

K. BAHR

"Erdmagnetische und magnetotellurische Messungen am Harznordrand und ihre gemeinsame Deutung durch ein zweidimensionales Leitfähigkeitsmodell"

1. Einleitung

An der nordöstlichen Randstörung des Harzes hebt sich das variskische Grundgebirge um mehrere tausend Meter gegen die mesozoischen Schichten des nördlichen Vorlandes heraus. Häufig ist ein Zusammenhang zwischen dieser Hebung und dem Magmatismus des Harzes gesehen worden.

Wegen der zu erwartenden Leitfähigkeitsunterschiede boten sich elektromagnetische Verfahren zur Erforschung der Tiefenerstreckung der Harzkante sowie der Ausdehnung der Plutone an.

Dabei sollte ein Modell der orts- und tiefenabhängigen Leitfähigkeitsverteilung gefunden werden, das sowohl lokale Änderungen aller magnetischen Komponenten wie auch die vollständigen Impedanztensoren erklärt. Dieses Ziel ist inzwischen weitgehend, aber nicht ganz erreicht worden. Abb. 1 zeigt das Meßgebiet und die sieben Stationen auf einem Nord-Süd-Profil, das den Harznordrand bei Bad Harzburg schneidet. An diesen Stationen wurden im November 1979 und im April/Mai 1980 Pulsationen des erdmagnetischen und erdelektrischen Feldes registriert, die nach einem von Schmucker (1978) vorgeschlagenen Verfahren für Perioden von 12s - 1000s analysiert worden sind. An den Stationen BUC und BRO wurde der Periodenbereich durch den Einsatz von Fluxgates auf 12s - 4h erweitert.

BUC und VIE liegen auf pleistozänischen Sedimenten, BRO und PFE auf dem Brockengranit bzw. dem sich nördlich anschließenden Gabbro, und WAL und TEL waren auf Südharz-Grauwacke aufgebaut.

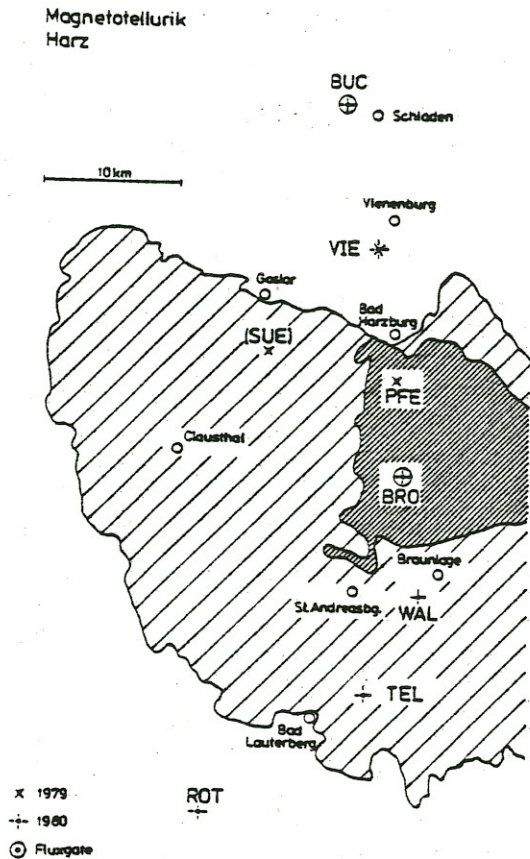


Abb. 1:
Das Meßgebiet.
Die feinere Schraffur
bezeichnet die Gesteine
der Brocken-Intrusion.

Dem Registrierbeispiel in Abb. 2 kann ein wesentliches Ergebnis bereits qualitativ entnommen werden: Ein Rückgang der Amplituden der magnetischen Horizontalkomponenten H und D von Norden nach Süden und Unterschiede zwischen den tellurischen Pulsationen zweier Stationen, die diejenigen im Magnetfeld um Größenordnungen übersteigen. Die gleichzeitige Registrierung magnetischer Pulsationen an den meisten Meßpunkten gestattete die Berechnung von Übertragungsfunktionen des anomalen magnetischen Horizontalfeldes, bezogen auf den nördlichsten Meßpunkt BUC als Normalstation. Mit einer einfachen Umrechnung kann diese Übertragungsfunktion auch für die Station PFE gewonnen werden, die nicht gleichzeitig mit BUC betrieben wurde, da die Station VIE sowohl gleichzeitig mit PFE wie auch mit BUC gelaufen ist.

