

P. KRÖGER

"Zeitsynchrone Magnetotellurik auf einem 60km-Profil zur Erkundung lokaler technischer Störfelder"

1. Übersicht

Die Bestimmung des Magnetotellurik-Impedanztensors aus technisch gestörten Meßsignalen beinhaltet einen systematischen Fehler (bias), wenn die Störsignale gleichzeitig im elektrischen und magnetischen Feld vorhanden sind. Die Abschätzung dieses Bias-Fehlers setzt die Bestimmung und Trennung dieser beiden Störungen voraus.

Es soll gezeigt werden, von welchen Größen der Bias-Fehler abhängig ist und eine Klassifizierung von Störarten vorgenommen werden. Eine Methode wird dargestellt, bei der mit Hilfe einer zur Meßstation örtlich getrennten Referenzstation die Störungen im elektrischen und magnetischen Feld bestimmt und daher auch der Bias-Fehler reduziert werden kann. Eine Analyse der in magnetotellurischen Daten vorhandenen Störungen wird vorgenommen und der Bias-Fehler im Impedanztensor aufgezeigt.

2. Bestimmung des Impedanztensors durch Schätzung

Wegen der Störungen, die den Meßsignalen überlagert sind, werden zur Bestimmung des MT-Tensors üblicherweise statistische Methoden angewandt. Grundlagen hierüber sind in den Arbeiten von Draper und Smith (1966) und Jenkins und Watts (1968) zu finden. Es wird dabei angenommen, daß die Störungen entweder im elektrischen oder im magnetischen Feld dominierend sind.

Im ersten Fall geht man von einer Vielzahl von Messungen  $i = 1 \dots N$  aus, für die die Beziehung

$$\vec{E}_i = [Z] \cdot \vec{B}_i + \vec{J}E_i \quad (2.1)$$

gelten möge.

Vorausgesetzt wird, daß die Signale  $\vec{E}_i, \vec{B}_i$  von homogen induzierenden Feldern stammen, zwischen denen eine konstante Übertragungsfunktion  $[Z]$  vorhanden ist.

Die Ausgleichsrechnung, in der

$$\sum_{i=1}^N \overline{\delta E_i}^2 = \min \quad (2.2)$$

gefordert wird, liefert den Schätzwert für den Magnetotellurik-Impedanztensor

$$[\hat{Z}] = [C] \cdot [P]^{-1} \quad (2.3)$$

wobei  $[C]$  und  $[P]$  2 x 2-Matrizen mit den Elementen

$$c_{mn} = \sum_{i=1}^N (E_{mi} \cdot B_{ni}^*), \quad p_{mn} = \sum_{i=1}^N (B_{mi} \cdot B_{ni}^*), \quad m, n = x, y$$

sind. Für große Werte  $N$  beinhalten die Matrizen  $[C]$  und  $[P]$  die Leistungs- und Kreuzleistungsspektren zwischen den Meßsignalen.

Bei Gültigkeit der genannten Voraussetzungen liefert (2.3) einen bias-freien Schätzwert, der lediglich einer Streuung unterliegt. Die Streuung von  $[\hat{Z}]$  läßt sich z.B. kennzeichnen durch einen Vertrauensbereich (Bendat, Piersol 1971).

### 3. Bias-Fehler im Schätzwert $[\hat{Z}]$

Im allgemeinen sind gleichzeitig das elektrische und magnetische Feld gestört und (2.1) ist zu erweitern durch einen Störterm im magnetischen Feld.

$$\vec{E}_i + \overline{\delta E_i} = [Z] \cdot (\vec{B}_i + \overline{\delta B_i}) \quad (3.1)$$

Beispiele für solche Störungen sind apparatives Rauschen, vorbeifahrende Kraftfahrzeuge oder Störfelder von elektrischen Versorgungsleitungen und Industriebetrieben.

