

V48

Dipolrelaxion in Ionenkristallen

Sebastian Rüßmann

sebastian.ruessmann@tu-dortmund.de

Ben Grobecker

ben.grobecker@tu-dortmund.de

Durchführung: 27. Juni 2022

Abgabe: 6. Juli 2022

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung	3
2 Theorie	3
2.1 Ionenkristalle	3
2.2 Dipole und Dipolrelaxion in Ionenkristallen	3
2.3 Der Depolarisationsstrom	4
2.3.1 Polarisationsansatz	4
2.3.2 Stromdichtenansatz	5
3 Durchführung	6
4 Auswertung	7
5 Diskussion	7
Literatur	7

1 Zielsetzung

Zur Untersuchung der Dipolrelaxion in Ionenkristallen wird in diesem Versuch die Aktivierungsenergie und die charakteristische Relaxionszeit eines Ionenkristalles bestimmt. Als Ionenkristall wird Kaliumbromid mit einer 0,005% Mol Strontium Dotierung verwendet.

2 Theorie

2.1 Ionenkristalle

Ein Ionenkristall setzt sich zusammen aus Kationen (positiv geladen) und Anionen (negativ geladen), welche in einer fcc-Struktur angeordnet sind. In einem perfektem Krtistall wären alle Plätze der Struktur durch diese Ionen alternierend besetzt. Dies würde ein homogenen, elektrisch neutralen Kristall ergeben. In reelen Kristallen hingegen befinden sich immer wieder Störstellen, die die Struktur des Gitters unterbrechen. Für diesen Versuch besonders interessant sind die Leerstellen, also leere Gitterplätze. Diese können ihre Position im Kristall verändern, indem Ionen ihren Platz einnehmen und einen leeren Platz hinterlassen.

Bei der Dotierung werden dem Ionenkristall Fremdatome im geringen Maße hinzugefügt, welche den Platz einer leerstelle einnehmen können. Dabei muss auf mikroskopischer Ebene Ladungsneutralität herrschen. Das bedeutet, wenn das Fremdatom eine Ladungsänderung im Kristall vornimmt, dass sich eine entsprechende Anzahl an Ionen in der Nähe sich im Gitter entfernen und Leerstellen füllen, oder an die Oberfläche wandern. Bei einem durch Strontium dotierten Kaliumbromid ersetzen zweifach positiv geladene Strontium-Ione ein einfach positiv geladenes Kalium-Ion. Zum mikroskopischen Ladungsausgleich entsteht in der Umgebung eine Leerstelle und das Kation wandert im Festkörper an den Rand. Leerstelle und Dotierung bilden hier einen Dipol mit der Folge, dass der Kristall im Markroskopischen leicht geladen ist.

2.2 Dipole und Dipolrelaxion in Ionenkristallen

Ein Dipol ist die Anordnung zweier entgegengesetzter Ladungen. Das zugehörige Dipolmoment \vec{p} berechnet sich durch

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

mit den Ladungen q_i an den Orten \vec{r}_i und zeigt immer in Richtung der Positiven Ladung. Innerhalb eines Elektrischen Feld richten sich diese Dipole entlang der Feldlinien aus, um einen Zustand minimaler Energie ein nehmen zu können. Dadurch bildet sich eine Forzugsrichtung für das Dipolmoment. Ohne elektrisches Feld sind die Dipole so verteilt, dass sich ihr Gesamtdipolmoment zu Null addiert.

Die Zeit welche die Dipole nachd er Polarisation benötigen, um sich wieder zu depolarisieren nennt sich Relaxionszeit:

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

Sie ist abhängig von der Aktivierungsenergie W , welche benötigt wird, um die Coulomb-Barriere des Ionengitters zu überwinden, so wie der Temperatur T . Zu erkennen ist, dass die Relaxionszeit bei niedrigen Temperaturen niedrig und bei hohen hoch ist. Daher wird der Ionenkristall bei Raumtemperatur in ein E-Feld gegeben, um schnell eine polarisation im Kristall zu erhalten. Durch das anschließende abkühlen wird diese Polarisation auch bei abgeschaltetem E-Feld quasi festgehalten.

