

V 48

## **Dipolrelaxation in Ionenkristallen**

Donata Osthues  
donata.osthues@tu-dortmund.de

Jonas Rönsch  
jonas.roensch@tu-dortmund.de

Durchführung: 25.01.2021

Abgabe: DATUM

TU Dortmund – Fakultät Physik

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Zielsetzung</b>	<b>3</b>
<b>2 Theorie</b>	<b>3</b>
2.1 Dipole in Ionenkristallen . . . . .	3
2.2 Dipolpolarisation . . . . .	3
2.3 Berechnung der Aktivierungsenergie . . . . .	4
<b>3 Durchführung</b>	<b>6</b>
3.1 Versuchsaufbau . . . . .	6
3.2 1. Messreihe . . . . .	7
3.3 2. Messreihe . . . . .	7
<b>4 Auswertung</b>	<b>8</b>
4.1 Bestimmung des Untergrundes . . . . .	8
4.2 Niedertemperatur Approximation . . . . .	13
4.3 Integrationsverfahren . . . . .	15
4.4 Bestimmung der Relaxationszeit $\tau_0$ . . . . .	18
<b>5 Auswertung, Kevin</b>	<b>18</b>
5.1 Approximative Ausgleichsrechnung . . . . .	19
5.2 Ausgleichsrechnung mit Integration . . . . .	19
<b>6 Diskussion</b>	<b>20</b>
<b>7 Diskussion</b>	<b>20</b>
7.1 Niedertemperatur Approximation . . . . .	20
7.2 Integrationsverfahren . . . . .	20
<b>Literatur</b>	<b>25</b>

# 1 Zielsetzung

Das Ziel dieses Versuches ist die Untersuchung der Dipolrelaxation eines strontiumdotierten Ionenkristalls aus Kaliumbromid. Dafür wird die Relaxationszeit  $\tau(T, W, \tau_0)$  der Dipole in den Kristallen bestimmt. Die Temperatur  $T$  wird während des Versuches gemessen, wogegen die Aktivierungsenergie  $W$  und die charakteristische Relaxationszeit  $\tau_0$  über den ebenfalls gemessenen Depolarisationsstrom berechnet werden können.

## 2 Theorie

Die Dipolrelaxation wird in diesem Versuch an Ionenkristallen beobachtet. Werden die Dipole der Kristalle durch ein äußeres elektrisches Feld aus ihrer Gleichgewichtslage ausgelenkt, benötigen sie eine Zeit um sich nach Abschalten des elektrischen Feldes wieder in ihre Ausgangslage zurück zubewegen. Der Übergang vom ausgelenkten Zustand zurück in den Ruhezustand wird als Relaxationsprozess bezeichnet. Die Dauer dieses Prozesses wird Relaxationszeit genannt.

### 2.1 Dipole in Ionenkristallen

Dieser Versuch wird an dem Ionenkristalle Kaliumbromid durchgeführt. Ein Ionenkristall ist durch seine Eigenschaft definiert, abwechselnd aus Anionen und Kationen aufgebaut zu sein. Kaliumbromid besitzt eine einfach kubische Kristallstruktur, da die Kaliumkationen ( $\text{K}: 4s^1 \rightarrow \text{K}^+: 3p^6$ ) und die Bromanionen ( $\text{Br}: 4p^5 \rightarrow \text{Br}^-: 4p^6$ ) jeweils eine flächenzentriert kubische Struktur besitzen, die um eine Gitterkonstante in eine Raumrichtung gegeneinander verschoben sind. Dadurch ist das Kriterium der abwechselnden Kationen-Anionen-Anordnung erfüllt. Ein solcher Ionenkristall ist durch diese regelmäßige Ionenanordnung nach außen elektrisch neutral. Um die Entstehung von Dipolen im Kristall zu ermöglichen wird die Probe mit einem Anteil von 0,005% mit Strontiumiodid ( $\text{Sr}^{++}: 4p^6$ ,  $\text{I}^-: 5p^6$ ) dotiert. Da Strontiumiodid zweifach positiv geladene Strontiumionen enthält, entstehen Kaliumleerstellen, die mit der zusätzlichen positiven Ladung einen Dipol bilden, damit die Gesamtladungsneutralität des Kristalls aufrechterhalten werden kann.

### 2.2 Dipolpolarisation

Die Dipole, welche sich aus den Strontiumkationen und den Leerstellen ergeben, sind entsprechend ihrer Position im Gitter ausgerichtet. Da nur diskrete Gitterplätze möglich sind, ist auch die Richtungsverteilung der Dipole bei Raumtemperatur statistisch diskret verteilt. Eine Richtungsänderung der Dipole ist durch Leerstellendiffusion möglich, wenn eine materialspezifische, thermische Energie überschritten wird. Sie wird Aktivierungsenergie  $W$  genannt. Die Anzahl der Dipole deren Energie ausreichend zur Diffusion ist, ist durch die Boltzmann-Verteilung gegeben. Das heißt, wenn die spezifische Aktivierungsenergie überschritten wird (Umgebungstemperatur muss ausreichend hoch sein), dann bewegen sich die Dipole zurück in ihre Ausgangslage. Die Relaxation beginnt. Je größer die

Umgebungstemperatur, desto mehr Energie steht den Dipolen zur Verfügung und desto schneller relaxieren sie. Das heißt die Relaxationszeit

$$\tau(T) = \tau_0 \exp\left(\frac{W}{k_B T}\right) \quad (1)$$

wird mit steigender Temperatur kleiner. Die Bewegung der Ladungsträger während der Relaxation führt zu einem Strom innerhalb des Kristalls, welcher Depolarisationsstrom genannt wird. Dieser kann mit Strom durch weitere bewegliche Ladungsträger (z.B. aufgrund von Störstellen) überlagert werden (Untergrund).

### 2.3 Berechnung der Aktivierungsenergie

Um die Aktivierungsenergie zu bestimmen können zwei Ansätze verwendet werden, wobei beide den Depolarisationsstrom beinhalten. Der erste Ansatz wird über die Depolarisationsstromdichte geführt. Dabei wird zunächst davon ausgegangen, dass diejenigen Dipole  $y(T)$ , die sich durch ein angelegtes elektrisches Feld ausgerichtet haben durch

$$y(T) = \frac{pE}{3k_B T}$$

gegeben sind. Der Depolarisationsstrom  $j(t)$  kann dann über die ausgerichteten Dipole  $y(T)$  über

$$j(t) = y(T_P) p \frac{dN}{dt}$$

ausgedrückt werden, wobei  $p$  das Dipolmoment und

$$\frac{dN}{dt} = -\frac{N}{\tau(T)}$$

die Stromdichte, also die pro Zeit und Volumeneinheit relaxierenden Dipole darstellt. Eine Integration dieses Ausdrucks führt dann auf

$$N = N_P \exp\left(-\frac{1}{b} \int_{T_0}^T \frac{dT'}{\tau(T')}\right)$$

wobei  $N_P$  die Anzahl der bereits zu Beginn des Relaxationsprozesses, entsprechend des Gleichgewichtszustandes orientierten Dipole darstellt. Die konstante Temperaturänderung ist definiert als

