

Aufbau einer Magnetotellurik-Apparatur zur Registrierung langer Perioden und Messungen auf dem Profil Nienburg/Weser - Lauenburg/Elbe

A. Jording, M. Gurk und H. Jödicke; Institut für Geophysik Münster

1 Einleitung

In der Arbeitsgruppe Magnetotellurik in Münster wurde bisher gerätebedingt im 'klassischen' Periodenbereich der Magnetotellurik gearbeitet, der sich von ca. 0.4 bis 4096 s erstreckt. Seit längerem bestand der Wunsch, speziell für Untersuchungen in Norddeutschland auch lange Perioden von Bay-Störungen möglichst bis hin zu S_q -Variationen messen und auswerten zu können.

Um diese langen Perioden aufzeichnen zu können, wurde ein in Münster vorhandenes EDA-Fluxgate-Magnetometer zu einer Magnetotellurik-Apparatur erweitert. Erste Messungen langperiodischer Variationen des Magnetfeldes und des elektrischen Feldes wurden im Norddeutschen Sedimentbecken auf einem Profil, auf dem GURK (1995) 'klassische' MT-Messungen durchgeführt hatte, vorgenommen. Ziel der langperiodischen MT-Messungen war der Versuch, die für Norddeutschland charakteristische Abschirmwirkung der mächtigen und hochleitfähigen Sedimentbedeckung zu durchdringen, um Aussagen über die Leitfähigkeitsstruktur im oberen Erdmantel zu erhalten. Angestrebt war dabei, den Bereich der Asthenosphäre aufzulösen.

2 Aufbau einer Magnetotellurik-Apparatur zur Messung langperiodischer Variationen

Bei unserer weitgehend aus vorhandenen Komponenten zusammengebauten langperiodischen MT-Apparatur 'Typ Münster' wird zur Registrierung des Magnetfeldes ein Fluxgate-Magnetometer der Firma EDA-Electronics benutzt. Die Messung des elektrischen Feldes erfolgte für die hier gezeigten Daten mit Hilfe von Kupfersulfatsonden (Cu-CuSO_4) (inzwischen werden Kalomel-Sonden eingesetzt), zur Signalverstärkung wird ein Vorverstärker der EMF772 μ P-Apparatur der Firma Metronix verwendet. Die Steuerung des Meßgerätes und der angeschlossene Datalogger wurden von der Elektronikwerkstatt des Instituts für Geophysik in Münster konzipiert und gebaut. Die Daten werden auf einer PCMCIA-Karte mit 1 Megabyte (inzwischen 2 MB) Kapazität abgespeichert. Der Dynamikbereich der Apparatur umfaßt ± 1000 nT in den Magnetfeldkomponenten und ± 5 mV (durch interne schrittweise Kompensation inzwischen unbegrenzt) in den Komponenten des elektrischen Feldes. Als feste Abtastrate ist wie bei unseren 'klassischen' MT-Apparaturen $\Delta t = 32$ s vorgegeben. Für die Datenauswertung wird sie mit Hilfe geeigneter Software auf $\Delta t = 128$ s und $\Delta t = 256$ s herabgesetzt, so daß für die statistische Frequenzanalyse drei unterschiedliche Periodenbereiche zur Verfügung stehen. Der derzeit ausgewertete Bereich erstreckt sich von 128 bis 65536 s.

Die wichtigsten technischen Daten der langperiodischen MT-Apparatur sind in der nachstehenden Tabelle 1 zusammengefaßt:

Magnetotellurik-Apparatur Typ Münster

Sonden:

Magnetfeld : E.D.A. FM100B Fluxgate-Magnetometer
elektrisches Feld : Kupfersulfat-Sonden (Cu-CuSO₄)
Temperatur : PT100, im Fluxgate-Meßkopf integriert

Dynamikbereich : B-Feld ± 1000 nT
: E-Feld ± 5 mV

Steuerung : CPU Z80180
16 kbyte EPROM, 32 kbyte interner RAM

Speicherung : PCMCIA-Karte 1 Megabyte

Abtastrate : $\Delta t = 32$ s
Temperaturabtastung : $\Delta t_{Temp} = 384$ s
Abtastung Uhrzeit/Datum : $\Delta t_{Uhr/Dat} = 3840$ s

Analog/Digital-Wandler : ICL 7109
Auflösungsvermögen: 12 bit + Vorzeichen
Wandlungsrate: max. 30 Wandlungen/s
Eingangsspannung: ± 2 V

Multiplexer : CMOS CD4051 (8 zu 1)

Tiefpaßfilter : B-Feld : 128 s Bessel-Tiefpaßfilter 2.Ordnung
: E-Feld : 128 s Bessel-Tiefpaßfilter 2.Ordnung

Spannungsversorgung : externer 12 V Akkumulator mit 60 Ah
Stromverbrauch : ~ 180 mA

Tabelle 1: Technische Daten der langperiodischen MT-Apparatur.

3 Messungen auf dem Profil Nienburg/Weser - Lauenburg/Elbe und ihre Auswertung

Die Messungen mit der langperiodischen Magnetotellurik-Apparatur fanden von August 1994 bis Januar 1995 im Nordwestdeutschen Sedimentbecken entlang eines senkrecht zum herzynischen Streichen orientierten SW-NE-Profiles zwischen Nienburg/Weser und Lauenburg/Elbe mit fünf Meßpunkten (DUED, HASS, JARL, STEI, MECH) im Abstand von ca. 30 km statt (Abbildung 1). Für einen Vergleich mit der 'klassischen' MT (GURK, 1995) wurden für die Messung des elektrischen Feldes dieselben Sondenlöcher benutzt. Die mittlere Standzeit pro Punkt betrug ca. vier Wochen.

