

# **Magnetotellurische und erdmagnetische Tiefensondierung auf einem Profil in Nordthüringen**

Sven Cyplik, Institut für Geophysik, Göttingen

## **Einführung**

Das Meßgebiet befindet sich im Bereich der Grenze zweier Zonen des Variszikums. Dies ist zum einen die reno-herzynische, zum anderen die saxo-thuringische Zone. Zwischen diesen beiden Zonen befindet sich das Band der Mitteldeutschen Schwelle, das manchmal noch in das Saxo-Thuringikum mit einbezogen wird. Zu den heute sichtbaren Teilen dieser vorwiegend metamorphen Schwelle gehören z.B. Teile des Odenwaldes und des Spessarts, der Kyffhäuser und das Ruhlaer Kristallin. Die drei Stationen des Profils schließen direkt westlich an den Kyffhäuser an (siehe Abbildung 0.1) und liegen somit genau auf der Mitteldeutschen Schwelle. Nach Süden erstreckt sich die flach muldenförmige Triastafel des Thüringer Beckens mit herzynisch (d.h. mit Nordwest-Südost) streichenden Verwerfungen. Im Westen befindet sich die Senkungszone des Eichsfeldes und das Ohmgebirge mit seinen nördlich streichenden Verwerfungen. Im Norden schließlich liegt der Harz. Alle drei Stationen stehen, wie in Abbildung 0.6 zu sehen ist, auf Muschelkalk und den darunter liegenden Schichten des Sandsteins, Zechsteins und des Devons.

Das Datenmaterial wurde während zweier Meßkampagnen angesammelt, in denen an allen drei Stationen in Nordthüringen und an einer Referenzstation auf der Mackenröder Spitze im Göttinger Wald zeitgleiche Registrierungen des erdelektrischen und des erdmagnetischen Feldes durchgeführt wurden. In der ersten Meßkampagne vom 6. April 1994 bis zum 30. Mai 1994 wurden Pulsationen, in der zweiten vom 13. September 1994 bis zum 6. Januar 1995 Variationen aufgezeichnet. Hierzu wurden Induktionsspulenmagnetometer nach Watermann bzw. EDA-Fluxgate Magnetometer und Einkammersonden nach Junge verwendet. Zur Aufzeichnung der Zeitreihen standen KAP und RAP Geräte nach Steveling zur Verfügung. Aus dem gesamten Datenmaterial wurden sowohl magnetotellurische als auch erdmagnetische Übertragungsfunktionen für den Periodenbereich von 10 s bis 1,5 cpd bestimmt.

## **Ergebnisse der Erdmagnetischen Tiefensondierung**

### **Das vertikale magnetische Feld**

Zur Berechnung der Übertragungsfunktionen der vertikalen Magnetfelder werden die horizontalen Magnetfelder der jeweiligen lokalen Station benutzt, und nicht die der Referenzstation MACK, da dort auf Grund der Göttinger D-Anomalie die größten anomalen Horizontalfelder vorliegen. Betrachtet man in Abbildung 0.2 die Periodenabhängigkeit der Induktionspfeile nach Schmucker (der Realpfeil zeigt stets vom guten Leiter weg), so läßt sich für alle drei Stationen annähernd das gleiche Verhalten beobachten. Die Realpfeile drehen mit größer werdender Periode stetig und im Uhrzeigersinn von

