

V48

# **Dipolrelaxationen in Festkörpern**

Schokoladenporsche

Durchführung: 06.01.2020

TU Dortmund – Fakultät Physik

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Zielsetzung</b>	<b>3</b>
<b>2 Theoretische Grundlagen</b>	<b>3</b>
2.1 Dipole in dotierten Ionenkristallen . . . . .	3
2.2 Depolarisationseffekte . . . . .	3
2.3 Polarisationsansatz . . . . .	4
2.4 Stromdichtenansatz . . . . .	5
2.5 Berechnung der Aktivierungsenergie $W$ . . . . .	6
2.5.1 Bestimmung mithilfe des Maximums . . . . .	6
2.5.2 Verwendung des gesamten Kurvenverlaufs . . . . .	6
2.6 Berechnung der charakteristischen Relaxationszeit . . . . .	7
<b>3 Aufbau</b>	<b>8</b>
<b>4 Durchführung</b>	<b>8</b>
<b>5 Auswertung</b>	<b>9</b>
5.1 Darstellung der Ergebnisse . . . . .	9
5.2 Bestimmung der Aktivierungsenergie - Methode I . . . . .	12
5.3 Bestimmung der Aktivierungsenergie - Methode II . . . . .	15
5.4 Bestimmung der Relaxationszeit . . . . .	18
<b>6 Diskussion</b>	<b>20</b>
<b>Literatur</b>	<b>21</b>

## 1 Zielsetzung

In dotierten Ionenkristallen treten Dipole auf. Diese werden in diesem Versuch, mit dem Ziel deren Anregungsenergie  $W$  und charakteristische Relaxationszeit  $\tau_0$  zu ermitteln, untersucht.

## 2 Theoretische Grundlagen

### 2.1 Dipole in dotierten Ionenkristallen

Die hier verwendete Kaliumbromid-Probe ist ein Ionenkristall, dieser besteht aus einem regelmäßigen Gitter aus Kalium-Kationen und Brom-Anionen (Abb. 1).

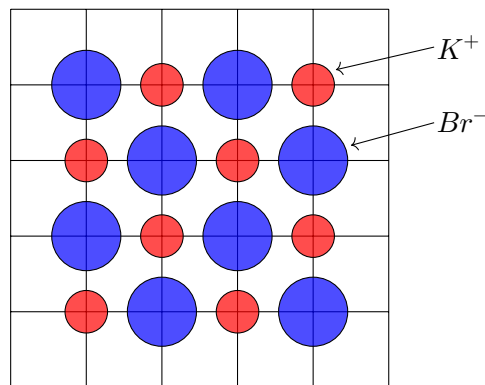


Abbildung 1: Form eines KBr Ionenkristalls.

Kalium ist ein Alkalimetall (1te Hauptgruppe) und Brom ist ein Halogen (7te Hauptgruppe). Der gesamte Kristall ist somit elektrisch neutral.

Der Kristall ist mit Strontium ( $Sr^{2+}$ ) dotiert. Dies führt dazu, dass eine negative Ladung (Elektron) fehlt. Im Kristall bildet sich so ein Dipol aus. Diese sind bei Raumtemperatur statistisch so verteilt, dass das Gesamtdipolmoment des Kristalls null ist.

### 2.2 Depolarisationseffekte

Als Vorgriff auf die Durchführung [4] sei hier erwähnt, dass die Dipole in der Probe erst mit einem von außen angelegtem E-Feld ausgerichtet und dann in diesem Zustand eingefroren werden. Anschließend wird die Probe langsam wieder erwärmt und der Strom in der Probe gemessen. Dieser Strom stammt aus der Reorientierung der Dipole, die bei ansteigender Temperatur wieder in die Ausgangslage relaxieren.

Der Abstand zwischen dem zweifach geladenen Ion und der Kationen-Leerstelle gibt die Richtung des Dipols an, sodass aufgrund der Gitterplätze nur diskrete Dipolrichtungen im Kristall vorliegen können. Unter 500 °C ist eine Richtungsänderung der Dipole nur

durch eine Leerstellendiffusion möglich, welche unter einer materialspezifischen Aktivierungsenergie  $W$  auftritt. Der Anteil der Dipole, welche durch thermische Bewegung diese Energie aufbringen können, ist durch die Boltzmann-Statistik gegeben und somit proportional zu  $\exp(-W/k_{\text{B}}T)$ . Daraus folgt für die Relaxationszeit eines Dipols der Zusammenhang

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

mit der charakteristischen Relaxationszeit  $\tau_0 = \tau(\infty)$ .

Theoretisch kann der Depolarisationsstrom mittels zwei Ansätzen beschrieben werden:

### 2.3 Polarisationsansatz

Der Depolarisationsstrom ist im allgemeinen

$$i(T) = -\frac{dP(t)}{dt} . \quad (2)$$

Die Polarisationsrate hängt von der übrigen Polarisation zur Zeit  $t$  und von der Relaxationsrate  $\tau(T)$  ab.

$$\frac{dP(t)}{dt} = -\frac{P(t)}{\tau(T)} \quad (3)$$

Einsetzen von Gleichung (3) in Gleichung (2) ergibt

$$i(T) = \frac{P(t)}{\tau(T)} . \quad (4)$$

Nach Integration von Gleichung (3) erhält man einen Zusammenhang für  $P(t)$ .

$$P(t) = P_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau(T)}\right) , \quad (5)$$

welcher sich mit Gleichung (4) zu

$$i(T) = \frac{P_0}{\tau} \exp\left(-\frac{t}{\tau(T)}\right) \quad (6)$$

bestimmt. Die Zeit  $t$  kann nun als Integral geschrieben werden, vom Zeitpunkt des abschalten des elektrischen Feldes zum Beginn des Depolarisationsstroms

$$i(T) = \frac{P_0}{\tau} \exp\left(-\int_0^t \frac{dt}{\tau(T)}\right) . \quad (7)$$

$$(8)$$

Nimmt man nun eine konstante Heizrate  $b$  mit

$$b := \frac{dT}{dt} = \text{const} \quad (9)$$

an, nimmt der Depolarisationsstrom die Form

$$i(T) = \frac{P_0}{\tau} \exp\left(-\int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{W}{k_B T}\right) dT\right) \quad (10)$$

an.

## 2.4 Stromdichtenansatz

Aus dem Debye-Modell für hohe Temperaturen erhalten wir die mittlere Polarisation[2]  $\bar{P}(T)$  als

$$\bar{P}(T) = \frac{N}{N_V} \frac{p^2 E}{3k_B T}, \quad (11)$$

wobei  $p$  das Dipolmoment beschreibt,  $E$  das elektrische Feld und  $T$  die Temperatur. Die Dichte der Dipole wird mit  $N_V$  erfasst. Die Änderung der Anzahl  $N$  an Dipolen, die in der Zeit  $t$  relaxieren, ist ein thermisch aktivierter Prozess, wird also durch Temperaturerhöhung gefördert und lässt sich schreiben als

$$\frac{dN}{dt} = -\frac{N}{\tau(T)}. \quad (12)$$

Dabei ist

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

mit  $N_P$  als Zahl der zu Beginn des Aufheizens vorhandenen orientierten Dipole pro Volumeneinheit und somit ergibt sich für den Depolarisationsstrom  $i(T)$ , welcher sich auch als Rate an Dipolrelaxationen verstehen lässt

$$i(T) = \bar{P}(T) \frac{dN}{dt}. \quad (13)$$

Aus Gleichung (12) und Gleichung (13) erhält man so eine geschlossene Formel für den Depolarisationsstrom.

$$i(T) = -\bar{P}(T) \frac{N}{\tau(T)}. \quad (14)$$

Einsetzen von allen bekannten Termen ergibt

$$i(T) = \frac{p^2 E}{3k_B T_P} \frac{N_P}{\tau_0} \exp \left( -\frac{1}{b\tau_0} \int_{T_0}^T \exp \left( -\frac{W}{k_B T'} \right) dT' \right) \exp \left( -\frac{W}{k_B T} \right) \quad (15)$$

wobei  $b$  die Heizrate ist.

