

Langperiodische elektromagnetische Array-Messungen: Anzeichen für einen anisotropen oberen Mantel?

Alexander Gatzemeier

Institut für Geophysik, Universität Göttingen

1 Einleitung

Das Gebiet zwischen Rheinischem Schiefergebirge und Fränkischem Schichtstufenland bis hinauf zur Norddeutschen Tiefebene war in den letzten zwei Jahrzehnten oft Gegenstand elektromagnetischer Messungen. Durch zahlreiche Diplom- und Doktorarbeiten und nicht zuletzt durch die im Rahmen des Eifel-Projektes (LEIBECKER 2000) durchgeführten Messungen liegen Daten von insgesamt 51 Stationen vor. Im Sommer 1999 und 2000 wurde in Feldexperimenten mit 12 Magnetotellurik(MT)-Stationen dieses Meßnetz erweitert (Abb.1).

Durch die gemeinsame Interpretation dieser 63 Stationen kann erstmals eine Aussage über die großräumige Leitfähigkeitsverteilung des oberen Mantels unter dem Meßgebiet getroffen werden.

2 Elektromagnetische Arraymessungen

Im folgenden werden zunächst die charakteristischen Besonderheiten des Meßgebietes dargestellt. Diese werden dann durch ein dreidimensionales Leitfähigkeitsmodell erklärt. Um den Einfluß galvanischer Verzerrung auf die Daten durch oberflächennahe Störkörper auszuschließen, werden im folgenden nur phasensensitive Größen nach BAHR (1988) berücksichtigt.

Abbildung 2 zeigt die unrotierten Phasenkurven der xy - und yx -Polarisation von acht, für das westliche Meßgebiet charakteristischen Stationen (vergl. Abb. 1). Der Frequenzgang kann in zwei Bereiche unterteilt werden. Bis 500 s liegen die Eindringtiefen im Bereich der mittleren bis unteren Kruste, bei längeren Perioden erstrecken sie sich bis in den oberen Mantel.

Bei kurzen Perioden < 500 s zeigen die Kurven verschiedener Stationen kein einheitliches Verhalten. Für längere Perioden hingegen ist der Verlauf bei allen Stationen ähnlich, die Phase der xy -Polarisation liegt unterhalb von 45° , durchläuft bei etwa 1000 s ein Minimum von 30° und steigt dann wieder an. Die Phase der yx -Polarisation hingegen liegt oberhalb von 45° , im Süden des Meßgebietes mit einem Maximum von 60° , im Norden von mehr als 70° . Dieses Aufspalten der Phasenkurven nimmt von Süden nach Norden zu und ist charakteristisch für alle Stationen im westlichen Teil des Meßgebietes.

Eine weitere Besonderheit in den Daten zeigt der phasensensitive Rotationswinkel (Abb. 3). Zur besseren Darstellung sind die Rotationswinkel dieser acht Stationen

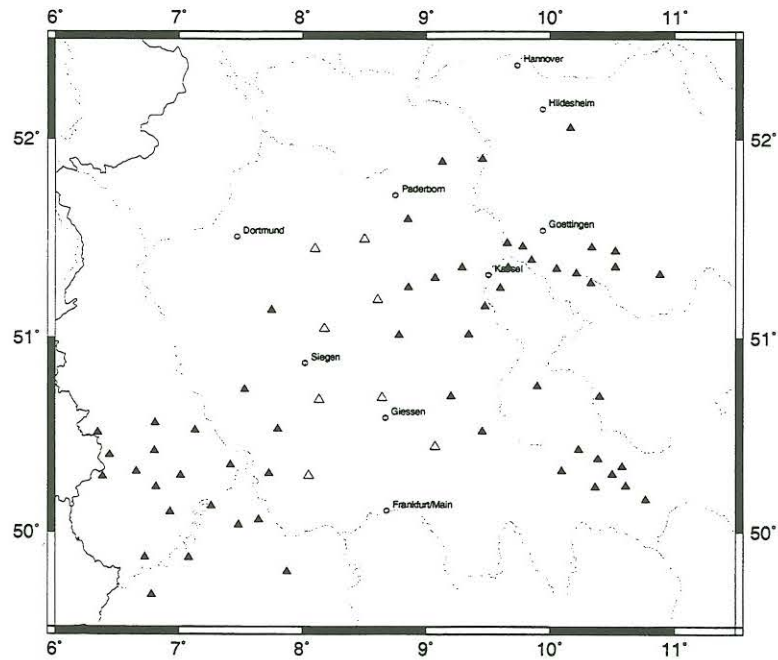


Abb. 1: Karte des Meßgebietes. Die grauen Dreiecke zeigen die Koordinaten von acht charakteristischen Stationen.

zusammen dargestellt.

