

Versuch Nr. V48

Dipolrelaxation in Ionenkristallen

Daniel Rau

daniel.rau@tu-dortmund.de

Sören Lippert

soeren.lippert@tu-dortmund.de

Durchführung: 24. Januar 2018 1.Abgabe: 11. Februar 2018

TU Dortmund – Fakultät Physik
Bachelor Medizininphysik

Inhaltsverzeichnis

1	Zielsetzung	3
2	Theorie	3
3	Durchführung	7
4	Auswertung	8
4.1	Berechnung der Aktivierungsenergie W	8
4.1.1	Korrektur des Untergrundes	8
4.2	Berechnung von W aus dem gesamten Kurvenverlauf	9
4.2.1	Berechnung der Aktivierungsenergie W über linearen Anstieg . . .	10
4.2.2	Mittelung der Aktivierungsenergie W	11
4.3	Bestimmung der Relaxationszeit	12
4.3.1	Bestimmung der Heizrate b_{heiz}	12
4.3.2	Berechnung der der Relaxationszeit	14
5	Diskussion	14
6	Tabellen	17
7	Messwerte	22
	Literatur	26

1 Zielsetzung

Im vorliegenden Versuch soll das temperaturabhängige Verhalten von Dipolen in Ionenkristallen untersucht werden. Hierzu sollen die Aktivierungsenergie W und die charakteristische Relaxationszeit τ_0 einer Probe bestimmt werden.

2 Theorie

Werden zweiatomige Kationen in ein einatomiges Ionenkristallgitter eingebaut entstehen aufgrund der Ladungsneutralität, wie in Abbildung 1a dargestellt, Kation-Leerstellen. Die Verbindungslinie zwischen dem eingebauten Kation und der Leerstelle gibt die Richtung des Dipols an, welcher sich zwischen diesen beiden Punkten ausbildet. Eine Richtungsänderung dieses Dipols kann aufgrund der Gittereigenschaften nur durch Leerstellendiffusion und somit nur in diskreten Werten erfolgen. Um diesen Prozess zu bewirken muss Energie in Form von Wärme in das System gebracht werden, bis eine bestimmte Aktivierungsenergie W erreicht wird. Die Dipole, die aufgrund ihrer thermischen Bewegung dazu in der Lage sind, diese Schwellenenergie aufzunehmen, sind nach der Boltzmannstatistik verteilt. Hierzu proportional ist die mittlere Zeit zwischen zwei Umorientierungen des Dipols, auch Relaxationszeit genannt.

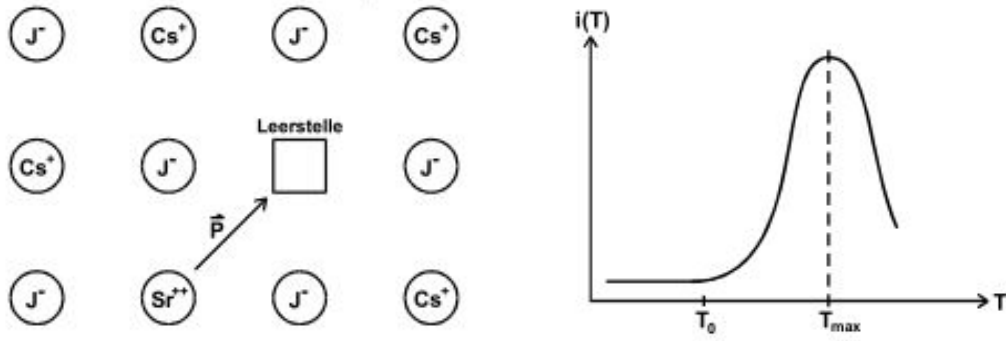
$$\tau(T) = \tau_0 \exp(W/kT) \quad (1)$$

Hierbei ist k die Boltzmannkonstante, T die Temperatur und τ_0 die charakteristische Relaxationszeit für die $\tau_0 = \tau(\infty)$ gilt.

Mittels eines elektrischen Feldes E lässt sich aufgrund der thermischen Bewegung der Gitterbausteine nur ein Bruchteil y der Dipolgesamtheit aus der statistischen Verteilung über alle Raumwinkel hin zum E-Feld ausrichten. Der Bruchteil y wird mit der Langevin-Funktion $L(x)$ beschrieben, wobei $x = \frac{pE}{kT}$ mit dem Dipolmoment p ist. Da $x \ll 1$ wegen $pE \ll kT$ lässt sich y aufgrund der Eigenschaften der Langevin-Funktion als

$$y = \frac{pE}{3kT} \quad (2)$$

schreiben.



(a) Dipol am Beispiel eines CsJ-Gitters mit Sr^{2+} -Kation [2] (b) Erwarteter Verlauf der Stromdichte gegenüber der Temperatur [2]

Abbildung 1: Einfache Darstellung eines Dipols und der Verlauf der zunehmenden Stromdichte

Bedingung für die Gültigkeit dieser Formel ist, dass die Zeit t in der das E-Feld die Dipole ausrichtet groß gegenüber der Relaxationszeit $\tau(T)$ ist. Durch schnelles Abkühlen dieser Verteilung der Ausrichtung des Bruchteils y der Dipole entlang des E-Feldes, gelingt es, aufgrund des exponentiellen Anstiegs der Relaxationszeit mit sinkender Temperatur, die Dipolausrichtungen einzufrieren. Durch das Kurzschließen und damit einhergehende Entladen der Kondensatorplatten wird sichergestellt, dass keine freien beweglichen Elektronen den Depolarisationsstrom beeinflussen. Dieser entsteht durch das Aufheizen der Probe mit einer konstanten Heizrate $b = \frac{dT}{dt}$ und dem damit verbundenen Relaxieren der Dipole zurück in die räumliche Winkelverteilung. Die Depolarisationsstromdichte $j(t)$ ergibt sich nach

$$j(T) = y(T_P) p \frac{dN}{dt}, \quad (3)$$

mit T_P als Polarisierungstemperatur und $\frac{dN}{dt}$ als Zahl der pro Zeit und Volumeneinheit relaxierenden Dipole. Der erwartete Verlauf der Depolarisationsstromdichte gegen die Temperatur ist in Abbildung 1b dargestellt. Dieser Verlauf ergibt sich aufgrund der schnellen Abnahme der Relaxationszeit bis zu einem Maximum. Danach nimmt die Depolarisationsstromdichte wieder ab, da die Zahl der noch nicht relaxierten Dipole abnimmt und somit im gleichen Temperaturintervall weniger Dipole relaxieren können. Der Faktor $\frac{dN}{dt}$ ist mit dem Proportionalitätsfaktor $\frac{1}{\tau}$ proportional zur Zahl der noch pro Volumeneinheit orientierten Dipole.

$$\frac{dN}{dt} = \frac{N}{\tau} \quad (4)$$

Die Lösung dieser Differentialgleichung ist

$$N = N_P \exp \left(-\frac{1}{b} \int_{T_0}^T \frac{dT'}{\tau(T')} \right) \quad (5)$$

N_P ist dabei die Dipolzahl zu Beginn des Aufheizens also bei der Temperatur T_0 . Das lässt sich nun mittel Gleichung 4 in Formel 3 einsetzen und $\tau(T)$ durch Formel 1 ersetzen.

