leeren und befüllten Gefäße mit warmem und kaltem Wasser:

$$\begin{aligned} m_{\text{Dewar, leer, } 1} &= 115,8 \text{ g}, & m_{\text{Dewar, kalt, } 1} &= 165,4 \text{ g}, \\ m_{\text{Glas, leer, } 1} &= 130,4 \text{ g}, & m_{\text{Glas, warm, } 1} &= 259,2 \text{ g}. \end{aligned}$$

Aus diesen Messergebnissen lässt sich jeweils das reine Gewicht des kalten und warmen Wassers ermitteln:

$$\begin{aligned} m_{k,1} &= m_{\text{Dewar, kalt, } 1} - m_{\text{Dewar, leer, } 1} = 49,6 \text{ g}, \\ m_{w,1} &= m_{\text{Glas, warm, } 1} - m_{\text{Glas, leer, } 1} = 128,8 \text{ g}. \end{aligned}$$

Hierbei wird ein Messfehler von  $\Delta m = 0,1 \text{ g}$  aufgrund der Auflösung der Waage geschätzt. Durch das doppelte Wiegen der leeren Gefäße inklusive des Inhaltes verdoppelt sich der Fehler für das kalte und warme Wasser auf  $\Delta m_k = \Delta m_w = 0,2 \text{ g}$ .

Die Temperaturen des kalten und warmen Wassers beziehungsweise die Mischtemperatur werden über einen Zwickelabgleich bestimmt. Der Zwickelabgleich wird verwendet, um Ungenauigkeiten aufgrund des Wärmeverlustes an die Umgebung zu minimieren. Dafür wurde, wie bereits in der Versuchsdurchführung 2.1 beschrieben, die Temperatur des kalten und warmen Wassers für fünf Minuten erfasst. Die aufgenommenen Werte können gut durch eine händisch hinzugefügte Ausgleichsgerade approximiert werden.

Wie in Abbildung 2.2 zu sehen, lassen sich die Messpunkte des kalten Wassers durch die dunkelblaue Ausgleichsgerade und die Messpunkte des warmen Wassers durch die orange

