

# **W9 - Thermoelektrische Effekte**

Julia Mariella Wiest

Gruppe A06

28.05.2025

---

*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, den Seebeck-Koeffizienten eines Thermoelements, den Peltier-Koeffizienten eines Kühlblocks und daraus den hieraus resultierenden Seebeck-Koeffizienten des Kühlblocks experimentell zu bestimmen.

Allgemein versteht man unter thermoelektrischen Effekten die Wechselwirkung zwischen elektrischen und thermischen Größen, wie zum Beispiel von Spannung oder Strom mit der Temperatur oder einem Wärmestrom. Zu diesen sogenannten thermoelektrischen Effekten gehören der Seebeck- und der Peltier-Effekt.

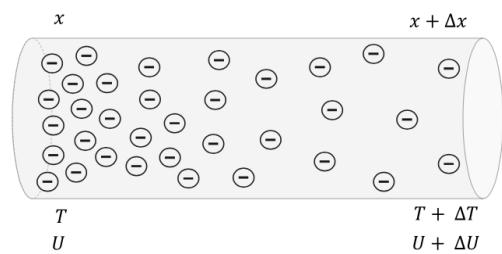
Wird ein homogener elektrischer Leiter einseitig erwärmt, so ruft das dadurch entstehende Temperaturgefälle einen sogenannten Diffusionsstrom her vor.

In einem metallischen Leiter lässt sich die Bildung eines Diffusionsstroms dadurch erklären, dass eine unterschiedliche Ladungsverteilung innerhalb des Leiters infolge des Temperaturgefälles entsteht (siehe Abbildung 1.1). Wird diese Temperaturdifferenz über die Zeit aufrechterhalten, bildet sich ein stationäres Verhältnis aus und zwischen den Enden des Leiters entsteht eine Spannungsdifferenz. Wird die auftretende Temperaturdifferenz in Relation zur dadurch entstehenden Thermospannung gesetzt, resultiert daraus die absolute Thermokraft

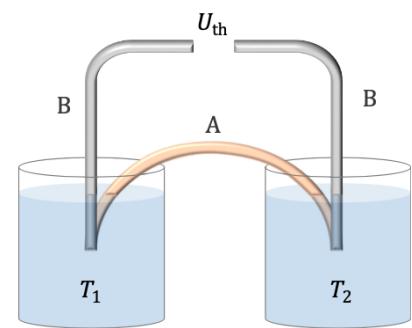
$$\alpha = \frac{dU_{th}}{dT},$$

auch Seebeck-Koeffizient genannt (Universität Augsburg SoSe 2025). Werden nun zwei verschiedene Leitermaterialien *A* und *B* zu einem Schaltkreis verbunden und die jeweiligen Kontaktstellen auf unterschiedliche Temperaturen  $T_1$  und  $T_2$  erhitzt oder gekühlt, so kann mithilfe eines Voltmeters eine Thermospannung

$$U_{th} = \alpha_{AB}(T_2 - T_1)$$



**Abb. 1.1:** Ladungsträgerverteilung unter einem Temperaturgefälle  $\Delta T$  (Universität Augsburg SoSe 2025).



**Abb. 1.2:** Aufbau des Thermoelements (Universität Augsburg SoSe 2025).

gemessen werden. Dieser Aufbau wird auch als Thermoelement, wie in Abbildung 1.2 zu sehen, bezeichnet (Demtröder 2017, S. 71), (Meschede 2010, S. 364).

Der Peltier-Effekt stellt eine Umkehrung der Erzeugung eines Thermostroms, also des Seebeck-Effekts, dar (Demtröder 2017, S. 73). Wird ein Leiterkreis aus zwei verschiedenen Materialien, wie in Abbildung 1.3, verlötet und lässt einen elektrischen Strom durch die Leiter fließen, so wird an den jeweiligen Kontakstellen der Materialien eine bestimmte Peltier-Wärme erzeugt beziehungsweise vernichtet. Das heißt, eine der Kontakstellen erwärmt sich, wobei die andere sich abkühlt (Weber 2007, S. 396).

An den Lötstellen der Materialien A und B

wird nun die Wärme

$$\dot{Q}_{AB} = \frac{E_A - E_B}{e} \cdot I = \Pi_{AB} \cdot I,$$

mit den Energien  $E_A$  und  $E_B$  der beiden Materialien, der Elementarladung  $e$  und der dem Peltier-Koeffizienten  $\Pi_{AB}$ , an die Umgebung abgegeben. Dieses sogenannte Peltier-Element stellt eine praktische Anwendung des Peltier-Effekts dar, indem durch einen Stromfluss ein Wärmestrom erzeugt wird, was eine Analogie zum Thermoelement darstellt, bei welchem durch ein Temperaturgefälle eine Spannung erzeugt wird. Zwischen dem Seebeck- und dem Peltier-Koeffizienten lässt sich zudem der Zusammenhang

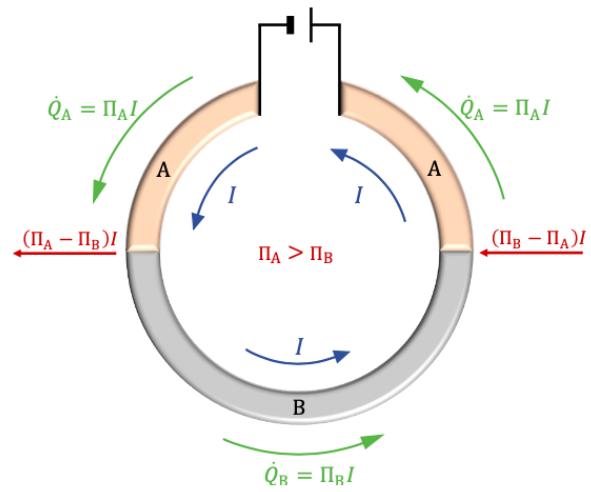
$$\Pi_A = \alpha_A T$$

herstellen (Universität Augsburg SoSe 2025).

Eine technische Anwendung des Peltier-Elements ist die Möglichkeit, Kühlung durch einen Peltier-Kühlblock zu erzeugen, da das Peltier-Element wie ein Kühlschrank als Wärmepumpe arbeitet (Demtröder 2017, S. 74). So wird je nach Stromrichtung an einer vorhandenen Lötstelle geheizt oder gekühlt (Meschede 2010, S. 366). Dabei kann die Abkühlung  $\Delta T$  an der kalten Seite als

$$c\Delta T = \frac{1}{2} \cdot U \cdot I - \Pi_{AB} \cdot I$$

angegeben werden, wobei zur erzeugten Peltier-Wärme  $\dot{Q}_{AB} = \Pi_{AB} \cdot I$ , aufgrund des elektrischen Widerstandes der verbauten Halbleiter im Peltier-Kühlblock, noch die ohmsche Wärme  $P = U \cdot I$  berücksichtigt werden muss.  $c$  stellt die sogenannte Proportionalitätskonstante dar. Damit im Endeffekt allerdings eine Kühlleistung entsteht, ist es nötig, die an der warmen Seite erzeugte Wärmeenergie effektiv wieder abzukühlen. Somit sollte der Kühlblock beispielsweise auf einer Wärmesenke montiert werden (Universität Augsburg SoSe 2025).



**Abb. 1.3:** Aufbau des Peltier-Elements (Universität Augsburg SoSe 2025).

## 2 Thermoelektrische Effekte

### 2.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Im ersten Teilversuch soll der Seebeck-Koeffizient eines Thermoelementes bestimmt werden. Hierfür wird ein Topf mit Leitungswasser befüllt und auf einer Heizplatte platziert. In einen Thermobecher werden Eiswürfel mit kaltem Wasser gefüllt und mit einem Deckel mit Loch verschlossen. Das verwendete Thermoelement besteht aus einem weiß isolierten Draht, an welchen an beiden Enden ein blander Draht angelötet wurde. Diese Lötstellen wurden jeweils in den Topf mit dem warmen Wasser und in das Gefäß mit dem Eiswasser gehängt. Bevor die Herdplatte angeschaltet wird, wird mit einem Thermometer die Wassertemperatur im Topf aufgenommen bis diese konstant ist. Mithilfe von Krokodilklemmen werden die Enden des Thermoelements mit einem Voltmeter verbunden, sodass nach dem Anschalten der Herdplatte simultan die Temperatur des Wassers im Topf und die Thermospannung am Thermoelement abgelesen werden kann. Dabei wird die Thermospannung  $U_{\text{th}}$  in circa 0,05 mV-Schritten zusammen mit der Temperaturdifferenz  $\Delta T$  notiert. Sobald das Wasser im Topf 75 °C erreicht hat, ist die Messung abgeschlossen. Der gesamte Versuchsaufbau ist in Abbildung 2.1 zu sehen.