So erhält man für die Depolarisationsstromdichte

$$j(T) = \frac{p^2 EN_P}{3kT_P \tau_0} \exp \left(-\frac{1}{b\tau_0} \int_{T_0}^T \exp \left(-\frac{W}{kT'} \right) dT' \right) \exp \left(-\frac{W}{kT} \right). \quad (6)$$

Um nun die gesuchte Potentialschwelle W zu erhalten gibt es zwei Methoden. Für eine möglichst genaue Bestimmung der Potentialschwelle W wird Methode 1 angewandt, bei der die Schwellenenergie aus dem gesamten Kurvenverlauf bestimmt wird. Hierzu wird für die Polarisation P eine Differentialgleichung analog zu Gleichung 4 aufgestellt.

$$\frac{dP}{dt} = \frac{P(t)}{\tau(T(t))} \quad (7)$$

Durch die Integration des durch die Polarisation erzeugten Stromes $i(t)$ ergibt sich nun einen Ausdruck für

$$\tau(T(t)) = \frac{\int_{t(T)}^{\infty} i(t) dt}{i(t(T))}. \quad (8)$$

Da t und T über eine lineare Funktion zusammenhängen, lässt sich Gleichung 8 auch als

$$\tau(T) = \frac{\int_T^{\infty} i(T') dT'}{bi(T)} \quad (9)$$

schreiben. Mit Formel 1 lässt sich nun ein Zusammenhang mit der Aktivierungsenergie W herstellen.

$$\frac{W}{kT} = \frac{\int_T^{\infty} i(T') dT'}{bi(T)\tau_0} \quad (10)$$

Somit lässt sich nun W bestimmen indem

$$\ln \frac{\int_T^{T^*} i(T') dT'}{i(T)} \quad (11)$$

gegen $\frac{1}{T}$ aufgetragen wird. T^* ist dabei eine beliebige Temperatur bei der $i(T) \approx 0$ gilt. τ_0 lässt sich bestimmen, indem zunächst Gleichung 16 nach T differenziert wird und gleich 0 gesetzt wird.

$$\frac{d}{dT} \left(\frac{p^2 EN_P}{3kT_P \tau_0} \exp \left(-\frac{1}{b\tau_0} \int_{T_0}^T \exp \left(-\frac{W}{kT'} \right) dT' \right) \exp \left(-\frac{W}{kT} \right) \right) = 0 \quad (12)$$

Nun wird $T = T_{\max}$ gesetzt und der Vorfaktor durch Dividieren eliminiert. So erhält man

$$0 = \frac{W}{kT_{\max}^2} - \frac{1}{b\tau_0} \exp \left(-\frac{W}{kT_{\max}^2} \right) \quad (13)$$

Daraus lässt sich τ_0 also als

$$\tau_0 = \frac{kT_{\max}^2}{Wb} \exp \left(-\frac{W}{kT_{\max}^2} \right) \quad (14)$$

bestimmen. Eine weitere, mit weniger Rechenaufwand verbundene Möglichkeit die Potentialschwelle W zu bestimmen, ist Methode 2. Hierbei lässt sich im Anfangsbereich der Kurve der Depolarisationsstrom wegen

$$\int_{T_0}^{T'} \exp\left(-\frac{W}{kT}\right) dT' \approx 0 \quad (15)$$

als

$$j(T) \approx \frac{p^2 E N_P}{3kT_P \tau_0} \exp\left(-\frac{W}{kT}\right) \quad (16)$$

nähern. Für den Temperaturbereich indem diese Näherung gültig ist, lässt sich W aus der Steigung der Ausgleichsgeraden die durch ein Diagramm gelegt wird, in dem $\ln(j)$ gegen $\frac{1}{T}$ aufgetragen ist, berechnen.

3 Durchführung

Zunächst wird die sich in dem in Abbildung 2 dargestellten Aufbau befindliche Probe über die Heizwicklung auf ca. 50°C erwärmt.

Ist diese Temperatur erreicht, wird mit der Ausrichtung der Dipole begonnen, indem mit dem Kondensator ein elektrisches Feld erzeugt wird. Nach ca. 20 Minuten wird mit dem Einfrieren des Polarisationszustandes begonnen, indem die Probe mit flüssigem Stickstoff, welcher den Kühlfinger umgibt, auf -60°C abgekühlt wird. Zu sehen ist sowohl der Kühlfinger als auch die Heizspule in der rechts stehenden Abbildung in der Mitte unten. Nachdem bei dieser Temperatur das E-Feld abgeschaltet und die Platten durch Kurzschließen vollständig entladen sind, wird mit dem Aufheizen der Probe begonnen bis sie eine Temperatur von 60°C erreicht. Dabei sollen Heizraten zwischen $1,5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ und $3,0^{\circ}\text{C}/\text{min}$ gewählt werden. Jede Minute wird die Probentemperatur und der Depolarisationsstrom von dem Thermometer und dem Picoamperemeter abgelesen. Die Messung wird für zwei verschiedene Heizraten durchgeführt.