Die Störungen  $\overline{\delta E_i}$ ,  $\overline{\delta B_i}$  sind inhomogen wegen der räumlichen Nähe zwischen Meßort und Quellort. Sie sind ferner inkohärent zu den homogenen Signalanteilen  $\vec{E}_i, \vec{H}_i$ .

Die Schätzung von  $[Z]$  gemäß (2.3) ist nun nicht mehr bias-frei. Bezüglich des Bias-Fehlers in  $[\hat{Z}]$  müssen dabei in (3.1) folgende Fälle für die Störungen unterschieden werden:

- a) Die Störungen  $\overline{\delta E_i}, \overline{\delta B_i}$  sind inkohärent. In (2.3) erscheinen als Bias-Terme die Leistungen der Störungen  $\overline{\delta B_i}$ .

- b) Die Störungen  $\vec{\delta E}_i$  sind inkohärent zu den Störungen  $\vec{\delta B}_i$ , aber die Eingangskomponenten  $\delta B_{xi}$  und  $\delta B_{yi}$  sind kohärent. Diese Art der Störung soll eingangskohärent genannt werden. In (2.3) existieren nun neben den Leistungen auch die Kreuzleistungen der Störungen  $\vec{\delta B}_i$  als Bias-Terme.
- c) Die Störungen  $\vec{\delta E}_i$ ,  $\vec{\delta B}_i$  sind kohärent. Dieser Fall wird multipl-kohärent genannt. In (2.3) erscheinen ebenfalls Kreuzleistungen zwischen Störungen im elektrischen und magnetischen Feld. Das bedeutet, es existiert ein Modell  $[Z]_s$  zwischen den Störungen selbst, welches abhängig von der Kohärenz der Störungen vom wahren Modell  $[Z]$  abweicht. Es gibt damit zwei verschiedene, gleichzeitig vorhandene Signalanteile in (3.1): Die homogen-kohärenten Signale und die inhomogen-kohärenten Störungen.

#### 4. Magnetotellurik mit einer Referenzstation

Die Bestimmung der Störungen geschieht mit Hilfe einer Referenzstation. Die Referenz ist ein Magnetfeld, das an einem zur Meßstation entfernten Ort gleichzeitig gemessen wird. Die Entfernung zwischen Meß- und Referenzstation sei hinreichend groß, so daß die Störungen des Meßortes am Referenzort nicht mehr nachzuweisen sind. Das Referenzsignal soll störungsfrei sein.

Zwischen Meß- und Referenzstation läßt sich eine Übertragungsfunktion  $[K]$  gemäß

$$\vec{B}_{\text{mess } i} = [K] \cdot \vec{B}_{\text{ref } i} + \vec{\delta B}_i \quad (4.1)$$

aufstellen, die nach (2.3) bestimmt, einen bias-freien Schätzwert  $[\hat{K}]$  liefert. Mit dem geschätzten  $[K]$  können dann Prädiktionswerte

$$\vec{B}_{\text{pmess } i} = [\hat{K}] \cdot \vec{B}_{\text{ref } i} \quad (4.2)$$

berechnet werden, die identisch mit den homogen-kohärenten Signalanteilen an der Meßstation sind. Die Störungen des Magnetfeldes sind die Residuen

$$\vec{\delta B}_i = \vec{B}_{\text{pmess } i} - \vec{B}_{\text{mess } i} \quad (4.3)$$

Mit den störbefreiten Magnetfeldsignalen  $B_{\text{pmess } i}$  läßt sich der Magnetotellurik-Tensor  $[Z]_R$  aufstellen

$$\vec{E}_i = [Z]_R \cdot \vec{B}_{\text{pmess } i} + \vec{\delta E}_i \quad (4.4)$$

$[\hat{Z}]_R$ , nach (2.3) bestimmt, ist nun im Gegensatz zu  $[\hat{Z}]$  frei von einem Bias-Fehler. Ähnlich (4.2) lassen sich mit dem Schätzwert  $[\hat{Z}]_R$  Prädiktionwerte des elektrischen Feldes an der Meßstation berechnen, mit denen die Störungen im elektrischen Feld  $\vec{\delta E}_i$  zu bestimmen sind.

