

Entwicklung einer feldtauglichen Apparatur und eines Auswerteverfahrens für hochgenaue Messungen der Spektralen Induzierten Polarisation (SIP)

D. Kretschmar¹, R. Lienau², E. Niederleithinger³ und T. Radic¹

1. Einleitung

Das Verfahren der Spektralen Induzierten Polarisation (SIP) berücksichtigt die Charakteristiken der Frequenzabhängigkeit der Gesteinswiderstände. Dadurch erlaubt das SIP-Verfahren eine weitergehende Diskriminierung der leitfähigen Untergrundstrukturen, als dies anhand des Gleichstromwiderstandes und der Aufladefähigkeit möglich wäre. Der scheinbare spezifische Widerstand wird dafür nach Betrag und Phase für unterschiedliche Meßkonfigurationen gemessen, wobei die Frequenz des verwendeten Meßsignales von Werten kleiner als 1 Hz bis zu Werten im kHz-Bereich variiert wird. Die Inversion der Meßdaten liefert dann die geometrische Verteilung der leitfähigen Strukturen im Untergrund und die Werte derjenigen Parameter, die die spezielle Frequenzabhängigkeit der Gesteinswiderstände beschreiben. Diese Vorgehensweise hat sich in der Erzexploration bewährt und sollte grundsätzlich auch zur Untersuchung von Lockersedimenten geeignet sein.

Einsatzbereiche des SIP-Verfahrens sind die Erkundung von Kontaminationen des Erdreiches (z.B. im Umfeld von Industrieanlagen und Deponien) und die Detektion von Ton bzw. tonigen Bereichen im Untergrund für die Bearbeitung verschiedener hydrologischer und ingenieurgeologischer Fragestellungen. Ein wichtiger Parameter aus diesem Bereich ist z.B. der Durchlässigkeitsbeiwert k_f , für dessen Bestimmung aus SIP-Feldmessungen bereits eine Methode diskutiert wurde [17]. Laboruntersuchungen der letzten Jahre haben zudem Hinweise darauf erbracht, daß die Frequenzcharakteristik des Gesteinswiderstandes auch von Kohlenwasserstoffkontaminanden beeinflusst werden kann [1]. Voraussetzungen für ein aussagekräftiges Ergebnis sind in jedem Fall hinreichend präzise Feldmessungen, wobei die in den letzten Jahren durchgeführten Feldmessungen [2] gerade hier folgende Defizite deutlich aufgezeigt haben:

- Im Hinblick auf die Meßgenauigkeit sind die primär für die Erzexploration konzipierten SIP-Apparaturen nur bedingt geeignet.
- Die hohen Systemkosten verhindern einen breiten Einsatz der Methode im Umweltbereich. Die Anzahl an hochwertigen SIP-Messungen ist verschwindend klein.
- Es sind keine Inversionsprogramme verfügbar, die auch die EM-Effekte berücksichtigen.
- Es ist unklar, welches Modell ein Lockersediment (Membranpolarisator) hinreichend beschreibt.

Ziel des laufenden Vorhabens ist daher:

- Die Entwicklung einer mehrkanaligen SIP-Meßapparatur, die für einen Frequenzbereich von 10 mHz bis etwa 20 kHz ausgelegt ist und das Verfahren einer breiten Feldanwendung zuführt.
- Die Erstellung eines 1D-Inversionsprogrammes, das die unvermeidlichen elektromagnetischen Induktionserscheinungen berücksichtigt und auf einem PC lauffähig ist.
- Die Erstellung eines SIP-Programmes zur Modellierung einer zweidimensionalen polarisierbaren Struktur unter Berücksichtigung der elektromagnetischen Erscheinungen.

