

G. Karlik, K.-M. Strack

'ALL-TIME' scheinbare Widerstandskurven für LOTEM

Die scheinbare Widerstandskurve ist eine wichtige Form der Darstellung elektromagnetischer Daten. Für TEM Methoden werden Frühzeit-(early-time) und Spätzeit-(late time) Näherung des scheinbaren Widerstandes weitverbreitet benutzt, weil es schwer ist, eine scheinbare Widerstandskurve zu finden, die für alle Zeiten gültig ist (Kaufmann und Keller, 1983).

Hier wird eine scheinbare Widerstandskurve für alle Zeiten unter Benutzung der Magnetfelder berechnet, die unabhängig von Sender-Empfänger ist. Zur Berechnung der scheinbaren Widerstandskurven als Funktion der Zeit gibt es zwei Gründe: Zunächst möchte man eine Transformation als Funktion der Tiefe oder ein Widerstandsverteilungsbild (Image) des Untergrundes des Meßortes erhalten.

Es gibt mehrere Versuche, den scheinbaren Widerstand für alle Zeiten zu berechnen. Stoyer (1983), Sheng (1986) und Strack (1987) definierten scheinbare Widerstandskurven für Long Offset Transientelektromagnetik (LOTEM) Verfahren unter Benutzung der gemessenen Spannung (beim Magnetfeld die zeitliche Veränderung des Magnetfeldes). Spies und Eggers (1986) haben die scheinbaren Widerstandskurven für die 'in-loop' TEM Konfiguration sowohl von den gemessenen Spannung als auch vom gemessenen Magnetfeld berechnet und verglichen, welche die beste Näherung für die TEM Daten ist. Dadurch haben sie festgestellt, daß die Schwierigkeit für 'in-loop' oder 'wire-loop' Konfigurationen darin besteht, daß es zwei exakte Lösungen scheinbarer Widerstände für jede gemessene Spannung gibt. Für den geschichteten Halbraum ist schwer zu bestimmen, welcher von den zwei Werten richtig ist.

Die scheinbare Widerstandskurve unter Benutzung der Magnetfelder zeigt besseres Verhalten und eliminiert das 'Überschießen' (overshooting) und die Doppelwertigkeit, die bei den scheinbaren Widerständen auftreten, wenn sie von der zeitlichen Ableitung des Magnetfeldes berechnet werden. Im Vergleich zur Spannung verhalten sich Magnetfelder einfacher. Wie Spies und Eggers (1986) betonen, sind die Magnetfelder für Frühzeiten bei einem Zwei-Schicht Fall für alle Modelle gleich dem Magnetfeld eines homogenen Halbraums, der den gleichen Widerstand hat wie die erste Schicht. Zu einer bestimmten Zeit, die abhängig vom Erdmodell ist, laufen die Magnetfeldkurven auseinander und bewegen sich vom Magnetfeld des ersten Schichtwiderstandes asymptotisch zu dem Magnetfeld des unteren

Schichtwiderstandes. Daher ändern sich die scheinbaren Widerstandskurven von TEM Daten vom Widerstand der obersten Schicht hin zum Widerstand der untersten Schicht.

Beim LOTEM Verfahren wird die zeitliche Ableitung des vertikalen Magnetfeldes gemessen. Sie wird folgendermaßen für einen Halbraum als Spannung an der Induktionsspule errechnet:

$$V(t) = \frac{3 D A y}{2 \pi r^5} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{u}{2} \right) - \sqrt{\frac{2}{\pi}} u \left(1 + \frac{u^2}{3} \right) e^{-u^2/2} \right]$$

$$u = \frac{2 \pi r}{\tau} \quad \tau^2 = \frac{8 \pi \rho t}{\mu_0}$$

A : Spulenfläche

D : Dipolmoment

r : Sender-Empfängerabstand

y : Empfänger Ortskoordinate

erf: Fehler Funktion (Abramowitz und Stegun, 1964)

Die asymptotische Näherung für Frühzeiten ist

$$V(t) = \frac{3 D A y}{2 \pi r^5}$$

und für Spätzeiten

$$V(t) = \frac{D A y}{40 \pi \sqrt{\pi}} \frac{\mu^{5/2}}{\rho^{3/2} t^{5/2}}$$

Um die scheinbare Widerstände als Funktion aller Zeiten zu berechnen, werden Magnetfelder aus den induzierten Spannungen berechnet.

