

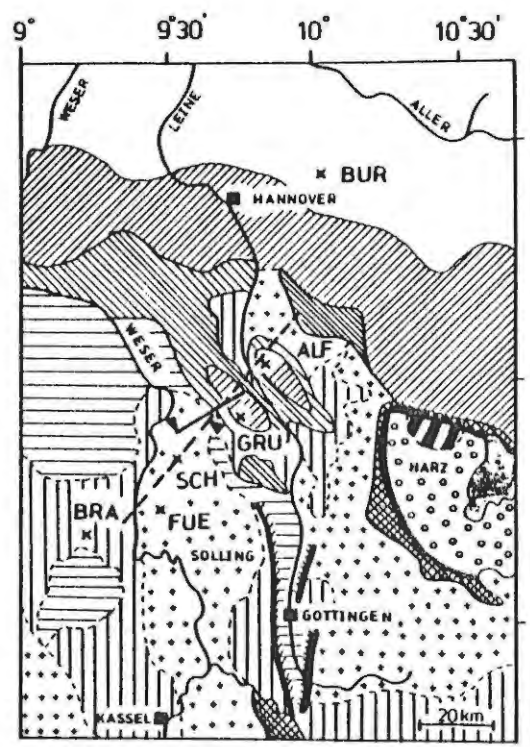
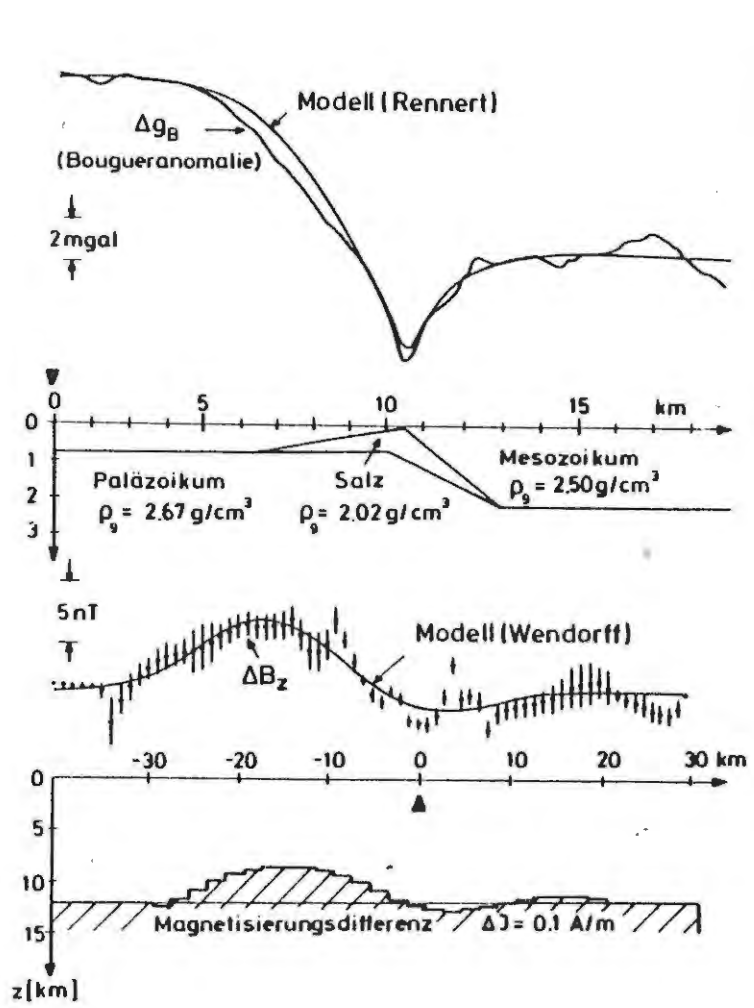
B. Siemon

"Mit MT & ETS auf einem Profil vom Solling bis nach Hannover"

1) Meßgebiet

Die Wahl des Meßprofils von Burgdorf (BUR) bei Hannover nach Brakel (BRA) westlich des Sollings geht auf vorhergehende Messungen der Schwere und des statischen Magnetfeldes zurück. Im Rahmen zweier Diplomarbeiten am Institut für Geophysik der Univ. Göttingen wurden von RENNERT (1982) und WENDORFF (1984) Profile vermessen, die etwa senkrecht zum herzynischen Streichen stehen, also NO-SW-wärts verlaufen. Beide Autoren stellten einen Niveau-Unterschied in ihrer Meßgröße auf beiden Seiten der NW-SO-wärts verlaufenden Elfas-Achse fest. Während RENNERT das niedrigere Niveau der BOUGUER-Schwere im Hils durch einen Staffelbruch im Paläozoikum parallel zur Elfas-Achse mit nordöstlich hiervon mächtigeren mesozoischen Sedimenten deutet, nimmt WENDORFF eine Aufwölbung des Kristallinen Grundgebirges unterhalb des Sollings zur Interpretation des höheren Niveaus der Vertikalintensität südöstlich der Elfas-Achse an. Zwangsläufig stellt sich die Frage, ob diese Niveau-Unterschiede mit den Methoden der MT und ETS auch festgestellt werden können.

In zwei Meßkampagnen im Frühjahr und Herbst 1984 wurden 6 MT-Stationen betrieben, von denen eine (BUR) in beiden Kampagnen registrierte, so daß diese als Bezugsstation gewählt wurde. Die Registrierung der Magnetfelder wurde durch WATERMANN-Induktionsspulenmagnetometer und die der tellurischen Felder durch HEMPFLING-Sonden realisiert und auf eine Kassettenaufzeichnungsapparatur aufgezeichnet. Die Auswertung der Zeitreihen fanden im Bereich von  $T=12 - 667s$ , also im Periodenbereich der Pulsationen statt. Das hierbei verwendete Verfahren ist bei SCHMUCKER (1978) beschrieben.



- Stationen:
- BUR (Burgdorf)
  - ALF (Alfeld)
  - GRU (Grünenplan)
  - SCH (Schießhaus)
  - FUE (Fürstenberg)
  - BRA (Brakel)

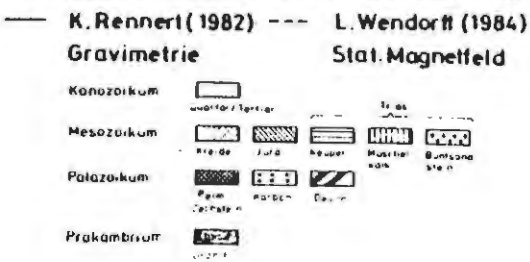


Abb.1: Geologische Karte des Meßgebietes mit eigenen Stationen (x) und Profilverlauf von RENNERT und WENDORFF sowie deren Ergebnisse.