1 Institut für Angewandte Geowissenschaften II, Fachgebiet Angewandte Geophysik, TU Berlin

2 Lienau - Industrieelektronik

3 Büro für Geophysik - Lorenz

2. SIP - Meßapparatur

Ziel ist die Messung der erdelektrischen Impedanz mittels einer Vierpunktanordnung bei Frequenzen bis 20 kHz. Die Impedanz von Lockersedimenten nimmt zu höheren Frequenzen hin in der Regel nur um wenige Prozent ab [11], [12]. Eine Materialdifferenzierung/-charakterisierung anhand der Frequenzcharakteristiken dieser Abnahme zu ermöglichen, erfordert notwendigerweise eine sehr hohe relative Meßgenauigkeit. Die meßtechnischen Konzepte hierfür sind:

- ein sinusoidaler Erregerstrom,
- eine präzise Messung der zeitlichen Variationen von Erregerstrom und Spannung,
- eine optimale galvanische Entkopplung von Stromquelle und Spannungsteil durch räumliche Trennung und Einsatz von Glasfasern,
- die Berechnung der Impedanz auf der Basis einer uni- bzw. multivariaten linearen Ausgleichsrechnung,
- eine 4- bis 100.000-fache Überabtastung (frequenzabhängig) kombiniert mit einer Echtzeit Datenreduktion.

Die Handhabung einer Apparatur im Feldeinsatz wird wesentlich auch durch einen hohen Bedienungskomfort verbessert. Zu diesem Zweck wurde auf dem Bildschirm des Meßrechners eine virtuelle Geräteoberfläche implementiert, die

- die Steuerung des Meßablaufs,
- die Parameterwahl,
- die Kontrolle der Messung anhand einer oszilloskopischen Darstellung von Strom und Spannung,
- die Qualitätskontrolle anhand der Darstellung der Impedanz in Abhängigkeit von der Frequenz

ermöglicht und zukünftigen erweiterten Anforderungen wie z.B. einer Parameterbestimmung leicht angepaßt werden kann.

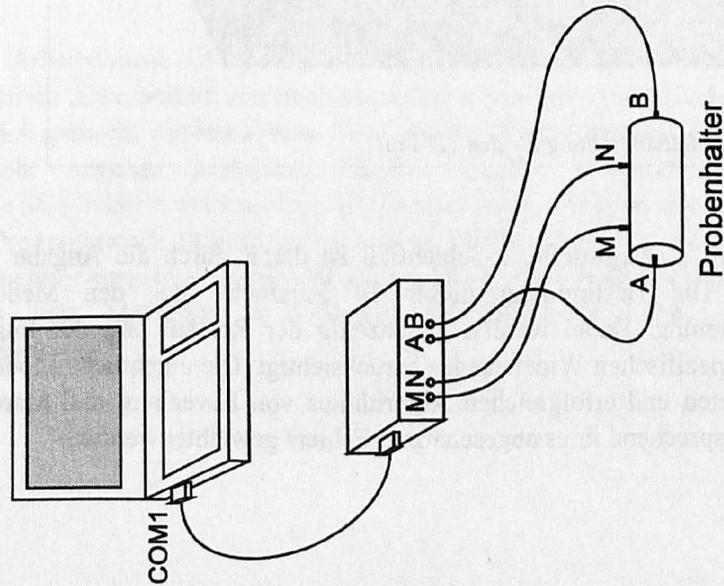
Zielgruppen, Einsatzbereiche und Meßgerätekonfigurationen

Die Einsatzbereiche der SIP-Methode sind sehr vielfältig. Eine Apparatur, die darüberhinaus weitere geophysikalische Methoden unterstützt, ist zwar wünschenswert, besitzt jedoch einen erheblichen Overhead und ist ggf. nicht optimal ausgelegt. Die aus dieser Überlegung erwachsene Konsequenz ist eine Modularität, die dem Anwender eine individuelle Auslegung des Meßgerätes ermöglicht (Abb. 1). Die SIP-Box enthält die methodenspezifischen digitalen Komponenten und Funktionen. Sie kann über den seriellen Port eines PCs angesteuert werden. Die Remote-Units beinhalten die analogen Komponenten. Die Soft- und Hardware für den PC ist bei den für den Feldeinsatz ausgelegten Modellen im wesentlichen gleich, jedoch werden kommerzielle Anwender weniger Rücksicht auf widrige Witterungs- und Geländebedingungen nehmen können und daher stärker Wert auf eine kompakte und robuste Bauweise legen. Die benötigte Stromquelle kann individuell spezifiziert werden (15 bis 3000 Watt). Neben der Messung von Polarisationserscheinungen eignet sich eine Wechselstromapparatur auch

