

Effekte von Rohrleitungen auf RMT-Messungen

S. Recher, B. Tezkan, A. Hördt, Universität zu Köln

1 Problemstellung

Bei der geophysikalischen Flacherkundung mit elektrischen und elektromagnetischen Meßmethoden stellen metallische Objekte wie Zäune, Telefon- und Stromleitungen, vergrabene Rohre und Kabel, Störquellen dar. Der Einfluß dieser Objekte ist je nach Meßverfahren noch in einiger Entfernung deutlich zu messen. Der Grund liegt darin, daß die elektrischen und elektromagnetischen Meßverfahren in erster Linie zur Bestimmung der Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit des Untergrunds eingesetzt werden. Da die elektrische Leitfähigkeit metallischer Objekte gegenüber den üblichen Leitfähigkeiten des Bodens und der Gesteine nahezu perfekt ist, werden diese Objekte auch primär in den Meßdaten sichtbar.

Man ist bei einer Feldmessung daher stets bemüht, sich weit genug von metallischen Leitern fernzuhalten. Andererseits kann der Fall auftreten, daß es unvermeidbar ist, die Meßprofile in direkter Nähe zu metallischen Objekten zu verlegen. Zum Beispiel sind Untersuchungsflächen auf Altlasten und Industrieanlagen, die zur Begutachtung für eine Sanierung und Rekultivierung anstehen, oft in erheblichem Maße mit metallischen Objekten versehen. Die Abbildung 1 zeigt als Beispiel den Effekt von vergrabenen Rohren auf den scheinbaren Widerstand bei

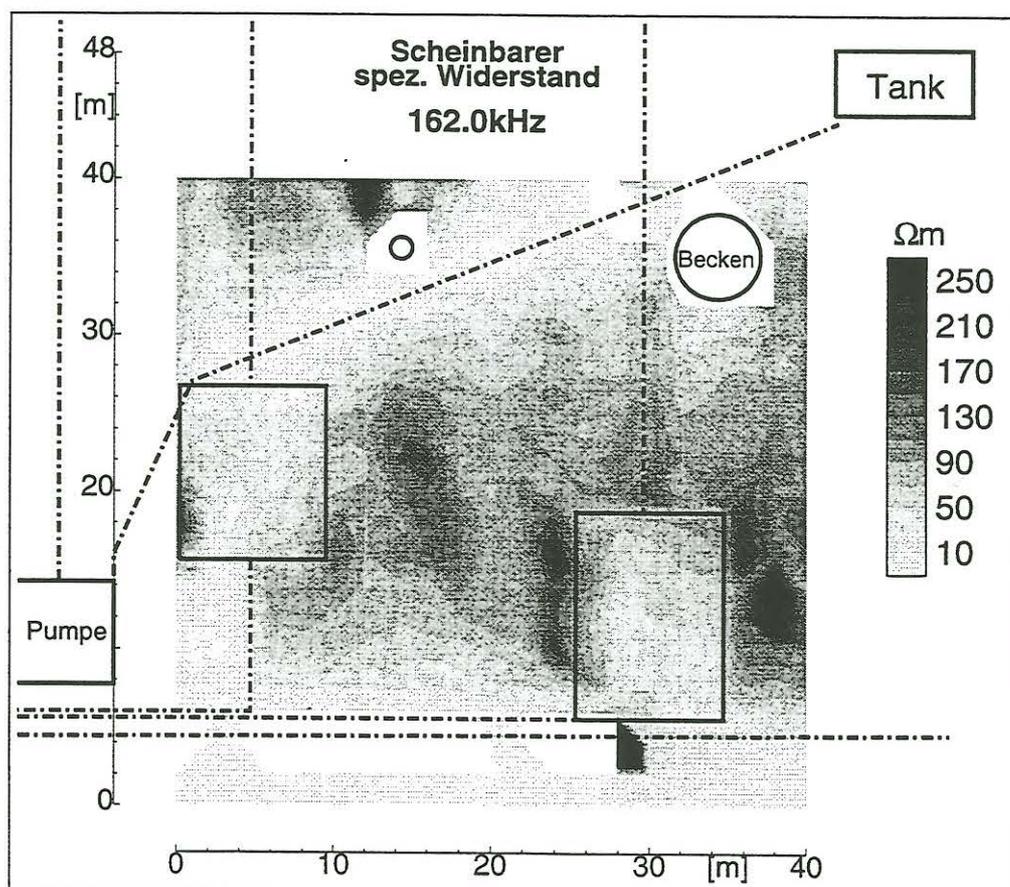


Abbildung 1: Radiomagnetotellurik(RMT)-Messung auf einem kontaminierten Gebiet bei Straßburg. Die Rohre (als Strichpunktlinien) machen sich im scheinbaren Widerstand der Frequenz 162 kHz deutlich bemerkbar. Mit Rechtecken sind die Orte ehemals vergrabener Tanks eingezeichnet.

einer Radiomagnetotellurik(RMT)-Messung mit der Frequenz 162 kHz auf einer Fläche von 40m×40m. Die Rohre (als Strichpunktlinien) treten im Meßgebiet nicht nur an ihrem Vergrabungsort als deutliche Erniedrigung des scheinbaren Widerstands hervor, auch die Meßwerte in der näheren Umgebung zum Rohr sind gestört.

