

## ZUR ELEKTRISCHEN LEITFÄHIGKEIT NATÜRLICHER FELDSPÄTE IM TEMPERATURBEREICH 300-1000°K\*

Von  
G. Kostakis\*\*

### ZUSAMMENFASSUNG

E wurde die elektrische Leitfähigkeit natürlicher Feldspäte im Temperaturbereich von 300-1000°K in Abhängigkeit von der Kristallrichtung untersucht und die Aktivierungsenergie der Elektrizitätsträger im Eigenleitungsbereich ermittelt.

Die Eigenleitung der untersuchten Feldspäte machte sich ab ca 650°K bemerkbar, während im Niedertemperaturbereich die Störleitung dominierend war.

### ABSTRACT

The electrical conductivity of natural feldspars has been investigated in the temperature range 300-1000°K as a function of the crystallographic orientation and the activation energy of the charge carriers from the intrinsic conductivity computed.

The intrinsic conductivity predominates from about 650°K and upwards, while at lower temperatures the impurity conductivity is dominant.

---

\* Περί τῆς ἠλεκτρικῆς ἀγωγιμότητος φυσικῶν ἀστρίων στὴν περιοχὴ θερμοκρασίας 300—1000°K.

\*\* Anschrift des Verfassers: Dr. G. Kostakis, Department of Mineralogy - Petrography - Geology, Nat. Techn. University, 42, October 28th St., Athens - Greece.

## EINFÜHRUNG

Die Feldspäte sind bei Zimmertemperatur Isolatoren, während sie bei hohen Temperaturen Halbleiterverhalten zeigen (MAURI et TIYAMA, 1967).

Die elektrische Leitfähigkeit  $\sigma$  eines festen Körpers wird durch die Beziehung

$$\sigma = \sum n_i e_i \mu_i \quad (\text{Gl. 1}),$$

wobei  $n_i$  die Dichte der Ladungsträger (in der Volumeneinheit) der  $i$ -ten Trägerarten,  $e_i$  die Ladungen und  $\mu_i$  die Beweglichkeiten der Ladungsträger sind, definiert (O'DWYER, 1973).

Der Zusammenhang der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit mit der Stromdichte  $\vec{J}$  beim Anlegen eines elektrischen Feldes von der Feldstärke  $\vec{F}$ , wird bei isotropen Körpern durch das Ohm'sche Gesetz.

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{F} \quad (\text{Gl. 2}),$$

zum Ausdruck gebracht. Für die Ermittlung der elektrischen Leitfähigkeit der Feldspäte kann, zur Vereinfachung, diese Gleichung zugrunde gelegt werden, wobei anstatt  $\vec{J}$  und  $\vec{F}$  die Stromstärke  $I$  und die Spannung  $U$  eingesetzt wird.

Betrachtet man eine Probe mit den Querschnitt  $Q$  und der Dicke  $d$ , so erhält man unter Berücksichtigung der Beziehung  $F = U/d$ , die Gleichung

$$\sigma = \frac{I}{U} \cdot \frac{d}{Q} \quad (\text{Gl. 3}).$$

Daraus resultiert, durch Messung von Strom und Spannung, die spezifische elektrische Leitfähigkeit des Probenmaterials.

Für die Abhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit von der Temperatur bei Halbleitern, gilt, abgeleitet vom Boltzmanntheorem und dem Maxwellverteilungsgesetz, die Gleichung

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \exp \left( - \frac{\Delta E}{kT} \right) \quad (\text{Gl. 4}),$$

wobei  $\sigma_0$  eine Konstante,  $\Delta E$  die Aktivierungsenergie der Ladungsträger,  $k$  die Boltzmann'sche Konstante und  $T$  die absolute Temperatur ist.

Eine einfache Darstellung dieses funktionellen Zusammenhangs ermöglicht man durch Logarithmieren der Gleichung 4, was zur Gleichung

$$\log \sigma = \log \sigma_0 - 0,43 \frac{\Delta E}{kT} \quad (\text{Gl. 5})$$

führt, die durch eine Gerade dargestellt werden kann. Wird die elektrische Leitfähigkeit innerhalb eines Temperaturbereiches, vorherrschend von nur einer

Ladungsträgerart hervorgerufen, so liegen die Messwerte annähernd auf dieser Gerade. Aus der Neigung der Gerade ergibt sich dann die Aktivierungsenergie der Ladungsträger.