## 2) Ergebnisse der MT

Durch eine geeignete Koordinatentransformation läßt sich der Impedanztensor  $\underline{Z}$

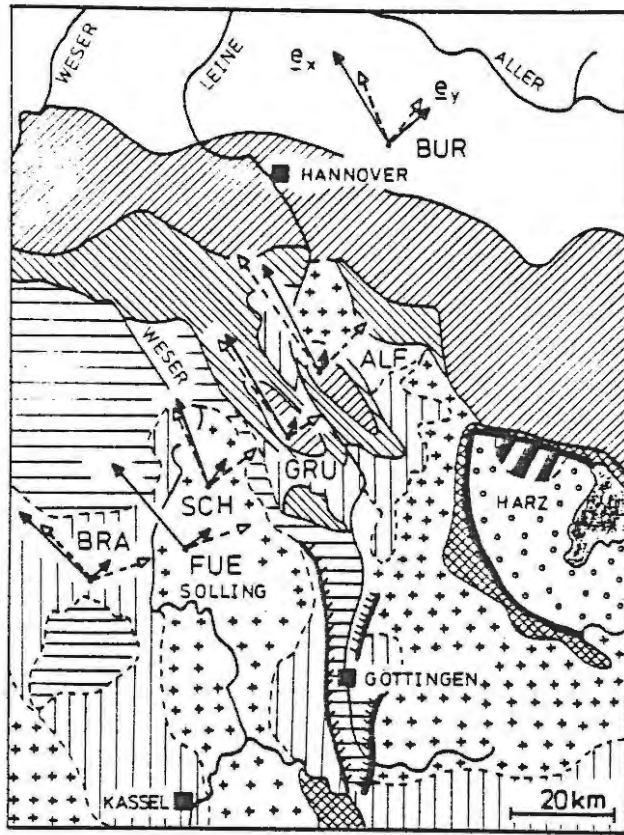
$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix}}_{\underline{Z}} \cdot \begin{pmatrix} H \\ D \end{pmatrix}$$

oft auf eine einfache Form bringen (Hauptdiagonalkomponenten verschwinden). Dazu werden zunächst für jede Station die Vorzugsrichtungen des tellurischen Feldes nach dem SWIFT-Kriterium bestimmt. Bei den vorliegenden Daten ergeben sich recht einheitliche Drehwinkel um  $\phi = 55^\circ$  von N nach O. Die Streichrichtung wird so festgelegt, daß sie in etwa mit dem Streichen der geologischen Strukturen zusammenfällt, also von NW nach SO verläuft.

Eine anschauliche Darstellung der Impedanzen gelingt durch die tellurischen Vektoren. Über den gesamten Periodenbereich sehen sie sich recht ähnlich. Für eine mittlere Periode ( $T=100s$ ) sind sie in Abb.2 graphisch dargestellt. Die tellurischen Vektoren  $\underline{e}_x$  ( $\underline{e}_y$ ) aller Stationen zeigen recht einheitlich parallel (senkrecht) zur Streichrichtung nach NW (NO), so daß sich eine zweidimensionale Interpretation des Meßgebiets anbietet. Die E-Polarisation kann demnach durch  $Z_{y'x'}$  und die B-Polarisation durch  $Z_{x'y'}$  dargestellt werden.

Die Sollingstationen SCH und FUE heben sich in den Amplituden des tellurischen Feldes von den anderen Stationen ab. So sind die Vektoren  $\underline{e}_x$  im Solling etwa zweimal größer als bei der Station BRA und etwa fünfmal größer als bei den drei nördlichen Stationen. Eine mögliche Erklärung hierfür wird weiter unten geliefert.

