

# Kapitel 4

## 3D Effekte in den Daten aus Namibia

Dieses Kapitel widmet sich vor allem der starken 3D Effekte, die in den Namibia-Daten zu beobachten sind. Bevor ich jedoch die Besonderheiten dieses Datensatzes beschreibe, möchte ich kurz auf die Rohdaten und deren Gewinnung eingehen.

### 4.1 Datengewinnung

Der Schwerpunkt der ORYX-Messungen<sup>1</sup> von 1999 ist die Detailstudie der Waterberg Fault/Omaruru Lineaments (WF/OL). Im MT-Datensatz, der im Vorjahr auf dem damals etwa 150km langen Profil registriert wurde, zeigte sich ein Richtungswechsel der Induktionspfeile über der WF/OL. Die WF/OL befand sich allerdings im Randbereich des damaligen Profils, so dass detaillierte Aussagen zur Leitfähigkeitsstruktur dieser Faultzone nicht möglich waren. Aus diesem Grund wurden 1999 zwei 18km lange Profile über die WF/OL gelegt, die sowohl mit Reflexionsseismik als auch mit der Magnetotellurik vermessen wurden. Abbildung 4.1 zeigt eine Stationskarte beider Experimente. Die lange Damara-Traverse verläuft Nordwest-Südost, entlang der magmatischen Intrusionen Brandberg und Erongo und über die beiden Scherzonen Autseib Fault und WF/OL. Diese stellen die Grenzen zwischen den tektonostratigraphischen Einheiten *Northern Zone*, *northern Central Zone* und *southern Central Zone* dar [Miller, 1983]. Die nicht ausgefüllten Dreiecke kennzeichnen die Messpunkte aus dem Jahr 1998, die schwarzen Dreiecke die des ORYX-Experimentes sowie einer weiteren Verdichtung der Messstationen entlang des Omaruru Flusses, da dieser Bereich in den Daten von 1998 anomale Leitfähigkeiten zeigte. Zusätzlich befinden sich 9 Stationen mit 5km Stationsabstand in südlicher Verlängerung der Damara-Traverse (siehe Abb. 4.1). Der Bereich des weißen Kastens ist in Abbildung 4.2 vergrößert dargestellt.

Für den reflexionsseismischen Teil des ORYX-Experiments wurden Signale an Geophonen im Abstand von 100m registriert, während der Schusspunktabstand 500m

---

<sup>1</sup>ORYX: Omaruru Geophysical Experiment

betrug. Die schwarzen Kreise des Profils 1 stellen die Schusspunkte dar, an denen ebenfalls MT-Daten mit einem Stationsabstand von 500m registriert wurden. Die MT-Stationen des Profil 2 befinden sich im Abstand von 2000m, das heißt an jedem vierten Schusspunkt. Die Lokationen des 2. Profils, die nur Seismik-Schusspunkte waren, sind auf der Karte mit nicht ausgefüllten Kreisen gekennzeichnet. Zieht man die für die MT sonst üblichen Stationsabstände von einigen wenigen bis einigen zehn Kilometer in Betracht, so liegt mit den ORYX-Messungen ein sehr dicht vermessener Datensatz vor. 16 Stationen im Osten und Westen der beiden Profile gewährleisten außerdem eine gewisse flächenhafte Überdeckung des Gebiets.

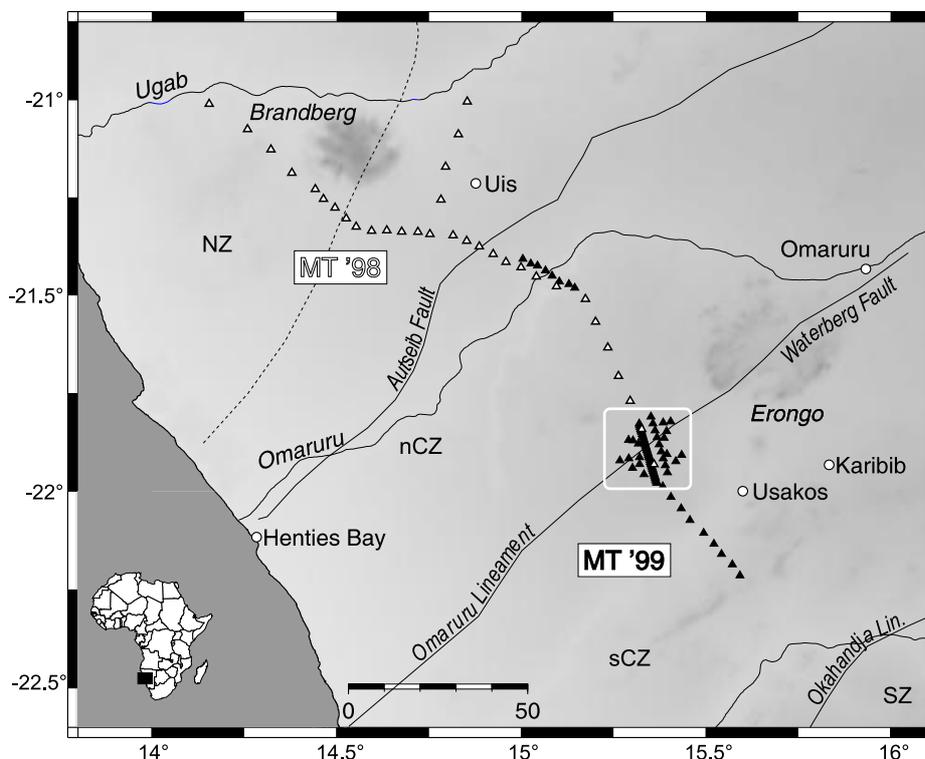


Abbildung 4.1: Anordnung der 107 MT Stationen aus den Messungen von 1998 (weiße Dreiecke) und 1999 (schwarze Dreiecke). Das über 200km lange Profil verläuft entlang der magmatischen Intrusionen Brandberg und Erongo und überquert den Omaruru Fluß, die Ausseib und die Waterberg Fault / Omaruru Lineament. (NZ = Northern Zone, nCZ = northern Central Zone, sCZ = southern Central Zone, SZ = Southern Zone)

Abbildung 4.3 zeigt einen für die MT typischen Stationsaufbau. Die elektrischen Feldvariationen werden mit Nord-Süd und Ost-West ausgerichteten Elektrodenpaaren,  $E_x$  und  $E_y$ , erfaßt. Die horizontalen Spulen zur Registrierung des Magnetfelds

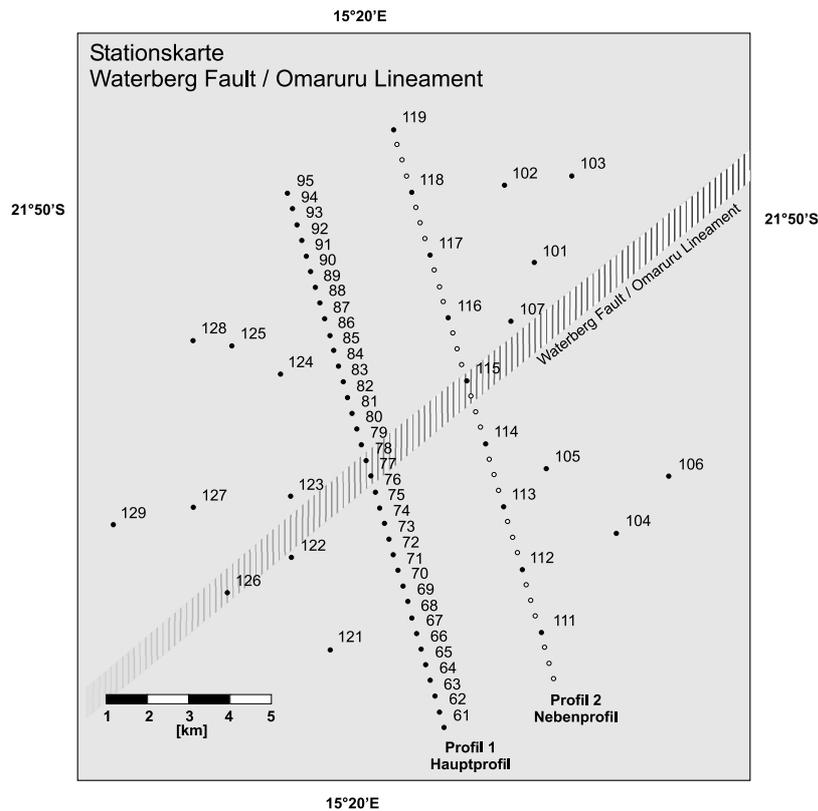


Abbildung 4.2: Stationskarte des ORYX-Experiments, eine Detailvermessung von Waterberg Fault / Omaruru Lineament. Schwarze Kreise kennzeichnen die MT-Stationen, weiß ausgefüllte Kreise auf Profil 2 zeigen die seismischen Schusspunkte, die nicht von der MT vermessen worden sind.

sind nach Norden ( $B_x$ ) und Osten ( $B_y$ ) orientiert, während das vertikale Magnetfeld mit einer senkrecht stehenden Spule ( $B_z$ ) gemessen wird. Zur Messung der Magnetfelder in einem breiten Frequenzbereich von  $1000\text{Hz} - 0.001\text{Hz}$  wurden die Induktionsspulenmagnetometer MFS05 der Firma Metronix verwendet. Die vom GFZ entwickelten, unpolarisierbaren Ag/AgCl-Elektroden dienten zur Erfassung der elektrischen Potentialdifferenzen.

