

HANS JÜRGEN MICHEEL

"Eine Audiomagnetotellurik-Meßapparatur (1 Hz - 20 kHz)
und erste Ergebnisse der Datenanalyse

In den letzten beiden Jahren wurde im Rahmen eines DFG-Vorhabens am Institut für Nachrichtentechnik eine Audiomagnetotellurik-Meßapparatur für den Frequenzbereich von 1 Hz bis 20 kHz entwickelt. Über das Konzept der Station und z.T. auch technische Einzelheiten wurde bereits auf dem letzten ETF-Kolloquium in Neustadt (April 78) berichtet.

Die in diesem Frequenzbereich vorhandenen natürlichen und künstlichen Anregungen führten zu einer Aufteilung des Spektrums in drei Bereiche, wobei die Grenzen als Richtwerte aufzufassen sind:

Band I	1 Hz - 1 kHz	Abnahme der Energie mit der Frequenz, technische Störungen
Band II	1 kHz - 5 kHz	Minimum der Energie
Band III	5 kHz - 20 kHz	Zunahme der Energie mit der Frequenz, VLF-Sender

1. Die Meßapparatur

Das Blockschaltbild der gesamten Meßapparatur zeigt Abb. 1. Gemessen werden die Horizontalkomponenten der Schwankungen des erd-elektrischen (E) und magnetischen Feldes (H). Für den gesamten Frequenzbereich werden eingangsseitig sechs Meßkanäle benötigt, davon zwei zur breitbandigen Registrierung des elektrischen Feldes, zwei zur Registrierung des Magnetfeldes im Band I und zwei zur Messung des Magnetfeldes in den Bändern II und III. Jeder Meßkanal läßt sich in drei Blöcke unterteilen: Sensor, Vorverstärker mit bandbegrenzenden und Störunterdrückungsfiltern sowie Endverstärker mit weiteren Filtern. Das breitbandige Vorverstärker Ausgangssignal eines jeden E-Feld-Kanales wird für das Band I und die Bänder II und III getrennten Endverstärkern zugeführt, so daß am Ausgang der Meßapparatur alle Signale im Band I und in den Bändern II und III parallel zur Verfügung stehen. Die bandbegrenzenden Filter sind so ausgelegt, daß sich das niederfrequente Band I und das hochfrequente Band II überlappen. In den Meßkanälen für das Band I können durch zuschaltbare Sperr-

Endverstärker, Filter

Sensoren

Vorverstärker, Filter

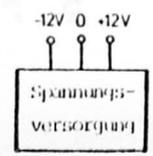
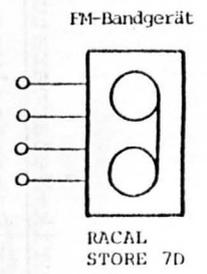
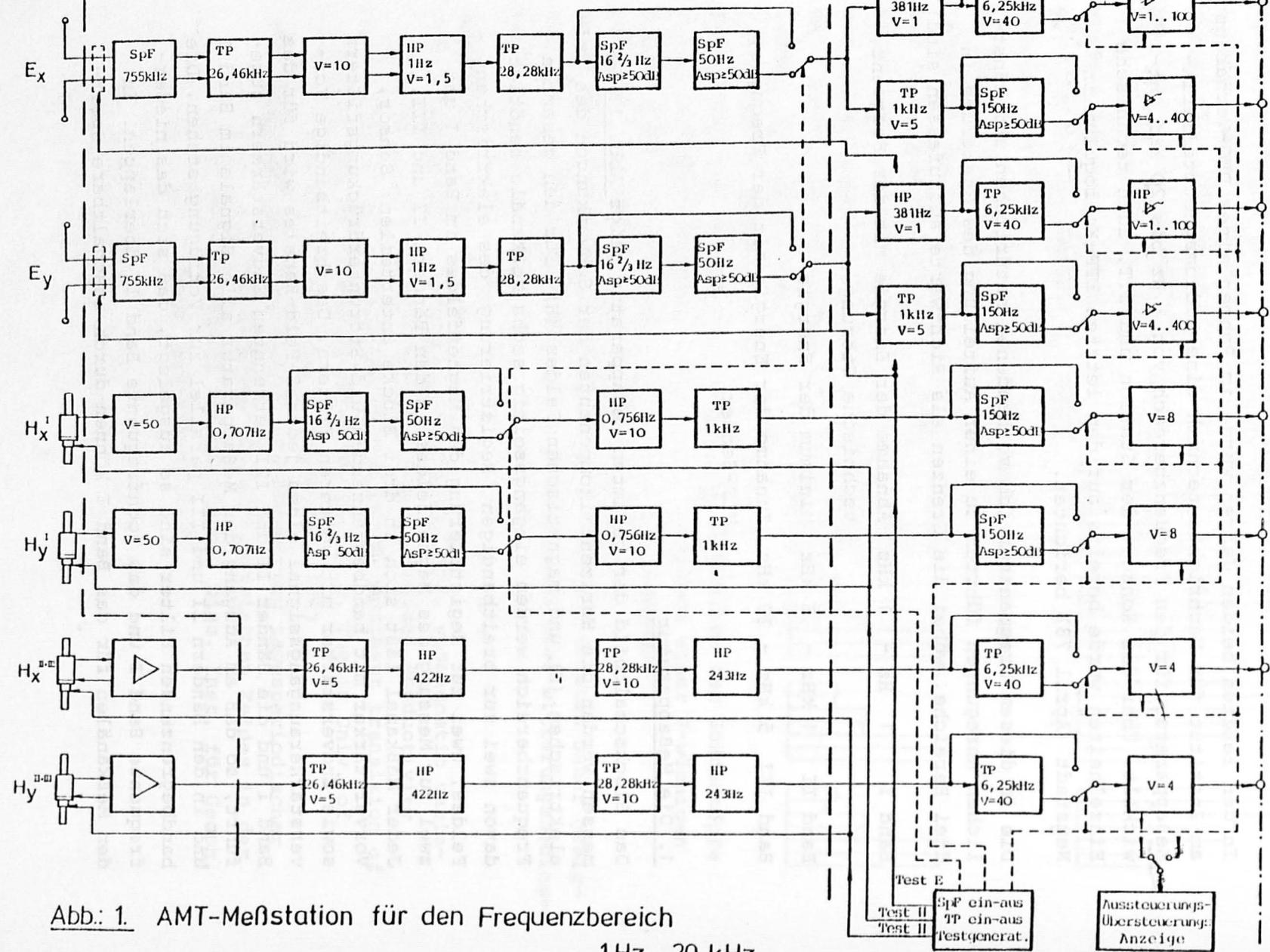


