

A. JUNGE

"150 Tage Langzeitregistrierung bei Göttingen und Augsburg"

Aus der Analyse der Horizontal- und Vertikalkomponenten erdmagnetischer Variationen im Periodenbereich zwischen 3 h und 24 h können Schätzwerte der Widerstandsverteilung des Erdinnern für Tiefen zwischen 250 km und 1000 km bestimmt werden. Magnetotellurische Verfahren bieten eine unabhängige Möglichkeit, solche Schätzwerte zu berechnen, wobei wegen der geringen elektrischen Signalstärken im langperiodischen Kontinuum hohe Anforderungen bezüglich der Basisstabilität und des Rauschverhaltens an die tellurischen Sonden und Aufzeichnungsapparatur gestellt werden. Die von Hempfling (1977) entwickelten 3-Kammer-Tonsonden in Kombination mit einer Ag-AgCl-Elektrode (Filloux, 1967) ermöglichen bei extrem kurzen Sondenabständen von nur 200 m rausch- und driftarme Registrierungen, in denen der Sq-Gang im tellurischen Feld nachgewiesen werden konnte (Hempfling, 1977, Wiens, 1980).

Lokale oberflächennahe Inhomogenitäten der Widerstandsverteilung sollten für längere Perioden eine nahezu frequenzunabhängige Gleichstromverzerrung des elektrischen Feldes bewirken, die durch eine reelle Verzerrungsmatrix \underline{A} beschrieben wird und welche nur über einen bivariaten Ansatz

$$\underline{E} = \underline{Z} \underline{B} = \underline{A} \underline{Z}_n \underline{B}$$

bestimmt werden kann, wobei \underline{E} und \underline{B} die Vektoren des horizontalen tellurischen und magnetischen Feldes, \underline{Z} den Impedanztensor, \underline{Z}_n die aus magnetischen Verfahren berechnete normale Impedanz und \underline{A} die Verzerrungsmatrix darstellen.

Die bis zu 2 Dekaden über dem Kontinuumsniveau liegende Energie der ersten vier Sq-Harmonischen reicht jedoch auf Grund der hier vorhandenen hohen Kohärenz zwischen den horizontalen Magnetfeldkomponenten nur zu einer univariaten Analyse (Hempfling, 1977, Wiens, 1980). Die vollständige Bestimmung des Impedanztensors sowie die Entzerrung des elektrischen Feldes erfordert deshalb eine Analyse im Kontinuum zwischen den Sq-Linien, die nur auf der Basis rausch- und driftarmer Registrierungen des tellurischen Feldes während eines ausreichend langen Zeitraums durchführbar ist.

In einem Geländetest bei Göttingen wurden verschiedene Sondentypen (PVC- und Tonsonden mit unterschiedlichen KCl-Konzentrationen) sowie eine Digital- und eine Analogaufzeichnungsapparatur mit-

einander verglichen (Junge, 1982). Die wichtigsten Ergebnisse seien im folgenden aufgeführt:

Die Temperaturabhängigkeit der Sonden kann bei ausreichender Bodentiefe (>0.5 m) vernachlässigt werden, ein Temperatureinfluß auf die Registrierung kann nur durch die Elektronik der Aufzeichnungsapparatur entstehen.

Für den Frequenzbereich zwischen 1 cpd und 8 cpd beträgt das Rauschniveau der mit hochkonzentrierter KCl-Lösung gefüllten Sonden zusammen mit der Aufzeichnungsapparatur etwa 0.1 mV_{pp} .

Auf der Basis einer Analyse der Sq-Harmonischen war zwischen der analogen und digitalen Aufzeichnungsmethode kein Unterschied feststellbar. Jedoch zeigte sich die Digitalstation wartungsfreundlicher und sparsamer im Leistungsverbrauch.

Die Drifthanfälligkeit der Sondenspannungen konnte durch Verwendung einer gesättigten KCl-Lösung in der inneren Sondenkammer vermindert werden.

Die elektrolytisch wirksame Sondenoberfläche spielt eine wichtige Rolle bei der Stabilisierung der Sondenpotentiale. Sie bestimmt die Größe des Übergangswiderstandes zwischen Elektrode und Erdreich und kann bei dem verwendeten PVC-Sondentyp offensichtlich unter Einfluß von Feuchtigkeitsänderungen im Boden im Gegensatz zu den Hemptling-schen Tonsonden Potentialsprünge bei den Aufzeichnungen verursachen.