$$b = \frac{dT}{dt}.$$

Für den Depolarisationsstrom ergibt sich somit die Gleichung

$$j(T) = \frac{p^2 E}{3k_B T_P} \frac{N_P}{\tau_0} \exp\left(-\frac{1}{b\tau_0} \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{W}{k_B T'}\right) dT'\right) \exp\left(-\frac{W}{k_B T}\right) \quad (2)$$

wobei dieser Ausdruck für  $T_0 \approx T$  aufgrund des Zusammenhangs

$$\int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{W}{k_B T}\right) \approx 0$$

weiter zu

$$j(T) \approx \frac{p^2 E}{3k_B T_P} \frac{N_P}{\tau_0} \exp\left(-\frac{W}{k_B T}\right) \quad (3)$$

approximiert werden kann. Aus diesem Ergebnis kann schließlich die Aktivierungsenergie  $W$  abgeleitet werden. Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung von  $W$  liegt in einem Ansatz der über die Polarisation  $P$  geführt wird. Die zeitliche Ableitung der Polarisation ist als

$$\frac{dP}{dt} = -\frac{P(t)}{\tau(T(t))}$$

gegeben, wobei sie einen Strom durch den Probenquerschnitt  $F$  erzeugt und daher auch als

$$\frac{dP}{dt} = \frac{j(t)}{F} \quad .$$

formuliert werden kann. Somit lassen sich die oberen Gleichungen auf die Form

$$\tau(T) = \frac{\int_T^\infty j(T') dT'}{bj(T)}$$

bringen. Wenn  $\tau(T)$  durch Gleichung (1) ersetzt wird, kann die Aktivierungsenergie schließlich mit der Gleichung

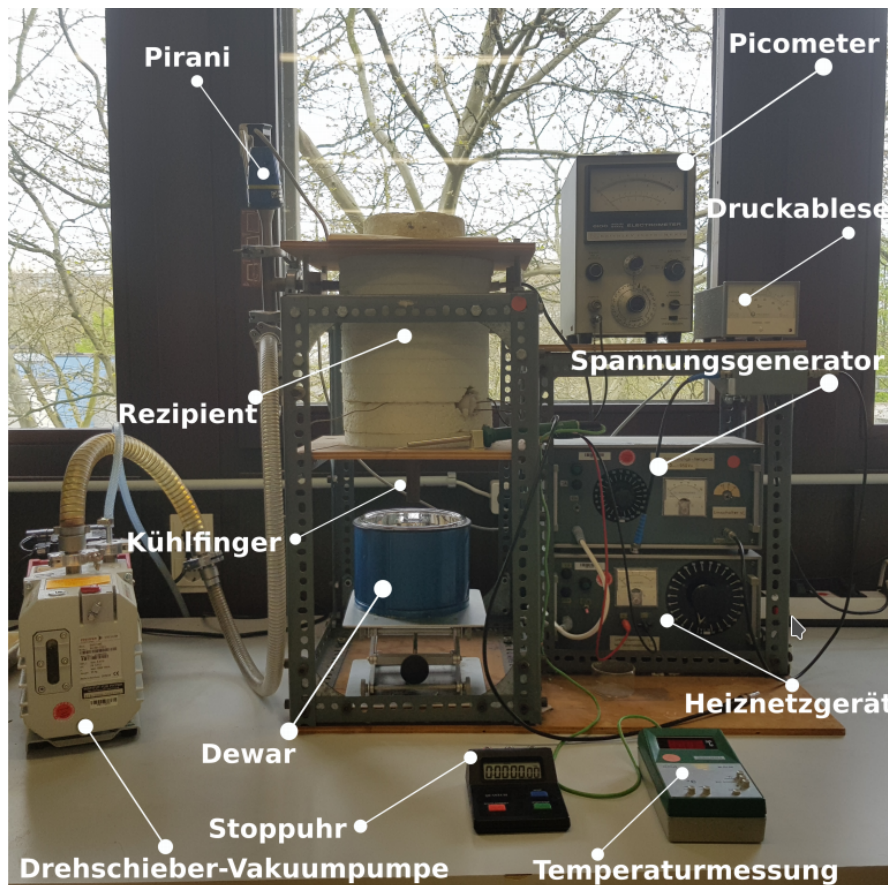
$$W = \ln\left(\frac{\int_T^\infty j(T') dT'}{bj(T)\tau_0}\right) k_B T \quad (4)$$

abgelesen werden. In der Praxis gilt  $j(T \rightarrow \infty) = j(T^*) \approx 0$ . Dieser Abschnitt wurde mittels des Literaturangaben [1] [5] [4] und [3] erstellt.

### 3 Durchführung

Die Durchführung basiert auf der gleichmäßigen Erwärmung der Kaliumbromidprobe, nachdem die internen Dipole ausgerichtet wurden und einer Notation des zugehörigen Stroms, der aufgrund der Relaxation der Dipole durch den folgenden Versuchsaufbau messbar ist.

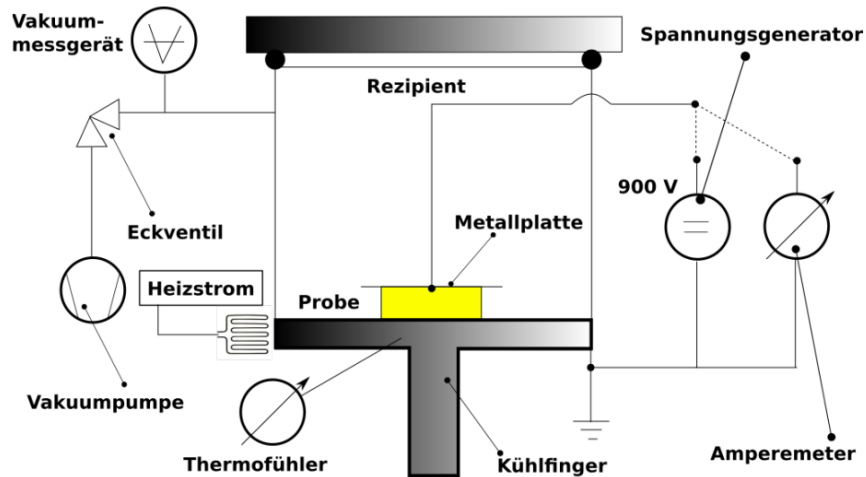
#### 3.1 Versuchsaufbau



**Abbildung 1:** Auf diesem Foto ist der verwendete Versuchsaufbau abgebildet. [2]

Die Beschriftungen der Bestandteile des Aufbaus sind in Abbildung 1 dargestellt. Hauptbauteil der Apparatur ist der Rezipient, ein Plattenkondensator mit der Kaliumbromidplatte im Inneren, welcher vakuumisiert und isoliert verschlossen ist. Zur Temperaturregulation des Ionenkristalls dient lediglich ein Kühlfinger, der aus dem Rezipienten herausragt und durch eintauchen in ein Bad aus flüssigem Stickstoff abgekühlt bzw. in seiner Erwärmung durch die Umgebungstemperatur reguliert werden kann. Über die Temperaturvariation am Kühlfinger wird dementsprechend die Temperatur der Kaliumbromidplatte kontrolliert. Außerdem ist ein Heiznetzgerät an dem Rezipienten angeschlossen, das eine Erwärmung

der Apparatur ermöglicht, wenn die Umgebungstemperatur für eine konstante Heizrate nicht mehr ausreichend ist. Das Ablesen des Stroms, welcher aufgrund der Dipolrelaxation im Kristall zwischen den Kondensatorplatten entsteht, wird über ein zugeschaltetes Picometer bzw. Amperemeter (Abbildung 2) ermöglicht. In Abbildung 2 ist die Schaltung und der Aufbau im Rezipient strukturiert dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Erwärmung durch das Heiznetzgerät mittels einer stromdurchflossenen Spule realisiert wird, die um die Probe verbaut wurde. Außerdem wird deutlich, dass das Thermoelement unmittelbar an der Probe verbaut wurde und somit die Temperatur des Kristalls wiedergibt [2].



