

V48

## **Dipolrelaxation in Ionenkristallen**

Celina Wieberg

celina.wieberg@tu-dortmund.de

Aaron Schink

aaron.schink@tu-dortmund.de

Durchführung: 29.1.2025

Abgabe: 10.02.2025

TU Dortmund – Fakultät Physik

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Zielsetzung</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Theorie</b>	<b>3</b>
2.1	Ionenkristalle . . . . .	3
2.2	Dipolrelaxation . . . . .	4
2.3	Aktivierungsenergie über den Polarisationsansatz . . . . .	5
2.4	Aktivierungsenergie und charakteristische Relaxationszeit über die Strom- dichte . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Durchführung</b>	<b>6</b>
3.1	Aufbau und Ablauf . . . . .	6
3.2	Tatsächliche Durchführung . . . . .	8
<b>4</b>	<b>Auswertung</b>	<b>8</b>
4.1	Fehler . . . . .	8
4.2	Heizraten . . . . .	9
4.3	Hintergrundsignale und Datenbereinigung . . . . .	10
4.4	Berechnung über den Polarisationsansatz . . . . .	13
4.5	Berechnung aus der Stromdichte . . . . .	14
4.6	Relaxationszeit in Abhängigkeit der Temperatur . . . . .	15
<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>17</b>
<b>6</b>	<b>Originaldaten</b>	<b>18</b>
	<b>Literatur</b>	<b>23</b>

# 1 Zielsetzung

Es werden die charakteristische Relaxationszeit  $\tau_0$  und die Aktivierungsenergie  $W$  von ermittelt, um die Relaxationszeit  $\tau(T)$  zu bestimmen.

## 2 Theorie

Bei der TSDC (Thermally stimulated depolarization current) werden Dipole in einem kalten Ionenkristall erzeugt und der entstehende Strom  $I$  beim Aufwärmen gemessen. Über den Verlauf des Stromes  $I$  in Abhängigkeit von der Temperatur  $T$  lassen sich Aussagen über die Aktivierungsenergie  $W$  und schlussendlich über die Relaxationszeit  $\tau$  treffen.

### 2.1 Ionenkristalle

Ordnen sich Anionen und Kationen in einer regelmäßigen Kristallstruktur an, spricht man von Ionenkristallen. Die Bindungskraft ist die elektrostatische Anziehungskraft zwischen den involvierten Ionen, eine sehr starke Kraft, weshalb die Schmelztemperatur von Ionenkristallen sehr hoch ist [1].

In Ionenkristallen gibt es verschiedene Defekte. So kann eine Gitterstelle unbesetzt sein, mit einem Fremdatom besetzt sein oder es können Zwischengitterplätze belegt sein, schematisch zu sehen in Abbildung 1.

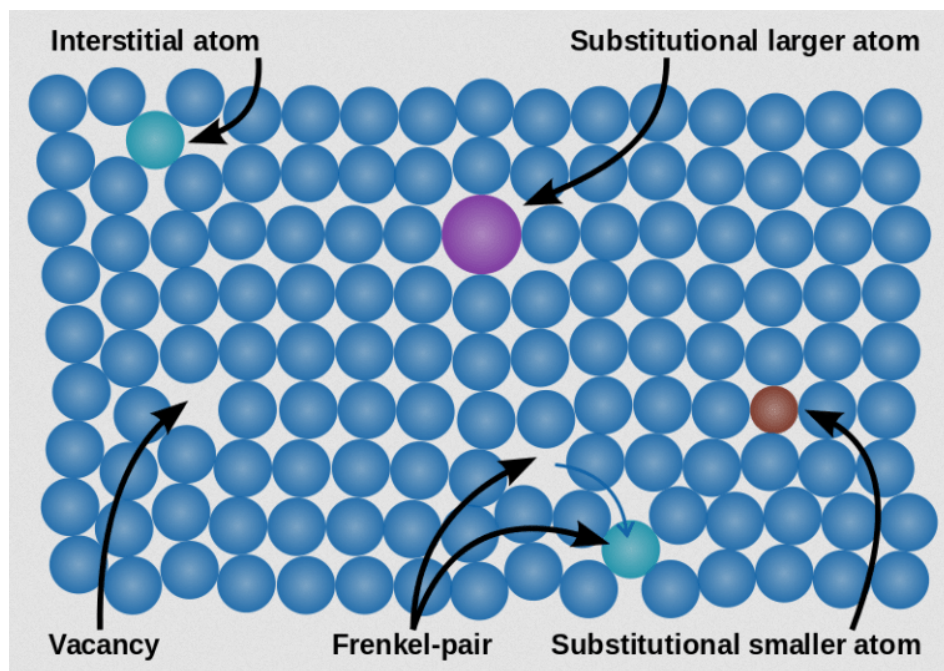


Abbildung 1: Schematische Darstellung von Defekten in Kristallstrukturen [5].

Ein idealer Kristall besteht zwar aus geladenen Teilchen, aber die Verhältnisse der Ladungsträger sorgen dafür, dass der Kristall insgesamt nach außen hin elektrisch neutral ist.

Wird nun ein Fremdatom mit einer anderen Ladung  $q_i$  in das Gitter eingeführt, beispielsweise ionisiertes Strontium mit einer zweifach positiven Ladung in ein Cäsium-Iodid-Kristall, wo das Cäsium nur einfach positiv geladen ist, dann ist der Kristall lokal um das Strontium positiv geladen. Um für die zweifache positive Ladung zu kompensieren, kommt es zu Veränderungen innerhalb des Kristalls, z.B. durch die Verschiebung von Cäsium oder Iodid, sodass der Kristall elektrisch neutral wird. Dabei entstehen Dipole  $\vec{p}_i$  zwischen dem Strontium und den Cäsium-Leerstellen oder den verschobenen Iodid-Atomen. Diese Dipole sind bei Raumtemperatur zufällig verteilt, sodass der Kristall ein gesamtes Dipolmoment von 0 hat,

$$\vec{p} = \sum_i \vec{p}_i = \sum_i q_i \cdot \vec{r}_i = 0,$$

dabei ist  $\vec{r}_i$  der Abstand der Ladungsträger in den einzelnen Dipolen.

## 2.2 Dipolrelaxation

Wird ein elektrisches Feld  $\vec{E}$  angelegt, können sich diese Dipole rotieren. Gemäß

$$E_{\text{pot}} = -\vec{p} \cdot \vec{E}$$

ist die energetisch günstigste Orientierung erreicht, wenn die Dipole parallel zum Feld liegen. Dies ist nur unter der Anwesenheit eines elektrischen Feldes der Fall. Die Orientierung der Dipole kann nun festgehalten werden, wenn man den Kristall stark kühlt. Wird das elektrische Feld nun ausgeschaltet, benötigen die Dipole eine gewisse Energie  $W$ , genannt Aktivierungsenergie, um das Coulomb-Potential des Ionengitters zu überwinden und die nun energetisch günstigere zufällige Orientierung anzunehmen. Von Interesse ist dabei die Zeit  $\tau$ , die vergeht, bis der Kristall wieder entpolarisiert ist. Aufgrund der thermischen Natur lässt sich dieser Vorgang mit der Arrhenius-Gleichung [6]

$$\tau(T) = \tau_0 e^{\frac{W}{k_B T}} \quad (1)$$

beschreiben. Die sogenannte Relaxationszeit  $\tau(T)$  hängt dabei von der Aktivierungsenergie  $W$  und der Temperatur  $T$  ab. Weiterhin ist  $\tau_0$  die charakteristische Relaxationszeit des Materials und  $k_B$  die Boltzmannkonstante. Bei hohen Temperaturen strebt der exponentielle Faktor gegen 1 und die Relaxationszeit wird zur charakteristischen. Bei niedrigen Temperaturen wird derselbe Faktor sehr groß und die Relaxationszeit nimmt exponentiell zu. Anschaulich bedeutet das, dass die Wahrscheinlichkeit, aus thermischen Fluktuationen genug Energie zu kriegen, um die Aktivierungsenergie zu überwinden, bei niedrigen Temperaturen sehr klein ist und die mittlere Zeit, bis ein Dipol seine Orientierung ändert, entsprechend wächst.