Einen Ansatz, den Einfluß von Rohren und Kabeln im Untergrund auf elektromagnetische Erkundungsverfahren zu untersuchen, ist, diese Störkörper zunächst als gut leitende, symmetrische zweidimensionale Strukturen (Zylinder) zu behandeln. Diese Zylinder besitzen eine hohe Leitfähigkeit - im Kontrast zum umgebenden Medium - und zum Teil sehr kleine Querschnittsflächen. In der Literatur findet man dazu unterschiedliche Ansätze.

Man kann sich dem Problem nähern, indem man das Rohr als Zylinder in einem Vollraum (Wait (1952), Kertz (1960)) oder einem Halbraum (D'Yakonov (1959)) modelliert.

Für die RMT betrachtet man als Anregungsquelle die ebene elektromagnetische Welle. Zu dieser Art der Anregung von sehr gut leitenden Zylindern finden sich Arbeiten von Mahmoud et al. (1981), Hill und Wait (1977) und von Parry und Ward (1971). Vereinfachend kann man die Anregung von außen weglassen und das Rohr durch einen oszillierenden Strom in der Tiefe ersetzen, dessen elektromagnetisches Feld (anomaler Anteil) sich an der Erdoberfläche mit dem ebenen Wellenfeld (normaler Anteil) überlagert (Hanstein (1994)).

Watts (1978) zeigt den Effekt von vergrabenen Rohren oder Kabeln auf VLF- oder AFMAG-Messungen. Mit dem in der Arbeit gezeigten Ansatz können neben den magnetischen Komponenten H_x und H_z auch die Impedanz an der Erdoberfläche $|E_x/H_y|$ berechnet werden. Hierzu wird unter Benutzung des Fast-Fourier-Transform-Algorithmus das elektromagnetische Feld eines langen geraden Leiters in konstanter Tiefe in einem geschichteten Halbraum berechnet. Als Anregung dient die TE-Mode einer ebenen Welle; dies entspricht dem Fernfeld eines Radiosenders bei VLF- oder RMT-Messungen. Die ebene Welle (Primärfeld) induziert von außen Ströme in dem vergrabenen Rohr. Diese Ströme wiederum führen zu sekundären EM-Feldern, die in Überlagerung mit dem Primärfeld das lokale EM-Feld ergeben.

Die Berechnungen von Watts zeigen eine gute Übereinstimmung mit experimentellen Daten, die auf einer EM-Skalenmodell-Studie von Frischknecht (1971) basieren. Nähere Angaben zum Modell und zu den Ergebnissen von Watts werden später gemacht.

Wünschenswert wäre es, wenn sich ein zweidimensionaler metallischer Leiter, im folgenden kurz Rohr genannt, in das Startmodell eines 2-D-Modellierungsprogramms einbeziehen ließe. Die Schwierigkeiten liegen hierbei einmal in der kleinen Querschnittsfläche, die eine sehr feine Diskretisierung des Modellgitters verlangt, und zweitens in dem sehr hohen Leitfähigkeitskontrast zwischen Rohr und umgebendem Medium. Zwischen einem $10 \Omega\text{m}$ -Halbraum und einem Kupferkabel liegt ein Sprung im spezifischen Widerstand von gut $10^9 \Omega\text{m}$. Kupfer hat einen spezifischen Widerstand von $1.6 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$, andere Metalle liegen auch in diesem Bereich (Keller (1988)).

Die Auswertung der RMT-Felddaten erfolgt unter anderem mit dem 2-D-MT-Programm d2inv von Mackie et al. (1997). Für dieses Programm wird nachfolgend mit eingehenden Modellstudien untersucht, ob sich das Rohr mit seiner wahren Dimension und Leitfähigkeit in eine Vorwärtsrechnung einbeziehen läßt.

Die 2-D-Modellierung läßt nur eine Lage des Rohrs bezüglich eines Meßprofils zu, nämlich senkrecht dazu. Dies schränkt die Möglichkeiten hinsichtlich der Auswertung von Felddaten ein, denn die Profile orientieren sich nach der Streichrichtung der Untersuchungsobjekte, die im allgemeinen nicht die Rohre sind. Man unterscheidet bei einer zweidimensionalen Leitfähigkeitsstruktur im Untergrund eine TE-Mode (elektrisches Feld parallel zur Streichrichtung).

tung der Struktur) und eine TM-Mode (magnetisches Feld parallel zur Streichrichtung der Struktur). Für das Rohr wird die TE-Mode am interessantesten sein, da hier die induzierten Ströme des Primärfeldes parallel zum Rohr fließen.