Die analogen Signale der Sensoren sind mit S.P.A.M. MkIII - Apparaturen, einer Entwicklung von G. Dawes an der Universität in Edinburgh, in einem breiten Frequenzbereich von  $1000\text{Hz} - 0.001\text{Hz}$  aufgezeichnet worden [Ritter *et al.*, 1998]. Auf eine detaillierte Beschreibung des Messgeräts möchte ich hier verzichten und verweise auf die Arbeiten von Ritter [1995], Nascimento [1997], Ritter *et al.* [1996] and Weckmann [1999]. Insgesamt 6 dieser Messapparaturen standen für die ORYX-Feldmessungen zur Verfügung. Da die Geräte über GPS synchronisiert sind, ist eine

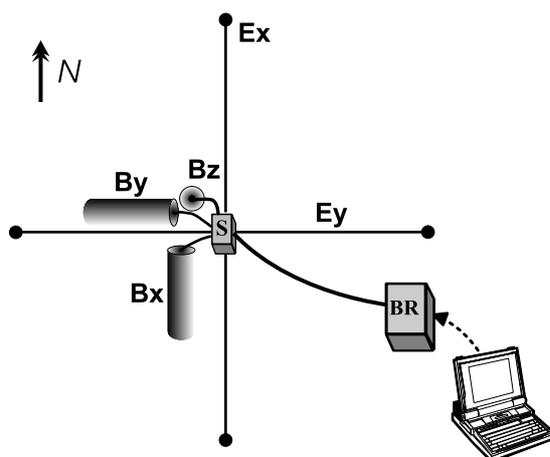


Abbildung 4.3: Aufbau einer 5-Komponenten-MT-Station mit der S.P.A.M. bestehend aus einer *Sensor Box* (S) und einer kombinierten *Base / Remote Box* (BR).

Auswertung der Daten mit *Remote Reference Processing*<sup>2</sup> [Ritter *et al.*, 1998, und Zitate darin] möglich. Die Messzeiten der einzelnen Stationen betragen zwischen  $24h$  und  $48h$ .

## 4.2 Processing der MT Daten

Für das Processing der MT Daten wurde das Programmpaket EMERALD [Ritter, 1995, Ritter *et al.*, 1998] verwendet. Die einzelnen Programme sind bei Weckmann [1999] detailliert beschrieben. Generell werden Daten in der MT im Frequenzbereich prozessiert, das heißt, die registrierten Zeitreihen werden in kürzere Zeitsegmente<sup>3</sup> unterteilt und mit einer Fourier Transformation in den Frequenzbereich überführt. Zur Berechnung der Übertragungsfunktionen (siehe Gl. 2.14) dieser Segmente verwendet man eine bivariate, lineare Ausgleichsrechnung nach der Methode der kleinsten Quadrate, in die Auto- und Kreuzspektren aller Kanäle eingehen. Um eine gemittelte Übertragungsfunktion aus allen Events zu erhalten, wird ein Auswertalgorithmus basierend auf robuster Statistik nach Junge [1990] verwendet. Diese robuste Statistik reduziert den Einfluß von extremen Ausreißern in einem iterativen Prozess. Im Vergleich zu der Mittelung nach der Methode der kleinsten Quadrate liefert das robuste Processing auch beim Vorhandensein von Störungen stabilere Schätzungen der Übertragungsfunktionen. Liegt jedoch keine Normalverteilung der Einzelspektren vor, wie es für dieses Verfahren Voraussetzung ist, oder ist die An-

<sup>2</sup>Beim Remote Reference Processing wird eine entfernte Referenzstation genutzt, um unkorreliertes Rauschen zu eliminieren.

<sup>3</sup>Die Zeitsegmente werden auch mit (Einzel-)Effekt oder *Event* bezeichnet. Ebenso wird der Begriff „Einzelspektren“ für die aus den Segmenten berechneten Spektren verwendet.

zahl der gestörten Spektren über 50% [Junge, 1993], können diese nicht wirkungsvoll unterdrückt werden.

Schlecht bestimmte Übertragungsfunktionen sind häufig in dem als *dead band* bekannten Periodenbereich (bei etwa 10s) zu beobachten. Aufgrund von geringer und streuender, natürlicher elektromagnetischer Energie in diesem Bereich kommt es zu einem schlechteren Signal / Rausch-Verhältnis. Verringert sich zusätzlich durch verhältnismäßig kurze Standzeiten von 24 Stunden die Anzahl der Einzelspektren, aus denen die Übertragungsfunktion berechnet wird, so können schlecht bestimmte Übertragungsfunktionen die Folge sein. Eine Verlängerung der Registrierdauer ermöglicht auch für diesen Periodenbereich stabilere Schätzwerte, jedoch muss diese häufig, um den nötigen Messfortschritt zu erreichen, eingeschränkt werden.

Die MT-Daten in Namibia sind generell von hoher Qualität und zeigen keine erkennbaren künstlichen Störungen durch Stromleitungen, Industrie oder Sendeanlagen, wie sie in Mitteleuropa typisch sind. Abbildung 4.4 zeigt ein Beispiel von Zeitreihen an 5 Stationen in einem schmalen Periodenband von 16s – 32s. Die horizontalen Magnetfelder besitzen augenscheinlich eine hohe Korrelation und scheinen rauschfrei zu sein. Die elektrischen Felder sowie das vertikale Magnetfeld sind unter den Stationen vergleichbar, zeigen jedoch Unterschiede, die auf lokale Leitfähigkeitsänderungen zurückzuführen sind.

Um den oben beschriebenen Einfluß der kurzen Registrierdauer auf die Übertragungsfunktionen zu langen Perioden zu verringern, sind die Daten in schmale Periodenbänder gefiltert worden. Dies gewährleistet, dass eventuelle Störungen, die in einem bestimmten Periodenbereich auftreten, lediglich auf ein schmales Periodenband beschränkt bleiben und nicht durch die Transformation in den Frequenzbereich auf benachbarte Perioden verschmiert werden. Obwohl die Namibia-Daten keine starken künstlichen Störungen enthalten, ist es sinnvoll sicherzustellen, dass die Einzelspektren einer Normalverteilung gehorchen und keine extremen Ausreißer vorhanden sind. Zur Datenbearbeitung vor der robusten Auswertung wurden die langperiodischen Daten im Frequenzbereich mit dem Programm SEL4ROB selektiert [Weckmann, 1999]. Dieses Programm ermöglicht die Darstellung und Vorselektion im Frequenzbereich nach 9 verschiedenen MT-Parametern, wie zum Beispiel Energie der einzelnen Kanäle, Kohärenzen und Übertragungsfunktionen. Die Namibia-Daten wurden mit einem Kohärenz-Kriterium bearbeitet, was ein Standardverfahren im MT-Datenprocessing ist [z.B. Egbert & Livelybrooks, 1996]. In einem Periodenbereich über mehrere Dekaden gibt es keinen allgemeingültigen Grenzwert, wie er in automatischen Auswerteverfahren verwendet wird. Durch das Selektionsprogramm wurde der Grenzwert an die jeweilige Datenqualität angepaßt und in den meisten Fällen bei etwa 0.8 angesetzt.

Zusätzlich wurden Einzeleffekte, deren Spektren eine zu hohe oder zu geringe Energiedichte im Vergleich zu den übrigen Effekten besaßen, für die weitere Auswertung entfernt.