Der Vorteil der langen Einsatzfähigkeit der PVC-Sonden wegen ihres geringen Flüssigkeitsverlustes kam bei der Versuchsstation nicht zur Geltung, da dort die Konsistenz des Lehmbodens ein rasches Austrocknen der Tonsonden verhinderte. Der Einfluß des schnelleren Verlusts an KCl bei den Tonsonden wird dabei anscheinend durch eine Langzeitstabilisierung der Ag-AgCl-Elektrodenpotentiale ausgeglichen, so daß im Hinblick auf Messungen langperiodischer tellurischer Variationen bei einer sorgfältigen Auswahl der Meßstationen die Tonsonden geeigneter erscheinen als die PVC-Sonden.

An zwei weit voneinander entfernten Orten, Deppoldshausen (DEP) bei Göttingen und Baiershofen (BAI) bei Augsburg wurde gleichzeitig im Winter 1980/81 das horizontale tellurische Feld mit Sondenabständen von ca. 200 m kontinuierlich gemessen (Junge, 1982). Stündliche Mittelwerte der magnetischen Variationen wurden den Hauptregistrierungen des Göttinger Instituts (GTT) und des Observatoriums Fürstfeldbruck (FUR) entnommen.

Einen Ausschnitt von 40 Tagen aus der 150-tägigen Registrierung der Station DEP zeigt Abb.1. Die sprungfreien Aufzeichnungen der einzelnen Komponenten gestatten für kürzere Zeitsegmente bis zu 20 Tagen eine Trendbeseitigung durch Anpassung eines Polynoms 3. Ordnung, für längere Zeitabschnitte wird eine Hochpaßfilterung durch ein optimales Trapezfilter (Schmucker, 1978) mit einer Abschneidefrequenz von 0.25 cpd bevorzugt.

Abb.2 verdeutlicht die Unsicherheit einer magnetotellurischen Einzelsturmauswertung im Zeitbereich, da nicht-induzierte langperiodische Schwankungen des tellurischen Feldes nicht eindeutig von der Dst-Nachphase unterschieden werden können.

Die räumliche Kohärenz zwischen den elektrischen Feldern von DEP und BAI ist in Abb.3 anhand eines 9-tägigen Registrierbeispiels dargestellt. Zufällig scheint die Verzerrung des elektrischen Nord-Süd-Feldes an beiden Stationen ähnlich zu sein, so daß der Vergleich im Zeitbereich die gute Übereinstimmung der elektrischen Nord-Süd-Komponenten (E_N) nicht nur für den täglichen Gang hervorhebt. Die Ost-West-Komponente (E_E) der Station BAI ist offensichtlich starken Driften unterworfen, die zeitweise sogar die täglichen Variationen, die deutlich kleiner als die der Station DEP sind, überdecken.

Zur Berechnung der Energiedichtespektren der magnetischen und elektrischen Variationen wurden ausgewählte 10-Tage-Segmente nach der Trendbeseitigung in den Frequenzbereich fouriertransformiert. Von den Stationen BAI/FUR standen hierfür acht, von den Stationen DEP/GTT zehn ungestörte 10-Tagesintervalle zur Verfügung. Spektrale Schätzwerte wurden durch Mittelung über die Rohspektren für jede Komponente einzeln berechnet und sind in Abb.4 für einen Frequenzbereich zwischen 0.1 und 8 cpd mit einer Bandbreite von 0.1 cpd aufgetragen, die Doppelpfeile kennzeichnen den 95%-Vertrauensbereich. In allen Spektren heben sich signifikant die Energiedichten der ersten vier Sq-Harmonischen um bis zu fast zwei Dekaden vom Kontinuum ab, wobei im E-Feld im Gegensatz zum Magnetfeld die Energiedichte der zweiten Sq-Harmonischen deutlich am größten ist. Dies ist auf die Periodenabhängigkeit der Signalstärke des E-Feldes zurückzuführen, die vermutlich auch in dem verhältnismäßig konstantem Kontinuumsniveau von etwa 0.1 (mV/km)^2 der E-Felder zwischen 1 und 8 cpd gegenüber dem zu längeren Perioden hin ansteigenden Pegel der Energiedichte der Magnetfelder zu erkennen ist, wo offensichtlich der Einfluß von Dst-Variationen bemerkbar wird. Die Spektren der elektrischen und magnetischen Komponenten der Stationen

BAI und FUR unterschieden sich nur unwesentlich von den in Abb.4 gezeigten Spektren von DEP bzw. GTT.