Auch hier beobachtet man im Frequenzgang zwei charakteristische Bereiche. Bei kurzen Perioden spiegelt die Streuung der Winkel laterale Variationen in der Kruste wider. Für $T > 1000$ s nimmt die Streuung der Rotationswinkel ab und die Werte liegen einheitlich um 0 oder 90° . In einem großen Bereich des Meßgebietes sind somit Phasenaufspaltung und Rotationswinkel einheitlich. Dies wird besonders deutlich in einer flächenhaften Darstellung beider Größen.

In Abb. 4 sind Rotationswinkel und Phasenaufspaltung bei 2730 s dargestellt. Die obere Abbildung zeigt die Phasen der xy - und yx -Polarisation bei der Periode 2730 s. Jede Station ist um den phasensensitiven Rotationswinkel bei dieser Periode rotiert. Der Azimuth eines jeden Balkens in der unteren Darstellung gibt den phasensensitiven Rotationswinkel bei 2730 s wieder. Die Länge ist ein Maß für die Phasenaufspaltung $|\Phi'_{xy} - \Phi'_{yx}|$, im um den jeweiligen Winkel rotierten Koordinatensystem, aufgetragen in die Richtung der größeren Phase. Im gesamten Meßgebiet zeigen die Rotationswinkel bei langen Perioden ein sich lateral wenig änderndes und besonders im Bereich der großen Phasenaufspaltung einheitliches Verhalten. In der unteren Darstellung von Abb. 4 zeigen die Balken in Richtung der höheren Leitfähigkeit.

Das einheitliche Verhalten von Phase und Rotationswinkel über einen großen Bereich des Meßgebietes läßt eine dreidimensionale Leitfähigkeitsstruktur in großen Tiefen eher unwahrscheinlich erscheinen. Vielmehr deuten Rotationswinkel und Phasenaufspaltung auf eine richtungsabhängige Leitfähigkeit in großen Tiefen hin. Da die Ausdehnung des Meßgebietes \gg als die Eindringtiefe ist und sich lateral Phasenaufspal-

