

Petry, H., Strack, K.-M.

Das Auflösungsvermögen von LOTEM-Sondierungen

Anhand von Modellrechnungen soll die Anwendbarkeit von LOTEM auf elektromagnetische Tiefensondierungen besprochen werden. LOTEM steht für Long Offset Transient ElectroMagnetics und gehört zu den Time Domain ElectroMagnetic (TDEM) Methoden.

Im Feld wird bei LOTEM-Messungen ein ca. 1km langer geerdeter elektrischer Dipol als Sender benutzt. Der Empfänger, eine Induktionsspule, wird in 4 bis über 10 km Entfernung vom Sender von Meßstation zu Meßstation bewegt (Abb.1). Dabei ist zu beachten, daß der Abstand zwischen Sender und Empfänger für die Gültigkeit der LOTEM Definition größer sein muß als die angestrebte Sondierungstiefe.

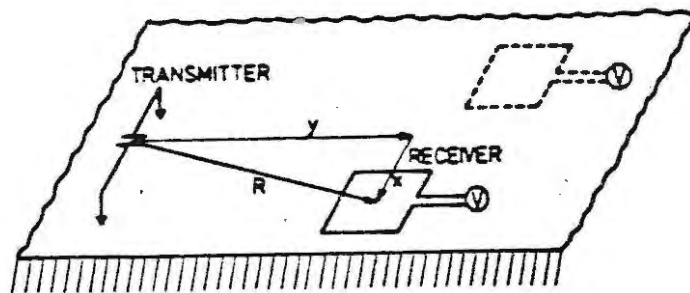


Abb. 1: LOTEM-Feldkonfiguration mit einem geerdeten horizontalen elektrischen Dipol als Sender und einer Induktionsspule als Empfänger (nach Strack, 1984a)

Nur in diesem Fall spricht man von Long Offset Transient ElectroMagnetics. Das Signal wird von einem Generator erzeugt (Abb.2), in einer Switchbox gleichgerichtet und umgeschaltet, so daß Rechteckströme von bis zu über 100 Ampere in den Boden eingespeist werden. Der Umschaltvorgang induziert sekundäre Stromsysteme (Nabighian, 1979), die sich in die Erde hinein fortpflanzen und dabei abklingen. Das dadurch entstehende Magnetfeld, bzw. dessen Veränderung wird als zeitlich abklingendes, also transientes Signal mit der Induktionsspule aufgefangen, verstärkt und zur weiteren Verarbeitung digitalisiert.

Diese Sender-Empfängerkombination ist, wenn auch nicht die einzige, so doch die für größere Eindringtiefen günstigste, wie im folgenden gezeigt wird. Man kann sowohl einen anderen Sender verwenden, als auch andere Komponenten der elektromagnetischen Felder aufzeichnen.

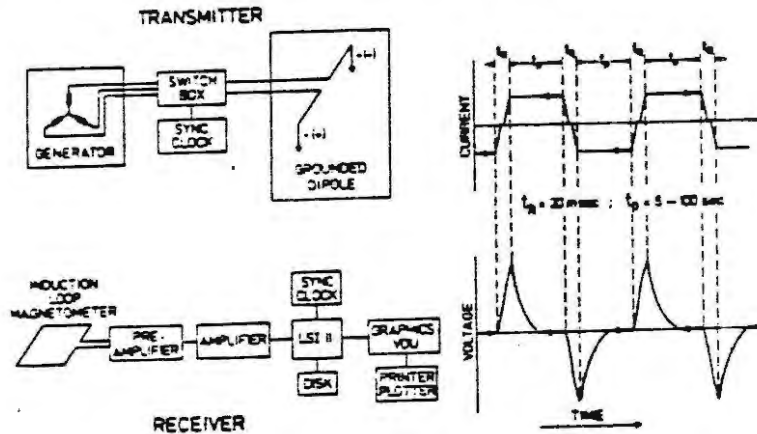


Abb. 2: LOTEM Sende- und Empfangsapparatur mit den entsprechenden Signalformen (nach Strack, 1985)

