

Ute Weckmann

**Entwicklung eines Verfahrens
zur Abbildung
krustaler Leitfähigkeitsstrukturen
anhand von
Magnetotellurikdaten aus Namibia**

Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades
im Fachbereich Geowissenschaften
an der
Freien Universität Berlin

Erster Gutachter: Prof. Dr. Volker Haak
Zweiter Gutachter: Prof. Dr. Serge A. Shapiro

Datum der Prüfung: 01.02.2002

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung und Motivation	1
2	Zum Verständnis komplizierter Leitfähigkeitsverteilungen	5
2.1	Elektromagnetische Tiefensondierung	5
2.2	Eigenschaften des Impedanztensors	8
2.2.1	Homogener und geschichteter Halbraum	9
2.2.2	2D-Leitfähigkeitsverteilung	9
2.2.3	3D-Leitfähigkeitsverteilung	12
3	Geologische Einordnung des Messgebiets	14
3.1	Die Damara Orogenese	15
3.2	Die Öffnung des Südatlantik	17
3.3	Leitfähigkeitsverteilungen im Süden Afrikas	17
4	3D Effekte in den Daten aus Namibia	20
4.1	Datengewinnung	20
4.2	Processing der MT Daten	23
4.3	Besonderheiten der Übertragungsfunktionen aus Namibia	25
4.4	Dimensionalitätsuntersuchung des Messgebiets	30
4.5	Rotationswinkel und Tensordekomposition	32
4.6	Die magnetischen Übertragungsfunktionen	34
4.7	Vergleich der Namibia Daten mit bekannten Datensätzen	37
5	Abbildungsmethoden	40
5.1	EGGERS' Eigenstate Analysis	42
5.2	LA TORRACA Singular Value Decomposition	44
5.3	Propagation Number Analysis (PNA)	46
5.3.1	Einfluß von verzerrenden, oberflächennahen Strukturen auf die <i>PNA</i>	52
5.3.2	Einfluß von fehlerbehafteten Impedanzen auf die <i>PNA</i>	52
5.4	Vergleich der Abbildungsmethoden	54
5.5	Verwendung von Invarianten	57

6	Anwendung der Abbildungsmethoden	58
6.1	Die Abbildung eines 2D Untergrundes durch Ellipsen	58
6.2	Anwendung der Darstellungsmethoden auf die Daten aus Namibia . .	64
6.3	Diskussion	73
7	Modellierung der 3D Effekte	75
7.1	Die Ringstruktur im Norden des Messgebiets	76
7.2	Modellierung der 3D Effekte im zentralen Bereich	88
7.3	Die Leitfähigkeitsverteilung südlich der WF/OL	94
7.4	Diskussion	96
8	Zusammenfassung	99
9	Summary	103
A	Anhang	107
A.1	Hat ρ_a Tensoreigenschaften?	107
A.2	Ist γ ein Tensor?	108
A.3	Gesteine sedimentären Ursprungs	110
A.4	Aufspaltung einer Leitfähigkeitsverteilung durch die <i>PNA</i>	111
A.5	Übertragungsfunktionen	114