2 Modellierung eines Rohrs mit dem d2inv-Programm

Stellvertretend für ein Rohr wird im folgenden ein homogener, unendlich langer gerader Quader, der in einem leitfähigen Halbraum eingebettet ist, mit dem 2-D-MT-Programm d2inv von Mackie *et al.* (1997) modelliert, um dessen Einfluß auf den scheinbaren Widerstand und die Phase bei einer RMT-Messung zu berechnen. Das Ziel ist, die gestörte Meßzone quantitativ zu erfassen.

Das in der Arbeit von Watts (1978) benutzte Modell wird als Grundlage zu einem Vergleich mit den hier vorgestellten Studien mittels Mackies d2inv-Programm herangezogen.

Bei dem 2-D-MT-Programm d2inv wird der leitfähige Halbraum Erde in unendlich (x -Richtung) langgestreckte Quader unterteilt. Der Querschnitt (y - z -Ebene) dieser Quader ist frei wählbar. Ebenso kann man jedem Quader einen beliebigen spezifischen Widerstandswert zuordnen. Diese freie Wahl soll genutzt werden, um ein Rohr in seiner wirklichen Geometrie im Untergrund zu modellieren. Die Abbildung 2 zeigt eine Unterteilung des leitfähigen Halbraumes in langgestreckte Quader unter Einbeziehung eines fein diskretisierten Bereichs, welcher das Rohr repräsentieren soll. Die schwarz hervorgehobenen Quader bilden das Rohr. Ihnen wird ein gemeinsamer spezifischer Widerstand zugeordnet. Das Rohr ist demnach ein Vollkörper und nicht hohl (Luft) oder mit einem anderen Medium (z.B. Flüssigkeit) gefüllt.

Beim Übergang zwischen zwei Medien unterschiedlichen spezifischen Widerstands müssen die Quader kleiner werden. Allgemein kann man sich für die Modellierung an die Richtlinien zu dem 2-D-Finite-Elemente-Programm von Wannamaker *et al.* (1985),(1987) halten. Als Maximalgröße für den Quader direkt am Widerstandssprung soll ein Drittel der Skineindringtiefe

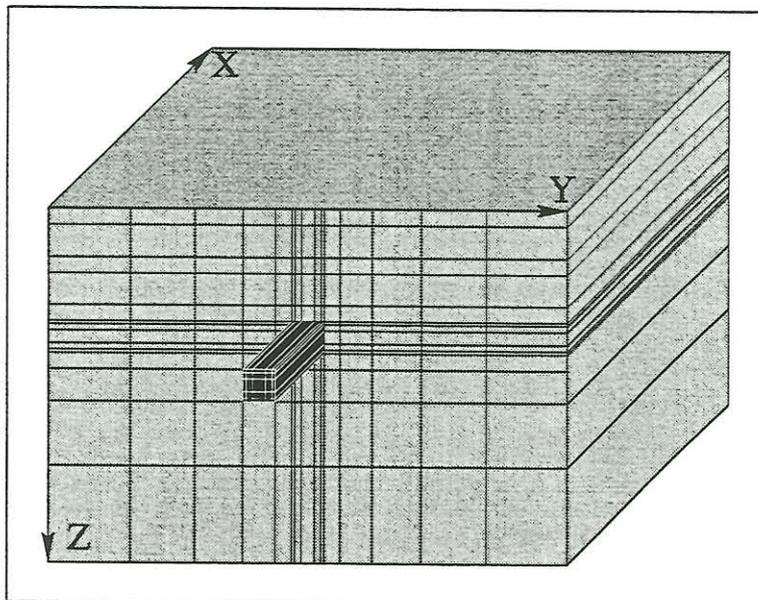


Abbildung 2: Modellgitter zur Simulation des Rohreffektes mit Mackies d2inv-Programm auf die Meßgrößen der RMT. Die Länge der Quader in x -Richtung ist unendlich, die Breite und Höhe (y - und z -Komponente) können variiert werden. Jedem Quader wird mit dem Startmodell ein spezifischer Widerstandswert zugeordnet.

Tabelle 1: Angaben zum Modell nach Watts (1978).

Frequenz	=	20 kHz
Widerstand Halbraum	=	30 Ωm
Widerstand Rohr	=	$1.7 \cdot 10^{-6} \Omega m$
Radius Rohr	=	2.6 cm
Tiefe der Rohrmitte	=	1.95 m
Skintiefe für Halbraum	=	19.5 m

für die kleinste benutzte Frequenz verwendet werden, dies gilt für die horizontale wie vertikale Kantenlänge des Quaders. Für das Rohr bedeutet dies, daß für Frequenzen im RMT-Bereich (10-240 kHz)¹ die äußersten Quader maximal 1 mm² Querschnittsfläche haben sollten. Für die sich weiter ins jeweilige Medium anschließenden Quader soll sich die Breite (y-Richtung) wie die Höhe (z-Richtung) von Element zu Element nicht mehr als um den Faktor 3-4 ändern. Das Rohr setzt sich demnach aus mehreren kleinen Quadern zusammen. Später wird kurz gezeigt, was passiert, wenn man diese Richtlinien außer Acht läßt.