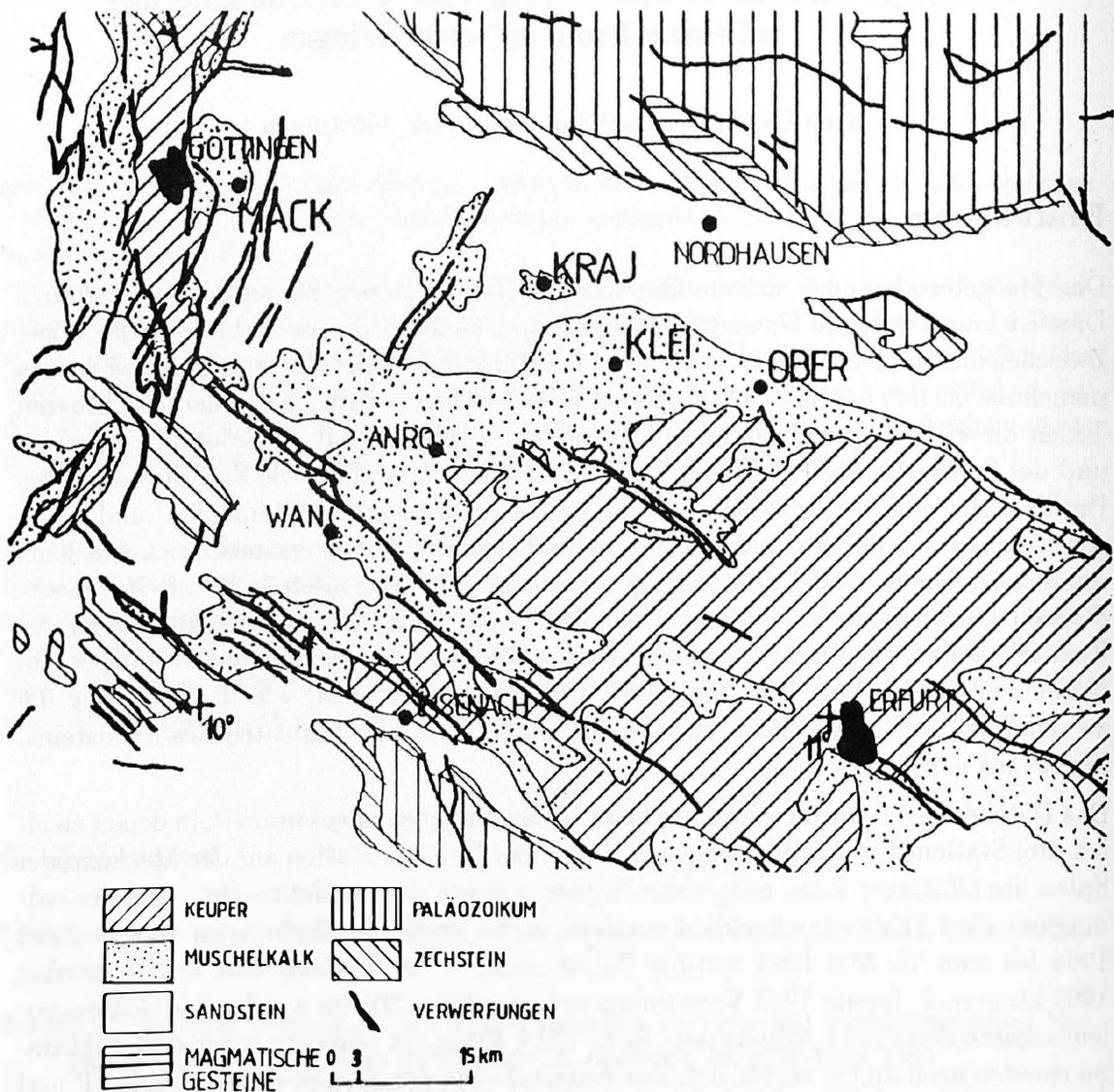


Abb. 0.1: Die Lage der Stationen

einer nördlichen bzw. nordöstlichen Richtung auf eine eher südöstliche Richtung. Bei den kürzesten Perioden zeigen sich gewisse Unterschiede zwischen den zwei westlichen Stationen und der östlichsten, die auf lokale Leitfähigkeitsstrukturen zurückzuführen sind. Während die fast direkt nach Norden zeigenden Pfeile für KRAJ und KLEI einen lokalen südlich liegenden guten Leiter anzeigen, deutet die östliche Richtung an der Station OBER auf einen guten Leiter im Westen hin. Möglicherweise sehen die drei Stationen die gleiche oberflächennahe Struktur, die ungefähr in Richtung West-Ost streicht und zwischen den Stationen KLEI und OBER endet. Mit wachsender Periode nimmt der Einfluß der lokalen Strukturen ab, so daß bei OBER die Pfeile bei  $T \approx 100$  s sogar fast vollständig verschwinden. Es macht sich dafür immer stärker ein im Westen liegender und ungefähr Nord-Süd streichender guter Leiter, die Göttinger

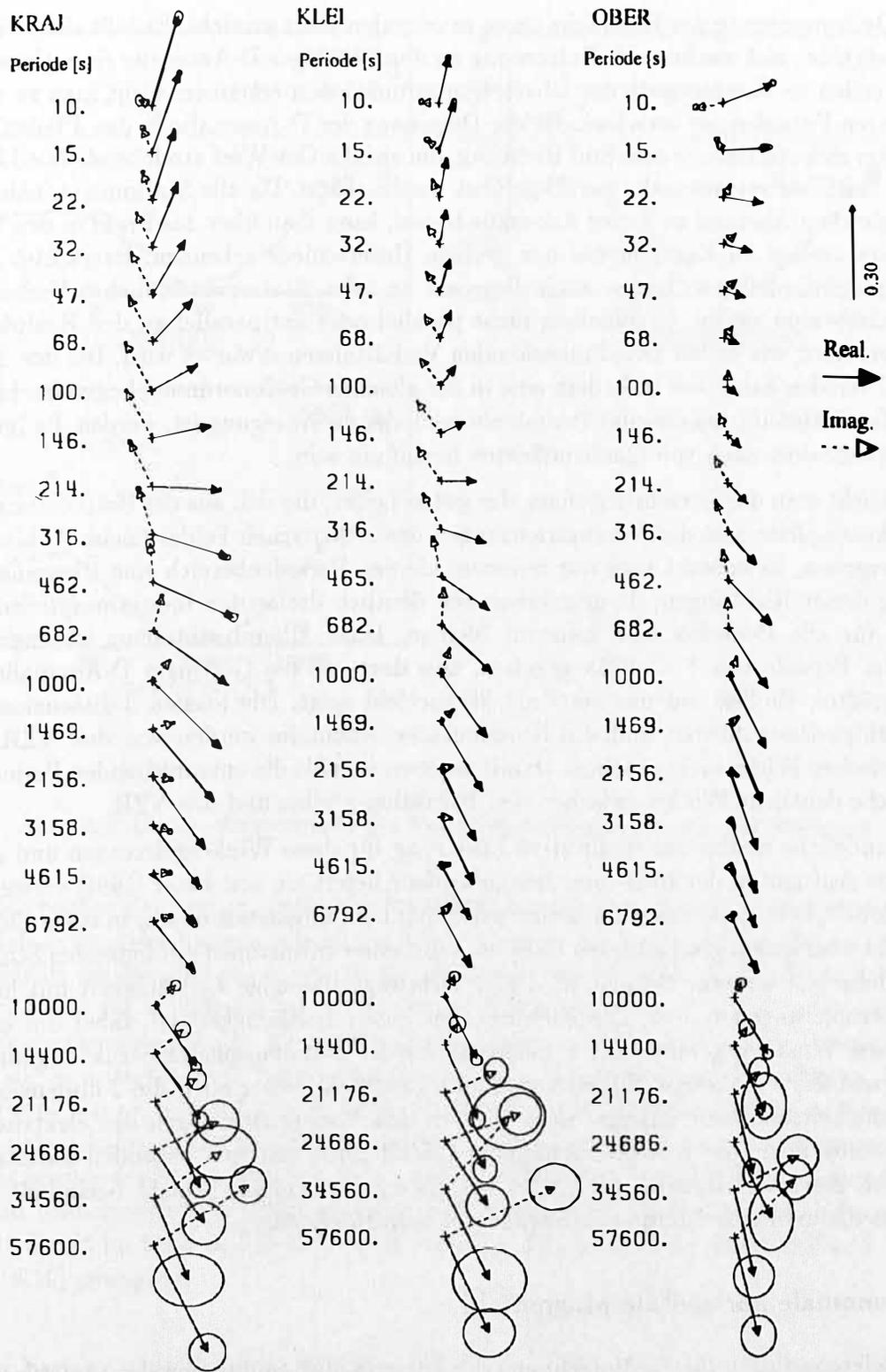


Abb. 0.2: Die Periodenabhängigkeit der Induktionspfeile

D-Anomalie, bemerkbar. Ihr größter Einfluß zeigt sich bei der Periode von ca. 500 s, wo