**Abbildung 2:** Diese Abbildung zeigt die Verschaltung und die innere Struktur des Rezipienten. [2]

### 3.2 1. Messreihe

Zu Beginn des Versuches wird die Kaliumbromidplatte, welche sich zwischen den Plattenkondensatoren befindet, mit Hilfe des Heizstroms auf  $47^{\circ}\text{C}$  erhitzt. Danach wird an die Kondensatorplatten über den Spannungsgenerator eine Spannung von  $950\text{ V}$  angelegt. Dabei richten sich die Dipole im Kristall entlang der E-Feldlinien aus. Der Aufbau wird für  $900\text{ s}$  in diesem Zustand gelassen, um eine Ausrichtung möglichst vieler Dipole zu realisieren. Nach dieser Zeit wird die Probe durch eintauchen des Kühlfingers in flüssigen Stickstoff auf unter  $-60^{\circ}\text{C}$  abgekühlt. Wenn diese Temperatur erreicht ist, werde die Kondensatorplatten für  $5\text{ min}$  kurzgeschlossen um ein vollständiges abflachen des elektrischen Feldes zu ermöglichen. Jetzt wird mit einer konstanten Heizrate von  $2^{\circ}\text{C}$  pro Minute ausgehend von  $-60^{\circ}\text{C}$  erhitzt, bis eine Temperatur von  $57^{\circ}\text{C}$  überschritten wird. Währenddessen werden alle  $30\text{ s}$  die Wertepaare Temperatur und Depolarisationsstrom aufgenommen.

### 3.3 2. Messreihe

Für den zweiten Messdurchgang wird die Probe erneut einem elektrischen Feld ausgesetzt, welches für 15 min anliegt. Dadurch soll wie im ersten Durchlauf eine Maximalanzahl, der am elektrischen Feld ausgerichteten Dipole erzeugt werden. Daraufhin wird der Kondensator mit der Probe im Inneren durch flüssigen Stickstoff erneut auf unter  $-40\text{ °C}$  abgekühlt. Bevor die Messwerte aufgenommen werden können, muss wieder eine Wartezeit von 5 min eingehalten werden, währenddessen der Kondensator kurzgeschlossen wird, sodass das elektrische Feld komplett abflachen kann. Danach wird die Temperatur wieder konstant erhöht, wobei minütlich die Wertepaare Temperatur und Depolarisationsstrom aufgenommen werden.

## 4 Auswertung

In diesem Versuch werden zwei Temperatur-Strom-Kurven mit unterschiedlichen Heizraten  $b$  analysiert. Messreihe A hat eine Heizrate von  $b_A = 2\text{ K/min}$  und es wurde in dem Temperaturbereich  $T \in [213,1\text{ K}, 330,3\text{ K}]$  gemessen. Für Messreihe B beträgt die Heizrate  $b_B = 1\text{ K/min}$  und der vermessene Temperaturbereich ist  $T \in [232,7\text{ K}, 289,6\text{ K}]$ . In beiden Fällen ist Kaliumbromid KBr der verwendete Kristall. Die Messdaten sind in Tabelle 4 abgebildet.