Abb.: 1. AMT-Meßstation für den Frequenzbereich
1 Hz - 20 kHz

filter technische Störungen bei den Frequenzen $16 \frac{2}{3}$ Hz, 50 Hz und 150 Hz unterdrückt werden. In den Endverstärkern der E-Feld-Kanäle ist eine Verstärkungsumschaltung in 10-dB-Schritten vorhanden (max. Änderung 40 dB), durch die eine Anpassung der von Anregung und Untergrund abhängigen Signalamplituden ($E \sim \sqrt{P_S} \cdot H$) an den Aussteuerungsbereich des Bandgerätes möglich ist. In den Meßkanälen für die Bänder II und III kann durch ein zuschaltbares Tiefpaßfilter der Meßfrequenzbereich allein auf das Band II begrenzt werden, um auch in diesem Bereich die Signale mit hinreichendem Signal-Rausch-Abstand aufzeichnen zu können.

Sensoren und Vorverstärker für je zwei Komponenten bilden jeweils eine räumliche Einheit, die Endverstärker und die sonstige Elektronik werden getrennt davon in einem gesonderten Einschub untergebracht. Testgeneratoren, deren Ausgangssignale direkt in die Sensoren eingespeist werden, ermöglichen die Überprüfung der Funktion der gesamten Anlage im Feld.

Eine optische Aus- und Übersteuerungsanzeige für vier Kanäle ist vorhanden. Sie kann wahlweise für die nieder- oder hochfrequenten Kanäle benutzt werden.

Mit einem Magnetbandgerät, das mit vier FM-Kanälen bestückt ist, können entweder die Ausgangssignale der vier niederfrequenten oder die der vier hochfrequenten Kanäle analog aufgezeichnet werden.

Die Spannungsversorgung für die Meßapparatur einschließlich Bandgerät erfolgt durch zwei 12-V-Akkus.

2. Sensoren

Als Sonden für das elektrische Feld dienen verzinkte Stahlstäbe, die Auslage beträgt 50 m bis 100 m.

Die Messung der Magnetfeldkomponenten im niederfrequenten Band I erfolgt durch Induktionsspulenmagnetometer. Für das hochfrequente Band wird ein Magnetometertyp mit einer induktiven Gegenkopplung verwendet, zu dessen Entwicklung folgende Überlegungen führten.

Der Induktionsspulensensor liefert eine Ausgangsspannung, die der zeitlichen Ableitung des äußeren Magnetfeldes proportional ist. Bei einem mit der Frequenz fallenden Magnetfeldspektrum, wie es im Band I vorhanden ist, ist dieses Sensorverhalten im Hinblick auf die Signalaufzeichnung durch ein FM-Analog-Magnetbandgerät mit begrenztem Dynamikbereich wegen der Höhenanhebung als günstig anzusehen. Der Meßfrequenzbereich dieses Magnetometers wird nach oben durch eine Resonanzstelle im Frequenzgang begrenzt, die aufgrund von Verstärker- und Wicklungskapazitäten in Verbindung mit der Sensorinduktivität entsteht. Die untere Bandgrenze wird bei gegebener Induktivität durch das geforderte Auflösungsvermögen bestimmt.