Benutzt man einen vertikalen magnetischen Dipol (VMD), im Prinzip eine auf der Erde liegende Spule mit Spannungsquelle, als Sender, so lassen sich in Zylinderkoordinaten

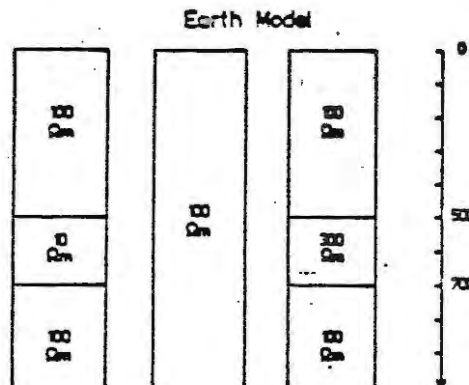


Abb. 3: Gerechnete Modelle

die vertikale und die radiale Komponente des Magnetfeldes, bzw. dessen Änderung bestimmen, sowie die phi-Komponente des E-Feldes. Beim oben beschriebenen horizontalen elektrischen Dipol (HED) lassen sich alle drei Magnetfeldkomponenten sowie die radiale und die phi-Komponente des

elektrischen Feldes bestimmen.

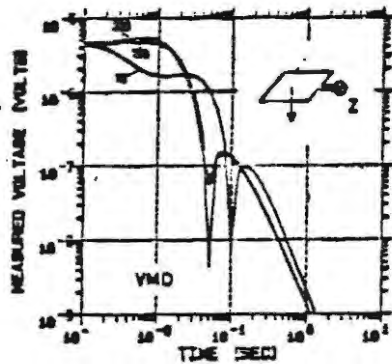
Für alle diese Komponenten werden Modellrechnungen durchgeführt. Die verwendeten Modelle sind in Abb.3 dargestellt. Zunächst wird ein homogener Halbraum mit einem spezifischen Widerstand von 100 Ohm-m gerechnet. In diesen wird dann in 500 m Tiefe einmal eine gut leitende Schicht (10 Ohm- m, 200 m mächtig) und einmal eine schlecht leitende Schicht (300 Ohm-m, 200 m mächtig) eingebettet, um zu erkennen, wie diese Schichten im Signal aufgelöst werden.

Um aus den benutzten Formeln direkt etwas über den erwarteten Verlauf der Kurven aussagen zu können, werden sie hier nur für den homogenen Halbraum angeschrieben, und zwar als Grenzwert für große und kleine Zeiten. Diese Näherungen hängen außer von der Zeit noch von der Geometrie ab, und zwar derart, daß die early-time Näherung für große Sender-Empfänger Abstände länger gültig ist, was für LOTEM ja zutrifft. Die Diskussion dieser Gleichungen ist dennoch auch für den geschichteten Halbraum gerechtfertigt. Die Aussagen, die man damit für die Dynamik der Kurven, die sich in deren Zeitverhalten ausdrückt, die Abhängigkeit des Signals vom Abstand zwischen Sender und Empfänger R, sowie die Ankopplung an den Untergrund, die man an der Potenz, mit der rho auftritt, erkennt, treffen kann, lassen sich nämlich in fast allen Fällen auf die geschichtete Erde übertragen.

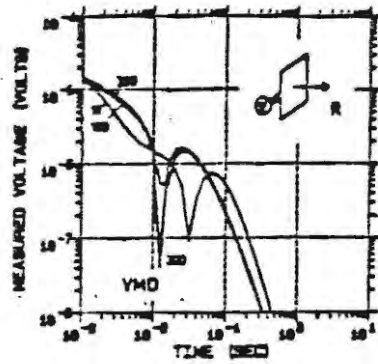
Für die Änderung des Magnetfeldes beim VMD (Abb.4) erkennt man folgendes in den Gleichungen und auch auf den Plots: Bei der R-Komponente ist die Abhängigkeit des Signals vom Abstand günstiger als bei der vertikalen Komponente. Zu kleinen Zeiten sorgt außerdem die Zeit im Nenner für ein starkes radiales Signal. Diese Zeitabhängigkeit, die zu frühen Zeiten beim vertikalen Signal ganz fehlt, gibt der Spannung jedoch eine Dynamik, die bei der digitalen Aufzeichnung ungünstig ist, da die Empfindlichkeit des A/D-Wandlers (zur Zeit 19 bit für LOTEM Apparaturen) eine obere Grenze für die Dynamik setzt. Während die Spannung der einen Komponente also über mehrere Dekaden abfällt und sogar ihr Vorzeichen wechselt, befindet sich die die Spannung der anderen Komponente immer noch in der ersten Dekade. Man erkennt auch die bessere Auflösung der eingelagerten

