

Matthias Müller

TEM mit kleinen Sende- und Empfangsspulen zur Detektion von UXO

Diplomarbeit

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek: Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de/> abrufbar.

Dieses Werk sowie alle darin enthaltenen einzelnen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsschutz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlanges. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen, Auswertungen durch Datenbanken und für die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronische Systeme. Alle Rechte, auch die des auszugsweisen Nachdrucks, der fotomechanischen Wiedergabe (einschließlich Mikrokopie) sowie der Auswertung durch Datenbanken oder ähnliche Einrichtungen, vorbehalten.

Copyright © 2005 Diplomica Verlag GmbH
ISBN: 9783956360831

Matthias Müller

**TEM mit kleinen Sende- und Empfangsspulen zur
Detektion von UXO**

Matthias Müller

TEM mit kleinen Sende- und Empfangsspulen zur Detektion von UXO

Diplomarbeit
Universität zu Köln
Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät
Institut für Geophysik und Meteorologie
März 2005



Diplomica GmbH _____
Hermannstal 119k _____
22119 Hamburg _____

Fon: 040 / 655 99 20 _____
Fax: 040 / 655 99 222 _____

agentur@diplom.de _____
www.diplom.de _____

Matthias Müller

TEM mit kleinen Sende- und Empfangsspulen zur Detektion von UXO

ISBN-13: 978-3-8366-0009-5

Druck Diplomica® GmbH, Hamburg, 2007

Zugl. Universität zu Köln, Köln, Deutschland, Diplomarbeit, 2005

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Die Informationen in diesem Werk wurden mit Sorgfalt erarbeitet. Dennoch können Fehler nicht vollständig ausgeschlossen werden, und die Diplomarbeiten Agentur, die Autoren oder Übersetzer übernehmen keine juristische Verantwortung oder irgendeine Haftung für evtl. verbliebene fehlerhafte Angaben und deren Folgen.

© Diplomica GmbH

<http://www.diplom.de>, Hamburg 2007

Printed in Germany

Autorenprofil



Matthias Müller, Diplom Geophysiker
Abelshofweg 18
47807 Krefeld
+49 2151 32711-84
E-Mail: Matthias.Mueller@MMWeb.eu
Web-Site: www.MMWeb.eu
* 07.05.1973, Bad Kreuznach
verheiratet

BERUFLICHE ZIELE

Übernahme von verantwortungsvollen interessanten und praxisnahen Aufgaben, gerne auch über naturwissenschaftliche Fragestellungen hinaus.

BERUFLICHE ERFAHRUNGEN

seit 12.2004

Consultant, Freiberufler
Schwerpunkte: Modellierung, geophysikalische Dienstleistungen, Softwareentwicklung

WEITERBILDUNG

Seit 02.2006

Aufbaustudium Master of Arts (M.A.), AKAD - Fachhochschule Leipzig (Fernstudium), bis 02.2008

05.2004

3-tägige Fortbildung zum Thema „Reservoir Characterization with Borehole Geophysics“, Dr. K.M. Strack (KMS Technologies)

10.2000 - 02.2001

Programmierkurs C++, Universität zu Köln, Institut für Informatik

BESONDERE KENNTNISSE

SPRACHEN

Englisch
Französisch

Wort: fließend; Schrift: fließend
Wort: gut; Schrift: gut

EDV

Betriebssysteme
Anwendung
Programmiersprachen
Sonstiges

Windows: umfassende Kenntnisse; Linux: Grundkenntnisse
Office-Anwendungen, TeX, Corel Draw, Internet, e-Mail
Visual Basic, C++, Turbo Pascal, Java, Html
PC-Hardware-Kenntnisse; Netzwerk: Grundkenntnisse

Zusammenfassung

Diese Arbeit befasst sich mit Transientenelektromagnetik (TEM) unter Verwendung kleiner Sende- und Empfangsspulen. Übergeordnetes Ziel ist dabei die Entwicklung einer kompakten und mobilen Sende- / Empfangsspuleneinheit zur Detektion von UXO (UneXploded Ordnance).

Als UXO (UneXploded Ordnance) bezeichnet man explosive Munition, die aufgrund einer Fehlfunktion nicht explodiert ist. Wegen des hohen Metallanteils dieser Objekte eignen sich EM-Methoden im Allgemeinen und die TEM-Methode im Besonderen zur Auffindung und Charakterisierung von UXO. Dabei wird durch An- und Abschalten eines Sendestromes in einer quadratischen Spule mit 1m Seitenlänge ein Strom im leitenden Untergrund und speziell in sehr gut leitenden Körpern induziert. Dieser Strom klingt mit der Zeit ab und erzeugt dadurch ein Sekundärfeld.