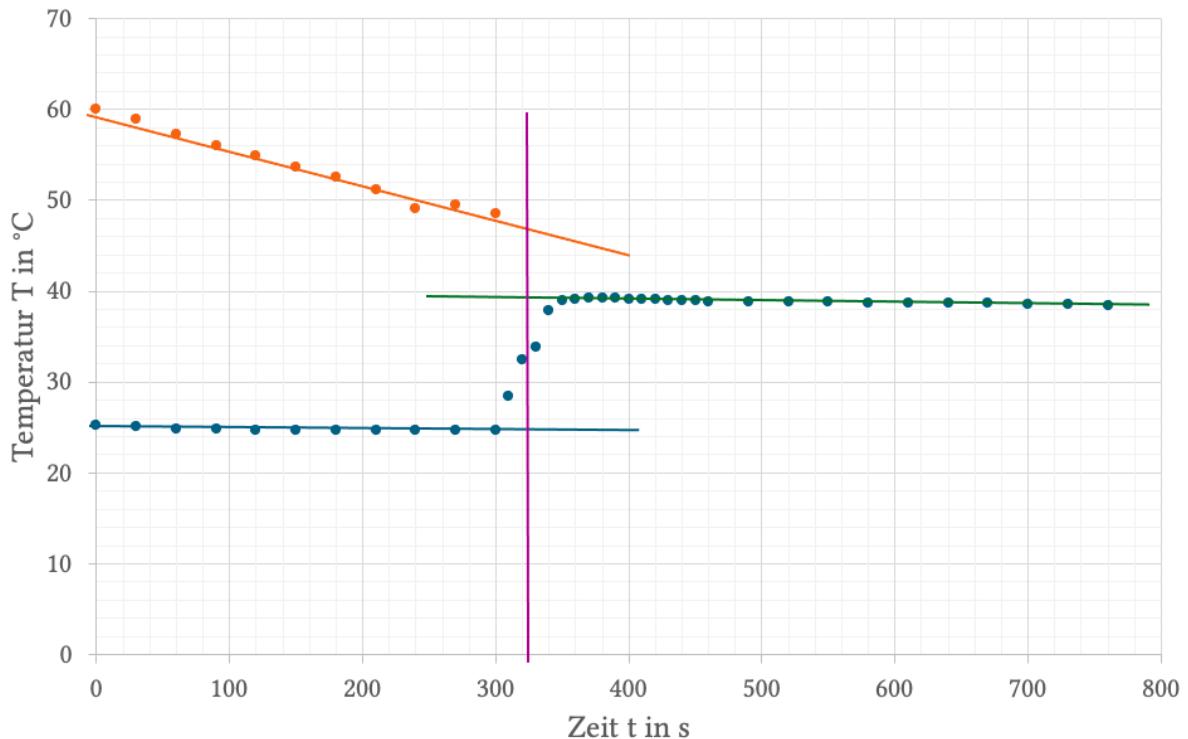


Abb. 2.2: Graphische Darstellung des ersten Zwickelabgleichs zur Bestimmung des Wasserwerts.

Ausgleichsgerade beschreiben.

Durch das Eingießen des warmen Wassers in das kalte Wasser im Dewar-Gefäß beginnt die Temperatur darin zu steigen. Dies zeigen die aufgenommenen Messpunkte deutlich. Nachdem sich eine Maximaltemperatur eingestellt hat, beginnt die Temperatur des Gemischs wieder zu sinken. Dies erfolgt graphisch nahezu linear, sodass die aufgenommenen Messpunkte der Mischung wiederum durch die grüne Ausgleichsgerade abgebildet werden können.

Anhand der Ausgleichsgeraden wird nun ein Zeitpunkt  $t^*$  gesucht, bei welchem der Wärmeaustausch von kalter zu warmer Flüssigkeit abrupt geschehen würde. Dieser ergibt sich, indem parallel zur  $T$ -Achse eine Gerade, in Abbildung 2.2 in Lila, durch die Messpunkte des Temperaturanstiegs gelegt wird, sodass die dabei entstehenden „dreieckigen Flächen“ gleich groß sind. Die Schnittpunkte der lila Geraden mit der dunkelblauen, grünen und orangen Ausgleichsgeraden ergeben dann die gesuchten Temperaturen  $T_k$ ,  $T_M$  und  $T_w$  (Universität Augsburg SoSe 2025).

Somit ergeben sich aus dem Zwickelabgleich der ersten Messdatenreihe folgende Temperaturen:

$$T_{k,1} = 25,0 \text{ °C}, \quad T_{w,1} = 46,5 \text{ °C}, \quad T_{M,1} = 39,5 \text{ °C}.$$

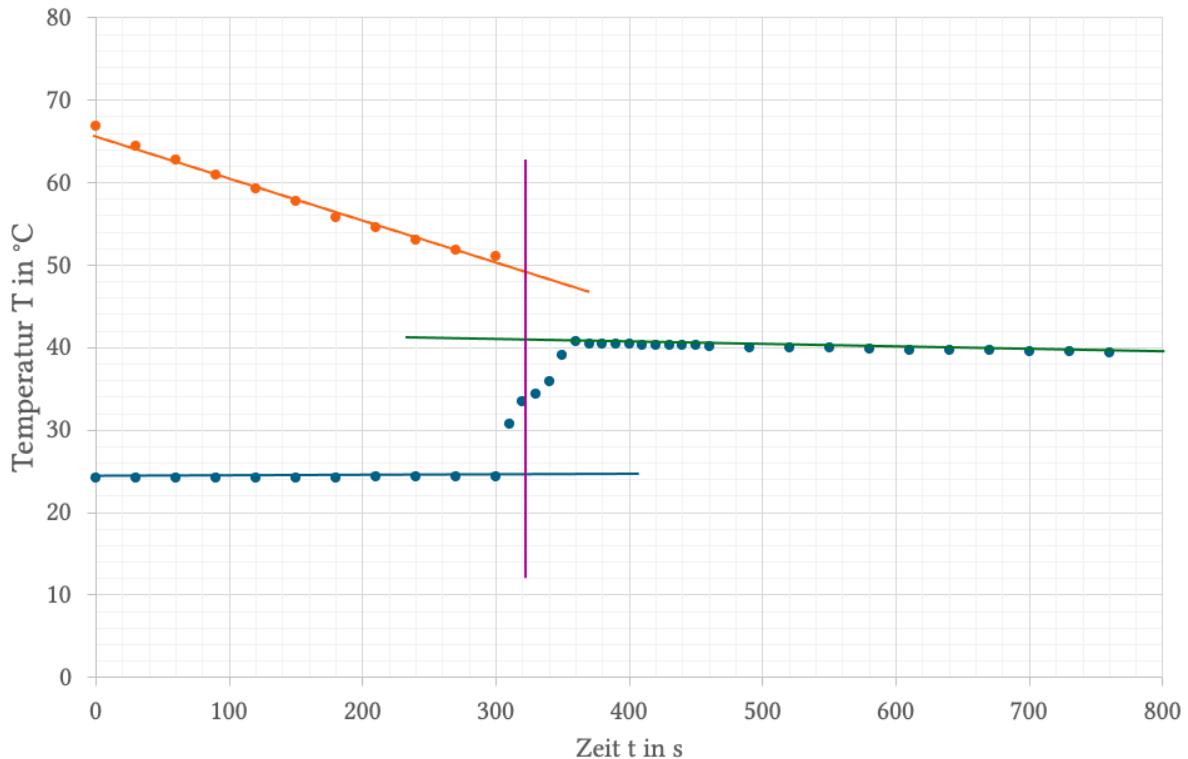
Gleichermaßen wird mit den Messdaten für den zweiten Zwickelabgleich in Abbildung 2.3 vorgegangen.