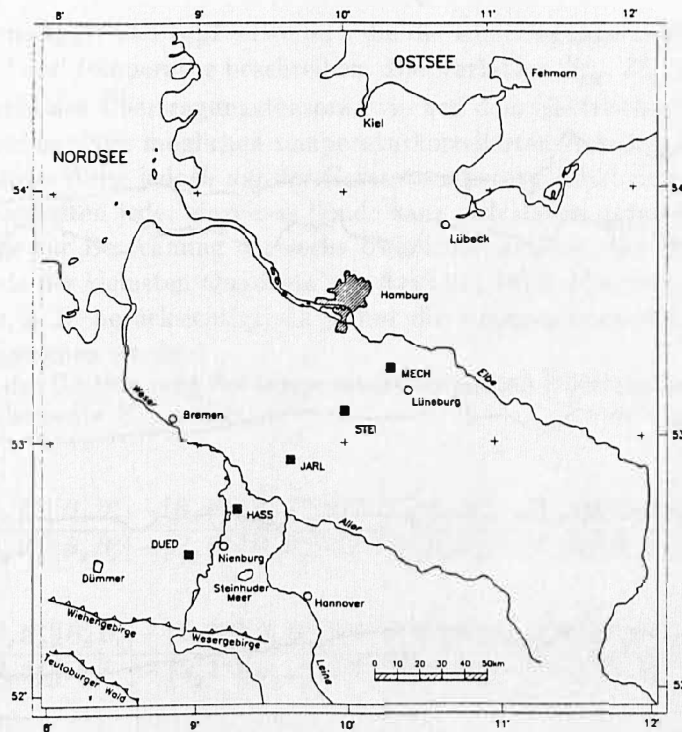


Abbildung 1: Lage der langperiodischen MT-Stationen des Profils Nienburg/Weser - Lauenburg/Elbe.

3.1 Datenbearbeitung

Es war vorher bekannt und zeigte sich bei unseren Messungen erneut, daß langperiodische MT-Messungen sehr anfällig in bezug auf Störungen und Driften insbesondere in den Komponenten des elektrischen Feldes sind. Daher wurden sämtliche Datensätze gezielt visuell untersucht, um eine Auswahl geeigneter Zeitreihenabschnitte zu treffen. Ferner wurden die Daten mit der Gewichtsfunktion $Gew(\gamma^2) = (\gamma^2)^n$ gewichtet, wobei γ^2 die multiple Kohärenz darstellt und eine geeignete Wahl von $n = 0, 1, 2, \dots$ die an sich schon günstigen Gewichtseigenschaften von γ^2 in vielen Fällen noch verbessern kann. Eine Korrektur der Driteffekte konnte meistens durch linearen Trendabzug und Filterung der Daten erreicht werden.

Bei der Messung langsamer Variationen des magnetischen und des elektrischen Feldes ist wegen der langen Standzeit der Geräte im Gelände der mögliche Einfluß der Temperatur auf die Meßdaten von besonderem Interesse. Wir waren darüber hinaus durch eine Untersuchung zum Temperaturverhalten des EDA-Magnetometers von JUNGE ET AL. (1994) gewarnt, die von einer Verwendung dieses Gerätes zu langperiodischen Messungen wegen möglicher starker

Temperaturdriften abgeraten hatten.

Abbildung 2 zeigt ein Registrierbeispiel an der Station MECH mit der Dauer von neun Tagen.

