

Messung von magnetischen Übertragungsfunktionen im Radiofrequenzbereich (10 kHz bis 1 MHz)

T. Radic und L. Aschmann
 Institut für Angewandte Geophysik, TU Berlin

Einführung

Zur Erkundung des oberflächennahen Untergrundes bis in etwa 30 Meter Tiefe werden immer aussagekräftigere und effizientere geophysikalische Erkundungsmethoden benötigt. Unter den elektrischen Verfahren zeichnen sich die passiven EM-Verfahren dadurch aus, daß sie an Stelle einer eigenen Signalquelle die zumindest in Zentraleuropa in großer Zahl vorhandenen Radiosender nutzen. Entsprechende Meßgeräte sollten daher prinzipiell kompakter aufgebaut und kostengünstiger herzustellen sein als solche aktiver Verfahren. Vertreter sind das radiomagnetotellurische- (RMT-), das radiomagnetische (RMS-) (Radic, 1996) und das VLF-Verfahren. Letzteres erfordert keinen galvanischen Kontakt zum Erdboden, was es in besonderer Weise für schnelle Übersichtsmessungen prädestiniert. Gelänge es, den Frequenzbereich dieses Verfahrens zu hohen Frequenzen hin zu erweitern und analog zur Methode der erdmagnetischen Tiefensondierung (siehe Schmucker, 1970) fortzuentwickeln, dann sollte hieraus ein leistungsfähiges Sondierungsverfahren hervorgehen. Es resultieren somit folgende Zielsetzungen:

- Methode zur Bestimmung der magnetischen Übertragungsfunktionen
- Erweiterung des Frequenzbereichs
- Erprobung und Vergleich mit anderen Methoden

Methode zur Bestimmung magnetischer Übertragungsfunktionen

Im Radiofrequenzbereich werden die elektromagnetischen Felder von Funkdiensten und Rundfunksendern des VLF-, Langwellen- und Mittelwellenbereichs gemessen und ausgewertet. Die Feldstärken der natürlichen Signale sind hier um mindestens 4 Größenordnungen kleiner als die der Sender. Eine Messung im Kontinuum erscheint daher derzeit als nicht sinnvoll. Da in einem Frequenzintervall von wenigen Hertz die Feldenergie nur von einem einzigen Sender stammt, sind die Eingangskanäle $H_x(\omega)$ und $H_y(\omega)$ vollständig korreliert. Der in der erdmagnetischen Tiefensondierung übliche Ansatz

$$H_z(\omega) = A_x(\omega) H_x(\omega) + A_y(\omega) H_y(\omega)$$

ist folglich nicht geeignet, die magnetischen Übertragungsfunktionen $A_x(\omega)$, $A_y(\omega)$ mittels einer bivariaten Ausgleichsrechnung zu bestimmen. Das Problem lösen wir, indem wir jeweils zwei Sender kombiniert auswerten, die benachbarte Frequenzen ω_1 , ω_2 aufweisen, jedoch in unterschiedlichen Richtungen ϑ_1 , ϑ_2 stehen. Für den erweiterten Ansatz wählen wir im folgenden eine kompaktere Schreibform (z.B. $H_{z1} := H_z(\omega_1)$):

$$H_{z1} = A_x H_{x1} + A_y H_{y1} \quad \text{Sender 1}$$

$$H_{z2} = A_x H_{x2} + A_y H_{y2} \quad \text{Sender 2}$$

Aus diesem Gleichungssystem können die Bestimmungsgleichungen für die magnetischen Übertragungsfunktionen abgeleitet werden:

$$A_x = \frac{\frac{H_{z2}}{H_{y2}} - \frac{H_{z1}}{H_{y1}}}{\frac{H_{z2}}{H_{y2}} \left(\frac{H_{z2}}{H_{x2}} \right)^{-1} - \frac{H_{z1}}{H_{y1}} \left(\frac{H_{z1}}{H_{x1}} \right)^{-1}} \quad A_y = \frac{\frac{H_{z2}}{H_{x2}} - \frac{H_{z1}}{H_{x1}}}{\frac{H_{z2}}{H_{x2}} \left(\frac{H_{z2}}{H_{y2}} \right)^{-1} - \frac{H_{z1}}{H_{x1}} \left(\frac{H_{z1}}{H_{y1}} \right)^{-1}} \quad (1)$$