Für den zweiten Zwickelabgleich ergeben sich folgende Massen der leeren und befüllten Gefäße mit warmem und kaltem Wasser:

$$\begin{aligned} m_{\text{Dewar, leer, } 2} &= 116,2 \text{ g}, & m_{\text{Dewar, kalt, } 2} &= 164,3 \text{ g}, \\ m_{\text{Glas, leer, } 2} &= 130,7 \text{ g}, & m_{\text{Glas, warm, } 2} &= 257,0 \text{ g}. \end{aligned}$$

Aus diesen Messergebnissen lässt sich jeweils das reine Gewicht des kalten und warmen Wassers ermitteln:

$$\begin{aligned} m_{k,2} &= m_{\text{Dewar, kalt, } 2} - m_{\text{Dewar, leer, } 2} = 48,1 \text{ g}, \\ m_{w,2} &= m_{\text{Glas, warm, } 2} - m_{\text{Glas, leer, } 2} = 126,3 \text{ g}. \end{aligned}$$



**Abb. 2.3:** Graphische Darstellung des zweiten Zwickelabgleichs zur Bestimmung des Wasserwerts.

Daraus ergeben sich aus dem Zwickelabgleich der zweiten Messdatenreihe folgende Temperaturen:

$$T_{k,2} = 24,2 \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad T_{w,2} = 49,1 \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad T_{M,2} = 40,8 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Die aufgenommenen Messdaten für die beiden Zwickelabgleiche, aus welchen mittels Excel die Grafiken erstellt wurden, befinden sich im Anhang 3 in Tabelle 3.1 und 3.2.

Für die Fehlerdiskussion wurde bewusst auf das Einzeichnen von Fehlergeraden zu den Ausgleichsgeraden verzichtet, da die durch mögliche Grenzgeraden dargestellten Fehler bei der vorherrschenden Skalierung so klein wären, dass es nicht möglich wäre, so einen brauchbaren

## 2 Elektrisches Wärmeäquivalent

Fehlerwert zu finden. Deswegen wurde der mögliche Messfehler der Temperatur anhand der Temperaturskala abgeschätzt. Das verwendete Thermometer gab die Temperatur auf eine Nachkommastelle genau an. Die Skalierung der  $T$ -Achse, welche die Temperatur in °C angibt, wurde so angepasst, dass sich die Temperatur einigermaßen genau auf eine Nachkommastelle ablesen lässt. Da sich hierbei jedoch beim Ablesen weiterhin Abschätzungsfehler ergeben, wird im Folgenden von einem eher größeren Fehler von  $\Delta T = 0,3$  °C ausgegangen.

Aus den berechneten Massen und Temperaturen des warmen und kalten Wassers beziehungsweise deren Mischtemperatur lässt sich der zugrundeliegende Wasserwert des verwendeten Kaloriemeters über die Formel

$$w = \frac{m_w(T_w - T_M)}{T_M - T_k} - m_k$$

bestimmen.

