

H. BRASSE

"Zeitgleiche" Registrierung audiomagnetotellurischer Signale
an zwei Stationen

Am Institut für Angewandte Geophysik der TU Berlin wurde im Jahre 1989 eine zweite audiomagnetotellurische Station hergestellt, die im wesentlichen baugleich mit der bereits vorhandenen ist (Schnegg et al. 1980, Schnegg & Fischer 1980, Brasse 1988). Damit sollte es prinzipiell möglich sein, wie in der längerperiodischen Magnetotellurik das "Remote Reference-Verfahren" zur Verbesserung des Signal/Rausch-Verhältnisses anzuwenden, anomale Magnetfelder bei der Untersuchung von Leitfähigkeitsanomalien zu bestimmen sowie Aussagen zur räumlichen Kohärenz des anregenden Feldes im Audiofrequenzbereich zu treffen. Erste Versuche dazu wurden in der Oberpfalz/Nordbayern und im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 69 im Nordsudan (vgl. Burkhardt et al. 1990) unternommen; sie sollen im Rahmen dieses Artikels vorgestellt werden.

Korrektur des Phasenganges und räumliche Kohärenz

Als wesentliches Problem stellte sich die genaue zeitliche Synchronisierung der beiden Apparaturen dar. Eine ungenaue Synchronisierung äußert sich in einer Phasenverschiebung zwischen den sich entsprechenden Komponenten des Feldes (also etwa B_x und B_x^r) an Basis- und Wanderstation. Bei einer Frequenz von $f = 1$ kHz oder einer Periodenlänge von $T = 1$ ms bedeutet ein "akzeptierter" Fehler im Phasengang von $\Delta\varphi = \varphi(B_x) - \varphi(B_x^r) = 1^\circ$ eine zu fordernde Genauigkeit von $\Delta t \approx 2.8 \mu s$, was mit den vorhandenen Mitteln nicht zu erfüllen war. Die Synchronisierung erfolgte bei den Messungen in Deutschland über DCF77-Zeitzeichenempfänger der Fa. Hopf Elektronik; in der Sahara, wo diese Signale nicht mehr zu empfangen waren, wurden beide Stationen mit Hilfe von UKW-Funkgeräten, die fest in den Meßfahrzeugen installiert waren, getriggert. Dabei ist zu beachten, daß - bedingt durch die Laufzeit elektromagnetischer Wellen - bei einer Entfernung von z.B. 30 km bereits eine Zeitverschiebung zwischen beiden Stationen von $\Delta t = 100 \mu s$ entsprechend einer Phasenverschiebung von $\Delta\varphi = 36^\circ$ bei einer Sondierfrequenz von $f = 1$ kHz auftritt.

Auf diese Weise konnte nur eine Synchronisationsgenauigkeit von einigen ms erreicht werden. Dieser Fehler bezieht sich allerdings nur auf die Startzeit der Registrierungen; ein unterschiedlicher zeitlicher Gang während der Aufzeichnung (etwa bedingt durch Ungenauigkeiten der steuernden Timer-Bausteine) konnte bei Labormessungen nicht festgestellt werden. Das

gewählte Registrierintervall ist für den AMT-Bereich lediglich ≈ 37 s lang, was bei einer Abtastrate von $f_s = 2$ kHz einer Datenmenge von 72×1024 Werten bei 5 Kanälen entspricht. Im längerperiodischen Bereich (entsprechend einem Registrierintervall von mehreren Stunden) ist jedoch eine Gangkorrektur anzubringen. Dafür entfällt hier das Problem der synchronen Startzeit.

Da der zeitliche Fehler zwischen beiden Stationen lediglich die gemeinsame Startzeit betrifft, kann der entstehende Phasenfehler $\Delta\varphi$ leicht korrigiert werden. Unter der Voraussetzung einer quasihomogenen Anregung und eines identischen Untergrundes an beiden Stationen ist $\Delta\varphi$ eine lineare Funktion der Frequenz:

$$\Delta\varphi(f) = a f + b ,$$

wobei der Koeffizient a durch lineare Regression bestimmt wird. Bei einem angenommenen Fehler von z.B. $\Delta t = 1$ ms ist $a = 0.36^\circ/\text{Hz}$. Die Bestimmung einer Ausgleichsgeraden wird allerdings erschwert, wenn - wie unter realen Meßbedingungen fast immer - die Leitfähigkeitsverteilungen im Untergrund verschieden sind und wenn stark streuende Daten vorliegen. Im Idealfall sollte die Konstante $b = 0$ sein.

Zur Illustration der Vorgehensweise sei zunächst in Abb. 1 ein Registrierbeispiel aus der Oberpfalz gezeigt. Die Stationen B5 und B7 lagen etwa 1 km voneinander entfernt westlich der Fränkischen Linie auf mesozoischen Sedimenten, die Synchronisierung erfolgte über DCF77. Die Notchfilter ($16^{2/3}$, 50 und 150 Hz) wurden zu dieser Messung ausgeschaltet, daher wird die Aufzeichnung von 50 Hz-Signalen dominiert, denen atmosphärische überlagert sind. Die Station B7 lag dabei unmittelbar neben einer Geländestufe, die vermutlich für einen 2D-Effekt in der magnetotellurischen Registrierung verantwortlich ist (Schulte 1990).

Beide magnetischen Horizontalkomponenten B_x und B_y - das gleiche gilt für das hier nicht gezeigte tellurische Feld - sind außergewöhnlich gut korreliert (Abb. 2a), das Phasenspektrum zeigt jedoch die den Originaldaten zunächst nicht unmittelbar zu entnehmende Verschiebung zwischen Basis- und Wanderstation bei hohen Frequenzen (Abb. 2b). Der Datensatz einer Station wird nun zunächst im Speicher des Rechners soweit verschoben, daß korrelierte Spitzen der beiden Zeitreihensätze (z.B. B_x und B_x^r) aufeinander zu liegen kommen. Die Genauigkeit dieses Vorgehens ist durch die Abtastfrequenz begrenzt; z.B. bleibt für $f_s = 2$ kHz eine Ungenauigkeit von 0.5 ms. Ein eventuell noch vorhandener linearer Phasengang kann dann durch Bestimmung des Faktors a wie oben beschrieben entfernt werden (Abb. 2c).