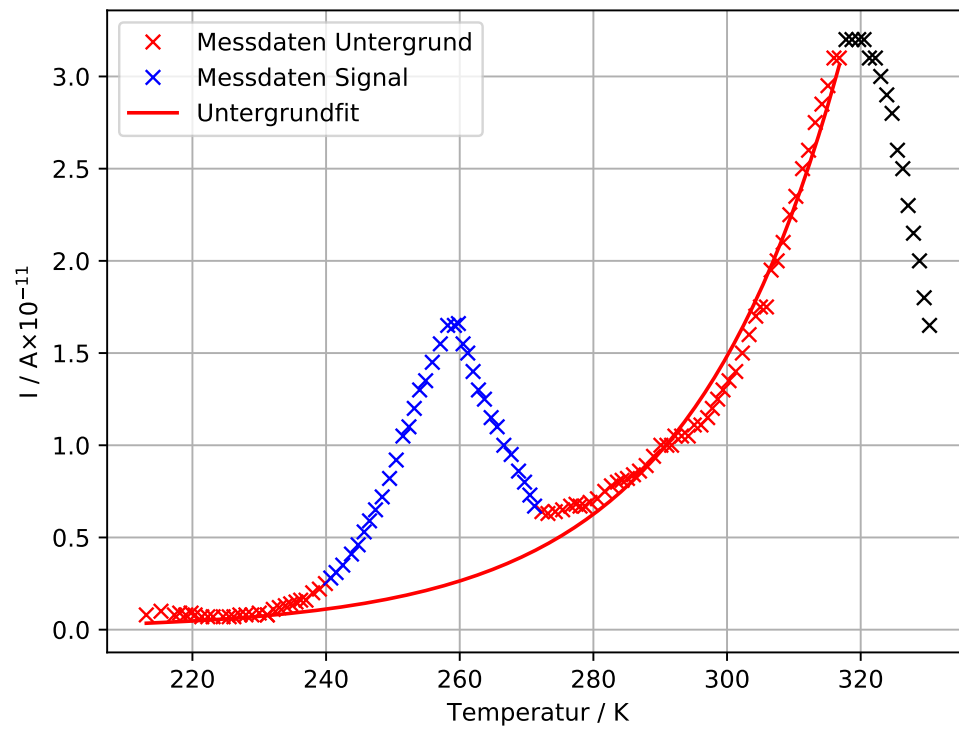
### 4.1 Bestimmung des Untergrundes

Um den Untergrund zu bestimmen wird die Exponentialfunktion

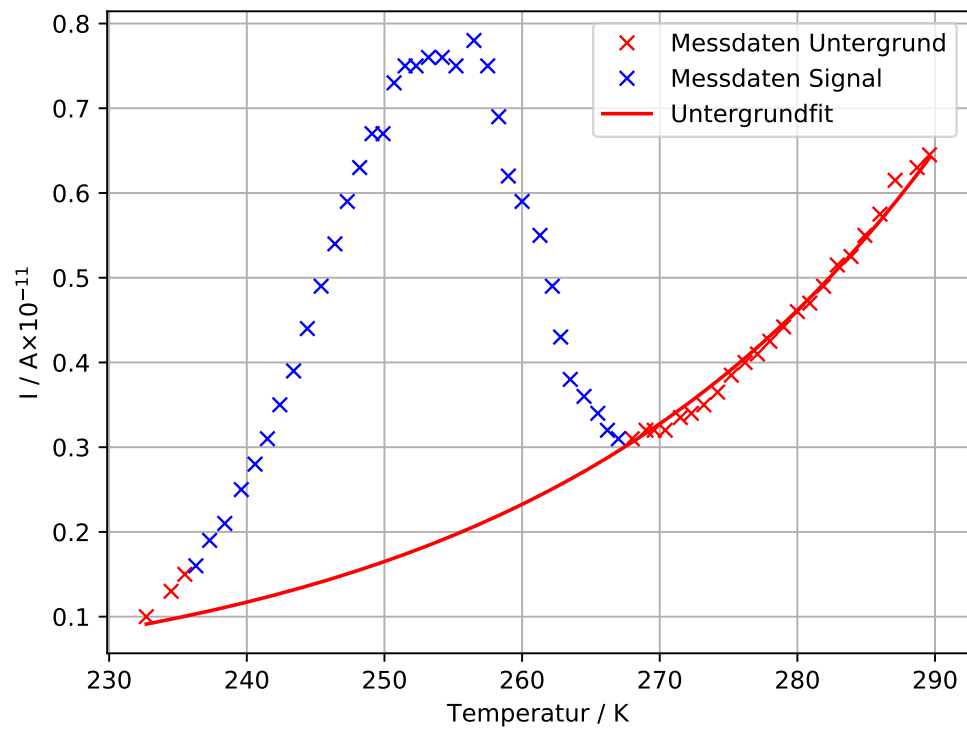
$$I_U(T) = C \cdot \exp(D \cdot T) \quad (5)$$

an die Messdaten vor und nach dem Peak gefittet. Die Messdaten und die Fits sind in Abbildung 3 und 4 abgebildet.





**Abbildung 3:** Messdaten und Untergrundfit für Messreihe A, hierbei können die Messdaten nach dem zweiten Peak nicht für die Bestimmung des untergrundes verwendet werden.



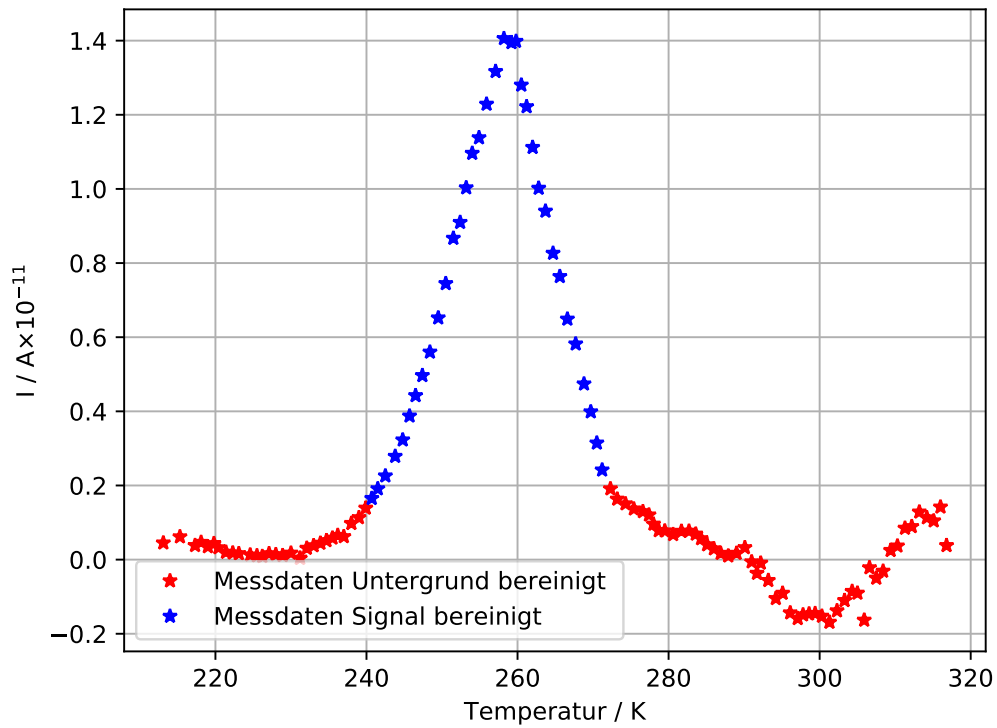
**Abbildung 4:** Messdaten und Untergrundfit für Messreihe B.

Die Fitparameter sind in der Tabelle 1 aufgelistet.

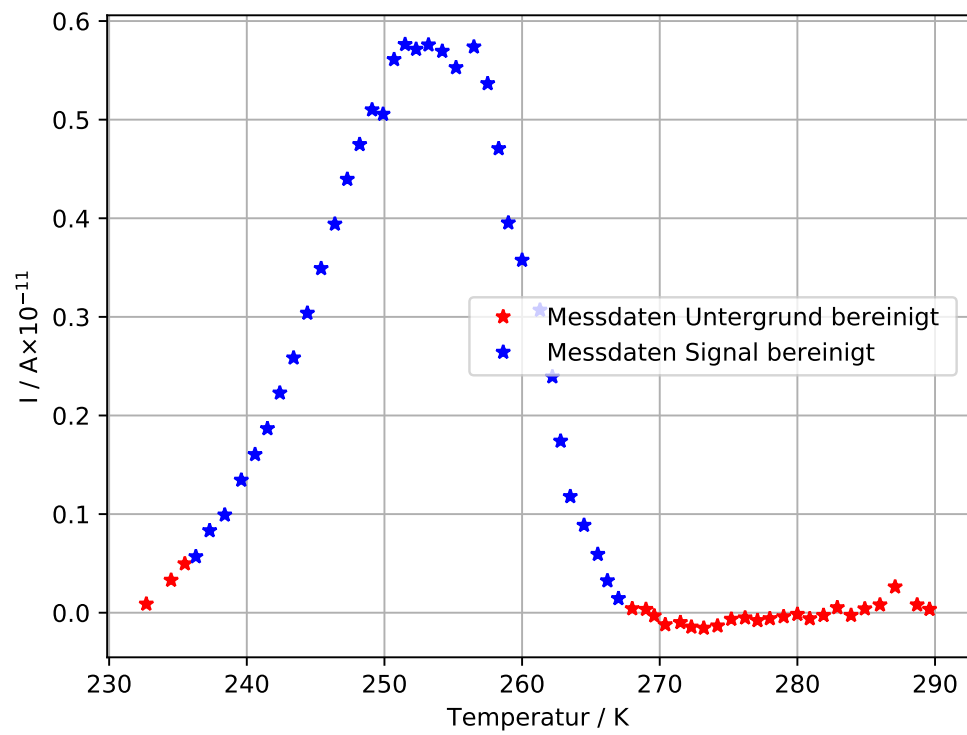
**Tabelle 1:** Fitparameter für die Untergrundfunktionen der beiden Messreihen.

Messreihe	$C / \text{A}$	$D / \text{/K}$
A	$(3,5 \pm 0,9) \cdot 10^{-6}$	$0,0431 \pm 0,0008$
B	$(3,1 \pm 0,9) \cdot 10^{-5}$	$0,0343 \pm 0,0010$

Um die Messreihe vom Untergrund zu bereinigen, werden von den gemessenen Stromwerten der Wert der Untergrundfunktion zu der dazugehörigen Temperatur subtrahiert. Die bereinigten Messwerte sind in Abbildung 5 und 6 zu sehen.