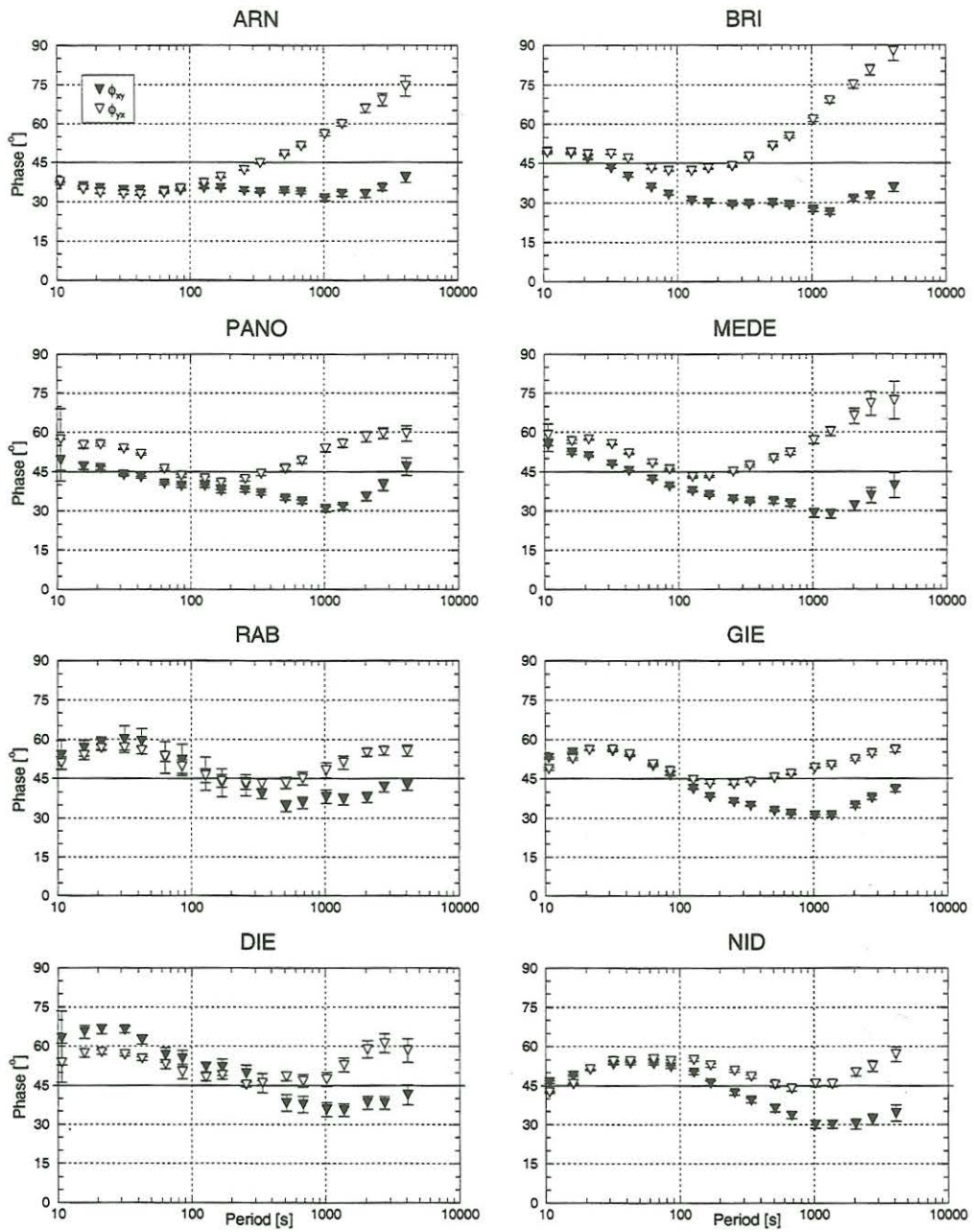


Abb. 2: Unrotierte Phasenkurven der xy - und yx -Polarisation von acht charakteristischen Stationen.

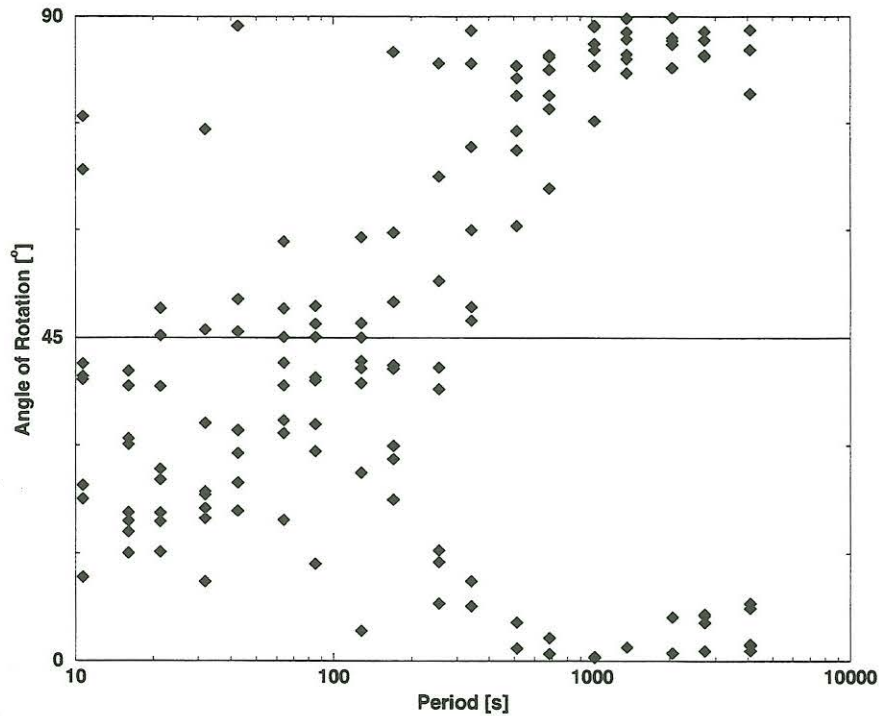


Abb. 3: Frequenzgang der phasensensitiven Rotationswinkel der acht charakteristischen Stationen.

tion und Rotationswinkel nur wenig ändern, scheint eine anisotrope Leitfähigkeitsstruktur eher wahrscheinlich als eine zweidimensionale. Durch Modellrechnungen soll diese genauer beschrieben werden.