Ausgehend von dem bivariaten Ansatz $E=Z_1H+Z_2D+\delta E$ wurde für jede E-Feldkomponente die multiple quadratische Kohärenz mit den zugehörigen horizontalen Magnetfeldkomponenten H und D berechnet und ihr Energiedichtespektrum S in einen mit H und D korrelierten und unkorrelierten Anteil S_{kor} und S_{unk} zerlegt, wobei der unkorrelierte Anteil S_{unk} der Energiedichte im folgenden als Rauschanteil bezeichnet wird.

In Abb.5 sind S_{kor} und S_{unk} für E_N und E_E der Stationen DEP und BAI im Frequenzbereich zwischen 0.1 und 8 cpd mit einer Bandbreite von 0.1 cpd zusammen mit den zugehörigen 95%-Vertrauensbereichen aufgetragen. Zwischen 3 cpd und 8 cpd liegt bei beiden Stationen der induzierte Anteil des elektrischen Feldes signifikant über dem nichtinduzierten mit einer Verschlechterung des Signal/Rauschverhältnisses zu den höheren Frequenzen hin, was auf die für kürzere Perioden schwächer werdende magnetische Anregung zurückgeführt wird. Im Frequenzbereich zwischen 1 cpd und 3 cpd, die Sq-Bänder ausgenommen, steigt der Pegel der inkohärenten bis auf das Niveau der kohärenten Energiedichte um etwa eine Dekade bei allen vier E-Feldern an. Aus dem Rauschniveau der E-Felder in DEP ragt eine deutlich zu 1.9 cpd hin verschobene Spitze heraus, welche mit einer Wahrscheinlichkeit von 99% durch die lunare Gezeitenperiode M2 (12.42h) verursacht wird und bei höherer spektraler Auflösung auch im Spektrum von BAI zu erkennen ist (Junge,1982). Im Periodenbereich zwischen einem und zehn Tagen sinkt der Signalpegel der E-Felder deutlich unter das Rauschniveau, was eine Auswertung für längere Perioden als einen Tag sehr erschwert. Der Einfluß nicht induzierter Schwankungen der Sondenspannungen tritt demnach verstärkt im Frequenzbereich unterhalb von 3 cpd auf.

In Abb.6 ist die räumliche Kohärenz der elektrischen und magnetischen Felder dargestellt, indem wieder für den Frequenzbereich von 0.1 bis 8 cpd auf der linken Seite der mit den horizontalen Magnetfeldkomponenten der Göttinger Institutsregistrierung korrelierte und unkorrelierte Anteil der Energiedichte von H und D der Observatoriumsregistrierung von FUR auf der Basis von zehn gemittelten 10-Tagessegmente aufgetragen, und auf der rechten Seite die Energiedichte der beiden E-Feldregistrierungen aus BAI in je einen

mit dem tellurischen Feld aus DEP korrelierten und unkorrelierten Anteil für sieben gemittelte 10-Tagesintervalle zerlegt worden ist.

Die Korrelation der Magnetfelder gelingt selbst für die längsten erfaßten Frequenzbänder sehr gut, das Rauschniveau liegt für fast alle Frequenzbänder bis hin zur Nyquistperiode (hier nicht gezeigt) mindestens eine Dekade unter dem Signalniveau bei etwa $0.1 \text{ (nT)}^2 \text{d}$. Der Anstieg des Rauschpegels unterhalb von 1 cpd hat offensichtlich seine Ursache in einem Nachlassen der Basisstabilität der Magnetometer bezüglich langer Perioden. Für den Periodenbereich zwischen 2 und 12 Stunden erhält man damit eine konstante Rauschamplitude der Magnetfelder von 1 nT, was der Ablesegenauigkeit für die Stundenmittelwerte entspricht.

Die Nordkomponente des elektrischen Feldes der Station BAI ist im Frequenzbereich von 2 bis 8 cpd etwas besser als die Ostkomponente mit dem elektrischen Feld in DEP korreliert, vielleicht bedingt durch den größeren Sondenabstand von E_N (216m) gegenüber E_E (191m) in BAI. In beiden Fällen liegt der Signalpegel für die meisten Frequenzbänder in diesem Periodenbereich signifikant über dem Rauschpegel. Im Frequenzbereich zwischen 4 und 7 cpd beträgt das auf eine Sondenauslage von 200 m normierte Rauschniveau der mit dem E-Feld von DEP korrelierten Nordkomponente von BAI etwa $0.006 \text{ (mV/km)}^2 \text{d}$ und entspricht damit dem im Vorversuch in DEP gemessenen Rauschniveau zwischen direkt nebeneinanderliegenden Sondenstrecken. Demnach ist das induzierte elektrische Feld von BAI und DEP selbst über mehrere hundert Kilometer Entfernung hinweg zumindest in diesem Frequenzbereich ausgezeichnet korreliert. Zwischen 4 und 2 cpd wird das Signal/Rauschverhältnis schlechter, unterhalb von 2 cpd überwiegt der Rauschanteil den Signalanteil des E-Feldes. Dies gilt nicht für die Frequenzbänder der Sq-Harmonischen, bei denen das Signal/Rausch-Verhältnis in der Größenordnung von 20 dB liegt.

