

Dipl. - Phys. I. SCHEELKE, Braunschweig

---

"Magnetotellurische Messungen im Gebiet Lahr - Schramberg.-  
Erste Auswertung"

---

Dienstag, den 4. 3. 1969

Im Herbst 1968 wurden vom Institut für Geophysik und Meteorologie der TU Braunschweig magnetotellurische Messungen im Gebiet des Oberen Rheingrabens durchgeführt. Das "Fernziel" der Untersuchungen war es, einen Beitrag zur Erforschung der Struktur des Rheingrabens zu liefern. Das "Nahziel" war zweifacher Art: Erstens sollten Erfahrungen bei einem längeren Geländeeinsatz der verwendeten Meßapparatur gesammelt werden; zweitens sollte an dem gewonnenen Registriermaterial ein für die Analyse späterer Messungen geeignetes Auswerteverfahren erprobt werden.

Aufzeichnungen der magnetischen Komponenten  $H_x$ ,  $H_y$ ,  $H_z$  und der elektrischen Komponenten  $E_x$ ,  $E_y$  wurden auf einem Profil senkrecht zur Richtung des Rheingrabens an den Stationen Ichenheim (Rheinnähe), Oberweier (Schwarzwaldrand, Nähe Lahr) und Liefersberg (Schwarzwaldmassiv, Nähe Schiltach) vorgenommen.

Meßanlage

Die in einem geländegängigen Fahrzeug (Mercedes-Unimog) untergebrachte Apparatur kann praktisch überall eingesetzt werden, zumal die Stromversorgung von einem mitgeführten Dieselmotorgenerat übernommen wird.

Die Komponenten des erdmagnetischen Feldes werden mit Hilfe von entsprechend ausgerichteten Induktionsspulen gemessen (Abb. 1). Einige Spulendaten: Empfindlichkeit:  $150 \mu V \gamma^{-1} Hz^{-1}$ , Induktivität: 630 H, Gleichstromwiderstand: 360  $\Omega$ , Zahl der Windungen: 30000 auf Mümetallkern, Länge: 188 cm, Durchmesser: 10,5 cm.

Die Komponenten des erdelektrischen Feldes werden in der üblichen Weise durch zwei Auslagen gemessen, an deren Enden sich nichtpolarisierbare Kupfer-Kupfersulfat-Sonden befinden. Die Länge der Auslagen betrug im allgemeinen 200 m.

Die einzelnen Registrierkanäle sind in Abb. 2 dargestellt. Alle Filter sind identisch und so regelbar, daß man mit verschiedenen Bandbreiten aufnehmen kann. Als Signalspeicher dient ein 7-Spur-FM-Magnetbandgerät. Bei einer Bandgeschwindigkeit von 5 cm pro sec und einer Bandlänge von 1100 m beträgt die maximale Registrierzeit etwa 6 1/4 Std. Hauptsächlich zur Kontrolle werden alle Signale von einem 5-Kanal-Schreiber parallel aufgezeichnet.

### Signalaufbereitung (Abb. 3)

Zur Weiterverarbeitung werden die Analogsignale bei einer höheren als der Aufnahmegeschwindigkeit vom FM-Bandgerät abgespielt (Zeitraffung) und von einem Analogrechner derart verstärkt, daß der nachfolgende Analog-Digitalwandler möglichst gut angesteuert wird. Die Digitalisierfrequenz des A-D-Wandlers läßt sich in einem weiten Bereich einstellen:  $0 < f_{\text{dig}} \leq 1$  kHz. Jeweils 4 Kanäle werden gleichzeitig abgefragt, während der 5. Kanal um die Taktperiode verzögert ist. Die digitalen Werte werden dann blockweise auf Band gespeichert. Diese Digitalbänder können anschließend von der ICL 1907 (Rechenzentrum der TU Braunschweig) gelesen und weiterverarbeitet werden.