Abbildungsverzeichnis

3.1	Pan-Afrikanische Strukturen auf dem afrikanischen und südamerikanischen Kontinent (aus Porada [1979]).	14
3.2	Darstellung der tektono-stratigraphischen Zonen des Damara Gürtels	15
3.3	Magmatische Gangschwärme und der Hochleitfähigkeitsgürtel im Damara Belt	16
3.4	Auf einer vereinfachten Karte der Oberflächengeologie sind die Stationen aus den ORYX-Messungen 1999 dargestellt.	18
4.1	Stationskarte der MT Messungen von 1998 und 1999	21
4.2	Stationskarte der ORYX-Messkampagne	22
4.3	Aufbau einer 5-Komponenten-MT-Station	23
4.4	Beispiel elektromagnetischer Zeitreihen von 5 synchronisierten Stationen	25
4.5	Nebendiagonalelemente dreier Stationen des Datensatzes	26
4.6	Hauptdiagonalelemente dreier Stationen des Hauptprofils	27
4.7	Pseudosektion (xy-Komponente) des Hauptprofils	28
4.8	Pseudosektion (yx-Komponente) des Hauptprofils	29
4.9	Darstellung der Skewwerte aller Stationen des Hauptprofils	30
4.10	Univariate Kohärenzen der Stationen 063, 085 und 094	31
4.11	Rotationswinkel nach BÄHR und SWIFT des Hauptprofils	33
4.12	<i>Multisite-multifrequency decomposition</i> für das Hauptprofil	33
4.13	Induktionspfeile für die Frequenzen $128Hz$, $1Hz$ und $0.002Hz$	35
4.14	Zusammenfassende Darstellung der leitfähigen Strukturen abgeleitet aus den Induktionspfeilen	37
5.1	Skizze der Ellipsen nach der <i>PNA</i>	50
5.2	Verzerrung der Ellipse nach der <i>PNA</i>	53
5.3	Darstellung der „Fehlerbalken“ für die Ellipsen nach der <i>PNA</i>	53
5.4	Vergleich LATORRACA- und EGGERS-Ellipsen anhand eines synthetischen Impedanztensors	55
5.5	Ellipse nach der <i>PNA</i> für synthetischen Impedanztensor	56
6.1	2D-Modell	59
6.2	EGGERS' <i>Eigenstate</i> Ellipsen über einer 2D Leitfähigkeitsverteilung .	60

6.3	LATORRACA SVD Ellipsen über einer 2D Leitfähigkeitsverteilung . . .	61
6.4	Widerstandsellipsen über einer 2D Leitfähigkeitsverteilung	62
6.5	Anwendung der EGGERS Eigenwert-Analyse auf den Namibia Datensatz	65
6.6	Anwendung der LATORRACA SVD auf den Namibia Datensatz	66
6.7	Anwendung der PNA auf den Namibia Datensatz	67
6.8	Widerstandsellipsen der Namibia Daten für $90.5Hz$ und $90.5s$	69
6.9	Tiefenzuordnung der Widerstandsellipsen des Hauptprofils	70
6.10	Darstellung der Widerstandsellipsen für $90.5Hz$, $5.6Hz$ und $0.011Hz$ mit ihren „Fehlerbalken“	71
6.11	Pseudosektion der LaTorraca Skew	72
7.1	3D-Modell eines gut leitenden Rings in einem schlecht leitenden Halb- raum	76
7.2	Modellphasen über 90° für lange Perioden aufgrund eines gut leiten- den Rings	77
7.3	ρ_a - und Phasenkurven für das Modell des leitfähigen Rings	78
7.4	Widerstandsellipsen für das Ring-Modell	79
7.5	LATORRACA Ellipsen für das Ring-Modell	80
7.6	LATORRACA Skew für Station 2 über dem leitenden Ring	81
7.7	EGGERS Ellipsen für das Ring-Modell	82
7.8	3D-Modell einer leitfähigen Schachtel im schlecht leitenden Halbraum	83
7.9	Modellphasen für $0.01Hz$ für einen gut leitenden Ring mit Boden . .	84
7.10	Widerstandsellipsen für $10Hz$ und $21.7s$ über der gut leitenden Schach- tel	85
7.11	3D-Modell eines gut leitenden Kastens im schlecht leitenden Halbraum	86
7.12	Modellphasen für $0.01Hz$ für einen gut leitenden Block	87
7.13	Widerstandsellipsen für $10Hz$ über einem gut leitenden Block	87
7.14	Anisotropes 2D-Modell	88
7.15	Übertragungsfunktionen von Station D über dem anisotropen Block .	89
7.16	Widerstandsellipsen für das anisotrope 2D-Modell	91
7.17	Induktionspfeile von drei Stationen über dem anisotropen Modell . .	92
7.18	Flächenhafte Darstellung der Realpfeile für $500s$	93
7.19	2D-Inversionsmodell des Bereichs südlich der WF/OL	95
7.20	2D-Inversionsmodell der gesamten Traverse	96
7.21	Zusammenstellung der leitfähigen Strukturen des Messgebiets	98
A.1	Überprüfung der Tensoreigenschaften	109
A.2	Leitfähigkeitstensor im geographischen Koordinatensystem	111