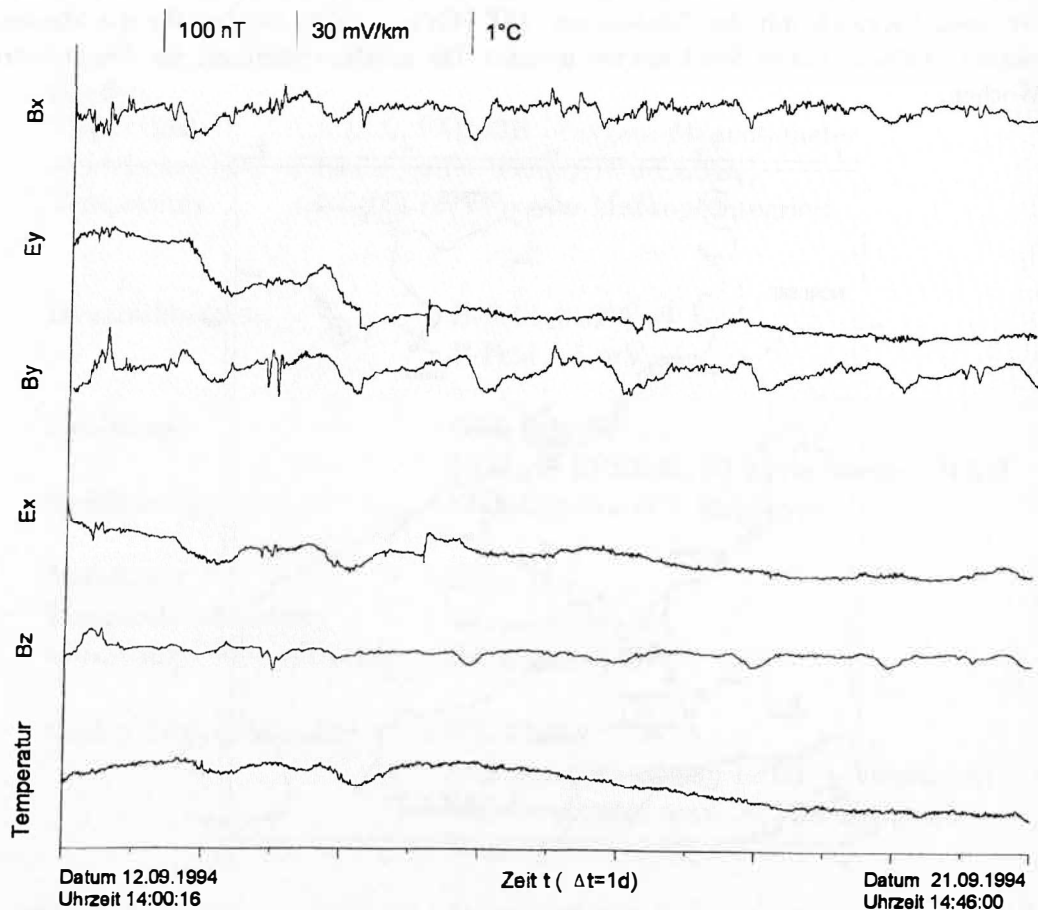


Abbildung 2: Registrierbeispiel der langperiodischen MT-Apparatur an der Station MECH. In der Darstellung wurden die Daten mit einer Abtastrate von $\Delta t = 32$ s registriert und mit einem gleitenden Mittel über zehn Werte geglättet.

Aufgetragen sind die drei Komponenten des Magnetfeldes, die zwei Komponenten des elektrischen Feldes und die Temperatur, gemessen im Innern des EDA-Magnetometers. Der Vergleich zeigt, daß zwischen den Komponenten des Magnetfeldes und der Temperatur keine Korrelation festzustellen ist. Angesichts der zugleich recht geringen Temperaturvariation kann dies offenbar mit dem ausreichend tiefen Vergraben des Magnetometertripels begründet werden. Eine mögliche Korrelation mit der Temperatur scheint jedoch in den Komponenten des elektrischen Feldes vorhanden zu sein. Ein ähnlicher Eindruck entsteht auch bei der Analyse der anderen Meßstationen. Daher ist festzuhalten, daß temperaturbedingte Fehler in den Sondierungskurven, sofern überhaupt vorhanden, auf Temperatureffekte in den Komponenten des elektrischen Feldes zurückzuführen sind. Um dies zu überprüfen, wurde der Versuch unternommen, eine

temperaturkorrigierte Übertragungsfunktion zu berechnen.

Der Ansatz zur Berechnung der temperaturkorrigierten Übertragungsfunktion sieht vor, daß die Temperatur als gleichwertige dritte Eingangskomponente einbezogen werden soll, d.h. der bekannte Übertragungstensor der Magnetotellurik

$$E_x = Z_{xx}^t B_x + Z_{xy}^t B_y + t_{E_x} T \quad (1)$$

$$E_y = Z_{yx}^t B_x + Z_{yy}^t B_y + t_{E_y} T \quad (2)$$

wird um die Terme $t_{E_x} T$ und $t_{E_y} T$ erweitert, die die Übertragungsfunktion zwischen dem elektrischen Feld und der Temperatur beschreiben. Die Variablen $Z_{xx}^t, Z_{xy}^t, Z_{yx}^t$ und Z_{yy}^t stellen wie bisher die Elemente des Übertragungstensors zwischen dem elektrischen Feld und dem Magnetfeld dar, sind aber nun von möglichen temperaturkorrelierten Anteilen befreit. Temperaturkorrigiert wird auf diese Weise jedoch nur der Gesamtemperaturerfolg einer E-Feld-Sondenstrecke, das Temperaturverhalten jeder einzelnen Sonde kann sich davon unterscheiden.

Als Grundlage zur Berechnung der sechs Unbekannten dient das Fehlerausgleichsverfahren nach der 'Methode der kleinsten Quadrate' (SCHEELKE, 1972; JÖDICKE, 1977). Es wird nur der 'minimale Fehler in E ' berücksichtigt, da ja nur die Komponenten des elektrischen Feldes als fehlerbehaftet angesehen werden.

Als Ergebnis der Bestimmung der temperaturkorrigierten Übertragungsfunktion ergeben sich als Beispiel die Elemente Z_{xy} und t_{E_x} :

$$Z_{xy}^t = \frac{([E_x T^*][B_x B_x^*] - [E_x B_x^*][B_x T^*])([T B_x^*][B_x B_y^*] - [T B_y^*][B_x B_x^*]) - ([B_y B_y^*][B_x B_x^*] - [B_y B_x^*][B_x B_y^*])([T T^*][B_x B_x^*] - [T B_x^*][B_x T^*])}{([E_x B_x^*][B_x B_y^*] - [E_x B_y^*][B_x B_x^*])([T T^*][B_x B_x^*] - [T B_x^*][B_x T^*]) - ([B_y B_x^*][B_x T^*] - [B_y T^*][B_x B_x^*])([T B_x^*][B_x B_y^*] - [T B_y^*][B_x B_x^*])} \quad (3)$$

$$\frac{([E_x B_x^*][B_x B_y^*] - [E_x B_y^*][B_x B_x^*])([T T^*][B_x B_x^*] - [T B_x^*][B_x T^*])}{([B_y B_x^*][B_x T^*] - [B_y T^*][B_x B_x^*])([T B_x^*][B_x B_y^*] - [T B_y^*][B_x B_x^*])}$$