## 2.5 Berechnung der Aktivierungsenergie $W$

### 2.5.1 Bestimmung mithilfe des Maximums

Im ersten Verfahren ist das Integral in Gleichung (15) etwa

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

woraus sich der Strom näherungsweise als

$$i(T) \approx \frac{p^2 E}{3k_B T_P} \frac{N_P}{\tau_0} \exp \left( -\frac{W}{k_B T} \right) \quad (16)$$

schreiben lässt. Durch anwenden des Logarithmus ergibt sich eine Geradengleichung für  $i(T)$  gegen  $\frac{1}{T}$  zu

$$\ln(i(T)) = \underbrace{\left( \frac{p^2 E N_P}{3k_B T \tau_0} \right)}_{\text{const.}} - \underbrace{\frac{W}{k_B}}_{\text{Steigung}} \frac{1}{T}. \quad (17)$$

Die Aktivierungsenergie ergibt sich also zu

$$W = m \cdot k_B \quad (18)$$

wobei  $m$  die Steigung der Geraden ist.

### 2.5.2 Verwendung des gesamten Kurvenverlaufs

Die zweite Methode verwendet die gesamte Stromkurve. Für die Gesamtpolarisation gilt

$$\frac{dP}{dt} = \frac{P(t)}{\tau(T(t))}. \quad (19)$$

Der durch die Änderung der Polarisation hervorgerufene Strom hängt vom Probenquerschnitt  $F$  gemäß

$$\frac{dP}{dt} = \frac{i(t)}{F}. \quad (20)$$

ab. Wird die Gleichung (19) nach  $\tau(T)$  umgestellt und mit  $\frac{dT}{dT}$  erweitert, folgt

$$\tau(T) = P(T) \cdot \frac{dT}{\frac{dP}{dt}dT} . \quad (21)$$

Mit Gleichung (9) wird  $\tau$  zu

$$\tau(T) = \frac{P(t)dT}{b dP} . \quad (22)$$

Erweitern mit  $\frac{dt}{dt}$  liefert nun

$$\tau(T) = \frac{P(t)}{b} \frac{dT}{dP} \frac{dt}{dT} = \frac{P(t)}{b} \frac{\frac{dT}{dt}}{\frac{dP}{dt}} \quad (23)$$

Mit der Definition aus Gleichung (20) und umschreiben der Polarisation als  $P = \int dP$  erhält man

$$\tau(T) = \frac{\int \frac{dP}{dt} dT}{i(T)b} \quad (24)$$

Nun erhält man mit Gleichung (20) die Darstellung für  $\tau(T)$

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

und durch ersetzen von  $\tau(T)$

$$W = k_B T \ln \left( \frac{\int_T^\infty i(T') dT'}{i(T)b\tau_0} \right) , \quad (25)$$

woraus sich nun  $W$  berechnen lässt. In der Praxis wird die obere Integrationsgrenze von  $\infty$  in  $T^*$  geändert, wobei  $j(T^*) \approx 0$  gilt.

## 2.6 Berechnung der charakteristischen Relaxationszeit

Um die charakteristische Relaxationszeit zu erhalten differenziert man Gleichung (15) nach der Zeit.

$$\frac{di(T)}{dT} \propto \frac{1}{\tau_0} \left( -\frac{1}{b\tau_0} \int_{T_0}^T \exp \frac{W}{k_B T} dT' - \frac{W}{k_B T} \right) \left( \frac{W}{k_B T^2} - \frac{1}{b\tau_0} \left( \exp - \frac{W}{k_B T} \right) \right) . \quad (26)$$

Es folgt für  $\tau$  in Abhängigkeit der Maximaltemperatur

$$\tau_0 = \tau(T_{\max}) \exp \left( -\frac{W}{k_b T_{\max}} \right) = \frac{k_B T_{\max}^2}{Wb} \exp \left( -\frac{W}{k_b T_{\max}} \right) . \quad (27)$$

### 3 Aufbau

Die zylinderförmige KBr-Probe befindet sich auf einer Metallplatte, die als eine der Kondensatorplatten dient, die andere Kondensatorplatte liegt auf der Probe. Von der unteren Platte aus geht ein Metallstab runter, dieser wird in ein mit flüssigem Stickstoff gefülltes Dewar-Gefäß gefahren, um die Probe kühlen zu können. Die Probe befindet sich in einer Kammer, welche bis auf  $10^{-2}$  mbar evakuiert ist. Dies ist notwendig, da die Probe hygroskopisch ist. Außerhalb der Kammer der Probe befindet sich eine Heizvorrichtung zur Temperaturregelung.

Eine schematische Skizze des Aufbaus ist in Abbildung 2 zu sehen.

### 4 Durchführung

Die Probe wird auf eine Temperatur von  $T = 320$  K aufgeheizt und an die Platten die Spannung  $U = 900$  V angelegt und für 900 s aufrecht erhalten. Dann wird die Probe mit flüssigem Stickstoff auf  $T = -45$  °C abgekühlt und in zwei Messreihen mit unterschiedlichen konstanten Heizraten erwärmt. Es werden in regelmäßigen Zeitabständen Messwerte für den Depolarisationsstrom und die Temperatur notiert. Bei der größeren Heizrate alle 30 s, bei der kleineren jede Minute.

