

## Hochfrequente Elektromagnetik auf Altlasten

Die Arbeitsgruppe "Umweltgeophysik" der Universität zu Köln arbeitet an einem Gemeinschaftsprojekt mit der "Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe" (BGR) und der "Deutschen Montan-Technologie" (DMT). Ziel ist die Entwicklung integrierter Meß- und Interpretationsverfahren für LF-R und SHOTEM (Short Offset TEM) zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten.

Die gewissenhafte Erkundung von Altlasten stellt eine hohe Anforderung an die Geophysik und verlangt neue Meßmethoden, die vor allem in den obersten 10er Metern Informationen über den Untergrund liefern.

Das LF-R-Verfahren ist ein *passives* Elektromagnetik-Verfahren ähnlich dem VLF-R (d.h. daß nicht kontrollierbare Sender als Signal dienen). Der Frequenzbereich wurde jedoch wesentlich erweitert auf 10 kHz - 2 MHz und umfaßt nun nicht nur wie bisher beim VLF-R die U-Boot-Sender, sondern weiterhin den Bereich der Lang- und Mittelwellensender im Radiofrequenzbereich.

Wie bei der Magnetotellurik (MT) soll dieses Frequenzband es ermöglichen, eine Sondierung vorzunehmen.

Der wesentliche Unterschied hierzu ist:

- die Eindringtiefe von einigen Metern bis 10er Metern
- ein höheres Auflösungsvermögen
- die Messung diskreter Frequenzen (keine FFT notwendig) bewirkt eine größere Genauigkeit

SHOTEM hingegen ist ein aktives Elektromagnetik-Verfahren im Zeitbereich, welches schon vielseitig erprobt wurde und nun von der BGR für unsere Aufgabenstellung optimiert wird (PROTEM-Apparatur). Die Eindringtiefe beträgt hierbei einige 10er bis 100er Meter.

Die Aufgaben unserer Arbeitsgruppe sind:

- Entwicklung der Theorie sowie der Interpretations-Software für das LF-R-Verfahren
- Gemeinsame Interpretation von LF-R- und SHOTEM-Daten: **Joint Inversion**
- Entwicklung einer schnellen Vor-Auswertung, die bereits im Feld genutzt werden kann:
  - 1D-Inversion
  - Imaging
- Sämtliche Software soll für PC's entwickelt werden

Für die Auswertung der LRF-Daten interessiert nun der Gültigkeitsbereich der Lösung für ebene Wellen, da diese nur für große Entfernung von der Quelle gilt.

Die exakte Lösung für das elektrische und magnetische Feld des vertikalen elektrischen Dipoles (VED) unter Berücksichtigung der Verschiebungsströme für  $l$  Schichten lautet (nach Wait, J. R., 1982, 166-169):

$$E_r = \frac{I_z i\omega\mu_0}{2\pi k_0^2} \int_0^\infty \frac{m^2 J_1(mr) dm}{R_2^+ \left(1 + \frac{1}{R_2^+}\right)} \quad (1)$$

$$H_\phi = \frac{I_z}{2\pi} \int_0^\infty \frac{m^2 J_1(mr) dm}{n_0 + \left(1 + \frac{1}{R_2^+}\right)} \quad (2)$$

mit

$$R_2^+ = \frac{n_0 k_1^2}{n_1 k_0^2} \tanh \left[ n_1 h_1 + \operatorname{artanh} \left( \frac{n_1 k_2^2}{n_2 k_1^2} \tanh (n_1 h_1 + \dots) \right) \right]$$

$$n_0 = \sqrt{m^2 - k_0^2} \quad ; \quad k_0^2 = \omega^2 \varepsilon_0 \mu_0$$

$$n_j = \sqrt{m^2 - k_j^2} \quad ; \quad k_j^2 = \omega^2 \varepsilon'_j \mu_0$$

$$\varepsilon'_j = \varepsilon_j + i \frac{\sigma_j}{\omega} \quad ; \quad j = 1 \dots l \quad ; \quad J_1(mr) \dots \text{Besselfunktion 1. Ordnung}$$

Zur Vereinfachung wurden die Felder für den homogenen Halbraum berechnet; in Abhängigkeit von der Entfernung  $r$  und für verschiedene Frequenzen sowie spezifische elektrische Widerstände.