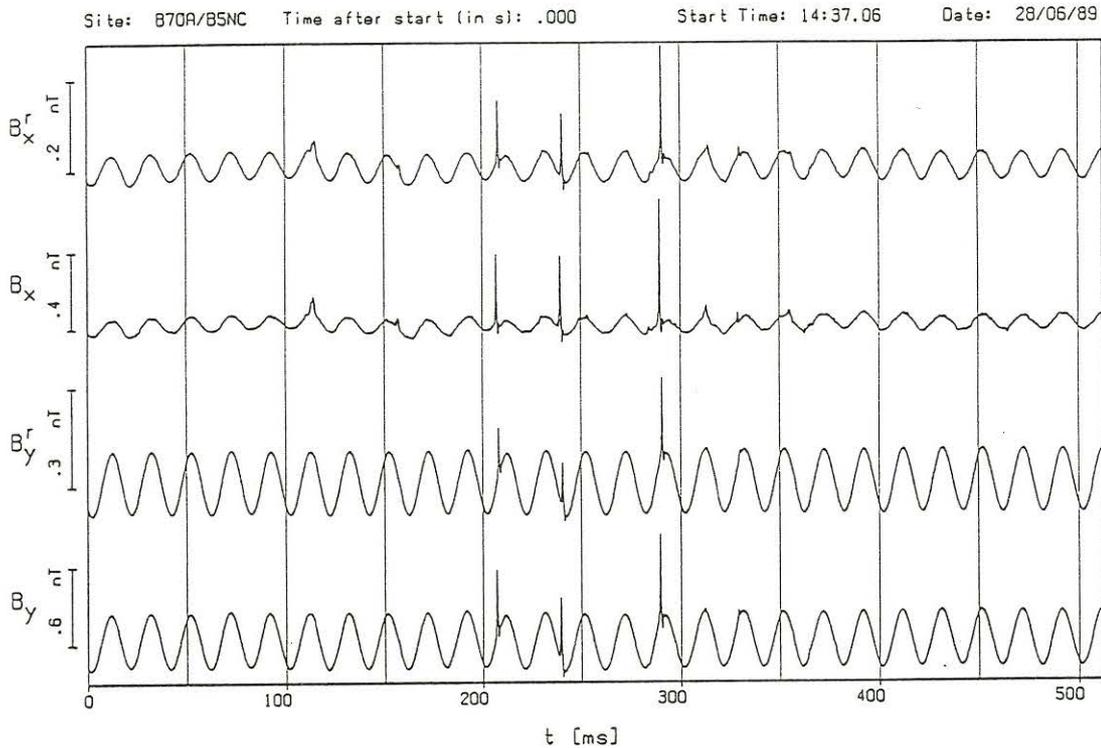


Abb. 1: Zeitreihen der magnetischen Horizontalkomponenten an den Stationen B7 (B_x , B_y) und B5 (B_x^r , B_y^r) in der Oberpfalz. Den 50 Hz-Signalen der Netzfrequenz sind hochfrequente atmosphärische Überlagerungen überlagert. Zeitreihen an B5 um ≈ 1 ms gegenüber B7 verschoben.

Er berechnet sich in diesem Fall zu

$$a = (0.36629 \pm 0.005)^\circ/\text{Hz} \text{ für } B_x/B_x^r \text{ und}$$

$$a = (0.36627 \pm 0.003)^\circ/\text{Hz} \text{ für } B_y/B_y^r .$$

Das Verfahren arbeitet auch dann noch, wenn wie in Abb. 3 die Zeitreihenansätze einen sehr großen zeitlichen Versatz aufweisen. Hierbei handelt es sich um die Stationen SAF12 und WUZ6 aus dem Nordsudan, die etwa 25 km voneinander entfernt lagen. Eine Funktriggerung war über diese Entfernung nicht mehr möglich; statt dessen wurden die - ungenaueren - internen Echtzeit-Uhren der Mikrocomputer benutzt, was die sehr große Verschiebung von $\Delta t \approx 55.5$ ms erklärt. Nach Abzug dieser Vorkorrektur (Abb. 4b) wurden die Koeffizienten für B_x und B_y bestimmt zu:

$$a = (0.0377 \pm 0.0007)^\circ/\text{Hz} \text{ für } B_x/B_x^r \text{ und}$$

$$a = (0.0329 \pm 0.0008)^\circ/\text{Hz} \text{ für } B_y/B_y^r .$$

Die so korrigierte Phasenbeziehung ist in Abb. 4c aufgetragen.