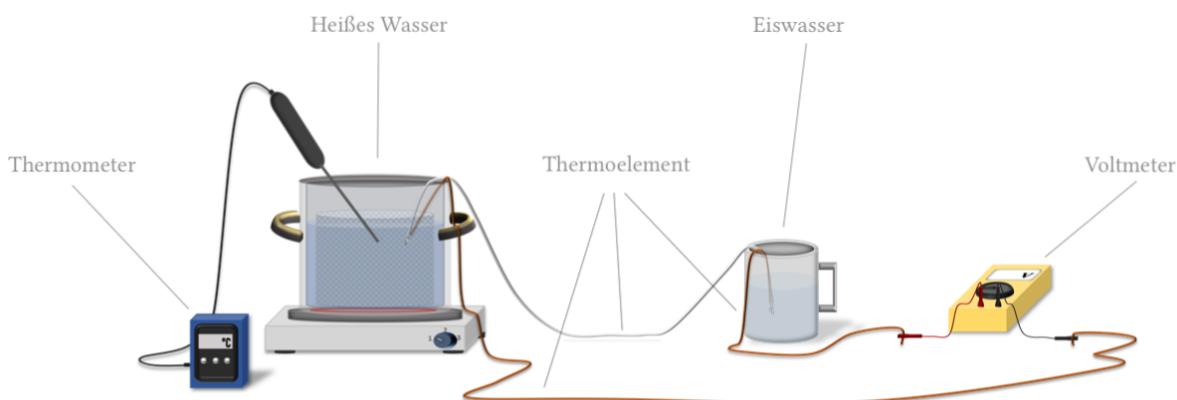
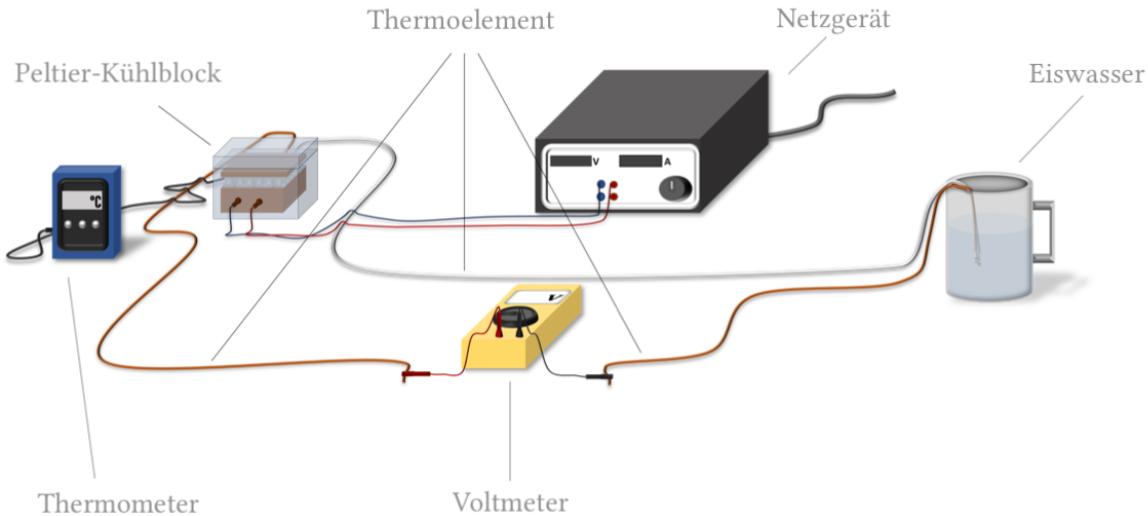


Abb. 2.1: Darstellung des Versuchsaufbaus (Universität Augsburg SoSe 2025).

Für den zweiten Teilversuch wird der Topf mit dem heißen Wasser nicht mehr benötigt. Stattdessen wird ein Netzgerät an einen durch Styropor isolierten Peltier-Kühlblock angeschlossen. Dabei ist es besonders wichtig, dass die Kabel korrekt gepolt eingesteckt werden, da sonst die warme und kalte Seite des Kühlblocks vertauscht werden. Das zuvor im Topf befindliche Thermometer wird nun an die warme (untere) Seite des Kühlblocks angebracht, wobei eine inkludierte Wasserkühlung am Peltier-Kühlblock dort die Temperatur nahezu konstant hält. An die obere kalte Seite des Peltier-Kühlblocks wird zur Temperaturmessung das bereits im

ersten Teilversuch verwendete Thermoelement angebracht. Die zweite Kontaktstelle des Thermoelements verbleibt weiterhin im Eiswasser. Der gesamte Aufbau ist wiederum in Abbildung 2.2 zu sehen.



**Abb. 2.2:** Darstellung des Versuchsaufbaus (Universität Augsburg SoSe 2025).

Am Netzgerät wird nun beginnend mit der Stromstärke  $I = 0,00 \text{ A}$  bis zur Stromstärke  $I = 4,00 \text{ A}$  in  $0,80 \text{ A}$ -Schritten die Thermospannung  $U_{\text{th}}$  am Thermoelement, die Temperatur  $T_U$  an der Kühlblock-Unterseite und die abfallende Spannung  $U$  am Kühlblock am Netzgerät abgelesen. Diese Werte wurden jeweils alle in einem Zeitintervall von  $t = 20 \text{ s}$  notiert.

Im dritten Teilversuch soll abschließend der Seebeck-Koeffizient des Peltier-Kühltürms bestimmt werden. Hierfür wird in dem oben beschriebenen Aufbau der Kreislauf um ein weiteres Voltmeter ergänzt. Dieses wird benötigt, um die Spannung  $U_{\text{Pe}}$  des Kühlblocks, welche zuvor direkt am Netzgerät abgelesen werden konnte, auch nach dem Abschalten des Netzgerätes sehen zu können. Am Netzgerät selbst wird die Stromstärke eingestellt, für welche im obigen Teilversuch 2 die minimale Thermospannung gemessen wurde, und somit auch die minimale Temperatur an der Kühlblock-Oberseite vorherrschte. Dies war hier bei  $I = 3,21 \text{ A}$  der Fall. Nun wurden abermals die Thermospannung  $U_{\text{th}}$ , die Temperatur  $T_U$  und die Spannung  $U_{\text{Pe}}$  des Kühlblocks in 20 Sekundenintervallen abgelesen, bis die Thermospannung konstant war. Dann wurde das Netzgerät abgeschaltet, wodurch die Thermospannung zu steigen und die Spannung am Kühlblock zu sinken begann. Es wurden bis zur Thermospannung von  $U_{\text{th}} = 0,00 \text{ V}$  weiterhin alle 20 Sekunden alle oben genannten Werte notiert.

## 2.2 Auswertung der Messergebnisse

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

### Bestimmung des Seebeck-Koeffizienten des Thermoelements

Aus den Messergebnissen des ersten Teilversuchs lässt sich der Seebeck-Koeffizient des verwendeten Thermoelementes bestimmen. Dafür werden die im Anhang befindlichen Messergebnisse in Tabelle 3.1 in einem Diagramm visualisiert. Dabei wird die gemessene Thermospannung  $U_{\text{th}}$  gegen die Temperatur  $T$  aufgetragen, wie in Abbildung 2.3 zu sehen.

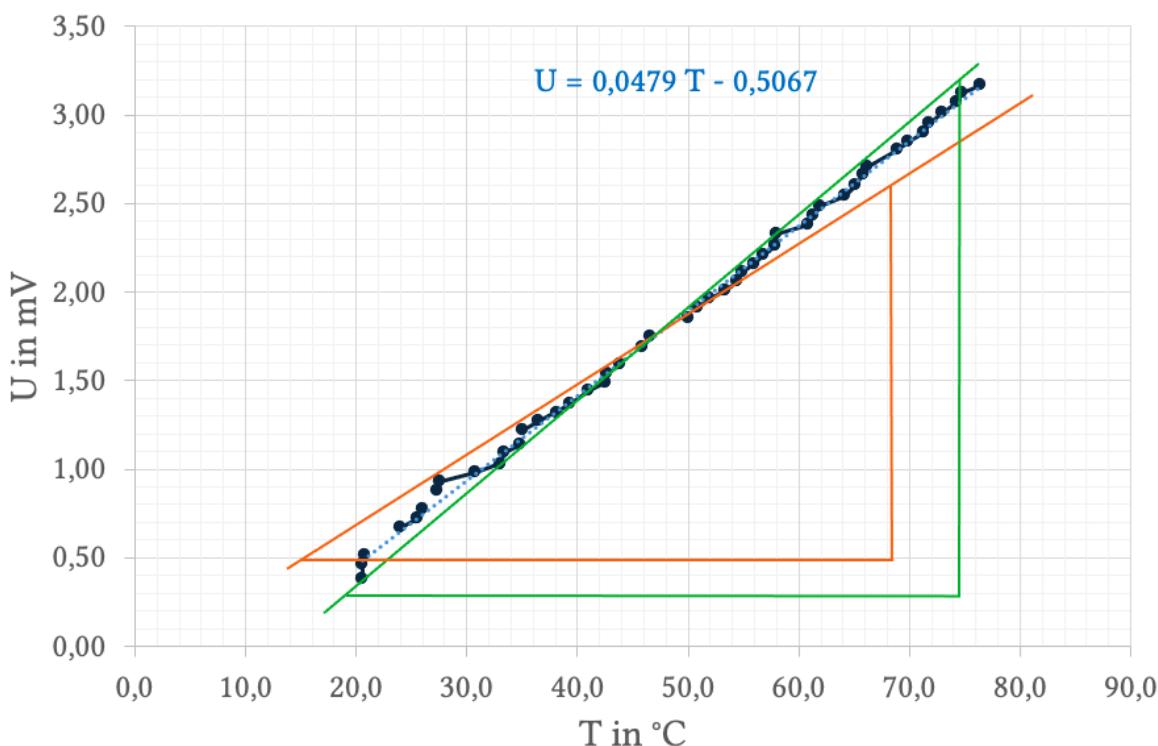


Abb. 2.3: Auftragung der Thermospannung des Thermoelements gegen die gemessene Temperatur im Topf.