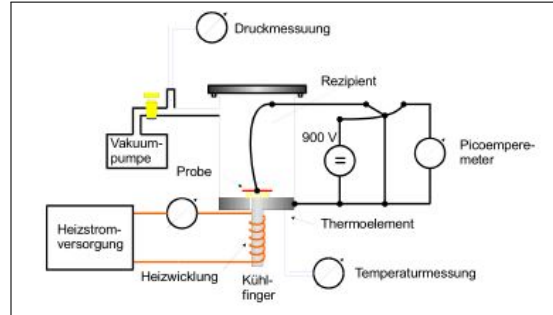


Abbildung 2: Aufbau der Messvorrichtung [2]

4 Auswertung

4.1 Berechnung der Aktivierungsenergie W

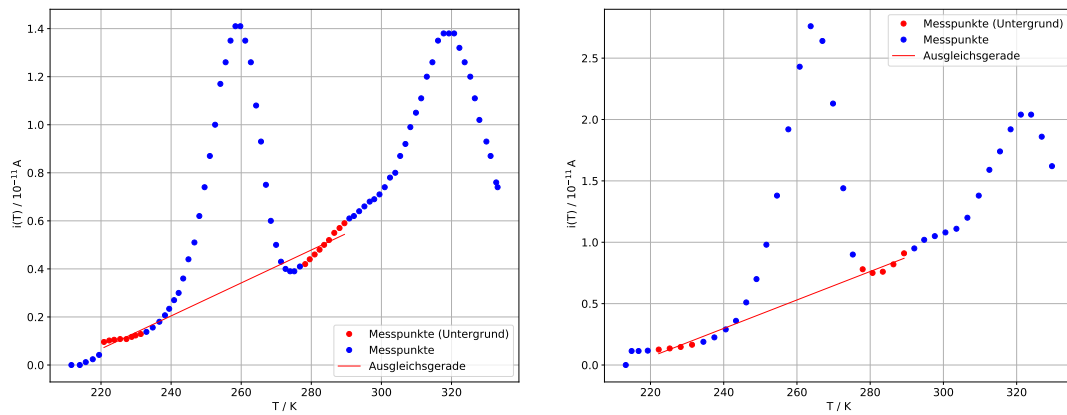
Zu Beginn wird aus dem gemessenen Strom i die Stromdichte j berechnet, indem der Strom durch die Kreisfläche A geteilt wird. Die im Experiment verwendete Probe besitzt einen Durchmesser $d = 3 \text{ mm}$ [2], sodass die Stromdichte durch

$$j = \frac{i}{A} = \frac{i}{\pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2} \quad (17)$$

berechnet werden kann.

4.1.1 Korrektur des Untergrundes

Zu beachten ist, wie in den Abbildungen 3a und 3b zu sehen, den nahezu linear ansteigenden Untergrundeﬀekt zu berechnen und abzuziehen. Aus diesem Grund werden jeweils einige Werte vor und nach dem ersten Peak ausgewählt und eine lineare Ausgleichsgerade durch diese gezogen. Die entsprechenden Werte sind in den Tabellen 2 und Tabelle 3 zu sehen.



(a) Stromverlauf mit einer Heizrate $\approx 1,5 \text{ K/min}$ (b) Stromverlauf mit einer Heizrate $\approx 3,0 \text{ K/min}$

Abbildung 3: Temperaturabhängiger Verlauf des Depolarisationsstroms

Für den Depolarisationsstrom mit einer Heizrate von $1,5 \text{ K/min}$ kann die Ausgleichsgerade ($y(x) = ax + b$) des Untergrundeﬀekt durch die Parameter

$$a_{\text{Ausgleich}} = (6,9 \pm 0,2) \cdot 10^{-14} \frac{\text{A}}{\text{K}}$$

$$b_{\text{Ausgleich}} = (-1,44 \pm 0,06) \cdot 10^{-11} \text{ A}$$

bzw. für eine Heizrate von etwa 3,0 K/min durch

$$a_{\text{Ausgleich}} = (1,16 \pm 0,04) \cdot 10^{-13} \frac{\text{A}}{\text{K}}$$

$$b_{\text{Ausgleich}} = (-2,5 \pm 0,1) \cdot 10^{-11} \text{ A}$$

beschrieben werden. Die beiden Geraden sind in den jeweiligen Abbildungen eingezeichnet.

4.2 Berechnung von W aus dem gesamten Kurvenverlauf

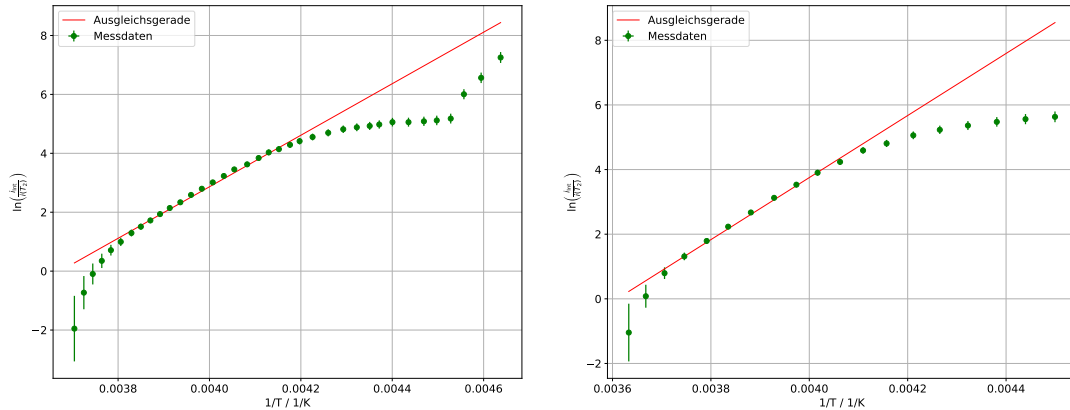
Anschließend kann das Integral berechnet werden und in die Formel 11 eingesetzt werden. Für die Berechnung des Integrals wird jeweils zwischen zwei Messpunkten eine Gerade der Form

$$a_{\text{Anstieg}} \cdot T + b_{\text{Anstieg}}$$

gezogen und die Fläche zwischen dieser Geraden und der Ausgleichsgeraden für die Hintergrundeffekte berechnet. Es wird somit jeweils zwischen zwei Messpunkten das Integral

$$\int_{T_1}^{T_2} (a_{\text{Anstieg}} \cdot T' + b_{\text{Anstieg}} - a_{\text{Ausgleich}} \cdot T' - b_{\text{Ausgleich}}) dT' \quad (18)$$

ermittelt. Durch Aufsummieren der Teilintegrale bis zum jeweiligen Punkt, wird das Gesamtintegral i_{Int} berechnet (Tabelle 4 und 5). In Abbildung 4a und 4b sind $\ln(i_{\text{Int}}/i(T_2))$ gegen $1/T$ aufgetragen und eine Ausgleichsgerade durch die berechneten Wertepaare gelegt worden.