Schicht im vertikalen Signal, wo rho für den homogenen Halbraum linear in der Gleichung steht, beim radialen Signal jedoch unter der Wurzel. Hier zeigt sich auch die qualitative Übertragbarkeit der Aussagen von der homogenen Näherung auf den geschichteten Fall.

VMD



$$|\mu_0 \dot{A} \ddot{H}_Z|$$



$$|\mu_0 \dot{A} \ddot{H}_R|$$

Receiver components of $\frac{\partial H}{\partial t}$ for VMD-Source

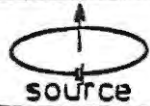


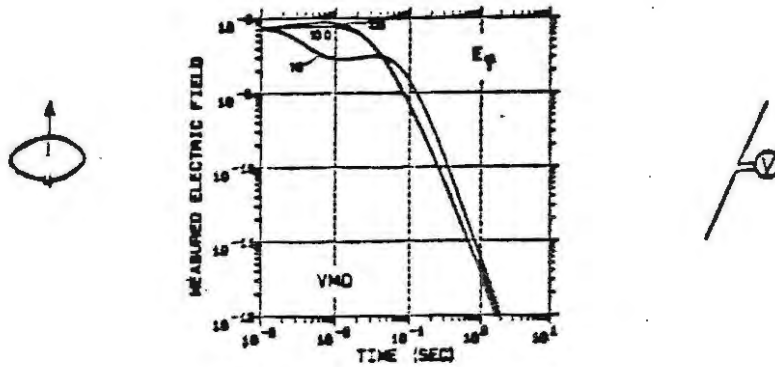
Receiver component	early time	 source	late time
Z 	$\frac{-9M}{2\pi\mu_0}$	$\frac{\rho}{R^5}$	$\frac{M\mu_0^{3/2}}{20\pi^{3/2}}$ $\frac{1}{t^{5/2}\rho^{3/2}}$
R 	$\frac{3M}{2\mu_0^{1/2}\pi^{3/2}}$	$\frac{\rho^{1/2}}{R^4 t^{1/2}}$	$\frac{-M\mu_0^2}{64\pi}$ $\frac{R}{t^3 \rho^2}$

Abb. 4: Vergleich der Änderung der Magnetfeldkomponenten beim vertikalen magnetischen Dipol als Sender

Wegen des geringen Dynamikbereichs und der besseren Ankopplung an den Untergrund ist also die Messung der vertikalen Komponenten der radialen vorzuziehen. Außerdem ist die

Handhabung der Empfängerspule im Feldeinsatz einfacher, da man sie auf der Erde auslegen kann, während man sie bei Messung der radialen Komponente vertikal befestigen muß.

VMD $|E_\varphi|$



received E_φ for VMD - source

source	early time	late time	receiver
	$\frac{+3M}{2\pi} \frac{\rho}{R^4}$	$\frac{+M\mu_0^{5/2}}{40\pi^{3/2}} \frac{R}{t^{5/2}\rho^{3/2}}$	x

Abb. 5: Zeitverhalten des elektrischen Feldes beim vertikalen magnetischen Dipol als Sender

In Abb.5 sind die entsprechenden Formeln und Plots für die phi-Komponente des elektrischen Feldes angegeben. Die early-time Halbraumformel ähnelt der für die z-Komponente der Magnetfeldänderung. Sie enthält allerdings den Abstand in günstigerer Form. Die gemessene Spannung hier ist dennoch geringer, da sie proportional zur Separation der Empfängerelektroden ist. Diese sind typisch 100 m auseinander, so daß man auf einige 10 Volt als Anfangssignal kommt. Die gemessene Spannung der Magnetfeldänderung hingegen geht mit der Windungsfläche der Empfängerspule. Daher auch das stärkere Meßsignal (bei nicht zu großem Abstand).