### Auswertemethode

Eine Auswertung der Beziehungen zwischen den elektrischen und magnetischen Horizontalkomponenten soll mit Hilfe einer Tensorarstellung (CANTWELL, 1960) versucht werden:

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix}, \text{ Impedanztensor.}$$

Die  $Z_{ik}$  sind frequenzabhängig, ortsabhängig und zeitunabhängig, falls das Quellenfeld homogen ist. Man hat also zunächst zwei

Gleichungen für vier Unbekannte. Eine Lösung ist möglich, wenn man zwei unabhängige Sätze von Meßdaten verwendet:

$$H_x^I, H_y^I, E_x^I, E_y^I ; H_x^{II}, H_y^{II}, E_x^{II}, E_y^{II}.$$

Auflösung nach den  $Z_{ik}$ :

$$Z_{11} = (H_y^{II} E_x^I - H_y^I E_x^{II})/D, Z_{12} = \dots; Z_{21} = \dots; Z_{22} = \dots;$$

$$D = (H_x^I H_y^{II} - H_x^{II} H_y^I).$$

Eine Bestimmung der  $Z_{ik}$  für den Fall, daß Anisotropie vorliegt und die Felder elliptisch polarisiert sind, ist mit folgendem Ansatz möglich (HENTE, 1967):

$$|E_1(\omega)| e^{i\epsilon_1} = |Z_{11}(\omega)| e^{i\xi_{11}} |H_1(\omega)| + |Z_{12}(\omega)| e^{i\xi_{12}} |H_2(\omega)| e^{i\eta_2}$$

$$|E_2(\omega)| e^{i\epsilon_2} = |Z_{21}(\omega)| e^{i\xi_{21}} |H_1(\omega)| + |Z_{22}(\omega)| e^{i\xi_{22}} |H_2(\omega)| e^{i\eta_2}.$$

Die Amplituden  $|E_i(\omega)|$  und  $|H_i(\omega)|$  lassen sich aus den Quadratischen Spektren bestimmen, die Phasenwinkel aus den Kreuzspektren mit  $H_1$ . Setzt man diese Größen in die obigen Gleichungen für die Tensorkomponenten ein, so erhält man vier komplexe Gleichungen. Nach einer Aufspaltung in Real- und Imaginärteile und einigen Zusammenfassungen ergeben sich die gesuchten  $Z_{ik}$ :

$$Z_{ik} = \frac{\text{Re}A_{ik} \cdot \text{Re}D + \text{Im}A_{ik} \text{Im}D}{(\text{Re} D)^2 + (\text{Im} D)^2} + i \frac{\text{Im}A_{ik} \cdot \text{Re}D - \text{Re}A_{ik} \text{Im}D}{(\text{Re} D)^2 + (\text{Im} D)^2}.$$

Es hat sich gezeigt (BOSTICK u. SMITH, 1962), daß die Größe der  $Z_{ik}$  bei vorhandener Anisotropie von der relativen Orientierung der Meßachsen abhängig ist. Bei der Drehung eines kartesischen Koordinatensystems gilt für die Feldkomponenten:

$$E' = R \cdot E ; H' = R \cdot H$$

mit  $R = \begin{pmatrix} \cos\phi & \sin\phi \\ \sin\phi & \cos\phi \end{pmatrix} \quad \phi = \text{Drehwinkel.}$

Gesucht ist:  $E' = Z'H'$  ; dann muß gelten:

$$Z' = R Z R^T$$

oder

$$Z'_{11} = Z_{11} \cos^2 \phi + (Z_{12} + Z_{21}) \sin \phi \cos \phi + Z_{22} \sin^2 \phi ;$$

$$Z'_{12} = \dots; \quad Z'_{21} = \dots; \quad Z'_{22} = \dots .$$

Man versucht jetzt, eine Drehung vorzunehmen, so daß  $Z'_{11}$  und  $Z'_{22} = 0$ , d.h. Hauptachsentransformation oder Drehung der Meßachsen in Streichrichtung der Anisotropie bzw. senkrecht dazu.

Annahme:  $Z'_{11} = Z'_{22} = 0$ , dann folgt:

$$Z'_{12} = 1/2 (\sqrt{4 Z_{11}^2 + (Z_{12} + Z_{21})^2} + Z_{12} - Z_{21}); \quad Z'_{21} = \dots;$$

$$\text{tg } 2\phi_0 = - \frac{2 Z_{11}}{Z_{12} + Z_{21}} \quad \text{zugehöriger Drehwinkel.}$$

Um die Richtung der Hauptachsen festzulegen, genügt es, das Minimum von  $Z'_{11}$  zu bestimmen. Zu diesem Zweck variiert man in obiger Gleichung für  $Z'_{11}$  den Drehwinkel im Bereich von  $-90^\circ$  bis  $+90^\circ$ . Entsprechend der Beziehung  $Z'_{11}(\phi_0) = Z'_{22}(\phi_0 + 90^\circ)$  treten im allgemeinen zwei Minima auf. Mit diesen Winkeln lassen sich dann  $Z'_{12}$  und  $Z'_{21}$ , die Komponenten des Anisotropietensors ermitteln.

