

V. HAAK, Berlin

"Neuere Ergebnisse und Modelle für die Korrelation zwischen elektrischer Leitfähigkeit und Temperatur in Erdkruste und Erdmantel"

In den letzten Jahren wurden außer neuen Ergebnissen aus dem Labor auch neue Modell-Vorstellungen über den Zusammenhang zwischen Temperatur und elektrischer Leitfähigkeit bekannt. Die Antworten auf Fragen nach diesem Zusammenhang scheinen immer komplizierter zu werden, da insbesondere die Fragen nach der stofflichen Zusammensetzung noch nicht genügend geklärt sind. In einer im letzten Jahr erschienen Arbeit von SCHOCK, DUBA, HEARD and STROMBERG (1977), in der der schon vielfach diskutierte Einfluß der polykristallinen Struktur einer Probe auf die elektrische Leitfähigkeit experimentell untersucht und diskutiert wird, wird die Meinung eines für die Geophysik - bisher jedenfalls - völlig unmaßgeblichen Autors über die stoffliche Zusammensetzung der Erde zitiert. Nach SHAKESPEARE (1622) bestehe die Erde vornehmlich aus Olivin, im Original durch das Synonym Chrysolith ersetzt (OTHELLO, 5. Akt, 2. Scene). Liest man den Text genauer, so erkennt man, daß der Autor bereits damals Zweifel hegte, doch ließen ihn die fortschreitenden Komplikationen der Tragödie offenbar keinen Platz, das Problem der stofflichen Zusammensetzung ausführlicher zu diskutieren. Das möchte ich in bescheidenerem Rahmen nachholen, insoweit es für den Zusammenhang zwischen Temperatur und Leitfähigkeit wichtig ist.

1. Laborergebnisse

Bis vor wenigen Jahren war die allgemeine Erfahrung die, daß die experimentell bestimmten Kurven für die elektrische Leitfähigkeit als Funktion der Temperatur von Olivinen über viele Zehnerpotenzen "streuten". Einer der Gründe, die hierfür verantwortlich waren, war der zu hohe Sauerstoff-Partialdruck im Probenraum. Der entscheidende Fortschritt wurde durch die experimentelle Bestimmung der Stabilitätsbereiche für Olivine verschiedener Zusammensetzung erreicht (siehe z.B. DUBA, 1976). Durch die Verwendung von "Puffer"-Materialien kann man jetzt die Versuchsbedingungen so einhalten, daß die Ergebnisse reproduzierbar sind (siehe den Artikel von HINZE, CEMIĆ und WILL in diesem Band). In Figur 1 sind einige Labor-Ergebnisse für Olivin-Einkristalle wiedergegeben, die bei jenen Sauerstoff-Partialdrucken gemessen wurden, die vermutlich auch im Erdmantel herrschen.- Man hat die elektrische Leitfähig-

keit natürlich nicht nur von Olivinen, sondern auch von anderen basischen Materialien gemessen, die die Leitfähigkeit von Mantel und Kruste bestimmen können. In Figur 2 sind Ergebnisse von einer Vielzahl von Basalten verschiedener Zusammensetzung wiedergegeben. Ein wichtiges Ergebnis der Messungen von WAFF und WEILL(1975) war die Erkenntnis, daß die elektrische Leitfähigkeit von Basalt-Schmelzen fast nicht vom Sauerstoff-Partialdruck abhängt. Man hat deshalb zur Zeit zwei sichere "Säulen", auf denen man einen Zusammenhang zwischen Temperatur und Leitfähigkeit aufbauen kann: Die elektrische Leitfähigkeit von Olivin-Einkristallen und die elektrische Leitfähigkeit von Basaltschmelzen. Dies sind die Grundlagen für die weiteren Modell-Überlegungen unter Punkt 3 und 4.