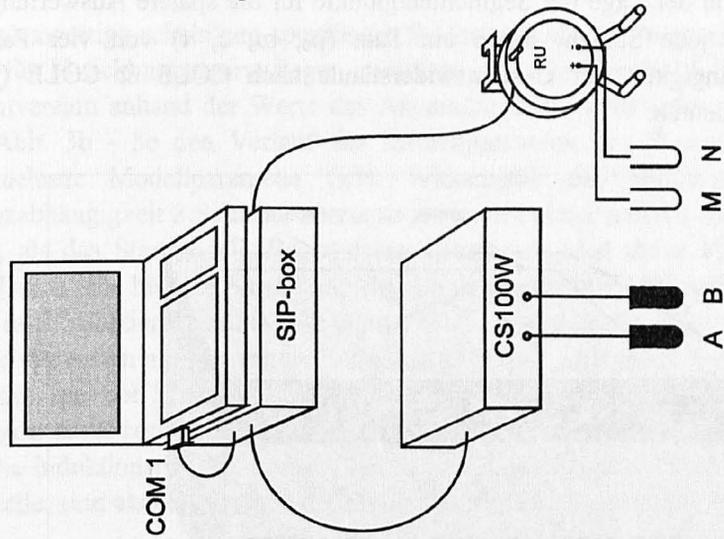
- für den Einsatz in Trockengebieten mit hohen Übergangswiderständen und extremen Widerstandskontrasten im Untergrund, da beides meist sehr kleine Signalspannungen nach sich zieht [8],
- zur Messung und Berücksichtigung elektromagnetischer Erscheinungen. So polarisieren laterale Leitfähigkeitsinhomogenitäten den elektrischen Feldvektor. Eine Sondenkreuzauslage erlaubt die Bestimmung der Elliptizität und der Richtung der Hauptachse [2],
- zur Erkennung und Korrektur von Gleichstromverzerrungen [9],
- um das regionale elektrische Störfeld mit Hilfe einer Referenzstation und einer multivariaten Datenauswertung zu unterdrücken und die Meßgenauigkeit zu erhöhen [10].

Konfigurationen der modularen SIP - Apparatur

Labor - 'Mini'



Feld - 'low budget'



Feld - 'professional'

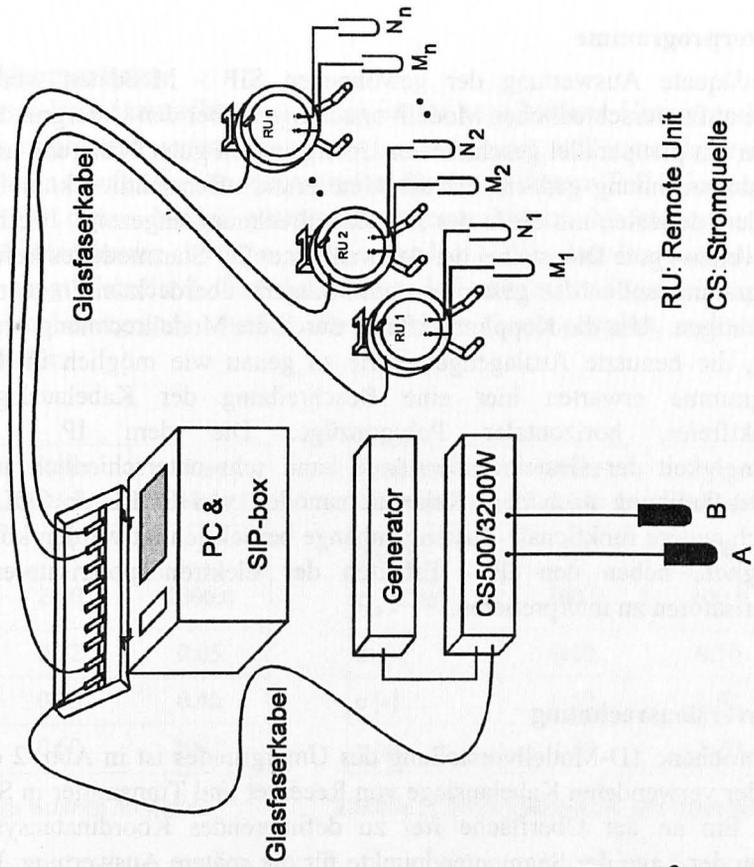


Abb. 1: Übersicht über die im Vorhaben zu entwickelnden Apparaturen. Die Hard- und Software der beiden feldauglichen Varianten ist bis auf die Bauform weitgehend identisch. Das Modell 'Mini' ist für kleinstskalige Anwendungen ausgelegt. Einsatzbereiche sind: Lehre, Feld, Labor und Bohrloch.