Wird die kalte, polarisierte Probe nun mit einer konstanten Heizrate  $b$  erwärmt, erhalten die Teilchen mehr Energie. Mit dieser Energie können sich unter anderem

einzelne gebundene Ladungsträger aus Unreinheiten lösen (Trapped Charges), wenn sie das bindende Potential überwinden können. Viel prominenter aber ist die Reorientierung der Dipole, sobald diese ihre Aktivierungsenergie  $W$  erhalten. Diese Reorientierung (und zum kleinen Teil die nun freien Ladungsträger) in energetisch günstigere Zustände sorgen für einen messbaren Strom, dem Depolarization Current.

Der Depolarization Current lässt sich über folgenden Gedanken quantifizieren [6]:

$$I(T) \propto (\text{Polarisation pro Dipol}) \cdot (\text{Anzahl teilnehmender Dipole}) \cdot (\text{Dipolrelaxationsrate})$$

Die Dipolrelaxationsrate ist das Inverse der Relaxationszeit  $\tau_0$ . Die Polarisation pro Dipol  $P$  lässt sich über die Debye-Theorie schreiben als

$$P = \frac{\bar{p}^2 |\vec{E}|}{3k_B T}. \quad (2)$$

Die Anzahl teilnehmender Dipole  $N(T)$  lässt sich bestimmen über

$$N(T) = N_p \exp \left( \frac{-1}{b\tau_0} \int_{T_0}^T \exp \left( \frac{-W}{k_B T'} \right) dT' \right), \quad (3)$$

wobei  $N_p$  die Anzahl ursprünglich parallel orientierter Dipole ist und  $T_0$  die Starttemperatur,  $T$  die Temperatur zu einem bestimmten Zeitpunkt bei der Aufwärmung ist. Für den Strom gilt somit

$$I(T) = \frac{\bar{p}^2 |\vec{E}|}{3k_B T_1} \cdot N_p \exp \left( \frac{-1}{b\tau_0} \int_{T_0}^{T'} \exp \frac{-W}{k_B T'} \right) \cdot \frac{1}{\tau_0} e^{\frac{-W}{k_B T}}. \quad (4)$$

$T_1$  ist die Temperatur, bei der das elektrische Feld angelegt wurde. Gleichung 4 hat ein Maximum bei  $T_{\max}$ , dessen Lage in  $T$  unabhängig von den anderen Temperaturen ist. Damit lässt sich die charakteristische Relaxationszeit  $\tau_0$  berechnen zu

$$\tau_0 = \frac{k_B T_{\max}^2}{bW} \cdot \exp \left( \frac{-W}{k_B T_{\max}} \right). \quad (5)$$

### 2.3 Aktivierungsenergie über den Polarisationsansatz

Ist  $W$  groß im Vergleich zur thermischen Energie  $k_B T$  und die Temperaturdifferenz  $T - T_0$  klein, so nähert sich für das Integral in Gleichung 3

$$\int_{T_0}^{T'} \exp \frac{-W}{k_B T'} dT' \approx 0$$

und für den Strom gilt

$$\ln I(T) \approx C - \frac{W}{k_B} (T^{-1}). \quad (6)$$

Über eine lineare Regression lässt sich somit  $W$  berechnen [6].

## 2.4 Aktivierungsenergie und charakteristische Relaxationszeit über die Stromdichte

Das Integral des Depolarization Currents  $I(T)$  ist proportional zur Polarisierung  $P$ ,

$$\int_{T_0}^{T_1} I(T) dT = P_0 A = \frac{N\vec{p} |\vec{E}|}{3k_B T},$$

mit der Probenoberfläche  $A$  und der Polarisierung  $P_0$  zur Temperatur  $T_0$ . Über die Änderung der Polarisierung ausgezeichnet durch die Stromdichte lässt sich folgende Gleichung herleiten.

$$\ln(\tau) = \ln(\tau_0) + \frac{W}{k_B T} = \ln\left(\int_{t(T)}^{\infty} I(T(t')) dt'\right) - \ln(I(T)) \quad (7)$$

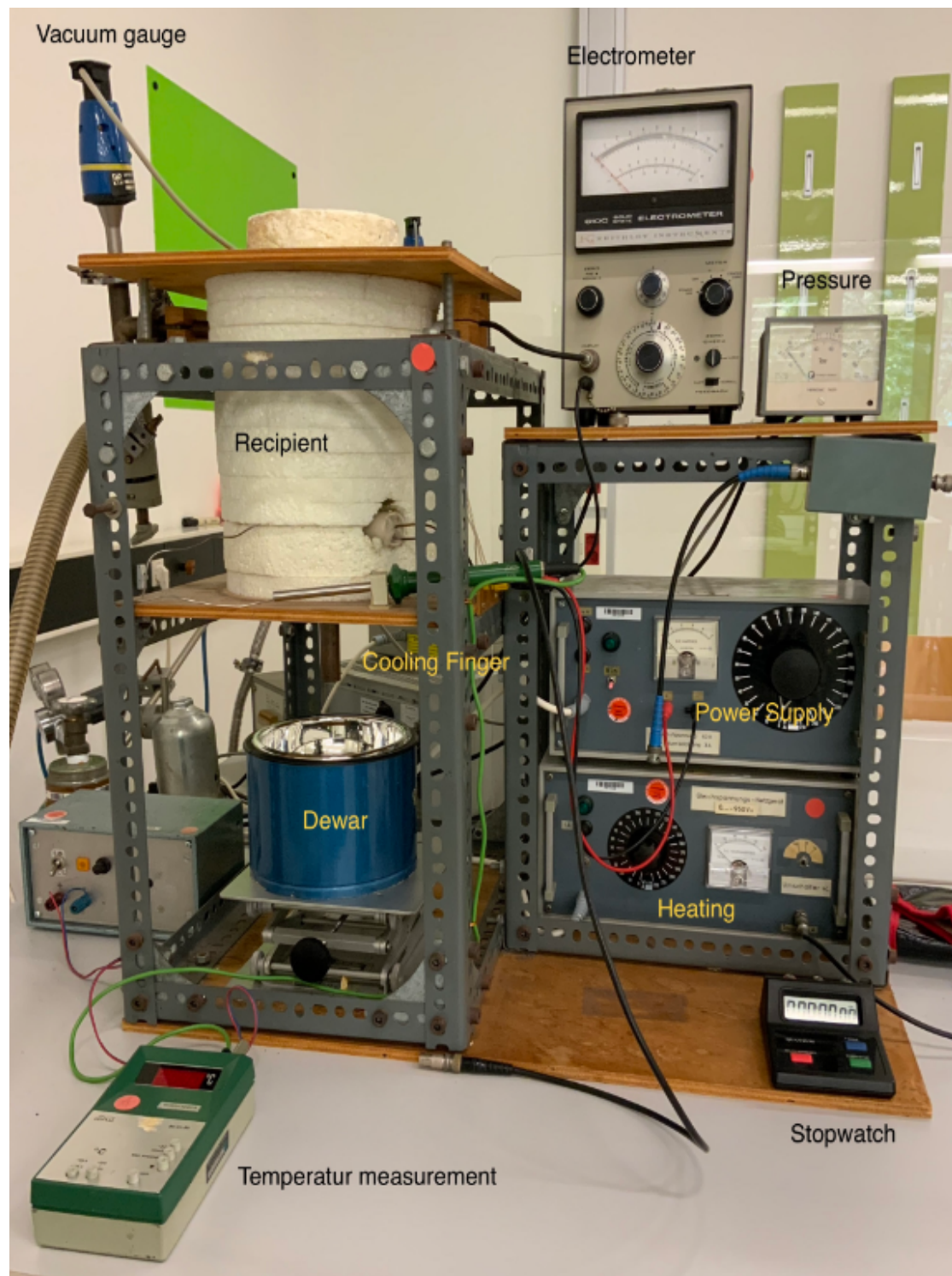
Über ein numerisches Integral lassen sich somit auch  $W$  und  $\tau_0$  bestimmen [6].