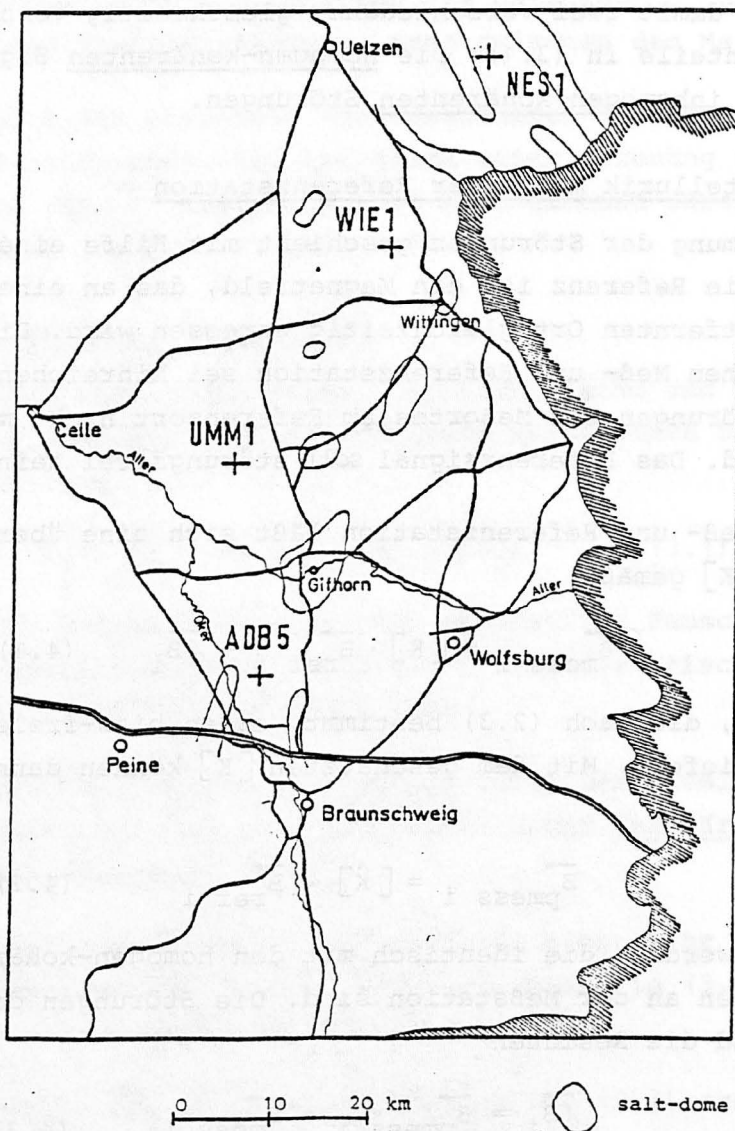


Fig.1. Map of stations in the region Braunschweig - Uelzen (Northern Germany)

### 5. Meßergebnisse

Zur Untersuchung von Störungen, die in der Praxis in magnetotellurischen Registrierungen enthalten sind, wurden auf einem 60km-Profil nördlich von Braunschweig gleichzeitige MT-Registrierungen durchgeführt. Die Messungen wurden durchgeführt mit den am Institut für Nachrichtentechnik der TU Braunschweig entwickelten automatisch registrierenden MT-Meßgeräten EMF 772, up. Fig. 1 zeigt die Lage der Stationen ADB5, UMM1, WIE1 und NES1. Der Periodenbereich der Registrierungen erstreckte sich von 2,5 bis 128 sec. Als Meßort wurde die Station ADB5 in der Nähe von Braunschweig und als Referenzorte die drei übrigen Stationen ausgewählt. Die Referenz-Orte sind weit entfernt von Industrieanstaltungen und elektrischen Versorgungsleitungen, so daß sie als nahezu "störungsfrei" angesehen werden können.