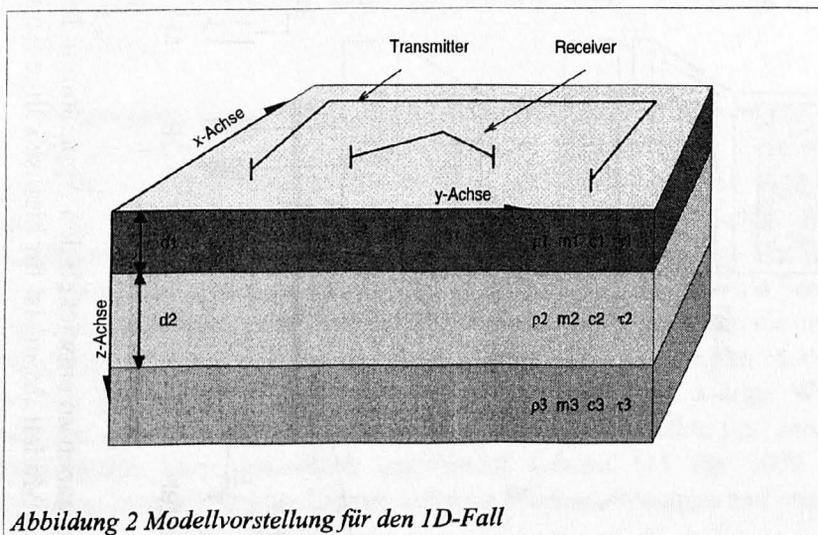
3. Computerprogramme

Für die adäquate Auswertung der gewonnenen SIP - Meßdaten werden zwei Softwarelösungen entwickelt, die auf unterschiedlichen Modellvorstellungen über den Untergrund am Meßort beruhen. Für alle Fälle, in denen ein planparallel geschichteter Untergrund in guter Näherung angenommen werden kann, ist die 1D-Inversionsrechnung gedacht. Ist der Untergrund offensichtlich komplizierter aufgebaut, so ist die Auswertung der Meßdaten mit Hilfe der 2D-Modellrechnung angezeigt. Hierbei kann eine Vorauswertung mit der 1D-Inversion gute Dienste bei der Auswahl eines 2D-Startmodelles liefern.

Beide Programme sollen den gesamten vom Meßgerät überdeckten Frequenzbereich von 0.01 Hz bis 20 kHz berücksichtigen. Um die Kopplungseffekte durch die Modellrechnung exakt nachbilden zu können, ist es notwendig, die benutzte Auslagegeometrie so genau wie möglich im Feld zu dokumentieren. Die Auswerteprogramme erwarten hier eine Beschreibung der Kabelauslage durch die Koordinaten kreuzungspunktfreier, horizontaler Polygonzüge. Die dem IP - Effekt zugrundeliegende Frequenzabhängigkeit der Gesteinswiderstände kann sehr unterschiedlich ausfallen. Bisher wurde eine analytische Beschreibung nach dem Relaxationsmodell von COLE & COLE [3] implementiert, wobei prinzipiell auch andere funktionale Zusammenhänge berücksichtigt werden können (z.B. nach [16]). Damit wird es möglich, neben den IP - Effekten der Elektronenpolarisatoren auch IP - Effekte von Membranpolarisatoren zu interpretieren.