Im wesentlichen verhalten sich die unkorrelierten Anteile der Energiedichtespektren der E-Felder bis auf die "Gezeitenspitzen" der Spektren von DEP in Abb.5 nicht signifikant abweichend: Einem verhältnismäßig konstanten Niveau zwischen 0.005 und 0.01 $\text{(mV/km)}^2 \text{d}$ zwischen 8 und 3 cpd schließt sich ein exponentieller Anstieg des Rauschpegels um ca. eineinhalb Dekaden zwischen 3 und 0.1 cpd an.

Die Aufspaltung der Spektren zeigt, daß bei hinreichend langen Zeitreihen die Qualität der Sonden/Aufzeichnungsapparatur auch bei Sondenauslagen von nur 200 m eine magnetotellurische Analyse im Frequenzbereich des Kontinuums zwischen 1 und 8 cpd zuläßt. Da die Darstellung der weiteren Auswertung des vorhandenen Datenmaterials den Rahmen dieses Protokolls sprengen würde, wird an dieser Stelle auf die Diplomarbeit des Autors verwiesen.

Literatur:

Filloux, J.: Oceanic electric currents, geomagnetic variations and the deep electrical conductivity structure of the ocean-continent transition of Central California. Ph. D. Theses Univ. of California, San Diego, 1967.

Hempfling, R.: Beobachtung und Auswertung tagesperiodischer Variationen des erdelektrischen Feldes in der Umgebung von Göttingen. Diss. Math.-Nat. Fak. Uni. Göttingen, 1977.

Junge, A.: Messung und Auswertung langperiodischer Variationen des erdelektrischen Feldes bei Göttingen und Augsburg. Dipl. Arbeit, Math.-Nat. Fak. Uni. Göttingen, 1982.

Schmucker, U.: Auswerteverfahren Göttingen. Protokoll Kolloquium "Elektromagnetische Tiefenforschung", Neustadt/Weinstraße, 163-188, 1978.

Wiens, U.: Vergleichende Registrierungen von Variationen des erdelektrischen und erdmagnetischen Feldes in der Umgebung von Göttingen. Dipl. Arbeit, Math.-Nat. Fak. Uni. Göttingen, 1980.