Typischerweise wird zur Metaldetektion nur der vertikale Anteil dieses Feldes mit einer Induktionsspule vermessen. Um mehr Informationen über die Form und Lage des Störkörpers zu erhalten, werden bei diesem Ansatz auch die beiden horizontalen Magnetfeldanteile mit Induktionsspulen aufgezeichnet. Durch die zusätzlichen \dot{H}_x - und \dot{H}_y -Komponenten erhält man eine bessere räumliche Abgrenzung des Metallkörpers und kann Rückschlüsse auf die Form des Körpers ziehen.

Der erste Versuch mit einer selbstkonstruierten Spulenanordnung führte hier zu technischen Problemen, verursacht durch den geringen Abstand zwischen Sende- und Empfangsspule und die große Induktivität der verwendeten Sendespule. Durch das daraus resultierende, zu große Primärfeld wurden die Eingangsverstärker des Messgerätes übersteuert und zeigten als Folge davon nichtlineares Verhalten zu späten Zeiten des Signals. Im Bezug auf eine Verwendung zur oberflächennahen Bodenerkundung stellt die Verwendung einer größeren Sendespule eine mögliche Lösung dar.

Zur Detektion von UXO auf großflächigen Zielgebieten ist eine kompakte, mobile Apparatur unerlässlich und daher die Lösung in einer Begrenzung der Signalstärke vor dem Eingang der Messapparatur zu suchen.

Dazu wurden, zunächst nur für die vertikale Komponente, zwei Ansätze untersucht. Eine identische, aber entgegengesetzt gepolte zusätzliche Empfangsspule koaxial in 50cm Höhe über der ersten zur Aufzeichnung des Feldgradienten lieferte keine zufrieden stellenden Ergebnisse. Die Konstruktion einer neuen, differentiellen Empfangsspule nach Vorbild eines Minendetektors lieferte dagegen gute Ergebnisse. Dabei werden zwei identische rechteckige Teilspulen so zu einer quadratischen Gesamtpule kombiniert, dass sich über homogenem Untergrund die betraglich gleichen aber gegenpoligen Signale der beiden Teilspulen zu null addieren.

Da sich das technische Problem im Fall der beiden horizontalen Komponenten aufgrund geringer Signalstärke auch ohne Einsatz einer differentiellen Spule lösen lässt, bietet sich als optimale Messkonfiguration eine Kombination aus differentiellem \dot{H}_z und normalen \dot{H}_x und \dot{H}_y an.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Gliederung	3
2	Theorie	5
2.1	Allgemeine EM - Theorie	6
2.1.1	Maxwellgleichungen	6
2.1.2	Telegraphengleichungen	9
2.1.3	Helmholtzgleichungen	9
2.1.4	Quasi-Statische Approximation	9
2.2	Gesetz von Biot - Savart	10
2.3	Elektromagnetische Schwingungen in TEM - Sendespulen	11
2.3.1	Strom- und Spannungsverlauf beim Aus- / Einschalten des Senders	14
2.4	Transient-Elektromagnetik (TEM)	15
2.4.1	Central - Loop - TEM	16
2.4.2	Homogener Halbraum	16
2.4.3	Das Magnetfeld einer Kugel	19
2.4.4	Maximale Erkundungstiefe	19
2.4.5	Die Horizontalkomponenten des Sekundärfeldes	19
2.5	Elektrische Leitfähigkeitsmechanismen	21
2.6	IP - Effekte	22
2.6.1	IP - Effekte bei TEM - Messungen	24
3	Messkonfiguration und Konstruktion der benötigten Spulen	27
3.1	Die NanoTEM - Apparatur	28
3.1.1	Sender NT-20	28
3.1.2	Empfänger GDP-32 ^{II}	28
3.2	Induktionsspulenanordnung	31