Beim horizontalen elektrischen Dipol als Sender lassen sich alle Magnetfeldkomponenten bestimmen, sowie die radiale und die phi-Komponente des elektrischen Feldes (Abb.6). Wegen der ausgezeichneten Richtung, die sich durch die Anordnung des Senderdipols ergibt, sind die Feldkomponenten jetzt winkelabhängig. Um die Ergebnisse der Modellrechnungen besser miteinander vergleichen zu können, werden die Empfänger jeweils so positioniert, daß diese Abhängigkeit überall gleich eins wird.

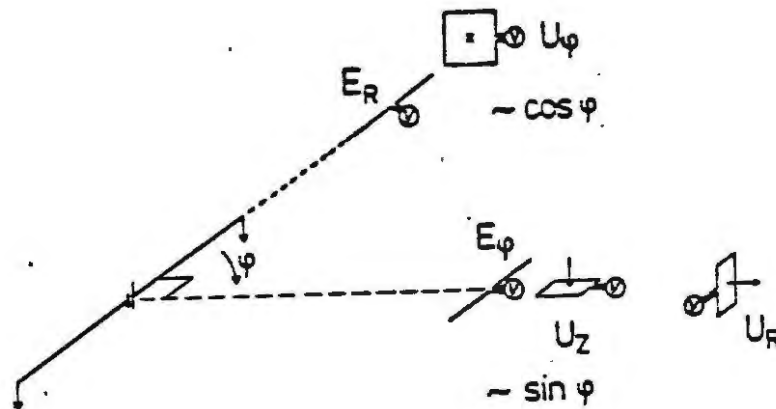
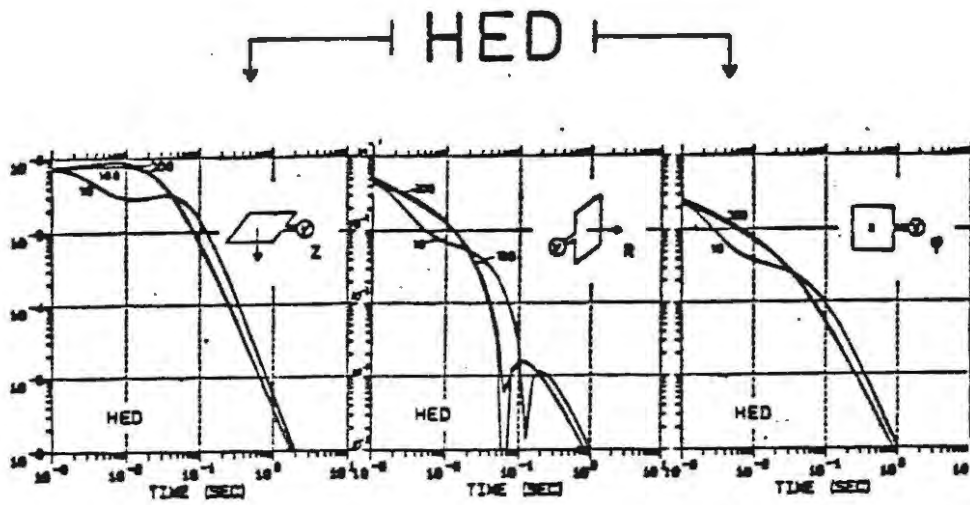


Abb. 6: Sender- und Empfängerkonfiguration für den horizontalen elektrischen Dipol als Sender