Die Fehlerbetrachtung erfolgt über den Größtfehler

$$\begin{aligned}\Delta w &= \left| \frac{\partial w}{\partial m_w} \right| \cdot \Delta m_w + \left| \frac{\partial w}{\partial m_k} \right| \cdot \Delta m_k + \left| \frac{\partial w}{\partial T_k} \right| \cdot \Delta T_k + \left| \frac{\partial w}{\partial T_w} \right| \cdot \Delta T_w + \left| \frac{\partial w}{\partial T_M} \right| \cdot \Delta T_M \\ &= \frac{T_w - T_M}{T_M - T_k} \cdot \Delta m_w + \Delta m_k + \frac{m_w(T_w - T_M)}{(T_M - T_k)^2} \cdot \Delta T_k + \frac{m_w}{T_M - T_k} \cdot \Delta T_w + \frac{m_w(T_w - T_k)}{(T_M - T_k)^2} \cdot \Delta T_M.\end{aligned}$$

Durch das Einsetzen der oben ermittelten Werte in die Formeln zur Bestimmung des Wasserwertes ergeben sich folgende Werte für die unabhängig voneinander durchgeführten Zwickelabgleiche:

$$w_1 = (12,579 \pm 8,199) \text{ g} \quad w_2 = (15,050 \pm 7,148) \text{ g}$$

Der Fehler beider Werte erscheint im ersten Moment relativ groß, jedoch resultiert dieser vor allem aus dem hoch angenommenen Fehler der Temperatur  $\Delta T = 0,3$  °C aufgrund der graphischen Ermittlung der Temperaturen aus dem Zwickelabgleich. Beide berechneten Wasserwerte liegen somit innerhalb des Fehlerbereichs, sodass ein Mittelwert aus beiden für weitere Berechnungen gebildet wird:

$$\bar{w} = \frac{w_1 + w_2}{2} \pm \frac{\Delta w_1 + \Delta w_2}{2} = (13,815 \pm 7,674) \text{ g}$$

Um die tatsächliche Qualität des Wasserwertes des verwendeten Dewar-Gefäßes beurteilen zu können, wird die gesamte Masse der Wasserfüllmenge in Relation zum Wasserwert gesetzt. Nachdem das gesamte warme Wasser zum kalten in das Kaloriemeter gefüllt wurde, ergeben sich folgende Gesamtwassermassen für beide Mischungsversuche:

$$\begin{aligned}m_1 &= m_{k,1} + m_{w,1} = 49,6 \text{ g} + 128,8 \text{ g} = 178,4 \text{ g}, \\ m_2 &= m_{k,2} + m_{w,2} = 48,1 \text{ g} + 130,7 \text{ g} = 178,8 \text{ g}.\end{aligned}$$

Im Mittel ergibt sich damit für die Gesamtmasse des Wassers im Kalorimeter von

$$m = \frac{m_1 + m_2}{2} = 178,6 \text{ g.}$$

Die Relation des Gesamtgewichtes zum Wasserwert lässt sich über den Dreisatz

$$\begin{aligned} 178,6 \text{ g} &\hat{=} 100,00\% \\ 13,8 \text{ g} &\hat{=} 7,73\% \end{aligned}$$

bestimmen.

Das Ergebnis des Verhältnisses des Wasserwerts von 7,73 % zur Gesamtmasse des eingefüllten Wassers spricht dafür, dass das Kalorimeter wenig Wärme an die Umgebung abgibt und damit im Folgenden der Wasserwert zur Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität von Wasser vernachlässigt werden kann.

Mögliche systematische Fehlerquellen während des Versuches sind beispielsweise:

- Ungleichmäßiges Einschütten des warmen Wassers zum kalten Wasser ins Dewar-Gefäß kann trotz Rührens zu Verfälschungen führen, da sich aufgrund der zu großen Menge in kürzester Zeit die Temperatur schneller ändert. Zum Einschütten des Wassers wurde ein Trichter verwendet, sodass das warme Wasser sich zuerst im unteren Teil des Kaloriometers befindet und durch das kontinuierliche Rühren mit dem Mischer dann gleichmäßig verteilt wird. Jedoch befindet sich die Spitze des Stabthermometers auch im unteren Teil des Dewar-Gefäßes, dass sich hierdurch trotz Rührens Verfälschungen ergeben können.
- Das verwendete Kalorimeter hat ungefähr eine Füllmenge von 200 mL, sodass davon ausgegangen werden kann, dass sich das warme und kalte Wasser auch bei händischem Umrühren gut vermischen lässt. Die Mischvorrichtung im Deckel des Dewar-Gefäßes besteht aus einem Stab horizontal befestigten „Reifen“, welcher einfach nach oben und unten bewegt werden kann, sodass schnell viel Flüssigkeit vermischt werden kann. Jedoch könnte das Rühren durch einen inkludierten Magnetrührer im Dewar-Gefäß noch genauer vorstatten gehen.
- Das sekundengenaue Ablesen der Mischtemperatur im zehn Sekundenrhythmus war nicht immer exakt möglich, da die Temperatur teilweise sehr schnell stieg.
- Die graphische Auswertung des Zwickelabgleiches gestaltet sich aufgrund der Skalierung der Temperatur auf der y-Achse als schwierig. Trotz Anpassung der T-Achse gestaltet sich die vorherrschende Skalierung des Ablesens der Temperaturen auf eine Nachkommastelle genau eher schwierig. Dieses Problem ließe sich verhindern, indem die Ergebnisse beispielsweise nicht mit Excel, sondern mit einer anderen, genaueren Auswertungssoftware geplottet werden.

## Bestimmung des elektrischen Wärmeäquivalents

Zur Ermittlung der Temperaturdifferenz  $\Delta T$ , welche zur Bestimmung des elektrischen Wärmeäquivalents benötigt wird, wird ein weiterer Zwickelabgleich durchgeführt. Da die Erwärmung des Wassers elektrisch über einen Heizwiderstand realisiert wird, erfolgt die graphische Auswertung des Zwickelabgleiches in Abbildung 2.4 nur über zwei Ausgleichsgeraden. Dabei approximiert die dunkelblaue Ausgleichsgerade die Temperatur des kalten Wassers und die grüne Ausgleichsgerade die Temperatur des warmen Wassers nach der Erwärmung des kalten Wassers durch den Heizwiderstand. Durch die Auswertung ergeben sich die Temperaturen

$$T_k = 24,8 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$T_w = 39,2 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Auch hier wird wie bei der Bestimmung des Wasserwertes auf die Ermittlung des Fehlerwertes über Grenzgeraden verzichtet, da diese so eng an die Ausgleichsgeraden gelegt werden müssten, dass kein Aussagekräftiger Wert daraus eruiert werden kann. Deswegen wird gleichermaßen großzügig von einem Abschätzungsfehler von  $\Delta\Delta T = 0,3 \text{ } ^\circ\text{C}$  aufgrund des Ablesen aus der Grafik ausgegangen.