Für die Thermospannung gilt der Zusammenhang

$$U_{\text{th}} = \alpha_{\text{Thermo}}(T_2 - T_1).$$

Temperatur  $T_1 = 0,0^{\circ}\text{C}$  entspricht im Aufbau der Temperatur des Eiswassers, wodurch für die Auswertung die Temperaturdifferenz der gemessenen Temperatur im Topf verwendet werden kann. Aufgrund des linearen Zusammenhangs zwischen der Spannung  $U_{\text{th}}$  des Thermoelements und der Temperatur  $T$  lässt sich der Seebeck-Koeffizient des Thermoelements  $\alpha_{\text{Thermo}}$  anhand

## 2 Thermoelektrische Effekte

der Steigung der Eichkurve ablesen. In Grafik 2.3 ist diese Ausgleichsgerade in Blau zu sehen und weist eine Steigung von

$$\alpha_{\text{Thermo}} = 0,0479 \frac{\text{mV}}{\text{°C}}$$

auf. Die blaue Gerade wurde dabei automatisch von Excel generiert und berechnet.

Zur Fehlerabschätzung des Seebeck-Koeffizienten werden zwei Grenzgeraden in Orange und Grün in das Diagramm eingezeichnet und ausgewertet. Deren Steigungen ergeben sich folgendermaßen:

$$\begin{aligned} \text{Steigung orange: } \alpha_{\min} &= \frac{y}{x} = \frac{2,6 - 0,5}{68 - 16} = \frac{2,1}{52} = 0,0404 \frac{\text{mV}}{\text{°C}}, \\ \text{Steigung grün: } \alpha_{\max} &= \frac{y}{x} = \frac{3,2 - 0,3}{74 - 20} = \frac{2,9}{54} = 0,0537 \frac{\text{mV}}{\text{°C}}. \end{aligned}$$

Durch das Verrechnen der Steigungen der orangen und grünen Grenzgerade ergibt sich damit insgesamt für den Fehlerterm des Seebeck-Koeffizienten

$$\Delta\alpha_{\text{Thermo}} = \frac{\alpha_{\max} - \alpha_{\min}}{2} = 0,00665 \frac{\text{mV}}{\text{°C}}.$$

Somit ergibt sich für den Seebeck-Koeffizienten des Thermoelements

$$\alpha_{\text{Thermo}} = (0,0479 \pm 0,00667) \frac{\text{mV}}{\text{°C}}.$$

In der Versuchsanleitung war mit der Gleichung

$$\alpha = \frac{3 k_B}{2 e} = 0,129 \frac{\text{mV}}{\text{K}},$$

mit der Boltzmann-Konstante  $k_B$  und der Elementarladung  $e$  eine einfache Abschätzung für die Thermokraft gegeben. Der Vergleich des Wertes für die Abschätzung mit dem tatsächlich bestimmten Seebeck-Koeffizienten für den verwendeten Draht ergibt, dass der Seebeck-Koeffizient materialabhängig sein muss. Deswegen ist es nötig, für eine genauere Betrachtung quantenmechanische Effekte in die Rechnung miteinzubeziehen. Dafür wird das Bändermodell für Metalle verwendet, um die Energiezustände in einem Stoff anhand der Fermi-Energie bei thermischer Anregung besser beurteilen zu können. Dadurch lässt sich letztendlich ein Korrekturfaktor angeben, in welchem die materialabhängig Fermi-Temperatur eingeht. Dies ist bei der obigen Formel nicht der Fall, weswegen die theoretische Abschätzung mit dem tatsächlich experimentell bestimmten Seebeck-Koeffizienten nicht übereinstimmt.

Im Versuch selbst kann es zu systematischen Fehlern kommen, indem beispielsweise das Thermoelement selbst während des Messprozesses geringfügig Wärme an die Umgebung abgibt, sodass kein exakt gleichmäßiger Temperaturgradient zustande kommt. Dieser Fehler lässt sich jedoch gut durch die Linearität der Spannung zur Temperatur in der Grafik ausgleichen. Die Spannung des Thermoelementes sollte während des Versuches in 0,05 mV-Schritten abgelesen werden. Dies gestaltete sich teilweise als schwierig, da zeitweise sehr schnelle Sprünge nach

oben passierten und demnach das simultane Mitschreiben und Ablesen des Thermometers und Voltmeters erschwert war. Im verwendeten Voltmeter selbst ist ein Widerstand verbaut, durch welchen ein geringfügiger Strom fließt, welcher Einfluss auf die Spannung nimmt, was ebenfalls zu einer leichten Verfälschung der Ergebnisse führen kann.

## Bestimmung des Peltier-Koeffizienten für den Peltier-Kühlblock

Mit den Messergebnissen aus dem zweiten Teilversuch kann der Peltier-Koeffizient des verwendeten Peltier-Kühlblocks bestimmt werden. Dafür werden die im Anhang befindlichen Messergebnisse für die aufgenommenen verschiedenen Stromstärken (Tabellen 3.2 bis 3.6) zunächst in Diagramm 2.4 visualisiert.

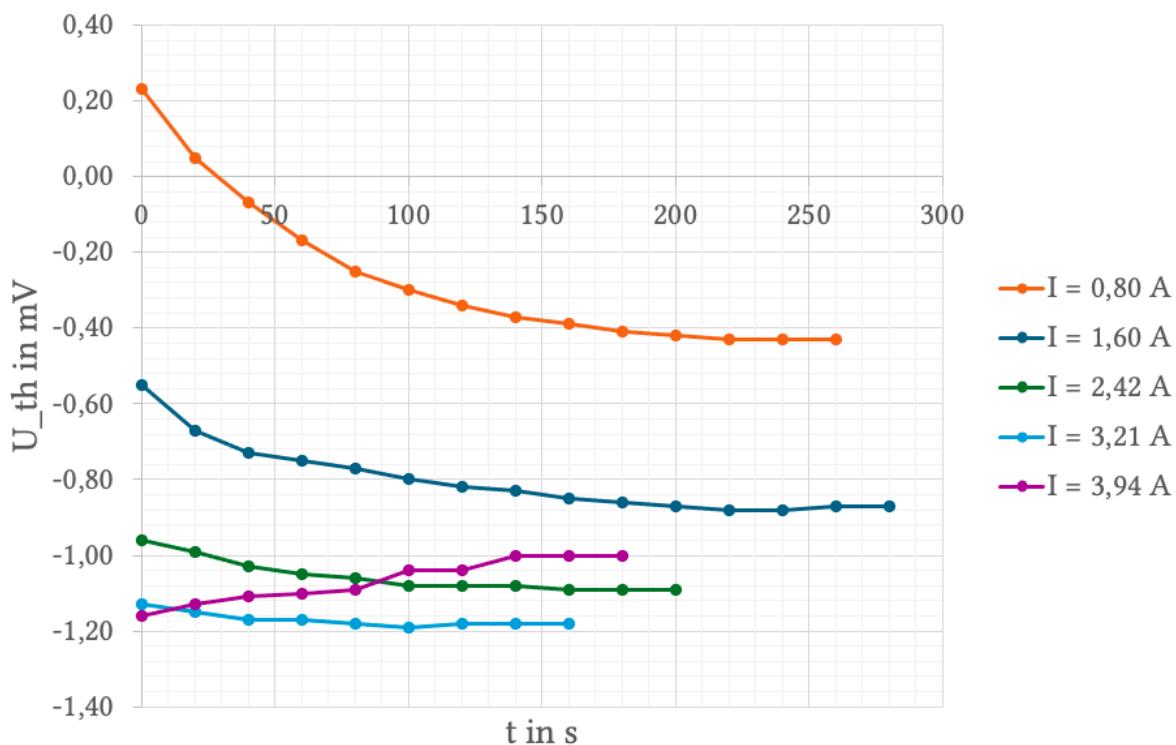


Abb. 2.4: Auftragung Thermospannung der verschiedenen Stromstärken.

Für jede aufgenommene Stromstärke wurde die Thermospannung so lange aufgenommen, bis sich ein stationärer Zustand der Spannung ergab. Es fällt auf, dass sich bei den Stromstärken  $I = 0,80 \text{ A}$  und  $I = 1,60 \text{ A}$  eine gut ersichtliche Kurve von oben nach unten bildet, bis die Thermospannung konstant bleibt. Bei den Stromstärken  $I = 2,42 \text{ A}$  und  $I = 3,21 \text{ A}$  findet die Abflachung der Kurve schneller statt, sodass sich kein wirklicher Bogen ausbildet. Im Gegensatz dazu steigt die Spannung bei der Stromstärke  $I = 3,94 \text{ A}$  als Kurve von unten nach oben an. Demnach lässt sich schlussfolgern, dass die kühlsste Temperatur bei der niedrigsten Thermospannung von  $I = 3,21 \text{ A}$  vorherrscht.

## 2 Thermoelektrische Effekte

Mithilfe der stationären Thermospannungen für die verschiedenen Stromstärken lässt sich im Folgenden die Temperaturdifferenz  $\Delta T$  zwischen der Kühlblock-Oberseite und der Unterseite ermitteln. Die Temperatur der Oberseite ist gegeben durch die Formel

$$T_{\text{oben}}(I) = \frac{U_{\text{th}}(I)}{\alpha_{\text{Thermo}}}.$$

Die Fehlerabschätzung ergibt sich über den Größtfehler

$$\begin{aligned}\Delta T_{\text{oben}}(I) &= \left| \frac{\partial T_{\text{oben}}(I)}{\partial U_{\text{th}}(I)} \right| \cdot \Delta U_{\text{th}}(I) + \left| \frac{\partial T_{\text{oben}}(I)}{\partial \alpha_{\text{Thermo}}} \right| \cdot \Delta \alpha_{\text{Thermo}} \\ &= \frac{1}{\alpha_{\text{Thermo}}} \cdot \Delta U_{\text{th}} + \frac{U_{\text{th}}}{\alpha_{\text{Thermo}}^2} \cdot \Delta \alpha_{\text{Thermo}}\end{aligned}$$

mit  $\Delta U_{\text{th}} = 0,02 \text{ mV}$  und  $\Delta \alpha_{\text{Thermo}} = 0,0067 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ .

Für jede Stromstärke wird die maßgebende Thermospannung  $U_{\text{th}}$  über die Bildung des Mittelwertes

$$\overline{U_{\text{th}}} = \sum_{i=1}^n \frac{U_{\text{th},i}}{n}$$

berechnet. Die zugrundeliegenden Messergebnisse hierfür sind im Anhang 3 zu finden. Der Seebeck-Koeffizient für das Thermoelement  $\alpha_{\text{Thermo}} = 0,0479 \text{ mV}/^\circ\text{C}$  wurde bereits im obigen Teilkapitel berechnet. Alle benötigten Werte und Ergebnisse sind in Tabelle 2.1 aufgetragen.

$I$ in A	$U_{\text{th}}$ in mV	$T_{\text{oben}}(I)$ in $^\circ\text{C}$	$\Delta T_{\text{oben}}(I)$ in $^\circ\text{C}$
0,80	-0,27	-5,64	-0,37
1,60	-0,80	-16,70	-1,92
2,42	-1,05	-21,92	-2,65
3,21	-1,17	-24,43	-3,00
3,94	-1,07	-22,34	-2,71

**Tabelle 2.1:** Auswertung der Tempertur der Kühlblock-Oberseite.

Mit der ermittelten Temperatur auf der Oberseite des Kühlblocks kann nun die Temperaturdifferenz

$$\Delta T = T_{\text{unten}} - T_{\text{oben}}$$

berechnet werden.

Die Fehlerberechnung erfolgt ebenfalls über den Größtfehler

$$\Delta \Delta T = \left| \frac{\partial \Delta T}{\partial T_{\text{unten}}} \right| \cdot \Delta T_{\text{unten}} + \left| \frac{\partial \Delta T}{\partial T_{\text{oben}}} \right| \cdot \Delta T_{\text{oben}} = \Delta T_{\text{unten}} + \Delta T_{\text{oben}}$$

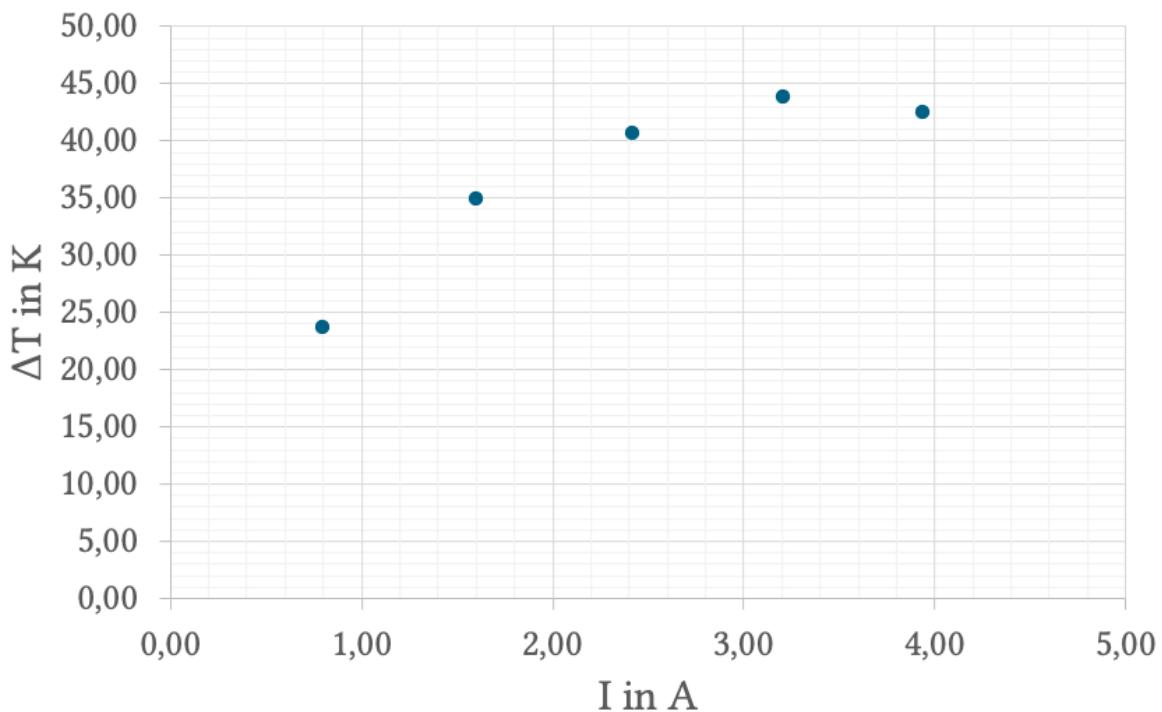
mit  $\Delta T_{\text{unten}} = 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Alle verwendeten und Werte sind Tabelle 2.2 zu entnehmen.

$I$ in A	$T_{\text{unten}}$ in °C	$T_{\text{oben}}$ in °C	$\Delta T_{\text{oben}}(I)$ in °C	$\Delta T$ in °C	$\Delta \Delta T$ in °C
0,80	18,07	-5,64	-0,37	23,71	0,47
1,60	18,25	-16,70	-1,92	34,95	2,02
2,42	18,78	-21,92	-2,65	40,70	2,75
3,21	19,36	-24,43	-3,00	43,79	3,10
3,94	20,17	-22,34	-2,71	42,51	2,81

**Tabelle 2.2:** Ermittlung der Temperaturdifferenz aus der Temperatur der Ober- und Unterseite.

Anhand der obigen Ergebnisse kann die Temperaturdifferenz  $\Delta T$  graphisch in Abhängigkeit der Stromstärke  $I$  dargestellt werden. Der Verlauf der Kurve  $\Delta T(I)$  ist in Abbildung 2.5 zu sehen.

**Abb. 2.5:** Auftragung der Temperaturdifferenz  $\Delta T(I)$  in Abhängigkeit der Stromstärke  $I$ .

Beginnend mit der Stromstärke  $I = 0,80$  A ist dort die Temperaturdifferenz  $\Delta T$  am niedrigsten. Mit zunehmendem Stromfluss steigt auch die Temperaturdifferenz immer weiter an, bis diese bei einer Stromstärke von  $I = 3,21$  A ihr Maximum erreicht. Bei einer Stromstärke von  $I = 3,94$  A fällt die Temperaturdifferenz wieder ab. Der Gesamtverlauf lässt einen quadratischen Anstieg vermuten. Trifft man die Annahme, dass sich das Peltier-Element wie ein ohmscher Widerstand verhält, so steigt mit der Erhöhung der Stromstärke nicht nur die Kühlleistung, sondern auch die damit einhergehende produzierte ohmsche Wärme. Jene ohmsche Wärme wird auf beiden Seiten, also auf der warmen und der kalten, gleichermaßen abgegeben, sodass die Kühlleistung und damit die Temperaturdifferenz ab einem gewissen Maximalwert wieder abnimmt. Bei

## 2 Thermoelektrische Effekte

dem verwendeten Peltier-Kühlblock befindet sich dieser Punkt bei einer Stromstärke zwischen  $I = 3,21 \text{ A}$  und  $I = 3,94 \text{ A}$ .

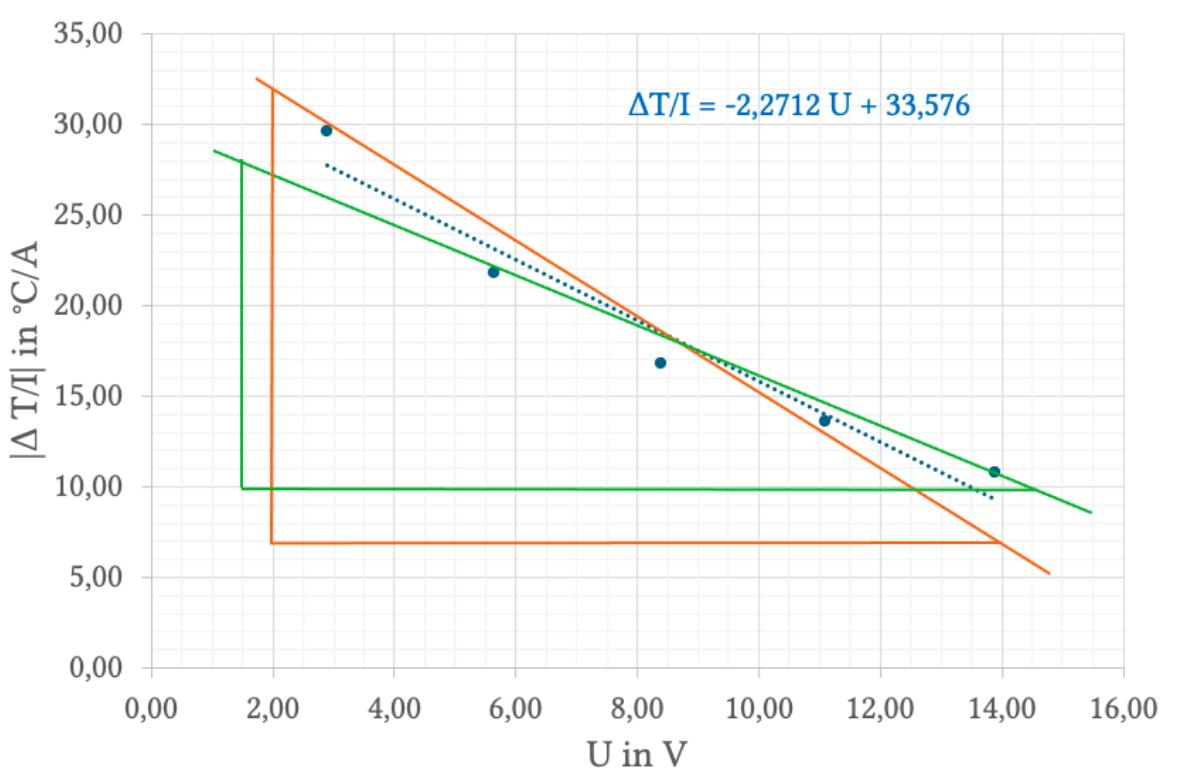
Im Folgenden wird nun der Peltier-Koeffizient  $\Pi_{\text{Kühlblock}}$  und Konstante  $c$  mithilfe der Formel

$$\underbrace{\frac{\Delta T}{I}}_{y=2c} = \underbrace{\frac{1}{m \cdot x}}_{+c} U - \underbrace{\frac{\Pi_{\text{Kühlblock}}}{c}}_{+\tau} \quad (2.1)$$

ermittelt.