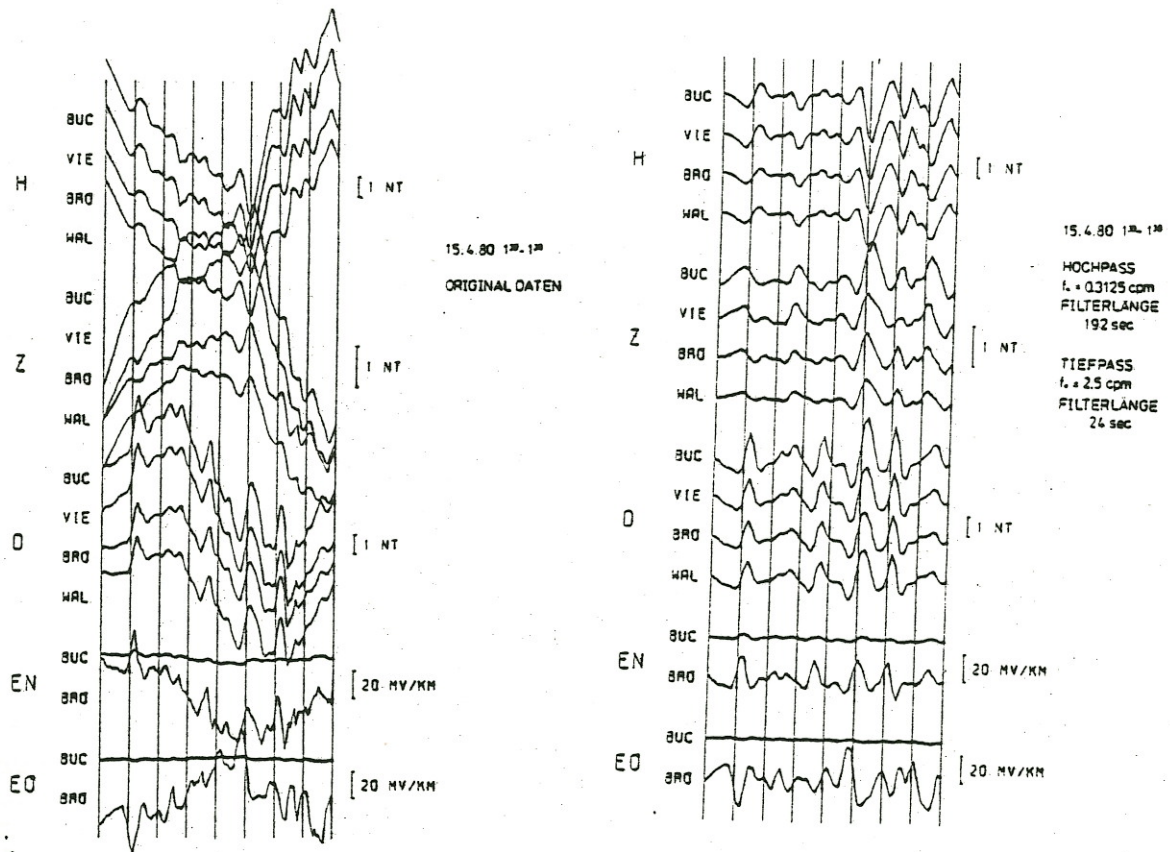


Abb. 2a, b: Beispiel für einen Effekt: Pulsationen am 15.4.1980, 130 - 138. Links: Originaldaten mit Berücksichtigung der Geräte-Übertragungsfunktionen, rechts: Dieselben Daten nach der Anwendung numerischer Filter, die die Information der Zeitreihen auf dasjenige Frequenzband beschränken, in dem der Effekt analysiert werden soll. Durch die Reihenfolge der Stationen ist der Profilverlauf von Norden nach Süden wiedergegeben, der Abstand zwischen den Zeitmarken ist 1 min.

2. Meßergebnisse

Abb. 3 stellt das elektrische Feld durch tellurische Vektoren (Schmucker und Wiens; 1980) dar. Mit $e_x = z_{xx}\hat{x} + z_{yx}\hat{y}$ ist die Impedanz des mit der magnetischen Nordkomponente korrelierten Feldes bezeichnet. Für die Impedanzen von BUC und VIE, die etwa 15mal kleiner sind als die der anderen Stationen, ist ein anderer Maßstab gewählt worden. Der geologische Nordrand des Harzes liegt zwischen PFE und VIE.

Die Richtung der tellurischen Vektoren ist - mit Ausnahme der Station VIE - nahezu unabhängig von der Richtung des anregenden Feldes. PFE liegt auf kristallinem Gestein niedriger Leitfähigkeit, so daß das E-Feld senkrecht zum Harzabbruch vergrößert wird. Der Impedanztensor von VIE, 5 km nördlich des Harzrandes,

ist für kurze Perioden nahezu eindimensional interpretierbar. Für Perioden über 30s übersteigt die Eindringtiefe 5 km, und das Streichen des Harzabbruchs stellt sich als Vorzugsrichtung ein. Bei ROT fällt die Richtung maximaler Impedanz mit der Richtung des 8 km nördlich gelegenen Harzsüdrandes zusammen.

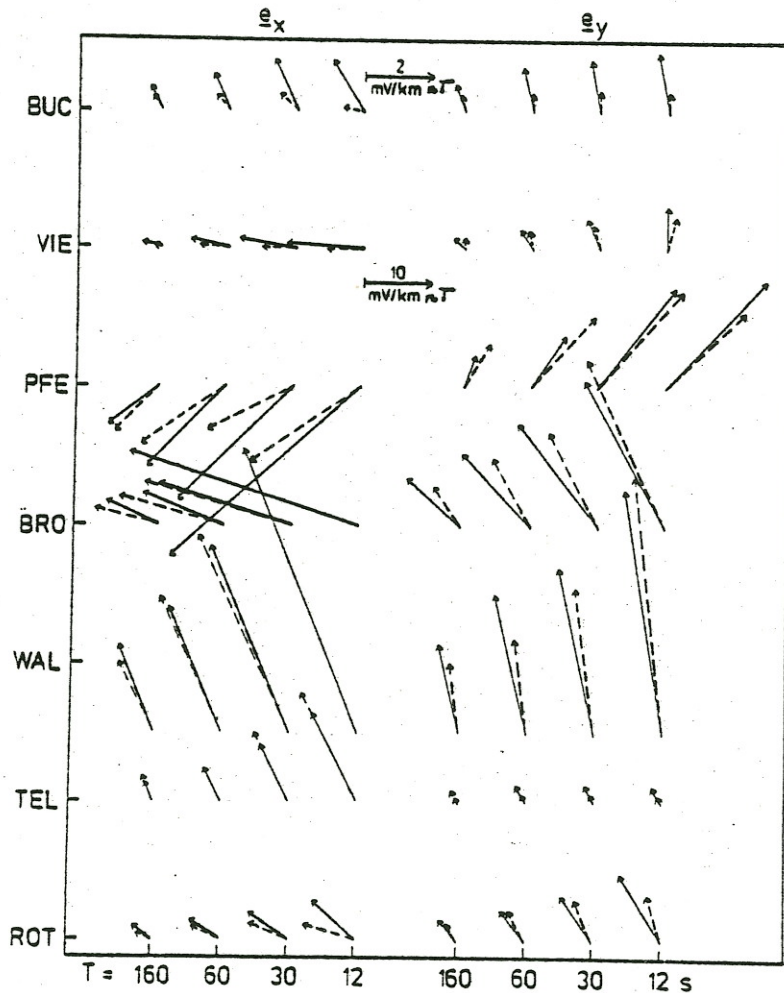


Abb. 3:
Tellurische Vektoren für vier Perioden. Die Anordnung der Stationen entspricht ihrer Lage auf dem Nord-Süd-Profil.