Wie die Abbildung 2 zeigt, liegt das Rohr im Kreuzpunkt der horizontalen wie vertikalen Verfeinerung des Gitters. Da man nur für alle Quader senkrecht untereinander eine Breite und für alle Quader in gleicher Tiefe eine gemeinsame Höhe eingeben kann, zieht sich die feine Diskretisierung durch das umgebende Medium bis zum Gitterrand, obwohl hier die Verfeinerung nicht mehr nötig wäre.

Das 2-D-MT-Programm berechnet für die gewünschten Frequenzen die scheinbaren Widerstände und Phasen an der Erdoberfläche. Als Rechenbeispiel dient das Modell, dessen Parameter in Tabelle 1 aufgelistet sind.

Scheinbare Widerstände und Phasen werden jeweils für vier unterschiedliche Tiefenlagen des Rohrs berechnet. Die unterschiedlichen Tiefen sind relativ zur Skintiefe des Halbraums 5% (0.95m), 10% (1.95m), 25% (4.75m) und 50% (9.75m). Durch die Wahl unterschiedlicher Tiefenlagen eines Rohrs kann man abklären, bis in welche Tiefe ein Rohr an der Oberfläche für eine RMT-Frequenz noch sichtbar ist.

Für die Berechnungen muß ein Modellgitter erstellt werden, wie es schematisch in Abbildung 2 zu sehen ist. Das Rohr baut sich aus kleinen Quadern mit von außen nach innen wachsender Kantenlänge (1 mm, 3 mm, 6 mm, ...) auf. Die gesamte Kantenlänge des modellierten Rohrs beträgt 4.60 cm, damit das quadratische Rohr in der 2-D-Modellierung die gleiche Querschnittsfläche wie das Rohr mit kreisrundem Querschnitt (Radius: 2.60 cm) hat. Den Quadern wird der spezifische Widerstand gemäß Tabelle 1 zugewiesen. Der Querschnitt der Quader in der Umgebung des Rohrs wird mit weiterer Entfernung vom Rohr größer. Das Gesamtmodell erstreckt sich 3-5 Skintiefen für den homogenen Halbraum horizontal und vertikal vom Rohr.

Die Ergebnisse der Vorwärtsrechnung dieses 2-D-Modells sieht man in Abbildung 3. Dargestellt sind die Kurven für Phase und normierten scheinbaren Widerstand als Funktion der auf die Skintiefe normierten Entfernung beiderseits des Rohrs. Das obere Diagramm von Abbildung 3 zeigt die Phase. Das Maximum liegt für alle vier Tiefen jeweils direkt oberhalb des Rohrs und zwar stets über 45°, wie man es auch erwartet, wenn ein guter Leiter unter einer dazu schlecht leitenden Deckschicht liegt. Mit geringerer Tiefenlage des Rohrs wächst das Maximum an und die Flanken der Kurvenspitze werden steiler. Das Rohr in ca. 1 m Tiefe erzeugt eine Phase von über 80°. Der laterale Einfluß des Rohrs ist für alle Tiefenlagen ab ungefähr 1.5 Skintiefen verschwunden.

Das untere Diagramm von Abbildung 3 zeichnet den Verlauf des scheinbaren Widerstands nach, der hier auf den scheinbaren Widerstand des Halbraums (30 Ωm) normiert ist. Das Mi-

¹Der Frequenzbereich der RMT erstreckt sich von 10 kHz bis 2 MHz. Das Kölner Meßgerät ermöglicht aber nur Messungen von Radiosendern, deren Frequenzen zwischen 10-240 kHz liegen.