Erkennbar sind die audiomagnetotellurischen Signale auch über einen

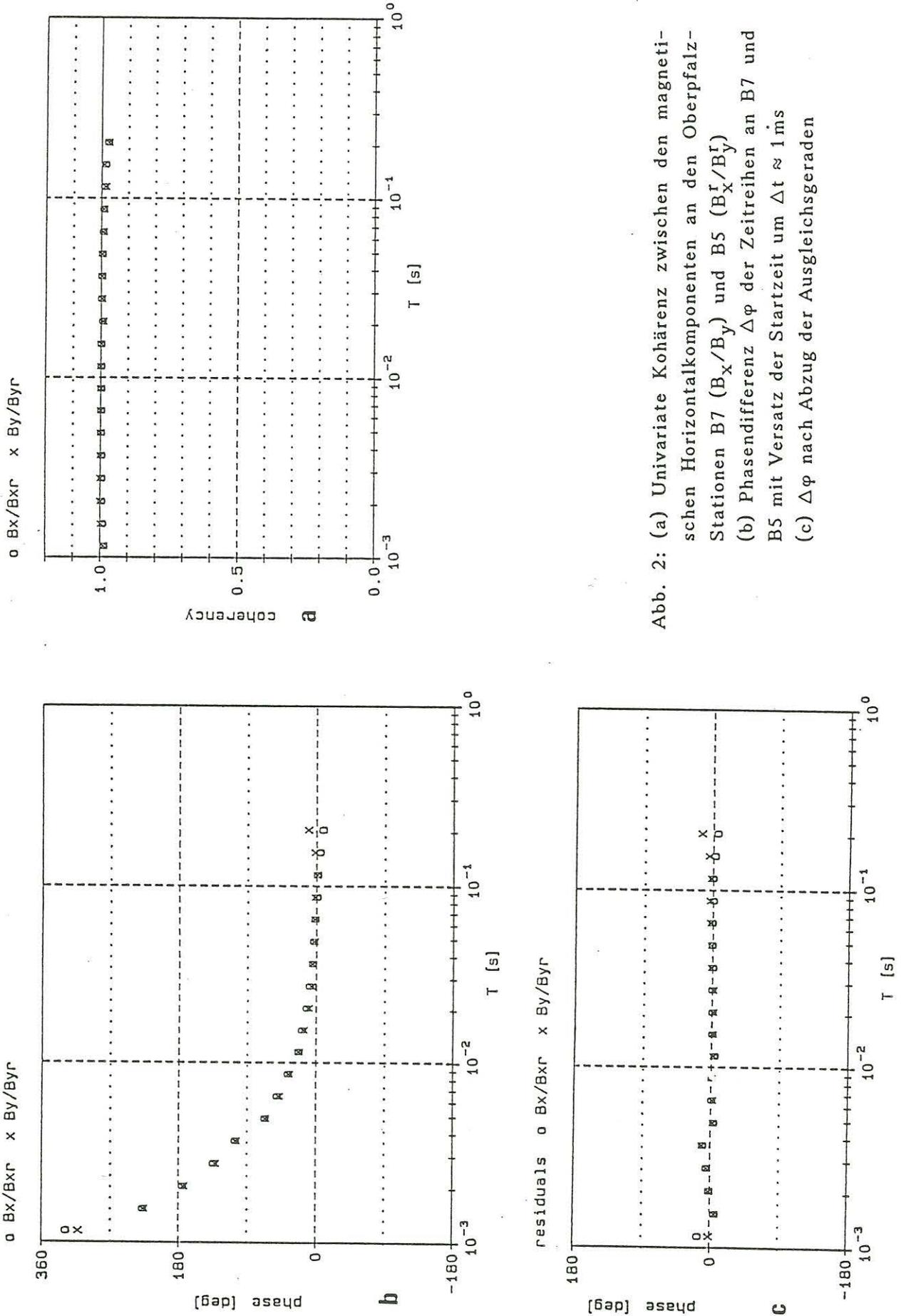


Abb. 2: (a) Univariate Kohärenz zwischen den magnetischen Horizontalkomponenten an den Oberpfalz-Stationen B7 (B_x/B_{yr}) und B5 (B_x^I/B_y^I) (b) Phasendifferenz $\Delta\varphi$ der Zeitreihen an B7 und B5 mit Versatz der Startzeit um $\Delta t \approx 1$ ms (c) $\Delta\varphi$ nach Abzug der Ausgleichsgeraden

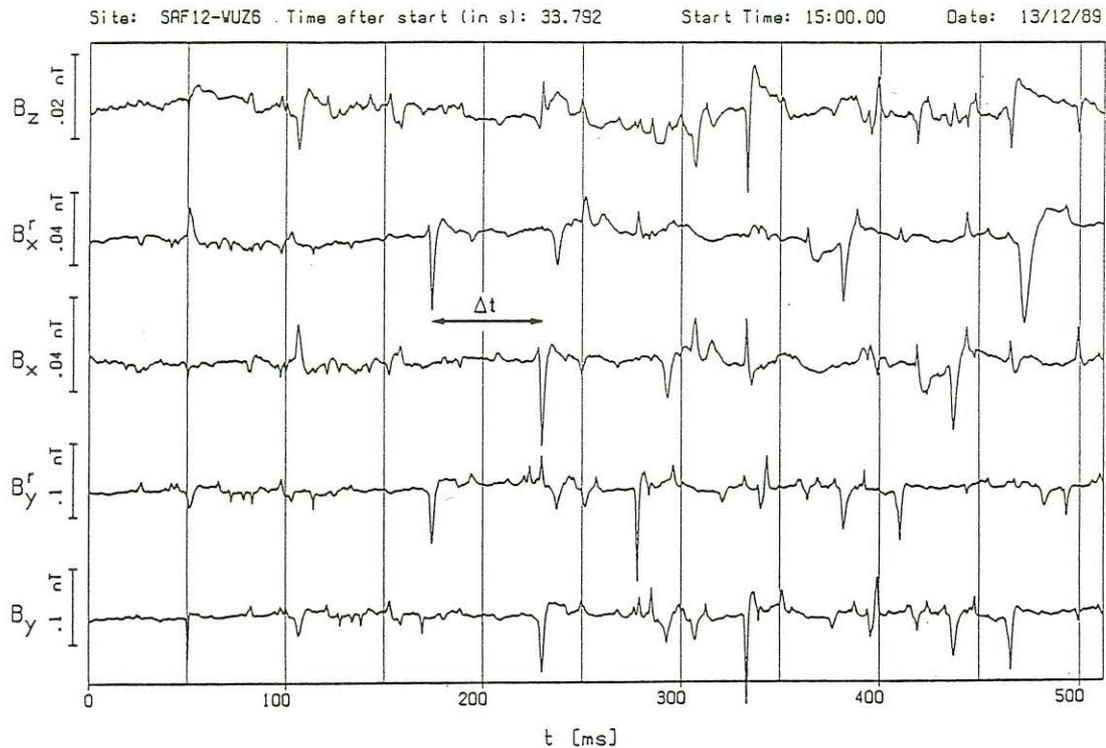


Abb. 3: Ungestörte AMT-Zeitreihen (magnetische Horizontalkomponenten) aus der Ostsahara. In SAF12 zusätzlich Registrierung der Vertikalkomponente. Entfernung von Station WUZ6 \approx 25 km.

größeren räumlichen Abstand sehr gut miteinander korreliert (Abb. 4a). Die spektrale Charakteristik von atmosferics - d.h. das häufige Auftreten hochfrequenter Spitzen, die von einzelnen, näheren Gewittern herrühren (vgl. Al'pert 1973) - erleichtert in einem solchen extremen Fall das Verschieben der Zeitreihen. Ähnlich dem vorherigen Beispiel lag die Basisstation SAF12 an einer Leitfähigkeitsanomalie. Hier wurde auch die magnetische Vertikalkomponente B_z aufgezeichnet (Abb. 3). Die großen Amplituden von B_z werden erklärt durch eine südlich gelegene, auch an der Oberfläche sichtbare Störung (Kontakt Alluvium/granitische Basement, s. später).