**Abbildung 5:** Vom Untergrund bereinigte Messdaten der Messreihe A.



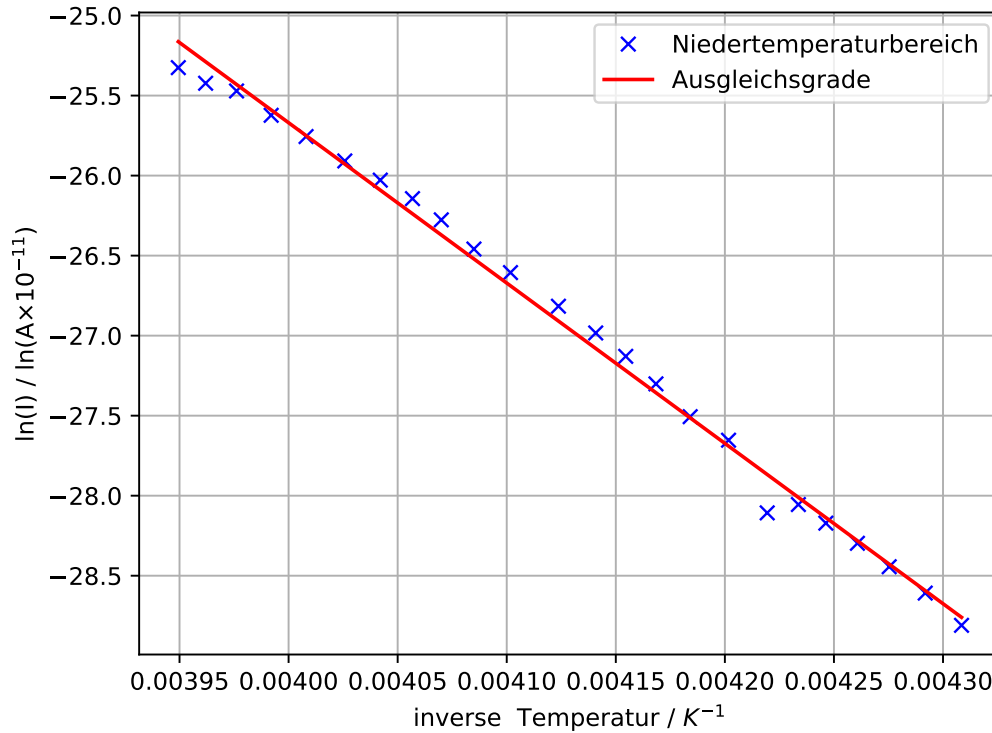
**Abbildung 6:** Vom Untergrund bereinigte Messdaten der Messreihe B.

## 4.2 Niedertemperatur Approximation

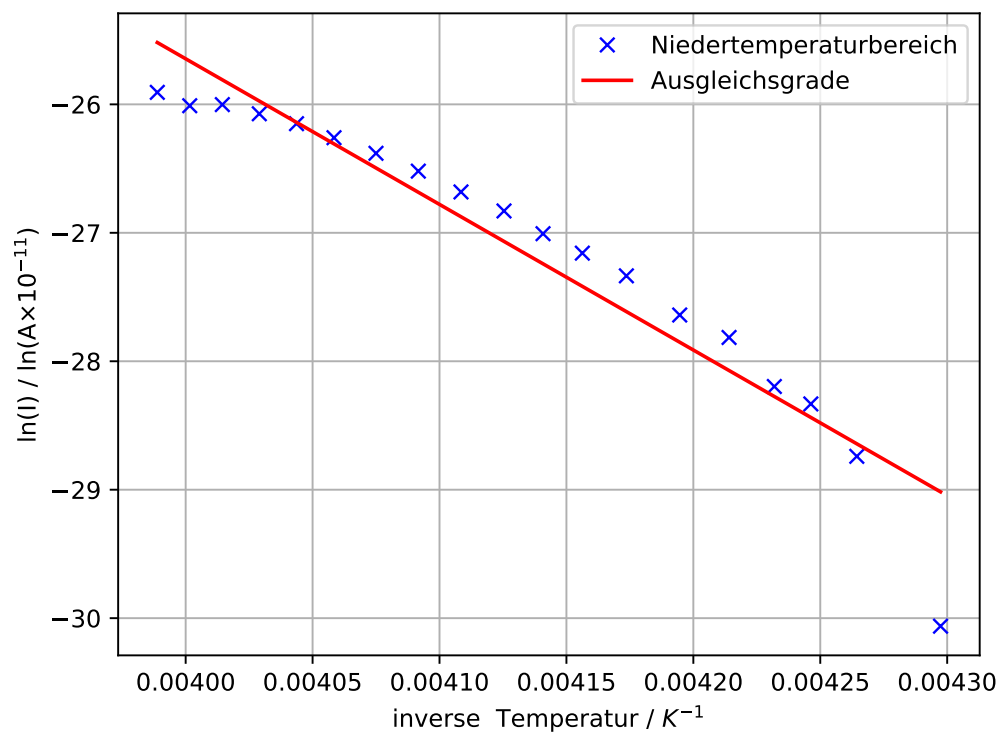
Um die Aktivierungsenergie  $W$  zu ermitteln, wird die Gleichung (3) verwendet. Dafür werden die bereinigten Messdaten der Messreihe A im Bereich  $T_A \in [232,2 \text{ K}, 253,2 \text{ K}]$  und für Messreihe B im Bereich von  $T_B \in [232,7 \text{ K}, 250,7 \text{ K}]$  logarithmiert und gegen  $\frac{1}{T}$  aufgetragen. Dazu wird eine lineare Ausgleichsgrade

$$\ln(I(T)) = \frac{-W}{k_B} \frac{1}{T} + \beta$$

angepasst. Hierbei ist der Fitparameter  $W$  die Aktivierungsenergie des Kristalls. Die logarithmiert Messdaten und die Ausgleichsgrade sind in den Abbildungen 7 und 8 abgebildet.



**Abbildung 7:** Messdaten und lineare Ausgleichsgrade für die Bestimmung der Aktivierungsenergie  $W$  mit Hilfe der Messreihe A.



**Abbildung 8:** Messdaten und lineare Ausgleichsgrade für die Bestimmung der Aktivierungsenergie  $W$  mit Hilfe der Messreihe B.

Die Fitparameter sind in Tabelle 2 abgebildet.

