

## Ein AMT Experiment zur hochauflösenden Kartierung von Vertikalfeldvariationen

### Einleitung

Die Auswertung von Vertikalfeldvariationen (MVM) ist eines der am längsten erprobten Verfahren der Induktionsmethoden überhaupt. Eine vertikale Komponente der Variationsfelder gibt es nur in Gegenwart von lateralen Änderungen der elektrischen Leitfähigkeit<sup>1</sup> und daher ist deren Kartierung eine sehr geeignete Methode zur Auffindung von anomalen Bereichen im Untergrund.

Magnetische Variationsanomalien wurden dabei typischerweise in einem Periodenbereich zwischen 50s und 10000s vermessen und anomale Felder wurden im gesamten Periodenbereich festgestellt. Bei diesen Perioden ist die räumliche Ausdehnung der Anomalien in der Größenordnung 10km oder mehr, mit Quellen, die mindestens einige Kilometer tief liegen. Bei solchen Messungen war die räumliche Dichte der Meßstationen allerdings kaum ausreichend, um Anomalien mit kürzeren Wellenlängen ausschließen zu können und es ist sehr wahrscheinlich, daß zumindest einige der Anomalien an Grenzschichten erzeugt werden, die an der Oberfläche sichtbar sind, z.B. den gefalteten Rändern von Sedimentbecken.

Wir haben uns daher ein Experiment ausgedacht, indem wir versuchen, die Vertikalfelder mit ausreichender hoher Stationsdichte und bei geeigneten hohen Frequenzen zu kartieren, um die gemessenen Anomalien direkt im Vergleich mit der Oberflächengeologie interpretieren zu können.

### Lokation und geologischer Hintergrund

Für das Experiment suchten wir ein Gebiet in der Nähe von Edinburgh, mit einem Leitfähigkeitskontrast von 10 : 1 oder mehr, mit der Möglichkeit entlang eines Profils arbeiten zu können, aber - selbstverständlich - ohne elektromagnetische Rauschquellen. Solche Meßgebiete existieren tatsächlich nie in Wirklichkeit, jedoch wußten wir von früheren Messungen, daß das Gebiet um die Southern Uplands Fault (SUF) ein geologisch geeignetes Areal ist.

Die ostnordost-west-südwest verlaufende SUF ist ein sehr prominenter geologischer Komplex, welcher das Midland Valley und die Southern Uplands im Süden Schottlands voneinander trennt. Tektonisch ist die SUF an die Schließung eines Proto-atlantischen Ozeans im späten Paläozoikum gebunden. Im Frühpaläozoikum trennten mehrere hundert Kilometer tiefer Ozean - der Iapetus - den Norden Schottlands, damals Teil der (amerikanischen) Laurentia Platte, vom Süden Schottlands und dem Norden Englands, die Teil der (europäischen) Avalonia Platte waren. Beginnend im Kambrium und fortwährend bis ins Devon wurde dieser Ozean schließlich durch Subduktion im Norden unter Laurentia aufgezehrt.

Das von uns gewählte Profil kreuzt die SUF etwa 15km SSO von Edinburgh (Abb. 1). An der Störung, die lokal als Lammermuir Fault bekannt ist, grenzen karbonische Sedimente im NW an ordovizische Metasedimente im SO. Von den früheren Untersuchungen her war auch bekannt, daß die karbonischen Sedimente Leitfähigkeiten um die 100  $\Omega m$  aufweisen, während die Metasedimente in der Größenordnung  $>1000 \Omega m$  liegen. Abb. 1 zeigt die gemessenen 24 MVM Stationen (schwarze Punkte) und 3 MT Stationen (Rechtecke); die Gitterlinien auf der Karte entsprechen 1km Abständen.

Abbildung 2 zeigt die Projektion dieser Stationen auf ein Profil. Die MVM Daten wurden in sechs Stations-Sets (10-60) im September und Oktober 1992 registriert. Magnetotellurische Daten sind an beiden Enden des Profils (50OR, 60OR) und in der Profilmitte gemessen worden (10OR). Für den überwiegenden Teil des Profils beträgt der Abstand zwischen den Stationen ca. 100m, allerdings musste das Profil zwischen den Sets 10 und 30 aufgrund einer Landstraße