Die Auflösungs Grenze läßt sich berechnen /1/ und für verschiedene Frequenzbereiche asymptotisch annähern. Der qualitative Verlauf der Asymptoten ist in Abb. 2 dargestellt. Die Auflösung ist bei tiefen Frequenzen durch das Spannungsrauschen des Wicklungswiderstandes und das des Verstärkers gegeben und zeigt dort

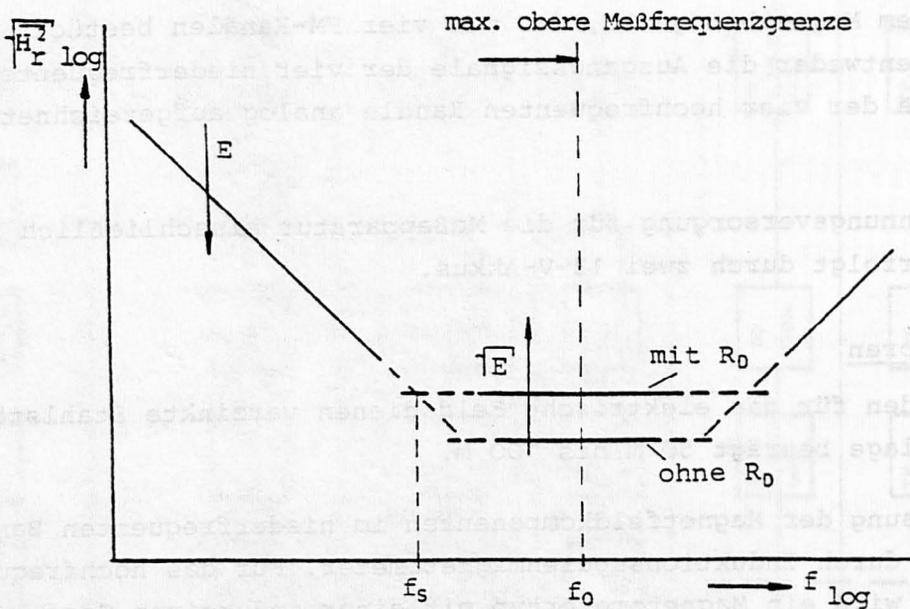


Abb.: 2 Spektrales Auflösungsvermögen eines Induktionsspulensensors und dessen Abhängigkeit von der Sensorenempfindlichkeit E . (Sensordämpfung konstant)

eine $1/f$ -Charakteristik. In einem mittleren Frequenzbereich, in dem auch die Sensorresonanzfrequenz f_0 liegt, wird das Auflösungsvermögen frequenzunabhängig. Es wird dort durch das Stromrauschen des Verstärkers und das eines Parallelwiderstandes R_D zum Sensor bestimmt, der zur Bedämpfung der Sensorresonanz notwendig ist. Bei hohen Frequenzen und damit weit außerhalb des Meßfrequenzbereiches nimmt das Auflösungsvermögen wieder ab.

Die Abhängigkeit der Auflösungsgrenze von der Sensorempfindlichkeit E läßt sich ebenfalls der Abb. 2 entnehmen. Eine Erhöhung von E verbessert das Auflösungsvermögen bei niedrigen und verschlechtert es bei hohen Frequenzen. Die Eckfrequenz f_g im Schnittpunkt des Symptoten wird dadurch wie die Resonanzfrequenz f_0 zu kleineren Frequenzen verschoben. Bei einer Verminderung von E ergeben sich umgekehrte Verhältnisse.

Voruntersuchungen des Spektrums der natürlichen Signale im Frequenzbereich von 1 - 5 kHz haben gezeigt, daß ein gegenüber dem dazu benutzten Induktionsspulenmagnetometer erhöhtes Auflösungsvermögen wünschenswert ist. Eine merkliche Verbesserung kann allein durch eine Empfindlichkeitsverminderung für den Sensor nicht erreicht werden. Sie ergibt sich erst, wenn auf den Dämpfungswiderstand R_D verzichtet werden kann. Dann wird die Auflösungsgrenze nur durch den Eingangsrauschstrom des Verstärkers bestimmt, der im allgemeinen kleiner als der Rauschstrom des Dämpfungswiderstandes gehalten werden kann (siehe Abb. 2). Ein Verzicht auf diesen Widerstand ist möglich, wenn bei dem Sensor eine induktive Rückkopplung eingeführt wird.

Den prinzipiellen Aufbau eines Sensors mit induktiver Rückkopplung zeigt Abb. 3. Eine Induktionsspule mit hochpermeablem Kern und der Windungszahl n_1 wird an den nicht invertierenden Eingang eines Verstärkers gelegt, dessen Verstärkung V_0 mit den Widerständen R_1, R_2 eingestellt werden kann. Über einen Widerstand R_K und eine Wicklung mit wenigen Windungen n_2 wird das Ausgangssignal auf den Kern zurückgekoppelt. Der Widerstand R_K wird dabei so gewählt, daß der Strom i_K im Rückkopplungszweig nur durch ihn bestimmt wird. i_K erzeugt ein Magnetfeld, das dem ursprünglichen Feld im Kern entgegengerichtet ist, so daß der Kern nahezu feldfrei wird. Ohne Berücksichtigung von Verstärker und Wicklungskapazitäten ergibt sich unter der genannten Vor-