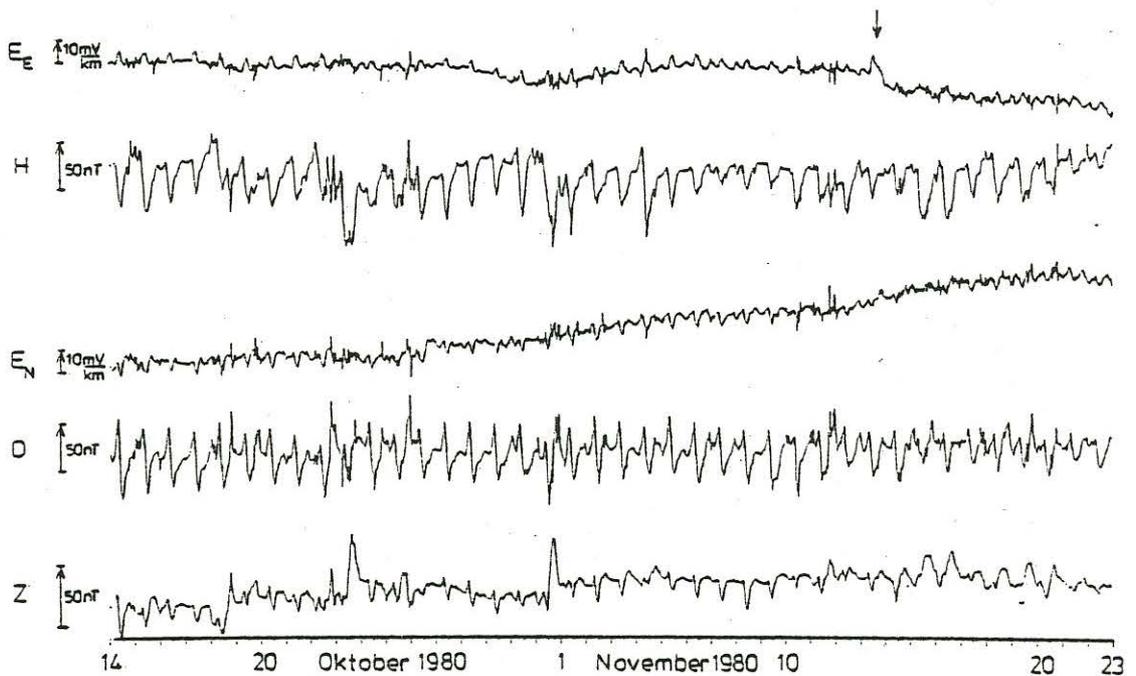


Abb. 1 : Stündliche Mittelwerte für 40 Tage der Originalregistrierungen des E-Feldes der Station DEP und der Magnetfeldkomponenten von GTT.

Es ist deutlich der Tagesgang im E- und B-Feld zu erkennen. E_N zeigt eine starke lineare, nicht induzierte Drift, der Pfeil kennzeichnet ein kurzzeitige nichtinduzierte Störung von E_E .

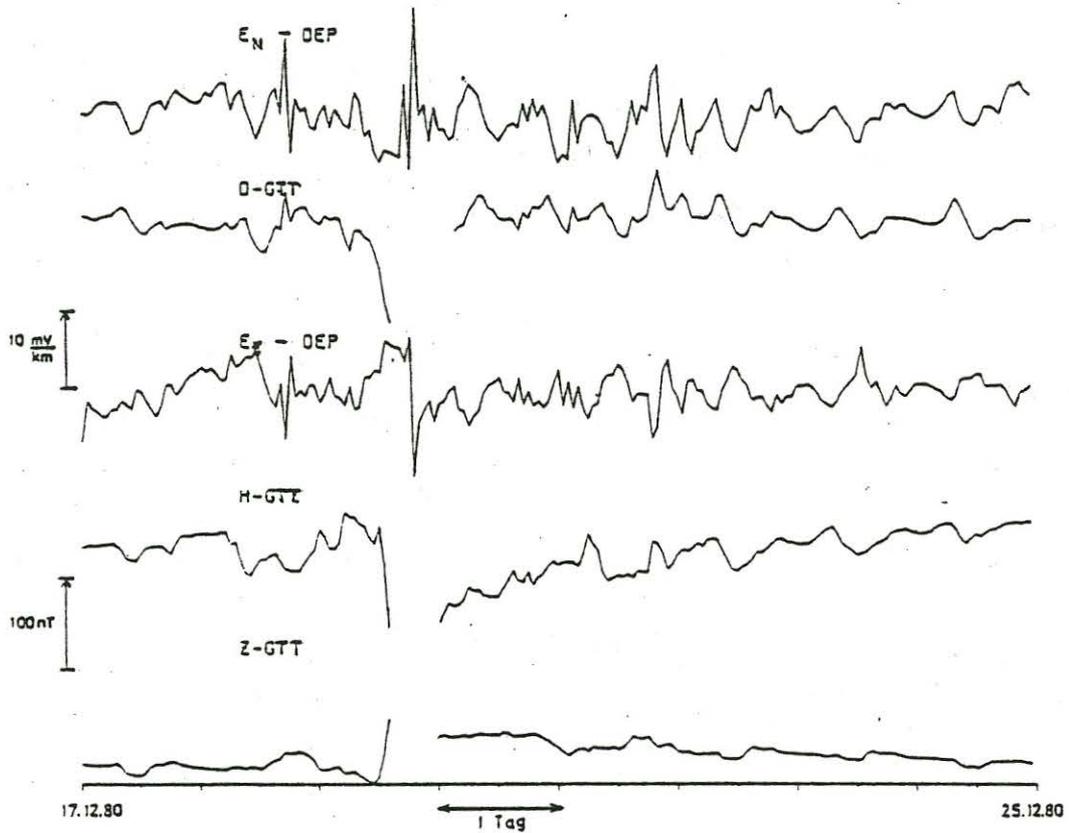


Abb. 2 : Ausschnitt von acht Tagen der E- und B-Feldregistrierung von DEP/GTT. Am 19.12.80 fand ein magnetischer Sturm statt. Die zweitägige Nachphase ist in H gut zu erkennen, während in E_E angesichts des Driftverhaltens am 17.12.80 nur die Hauptphase des Sturms signifikant erscheint.