(a) Bestimmung der Aktivierungsenergie mit einer Heizrate $\approx 1,5 \text{ K/min}$ (b) Bestimmung der Aktivierungsenergie mit einer Heizrate $\approx 3,0 \text{ K/min}$

Abbildung 4: Bestimmung der Aktivierungsenergie

Es ergibt sich eine Steigung und Y-Achsenabschnitt von

$$\begin{aligned}a_{\text{int}_1} &= (8700 \pm 200) \text{ K} \\ b_{\text{int}_1} &= -32 \pm 1\end{aligned}$$

für die Heizrate von 1,5 K/min und für die Heizrate von 3,0 K/min ist die Steigung bzw. Y-Achsenabschnitt von

$$\begin{aligned}a_{\text{int}_2} &= (9600 \pm 200) \text{ K} \\ b_{\text{int}_2} &= -34 \pm 1.\end{aligned}$$

Da die Ausgleichsparameter $a_{\text{Ausgleich}}$ und $b_{\text{Ausgleich}}$ fehlerbelastet sind, ist auch das Integral über den Depolarisationsstroms fehlerbelastet. Der Fehler des Integrals (Formel 18) errechnet sich aus

$$\Delta I = \sqrt{\left(\frac{T^2 \Delta a_{\text{Ausgleich}}}{2}\right)^2 + (\Delta b_{\text{Ausgleich}} T)^2}. \quad (19)$$

Durch Umstellen des Verhältnis (Formel 10)

$$a = \frac{W}{k_B} \iff W = a \cdot k_B \quad (20)$$

kann die Aktivierungsenergie W zu

$$W_{1a} = (120 \pm 3) \cdot 10^{-21} \text{ J} = (0,75 \pm 0,02) \text{ eV}$$

für die Messreihe mit Heizrate $b \approx 1,5 \text{ K/min}$ berechnet werden. Analog kann dies für die Messreihe mit $b \approx 3,0 \text{ K/min}$ ermittelt werden. Es ergibt sich eine Aktivierungsenergie von

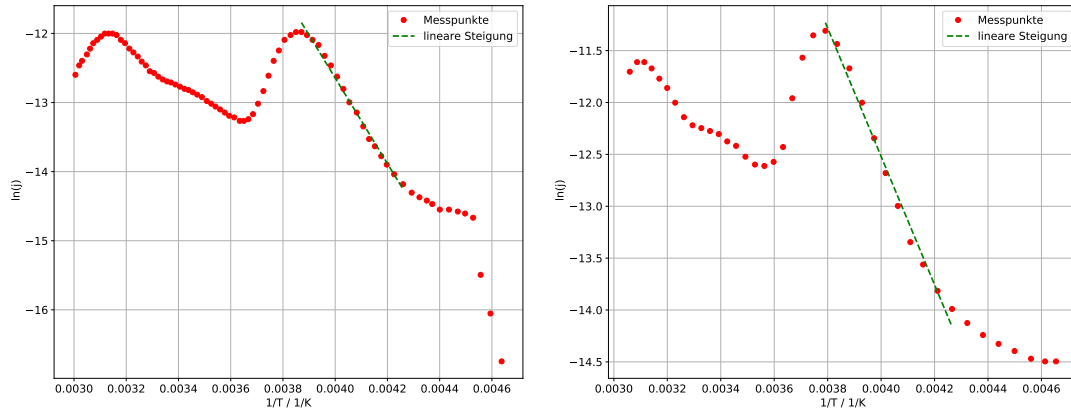
$$W_{2a} = (133 \pm 3) \cdot 10^{-21} \text{ J} = (0,83 \pm 0,02) \text{ eV}.$$

4.2.1 Berechnung der Aktivierungsenergie W über linearen Anstieg

Eine andere Methode zur Bestimmung der Aktivierungsenergie W ist es $\ln(j)$ gegen $1/T$ im Anfangsbereich der Depolarisationskurve aufzutragen und mit Hilfe einer Ausgleichsgerade sowie dem Verhältnis

$$a = -\frac{W}{k_B} \iff W = -a \cdot k_B \quad (21)$$

dieses zu berechnen. Der Zusammenhang wurde in der Theorie in Formel 16 gezeigt und für die Berechnung umgestellt. Grundlage hierfür ist die in Formel 15 erwähnte Näherung und die daraus resultierende Annahme (Formel 16). In Abbildung 5a und Abbildung 5b ist $\ln(j)$ gegen $1/T$ gezeigt, während die errechneten Werte in Tabelle 6 und 7 abgebildet sind. Im jeweiligen lineare Anstieg des Graphen ist die erwähnte Ausgleichsgerade eingezeichnet, um aus dessen Parametern die Aktivierungsenergie zu bestimmen.



(a) Bestimmung der Aktivierungsenergie mit einer Heizrate $\approx 1,5$ K/min (b) Bestimmung der Aktivierungsenergie mit einer Heizrate $\approx 3,0$ K/min

Abbildung 5: Bestimmung der Aktivierungsenergie durch linearen Anstieg

Für die Messreihe mit der niedrigeren Heizrate ergeben sich die Parameter

$$a = (-6200 \pm 100) \text{ K}$$

$$b = 12,1 \pm 0,5$$

und resultierend eine Aktivierungsenergie von

$$W = (85 \pm 1) \cdot 10^{-21} \text{ J} = (0,53 \pm 0,01) \text{ eV}.$$

Bei analogem Vorgehen für die andere Messung lassen sich die Parameter

$$a = (-6200 \pm 200) \text{ K}$$

$$b = (12,2 \pm 0,9) \cdot 10^{-21}$$

und eine Aktivierungsenergie W von

$$W = (85 \pm 3) \text{ J} = (0,53 \pm 0,02) \text{ eV}$$

ermitteln.