2.3 Der Depolarisationsstrom

Bei der stattfindenden Depolarisation wird ein Strom induziert, welcher gemessen werden kann. Aus diesem Depolarisationsstrom lassen sich die Größen Aktivierungsenergie und Relaxionszeit bestimmen. Ermittelt werden kann er durch zwei Ansätze.

2.3.1 Polarisationsansatz

Der Depolarisationsstrom beträgt dabei 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.

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

Aus den beiden Gleichungen (3) und (2) ergibt sich daher

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

Integriert man 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 wird. Die Zeit t wird nun als Integral über den Startpunkt bis zum Beginn des Depolarisationsstroms beschrieben

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

Bei einer konstanten Heizrate b nimmt der der Depolarisationsstrom die Form

$$i(T) = \frac{P_0}{\tau} \exp\left(-\int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{W}{k_B T}\right) dT\right) \quad (8)$$

an.

Zur Berechnung der Aktivierungsenergie W und der Relaxationszeit wird angenommen, dass W groß im Vergleich zur thermischen Energie $k_B T$ und die Temperaturdifferenz $T - T_0$ gering ist. Mit der Annahme wird aus 8

$$i(T) = \frac{P_0}{\tau} \exp\left(-\int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{W}{k_B T}\right) dT\right) \approx 0 \quad (9)$$

und der Ausdruck für den Strom vereinfacht sich zu

$$I(T) \approx \frac{p^2 E}{3k_B} \cdot \frac{N_0}{\tau_0} \cdot \exp \frac{-W}{k_B T}. \quad (10)$$

Mit dem Bilden des Logarithmus ergibt sich

$$\log(I(T)) = \text{const} - \frac{W}{k_B T} \quad (11)$$

was in der Auswertung für eine lineare Ausgleichsrechnung zwischen $\log(I)$ und T^{-1} zur Bestimmung von W verwendet wird.

Die charakteristische Relaxionszeit bestimmt sich aus dem maximum der Stromkurve bei einer Temperatur T_{\max}

$$T_{\max}^2 = bW \frac{\tau(T_{\max})}{k_B T} \quad (12)$$

2.3.2 Stromdichtenansatz

Der zweite Ansatz zur Bestimmung der Aktivierungsenergie W geht über die Annahme, dass die Änderung der Polarisation P mit der Zeit zum Betrag der Stromdichte $j(T)$ entspricht. Aus dem Debye-Modell für hohe Temperaturen erhalten wir die mittlere Polarisation $\bar{P}(T)$ als

$$\bar{P}(T) = \frac{N}{N_V} \frac{p^2 E}{3k_B T}, \quad (13)$$

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

$$\frac{dN}{dt} = -\frac{N}{\tau(T)}. \quad (14)$$

Dabei ist

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

mit 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

$$i(T) = \bar{P}(T) \frac{dN}{dt} . \quad (15)$$

Aus Gleichung (14) und Gleichung (15) erhält man so eine geschlossene Formel für den Depolarisationsstrom.

$$i(T) = -\bar{P}(T) \frac{N}{\tau(T)} . \quad (16)$$

Einsetzen von allen bekannten Termen ergibt

$$i(T) = \frac{p^2 E}{3k_B T_P} \frac{N_P}{\tau_0} \exp \left(-\frac{1}{b\tau_0} \int_{T_0}^T \exp \left(-\frac{W}{k_B T'} \right) dT' \right) \exp \left(-\frac{W}{k_B T} \right) \quad (17)$$