In Abbildung 1 sind die vertikalen Magnetfelder für LOTEM von zwei homogenen Halbräumen und für ein Zwei-Schicht Modell gezeigt. Da das Zwei-Schicht Modell aus den Widerständen der Halbräume besteht, ist deutlich eine Annäherung der Magnetfelder von der ersten Schicht mit 30 Ohm-m zur zweiten mit 1 Ohm-m zu sehen.

Der Algorithmus zur Berechnung der scheinbaren Widerstände für alle Zeiten basiert auf dem Vergleich des gemessenen Magnetfeldes als Funktion der Zeit und des Sender-Empfängerabstandes mit dem Magnetfeld eines homogenen Halbraum. Unter dieser Annahme soll der gemessene Wert gleich dem theoretischen sein.

$$H_z^{\text{gemessen}} = H_z^{\text{homogen}} \quad \text{oder} \quad H_z^{\text{gemessen}} - H_z^{\text{homogen}} = 0$$

$$g - f(\rho) = 0$$

Aus dieser Gleichung kann man jetzt ρ berechnen. D.h

$$\rho = f^{-1}(g)$$

Die Gleichung kann nur numerisch und nicht analytisch aufgelöst werden. Die Auflösung wird mit einem iterativen Algorithmus nach der Newton-Raphson Methode berechnet. Bei jedem Schritt wird das Magnetfeld des homogenen Halbraums für einen Schätzwiderstand berechnet und mit dem vorgegebenen Magnetfeld verglichen. Dann wird ein neuer Schätzwiderstand bestimmt und das Verfahren solange fortgesetzt, bis die Konvergenz erreicht ist.

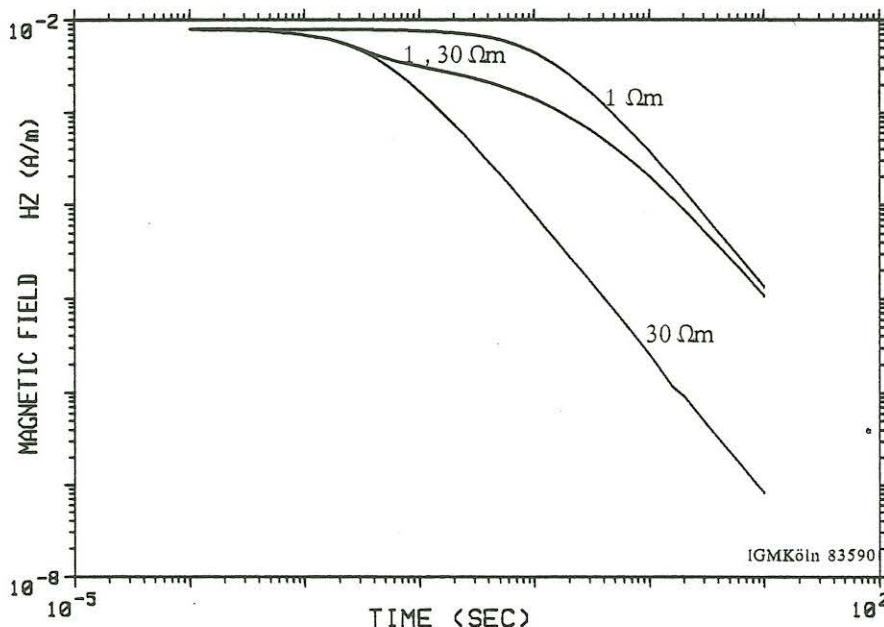


Abb. 1: Magnetfelder für zwei homogenen Halbräume mit unterschiedlichen Widerstände (30 Ωm und 1 Ωm) und ein Zwei-Schicht Modell ($\rho_1 = 30 \Omega\text{m}$, $\rho_2 = 1 \Omega\text{m}$, $h_1 = 400\text{m}$)