$U \text{ in V}$	$\Delta T \text{ in } ^\circ\text{C}$	$I \text{ in A}$	$\frac{\Delta T}{I}(U) \text{ in } ^\circ\text{C/A}$
2,90	23,71	0,80	29,63
5,64	34,95	1,60	21,84
8,40	40,70	2,42	16,82
11,09	43,79	3,21	13,64
13,90	42,51	3,94	10,79

**Tabelle 2.3:** Benötigte Werte zur Erstellung der Grafik der Auftragung von  $\frac{\Delta T}{I}$  in Abhängigkeit der Spannung  $U$ .



**Abb. 2.6:** Bestimmung des Peltier-Koeffizienten und der zugehörigen Konstante  $c$  über die Auftragung von  $\frac{\Delta T}{I}(U)$ .

Durch die graphische Auswertung, in welcher  $\frac{\Delta T}{I}$  gegen die Spannung  $U$  des Kühlblocks aufgetragen wird (siehe Abbildung 2.6 und 2.3), lässt sich die obige Gleichung (2.1) als Geraden-Gleichung interpretieren. Demnach ergibt sich für die Steigung der blauen Ausgleichsgerade der Zusammenhang

$$m = \frac{1}{2c} = -2,27 \Rightarrow c = \frac{1}{2m} = -0,22.$$

Für die Fehlerabschätzung der Konstante  $c$  wird der Größtfehler

$$\Delta c = \left| \frac{\partial c}{\partial m} \right| \cdot \Delta m = \frac{1}{2m^2} \cdot \Delta m = -0,03$$

verwendet.

Der y-Achsenabschnitt  $\tau$  ist über den zweiten Teil der Formel (2.1) definiert:

$$\tau = \frac{\Pi_{\text{Kühlblock}}}{c} \Rightarrow \Pi_{\text{Kühlblock}} = \tau \cdot c.$$

Aus der Grafik 2.6 lässt sich für  $\tau$  der Wert

$$\tau = 33,576$$

anhand des y-Achsenabschnitts ablesen.

Auch hier wird zur Fehlerbetrachtung der Größf Fehler

$$\Delta \tau = \frac{\tau_{\max} - \tau_{\min}}{2} = \frac{36,16 - 30,09}{2} = 3,04$$

herangezogen.

Die nötigen Korrekturterme zur Fehlerabschätzung, welche in den obigen Formeln bereits eingesetzt wurden, werden über zwei Grenzgeraden in Orange und Grün ermittelt.

Die Steigungen der orangen und grünen Grenzgeraden ergeben sich folgendermaßen

$$\begin{aligned} \text{Orange: } m_{\min} &= \frac{y}{x} = \frac{32 - 7}{14 - 2} = \frac{25}{12} = -2,08, \\ \text{Grün: } m_{\max} &= \frac{y}{x} = \frac{28 - 10}{14,5 - 1,5} = \frac{18}{13} = -1,39. \end{aligned}$$

Die Kombination beider Steigungen  $m_{\max}$  und  $m_{\min}$  ergibt den Korrekturwert

$$\Delta m = \frac{m_{\max} - m_{\min}}{2} = \frac{-1,39 - (-2,08)}{2} = 0,345.$$

Weiterhin werden für den Korrekturterm  $\Delta \tau$  die y-Achsenabschnitte der orangen und grünen Grenzgeraden berechnet. Die orange Gerade weist eine Steigung von  $m = -2,08$  auf. Durch

die Wahl des Punktes  $(2|32)$ , welcher sich auf der orangen Geraden befindet, kann der y-Achsenabschnitt über den Zusammenhang

$$y = m \cdot x + \tau \Rightarrow \tau = -m \cdot x + y$$

berechnet werden.

Für die grüne Gerade mit der Steigung  $m = -1,39$  wird der Punkt  $(1,5|28)$  gewählt. Somit ergibt sich für die jeweiligen y-Achsenabschnitte:

$$\begin{aligned} \text{Orange: } \tau &= 2,08 \cdot 2 + 32 = 36,16 \Rightarrow \frac{\Delta T}{I} = -2,08U + 36,16, \\ \text{Grün: } \tau &= 1,39 \cdot 1,5 + 28 = 30,09 \Rightarrow \frac{\Delta T}{I} = -1,39U + 30,09. \end{aligned}$$

Mit der Konstante  $c$  und dem y-Achsenabschnitt  $\tau$

$$c = (-0,22 \pm 0,03) \quad \tau = (33,576 \pm 3,04)$$

lässt sich nun abschließend der Peltier-Koeffizient des Kühlblocks

$$\Pi_{\text{Kühlblock}} = \tau \cdot c = 33,58 \cdot 0,22 = 7,39$$

berechnen.

Auch hier wird die Fehlerabschätzung mithilfe des Größtfehlers

$$\Delta \Pi_{\text{Kühlblock}} = \left| \frac{\partial \Pi_{\text{Kühlblock}}}{\partial \tau} \right| \cdot \Delta \tau + \left| \frac{\partial \Pi_{\text{Kühlblock}}}{\partial c} \right| \cdot \Delta c = c \cdot \Delta \tau + \tau \cdot \Delta c = -0,46$$

ermittelt.

Somit ergibt sich insgesamt für den Peltier-Koeffizienten des Kühlblocks

$$\Pi_{\text{Kühlblock}} = (7,39 \pm 0,46) \text{ V.}$$

Wie bereits in den physikalischen Grundlagen 1 beschrieben, lässt sich ein ohmscher Anteil der Verlustwärme separieren. Dabei ist die ohmsche Wärmeliste mit  $P = U \cdot I$  und die Peltier-Wärmeliste mit  $\dot{Q} = \Pi \cdot I$  gegeben. Dieser Zusammenhang findet sich in folgender Gleichung wieder:

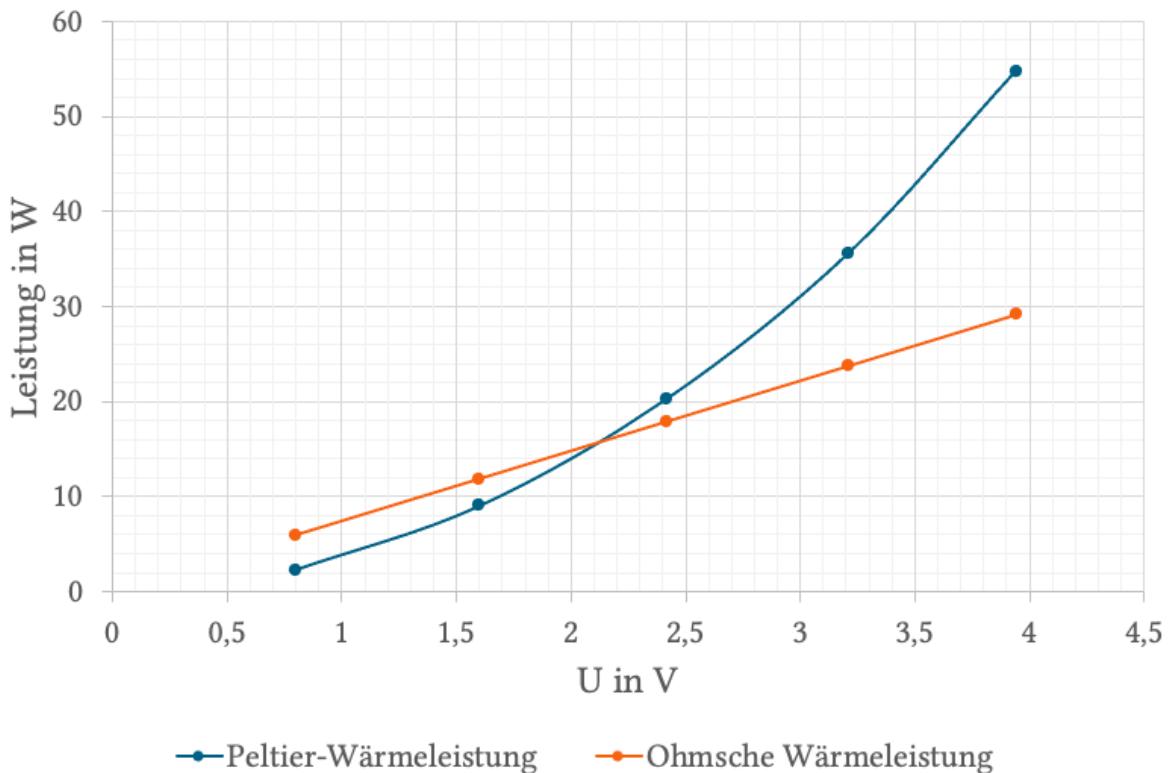
$$c \cdot \Delta T = \frac{1}{2} \overbrace{U \cdot I}^{=P} - \overbrace{\Pi_{\text{Kühlblock}} \cdot I}^{=\dot{Q}}$$

Durch das Einsetzen der gemessenen Werte im Versuch in die obige Gleichung ergeben sich die folgenden Ergebnisse wie in Tabelle 2.4 dargestellt.