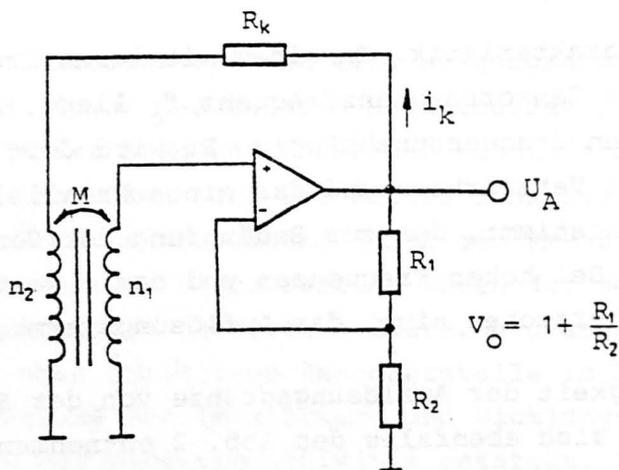


Abb.: 3 Magnetfeldsensor mit induktiver Rückkopplung

aussetzung für dieses Magnetometer folgende Übertragungsfunktion:

$$\frac{U_A}{H_a} = \frac{E_O}{2\pi} \frac{R_K}{M} \frac{j\omega/\omega_{gr}}{1+j\omega/\omega_{gr}} \quad (1)$$

$$\text{mit } \omega_{gr} = \frac{R_K}{V_O \cdot M}$$

E_O = Empfindlichkeit der Induktionsspule

M = Gegeninduktivität

Gleichung 1 stellt eine Hochpaßfunktion dar, die Hochpaßgrenzfrequenz ω_{gr} wird durch die Schaltungsparameter R_K , M und V_O bestimmt. Oberhalb der Grenzfrequenz ist die Ausgangsspannung dem zu messenden Feld H_a proportional. Dieses Sensorverhalten ist für die Signalaufzeichnung im Band III vorteilhaft, da im Vergleich zur Induktionsspule keine Anhebung der ohnehin schon sehr starken Signalpegel bei hohen Frequenzen erfolgt. Die obere Meßfrequenzgrenze dieses Magnetometers liegt weit oberhalb der Resonanzfrequenz der Induktionsspule-Verstärker-Kombination. Sie wird neben den Schaltungsparametern entscheidend durch das erste Spannungsminimum im Sensorfrequenzgang beeinflusst. Oberhalb der Hauptresonanz treten im Sensorfrequenzgang Spannungsminima und Partialresonanzen immer dann auf, wenn die Wicklung in Kammern unterteilt wird.

Das spektrale Auflösungsvermögen dieses Magnetometers ist von den gleichen Größen abhängig wie das des Induktionsspulen-

	1-kHz-Sensor	20-kHz-Sensor
Kernmaterial	Mu-Metalldraht	Ferrit H4
Kernlänge	600 mm	600 mm
Kernquerschnitt	∅ 17 mm	15 x 15 mm
Kernschlankheitsgrad	35	40
Kerngewicht	700 g	683 g
Windungszahl	22 400	12 000
Wicklungsdrahtdurchmesser	0,15 mm	0,22 mm
Wicklungswiderstand	2 kΩ	650 Ω
Induktivität	198 H	60 H
Gegeninduktivität		25 mH
Resonanzfrequenz	4 kHz	3,5 kHz
Empfindlichkeitskonstante	13,55 μV/ nT/Hz	7,33 μV/ nT/Hz
Empfindlichkeit bezogen auf Sensorverstärkerausgang	0,7 mV/ nT/Hz	50 mV/ nT