Das Resultat sind scheinbare Widerstände für alle Zeiten unter der wichtigen Voraussetzung, daß das Magnetfeld eine streng monotone Funktion und damit umkehrbar ist. Man mißt bei LOTEM meistens die induzierte Spannung, jedoch gilt für diese nicht die Umkehrbarkeit. Das vertikale Magnetfeld erfüllt jedoch diese Bedingung. In Abbildung 2 sieht man das Magnetfeld als Funktion von τ . Hierbei wird für jedes vorgegebenes Magnetfeld, H_z , ein τ gesucht, wobei τ eine eindeutige Funktion des scheinbaren Widerstandes ist.

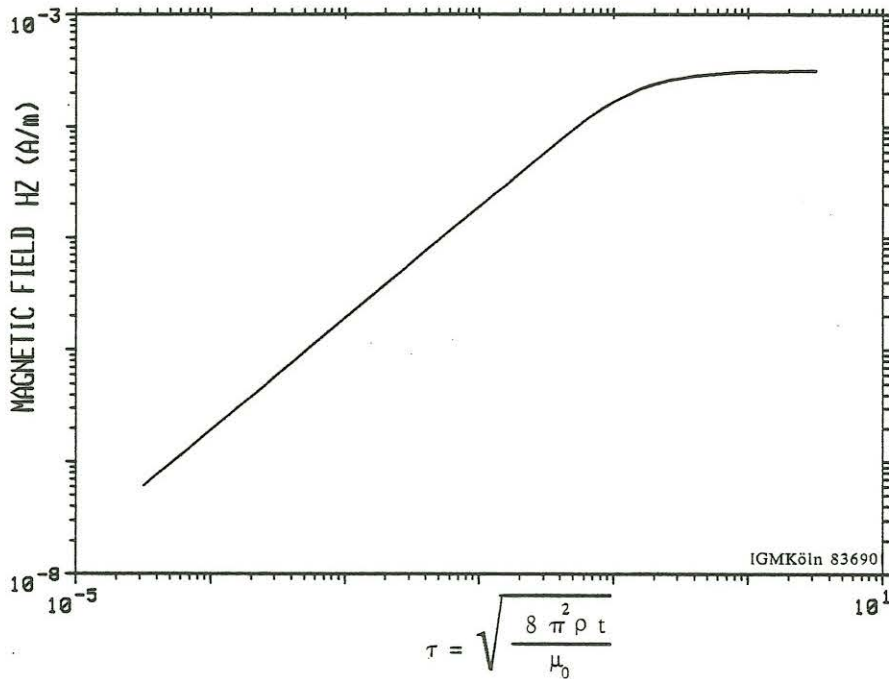


Abb. 2 : Das vertikale Magnetfeld als Funktion τ .

Abbildung 3 zeigt die resultierenden scheinbaren Widerstandskurven für ein Zwei-Schicht-Modell mit Widerstandsvariationen der zweiten Schicht.