3.2.1	Sendespule	31
3.2.2	Drei Komponenten - Empfangsspulenordnung	32
3.3	Mobilität der Induktionsspulenordnung	33
4	Drei - Komponenten - Anordnung - Messungen und Ergebnisse	37
4.1	Vorbemerkungen	37
4.2	Messung mit 3K- Empfangsspulen	39
4.2.1	Erste Interpretation des vertikalen Magnetfeldes	41
4.2.2	Erste Interpretation des horizontalen Magnetfeldes	43
4.2.3	Signalstärke der Horizontalkomponenten	47
4.3	Erklärungsversuche zur Form des Transienten	48
4.3.1	Geologische Ursachen	48
4.3.2	IP - Effekte	50
4.3.3	Verschiedene Sendespulen	52
4.3.4	Vergleich mit Vorwärtsrechnung	53
4.4	Technische Erklärungen	55
4.4.1	Übersprechen der Signale in Empfangsspulen, Kabeln und Empfänger GDP-32 ^{II}	55
4.4.2	Dämpfung der Spulen und Abschaltzeit des Sendestroms (Tx - Delay)	59
4.4.3	Eigenschaften der Verstärker	63
4.4.4	Magnetfeldberechnung	66
5	Konstruktion neuer Empfangsspulen - Testmessungen und Ergebnisse	69
5.1	Neue Empfangsspulen	70
5.1.1	Differentielle Empfangsspule	70
5.1.2	Zusätzliche \dot{H}_z - Spule zur Gradientenmessung	73
5.2	Gradientenmessung	74
5.3	Differentielle Empfangsspule	77
5.3.1	Messergebnisse mit zusätzlichem Tiefpassfilter	77
5.3.2	Messergebnisse ohne zusätzliche Filter	79
5.3.3	Horizontalfeldmessung mit differentieller Spule	84
5.3.4	Vergleich mit Modellrechnung	86
6	Fazit, Diskussion und Ausblick	91
6.1	Detektion von UXO mit 3D - TEM	91
6.2	TEM mit kleinen Sende - / Empfangsspulen	92

6.3 Ausblick	92
Literaturverzeichnis	95
A Metallische Störkörper	99
A.1 Kugel	99
A.2 Patronenhülse	100
B Darstellung der Messdaten	101
B.1 Transientenplots	101
B.2 Vektorplots	101
C Widerstandsbestimmung an Bodenproben	103
C.1 Messverfahren	103
C.2 Ergebnisse	104
C.2.1 Sandprobe	105
C.2.2 Bodenprobe	106
D Elektronik	107
D.1 Passives Tiefpassfilter 1. Ordnung	107
D.2 Resonanzfrequenz einer Spule	108
E Modellrechnung	110
E.1 IP - Effekte bei TEM - Messungen	110
E.2 Kreisspule über homogenem Halbraum	110
E.3 Kugel im Lufthalbraum	110
Danksagung	113
Versicherung	115

Abbildungsverzeichnis

1.1	Typische Beispiele für UXO	2
2.1	Stromkreis analogie zu einem EM - System (nach <i>Telford et al.</i> [1990]) .	5
2.2	Veranschaulichung von Faradayschem und Ampereschem Gesetz . .	7
2.3	Skizze zur Berechnung des Magnetfeldes eines ringförmigen Stromweges	10
2.4	Vereinfachtes äquivalentes Schaltbild eines TEM - Senders mit Sendespule. (<i>Helwig und Kozhevnikov</i> [2003])	12
2.5	Auswirkung verschiedener Dämpfungswiderstände	13
2.6	Ausbreitung elektromagnetischer Felder eines vertikalen magnetischen Dipols in einem leitfähigen Halbraum (<i>Nabighian und Macnae</i> [1991])	15
2.7	Der „Overvoltage“ - Effekt (<i>Reynolds</i> [1997])	22
2.8	Elektroden- und Membranpolarisation (<i>Reynolds</i> [1997])	23
2.9	Schematisches Diagramm der Ionenbewegung unter einer TEM - Sendespule (<i>Flis et al.</i> [1989])	25
3.1	Das NT-20 Sendesignal mit 50% Dutycycle (<i>Gaidetzka</i> [2002]).	29
3.2	Entwurfszeichnung der Sendespule	31
3.3	Entwurfszeichnung der 3K - Empfangsspulen	33
3.4	Linke Seite: Foto der Spulenanordnung, die <i>Carlson und Zonge</i> [2002] in ihrer Arbeit verwenden. Rechte Seite: Foto der Spulenanordnung, die in dieser Arbeit verwendet wurde.	34
4.1	Oszilloskopaufzeichnung des Abschaltvorgangs des Sendestroms . .	38
4.2	Schematische Darstellung des Testaufbaus und der Konvention der Magnetfeldrichtungen. Die Koordinaten des Testfeldes sind so gewählt, dass sie der Konvention der horizontalen Magnetfeldrichtungen entsprechen.	40
4.3	Links: Vergleich zwischen berechnetem und gemessenem Transienten. Rechts: Vergleich zwischen an 3 versch. Punkten gemessenen \dot{H}_z - Transienten. (Alle Transienten sind ohne selbst vergrabene Störkörper gemessen)	40