3 Der obere Mantel: eine Modellvorstellung

Die über den Frequenzgang nicht einheitlichen Rotationswinkel lassen in Kruste und oberem Mantel unterschiedliche Streichrichtungen vermuten (vgl. Abb. 3). Daher werden durch dreidimensionale Modellierungen die besonderen Merkmale in den Daten erklärt. Hierzu wird der 3D-Finite-Differenzen-Code von MACKIE et al. (1993) in der modifizierten Version von BOOKER verwendet.

Abbildung 5 zeigt ein Modell der Leitfähigkeitsverteilung des westlichen Teils des Arrays. Insbesondere die Phasenaufspaltung bei langen Perioden und das Verhalten des phasensensitiven Rotationswinkels sollte erklärt werden.

Das Leitfähigkeitshintergrundmodell als Grundlage für das 3D-Modell ist 1D-Inversionen entnommen (LEIBECKER 2000). Der linke Teil von Abb. 5 zeigt einen Nord-Süd-Schnitt durch das Modell. Um die Charakteristika in den Daten zu erklären, wurden zwei anisotrope Schichten integriert (Aufsicht im rechten Teil von Abb. 5). In der oberen Schicht sind vereinfacht Leitfähigkeiten und Streichrichtungen der mittleren und unteren Kruste zusammengefasst. In der zweiten Schicht wird durch ost-west-streichende Dykes ein anisotroper oberer Mantel modelliert. Mit spezifischen Widerständen von bis zu $0.5 \Omega\text{m}$ für die gutleitende und $500 \Omega\text{m}$ für die schlechtleitende Phase, unterscheiden sich die aus dem Modell berechneten effektiven Leitfähigkeiten $\sigma_{\parallel} \approx 1 \text{ S/m}$ und $\sigma_{\perp} \approx 250 \text{ S/m}$ (KIRCHHOFFSche Regeln, parallel und senkrecht zu den Dykes), in dieser Schicht um mehr als zwei Größenordnungen

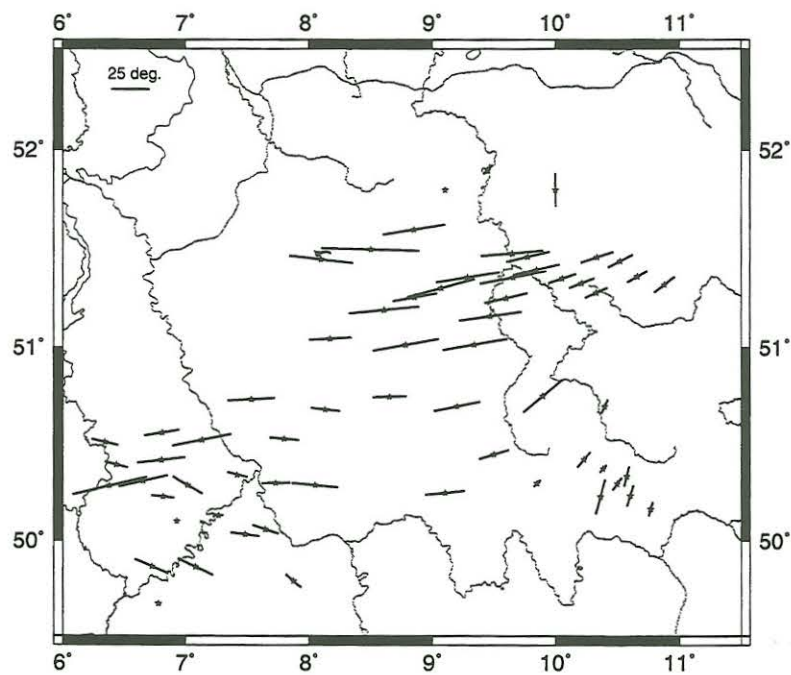
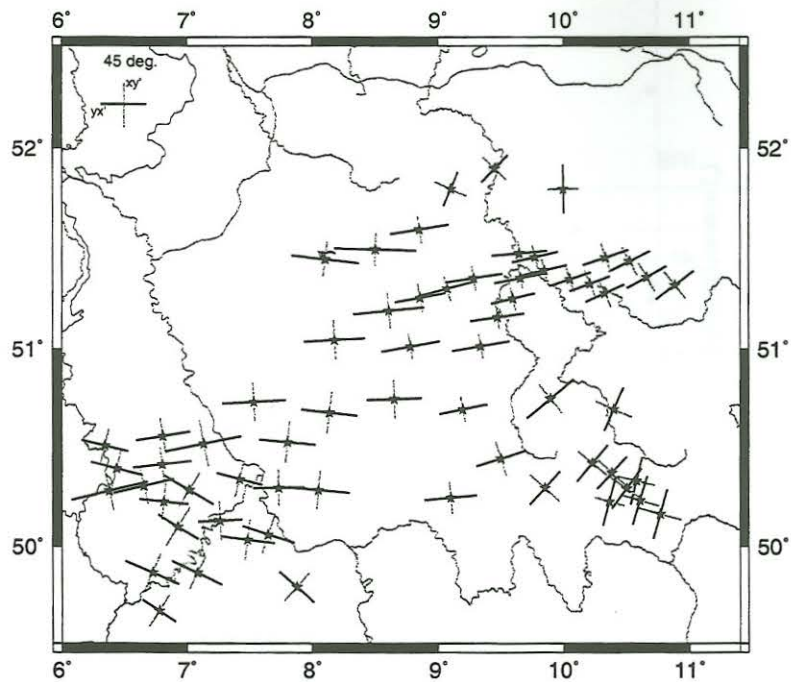