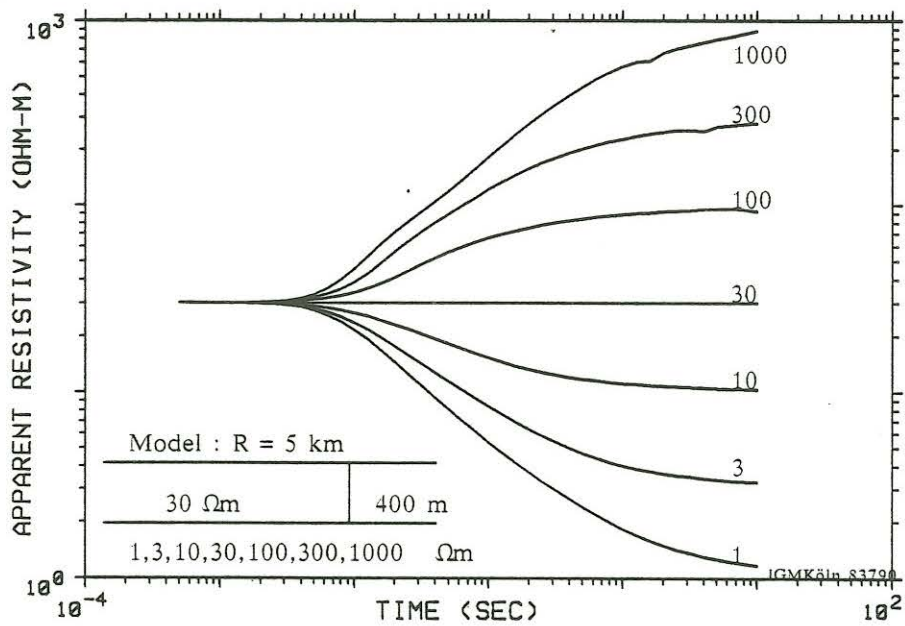


Abb. 3 : Scheinbaren Widerstandskurven für einen Zwei-Schicht-Fall mit Widerstandsvariationen der zweiten Schicht. Das Modell entspricht dem Modell von Abbildung 4.

Aus dem Verlauf der Kurven ist zu sehen, daß sich die scheinbaren Widerstandskurven glatt verhalten, und es keine Unterschwingung wie im Frequenzbereich (Spies und Eggers, 1986) gibt.

In Abbildung 4 sind die scheinbaren Widerstandskurven für das Modell von Abbildung 3 nach der Definition von Stoyer (Strack, 1985) zum Vergleich zu sehen. Wie aus dem Vergleich von Abbildung 3 und 4 deutlich wird, gibt es bei der Definition unter Benutzung des Magnetfeldes keine zusätzliche Kurvenkrümmung, die durch das Überschießen (overshooting) der Spannung verursacht wird.

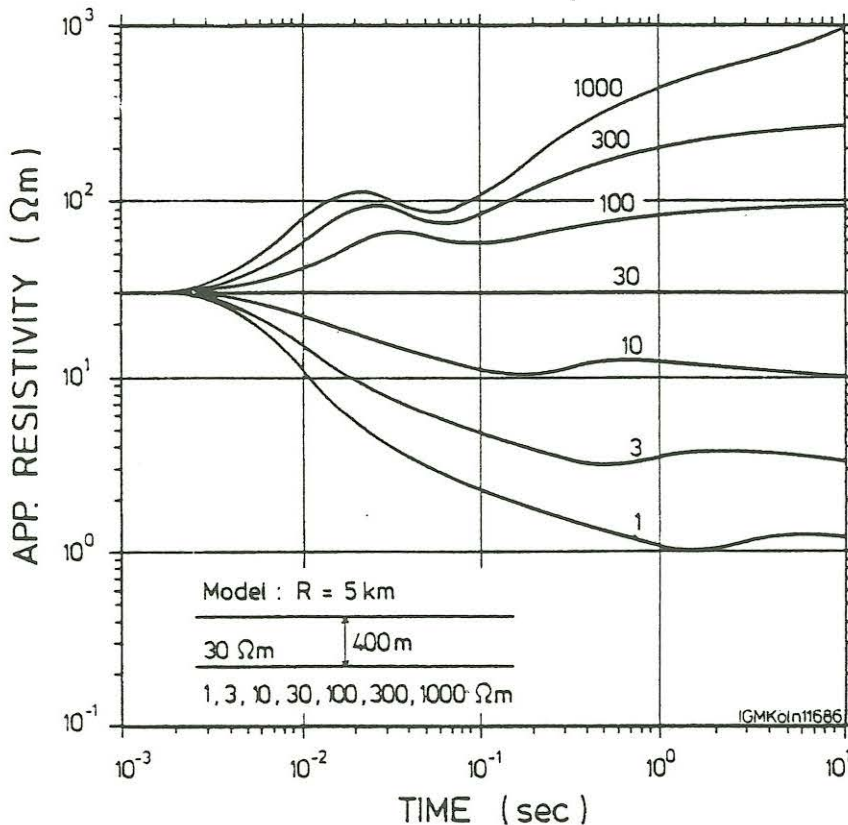


Abb. 4 : Scheinbare Widerstandskurven von Stoyer (Strack, 1985) für die Modelle von Abbildung 3.