Tabellenverzeichnis

1	Verwendete Variablen	vi
2.1	Betrag und Winkel des Induktionspfeils nach WIESE	8
A.1	Stratigraphische Abfolge der Gesteine sedimentären Ursprungs	110

Nomenklatur

Physikalische Einheiten sind im SI-System angegeben.

Zeitabhängige Größen sind mit Kleinbuchstaben $x(t)$ bezeichnet, die FOURIER-Transformierte mit Großbuchstaben $X(\omega)$.

Sei $z = Re(z) + iIm(z)$, dann bedeutet z^* die konjugiert komplexe Zahl:
 $z^* = Re(z) - iIm(z)$, mit i als der imaginären Einheit.

Um Vektoren, Matrizen und Tensoren voneinander zu unterscheiden, sind Vektoren fett dargestellt (\mathbf{A}), Matrizen mit einem Dach versehen (\hat{B}) und Tensoren doppelt unterstrichen ($\underline{\underline{C}}$).

\hat{A}^T stellt die transponierte Matrix $\hat{A}_{ij}^T = \hat{A}_{ji}$ dar.

In der hier vorliegenden Arbeit werden die Bezeichnungen „Frequenzbereich“ und „Periodenbereich“ als Synonyme verwendet: Um Frequenzangaben mit unübersichtliche Dezimalzahlen < 1 zu vermeiden, bezeichne ich den Bereich von Frequenzen $> 1Hz$ im allgemeinen als Frequenz-, den $< 1Hz$ oder $1s$ als Periodenbereich.

Grundgrößen und Symbole

B	magnetische Flussdichte [$T = \frac{Vs}{m^2}$]
D	Verschiebungsdichte [$\frac{C}{m^2}$]
δ	Skintiefe [m]
δ_{ij}	Kronecker-Symbol, $\delta_{ij} = 1$, falls $i = j$, $\delta_{ij} = 0$, falls $i \neq j$
E	elektrische Feldstärke [$\frac{V}{m}$]
ϵ_0	Permittivität des Vakuums $8.85 \cdot 10^{-12} [\frac{As}{Vm}]$
ϵ_r	relative Permittivität
ϵ	$= \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$
η	phasensensitive Skew nach BAHR
f	Frequenz [Hz]
γ	Ausbreitungszahl [$\frac{1}{m}$]
H	magnetische Feldstärke [$\frac{A}{m}$]
j	Stromstärke [A]
k	komplexe Wellenzahl [$\frac{1}{m}$]
μ_0	magnetische Permeabilität $4\pi \cdot 10^{-7} [\frac{Vs}{Am}]$
μ_r	relative Permeabilitätszahl
μ	$= \mu_0 \cdot \mu_r$
ω	Kreisfrequenz [Hz]
ϕ	Phase der Impedanz [$^\circ$]
r_u^2	quadratische Kohärenz
ρ	spezifischer elektrischer Widerstand [Ωm]
ρ_a	scheinbarer spezifischer Widerstand [Ωm]
σ	elektrische Leitfähigkeit [$\frac{1}{\Omega m}$]
t	Zeit [s]
T	Periode [s]
T	magnetische Übertragungsfunktion
$[[X]^2]$	Autospektrum
$[XY^*]$	Kreuzspektrum
$\underline{\underline{Z}}$	Übertragungsfunktion oder Impedanz [$\frac{V}{mT}$]
∇	NABLA-Operator
Δ	LAPLACE-Operator

Tabelle 1: Verwendete Variablen