$I$ in A	$U$ in V	$P$ in W	$\dot{Q}$ in W
0,80	2,90	2,32	5,91
1,60	5,64	9,02	11,82
2,42	8,40	20,33	17,88
3,21	11,09	35,60	23,71
3,94	13,90	54,77	29,10

**Tabelle 2.4:** Werte für Auftragung Ohmscher Widerstand

Mittels graphischer Auswertung wird nun der ohmsche Anteil der Verlustwärme  $P$  beziehungsweise die Peltier-Wärmeleistung  $\dot{Q}$  gegen die vorherrschende Spannung  $U$  aufgetragen.

**Abb. 2.7:** Auftragung des ohmschen Anteils der Verlustwärme bzw. der Peltier-Wärmeleistung gegen die Spannung.

In Abbildung 2.7 fällt auf, dass die ohmsche Wärmeleistung, in der Grafik als orange Linie zu sehen, linear zum Stromfluss steigt. Die Peltier-Wärmeleistung in Blau hingegen wächst zunehmend schneller und entspricht damit in etwa einem quadratischen Zusammenhang. Insgesamt lässt sich dadurch folgern, dass der Peltier-Effekt linear vom Strom abhängen scheint.

Mögliche systematische Fehler während des Versuchs sind ähnlich zu denen aus dem ersten Teilversuch. Nach Versuchsbeginn mussten vier verschiedene Werte zeitgleich abgelesen werden: Die Zeit  $t$  auf der Handstoppuhr, die Thermospannung  $U_{\text{th}}$  am Voltmeter, welches an das

Thermoelement angeschlossen ist, die Spannung  $U$  des Peltier-Kühlblocks am Netzgerät und die Temperatur  $T_U$  der Unterseite des Kühlblocks am daran angebrachten Thermometer. Dabei kann es leicht zu Ablesefehlern oder geringfügig verzögert notierten Werten kommen. Zudem war der verwendete Peltier-Kühlblock nicht ideal isoliert. Der Kühlblock selbst befand sich zwar innerhalb einer eng anliegenden Styroporschachtel, jedoch kann über die Aussparungen für die Anschlüsse in der Styroporschachtel ein Wärmeaustausch mit der Umgebung stattfinden.

## Bestimmung des Seebeck-Koeffizienten des Peltier-Kühlblocks

Aus den Messergebnissen des dritten Teilversuches lässt sich nun abschließend der zugrundeliegende Seebeck-Koeffizient des Peltier-Kühlblocks bestimmen. Dafür kommen zwei verschiedene Auswertungsmethoden infrage: Entweder eine graphische Auswertung, indem die gemessene Spannung des Kühlblocks  $U_{Pe}$  gegen die Temperaturdifferenz  $\Delta T$  aufgetragen wird, oder eine rein mathematische Auswertung über eine Formel, welche den Peltier-Koeffizienten  $\Pi_{\text{Kühlblock}}$  in Relation zur Temperaturdifferenz  $\Delta T$  setzt. Im Folgenden werden beide Varianten näher beleuchtet.

Zunächst wird für beide Varianten die Temperaturdifferenz  $\Delta T$  benötigt. Dies erfolgt analog wie im obigen Teilkapitel, indem zuerst die Temperatur an der Kühlblock-Oberseite bestimmt wird

$$T_{\text{oben}}(I) = \frac{U_{\text{th}}(I)}{\alpha_{\text{Thermoelement}}} \pm \left( \frac{1}{\alpha_{\text{Thermo}}} \cdot \Delta U_{\text{th}} + \frac{U_{\text{th}}}{\alpha_{\text{Thermo}}^2} \cdot \Delta \alpha_{\text{Thermo}} \right)$$

mit  $\Delta U_{\text{th}} = 0,02 \text{ mV}$  und  $\Delta \alpha_{\text{Thermo}} = 0,0067 \text{ mV/}^\circ\text{C}$  und anschließend daraus die Temperaturdifferenz

$$\Delta T = T_{\text{unten}} - T_{\text{oben}} \pm (\Delta T_{\text{unten}} + \Delta T_{\text{oben}})$$

mit  $\Delta T_{\text{unten}} = 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$  berechnet werden kann.

Dies erfolgt anhand der im Anhang befindlichen Messwerte in Tabelle 3.7. Die daraus resultierenden Ergebnisse sind in Tabelle 2.5 dargestellt.

	$U_{\text{th}}$ in mV	$T_{\text{oben}}(I)$ in $^\circ\text{C}$	$T_{\text{unten}}(I)$ in $^\circ\text{C}$	$\Delta T_{\text{oben}(I)}$ in $^\circ\text{C}$	$\Delta T$ in $^\circ\text{C}$	$\Delta \Delta T$ in $^\circ\text{C}$	$U_{Pe}$ in V
	-0,84	-17,54	16,50	-2,04	18,54	-1,94	0,70
	-0,61	-12,73	16,70	-1,36	18,06	-1,26	0,60
	-0,42	-8,77	16,90	-0,81	17,71	-0,71	0,50
	-0,28	-5,85	17,00	-0,40	17,40	-0,30	0,40
	-0,17	-3,55	17,10	-0,08	17,18	0,02	0,30
	-0,08	-1,67	17,20	0,18	17,02	0,28	0,20
	0,00	0,00	17,30	0,42	16,88	0,52	0,20
Mittelwert					17,54	-0,48	

Tabelle 2.5: Ermittlung der Temperaturdifferenz

Anhand der nun berechneten Temperaturdifferenz  $\Delta T$  kann nun die Spannung des Peltier-Elementes  $U_{Pe}$  graphisch dagegen aufgetragen werden. Dabei gilt bei der Betrachtung der Messergebnisse im Anhang 3 zu beachten, dass die graphische Auswertung der Werte ab dem Abschalten des Stroms genügt.

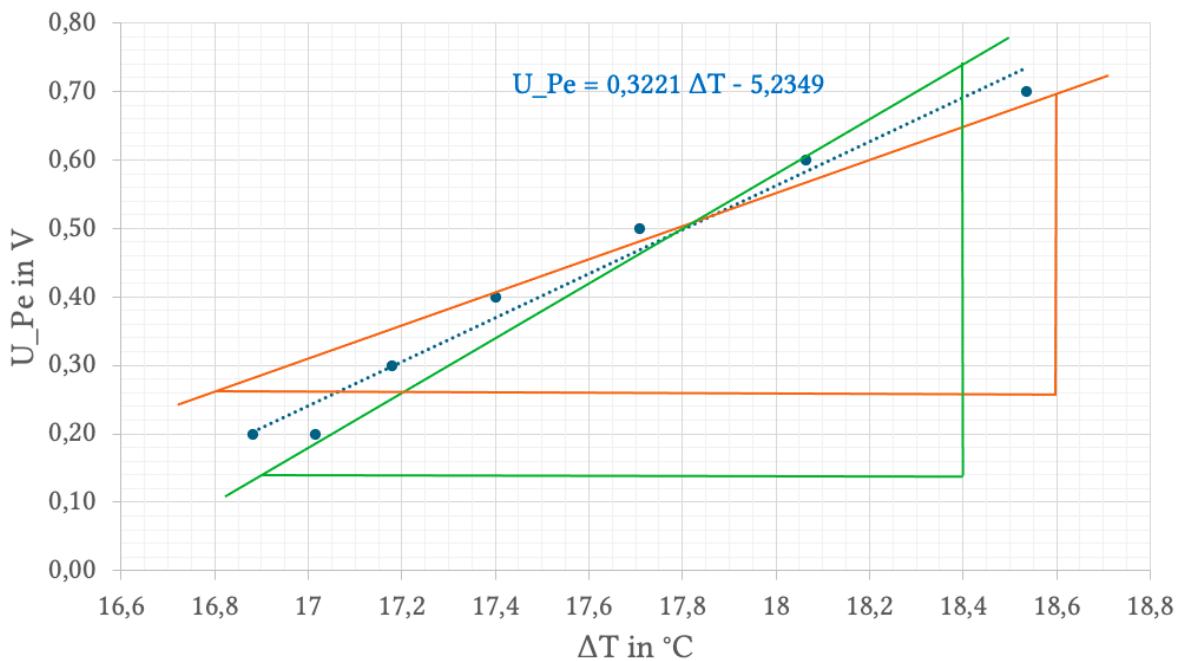


Abb. 2.8: Grafische Ermittlung

Die Steigung der blau dargestellten Ausgleichsgeraden in Grafik 2.8 entspricht, genau wie in der Auswertung zu Teilversuch 1, dem Seebeck-Koeffizienten des Peltier-Kühlblocks

$$\alpha_{\text{Peltier}} = 0,3221 \frac{\text{mV}}{^{\circ}\text{C}}.$$

Gleichermaßen erfolgt hierfür die Fehlerbetrachtung über das Einzeichnen von Grenzgeraden in orange und grün, wobei im Anschluss daran deren Steigungen bestimmt werden:

$$\begin{aligned} \text{Orange: } \alpha_{\min} &= \frac{y}{x} = \frac{0,70 - 0,26}{18,6 - 16,8} = \frac{0,44}{1,8} = 0,24 \frac{\text{mV}}{^{\circ}\text{C}}, \\ \text{Grün: } \alpha_{\max} &= \frac{y}{x} = \frac{0,74 - 0,14}{18,4 - 16,9} = \frac{0,60}{1,5} = 0,40 \frac{\text{mV}}{^{\circ}\text{C}}. \end{aligned}$$