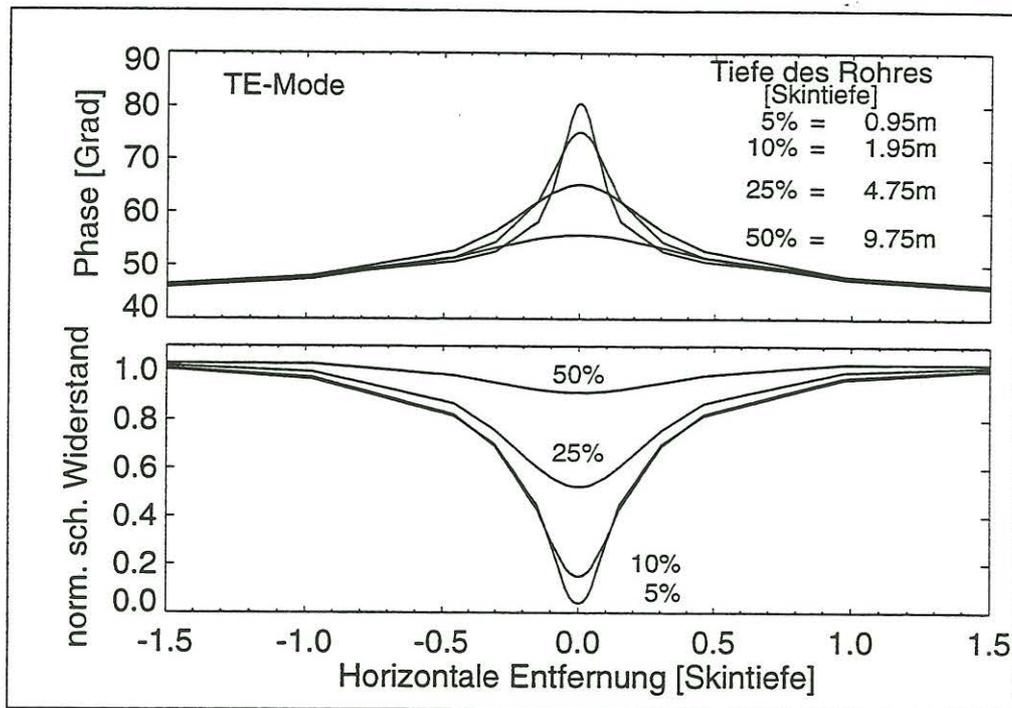


Abbildung 3: Ergebnisse des Modells aus Tabelle 1. Dargestellt sind die Phasen und normierten scheinbaren Widerstände für vier unterschiedliche Tiefenlagen des Rohrs.

nimum der Kurven liegt direkt oberhalb des Rohrs. Mit geringerer Tiefenlage des Rohrs sinkt der scheinbare Widerstand. Das Rohr in ca. 1 m Tiefe verringert den normierten scheinbaren Widerstand im Minimum auf unter 5%; für den $30 \Omega\text{-m}$ -Halbraum entspricht das einem gemessenen scheinbaren Widerstand von kleiner $1.5 \Omega\text{m}$.

Das Modell ist so gewählt, daß es mit den Ergebnissen aus der Arbeit von Watts (1978) verglichen werden kann. Watts hat die Möglichkeit, ein Rohr mit einer kreisrunden Querschnittsfläche zur Modellierung benutzen zu können. Das Rohr ist im hier vorliegenden Modell durch ein Quader mit quantitativ gleicher Querschnittsfläche ersetzt worden (Kantenlänge des Quaders: 4.60 cm). Die Phasenkurven lassen sich direkt vergleichen. Da Watts die normierte Impedanz $|E_x/H_y|_{norm}$ darstellt, muß die Quadratwurzel aus dem normierten scheinbaren Widerstand in Abbildung 3 gezogen werden, um einen Vergleich zu ermöglichen ($\rho_a \sim |E_x/H_y|^2$). Die Daten des hier modellierten 2-D-Falls sind auf die entsprechenden Größen konvertiert und in der Abbildung 4 so skaliert, daß derselbe Ausschnitt gezeigt wird, wie in der Originaldarstellung (Abbildung 5) aus der Arbeit von Watts für die normierte Amplitude der Impedanz und der Phase. Weder im Phasenverlauf noch im Amplitudenverlauf der normierten Oberflächenimpedanz zeigen sich Abweichungen in den Kurven sämtlicher Tiefenlagen des Rohrs. Die Ergebnisse sind so überzeugend, daß die 2-D-Modellierung des Rohrs mit dem d2inv-Algorithmus als zuverlässig angenommen wird.

Ergänzend ist in Abbildung 6 gezeigt, wie sich für eine vorgegebene Geometrie (Rohr in 1.95 m Tiefe) der Effekt des Rohrs bei unterschiedlicher Frequenz im RMT-Bereich (hier: 20 kHz und 200 kHz) ändert. Für steigende Frequenz nimmt die Störung auf den scheinbaren Widerstand und die Phase ab.

Die Angaben, wie sie sich in der Abbildung 3 finden, sind für die TE-Mode berechnet und gezeigt worden. Die TM-Mode ist in der Arbeit von Watts (1978) nicht berücksichtigt worden. Die 2-D-Modellierung erlaubt aber diese Berechnung. Abbildung 7 zeigt die TM-Mode für das Modell der Tabelle 1. Um Unterschiede zwischen den vier Vergrabungstiefen sichtbar zu machen,

Abbildung 4: Darstellung der normierten Impedanz $|E_x/H_y|_{norm}$ und der Phase des 2-D-Modells (entsprechend Abbildung 3) nach Berechnung mit dem d2inv-Programm von Mackie et al. (1997).