Abb.5
Daten der Magnetometer für die AMT-Station

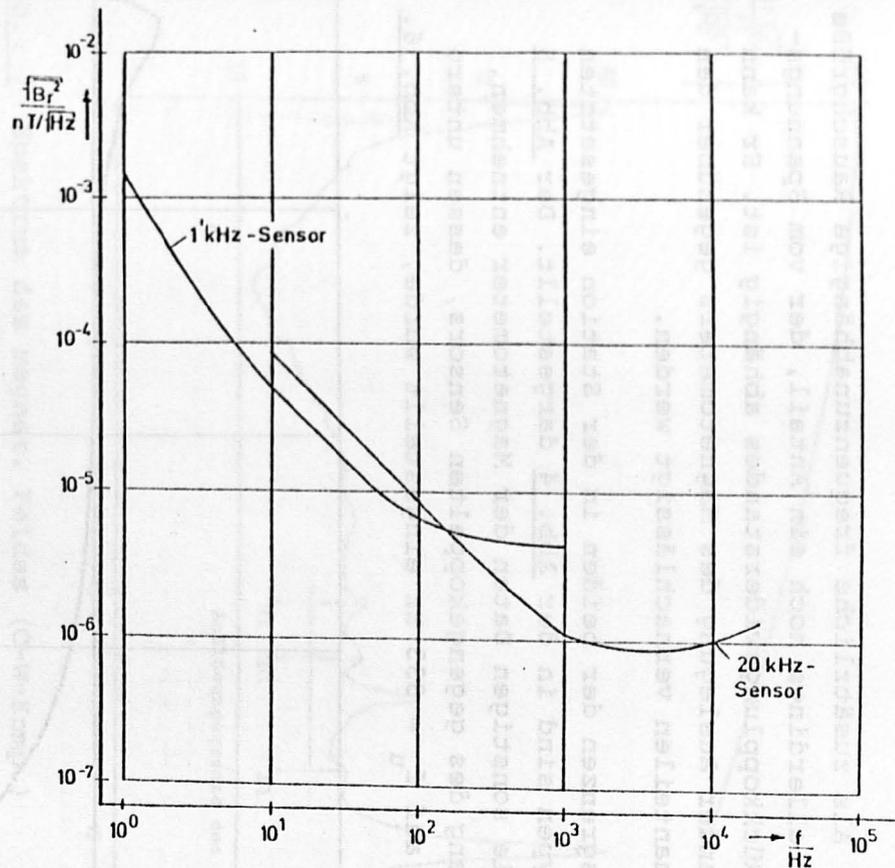


Abb.4:
Auflösungsgrenzen der Magnetometer für die AMT-Station

magnetometers. Als zusätzliche frequenzunabhängige Rauschgröße erscheint hier allerdings noch ein Anteil, der vom Spannungsrauschen des Rückkopplungswiderstandes abhängig ist. Er kann bei entsprechender Auslegung des Magnetometers gegenüber den anderen Rauschanteilen vernachlässigt werden.

Die Auflösungsgrenzen der beiden in der Station eingesetzten Magnetometertypen sind in der Abb. 4 dargestellt. Der Abb. 5 lassen sich die sonstigen Daten der Magnetometer entnehmen. Den Frequenzgang des gegengekoppelten Sensors, dessen untere Grenzfrequenz auf $f_u = 333$ Hz eingestellt wurde, zeigt Abb. 6.

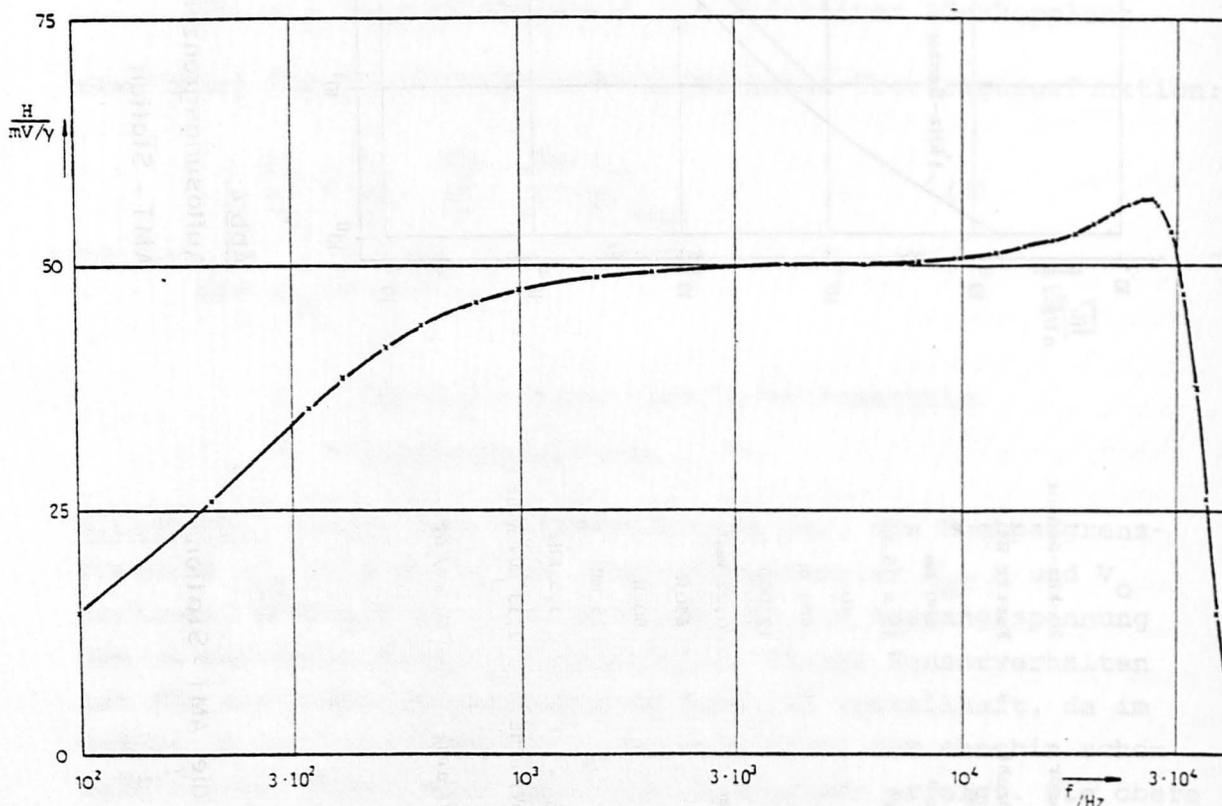


Abb.: 6 Frequenzgang der Empfindlichkeit des gegengekoppelten Magnetometers (eingestellte untere Grenzfrequenz 333 Hz)

3. Ergebnisse der Datenanalyse

Die Meßdaten, die an verschiedenen Orten mit der beschriebenen Apparatur aufgezeichnet wurden, wurden im Labor mit Echtzeit-spektrumanalysatoren ausgewertet. Über die spektrale Verteilung der Signalenergie und Störungen im Band I habe ich bereits auf der DGG-Tagung in Kiel (1979) berichtet (siehe auch /2/). Abb. 7 zeigt ein Beispiel für das mittlere Signalspektrum bei hohen