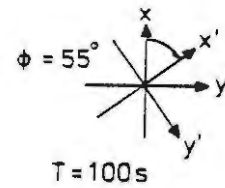




Tellurische Vektoren  
in rotierten Koordinaten

$$\underline{e}_x = Z_{xx} \hat{x} + Z_{yx} \hat{y}$$

$$\underline{e}_y = Z_{xy} \hat{x} + Z_{yy} \hat{y}$$

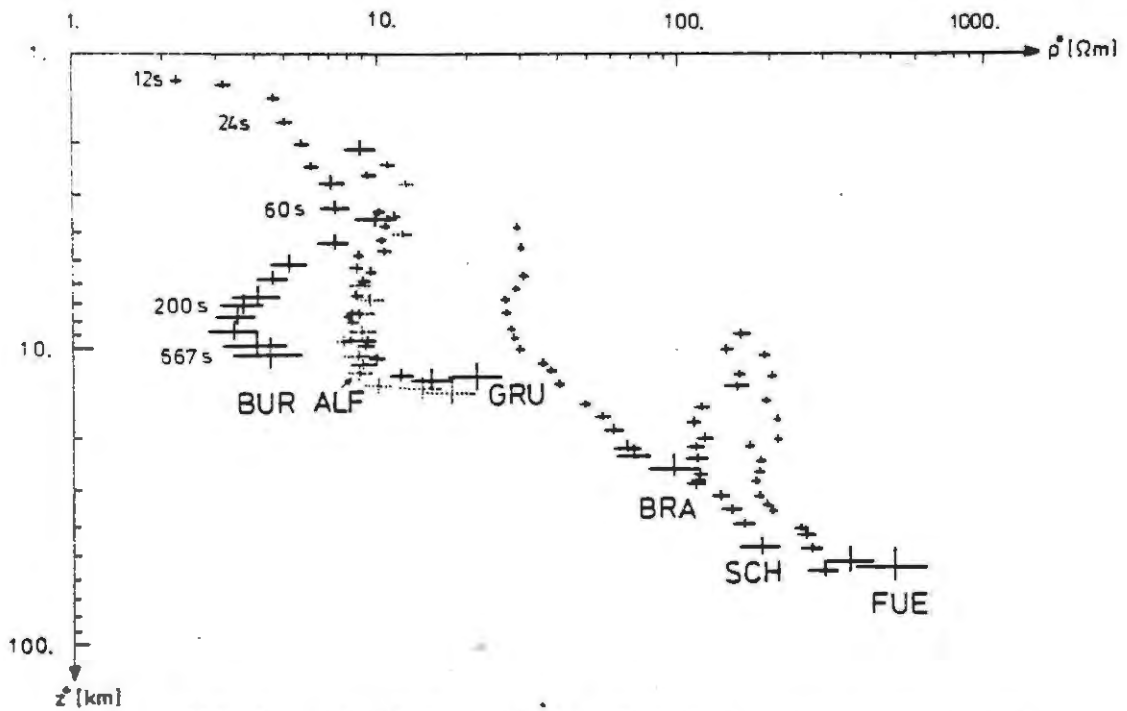


1.0 mV/nT.km →

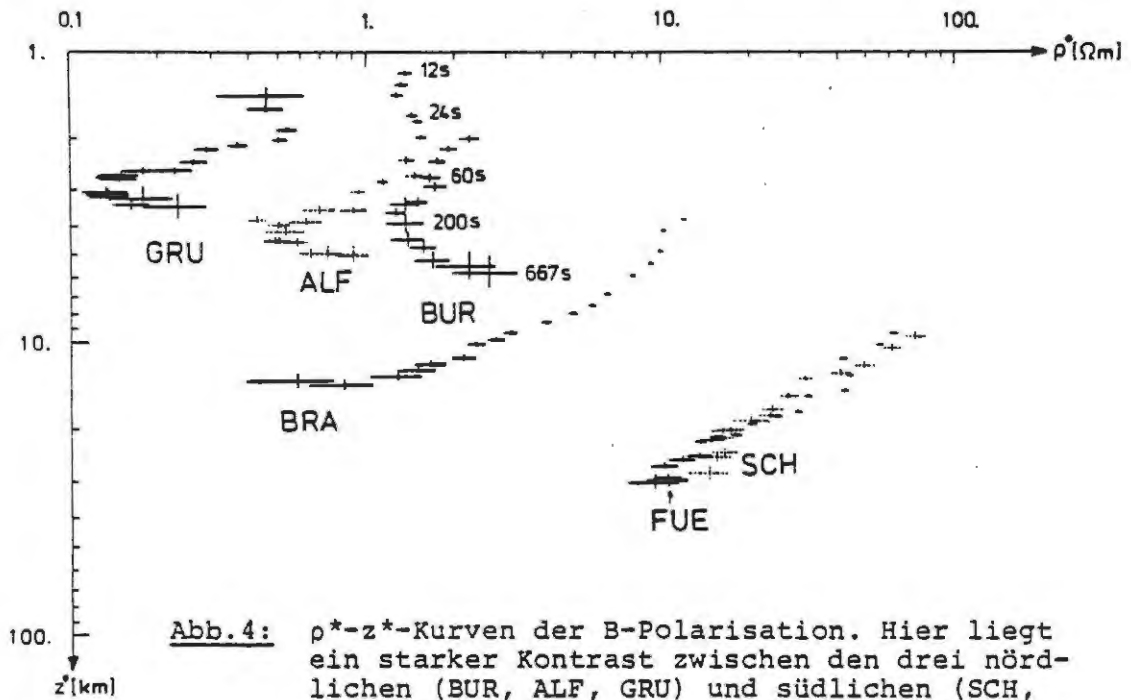
SCH } 5 fach verkleinert  
 FUE }  
 BRA 2.5 fach ..  
 → Re    - - - → Im

**Abb.2:** In einem um  $\phi = 55^\circ$  rotierten Koordinatensystem (Kennzeichnung  $x', y'$ ) nehmen die tellurischen Vektoren sehr ähnliche Richtungen ein und stehen nahezu senkrecht aufeinander.

Einen ersten Aufschluß über die vertikale Widerstandsverteilung erhält man durch die Transformationen der tellurischen Impedanz in scheinbare Widerstandsfunktionen. Das  $\rho^*-z^*$ -Verfahren von SCHMUCKER (1970) liefert für die vorliegenden Daten folgende Ergebnisse.



**Abb. 3:**  $\rho^*$ - $z^*$ -Kurven der E-Polarisation. Deutlich sichtbar ist ein Widerstandsminimum in 6-10 km Tiefe (bei SCH und FUE erscheint es tiefer).



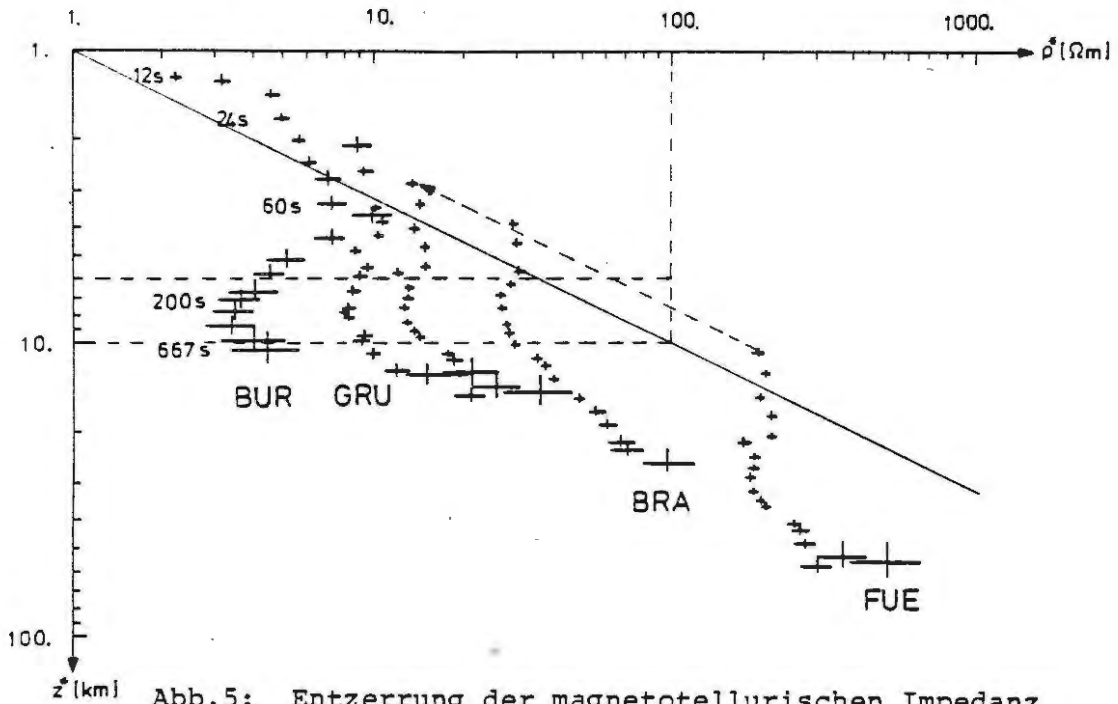
**Abb. 4:**  $\rho^*$ - $z^*$ -Kurven der B-Polarisation. Hier liegt ein starker Kontrast zwischen den drei nördlichen (BUR, ALF, GRU) und südlichen (SCH, FUE, BRA) Stationen vor. Die in der Mitte des Profils benachbarten Stationen (GRU und SCH) liegen in dieser Darstellung extrem weit auseinander.