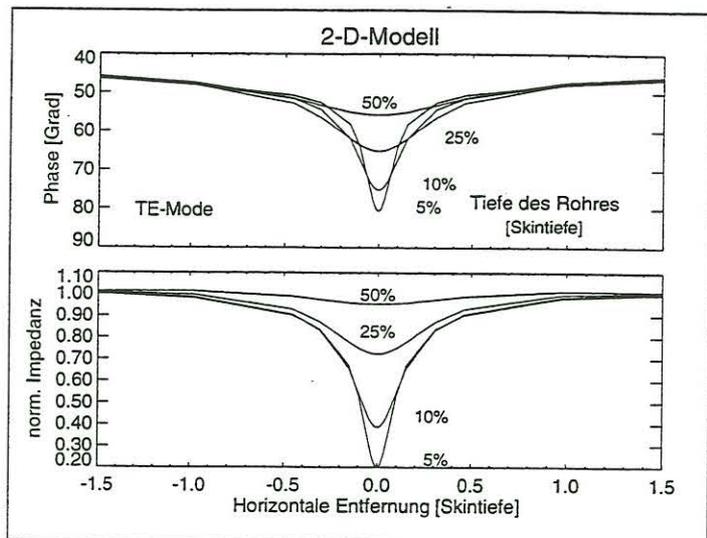
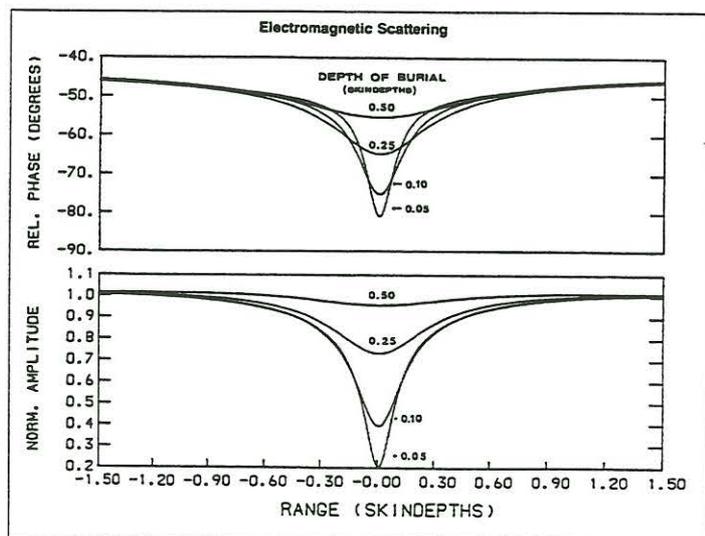


Abbildung 5: Darstellung der normierten Amplitude $(|E_x/H_y| / |E_x/H_y|_{\infty})$ und der Phase nach Watts (1978). Die Phase ist hier negativ angegeben.



sind die Phase wie der normierte scheinbare Widerstand stark vergrößert dargestellt. In der Phase erkennt man keine Differenz zwischen den Kurven für unterschiedliche Tiefen des Rohrs, überhaupt weichen die Kurve nicht von 45° ab, auch nicht unmittelbar über dem Rohr. Die Kurven für den normierten scheinbaren Widerstand der beiden flach vergrabenen Rohre (5% und 10%) zeigen einen Ausschlag, der aber mit 1 bzw. 3 Promille Erniedrigung gegenüber dem scheinbaren Widerstand des ungestörten Halbraums bei einer Feldmessung nicht wahrnehmbar wäre. Die TM-Mode eines quer zum Rohr verlaufenden Profils erfährt also nur eine vernachlässigbare Störung.

Zur Bestimmung der Größe der Quader im und um das Rohr ist nach den Empfehlungen von Wannamaker et al. (1985) für die 2-D-Modellierung vorgegangen worden. Dies führt zu der feinen Diskretisierung des Modells im Bereich des Rohrs. Weicht man von diesen Richtlinien ab und ersetzt die vielen Quader, die das Rohr aufbauen, durch einen einzigen Quader mit der gleichen Querschnittsfläche und unterlässt man die Verfeinerung des Modellgitters im umgebenden Medium (Halbraum) in Rohrnähe, dann erhält man Kurvenverläufe für normierten

Abbildung 6: Darstellung der normierten scheinbaren Widerstands- und Phasenkurven für 20 kHz und 200 kHz. Die horizontale Entfernung ist hier in Metern, nicht in Skintiefen eingeteilt.

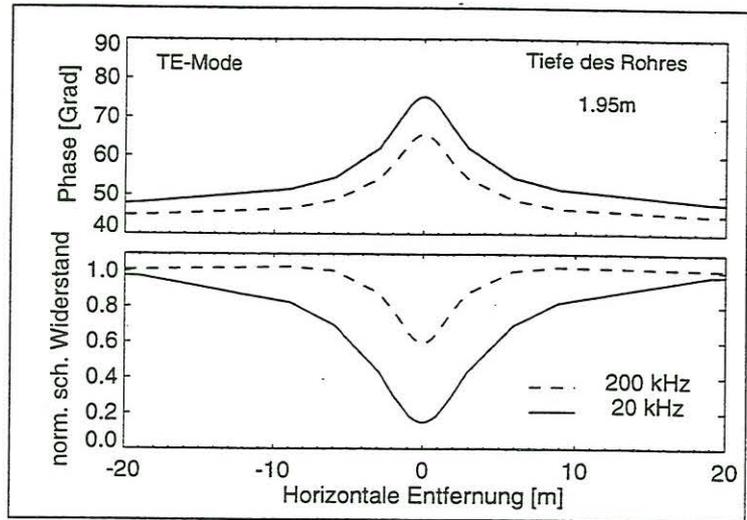
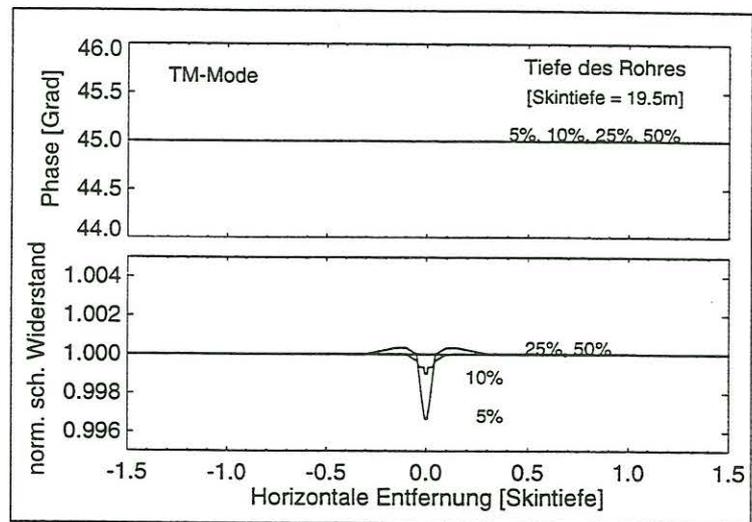