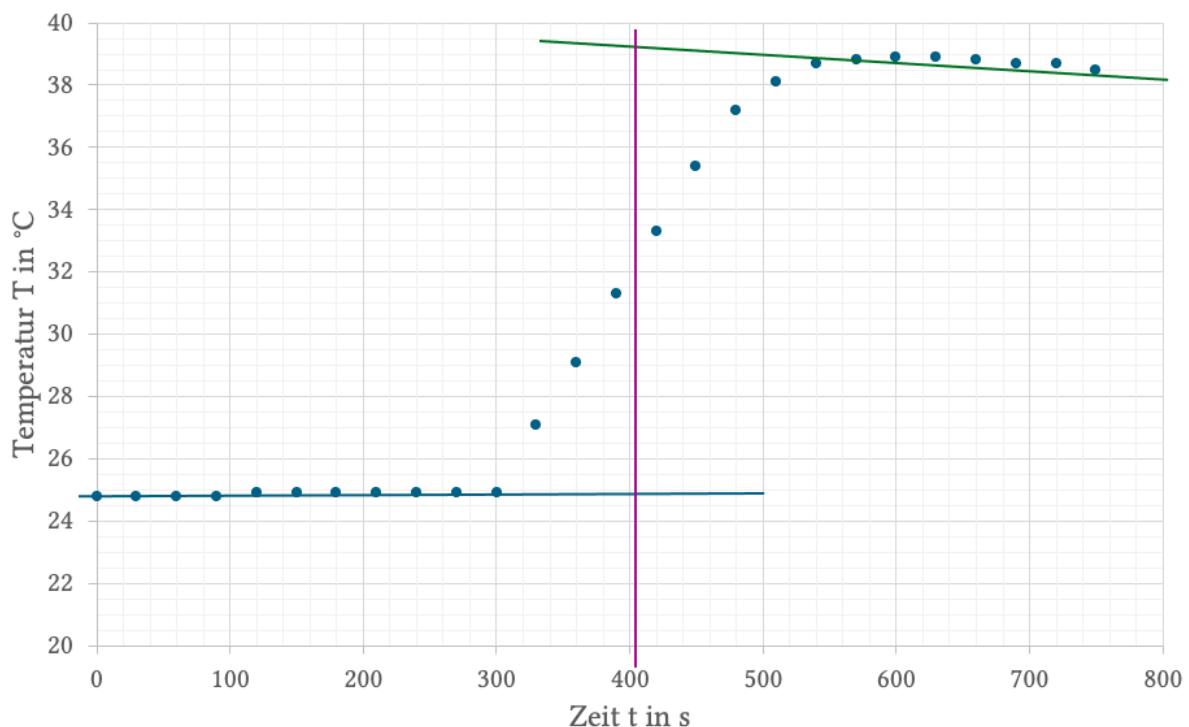


Abb. 2.4: Graphische Darstellung des dritten Zwickelabgleichs zur Bestimmung des elektrischen Wärmeäquivalents.

Die Temperaturdifferenz  $\Delta T$  kann nun mit dem aus dem Zwickelabgleich ermittelten Temperaturen über die Formel

$$\Delta T = T_w - T_k = 14,4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

berechnet werden.

Die Masse des im Kalorimeter befindlichen kalten Wassers wird wie im obigen Teilkapitel analog ermittelt. Die Wägung des leeren und befüllten Dewar-Gefäßes ergibt

$$m_{\text{Dewar, leer}} = 116,0 \text{ g}, \quad m_{\text{Dewar, kalt}} = 168,6 \text{ g}.$$

Daraus ergibt sich für die Masse des kalten Wassers

$$m_k = m_{\text{Dewar, kalt}} - m_{\text{Dewar, leer}} = 52,6 \text{ g}.$$

Der angenommene Fehlerwert von  $\Delta m_k = 0,2 \text{ g}$  wird aus der obigen Teilaufgabe übernommen.

Nachdem für fünf Minuten (entspricht 300 s) die Temperatur des kalten Wassers in 30 Sekundenintervallen aufgenommen wurde, wird am Netzgerät der Strom angestellt. Die eingestellte Spannung beträgt  $U = 12,0 \text{ V}$  und die Stromstärke  $I = 1,85 \text{ A}$ . Da die verwendeten Messgeräte sehr genau sind, wird für beide elektrischen Größen nur ein kleiner Fehler von  $\Delta U = 0,01 \text{ V}$  beziehungsweise  $\Delta I = 0,01 \text{ A}$  angenommen. Circa  $t = 150 \text{ s}$ , nachdem der Strom angestellt wurde, hat sich das kalte Wasser im Kalorimeter um circa  $10^\circ \text{C}$  erwärmt und der Strom wurde wieder abgestellt. Für das händische An- und Ausschalten des Stroms wird ein Fehler von  $\Delta t = 2 \text{ s}$  angenommen.

Alle nun aufgezählten Werte, welche zur Ermittlung der elektrischen Wärmekapazität benötigt werden, sind im Folgenden nochmals aufgetragen:

$$\begin{aligned} \Delta T &= 14,4^\circ \text{C}, & \Delta \Delta T &= 0,3^\circ \text{C}, & m_k &= 52,6 \text{ g}, & \Delta m_k &= 0,2 \text{ g}, \\ U &= 12,0 \text{ V}, & \Delta U &= 0,01 \text{ V}, & I &= 1,85 \text{ A}, & \Delta I &= 0,01 \text{ A}, \\ t &= 150 \text{ s}, & & & \Delta t &= 2 \text{ s}. \end{aligned}$$