Die  $\rho^*-z^*$ -Kurven der E-Polarisation (Abb.3) zeigen in ihrer vertikalen Richtung für alle Stationen eine ähnliche Struktur, die eine gut-schlecht-gut-schlecht-leitende Schichtenfolge vermuten läßt. Die Kurven deuten auf ein Minimum des spezifischen Widerstandes in ca. 6-10 km Tiefe und ein Ansteigen des spezifischen Widerstandes von NO nach SW hin. Die beiden Sollingstationen unterscheiden sich von den anderen sowohl in der Lage des Widerstandsminimums als auch in der Höhe des scheinbaren Widerstandes. Für die B-Polarisation lassen sich die  $\rho^*-z^*$ -Kurven in zwei Gruppen unterteilen. Die drei nördlichen Stationen BUR, ALF und GRU weisen wieder deutlich auf ein Widerstandsminimum hin, allerdings in 3-4 km Tiefe. Bei den drei südlichen Stationen SCH, FUE und BRA geht die vertikale Strukturierung nahezu verloren. Der scheinbare Widerstand nimmt mit zunehmender Tiefe stark ab. Auch hier heben sich die beiden Sollingstationen stark von den übrigen ab.

Die Sonderstellung der Sollingstationen ist nur in den Amplituden nicht aber in den Phasen der magnetotellurischen Impedanz zu sehen. Dies deutet darauf hin, daß eine Gleichstromverzerrung des tellurischen Feldes anzunehmen ist. Die Entzerrung wird über eine Parallelverschiebung der  $\rho^*-z^*$ -Kurven des Sollings durchgeführt. Dies ist möglich, da  $\rho^* \sim \rho_a$  und  $z^* \sim \sqrt{\rho_a}$  ( $\rho_a = \text{CAGNIARD-Widerstand}$ ) ist. Vorausgesetzt wird an dieser Stelle, daß nur die Sollingstationen durch oberflächennahe laterale Leitfähigkeitskontraste verzerrt sind und daß der gute Leiter, der von diesen Leitfähigkeitskontrasten mindestens durch eine schlecht-leitende Zwischenschicht getrennt ist, im Meßgebiet in der gleichen Tiefe liegt.

Dieses Verfahren, das in Abb.5 skizziert ist, liefert für die  $Z_{y,x}$ -Komponente Verzerrungsfaktoren von 3.0 für die Station SCH und 3.7 für die Station FUE. Für die B-Polarisation ist eine Entzerrung seiner Art nicht möglich.

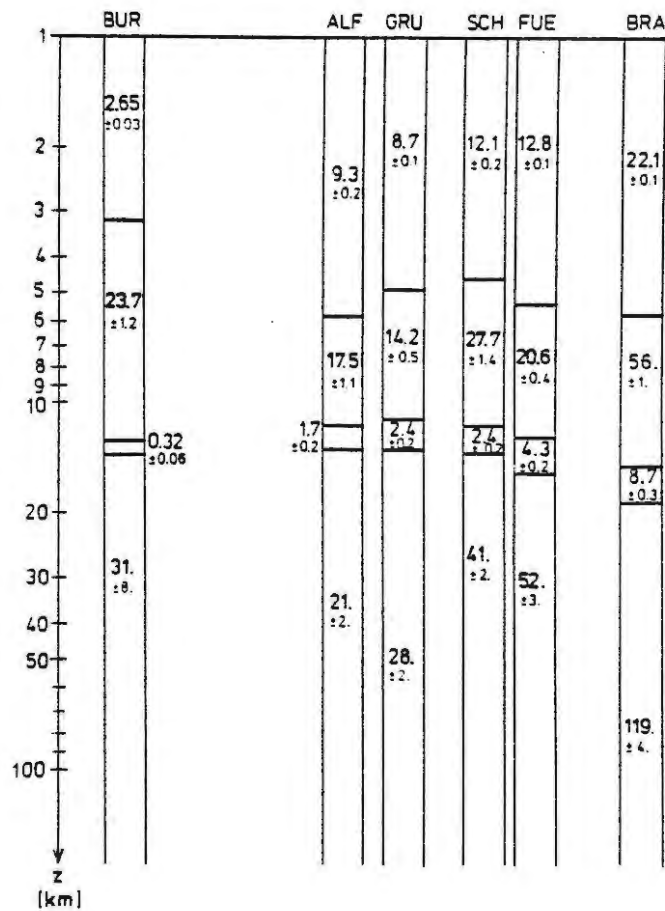




**Abb.5:** Entzerrung der magnetotellurischen Impedanz der E-Polarisation anhand der  $\rho^*$ - $z^*$ -Kurven am Beispiel der Station FUE. Die Verschiebung im  $\rho^*$ - $z^*$ -Diagramm entlang der eingezeichneten Geraden bewirkt nur eine Änderung der Amplitude.

Die 1-D-Inversionsmodelle aller Stationen, die mit dem  $\psi$ -Algorithmus (SCHMUCKER, 1974) für die entzerrten Impedanzen berechnet worden sind, bestätigen die Ergebnisse des  $\rho^*$ - $z^*$ -Verfahrens. Es bietet sich ein Vierschichtfall an, dessen beiden oberen Schichten etwa 6 km (außer bei BUR) mächtig sind. Die dritte Schicht stellt einen sehr guten Leiter in etwa 12-15 km Tiefe dar.

Ausgehend von den 1-D-Inversionsmodellen ist ein 2-D-Modell für die MT-Daten berechnet worden, bei dem die Schichtmächtigkeiten der oberen drei Schichten fest vorgegeben wurden. Die übrigen Schichtmächtigkeiten und die Schichtwiderstände sind derart variiert worden, daß sich eine bestmögliche Anpassung an die Daten ergeben hat. Dabei ergibt sich die untere Begrenzung der inhomogenen Schichtung aus numerischen Gründen. Die Schichtenfolge der homogenen Schichtung



**Abb.6:** 1-D-Inversionsmodelle für die entzerrten Impedanzen der E-Polarisation. Deutlich hebt sich ein guter Leiter in 12-15 km Tiefe hervor.

muß gefordert werden, um die Phasen wiedergeben zu können. Die Anpassung für Amplitude und Phase der magnetotellurischen Impedanz  $Z_{y,x}$ , ist zumindest für die mittleren Stationen des Profils gut gelungen. Bei den Randstationen BUR und BRA ergeben sich geringfügige Abweichungen (vgl. Abb.8).