Abbildung 7: Ergebnisse der TM-Mode zum Modell aus Tabelle 1. Dargestellt sind die Phasen und normierten scheinbaren Widerstände für vier unterschiedliche Tiefenlagen des Rohrs in Einheiten der Skintiefe. Entgegen der Abbildung 3 sind die Ordinaten stark vergrößert dargestellt.

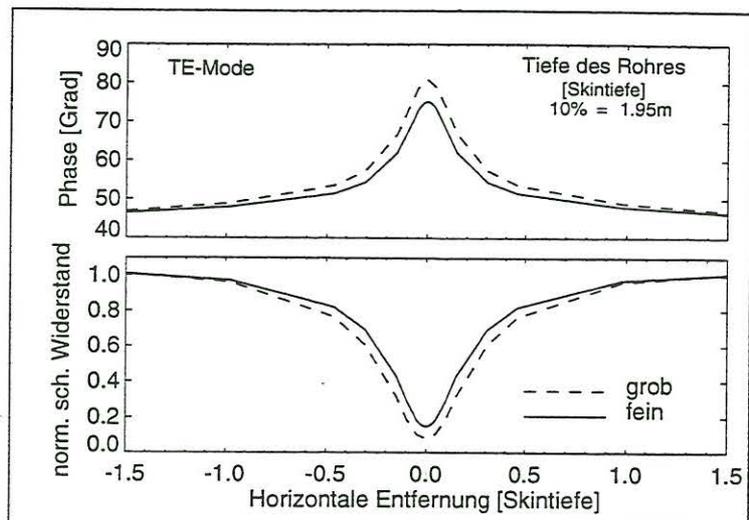


scheinbaren Widerstand und Phase, die von denjenigen für das feine Modellgitter abweichen. Als Beispiel ist das Modell nach Tabelle 1 mit dem Rohr in einer Tiefe von 1.95 m auf einem größeren Modellgitter berechnet worden. Dabei ist das Rohr selbst durch einen einzigen Quader mit der Kantenlänge 4.6 cm modelliert worden und auch die Gitterzellen in der Umgebung zum Rohr sind nicht so fein, wie in dem bereits geschilderten Modellgitter. Die Abbildung 8 zeigt den Unterschied in beiden Kurven. Dabei entspricht die durchgezogene Linie der 10%-Kurve in der Abbildung 3. Die Abweichung beträgt im Punkt 0.0, also direkt oberhalb des Rohrs, beim normierten scheinbaren Widerstand mehr als 6% und in der Phase mehr als 5°. Die Querschnittsfläche der Quader im Modell muß sich also an den benutzten Frequenzen und spezifischen Widerständen orientieren. Dabei ist im Bereich von Sprüngen im spezifischen Widerstand, besonders bei einem hohen Kontrast, auf eine genügende Verfeinerung des Gitters zu achten.

3 Zusammenfassung

Für die Radiomagnetotellurik ergibt sich ein Problem bei Messungen in der Nähe von metallischen Leitern. Der Effekt von vergrabenen, unendlich langen Rohren auf die RMT-Daten ist an ausgewählten Beispielen berechnet worden. Es zeigt sich, daß für den Frequenzbereich

Abbildung 8: Vergleich zwischen grobem Gitter und feinem Gitter für die Vorwärtsrechnung des 2-D-Modells



der RMT die Störung der Meßwerte bis in einer Entfernung von einer Skintiefe (bezogen auf das umgebende Medium) bemerkbar ist, wenn das Anregungsfeld des Senders die TE-Mode bezüglich des Rohrs darstellt. Der Bereich von einer Skintiefe entspricht aber gerade der Erkundungstiefe an einer RMT-Station. Desweiteren wird die Störung auch von der Tiefe des vergrabenen Rohrs beeinflusst. Liegt das Rohr mehr als eine halbe Skintiefe vergraben, so kann man die Störung mehr oder weniger vernachlässigen. Da diese Angaben in Einheiten der Skintiefe sind, folgt für ein hochohmiges Gebiet eine deutlich breitere Störungszone, im Gegensatz zu einem niederohmigen Meßgebiet.