**Tabelle 2:** Fitparameter der linearen Ausgleichsgraden der beiden Messreihen.

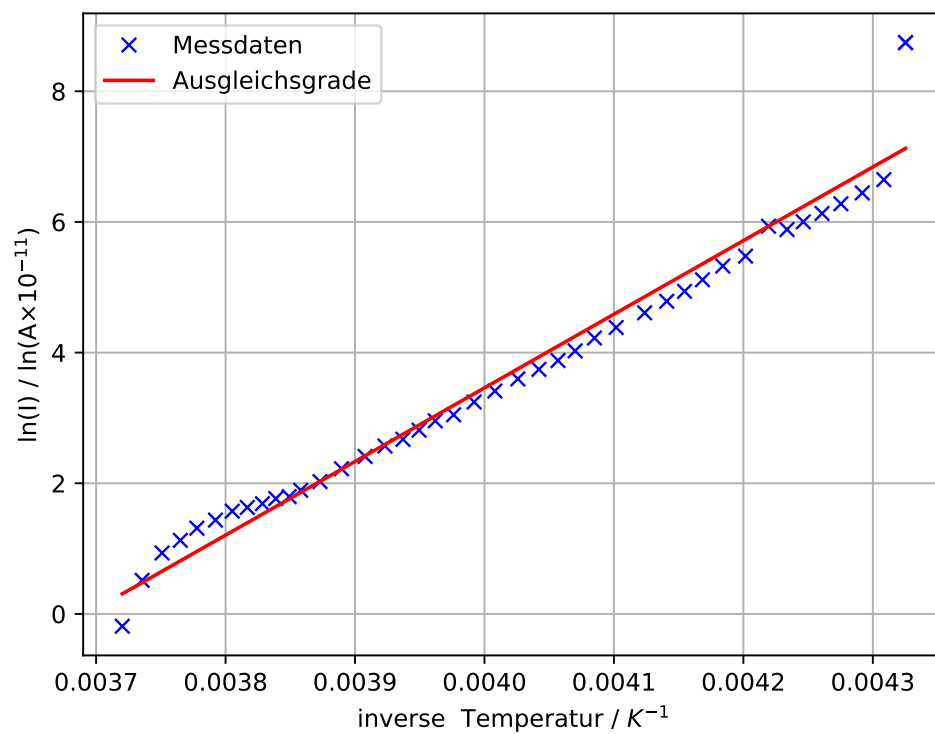
Messreihe	$\beta / \ln(10^{-11} \text{ A})$	$W / \text{J}$	$W / \text{meV}$
A	$14,4 \pm 0,7$	$(1,383 \pm 0,023) \cdot 10^{-19}$	$863 \pm 14$
B	$19,7 \pm 3,4$	$(1,57 \pm 0,11) \cdot 10^{-19}$	$980 \pm 70$

### 4.3 Integrationsverfahren

Bei dieser Methode wird die Aktivierungsenergie mithilfe der Gleichung (4) bestimmt. Das Integral aus Gleichung (4) wird numerisch mithilfe der Trapezregel bestimmt. An die ermittelten Daten wird eine lineare Ausgleichsgrade der Form

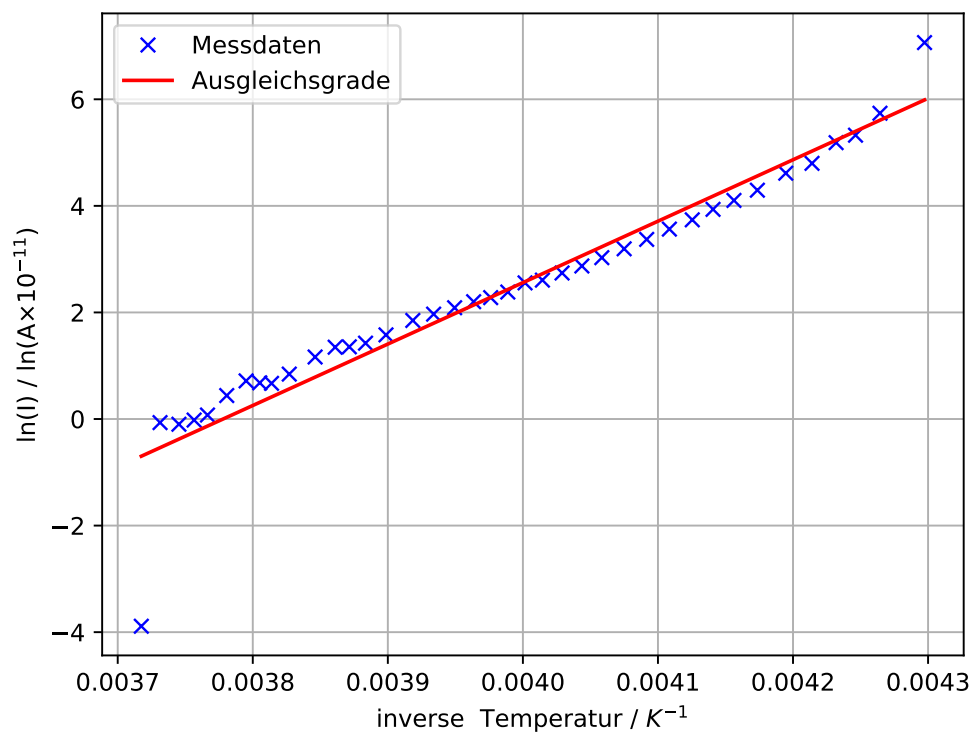
$$\ln \left( \frac{\int_T^\infty j(T') dT'}{bj(T)\tau_0} \right) = \frac{W}{k_B} \frac{1}{T} + \beta$$

angepasst. Der Fitparameter  $W$  ist die Aktivierungsenergie. Die Messdaten und die Fits sind in den Abbildungen 9 und 10 abgebildet.



**Abbildung 9:** Messdaten und lineare Ausgleichsgrade für die Bestimmung der Aktivierungsenergie mithilfe der Integrationsverfahrens für Messreihe A.





**Abbildung 10:** Messdaten und lineare Ausgleichsgrade für die Bestimmung der Aktivierungsenergie mithilfe der Integrationsverfahrens für Messreihe B.

Die Fitparameter der Ausgleichsgeraden aus den Abbildungen 9 und 10 sind in Tabelle 3 aufgelistet.

**Tabelle 3:** Fitparameter der Ausgleichsgeraden für die Bestimmung der Aktivierungsenergie mithilfe des Integrationsverfahrens.

Messreihe	$\beta / \ln(10^{-11} \text{ A})$	$W / \text{J}$	$W / \text{meV}$
A	$-41,6 \pm 1,4$	$(1,56 \pm 0,05) \cdot 10^{-19}$	$971 \pm 30$
B	$-43,6 \pm 2,3$	$(1,59 \pm 0,08) \cdot 10^{-19}$	$990 \pm 50$

#### 4.4 Bestimmung der Relaxationszeit $\tau_0$

Um die Relaxationszeit  $\tau_0$  zu bestimmen wird die Funktion (2) nach der Temperatur abgeleitet und die Temperatur bei Strommaximum eingesetzt und gleich Null gesetzt.

$$\left. \frac{dj(T)}{dT} \right|_{T_{\max}} = 0$$

$$\Rightarrow \tau_0 = \frac{k_B T_{\max}^2}{Wb} \exp\left(-\frac{W}{k_B T_{\max}}\right)$$

## 5 Auswertung, Kevin

Es werden in diesem Versuch zwei Messreihen mit unterschiedlicher Heizrate  $b$  durchgeführt. Zunächst müssen die Messwerte von Untergründen bereinigt werden, auf die im Folgenden eingegangen wird. Für die erste Messreihe – im Folgenden mit dem Index A gekennzeichnet – gilt  $b_A = 2 \text{ K/min}$ , für die Zweite, mit B gekennzeichnete Messreihe gilt  $b_B = 4 \text{ K/min}$ .

Alle Fehler in dieser Auswertung werden – wenn nicht anders beschrieben – mittels Gaußscher Fehlerfortpflanzungen mit Hilfe des `python`-Paketes `uncertainties` [`py-uncertainties`] berechnet.