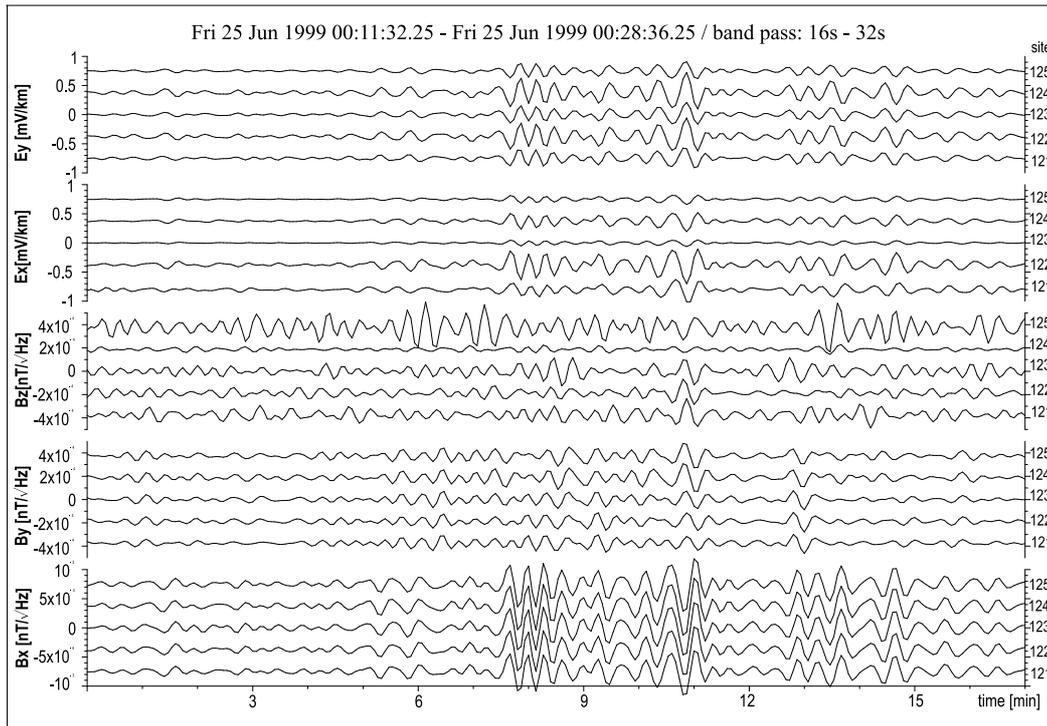


Abbildung 4.4: Die Zeitreihen im Periodenbereich  $16s - 32s$  von fünf zeitgleich registrierten Stationen zeigen eine hohe Korrelation der horizontalen Komponenten untereinander. Das vertikale Magnetfeld weist stärkere Unterschiede zwischen den Stationen auf, was durch den Untergrund hervorgerufen wird. Im wesentlichen scheinen die Zeitreihen abgesehen von  $B_z$  an Station 125 (schlecht eingegrabene vertikale Spule wegen Granit) ungestört zu sein.

### 4.3 Besonderheiten der Übertragungsfunktionen aus Namibia

Das Ergebnis des Datenprocessings ist der frequenzabhängige Impedanztensor, aus dem für jede Station scheinbare spezifische Widerstände  $\rho_a$  und die Phasen  $\phi$  berechnet werden. Alle vier Impedanzensorelemente werden getrennt voneinander in  $\rho_a$  und Phase transformiert und über der Periodenachse aufgetragen. Das für den Impedanztensor gewählte Koordinatensystem überträgt sich dabei auf  $\rho_a$  und  $\phi$ . Der Übersichtlichkeit wegen werden Phasenkurven der Nebendiagonalelemente in den Quadranten zwischen  $0^\circ$  und  $90^\circ$  gespiegelt.

Aufgrund der großen Datenmenge möchte ich an dieser Stelle anhand von drei verschiedenen Stationen charakteristische Widerstands- und Phasenverläufe des ORYX-Datensatzes beschreiben. Die  $\rho_a$ - und Phasenkurven sowohl für die beiden Neben- als auch für die Hauptdiagonalelemente aller Stationen sind im Anhang **A5** abge-

bildet.

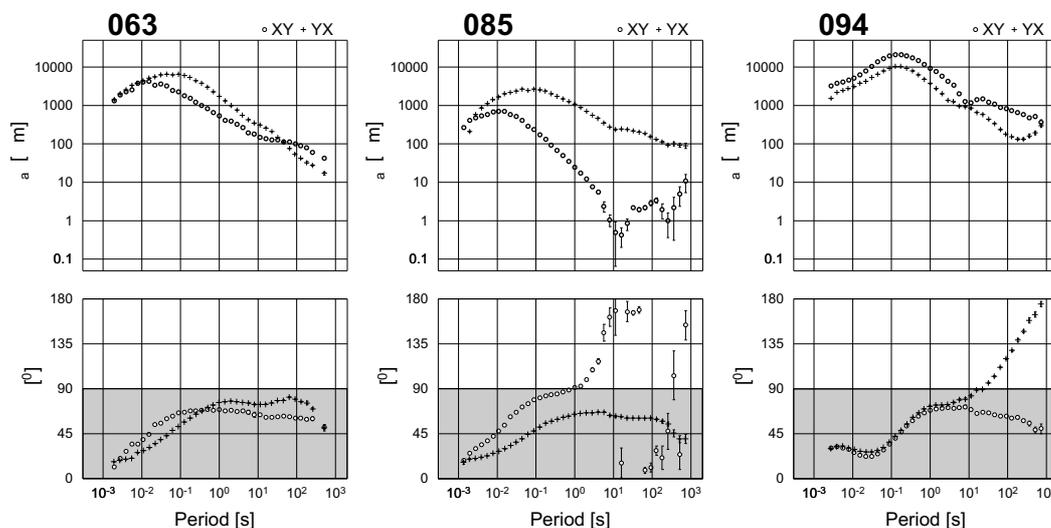


Abbildung 4.5: Die beiden Nebendiagonalelemente einer südlichen (063), einer zentralen (085) und einer nördlichen Station (094) verdeutlichen die drei unterschiedlichen Typen von Widerstands- und Phasenkurven des Namibia Datensatzes. Im Gegensatz zu der Station 063 ist bei 085 eine Komponente nicht aufgelöst und an Station 094 verlässt die Phasenkurve den Quadranten zwischen  $0 - 90^\circ$ .

Station 063<sup>4</sup> im Süden des Hauptprofils ist exemplarisch für die meisten südlichen Stationen (061-073). Die beiden Nebendiagonalelemente, die bei einem 1D- oder 2D-Untergrund im richtigen Koordinatensystem dominieren, zeigen einen glatten und ungestörten Kurvenverlauf. Die scheinbare spezifische Widerstandskurve deutet oberflächennah eine leitfähigere Zone an, die gefolgt ist von hohen Widerständen. Zu längeren Perioden, also größeren Eindringtiefen, beobachten wir einen Abfall der Widerstände um etwa 3 Dekaden. Die Phasenkurven beschreiben ein ähnliches Verhalten, sie sind  $< 45^\circ$  für kurze und  $> 45^\circ$  für lange Perioden, was einer Abfolge von gutem - schlechtem - gutem Leiter entspricht. Station 085 befindet sich in der Mitte des Hauptprofils und steht für die Stationen in der Nähe, bzw. etwas nördlich der WF/OL. Die  $yx$ -Komponente der  $\rho_a$ - und Phasenkurve ist vergleichbar von Qualität und Verlauf mit denen der Station 063. Die  $xy$ -Komponente des Widerstands zeigt jedoch einen noch steileren Abfall zu längeren Perioden. Ab  $5s$  liegen die Widerstandswerte bei etwa  $1\Omega m$  und beginnen zu noch längeren Perioden hin zu streuen. Die Phasenwerte verlassen den normalen Quadranten von  $0^\circ - 90^\circ$ , wobei sie ab einer Periode von etwa  $5s$  ebenfalls streuen. Dieser Effekt ist nicht nur an Station 085 zu beobachten, sondern tritt im gesamten zentralen Bereich des Messgebiets auf. Eine Betrachtung aller Stationen über das gesamte Profil folgt am Ende dieses

<sup>4</sup>Zur genauen Lage der Stationen siehe Abbildung 4.2.

Abschnitts.

Im Norden des Profils beobachten wir an Station 094, dass  $\rho_a$  und Phase beider Nebendiagonalelemente eine glatte, ungestörte Kurve ergeben. Lediglich im Bereich des *dead band* ist die *xy*-Komponente trotz versuchten *Remote Reference* und robusten Processings mit *Bias* behaftet. Grundsätzlich sind die scheinbaren spezifischen Widerstandskurven beider Komponenten hochohmiger, und auch der Abfall zu langen Perioden hin ist nicht so stark ausgeprägt. Dadurch, dass zu kurzen Perioden beide Kurven nicht zusammenlaufen, kann eine *static shift* Verzerrung vorliegen. Dies tritt dann auf, wenn sich Ladungen an einer kleinen, oberflächennahen Inhomogenität ansammeln und aufgrund ihres elektrischen Feldes das regionale elektrische Feld verzerren.