$$t_{E_x} = \frac{([E_x T^*][B_x B_x^*] - [E_x B_x^*][B_x T^*])([B_x B_x^*][B_y B_y^*] - [B_x B_y^*][B_y B_x^*]) - ([T B_x^*][B_x B_y^*] - [T B_y^*][B_x B_x^*])([B_x B_x^*][B_y T^*] - [B_y B_x^*][B_x T^*])}{([E_x B_y^*][B_x B_x^*] - [E_x B_x^*][B_x B_y^*])([B_x B_x^*][B_y T^*] - [B_y B_x^*][B_x T^*]) - ([T B_x^*][B_x T^*] - [T T^*][B_x B_x^*])([B_x B_x^*][B_y B_y^*] - [B_x B_y^*][B_y B_x^*])} \quad (4)$$

$$\frac{([E_x B_y^*][B_x B_x^*] - [E_x B_x^*][B_x B_y^*])([B_x B_x^*][B_y T^*] - [B_y B_x^*][B_x T^*])}{([T B_x^*][B_x T^*] - [T T^*][B_x B_x^*])([B_x B_x^*][B_y B_y^*] - [B_x B_y^*][B_y B_x^*])}$$

Im Falle einer Korrelation der Temperatur mit dem elektrischen Feld müßte für die Übertragungsfunktionen t_{E_x} und t_{E_y} ein erkennbarer Zusammenhang zwischen dem Verlauf der Amplituden bzw. Phasen und der Periode resultieren. Alle bisherigen Versuche zeigten jedoch ein rein statistisches Verhalten. Ein wesentlicher Einfluß der Temperatur auf die magnetotellurischen Übertragungsfunktionen ist bei unseren Daten demnach auszuschließen.

Bestätigt wird die Aussage durch einen Vergleich der temperaturkorrigierten Übertragungsfunktionen Z_{xy}^t, Z_{yx}^t mit den 'normal' berechneten Übertragungsfunktionen Z_{xy}, Z_{yx} , hier am Beispiel der Station DUED (Abbildung 3). Die Säulendiagramme stellen jeweils für die Komponenten xy und yx die Differenzen der Werte des spezifischen Widerstandes und der Phase