## EXPERIMENTELLES

Die Minerale wurden mikroskopisch auf Homogenität, mit einer Elektronenmikrosonde chemisch untersucht und zu kristallographisch orientierten Scheiben von ca 1-3 cm<sup>2</sup> Fläche und 1-3 mm Dicke geschnitten. Die elektrische Leitfähigkeit dieser Präparate wurde, um Polarisierungseffekten (SMEKAL 1935) Rechnung zu tragen, mit kommutiertem Gleichstrom ermittelt. Um den Einfluss von Kriechströmen bei der Strommessung auszuschalten, wurde die Schutzringmethode angewandt. Die Messanordnung (KOSTAKIS, 1981) bestand aus einer Präparathalterung, die sich in einem zylindrischen, gegen Induktionströme in seinem Inneren abgeschirmten elektrischen Ofen befand, aus einer Spannungsquelle, einem Spannungsmessgerät und einem hochempfindlichen Galvanometer mit Empfindlichkeitsregler. Die Präparathalterung bestand aus einem elektrisch isolierenden Material auf dem zwei Metallfederkontakte und eine Kontaktplatte befestigt waren. Direkt an der Stelle, auf der das Präparat festgeklemmt wurde, befand sich die Spitze eines Thermo-elementes aus NiCr/Ni.

Um einheitliche, gute Kontakte herzustellen wurden die Präparate an beiden Flächen gleichmässig poliert und die Kontaktflächen mit Leitsilber gestrichen.

## MESSERGEBNISSE

Es wurden drei natürliche Feldspäte (Arntal, Norwegen), deren chemische Zusammensetzung in der Tab. I gegeben wird, untersucht. Durch Voruntersuchung wurden die Mineralschnitte ausgeschlossen, die makroskopisch sichtbare Risse hatten und abnormales Leitfähigkeitsverhalten zeigten. In wenigen Fällen wurde eine Abweichung vom Ohm'schen Gesetz (SCHOTTKY 1940) festgestellt (Abb. 1). Da bei niedrigen Temperaturen eine Abnahme des Stromdurchganges

Tabelle I: Chemische Zusammensetzung der Feldspatkristalle

Feldspat Nr.	1 <sup>+</sup>	2 <sup>+</sup>	3
SiO <sub>2</sub>	64,2	64,3	68,1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,7	18,9	19,5
Na <sub>2</sub> O	1,1	1,2	11,2
K <sub>2</sub> O	15,2	14,4	—
CaO	0,1	0,4	0,9
Summe	99,3	99,2	99,7

+ in einigen Partien des Kristalls waren Mg-, Mn- und Ti-haltige Bereiche vorhanden.

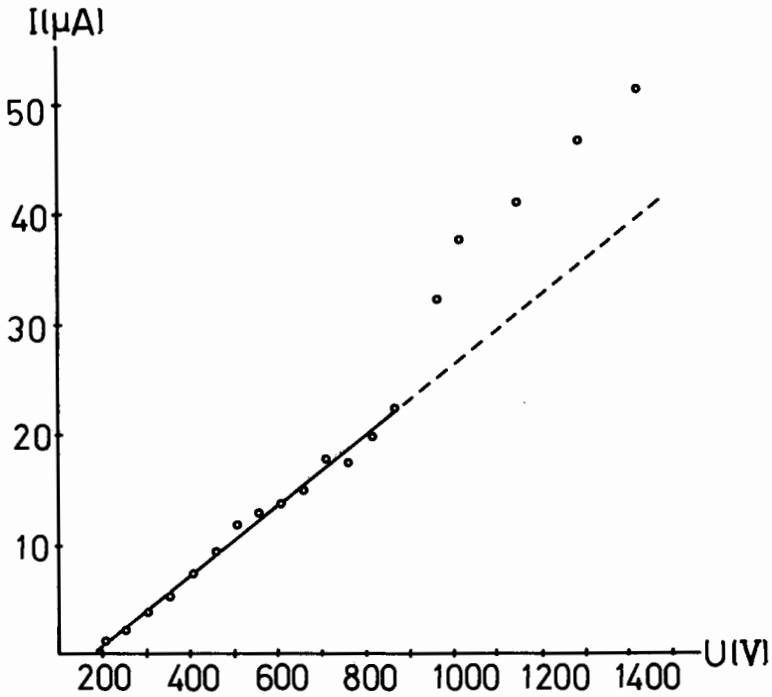


Abb. 1: Abweichung vom Ohm'schen Gesetz bei einem Feldspat.