Die weitere Auswertung kann jetzt nach der bekannten Methode von CAGNIARD erfolgen, denn es gilt:

$$\text{Richtung von } \phi_0 \quad : \quad \rho_{s1} = 0,2 T |Z_{12}(\phi_0)|^2 ,$$

$$\text{Richtung von } \phi_0 + 90^\circ \quad : \quad \rho_{s2} = 0,2 T |Z_{21}(\phi_0)|^2 .$$

### Ergebnisse

Die beiden folgenden Abbildungen (Abb.4 u. Abb.5) zeigen  $\rho_s$ -Kurven für die Station Ichenheim, die nach obigem Verfahren bisher berechnet wurden.

Zu Abb.4: Alle Kurven beziehen sich auf  $E_x$ , die Nord-Süd-Komponente des elektrischen Feldes. Die beiden Funktionen, deren Punkte verbunden sind, wurden vom Rechner aus je zwei

unabhängigen Datensätzen, die jeweils vier Tage auseinanderlagen, ermittelt. Da die Streuungen sehr stark sind, läßt sich ein mittleres  $\rho_s$  nur schwer angeben; es scheint aber ziemlich flach in Abhängigkeit von der Periode zu verlaufen. Die Streuungen lassen sich hauptsächlich auf das Auswerteverfahren zurückführen, das ja die explizite Bestimmung von Phasenwinkeln erfordert. Phasenfunktionen aber, die mit Hilfe der statistischen Frequenzanalyse gewonnen wurden, unterliegen starken Schwankungen, sobald die zugehörigen Kohärenzwerte klein werden. Die obigen Funktionen wurden ohne Rücksicht auf die Kohärenz gezeichnet, die in manchen Periodenbereichen durchaus kleine Werte annahm. Diejenigen Kurven, die durch die starken Punkte und Kreuze angedeutet sind, wurden von Hand berechnet, indem in die einfache CAGNIARDsche Gleichung für  $\rho_s$  die entsprechenden Werte der Quadratischen Spektren eingesetzt wurden. Während beide Funktionen unter sich recht ähnlich sind, weichen sie von den beiden anderen doch erheblich ab. Eine Entscheidung, welchen  $\rho_s$ -Werten das größere Gewicht beizumessen ist, ist zur Zeit noch nicht möglich.

Zu Abb.5: Die Kurven beziehen sich auf  $E_y$ , die Ost-West-Komponente des elektrischen Feldes. Hier ist die Übereinstimmung zwischen den von Hand und den von der Rechenanlage ermittelten Funktionen etwas besser. Sonst gilt sinngemäß das zu Abb.4 Gesagte.

Für die weitere Auswertung ist vorgesehen, das Verfahren von MADDEN und NELSON (1964) anzuwenden. Hierbei werden die Tensorkomponenten mit Hilfe der Kohärenzen zwischen den einzelnen Horizontalkomponenten bestimmt.

#### Literatur:

BOSTICK, F.X. and H.W. SMITH: Investigation of large-scale inhomogeneities in the earth by the magnetotelluric method. Proc. IRE, 50, 2339-2346, 1962.

CANTWELL, T.: Detection and analysis of low frequency magneto-telluric signals. Ph. D. Thesis, Department of Geology and Geophysics, M.I.T., Cambridge, Mass., 1960.

HENTE, B.: Magnetotellurik über einem Untergrund mit anisotroper Leitfähigkeit. Diplomarbeit, Braunschweig, 1967.

MADDEN, T. and P. NELSON: A defense of Cagniard's magneto-telluric method. Project Nr-371-401, Office of Naval Research, Geophys. Lab. M.I.T., Cambridge, Mass. 02139, 1964.