## 3 Durchführung

Es wird eine Kaliumbromid-Probe untersucht.

### 3.1 Aufbau und Ablauf

Abbildung 2 zeigt den Versuchsaufbau.



Mit einer Drehschieberpumpe wird im Rezipienten, wo sich die Probe befindet, ein Vakuum von  $10 \cdot 10^{-2}$  mbar aufrechterhalten, damit das hygroskopische Salz vor insbesondere Luftfeuchtigkeit geschützt ist, die die Messung beeinflusst. Die Probe liegt auf einer Platte mit einem Kühlfinger auf, der aus dem Rezipienten rausragt und für die Kühlung in einen mit flüssigen Stickstoff gefüllten Dewar geführt werden kann. Um die Probe zu erhitzen, ist eine Heizwicklung im Rezipienten verbaut. Für die Temperaturmessung ist des Weiteren ein Thermometer verbaut. Um die Probe zu polarisieren, liegt eine weitere Metallplatte auf der Probe, die mit der Auflageplatte des Kühlfingers einen Plattenkondensator bildet. Für die Strommessung wird der Plattenkondensator umverkabelt und an ein Elektrometer angeschlossen.

Zu Beginn einer Messung muss die Probe auf bis zu  $50^\circ\text{C}$  erwärmt werden, damit gewährleistet ist, dass möglichst viele Dipole sich entlang des elektrischen Feldes ausrichten können. Bei dieser Temperatur wird für 900 s ein elektrisches Gleichfeld mit einer Spannung von ungefähr 950 V aufgebaut. Der Dewar wird mit flüssigem Stickstoff gefüllt und der Kühlfinger in die Flüssigkeit eingetaucht, bis die Probe eine Temperatur von ungefähr  $-50^\circ\text{C}$  hat. Das elektrische Feld wird abgeschaltet und der Plattenkondensator für weitere 5 Minuten kurzgeschlossen, um ihn zu entladen. Danach wird das Elektrometer und das Heizelement angeschlossen. Zwischen der Starttemperatur  $T_0 = -50^\circ\text{C}$  und der Endtemperatur  $T_{\text{end}} = 30^\circ\text{C}$  wird minütlich die Temperatur und der Strom gemessen.

### 3.2 Tatsächliche Durchführung

Es wurden zwei Messreihen mit zwei verschiedenen Heizraten, d.h. mit zwei verschiedenen Heizspannungen, durchgeführt. Die erste Erhitzung beider Messreihen lief, bis die Probe ungefähr  $55^\circ\text{C}$  hatte, wobei das Gleichfeld angeschaltet wurde, als die Probe ungefähr  $40^\circ\text{C}$  heiß war. Das Feld wurde während der Abkühlung ausgeschaltet und die Platten bei ungefähr  $-45^\circ\text{C}$  kurzgeschlossen. Die Starttemperatur betrug in beiden Fällen  $-60^\circ\text{C}$ . Für die erste Messreihe wird eine Heizspannung von ungefähr 70 V eingestellt, für die zweite eine von ungefähr 80 V. Mit einer Stoppuhr wurde minütlich die Temperatur und der Strom gemessen, wobei die beiden Messungen aufgrund der Zeit zum Ablesen des sensiblen Picoampèremeters nicht zeitgleich stattfanden, sondern mit einem Abstand von ungefähr 10 Sekunden. Die Endtemperatur betrug in beiden Fällen ungefähr  $20^\circ\text{C}$ .

## 4 Auswertung

Für die Auswertung wird die Python-Bibliothek `numpy` [2] benutzt. Die Fits entstehen mit `curve_fit` aus `scipy.optimize` [7]. Die Fehlerrechnung wird mit `uncertainties` [4] durchgeführt. Plots entstehen mit `matplotlib.pyplot` [3].

### 4.1 Fehler

Der Mittelwert  $\bar{x}$  von  $N$  gemessenen Werten  $a$  bestimmt sich über

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i, \quad (8)$$



der Fehler des Mittelwertes über

$$\Delta x = \sqrt{\frac{1}{N \cdot (N-1)} \sum_{i=1}^N (a_i - \bar{x})^2}. \quad (9)$$

Die Gaußsche Fehlerfortpflanzung für eine berechnete Größe  $f$  lautet

$$\Delta f = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left( \frac{\delta f}{\delta x_i} \right)^2 \cdot (\Delta x_i)^2}. \quad (10)$$

Prozentuale Abweichungen werden mit

$$\Delta x = \left| \frac{x - a}{a} \right| \quad (11)$$

berechnet, wobei  $a$  ein Vergleichswert und  $x$  der erhaltene Wert ist.

## 4.2 Heizraten

Zur Bestimmung der Heizraten wurden die Temperaturen gegen die Zeit aufgetragen. Dazu wurden die Einheit von  $^{\circ}\text{C}$  in  $\text{K}$  umgerechnet. Aus den Daten wurde eine lineare Funktion der Form

$$I(t) = a_i t + b_i \quad (12)$$

gebildet um die Heizraten zu ermitteln. Der Einfachheit halber ist bei den Strömen eine Unsicherheit von  $0,05 \cdot 10^{-11} \text{ A}$  angenommen worden, obwohl dieser kleiner sein könnte. Für die Temperatur wurde ein Fehler von  $0,3 \text{ K}$  angenommen.