Die TM-Mode wird nur äußerst schwach durch das vergrabene Rohr gestört. Diese Mode sollte sich also am besten eignen, auch in unmittelbarer Nähe des Rohrs Objekte im Untergrund auflösen zu können. Für die TM-Mode ist die Richtung zum Radiosender genau senkrecht zum Rohrverlauf. In den Modellstudien sind diese 90° auch exakt eingehalten, doch bei einer Feldmessung wird es nicht so einfach werden, einen Sender bzw. mehrere im Bereich zwischen 10-240 kHz zu finden, die genau senkrecht zum Rohrverlauf senden. Bereits ein Abweichen von einigen Grad führt dazu, daß ein in Rohrrichtung induzierter Strom im Boden fließt, der sich dann auf den fast perfekten Leiter konzentriert.

Abschließend kann man sich folgende Punkte für eine Feldmessung mit RMT merken:

- Ist bekannt, wo und in welcher Tiefe ein langes gerades Rohr vergraben ist, und hat man eine ungestörte Widerstandsmessung (fernab des Rohrs), so kann mit der Skintiefe beiderseits des Rohrs für eine Untersuchungsfrequenz eine Zone abgeschätzt werden, in der die Meßgrößen durch das Rohr noch beeinflusst werden.
- Ist das Untersuchungsobjekt das Rohr selbst, so kann mit den Anomalien der unterschiedlichen Frequenzen die horizontale und unter Umständen auch die vertikale Lage des Rohrs bestimmt werden. Dies gelingt um so besser, wenn genau die TE-Mode gemessen wird, d.h., man benutzt Radiosender genau in Richtung des Rohrverlaufs.

Das 2-D-Finite-Elemente-Programm PW2D von Wannamaker *et al.* (1985) liefert übereinstimmende Ergebnisse mit den hier gezeigten Kurven. Das 2-D-MT-Programm d2inv von Mackie *et al.* (1997) ermöglicht in einem nächsten Schritt die Inversion von RMT-Felddaten, die über oder in unmittelbarer Nähe zu einem vergrabenen Rohr gemessen wurden (Recher (1998)).

Literatur

- D'Yakonov, B. P., The diffraction of electromagnetic waves by a circular cylinder in a homogenous half-space, *Acad. Sci. U.S.S.R Geophys. Ser.*, 9, 950–955, 1959.
- Frischknecht, F. C., Electromagnetic scale modeling, in *Electromagnetic probing in geophysics*, herausgegeben von J. R. Wait, 265–320, Golem Press, Boulder, 1971.
- Hanstein, T., Effekte von Gasleitungen auf MT und VLF-R Sondierungen, in *Protokoll über das 15. Kolloquium Elektromagnetische Tiefenforschung*, herausgegeben von K. Bahr und A. Junge, 128–131, Dt. Geophys. Gesellschaft, 1994.
- Hill, D. und J. Wait, Coupling between a dipole antenna and an infinite cable over an ideal ground plane, *Radio Science*, 12, (2), 231–238, 1977.
- Keller, G. V., Rock and mineral properties, in *Electromagnetic methods in applied geophysics*, herausgegeben von M. N. Nabighian, Bd. 1, chapter 2, 13–51, Society of Exploration Geophysicists, 1988.
- Kertz, W., Leitungsfähiger Zylinder in transversalem magnetischen Wechselfeld, *Gerlands Beitr. zur Geophysik*, 69, 4–28, 1960.
- Mackie, R., S. Rieven und W. Rodi, *Users Manual and Software Documentation for Two-Dimensional Inversion of Magnetotelluric data*, Massachusetts Institut of Technology, Earth Resources Laboratory, Cambridge, Massachusetts 02139, Juli 1997.
- Mahmoud, S., S. Ali und J. Wait, Electromagnetic scattering from a buried cylindrical inhomogeneity inside a lossy earth, *Radio Science*, 16, (6), 1285–1298, 1981.
- Parry, J. und S. Ward, Electromagnetic scattering from cylinders of arbitrary cross-section in a conductive half-space, *Geophysics*, 36, (1), 67–100, 1971.
- Recher, S., Untersuchung der Anwendbarkeit der Radiomagnetotellurik-Methode auf die Lokalisierung von kontaminiertem Boden, Diplomarbeit, Institut für Geophysik und Meteorologie, Universität zu Köln, 1998.
- Wait, J. R., The cylindrical ore body in the presence of a cable carrying an oscillating current, *Geophysics*, 17, 378–386, 1952.
- Wannamaker, P. E., J. A. Stodt und L. Rijo, *PW2D — Finite Element Program for solution of Magnetotelluric Responses of two-dimensional earth Resistivity structure — Program documentation*, University of Utah Research Institute Report, Revised Edition June, 1987, ESL-158 Auflage, 1985.
- Wannamaker, P. E., J. A. Stodt und L. Rijo, A stable finite element solution for two-dimensional magnetotelluric models, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 88, 277–296, 1987.
- Watts, R. D., Electromagnetic scattering from buried wires, *Geophysics*, 43, (4), 767–781, 1978.