2. Stoffliche Zusammensetzung

Man kann vermuten, daß weder Olivin noch Basalt allein die stoffliche Zusammensetzung von Mantel und unterer Kruste beschreiben. Hierüber existiert eine umfangreiche Literatur. Die folgenden Definitionen habe ich in folgenden Werken gefunden: RINGWOOD (1976), GREEN und LIEBERMANN (1976), BOTTINGA und ALLEGRE (1976) und anderen, die ich der Kürze wegen weglassen. Es ist auch nur näherungsweise möglich, übereinstimmende Definitionen zu finden, woran auch die große Zahl von petrographischen Namen schuld ist. Olivin ist ein Mineral mit der Zusammensetzung: Forsterit (Fo , Mg_2SiO_4) und Fayalit (Fa , Fe_2SiO_4), wobei für den Erdmantel 10% Fa und 90% Fo typisch sein sollen. In vielen Arbeiten ist zwar von Olivin die Rede, aber man findet dann doch eine recht lange Tabelle mit vielen anderen Elementen. Solche Olivine "2.Art" sind dann Edelsteine, die Olivin in großer Menge enthalten. Sie werden auch Peridotite genannt. Manchmal findet man auch die Bezeichnung Olivinite, die vermutlich den Peridotiten sehr ähnlich sind. Beide enthalten außer dem reinen Olivin noch Pyroxen. Lherzolith ist eine Mischung aus Olivin, Orthopyroxen und Klinopyroxen, Harzburgit eine Mischung aus Olivin und Orthopyroxen. So kann man einen Peridotit als eine Mischung aus Lherzolith und Harzburgit auffassen. Ein weiteres Tiefengestein ist Dunit, das zu 90% aus Olivin besteht. Eklogit kann man als Basalt bei hohen Drucken beschreiben, es besteht aus Granaten und Pyroxenen (wobei letztere als Omphacite in der Hochdruck-Modifikation bezeichnet werden). Pyroxenit ist ein Eklogit ohne diese Hochdruck-Modifikation Omphacit. In Figur 3

ist die elektrische Leitfähigkeit als Funktion der Temperatur an einer Vielzahl solcher ultrabasischer Gesteine wiedergegeben. Die Frage ist die, ob die in dieser Figur dargestellten Ergebnisse den Zusammenhang zwischen Temperatur und Leitfähigkeit viel realistischer wiedergeben als die Ergebnisse für Olivin-Einkristalle oder die Ergebnisse für Basalte. Es wird also nach der stofflichen Zusammensetzung des Mantels gefragt. RINGWOOD hat solch ein "Modell-Material" erdacht, das er Pyrolit (von Pyroxen + Olivin - Gestein) nannte. BOTTINGA und ALLEGRE (1976) bemerken "aufschlußreich", das Wort Pyrolit werde nur von einigen australischen Petrologen (= Ringwood) und von den Geophysikern benutzt. Das Konzept für die Zusammensetzung dieses Mantel-Materials ist bezwingend einfach: Es soll beim Aufstieg an die Erdoberfläche nach einer Kette von Differentiations-Prozessen Basalt und Olivin ergeben. Es gibt mehrere Definitionen, z.B. Pyrolit = 25 % Basalt + 75 % Olivin, oder Pyrolit = 1 Teil Olivintholeit und 3 Teile Peridotit. Nach GREEN et. al. (1976) ist Harzburgit = Pyrolit - 20-30% Basalt und Lherzolit = Pyrolit - 10% Basalt. Es sind bereits viele petrologische und physikalische Eigenschaften des Pyrolits untersucht worden, aber anscheinend noch nicht die elektrische Leitfähigkeit als Funktion der Temperatur. Da man aber die elektrische Leitfähigkeit der einzelnen Komponenten, nämlich von Basalt und von Olivin kennt, sollte es möglich sein, die Gesamtleitfähigkeit dieses hypothetischen Mantelmaterials zu berechnen. Die theoretischen Möglichkeiten werden im nächsten Abschnitt diskutiert. Mir scheint diese Betrachtungsweise durch die in Figur 3 dargestellten Ergebnisse gerechtfertigt zu sein. Es ist unwahrscheinlich, daß der starke Anstieg der Leitfähigkeit bei etwa 1100°C durch Bändermodelle für Halbleiter (mit Aktivierungsenergien über 2-3eV!) erklärt werden kann, wie es einige der Autoren machen. Viel wahrscheinlicher ist der starke Anstieg der Leitfähigkeit durch eine Zunahme der geschmolzenen Basalt-Phase in diesen ultrabasischen Gesteinen begründet.