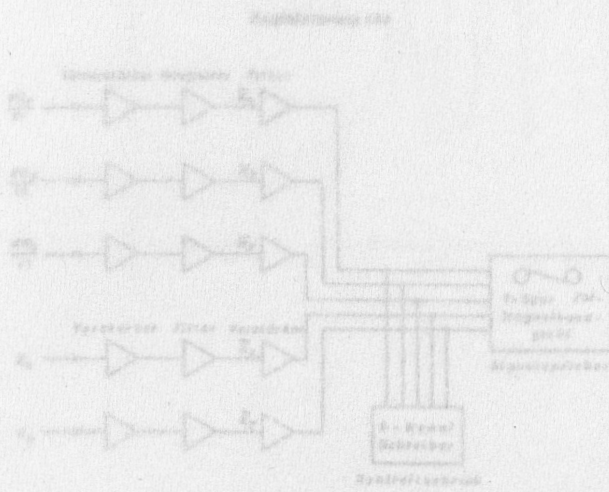


Abb. 2

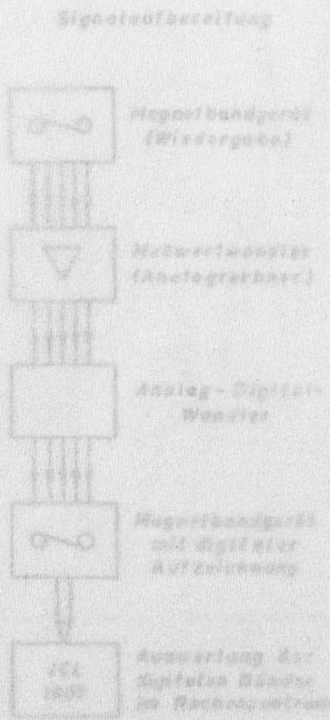


Abb. 3

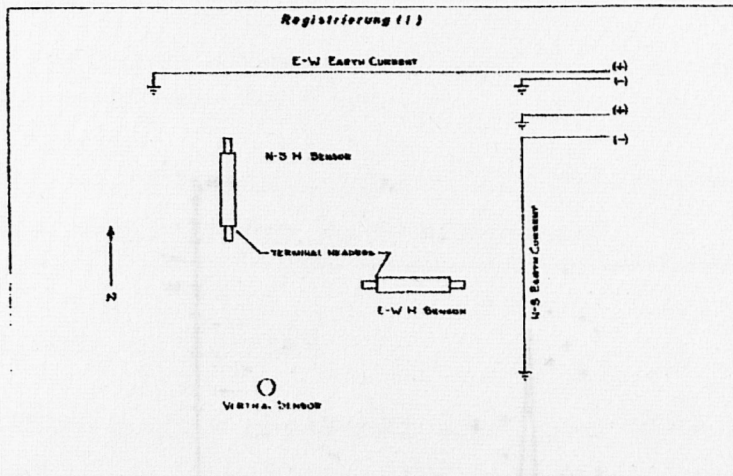


Abb. 1

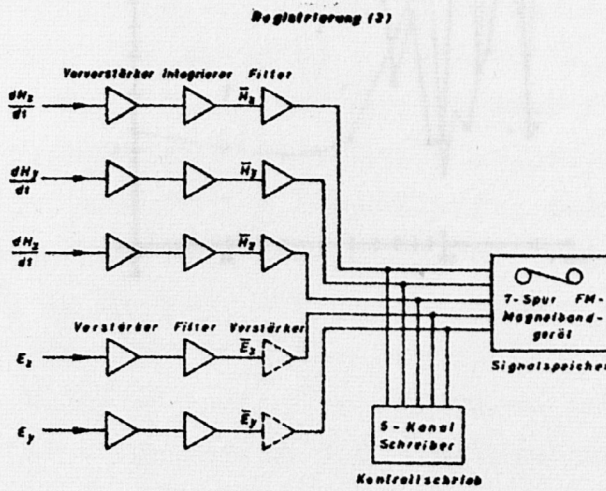


Abb. 2

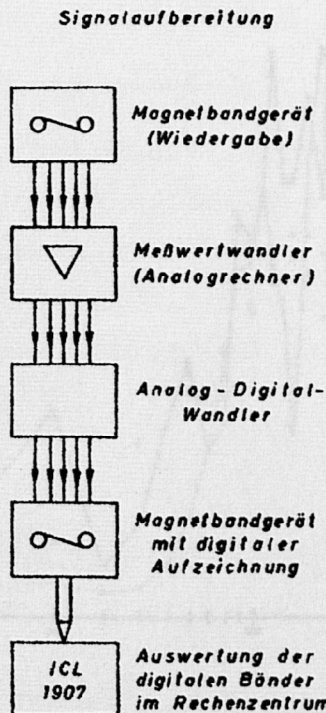


Abb. 3

Dr. K.-F. RANKIN, München

"Vergleich von Modellrechnungen mit Meßergebnissen des erdelektrischen Feldes am Rheingraben"