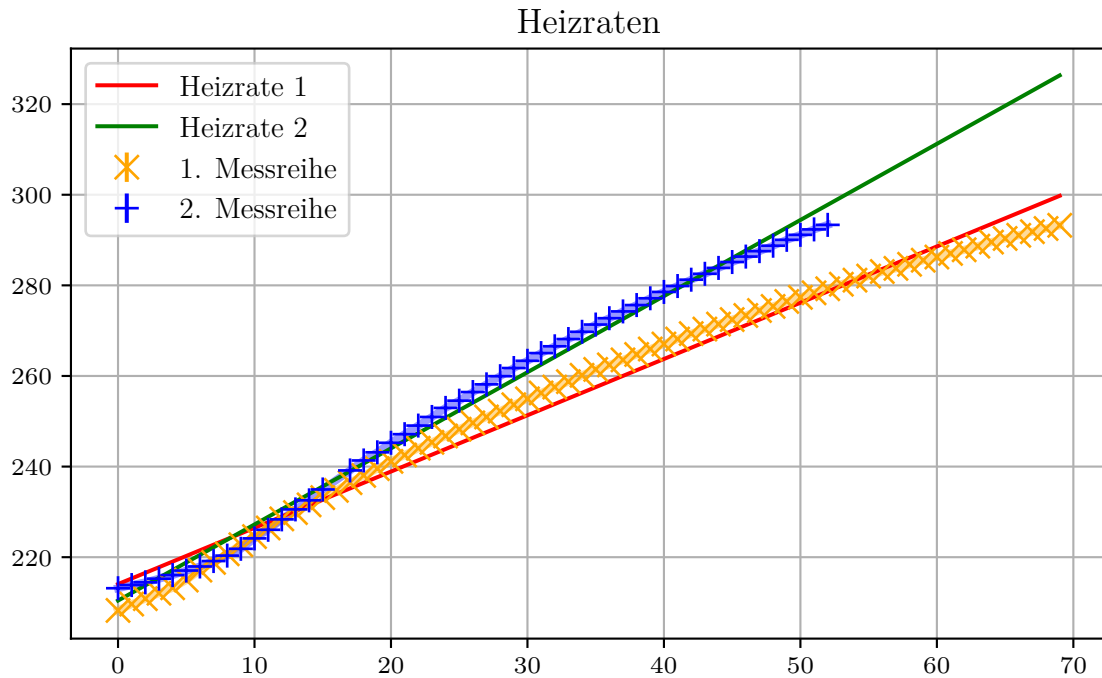


Abbildung 3: Die Heizraten für beide Messreihen

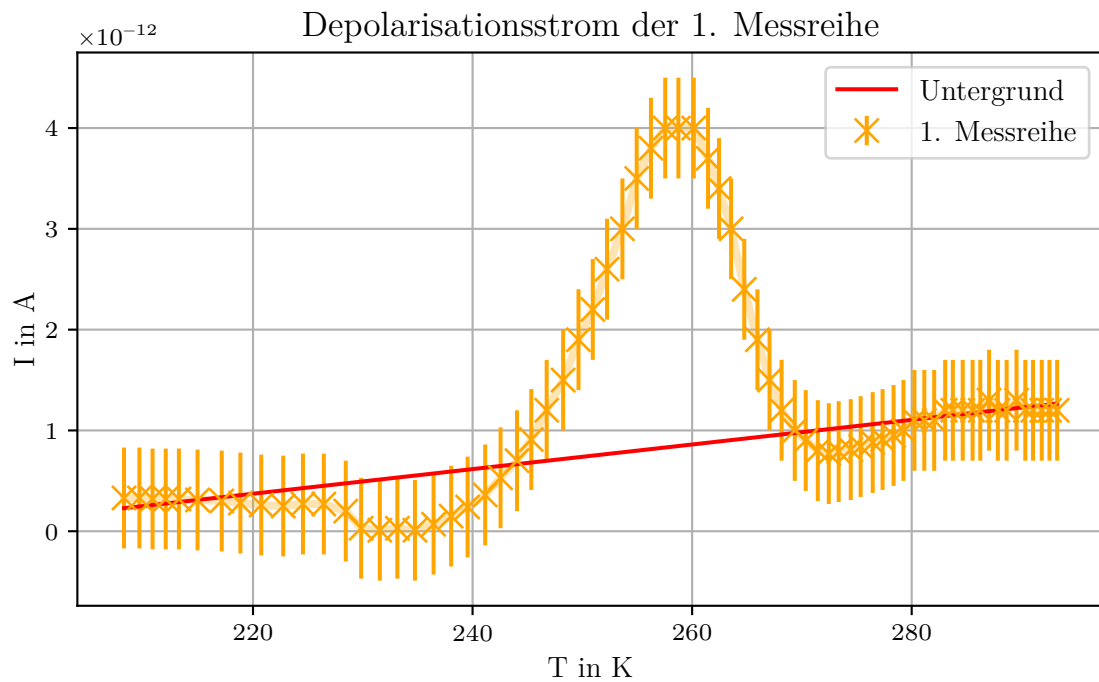
Die Heizraten für die beide Messreihen ergeben sich zu:

$$b_1 = (1,24 \pm 0,01) \frac{\text{K}}{\text{min}}$$

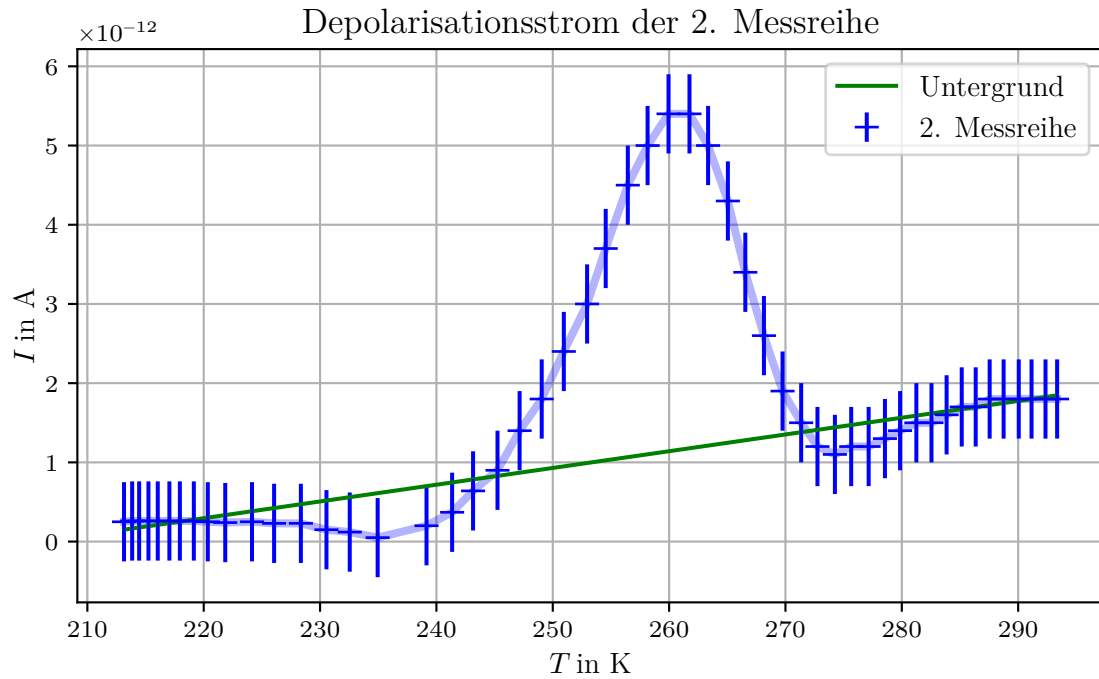
$$b_2 = (1,67 \pm 0,02) \frac{\text{K}}{\text{min}}$$

### 4.3 Hintergrundsignale und Datenbereinigung

In Abbildung 4 und 5 werden die Messdaten grafisch dargestellt. Für die Analyse wird ein linearer Hintergrund angenommen, der mithilfe einer Ausgleichsgeraden berechnet wird.