In Abbildung 1 ist zum einen der Quotient  $Q$  aus der Amplitude der Impedanz für die Lösung des VED's und der ebenen Welle, und zum anderen die Phasendifferenz der beiden Lösungen dargestellt.  $Q$  geht für  $r \rightarrow 0$  ebenfalls gegen Null. Dies folgt daraus, daß die  $E_r$ -Komponente des Primärfeldes in der Ebene  $z = 0$  Null ist, und sich für  $r \rightarrow 0$  die  $E_r$ -Komponente des Gesamtfeldes dieser annähert.

Je niedriger die Frequenz und je größer der spezifische elektrische Widerstand des Untergrundes, desto größer ist der Abstand  $d$  von der Quelle, bei dem die exakte Lösung des VED's in die Näherungslösung der ebenen Welle übergeht.

Es wurde ein einfacher Zusammenhang zwischen diesem Abstand  $d$  und der Meßfrequenz sowie des spezifischen elektrischen Widerstandes des Untergrundes gefunden: Abstand  $d_1$  gibt die kleinste Entfernung an, bei dem der in Abbildung 1a) und 1c) dargestellte Quotient 1 beträgt (bei größerer Entfernung beträgt die Abweichung nur einige Prozent):

$$d_1 [\text{m}] \approx 41 \sqrt{\frac{\rho [\Omega \text{m}]}{f [\text{kHz}]}} \approx 2.6 \text{ ST} [\text{m}] \quad (3)$$

ST ... Skin-Tiefe

Abstand  $d_2$  ist die Entfernung, bei der die Phasendifferenz (Abbildung 1b) und 1d) kleiner  $1^\circ$  wird:

$$d_2 [\text{m}] \approx 95 \sqrt{\frac{\rho [\Omega \text{m}]}{f [\text{kHz}]}} \approx 6 \text{ ST} [\text{m}] \quad (4)$$

Dies ermöglicht eine einfache Abschätzung, ab welcher Entfernung die einfache Lösung der ebenen Wellen verwendet werden kann.

Um den Einfluß der Verschiebungsströme auf unsere Messungen abschätzen zu können, wurde für das Feld des VED's eine Näherungslösung für das elektrische und magnetische Feld genommen. Für  $r \rightarrow \infty$  berechnet sich die Impedanz  $Z_n$  des geschichteten Untergrundes ( $n$  Schichten) zu:

$$Z_n := \frac{E_r}{H_\phi}(r \rightarrow \infty) = \frac{\omega \mu_0}{k_1} R_n \quad (5)$$

mit:

$$R_n = \coth \left( -ik_1 h_1 + \operatorname{arccoth} \frac{k_1}{k_2} \coth(-ik_1 h_1 + \dots) \right)$$

$$k_j = \sqrt{\underbrace{\omega^2 \mu_0 \epsilon_{rj} \epsilon_0}_{\text{Wellenterm}} + \underbrace{i\omega \mu_0 \sigma_j}_{\text{Dämpfungsterm}}}$$

$\epsilon_{rj}$  ... relative Dielektrizitätskonstante der  $j$ -ten Schicht

$\sigma_j$  ... elektrische Leitfähigkeit der  $j$ -ten Schicht

$h_j$  ... Dicke der  $j$ -ten Schicht ;  $j = 1 \dots n$

Diese Näherung stimmt mit der Formel 2.110 für ebene Wellen in Kaufmann & Keller (1981) überein. Im folgenden wurde für verschiedene relative Dielektrizitätskonstanten die Impedanz in Abhängigkeit von der Frequenz für einfache 2-Schichtfälle berechnet.