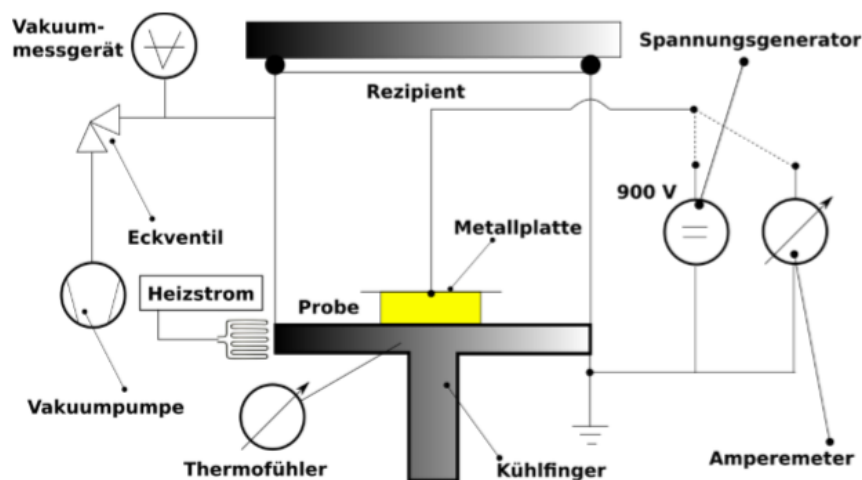


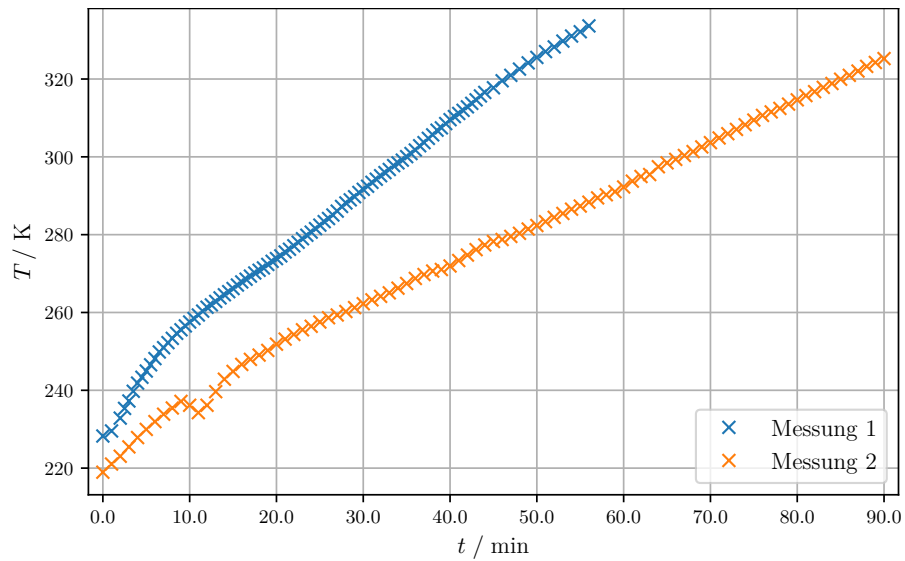
Abbildung 2: Schematische Skizze des verwendeten Aufbaus [1].



## 5 Auswertung

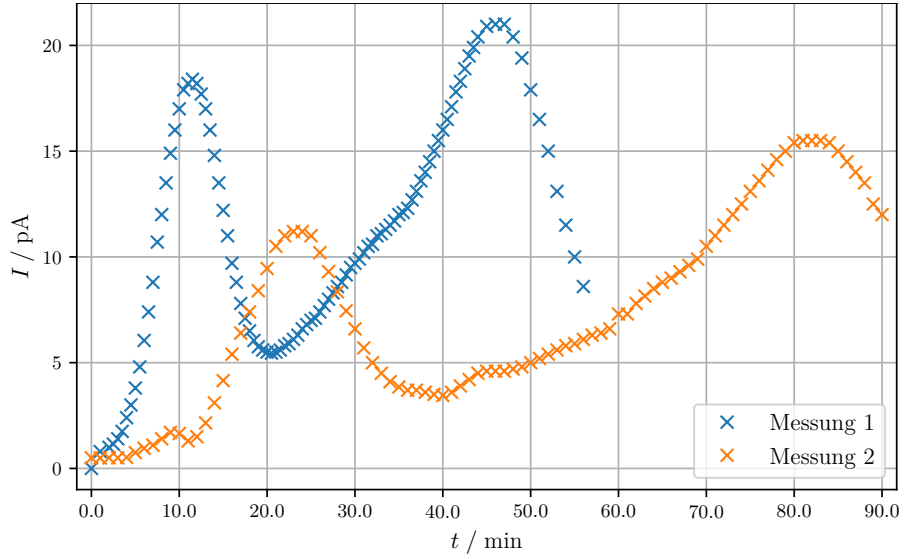
### 5.1 Darstellung der Ergebnisse

In Abbildung 3 ist der Verlauf der Temperatur während der beiden Messungen aufgetragen, in der Abbildung 4 der Depolarisationsstrom während der Messungen.



**Abbildung 3:** Temperaturverlauf.

In den beiden Plots sind einmal die Messwerte der Proben­temperatur und des Depolarisationsstromes in Abhängigkeit der Zeit aufgetragen.



**Abbildung 4:** Stromverlauf.

Interessanter ist jedoch der Verlauf des Depolarisationsstromes in Abhängigkeit der Proben­temperatur. Dies ist in Abbildung 5 dargestellt.

An diese Kurven wird jetzt mit `SciPy` eine Exponentialfunktion

$$f(x) = a \cdot e^{x \cdot b} \quad (28)$$

an die ansteigende Flanke des zweiten Maximums gefittet.

Die Ergebnisse für die Messung 1 sind

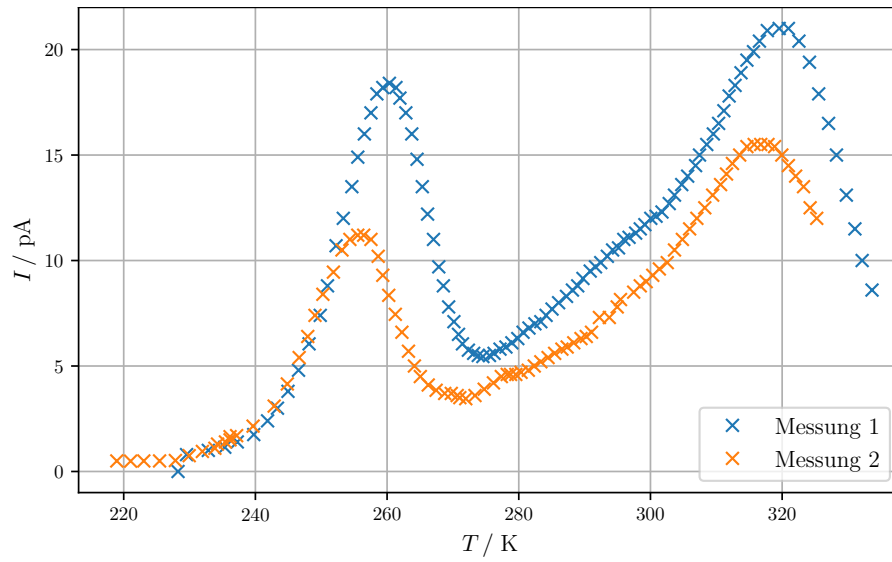
$$a_1 = (1,3 \pm 0,1) \cdot 10^{-3} \text{ pA} \quad (29)$$

