

# Kapitel 8

## Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit verschiedenen Abbildungsverfahren zur Interpretation magnetotellurischer Daten. Eine geläufige Methode MT-Daten zu interpretieren, ist die Verwendung von Inversionsrechnungen. Zur Zeit stehen hierfür Algorithmen zur Verfügung, die einen ein- oder zweidimensionalen Untergrund voraussetzen. Das Inversionsergebnis hängt dabei stark von der Dichte der Messstationen, dem verwendeten Gitter und den Regularisierungsparametern ab. Wir erhalten jedoch kein eindeutiges Modell, es wird eine Vielzahl von Modellen geben, die die Daten ausreichend erklären. Liegt aber ein Datensatz vor, der auf einen dreidimensionalen Untergrund hinweist, kann eine 2D-Modellierung unter Umständen nur eine sehr grobe Näherung sein. Grundsätzlich ist der Einsatz einer 3D-Vorwärtsmodellierung möglich. Aber aufgrund der Komplexität und der vielen freien Modellparameter sind oft nur Modellstudien machbar. Das Modellgitter und die zugeordneten Leitfähigkeiten haben einen starken Einfluß auf die Konvergenz der Modellierung, so dass komplizierte Leitfähigkeitsverteilungen oft nicht in dem Maßstab modelliert werden können, wie sie in der Natur zu beobachten sind. Geeignete Abbildungsmethoden bieten die Möglichkeit, Messdaten direkt in eine physikalisch anschauliche Größe umzuwandeln und Koordinatensystem-unabhängig darzustellen.

Angewendet werden die hier vorgestellten Abbildungsverfahren auf den MT-Datensatz aus Namibia, der 1999 mit modernen GPS-gestützten Messgeräten (S.P.A.M. MkIII) registriert wurde. Ziel dieser Messungen war eine Detailstudie einer großen tektono-stratigraphischen Grenze des Damara Belt, der Waterberg Fault / Omaruru Lineament (WF/OL), mit 61 Stationen in engem Abstand. Eine Auswertung der Daten zeigt starke 3D-Effekte in diesem Gebiet: Über und nördlich der Fault beobachten wir Phasen über  $90^\circ$ , eine starke Abhängigkeit paralleler elektrischer und magnetischer Feldkomponenten und ein nicht aufgelöstes Nebendiagonalelement. Diese Effekte sind weder auf Gerätefehler noch auf starke künstliche Störungen zurückzuführen. Sie deuten vielmehr auf eine komplizierte Leitfähigkeitsverteilung im Untergrund hin, die die Ströme und damit auch die elektrischen Felder bündeln und in andere Richtungen umlenken. Die 3D-Effekte sind nicht nur an einzelnen Stationen, sondern über viele Stationen konsistent zu beobachten. Der Einsatz von

Dekompositionsverfahren zeigt, dass die hier vorliegenden Verzerrungen nicht dem vorausgesetzten Verzerrungsmodell entsprechen und somit fehlschlagen.

Im Rahmen dieser Arbeit ist eine vor mehr als 20 Jahren entwickelte Idee von REILLY [1979] aufgegriffen worden. Er versucht durch einen mathematischen Formalismus aus dem gemessenen Impedanztensor einen Leitfähigkeitstensor zu entwickeln. Diese mathematische Formulierung ist in eine physikalischen Beschreibung von elektromagnetischen, ebenen Wellen in einem homogenen, horizontal anisotropen Medium überführt worden. Eine wesentliche Rolle spielt dabei die „Ausbreitungskonstante“ in der Wellengleichung, weshalb ich diese Methode als *Propagation Number Analysis (PNA)* bezeichnen möchte. Diese im Rahmen dieser Arbeit ausgearbeitete, neue Formulierung ermöglicht es, die Vorteile, die die *PNA* bietet, sowie die gemachten Einschränkungen zu erkennen. Für jeden Impedanztensor wird mittels *PNA* ein anisotropes Ersatzmodell gesucht. Zur Darstellung des erhaltenen Widerstandstensor eignen sich Ellipsen, die die Vorzugsrichtung von Strömen wiedergeben.

Verglichen wird diese Methode mit zwei Verfahren, die in der MT schon seit längerem bekannt sind - der EGGERS Eigenwert-Analyse und der LATORRACA *Singular Value Decomposition (SVD)* [Eggers, 1982, LaTorraca *et al.*, 1986]. Beide Verfahren spalten den Impedanztensor in seine Hauptachsen auf und erlauben ebenfalls eine Darstellung der Eigenvektoren in der Form von Ellipsen. Bislang wurden die Ergebnisse beider Verfahren anstelle einer Dekomposition mit Verzerrungsmatrix eingesetzt. Ihre Anwendung auf Messdaten ist kaum verbreitet und somit wenig untersucht. Anhand eines einfachen 2D-Modells sowie der Messdaten aus Namibia konnte gezeigt werden, dass sie auch zur Abbildung von Leitfähigkeitsverteilungen geeignet sind.