3. Mathematische Misch-Modelle

In den Arbeiten von SHANKLAND und WAFF (1977) und von HONKURA (1975) werden mathematische Modelle diskutiert, die aus einer gutleitenden, flüssigen Phase und einer festen, schlechtleitenden Phase bestehen. Es ergibt sich, daß das simple "Kugel-Modell" von MAXWELL (1892) eine gute Näherung, auch für kompliziertere Geometrien ist. Im Modell I liegen gutleitende Kugeln isoliert

voneinander in einer schlechtleitenden Matrix. Dieser Fall entspricht petrographisch dem Zustand des "Initial Melting", wobei sich vorzugsweise in den Zwickeln der polykristallinen Kristallstruktur die ersten, gutleitenden Keime der Schmelzphase bilden. Erreicht dieser Schmelzanteil jedoch wenige Prozent (5%), dann breitet sich das geschmolzene Material rasch an den Korngrenzen aus und bildet einen gutleitenden Film um die schlechtleitenden Restkristalle. Für diesen Fall gilt das Modell II. Erreicht der Schmelzanteil Werte über 25% des Gesamtvolumens, so sondert sich der flüssige Anteil ab in Form von Magmenkammern. Spielt sich dieser Vorgang in großen Tiefen (100km) ab, so könnte dieses Modell wiederum durch gutleitende Kugeln (Durchmesser 10 km) in einem schlechtleitendem residualem Gestein, also durch das Modell I beschrieben werden.

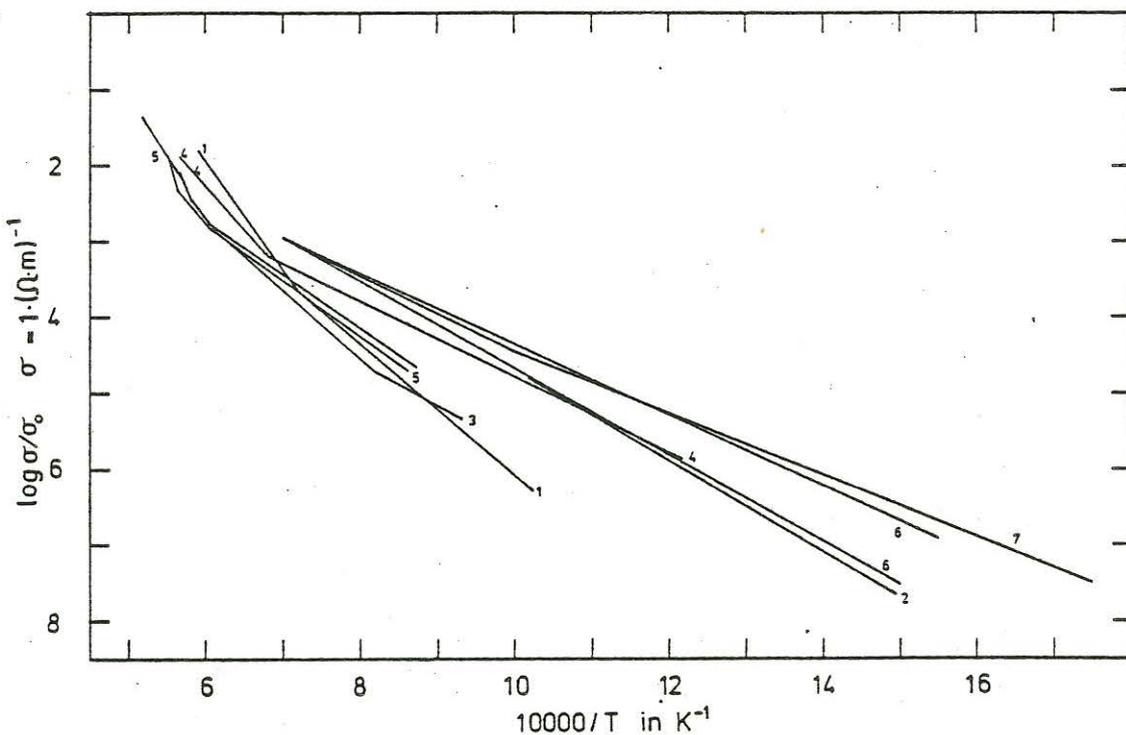
$$\text{Modell I} \quad \sigma = \sigma_{ol} \frac{\sigma_{ba} + 2 \sigma_{ol} + 2 v_{ba} (\sigma_{ba} - \sigma_{ol})}{\sigma_{ba} + 2 \sigma_{ol} - v_{ba} (\sigma_{ba} - \sigma_{ol})}$$