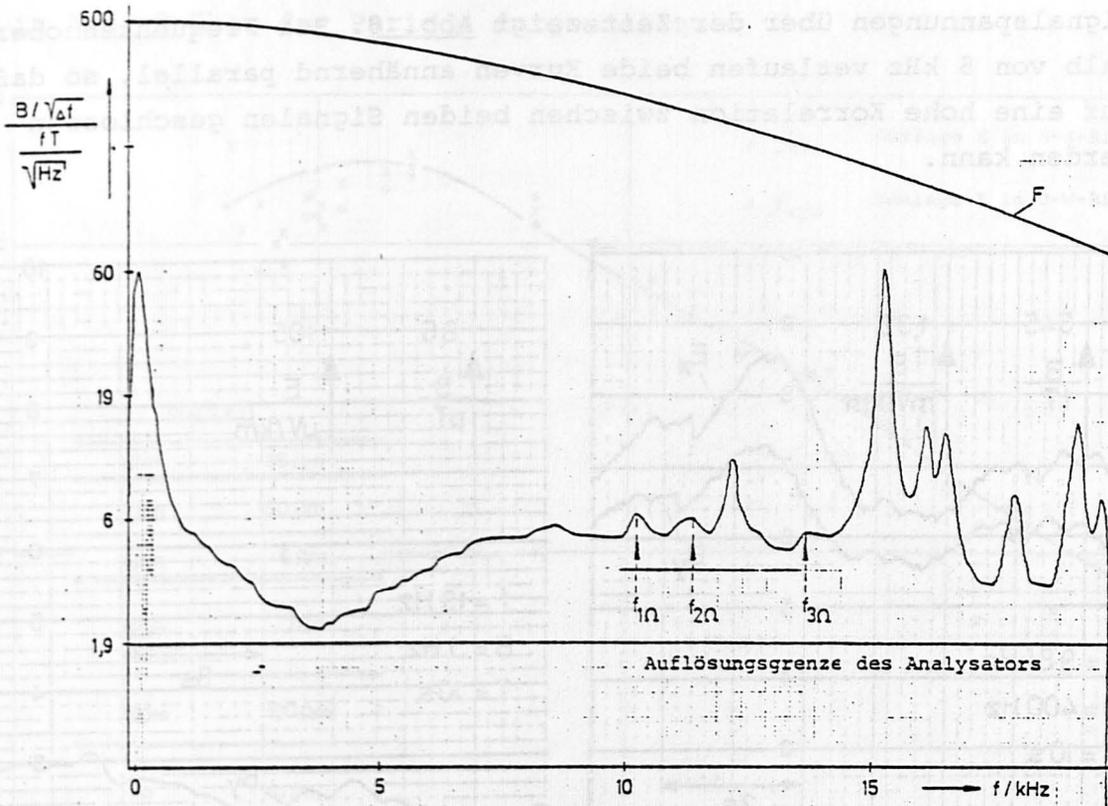


Abb.: 7 Spektrum des magnet. Feldes (O-W-Komp.)
Schneeren Sommer 79

Frequenzen, das für die O-W-Komponente des Magnetfeldes für den Meßort Schneeren (Steinhuder Meer) bestimmt wurde. Das Spektrum ist mit der angegebenen Funktion F gewichtet. Man erkennt deutlich das Minimum der spektralen Amplituden unterhalb von 5 kHz, das auf die Bedämpfung dieser Frequenzen im Wellenleiter Ionosphäre-Erde zurückzuführen ist, und ihre Zunahme bei höheren Frequenzen. Oberhalb von 10 kHz sind die Frequenzlinien zahlreicher Längstwellensender vorhanden, die z.T. Navigationssystemen zugeordnet werden können. Zu erkennen sind z.B. die Linien des Omega-Systems ($f_{1\Omega}$, $f_{2\Omega}$, $f_{3\Omega}$), deren mittlere Pegel, da die Sender im Impulsbetrieb mit einem Tastverhältnis von ca. 1 : 10 arbeiten, allerdings nur geringfügig größer sind als die der natürlichen Signale.

Zur Bestimmung einer \mathcal{S}_s -Kurve für diesen Meßort wurden die Daten mit einem Analysator schmalbandig gefiltert und das Integral des Effektivwertes in diesem Band über eine gewisse Zeit aufgezeichnet. Orthogonale Komponenten des elektrischen und magnetischen Feldes wurden dabei nacheinander ausgewertet und übereinandergeschrieben. Zwei Beispiele für den Verlauf der schmalbandigen

Signalspannungen über der Zeit zeigt Abb. 8. Bei Frequenzen oberhalb von 5 kHz verlaufen beide Kurven annähernd parallel, so daß auf eine hohe Korrelation zwischen beiden Signalen geschlossen werden kann.