3.1 1D - Inversionsrechnung

Die angesprochene 1D-Modellvorstellung des Untergrundes ist in Abb. 2 dargestellt. Dort ist auch die Unterteilung der verwendeten Kabelauslage von Receiver und Transmitter in Segmente eines Polygonzuges zu erkennen. Ein an der Oberfläche frei zu definierendes Koordinatensystem ermöglicht die exakte Dokumentation der Lage der Segmentendpunkte für die spätere Auswertung. Neben den Mächtigkeiten d_1 und d_2 wird jede Schicht durch ein Satz (ρ_0 , m , c , τ) von vier Parametern beschrieben, die die Frequenzabhängigkeit der Gesteinswiderstände nach COLE & COLE ([3] und [6]) festlegen. Diese Parameter bedeuten:



ρ_0 : Gleichstromwiderstand
 m : Aufladefähigkeit
 c : Frequenzabhängigkeit
 t : Zeitkonstante

Abbildung 2 Modellvorstellung für den 1D-Fall

Der in Abb. 2 dargestellte 3-Schichtfall ist damit durch die Angabe von 14 Parametern vollständig beschrieben. Die Bestimmung dieser 14 Parameter aus den Meßdaten ist das Ziel der 1D-Inversionsrechnung. Dabei werden gleichzeitig der Realteil und der Imaginärteil des komplexwertigen scheinbaren spezifischen Widerstandes berücksichtigt. Die eigentliche Modelloptimierung erfolgt nach dem weit verbreiteten und erfolgreichen Algorithmus von Levenberg und Marquardt ([4] und [7]), wobei die Meßdaten entsprechend ihres abgeschätzten Fehlers gewichtet werden.

Zum Stand der Entwicklungsarbeiten

Der Inversionsalgorithmus läuft inzwischen stabil und ist für verschiedene Untergrundmodelle anhand synthetischer »Meßdaten« erfolgreich getestet worden. Im Folgenden soll eine Inversion beispielhaft vorgestellt werden. Die Tabelle 1 zeigt die Modellparameter für das in diesem Fall bekannte (vorgegebene) wahre Untergrundmodell. Für dieses Modell werden die entsprechenden Meßwerte berechnet und als Eingangsdaten der Inversionsrechnung in eine Datei abgelegt. Die das Startmodell der Inversion beschreibenden Parameter zeigt Tabelle 2. Um das Startmodell möglichst allgemein zu halten (wenig Vorabinformationen über den Untergrund), wurden alle Schichten gleich gestaltet, und stellen im Prinzip einen homogenen Halbraum dar.

<i>Modellparameter</i>	<i>Wert Schicht 1</i>	<i>Wert Schicht 2</i>	<i>Wert Schicht 3</i>
d [m]	1.5	1.5	-
ρ_0 [Ωm]	500.0	20.0	1000.0
m [-]	0.03	0.12	0.05
c [-]	0.15	0.25	0.40
τ [s]	0.01	0.60	200.0

Tabelle 1: Modellparameter des wahren Modelles

<i>Modellparameter</i>	<i>Wert Schicht 1</i>	<i>Wert Schicht 2</i>	<i>Wert Schicht 3</i>
d [m]	5.0	5.0	-
ρ_0 [Ωm]	100.0	100.0	100.0
m [-]	0.10	0.10	0.10
c [-]	0.50	0.50	0.50
τ [s]	1.20	1.20	1.20

Tabelle 2: Modellparameter des Startmodelles

Berechnet wurde der komplexwertige scheinbare spezifische Widerstand für 61 Frequenzen im Bereich von 10 mHz bis 10 kHz und für 13 Schlumbergerauslagen zwischen $L/2 = 1.58$ m und $L/2 = 200.0$ m. In Abb. 3a ist der Verlauf der Inversion anhand der Werte des Anpassungsfehlers für jeden Iterationsschritt dokumentiert, während die Abb. 3b - 3e den Verlauf der Modellparameter des Startmodelles zeigen. Auffallend ist, daß sich mehrere Modellparameter (z.B. Widerstand und Mächtigkeit 2.Schicht, Aufladefähigkeit und Frequenzabhängigkeit 3.Schicht) zuerst so stark verändern, daß sie sogar weiter vom wahren Modell entfernt sind, als das Startmodell. Bei anderen Parametern sind diese »Überschwinger« deutlich geringer ausgeprägt. Durch eine bessere Einstellung des marquardt'schen Dämpfungsparameters kann dieser Effekt vermutlich noch reduziert werden. Sehr unterschiedlich ist auch das Konvergenzverhalten der Parameter: Der Widerstand der ersten und der dritten Schicht sind bereits nach nur 5 Iterationen korrekt bestimmt, während die Zeitkonstante der 3. Schicht am längsten braucht, um sich auf den wahren Wert einzustellen. Der Inversionsalgorithmus reproduziert die Ausgangswerte des wahren Modelles daher erst in 18 Iterationsschritten exakt. Die Induktionseffekte, die bei den Signalfrequenzen bis 10 kHz deutlich größer werden als die Gleichstromanteile, sind also erfolgreich mit in den Inversionsprozeß einbezogen worden.