Abb. 4: Oben: Phasen der xy - und yx -Polarisation bei 2730 s. Jede Station ist um den phasensensitiven Rotationswinkel bei 2730 s rotiert. Die Länge eines Balkens ist ein Maß für die (rotierte) Phase. Unten: Die Richtung jedes Balkens gibt die Richtung des phasensensitiven Rotationswinkels bei 2730 s wieder. Die Länge ist ein Maß für die Phasenaufspaltung im um diesen Winkel rotierten Koordinatensystem.

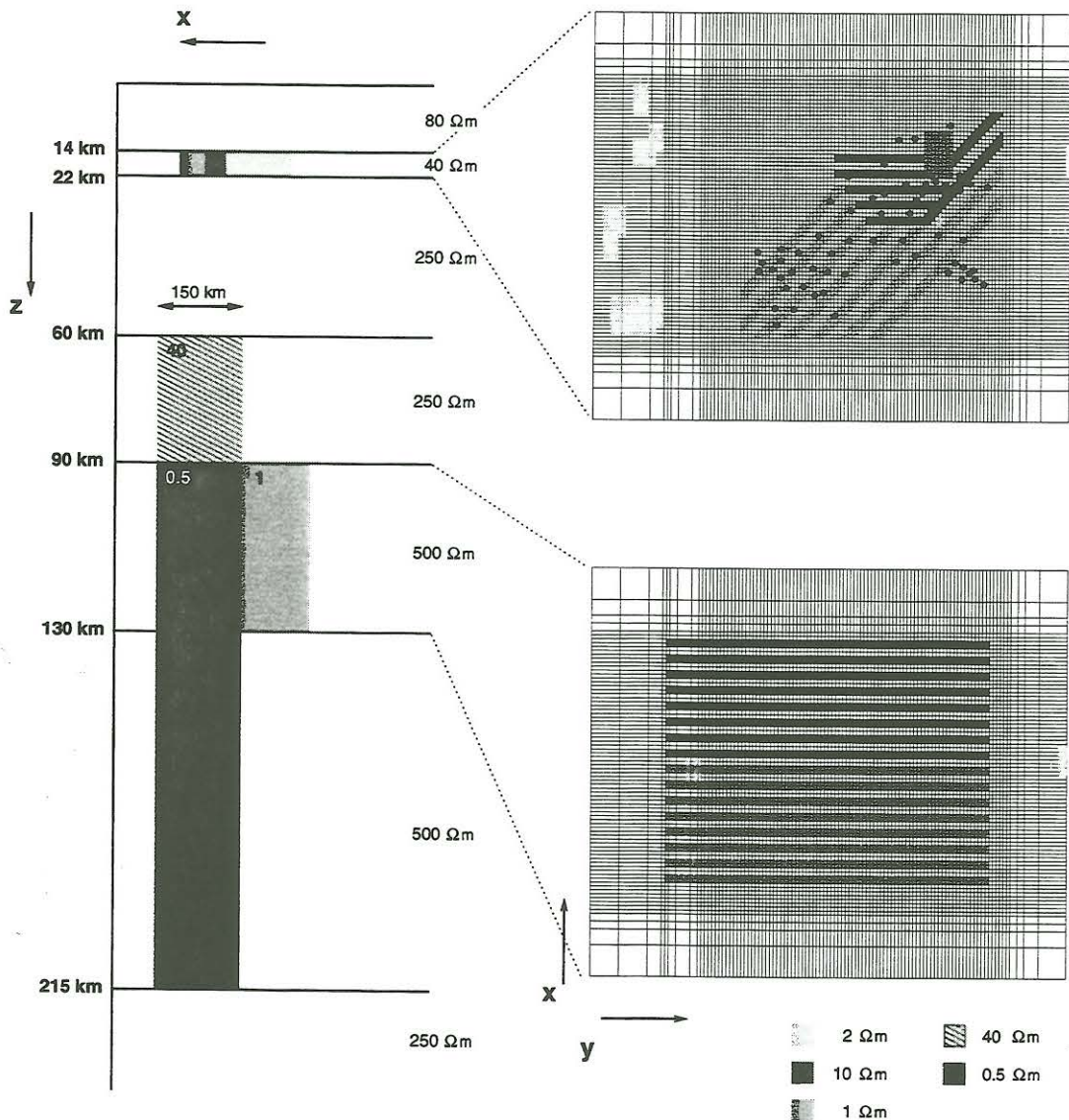


Abb. 5: Dreidimensionales Leitfähigkeitsmodell für den Bereich des Meßgebietes.

in nord-süd- und ost-westlicher Richtung. Aus dem Leitfähigkeitsmodell erhält man für den oberen Mantel einen *Anisotropiekoeffizienten*¹ von 15.8. Um die nordwärts ansteigende Phasenaufspaltung zu berücksichtigen, ist die Anisotropie und Mächtigkeit der Schicht im Norden vergrößert. Zur Vereinfachung nicht in die Darstellung mit aufgenommen, aber im Modell berücksichtigt sind das norddeutsche Sedimentbecken (LOSECKE et al. 1978), die Göttinger D-Anomalie (PETER 1994) und die Krustenanomalie in der Eifel (LEIBECKER 2000). Abbildung 6 zeigt die Anpassung der Phasenkurven der acht charakteristischen Stationen. Die erste anisotrope Schicht gibt für den Bereich der Kruste bei kurzen Perioden den generellen Trend in den Daten wieder. Für lange Perioden passt die zweite anisotrope Schicht die nordwärts ansteigende Phasenaufspaltung gut an, lediglich die maximale Aufspaltung für die nördlichen Stationen wird nicht erreicht. Abbildung 7 zeigt den Frequenzgang der phasensensitiven Rotationswinkel mit Modellanpassung. Für kurze

¹Der Anisotropiekoeffizient ist definiert als $\lambda = \sqrt{\frac{\sigma_{\parallel}}{\sigma_{\perp}}}$