**Abbildung 4:** Der erste Datensatz zusammen mit der linearen Regression des Hintergrundes für die erste Messreihe.



**Abbildung 5:** Der zweite Datensatz zusammen mit der linearen Regression des Hintergrundes für die zweite Messreihe.

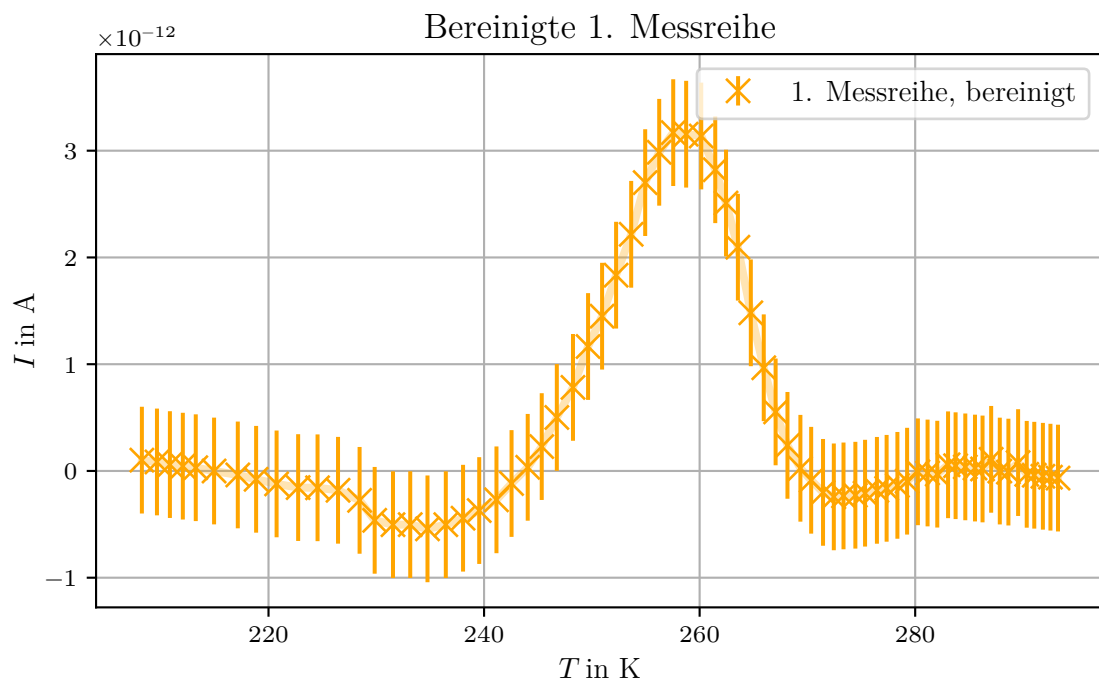
Die Parameter der Ausgleichsfunktion lauten:

$$f(t) = (0,0122 \pm 0,0004) \frac{\text{A}}{\text{K}} \cdot T_i - (2,315 \pm 0,098) \text{ A}$$

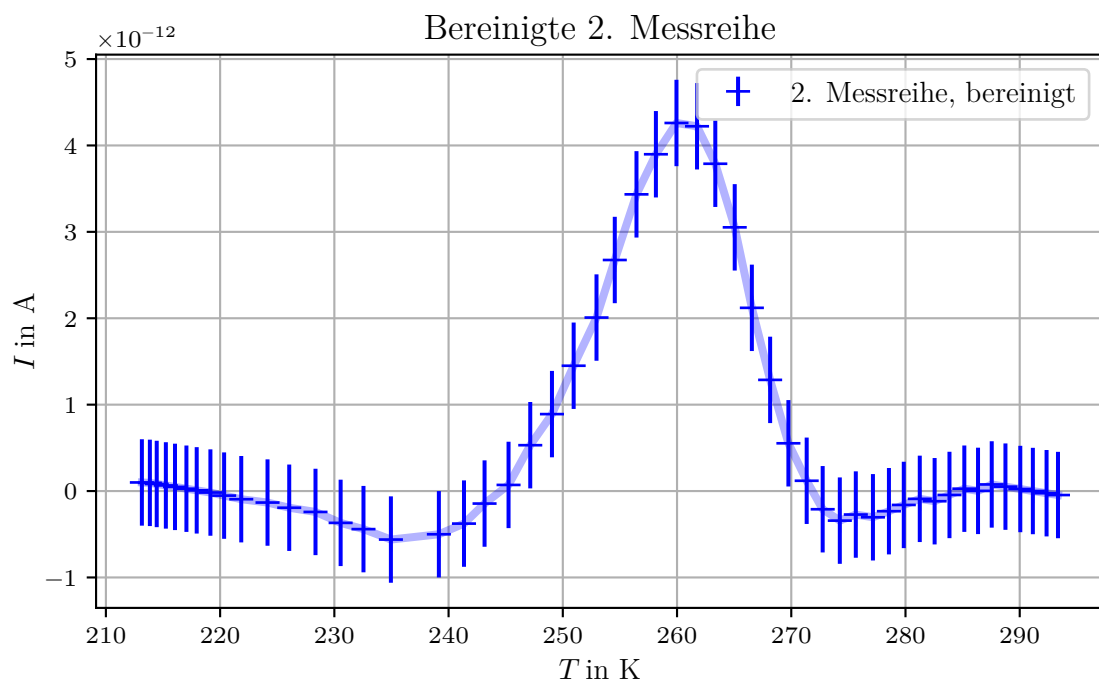
$$f(t) = (0,0211 \pm 0,0005) \frac{\text{A}}{\text{K}} \cdot T_i - (4,356 \pm 0,121) \text{ A}$$

Diese lineare Funktion wird verwendet, um den Einfluss des Hintergrundes auf die Messreihe zu beschreiben und zu korrigieren, sodass nur die relevanten Effekte des Depolarisationsstroms analysiert werden. Um die Messdaten von dem Hintergrund zu bereinigen wird er von den Daten subtrahiert.

Die bereinigten Messwerte sind in Abbildung 6 und 7 zu sehen.



**Abbildung 6:** Die bereinigte erste Messreihe.



**Abbildung 7:** Die bereinigte zweite Messreihe.

Für die Fits sind insbesondere die gaußähnlichen Datenpunkte relevant in Abbildung 8 sind diese dargestellt.

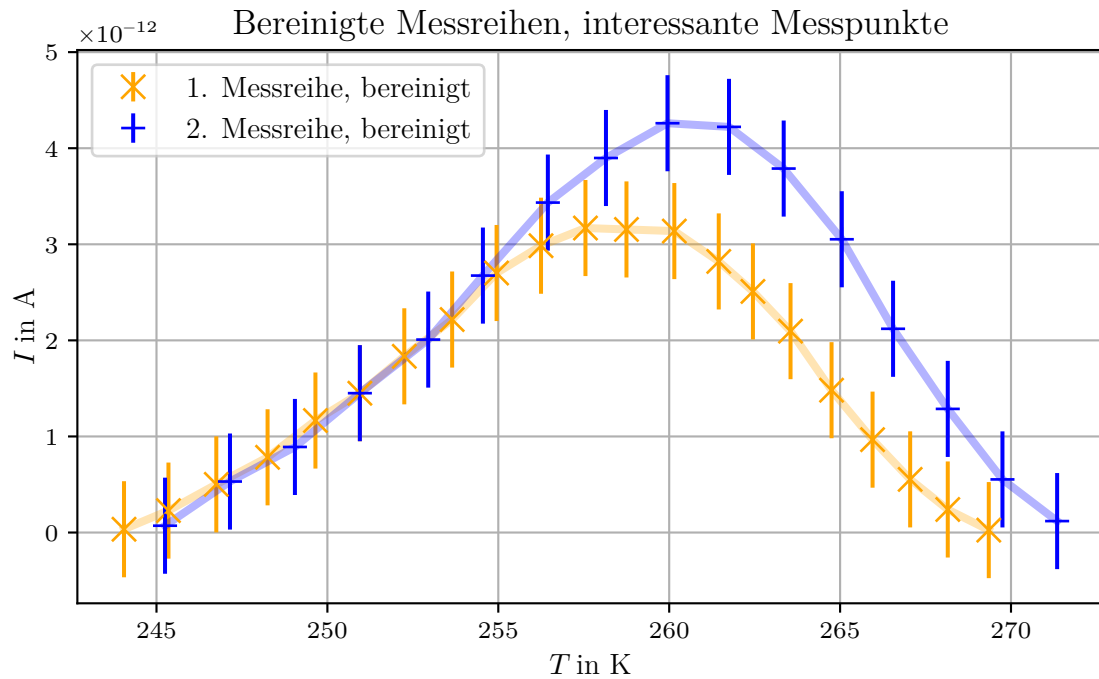
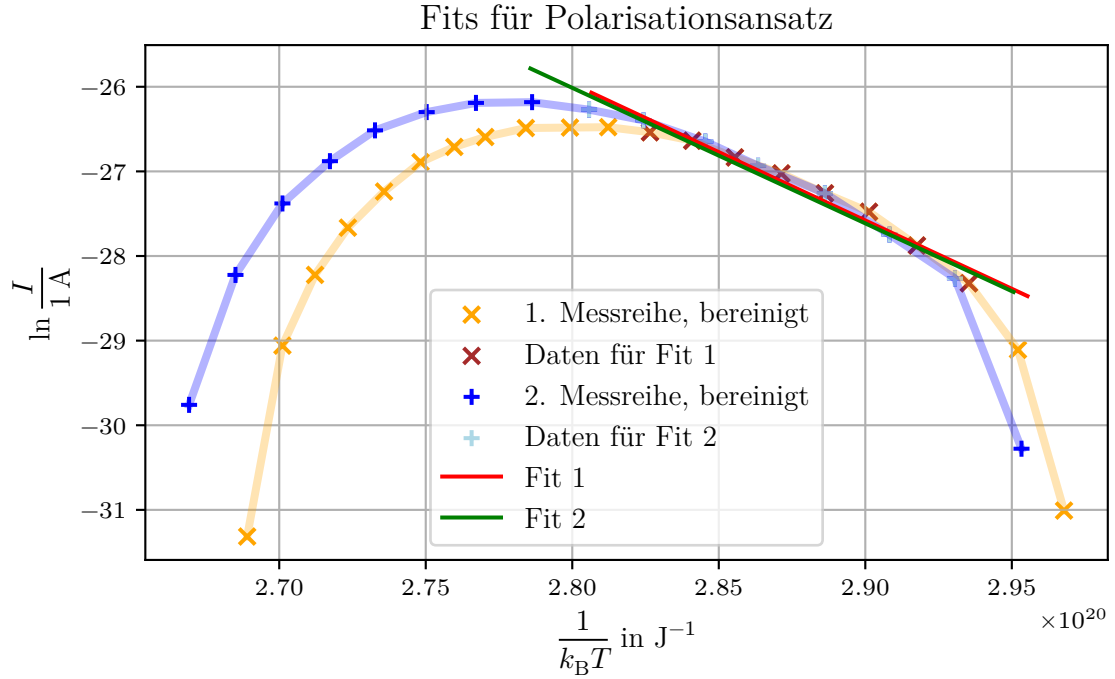