Während die Phasen der *xy*-Komponente im Quadranten zwischen  $0^\circ - 90^\circ$  liegen, verlassen die Phasenwerte der *yx*-Komponente bei dieser Station den Quadranten und durchqueren den 2. Quadranten stetig.

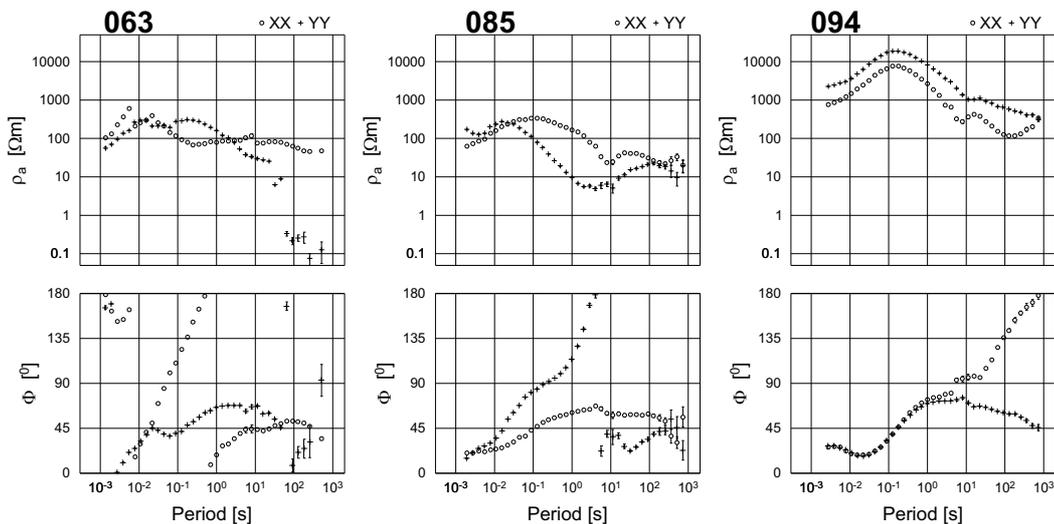


Abbildung 4.6: Für die gleichen Stationen wie in Abb. 4.5 sind die Hauptdiagonalen als scheinbare spezifische Widerstände und Phasen dargestellt. Für die Stationen 063 und 085 ergeben sich unwesentlich kleinere Widerstände als für ihre Nebendiagonalelemente. Station 094 jedoch besitzt Hauptdiagonalelemente in der gleichen Größenordnung wie die Nebendiagonalen.

Bislang sind nur die Nebendiagonalelemente betrachtet worden. Sie sind dominant, wenn ein 1D- oder 2D-Untergrund gegeben ist und bei letzterem das Koordinatensystem, in dem der Impedanztensor betrachtet wird, entsprechend der Streichrichtung orientiert ist. Im 3D-Fall verschwinden die Hauptdiagonalelemente nicht (siehe Kapitel 2). Anders als für die Nebendiagonalelemente gibt es für die Phasen keinen zu erwartenden Quadranten.



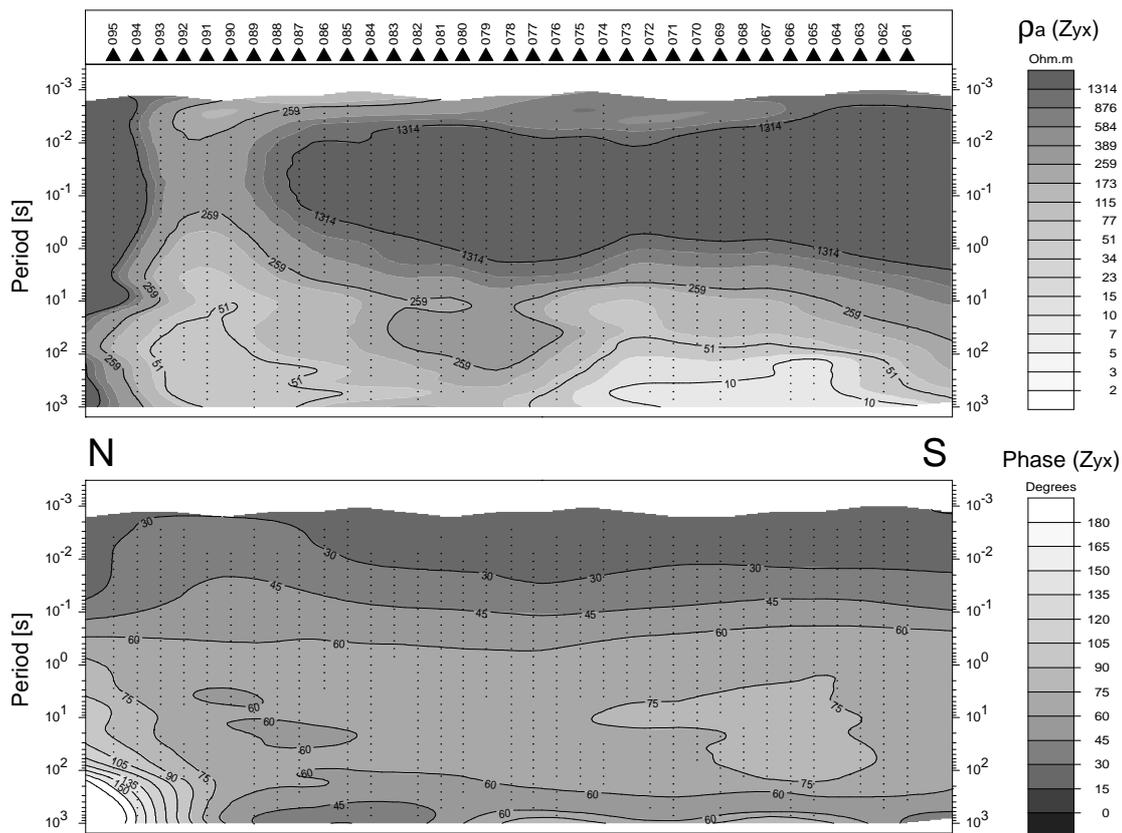


Abbildung 4.8: Die Pseudosektion der yx-Komponente läßt die Zweiteilung über der WF/OL nicht erkennen. Lediglich die nördlichen Stationen zeigen Phasen über 90°.

spezifischen Widerstands (Abb. 4.7 oben) der xy-Komponente<sup>5</sup> verdeutlicht, dass unter einem oberflächennahen schlechten Leiter eine gutleitende Struktur folgt. Die Pseudosektion der Phasen in Abb. 4.7 unten zeigt stärkere Unterschiede über dem Profil. Die Phasen der Stationen im Süden (061-074) liegen auch zu langen Perioden im normalen Quadranten zwischen 0° – 90°. Die zentralen Stationen (075-092) sind durch Phasen über 90° für lange Perioden gekennzeichnet. Da in dieser Darstellung keine Fehler berücksichtigt sind, läßt sich nur in den extrem kleinen Widerständen erkennen, dass diese Komponente streut, beziehungsweise nicht aufgelöst ist. Die nördlichen Stationen (093-095) zeigen in dieser Komponente kein auffälliges Verhalten.

In den Pseudosektionen der xy-Komponente (Abbildung 4.8) läßt sich eine Unterteilung aufgrund von ähnlichem Verhalten in Widerstand und Phase zwischen den südlichen und zentralen Stationen nicht so eindeutig treffen. In den scheinbaren spezifischen Widerstände ist bis auf den nördlichen Bereich eine schlecht leitende Zone

<sup>5</sup>Der Impedanztensoren sind nach geographisch Nord rotiert.

über einer gut leitenden zu beobachten. Im Norden scheint diese schlecht leitende Zone von einer besser leitenden Struktur durchtrennt zu sein. Die Phasen sind für die Stationen recht einheitlich, nur die Stationen 092 - 095 im Norden zeigen Phasen über  $90^\circ$  für lange Perioden.

## 4.4 Dimensionalitätsuntersuchung des Messgebiets

Die scheinbaren spezifischen Widerstände und Phasen des Namibia-Datensatzes weisen Effekte auf, die entweder von einem komplizierten 3D-Untergrund oder von Noise und fehlerhaften Geräten herrühren könnten. Wie schon beschrieben, sind in den registrierten Zeitreihen keine Anzeichen für künstliche Störungen. Auch die Selektion im Frequenzbereich hat gezeigt, dass nur ein geringer Einfluß von natürlichem Rauschen besteht. Die Messapparatur und die Sensoren scheinen für die beschriebenen Effekte auch nicht verantwortlich zu sein: Die S.P.A.M und die verwendeten Sensoren sind seit langer Zeit im Einsatz und haben sich als verlässlich erwiesen. Auch eine Auswertung nach Einsatzort und -zeit der Messgeräte und Sensoren zeigt, dass das anomale Verhalten der Messlokation nicht bestimmten Geräten zuzuordnen ist (vergleiche auch Abbildungen 4.7 und 4.8). Aus diesem Grund sind Geräteeffekte auszuschließen. Dies bedeutet, dass die anomalen Effekte ihre Ursache im Untergrund haben müssen.