—————→ Re \underline{e}_x , Re \underline{e}_y
 - - - - -→ Im \underline{e}_x , Im \underline{e}_y

Die stark hervortretenden Vorzugsrichtungen der anderen Stationen sind mit großräumigen geologischen Strukturen nicht korrelierbar, sie werden wohl durch kleinräumige Einlagerungen im obersten Stockwerk bestimmt. Hierauf weist auch der Frequenzgang des skewness-Koeffizienten des elektrischen Feldes

$$\chi = \left| \frac{Z_{xx} + Z_{yy}}{Z_{xy} - Z_{yx}} \right|$$

hin, der in Abb. 4 dargestellt ist. Diese Größe ist unter bestimmten Bedingungen ein Maß dafür, wie stark der Impedanztensor durch eine zweidimensionale Struktur bestimmt wird.

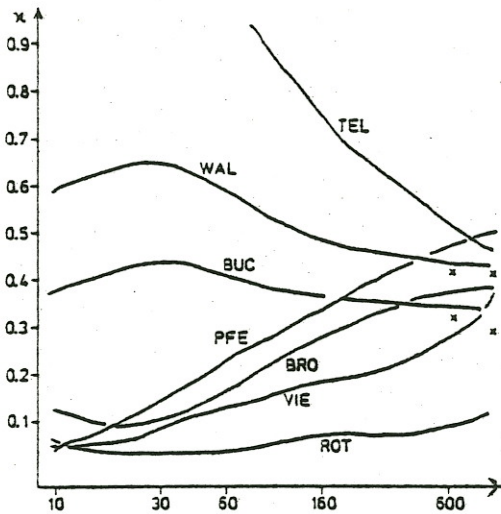


Abb. 4:
Skewness

Bei PFE, BRO und VIE überwiegt für kurze Perioden eine Vorzugsrichtung, für größere Eindringtiefen wächst der Einfluß von zusätzlichen, überlagerten Strukturen. Bei TEL ist es umgekehrt, hier gehen die Verzerrungen mit wachsender Eindringtiefe zurück. Mit Ausnahme von WAL und TEL gelang an allen Stationen eine recht gute Entkoppelung von E- und B-Polarisation, nachdem die Impedanztensoren um den nach Swifts Kriterium bestimmten Winkel rotiert worden waren.

In der Zusammenschau bieten die im Harz und seinem nördlichen Vorland gewonnenen Impedanztensoren ein komplexes Bild, das von Verzerrungen an jeder Einzelstation wie auch von starken Sprüngen des elektrischen Feldes von Meßpunkt zu Meßpunkt geprägt ist.

Dagegen sind die gefundenen Übertragungsfunktionen des Magnetfeldes recht glatte Funktionen des Ortes. Abb. 5 zeigt als Beispiel Induktionspfeile, die ohne Abzug eines Normalfeldes nach der Gleichung

$$Z = (z_H \ z_D) \begin{pmatrix} H \\ D \end{pmatrix}$$

gewonnen wurden. Mit H, D und Z sind hierin die frequenzabhängigen Fouriertransformierten der Komponenten des Magnetfeldes bezeichnet.