Eine starke räumliche Kohärenz des anregenden Feldes konnte auch in relativ gestörten Gebieten in Deutschland beobachtet werden. Abb. 5 zeigt ein Beispiel aus der Oberpfalz; die Stationen B7 und NI (Nikolaus Nord an der tschechischen Grenze) lagen etwa 60 km voneinander entfernt. Auch hier traten wie im ersten Beispiel hauptsächlich "monochromatische" Störungen (Netzfrequenz und Harmonische) auf. Diese Art der Einstreuung stellt weder für die Interpretation gleichzeitiger Messungen noch für AMT-Sondie-

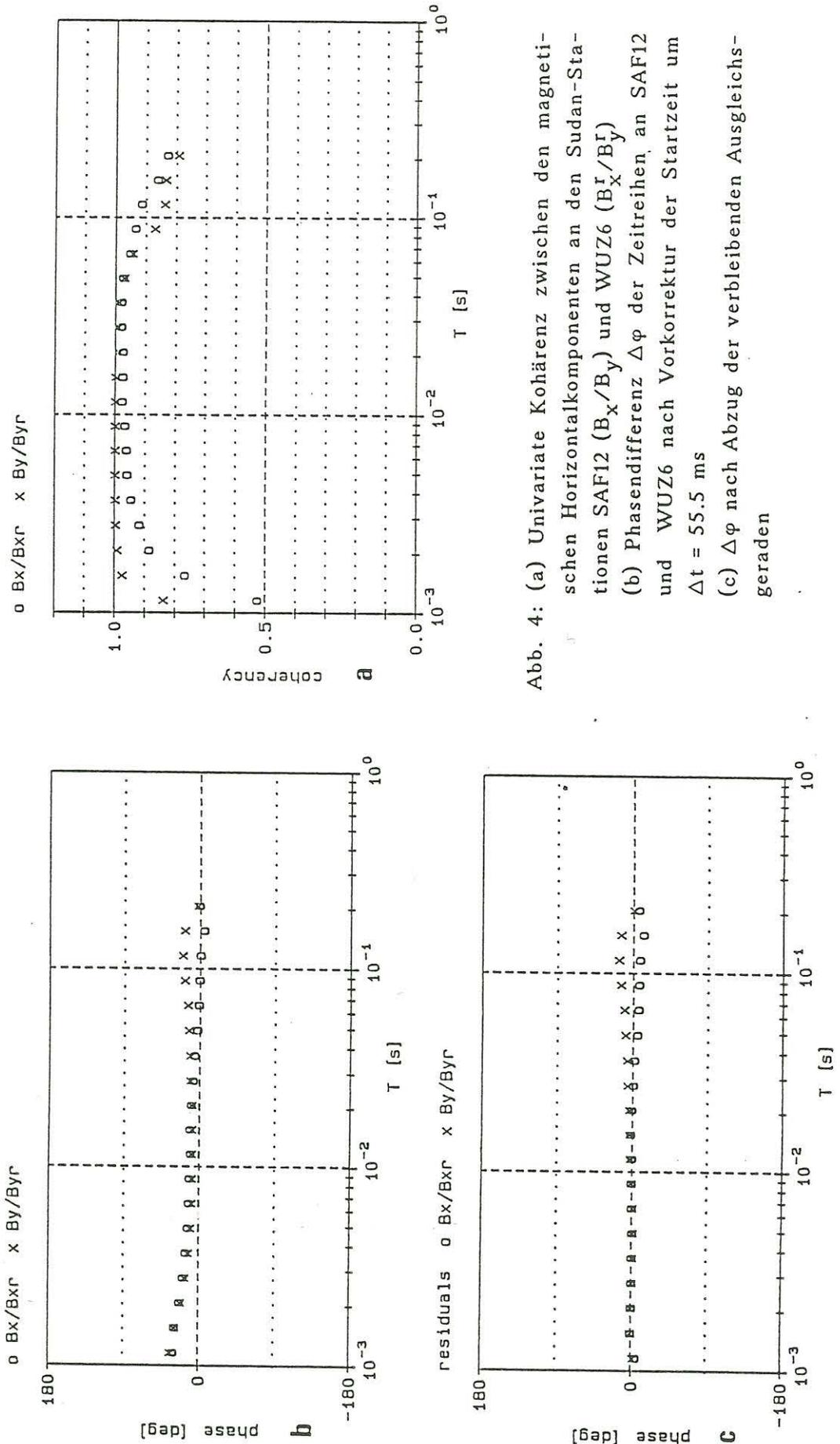


Abb. 4: (a) Univariate Kohärenz zwischen den magnetischen Horizontalkomponenten an den Sudan-Stationen SAF12 (B_x/B_{xr}) und WUZ6 (B_x^r/B_y^r) (b) Phasendifferenz $\Delta\phi$ der Zeitreihen, an SAF12 und WUZ6 nach Vorkorrektur der Startzeit um $\Delta t = 55.5$ ms (c) $\Delta\phi$ nach Abzug der verbleibenden Ausgleichsgeraden

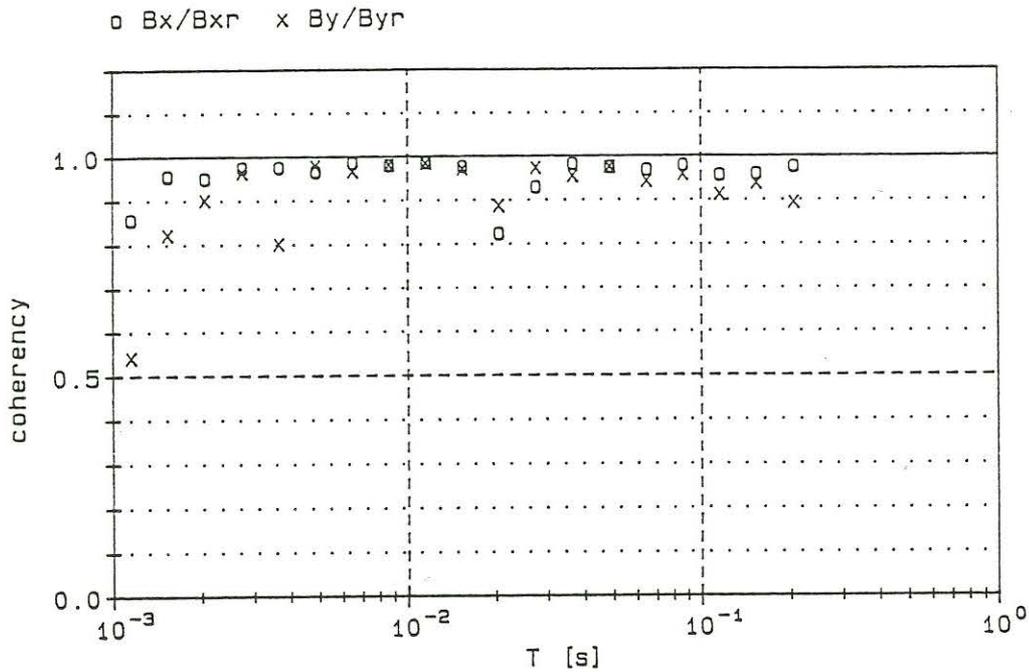


Abb. 5: Univariate Kohärenz zwischen den magnetischen Horizontalkomponenten an den etwa 60km auseinander liegenden Stationen B7 und NI (Oberpfalz).