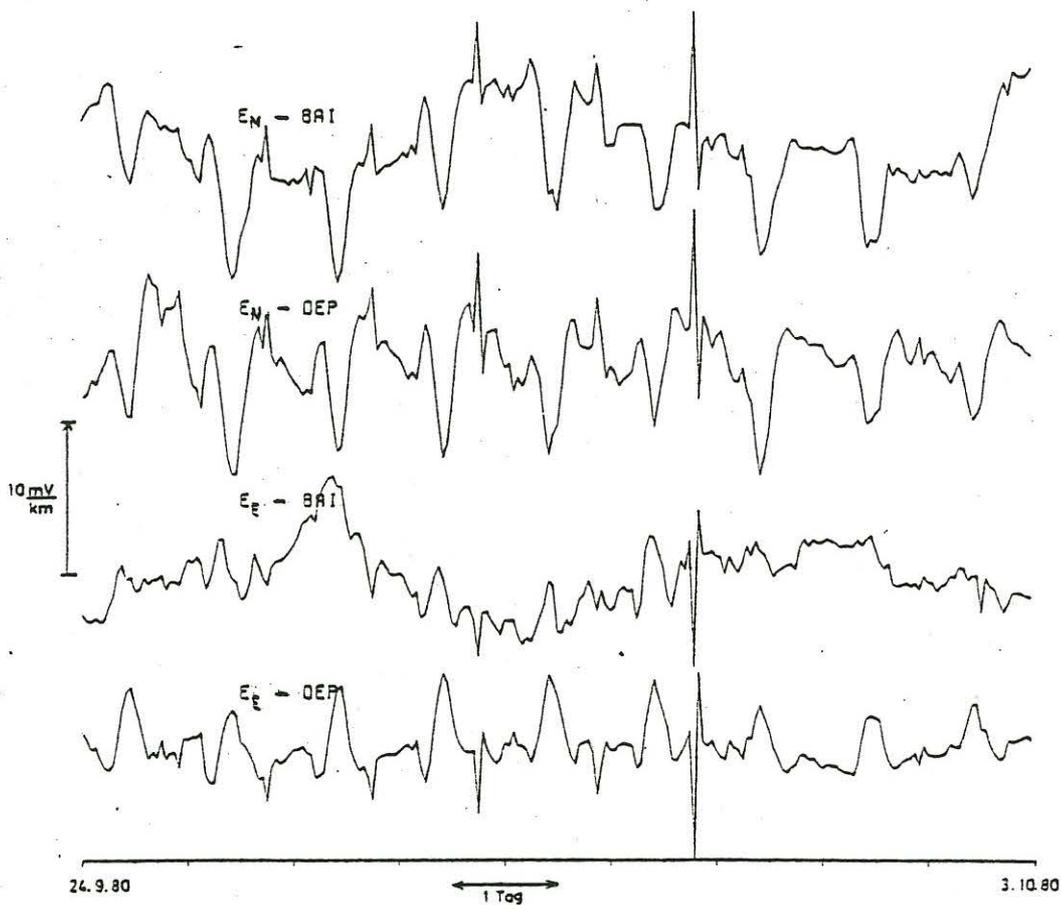


Abb. 3: 9-tägiges Registrierbeispiel des tellurischen Feldes in DEP und BAI. Die Übereinstimmung der Amplituden von E_N könnte von einer zufällig ähnlichen Verzerrung des E-Feldes stammen.