Station DUED

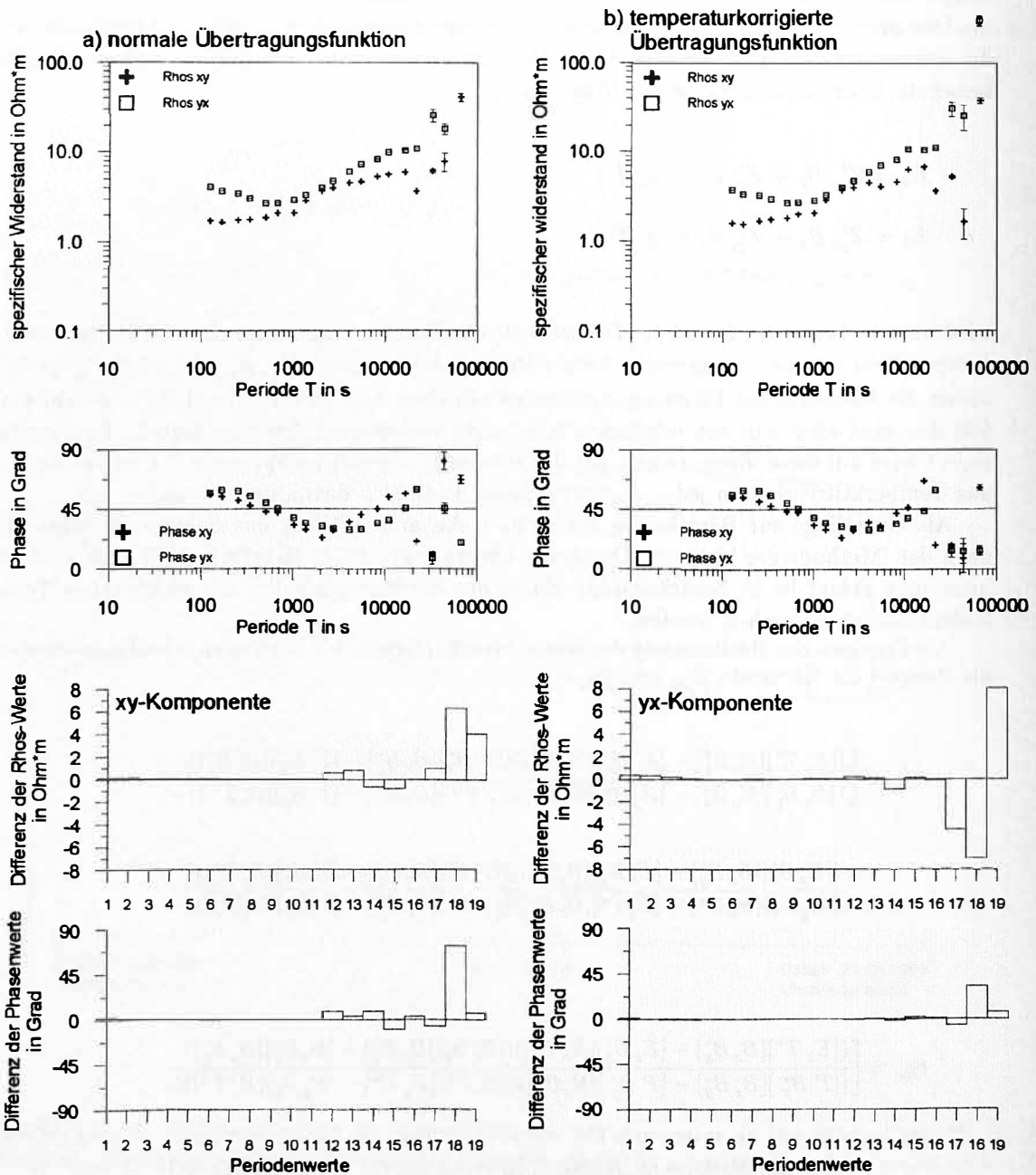


Abbildung 3: Vergleich der Sondierungskurven für die Beispielstation DUED. Die Berechnungen beruhen auf dem 'minimalen Fehler in E'. Teil a zeigt das Ergebnis der normalen Berechnung der Übertragungsfunktion und Teil b das Ergebnis der temperaturkorrigierten Übertragungsfunktion. Die Säulendiagramme stellen die Differenzen der Werte des spezifischen Widerstandes und der Phase für die xy- bzw. yx-Komponente dar. Es wurden jeweils die Werte der temperaturkorrigierten Übertragungsfunktionen von denen der normalen Übertragungsfunktionen abgezogen. Die Zahlen auf der Abzisse entsprechen den 19 vorhandenen Periodenwerten im Bereich von 128 bis 65 536 s.

dar, wobei die Werte der temperaturkorrigierten Übertragungsfunktion von denen der normalen Übertragungsfunktion abgezogen wurden. Als Ergebnis ist festzuhalten, daß größere, statistisch streuende Differenzen nur in den langen Perioden auftreten, für die die Bestimmung der Übertragungsfunktion wegen mangelnder Datenqualität ohnehin unsicher ist. Weiterhin zeigen die Daten exemplarisch, daß eine zufriedenstellende Datenqualität mit den in Münster derzeit vorhandenen apparativen Möglichkeiten und Standzeiten von ca. vier Wochen nur bis etwa 20 000 s erreicht werden kann. Bis 4096 s sind die mit der langperiodischen MT-Anlage bestimmten Übertragungsfunktionen praktisch identisch mit denen der 'klassischen' MT (JORDING, 1995).

3.2 Induktionspfeile

Um erste Informationen über die Strukturierung des Meßgebietes zu erhalten, wurden die Induktionspfeile nach SCHMUCKER (1970) für die Perioden $T = 1024$ s und $T = 10920$ s bestimmt. Abbildung 4 zeigt, daß die Realpfeile weitgehend senkrecht zum herzynischen Streichen stehen. Das Umklappen ihrer Orientierung von Südwesten nach Nordosten und die Längenabnahme im Zentrum des Nordwestdeutschen Sedimentbeckens sind Hinweise auf das Kreuzen mit einem Maximum der integrierten Leitfähigkeit, der sogenannten 'norddeutschen Leitfähigkeitsanomalie', die erstmals von SCHMUCKER (1959) anhand der Analyse von magnetischen Variationen entlang von zwei Nord-Süd-Profilen im Nordwestdeutschen Becken nachgewiesen worden ist. Die Lage der 'Leitfähigkeitsanomalie' ist demnach zwischen den Stationen JARI und STEI einzuordnen.

3.3 Eindimensionale Modelle

Nachdem in den Untersuchungen zur Dimensionalität des Untergrundes, d.h. der Auswertung der Skewness und der Anisotropie, festgestellt wurde, daß das Meßgebiet als angenähert eindimensional zu betrachten ist, wurden eindimensionale Modellrechnungen als Näherungslösung für die Leitfähigkeitsverteilung im Untergrund durchgeführt. Zuvor wurde die zu erwartende Eindringtiefe mit dem $\rho^* - z^*$ -Verfahren abgeschätzt. Dabei zeigte sich erneut, daß eine sinnvolle Auswertung der Sondierungskurven nur bis ca. 20 000 s möglich ist. Als Modellrechnungsprogramm wurde der Algorithmus von FISCHER & LEQUANG (1981) verwendet.

Als erste Näherung wurde für jede Station zunächst ein Modell auf Grundlage der Berdichevsky-Invariante (BERDICHEVSKY & DMITRIEV, 1976) berechnet. Diese ersten 1D-Modelle ergaben jedoch ein sehr uneinheitliches Bild der Leitfähigkeitsverteilung im Untergrund. Als Ursache hierfür sind statische Verzerrungen der Sondierungskurven nicht auszuschließen. Eine gezielte Untersuchung hierzu ergab zwei 'static shift'-verdächtige Stationen, die versuchsweise entzerrt wurden. Von einer versuchsweisen Korrektur muß gesprochen werden, weil bei einem Meßpunkt-Abstand von ca. 30 km und deutlichen Variationen der integrierten Leitfähigkeit im Untergrund auf kurze Distanzen (vgl. GURK, 1995) eine Entzerrung praktisch kaum möglich ist.

Abbildung 5 zeigt das Resultat nach der versuchten Entzerrung als Profilschnitt in Form eines Widerstands-Tiefenmodells.

Charakteristisch für alle Modelle sind die gutleitende Zone in der Oberkruste und der gutleitende Halbraum. Für den guten Leiter in der Kruste ergibt sich im Südwesten des Profils eine Tiefenlage von 6 bis 10 km und im Nordosten von 10 bis 12 km Tiefe. Der Übergang zum gutleitenden Halbraum variiert zwischen 70 und 150 km Tiefe. Eine gutleitende Deckschicht, wie sie für das norddeutsche Sedimentbecken charakteristisch ist, konnte nur an den Stationen STEI und MECH aufgelöst werden. An den anderen Stationen läßt sie sich wegen der verwendeten langen Perioden nicht bestimmen.