Einen ersten Eindruck über vorhandene Störungen vermitteln bereits die Zeitschriebe an verschiedenen Orten. Fig. 2 zeigt

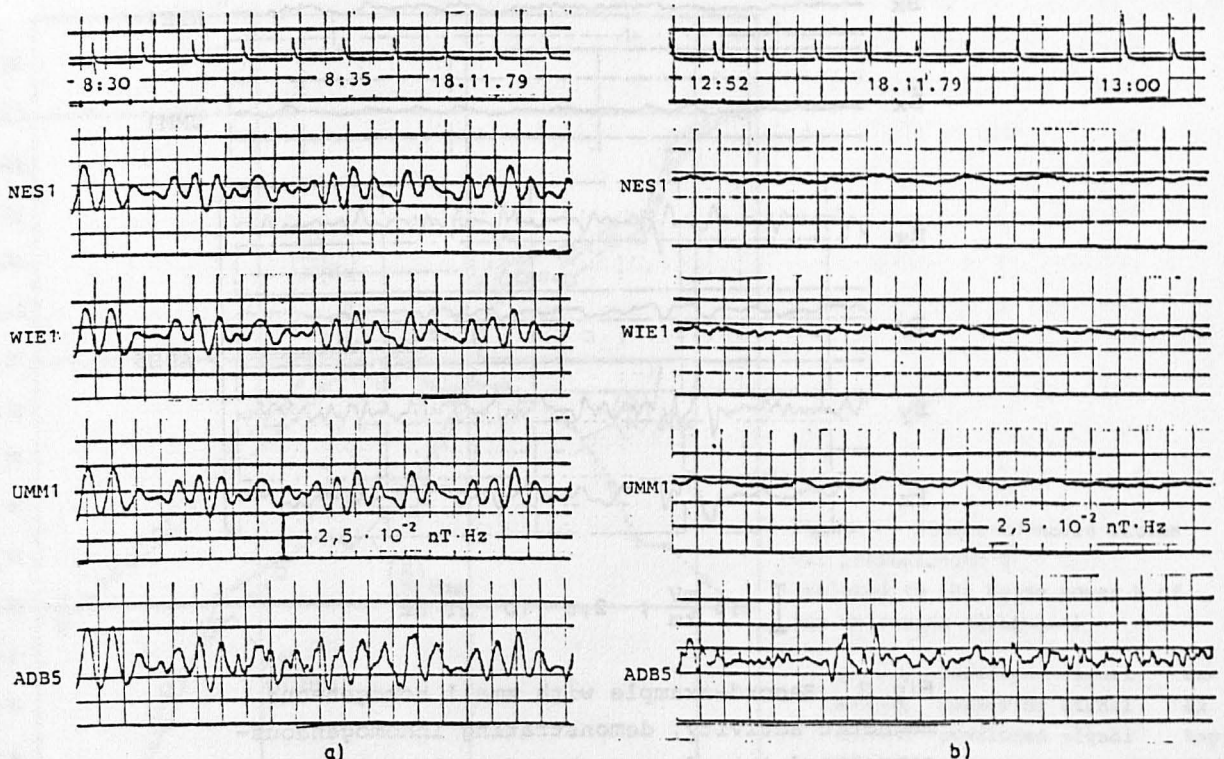


Fig. 2. Two record-examples of the magnetic component  $B_y$ , simultaneously sampled at the measuring-point ADB5 and the reference points UMM1, WIE1, NES1; bandwidth: 2,5 sec - 128 sec  
a) large homogeneous magnetic activity ; b) small homogeneous magnetic activity