Zur Beschreibung des oben genannten Untergrundes wird bei Messreihe A eine exponentielle Funktion  $I_{\text{bkg,A}}(T)$  und bei Messreihe B eine lineare Funktion  $I_{\text{bkg,B}}(T)$  von den Daten abgezogen. Die Variablen der Funktionen werden durch Fit an einen Teil der Daten bestimmt, der in Abbildungen ?? und ?? markiert ist. Die Fitfunktionen haben die Gestalt

$$I_{\text{bkg,A}}(T) = A_1 e^{B_1(T-T_0)} + C_1,$$

$$I_{\text{bkg,B}}(T) = A_2 \cdot T + B_2.$$

Das Resultat, sowie der Fit sind ebenfalls in oben genannter Abbildung dargestellt und die entsprechenden Daten in den Tabellen ?? und ?? aufgeführt. Im weiteren Verlauf wird dabei jeweils ein offset  $I_{\text{off}}$  von den Daten abgezogen. Dieser beträgt für Datensatz A  $I_{\text{off}} = 1,46 \text{ pA}$  und für Datensatz B  $I_{\text{off}} = 8,1 \text{ pA}$ . Bei der ersten Messreihe ist auffällig, dass nur ein einzelner, flacher Peak zu erkennen ist. Dies macht die spätere Auswertung

extrem schwierig. Aus diesem Grund werden die Ergebnisse der erste Messreihe im weiteren Verlauf nicht betrachtet.

## 5.1 Approximative Ausgleichsrechnung

Zunächst wird die in Abschnitt ?? aufgeführte Gleichung ?? zur Bestimmung der Aktivierungsenergie  $W$  benutzt. Dabei wird diese mit einem nicht-linearen Fit in einem Bereich  $T$  zwischen 250 K to 267 K an die Daten angepasst. Das Ergebnis des Fits ist in Abbildung ?? dargestellt. Der Fit liefert von Messreihe A liefert

das entsprechende Ergebnis aus Messreihe B liefert

Die zugehörigen Fits sind in Abbildungen ?? und ?? dargestellt.

## 5.2 Ausgleichsrechnung mit Integration

Als zweite Methode zur Bestimmung der Aktivierungsenergie  $W$  wird ein linearer Fit der Form

$$F(T) = \alpha \cdot \frac{1}{T} + \beta$$

an die inversen Temperaturdaten  $1/T$  durchgeführt. Hierbei ist  $F(T)$  wie in Gleichung ?? definiert als

$$F(T) = \frac{\int_T^{T^*} i(T') dT'}{i(T)}.$$

Aus der Steigung  $A$  lässt sich somit die Aktivierungsenergie  $W$  berechnen durch

$$W = \alpha \cdot k_B.$$

Außerdem wird schließlich die Relaxationszeit  $\tau_0$  aus der Temperatur bei maximalem Strom  $T_{\max}$  bestimmt:

$$\tau_0 = \frac{k_B T_{\max}^2}{Wb} \exp \left[ -\frac{W}{k_B T_{\max}} \right] \quad (6)$$

Die Fits sind in Abbildungen ?? und ?? dargestellt, sie liefern

für Datensatz A in einem Bereich  $T \in [260 \text{ K}, 310 \text{ K}]$  bei und für Datensatz B in einem Bereich  $T \in [250 \text{ K}, 280 \text{ K}]$  bei . Die Fehler dieser Werte berücksichtigen jedoch keine systematischen Unsicherheiten und werden daher stark unterschätzt. Darauf wird in der Diskussion weiter eingegangen.

## 6 Diskussion

Alle hier durchgeführten Methoden zur Bestimmung der Aktivierungsenergie  $W$  liefern Werte im erwarteten Bereich von einigen Millielektronvolt. Die verschiedenen Messreihen liefern unterscheiden sich jedoch um einen Faktor (approximative Methode) beziehungsweise (integrierende Methode), was auf systematische Fehler hindeutet und mit weiteren Messungen untersucht werden muss.

Die mit Hilfe der integrierenden Methode bestimmten Werte der Relaxationszeit  $\tau_0$  sind schließlich nicht signifikant. Die Fehler berücksichtigen nicht die starke Abhängigkeit von  $\tau_0$  von der Aktivierungsenergie  $W$ , die in Abbildung ?? dargestellt ist. Bei einer Änderung von  $W$  um einige 100 meV ändert sich der Wert der Relaxationszeit bereits um etliche Größenordnungen. Änderungen in diesem Bereich treten bereits auf, wenn der Wertebereich des Fits leicht verändert wird und einige Meßpunkte mehr oder weniger betrachtet werden. Die damit verbundenen Fehler machen eine Aussage über den wahren Wert von  $\tau_0$  unmöglich. Die Unsicherheit  $\Delta\tau_0$  sollte daher wesentlich zu größeren Werten hin korrigiert werden.

## 7 Diskussion

In den Abbildungen 3 und 4 ist zu sehen, dass bei einer höheren Heizrate ( $b_A = 2 \text{ K/min}$  und  $b_B = 1 \text{ K/min}$ ) das Stromstärkemaximum bei einer höheren Temperatur eintritt und dass die Stromstärke größer ist. Die Verschiebung der Temperatur kann daran liegen, dass generell schneller höhere Temperaturen erreicht werden. Daher wird das Stromstärkemaximum bei einer höheren Temperatur erreicht. Das das Stromstärkemaximum größer ist als bei einer kleineren Heizrate kann daran liegen, dass in einer bestimmten Zeit mehr Energie dem System beigelegt wird, was eine höhere Stromstärke zur Folge hat. Ebenfalls in den Abbildungen 3 und 4 ist zu sehen, dass der Untergrundfit die Untergrunddaten genügend gut beschreibt.

### 7.1 Niedertemperatur Approximation

Die über die approximative Methode bestimmte Aktivierungsenergiewerte liegen bei  $W_A = (863 \pm 14) \text{ meV}$  und  $W_B = (980 \pm 70) \text{ meV}$ . Der Literaturwert aus Quelle [4] beträgt  $W_{\text{lit}} = 660 \text{ meV}$ . Die Diskrepanz zwischen den Messreihen und dem Literaturwert könnten durch systematische Fehler entstanden sein. Diese können durch den zeitlichen Unterschied zwischen dem Ablesen der Temperatur und dem Ablesen der Stromstärke herbeigeführt werden, oder durch die manuelle Methode um die Heizrate konstant zu halten.

### 7.2 Integrationsverfahren

Die Werte die mit dieser Methode bestimmt wurden liegen bei  $W_A = (863 \pm 14) \text{ meV}$  und  $W_B = (980 \pm 70) \text{ meV}$ . Die höhere Abweichung vom oben genannten Literaturwert

kann daran liegen, dass mehr Daten bei dieser Methode verwendet werden können, was den systematischen Fehler verstärken würde.

**Tabelle 4:** Temperatur und Strom für Messreihe A und B, bei A wurden halbminütig und bei B jede Minute ein Datenpaar aufgezeichnet.