In Abbildung 5 wurde in einem homogenen Halbraum eine Schicht mit Widerstandsvariation von 1 Ohm-m bis 1000 Ohm-m eingebaut. Wie aus den Kurven zu sehen sind, sind die Kurven für schlechte Leiter nicht deutlich zu unterscheiden. Dies hängt jedoch damit zusammen, daß Magnetfelder schlecht leitende Schichten nicht gut auflösen (Strack et. al., 1989).

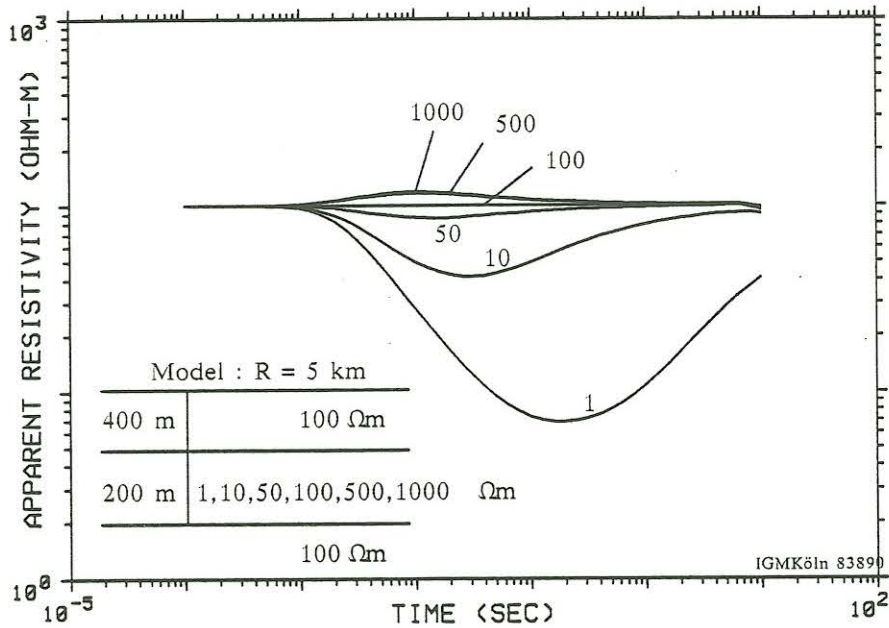


Abb.5 : Scheinbare Widerstandskurven für Drei-Schicht-Fall mit Variationen des Widerstandes der zweiten Schicht

Ein weiterer Drei-Schicht Fall wurde für das Modell von Sheng (1986) in Abbildung 6, von der gemessenen Spannung berechnet. Wie aus der Kurve in Abbildung 7 zu sehen ist, gibt es keine zusätzliche Kurvenkrümmung wie bei

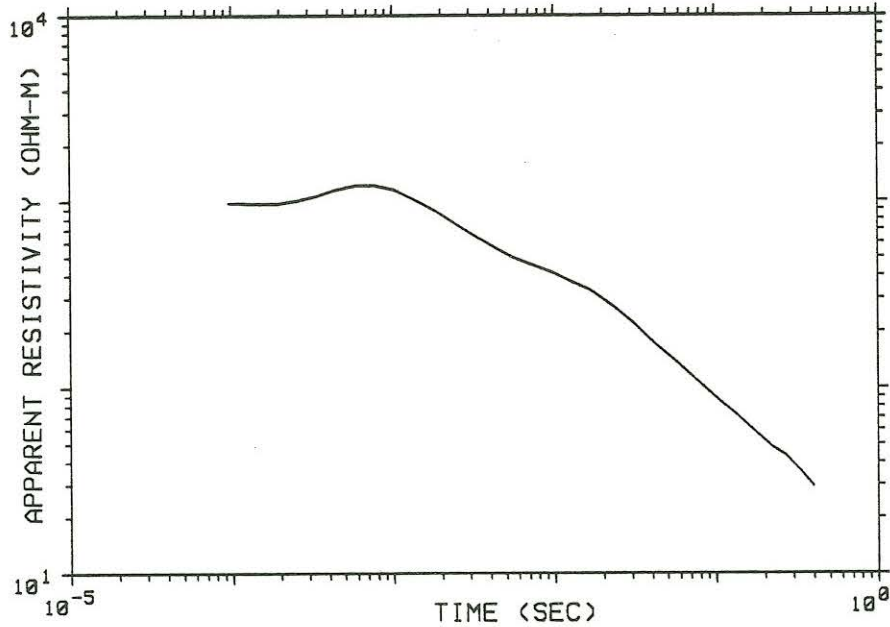


Abb. 6 : Scheinbare Widerstandskurve von Sheng (1986)