die Ostkomponente des Realpfeils einen maximalen Wert erreicht. Es läßt sich, wie zu erwarten ist, mit wachsender Entfernung zu der Göttinger D-Anomalie eine Abnahme der reellen  $z_D$ -Komponente der Übertragungsfunktionen erkennen. Geht man zu noch größeren Perioden, so verschwindet die Dominanz der D-Anomalie in den Pfeilen und es zeigt sich zusätzlich eine Süd Richtung, die auf die Ost-West streichende Norddeutsche Leitfähigkeitsanomalie zurückgeführt werden kann. Da alle Stationen annähernd den gleichen Abstand zu dieser Anomalie haben, kann man über das Profil in den Werten der reellen  $z_H$ -Komponente nur geringe Unterschiede erkennen. Betrachtet man die Imaginärpfeile, so zeigen auch diese ein an allen Stationen ähnliches Verhalten, allerdings sind sie im Allgemeinen nicht parallel oder antiparallel zu den Realpfeilen ausgerichtet, wie es bei zweidimensionalen Verhältnissen erwartet wird. Bei den längsten Perioden haben sie außerdem eine in der gleichen Größenordnung liegenden Länge wie die Realpfeile. Da dies der Periodenbereich der Sq-Anregung ist, werden die Induktionspfeile dort auch von Quelleneffekten beeinflusst sein.

Vergleicht man die Streichrichtungen der guten Leiter, die sich aus der Betrachtung der Induktionspfeile und der Vorzugsrichtungen des elektrischen Feldes (siehe Abbildung 0.6) ergeben, so erkennt man nur in einem kleinen Periodenbereich eine Übereinstimmung dieser Richtungen, da gegenüber den deutlich drehenden Induktionspfeilen die VZR für alle Perioden sehr konstant bleiben. Diese Übereinstimmung ist ungefähr bei der Periode von  $T = 462$  s gegeben, also dort, wo die Göttinger D-Anomalie ihren größten Einfluß auf das vertikale Magnetfeld zeigt. Die lokalen 3-dimensionalen Leitfähigkeitsstrukturen und die Norddeutsche Anomalie werden von den VZR des elektrischen Feldes nicht gesehen. Damit ergeben sich für die entsprechenden Periodenbereiche deutliche Winkel zwischen den Induktionspfeilen und den VZR.

Eine mögliche wenigstens qualitative Erklärung für diese Winkeldifferenzen und auch für das Aufspalten der Real- und Imaginärpfeile liefert ein von Peter [1994] verwendetes Modell, bestehend aus einer 2-dimensionalen Leitfähigkeitsanomalie in einer dünnen Schicht über einem geschichteten Halbraum mit einer anisotropen gut leitenden Schicht. Für diese gut leitende Schicht wird eine richtungsabhängige Leitfähigkeit mit hoher Anisotropie angenommen. Die Richtung der guten Leitfähigkeit ist dabei um einen gewissen Winkel gegenüber der Streichrichtung der 2-dimensionalen Struktur gedreht. Während der aus diesem Modell berechnete Realpfeil immer noch die 2-dimensionale Leitfähigkeitsanomalie anzeigt, sieht man in den Vorzugsrichtungen des elektrischen Feldes nur noch die richtungsabhängige Leitfähigkeit der gut leitenden anisotropen Schicht. Auch der Imaginärpfeil wird von dieser anisotropen Schicht beeinflusst und besitzt dadurch eine Komponente senkrecht zum Realpfeil.

## Das anomale horizontale Magnetfeld

Als Referenzstation für die Berechnung der Übertragungsfunktionen der anomalen horizontalen Magnetfelder wird die im Göttinger Wald liegende Station MACK benutzt. Die  $d_D$ -Komponente, in welcher sich die Göttinger D-Anomalie bemerkbar macht, ist an allen drei Stationen über den gesamten Periodenbereich die dominierende Komponente des Perturbationstensors. Die Göttinger D-Anomalie kann über den gesamten Perioden-

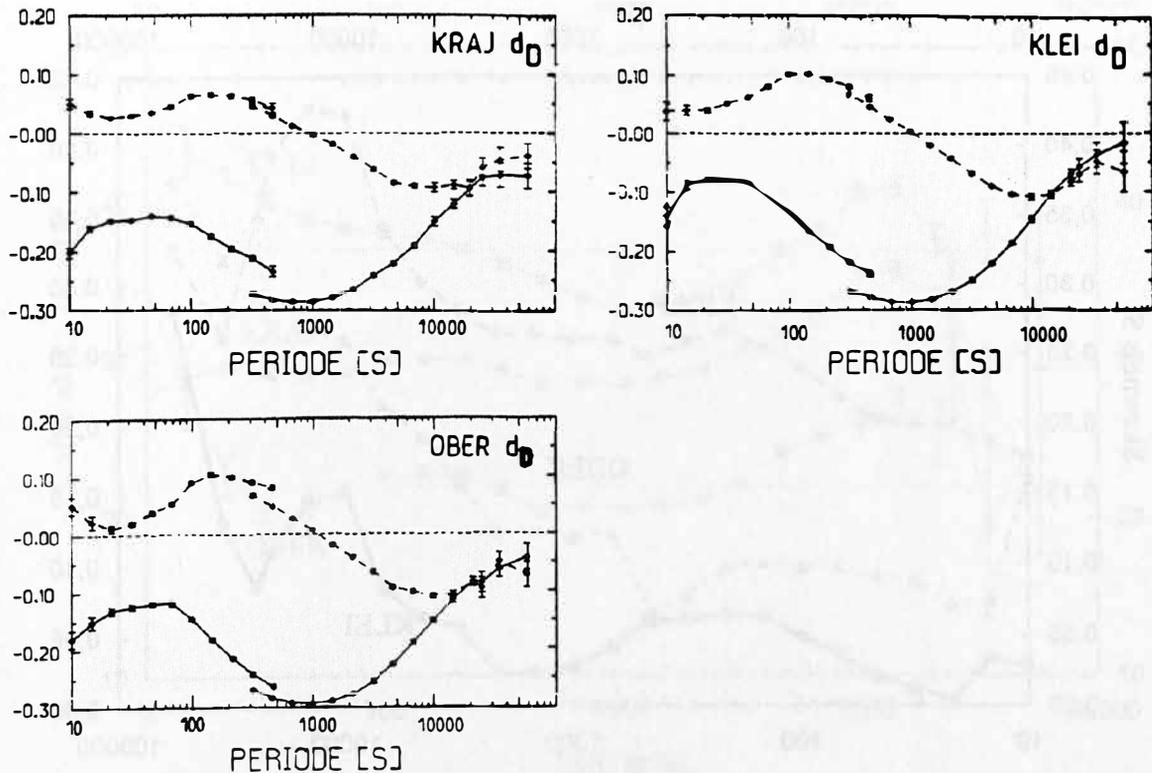


Abb. 0.3: Die  $d_D$ -Komponente des Perturbationstensors für alle drei Stationen