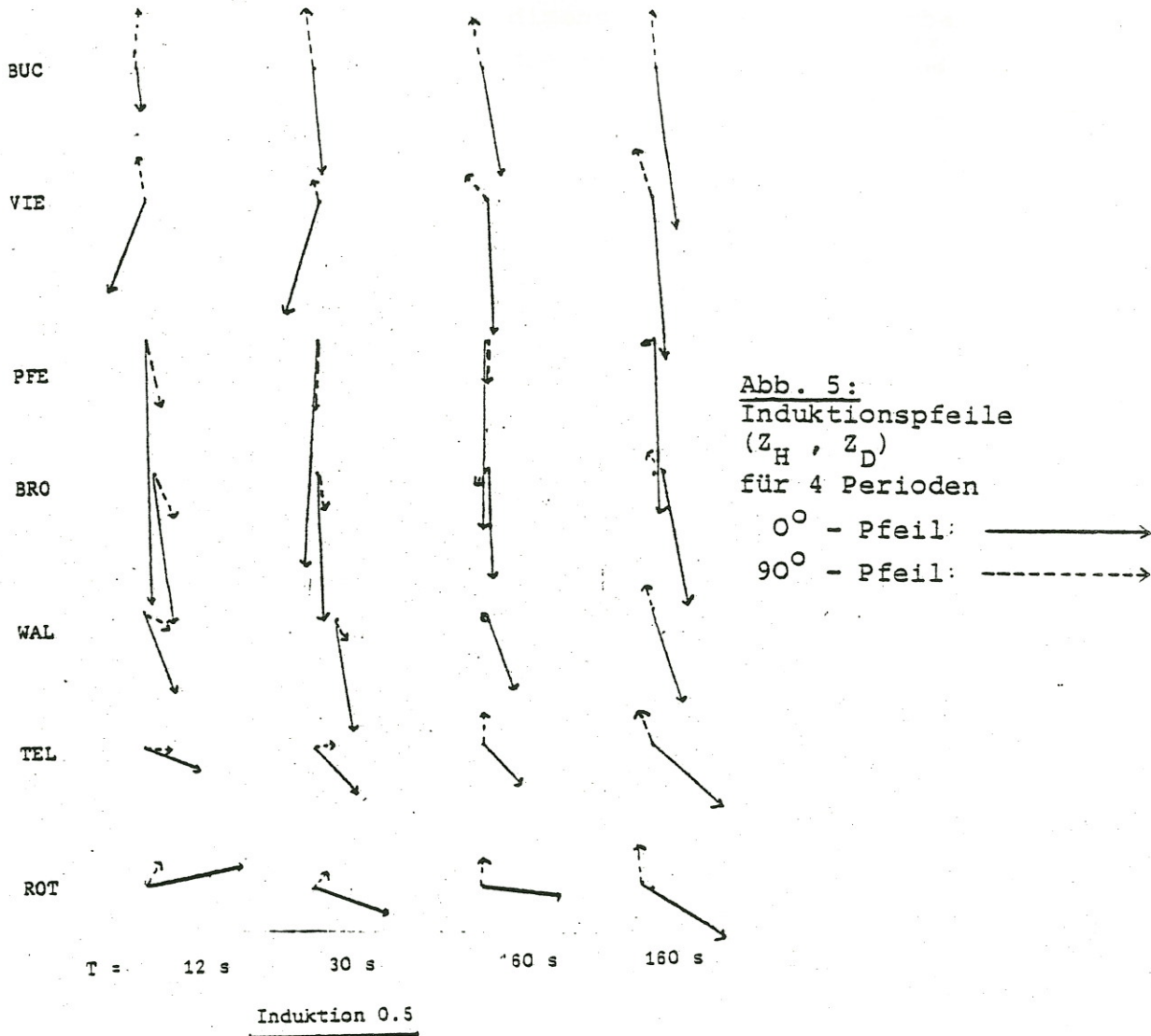


Abb. 5:
Induktionspfeile
(Z_H , Z_D)
für 4 Perioden

0° - Pfeil: \longrightarrow
 90° - Pfeil: \dashrightarrow

Die Pfeile der fünf nördlichen Stationen weisen auf ost-west streichende Anomalien hin. Bei PFE, BRO und WAL fällt das periodenabhängige Umklappen des 90° -Pfeiles auf. Es existieren mindestens zwei Leitfähigkeitsanomalien, von denen eine noch nördlich von BUC gelegen sein muß. Mit ihr kann die norddeutsche Leitfähigkeitsanomalie identifiziert werden. Die Verstärkung der Z-Komponente bei PFE wird dem Harznordrand zugeschrieben.

3. Interpretation durch ein zweidimensionales Leitfähigkeitsmodell

Abb. 6 zeigt für jede Station einen tellurischen Vektor unter Berücksichtigung der Rotation im Kartenbild. Die durch die Längen dieser Vektoren beschriebenen Impedanzen sind durch Modelle interpretiert worden. Sie ergeben sich zu

$$Z = \sqrt{(Re Z_{xy})^2 + (Re Z_{yy})^2} + i \sqrt{(Im Z_{xy})^2 + (Im Z_{yy})^2}$$

wenn der mit einem in x-Richtung polarisierten Magnetfeld korrelierte und auf dieses Magnetfeld normierte elektrische Feldvektor \underline{e}_y ausgewertet wird. Für die Auswertung von \underline{e}_x sind in dieser Formel die Indices x,y zu vertauschen.

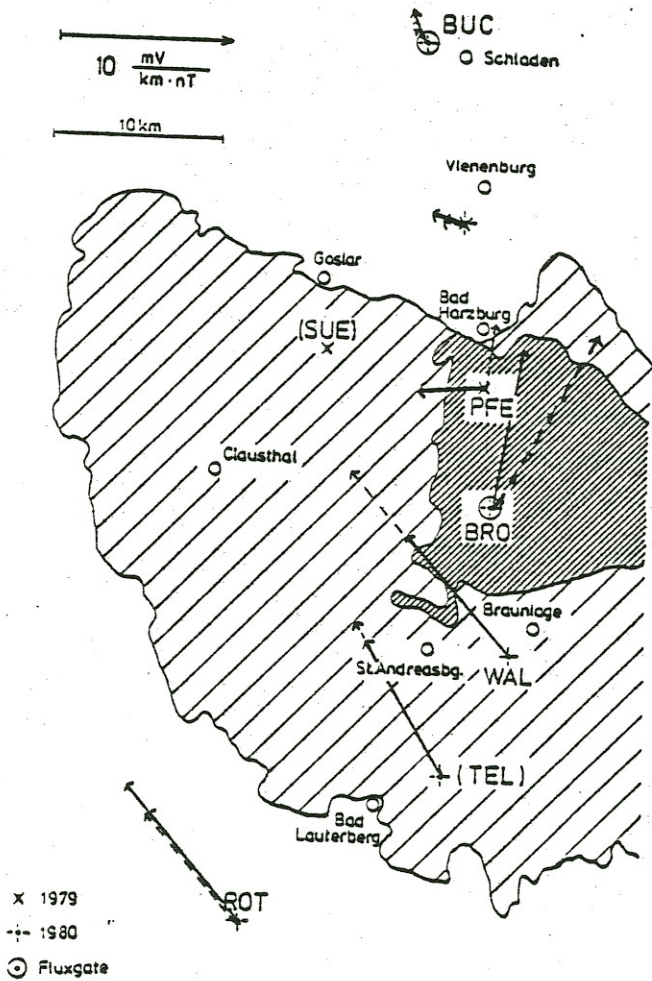


Abb. 6:
Tellurische Vektoren \underline{e}_x oder \underline{e}_y in rotierten Koordinaten; T = 30s

Für zweidimensionale Impedanztensoren folgt $Z = Z_{xy}$ oder $Z = Z_{yx}$, diese Vereinfachung gilt nur für die kompliziert verzerrten Impedanztensoren von WAL und TEL nicht.