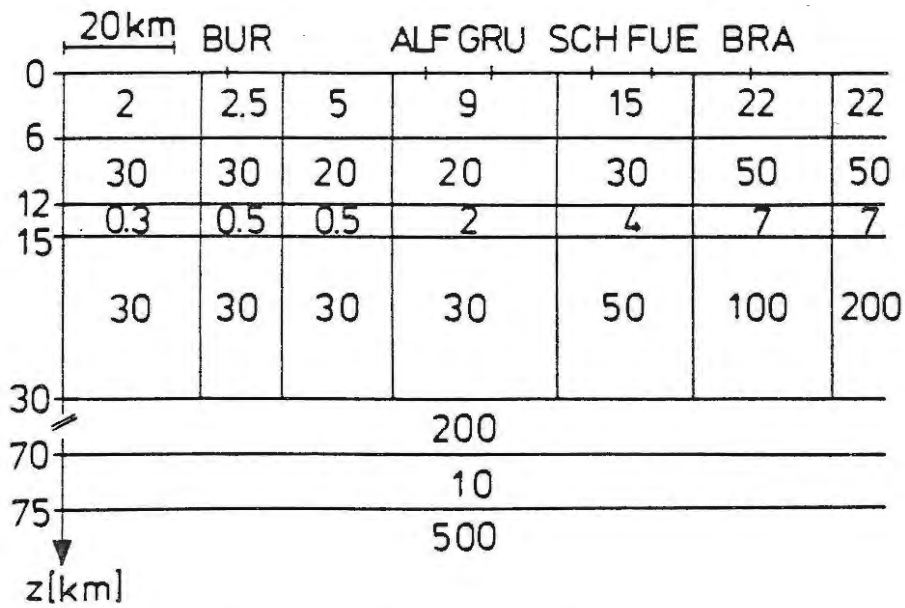


Abb.7: 2-D-Modell für die MT (Profilrichtung: NO-SW).

### 3) Ergebnisse der ETS

Die MT-Daten können durch ein 2-D-Modell gut interpretiert werden. Ist dies auch für die ETS-Daten möglich? Die ETS beschreibt ein Verfahren, bei dem magnetische Vertikal- oder Horizontalkomponenten auf ein Normalfeld (horizontales Magnetfeld der Bezugsstationen) bezogen werden:

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

$$H_a = H - H_n$$

$$D_a = D - D_n$$

$$z = \begin{pmatrix} z_H^l & z_D^l \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} H \\ D \end{pmatrix}$$

$$l = \text{lokal}$$

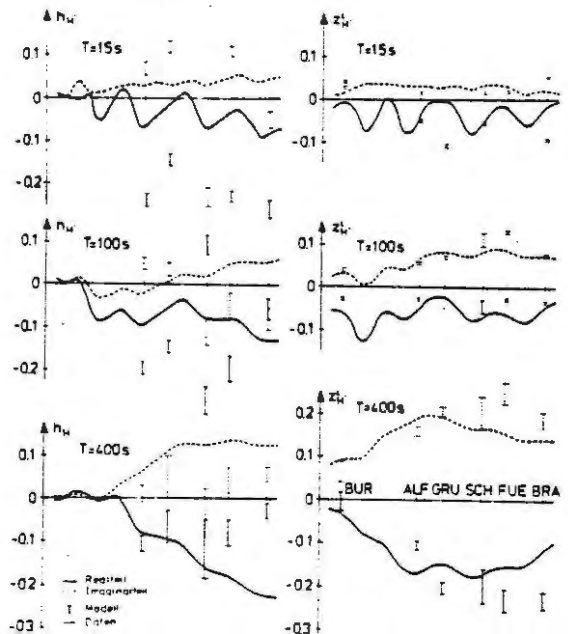


Abb.9: Vergleich der magnetischen Übertragungsfunktionen mit denen die sich aus dem MT-Modell ergeben.