Ausblick

Der wichtigste folgende Arbeitsschritt ist der Test des Inversionsalgorithmus mit verrauschtem Datenmaterial. Hierbei ist natürlich insbesondere von Interesse, welche Aussagen mit fehlerbehafteten Daten noch über das Untergrundmodell gemacht werden können, bzw. welche Modellparameter sich noch gut und welche sich nur noch sehr ungenau bestimmen lassen. Weitere Frequenzmodelle für die Gesteinsleitfähigkeit sowie die Möglichkeit, verschiedene Frequenzmodelle innerhalb eines Schichtpaketes zu verwenden, sollen in den Programmcode aufgenommen werden. Die Inversionsrechnung ist zur Zeit als eine rein textorientierte Anwendung ausgelegt, geplant ist jedoch, sowohl die Bedienung des Programmes als auch die Präsentation von Meßdaten und Untergrundinformationen über eine grafische Benutzerschnittstelle abzuwickeln.

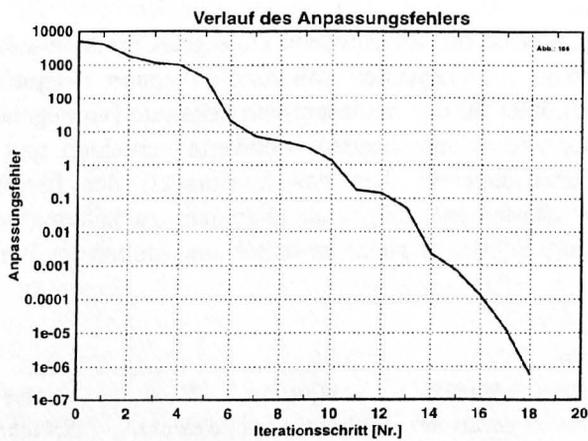


Abbildung 3a

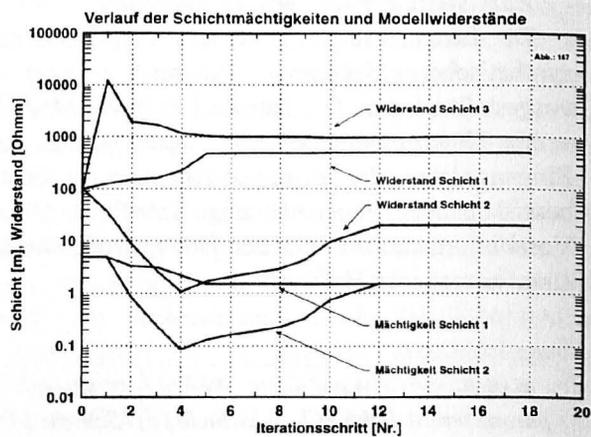


Abbildung 3b

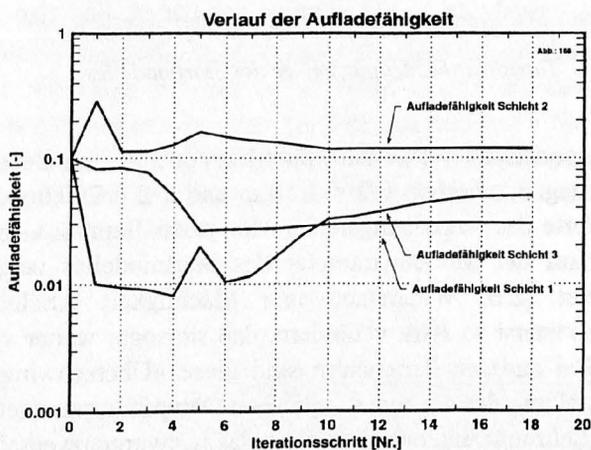


Abbildung 3c

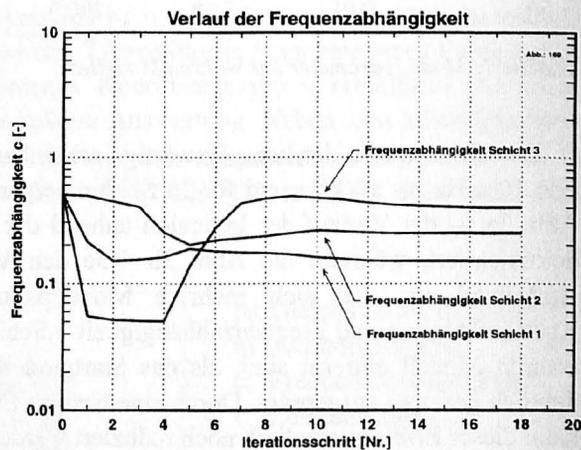


Abbildung 3d

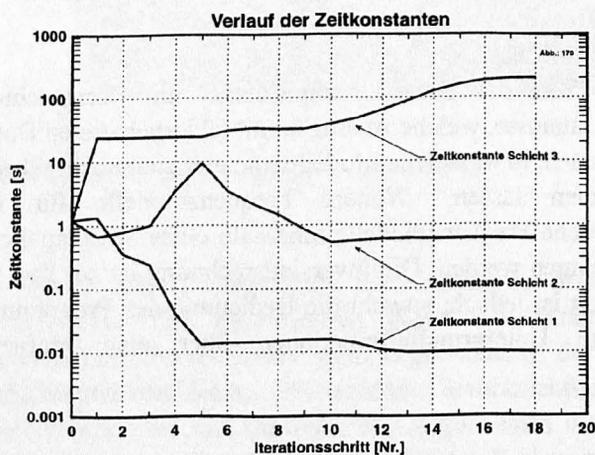


Abbildung 3e

Die Abbildung 3 (a-e) dokumentiert einen Inversionslauf synthetischer SIP-Meßdaten anhand des Verlaufes des Anpassungsfehlers und der Modellparameter (siehe Text vorige Seite).

3.2 2D - Modellrechnung