Zunächst soll wieder die Änderung der Magnetfeldkomponenten besprochen werden (Abb. 7). Sieht man von der Winkelabhängigkeit ab, so unterscheiden sich die radiale und die phi-Komponente im frühen Zeitbereich nur um einen konstanten Faktor, der auch das Vorzeichen einschließt. Da beide die Zeit explizit im Nenner enthalten, beginnen sie sehr hoch und haben eine sehr große Dynamik. Die vertikale Komponente, die den Offset um eine Potenz günstiger enthält, befindet sich noch in der ursprünglichen Dekade, wenn die phi-Komponente schon in der dritten dargestellten ist und die radiale schon das Vorzeichen gewechselt hat. Außerdem erkennt man in den Plots auch die in der homogenen Halbraumnäherung stehende bessere Auflösung des Untergrundes. Der Widerstand im Zähler impliziert das Abfallen der Spannung bei einem guten Leiter im Untergrund. Wegen dieser Ankopplung und wegen der anfänglichen Unabhängigkeit von der Zeit ist die Messung der z-Komponente vorzuziehen. Wie bei



Receiver components of $\frac{\partial H}{\partial t}$ for HED - Source





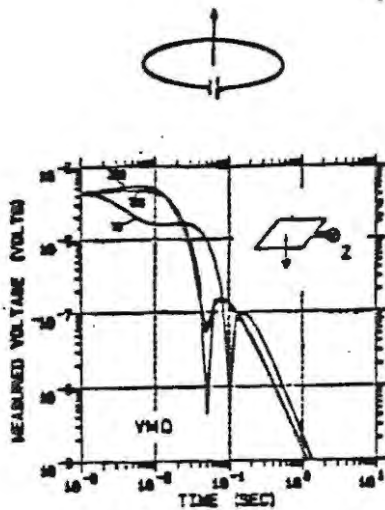
Receiver component	early time	source	late time
Z 	$\frac{3D}{2\pi\mu_0} \frac{\rho}{R^4} \sin \varphi$		$\frac{D\mu_0^{3/2}}{40\pi^{3/2}} \frac{R}{\rho^{3/2} t^{5/2}} \sin \varphi$
R 	$-\frac{D}{R^3} \sqrt{\frac{\rho}{\mu_0 \pi^3 t}} \sin \varphi$		$\frac{D\mu_0}{64\pi} \frac{1}{\rho t^2} \sin \varphi$
φ 	$\frac{D}{2R^3} \sqrt{\frac{\rho}{\mu_0 \pi^3 t}} \cos \varphi$		$\frac{D\mu_0}{64\pi} \frac{1}{\rho t^2} \cos \varphi$

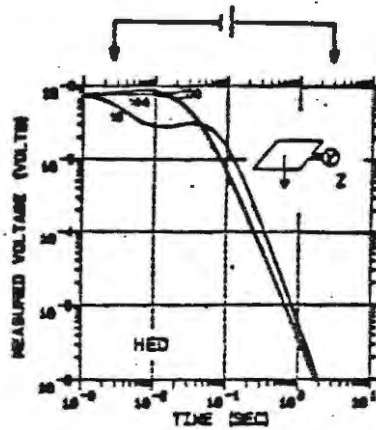
Abb. 7: Vergleich der Änderung der einzelnen Magnetfeldkomponenten beim horizontalen elektrischen Dipol als Sender. Oben ist die gemessene Spannung (in Volt) als Funktion der Zeit dargestellt

der vertikalen Komponente des VMD ist auch hier die Handhabung der Empfängerspule am einfachsten. Bei beiden Senderarten, VMD wie HED, hat man also dieselbe bevorzugte Magnetfeldkomponente. Daher ist es angebracht, diese miteinander zu vergleichen (Abb.8). Dabei fällt zunächst beim HED die Winkelsabhängigkeit im Meßsignal auf, wofür sich beim VMD das Vorzeichen im zeitlichen Verlauf umkehrt. Hier soll jedoch das early-time-Verhalten betrachtet werden. In