Da die Anisotropie zu langen Perioden hin zunimmt, wurden als Vorbereitung für 2D-Modellrechnungen auch Modelle für die E- und die B-Polarisation berechnet. Mit ihrer Hilfe sollte zugleich die maximale bzw. minimale Tiefe des Übergangs zum gutleitenden Halbraums

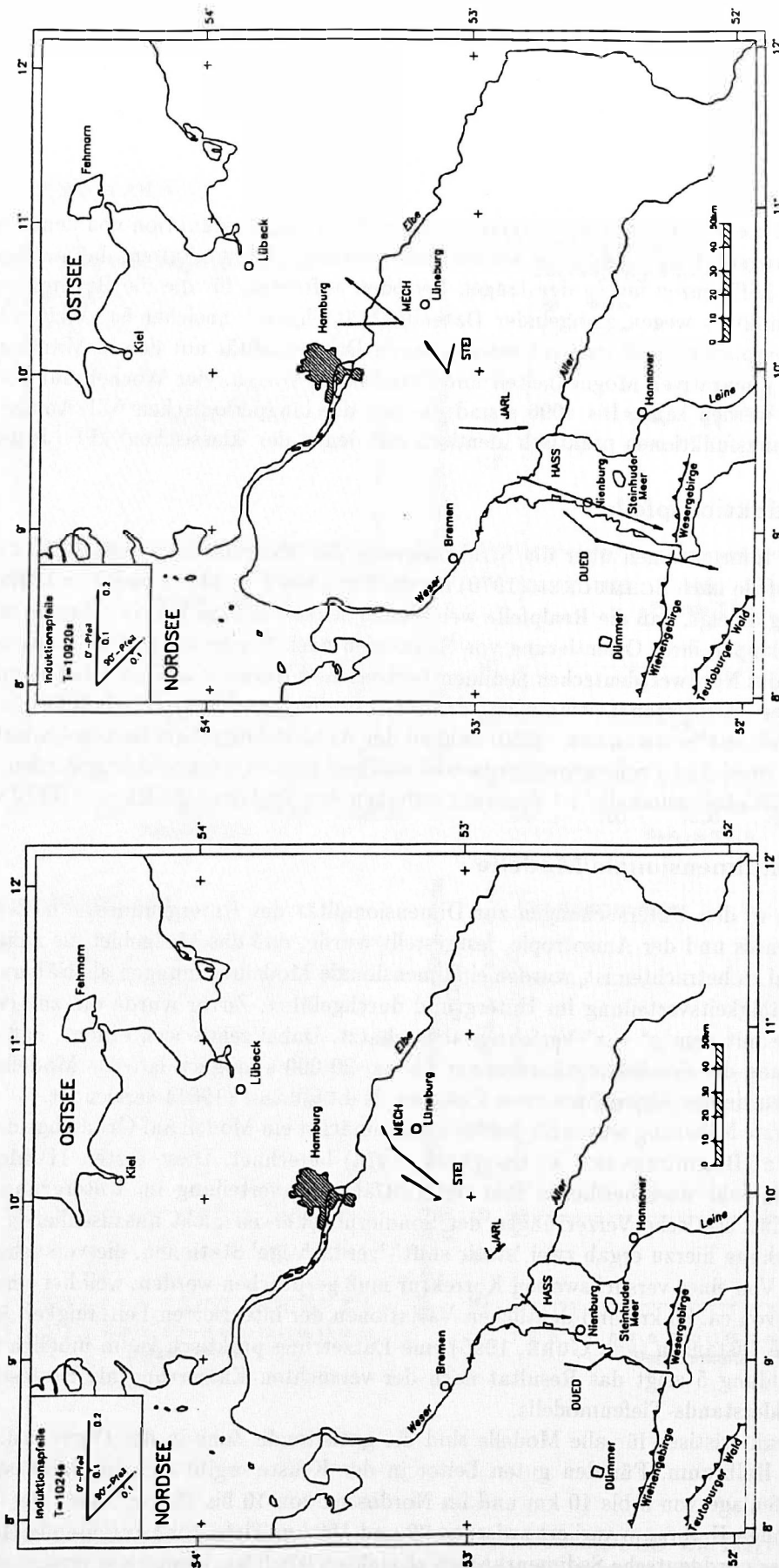


Abbildung 4: Die Induktionspfeile nach SCHMUCKER entlang des Profils Nienburg/Weser - Lauenburg/Elbe für die Perioden $T = 1024$ s und $T = 10920$ s.

1D-Modell auf Grundlage der Berdichevsky-Invariante (entzerrt)