$$b_1 = (0,0305 \pm 0,0004) \frac{1}{\text{K}}. \quad (30)$$

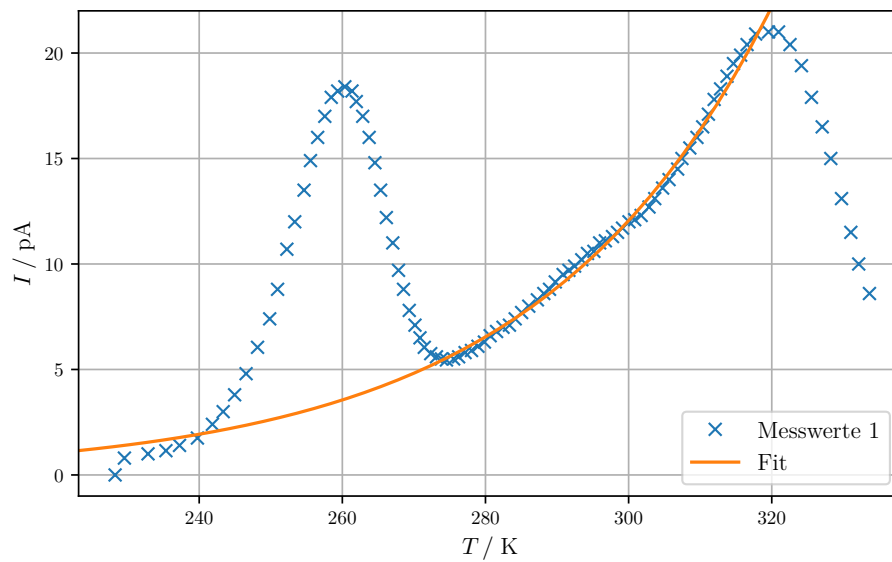
Die Ergebnisse für die Messung 2 sind

$$a_2 = (0,25 \pm 0,02) \cdot 10^{-3} \text{ pA} \quad (31)$$

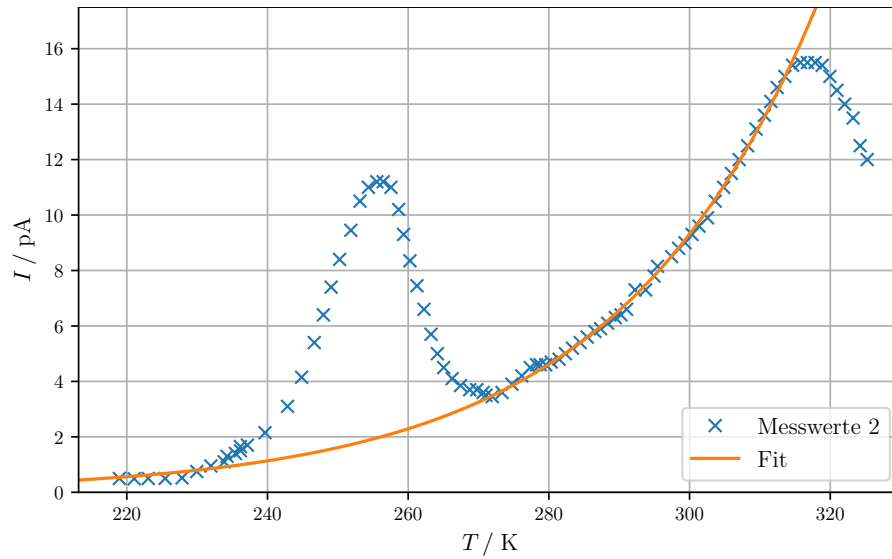
$$b_2 = (0,0351 \pm 0,0003) \frac{1}{\text{K}}. \quad (32)$$



**Abbildung 5:** Aufgetragen ist der Depolarisationsstrom in Abhängigkeit der Proben-temperatur.



**Abbildung 6:** Exponentialfit zur Korrektur der Messwerte der Messung 1.



**Abbildung 7:** Exponentialfit zur Korrektur der Messwerte der Messung 2.

## 5.2 Bestimmung der Aktivierungsenergie - Methode I

Mit einer linearen Ausgleichsgeraden der Form

$$f(x) = m \cdot x + b, \quad (33)$$

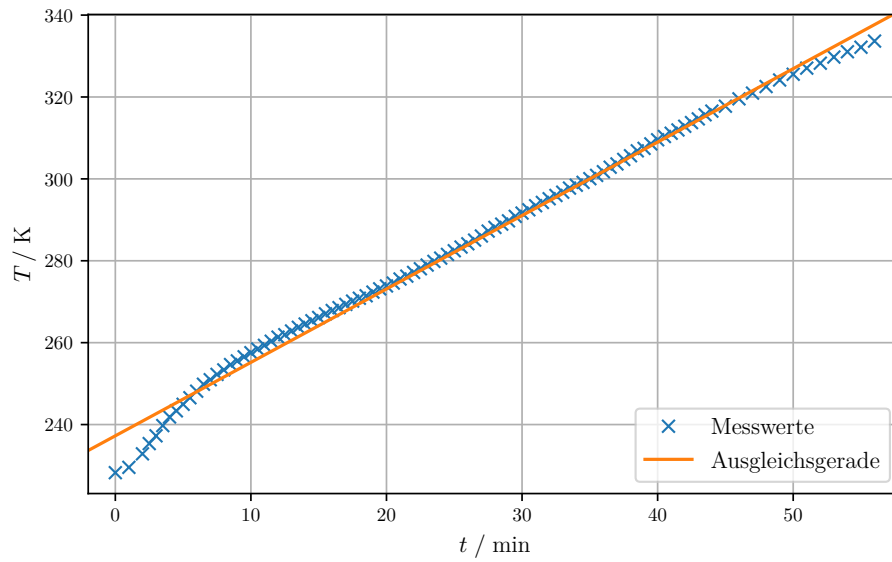
wobei  $x = t$  und  $f(x) = T$ , erhalten wir die Heizraten

$$m_1 = (1,79 \pm 0,02) \frac{\text{K}}{\text{min}} \quad (34)$$

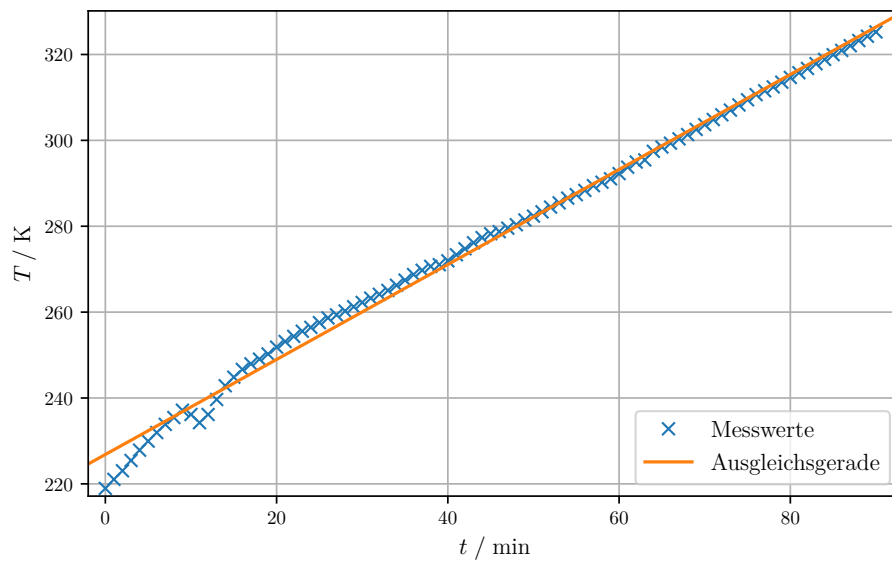
$$m_2 = (1,106 \pm 0,009) \frac{\text{K}}{\text{min}} \quad (35)$$

$$b_1 = (237,3 \pm 0,5) \text{ K} \quad (36)$$

$$b_2 = (226,8 \pm 0,4) \text{ K}. \quad (37)$$



**Abbildung 8:** Bestimmung der Heizrate für die Messung 1 mittels einer Ausgleichsgeraden.



**Abbildung 9:** Bestimmung der Heizrate für die Messung 2 mittels einer Ausgleichsgeraden.

In den Abbildungen 10 und 11 ist je der Logarithmus der korrigierten Depolarisationsstromwerte gegen die inverse Temperatur aufgetragen. An die orangenen Messwerte wird eine Ausgleichsgerade (33) gelegt. Diese hat die jeweiligen Parameter