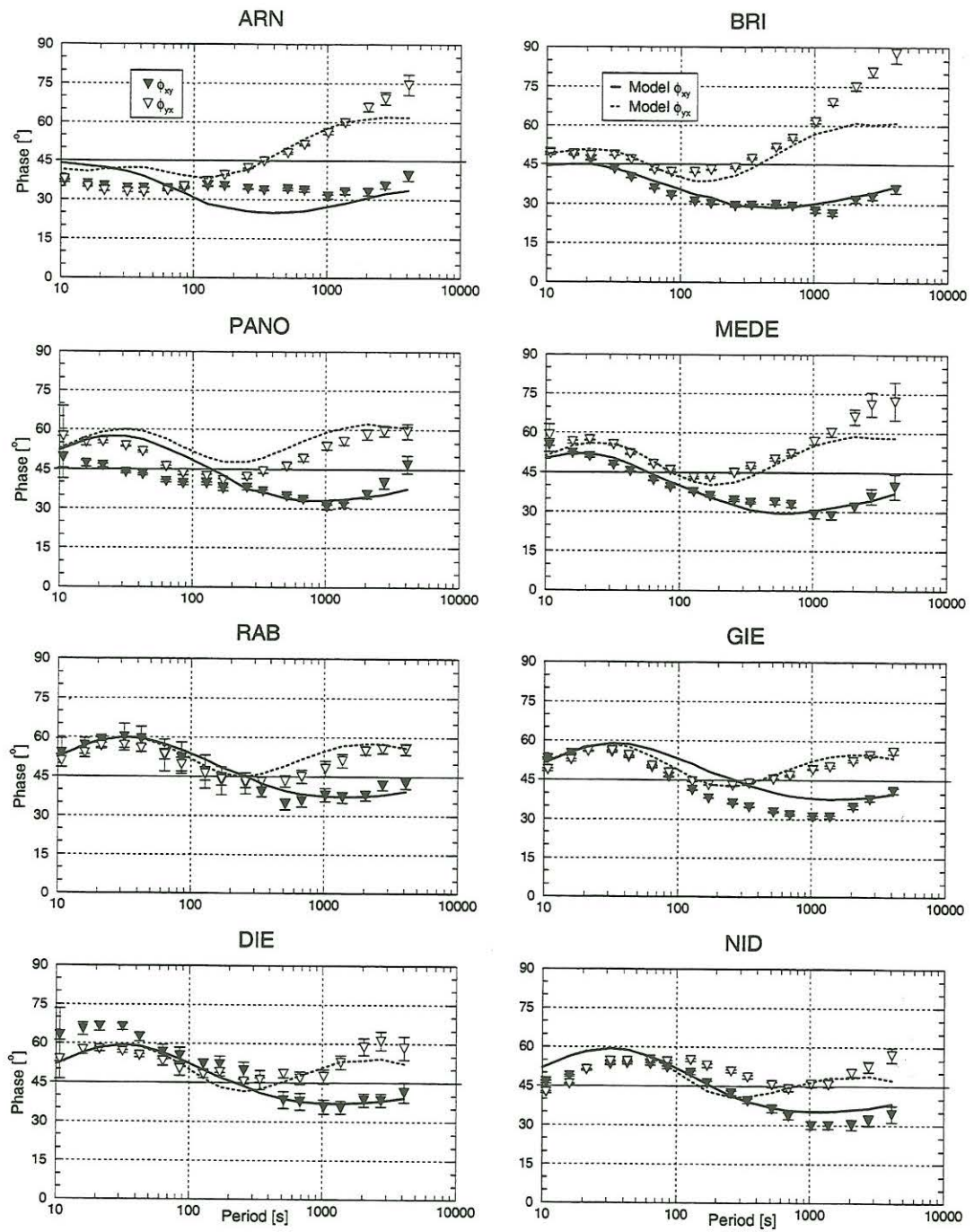


Abb. 6: Datenanpassung durch das in Abb. 5 beschriebene Modell.

Perioden fällt sofort auf, daß das stark vereinfachte Modell für die Kruste noch nicht ausreicht, die Daten zu erklären. Bei langen Perioden passt