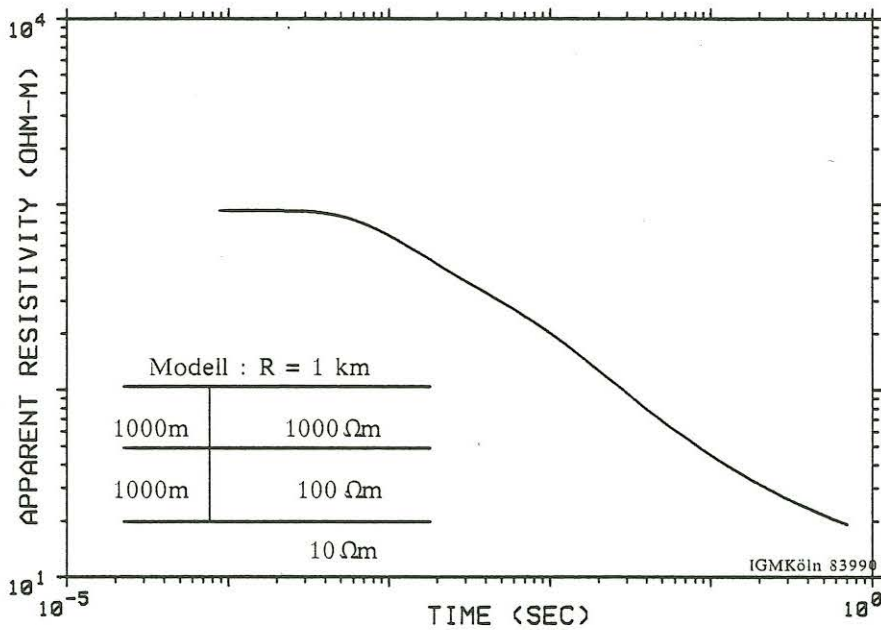


Abb. 7 : Scheinbare Widerstandskurve für einen Drei-Schicht-Fall. Das entspricht dem Modell in Abbildung 6.

Sheng (1986) und Strack (1987). Die Kurve verhält sich glatt und hat keine Krümmung zu frühen Zeiten.

In Abbildung 8 sind scheinbare Widerstandskurven für einen Vier-Schicht-Fall für unterschiedliche Mächtigkeiten der dritten Schicht gezeigt. Der Anstieg durch den schlechten Leiter ist von der Tiefe abhängig.