die Ost-West-Komponente  $\dot{B}_y$  an den vier Stationen. Im Teil a mit großer homogener Signalaktivität ist ein nahezu identischer Signalverlauf an den drei Referenzorten zu beobachten, während der Verlauf an der Station ADB5 hierzu abweicht. Dieses weist auf Störungen im Magnetfeld an der Meßstation hin. Noch deutlicher ist dieses im Teil b zu erkennen. Die Referenzorte zeigen sehr wenig homogene magnetische Aktivität. Dagegen sind in ADB5 große Störanteile zu sehen. In Fig. 3 sind die Magnetfeldkomponenten in ADB5 den zugehörigen elektrischen Feldkomponenten gegenübergestellt. Zum Vergleich sind ebenfalls die Signalverläufe an den Referenzorten dargestellt. Die homogenen Signalanteile sind sehr gering. Die Meßstation weist dagegen zwischen  $\vec{E}$  und  $\vec{B}$  korrelierte inhomogene Störungen auf, die die in Kap. 3 erwähnten multipel-kohärenten Störungen verdeutlichen.

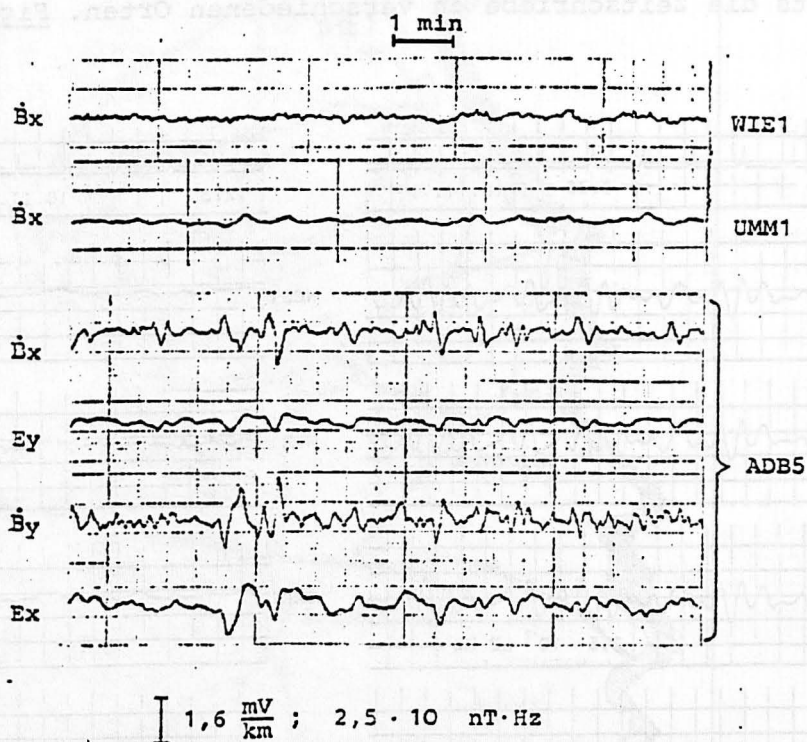


Fig. 3. Record-example with small homogeneous magnetic activity, demonstrating inhomogeneous-correlated interference between electric and magnetic components  $E_{x,y}$  and  $B_{y,x}$  at ADB5, bandwidth: 2,5 sec - 128 sec

5.1 Störungen im Magnetfeld

Zur quantitativen Bestimmung der Störungen im Magnetfeld wurde die Übertragungsfunktion  $[K]$  in (4.1) mit 240 Freiheitsgraden bestimmt und daraus nach (4.2) und (4.3) die homogenen Signalanteile und die inhomogenen Störanteile berechnet. Als Referenzstation diente UMM1. Die Leistungen der verschiedenen Signale sind in Fig. 4 im Periodenbereich von 3 sec bis 128 sec dargestellt. Das Bild zeigt die Leistungen  $S$  des Meßsignals  $B_x$ , des Referenzsignals  $B_{xR}$  und des Störsignals  $\delta B_x$ . Die Leistungen wurden bezogen auf die apparative Rauschleistung  $N$ .