4.2.2 Mittelung der Aktivierungsenergie W

In den beiden letzten beiden Unterkapiteln wurden die folgenden Werte für die Aktivierungsenergie W bestimmt:

Integralmethode:

$$W_{1a} = (120 \pm 3) \cdot 10^{-21} \text{ J und } W_{2a} = (133 \pm 3) \cdot 10^{-21} \text{ J}$$

Methode der linearen Steigung:

$$W_{1b} = (85 \pm 1) \cdot 10^{-21} \text{ J und } W_{2b} = (85 \pm 3) \cdot 10^{-21} \text{ J}$$

Eine Mittelung der Werte einer Messreihe ergibt eine Aktivierungsenergie von

$$\begin{aligned} W_1 &= (102 \pm 2) \cdot 10^{-21} \text{ J} = (0,64 \pm 0,01) \text{ eV} \\ \text{und} \\ W_2 &= (109 \pm 2) \cdot 10^{-21} \text{ J} = (0,68 \pm 0,01) \text{ eV} \end{aligned}$$

wobei der Fehler durch die Gauß'sche Fehlerfortpflanzung mit der Formel

$$\Delta W = \frac{1}{2} \sqrt{(\Delta W_a)^2 + (\Delta W_a)^2} \quad (22)$$

berechnet wird.

4.3 Bestimmung der Relaxationszeit

Um die Relaxationszeit τ_0 zu bestimmen wird Formel 14 verwendet. Der auftretende Fehler auf τ_0 kann durch

$$\Delta \tau_0 = \sqrt{\left(-\frac{k_B T_{\max}^2}{W b_{\text{heiz}}^2} \cdot e^{-\frac{W}{k_B T_{\max}}} \cdot \Delta b_{\text{heiz}} \right)^2 + \left(-\frac{(k_B T_{\max} + W) T_{\max}}{W^2 b_{\text{heiz}}} \cdot e^{-\frac{W}{k_B T_{\max}}} \cdot \Delta W \right)^2} \quad (23)$$

ermittelt werden. In dieser Formel steht b_{heiz} für die Heizrate, welche im folgenden Unterkapitel für die beiden Messreihen bestimmt wird.

4.3.1 Bestimmung der Heizrate b_{heiz}

Für die Berechnung der durchschnittlichen Heizrate werden die Temperaturen gegen die Messzeit aufgetragen und eine Ausgleichsgerade angelegt. In Abbildungen 6 und 7 sind die beiden Messreihen und deren Ausgleichsgerade abgebildet. Die Ausgleichsparameter der Geraden der Form $b_{\text{heiz}} \cdot T + c$ sind:

$$\begin{aligned} b_{\text{heiz}} &= (2434 \pm 4) \cdot 10^{-5} \frac{\text{K}}{\text{s}} = (1,460 \pm 0,002) \frac{\text{K}}{\text{min}} \\ c &= (213,9 \pm 0,1) \text{ K} \end{aligned}$$

Für die zweite Messreihe ergeben sich die Parameter

$$\begin{aligned} b_{\text{heiz}} &= (4807 \pm 10) \cdot 10^{-5} \frac{\text{K}}{\text{s}} = (2,884 \pm 0,006) \frac{\text{K}}{\text{min}} \\ c &= (211,5 \pm 0,1) \text{ K}. \end{aligned}$$

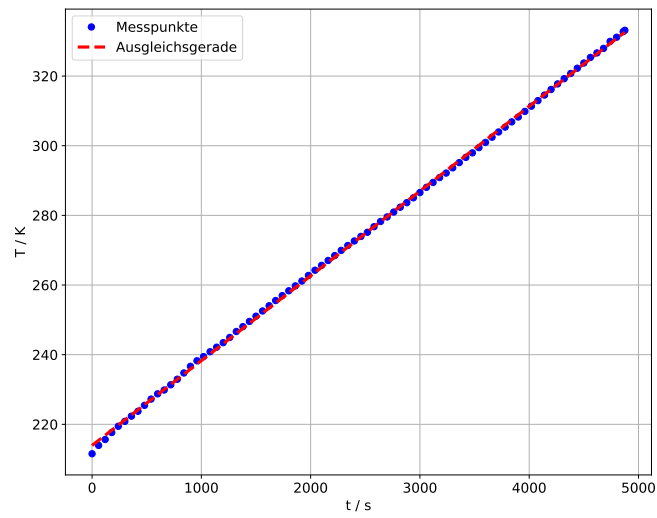


Abbildung 6: Berechnung der mittleren Heizrate für die Messung mit $b_{\text{heiz}} \approx 1,5 \text{ K/min}$

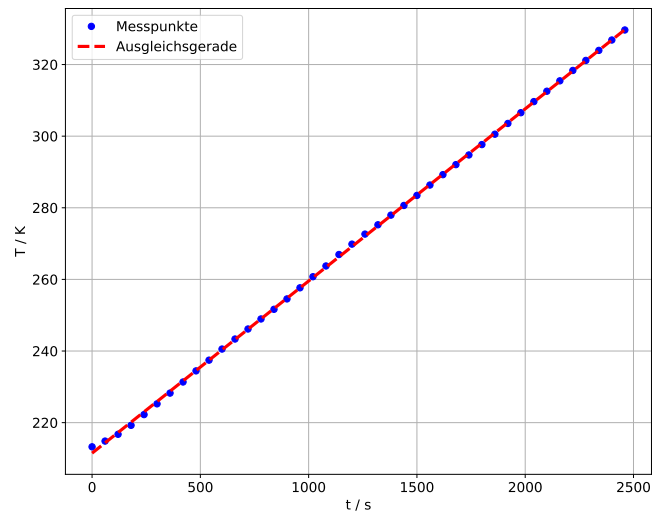


Abbildung 7: Berechnung der mittleren Heizrate für die Messung mit $b_{\text{heiz}} \approx 3,0 \text{ K/min}$

4.3.2 Berechnung der der Relaxationszeit

Die für das Berechnen der Relaxationszeit τ_0 bzw. deren Fehler notwendigen Werte sind unten dargestellt.

1. Messreihe mit $b_{\text{heiz}} \approx 1,5 \text{ K/min}$:

$$\begin{aligned} T_{\text{max}} &= 264,25 \text{ K} \\ W_1 &= (102 \pm 2) \cdot 10^{-21} \text{ J} \\ b_{\text{heiz}} &= (2434 \pm 5) \cdot 10^{-5} \frac{\text{K}}{\text{s}} \end{aligned}$$

2. Messreihe mit $b_{\text{heiz}} \approx 3,0 \text{ K/min}$:

$$\begin{aligned} T_{\text{max}} &= 263,75 \text{ K} \\ W_2 &= (109 \pm 2) \cdot 10^{-21} \text{ J} \\ b_{\text{heiz}} &= (4807 \pm 10) \cdot 10^{-5} \frac{\text{K}}{\text{s}} \end{aligned}$$

Wodurch sich durch Einsetzen in Formel 14 die Relaxationszeiten

$$\begin{aligned} \tau_{0_1} &= (3 \pm 2) \cdot 10^{-10} \text{ s} \\ \tau_{0_2} &= (2 \pm 1) \cdot 10^{-11} \text{ s} \end{aligned}$$

ergeben. Der Fehler berechnet sich mit Formel 23.