Abbildung 8: Die relevanten Punkte der bereinigten Daten .

#### 4.4 Berechnung über den Polarisationsansatz

Der Logarithmus des gemessenen Stroms wird geplottet, und die Daten im kleinen Temperaturbereich werden durch eine lineare Funktion angenähert. Die entsprechenden Ausgleichsgeraden sind in Abbildung 9 dargestellt.



**Abbildung 9:** Plot von  $\ln\left(\frac{I}{I_A}\right)$  gegen  $1/(k_B T)$ .

Die Aktivierungsenergie  $W$  wird nach Gleichung 6 berechnet. Es ergeben sich für die beiden Messreihen folgende Aktivierungsenergien:

$$W_1 = (1,614 \pm 0,118) \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$W_2 = (1,601 \pm 0,121) \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$C_i$  ist eine Konstante,

$$C_1 = (1,921 \pm 0,340) \cdot 10^1$$

$$C_2 = (1,883 \pm 0,346) \cdot 10^1$$

Die Relaxationszeit  $\tau_i$  erhält man aus Gleichung 5,

$$\tau_1 = (8,63 \pm 0,29) \cdot 10^{-20} \text{ s}$$

$$\tau_2 = (1,44 \pm 4,97) \cdot 10^{-19} \text{ s}$$

#### 4.5 Berechnung aus der Stromdichte

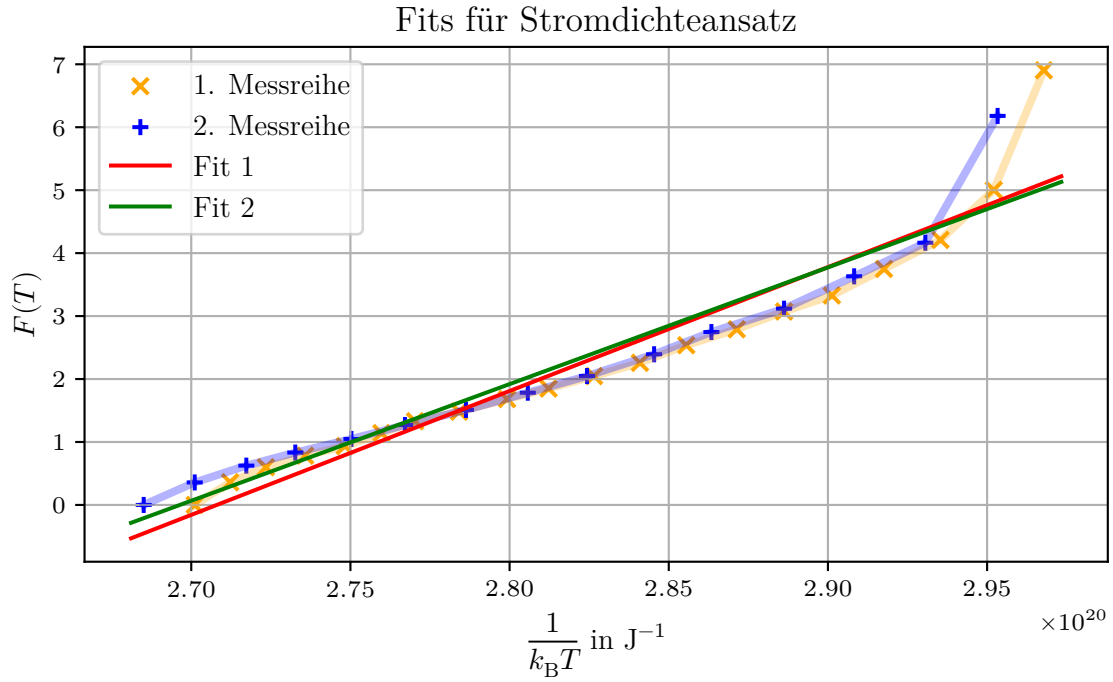
Unter Verwendung von Gleichung 7 wird die Aktivierungsenergie über den beschriebenen Ansatz der Stromdichte berechnet. Es wird die Hilfsfunktion über eine einfache Summe integriert und linear interpoliert. Es wird das Integral  $I(T)$  benötigt und die Funktion

$$f(T) = \ln \left( \int_{t(T)}^{\infty} I(t') dt' \right) - \ln I(T) \quad (13)$$

berechnet die den in 10 Plot liefert. Einige der korrigierten Daten ergaben negative Ströme, die aus der Analyse ausgeschlossen wurden, da sie für den untersuchten Effekt irrelevant sind. Außerdem kann die Funktion  $f(T)$  für negative Ströme nicht bestimmt werden. Die Daten werden durch eine Gerade der Form

$$f(T) = \frac{a_i}{k_B T} + b_i \quad (14)$$

genähert.