$$m_1 = (-12,8 \pm 0,9) \cdot 10^3 \text{ K} \quad (38)$$

$$b_1 = 53 \pm 4 \quad (39)$$

$$m_2 = (-11,5 \pm 0,6) \cdot 10^3 \text{ K} \quad (40)$$

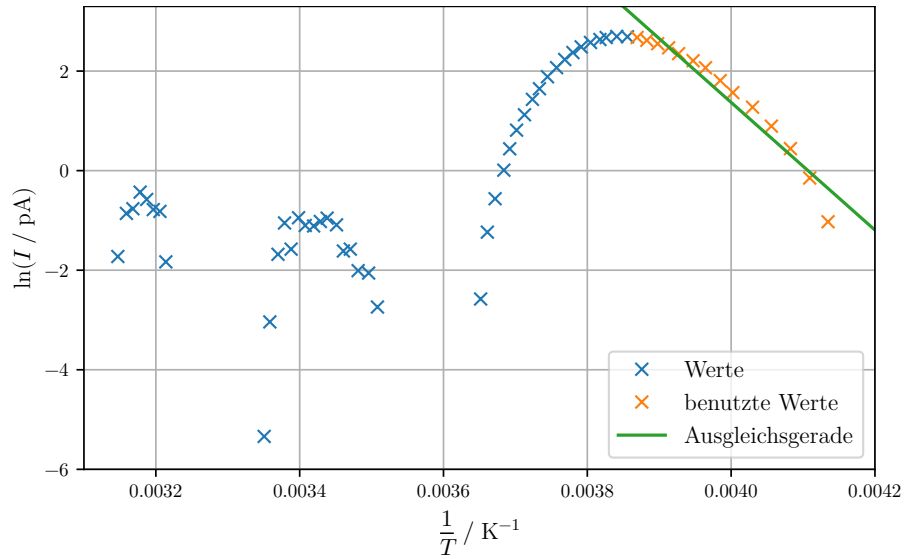
$$b_2 = 48 \pm 2. \quad (41)$$

Es ergibt sich mit

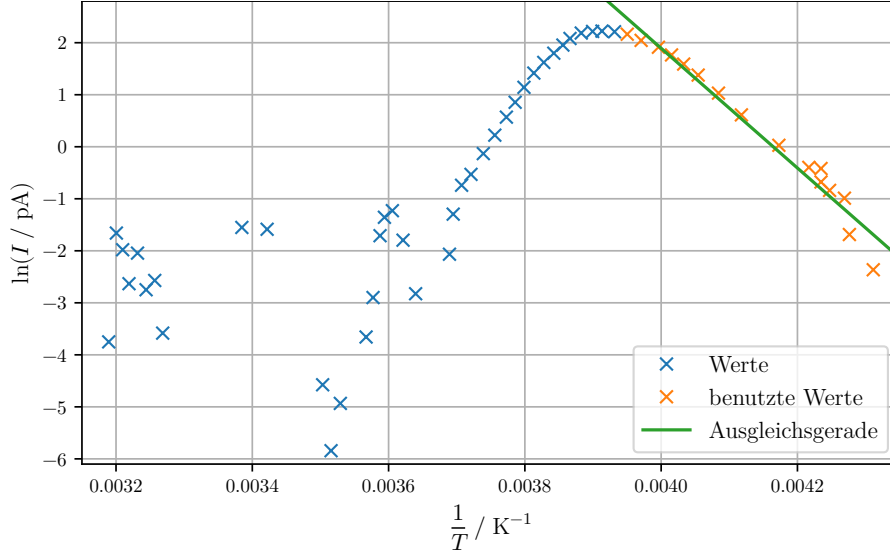
$$W = -k_B \cdot m \quad (42)$$

$$W_1 = (1,8 \pm 0,1) \cdot 10^{-19} \text{ J} = (1,10 \pm 0,08) \text{ eV} \quad (43)$$

$$W_2 = (1,59 \pm 0,08) \cdot 10^{-19} \text{ J} = (0,99 \pm 0,05) \text{ eV}. \quad (44)$$



**Abbildung 10:** Aufgetragen ist der Logarithmus des Depolarisationsstroms gegen die inverse Temperatur für die erste Messreihe. Einige der korrigierten Depolarisationsstromwerte sind negativ, sodass kein Logarithmus gebildet werden kann.



**Abbildung 11:** Aufgetragen ist der Logarithmus des Depolarisationsstroms gegen die inverse Temperatur für die zweite Messreihe. Einige der korrigierten Depolarisationsstromwerte sind negativ, sodass kein Logarithmus gebildet werden kann.

### 5.3 Bestimmung der Aktivierungsenergie - Methode II

Für die zweite Methode schauen wir uns erst die korrigierte Stromkurve an. Diese ist für Messung 1 in Abbildung 12, für Messung 2 in Abbildung 13 zu sehen. In den weiteren Schritten werden bezüglich der Messung 1 die positiven Messwerte zwischen  $T \approx 240$  K und 270 K betrachtet, für die zweite Messung zwischen  $T \approx 235$  K und 270 K.

Es wird dann das Integral

$$\int_T^{T'} i(T) dT' \quad (45)$$

mit der Trapezregel

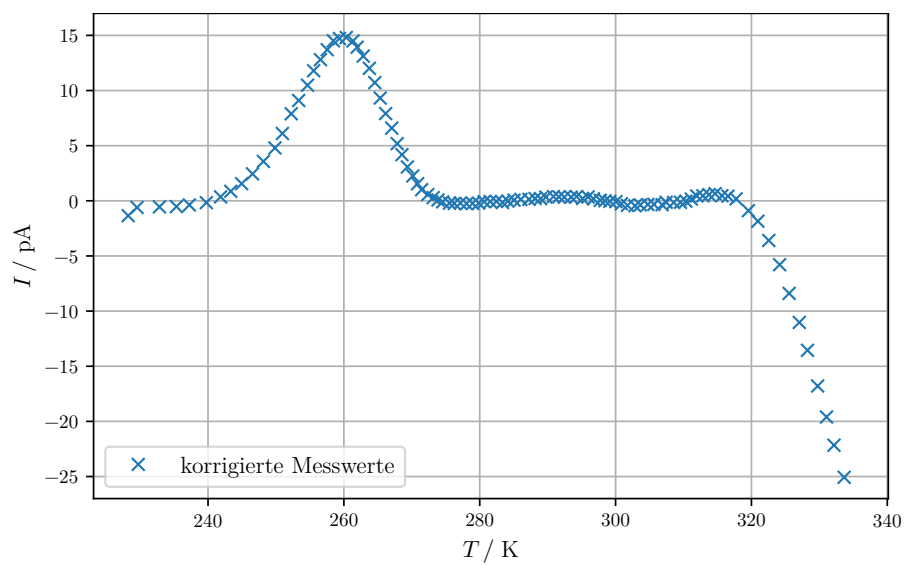
$$I = \frac{b-a}{2} (i(a) + i(b)) \quad (46)$$