Offensichtlich lassen sich A_x und A_y aus vier univariaten Übertragungsfunktionen berechnen:

Übertragungsfunktion	Senderfrequenz	Antennenausrichtung
H_{z1} / H_{x1}	ω_1	Nord
H_{z1} / H_{y1}	ω_1	Ost
H_{z2} / H_{x2}	ω_2	Nord
H_{z2} / H_{y2}	ω_2	Ost

Tab.1: Zusammenstellung der zur Bestimmung von A_x und A_y zu messenden vier Übertragungsfunktionen. Dabei soll gelten: $\omega_1 \approx \omega_2$, $|\vartheta_1 - \vartheta_2| > 30^\circ$, $\varpi = \sqrt{\omega_1 \omega_2}$

Abgeleitete Größen

Nach Vozoff (1972) und Jupp and Vozoff (1976) und können aus den magnetischen Übertragungsfunktionen weitere Parameter abgeleitet werden ($A := A^r + i A^i$):

Kippwinkel:
$$\alpha_x = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2 |A_x| \cos(\arg(A_x))}{1 - |A_x|^2} \right) \quad \alpha_y = \dots \text{ analog}$$

Elliptizität:
$$\varepsilon_x = \frac{\sin(\arg(A_x))}{\cos^2(\alpha_x) / |A_x| + |A_x| \sin^2(\alpha_x) + \sin(2\alpha_x) \cos(\arg(A_x))}$$

Tipper:
$$T = \sqrt{(A_x^r)^2 + (A_x^i)^2 + (A_y^r)^2 + (A_y^i)^2}$$

Streichrichtung (2D-Struktur):

$$\phi = \frac{[(A_x^r)^2 + (A_y^r)^2] \tan^{-1}(A_y^r / A_x^r) + [(A_x^i)^2 + (A_y^i)^2] \tan^{-1}(A_y^i / A_x^i)}{T^2}$$

Skew:
$$S = \frac{2(A_x^r A_y^i - A_x^i A_y^r)}{T^2}$$

Induktions-Pfeile (Schmucker, 1970):

$$c^r = \sqrt{(A_x^r)^2 + (A_y^r)^2} \quad \delta^r = \arctan \left(\frac{A_y^r}{A_x^r} \right) \quad \text{Real-Pfeil}$$

$$c^i = \sqrt{(A_x^i)^2 + (A_y^i)^2} \quad \delta^i = \arctan \left(\frac{A_y^i}{A_x^i} \right) \quad \text{Imaginär-Pfeil}$$

Der Kippwinkel und die Elliptizität sind zwei häufig genutzte Meßgrößen des VLF-Verfahrens. Die hier angegebenen Bestimmungsgleichungen gehen über die beim VLF-Verfahren üblichen hinaus, da sie direkt auf den magnetischen Übertragungsfunktionen basieren und dadurch nicht mehr von den Einfallrichtungen der Sender beeinflusst sind. Die weiteren Parameter sind der erdmagnetischen Tiefensondierung entlehnt und quantifizieren die Leitfähigkeitsverhältnisse im Umfeld jedes Meßpunktes.

Das Meßgerät

Da geeignete kommerzielle Meßgeräte derzeit noch nicht verfügbar sind, wurde im Rahmen des BMBF-geförderten Verbundvorhabens „Geophysikalisches RMS-Verfahren mit HTSL-SQUID“ (Burkhardt und Radic, 1997) ein Meßsystem u.a. für die neue Methode entwickelt. Das Meßgerät gliedert sich in vier Komponenten (Abb.1):

