

# "Imaging" für elektrische Felder der LOTEM Methode

Gülcin Karlik (Köln)

## Einleitung

Das "imaging" Verfahren ist eine schnelle und approximative Inversionsmethode zur Abschätzung der Leitfähigkeit des Untergrundes aus elektromagnetischen Messungen. Mit diesem Verfahren werden die magnetischen Felder durch einen Bildstrom approximiert, wobei das Magnetfeld des Bildstromes für jeden Zeitpunkt an das gemessene Magnetfeld angepaßt wird. Der Bildstrom ist ein Abbild ("image") des Senders und bewegt sich mit fortschreitender Zeit in die Tiefe. Aus der Geschwindigkeit des "image" Senders läßt sich die Leitfähigkeit bestimmen und einer Tiefe zuordnen. Das "imaging" Verfahren bietet die Möglichkeit, durch anschauliche Darstellung der Daten einen schnellen und groben Überblick über das Meßgebiet zu erhalten. Dieses Verfahren läßt sich auf verschiedene TEM Methoden mit unterschiedlichen Sender-Empfängerkonfigurationen anwenden (Nekut, 1987; Macnae und Lamontagne, 1987; Eaton und Hohmann, 1989; Karlik und Strack, 1991). Auch wurde es bereits erfolgreich auf aeroelektromagnetische Daten angewandt (Macnae et al, 1991; Karlik, 1992).

In diesem Beitrag soll die Frage, ob das "imaging" Verfahren auch auf die elektrischen Felder der LOTEM Methode (long-offset transient electromagnetics) anwendbar ist, behandelt werden. Eine mögliche Anwendung dieses Verfahrens auf die elektrischen Felder wäre interessant und wichtig, da die elektrischen Felder die schlecht leitenden Schichten besser auflösen und zusätzliche Aufschlüsse über die Leitfähigkeitsstrukturen geben können (Hördt, 1992).

## Die elektrischen und magnetischen Felder der LOTEM Methode

Die LOTEM Methode ist eine Tiefensondierungsmethode, bei der der Abstand zwischen Sender und Empfänger gleich oder größer als die Sondierungstiefe ist (Strack, 1992). Der Sender besteht aus einem horizontalen elektrischen Dipol, realisiert durch ein auf der Erde liegendes Kabel, welches an den Enden galvanisch an den Untergrund gekoppelt ist. Gemessen wird die zeitliche Ableitung des vertikalen Magnetfeldes und die horizontalen elektrischen Felder. Da bei der LOTEM Methode nicht direkt das Magnetfeld gemessen wird, sondern die induzierte Spannung,

$$V = - \mu_0 A \dot{H}_z \quad (1)$$

kann das Magnetfeld für einen Ausschaltvorgang durch die Integration der induzierten Spannung über die Zeit erhalten werden, wobei A die Empfängerfläche bezeichnet.

$$H_z = \int \dot{H}_z dt = -\frac{1}{\mu_0 A} \int V dt \quad (2)$$

$$H_z(t) = H_z(t=0) - \int_0^t \dot{H}_z dt \quad (3)$$

Der Grund hierfür ist, daß Magnetfelder die Voraussetzung einer streng monotonen Funktion und damit Umkehrbarkeit erfüllen. Dagegen erfüllt die Spannung diese Voraussetzung nicht.

Zur Untersuchung der vertikalen Magnetfelder und der horizontalen elektrischen Felder (nur  $E_x$ , d.h. elektrisches Feld parallel zum Sender) sind in Abbildung 1 die Felder für die homogenen Halbräume (0.1, 1, 10, 100 Ohm-m) und für ein Zwei-Schicht Modell dargestellt. Bei einem Zwei-Schicht Modell verhält sich das Magnetfeld (Abb. 1) so, daß es am Anfang gleich dem Magnetfeld eines homogenen Halbraumes ist, der den gleichen Widerstand hat wie die erste Schicht. Zu einer bestimmten Zeit, die abhängig vom Erdmodell ist, läuft das Magnetfeld vom Widerstand der obersten Schicht zum Widerstand

der untersten Schicht. Die elektrischen Felder zeigen hingegen ein komplizierteres Verhalten. Im Gegensatz zu den Magnetfeldern schneiden die elektrischen Felder für homogenen Halbräume andere Halbraumkurven.