Wenn man davon ausgehen muß, daß die Untergrundverhältnisse so kompliziert sind, daß eine näherungsweise Beschreibung durch einen planparallelen Mehrschichtfall nicht mehr möglich ist, ist es unabdingbar, eine 2D-Modellrechnung einzusetzen. In der Literatur finden sich Arbeiten zur 2D-Modellierung von Induktionsproblemen für frequenzunabhängige, reelle Gesteinswiderstände und Dipolquellen mit Hilfe der Methoden der »Finiten Differenzen« [13] und der »Finiten Elemente« [14]. Um extrem große Gleichungssysteme zu vermeiden, wird das Gesamtproblem durch eine Transformation in den Frequenzbereich in kleinere Teilaufgaben zerlegt. Aufbauend auf [13] und [14] und einem 2D-Modellierungsprogramm für die Gleichstromgeoelektrik [5] wird die SIP-Modellrechnung entwickelt. Die verwendete Gitterstruktur zur Diskretisierung des Untergrundes nach dem Finite Differenzen - Verfahren erlaubt eine sehr flexible Verteilung der nunmehr komplexwertigen, frequenzabhängigen Gesteinswiderstände im Untergrund. Die Frequenzabhängigkeit wird dabei zuerst nach dem Modell von COLE & COLE [3] implementiert. Die besonderen Anforderungen, die durch die Berücksichtigung der Induktionseffekte durch die Kabelkopplung entstehen, führen zu vielfältigen numerischen Problemen, die den aktuellen Arbeitsschwerpunkt bilden.