bereich beobachtet werden, siehe Abbildung 0.3, und zeigt an allen Stationen einen sehr ähnlich Verlauf der Kurven sowohl des Real- als auch des Imaginärteils. Bei ca. 1000 s durchläuft der Realteil ein ausgeprägtes Minimum, dessen Wert für KRAJ und KLEI bei  $\approx -0.28$  für OBER bei  $\approx -0.29$  liegt. Die Differenz von 0.01 liegt unterhalb der Auflösungsgenauigkeit der Meßgeräte und ist damit nicht relevant. Der Imaginärteil hat, wie es erwartet wird, bei maximalem Realteil gerade einen Nulldurchgang. Über das Profil von ca. 30 km Länge bleiben die Minimumswerte innerhalb der Auflösungsgenauigkeit konstant. Es ist damit nach Osten hin keine Abnahme der D-Komponente des Magnetfeldes zu beobachten. D.h., der Einflußbereich der Göttinger D-Anomalie scheint spätestens an der Station KRAJ beendet zu sein. Die Göttinger D-Anomalie klingt damit im nord-östlichen Bereich schneller ab, als dies bei Peter [1994, S. 104, Abb. 8.10] gezeigt ist.

## Ergebnisse der Magnetotellurik

Die rotationsinvariante Skewness als ein Anhaltspunkt für die Dimensionalität der Leitfähigkeitsstruktur im Erdboden ist in Abbildung 0.4 für alle drei Stationen dargestellt. An den Stationen KLEI und OBER schwankt sie in dem weiten Periodenbereich