4.4	Betrachtung verschiedener Zeitfenster im Verlauf der Transienten. (Alle Transienten sind ohne selbst vergrabene Störkörper gemessen)	42
4.5	Feldstärke des Vertikalfeldes zum Zeitpunkt Nr. 28. Links: ohne selbst vergrabenes Metall. Rechts: mit vergrabener Eisenkugel	43
4.6	Transienten des Horizontalfeldes an verschiedenen Messpunkten (x, y) (mit $x \in \{2, 3, 4\}, y \in \{2, 3, 4, 5, 6\}$). Obere Reihe u. mittlere Reihe links: \dot{H}_x . Mittlere Reihe rechts und untere Reihe: \dot{H}_y . (Alle Transienten sind ohne selbst vergrabene Störkörper gemessen)	44
4.7	Darstellung der horizontalen Magnetfeldanteile als Vektoren. Zeitfenster 2 (1, 773 μs nach Tx AUS)	45
4.8	Darstellung der horizontalen Magnetfeldanteile als Vektoren. Zeitfenster 4 (4, 182 μs nach Tx AUS)	46
4.9	Transienten des Vertikalfeldes an Messpunkten unter verschiedenen Bedingungen bzw. zum Teil über verschiedenen Untergründen. (Eingestellte Abschaltverzögerung (Tx-Delay): A - D: 1, 2 μs , E - F: 2 μs) .	49
4.10	Links: Vergleich zwischen einem berechneten, von IP-Effekten beeinflussten und einem gemessenen Transienten. Rechts: Gemessener Transient aus einer Fallstudie bei Bisbee, Arizona, über sulfidhaltigem Untergrund (<i>El-Kaliouby und El-Diwany</i> [2004]).	50
4.11	Links: Zeitpunkt der NR (Negative Response) in Abhängigkeit von der Zeitkonstante τ . Rechts: Amplitude der NR in Abhängigkeit vom Radius der Sende-/Empfangsspule (coincident-loop). (Abbildungen aus <i>El-Kaliouby et al.</i> [1997])	51
4.12	Vergleich von Transienten des Vertikalfeldes, erzeugt mit vier verschiedenen Sendespulen: A: $1 \times 1m^2$, 4 Windungen, B: $1 \times 1m^2$, 1 Windung, C: $2 \times 2m^2$ und D: $5 \times 5m^2$	53
4.13	Vergleich zwischen Messung und Vorwärtsrechnung für 2 verschiedene Sendespulen: Linke Seite: $2 \times 2m^2$ und rechte Seite: $5 \times 5m^2$. . .	54
4.14	Übersprechen zwischen den NanoTEM - Karten im GDP-32 ^{II}	56
4.15	Übersprechen zwischen den Leitungen des Signalkabels von den Empfangsspulen zum GDP-32 ^{II}	57
4.16	Übersprechen zwischen den Verbindungskabeln Rx→GDP-32 ^{II} und Tx→NT-20. Auswirkung des Kabelverlaufs auf die gemessenen \dot{H}_z (links) und \dot{H}_x (rechts).	57
4.17	Übersprechen zwischen den drei Empfangsspulen. Mit Oszilloskop aufgezeichneter Spannungsverlauf. (Rote Kurve: In \dot{H}_z angeregtes Signal. Schwarze Kurve: Signal in \dot{H}_y .)	58
4.18	Linke Seite: Grafische Bestimmung der Abschaltzeit des Sendestroms. Rechte Seite: Detailaufzeichnung des Spannungsverlaufs in der Sendespule beim Abschalten des Sendestroms.	60
4.19	Berechnete Abschaltkurve des Sendestroms	61
4.20	Testmessung mit der Drei - Komponenten - Empfangsspule mit einem Tx - Delay von 6 μs . Dargestellt ist jeweils die \dot{H}_z - Komponente.	62