Daraus resultiert durch die Verknüpfung der Steigungen der Fehlerterm für den Seebeck-Koeffizienten

$$\Delta\alpha_{\text{Peltier}} = \frac{\alpha_{\max} - \alpha_{\min}}{2} = 0,08 \frac{\text{mV}}{^{\circ}\text{C}}.$$

## 2 Thermoelektrische Effekte

Insgesamt erhält man für die graphische Ermittlung des Seebeck-Koeffizienten des Peltier-Kühlblocks einen Wert von

$$\alpha_{\text{Peltier, graphisch}} = (0,32 \pm 0,08) \frac{\text{mV}}{\text{°C}}.$$

Alternativ kann nun der Seebeck-Koeffizient des Peltier-Kühlblocks mathematisch mithilfe des im obigen Teilkapitel berechneten Peltier-Koeffizienten des Kühlblocks über die Formel

$$\Pi_{\text{Kühlblock}} = \alpha_{\text{Peltier}} \cdot \Delta T \Rightarrow \alpha_{\text{Peltier}} = \frac{\Pi_{\text{Kühlblock}}}{\Delta T}$$

berechnet werden.

Zur Fehlerbetrachtung wird hierbei der Größtfehler

$$\begin{aligned} \Delta \alpha_{\text{Peltier}} &= \left| \frac{\partial \alpha_{\text{Peltier}}}{\partial \Pi_{\text{Kühlblock}}} \right| \cdot \Delta \Pi_{\text{Kühlblock}} + \left| \frac{\partial \alpha_{\text{Peltier}}}{\partial \Delta T} \right| \cdot \Delta \Delta T \\ &= \frac{1}{\Delta T} \cdot \Delta \Pi_{\text{Kühlblock}} + \frac{\Pi_{\text{Kühlblock}}}{\Delta T^2} \cdot \Delta \Delta T, \end{aligned}$$

mit  $\Delta \Pi_{\text{Kühlblock}} = 0,46 \text{ V}$  und  $\Delta \Delta T = 0,48 \text{ °C}$ , herangezogen.

Das Einsetzen des Peltier-Koeffizienten  $\Pi_{\text{Kühlblock}} = 7,3867 \text{ V}$  und der in Tabelle 2.5 ermittelten Temperaturdifferenz  $\Delta T$ , wobei im Folgenden der Mittelwert aller Temperaturdifferenzen

$$\overline{\Delta T} = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta T_i}{n} = 17,54 \text{ °C}$$

verwendet wird, ergibt sich für den Seebeck-Koeffizienten

$$\alpha_{\text{Peltier, mathematisch}} = \frac{7,3867}{17,54} = (0,42 \pm 0,04) \frac{\text{mV}}{\text{°C}}.$$

Ein Vergleich der graphischen und der mathematischen Ergebnisse

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{Peltier, graphisch}} &= (0,32 \pm 0,08) \frac{\text{mV}}{\text{°C}}, \\ \alpha_{\text{Peltier, mathematisch}} &= (0,42 \pm 0,04) \frac{\text{mV}}{\text{°C}} \end{aligned}$$

ergibt, dass beide Werte, jeweils nach Berücksichtigung der Fehlerterme, innerhalb ihrer Fehlerbereiche übereinstimmen. Es fällt auf, dass der Fehlerbereich der graphischen Auswertung doppelt so groß ist wie der der mathematischen Auswertung. Dies lässt sich vor allem darauf zurückführen, dass die Grenzgeraden in der graphischen Auswertung händisch eingezeichnet werden und dadurch ein größeres subjektives Ermessen bei der Auswertung eintritt, als bei der Abschätzung der Fehler in der mathematischen Berechnung. Da beide Methoden innerhalb der Fehlerbereiche jedoch zu einer Übereinstimmung gelangen, scheint das Ergebnis insgesamt

ausreichend präzise zu sein.

Zuletzt kann nun noch der Seebeck-Koeffizient des Thermoelementes aus dem ersten Teilversuch mit dem Seebeck-Koeffizienten des Kühlblocks verglichen werden:

$$\alpha_{\text{Thermo}} = (0,048 \pm 0,0067) \frac{\text{mV}}{\text{°C}},$$

$$\alpha_{\text{Peltier}} = (0,420 \pm 0,0400) \frac{\text{mV}}{\text{°C}}.$$

Es fällt auf, dass der Seebeck-Koeffizient des Kühlblocks in etwa um den Faktor 10 größer ist als der des Thermoelements. Eine mögliche Begründung für diese Abweichung könnte sein, dass ein Peltier-Kühlblock aus vielen in Reihe geschalteten Peltier-Elementen besteht. Somit addieren sich die Seebeck-Koeffizienten der jeweiligen Elemente bei der Betrachtung des gesamten Kühlblocks auf. Weiterhin ist der Seebeck-Koeffizient materialabhängig. So liegt es nahe anzunehmen, dass das verwendete Thermoelement aus einem anderen Material besteht als der Peltier-Kühlblock. Ebenfalls unterscheiden sich die Messpunkte der beiden verschiedenen Versuchsaufbauten. So wurde im ersten Teilversuch der Seebeck-Koeffizient des Thermoelements durch die Verwendung zweier unterschiedlich warmer Flüssigkeiten (Eiswasser und über die Zeit erhitztes Wasser im Topf) bestimmt, wobei sich die Lötstellen des Thermoelements relativ weit voneinander entfernt befanden, sodass eine punktgenaue Messung möglich war. Für die Bestimmung des Seebeck-Koeffizienten des Kühlblocks wurde dagegen das Temperaturgefälle des Eiswassers und der im Peltier-Kühlblock verbauten Kupferplatte mithilfe des Thermoelements beziehungsweise zeitgleich die Temperatur der (warmen) Unterseite mit dem Thermometer gemessen. Daraus kann im Anschluss die Temperaturdifferenz der Ober- und Unterseite des Kühlblocks bestimmt werden. Jedoch liegen die Ober- beziehungsweise Unterseite des Kühlblocks nah beieinander und trotz der integrierten Wasserkühlung an der Unterseite könnte es dadurch bei der Messung zu möglichen Verfälschungen des Ergebnisses kommen.



# Literatur

- Demtröder, Wolfgang (2017). *Experimentalphysik* 2. 7. Aufl. Kaiserslautern: Springer Spektrum.  
Meschede, Dieter (2010). *Gerthsen Physik*. 24. Aufl. Heidelberg: Springer.  
Universität Augsburg (SoSe 2025). *Versuchsanleitung W9 - Thermoelektrische Effekte*.  
Weber, Reinhart (2007). *Klassische Physik*. 1. Aufl. Bd. Teil I. Wiesbaden: B.G. Teubner.



### 3 Anhang

#### Messergebnisse zur Bestimmung des Seebeck-Koeffizienten des Thermoelements

$U_{th}$ in mV	T in °C	$U_{th}$ in mV	T in °C	$U_{th}$ in mV	T in °C
0,38	20,6	1,44	41,0	2,38	60,9
0,46	20,6	1,49	42,5	2,43	61,3
0,51	20,8	1,54	42,7	2,48	61,9
0,67	24,0	1,59	43,9	2,54	64,2
0,72	25,6	1,69	45,9	2,60	65,1
0,77	26,0	1,75	46,6	2,66	65,8
0,88	27,3	1,85	50,0	2,71	66,2
0,93	27,6	1,91	50,9	2,80	68,9
0,98	30,8	1,96	51,9	2,85	69,9
1,03	33,1	2,01	53,4	2,90	71,3
1,09	33,4	2,06	54,5	2,95	71,8
1,14	34,8	2,11	54,9	3,01	73,0
1,22	35,1	2,16	56,0	3,07	74,3
1,27	36,5	2,21	56,8	3,12	74,8
1,32	38,1	2,26	57,9	3,17	76,4
1,37	39,3	2,33	58,0		

**Tabelle 3.1:** Messergebnisse aus Teilversuch 1 zur Bestimmung des Seebeck-Koeffizienten des Thermoelements.

## Messergebnisse zu Teilversuch 2 zur Bestimmung des Peltier-Koeffizienten des Kühlblocks

$I = 0,80 \text{ A}$	$U_{\text{th}}$ in mV	$t$ in s	$U$ in V	$T_U$ in °C
	0,23	0	2,6	18,4
	0,05	20	2,7	18,3
	-0,07	40	2,8	18,2
	-0,17	60	2,8	18,1
	-0,25	80	2,9	18,0
	-0,30	100	2,9	18,0
	-0,34	120	2,9	18,0
	-0,37	140	3,0	18,0
	-0,39	160	3,0	18,0
	-0,41	180	3,0	18,0
	-0,42	200	3,0	18,0
	-0,43	220	3,0	18,0
	-0,43	240	3,0	18,0
	-0,43	260	3,0	18,0
Mittelwert	-0,27		2,90	18,07