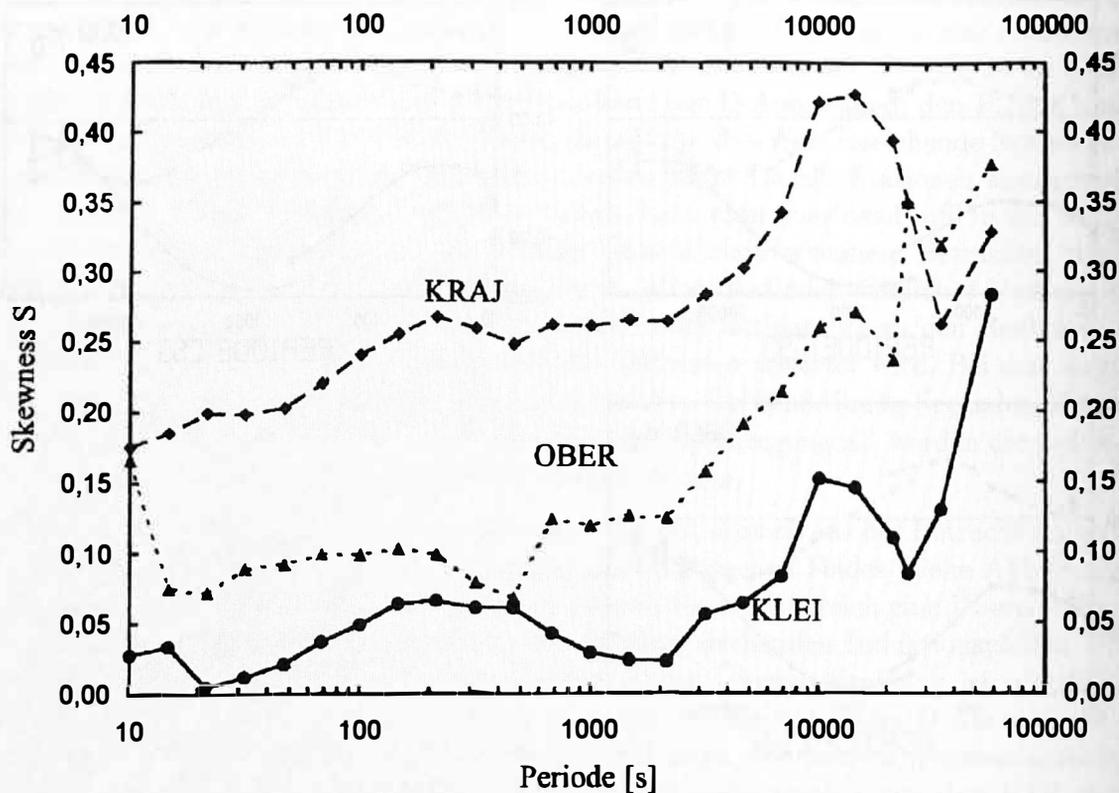


Abb. 0.4: Verlauf der Skewness für alle drei Stationen

von  $T = 10 \text{ s}$  bis zu  $T \approx 2000 \text{ s}$  nur wenig um einen konstanten Mittelwert, der bei KLEI  $S \approx 0.04$  und bei OBER  $S \approx 0.1$  beträgt. Erst zu höheren Perioden hin ist ein deutlicher Anstieg erkennbar. KRAJ zeigt ein etwas anderes Verhalten. Dort findet bis  $T = 200 \text{ s}$  ein leichter wellenförmiger Anstieg von  $S \approx 0.18$  auf  $S \approx 0.26$  statt, woraufhin die Skewness relativ konstant bis  $T \approx 2000 \text{ s}$  auf diesem Niveau bleibt, um dann wie bei den beiden anderen Stationen deutlich anzusteigen auf  $S \approx 0.42$  ( $T = 10000 \text{ s}$ ). Die größtenteils geringe Skewness bei KLEI und OBER weist auf eine 2-dimensionale Interpretierbarkeit beider Stationen hin, auch KRAJ kann unter Umständen im unteren Periodenbereich noch 2-dimensional aufgefaßt werden, für Perioden um  $T = 10000 \text{ s}$  aber möglicherweise nicht mehr. Ein Bild von den Vorzugsrichtungen (VZR) des elektrischen Feldes erhält man durch Auftragung der Beträge (nach Siemon) des um den jeweiligen Swiftwinkel gedrehten Impedanzensors. An allen drei Stationen weisen die Kreuze der VZR (Abbildung 0.6) auf eine ausgeprägte 2-dimensionale laterale Leitfähigkeitsstruktur hin. Die Richtung der guten Leitfähigkeit wird durch den kleinen Anteil des Impedanzensors angezeigt. Sie läßt sich durch Betrachtung des Swiftwinkels näher bestimmen. Dieser variiert zwar bei einem Vergleich der einzelnen Stationen untereinander in einem Bereich von  $\approx 20 \text{ Grad}$ , schwankt aber an jedem Ort für sich betrachtet über den gesamten Periodenbereich nur geringfügig um einen Mittelwert, wie in Abbildung 0.5 zu sehen ist. So erhält man längs des Profils von Westen nach Osten hin folgende durchschnittliche Swiftwinkel:

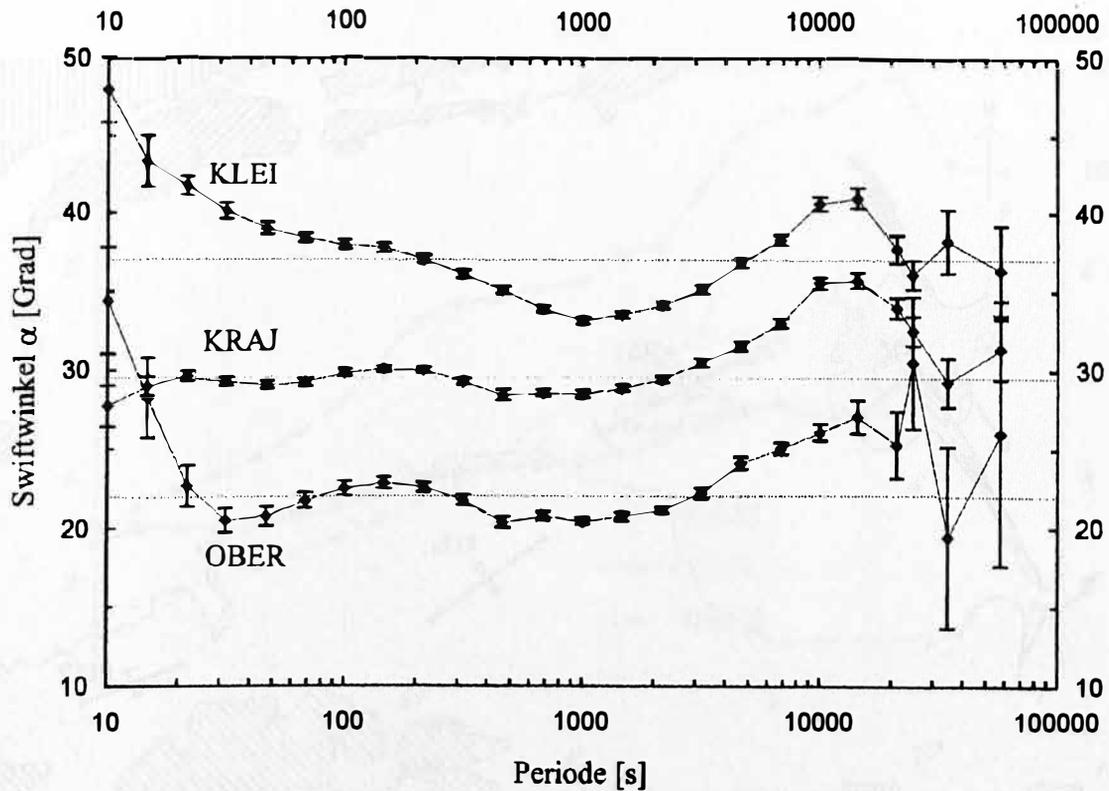


Abb. 0.5: Vergleich der Swiftwinkel; die dünnen horizontalen Linien geben den mittleren Swiftwinkel für jede Station an.

KRAJ:  $\alpha = 29.5 \text{ Grad}$     KLEI:  $\alpha = 37 \text{ Grad}$     OBER:  $\alpha = 22 \text{ Grad}$

Man erkennt dabei keine einheitliche Entwicklung über das Profil. Allgemein fällt eine Übereinstimmung der Richtung der guten Leitfähigkeit mit der Streichrichtung der Verwerfungen des Ohngebirges westlich des Meßgebietes auf. Da die VZR aber über den gesamten ausgewerteten Periodenbereich nahezu konstant bleiben, sind diese Verwerfungen auf Grund ihrer kleinräumigen und oberflächennahen Struktur nicht als Erklärung geeignet. Vielmehr ist dafür eine großräumigere Nordost streichende Leitfähigkeitsanomalie notwendig. Die im allgemeinen große und nach Osten hin nur langsam abnehmende Anisotropie, siehe Abbildung 0.7, läßt sich nur schwer durch eine isolierte 2-D Struktur im Westen erklären, da die Anisotropie sonst viel schneller abnehmen sollte. Vielmehr deutet dies Verhalten auf eine anisotrope Schicht mit sehr guter Leitfähigkeit in Richtung Nord-Ost und sehr viel schlechtere Leitfähigkeit senkrecht dazu hin. Diese Schicht scheint sich bei einem Vergleich mit Ergebnissen von Peter annähernd unverändert von östlich Göttingens ab bis zu der östlichsten Station OBER zu erstrecken. Allgemein ist an allen drei Stationen meines Profils ein gleichmäßiger Anstieg der Anisotropie bis zu Perioden von  $T \approx 10000 \text{ s}$  zu verzeichnen. Auf dem gesamten Profil liegt sie stets über 1, in OBER jedoch für die kurzen Perioden nur wenig. Der Anstieg an den zwei äußeren Stationen KRAJ und OBER erfolgt steiler als