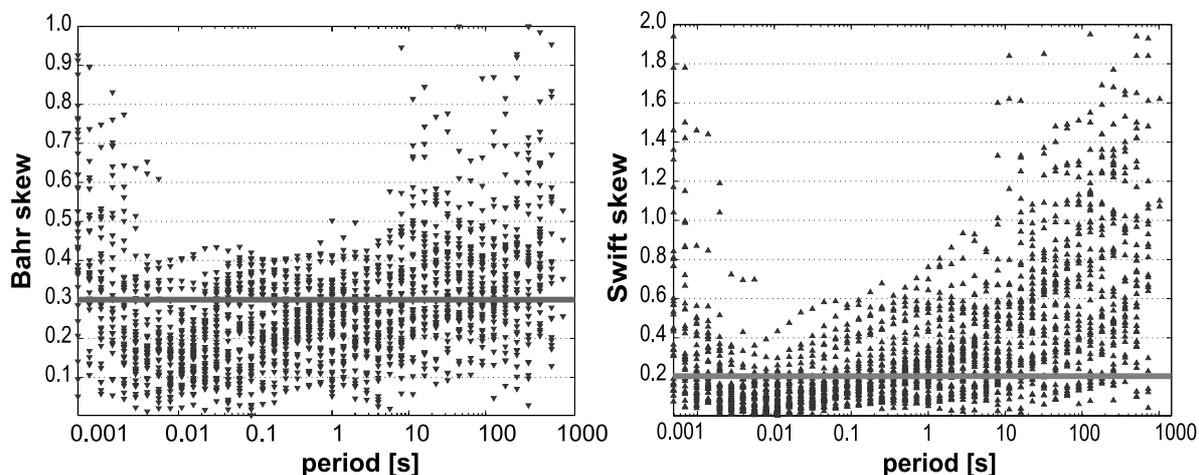


Abbildung 4.9: Die Skewwerte nach BAHR und SWIFT liegen ab einer Periode von  $10\text{ Hz}$  für viele Stationen des Hauptprofils über dem empirischen Grenzwert von 0.2, bzw. 0.3. Besonders zu langen Perioden hin lassen sich diese Daten nicht durch ein 1D- oder 2D-Modell erklären.

Um die Dimensionalität des Impedanztensors und somit auch des Untergrundes

abschätzen zu können, wird in der MT die Skew (vergleiche Kapitel 2) verwendet. Diese Größe ist eine Invariante, also eine vom Koordinatensystem unabhängige Größe. Abbildung 4.9 zeigt die Skewwerte nach SWIFT und die phasensensitive Skew nach BAHR. Dabei sind die Werte aller Stationen des Hauptprofils über der Periode dargestellt. Zur Abschätzung der Dimensionalität gibt es empirische Grenzwerte, ab denen die Daten nicht durch ein 1D- oder 2D-Modell erklärt werden können. Der Umkehrschluss, dass eine 3D-Leitfähigkeitsverteilung zwangsläufig hohe Skewwerte zur Folge hat, gilt nicht. Die Grenzwerte liegen für die Skew nach BAHR bei etwa 0.3, für die nach SWIFT bei 0.2. Beide sind in den Abbildungen durch eine graue Linie gekennzeichnet.

Die gemeinsame Darstellung der Skew für alle Stationen des Hauptprofils veranschaulicht, dass nur wenige Stationen über den gesamten Periodenbereich Werte unter dem jeweiligen Grenzwert haben. Ab Perioden von 0.1s liegen für die Skew nach SWIFT der Großteil der Stationen über dem Grenzwert, während dies für die Skew nach BAHR erst für Perioden ab 10s zu beobachten ist. Anhand der Skewwerte wird deutlich, dass der Untergrund zumindest für lange Perioden stark dreidimensional sein muss.

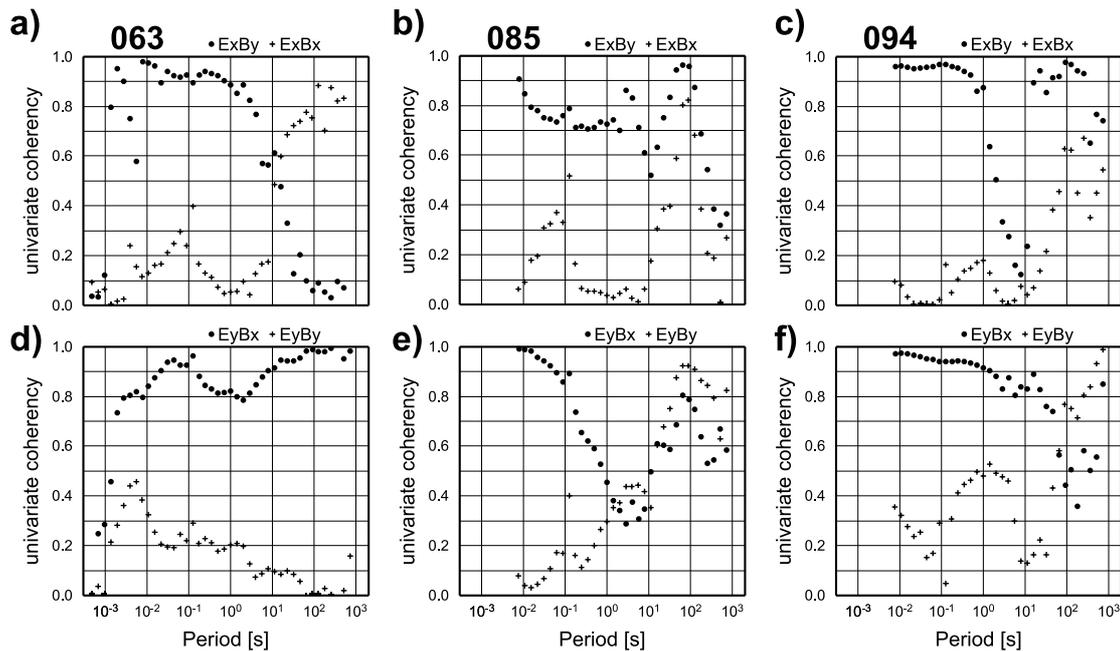


Abbildung 4.10: An allen Stationen ist zu beobachten, dass die univariaten Kohärenzen zwischen einer parallelen elektrischen und magnetischen Komponente für lange Perioden groß sind.

Eine andere Größe der MT, die normalerweise in Zusammenhang mit der Datenana-

lyse von Bedeutung ist, scheint geeignet, Hinweise für komplizierte Leitfähigkeitsverteilungen im Untergrund zu geben: die univariate Kohärenz. Sie wird normalerweise verwendet, um bei der statistischen Datenanalyse Signal und Rauschen zu trennen (Kohärenzkriterium). Univariate Kohärenzen zwischen einem elektrischen und einem magnetischen Feld berechnen sich nach folgender Formel, wobei das elektrische Feld dem Eingangskanal und das magnetische Feld dem Ausgangskanal zugeordnet wird.

$$r_u^2 = \frac{|[XY^*]|^2}{[XX^*] \cdot [YY^*]} \quad , \quad (4.1)$$

mit  $X$  als Eingangskanal,  $Y$  als Ausgangskanal.  $[XY^*]$  bezeichnet das Kreuzspektrum und  $[XX^*]$ ,  $[YY^*]$  die beiden Autospektren.

Aus den Maxwell-Gleichungen, die die Zusammenhänge zwischen elektrischen und magnetischen Feldern beschreiben, folgt, dass magnetische Felder zu ihnen senkrecht stehende, elektrische Felder induzieren und umgekehrt. Aus diesem Grund nehmen wir an, dass orthogonale elektrische und magnetische Komponenten hohe Kohärenzen besitzen, parallele dagegen sehr kleine. Genau dieses Verhalten spiegeln die Kohärenzen für  $E_y B_x$  an Station 063 (Abb. 4.10 d) und für  $E_x B_y$  an Station 094 (Abb. 4.10 c) wieder. Häufig beobachtet man ein Einbrechen der Kohärenzen bei etwa 10s aufgrund des schlechteren Signal / Rausch-Verhältnisses im *dead band*. Die Kohärenzen für  $E_x$  von Station 063 (Abb. 4.10 a) zeigen allerdings ein ungewöhnliches Verhalten: Für kurze Perioden sehen wir die erwartete hohe Korrelation zwischen orthogonalen Komponenten, aber ab 5s wird diese Abhängigkeit stetig geringer. Gleichzeitig steigt die Kohärenz zwischen parallelen Komponenten  $E_x$  und  $B_x$ . Dieses Verhalten ist auch an Station 085 (Abb. 4.10 b) zu beobachten. Zusätzlich zu diesem Effekt zeigt sich bei dieser Station ein größeres Streuen der Werte, bedingt durch eine kürzere Registrierdauer. Trotzdem wird auch an dieser Station eine hohe Kohärenz  $E_x B_x$  zwischen parallelen Feldern für lange Perioden deutlich. An Station 094 zeigt die Kohärenz  $E_y B_y$  ein anomales Verhalten.