Es sei betont, daß für Stationen im Harz die minimale für Stationen des nördlichen und südlichen Vorlandes dagegen die maximale Impedanz ausgewertet worden ist. Weil die Impedanzen im Harz, wie es für Plutone und variskische Sedimente zu erwarten ist, diejenigen des Vorlandes um 1-2 Größenordnungen übertreffen, stellt diese Wahl bereits eine räumliche Glättung dar. Dennoch bleiben,

wie sich der Abb. 6 entnehmen läßt, erhebliche Unterschiede von Station zu Station. Diese sollten durch Modellrechnung mit zweidimensionaler Verteilung der Leitfähigkeit, die auch die Ortsabhängigkeit der Übertragungsfunktionen des Magnetfeldes erklärt, interpretiert werden. Benutzt wurde das von Schmucker (1971) entwickelte Rechnerprogramm "Inhomogene Schicht". Zunächst sind aber die Impedanzen mit dem ψ -Algorithmus invertiert worden. Die gefundenen Drei- bis Fünfschichtmodelle sollen hier nur summarisch beschrieben werden, es sei aber auf eine genauere Darstellung verwiesen (Bahr, 1981).

Das Meßgebiet teilt sich auf in einen Nordteil mit hohen und einen Südteil mit erheblich geringeren Leitfähigkeiten, der von gut-leitenden kleinräumigen Strukturen durchzogen sein mag. Aus den Ergebnissen von PFE und ROT geht hervor, daß das Auftreten großer Widerstände in einem tieferen Stockwerk gegenüber dem geologischen Erscheinungsbild des Harz von Norden nach Süden verschoben ist.

Anomalous Z
Transfer Function

T = 60 s

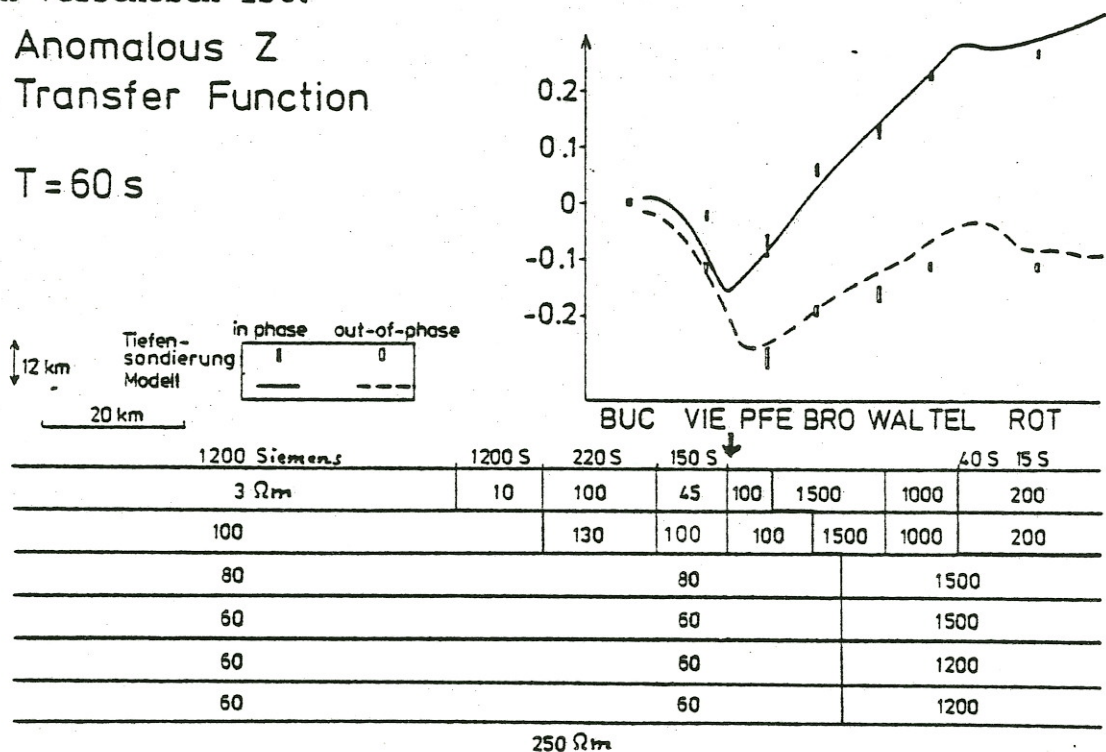


Abb. 7:
Zweidimensionales Modell der Widerstandsverteilung in einem von Norden (links) nach Süden verlaufenden Vertikalschnitt, der den Harznordrand bei Bad Harzburg (Pfeil) kreuzt. Zahlen geben in den Blöcken spezifische Widerstände (Ωm) und auf der obersten Linie integrierte Leitfähigkeiten (Siemens) der Deckschichten an. Weitere Erklärungen im Text. Diese Widerstands-Tiefenverteilungen sind nahezu unverändert in das in Abb. 7 gezeigte zweidimensionale

Modell übernommen worden. Durch die gut-leitenden Deckschichten im linken Teil des Blockdiagramms wird die norddeutsche Leitfähigkeitsanomalie in etwa der Form, wie sie WEIDELT (1978) gefunden hat, dargestellt.

In Abb. 7, 8 und 9 sind Übertragungsfunktionen zwischen dem anomalen Magnetfeld (H_a, D_a, Z_a) und dem normalen horizontalen Magnetfeld (H_n, D_n) eingetragen.

$$\begin{pmatrix} H_a \\ D_a \\ Z_a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_H & h_D \\ d_H & d_D \\ z_H & z_D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_n \\ D_n \end{pmatrix}$$

Abb. 7 zeigt also für eine Periode über dem Südteil des Modells die Anomalie der magnetischen Vertikalkomponente, wie sie sich aus der Modellrechnung ergibt und wie sie aus der Analyse der Feldmessungen an den sieben Einzelstationen gewonnen wurde. Noch deutlicher werden die Einzelheiten dieser Anomalie - eine durch die norddeutsche Leitfähigkeitsanomalie verursachter Anstieg von Norden nach Süden und zwei überlagerte, dem Harznord- und Südrand zuzuschreibene 'Buckel' - in der Darstellung für drei Perioden in Abb. 8. Es sei noch bemerkt, daß dieses Modell das immerhin einen Leitfähigkeitssprung in 50 km Tiefe fordert, auch von Impedanzen und magnetischen Übertragungsfunktionen mit Perioden bis 4h gestützt wird.