Durch das Einsetzen dieser Werte in die Formel für die spezifische Wärmekapazität von Wasser

$$c_W = \frac{U \cdot I \cdot t}{m \cdot \Delta T},$$

welche aufgrund der Definition einer Kalorie genau dem gesuchten elektrischen Wärmeäquivalent entspricht, ergibt sich mit der Berücksichtigung des Großfehlers

$$\begin{aligned} \Delta c_W &= \left| \frac{\partial c_W}{\partial U} \right| \cdot \Delta U + \left| \frac{\partial c_W}{\partial I} \right| \cdot \Delta I + \left| \frac{\partial c_W}{\partial t} \right| \cdot \Delta t + \left| \frac{\partial c_W}{\partial m} \right| \cdot \Delta m + \left| \frac{\partial c_W}{\partial \Delta T} \right| \cdot \Delta \Delta T \\ &= \frac{I \cdot t}{m \cdot \Delta T} \cdot \Delta U + \frac{U \cdot t}{m \cdot \Delta T} \cdot \Delta I + \frac{I \cdot U}{m \cdot \Delta T} \cdot \Delta t + \frac{U \cdot I \cdot t}{m^2 \cdot \Delta T} \cdot \Delta m + \frac{U \cdot I \cdot t}{m \cdot \Delta T^2} \cdot \Delta \Delta T \end{aligned}$$

eine spezifische Wärmekapazität von

$$c_W = (4,396 \pm 0,194) \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}.$$

Somit entspricht

$$1 \text{ cal} = (4,396 \pm 0,194) \cdot 10^3 \text{ J}.$$

Ein Vergleich mit der Literatur ergibt einen Wert für die spezifische Wärmekapazität von Wasser von

$$c_{W,\text{Literatur}} = 4,185 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

(Meschede 2010, S. 260).

Der experimentell ermittelte Wert von  $c_W = (4,396 \pm 0,194) \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$  liegt knapp außerhalb des Fehlerwertes am Literaturwert von  $c_{W,\text{Literatur}} = 4,185 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , sodass trotz leichter Abweichung von einem guten Messwert ausgegangen werden kann. Diese Abweichung lässt sich auf mögliche systematische Messfehler zurückführen. Zu den bereits im obigen Teilkapitel beschriebenen Fehlern während des Zwickelabgleichs kann es sein, dass es zu einem Stromverlust beim Energietransport durch den ohmschen Widerstand der Kabel kommt. Die verwendeten Multimeter können ebenfalls durch einen möglichen Blindwiderstand Einfluss auf die Messergebnisse nehmen.

## Bestimmung der molaren Wärmekapazität von Wasser

Zuletzt soll nun noch auf Grundlage der berechneten Wärmekapazität von Wasser mit  $c_W = (4,396 \pm 0,194) \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$  dessen molare Wärmekapazität ermittelt werden. Hierfür wird zunächst die molare Masse von Wasser bestimmt. Diese setzt sich aus den im Wasserstoffmolekül  $\text{H}_2\text{O}$  enthaltenen Elementen zusammen. Die molaren Massen für das Wasserstoffatom H und das Sauerstoffatom O wurden dabei aus der Literatur entnommen (Tipler und Mosca 2024, S. 1388). Mithilfe dieser Literaturwerte ergibt sich eine molare Masse für Wasser von

$$M_{\text{H}_2\text{O}} = 2 \cdot M_{\text{H}} + M_{\text{O}} = 2 \cdot 1,007\,97 \text{ g mol}^{-1} + 15,9994 \text{ g mol}^{-1} = 18,0153 \text{ g mol}^{-1}.$$

Über die folgende Formel kann damit die molare Wärmekapazität von Wasser berechnet werden:

$$c_{\text{mol}, \text{Wasser}} = c_W \cdot M_{\text{H}_2\text{O}} = 4,396 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1} \cdot 18,0153 \text{ g mol}^{-1} = 79,195 \text{ g mol}^{-1},$$

$$\Delta c_{\text{mol}, \text{Wasser}} = \Delta c_W \cdot M_{\text{H}_2\text{O}} = 0,194 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1} \cdot 18,0153 \text{ g mol}^{-1} = 3,495 \text{ g mol}^{-1}.$$

Der nun erhaltene molare Wert

$$c_{\text{mol}, \text{Wasser}} = (79,195 \pm 3,495) \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

soll im Folgenden mit dem Dulong-Petit-Gesetz und der Kopp-Neumann-Regel verglichen werden.