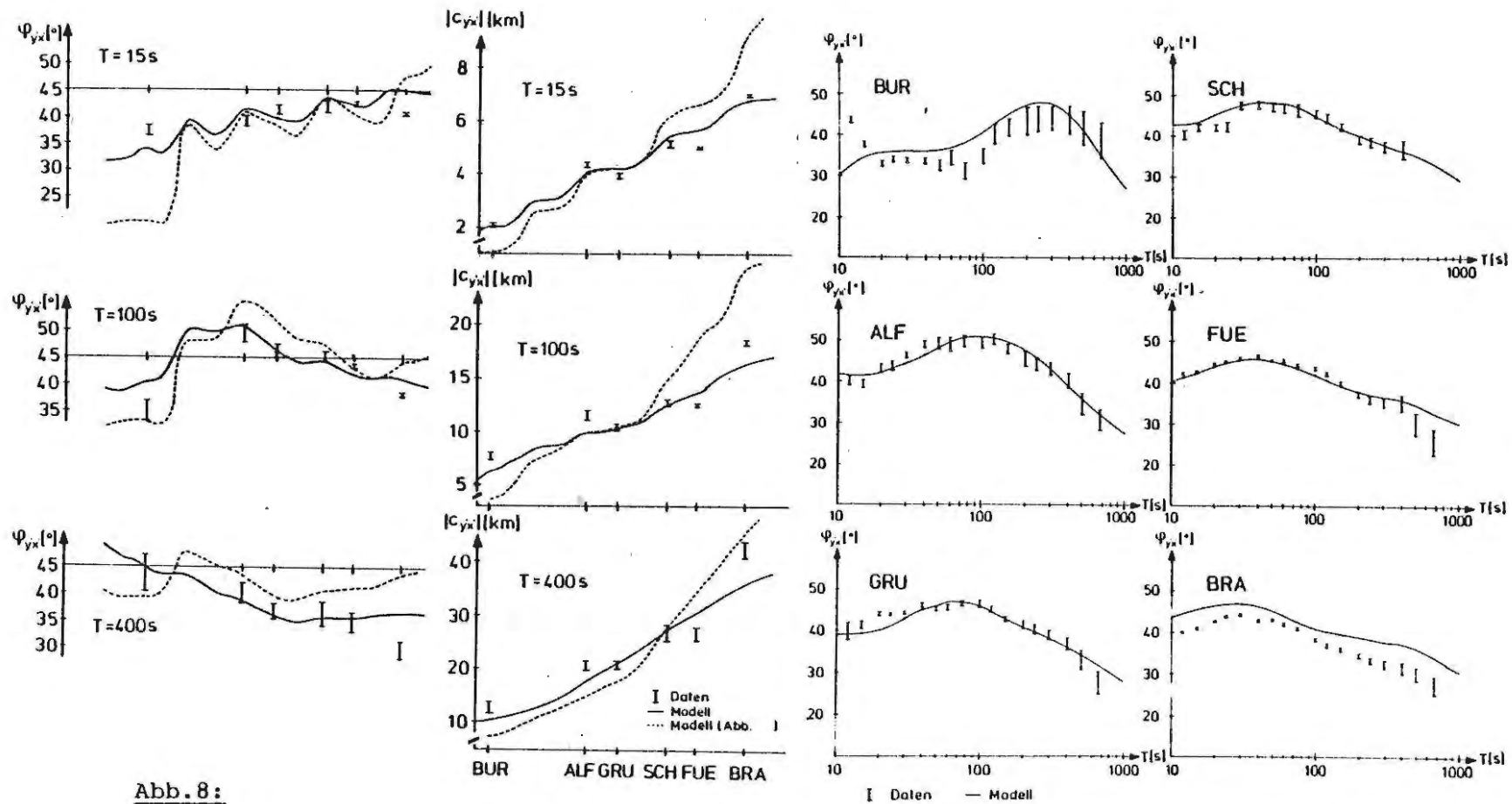
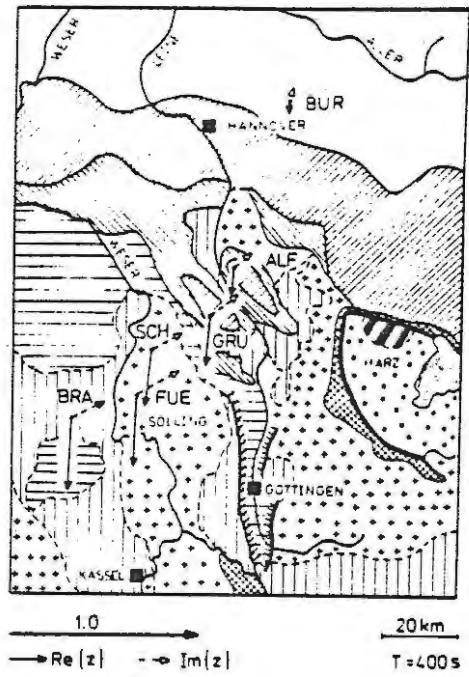
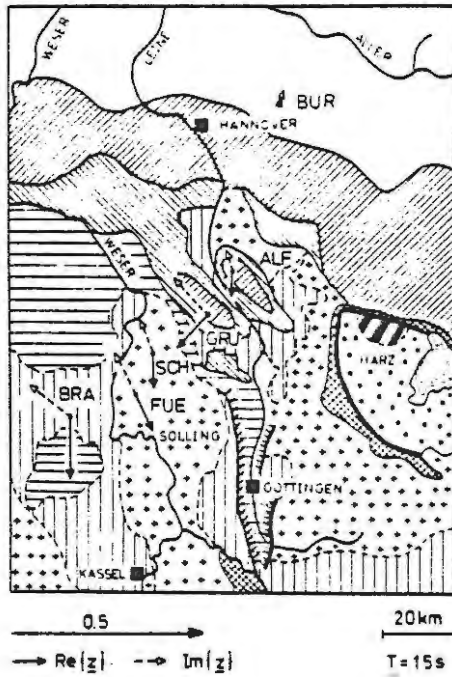
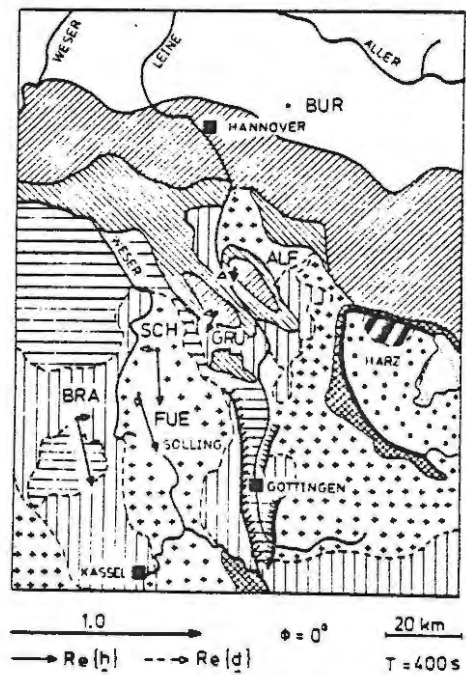
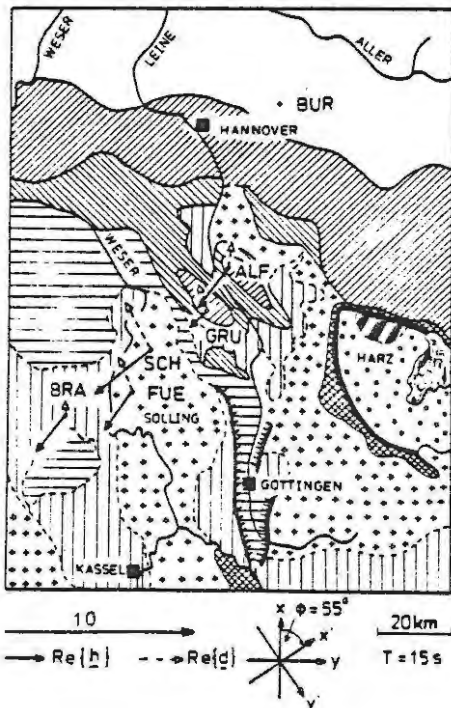


Abb. 8:

Vergleich von Modell- und Meßdaten der magnetotellurischen Impedanz. In der linken Bildhälfte sind die Phasen  $\varphi_{y'x'}$  und die Amplituden  $|C_{y'x'}|$  als Funktion des Ortes und in der rechten Bildhälfte ist  $\varphi_{y'x'}$  als Funktion der Periode aufgetragen. Die gestrichelte Linie stellt die Impedanz dar, die sich aus dem ETS-Modell berechnet. (Abb.11).



Induktionspfeile :  $\underline{z} = z_u \cdot \hat{x} + z_v \cdot \hat{y}$



Perturbationspfeile :  $\underline{h} = h_u \cdot \hat{x} + h_v \cdot \hat{y}$   
 $\underline{d} = d_u \cdot \hat{x} + d_v \cdot \hat{y}$

Abb.10: Induktions- und Perturbationspfeile am Beispiel zweier Perioden (T = 15s und T = 400s).