Είκ. 1: Απόκλιση από τον νόμο του Ohm σε ένα κρύσταλλο άστρίου.

mit der Zeit beobachtet wurde, musste oft bei der Strommessung bis zur Einstellung des Endwertes mehrere Minuten lang abgewartet werden. Um die Reproduzierbarkeit der ermittelten Leitfähigkeitswerte zu überprüfen wurden an mehreren zu (001) und zu (010) parallelen Schnitten von jedem Mineral, Messungen durchgeführt und die Leitfähigkeitswerte auf jeweils eine Kurve eingetragen.

### Feldspat Nr 1

Dieses Mineral war ein Mikroklin reich an perthitischen Ausscheidungen. Sein Leitfähigkeitsverhalten in Abhängigkeit von der Temperatur und der Kristallrichtung zeigt Abb. 2.

Bei den Kurven dieser Abbildung fallen zwei Bereiche auf. Ein Bereich niedriger Temperatur (von Zimmertemperatur bis ca.  $620^{\circ}\text{K}$ ) in dem alle Kurven jeweils zwei Wendepunkte zeigen. Bei den gleich orientierten Präparaten können sich in diesem Bereich die Werte der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit bei der gleichen Temperatur in den Präparaten von (010) bis zu ca. 1,5 Zehnerpotenzen von Präparat zu Präparat unterscheiden. Bei den Präparaten von (001) waren die

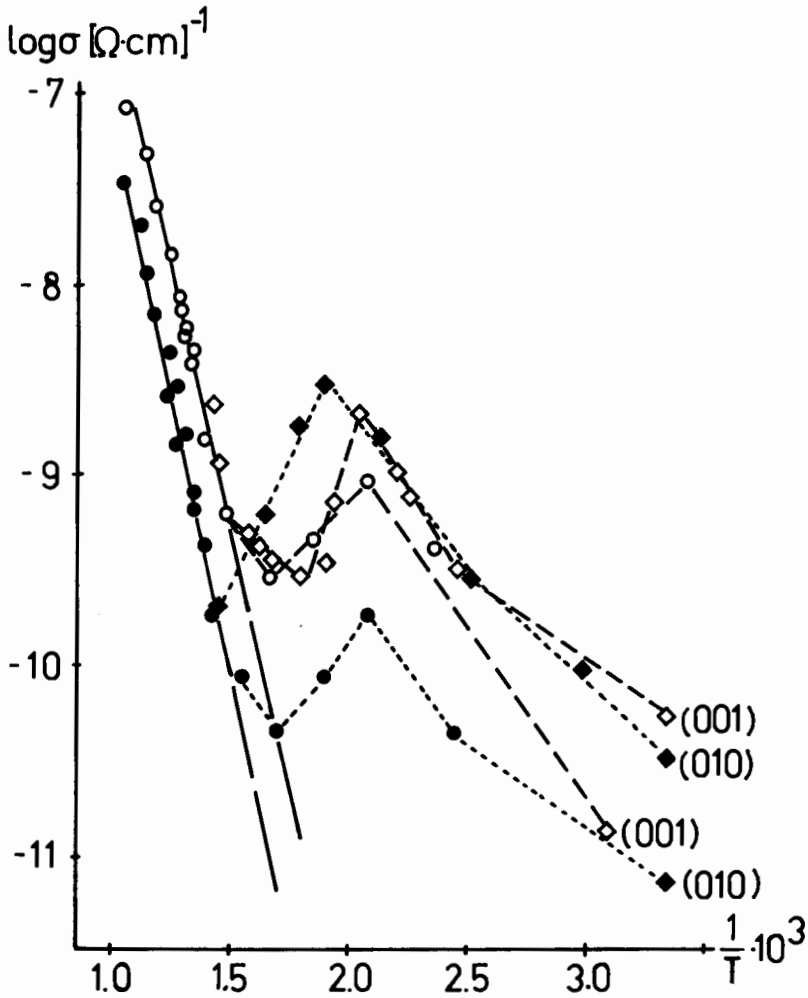


Abb. 2: Temperaturabhängigkeit der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit beim Feldspat

Nr. 1.