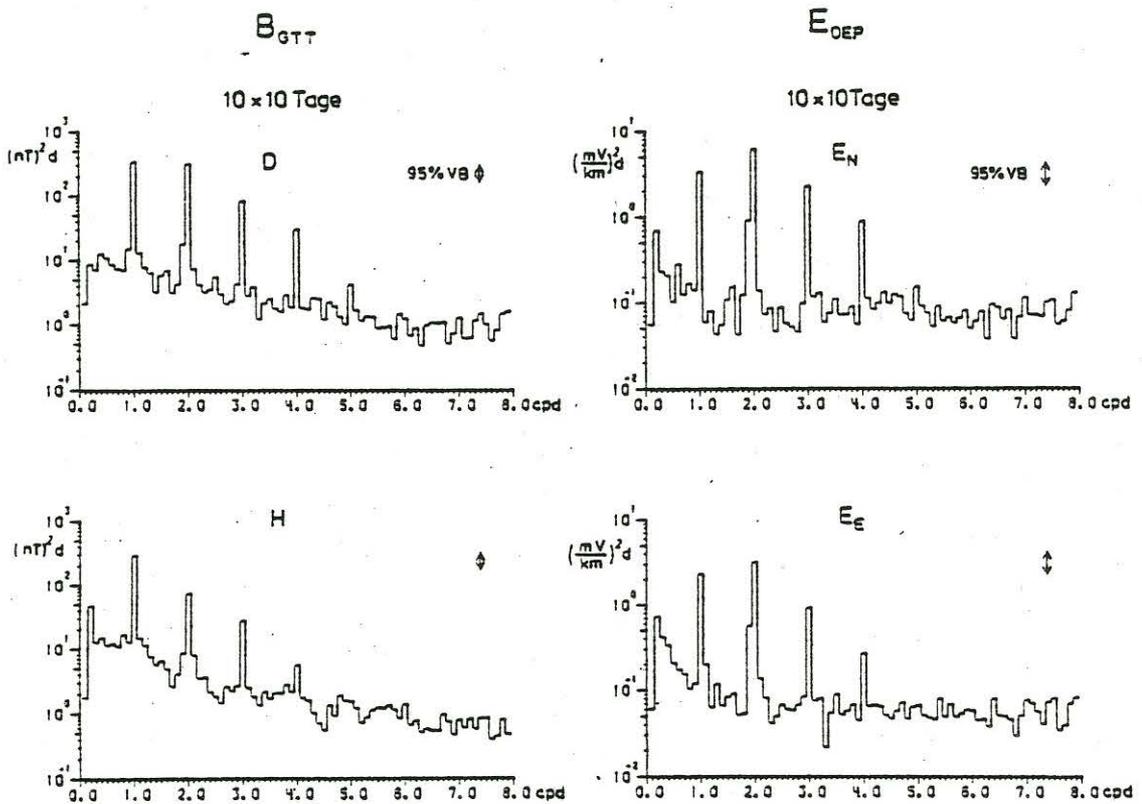


Abb. 4 : Energiedichtespektren der horizontalen E- und B-Feldkomponenten von DEP/GTT berechnet aus zehn 10-Tagessegmenten. Die Bandbreite beträgt 0.1 cpd. Die ersten vier Sq-Harmonischen treten deutlich aus dem Kontinuum hervor.