$$1 \mu A H_z$$



VMD



HED

$\frac{\partial H_z}{\partial t}$ for VMD and HED source





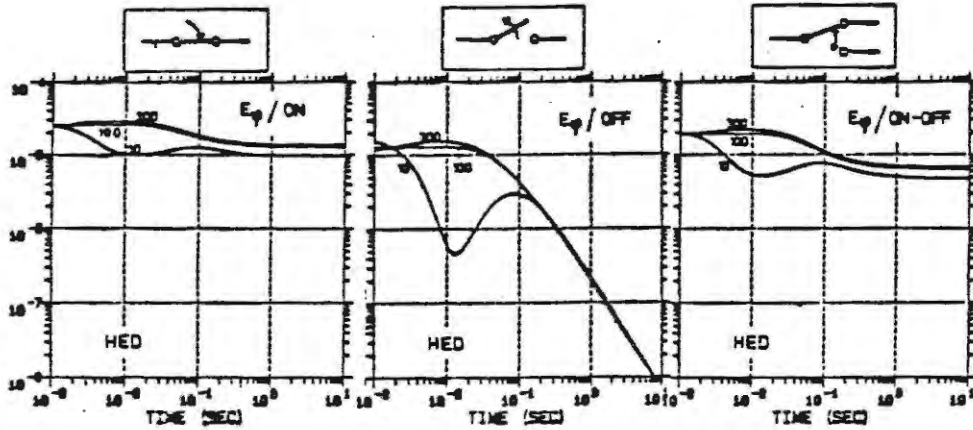
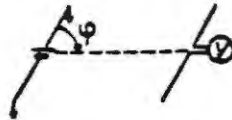
source	early time		late time		receiver
	$\frac{-9M}{2\pi\mu_0}$	$\frac{\rho}{R^5}$	$\frac{M\mu_0^{3/2}}{20\pi^{3/2}}$	$\frac{1}{\rho^{3/2}t^{5/2}}$	
	$\frac{3D}{2\pi\mu_0} \sin \varphi$	$\frac{\rho}{R^4}$	$\frac{D\mu_0^{3/2}}{40\pi^{3/2}} \sin \varphi$	$\frac{R}{\rho^{3/2}t^{5/2}}$	

Abb. 8: Vergleich der Änderung der Vertikalkomponente des Magnetfeldes beim vertikalen magnetischen und beim horizontalen elektrischen Dipol als Sender

diesem Zeitbereich enthalten beide Formeln den Widerstand linear und sind unabhängig von der Zeit. Der wesentliche Unterschied zwischen beiden liegt in ihrer Abhängigkeit vom Offset, der beim HED um eine Potenz günstiger im Nenner steht. Deshalb erhält man das viel stärkere Meßsignal bei sonst ähnlichem Kurvenverhalten. Somit wird es verständlich, daß wir bei Feldmessungen die Veränderung der z-Komponenten des Magnetfeldes beim HED-Sender aufzeichnen. Wegen der fehlenden Winkelabhängigkeit wäre der VMD-Sender höchstens bei Array-Messungen vorzuziehen, wenn man nicht allzutief in die Erde hinein blicken will.

HED

$$|E_\varphi|$$



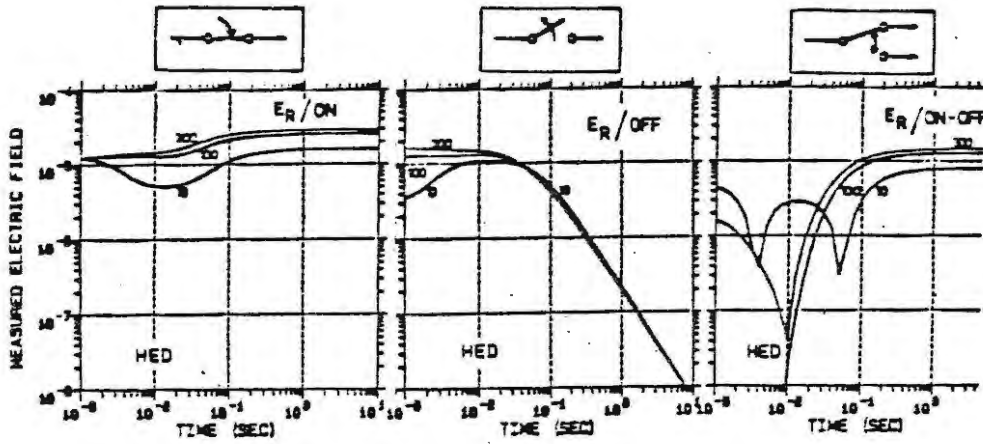
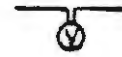
Dependence of E_φ on the switching process for HED-source