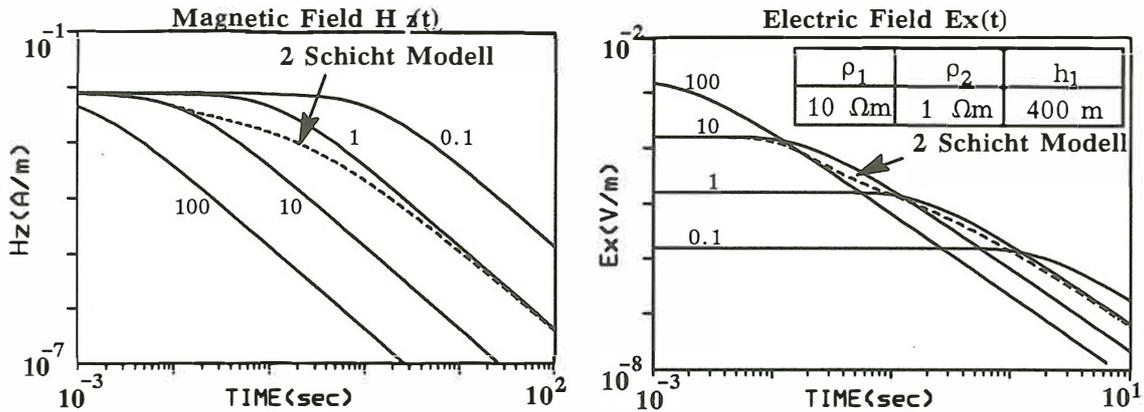


Abbildung 1: Vertikale Magnetfelder und horizontale elektrische Felder von den homogenen Halbräumen und einem Zwei-Schicht Modell bei einem Sender-Empfänger Abstand von 1 km für einen Ausschaltvorgang

### Transformation der elektrischen Felder der LOTEM Methode

Beim "imaging" Verfahren wird der Diffusionsprozeß der induzierten Ströme durch einen räumlich bewegten "image" Sender (Abb. 2) simuliert. Dieser "image" Sender, welcher mit den gleichen Bedingungen wie der Sender behaftet ist, wie z.B. die Länge und die Richtung des Senders, die Menge des fließenden Stroms, bewegt sich mit fortschreitender Zeit in die Tiefe.

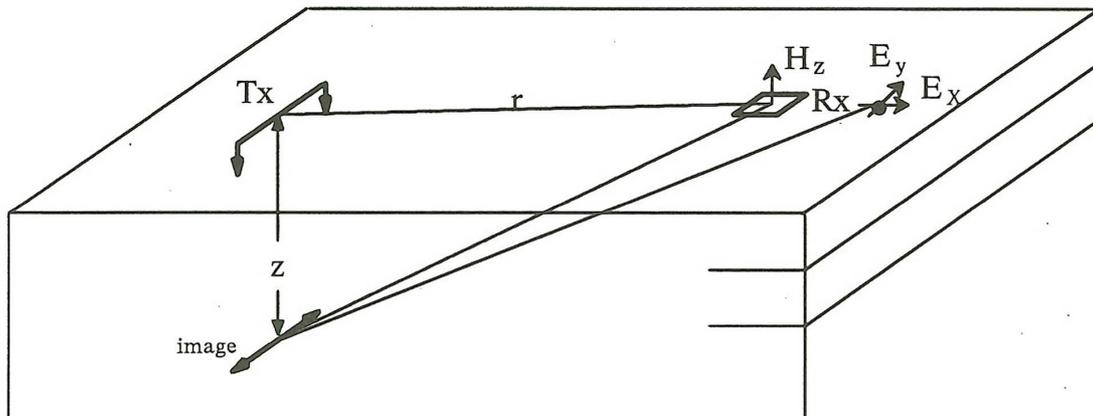


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Meßanordnung der LOTEM Methode und das zugehörige "image" des Senders