die anisotrope Schicht im oberen Mantel die Daten mit Rotationswinkeln von 0° oder 90° an.

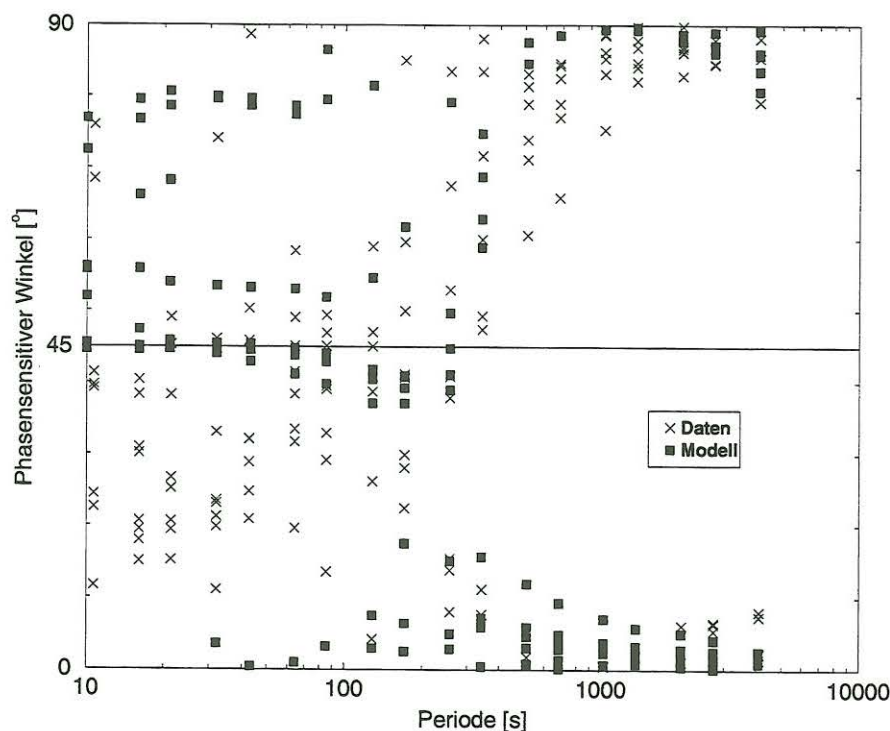


Abb. 7: Frequenzgang der phasensensitiven Rotationswinkel der acht charakteristischen Stationen mit Modellanpassung.