Betrachte zuerst das Dulong-Petit-Gesetz

$$c_{\text{mol}, \text{Dulong-Petit}} = \frac{i}{2} R,$$

wobei  $i$  die Anzahl der Freiheitsgrade und  $R = 8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$  die allgemeine Gaskonstante darstellt (Meschede 2010, S. 258, 1066). Das heißt, die molare Wärmekapazität ist damit abhängig

von der Anzahl der Freiheitsgrade der Atome. Ein einatomiges Gas weist beispielsweise drei Freiheitsgrade auf, sodass sich nach Dulong-Petit eine molare Wärmekapazität von

$$c_{\text{mol, Dulong-Petit}} = \frac{i}{2} R = \frac{3}{2} \cdot R = \frac{3}{2} \cdot 8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1} = 12,471 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

ergibt.

Ein Festkörper wiederum weist sechs Freiheitsgrade auf, welche sich auf drei Freiheitsgrade der Rotation und drei Freiheitsgrade der Translation verteilen, sodass sich nach Dulong-Petit

$$c_{\text{mol, Dulong-Petit}} = \frac{i}{2} R = \frac{6}{2} \cdot R = 3 \cdot R = 3 \cdot 8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1} = 24,93 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

ergibt.

Vergleicht man nun beide Werte nach Dulong-Petit mit der berechneten molaren Wärmekapazität von Wasser, so sind beide viel zu niedrig. Dies ist dahingehend auch stimmig, da es sich bei Wasser weder um ein einatomiges Gas noch um einen Festkörper handelt. Auch wenn es sich beim Wassermolekül  $\text{H}_2\text{O}$  um ein sogenanntes gewinkeltes Molekül mit sechs Freiheitsgraden handelt, ist zur Berechnung der spezifischen Wärmekapazität das Dulong-Petit-Gesetz nicht geeignet (Meschede 2010, S. 255).

Die Kopp-Neumann-Regel dagegen besagt, dass wenn Atome in einem Molekül unabhängig voneinander schwingen, sich die molare Wärmekapazität aus den Summen der einzelnen Atomwärmen der Elemente zusammensetzt. Für Wasser ist dafür ein Literaturwert von

$$c_{\text{mol, Knopp-Neumann}} = 75 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

gegeben (Meschede 2010, S. 878), (Universität Augsburg SoSe 2025).

Ein erneuter Vergleich mit der experimentell bestimmten molaren Wärmekapazität von Wasser ergibt, dass die Kopp-Neumann-Regel nach Berücksichtigung des Fehlerwertes knapp darunter liegt. Somit liefert die Kopp-Neumann-Regel eine gute Approximation für die spezifische Wärmekapazität von Wasser.



# Literatur

- Meschede, Dieter (2010). *Gerthsen Physik*. 24. Aufl. Heidelberg: Springer.
- Tipler, Paul und Gene Mosca (2024). *Tipler Physik*. 9. Aufl. Berlin: Springer Spektrum.
- Universität Augsburg (SoSe 2025). *Versuchsanleitung W1 - Elektrisches Wärmeäquivalent*.
- Walcher, Wilhelm (1994). *Praktikum Der Physik*. 7. Aufl. Stuttgart: B.G. Teubner.



### 3 Anhang

#### Messergebnisse des ersten Mischungsversuchs

Zeit $t$ in s	$T_k$ in °C	$T_w$ in °C	Zeit $t$ in s	$T_M$ in °C	Zeit $t$ in s	$T_M$ in °C
0	25,2	60,0	310	28,5	440	39,0
30	25,1	58,9	320	32,4	450	39,0
60	24,9	57,3	330	33,9	460	38,9
90	24,9	56,0	340	37,8	490	38,9
120	24,7	54,9	350	39,0	520	38,8
150	24,7	53,7	360	39,1	550	38,8
180	24,7	52,6	370	39,2	580	38,7
210	24,7	51,2	380	39,2	610	38,7
240	24,7	49,1	390	39,2	640	38,7
270	24,7	49,5	400	39,1	670	38,7
300	24,7	48,5	410	39,1	700	38,6
			420	39,1	730	38,6
			430	39,0	760	38,4

**Tabelle 3.1:** Messwerte des ersten Mischungsversuchs zur Bestimmung des Wasserwerts.