**Abbildung 10:** Plot von  $f(T)$  gegen  $1/k_B T$  auf logarithmischer Skala.

Die Aktivierungsenergie werden als

$$W_1 = (1,97 \pm 0,14) \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$W_2 = (1,85 \pm 0,15) \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

bestimmt. Die Relaxationszeiten ergeben sich zu

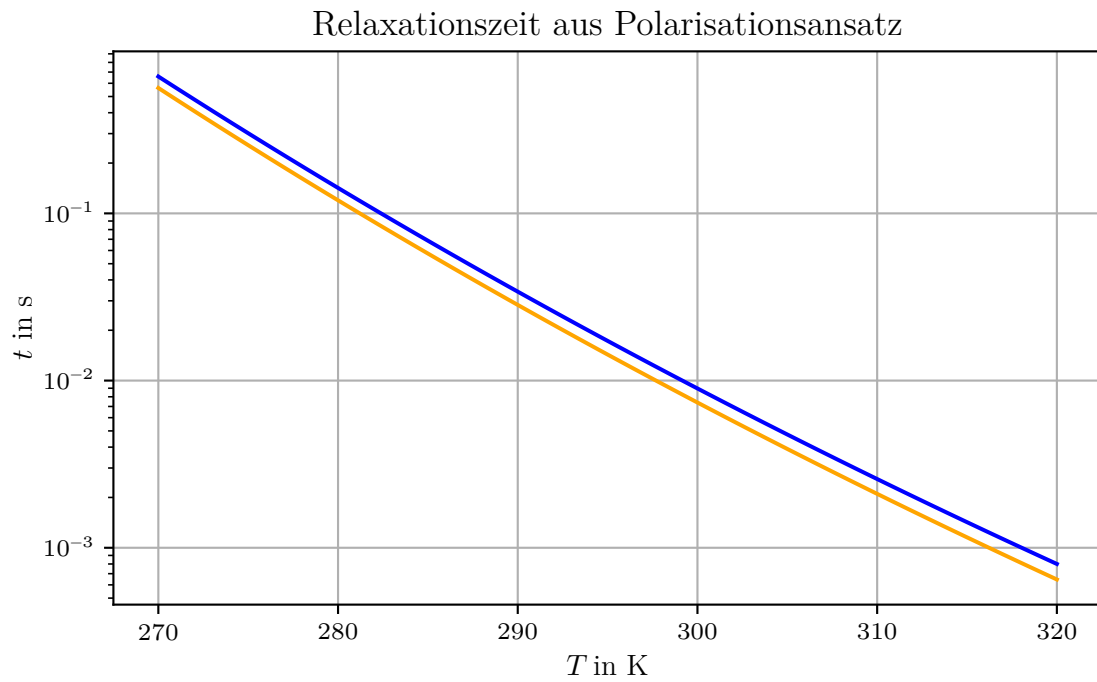
$$\tau_1 = (0,7 \pm 2,9) \cdot 10^{-23} \text{ s}$$

$$\tau_2 = (2 \pm 8) \cdot 10^{-22} \text{ s}$$

#### 4.6 Relaxationszeit in Abhängigkeit der Temperatur

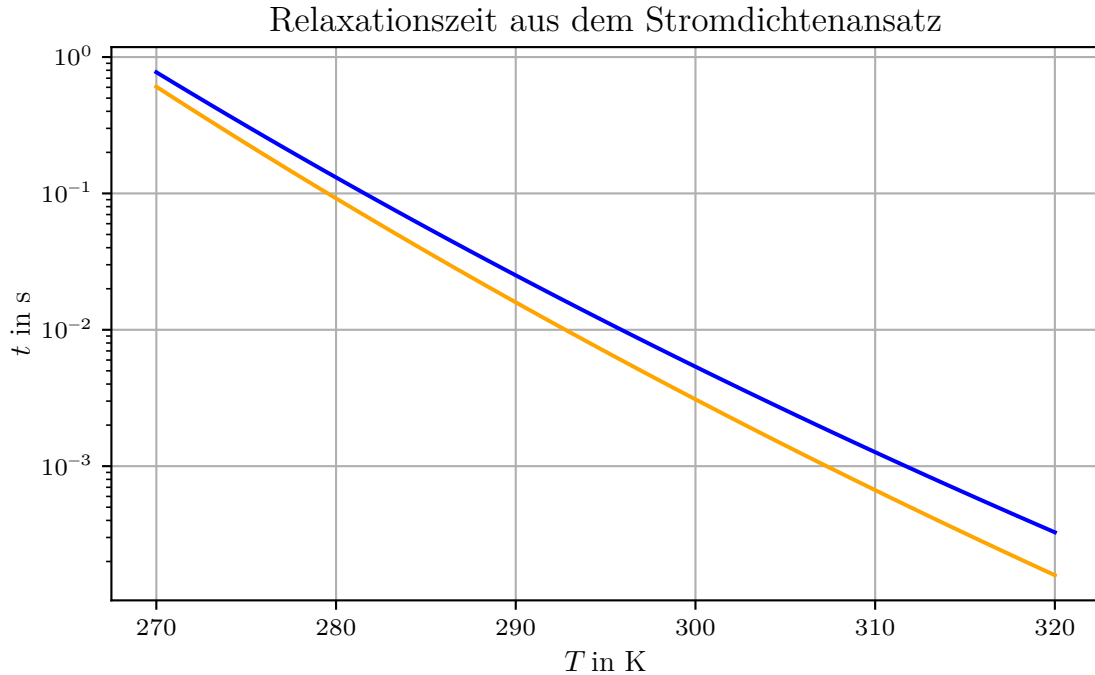
Die Relaxationszeiten in Abhängigkeit von der Temperatur, basierend auf dem Polarisationsstrom, sind in Abbildung 11 dargestellt. Die entsprechenden Daten zur

Stromdichte sind in Abbildung 12 zu sehen. Die Relaxationszeiten werden mit Gleichung 1 berechnet.



**Abbildung 11:** Plot der Relaxationszeit aus dem Ansatz des Polarisationsstrom in Abhängigkeit der Temperatur. Die erste Messreihe liefert die orangene Gerade, die zweite generiert die blaue Gerade.





**Abbildung 12:** Plot der Relaxationszeit aus dem Ansatz der Stromdichte in Abhängigkeit der Temperatur. Die erste Messreihe liefert die orangene Gerade, die zweite generiert die blaue Gerade.

## 5 Diskussion

Bei der Durchführung unserer Messungen und Analysen gibt es mehrere kritische Aspekte, die berücksichtigt werden müssen, um die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Ergebnisse sicherzustellen. Zunächst könnte die Wahl der Fehler genauer sein. Es ist entscheidend, dass die Unsicherheiten in den Messungen korrekt bestimmt und berücksichtigt werden, um die Präzision der Ergebnisse zu gewährleisten. Während der Messungen des Stromes wurde zu Beginn häufig umgepol. Dies kann zu systematischen Fehlern führen und sollte in zukünftigen Experimenten minimiert oder vermieden werden. Ein weiteres wichtiges Detail ist die Heizrate, die über die Zeit nicht konstant blieb, sondern eher einer logistischen Kurve folgte. Dies deutet darauf hin, dass die Temperaturregelung nicht gleichmäßig war und Anpassungen an der Steuerung vorgenommen werden sollten, um eine gleichmäßigere Heizrate zu gewährleisten. Die Annahme eines linearen Hintergrunds für die Datenanalyse ist ebenfalls kritisch zu betrachten. Möglicherweise wäre die Verwendung eines exponentiellen Hintergrunds sinnvoller, um die Daten genauer zu modellieren und zu analysieren. Bei der numerischen Integration könnten alternative Integrationsmethoden gewählt werden, um die Genauigkeit der Berechnungen zu verbessern. Dies könnte dazu beitragen, systematische Fehler zu minimieren und präzisere Ergebnisse zu erzielen. Die experimentell bestimmten Heizraten wichen von den theoretischen Werten ab. Die über

den Fit bestimmten Heizraten waren:

$$b_1 = (1,24 \pm 0,01) \frac{\text{K}}{\text{min}} \quad (15)$$

$$b_2 = (1,67 \pm 0,02) \frac{\text{K}}{\text{min}} \quad (16)$$

Die theoretischen Werte sollten 1,5 K/min und 2,0 K/min betragen. Die prozentuale Abweichungen sind

$$\Delta W_1 = \frac{|1.24 - 1.5|}{1.5} \cdot 100 \approx 17.33\% \quad (17)$$

für die erste Heizrate und

$$\Delta W_2 = \frac{|1.67 - 2.0|}{2.0} \cdot 100 \approx 16.5\% \quad (18)$$

für die zweite. Diese Abweichungen sind signifikant und deuten darauf hin, dass es systematische Unterschiede zwischen den experimentellen Bedingungen und den theoretischen Annahmen gibt. Es ist wichtig, diese Diskrepanzen weiter zu untersuchen und mögliche Ursachen wie experimentelle Fehler, Abweichungen in den Materialien oder Messgeräteungenauigkeiten zu identifizieren und zu korrigieren. Durch die Beachtung dieser Aspekte und die Implementierung geeigneter Korrekturmaßnahmen können wir die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der experimentellen Ergebnisse verbessern.