$$\text{Modell II} \quad \sigma = \sigma_{ba} \frac{3 \sigma_{ol} - 2 v_{ba} (\sigma_{ol} - \sigma_{ba})}{3 \sigma_{ba} - v_{ba} (\sigma_{ol} - \sigma_{ba})}$$

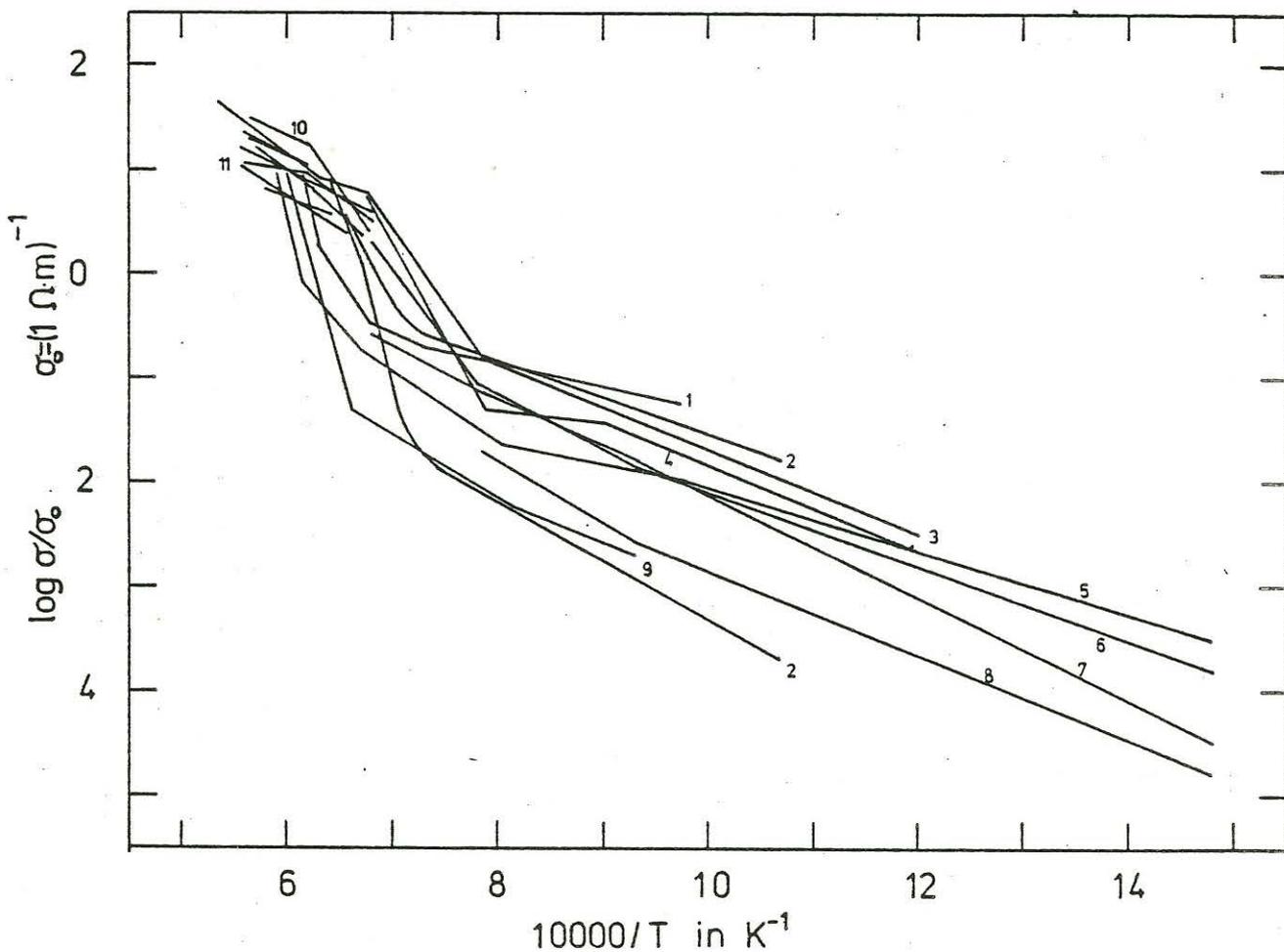
Hierbei sind v_{ba} der Volumenanteil Basalt am Gesamtvolumen.