- ◆◇ = Messungen mit Hochspannung
- = " " " " Niederspannung
- ◆● = " " an Schnitten parallel zu (010)
- ◇○ = " " " " " " (001)

Εικ. 2: Εξάρτηση της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας από την θερμοκρασία στον άστροιο αριθ. 1.

- ◆◇ = Μετρήσεις με ύψηλή τάση
- = " " " " χαμηλή "
- ◆● = " " σε τομές παράλληλες προς την έδρα (010)
- ◇○ = " " " " " " " " (001)

Differenzen kleiner. Im Niedertemperaturbereich kommt keine Abhängigkeit der Leitfähigkeit von der Orientierung zum Ausdruck. Nach einem anfänglichen Anstieg fallen die Kurven ab, bis sie in den Bereich höherer Temperaturen übergehen. In dem Bereich höherer Temperaturen werden die Kurven zu Geraden und die Werte der spezifischen Leitfähigkeit gleich orientierter Präparate fallen mit guter Näherung auf eine Gerade. Die Gerade der (001) - Präparate liegt bei höheren Leitfähigkeitswerten als jene der (010) - Präparate.

Die ermittelten Aktivierungsenergien betragen 1,07 eV für die Richtung senkrecht zu (001) und 1,16 eV senkrecht zu (010).

### Feldspat Nr. 2

Der Feldspat Nr. 2 war ein Perthit, in dem Verzwilligungen verschiedener Kristallindividuen mikroskopisch sichtbar waren. Die Abhängigkeit seiner elektrischen Leitfähigkeit von der Temperatur zeigt Abb. 3. Sowohl das qualitative Bild der Kurven als auch ihr Größenordnungsbereich war in etwa ähnlich wie beim Feldspat Nr. 1. Bei den Kristallschnitten von (010) waren jedoch im Niedertemperaturbereich die Differenzen der Messwerte kleiner (erreichten maximal eine halbe Zehnerpotenz) und die elektrische Leitfähigkeit senkrecht zu (001) höher als senkrecht zu (010). Bei ca 650°K wurden die Kurven der elektrischen Leitfähigkeit zu Geraden.

Die Aktivierungsenergien betragen 1,34 eV für die Richtung senkrecht zu (001) und 1,37 eV senkrecht zu (010).

### Feldspat Nr. 3

Es handelte sich um einen Albit, der gute Homogenität und nur wenige submikroskopische Ca-reiche Bereiche hatte. Das Verhalten seiner elektrischen Leitfähigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur ähnelte sich dem von den Feldspäten Nr. 1 und Nr. 2.

Im Niedertemperaturbereich differierten die Messwerte der Kristallschnitte von (010) bis zu 1,5 Zehnerpotenzen, während sie bei jenen von (001) eine halbe Potenz nicht überschritten. Weiterhin erfolgte bei einem der Kristallschnitte von (001), zum Unterschied zu allen anderen Präparaten, der Übergang der Kurve zur Gerade, ohne dass die Kurve ein Minimum durchlief. Dieses deutet darauf hin, dass in diesem Stück die elektrische Leitfähigkeit, die durch Störleiter hervorgerufen wird, entweder kein Maximum hat oder dass das Maximum innerhalb des Eigenleitungsgebietes auftritt und deshalb von der Eigenleitung überdeckt ist.

Die Gültigkeit des Ohm'schen Gesetzes, wie sich aus den Strommessungen bei verschiedenen Spannungen von 50 V bis 1400 V ergab, erwies sich dagegen weniger streng als bei den Feldspäten Nr. 1 und Nr. 2. Da jedoch bis zu Spannungen von ca 800 V das Verhältnis von Spannung zu Strom konstant blieb, wurden für die Ziehung der Gerade (Abb. 4), die Werte berücksichtigt, die durch Anlegen niedriger Spannungen ermittelt wurden.