In Abbildung 2 sind die Ergebnisse als scheinbarer spezifischer elektrischer Widerstand  $\varrho_s$  und Phase  $\varphi$  dargestellt.

$$\varrho_s = \frac{|Z_n|^2}{\mu_0 \omega}$$

$$\varphi = \arctan \frac{\Im\{Z_n\}}{\Re\{Z_n\}}$$

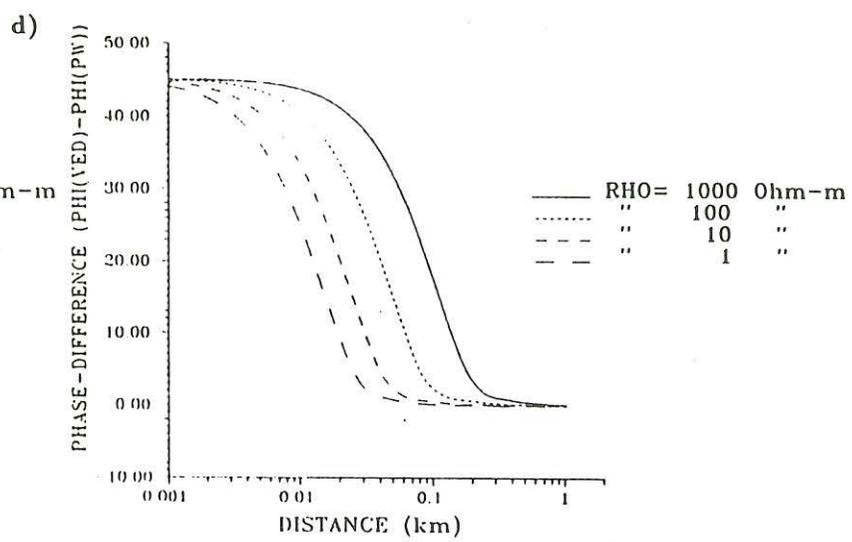
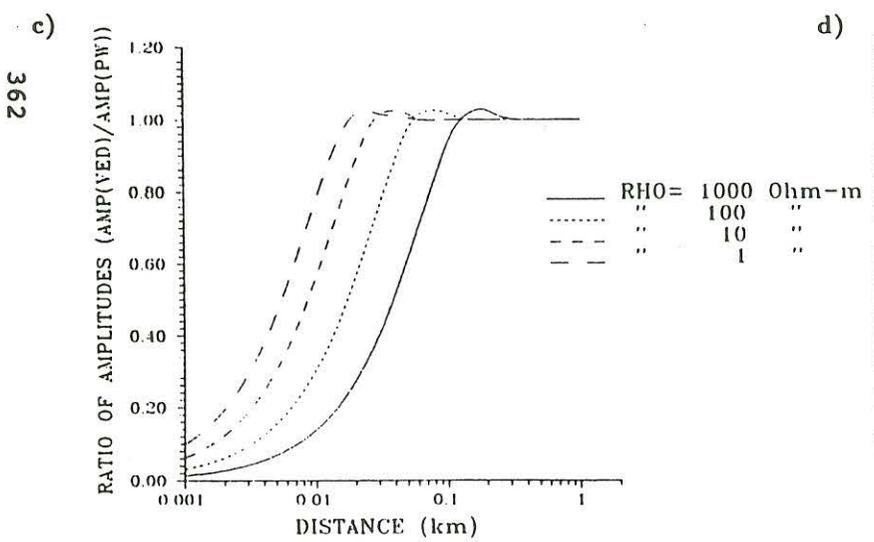
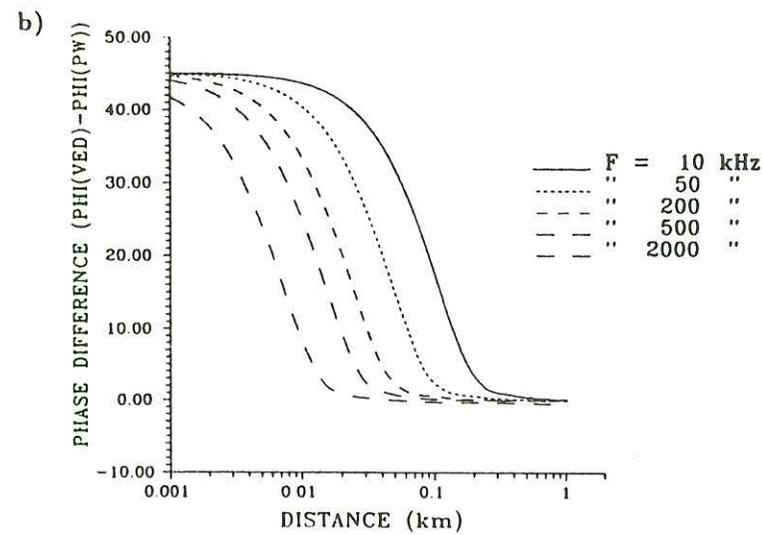
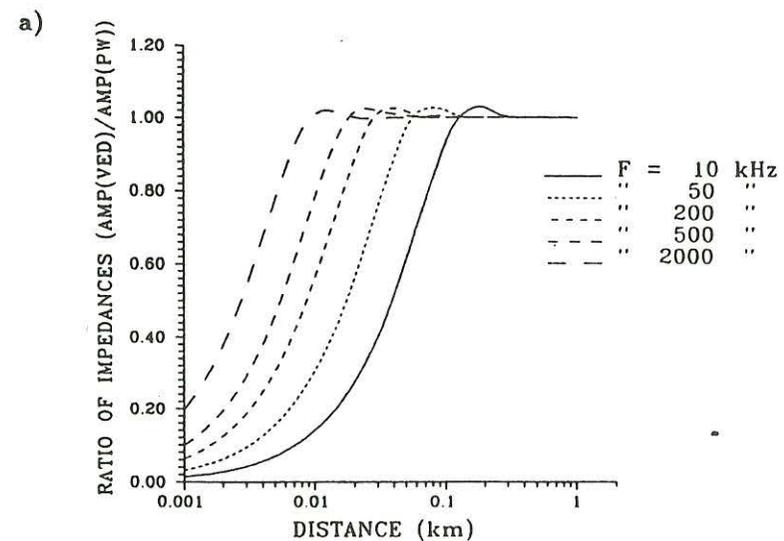
Der für uns interessante Frequenzbereich (10 kHz–2MHz) ist durch senkrechte Balken gekennzeichnet. Man erkennt deutlich eine Beeinflussung der Werte mit zunehmender Frequenz bei besonders hoher Dielektrizitätskonstante. Weiterhin wird die Phase stärker davon beeinflusst als der scheinbare spezifische elektrische Widerstand.