Die zeitliche Lokation des Bildstromes bzw. die "image" Tiefe wird als die Tiefe, wo das elektrische Feld ein Maximum aufweist, definiert (Karlik und Strack, 1991).

$$d = z^{\text{image}}(t) = \sqrt{\frac{4 t \rho}{\mu_0}} \quad (4)$$

Die Wanderung des "image" Dipols bzw. des Maximum des elektrischen Feldes ist abhängig von der Leitfähigkeitsstruktur des Untergrundes. In einem hoch leitfähigen Halbraum ist die Geschwindigkeit des Bildstromes geringer, als in einem schlecht leitenden Halbraum. Die zeitliche Variation der Lokation bzw. Geschwindigkeit des Bildstromes ermöglicht die Abschätzung der Leitfähigkeit des Untergrundes.

Zur Approximation des gemessenen elektrischen Feldes durch einen Bildstrom für einen homogenen Halbraum läßt sich das Feld des Bildstromes einfach vom elektrischen Potential berechnen.

$$E_X = - \frac{dV}{dx} = \frac{D\rho}{2\pi} \frac{3 \cos^2 \theta - 1}{(r^2 + d^2)^{3/2}}, \quad r = (x^2 + y^2) \quad (5)$$

wobei  $D$  das Dipolmoment,  $\rho$  der Widerstand des homogenen Halbraumes,  $r$  der Sender-Empfängerabstand,  $\theta$  der Winkel zwischen Sender und Empfänger,  $x$  und  $y$  die Ortskoordinaten und  $d$  die "image" Tiefe ist. In der Formel des elektrischen Feldes des Bildstromes steht explizit der Widerstand, was für das Magnetfeld des Bildstromes nicht der Fall ist (Karlik und Strack, 1991). Zur Vereinfachung der Herleitung, um das elektrische Feld des Bildstromes nur vom Widerstand abhängig zu machen, wird in (5) die "image" Tiefe mittels (4) ersetzt.

$$E_X^{\text{image}} = F(\rho, t) \quad (6)$$

Zunächst wird das gemessene elektrische Feld mit dem elektrischen Feld des Bildstromes verglichen bzw. die Auflösung der folgenden Gleichung für ein  $\rho$  gesucht:

$$\left| E_X^{\text{gemessen}}(r, t) - E_X^{\text{image}}(\rho, t) \right| = 0 \quad (7)$$

Dies wird mit einem iterativen Algorithmus nach der Newton-Raphson Methode berechnet. Die erhaltenen Widerstände werden einfach mittels (4) einer "image" Tiefe zugeordnet.

Dies ist eine einfache Approximation zur Transformation elektrischer Felder der LOTEM Methode. Die erhaltenen Widerstände sind die Bildwiderstände in nullter Ordnung. Es ist auch alternativ möglich, eine höhere Ordnung der Bildwiderstände zu berechnen,

$$\frac{1}{\rho^{(1)}} = \sigma^{(1)}(z) = \frac{2}{\mu_0} \frac{dt}{dz} \quad (8)$$

wobei man die Funktion  $t(z)$  erhält, indem man für jedes  $t$  mittels (7) ein  $\rho$  bestimmt, und dies in (4) einsetzt. Bei "imaging" mit Magnetfeldern stellte sich die 2. Ordnung als sinnvolle Wahl heraus (Karlik und Strack, 1991). Hier ist kurz zu erwähnen, daß die Magnetfelder im Gegensatz zu den elektrischen Feldern unabhängig vom Widerstand sind. Dies führte zu einem Algorithmus, wobei eine "image" Tiefe als einziger Parameter aus der Minimierung zwischen dem gemessenen Magnetfeld und dem Magnetfeld des Bildstromes auftritt. Die zeitliche Lokation bzw. die Geschwindigkeit des Bildstromes ermöglicht eine Abschätzung des Bildstromes als Funktion der Tiefe.