In Abb. 9 schließlich wird die Anomalie der magnetischen Horizontalkomponenten in einem rotierten Koordinatensystem gezeigt. Durch diese Rotation, auf die FLUCHE in diesem Band genauer eingeht, wird die dargestellte Übertragungsfunktion h_H maximiert. Die gefundenen Drehwinkel um 40° passen gut zum Streichen des Harznordrandes.

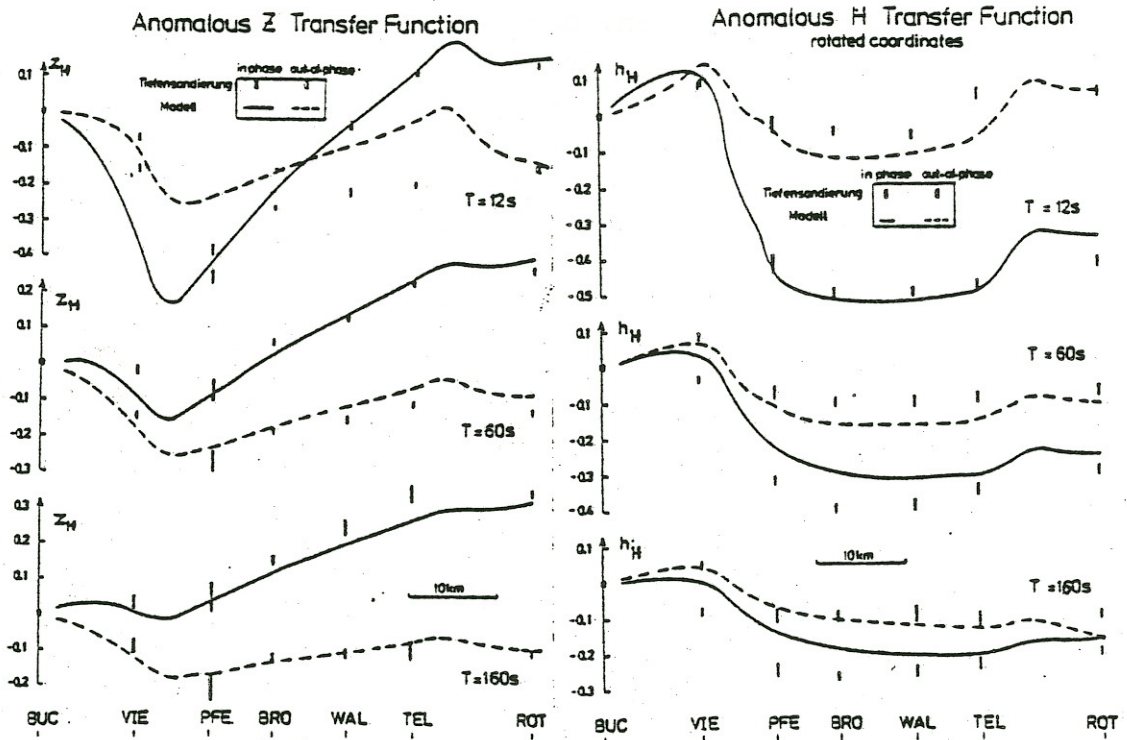


Abb. 8,9:

Durch Modellrechnung gewonnene Übertragungsfunktionen z_H bzw. h_H . Aus der Analyse gewonnene Daten mit Vertrauensbereichen für 68% Wahrscheinlichkeit.

Es ist nicht verwunderlich, daß der glatte Verlauf der gemessenen magnetischen Übertragungsfunktion durch ebenso glatt aussehende Modell-Übertragungsfunktionen angepaßt wird. Mit Daten von nur sieben Stationen wäre eine feinere Unterteilung des zweidimensionalen Modells nicht zulässig. Glatt ist deshalb auch der Verlauf der vom Modell erzeugten Übertragungsfunktion $C_y = z_{xy}/i\omega$ als Darstellung der zur E-Polarisation gehörenden Impedanz. In Abb. 10 ist sie gemeinsam mit den vergleichbaren gemessenen Impedanzen eingetragen.

Diese Impedanzen, deren Auswahl für jede Einzelstation der großen Anisotropien wegen bereits eine erste räumliche Glättung darstellte, haben die Widerstandsverteilung des zweidimensionalen Modells hauptsächlich bestimmt.

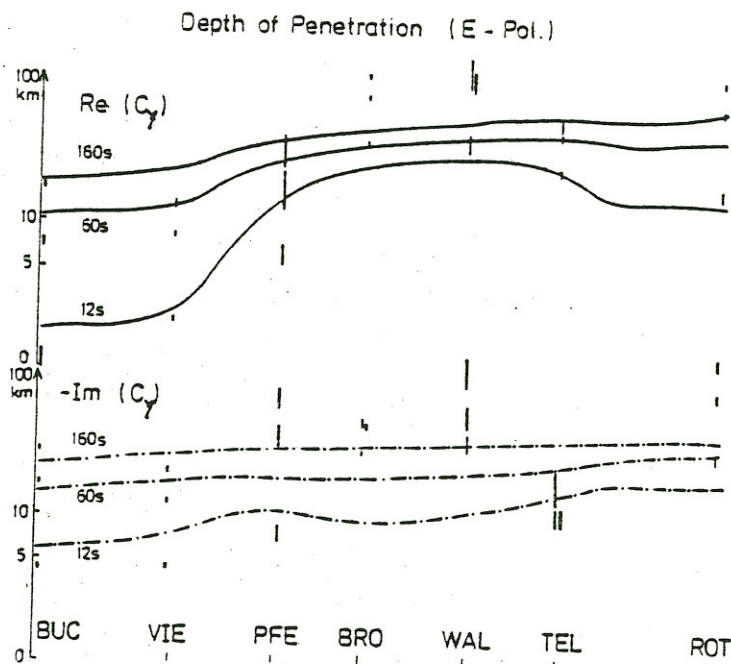


Abb. 10:

Induktive Skalenlängen der E-Polarisation für drei Perioden. Aus der Analyse gewonnene Daten in rotierten Koordinaten mit Vertrauensbereichen.