bestimmt, mit einer in `python` selbstgeschriebenen Methode. So, dass dann

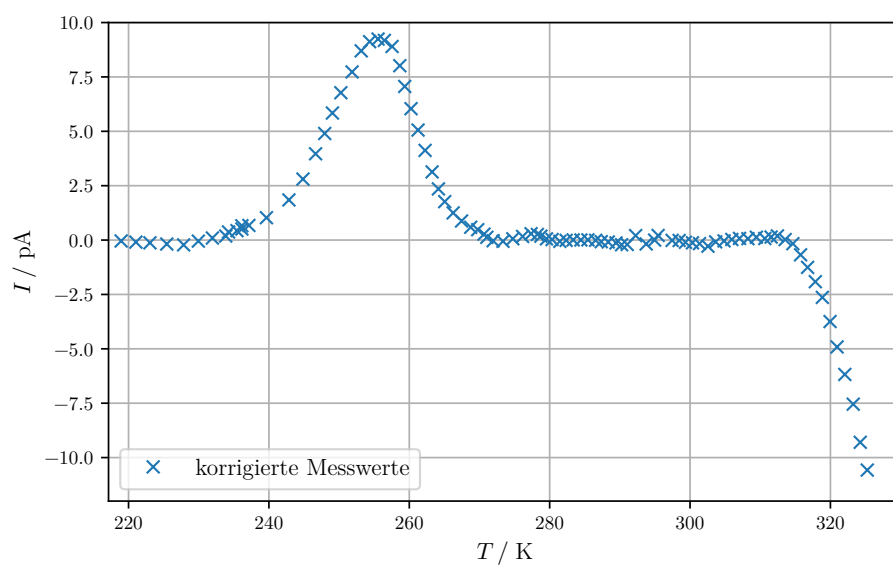
$$\ln \left( \frac{\int_T^{T'} i(T) dT'}{i(T)b} \right) \quad (47)$$

gegen die inverse Temperatur in den Abbildungen 14 und 15 aufgetragen werden kann. Eine lineare Ausgleichsrechnung ergibt für die Gerade

$$y = m \cdot x + b \quad (48)$$



**Abbildung 12:** Die korrigierte Stromkurve der Messung 1.



**Abbildung 13:** Die korrigierte Stromkurve der Messung 2.



und die Umformungen

$$W = k_B \cdot m \quad (49)$$

$$\tau_0 = e^{-b} \quad (50)$$

die Werte

$$m_1 = (12,4 \pm 0,3) \cdot 10^3 \text{ K} \quad (51)$$

$$W_1 = (1,72 \pm 0,05) \cdot 10^{-19} \text{ J} = (1,07 \pm 0,03) \text{ eV} \quad (52)$$

$$b_1 = -46 \pm 1 \quad (53)$$

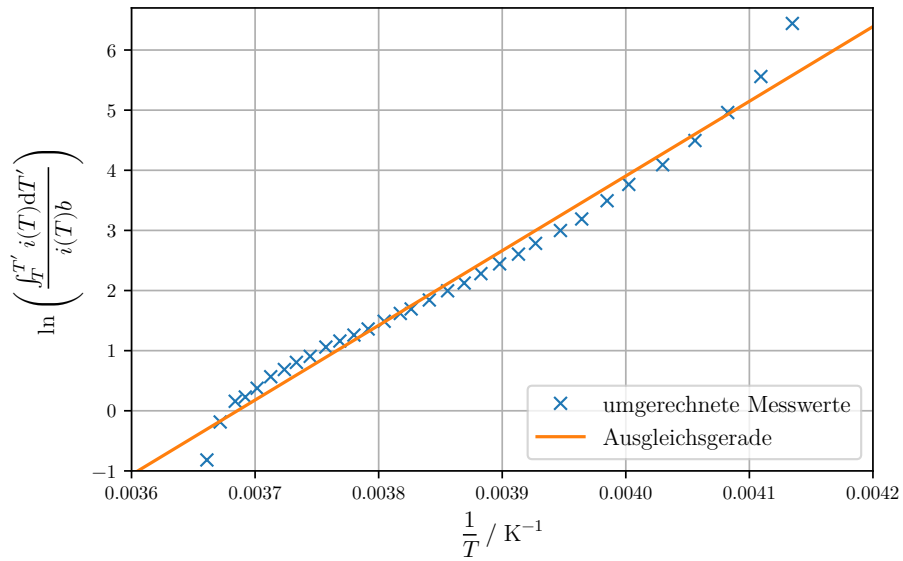
$$\tau_{0,1,2} = (13 \pm 17) \cdot 10^{-21} \text{ s} \quad (54)$$

$$m_2 = (11,0 \pm 0,3) \cdot 10^3 \text{ K} \quad (55)$$

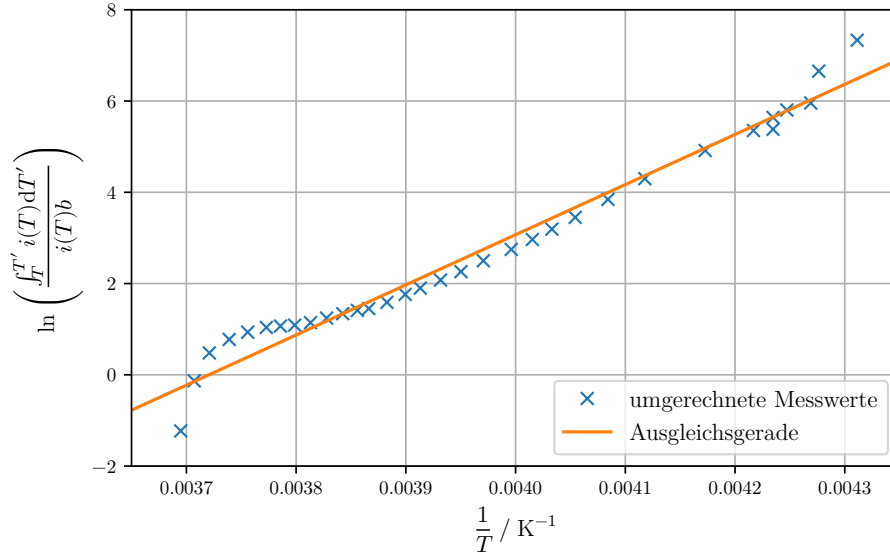
$$W_2 = (1,52 \pm 0,05) \cdot 10^{-19} \text{ J} = (0,95 \pm 0,03) \text{ eV} \quad (56)$$

$$b_2 = -41 \pm 1 \quad (57)$$

$$\tau_{0,2,2} = (18 \pm 23) \cdot 10^{-19} \text{ s} \quad (58)$$



**Abbildung 14:** Darstellung der logarithmierten, integrierten Werte in Abhängigkeit der inversen Temperatur für die Messung 1. Ebenfalls eingezeichnet ist die Ausgleichsgerade.



**Abbildung 15:** Darstellung der logarithmierten, integrierten Werte in Abhängigkeit der inversen Temperatur für die Messung 2. Ebenfalls eingezeichnet ist die Ausgleichsgerade.