### Anwendung auf synthetische und Felddaten

Abbildung 3a zeigt die Bildwiderstände ("image resistivity") als Funktion der Tiefe für ein synthetisches Beispiel, welches aus drei Schichten besteht (H-Typ). Die Bildwiderstandskurve in nullter Ordnung verhält sich glatt und nähert sich dem vorgegebenen Widerstand des Halbraumes (100 Ohm-m) an. Die eingebettete gutleitende Schicht ist erkennbar, allerdings wird ihr spezifischer Widerstand unterschätzt. Bei der Bildwiderstandskurve in erster Ordnung ist die gutleitende Schicht mit ihrer Mächtigkeit besser zu erkennen. Dabei sind die Überschwingungen bei der dritten Schicht zu bemerken. Wenn noch schärfere Grenzen der Schichten gewünscht werden (höhere Ordnung der Bildwiderstände), erhält man empfindlichere Ergebnisse. In Abbildung 3b ist das synthetisch erzeugte elektrische Feld und gut angepaßte Feld des Bildstromes dargestellt.

Als Feldbeispiel wurde eine Station XB15 aus einer LOTEM Meßkampagne in China gewählt (Strack, 1992). Das Meßgebiet ist reich an Öl- und Gasvorkommen und befindet sich in der Provinz Jiangsu. Teil des Meßgebietes haben eine sedimentare Überdeckung mit Mächtigkeiten zwischen 3 km und 9 km. Darunter befinden sich Karbonate und vulkanisches Material. Das Ziel der LOTEM Messung war es,

Strukturen innerhalb der Karbonate/ Vulkanite aufzuzeigen und, wenn möglich auch die Gesteinschichten unterhalb zu untersuchen. Eine ausführliche Interpretation der LOTEM Daten im Zusammenhang der geologischen und seismischen Informationen und die "image" Interpretation mit der Magnetfeldern ist bei Strack (1992) zu finden.

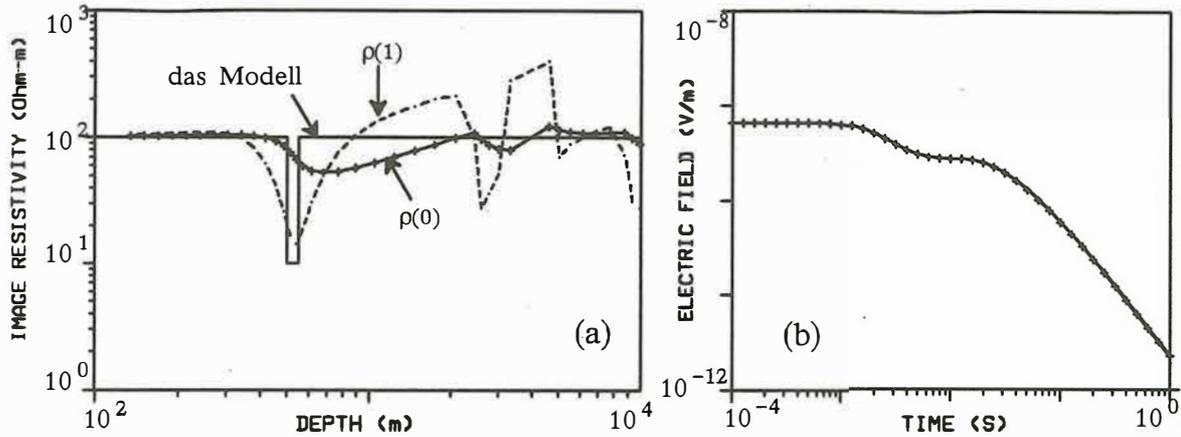


Abbildung 3: (a) Bildwiderstandskurven in nullter und erster Ordnung aus dem elektrischen Feld für ein Drei-Schicht Modell ( $\rho_1=100 \text{ Ohm-m}$ ,  $\rho_2=10 \text{ Ohm-m}$ ,  $\rho_3=100 \text{ Ohm-m}$ ,  $h_1=500 \text{ m}$ ,  $h_2=50 \text{ m}$ ) (b) das berechnete (durchgezogene Linie) und approximierte Feld (mit (+) Zeichen)