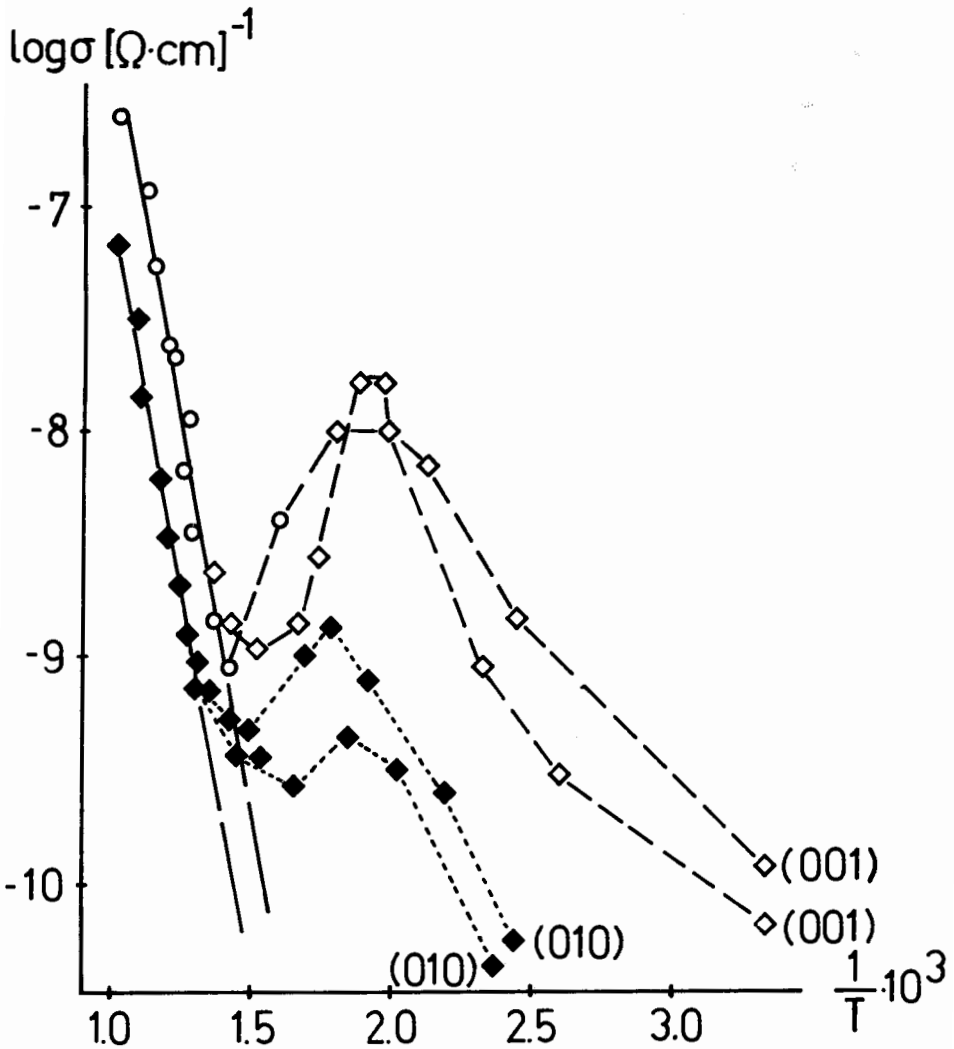


Abb. 3: Temperaturabhängigkeit der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit beim Feldspat

Nr.2.

- ◆ ◇ = Messungen mit Hochspannung
- = " " " Niederspannung
- ◆ = " " an Schnitten parallel zu (010)
- ◇ ○ = " " " " " " (001)

Εικ. 3: Έξαρτηση της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας από την θερμοκρασία στον άστρο αριθ. 2.

- ◆ ◇ = Μετρήσεις με ύψηλή τάση
- = " " χαμηλή "
- ◆ = " " σε τομές παράλληλες προς την έδρα (010)
- ◇ ○ = " " " " " " " (001)