Generell ist der Einfluß der Verschiebungsströme in unserem Frequenzbereich für vernünftige relative Dielektrizitätskonstanten ( $\epsilon_r < 20$ ) gering. Dennoch berücksichtigen wir diesen z.B. für die 1D-Inversion.

Da unsere Messungen in der Regel in mindestens 1 km Entfernung vom nächsten Radiosender stattfinden werden, und der Einfluß der Verschiebungsströme in unserem Frequenzbereich gering ist, können wir für die Interpretation der Meßdaten auf bestehende Software der MT zurückgreifen und in modifizierter Form (in Bezug auf Frequenzbereich, Eindringtiefe, Polarisierung der Welle etc.) für unsere Aufgabenstellung anwenden. In Zukunft planen wir, die Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstandes des oberflächennahen Untergrundes an Hand eines 2D-Modelles (vielleicht auch 3D-) interpretieren zu können.

### Literatur

- Kaufman, A. A. & Keller, G. V., 1981. *The magnetotelluric sounding method*, Elsevier, Amsterdam.
- Wait, J. R., 1982. *Geo-electromagnetism*, Academic Press, New York.



362

PHI: Phase of the Impedance  
 AMP: Amplitude of the Impedance  
 VED: Vertical Electrical Dipole  
 PW: Plane Wave

Abbildung 1 a)+c): Verhältnis der Amplituden der Impedanz für die Lösung des VED's und der ebenen Welle, aufgetragen über die Entfernung zum Dipol  
 a) für verschiedene Frequenzen ( $\rho = 100 \Omega\text{m}$ ).  
 c) für verschiedene  $\rho$  des homogenen Halbraumes ( $f = 20 \text{ kHz}$ ).  
 b)+d): Dementsprechend dargestellt jeweils die Phasendifferenz der Impedanzen.