Dienstag, den 4. 1962

Der Rheingraben erstreckt sich über eine Länge von fast 300 km bei einer durchschnittlichen Breite von 35 km. Für die im Mittel 4 km tiefe Grabenrinne ist ein mittlerer spezifischer Widerstand  $\rho$  von 5 Ohm/cm zu entnehmen; der spezifische Widerstand des Gesteins an den Seiten des Grabens ist wesentlich größer. Somit ist der Graben als eine zweidimensionale Leitbahn anzusehen, mit der aus Symmetriegründen gekoppelten Eigenschaft, daß sich die induzierten elektrischen Felder in der Grabenrichtung nicht ändern, d.h. es gilt  $\frac{\partial E_x}{\partial y} = 0$  (mit Ausnahme der Umgebung der Grabenränder). Es läßt sich für diesen Fall aus den Maxwell'schen Gleichungen ableiten, daß die von einem homogenen Magnetfeld  $H_0$  induzierten Komponenten des elektrischen Feldes parallel und senkrecht zum Streichen des Grabens entkoppelt sind und zwar in der Weise, daß

- 1)  $H_{0y}$  nur die Komponenten  $E_x$  und  $E_z$  induziert.
  - 2)  $H_{0x}$  und  $H_{0z}$  nur  $E_y$  induziert.
- Es ist daher möglich, bei Modellrechnungen beide Fälle getrennt zu behandeln. Im folgenden sollen die Ergebnisse solcher Rechnungen mit Meßergebnissen von G. RANKIN am Rheingraben verglichen werden. Insbesondere soll untersucht werden, welche Aussagen über den tiefen Untergrund unter dem Rheingraben möglich sind.

1. Das elektrische Feld senkrecht zum Rheingraben

1) Modellrechnung

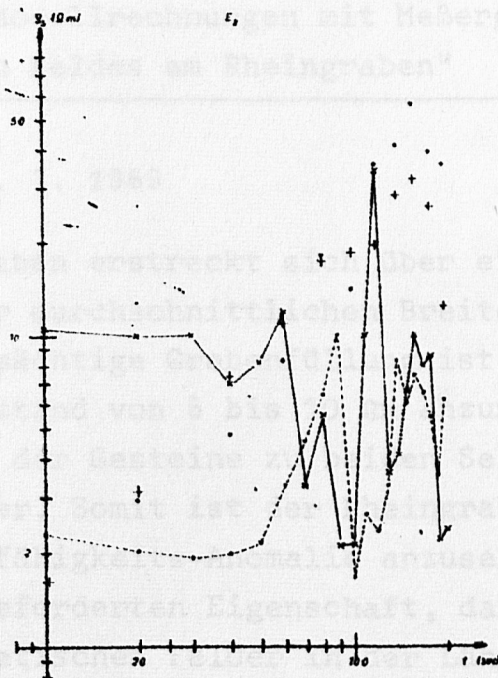


Abb. 4

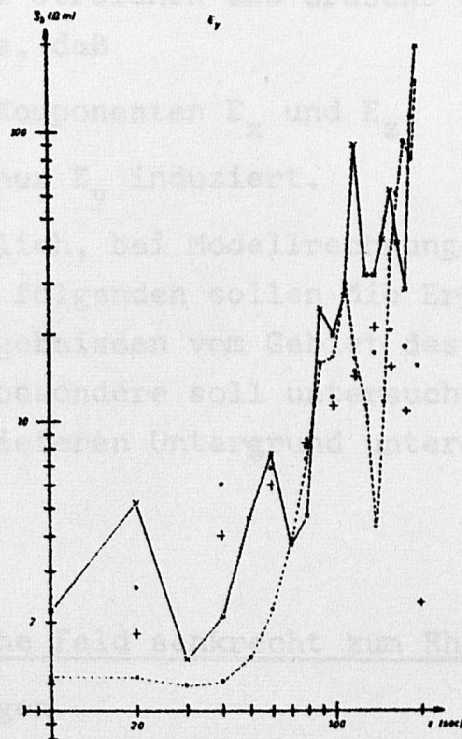


Abb. 5

Der Verlauf der senkrechten Komponente  $E_z$  des E-Feldes über verschiedenen Grabenmodellen wurde von RANKIN (1962)