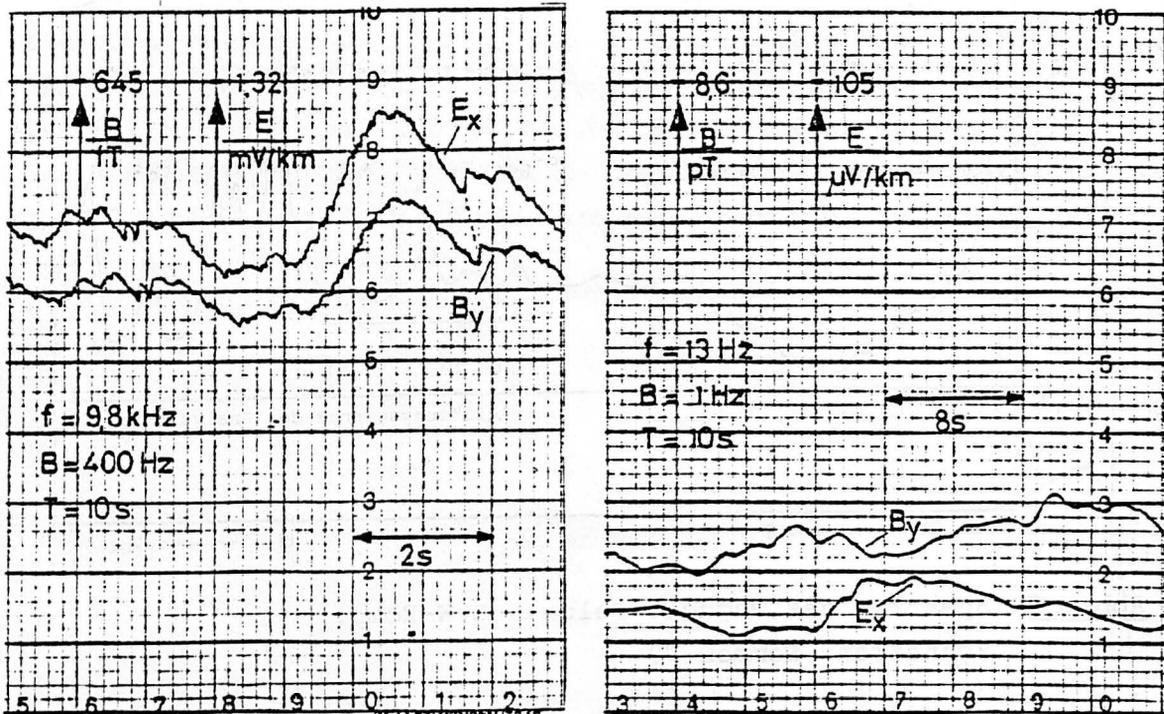


Abb. 8 Schmalbandige Signalspannungen für das elektrische und magnetische Feld bei verschiedenen Frequenzen

Bei Frequenzen zwischen 1 kHz und 100 Hz ergeben sich etwas größere Abweichungen zwischen beiden Kurven. Im niederfrequenten Bereich unter 100 Hz weichen die Kurvenverläufe mit abnehmender Frequenz zunehmend voneinander ab.

Aus den so aufgezeichneten Kurven wurden Werte für den scheinbaren spezifischen Widerstand ρ_s berechnet. Bei annähernd parallel verlaufenden Kurven wurden übereinanderliegende Kurvenpunkte berücksichtigt. Für Frequenzen über 5 kHz z.B. betragen die Unterschiede zwischen den so ermittelten minimalen und maximalen ρ_s -Werten bis zu ca. 30%. Ausgewertet wurden Datensätze von 30 s Dauer. Bei tiefen Frequenzen wurden bei nicht parallelen Kurvenverläufen Mittelwerte der Signalspannungen zur ρ_s -Berechnung herangezogen. Die Daten wurden hier über 2 min integriert. Die auf diese Art gewonnenen ρ_s -Werte sind

in Abb. 9 über der Periode dargestellt.