Alle drei, hier vorgestellten Methoden besitzen jedoch den Nachteil, dass sie eine gegebene Leitfähigkeitsverteilung für eine bestimmte Frequenz abbilden; eine zuverlässige Tiefenzuordnung ist nicht möglich. Als mögliche Tiefenzuordnung wird für die Widerstandsellipsen die Bostick-Tiefe, die aus der Determinante des Widerstandstensors berechnet wird, verwendet. Da dies insbesondere für eine komplizierte 3D-Leitfähigkeitsverteilung problematisch ist, wäre es wünschenswert, ein auch in dieser Hinsicht geeignetes Verfahren zu entwickeln.

Mit Hilfe der Abbildungsmethoden ist es möglich, konkrete Hinweise auf die Leitfähigkeitsverteilung im Messgebiet zu erhalten. Die Anwendung der einzelnen Verfahren auf die Messdaten verdeutlicht weiterhin ihre Vor- und Nachteile. Durch die EGGERS Eigenwert-Ellipsen erhalten wir ein kaum interpretierbares Abbild der Leitfähigkeiten im Messgebiet. Sowohl die Widerstandsellipsen nach der *PNA* als auch die Ellipsen nach der LATORRACA *SVD* ergeben hingegen ein gutes Abbild der Leitfähigkeitsverteilung im Untergrund. Besonders durch die Widerstandsellipsen erhalten wir eine sehr gute Abschätzung der Geometrie und Leitfähigkeiten von Anomalien. Auch wenn die Widerstandsellipsen vergleichbar mit dem ersten elektrischen, charakteristischen Vektor nach der LATORRACA-*SVD* sind, ist die Interpretation von nur einer Ellipse im Vergleich zu zwei Ellipsen nach der *SVD* einfa-

cher. Bei der Verwendung der Abbildungsmethoden wird deutlich, dass die Ellipsen zwar anzeigen ab welcher Frequenz eine Anomalie wirksam ist, die Unterkante der Anomalie ist nicht bestimmbar. Trotz der guten Abbildung von Leitfähigkeitsanomalien stellt die *PNA* keine Alternative zur Modellierung dar, sie ist als Ergänzung, bzw. zur Modellfindung geeignet. Die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Modelle basieren alle auf den Interpretationen dieser Widerstandsellipsen.

Im Messgebiet wird in der Abbildung der Widerstandsellipsen folgende Leitfähigkeitsverteilung deutlich:

- Südlich der WF/OL scheint im wesentlichen ein geschichteter Untergrund vorzuliegen. Dies deuten eher runde Ellipsen an. Ihre Ausrichtung nach Nord-nordost weist auf einen Ost-West verlaufenden Leitfähigkeitskontrast im Bereich der WF/OL hin. Ab einer Tiefe von einigen Kilometern beobachten wir hohe Leitfähigkeiten.
- Über und nördlich der WF/OL zeigen extrem langgestreckte, parallel zur Fault ausgerichtete Ellipsen eine starke Vorzugsrichtung von leitfähigen Strukturen an. Sie sind in einem etwa  $10\text{km}$  breiten Bereich zu beobachten.
- Im Norden des Messgebiets sind langgestreckte Ellipsen entlang einer ringförmigen Struktur angeordnet, die im Zusammenhang mit der Aufwölbung während der Damara Orogenese entstanden und anschließend erodiert ist.

Zur Erklärung der oben beschriebenen Leitfähigkeitsanomalien verwende ich 3D- und anisotrope 2D-Modellstudien. Durch ein 3D-Modell mit ringförmiger, gut leitender Anomalie im homogenen Halbraum können die MT-Daten an den nördlichen Stationen zwar nicht exakt angepasst werden, jedoch sind grundsätzliche Aussagen möglich: Um die beobachteten Ellipsen an Stationen in der Nähe der Ringstruktur zu erzeugen, ist ein oberflächennaher, ringförmiger, verbundener Leiter mit einer Tiefenerstreckung von etwa  $3\text{km}$  nötig. Über dem gut leitenden Ring sind Phasen über  $90^\circ$  zu beobachten.