1. **Sensoren:** Als Magnetfeldsensoren werden zwei kernlose Induktionsspulen verwendet. Bei einem Durchmesser von 50 cm beträgt deren effektive Fläche 1.25 m^2 .
2. **Vorverstärker:** Dank des geringen Innenwiderstandes der Spulen (0.2Ω), wird das instrumentelle Rauschlevel in erster Linie von der Qualität der Vorverstärker bestimmt. Der verwendete Verstärker wurde daher vom Projektpartner (PTB Berlin) speziell im Hinblick auf ein minimales Rauschen ($0.14 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$) und eine geringe Eingangsimpedanz (1.8Ω) optimiert. Ein wesentliches Merkmal der Schaltung ist der Parallelbetrieb von 8 Transistoren. Sensor und Vorverstärker haben eine Feldempfindlichkeit von $0.5 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$.
3. **Digitalisierung:** Zum Zeitpunkt der Projektkonzipierung standen noch keine hinreichend hochauflösenden und gleichzeitig schnellen A/D-Wandler zur Verfügung. Daher wurde für die Messungen ein zweikanaliger Überlagerungsempfänger (Heterodyne-Prinzip) entwickelt und eingesetzt. Dieser bildet ein frei wählbares, schmales Frequenzband ($\text{BW} = 4 \text{ kHz}$) zwischen 10 kHz und 2.5 MHz auf eine niedrigere Frequenz ($2 \text{ kHz} - 6 \text{ kHz}$) ab. Den Anforderungen der Weiterverarbeitung dieser im Audiofrequenzbereich liegenden Signale genügen handelsübliche A/D-Wandler.
4. **Meßrechner:** Als Meßrechner dient ein Notebook.

Um sofort über das Meßergebnis verfügen und dessen Qualität beurteilen zu können, wird jede Übertragungsfunktion (Tab.1) unmittelbar nach der Registrierung berechnet. Hierzu wird ein statistisches Verfahren (univariate Kohärenzanalyse) angewandt, das sich in ähnlicher Form bereits in der Magnetotellurik bewährt hat (Abb.2). Neben Betrag und Phase wird ein Vertrauensintervall (statistischer Fehler) berechnet. Für die weitere Auswertung wird nur die Frequenz verwendet, die die höchste Kohärenz zwischen den Kanälen aufweist. Im allgemeinen ist dies die Trägerfrequenz des stärksten im selektierten Frequenzband liegenden Senders.

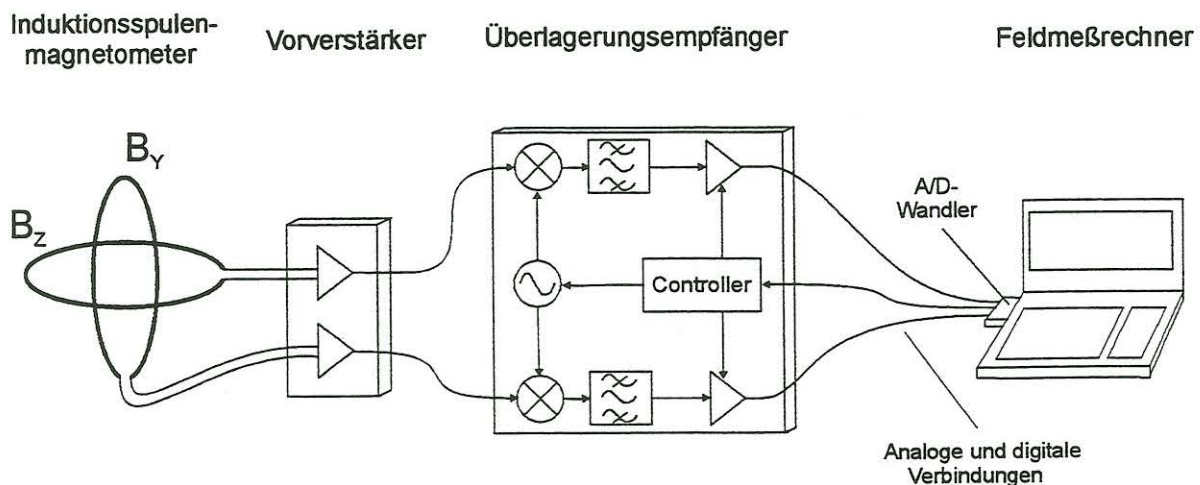
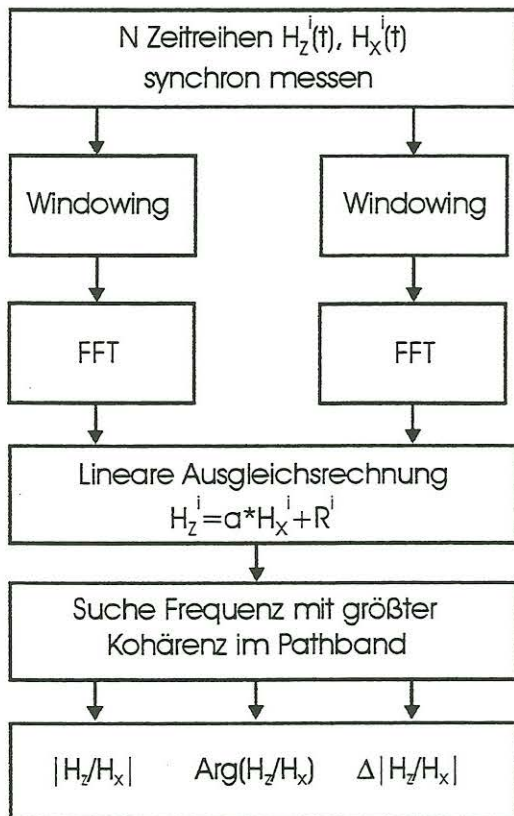