## 5.4 Bestimmung der Relaxationszeit

Wir bestimmen die Relaxationszeit, indem wir in Gleichung (27) die folgenden Werte einsetzen:

$$b_1 = (1,79 \pm 0,02) \frac{\text{K}}{\text{min}} \quad (59)$$

$$T_{\text{max},1} = 260,35 \text{ K} \quad (60)$$

$$W_{1,1} = (1,8 \pm 0,1) \cdot 10^{-19} \text{ J} \quad (61)$$

$$\tau_{1,1}(T_{\text{max},1}) = (2,9 \pm 0,2) \text{ s} \quad (62)$$

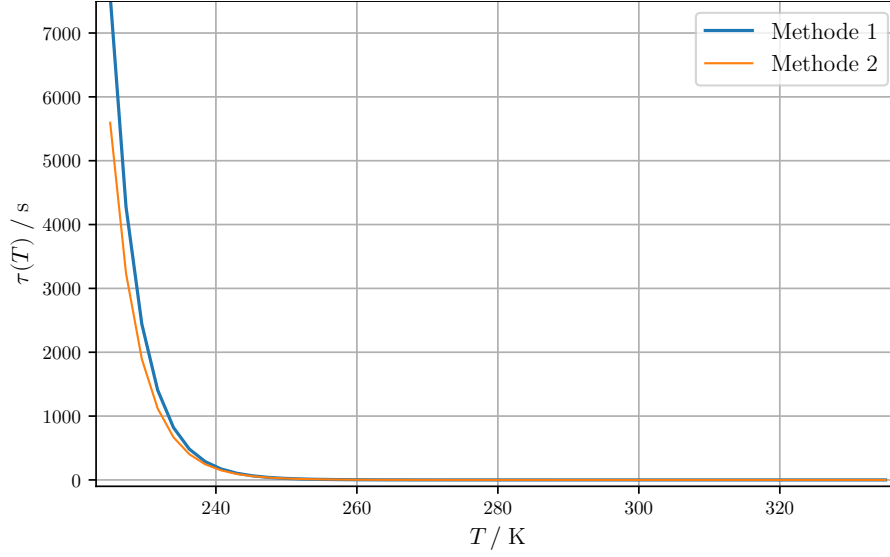
$$\tau_{1,1,0} = (5 \pm 15) \cdot 10^{-22} \text{ s} \quad (63)$$

$$W_{1,2} = (1,72 \pm 0,05) \cdot 10^{-19} \text{ J} \quad (64)$$

$$\tau_{1,2}(T_{\text{max},2}) = (3,04 \pm 0,09) \text{ s} \quad (65)$$

$$\tau_{1,2,0} = (5 \pm 7) \cdot 10^{-21} \text{ s} . \quad (66)$$

Die Abbildungen 16 und 17 zeigen die damit bestimmten Relaxationszeiten in Abhängigkeit der Temperatur.



**Abbildung 16:** Temperaturabhängigkeit der Relaxationszeit mit den Werten der Messung 1.

$$b_2 = (1,106 \pm 0,009) \frac{\text{K}}{\text{min}} \quad (67)$$

$$T_{\text{max},2} = 255,55 \text{ K} \quad (68)$$

$$W_{2,1} = (1,59 \pm 0,08) \cdot 10^{-19} \text{ J} \quad (69)$$

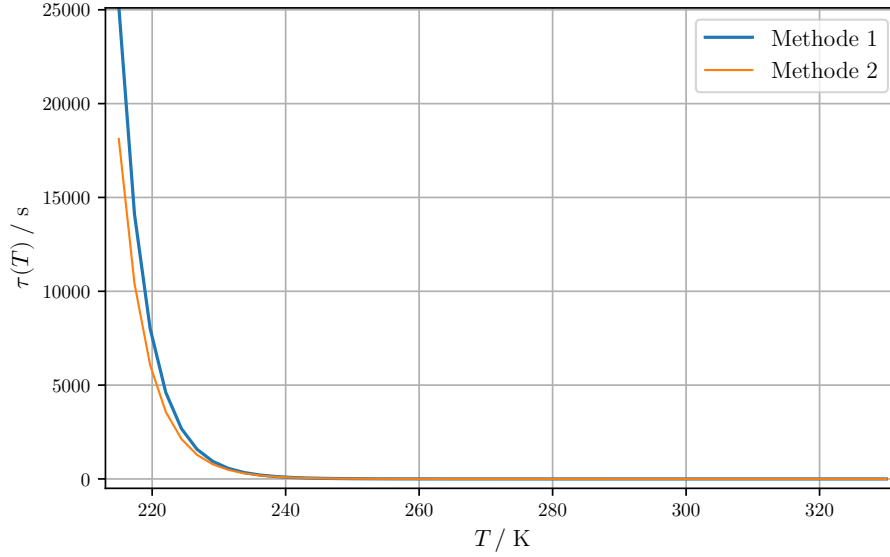
$$\tau_{2,1}(T_{\text{max},2}) = \boxed{(5,13 \pm 0,26) \text{ s}} \quad (70)$$

$$\tau_{2,1,0} = \boxed{(1 \pm 3) \cdot 10^{-19} \text{ s}} \quad (71)$$

$$W_{2,2} = (1,52 \pm 0,05) \cdot 10^{-19} \text{ J} \quad (72)$$

$$\tau_{2,2}(T_{\text{max},2}) = \boxed{(5,36 \pm 0,18) \cdot 10^{-18} \text{ s}} \quad (73)$$

$$\tau_{2,2,0} = \boxed{(1 \pm 2) \cdot 10^{-18} \text{ s}} \quad (74)$$



**Abbildung 17:** Temperaturabhängigkeit der Relaxationszeit mit den Werten der Messung 2.

## 6 Diskussion

Im Messvorgang war die Kontrolle der Temperatur gerade in den ersten Minuten der Messung nicht einfach. Dies ist deutlich in den Temperaturverläufen in Abbildung 3 zu sehen.

Die Berechnung der Aktivierungsenergien  $W$  führt zu Ergebnissen im Bereich von 0,95 eV bis 1,1 eV. Der Literaturwert liegt bei 0,66 eV [3]. Die Abweichung kann aus den Problemen beim Heizen stammen und aus den Fits. Als wichtigster Fit ist die erfolgte Korrektur der Ströme zu nennen, hier wurde der zusätzliche Term mit einer Exponentialfunktion genähert. Diese Funktion wird dann zur Korrektur der Messwerte von eben diesen abgezogen.

Die bestimmten Relaxationszeiten  $\tau_0$  liegen im Bereich von  $10^{-18}$  s bis  $10^{-22}$  s, der Literaturwert bei  $4 \cdot 10^{-14}$  s [3]. Die Abweichung ist hier in der Größenordnung mehrerer Zehnerpotenzen. Da die Abweichungen allerdings bei beiden Messungen in beiden Methoden auftreten, vermuten wir einen systematischen Fehler.

Es ist zu erkennen, dass das Einfrieren und Auftauen der Dipole als Methode funktioniert. Bei einer kleineren Heizrate ist das Strommaximum kleiner als bei einer größeren, die Integration zeigt jedoch, dass die Flächen unter der Kurve gleich sind. Dies ist in den Abbildungen 14 und 15 zu erkennen. Physikalisch ist dies auch zu erwarten, da die gleiche Anzahl an Dipolen vorliegt, es ist in beiden Messungen die gleiche Probe verwendet worden. Der maximale Strom ist in der Messung 1 größer, da die Reorientierungsrate der Dipole abhängig von der Heizrate ist.