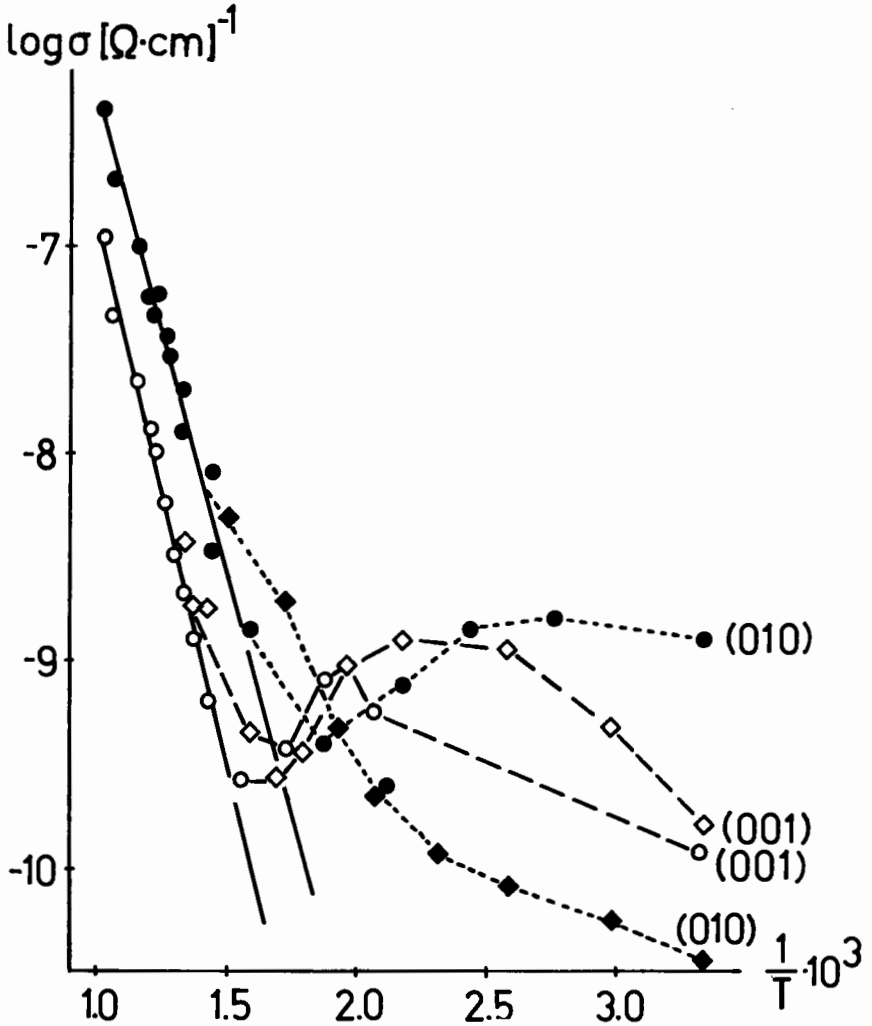


Abb. 4: Temperaturabhängigkeit der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit beim Feldspat

Nr. 3.

- ◆◆ = Messungen mit Hochspannung
- = " " " " Niederspannung
- ◆● = " " " " an Schnitten parallel zu (010)
- ◇○ = " " " " " " " " (001)

Εικ. 4: Έξαρτηση της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας από την θερμοκρασία στον άστριο αριθ. 3.

- ◆◆ = Μετρήσεις με υψηλή τάση
- = " " " χαμηλή "
- ◆● = " " " σε τομές παράλληλες προς την έδρα (010)
- ◇○ = " " " " " " " " (001).



Für die Aktivierungsenergie ergaben sich somit die Werte 1,05 eV in der Richtung senkrecht zu (001) und 0,93 eV senkrecht zu (010).

## DISKUSSION

Die durchgeführten Messungen zeigen, dass bei den untersuchten natürlichen Feldspatkristallen die elektrische Leitfähigkeit trotz der Vielzahl der möglichen Störfaktoren (z. B. Einschlüsse, Verwachsungen, Defekte des Gitters, Polarisations-effekte), bei Temperaturen oberhalb von ca 590-650°K und gut erhaltenen Kristallen, quantitativ reproduzierbar erfasst werden können. Dies wird durch die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse bei den verschiedenen Kristallschnitten, die jeweils aus dem gleichen Mineral stammten, sowie durch die eindeutig festgestellte Abhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit von der Richtung, belegt.

Der Verlauf der ermittelten Kurven der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur, legt nahe, dass bei niedrigen Temperaturen der Elektrizitätstransport vorwiegend durch Störleitung bedingt ist. So wächst im Niedertemperaturbereich zunächst die elektrische Leitfähigkeit mit der Temperaturzunahme zu, bis sie ein Maximum erreicht. Das Maximum deutet darauf hin, dass bei der dem Maximum zugehörigen Temperatur, alle die Störleitung verursachenden Ladungsträger aktiviert sind.