Source \longleftrightarrow Receiver \times		
Switching process	early time	late time
in	$\frac{D}{\pi} \frac{\varrho}{R^3} \sin \varphi$	$\frac{D}{2\pi} \frac{\varrho}{R^3} \sin \varphi$
out	$-\frac{D}{2\pi} \frac{\varrho}{R^3} \sin \varphi$	$\frac{D\mu_0^{3/2}}{12\pi^{3/2}} \frac{1}{\sqrt{\varrho t^3}} \sin \varphi$
over	$-\frac{3D}{4\pi} \frac{\varrho}{R^3} \sin \varphi$	$-\frac{D}{4\pi} \frac{\varrho}{R^3} \sin \varphi$

Abb. 9: Näherungsgleichungen für die über einem homogenen Halbraum zu erwartende phi-Komponente des E-Feldes sowie Ergebnisse von Modellrechnungen

Der Vollständigkeit halber sollen jetzt noch die beiden meßbaren Komponenten des elektrischen Feldes besprochen werden. Bei der Messung des elektrischen Feldes ist, im Gegensatz zu den bisher besprochenen Komponenten, das Primärfeld des Senders im Signal mitenthalten. Deshalb muß man zwischen Ein-, Aus- und Umschalten des Senderstromes unterscheiden. Im frühen Zeitbereich unterscheiden sich die in Abb. 9 aufgetragenen Feldstärken der phi-Komponenten nur um einen

$$|E_R|$$



Dependence of E_R on the switching process for HED-source

		Source	←	→	Receiver		
Switching process		early time		late time			
in		$\frac{D}{2\pi}$	$\frac{\rho}{R^3} \cos \varphi$	$\frac{D}{\pi}$	$\frac{\rho}{R^3} \cos \varphi$		
out		$\frac{D}{2\pi}$	$\frac{\rho}{R^3} \cos \varphi$	$\frac{D\mu_0^{3/2}}{12\pi^{3/2}}$	$\frac{1}{\sqrt{t^3\rho}} \cos \varphi$		
over		$\frac{-D\mu_0^{3/2}}{2\sqrt{\pi}}$	$\cos \varphi \frac{1}{\sqrt{\rho t^3}} e^{-\frac{\mu_0 R^2}{4\rho t}}$	$-\frac{D}{2\pi}$	$\frac{\rho}{R^3} \cos \varphi$		

Abb. 10: Näherungsgleichungen für die über einem homogenen Halbraum zu erwartende Radialkomponente des E-Feldes sowie Ergebnisse von Modellrechnungen

konstanten Faktor, enthalten den Offset und den Widerstand des Halbraumes gleichermaßen, wohingegen die Zeitabhängigkeit im Grenzwert fehlt. Im späten Zeitbereich geht das Ausschaltensignal verständlicherweise gegen Null, die beiden anderen gegen einen konstanten Wert. Außerdem ist die homogene Näherung nicht mehr auf den geschichteten Fall übertragbar, was besonders beim Ausschalten auch qualitativ auffällt: die Kurven schneiden sich, wo sie es nach der homogenen Formel nicht sollten und das Signal wird auch schwächer als das halbe Einschaltensignal, wie es die Formel des homogenen Halbraumes verlangt.