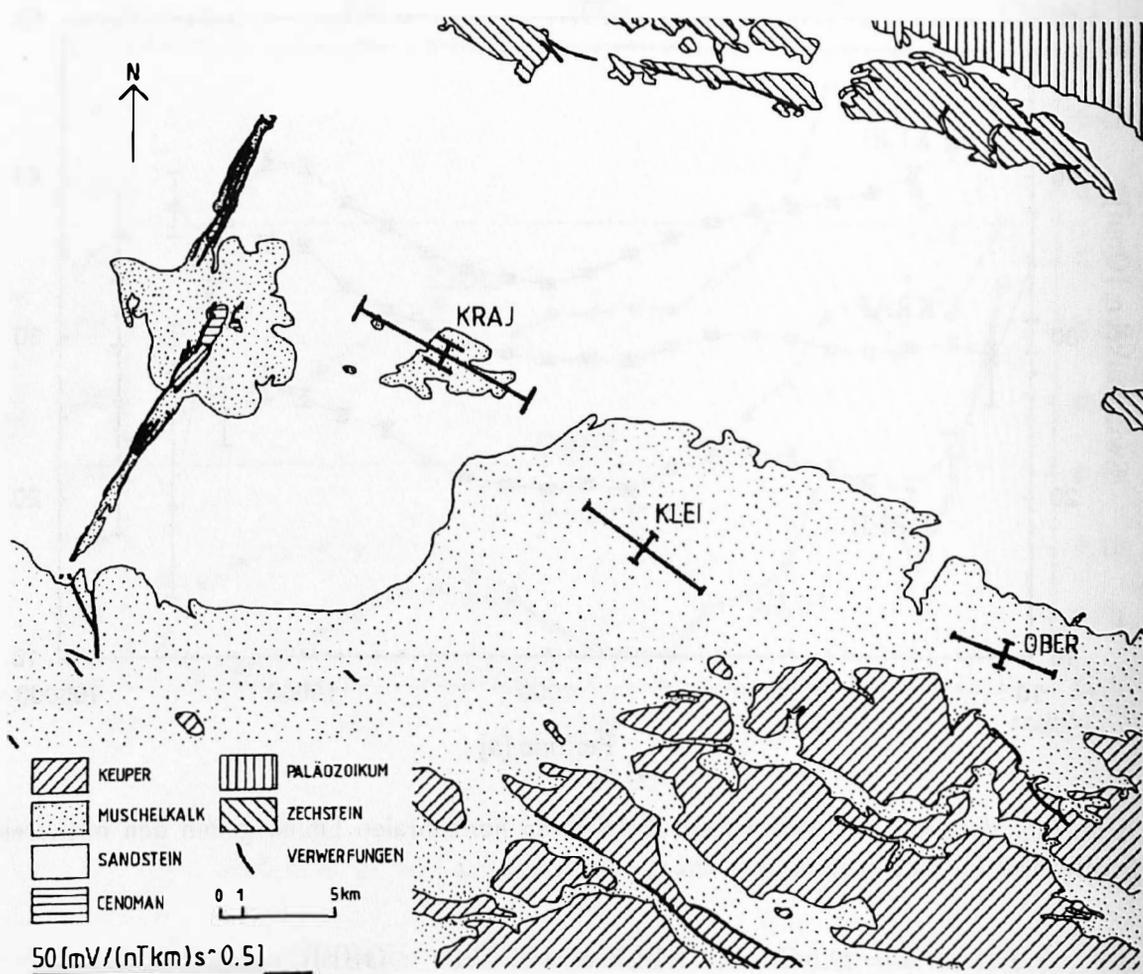


Abb. 0.6: Die Vorzugsrichtungen für  $T = 462$  s

der in KLEI, so daß in KRAJ schließlich Werte von  $a \approx 12$  in Ober von  $a \approx 7$  aber in KLEI höchstens von  $a \approx 5$  erreicht werden.

Obwohl die hohe Anisotropie, der Verlauf der Skewness und die Vorzugsrichtungen an allen drei Stationen auf eine mindestens 2-dimensionale Struktur hinweisen, werden die, strenggenommen nur für den 1-dimensionalen Fall abgeleiteten,  $\rho^* - z^*$  Kurven nach Schmucker zur weiteren Interpretation verwendet. Der offensichtlichen 2-Dimensionalität wird Rechnung getragen, indem der Impedanztensor auf die VZR gedreht wird und dann die beiden Nebendiagonalelemente getrennt behandelt werden. Alle weiteren Betrachtungen erfolgen somit in Koordinatensystemen, die für die einzelnen Stationen um den entsprechenden mittleren Swiftwinkel gedreht sind. Die  $x'$ -Achsen der gedrehten Koordinatensysteme weisen durchschnittlich ca.  $30$  Grad nach Osten von der magnetischen Nordrichtung weg und zeigen in Richtung der erhöhten Leitfähigkeit der angenommenen 2-dimensionalen Struktur. Deshalb werden im Folgenden die Komponenten  $Z_{x'y'}$  der Impedanztensoren der E-Polarisation zugeordnet. Dementsprechend wird die senkrecht dazu stehende Richtung, also die Richtung der  $y'$ -Achse und die dazugehörigen Komponenten  $Z_{y'x'}$ , als B-Polarisation bezeichnet. In