Bei allen drei Feldspäten war die Streuung der Leitfähigkeitswerte im Niedertemperaturbereich deutlich grösser bei den Kristallschnitten von (010) als bei jenen von (001). Beim weiteren Steigen der Temperatur nimmt, in Folge der steigenden Wechselwirkung dieser Ladungsträger mit dem Kristallfeld, ihre Beweglichkeit und somit die elektrische Leitfähigkeit der Kristalle ab, was durch den absteigenden Ast der Kurven zum Ausdruck kommt. Schliesslich erreichen die Kurven bei ca 590-650°K ein Minimum und gehen in steigende Geraden über. Dieser Wendepunkt zeigt die Temperatur an, ab welcher die Eigenleitung dominiert. Beim weiteren Steigen der Temperatur bleiben die Werte der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit auf den Geraden, die für die Halbleiter typisch sind.

Für die Aktivierungsenergie der Ladungsträger im Eigenleitungsbereich der untersuchten Feldspatkristalle ergaben sich, je nach Kristall und Kristallrichtung, Werte von 0,93 bis 1,37 eV.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Βάσει προσδιορισμού της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης παραλληλεπίπεδων τεμαχίων 3 φυσικών μονοκρυστάλλων άστρίων, στίς κάθετες προς (100) και (010) κρυσταλλογραφικές κατευθύνσεις, έπροσδιορίσθη ή συμπεριφορά της ηλεκτρικής άγωγιμότητας των σε συνάρτηση της θερμοκρασίας από τούς 300 μέχρι 1000°K.

Η μορφή της συναρτήσεως τού λογαρίθμου της ειδικής ήλ. άγωγιμότητας (logσ) μέ την θερμοκρασία (1/T · 10<sup>3</sup>), όδηγει στό συμπέρασμα ότι από τούς 300 μέχρις τούς 650°K περίπου, ύπερτερεί ή έξωγενής άγωγιμότης (Störleitung), ενώ από τούς 650°K περίπου έως τούς 1000°K καθοριστική είναι ή

ιδιοαγωγιμότης (Eigenleitung). Ἀπό τὰ εὐθύγραμμα τμήματα τῶν καμπυλῶν (εἰκ. 2, 3, 4) τὰ ὁποῖα ταυτίζονται μέ τήν γραφική παράσταση τῆς ἐξισώσεως

$$\log \sigma = \log \sigma_0 - 0,43 \frac{\Delta E}{kT}$$

ὅπου  $\log \sigma_0$  = μία σταθερά,  $\Delta E$  = ἡ ἐνέργεια ἐνεργοποιήσεως,  $k$  = ἡ σταθερά τοῦ BOLTZMANN καί  $T$  = ἡ ἀπόλυτη θερμοκρασία, ὑπελογίσθη ἡ ἐνέργεια ἐνεργοποιήσεως τῶν φορέων τοῦ ἠλεκτρικοῦ φορτίου εἰς τήν περιοχὴ τῆς ἰδιοαγωγιμότητος. Γιά τούς μελετηθέντες κρυστάλλους ἀστρίων ὑπελογίσθησαν τιμές τῆς ἐνεργείας ἐνεργοποιήσεως ἀπό 0,93 ἕως 1,37 eV.

## LITERATUR

- KOSTAKIS, G.: Zur elektrischen Leitfähigkeit natürlicher Diopside im Temperaturbereich 300-1000°K.- Πρακτ. Ἀκαδ. Ἀθηνῶν, 56, 1981, 139.
- MAURI, R., TIYAMA, J., T.: Conductibilité électrique des feldspaths.- *Schweiz. Miner. Petr. Mitteil.*, 54, 1967, 1.
- O'DWYER, J., J.: The Theory of Electrical Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics.- Clarendon Press, Oxford 1973.
- SCHOTTKY, W.: Abweichung vom Ohm'schen Gesetz.- *Phys. Zts.* 41, 1940, 537.
- SMEKAL, A.: Bildungen von Gegenspannungen in festen Ionenleitern.- *Phys. Zts.* 36, 1935, 742.