Ein wichtiges Ergebnis ist, daß die Störleistung im gesamten Periodenbereich wesentlich größer als die apparative Rauschleistung ist (min 10 dB). Das heißt, die Rauschleistung des Meßgerätes wird keinen nennenswerten Einfluß auf die Schätzung des Impedanztensors haben. Unter 30 sec ist die Störleistung sogar größer als die Leistung des homogenen Signalanteils  $B_{xp}$ .

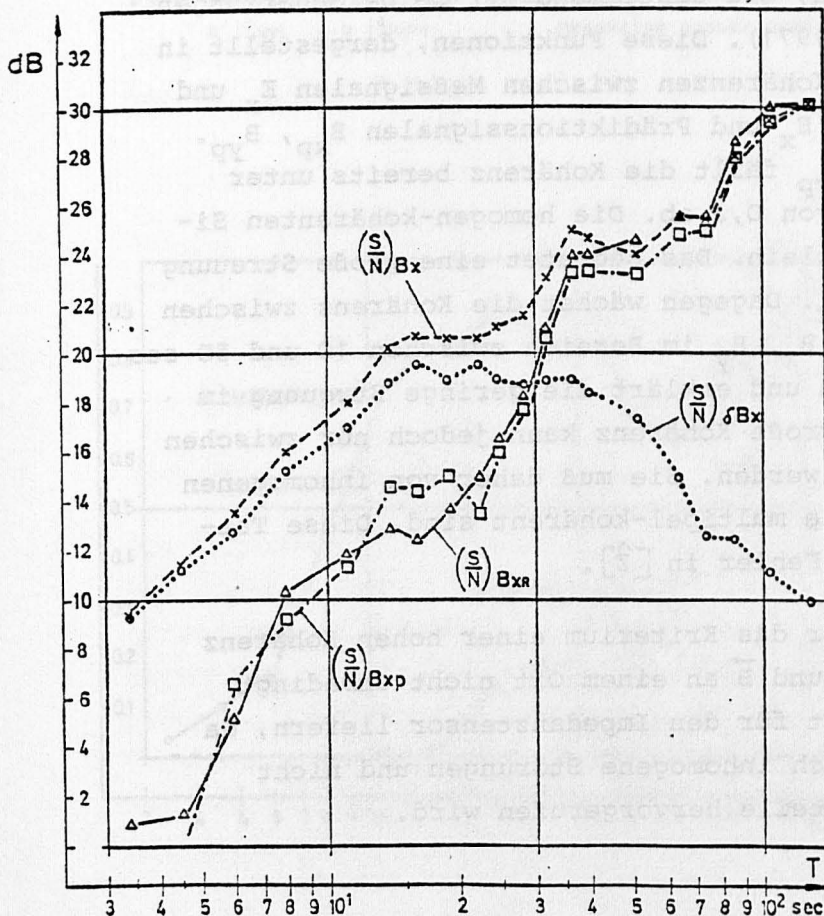


Fig.4. Signal-to-noise ratios vs. periodlength T (related to the noise power N of the measuring equipment)

- △—△ Reference-signal  $B_{xR}$  (UMM1)
- X---X measuring signal  $B_x$  (ADB5)
- predicted signal  $B_{xp}$  (ADB5)
- .....○ Interference-signal  $\delta B_x$  (ADB5)

Die Leistung des gesamten Meßsignals wird hier bestimmt durch die inhomogene Störleistung.

Daraus folgt, daß die Schätzung des Impedanztensors nur aus Meßdaten einer Station wegen der sehr großen Störleistung in diesem Periodenbereich einen beträchtlichen Bias-Fehler beinhalten wird.