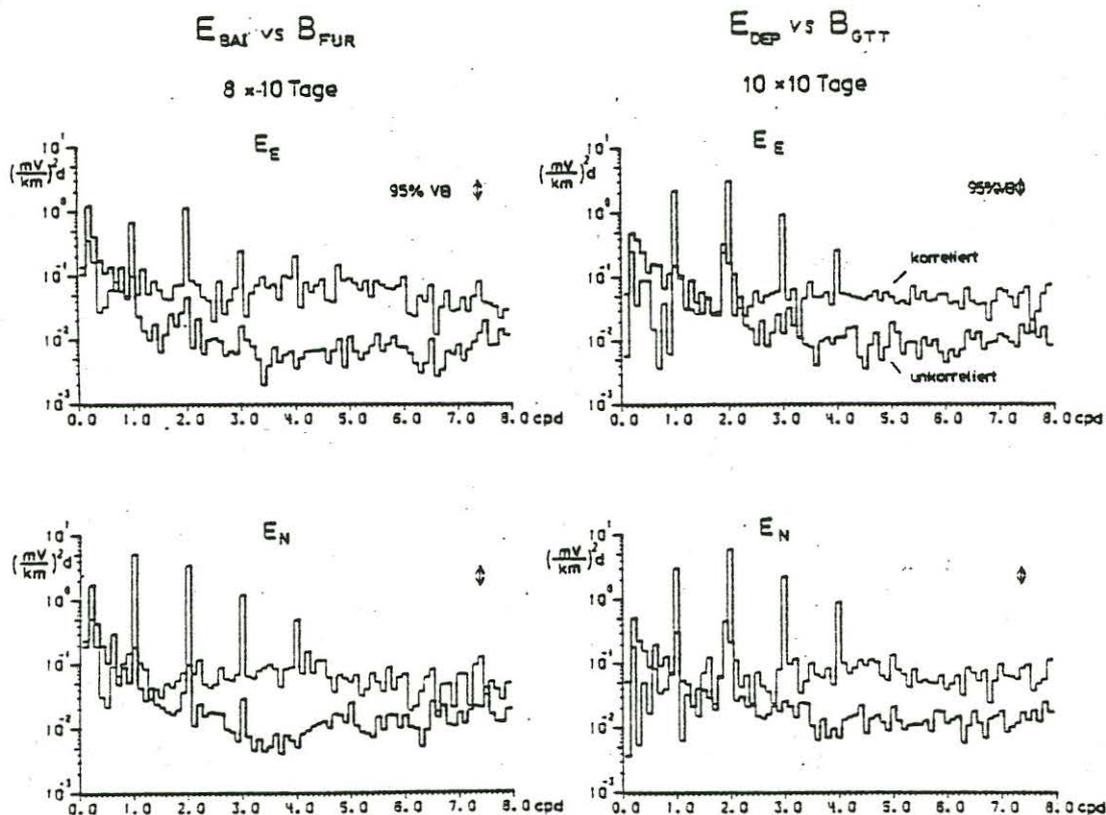


Abb. 5 : Aufteilung der Energiedichtespektren der E-Feldkomponenten von DEP und BAI in einen mit dem horizontalen B-Feld von GTT, bzw. FUR bivariat korrelierten (dünne Linien) und unkorrelierten (dicke Linien) Anteil auf der Grundlage von zehn, bzw. acht 10-Tagesintervallen. Hohe korrelierte Anteile der Spektren im Kontinuum zwischen 2 und 8 cpd mit exponentiellen Anstieg des nicht korrelierten Spektrums unterhalb von 2 cpd zu längeren Perioden hin. Im unkorrelierten Spektrum des tellurischen Feldes von DEP ist eine zu 1.9 cpd hin verschobene, signifikante Spitze zu erkennen.

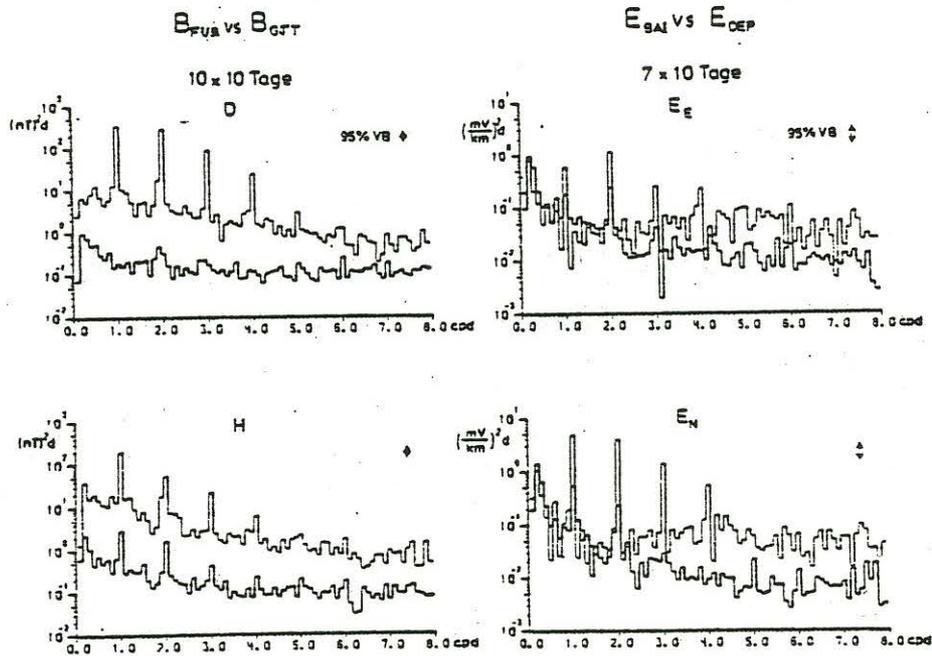


Abb. 6 : Räumliche Kohärenz der E- und B-Felder:

Linke Seite: Spektren der horizontalen B-Feldkomponenten H und D von FUR zerlegt in mit dem horizontalen B-Feld von GTT korrelierte und unkorrelierte Anteile auf der Basis von zehn 10-Tagesintervallen (Erläut. siehe Abb. 5). Die korrelierten Anteile übertreffen die Rauschanteile der Spektren um eine Größenordnung bis hin zu den längsten erfassten Perioden.

Rechte Seite: E-Feld-Spektren von BAI aufgespalten in mit dem E-Feld aus DEP korrelierte und unkorrelierte Anteile auf der Grundlage von sieben 10-Tagessegmenten. Hohe Kohärenz im Kontinuum zwischen 2 cpd und 8 cpd mit einem exponentiellen Anstieg der unkorrelierten Anteile zu längeren Perioden hin (siehe Abb. 5).