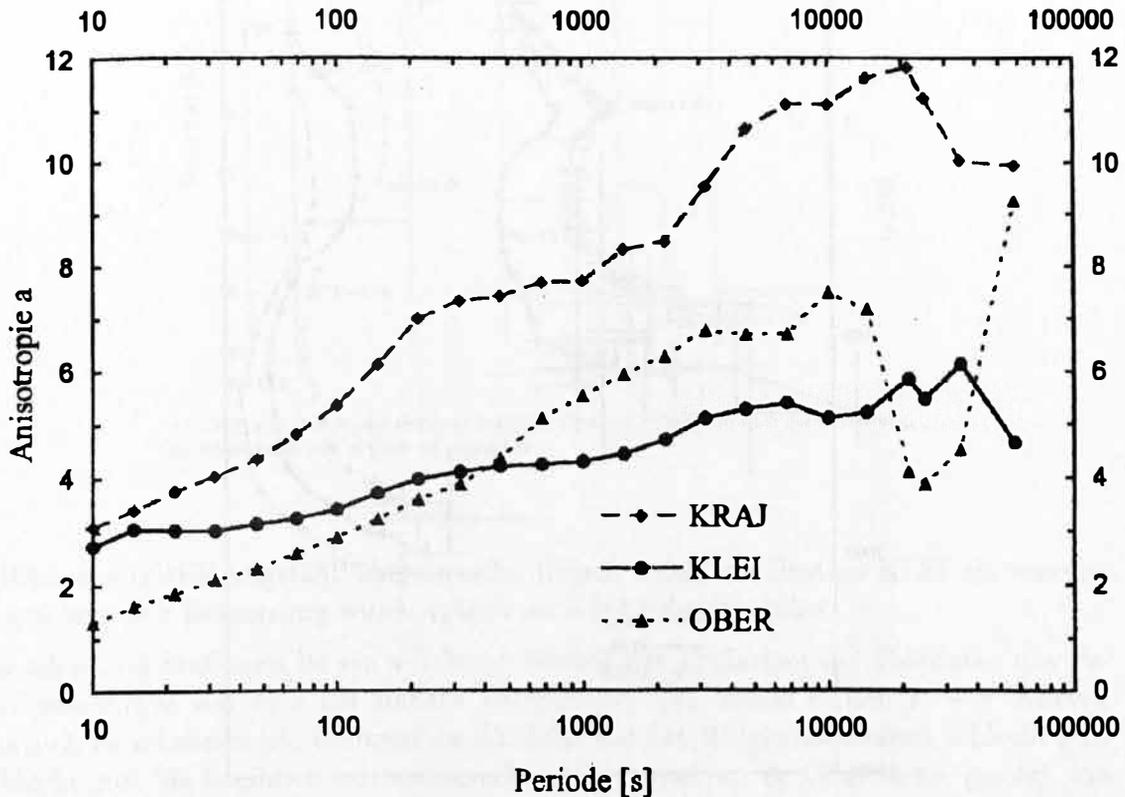


Abb. 0.7: Die Anisotropie, jeweils nach Drehung des Impedanztensors um den stationseigenen mittleren Swiftwinkel

der Abbildung 0.8 sind die  $\rho^* - z^*$  Kurven beider Polarisierungen dargestellt. Die Form der Kurven legt für beide Polarisierungen eine Interpretation der Leitfähigkeit des Untergrundes durch vier Schichten nahe. Es fallen die an den verschiedenen Stationen qualitativ sehr ähnlichen Verläufe der Kurven auf. Die Kurven der B-Polarisation der einzelnen Stationen sind aber sowohl in der Tiefe als auch im Widerstand gegeneinander verschoben. Das gleiche Verhalten erkennt man auch für die Kurve der E-Polarisation der Station KLEI gegenüber den annähernd direkt übereinander liegenden Kurven für KRAJ und OBER. All dies ist ein Hinweis auf eine Verzerrung des elektrischen Feldes an wenigstens zwei der drei Stationen.

In der E-Polarisation zeigt sich ungefähr bei der Periode  $T = 146$  s ein ausgeprägter guter Leiter in der Erdkruste in einer scheinbaren Tiefe von ca. 8 bis 9 km, der auf einen relativ kleinen Tiefenbereich begrenzt ist. Sein minimaler scheinbarer Widerstand beträgt für die beiden äußeren Stationen ca.  $3 \Omega m$  und für KLEI etwa  $6 \Omega m$ . Zu kürzeren Perioden hin steigt der scheinbare Widerstand an der mittleren Station weit weniger stark an als an den beiden äußeren Stationen. Das für die Periode von  $T = 68$  s sichtbare Widerstandsminimum des guten Leiters in der B-Polarisation ist nur schwach ausgebildet, erreicht dort Werte von  $100 \Omega m$  (OBER) bis  $300 \Omega m$  (KRAJ) und ist zu größeren Tiefen von ca. 15 bis 20 km verschoben. Dem guten Leiter folgt in beiden

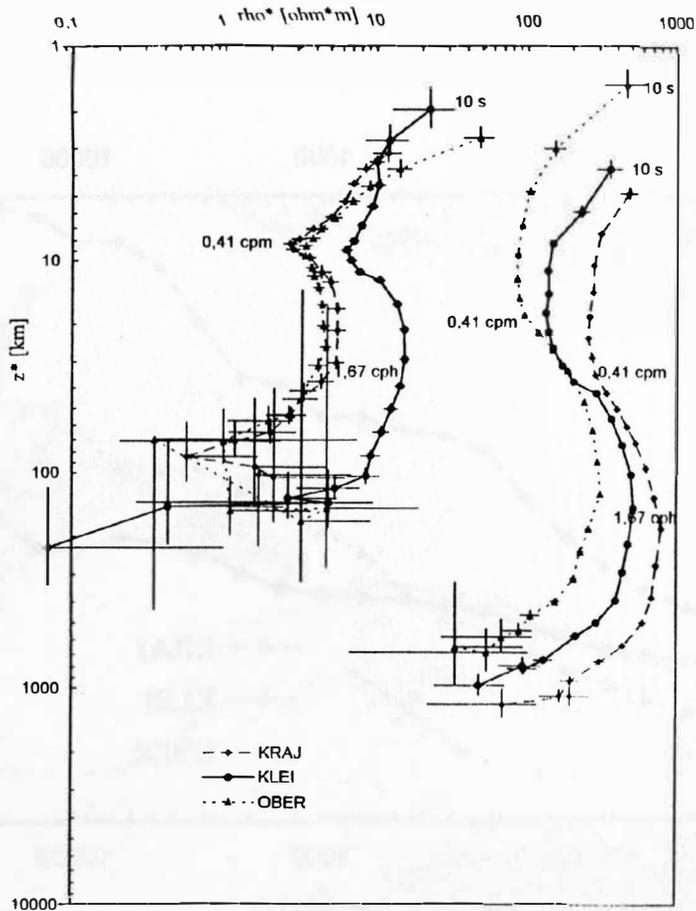


Abb. 0.8:  $\rho^* - z^*$ -Kurven der Stationen KRAJ, KLEI und OBER für den Periodenbereich von 10 s (6 cpm) bis 57600 s (1.5 cpm) (für 24 logarithmisch äquidistante Perioden) nach Drehung des Koordinatensystem um 29,5 (KRAJ), 37 (KLEI), 22 (OBER) Grad