Literaturverzeichnis

- [1]: BÖRNER, F., GRUHNE, M. UND SCHÖN, D., 1993, »Contamination indications derived from electrical properties in the low frequency range«, *Geophysical Prospecting* 41, 83-98
- [2]: BURKHARDT, H. UND RADIC, T., 1994, Schlußbericht zum Vorhaben »Entwicklung und Erprobung einer Apparatur und eines Auswertverfahrens für hochauflösende Messungen der Induzierten Polarisation«, BGR Hannover und TU Berlin
- [3]: COLE, K. S. AND COLE, R. H., 1941, »Dispersion and absorption in dielectrics. I. alternate current fields«, *J. Chem. Physics* 9, 341
- [4]: MARQUARDT, D. W., 1963, »An algorithm for least squares estimation of non-linear parameters«, *J. of the Society of Industrial and Applied Mathematics* 11, 431
- [5]: NIEDERLEITHINGER, E., 1990, »Zweidimensionale Modellrechnung zur Untersuchung oberflächennaher Inhomogenitäten in der Geoelektrik«, Diplomarbeit, TU Berlin
- [6]: PELTON, W. H., WARD, S. H., HALLOF, P. G., SILL, W. R., NELSON, P. H., 1978, »Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP«, *Geophysics*, vol. 43, No.3, 588
- [7]: PRESS, W. H., FLANNERY, B.P., TEUKOLSKY, S. A., VETTERLING, W. T., 1986, »Numerical Recipes, The Art of Scientific Computing«, Cambridge University Press
- [8]: RADIC, T., 1988, »Geoelektrische Messungen in SW-Ägypten mit einer digitalen Frequenzbereichsgeoelektrik sowie erste Erfahrungen mit einer Referenztechnik (Geoelektrische Referenztechnik) zur Minderung von künstlichen und natürlichen (tellurischen) Störungen«, Tagungsband Kolloquium Elektromagnetische Tiefenforschung, Königstein, 1988
- [9]: RADIC, T., 1990, »Auswertung des Skineffektes bei Wechselstromsondierungen zur Korrektur möglicher Gleichstromverzerrungen«, Tagungsband Kolloquium Elektromagnetische Tiefenforschung, Hornburg, 1990
- [10]: RADIC, T., 1991, »Neue Konzepte zur hochauflösenden Messung der Induzierten Polarisation«, Sonderband 1992 zum 1. DGG-Seminar Umweltgeophysik, Neustadt, 1991
- [11]: RADIC, T., 1994, »Zum aktuellen Stand der Methode der Induzierten Polarisation unter besonderer Berücksichtigung aktueller Entwicklungstendenzen«, Sonderband zum DGG-Kolloquium »Nichtseismische Verfahren in der Angewandten Geophysik«, Münster, 1994
- [12]: RADIC, T., 1994, »Entwicklung und Erprobung einer Apparatur und eines Auswertverfahrens zur hochauflösenden Messung der IP - erste Ergebnisse vom Teststandort Rabenstein«, Sonderband II 1994 zum DGG-Kolloquium Umweltgeophysik, Neustadt, 1993
- [13]: STOYER, C. H. AND GREEFIELD, R. J., 1976, »Numerical solutions of the response of a two-dimensional earth to an oscillating dipole source«, *Geophysics*, vol 41, 519-530
- [14]: UNSWORTH, M. J., TRAVIS, B. J. AND CHAVE, A. D., 1993, »Electromagnetic induction by a finite electric dipole source over a two-dimensional earth«, *Geophysics*, vol 58, 198-214
- [15]: VANHALA, H., SOININEN, H. AND KUKKONEN, I., 1992, »Detecting organic chemical contaminants by spectral-induced polarization method in glacial till environment«, *Geophysics*, vol 57, No.8, 1014-1017
- [16]: VINEGAR, H. J. UND WAXMAN, M. H., 1984, »Induced polarization of shaly sands«, *Geophysics*, vol 49, No. 8, 1267-1287
- [17]: WELLER, A., BÖRNER, F. UND WOITKE, L., 1992, »Bestimmung der Gesteinsdurchlässigkeit und anderer Gesteinsparameter des oberflächennahen Untergrundes aus geophysikalischen Messungen in Rammsonden-Löchern.«, In: Projektleitung Deponieuntergrund (Hrsg.): Berichtsband zum 2. Statusseminar des Verbundvorhabens »Methoden zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten«, 360-366, BGR Hannover
- [18]: WYNN, J. C. AND ZONGE, K. L., 1977, »Electromagnetic coupling«, *Geophysical Prospecting* 25, 29-51
- [19]: WYNN, J. C. AND ZONGE, K. L., 1975, »Electromagnetic coupling, its intrinsic value, its removal, and the cultural coupling problem«, *Geophysics*, vol 40, No.5, 831