5 Diskussion

Werden die auf die beiden verschiedenen Methoden bestimmten Aktivierungsenergien wie in Tabelle 1 miteinander verglichen, lässt sich die Erwartung, dass Methode 2 durch den Einbezug der gesamten Messkurve bessere Ergebnisse liefert, verifizieren. In der Tabelle steht W_a für die mit Methode 1 bestimmte Schwellenenergie und W_b für selbige mit Methode 2 bestimmt. Die prozentuale Abweichung bezieht sich auf den Literaturwert.

Tabelle 1: Vergleich von Literatur [1] und Messwerten

Heizrate / K/min	Literaturwert / eV	W_b / eV	Abweichung / %	W_a / eV	Abweichung / %
1,5	0,66	$0,75 \pm 0,02$	14	$0,53 \pm 0,01$	20
3,0	0,66	$0,83 \pm 0,02$	26	$0,53 \pm 0,02$	20

Darüberhinaus fällt auf, dass die Werte der für die beiden verschiedenen Heizraten sich bei der zweiten Methode nur in ihrem Fehler unterscheiden, was von einer gelungenen Wahl der Heizspannung zeugt. Auch die Abweichungen von lediglich maximal 26% spricht für eine gelungenen Versuchsdurchführung ohne große Fehlerquellen. Die teilweise höheren Abweichungen bei Methode 1 lassen sich zum einen durch die schon beschriebenen Fakt erklären, dass es sich bei dieser Methode lediglich um eine Näherungsmethode handelt und darüberhinaus der Bereich der Näherungsmethode subjektiv gewählt wurde. Da

analoge Messinstrumente verwendet wurden kann es zu Ablesungsfehlern gekommen sein, die ob der guten Ergebnisse aber keine große Rolle gespielt haben. Zu Beginn der Messungen kam es zu großen Varianzen des Depolarisationsstroms, weshalb diese Werte in der Auswertung nicht berücksichtigt wurden. Im Gegensatz zu den gemessenen Aktivierungsenergien weisen die berechneten Relaxationszeiten

$$\begin{aligned}\tau_{0_1} &= (3 \pm 2) \cdot 10^{-10} \text{ s und} \\ \tau_{0_2} &= (42 \pm 1) \cdot 10^{-11} \text{ s}\end{aligned}$$

mit einer Differenz von 3 bzw. 4 Größenordnungen eine deutliche Abweichung vom Literaturwert [1]

$$\tau_0 = 4 \cdot 10^{-14} \text{ s}$$

auf. Auf eine Bestimmung der relativen Abweichung wird auf Grund dieser großen Abweichung verzichtet. Gründe für diese Differenz zwischen Literatur- und Messwerten könnte das exponentielle Verhältnis zwischen der Aktivierungsenergie W und der Relaxationszeit τ_0 sein (siehe Formel 14). So wirkt sich eine kleine Schwankung in der Aktivierungsenergie deutlich in der Berechnung der Relaxationszeit aus. Jedoch kann dies alleine nicht die Abweichung um mindestens 3 Größenordnungen erklären, sondern spricht dafür, dass im Experiment und / oder in der Auswertung Vereinfachungen angenommen wurden oder Fehler aufgetreten sind.

6 Tabellen

Tabelle 2: Umgerechnete Messwerte der 1.Messung ($b_{\text{heiz}} = 1,5 \text{ K/min}$)

$i(T) / 10 \cdot 10^{-11} \text{ A}$	T / K	t / s	$i(T) / 10 \cdot 10^{-11} \text{ A}$	T / K	t / s
0,000	211,55	0	0,390	275,15	2520
0,000	213,95	60	0,410	276,75	2580
0,012	215,65	120	0,420	278,25	2640
0,024	217,65	180	0,440	279,55	2700
0,042	219,45	240	0,460	280,95	2760
0,096	220,85	300	0,480	282,35	2820
0,102	222,35	360	0,500	283,65	2880
0,105	223,75	420	0,520	285,05	2940
0,108	225,45	480	0,550	286,55	3000
0,108	227,25	540	0,570	288,05	3060
0,117	228,75	600	0,590	289,45	3120
0,123	229,85	660	0,610	290,85	3180
0,129	231,35	720	0,620	292,15	3240
0,138	232,95	780	0,640	293,65	3300
0,156	234,75	840	0,660	295,15	3360
0,180	236,65	900	0,680	296,65	3420
0,207	238,25	960	0,690	297,95	3480
0,234	239,45	1020	0,710	299,45	3540
0,270	240,85	1080	0,740	300,95	3600
0,300	242,15	1140	0,780	302,45	3660
0,360	243,45	1200	0,800	303,95	3720
0,440	244,95	1260	0,870	305,35	3780
0,510	246,65	1320	0,920	306,85	3840
0,620	248,05	1380	0,990	308,25	3900
0,740	249,55	1440	1,050	309,85	3960
0,870	251,05	1500	1,110	311,35	4020
1,000	252,55	1560	1,200	312,95	4080
1,170	254,05	1620	1,260	314,55	4140
1,260	255,55	1680	1,350	316,15	4200
1,350	256,95	1740	1,380	317,75	4260
1,410	258,35	1800	1,380	319,25	4320
1,410	259,75	1860	1,380	320,75	4380
1,350	261,15	1920	1,320	322,25	4440
1,260	262,75	1980	1,260	323,75	4500
1,080	264,25	2040	1,200	325,35	4560
0,930	265,65	2100	1,110	326,65	4620
0,750	267,05	2160	1,020	327,95	4680
0,600	268,45	2220	0,930	329,95	4740
0,500	269,95	2280	0,870	331,15	4800
0,430	271,35	2340	0,760	332,75	4860
0,400	272,65	2400	0,740	333,15	4875
0,390	273,95	2460			