Abbildung 4a zeigt die Bildwiderstandskurven in nullter Ordnung jeweils aus dem gemessenen elektrischen und magnetischen Feld. In der Abbildung ist auch das reduzierte Widerstandslog (bis 2500 m) und das Ergebnis von Joint Inversion von elektrischen und magnetischen Feldern dargestellt. Die Bildwiderstandskurven aus beiden Feldern zeigen eine Ähnlichkeit, wobei der erwartete Verlauf von einer gutleitenden Schicht zu einer schlechtleitenden Schicht zu sehen ist. Die Bildwiderstandskurve aus dem Magnetfeld wird im Vergleich zu der aus dem elektrischen Feld unterschätzt. Dies kann daran liegen, daß die Magnetfelder die schlechtleitenden Schichten nicht auflösen, während die elektrischen Felder diese besser auflösen. Die Bildwiderstandskurven haben eine glatte Kurvenform und sind nicht empfindlich gegen Widerstandscontraste. Es gibt eine Ähnlichkeit zwischen dem reduzierten Widerstandslog und der Joint Inversion, wobei die Joint Inversion die Widerstände unterschätzt hat, während die Bildwiderstandskurve aus dem elektrischen Feld einen ähnlichen Verlauf wie das Ergebnis von Joint Inversion darstellt.

In Abbildung 4b wird für Station XB15 das gemessene elektrische Feld und das Magnetfeld (durchgezogene Linien) sowie das durch "imaging" approximierte elektrische Feld und Magnetfeld des Bildstromes (mit (+) Zeichen) dargestellt, wobei die Anpassung der gemessenen und approximierten Felder gut ist. Es ist leider nicht für alle Stationen solch eine gute Anpassung für die elektrischen Felder möglich. Es kommt entweder ein Vorzeichenwechsel beim elektrischen Feld oder eine "Tiefenumkehr" bei der Transformation des elektrischen Feldes zu der Tiefe-Zeit Funktion vor. Daher kann "imaging" mit elektrischen Feldern routinemäßig nicht benutzt werden. Es ist aber trotzdem möglich, Informationen bis zu einer bestimmten Tiefe, wo eine Tiefenumkehr entsteht, zu erhalten. Der Grund für das Tiefenumkehrphänomen kann daran liegen, daß die scheinbare Widerstände mehr als einen Wert (Mehrdeutigkeitsproblem!) in manchen Tiefen haben (Smith und Buselli, 1991). Weiterhin wechseln die elektrischen Felder ihr Vorzeichen im Zeitverlauf für einen geschichteten Halbraum in Abhängigkeit vom Winkel zwischen Sender und Empfänger.