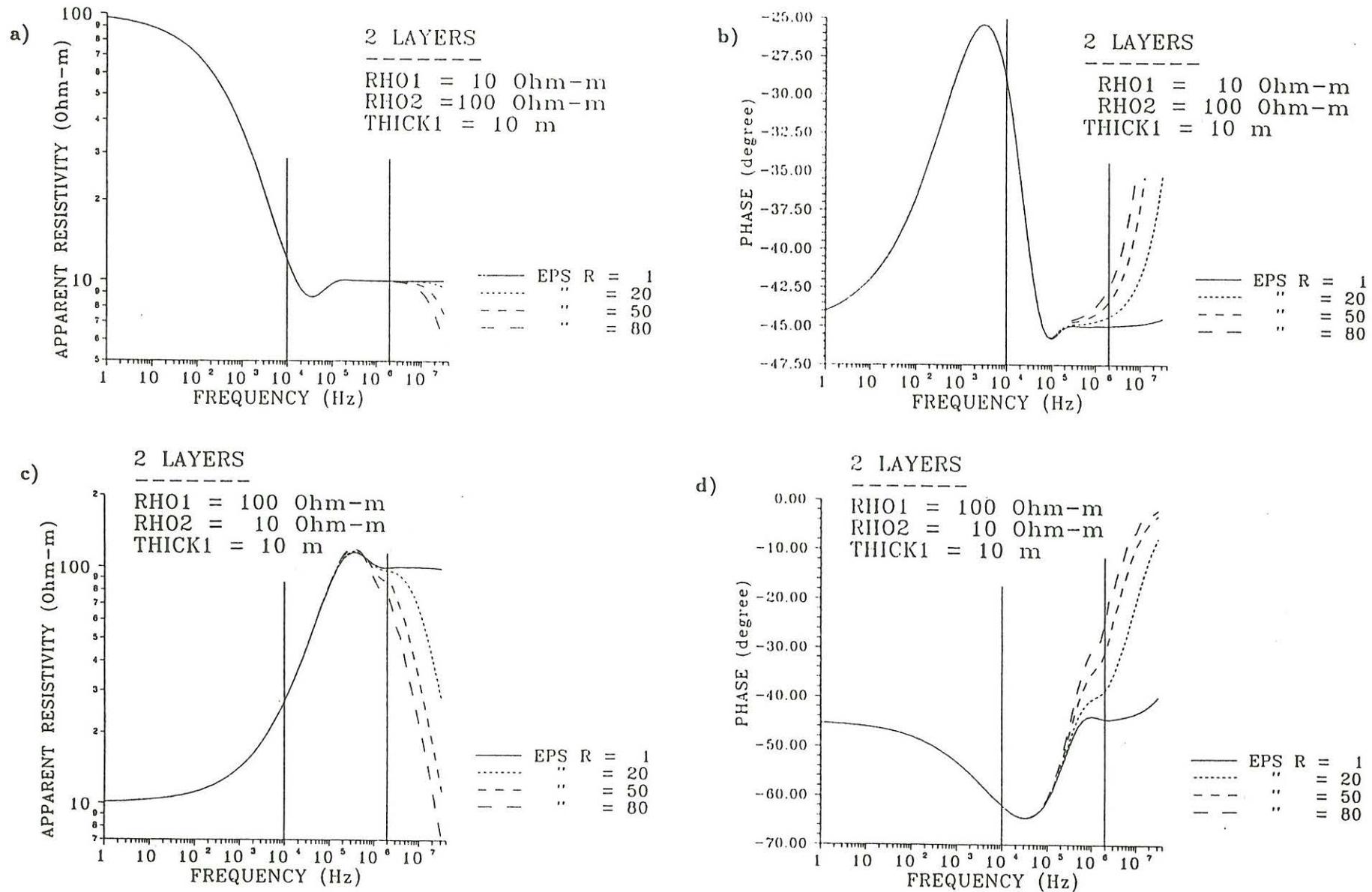


Abbildung 2 a)-d): Der scheinbare spezifische elektrische Widerstand und die Phase für einfache 2-Schicht-Fälle, jeweils in ihrer Frequenzabhängigkeit für verschiedene Dielektrizitätskonstanten. Deutlich sichtbar der Einfluß der Verschiebungsströme bei sehr hohen Frequenzen.