rungen an einer Station ein Problem dar (es sei denn, sie führt zu einer Übersteuerung der Analogelektronik), da sie durch digitale Notchfilter leicht aus dem Spektrum entfernt werden kann.

Schwer oder gar nicht auswertbar sind jedoch stark gestörte Registrierungen, die zum Beispiel durch Einstreuung von Radar-Impulsen "kontaminiert" sind. In Abb. 6 ist eine solche Aufzeichnung, die während eines militärischen Manövers in der Oberpfalz stattfand, aufgetragen: An der Station B10 auf der ZEV (Zone Erbendorf-Vohenstrauß) dominieren die Radar-Einstreuungen, während sie an der Referenzstation B7 nur in der Nordkomponente B_x abgeschwächt zu erkennen sind. Abb. 7 zeigt den sprunghaften Abfall in den Kohärenzen zwischen Basis- und Wanderstation oberhalb der Pulsfrequenz von $f \approx 120\text{Hz}$. Da diese Pulsfrequenz nicht zeitlich konstant ist, sondern offensichtlich stochastisch variiert wird und überdies mit breiten spektralen Maxima verbunden ist, läßt sie sich kaum aus den Aufzeichnungen mittels Notchfilter entfernen (vgl. dazu auch Schulte 1990). Eine Auswertung solcher Zeitreihen liefert nur in einem engen Frequenzbereich eine vertrauenswürdige Abschätzung der magnetotellurischen Impedanz (siehe nächsten Abschnitt).

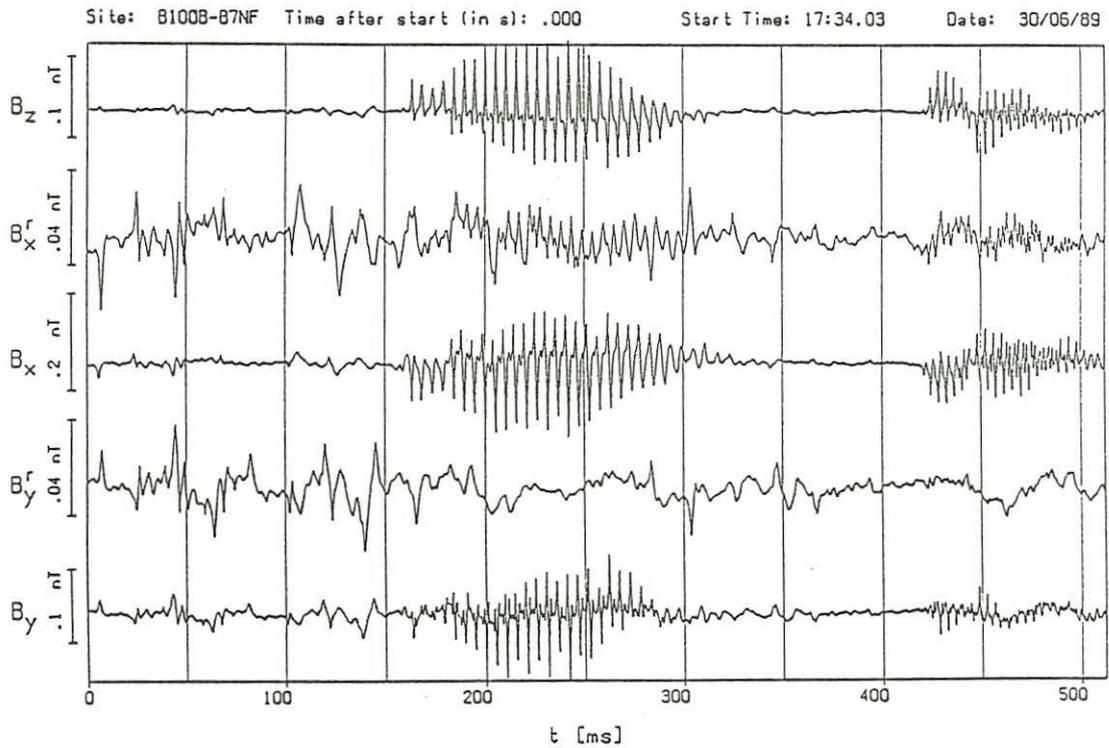


Abb. 6: Radar-Einstreuung an der Station B10 auf der ZEV nahe der Fränkischen Linie (Oberpfalz), die an der Basistation B7 kaum beobachtet wird.