Vergleicht man für jede Station die Feldkomponenten, bei denen ein anomales Verhalten in den Kohärenzen zu beobachten ist, mit den jeweiligen  $\rho_a$  und Phasenkurven dieser Komponenten, so fällt auf, dass streuende oder nicht aufgelöste Widerstände oder Phasen mit fehlender Kohärenz zusammenhängen.

## 4.5 Rotationswinkel und Tensordekomposition

In den vorangegangenen Abschnitten wurde gezeigt, dass aufgrund der großen Hauptdiagonalelemente des Impedanzensors sowie der hohen Skewwerte und des anomalen Kohärenzverhaltens im Messgebiet eine 3D-Leitfähigkeitsverteilung vorliegen muss. Es stellt sich nun die Frage, ob es ein geeignetes Koordinatensystem gibt, in dem die 3D-Effekte verschwinden oder geringer werden. Weiterhin könnten kleine, oberflächennahe Inhomogenitäten den Impedanztensor verzerrt haben, deren Einfluß mit Hilfe eines Dekompositionsverfahrens eliminiert werden kann.

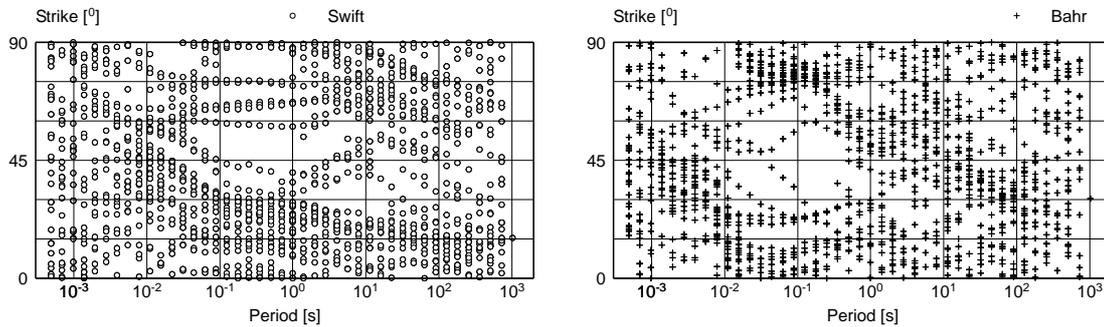


Abbildung 4.11: Die Rotationswinkel nach BAHR (rechts) und SWIFT (links) verdeutlichen, dass es für die Daten des Hauptprofils keine ausgeprägte Streichrichtung gibt.

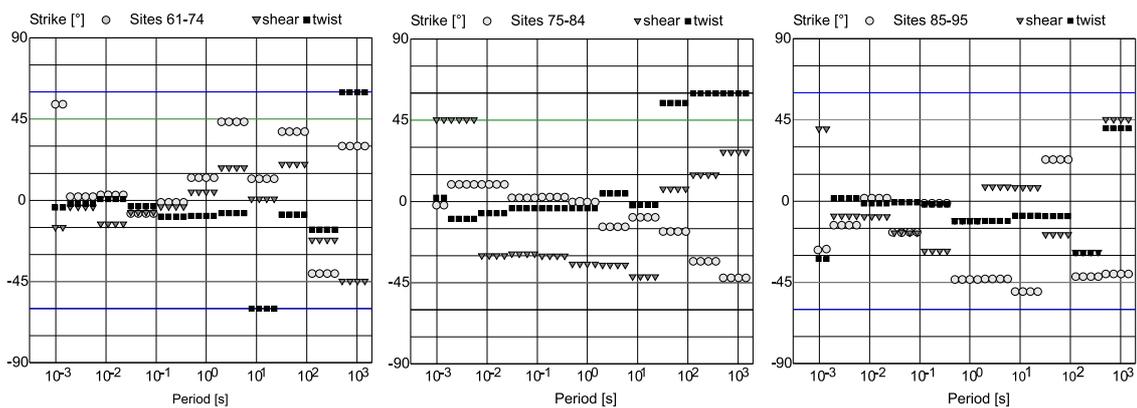


Abbildung 4.12: Für die *multisite-multifrequency decomposition* wurden die Stationen des Hauptprofils in drei Untergruppen aufgeteilt und jeweils 4 Frequenzen zusammengefaßt. Für jede Untergruppe sind die Streichrichtung als auch *twist* und *shear* in Abhängigkeit von der Periode dargestellt. Da *twist* und *shear* nicht frequenzunabhängig sind, sind die Voraussetzungen für eine GB Dekomposition nicht gegeben.

Zunächst möchte ich die aus den Impedanztensoren berechneten Rotationswinkel nach BAHR und SWIFT vorstellen. Abbildung 4.11 zeigt eine Übersicht der Rotationswinkel des gesamten Periodenbereichs für alle Stationen des Hauptprofils. Sie verdeutlicht, dass sich mit beiden Methoden kein einheitlicher Winkel finden läßt. Der phasensensitive Rotationswinkel soll von kleinräumigen Inhomogenitäten weniger beeinflusst sein und eine regionale Streichrichtung anzeigen (siehe Kap. 2). Dies ist jedoch im Vergleich mit dem Rotationswinkel nach SWIFT nicht zu beobachten.

Vielmehr wird deutlich, dass die berechneten Rotationswinkel nach Bahr sich von dem Swift'schen unterscheiden, aber trotzdem weder über die Frequenzachse noch für die Mehrzahl der Stationen ein konsistentes Streichen anzeigen. Um zu untersuchen, ob sich für Untergruppen der Stationen ein einheitlicher Winkel finden lässt, werden die südlichen (061-073), zentralen (074-084) und nördlichen Stationen (085-095) des Hauptprofils zusammengefasst. Auch für diese getrennte Untersuchung ergab sich aber kein einheitlicher Rotationswinkel für die Untergruppen, weshalb auf eine Abbildung verzichtet wird.

Die Idee, Stationen in Untergruppen zusammen zu fassen, greifen McNeice & Jones [2001] auf. Sie wenden eine Groom & Bailey Dekomposition (Inversion) auf mehrere Stations- und Frequenzbänder an. Dadurch soll einerseits eine höhere numerische Stabilität erreicht werden [McNeice & Jones, 2001], andererseits erwartet man bei Vorhandensein einer regionalen Streichrichtung, dass sie auch an mehreren Stationen und Frequenzen sichtbar wird.

Für diese *multisite-multifrequency decomposition* sind die Stationen des Hauptprofils in drei Untergruppen zusammengefasst. Für jeweils vier Frequenzen werden gemeinsame Werte für *strike*, *twist* und *shear* berechnet. Grundsätzlich sind bei der GB Dekomposition *twist* und *shear* als frequenzunabhängig vorausgesetzt (vergleiche hierzu Abschnitt 2.2.2). Eine Frequenzabhängigkeit dagegen deutet auf eine nicht erfolgreiche Entzerrung hin. Abbildung 4.12 verdeutlicht, dass eine Entzerrung und damit auch eine Bestimmung einer regionalen Streichrichtung für den Datensatz fehl schlägt. Lediglich die südliche (061 - 074) und die zentrale (075 - 084) Stationsgruppe zeigen zu kurzen Perioden von  $500\text{Hz} - 1\text{Hz}$  annähernd konstante *twist*- und *shear* Werte mit einem Streichwinkel von  $0^\circ$  an. In Anbetracht der  $90^\circ$ -Vieldeutigkeit scheint dies in etwa mit der Streichrichtung der WF/OL übereinzustimmen. Zu langen Perioden hin streuen alle Parameter über einen großen Winkelbereich, was aber nur bedeutet, dass die Tensordekomposition für diesen Periodenbereich nicht funktioniert.

Zusammenfassend betrachtet, scheint weder anhand der Rotationswinkel nach Swift und Bahr noch durch eine Tensordekomposition eine konsistente regionale Streichrichtung vorzuliegen. Dadurch, dass sich in den Messdaten keine einheitliche Streichrichtung zeigt, gibt es auch kein Koordinatensystem, in dem die beobachteten 3D-Effekte verschwinden.