Abb. 1: Blockbild des Meßgerätes zur Bestimmung der magnetischen Übertragungsfunktionen im Radiofrequenzbereich.



Parameter	Wert
Auflösung der A/D-Wandler	12 Bit
Zeitreihenlänge	2048 Samples
Meßzeit (Frequenzauflösung)	1/8 s (8 Hz)
Stacking (Gesamtmeßzeit)	32 (4 s)

Tab.2: Parameter der Feldmessungen

Zur Bedienung des Meßgerätes und zur Überwachung des Meßablaufs wurde auf dem Feldmeßrechner ein grafisches Benutzerinterface implementiert. Es ist Bestandteil der Software zum Betrieb des Meßgerätes (Aschmann, 1998). Die Senderfrequenzen werden vor Beginn der Meßkampagne ausgewählt und eingegeben. Die Apparatur mißt dann an jedem Meßpunkt nacheinander bei diesen Frequenzen und berechnet die Übertragungsfunktion nach der nebenstehend schematisch dargestellten Methode. Sobald die Übertragungsfunktion für beide Richtungen und für alle programmierten Frequenzen vorliegt, können die magnetischen Übertragungsfunktionen nach Gleichung 1 berechnet werden. Hierzu müssen die Senderfrequenzen sinnvoll gepaart werden. Im einfachsten Fall bilden jeweils benachbarte Frequenzen ein Paar. 12 Frequenzen liefern dann

Abb.2: Zur Berechnung der Übertragungsfunktion H_z/H_x für eine Radiofrequenz und eine Antennenrichtung verwendete Methode.

11 Paare. Ob eine Paarung die Berechnung stabiler magnetischer Übertragungsfunktionen erlaubt, muß für jedes Meßgebiet individuell geprüft werden.

Felderprobung

Zur praktischen Erprobung des Meßgerätes und der Methode zur Bestimmung von magnetischen Übertragungsfunktionen wurde der Standort Schöneiche ausgewählt. Das 300 m x 300 m messende Areal liegt etwa 30 km südlich des Stadtrandes von Berlin, im nördlichen Vorfeld der Deponie Schöneicher Plan. Aus umfangreichen Vorerkundungen von Krüger (1997), Krause (1997) und Aschmann (1998) ist die Leitfähigkeitssituation des oberflächennahen Untergrundes bereits vorab sehr genau bekannt gewesen. Beispielhaft hierfür steht das Ergebnis der flächenhaft durchgeführten radiomagnetotellurischen (RMT-)