4. Petrographische Randbedingungen

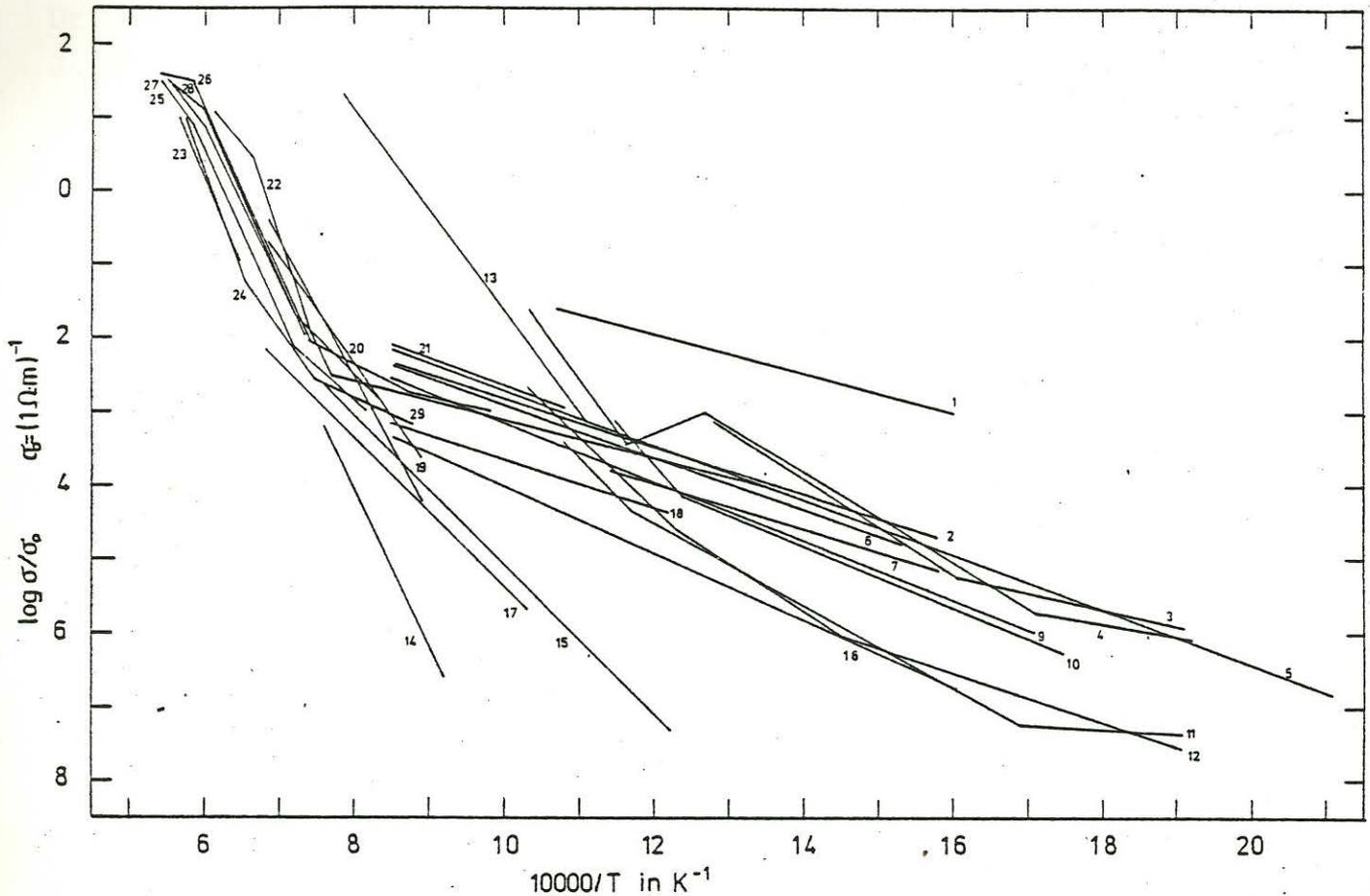
Die Frage ist, ob derartige mathematische Modelle den Zusammenhang zwischen Temperatur und elektrischer Leitfähigkeit sicherer anzugeben vermögen als Labormessungen, wie sie in Figur 3 gegeben sind. Es wäre leicht, zu zeigen, daß man die elektrische Leitfähigkeit im Labor (bis heute jedenfalls) nicht unter den Bedingungen des Erdinnern bestimmen kann. So ist z.B. der Einfluß von wenigen Prozent Wasser auf die Leitfähigkeit bei 1000°C technisch nicht meßbar. Dagegen existieren viele petrographische Beobachtungen, z.B. an Schmelzvorgängen unter vielen möglichen Bedingungen (Druck, Temperatur, H₂O), die Volumen, Geometrie und Chemismus der einzelnen Bestandteile des Gesteins angeben können. Die Vereinigung dieser petrographischen Kenntnisse mit den sicheren Daten für die Leitfähigkeit der einzelnen Bestandteile in einem der mathematischen Modelle könnte dann den Zusammenhang zwischen Temperatur und Leitfähigkeit ergeben, der auf direkte Weise nicht zu bestimmen ist. Das hier nur unvollständig diskutierte 2-Phasen Modell (siehe SHANKLAND & WAFF, 1977) ist sicher nur der Anfang einer neuen Entwicklung.