## 4.6 Die magnetischen Übertragungsfunktionen

Besonders für die Frage nach Streichrichtungen von Leitfähigkeitsanomalien ist die Darstellung der magnetischen Übertragungsfunktionen in Form von Induktionspfeilen hilfreich. An dieser Stelle möchte ich mich auf eine Darstellung der Induktionspfeile für drei Frequenzen beschränken, um die wesentlichen Anomalien zu erläutern. Die Induktionspfeile zu allen Stationen sind im Anhang A5 abgebildet.

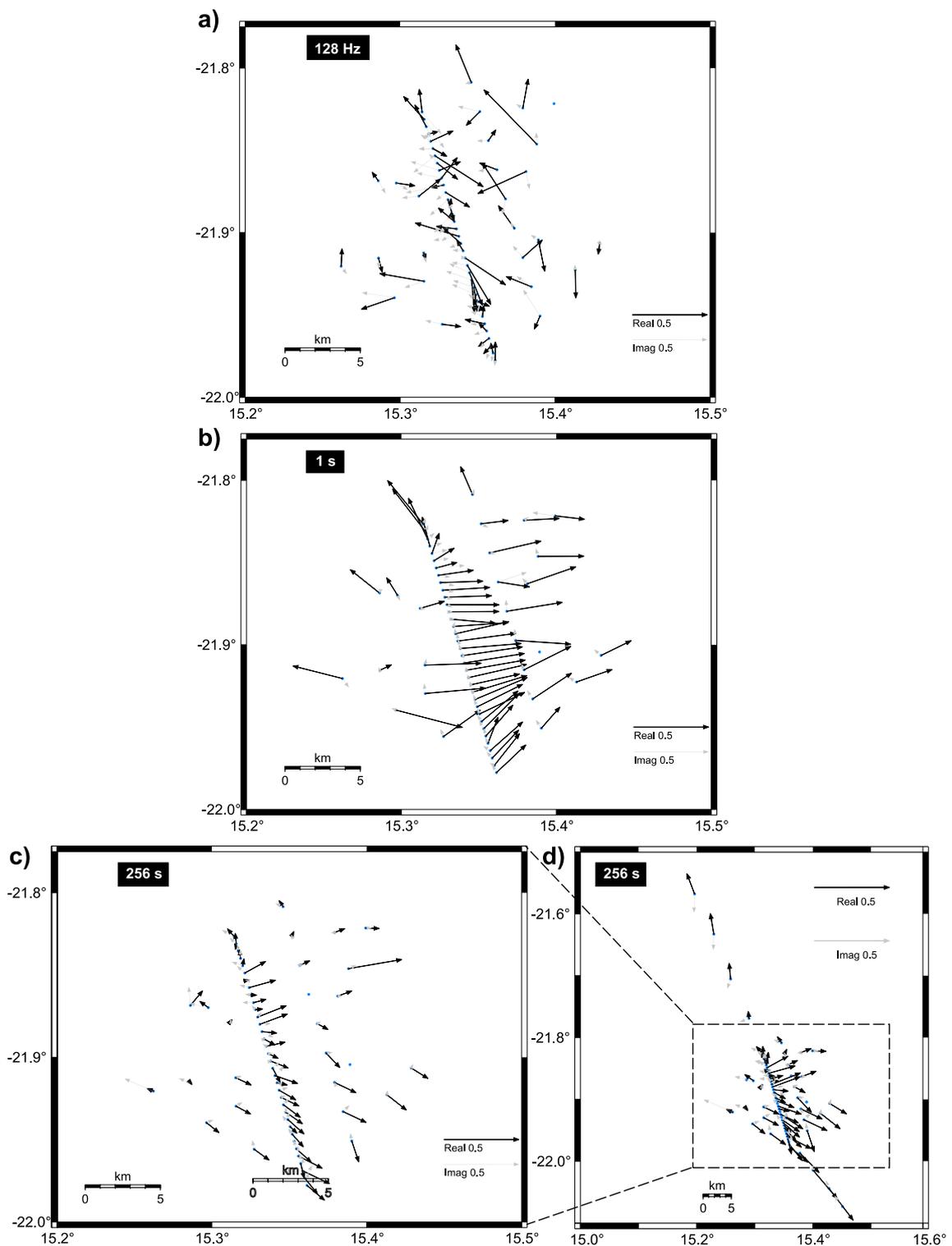


Abbildung 4.13: Die Induktionspfeile für  $128\text{ Hz}$  (a) sind im wesentlichen durch kleinräumige Inhomogenitäten beeinflusst. Für eine Periode von  $1\text{ s}$  (b) ist ein lateraler Leitfähigkeitskontrast westlich und parallel zu den Profilen angedeutet. Zu langen Perioden, z.B.  $512\text{ s}$  (c), kann man eine über etwa  $10\text{ km}$  ausgedehnte Anomalie nördlich der WF/OL erkennen. Deutlicher bildet sie sich ab, wenn einige Stationen in Fortsetzung der dichten Profile hinzugezogen werden ( d ) ).

Die Induktionspfeile sind in der WIESE Konvention dargestellt (vergleiche Tabelle 2.1, Seite 8) und zeigen somit in der Regel vom guten Leiter weg. Für  $128\text{Hz}$  in Abbildung 4.13 a) streuen die Realpfeile (schwarz), was durch oberflächennahe, lokale Heterogenitäten verursacht sein kann. Trotzdem ist eine Umkehr der Realpfeile im Bereich der WF/OL zu beobachten. Bei einer reinen 2D-Struktur würden die Imaginärpfeile parallel oder antiparallel zu den Realpfeilen stehen. Die Imaginärpfeile (grau), die durch das Abweichen von der Parallelität, bzw. Antiparallelität, zu den Realpfeilen keine 2D-Struktur andeuten, weisen somit ebenfalls auf kleinräumige Anomalien hin. In einem mittleren Periodenbereich um  $1\text{s}$  (Abbildung 4.13 b) ist von einem Leitfähigkeitskontrast an der Stelle der WF/OL nichts zu sehen, statt dessen deutet die Mehrzahl der Realpfeile von einer gut leitenden Struktur im Westen unseres Messgebiets weg, die nahezu parallel zu den Profilen verlaufen würde. Bei langen Perioden ( $512\text{s}$ ) (Abbildung 4.13 c und d) ist immer noch eine Ostkomponente in den Realpfeilen zu beobachten, die aber von einem Leitfähigkeitskontrast nördlich der WF/OL überlagert ist. Diese Anomalie wird besonders deutlich, wenn man einige Stationen der langen Traverse im Süden und Norden hinzuzieht.

In Abbildung 4.14 sind die markantesten Leitfähigkeitsanomalien, die sich in den Induktionspfeilen andeuten, als Cartoon zusammengestellt. In unterschiedlichen Farben sind die Induktionspfeile, die durch Richtungsänderung eine Anomalie abbilden, zusammen mit einer Skizze des dazu passenden Verlaufs der Anomalie eingezeichnet. Zusätzlich ist der Frequenzbereich angegeben, in dem ihr Einfluß zu beobachten ist. Im Norden des Messgebiets (in Blau dargestellt) zeigt sich eine Anomalie, die mit Teilen der Ringstruktur aus graphitisierten Marmoren zusammenfällt (siehe hierzu Abschnitt 3.1). Induktionspfeile einiger weiterer Stationen deuten einen geschlossenen Ring an, der im Cartoon mit einem Band aus Fragezeichen eingezeichnet ist. Doch scheinen in diesem Gebiet lokale, kleinräumige Heterogenitäten dieser Struktur überlagert zu sein, so dass die Induktionspfeile am südlichen und östlichen Rand der Ringstruktur diese nicht eindeutig abbilden. Die karbonatische Ringstruktur ist zumindest in Teilen in einem breiten Frequenzbereich von  $128\text{Hz}$  bis  $0.005\text{Hz}$  zu erkennen. Ebenfalls sehr oberflächennah zeigt sich eine gutleitende Anomalie (rot) in einem Frequenzbereich von  $128\text{Hz}$  bis  $4\text{Hz}$ , die sich im Bereich der WF/OL (vergleiche Abb. 3.4) befindet. In einem überlappenden Frequenzbereich von  $16\text{Hz}$  bis  $0.005\text{Hz}$  ist eine weitere Anomalie (grün) im Westen des Messgebiets wirksam. Diese Anomalie verläuft annähernd in Nord-Süd-Richtung und erzeugt die ostwärts gerichteten Induktionspfeile im mittleren Frequenzbereich. Zu tiefen Frequenzen, also ab ca  $0.011\text{Hz}$ , ist eine breite leitfähige Struktur in der nördlichen Hälfte des Messgebiets zu erkennen. Nördlich von ihr weisen die Induktionspfeile nach Norden, südlich von ihr nach Süden. Dieses Verhalten würde einer Ost-West-streichenden Anomalie entsprechen.