## 5.2 Der Impedanztensor $[Z]$

Fig. 5a und Fig. 5b zeigen die Ergebnisse für die Schätzungen des Impedanztensors.  $[\hat{Z}]$  wurde aus Meßdaten einer Station und  $[\hat{Z}]_R$  unter Zuhilfenahme einer Referenzstation bestimmt. Als Beispiel ist der Betrag des Koeffizienten  $Z_{xy}$  dargestellt. Allgemein fällt die wesentliche größere Streuung des Schätzwertes  $[\hat{Z}]_R$  gegenüber  $[\hat{Z}]$  auf. Daneben kann man jedoch auch eine mittlere Abweichung zwischen beiden Schätzwerten zu kleinen Periodenlängen hin feststellen, welche Ausdruck des Bias-Fehlers in  $[\hat{Z}]$  ist. Die Unterschiede lassen sich anhand der Kohärenzfunktionen erklären, die bestimmend für beide Schätzungen sind (Bendat, Piersol 1971). Diese Funktionen, dargestellt in Fig. 6, sind multiple Kohärenzen zwischen Meßsignalen  $E_x$  und  $B_x$ ,  $B_y$  sowie Meßsignal  $E_x$  und Prädiktionssignalen  $B_{xp}$ ,  $B_{yp}$ . Zwischen  $E_x$  und  $B_{xp}$ ,  $B_{yp}$  fällt die Kohärenz bereits unter 50 sec auf einen Wert von 0,3 ab. Die homogen-kohärenten Signalanteile sind also klein. Das bedeutet eine große Streuung für den Schätzwert  $[\hat{Z}]_R$ . Dagegen wächst die Kohärenz zwischen den Meßsignalen  $E_x$  und  $B_x$ ,  $B_y$  im Bereich zwischen 10 und 50 sec auf sehr große Werte an und erklärt die geringe Streuung im Schätzwert  $[\hat{Z}]$ . Diese große Kohärenz kann jedoch nur zwischen Meßsignalen beobachtet werden. Sie muß daher von inhomogenen Störungen herrühren, die multipel-kohärent sind. Diese Tatsache erklärt den Bias-Fehler in  $[\hat{Z}]$ .

Im allgemeinen muß daher das Kriterium einer hohen Kohärenz zwischen Meßsignalen  $\vec{E}$  und  $\vec{B}$  an einem Ort nicht unbedingt einen "guten" Schätzwert für den Impedanztensor liefern, da diese Kohärenz u.U. durch inhomogene Störungen und nicht durch homogene Signalanteile hervorgerufen wird.