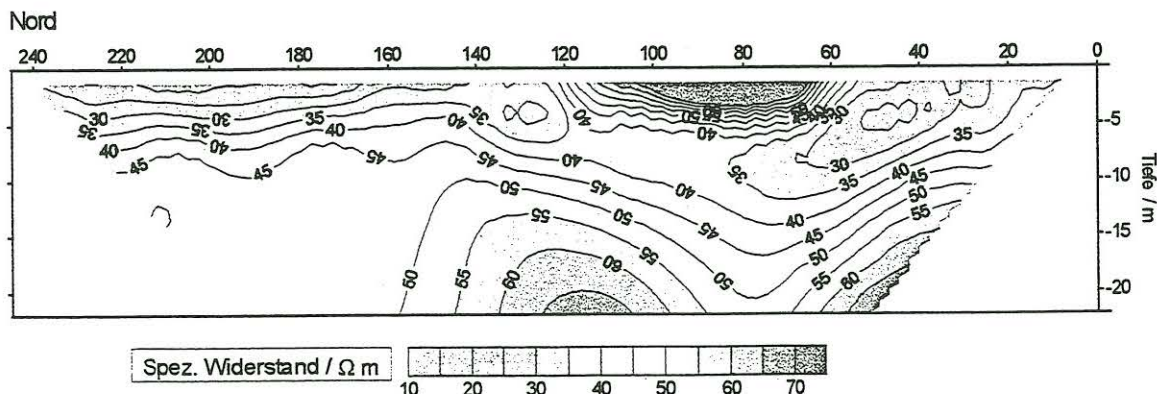


Abb.3: Ergebnis der zweidimensionalen Inversion der gleichstromgeoelektrischen Messungen (Wenner Sektion: $a=5\text{m}$) auf dem Profil 100 (Schöneiche b. Berlin). Nach Krüger (1996)

Messungen, die in Abb.4 dargestellt sind.

Für die Messungen wurde das Nord-Süd verlaufende RMT Profil 100 ausgewählt. Für dieses Profil wurde auch eine gleichstromgeoelektrische Cross-Sektionen erstellt (Abb.3). Dabei offenbart sich zwischen Profil-Abschnitt 60 m und 120 m eine resistive Struktur mit einer Mächtigkeit von 4 Metern. Wie geoelektrische Rammsondierungen zeigten, handelt es sich hierbei um eine Sandlinse. Diese wird von Süden her durch eine gut leitende, jedoch nicht von der Deponie stammende, Kontaminationsfahne unterströmt (Kretzer und Niederleithinger, 1995). Weitere gut leitende Strukturen im Norden sind natürlichen Ursprungs.

Die Messung bzw. Berechnung der magnetischen Übertragungsfunktionen erfordert mindestens vier Einzelmessungen (Tab.1). Mit dem uns zur Verfügung stehenden zweikanaligen Überlagerungsempfänger müssen diese nacheinander durchgeführt werden. Es zeigt sich, daß bereits Richtungsunterschiede von 30° zur Berechnung stabiler Übertragungsfunktionen genügen.

Das Ergebnis ist in Abb.5 dargestellt. Nach Schmucker (1970) weist der Real-Pfeil in Richtung des schlechten Leiters. Dabei nimmt primär der Bereich mit einem Radius von einer Skintiefe Einfluß auf den Pfeil. Seine Länge skaliert mit dem lateralen Widerstandscontrast. Die Ergebnisse lassen sich gut mit den RMT-Ergebnisse (Abb.4) in Einklang bringen. Am südlichen Profilende weisen die Real-Pfeile nach Osten, schwenken dann unter dem Einfluß des Randes der Sandlinse nach Nord-Ost und werden innerhalb der Sandlinse, aufgrund des abnehmenden Widerstandscontrastes, kleiner. Die Längenabnahme nach Norden hin ist bei der tiefsten Frequenz am geringsten, was daher rührt, daß die lateralen Widerstandsänderungen unterhalb der Sandlinse geringer sind.