Die Bezugsstation für die Horizontalkomponente ist die nördlichste Station BUR. Sie wurde ausgewählt, da bei ihr die Z-Komponente sehr klein ist. Das vertikale Magnetfeld wird auf das Horizontalfeld der gleichen Station bezogen.

Für das 2-D-Modell der MT sind die Übertragungsfunktionen  $h_H$  und  $z_H$  berechnet worden. Ein Vergleich mit den Daten  $h_H$  und  $z_H$  zeigt, daß die Übereinstimmung teilweise sehr schlecht ist (vgl. Abb.9). Es muß daher angenommen werden, daß das MT-Modell die Daten der ETS nicht erklären kann, daß also die angenommene einfache zweidimensionale Leitfähigkeitsstruktur des Meßgebietes die wirklichen Verhältnisse nicht befriedigend wiedergibt.

Die komplexen Übertragungsfunktionen lassen sich graphisch durch die rotationsinvarianten SCHMUCKER'schen Induktionspfeile darstellen. Zweidimensionale Leitfähigkeitsstrukturen können durch die Induktionspfeile offengelegt werden, da sie senkrecht zum Streichen dieser Strukturen stehen. Für die gegebenen Daten zeigen sie mehr oder weniger nach Süden. In Abb.10 sind sie für zwei Perioden in die geologische Karte eingezeichnet worden.

Die NW-SO-Streichrichtung der MT kann nicht bestätigt werden, allenfalls bei der Station GRU für  $T = 15s$ . Doch auch hier steht der Imaginärpfeil nicht senkrecht zu seiner Streichrichtung. Für lange Perioden, z.B. für  $T = 400s$  ergibt sich ein sehr einheitliches Bild, die reellen Pfeile zeigen nach Süden, die imaginären nach Nordosten. Es ist daher anzunehmen, daß zumindest für längere Perioden ( $T > 100s$ ) eine Leitfähigkeitsstruktur mit O-W-Streichrichtung vorliegt.

Die komplexen Übertragungsfunktionen des anomalen horizontalen Magnetfeldes werden durch die Perturbationspfeile  $\underline{h}$  und  $\underline{d}$  dargestellt. Liegt eine zweidimensionale Leitfähigkeitsstruktur vor, so läßt sich bei einer geeigneten Wahl des Koordinatensystems das anomale Magnetfeld durch einen Perturbationspfeil ( $\underline{h}$  oder  $\underline{d}$ ) beschreiben, dieser steht dann senkrecht zur Streichrichtung. Sowohl in dem um  $\phi = 55^\circ$  rotierten als auch in dem unrotierten Koordinatensystem bei kurzen

Perioden ( $T < 100s$ ) wird das anomale Magnetfeld durch beide Pfeile dargestellt. Nur für längere Perioden ist hier  $\underline{d}$  gegenüber  $\underline{h}$  zu vernachlässigen. Auch hier zeigt  $\underline{h}$  nach Süden, so daß eine O-W-Streichrichtung für längere Perioden angenommen werden kann.

An die Daten der ETS (unrotierte Übertragungsfunktionen  $h_H$  und  $z_H^l$ ) ist ein 2-D-Modell angepaßt worden, das die Realteile von  $h_H$  und  $z_H^l$  recht gut reproduziert. Die Imaginärteile und für  $T < 100s$  auch der Realteil von  $h_H$  lassen sich mit diesem Modell nicht befriedigend wiedergeben.

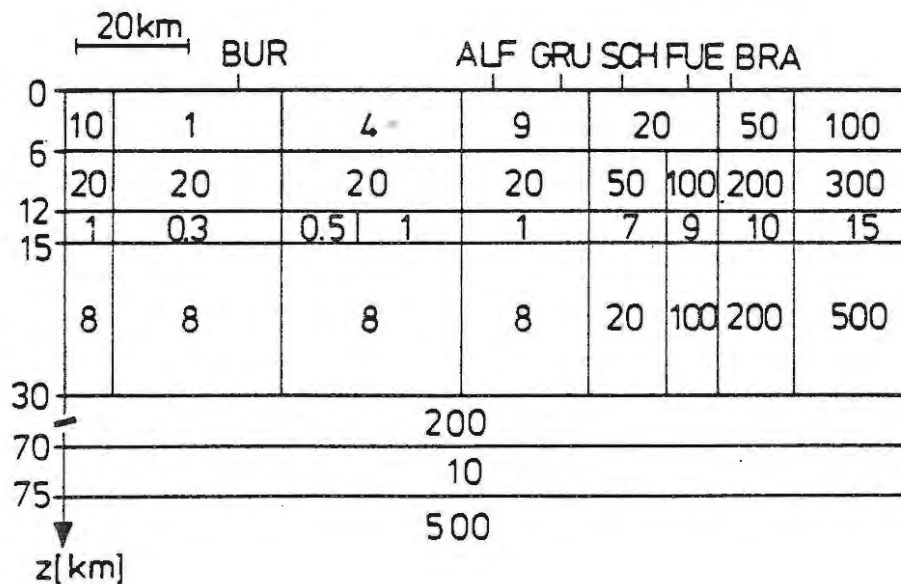


Abb.11: 2-D-Modell für die ETS (Profilrichtung: N-S).