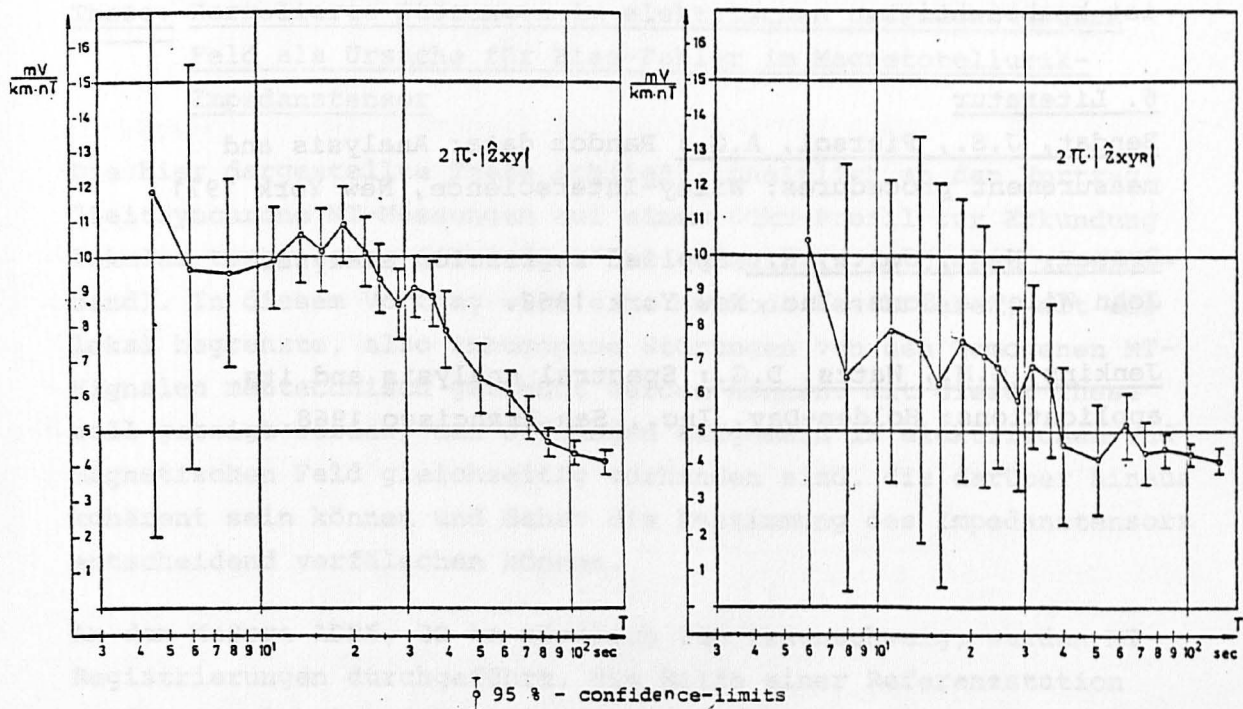


Fig. 5. Absolute value of the impedance coefficients vs. periodlength  $T$  with 95 %-confidence-limits  
 a  $|Z_{xy}|$  ; b  $|Z_{xyR}|$  Measuring point: ADB5, Reference point: UMM1

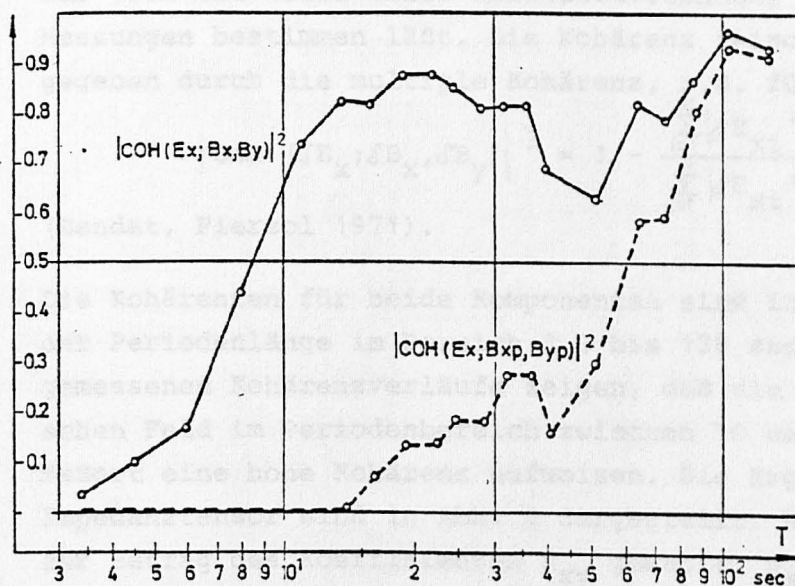


Fig. 6. Multiple coherence function vs. periodlength  $T$  at ADB5

- between  $E_x$  and  $E_x, B_y$
- between  $E_x$  and  $E_{xp}, B_{yp}$

Eine ausführliche Veröffentlichung der dargestellten Ergebnisse ist beabsichtigt.

6. Literatur

Bendat, J.S., Piersol, A.G.: Random data: Analysis and measurement procedures: Wiley-Interscience, New York 1971

Draper, N.R., Smith, H.: Applied regression analysis: John Wiley & Sons, Inc., New York 1966.

Jenkins, G.M., Watts, D.G.: Spectral analysis and its applications: Holden-Day, Inc., San Francisco 1968.