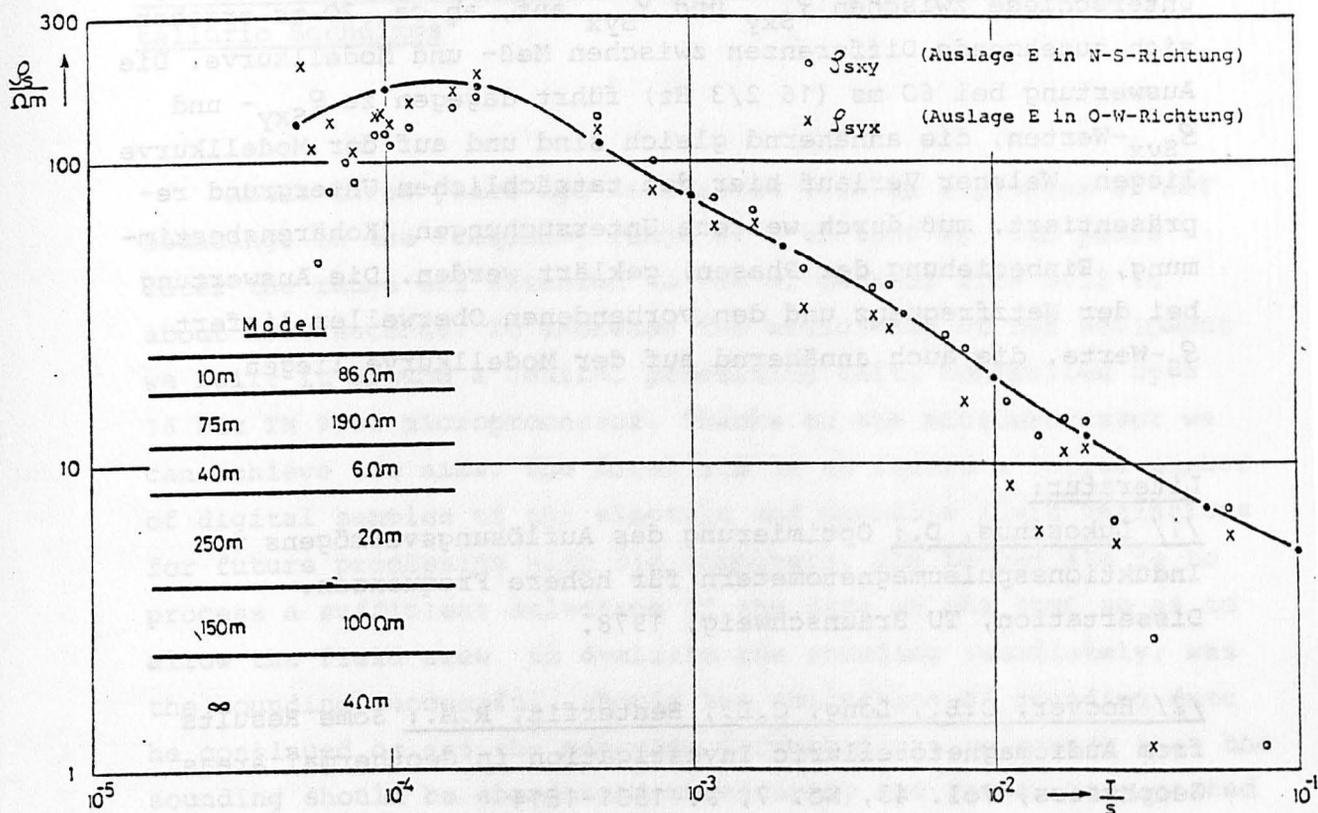


Abb.: 9 φ_S -Kurve und φ_S -Modellkurve für den Meßort Schneeren

Das für Schneeren angenommene Untergrundmodell wurde mit Hilfe einer Gleichstromgeoelektriksondierung (Auslage O-W-Richtung) erstellt /3/. Genauere Aussagen sind mit diesem Verfahren allerdings nur über die oberen Schichten möglich. Bei der Modellrechnung wurden daher Mächtigkeiten und spez. Widerstände der unteren Schichten so lange verändert, bis sich eine hinreichende Übereinstimmung zwischen Meß- und Modellkurve ergab. Phasenbeziehungen konnten aufgrund der noch fehlenden Rechnerauswertung bislang nicht berücksichtigt werden.

Das angenommene Untergrundmodell und die dazugehörige φ_S -Modellkurve sind ebenfalls in Abb. 9 dargestellt. Für Perioden unter 10 ms ergibt sich eine gute Übereinstimmung zwischen Meß- und Modellkurve. Unterhalb von 0,1 ms weichen allerdings die auf die N-S-Richtung des elektrischen Feldes bezogenen φ_{Sxy} -Werte zunehmend von den auf die O-W-Richtung bezogenen φ_{Syx} -Werten und der Modellkurve ab. Dieses Verhalten deutet darauf hin, daß die Annahme eines horizontal geschichteten Untergrundes hier nicht

mehr gerechtfertigt ist. Oberhalb von ca. 10 ms treten größere Unterschiede zwischen \mathcal{S}_{Sxy} und \mathcal{S}_{Syx} auf, ab ca. 20 ms ergeben sich zunehmende Differenzen zwischen Meß- und Modellkurve. Die Auswertung bei 60 ms (16 2/3 Hz) führt dagegen zu \mathcal{S}_{Sxy} - und \mathcal{S}_{Syx} -Werten, die annähernd gleich sind und auf der Modellkurve liegen. Welcher Verlauf hier den tatsächlichen Untergrund repräsentiert, muß durch weitere Untersuchungen (Kohärenzbestimmung, Einbeziehung der Phasen) geklärt werden. Die Auswertung bei der Netzfrequenz und den vorhandenen Oberwellen liefert \mathcal{S}_S -Werte, die auch annähernd auf der Modellkurve liegen.

Literatur:

/1/ Lukoschus, D.: Optimierung des Auflösungsvermögens von Induktionsspulenmagnetometern für höhere Frequenzen. Dissertation, TU Braunschweig, 1978.

/2/ Hoover, D.B., Long, C.L., Senterfit, R.M.: Some Results from Audiomagnetotelluric Investigation in Geothermal Areas. Geophysics, Vol. 43, No. 7, P. 1501-1514

/3/ Gramkow, B.: Geoelektrische Schlumberger-Sondierungen am Salzstock der Steinhuder-Meer-Linie - Meßbetrieb und Ergebnisse -. Diplom-Arbeit TU Braunschweig, Institut für Geophysik und Meteorologie, 1978.