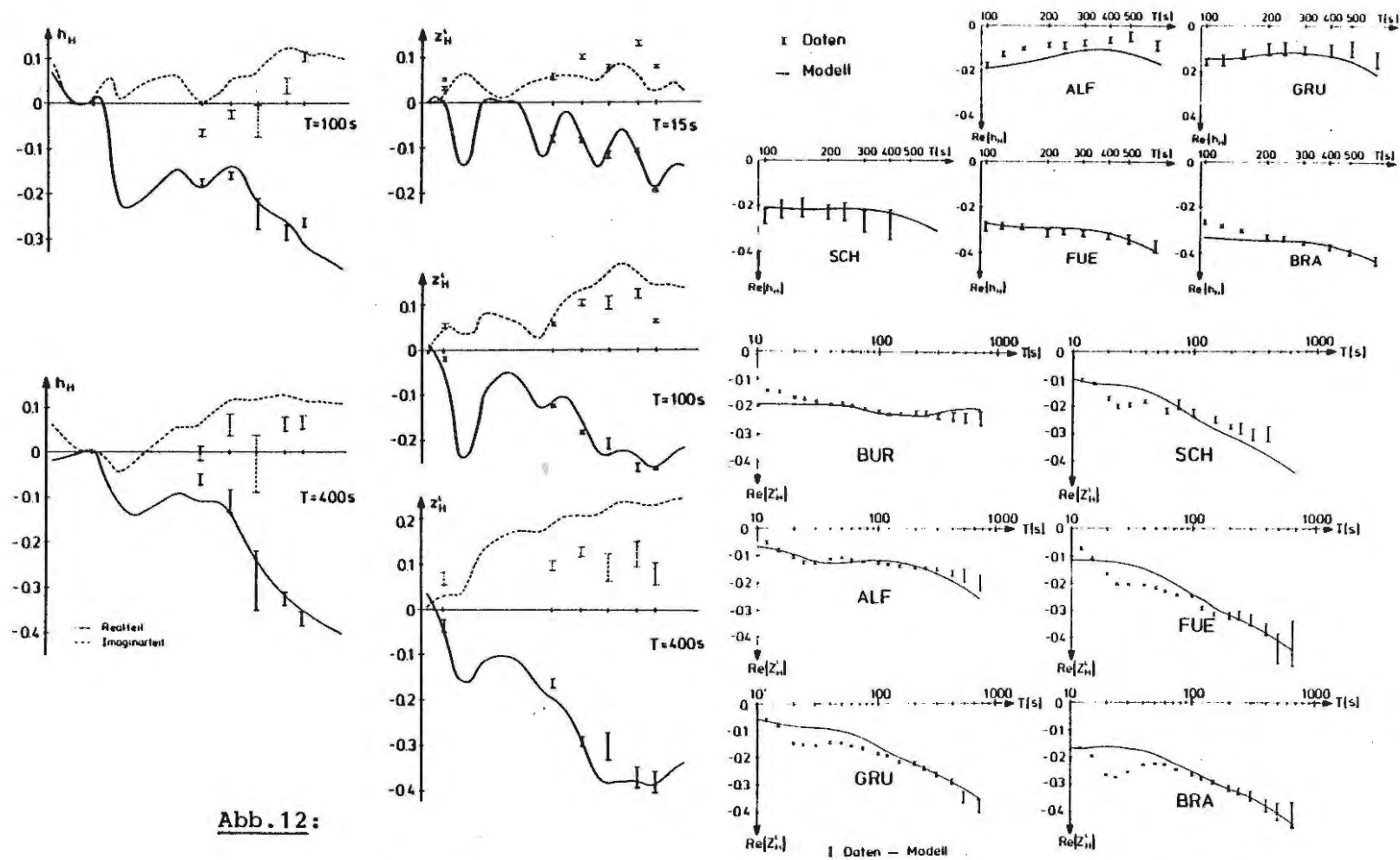


Abb. 12:

Vergleich der auf N-S-Profilrichtung projizierten unrotierten magnetischen Übertragungsfunktionen mit den Modelldaten. Links sind  $h_H$ ,  $z_H$  als Funktion des Ortes und rechts als Funktion der Periode aufgetragen.



#### 4) Zusammenfassung

Die Ergebnisse der MT erlauben es, das Meßgebiet als zweidimensional in einem um  $\phi = 55^\circ$  rotierten Koordinatensystem mit NW-SO-Streichrichtung anzusehen. Amplitude und Phase der magnetotellurischen Impedanz lassen sich durch ein 2-D-Modell im Periodenbereich  $12s \leq T \leq 667s$  gut reproduzieren. Dieses Modell erklärt die magnetischen Übertragungsfunktionen nicht befriedigend, so daß ein weiteres 2-D-Modell berechnet werden mußte. Das ETS-Modell kann die Realteile der unrotierten magnetischen Übertragungsfunktionen zumindest für den Periodenbereich  $100s \leq T \leq 667s$  erklären.

Es liegt also nahe eine Überlagerung zweier Anomalien für das Meßgebiet anzunehmen, eine oberflächennahe, die vor allem die tellurischen Felder beeinflusst (MT-Modell) und eine tiefer liegende, die sich für Perioden  $T \geq 100s$  in den magnetischen Feldern (ETS-Modell) widerspiegelt. Beide Modelle haben eine ähnliche Struktur, vier inhomogene Schichten mit - in der Regel - von Norden nach Süden zunehmenden spezifischen Widerständen und einen guten Leiter in 12 - 15 km Tiefe.

Ein Niveau-Unterschied auf beiden Seiten der Elfas-Achse im spezifischen Widerstand wird ebenso wie im Schwerfeld und statischen Magnetfeld beobachtet, jedoch sind weitere Niveau-Unterschiede an den Rändern des MT/ETS-Profiles teilweise noch größer. Ein direkter Vergleich der Widerstandsmodelle mit dem Dichte- und dem Magnetisierungsmodell ist nicht möglich. Zum einen kann der Tiefenbereich des Dichtemodells (bis 3 km) durch die Widerstandsmodelle nicht zufriedenstellend aufgelöst werden (erste Schicht = 6 km), zum anderen wird hier aus numerischen Gründen mit horizontalen Schichten gearbeitet, so daß die Aufwölbung des Kristallinen Grundgebirges in 10 - 12 km Tiefe unterhalb des Sollings (Magnetisierungsmodell) nicht modelliert werden konnte.

Literatur

- HEMPFLING, R.: Beobachtung und Auswertung tagesperiodischer Variationen des erdelektrischen Feldes in der Umgebung von Göttingen. Diss. Math.-Nat. Fak., Univ. Göttingen, 1977
- RENNERT, K. : Untersuchung des Schwerfeldes an der Elfas-Achse (Weserbergland). Diplomarbeit, Inst. für Geophysik, Univ. Göttingen, 1982
- SCHMUCKER, U.: Anomalies of geomagnetic variations in the southwestern United States. Univ. of California Press, 1970
- SCHMUCKER, U.: Erdmagnetische Tiefensondierung mit langperiodischen Variationen. ETS Kolloquium, Grafrath, 1974
- SCHMUCKER, U.: Neue Rechenmethoden zur Tiefensondierung. ETS Kolloquium, Rothenberge, 1971
- SWIFT, C.M. : A magnetotelluric investigation of an electrical conductivity anomaly in the southwestern United States. Project report M.I.T., 1967
- WATERMANN, J. : Konstruktion eines Drei-Komponenten-Induktionsspulenmagnetometers für den Feldeinsatz und erste Vergleichsmessungen. Diplomarbeit, Inst. für Geophysik, Univ. Göttingen, 1976
- WENDORFF, L. : Ein erdmagnetisches Profil über die Elfas-Achse (Weserbergland) mit einer Anwendung der Schwarz-Christoffel-Transformation. Diplomarbeit, Inst. für Geophysik, Univ. Göttingen, 1984