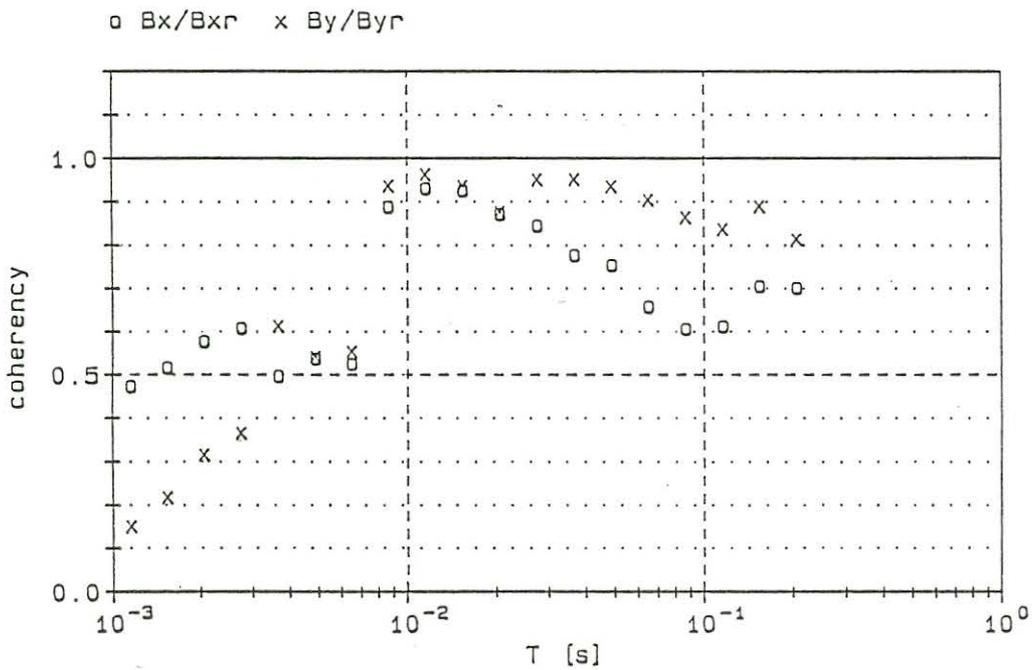


Abb. 7: Univariate Kohärenzen zur Registrierung in Abb. 6

Versuche zum Remote Reference-Verfahren

Durch das "Remote Reference-Verfahren" (Gamble et al. 1978) kann unter bestimmten Bedingungen (vgl. Schmucker 1984) die Schätzung des Impedanzensors Z verbessert werden, indem Übertragungsfunktionen W zwischen dem Magnetfeld einer lokalen Station und dem einer gleichzeitig registrierenden Referenzstation bestimmt werden und auf diese Weise nur noch Kreuzspektren (z.B. $B_x B_y^*$) in die Berechnung von Z eingehen. Die komplexwertigen W_{ij} werden analog den Elementen von Z mit der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt (s. auch Volbers 1986):

$$B_x = W_{xx} B_x^r + W_{xy} B_y^r$$

$$B_y = W_{yx} B_x^r + W_{yy} B_y^r .$$

Ein Beispiel zeigt Abb. 7 für die im ersten Abschnitt erwähnten Stationen SAF12/WUZ6 aus dem Nordsudan (Elemente W_{xx} und W_{yy}). Während

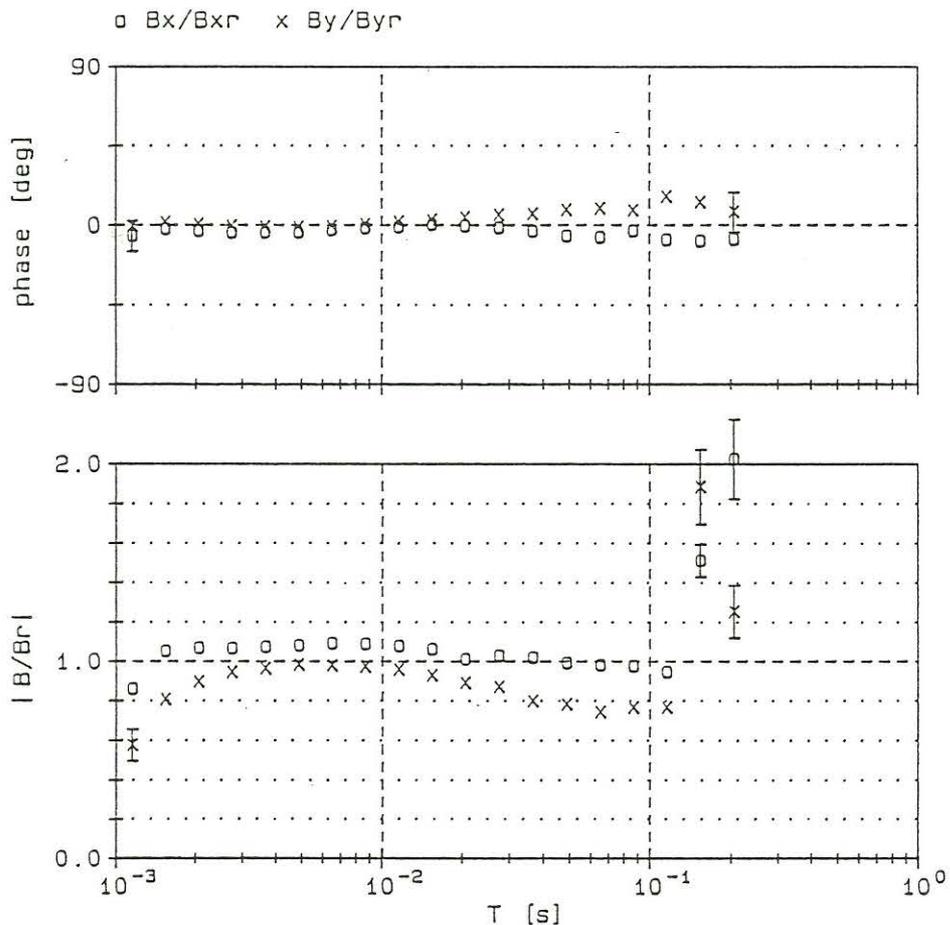
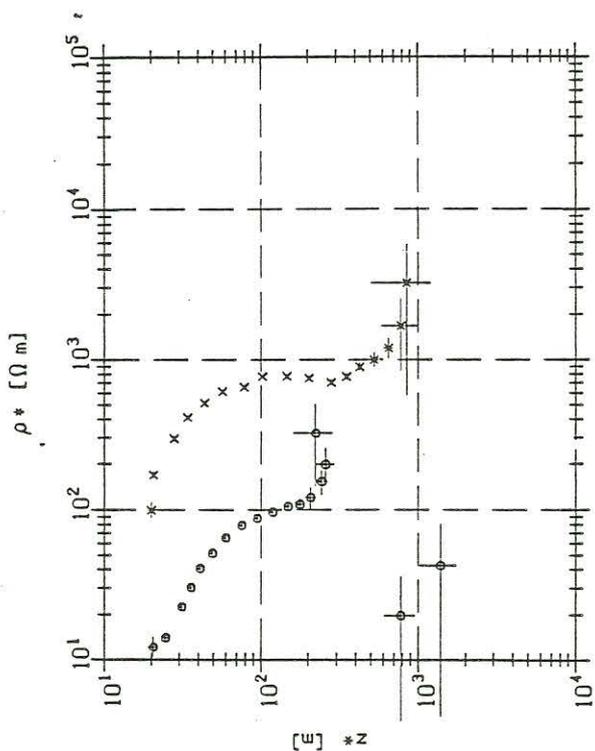