Zeit $t$ / min	Messreihe A		Messreihe B	
	Temperatur $T$ / K	Strom $I$ / $10^{-11}$ A	Temperatur $T$ / K	Strom $I$ / $10^{-11}$ A
0,0	213,1	0,08	232,7	0,1
0,5	215,3	0,1	-	-
1,0	217,3	0,08	234,5	0,13
1,5	218,1	0,09	-	-
2,0	219,0	0,08	235,5	0,15
2,5	219,8	0,09	-	-
3,0	220,4	0,08	236,3	0,16
3,5	221,4	0,07	-	-
4,0	222,3	0,07	237,3	0,19
4,5	223,1	0,07	-	-
5,0	224,6	0,07	238,4	0,21
5,5	225,5	0,07	-	-
6,0	226,2	0,07	239,6	0,25
6,5	227,1	0,08	-	-
7,0	228,0	0,08	240,6	0,28
7,5	228,9	0,08	-	-
8,0	230,0	0,09	241,5	0,31
8,5	231,2	0,08	-	-
9,0	231,2	0,08	242,4	0,35
9,5	232,1	0,11	-	-
10,0	233,0	0,12	243,4	0,39
10,5	233,9	0,13	-	-
11,0	234,7	0,14	244,4	0,44
11,5	235,5	0,15	-	-
12,0	236,2	0,16	245,4	0,49
12,5	237,0	0,16	-	-
13,0	238,0	0,2	246,4	0,54
13,5	239,0	0,22	-	-
14,0	239,9	0,25	247,3	0,59
14,5	240,7	0,28	-	-
15,0	241,5	0,31	248,2	0,63
15,5	242,5	0,35	-	-
16,0	243,8	0,41	249,1	0,67
16,5	244,8	0,46	-	-
17,0	245,7	0,53	249,9	0,67
17,5	246,5	0,59	-	-
18,0	247,4	0,65	250,7	0,73
18,5	248,4	0,72	-	-
19,0	249,5	0,82	251,5	0,75
19,5	250,5	0,92	-	-
20,0	251,5	1,05	252,3	0,75
20,5	252,4	1,1	-	-
21,0	253,2	1,2	253,2	0,76
21,5	254,0	1,3	-	-
22,0	254,9	1,35	254,2	0,76
22,5	255,9	1,45	-	-
23,0	257,1	1,55	255,2	0,75
23,5	258,2	1,65	-	-
24,0	259,2	1,65	256,5	0,78
24,5	259,8	1,66	-	-

Zeit $t$ / min	Messreihe A		Messreihe B	
	Temperatur $T$ / K	Strom $I$ / $10^{-11}$ A	Temperatur $T$ / K	Strom $I$ / $10^{-11}$ A
25,0	260,5	1,55	257,5	0,75
25,5	261,2	1,5	-	-
26,0	262,0	1,4	258,3	0,69
26,5	262,8	1,3	-	-
27,0	263,7	1,25	259,0	0,62
27,5	264,7	1,15	-	-
28,0	265,6	1,1	260,0	0,59
28,5	266,6	1,0	-	-
29,0	267,7	0,95	261,3	0,55
29,5	268,8	0,86	-	-
30,0	269,7	0,8	262,2	0,49
30,5	270,5	0,73	-	-
31,0	271,2	0,67	262,8	0,43
31,5	272,3	0,64	-	-
32,0	273,2	0,63	263,5	0,38
32,5	274,3	0,64	-	-
33,0	275,4	0,65	264,5	0,36
33,5	276,6	0,67	-	-
34,0	277,4	0,68	265,5	0,34
34,5	278,0	0,67	-	-
35,0	278,7	0,67	266,2	0,32
35,5	279,5	0,69	-	-
36,0	280,6	0,71	267,0	0,31
36,5	281,7	0,75	-	-
37,0	282,7	0,78	268,0	0,31
37,5	283,6	0,8	-	-
38,0	284,3	0,81	269,0	0,32
38,5	285,1	0,82	-	-
39,0	286,0	0,84	269,6	0,32
39,5	286,9	0,86	-	-
40,0	287,9	0,89	270,4	0,32
40,5	289,0	0,94	-	-
41,0	290,1	1,0	271,5	0,335
41,5	291,0	1,0	-	-
42,0	291,7	1,0	272,3	0,34
42,5	292,2	1,05	-	-
43,0	293,2	1,05	273,2	0,35
43,5	294,2	1,05	-	-
44,0	295,1	1,11	274,2	0,365
44,5	296,1	1,11	-	-
45,0	297,1	1,15	275,2	0,385
45,5	297,8	1,2	-	-
46,0	298,6	1,25	276,2	0,4
46,5	299,4	1,3	-	-
47,0	300,3	1,35	277,1	0,41
47,5	301,3	1,4	-	-
48,0	302,3	1,5	278,0	0,425
48,5	303,3	1,6	-	-
49,0	304,3	1,7	279,0	0,442
49,5	305,0	1,75	-	-

Zeit $t$ / min	Messreihe A		Messreihe B	
	Temperatur $T$ / K	Strom $I$ / $10^{-11}$ A	Temperatur $T$ / K	Strom $I$ / $10^{-11}$ A
50,0	305,9	1,75	280,0	0,46
50,5	306,6	1,95	-	-
51,0	307,5	2,0	280,9	0,47
51,5	308,4	2,1	-	-
52,0	309,4	2,25	281,9	0,49
52,5	310,3	2,35	-	-
53,0	311,3	2,5	282,9	0,515
53,5	312,2	2,6	-	-
54,0	313,2	2,75	283,9	0,525
54,5	314,2	2,85	-	-
55,0	315,1	2,95	284,9	0,55
55,5	316,0	3,1	-	-
56,0	316,8	3,1	286,0	0,575
56,5	317,8	3,2	-	-
57,0	318,7	3,2	287,1	0,615
57,5	319,7	3,2	-	-
58,0	320,5	3,2	288,7	0,63
58,5	321,3	3,1	-	-
59,0	322,2	3,1	289,6	0,645
59,5	323,0	3,0	-	-
60,0	323,9	2,9	-	-
60,5	324,7	2,8	-	-
61,0	325,5	2,6	-	-
61,5	326,3	2,5	-	-
62,0	327,1	2,3	-	-
62,5	327,9	2,15	-	-
63,0	328,8	2,0	-	-
63,5	329,5	1,8	-	-
64,0	330,3	1,65	-	-



## Literatur

- [1] R.Fieschi C.Bucci. „Ionic Thermocurrents in Dielectrics“. In: *Physics Review* 148 (1966).
- [2] TU Dortmund. *V48 Dipolrelaxation in Ionenkristallen*. 2020.
- [3] H. Hamann K.D. Becker. „Untersuchungen zur Diffusion von Fremdionen und Leerstellen in kubischen Ionenkristallen mit Hilfe der kernmagnetischen Relaxation durch Quadrupol-Wechselwirkung“. In: *Berichte der Bundesengesellschaft für physikalische Chemie* 79 (1975).
- [4] J.Rolfe R. Muccillo. „Effect of Irradiation on Impurity–Vacancy Dipoles in KBr Crystals Doped with Strontium“. In: *Physica Status Solidi* 61 (1974).
- [5] R.G.Fuller R.M. Fuller. „Research Project for Undergraduates; Ionic Thermoconductivity in Dielectrics“. In: *American Journal of Physics* 40 (1972).