**Tabelle 3.2:** Messergebnisse des Teilversuchs 2 mit der Stromstärke  $I = 0,80 \text{ A}$ .

$I = 1,60 \text{ A}$	$U_{\text{th}}$ in mV	$t$ in s	$U$ in V	$T_U$ in °C
	-0,55	0	5,5	18,4
	-0,67	20	5,6	18,3
	-0,73	40	5,6	18,3
	-0,75	60	5,6	18,2
	-0,77	80	5,6	18,2
	-0,80	100	5,6	18,2
	-0,82	120	5,6	18,3
	-0,83	140	5,7	18,2
	-0,85	160	5,7	18,2
	-0,86	180	5,7	18,2
	-0,87	200	5,6	18,2
	-0,88	220	5,7	18,2
	-0,88	240	5,7	18,3
	-0,87	260	5,7	18,3
	-0,87	280	5,7	18,3
Mittelwert	-0,80		5,64	18,25

**Tabelle 3.3:** Messergebnisse des Teilversuchs 2 mit der Stromstärke  $I = 1,60 \text{ A}$ .

$I = 2,42 \text{ A}$	$U_{\text{th}}$ in mV	$t$ in s	$U$ in V	$T_U$ in °C
	-0,96	0	8,4	18,8
	-0,99	20	8,4	18,8
	-1,03	40	8,4	18,7
	-1,05	60	8,4	18,7
	-1,06	80	8,4	18,7
	-1,08	100	8,4	18,8
	-1,08	120	8,4	18,8
	-1,08	140	8,4	18,8
	-1,09	160	8,4	18,8
	-1,09	180	8,4	18,8
	-1,09	200	8,4	18,9
Mittelwert	-1,05		8,40	18,78

**Tabelle 3.4:** Messergebnisse des Teilversuchs 2 mit der Stromstärke  $I = 2,42 \text{ A}$ .

$I = 3,21 \text{ A}$	$U_{\text{th}}$ in mV	$t$ in s	$U$ in V	$T_U$ in °C
	-1,13	0	11,1	19,4
	-1,15	20	11,1	19,4
	-1,17	40	11,1	19,3
	-1,17	60	11,0	19,3
	-1,18	80	11,1	19,3
	-1,19	100	11,1	19,3
	-1,18	120	11,1	19,4
	-1,18	140	11,1	19,4
	-1,18	160	11,1	19,4
Mittelwert	-1,17		11,09	19,36

**Tabelle 3.5:** Messergebnisse des Teilversuchs 2 mit der Stromstärke  $I = 3,21 \text{ A}$ .

$I = 3,94 \text{ A}$	$U_{\text{th}}$ in mV	$t$ in s	$U$ in V	$T_U$ in °C
	-1,16	0	13,9	20,2
	-1,13	20	13,9	20,2
	-1,11	40	13,9	20,2
	-1,10	60	13,9	20,1
	-1,09	80	13,9	20,1
	-1,04	100	13,9	20,2
	-1,04	120	13,9	20,2
	-1,00	140	13,9	20,2
	-1,00	160	13,9	20,1
	-1,00	180	13,9	20,2
Mittelwert	-1,07		13,90	20,17

**Tabelle 3.6:** Messergebnisse des Teilversuchs 2 mit der Stromstärke  $I = 3,94 \text{ A}$ .

## Messergebnisse zur Bestimmung des Seebeck-Koeffizienten des Peltier-Kühlblocks

	$U_{\text{th}}$ in mV	$t$ in s	$T_U$ in °C	$U_{\text{Pe}}$ in V
	-0,62	0	18,70	11,20
	-0,83	20	18,50	11,30
	-0,91	40	18,40	11,20
	-0,96	60	18,30	11,10
	-0,93	80	18,30	11,10
	-1,00	100	18,30	11,10
	-1,02	120	18,10	11,10
	-1,03	140	18,10	11,10
	-1,05	160	18,10	11,10
	-1,06	180	18,00	11,10
	-1,07	200	17,90	11,10
	-1,08	220	17,90	11,10
	-1,08	240	18,00	11,10
	-1,08	260	17,90	11,10
	-0,84	280	16,50	0,70
	-0,61	300	16,70	0,60
	-0,42	320	16,90	0,50
	-0,28	340	17,00	0,40
	-0,17	360	17,10	0,30
	-0,08	380	17,20	0,20
	0,00	400	17,30	0,20
Mittelwert	-0,77		17,77	7,56

**Tabelle 3.7:** Messergebnisse des Teilversuchs 3 zur Bestimmung des Seebeck-Koeffizienten des Peltier-Kühlblocks.

### 3 Anhang

Versuch 1			
Uth in mV	Tropf in °C	Uth in mV	Tropf in °C
0,38	20,6	2,54	64,2
0,46	weg- lassen	2,60	65,1
0,51	20,6	2,66	65,8
0,56	20,8	2,71	66,2
0,67	21,7	2,80	68,9
0,72	24,0	2,85	69,9
0,77	25,6	2,90	71,3
0,81	26,0	2,95	71,8
0,93	27,3	3,01	73,0
0,98	27,6	3,07	74,3
1,03	30,8	3,12	74,8
1,09	33,1	3,17	76,4
1,14	33,4		/ dfl
1,22	34,8		
1,27	35,1		
1,32	36,5		
1,37	38,1		
1,44	39,3		
1,49	41,0		
1,54	42,5		
1,59	42,7		
1,69	43,9		
1,75	45,9		
1,80	46,6		
1,85	49,5		
1,91	50,0		
1,96	50,9		
2,01	51,9		
2,06	53,4		
2,11	54,5		
2,16	54,9		
2,21	56,0		
2,26	56,8		
2,33	57,9		
2,38	58,0		
2,43	60,9		
2,48	61,3		
	61,9		

Uth ↗

$I = 0,00A$

Versuch 2

$U_{th}$ in mV	t in s	U in V	T <sub>u</sub> in °C
0,30	0	0,00	18,1
0,31	20	0,00	18,1
0,31	40	0,00	18,1
0,31	60	0,00	18,1

$I = 0,8 A$

$U_{th}$ in mV	t in s	U in V	T <sub>u</sub> in °C	$U_{th}$ in mV	t in s	U in V	T <sub>u</sub> in °C
-0,23	0	2,60	18,4	-0,42	200	3,0	18,0
-0,05	20	2,70	18,3	-0,43	220	3,0	18,0
-0,07	40	2,80	18,2	-0,43	240	3,0	18,0
-0,17	60	2,80	18,1	-0,43	260	3,0	18,0
-0,25	80	2,90	18,0				
-0,30	100	2,90	18,0				
-0,34	120	2,90	18,0				
-0,37	140	3,00	18,0				
-0,39	160	3,00	18,0				
-0,41	180	3,00	18,0				

$I = 1,6 A$

$U_{th}$ in mV	t in s	U in V	T <sub>u</sub> in °C	$U_{th}$ in mV	t in s	U in V	T <sub>u</sub> in °C
-0,55	0	5,5	18,4	-0,88	240	5,7	18,3
-0,67	20	5,6	18,3	-0,87	260	5,7	18,3
-0,73	40	5,6	18,3	-0,87	280	5,7	18,3
-0,75	60	5,6	18,2				
-0,77	80	5,6	18,2				
-0,80	100	5,6	18,2				
-0,82	120	5,6	18,3				
-0,83	140	5,7	18,2				
-0,85	160	5,7	18,2				
-0,86	180	5,7	18,2				
-0,87	200	5,7	18,2				
-0,88	220	5,7	18,2				

Versuch 2

 $I = 2,42 \text{ A}$ 

$U_{th}$ in mV	t in s	U in V	$T_u$ in °C
-0,96	0	8,4	18,8
-0,99	20	8,4	18,8
-1,03	40	8,4	18,7
-1,05	60	8,4	18,7
-1,06	80	8,4	18,7
-1,08	100	8,4	18,8
-1,08	120	8,4	18,8
-1,08	140	8,4	18,8
-1,08	160	8,4	18,8
-1,09	180	8,4	18,8
-1,09	200	8,4	18,9

 $I = 3,21 \text{ A}$ 

$U_{th}$ in mV	t in s	U in V	$T_u$ in °C
-1,13	0	11,1	19,4
-1,15	20	11,1	19,4
-1,17	40	11,1	19,3
-1,17	60	11,0	19,3
-1,18	80	11,1	19,3
-1,18	100	11,1	19,3
-1,18	120	11,1	19,4
-1,18	140	11,1	19,4
-1,18	160	11,1	19,4

 $I = 3,94 \text{ A}$ 

$U_{th}$ in mV	t in s	U in V	$T_u$ in °C
-1,16	0	13,9	20,2
-1,13	20	13,9	20,2
-1,11	40	13,9	20,2
-1,10	60	13,9	20,1
-1,09	80	13,9	20,1
-1,04	100	13,9	20,2
-1,04	120	13,9	20,2
-1,00	140	13,9	20,2
-1,00	160	13,9	20,1
-1,00	180	13,9	20,2

/dmp

Minimale Temperatur bei  $I = 3,22A$

Versuch

$U_{th}$ in mV	$t$ in s	$T_u$ in °C	$U_{pe}$ in V
-0,62	0	18,7	11,2
-0,83	20	18,5	11,3
-0,91	40	18,4	11,2
-0,96	60	18,3	11,1
-0,93	80	18,3	11,1
-1,00	100	18,3	11,1
-1,02	120	18,1	11,1
-1,03	140	18,1	11,1
-1,05	160	18,1	11,1
-1,06	180	18,0	11,1
-1,07	200	17,9	11,1
-1,08	220	17,9	11,1
-1,08	240	18,0	11,1
-1,08	260	17,9	11,1
-0,84	280	16,5	0,7
-0,61	300	16,7	0,6
-0,42	320	16,9	0,5
-0,28	340	17,0	0,4
-0,17	360	17,1	0,3
-0,08	380	17,2	0,2
-0,00	400	17,3	0,2 / 