## Literatur

- [1] TU Dortmund. Versuchsanleitung V48. 2019. URL: <https://moodle.tu-dortmund.de/>.
- [2] H. Föll. Polarisationsmechanismen. URL: [https://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/mw\\_for\\_et/kap\\_6/backbone/r6\\_3\\_3.html](https://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/mw_for_et/kap_6/backbone/r6_3_3.html) (besucht am 01.02.2020).
- [3] R. Muccillo und J. Rolfe. „Effect of Irradiation on Impurity-Vacancy Dipoles in KBr Crystals Doped with Strontium“. In: physica status solidi 61 (1974), S. 579–587.



# V48 Dipolrelaxation in Ionengittern

## Messung 2

zeit	Temperatur [°C]	Strom [ $10^{-11}$ A]	Heißspannung [V]	zeit	Temperatur [°C]	Strom [ $10^{-11}$ A]
00:00	-44,8	0,08	2,7 A	00:00	-54,2	0,085
1:00	-43,6	0,08	"	01:00	-52,7	0,089
2:00	-40,3	0,1	"	02:00	-50,7	0,05
2:30	-37,8	0,115	"	03:00	-47,7	0,05
3:00	-35,9	0,114	"	04:00	-45,3	0,052
3:30	-33,4	0,175	2 A	05:00	-43,2	0,075
4:00	-31,3	0,24	"	06:00	-41,2	0,095
4:30	-29,8	0,30	"	07:00	-39,3	0,17
5:00	-28,2	0,38	"	08:00	-37,2	0,74
5:30	-26,6	0,48	"	09:00	-36,0	0,77
6:00	-25,0	0,605	"	10:00	-37,0	0,765
6:30	-23,3	0,74	"	11:00	-38,9	0,73
7:00	-22,2	0,88	"	12:00	-37,0	0,75
7:30	-20,9	1,07	"	13:00	-33,5	0,275
8:00	-19,8	1,12	"	14:00	-30,3	0,37
8:30	-18,5	1,35	"	15	-28,3	0,475
9:00	-17,6	1,49	"	16	-26,5	0,54
9:30	-16,6	1,60	"	17	-25,2	0,64
10:00	-15,6	1,70	115 A	18	-24,7	0,74
10:30	-14,7	1,79	115 A	19	-22,9	0,84
11:00	-13,8	1,82	115 A	20	-21,3	0,945
11:30	-12,8	1,84	115 A	21	-20,0	1,05
12:00	-11,8	1,82	"	22	-18,8	1,7
12:30	-11,2	1,77	"	23	-17,6	1,72
13:00	-10,3	1,70	"	24	-16,7	1,72
13:30	-9,4	1,60	"	25	-15,6	1,7
14:00	-8,6	1,48	"	26	-14,5	1,02
14:30	-7,8	1,35	"	27	-13,8	0,93
15:00	-7,0	1,22	"	28	-12,9	0,835
15:30	-6,1	1,1	"	29	-12,9	0,745
16:00	-5,3	0,97	"	30	-10,9	0,66
16:30	-4,6	0,88	"	31	-9,9	0,57
17:00	-3,8	0,78	"	32	-9,0	0,5
17:30	-3,0	0,71	1,7 A	33	-8,7	0,45
18:00	-2,3	0,65	"	34	-6,9	0,47
18:30	-1,7	0,605	"	35	-5,7	0,385
19:00	-0,8	0,575	"	36	-4,4	0,32
19:30	0	0,56	"	37	-3,4	0,37
20:00	0,7	0,55	2 A	38	-2,5	0,36
20:30	1,4	0,545	"	39	-2,7	0,35
21:00	2,4	0,55	"	40	-1,2	0,345
21:30	3,1	0,56	"	41	0,2	0,36
22:00	4,0	0,58	"	42	1,6	0,39
22:30	4,9	0,59	"	43	3,0	0,42
23:00	5,8	0,61	"	44	4,2	0,45
23:30	6,7	0,63	"	45	5,7	0,46
24:00	7,5	0,66	"	46	5,6	0,46
24:30	8,4	0,68	"	47	6,4	0,46
25:00	9,3	0,7	"	48	7,2	0,47
25:30	10,2	0,71	2,2 A	49	8,3	0,48
26:00	11,0	0,74	"	50	9,2	0,5
26:30	11,9	0,77	"	51	10,2	0,52
27:00	12,9	0,8	"	52	11,3	0,54

I.B.



t	T[°C]	strom [pA]	Heizspannung [V]	zeit (min)	Temperatur [°C]	strom [10 <sup>-11</sup> A]
27:30	14,1	0,83	2,2	53	72,3	0,56
28:00	15,0	0,86	"	54	73,4	0,58
28:30	15,8	0,88	"	55	74,2	0,59
29:00	16,6	0,915	"	56	75,2	0,61
29:30	17,7	0,95	"	57	76,3	0,63
30:00	18,5	0,97	"	58	77,7	0,64
30:30	19,3	0,99	"	59	78,9	0,66
31:00	20,3	1,02	"	60	79,7	0,69
31:30	21,1	1,05	"	61	20,6	0,73
32:00	22,0	1,06	"	62	27,8	0,78
32:30	22,8	1,1	"	63	23,3	0,825
33:00	23,6	1,11	"	64	24,3	0,85
33:30	24,6	1,13	"	65	25,3	0,88
34:00	25,3	1,15	"	66	26,2	0,9
34:30	26,0	1,17	"	67	27,2	0,93
35:00	26,9	1,2	2,5	68	28,2	0,96
35:30	27,7	1,21	"	69	29,4	0,99
36:00	28,6	1,23	"	70	30,5	1,05
36:30	29,7	1,27	"	71	31,7	1,1
37:00	30,5	<del>1,32</del> 1,31	"	72	32,8	1,15
37:30	31,6	1,36	"	73	33,9	1,2
38:00	32,5	<del>1,42</del> 1,4	"	74	35,7	1,25
38:30	33,7	1,45	"	75	36,3	1,37
39:00	34,3	1,5	"	76	37,5	1,36
39:30	35,4	1,55	"	77	38,4	1,47
40:00	36,4	1,6	"	78	39,3	1,46
40:30	37,2	1,65	"	79	40,4	1,5
41:00	38,0	1,71	"	80	41,5	1,54
41:30	38,8	1,78	"	81	42,6	1,55
42:00	39,7	1,83	"	82	43,6	1,55
42:30	40,6	1,89	"	83	44,7	1,55
43:00	41,5	1,95	"	84	45,7	1,54
43:30	42,5	1,99	"	85	46,8	1,5
44:00	43,4	2,04	"	86	47,8	1,45
45:00	44,6	2,09	"	87	48,9	1,4
46:00	46,4	2,1	"	88	50,7	1,35
47:00	47,8	2,1	"	89	51,7	1,25
48:00	49,4	2,04	"	90	52,7	1,2
49:00	51,0	1,94	"			
50:00	52,4	1,79	"			
51:00	53,9	1,65	"			
52:00	55,1	1,5	"			
53:00	56,6	1,31	"			
54:00	57,9	1,15	"			
55:00	59,0	1,0	"			
56:00	60,5	0,86	"			

Probe: KBR 9005% Mol Sr

ILB.