Wegen der besseren Ausnutzung des Generators (Totzeiten !) ist der Umschaltvorgang in der Praxis vorzuziehen. Die beste Information steht auch da im frühen Signal, d.h. vor etwa 0.1 Sekunden. Dasselbe gilt auch für die auf Abb. 10 dargestellte radiale Komponente. Da im frühen Zeitbereich die homogenen Gleichungen für das Ein- und Ausschalten exakt gleich sind, geht das Signal beim Umschalten, das sich aus der Differenz der beiden oben genannten berechnet, sehr deutlich gegen Null. Das erkennt man auch auf dem Plot, wo das Signal tatsächlich bis zu ca. 1/100 sec. nicht zu sehen ist. Ferner erkennt man auf dem Bild, daß dies nicht für den geschichteten Halbraum zutrifft, dort unterscheiden sich die Signale sehr deutlich voneinander. Deshalb, und weil der Generator besser genutzt wird, ist der Umschaltvorgang bei der Messung trotz der etwas größeren Dynamik des Signals vorzuziehen.

Zusammenfassend kann man also sagen, daß wegen der geringen Dynamik der A/D-Wandler, der guten Auflösung des Untergrundes sowie der einfachen Handhabung des Empfängers die von uns angewandte Messung der z-Komponenten der Magnetfeldänderung beim HED als Sender vorzuziehen ist. Das gilt insbesondere für Profilmessungen. Will man einen Array vermessen und nicht in zu große Tiefen vordringen, so ist evtl. die Verwendung des VMD mit verstärktem Senderdipolmoment sinnvoll, da man den Offset R nicht zu groß werden lassen muß und auch die Winkelabhängigkeit fehlt.

Ist im Untergrund eine dünne, schlecht leitende Schicht anzunehmen, so empfiehlt es sich, E-Feldmessungen mit dem HED als Sender durchzuführen. Bei Profilmessung sollte man wegen dem geringen Dynamikbereich und der dennoch guten Auflösung des Untergrundes die phi-Komponente des E-Feldes beim Umschalten messen. Interessiert einen ein ganzes Array, so sollte man bei einer gegebenen Senderlokation beide Komponenten des E-Feldes ebenfalls beim Umschalten messen, da beide unterschiedlich vom Winkel abhängen und man daher den gesamten Winkelbereich abdecken kann.

Vor einer konkreten Meßkampagne sollte man, wenn man Vorinformationen über den Untergrund besitzt, auf jeden Fall mehrere Komponenten modellieren und anhand der Ergebnisse dann festlegen, welche Sender- und Empfängerkombination für diesen speziellen Fall vorzuziehen ist.

Literatur:

Kaufman, A.A., Keller, G.V., 1983, Frequency and Transient Soundings, Elsevier, Amsterdam

Nabighian, M.N., 1979, A quasi-static transient response of a conducting half-space - An approximate representation, Geophysics 44(10), 1706-1721

Sheriff, R.E., 1973, Encyclopedic Dictionary of Exploration Geophysics, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa

Strack, K.-M., 1985, Das transient-elektromagnetische Tiefensondierungsverfahren angewandt auf die Kohlenwasserstoff- und Geothermie-Exploration, Mitteilungen aus dem Institut für Geophysik und Meteorologie der Universität zu Köln, Heft 42, Dissertation

Strack, K.-M., 1984a, The deep transient electromagnetic sounding technique: First field test in Australia, Exploration Geophysics, Bull. Austr. Soc. Explor. Geophys., 15 (4)

Strack, K.-M., 1984b, Transient Elektromagnetische Tiefensondierungen mit Anwendungsbeispielen der Kohlenwasserstoffexploration, Protokoll über das 10. Kolloquium "ELEKTROMAGNETISCHE TIEFENFORSCHUNG" in Grafrath

Strack, K.-M., Tasci, M.T., Harthill, N., 1984c, Exploration with the deep time-domain sounding method in the United States and in Australia, paper presented at the 46th EAEG meeting in London, paper 404

Stoyer, Ch.H., Strack, K.-M., 1984, The deep transient electromagnetic sounding technique, paper presented at the 46th EAEG meeting in London, paper 401

Walker, R.C., Harthill, N., Strack, K.-M., Lee, D.S., 1982, Sensitivity analysis for transient electromagnetic sounding inversions, paper presented at the 52nd annual meeting, Society of Exploration Geophysicists, paper NS.8.