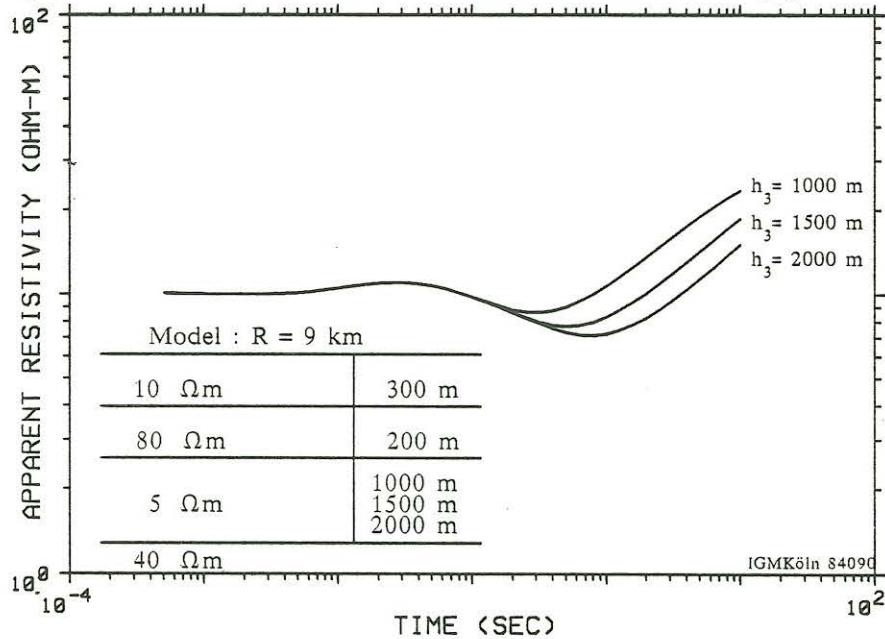


Abb.8 : Scheinbare Widerstandskurven für einen Vier-Schicht Modell. Das entspricht dem Modell in Abbildung 9.

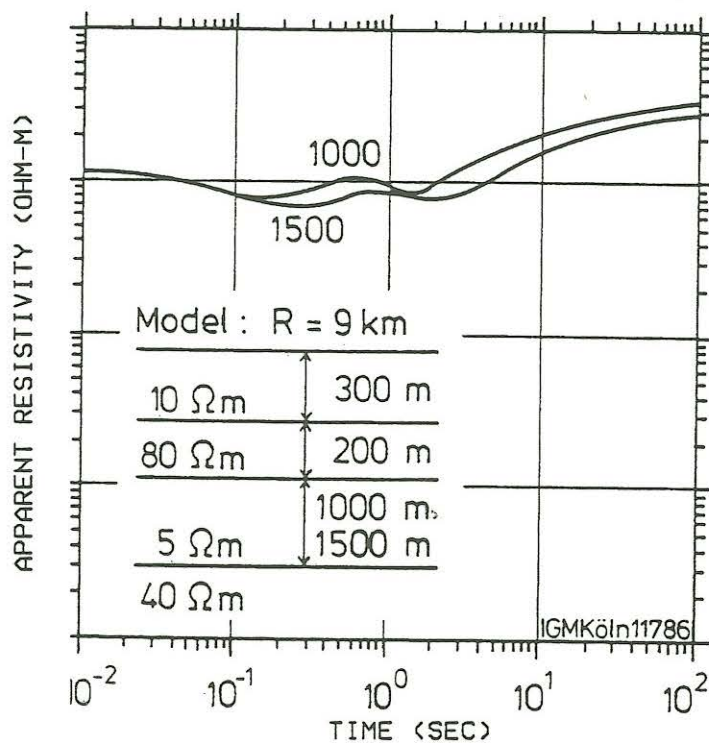


Abb.9 : Scheinbare Widerstandskurve von Strack (1985)

Abbildung 9 zeigt die Widerstandskurven von Strack (1987), die unter Benutzung der gemessenen Spannung gerechnet wurden. Diese Widerstandskurven zeigen zusätzlich Schwingungen in der Kurve, die mit dem zugrunde liegenden Erdmodell nichts zu tun haben.

Da obige Bestimmung der scheinbaren Widerstände nur mit synthetischen Daten gemacht wurde, möchten wir jetzt dies Verfahren auf Felddaten anwenden. Hierbei sind Probleme zu erwarten, da die mit Fehlern behafteten Felddaten von der Spannung in einer Induktionsspule herrühren und erst numerisch integriert werden müssen.

Abbildung 10 (oben) zeigt die standardmässig berechneten scheinbaren Widerstandskurven für Früh- und Spätzeiten für einen Datensatz aus China. Die durch obigen Algorithmus berechnete scheinbare Widerstandskurve ist im unteren Teil der Abbildung zu sehen. Für das Feldbeispiel wurde zuerst die Systemübertragungsfunktion entfaltet und über die Zeit integriert. Zu späten Zeiten ab 5 Sekunden wird die 'all time' Kurve ungenau, da die Daten verrauscht sind.