Zusammenfassend läßt sich sagen, dass die Realpfeile und die Imaginärpfeile im Messgebiet eine komplizierte Leitfähigkeitsverteilung andeuten. Die insgesamt vier markanten Anomalien zeigen sich in zum Teil überlappenden Frequenzbereichen.

Die Induktionspfeile zeigen eine Überlagerung von mehreren Anomalien. Der hier diskutierte Cartoon stellt also nur eine Vereinfachung der Anomalien im Messgebiet dar.

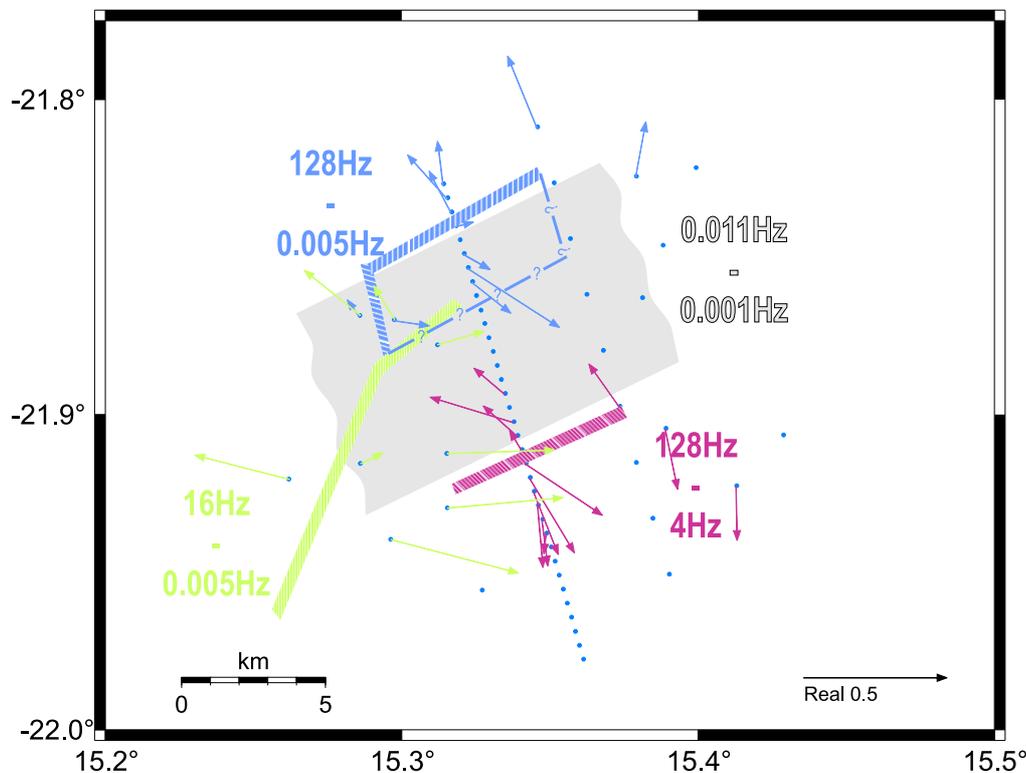


Abbildung 4.14: Vereinfachende Darstellung der leitfähigen Strukturen abgeleitet aus den Induktionspfeilen. In den dazu angegebenen Frequenzbereichen haben die jeweiligen Anomalien wesentlichen Einfluß auf die Induktionspfeile. Die graue Zone entspricht einer Anomalie, die für die langen Perioden unter Berücksichtigung der Stationen der langen Traverse im Norden und Süden zu einem deutlichen Richtungswechsel der Realpfeile führt.

## 4.7 Vergleich der Namibia Daten mit bekannten Datensätzen

Die MT-Übertragungsfunktionen im Bereich der WF/OL zeichnen sich durch drei große und ein kleines, bzw. schwer bestimmbares, Impedanzensorelement, Phasen über  $90^\circ$  und eine starke Abhängigkeit zueinander paralleler elektrischer und magnetischer Feldkomponenten aus. Da für diese Effekte künstliche Störungen oder Gerätefehler nicht in Frage kommen, müssen sie von einer komplizierten Leitfähig-

keitsverteilung im Untergrund herrühren und können als starke 3D Induktionseffekte betrachtet werden. Diese Annahme unterstützen auch die Induktionspfeile. Eine Analyse der Streichrichtungen und eine GB Dekomposition ergeben demzufolge keine konsistente regionale Streichrichtung.

Oft wurden MT-Daten zur Auswertung in einen zweidimensionalen Zusammenhang gebracht, obwohl genügend starke Anzeichen auf eine 3D-Umgebung hinweisen. Um eine bessere Abschätzung der Dimensionalität des Untergrundes zu erhalten, hat Bahr [1991] verschiedene Verzerrungsklassen auf der Basis von Parametern, die durch die Dekomposition gefundenen wurden, eingeführt. Eine Zuordnung in diese Klassen ist nicht immer eindeutig und liefert für eine 3D-Interpretation der Namibia-Daten keine wesentlichen zusätzlichen Erkenntnisse.

Besonders in der letzten Zeit beschäftigen sich viele Veröffentlichungen mit 3D-Effekten und ihrer Interpretation. Oft versteckt sich dahinter jedoch wieder eine 2D-Interpretation. Als Indikator für einen dreidimensionalen Impedanztensor dienen vor allem hohe Skewwerte [Garcia *et al.*, 1999]. Nach einer erfolgreichen GB Dekomposition werden anschließend die Daten mit 2D-Modellen interpretiert. Auch Simpson [2000] beschreibt 3D-Effekte in Daten aus Kenia. Ein 3D-Vorwärtsmodell aus drei 2D-Strukturen, die zueinander senkrechte Streichrichtungen besitzen, paßt die Induktionspfeile sowie die Phasen- und  $\rho_a$ -Kurven der Nebendiagonalen einiger Stationen des Kenia-Datensatzes an. Dabei bleiben die Hauptdiagonalelemente, die im 3D-Fall nicht vernachlässigbar sind, unberücksichtigt.

Ledo *et al.* [2000] verwendet 3D-Modelle zur Interpretation der MT-Daten aus den Pyrenäen. Dies wird vor allem für die Modellierung eines Datensatzes von flächenhaft verteilten Stationen benötigt, ohne dass starke 3D-Effekte in den Daten präsentiert werden. Das Modell basiert auf geologischen a priori Informationen und früheren 2D Modellen, paßt aber nur einige Stationen des Datensatzes an.

Grundsätzlich zeigen bislang nur wenige Datensätze extreme 3D Effekte, wie Phasenwerte über  $90^\circ$  [Tauber *et al.*, 2001, Lezaeta & Haak, 2001, Lezaeta, 2001]. Bei Tauber *et al.* [2001], zum Beispiel, läßt sich ein passendes Koordinatensystem finden, in dem die Phasenkurven den jeweiligen Quadranten nicht verlassen. Lezaeta & Haak [2001] stellen Indikatoren für die induktive Kopplung strombündelnder Leitfähigkeitsanomalien vor. Mit einem sogenannten *Channelling*-Modell versuchen sie, die in den Anden beobachteten Phasen über  $90^\circ$  zu erklären.

Auch Pomposiello *et al.* [1998] beschreiben starke 3D-Effekte, die sich in zwei nicht bestimmbar Impedanzensorelementen äußern. Für Stationen mit diesem Verhalten wird lediglich das unbeeinflusste Nebendiagonalelement zur Interpretation verwendet. Zur Erklärung der schlecht bestimmten Komponenten nehmen Pomposiello *et al.* [1998] eine starke Bündelung von Strömen an.

Zusammenfassend betrachtet beschäftigen sich vermehrt Arbeiten mit 3D-Effekten in den MT-Daten. Trotzdem zeigen sie die Schwierigkeiten auf, 3D-Effekte umfassend zu interpretieren. Oft beschränken sich die Arbeiten auf eine Beschreibung der Effekte, die an einigen Stationen eines großräumig verteilten Datensatzes auftreten.

Bei einer regionalen Interpretation der Leitfähigkeitsstruktur bleiben die von den 3D-Effekten betroffenen Stationen meistens unberücksichtigt, oder es werden nur einzelne Größen wie die Realpfeile oder die Nebendiagonalelemente angepaßt.

Der hier vorliegende Namibia-Datensatz bietet aufgrund des sehr dichten Stationsabstands eine gute Auflösung der 3D-Effekte und eignet sich für eine detaillierte Betrachtung der gesamten Information der Übertragungsfunktionen mit Hilfe von Abbildungsmethoden, die im folgenden vorgestellt werden.