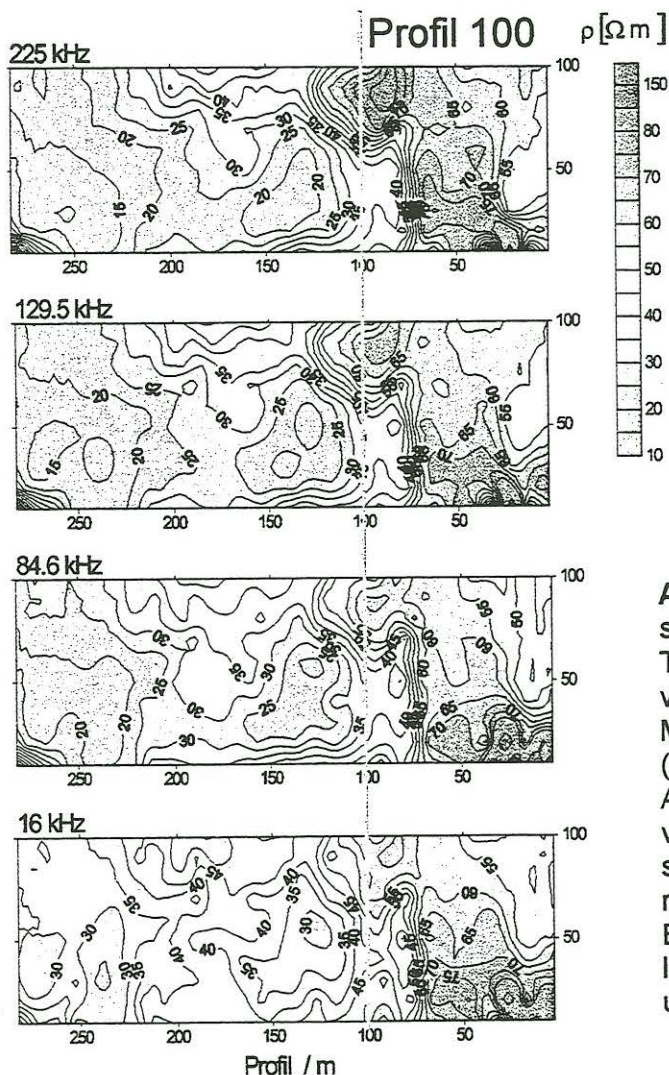


Abb.4: Verteilung der scheinbaren spezifischen Widerstände am Teststandort Schöneiche in Abhängigkeit von der Frequenz. RMT Antenne E/W. Die Messungen wurden von Prof. I. Müller (Neuchatel, Schweiz) mit seiner RMT-Apparatur durchgeführt. Die bei vier verschiedenen Frequenzen gemessenen scheinbaren spezifischen Widerstände repräsentieren unterschiedliche Erkundungstiefen. Im vorliegenden Fall liegen die Schwerpunkstiefen zwischen 3 und 10 Metern (Krause, 1997).