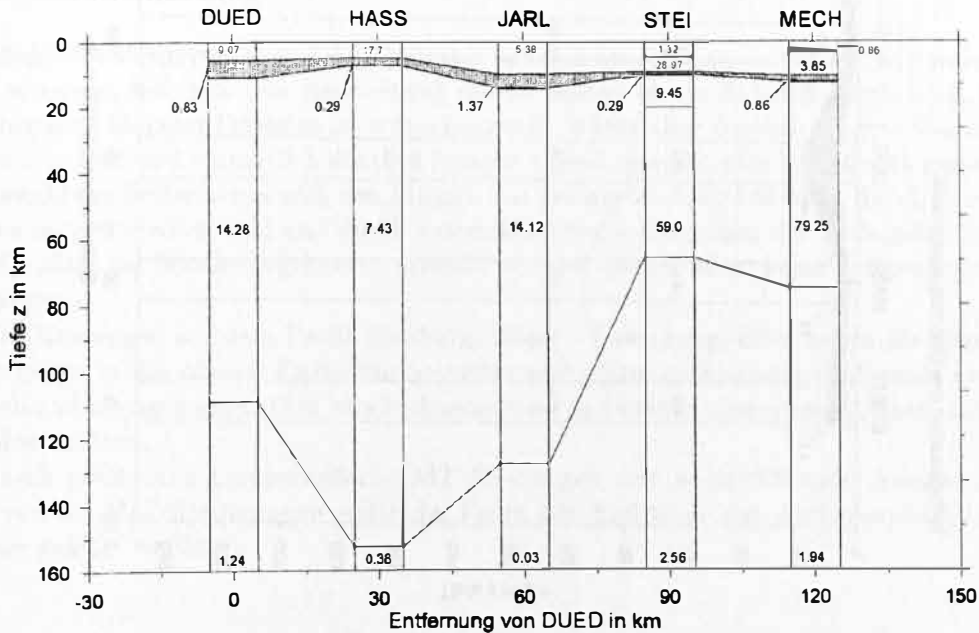


Abbildung 5: Ergebnis der 1D-Modellrechnung für die Berdichevsky-Invariante nach der Entzerrung. Die angegebenen Zahlenwerte entsprechen spezifischen Widerstandswerten in Ωm . Gutleitende Zonen sind schraffiert dargestellt.

bestimmt werden (vgl. Abbildungen 6 a/b). Beide Schnitte zeigen eine im wesentlichen identische Leitfähigkeitsabfolge. Die Modelle der E-Polarisation repräsentieren die maximalen und die der B-Polarisation die minimalen Tiefenlagen des guten Krustenleiters.

Wichtigstes Ergebnis der Modellrechnung mit langperiodischen MT-Daten sind die sehr kleinen spezifischen Widerstandswerte des gutleitenden Halbraums in beiden Polarisationen. Sie grenzen den Halbraum klar gegen die darüberliegenden Schichten ab. Eine genaue Festlegung der Tiefenlage des gutleitenden Halbraums ist durch 1D-Modelle nicht möglich, jedoch werden obere und untere Grenzen seiner Tiefenlage angegeben. So ergibt die B-Polarisation eine mittlere Tiefe von ca. 80 km und die E-Polarisation von ca. 200 km. Um eine genauere Bestimmung der Tiefenlage und eine Bestätigung der Leitfähigkeitsverteilung des Profils zu erhalten, sind ergänzende 2D-Modellrechnungen somit unbedingt notwendig.

Für Norddeutschland bedeutet dieses Ergebnis, daß durch die Erweiterung des auswertbaren Periodenbereichs bis zu 20 000 s trotz extrem hochleitender Deckschichten die Existenz eines gutleitenden Halbraums sicher nachzuweisen ist. Diese gutleitende Zone kann als Asthenosphäre unter Norddeutschland gedeutet werden. Daß sich die Asthenosphäre in den untersuchten Daten als Halbraum und nicht als begrenzte 'Schicht' darstellt, liegt insbesondere an dem noch zu geringen Periodenumfang der Auswertung (vgl. BARR, 1992).

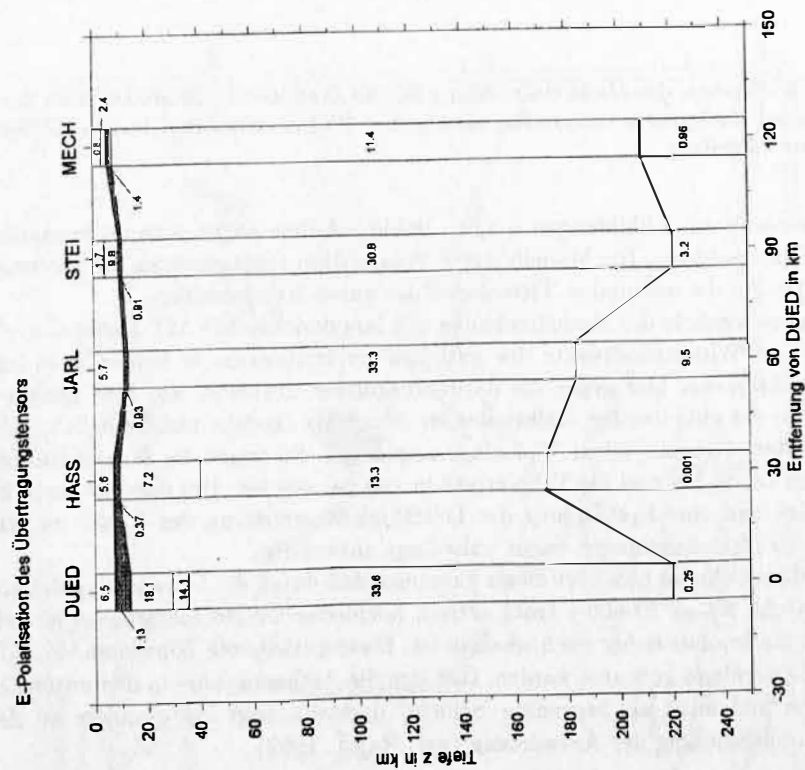
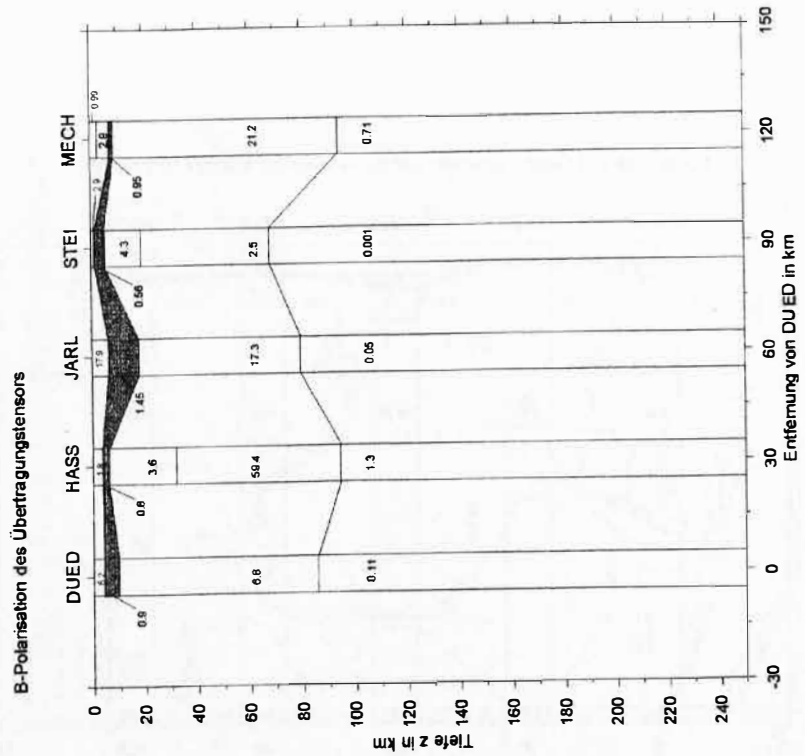