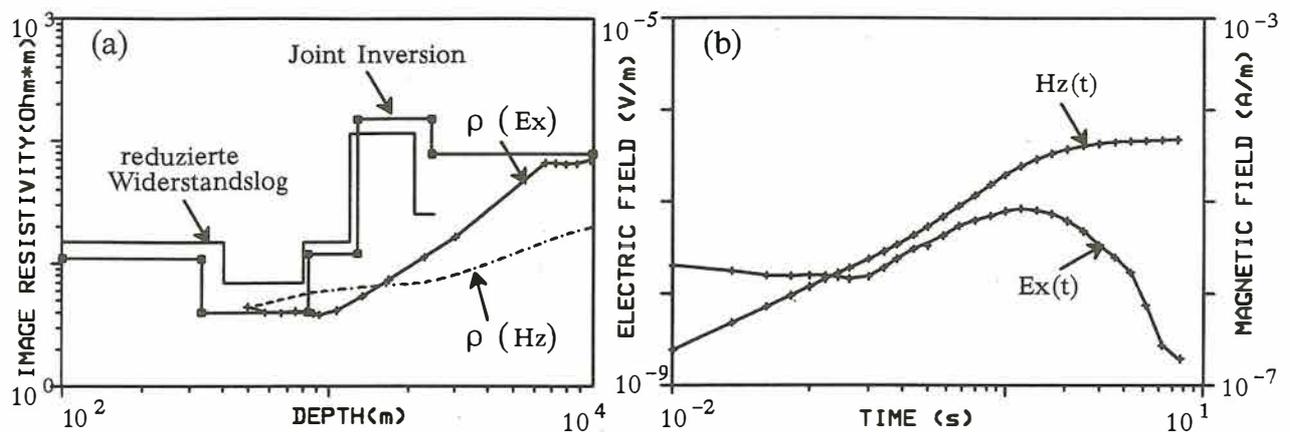


Abbildung 4: Feldbeispiel aus China (Station XB15), (a) Bildwiderstandskurven, reduziertes Widerstandslog und Joint Inversionsergebnis, (b) die gemessene (durchgezogene Linie) und approximierte Felder (mit (+) Zeichen).

Hier ist gezeigt worden, daß auch die gemessenen elektrischen Felder mit dem "imaging" Verfahren unter bestimmten Bedingungen simuliert werden können. Allerdings reicht wahrscheinlich ein einzelner Bildstrom nicht aus, um die Tiefenumkehr und den Vorzeichenwechsel bei den elektrischen Feldern zu erklären. Magnetfelder an der Erdoberfläche enthalten nur die TE-Mode, da das gemessene Magnetfeld nur von den horizontalen Stromsystemen abhängt und daher unabhängig vom Widerstand in vertikaler Richtung ist. Die elektrischen Felder enthalten hingegen sowohl Anteile der TE-Mode, als auch der TM-Mode (Weidelt, 1985). Das heißt, daß die elektrischen Felder auch vom Widerstand in vertikaler Richtung abhängig sind.

### Literaturhinweis

- Eaton, P. A. and Hohmann, G. W., 1989, A rapid inversion technique for transient electromagnetic soundings. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 53, 384-404.
- Hördt, A., 1992, Interpretation transient elektromagnetischer Tiefensondierungen für anisotrop horizontal geschichtete und für dreidimensionale Leitfähigkeitsstrukturen in: Ebel, A., Neubauer, F.M., Raschke, E., Speth, P., (Hrsg.), *Mitteilungen aus dem Institut für Geophysik und Meteorologie der Universität zu Köln*, 80.
- Karlik, G., Strack, K.-M., 1991, Imaging für LOTEM-Tiefensondierungsdaten: 51. Jahrestagung der DGG, Bochum.
- Karlik, G., 1992, Imaging von transient elektromagnetischen Daten: 52. Jahrestagung der DGG, Leipzig.
- Macnae J. and Lamontagne, Y., 1987, Imaging quasi-layered conductive structures by simple processing of transient electromagnetic data, *Geophysics* 52, 545-554.
- Macnae, J. C., Smith, R., Polzer, B. D., Lamontagne, Y., and Klinkert, P. S., 1991, Conductivity-depth imaging of airborne electromagnetic step-response data, *Geophysics* 56, 102-114.
- Nekut, A. G., 1987, Direct inversion of time-domain electromagnetic data, *Geophysics* 52, 1431-1435.
- Petry, H., 1987, Transient elektromagnetische Tiefensondierung - Modellrechnungen und Inversion: Diplomarbeit, Universität zu Köln.
- Smith, R. S., and Buselli, G., 1991, Examples of data processed using a new technique for presentation of coincident- and in-loop impulse response transient electromagnetic data, *Exploration Geophysics* 22, 363-368.
- Strack, K.-M., 1992, *Exploration with deep transient electromagnetic*: Elsevier, Amsterdam.
- Weidelt, P., 1985, Einführung in die elektromagnetische Tiefenforschung: Vorlesungsmanuskript, Universität Braunschweig.