Tabelle 3: Umgerechnete Messwerte der 2.Messung ($b_{\text{heiz}} = 3,0 \text{ K/min}$)

$i(T) / ^{-11} \text{ A}$	$T / \text{ K}$	$t / \text{ s}$
0,000	213,25	0
0,114	214,85	60
0,114	216,75	12
0,117	219,25	180
0,126	222,25	240
0,135	225,25	300
0,147	228,25	360
0,165	231,35	420
0,189	234,45	480
0,225	237,45	540
0,290	240,55	600
0,360	243,35	660
0,510	246,15	720
0,700	248,95	780
0,980	251,65	840
1,380	254,55	900
1,920	257,65	960
2,430	260,75	1020
2,760	263,75	1080
2,640	266,95	1140
2,130	269,85	1200
1,440	272,65	1260
0,900	275,25	1320
0,780	277,95	1380
0,750	280,65	1440
0,760	283,45	1500
0,820	286,35	1560
0,910	289,25	1620
0,950	292,05	1680
1,020	294,75	1740
1,050	297,65	1800
1,080	300,55	1860
1,110	303,55	1920
1,200	306,55	1980
1,380	309,65	2040
1,590	312,55	2100
1,740	315,45	2160
1,920	318,35	2220
2,040	321,15	2280
2,040	323,95	2340
1,860	326,85	2400
1,620	329,65	2460

Tabelle 4: Werte des Integrals von $i(T)$ der 1.Messung ($b_{\text{heiz}} = 1,5 \text{ K/min}$)

T / K	Integral von $i(T) / 10 \cdot 10^{-11} \text{ A}$	Integral von $\Delta i(T) / 10 \cdot 10^{-11} \text{ A}$	$i(T) / 10^{-11} \text{ A}$
269,950	0,071	0,079	0,500
268,450	0,289	0,163	0,600
267,050	0,681	0,242	0,750
265,650	1,318	0,321	0,930
264,250	2,199	0,399	1,080
262,750	3,406	0,484	1,260
261,150	4,926	0,574	1,350
259,750	6,376	0,653	1,410
258,350	7,881	0,731	1,410
256,950	9,357	0,810	1,350
255,550	10,742	0,889	1,260
254,050	12,106	0,973	1,170
252,550	13,290	1,058	1,000
251,050	14,264	1,142	0,870
249,550	15,059	1,226	0,740
248,050	15,682	1,311	0,620
246,650	16,117	1,389	0,510
244,950	16,509	1,485	0,440
243,450	16,760	1,569	0,360
242,150	16,898	1,643	0,300
240,850	16,989	1,716	0,270
239,450	17,055	1,794	0,234
238,250	17,084	1,862	0,207
236,650	17,094	1,952	0,180
234,750	17,081	2,059	0,156
232,950	17,054	2,160	0,138
231,350	17,027	2,250	0,129
229,850	17,006	2,334	0,123
228,750	16,994	2,396	0,117
227,250	16,980	2,481	0,108
225,450	16,975	2,582	0,108
223,750	16,988	2,678	0,105
222,350	17,010	2,756	0,102
220,850	17,041	2,841	0,096
219,450	17,042	2,919	0,042
217,650	16,999	3,021	0,024
215,650	16,946	3,133	0,012

Tabelle 5: Werte des Integrals von $i(T)$ der 1.Messung ($b_{\text{heiz}} = 3,0 \text{ K/min}$)

T / K	Integral von $i(T) / 10 \cdot 10^{-11} \text{ A}$	Integral von $\Delta i(T) / 10 \cdot 10^{-11} \text{ A}$	$i(T) / 10 \cdot 10^{-11} \text{ A}$
275,250	0,317	0,283	0,900
272,650	1,561	0,555	1,440
269,850	4,709	0,849	2,130
266,950	9,806	1,153	2,640
263,750	16,552	1,488	2,760
260,750	22,669	1,803	2,430
257,650	27,797	2,127	1,920
254,550	31,409	2,452	1,380
251,650	33,526	2,756	0,980
248,950	34,667	3,039	0,700
246,150	35,281	3,333	0,510
243,350	35,511	3,626	0,360
240,550	35,523	3,920	0,290
237,450	35,433	4,244	0,225
234,450	35,301	4,559	0,189
231,350	35,181	4,884	0,165
228,250	35,107	5,209	0,147
225,250	35,097	5,523	0,135
222,250	35,160	5,837	0,126

Tabelle 6: Werte für die Aktivierungsenergiebestimmung der 1.Messung ($b_{\text{heiz}} = 1,5 \text{ K/min}$)

$\ln(j)$	T / K	$\ln(j)$	T / K
-16,747	215,65	-13,265	275,15
-16,054	217,65	-13,215	276,75
-15,494	219,45	-13,191	278,25
-14,667	220,85	-13,145	279,55
-14,607	222,35	-13,100	280,95
-14,578	223,75	-13,058	282,35
-14,549	225,45	-13,017	283,65
-14,549	227,25	-12,978	285,05
-14,469	228,75	-12,922	286,55
-14,419	229,85	-12,886	288,05
-14,372	231,35	-12,851	289,45
-14,304	232,95	-12,818	290,85
-14,182	234,75	-12,802	292,15
-14,039	236,65	-12,770	293,65
-13,899	238,25	-12,739	295,15
-13,776	239,45	-12,710	296,65
-13,633	240,85	-12,695	297,95
-13,528	242,15	-12,666	299,45
-13,346	243,45	-12,625	300,95
-13,145	244,95	-12,572	302,45
-12,997	246,65	-12,547	303,95
-12,802	248,05	-12,463	305,35
-12,625	249,55	-12,407	306,85
-12,463	251,05	-12,334	308,25
-12,324	252,55	-12,275	309,85
-12,167	254,05	-12,219	311,35
-12,093	255,55	-12,142	312,95
-12,024	256,95	-12,093	314,55
-11,980	258,35	-12,024	316,15
-11,980	259,75	-12,002	317,75
-12,024	261,15	-12,002	319,25
-12,093	262,75	-12,002	320,75
-12,247	264,25	-12,046	322,25
-12,396	265,65	-12,093	323,75
-12,612	267,05	-12,142	325,35
-12,835	268,45	-12,219	326,65
-13,017	269,95	-12,304	327,95
-13,168	271,35	-12,396	329,95
-13,240	272,65	-12,463	331,15
-13,265	273,95	-12,598	332,75