Abbildung 6: Ergebnisse der 1D-Modellrechnung für die Komponente der E-Polarisation des Impedanzsensors und die Komponente der B-Polarisation des Impedanzsensors. Die angegebenen Zahlenwerte entsprechen spezifischen Widerständen in Ωm .

4 Zusammenfassung

Die Magnetotellurik-Apparatur Typ Münster hat sich als ein leistungsfähiges und robustes Meßgerät erwiesen, mit dem eine Auswertung der Meßdaten bis zu 20 000 s möglich ist. Eine Auswertung noch längerer Perioden ist wünschenswert, würde aber deutlich längere Standzeiten des Gerätes im Feld und vermutlich deutlich bessere E-Feld-Sonden erfordern. Durch gezielte visuelle Auswahl der Zeitreihen, durch den Einsatz von geeigneten Gütekriterien, durch Korrektur der Driften im elektrischen Feld und durch ausreichend tiefes Vergraben der Meßsonden konnte eine gute Qualität der Sondierungskurven erreicht werden, die vor allem keine Temperaturabhängigkeit zeigen.

Die Messungen auf dem Profil Nienburg/Weser - Lauenburg/Elbe haben als Resultate den guten Leiter in der oberen Erdkruste bestätigt und einen gutleitenden Halbraum unter Norddeutschland nachgewiesen. Dies ist gleichbedeutend mit dem Nachweis der Asthenosphäre unter Norddeutschland.

Durch zusätzliche langperiodische MT-Messungen und weiterführende Auswertungen mit Hilfe von 2D-Modellrechnungen sollte die Frage der Tiefenlage der Asthenosphäre in Zukunft genauer geklärt werden.

5 Literatur

- Bahr, K. (1992): *Auflösung der Asthenosphäre in elektromagnetischen Sondierungen*, DDG Mittlg. 3/1992, 15-23.
- Berdichevsky, M.N. & Dmitriev, V.I. (1976): *Basic principles of interpretation of magnetotelluric sounding curves*, KAPG Geophysical Monograph, Budapest, 165 – 221.
- Fischer, G., Schnegg, P.-A., Peguiron, M. & LeQuang, B. V. (1981): *An analytic one-dimensional magnetotelluric inversion scheme*, Geophys.J.R. astr. Soc. 67, 257 – 278.
- Gurk, M. (1995): *Magnetotellurik zwischen Nienburg/Weser und Lauenburg an der Elbe zur Bestimmung der Leitfähigkeitsverteilung in der oberen und mittleren Kruste*, Diplomarbeit, Inst. für Geophysik, Univ. Münster. [unveröff.]
- Jödicke, H. (1977): *Einzeleffekt-Auswertung magnetotellurischer Registrierungen*, Diplomarbeit, Inst. f. Geophysik, Univ. Münster. [unveröff.]
- Jording, A. (1995): *Aufbau einer Magnetotellurik-Apparatur zur Registrierung langer Perioden und Messungen auf dem Profil Nienburg/Weser - Lauenburg an der Elbe*, Diplomarbeit, Inst. f. Geophysik, Univ. Münster. [unveröff.]
- Junge, A., Spitta, P. & Peter, C. (1994): *Vergleich von Auster-Magnetometer und EDA-Fluxgate*, in Bahr, K. und Junge, A. (Hrsg): *Protokoll über das Kolloquium 'Elektromagnetische Tiefenforschung' in Höchst/Odenwald vom 28.-31. März 1994*: 428-430; Potsdam, Edinburgh.
- Scheelke, I. (1972): *Magnetotellurische Messungen im Rheingraben und ihre Deutung mit zweidimensionalen Modellen*, Dissertation, Naturwiss. Fak., Universität Braunschweig.
- Schmucker, U. (1959): *Erdmagnetische Tiefensondierung in Deutschland 1957-1959; Magnetogramme und erste Auswertung*, Abh. Akad. Wiss. Göttingen, Math.-Phys. Kl. Heft 5.
- Schmucker, U. (1970): *Anomalies of geomagnetic variations in the southwestern United States*, Bull. Scripps. Inst. Oceanogr., Univ. Calif., 13.