## 6 Originaldaten

In Tabelle 1 sind die originalen Messdaten der ersten Reihe zu sehen. Die Daten der zweiten Reihe stehen in Tabelle 2. Da die Heizleistung für die zweite Reihe erhöht wurde, aber die selben Anfangs und Endwerte verwendet werden, enthält sie weniger Daten.

Tabelle 1: Tabelle mit den Messdaten für Reihe 1

<b>Zeit <math>t</math> (min)</b>	<b>Temp. (<math>^{\circ}\text{C}</math>)</b>	<b>Strom (<math>\text{A} \times 10^{-11}</math>)</b>
0	-64.9	0.033
1	-63.5	0.033
2	-62.3	0.032
3	-61.1	0.032
4	-59.9	0.032
5	-58.2	0.031
6	-56.0	0.030
7	-54.3	0.028

Continued on next page

Tabelle 1: Tabelle mit den Messdaten für Reihe 1  
(Continued)

<b>Zeit <math>t</math> (min)</b>	<b>Temp. (<math>^{\circ}\text{C}</math>)</b>	<b>Strom (<math>\text{A} \times 10^{-11}</math>)</b>
8	-52.4	0.026
9	-50.4	0.025
10	-48.6	0.027
11	-46.7	0.027
12	-44.7	0.020
13	-43.3	0.003
14	-41.6	0.001
15	-40.0	0.003
16	-38.4	0.001
17	-36.7	0.007
18	-35.1	0.015
19	-33.6	0.024
20	-32.0	0.036
21	-30.6	0.053
22	-29.1	0.070
23	-27.8	0.091
24	-26.4	0.120
25	-24.9	0.150
26	-23.5	0.190
27	-22.2	0.220
28	-20.9	0.260
29	-19.5	0.300
30	-18.2	0.350
31	-16.9	0.380
32	-15.6	0.400
33	-14.4	0.400
34	-13.0	0.400
35	-11.7	0.370
36	-10.7	0.340

Continued on next page

Tabelle 1: Tabelle mit den Messdaten für Reihe 1  
(Continued)

<b>Zeit <math>t</math> (min)</b>	<b>Temp. (<math>^{\circ}\text{C}</math>)</b>	<b>Strom (<math>\text{A} \times 10^{-11}</math>)</b>
37	-9.6	0.300
38	-8.4	0.240
39	-7.2	0.190
40	-6.1	0.150
41	-5.0	0.120
42	-3.8	0.100
43	-2.8	0.090
44	-1.7	0.080
45	-0.7	0.077
46	0.2	0.079
47	1.3	0.081
48	2.2	0.084
49	3.3	0.088
50	4.2	0.091
51	5.2	0.095
52	6.1	0.100
53	7.1	0.110
54	8.0	0.110
55	8.9	0.110
56	9.9	0.120
57	10.6	0.120
58	11.5	0.120
59	12.4	0.120
60	13.1	0.120
61	13.9	0.130
62	14.7	0.120
63	15.5	0.120
64	16.4	0.130
65	17.2	0.120

Continued on next page

Tabelle 1: Tabelle mit den Messdaten für Reihe 1  
(Continued)

<b>Zeit <math>t</math> (min)</b>	<b>Temp. (<math>^{\circ}\text{C}</math>)</b>	<b>Strom (<math>\text{A} \times 10^{-11}</math>)</b>
66	17.9	0.120
67	18.7	0.120
68	19.4	0.120
69	20.1	0.120

Bei der zweiten Messung wurde in Minute 16 umgepolt, bis sich wieder ein stabiler Wert eingestelltte, war die laufende Minute vorbei, sodass kein Wert eingetragen werden konnte.

Tabelle 2: Tabelle mit den Messdaten für Reihe 2

<b>Zeit <math>t</math> (min)</b>	<b>Temp. (<math>^{\circ}\text{C}</math>)</b>	<b>Strom (<math>\text{A} \times 10^{-11}</math>)</b>
0	-60.0	0.025
1	-59.3	0.026
2	-58.7	0.026
3	-57.9	0.026
4	-57.1	0.026
5	-56.1	0.026
6	-55.2	0.026
7	-54.0	0.026
8	-52.8	0.025
9	-51.3	0.024
10	-49.0	0.025
11	-47.1	0.023
12	-44.8	0.023
13	-42.6	0.015
14	-40.6	0.012
15	-38.2	0.005
16	<i>Wert ausgelassen</i>	<i>Wert ausgelassen</i>
17	-34.0	0.020
18	-31.8	0.037

Continued on next page

Tabelle 2: Tabelle mit den Messdaten für Reihe 2 (Continued)

<b>Zeit <math>t</math> (min)</b>	<b>Temp. (<math>^{\circ}\text{C}</math>)</b>	<b>Strom (<math>\text{A} \times 10^{-11}</math>)</b>
19	-30.0	0.064
20	-27.9	0.090
21	-26.0	0.140
22	-24.1	0.180
23	-22.2	0.240
24	-20.2	0.300
25	-18.6	0.370
26	-16.7	0.450
27	-15.0	0.500
28	-13.2	0.540
29	-11.4	0.540
30	-9.8	0.500
31	-8.1	0.430
32	-6.6	0.340
33	-5.0	0.260
34	-3.4	0.190
35	-1.8	0.150
36	-0.4	0.120
37	1.1	0.110
38	2.5	0.120
39	4.0	0.120
40	5.4	0.130
41	6.7	0.140
42	8.1	0.150
43	9.4	0.150
44	10.7	0.160
45	12.0	0.170
46	13.2	0.170
47	14.4	0.180

Continued on next page

Tabelle 2: Tabelle mit den Messdaten für Reihe 2 (Continued)

Zeit $t$ (min)	Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	Strom ( $\text{A} \times 10^{-11}$ )
48	15.6	0.180
49	16.9	0.180
50	18.0	0.180
51	19.2	0.180
52	20.2	0.180

## Literatur

- [1] Uni Freiburg. *2. Alkalimetalle (1. Hauptgruppe: Li, Na, K, Rb, Cs) 2.3. Halogenide*. URL: [http://ruby.chemie.uni-freiburg.de/Vorlesung/metalle\\_2\\_3.html](http://ruby.chemie.uni-freiburg.de/Vorlesung/metalle_2_3.html).
- [2] Charles R. Harris u. a. „Array programming with NumPy“. In: *Nature* 585.7825 (Sep. 2020), S. 357–362. DOI: 10.1038/s41586-020-2649-2. URL: <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>.
- [3] J. D. Hunter. „Matplotlib: A 2D graphics environment“. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 90–95. DOI: 10.1109/MCSE.2007.55.
- [4] Eric O. Lebigot. *Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties*. Version 3.1.7. URL: <http://pythonhosted.org/uncertainties/>.
- [5] Madhu. *Difference Between Point Defect and Line Defect*. URL: <https://www.differencebetween.com/difference-between-point-defect-and-line-defect/>.
- [6] Robert G. Fuller Richard M. Fufller. „Research Project for Undergraduates: Ionic Thermoconductivity in Dielectrics“. In: *AJP* 40 (1972).
- [7] Pauli Virtanen u. a. „SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python“. In: *Nature Methods* 17 (2020), S. 261–272. DOI: 10.1038/s41592-019-0686-2.