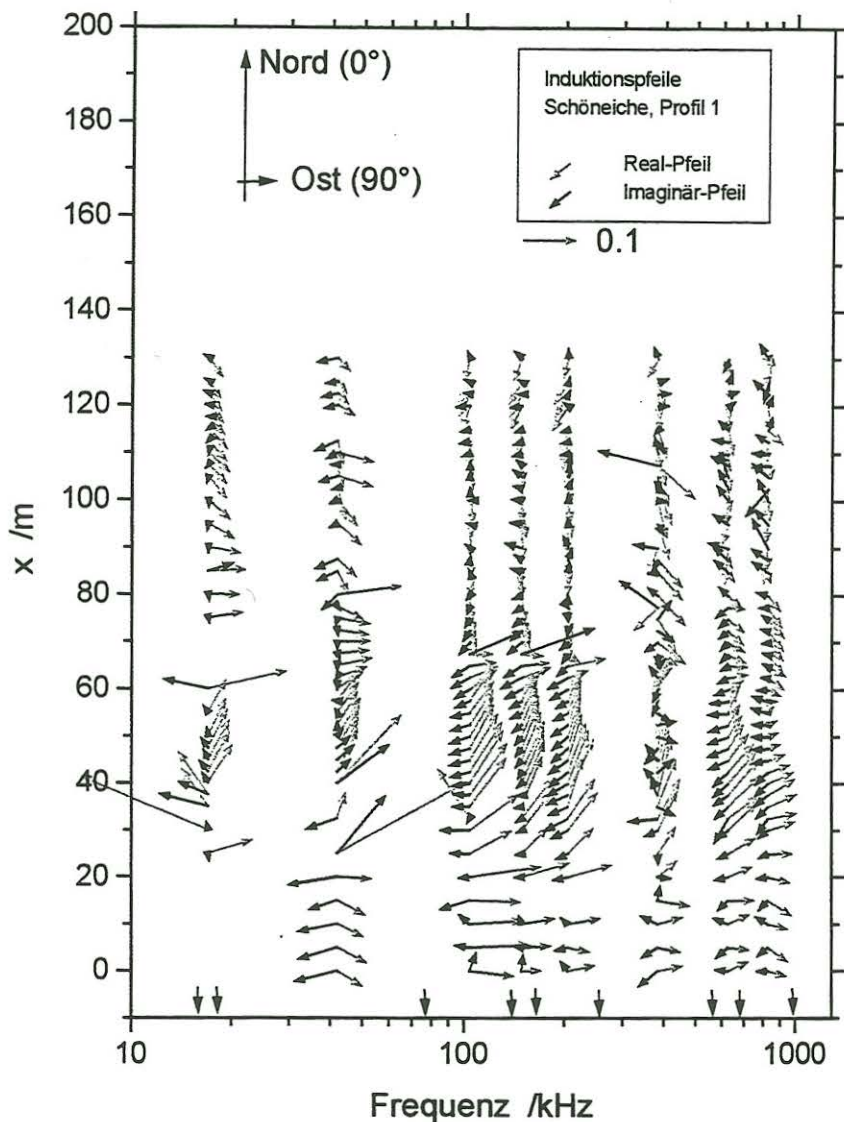


Abb.5: Auf dem Profil 100 für verschiedene Frequenzen ($\omega/2\pi$) berechneten Schmucker'sche Induktionspfeile. Die hell- und dunkelgrauen Pfeile sind eine grafische Repräsentation der magnetischen Übertragungsfunktion. Die nach unten weisenden Pfeile an der Frequenzachse kennzeichnen die verwendeten Senderfrequenzen.

Ausblick

Im Rahmen des laufenden Projekts (Burkhardt und Radic, 1998) sind folgende, weiterführende Arbeiten geplant:

- Bau eines 3-Komponenten Magnetometers
- Einsatz von supraleitenden Magnetometern (HTSL-SQUIDS)
- Einsatz schneller A/D-Wandler anstelle des Überlagerungsempfängers
- Messung des elektrischen Impedanztensors im Radiofrequenzbereich (RMT, RMS)
- CSAMT Messungen zwischen 1 kHz und 10 kHz
- Modellierung und Inversion der magnetischen Übertragungsfunktionen

Die technischen Entwicklungsarbeiten werden zu einer erheblichen Steigerung des Meßfortschrittes beitragen. Die Erweiterung des Frequenzbereichs zu niedrigeren Frequenzen hin verbessert die Durchdringung von gut leitenden Strukturen wie sie z.B. in Deponiekörpern auftreten. Die 2D Modellierung der magnetischen Übertragungsfunktionen zielt auf die Bestimmung der Leitfähigkeitsverteilung ab.

Literatur

- Aschmann, L. (1998): Fortentwicklung und Erprobung von Kartierungsverfahren der Gleichstrom-Geoelektrik und der Breitband-Kippwinkelmethode im Frequenzbereich von 20 kHz – 1 MHz, Diplomarbeit, Institut für Angewandte Geophysik der TU Berlin.
- Burkhardt, H., Radic, T. (1997): 1. Statusbericht des Teilprojekts "Klärung des methodischen Potentials...." im Verbundprojekt 13N6435A9 "Geophysikalisches RMS-Verfahren mit HTc-SQUID" an das BMBF.
- Jupp, D.L.B. and Vozoff, K. (1976): Discussion on „The magnetotelluric method in the exploration of sedimentary basins“ by Vozoff K (1972). *Geophysics*, V.41, p. 325-328.
- Krause, Y. (1997): Untersuchungen zu potentiellen systematischen Fehlerquellen bei der Messung und gemeinsamen 2D Inversion von RMT und CSAMT Daten. Diplomarbeit, Institut für Angewandte Geophysik der TU Berlin.
- Kretzer, H., Niederleithinger, E. (1995): Kombiniertes Einsatz von geoelektrischer Tiefensektion und tiefenorientierter Wasserprobennahme zur Erkundung einer Altlasten-Verdachtsfläche. *Wasser und Boden*, 47. Jahrgang, 8/1995.
- Krüger, B. (1997): Messung und Auswertung von oberflächennahen Widerstandslogs und geoelektrischen Tiefensektionen am Beispiel von Altlasten am Rande der Deponie Schöneiche. Diplomarbeit, Institut für Angewandte Geophysik der TU Berlin.
- Radic, T. (1996): Das Radiomagnetische Sondierungsverfahren (RMS) – Allererster Feldtest. S. 140-145. In (Hrsg.) Bahr, K. und Junge, A.: Protokoll über das 16. Kolloquium „Elektromagnetische Tiefenforschung“, Burg Ludwigstein, 9.-12.4.96, ISBN 0946-7467, Göttingen/Frankfurt.
- Schmucker, U. (1970): Anomalies of geomagnetic variations in the southwestern United States.- *Bull. of the Scripps Inst. Of Oceanography, Univ. of California, San Diego, La Jolla, California*, Vol. 13; University of California Press; Berkeley, Los Angeles, London.
- Vozoff, K. (1972): The magnetotelluric method in the exploration of sedimentary basins. *geophysics*, V.37, p.98-141.