Abb. 7: Übertragungsfunktionen für die horizontalen Magnetfeldkomponenten an den Stationen SAF12 und WUZ6 (Nordsudan)

Station : SAF12RB.01 x RHO*xy o RHO*yx

$\alpha_s = 40.7$



Station : SAF12RB.51 x RHO*xy o RHO*yx

$\alpha_s = 39.9$

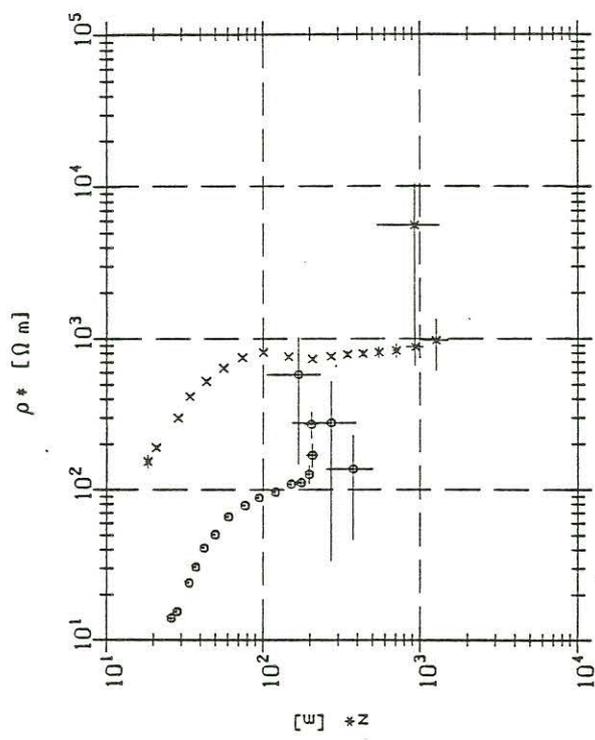


Abb. 8: ρ^* -z*-Transformation für die Station SAF12 (Sudan)

Links: Ohne Remote-Reference

Rechts: Mit Remote-Reference (Station WUZ6)

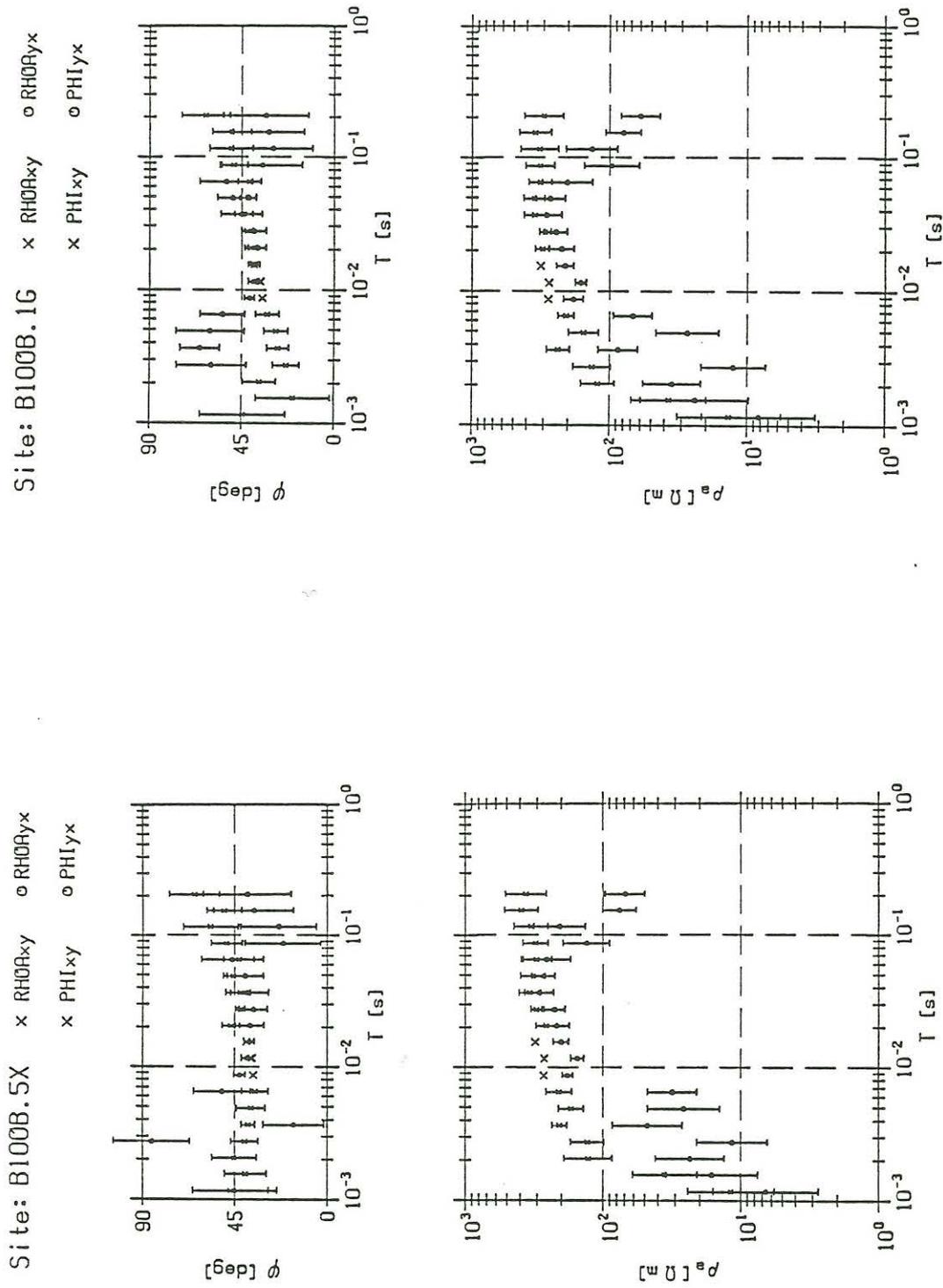


Abb. 9: $\rho_a(T)$ und $\varphi(T)$ für die Station B10 (Oberpfalz)