Die Phasen  $> 90^\circ$  über einem großen Bereich hinweg, können mit einem solchen Modell nicht erklärt werden. Mit einem anisotropen 2D-Ersatzmodell ist es möglich, an den Stationen nördlich der WF/OL die  $\rho_a$ - und Phasenkurven sowie die Widerstandsellipsen recht gut anzupassen. Das Modell besitzt einen  $10\text{km}$  breiten, anisotropen Block mit einem Widerstand von  $100\Omega\text{m}$  parallel zur WF/OL und  $1000\Omega\text{m}$  senkrecht dazu. Phasen, die den Quadranten verlassen, sind in den Modellstudien nur dann über einen  $10\text{km}$  breiten Bereich zu beobachten, wenn der Block mindestens  $14\text{km}$  mächtig ist. Unter diesem Block ist eine anisotrope Schicht nötig, um den gewünschten Effekt in den Phasen zu erzielen, deren Anisotropie jedoch im Rahmen der Anpassung nicht aufgelöst werden kann. Um mit diesem Modell ebenfalls die Induktionspfeile bei langen Perioden zu erklären, muß in einer Tiefe von  $32\text{km}$  direkt unter dem anisotropen, oberflächennahen Block eine gutleitende Struktur vorhanden sein. Darunter schließt sich ein geschichteter Halbraum, mit

geringer werdenden Widerständen in größerer Tiefe, an. Eine Nord-Süd-verlaufende Anomalie im Westen des Messgebiets ist in den magnetischen Übertragungsfunktionen, in Form von Ost-weisenden Induktionspfeilen, und den Widerstandsellipsen zu beobachten.

Obwohl der Datensatz aus Namibia kompliziert ist, können wesentliche Aussagen über die WF/OL und ihre Umgebung gemacht werden. Im Gegensatz zu vielen anderen Faults, wie die San Andreas Fault [Unsworth *et al.*, 1997] oder die West Fissure in Chile [Hoffmann-Rothe, 2002], erscheint die WF/OL nicht als subvertikale, schmale Leitfähigkeitsanomalie sondern als eine etwa 10km breite, anomale Zone. Ein weiterer Unterschied zu beiden anderen Störungszonen ist die Tiefenerstreckung: Während die San Andreas Fault oder die West Fault nur bis in einige Kilometer Tiefe als Leitfähigkeitsanomalie zu erkennen ist, reicht die WF/OL mindestens bis 14km Tiefe, also in die mittlere Erdkruste. Durch die Induktionspfeile haben wir jedoch Hinweise, dass die WF/OL sogar durch die gesamte Kruste reichen könnte. Vergleicht man Leitfähigkeitsmodelle der Damara-Traversal mit den Ergebnissen der Detailstudie, so zeigt sich übereinstimmend die Kruste im Bereich der WF/OL als tektonische Schwächezone. Durch einen genügend dichten Stationsabstand können darüberhinaus in dieser Zone Strukturen aufgelöst werden. So erscheint die WF/OL in der Damara-Traversal ebenfalls als subvertikale Anomalie, die sich durch einen engen Stationsabstand aber als anomale, makro-anisotrope Zone erkennen lässt. Aufgrund einer ungenügenden Überdeckung des Messgebiets östlich und westlich der beiden Profile lassen sich allerdings keine Aussagen darüber machen, wie weit sich die anomale Zone nach Westen und Osten fortsetzt. Dass ein genügend dichtes Stationsnetz äußerst wichtig ist, um die Messdaten mit einiger Sicherheit interpretieren zu können, zeigt der Vergleich der Widerstandsellipsen von Haupt- und Nebenprofil. Auf dem Hauptprofil mit einem Stationsabstand von 500m ist man in der Lage, die Widerstandsellipsen gut zu interpretieren, was bei einem Abstand von 2000m schwer fällt. Ebenso ist die Ringstruktur im Norden des Messgebiets nur durch den engen Stationsabstand aufgelöst worden. Ohne die detaillierten Daten wäre die Gefahr groß, diese Oberflächenanomalie als tiefe Struktur zu interpretieren.

Die Leitfähigkeitsanomalien im Messgebiet sind wahrscheinlich durch Graphit erzeugt. Gesteinsproben zeigen einen hohen Graphitanteil. Die Graphitbahnen sind zwar oberflächennah durch Verwitterung unterbrochen und zeigen keine gute Leitfähigkeit, doch aufgrund der Messergebnisse müssen sie unterhalb der Verwitterungsschicht leitend verbunden sein. Andere Leitfähigkeitsmechanismen (Fluide oder Störungslette), wie sie in Zusammenhang insbesondere mit aktiven Scherzonen auftreten, sind unwahrscheinlich. Da es sich bei der WF/OL um eine fossil angelegte Scherzone handelt, die im Laufe der Zeit reaktiviert wurde, gibt es keine Hinweise auf eine rezente hydrothermale Alterationszone.