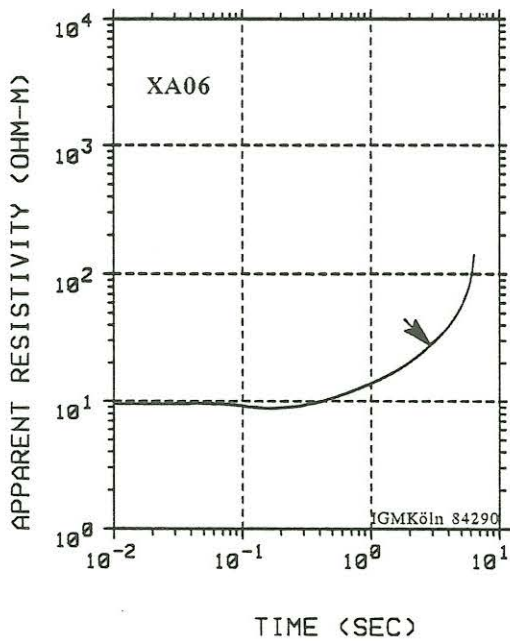
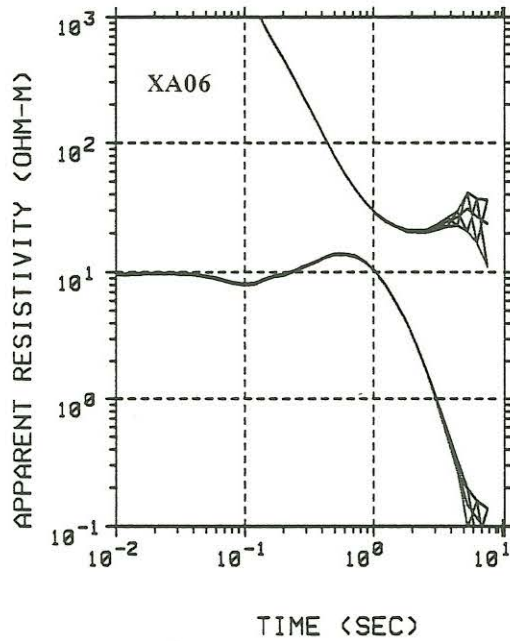


Abb.10 : Ein Beispiel für standard 'early' und 'late time' Darstellung von LOTEM Daten (oben) und der zugehörigen 'all time' Kurve.

Ziel der Bestimmung einer 'all time' Kurve ist neben dem Vergleich von Daten an unterschiedlichen Stationen die Herleitung einer kontinuierlichen Funktion, die es erlaubt, eine schnelle Darstellung der Felddaten zu erhalten. Das

resultierende 'Image' kann dazu benutzt werden, die Feldparameter während des Meßfortschrittes zu optimieren und somit optimale Daten zu erhalten. Dies ist bei der ständig steigenden Datenmenge unbedingt notwendig. Weiterhin können 'Image'-Sektionen mit anderen Datenverarbeitungsverfahren zur Verbesserung der Darstellung bearbeitet werden.

LITERATURVERZEICHNIS

- Abramowitz, M., and Stegun, I. A., 1968, Handbook of mathematical functions: New York, Dover Publ. Inc.
- Kaufman, A.A., and Keller, G.V., 1983, Frequency and transient soundings, Elsevier.
- Sheng, Y., 1986, A single apparent resistivity expression for long-offset transient electromagnetics, Geophysics 51, 1291-1297
- Spies, B. R. and Eggers, D.E., 1986, The use und misuse of apparent resistivity in electromagnetic methods, Geophysics 51, 1462-1471.
- Strack, K.-M., 1987, "All time" Definition des scheinbaren spezifischen Widerstandes für die LOTEM- Methode, in Haak, V., und Homilius, J., (Eds.), Prot. Koll. Elektr. Tiefensond. Lehrbach NLfb, 341-347.
- Strack, K.-M., 1985, Das Transient-Elektromagnetische Tiefensondierungs-Verfahren angewandt auf die Kohlenwasserstoff- und Geothermie-Exploration, in: Ebel, A., Neubauer, F. M., Raschke, E., Speth, P. (Eds.), Mitt. des Instituts f. Geophys. u. Met. der Universität zu Köln, Heft 42.