Polarisationen ein ausgedehntes  $\rho^*$ -Maximum. Dabei steigt der Widerstand in der B-Polarisation an allen drei Stationen auf das ca 3.5-fache an. In der E-Polarisation ist der schlechte Leiter an den einzelnen Stationen unterschiedlich stark ausgeprägt. Mit den größten Perioden taucht man in einen zweiten abschließenden guten Leiter ein, dessen Unterkante nicht mehr aufgelöst werden kann, da selbst die größte Frequenz von 1.5 cpm ihn nicht mehr durchdringt. Sein Widerstand scheint noch geringer als der des guten Krustenleiters zu sein. Der Anstieg der Leitfähigkeit läßt sich auf den Tiefenbereich von ca. 30 bis 200 km (E-Polarisation) bzw. 200 bis 1000 km (B-Polarisation) festlegen. Dieser zweite gute Leiter liegt demnach im Erdmantel.

## 1-D Modellrechnung

Zur weiteren Interpretation wurden mit Hilfe des  $\Psi$ -Algorithmus nach Schmucker 1-D Leitfähigkeitsmodellen für die E-Polarisation berechnet. Da es Anzeichen für eine Verzerrung des elektrischen Feldes an einzelnen Stationen gab, wurde vor dieser Modellrechnung noch eine Entzerrung durchgeführt. Diese Entzerrung erfolgte relativ zu einer der drei Stationen. Da die Kurven der E-Polarisation bei den zwei Stationen

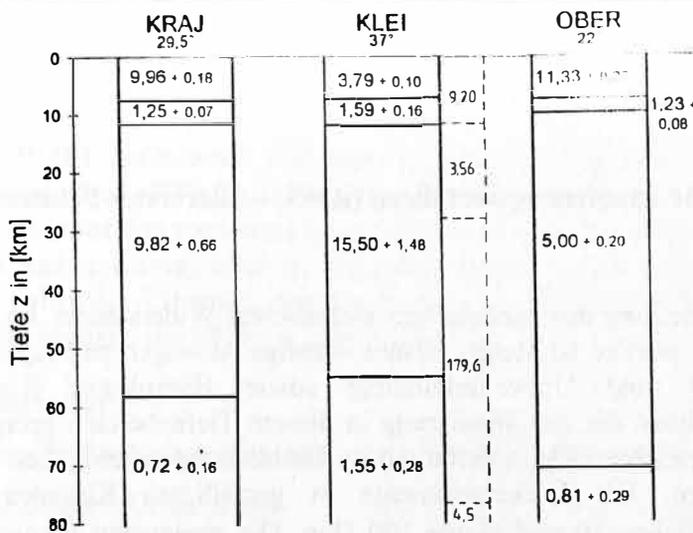


Abb. 0.9: 1-D Modelle der einzelnen Stationen für die E-Polarisation nach der Entzerrung, die Widerstände sind in [ohm m] angegeben

KRAJ und OBER ungefähr übereinander liegen, wurde die Station KLEI als verzerrt angesehen. Die Entzerrung wurde relativ zu KRAJ durchgeführt.

An allen drei Stationen ist ein 4-Schicht Modell zur Erklärung der Felddaten des Periodenbereiches von 10 s bis 20000 s ausreichend. Wie schon in den  $\rho^* - z^*$ -Kurven deutlich zu erkennen ist, besitzen die Modelle die Leitfähigkeitsabfolgen schlecht-gut-schlecht-gut. Sie beginnen mit einem schlechten Leiter an der Oberfläche, gefolgt von einer relativ dünnen Schicht hoher Leitfähigkeit im Tiefenbereich von ca. 7,5 – 12 km. Ihre integrierte Leitfähigkeit beträgt bei KRAJ und KLEI ca. 3000 S bei OBER etwas weniger, ca. 2000 S. Gefolgt wird dieser gute Krustenleiter von einem schlechten Leiter mit Widerständen von ca. 5  $\Omega m$  bis ca. 15  $\Omega m$  (KLEI) und einem abschließenden gut leitfähigen Halbraum, der an den zwei westlichen Stationen in ca. 55 km Tiefe und an der östlichen Stationen in ca. 70 km Tiefe beginnt. Der Widerstand des Halbraumes ist mit 0,7 bis 1,5  $\Omega m$  vergleichbar mit dem des Krustenleiters und sogar etwas geringer. Die entzerrte Station KLEI fügt sich sehr gut in das Bild der beiden anderen Stationen ein. Ein 4-Schicht Modell, welches für die verzerrten Impedanzen der Station KLEI berechnet wurde (gestrichelt), zeigt sowohl eine Verschiebung zu höheren Widerständen, als auch zu größeren Tiefen, die Struktur bleibt jedoch erhalten.

Die oberste schlechter leitende Schicht ist an der mittleren Station KLEI knapp halb so groß wie an den sie einrahmenden Stationen KRAJ und OBER. Ein ähnliches Verhalten zeigen die Stationen ANRO (Peter [1994]) und WAN (Friedrichs [1993]) (siehe Abbildung 0.1) im Hinblick auf deren Nachbarstationen. Möglicherweise befinden sich alle drei Stationen auf der gleichen NO verlaufenden Struktur, welche vielleicht gleichzusetzen ist mit der Mitteldeutschen Schwelle.

## Literatur

- FRIEDRICHS, B., Erdmagnetische und magnetotellurische Tiefensondierung über der Mitteldeutschen Kristallinschwelle in Thüringen, Diplomarbeit, Inst. f. Geophysik, Göttingen, 1993
- PETER, CH., Elektrische Leitfähigkeitsmodelle der Erdkruste in Südhannover, Nordhessen und im westlichen Thüringen, abgeleitet aus der elektromagnetischen Induktion durch natürliche Felder, Diss. Math.-Naturw. Fak. Uni Göttingen, 1994