Figur 1: Elektrische Leitfähigkeit von Olivin-Einkristallen (DUBA, HUGHES, HAAK)



Figur 2: Elektrische Leitfähigkeit von Basalten (PRESNALL, WAFF, WATANABE, KHITAROV)



Figur 3: Elektrische Leitfähigkeit von ultrabasischen Gesteinen (PARKHOMENKO, BONDARENKO, LASTOVIČKOVA, DVOŘAK, MANGHNANI)

Literatur:

- Bottinga, Y. and C. Allègre: Geophysical, Petrological and Geochemical Models of the oceanic lithosphere. *Tectonophysics*, 32, 9-59, 1976
- Duba, A.: Are laboratory electrical conductivity data relevant to the Earth? *Acta Geodaet., Geophys. et Montanist.* Tomus 11, 485pp, 1976
- Green, D.H. and R.C. Liebermann: Phase equilibria and elastic properties of a pyrolite model for the oceanic Upper Mantle. *Tectonophysics*, 32, 61 - 92, 1976
- Honkura, Y.: Partial melting and electrical conductivity anomalies beneath the Japan and Philippine Seas. *P.E.P.I.*, 10, 128 - 134, 1975
- Ringwood, A.E.: Composition and Petrology of the Earth Mantle. McGraw Hill, 1976
- Schock, R.N., A.G. Duba, H.C. Heard, H.D. Stromberg: The electrical conductivity of polycrystalline olivine and pyroxene under pressure. In: *High Pressure Research*. Editor MANGHNANI et al., Acad. Press, 1977
- Shankland, T.J., H.S. Waff: Partial melting and electrical conductivity anomalies in the Upper Mantle. *J.G.R.*, 82(33), 5409-5417, 1977
- Waff, H.S., Weill: Electrical conductivity of magmatic liquids: Effects of temperature, oxygen fugacity and composition. *Earth Plan. Sci. Lett.*, 28: 254 - 260, 1975.