3 Durchführung

Der Ionenkristall wird in einem Rezipienten zwischen zwei Kondensatorplatten platziert. Durch eine Drehschieberpumpe wird in dem Rezipienten ein Vakuum erzeugt, um die Wechselwirkung der hygroscopischen Probe und der Luftfeuchtigkeit zu minimieren. Über eine Heizspule im Boden kann die Temperatur der Probe erhöht werden. Gekühlt kann die Probe über den Kühlfinger am Boden des Rezipienten werden. Dazu wird dieser in flüssigen Stickstoff getaucht. Ein Thermofühler zeigt die Temperatur der Probe an. Der Aufbau ist in Abbildung 1 dargestellt. Ist ein ausreichendes Vakuum im Rezipienten hergestellt wird der

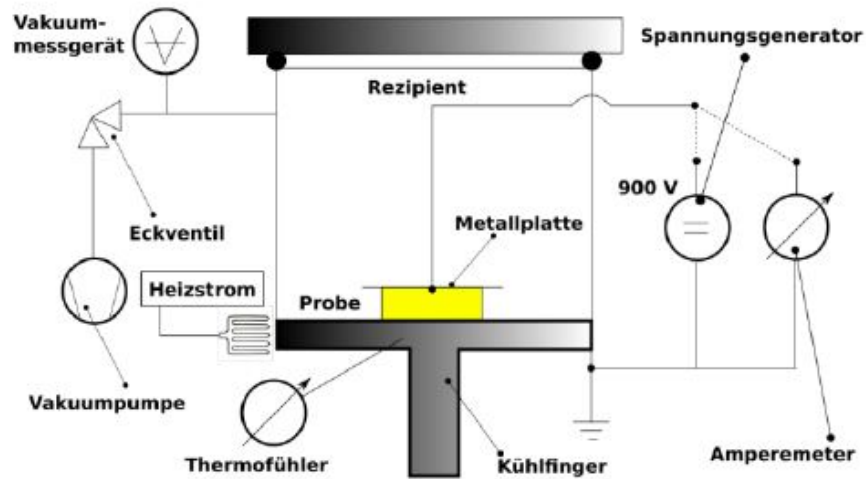


Abbildung 1: Skizze des Rezipienten [1]

Plattenkondensator aufgeladen. Durch das elektrische Feld wird der Ionenkristall langsam

polarisiert. Daher sollte die Polarisationszeit wesentlich größer als die Relaxationszeit sein. 5 bis 10 Minuten sollten dafür ausreichend sein. Nach der Polarisationszeit wird die Probe über den Kühlfinger auf 210 Kelvin gekühlt. Anschließend kann der Plattenkondensator ausgeschaltet werden, da die Relaxationszeit jetzt verhältnismäßig groß ist. Um Messfehler zu vermeiden wird der Plattenkondensator ca. 5 Minuten Kurzgeschlossen, um ihn vollständig zu entladen. Nun wird die Heizspannung wieder angelegt und so reguliert, dass eine konstante Heizrate von $2 \frac{\text{Kelvin}}{\text{Minute}}$ bzw. $1.5 \frac{\text{Kelvin}}{\text{Minute}}$ vorliegt. Parallel wird der Strom am Kondensator mittels des Picoamperemeter gemessen. Die Probe wird bis auf ca 330 Kelvin erwärmt.

4 Auswertung

5 Diskussion

Literatur

- [1] TU Dortmund. *V48-Dipolrelaxion in Ionenkristallen*. 2021.
- [2] John D. Hunter. „Matplotlib: A 2D Graphics Environment“. Version 1.4.3. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 90–95. URL: <http://matplotlib.org/>.
- [3] Eric Jones, Travis E. Oliphant, Pearu Peterson u. a. *SciPy: Open source scientific tools for Python*. Version 0.16.0. URL: <http://www.scipy.org/>.
- [4] Eric O. Lebigot. *Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties*. Version 2.4.6.1. URL: <http://pythonhosted.org/uncertainties/>.
- [5] Travis E. Oliphant. „NumPy: Python for Scientific Computing“. Version 1.9.2. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 10–20. URL: <http://www.numpy.org/>.