Links: Ohne Remote-Reference

Rechts: Mit Remote-Reference (Station B7)

WUZ6 auf fast eindimensionalen Untergrund lag, befand sich SAF12 nahe einer Störungszone, die auch an der Oberfläche sichtbar ist und eine dünne alluviale Deckschicht, bestehend aus Wadisedimenten, von einem granitischen Basement trennt. Ihr Einfluß ist deutlich in den ρ^* - z^* -Transformierten (Abb. 8) zu erkennen. Aufgetragen sind die Resultate für normales MT-Processing (links) und für das Remote Reference-Verfahren. Außer kleineren Unterschieden an den Rändern des Frequenzbereiches ist für die Remote Reference-Ergebnisse keine Verbesserung zu erkennen. Das ist allerdings in diesem Fall aufgrund der hohen Kohärenz zwischen den Zeitreihen beider Stationen (Abb. 4a) auch nicht zu erwarten. Allgemein wurden bei Messungen in den ungestörten Gebieten der Ostsahara sehr hohe Datenqualitäten im Audiofrequenzbereich erzielt (Burkhardt et al. 1990), so daß der höhere Aufwand, den das Remote Reference-Verfahren mit sich bringt, dort nicht angebracht erscheint. Allerdings wird eine Bestimmung anomaler Felder entlang von Profilen über Leitfähigkeitsanomalien durch eine zweite Station möglich, was bei zukünftigen Untersuchungen systematisch erfolgen soll.

Im "kritischeren" Frequenzbereich um etwa $f = 1\text{ Hz}$ (sehr geringe Anregung insbesondere in subtropischen Breiten) ist jedoch eine Verbesserung der Datenqualität zu erwarten. Entsprechende Untersuchungen konnten allerdings bisher noch nicht durchgeführt werden, da die zweite Station zunächst noch für diesen Frequenzbereich vorbereitet werden muß.

Eine Verbesserung der Datenqualität konnte auch bei extrem gestörten Zeitreihen wie in Abb. 6 nicht erreicht werden (vgl. Abb. 9). Für die dargestellten Oberpfalz-Stationen ist jeweils der scheinbare spezifische Widerstand ρ_a und die Phase φ aufgetragen. Nur im mittleren Periodenbereich ergab sich eine relativ stabile Bestimmung dieser Werte für beide Verfahren; auf eine ρ^* - z^* -Darstellung wurde aus diesem Grunde verzichtet.

Zusammenfassung

Auch im Frequenzbereich der Audiomagnetotellurik ist eine gleichzeitige Registrierung des erdmagnetischen und tellurischen Feldes an mehreren Stationen möglich. Sie bedeutet allerdings einen hohen Geräteaufwand zur Erfüllung der Genauigkeitsanforderungen hinsichtlich zeitlicher Synchronisierung; alternativ kann jedoch der Effekt einer nicht synchronen Startzeit rechnerisch in vielen Fällen eliminiert werden. Damit eröffnen sich auch in der Audiomagnetotellurik die Möglichkeiten, anomale Magnetfelder bei der Untersuchung von Leitfähigkeitsanomalien zu bestimmen. Das Remote Reference-Verfahren scheint - soweit es bisher angewandt wurde - keine sig-

nifikante Verbesserung der Datenqualität im Bereich der AMT zu bringen. Die Arbeiten darüber sind jedoch nicht abgeschlossen; die bisher bearbeiteten Feldbeispiele sind entweder durch eine außerordentlich hohe oder aber sehr niedrige Datenqualität gekennzeichnet.

Das audiomagnetotellurische Variationsfeld zeichnet sich durch eine hohe räumliche Kohärenz aus. Dies gilt sowohl für Meßgebiete, die frei von technischen Störeinflüssen sind, als auch für Gebiete in Mitteleuropa, in denen die Störsignale eine relativ gleichmäßige und "monochrome" spektrale Charakteristik aufweisen, also z.B. im Erdinnern vagabundierende Ströme des elektrischen Verbundnetzes. Stark lokale Störeinflüsse wie die Einstrahlung von Radar-Impulsen können aber die natürliche elektromagnetische Strahlung so stark überwiegen, daß Aussagen über die Struktur des anregenden Feldes unmöglich werden.

Literaturangaben

- Al'pert, Y.L. (1973/74): Radio wave propagation and the ionosphere, Vol. 1 & 2, Consultants Bureau, New York.
- Brasse, H. (1988): Audiomagnetotellurische Untersuchungen in von künstlichen Feldern freien Gebieten in Südägypten und Nordsudan, Protokoll ET Königstein (Taunus), 217-232.
- Burkhardt, H., Brasse, H., Fiedler-Volmer, R., Haußmann, U., Kalkbrenner, M., Radic, T. & Schuster, K. (1990): The application of seismic, magnetotelluric and geoelectric methods for tectonic and hydrogeological problems in SW Egypt and NW Sudan, Berliner Geowiss. Abh. (A), 120.1 (eds. E. Klitzsch & E. Schrank), Berlin.
- Gamble, T.D., Goubeau, W.M. & Clarke, J. (1979): Magnetotellurics with a remote magnetic reference, *Geophysics*, 44, 53-68.
- Schmucker, U. (1984): EM Übertragungsfunktionen aus Beobachtungen mit mehreren gleichzeitig registrierenden Stationen, Protokoll ET Grafath, 35-36.
- Schnegg, P.-A. & Fischer, G. (1980): On-line Determination of Apparent Resistivity in Magnetotelluric Soundings, Protokoll ET Berlin-Lichtenrade, 173-184.
- Schnegg, P.-A., Le Quang, B.V. & Fischer, G. (1980): Management and Processing of MT Data in the Field with a Microprocessor, paper presented at the 5th Workshop on Electromagnetic Induction in the Earth and Moon, IAGA working group I-3, Istanbul.
- Schulte, T.H. (1990): Untersuchungen zur Vertikalkomponente des erdmagnetischen Feldes im Audiofrequenzbereich, Dipl.-Arbeit, Institut für Angewandte Geophysik, Technische Universität Berlin.
- Volbers, R. (1986): Einzeleffektauswertung, Statistische Frequenzanalyse, und Remote-Reference-Technik: Ein Vergleich an verschiedenen stark gestörten Magnetotellurik-Daten eines Profils vom Münsterland zum Ostsauerland, Dipl.-Arbeit, Institut für Geophysik, Universität Münster.