Die dennoch vorhandenen Abweichungen sind frequenzunabhängig und auf lokale Gleichstromanomalien zurückzuführen, die zu klein sind, um durch ein alle Stationen einschließendes zweidimensionales Modell interpretiert zu werden.

4. Verzerrungen des tellurischen Feldes durch oberflächennahe Einlagerungen

Um den Einfluß lokaler Effekte abzuschätzen, sind magnetotellurische Sondierungen mit geringem Stationsabstand in der Umgebung der Station PFE durchgeführt worden. Abb. 11 zeigt die tellurischen Vektoren von drei nur jeweils 500 m auseinanderliegenden Stationen PF1, PF2 und PF3.

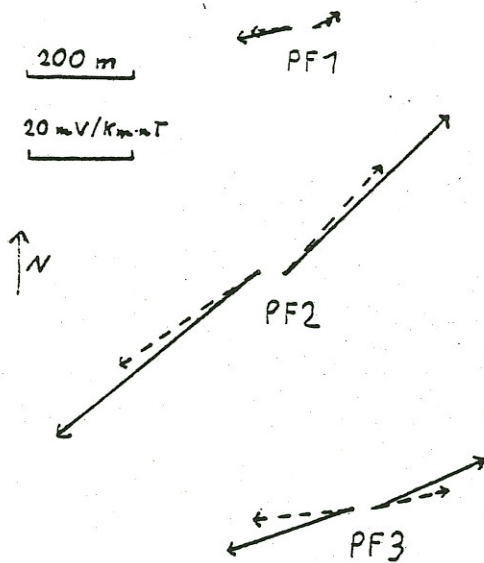


Abb. 11:
Tellurische Vektoren eng benachbarter Stationen. $T = 12s$

—————→ $Re \underline{e}_x, Re \underline{e}_y$
- - - - -→ $Im \underline{e}_x, Im \underline{e}_y$

Ihre großen Unterschiede in Betrag und Richtung weisen auf kleinräumige Verzerrungen hin. Dafür sprechen auch die folgenden Ergebnisse:

- 1) Die gefundenen hohen Anisotropien sind nahezu reell und frequenzunabhängig.
- 2) Die Ergebnisse einer Geoelektrik-Sondierung bei PF2 weisen auf die Existenz einer an dieser Stelle 10 m starken, gutleitenden ($180 \Omega m$) Deckschicht hin, darunter liegt Gabbro (über $2000 \Omega m$).
- 3) Offenbar gibt es auch vertikale Verzerrungen. Bei PF2 sind zwei Sonden übereinander mit genau 1 m Abstand eingegraben worden. Mit den rauscharmen HEMPFLING-Sonden gelang trotz des kurzen Elektrodenabstandes die Aufzeichnung vertikaler tellurischer Pulsationen.

Scheinbare vertikale elektrische Variationen hat bereits FORBUSH (1933) bei Messungen in einem 46 m tiefen trockenen Brunnen bei Huancayo gefunden und als Effekt von oberflächennahen Widerstandsänderungen gedeutet.

Anscheinend sehen wir in den starken Unterschieden zwischen den Impedanztensoren eng benachbarter Stationen Undulationen der Stärke einer gut leitenden Deckschicht.

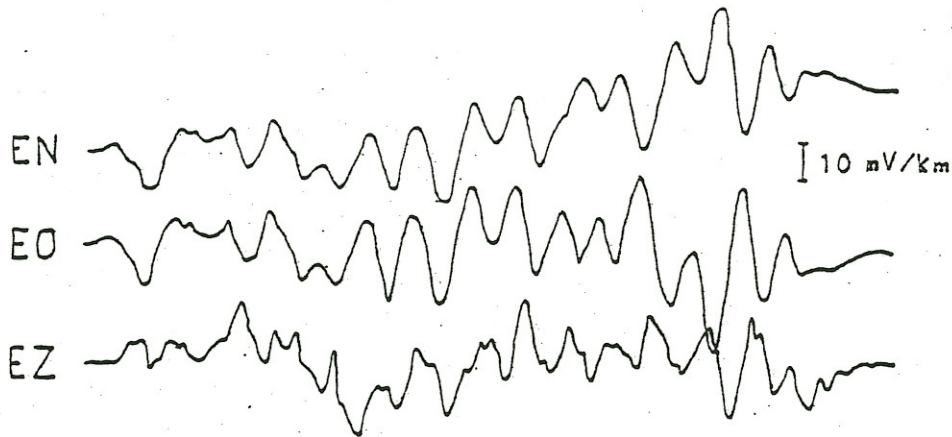


Abb. 12:

Horizontale (EN, EO) und vertikale (EZ) tellurische Pulsationen

Weil sich diese nur mit sehr vielen Geoelektrik-Messungen kartieren lassen, sollte die Verzerrung an jeder Einzelstation ohne weitere Vorkenntnisse nach folgendem Ansatz eliminiert werden:

\underline{Z} sei der unverzerrte, aber von einer großräumigen lateralen Leitfähigkeitsänderung - ich habe wieder an den Harznordrand gedacht - beeinflusste Impedanztensor, der mit den Drehmatrizen $\underline{T}_\alpha, \underline{T}_\alpha^T$ in das durch die Streichrichtung einer lokalen Anomalie gegebene Koordinatensystem überführt wird. Hier wird vereinfacht angenommen, daß die Verzerrung einfach eine Verstärkung des Feldes in einer Richtung ist. Die Verzerrungsmatrix hat die Form

$$\underline{A} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \alpha \end{pmatrix}$$

Nach einer weiteren Koordinatentransformation ($\underline{T}_\beta, \underline{T}_\beta^T$) sehen wir den verzerrten Impedanztensor \underline{Z}' in dem durch die Sondenauslagen gegebenen Koordinatensystem:

$$\underline{Z}' = \underline{T}_\beta^T \underline{A} \underline{T}_\alpha^T \underline{Z} \underline{T}_\alpha \underline{T}_\beta$$

Umgekehrt läßt sich der von oberflächennahen Verzerrungen befreite Impedanztensor

$$\underline{Z} = \underline{T}_\alpha \underline{A}^{-1} \underline{T}_\beta \underline{Z}' \underline{T}_\beta^T \underline{T}_\alpha^T$$

gewinnen. Mit der ersten Rotation um den Winkel β nach Swifts Kriterium wird hier nur die Orientierung der lokalen Anomalie gefunden. Der Verzerrungsfaktor α ist nun so zu bestimmen, daß für eng benachbarte Stationen ähnliche entzerrte Impedanztensoren gefunden werden, die sich durch ein gemeinsames Modell interpretieren lassen. Weil durch die Matrix \underline{A} die Determinante des

Impedanztensor verändert wird, läßt sich nach Swifts Kriterium wieder ein Drehwinkel α finden. Unter der Voraussetzung, daß alle Kabelauslagen gleich orientiert sind, sollte die von benachbarten Stationen bestimmte resultierende Richtung $\alpha+\beta$ der großen Anomalie die gleiche sein. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die Güte dieser Entzerrung. Mit Z ist die einmal rotierte und mit Z' die rotierte, entzerrte und wieder rotierte Impedanz [$\text{mV}/\text{km}\cdot\text{nT}$] für $T=20\text{s}$ bezeichnet.

Station	β	Z_{xy}	Z_{yx}	a	Z'_{xy}	Z'_{yx}	α	$\alpha+\beta$
PF1	67°	9.5 +i7.1	-1.1 -i1.2	5.0	2.1 +i1.8	-0.9 -i1.1	-28°	39°
PF2	48°	49.7 +i37.5	-2.9 -i2.7	9.0	5.1 +i4.8	-3.3 -i2.1	-17°	31°
PF3	62°	24.7 +i22.0	-2.4 -i0.6	5.0	6.0 +i4.8	-1.3 -i0.2	-24°	38°

Mit $31^\circ-39^\circ$ ist etwa der Winkel zwischen der Streichrichtung des Harznordrandes und der Ostrichtung gefunden worden. Weil nur die maximale Impedanz Z_{xy} (senkrecht zum Streichen) durch die Verzerrung wesentlich geändert wird, sollte für eine Auswertung in erster Näherung die minimale Impedanz herangezogen werden.

5. Schluß

Durch den Harznordrand als Sprung der elektrischen Leitfähigkeit in oberflächennahen wie auch in tiefen Schichten der Erdkruste sind großräumige Anomalien der Vertikal- und Horizontalkomponente erdmagnetischer Pulsationen und Baystörungen erklärt worden. Dabei werden Einlagerungen abweichender Leitfähigkeit mit Ausdehnungen von wenigen km nicht mehr aufgelöst. Daß solche lokalen Strukturen aber dennoch - zumindest an der Oberfläche - vorhanden sein müssen, zeigen die sprunghaften Änderungen des tellurischen Feldes von Station zu Station.

Hier liegt ein gutes Beispiel dafür vor, daß die Ergebnisse von Magnetotellurik und erdmagnetischer Tiefensondierung sich gegenseitig stützen können. Die Tiefensondierung findet Leitfähigkeitsanomalien im Sinne von Abweichungen von der Widerstandsverteilung einer Basisstation, die wiederum mit der Magnetotellurik bestimmt werden kann. Wird Magnetotellurik allein betrieben, fällt unter Umständen die Trennung von räum-

lichen Unterschieden des elektrischen Feldes in groß- und kleinräumige Anteile schwer. Die gleichzeitige Anwendung beider Verfahren läßt die Möglichkeit zu, das elektrische Feld einer weiträumigen Anomalie mit Modellrechnung vorherzusagen und so die gemessene Impedanz zu korrigieren.

Literatur

Bahr, K.: Erdmagnetische und magnetotellurische Messungen am Harznordrand und ihre Deutung durch ein zweidimensionales Leitfähigkeitsmodell. Diplomarbeit Institut für Geophysik, Universität Göttingen, 1981.

Forbush, S.E.: Apparent Vertical Earth-current Variations at the Huaracayo Magnetic Observatory. Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity 38, 1-12, 1933.

Schmucker, U.: Neue Rechenmethoden zur Tiefensondierung. Protokoll Erdmagnetische Tiefenforschung, Rothenberge/Westfalen, 1-31, 1971.

Schmucker, U.: Auswertungsverfahren Göttingen, Protokoll Elektromagnetische Tiefenforschung, 163-186, 1978.

Schmucker, U. und U. Wiens: Vergleichende Elektrische Beobachtungen in der Umgebung von Göttingen für Sq und Bays, Protokoll Elektromagnetische Tiefenforschung, Berlin Lichtenrade, 291-307, 1980.

Weidelt, P.: Entwicklung und Erprobung eines Verfahren zur Inversion zweidimensionaler Leitfähigkeitsstrukturen in E-Polarisation. Hab. Math.-Nat. Fak. Universität Göttingen, 1978.