4 Diskussion

Durch die Zusammenfassung und Erweiterung früherer elektromagnetischer Messungen (PETER 1994; LEIBECKER 2000; BAHR und DUBA 2000) liegt ein Datensatz vor, mit welchem eine Auflösung von Leitfähigkeitsverteilungen im oberen Mantel möglich ist.

Die Interpretation und Modellierung des ausgedehnten Bereichs großer Phasenaufspaltung mit einheitlichem phasensensitiven Rotationswinkel bei langen Perioden, ergibt im oberen Mantel unter dem Meßgebiet eine stark richtungsabhängige Leitfähigkeit. Die Hintergrundwiderstände für den oberen Mantel liegen mit $250\text{--}500 \Omega \text{ m}$ in der für trockenen Olivin in diesem Tiefenbereich vorhergesagten Größenordnung (XU et al. 1998). Die um zwei Größenordnungen differierenden spezifischen Widerstände in Nord-Süd- und Ost-West-Richtung, sowie die Richtung hoher Leitfähigkeit mit 1 S/m , lassen sich jedoch nicht durch trockenen Olivin in Anwesenheit von partieller Schmelze erklären (ROBERTS und TYBURCZY 1999). Eine solch große Anisotropie würde großräumig eine perfekte Vernetzung der gutleitfähigen, geschmolzenen Phase nur in Ost-West-Richtung fordern.

MACKWELL und KOHLSTEDT (1990) fanden entlang der $[100]$ - und $[010]$ -Achsen im Olivinkristall Unterschiede in der H^+ -Ionen-Diffusivität von zwei Größenordnungen. Leitfähigkeit und Diffusivität sind nach der NERNST-EINSTEIN-Gleichung einan-

der proportional. Sind im oberen Mantel die Olivinkristalle großflächig ausgerichtet, so folgt in Anwesenheit von H^+ -Ionen direkt der geforderte Anisotropiekoeffizient $\lambda \approx 10$ (KARATO 1990; LIZARRALDE et al. 1995).

Weitere Modellrechnungen sowie der Vergleich mit seismischen Daten sollen zeigen, ob oder inwieweit die H^+ -Ionenleitfähigkeit im Kristall als Leitfähigkeitsmechanismus favorisiert werden kann.

Literatur

- BAHR, K. (1988). *Interpretation of the magnetotelluric impedance tensor: regional induction and local distortion*. J. Geophys., 62: 119-127.
- BAHR, K. und A. DUBA (2000). *Is the asthenosphere electrically anisotropic?*. Earth Planet. Sci. Lett., 178:87-95.
- KARATO, S. (1990). *The role of hydrogen in the electrical conductivity of the upper mantle*. Nature, 347:272-273.
- LEIBECKER, J. (2000). *Elektromagnetische Arraymessungen im Rheinischen Schiefergebirge: Modelle der elektrischen Leitfähigkeit der Erdkruste und des oberen Mantels mit Verbindungen zum Eifelvulkanismus*. Doktorarbeit, Universität Göttingen.
- LIZARRALDE, D., A. CHAVE, G. HIRTH und A. SCHULTZ (1995). *Northeastern Pacific mantle conductivity profile from long-period magnetotelluric sounding using Hawaii-to-California submarine cable data*. J. Geophys. Res., 100:17837-17854.
- LOSECKE, W., K. KNÖDEL und W. MÜLLER (1978). *Ergebnisse magnetotellurischer Messungen in Norddeutschland*. Prot. Koll. Elektromagnetische Tiefenforschung in Neustadt a. d. Weinstr. vom 11.-13. April 1978.
- MACKIE, R.L., T. MADDEN und P. WANNAMAKER (1993). *Three-dimensional magnetotelluric modeling using difference equations - theory and comparisons to integral equation solutions*. Geophysics, 58:215-226.
- PETER, C. (1994). *Elektrische Leitfähigkeitsmessungen der Erdkruste in Südhannover, Nordhessen und im westlichen Thüringen, abgeleitet aus der elektromagnetischen Induktion durch natürliche Felder*. Doktorarbeit, Universität Göttingen.
- ROBERTS, J.J. und J. TYBURCZY (1999). *Partial-melt electrical conductivity: Influence of melt composition*. Journal of Geophysical Research, 104:7055-7065.
- XU, Y., B. T. POE, T. J. SHANKLAND und D. C. RUBIE (1998). *Electrical Conductivity of Olivine, Wadsleyite, and Ringwoodite Under Upper-Mantle Conditions*. Science, 280:1415-1418.