Tabelle 7: Werte für die Aktivierungsenergiebestimmung der 1.Messung ($b_{\text{heiz}} = 3,0 \text{ K/min}$)

$\ln(j)$	T / K	$\ln(j)$	T / K
-14,495	214,85	-11,959	272,65
-14,495	216,75	-12,429	275,25
-14,469	219,25	-12,572	277,95
-14,395	222,25	-12,612	280,65
-14,326	225,25	-12,598	283,45
-14,241	228,25	-12,522	286,35
-14,126	231,35	-12,418	289,25
-13,990	234,45	-12,375	292,05
-13,816	237,45	-12,304	294,75
-13,562	240,55	-12,275	297,65
-13,346	243,35	-12,247	300,55
-12,997	246,15	-12,219	303,55
-12,681	248,95	-12,142	306,55
-12,344	251,65	-12,002	309,65
-12,002	254,55	-11,860	312,55
-11,672	257,65	-11,770	315,45
-11,436	260,75	-11,672	318,35
-11,309	263,75	-11,611	321,15
-11,353	266,95	-11,611	323,95
-11,568	269,85	-11,703	326,85

7 Messwerte

V48 D2 relation

10⁻¹¹ ~~Amper~~ ~~Volts~~

i(T) · 10 ¹¹	T(°C)	Zeit (s)	verse (+)
0	-61,6	0	10
0	-59,2	60	10
0,4	-57,5	120	0,3
0,8	-55,5	180	0,3
1,2	-53,7	240	0,3
1,6	-52,3	300	0,3
2,0	-50,8	360	0,3
2,4	-49,4	420	0,3
2,8	-47,7	480	0,3
3,2	-45,9	540	0,3
3,6	-44,4	600	0,3
4,0	-43,3	660	0,3
4,4	-41,8	720	0,3
4,8	-40,2	780	0,3
5,2	-38,4	840	0,3
5,6	-36,5	900	0,3
6,0	-34,9	960	0,3
6,4	-33,7	1020	0,3
6,8	-32,3	1080	0,3
7,2	-31,0	1140	1
7,6	-29,7	1200	1
8,0	-28,2	1260	1
8,4	-26,5	1320	1
8,8	-25,1	1380	1
9,2	-23,6	1440	1
9,6	-22,1	1500	1
10,0	-20,6	1560	1
10,4	-19,1	1620	3
10,8	-17,6	1680	3
11,2	-16,2	1740	3
11,6	-14,8	1800	3
12,0	-13,4	1860	3
12,4	-12,0	1920	3
12,8	-10,4	1980	3
13,2	-8,9	2040	3
13,6	-7,5	2100	3
14,0	-6,1	2160	3
14,4	-4,7	2220	1
14,8	-3,2	2280	1
15,2	-1,8	2340	1
15,6	-0,5	2400	1
16,0	0,8	2460	1
16,4	2,0	2520	1
16,8	3,6	2580	1
17,2	5,1	2640	1
17,6	6,4	2700	1
18,0	7,8	2760	1
18,4	9,2	2820	1
18,8	10,5	2880	1
19,2	11,9	2940	1
19,6	13,4	3000	1

U_{acc} Pg

$10 \cdot 10^{-11} A$	Temp in $^{\circ}C$	Zeit in s	Verst.
5,7	14,9	3060	1
5,9	16,3	3120	1
6,1	17,7	3180	1
6,2	19,0	3240	1
6,4	20,5	3300	1
6,6	22,0	3360	1
6,8	23,5	3420	1
6,9	24,8	3480	1
7,1	26,3	3540	1
7,4	27,8	3600	1
7,8	29,3	3660	1
8,0	30,8	3720	1
8,7	32,2	3780	1
9,2	33,7	3840	1
3,3	35,1	3900	3
3,5	36,7	3960	3
3,7	38,2	4020	3
4,0	39,8	4080	3
4,2	41,4	4140	3
4,5	43,0	4200	3
4,6	44,6	4260	3
4,6	46,1	4320	3
4,6	47,6	4380	3
4,4	49,1	4440	3
4,2	50,6	4500	3
4,0	52,2	4560	3
3,7	53,5	4620	3
3,4	54,8	4680	3
3,1	56,4	4740	3
2,9	58,0	4800	1
7,6	59,6	4860	1
7,4	60,0	4895	1 *

i(T) · 10 ⁻¹¹ A	Temp in °C	zeit in s	verst
3,0	-58,9	0	0,3
3,3	-58,3	60	0,3
3,8	-56,4	120	0,3
3,9	-53,9	180	0,3
4,2	-50,9	240	0,3
4,5	-47,9	300	0,3
4,9	-44,9	360	0,3
5,3	-41,8	420	0,3
5,5	-38,7	480	0,3
6,3	-35,7	540	0,3
7,5	-32,6	600	0,3
2,2	-29,8	660	1
2,5	-27,0	720	1
3,1	-24,3	780	1
3,8	-21,5	840	1
4,1	-18,6	900	1
4,6	-15,5	960	1
5,1	-12,4	1020	1
5,2	-9,2	1080	1
5,8	-6,2	1140	1
6,1	-3,3	1200	1
6,4	-0,5	1260	1
6,8	2,1	1320	1
7,2	4,8	1380	1
7,6	7,5	1440	1
8,1	10,3	1500	1
8,2	13,2	1560	1
8,9	16,1	1620	1
9,5	18,9	1680	1
10,1	21,6	1740	1
10,5	24,5	1800	1
11,4	27,4	1860	1
12,4	30,4	1920	1
13,4	33,4	1980	1
15,5	36,5	2040	1
16,4	39,4	2100	1
18,8	42,3	2160	1
20,4	45,2	2220	1
22,8	48,0	2280	1
25,8	50,8	2340	1
28,2	53,7	2400	1
31,4	56,5	2460	1
34,2	59,4	2520	1
38,0	60,0	2583	1

LP

Literatur

- [1] R. Muccillo und J. Rolfe. *Effect of Irradiation on Impurity–Vacancy Dipoles in KBr Crystals Doped with Strontium*. 28. Jan. 2018. URL: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pssb.2220610223/abstract..>
- [2] V48: *Dipolrelaxation in Ionenkristallen*. 28. Jan. 2018. URL: <http://129.217.224.2/HOMEPAGE/PHYSIKER/BACHELOR/FP/SKRIPT/V48.pdf>.