<sup>1</sup>bei Annahme homogener Quellenfelder

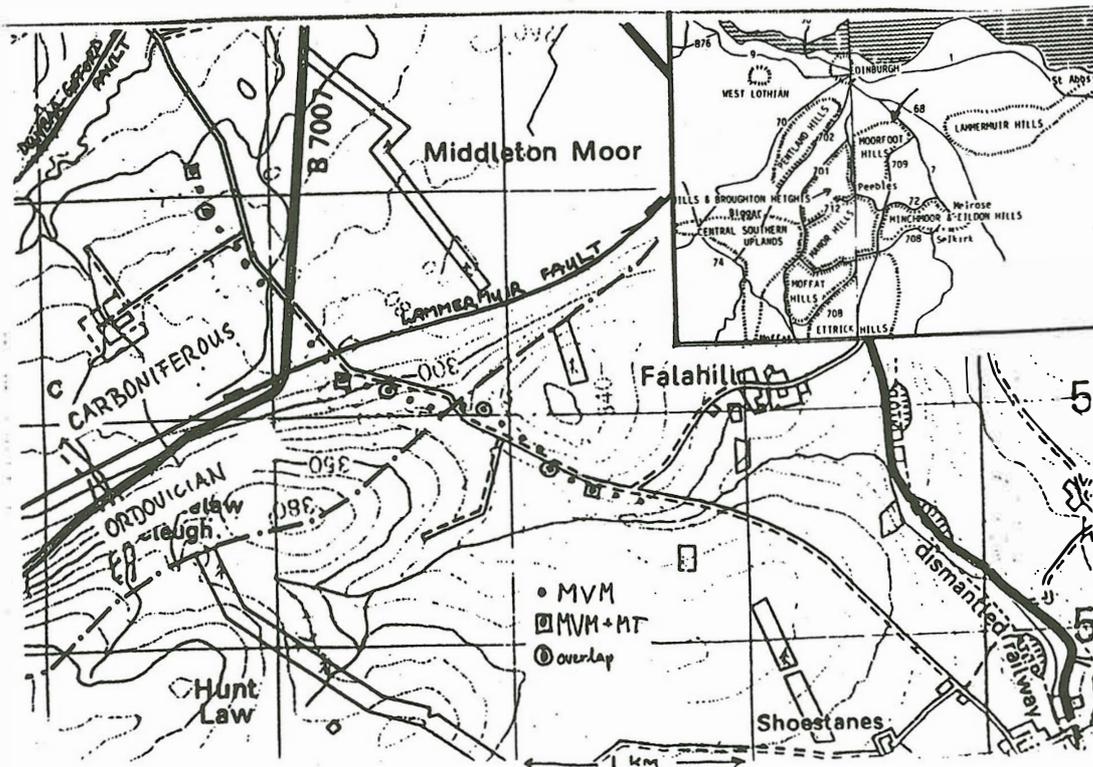


Abbildung 1: Stationskarte

unterbrochen werden. Abb. 2 zeigt auch den angenommenen Verlauf der Störung und den praktisch identischen Verlauf einer Gaspipeline.

### Instrumentation

In der Vergangenheit scheiterten derartige dichte Kartierungen an den hohen Anforderungen an die Meßgeräte (hohe Abtastraten) und das Fehlen von hochauflösenden Magnetometern. In Edinburgh war das Meßgerät in Form des universitätseigenen S.P.A.M. MkIIb vorhanden, während 9 Induktionsspulen von Typ CM11E vom NERC Geophysical Equipment Pool ausgeliehen werden konnten. Diese Hardwarekombination ermöglicht Registrierungen elektromagnetischer Zeitreihen von bis zu 7 Kanälen im Frequenzbereich 100 Hz bis 100 s. Für unser Experiment und um die 7 Kanäle voll auszunutzen, verwendeten wir das Gerät wie in Abbildung 3 dargestellt. Jede Gerätekonfiguration besteht aus zwei orthogonalen horizontalen und 5 vertikalen Magnetfeldkomponenten. Die horizontalen Magnetfelder in der Mitte jedes Stationsfünflings werden dabei als Referenzfelder für die jeweils fünf Vertikalfeldstationen registriert. Mit jeder Auslage werden also 5 Stationen und 400 Profilmeter abgedeckt.

S.P.A.M. MkIIb ist eine Real-time Apparatur, die normalerweise für Standard MT Anwendungen eingesetzt wird. Alle Daten werden in Form von diskontinuierlichen, kurzen (256 samples) Zeitsegmenten registriert und anhand von on-line Qualitätskriterien wird ein komplettes Datensegment entweder zurückgewiesen oder gestapelt. Aus Zeitmangel konnte die bestehende Registrierungssoftware nicht an die Besonderheiten dieses Experimentes angepasst werden, so daß ausschließlich die Qualität der jeweils mittleren Station ausschlaggebend für die Akzeptanz der Daten des kompletten Sets war.

### Auswertung der Felddaten

Für die Datenanalyse bestimmt man aus den drei Meßgrößen, den Magnetfeldkomponenten

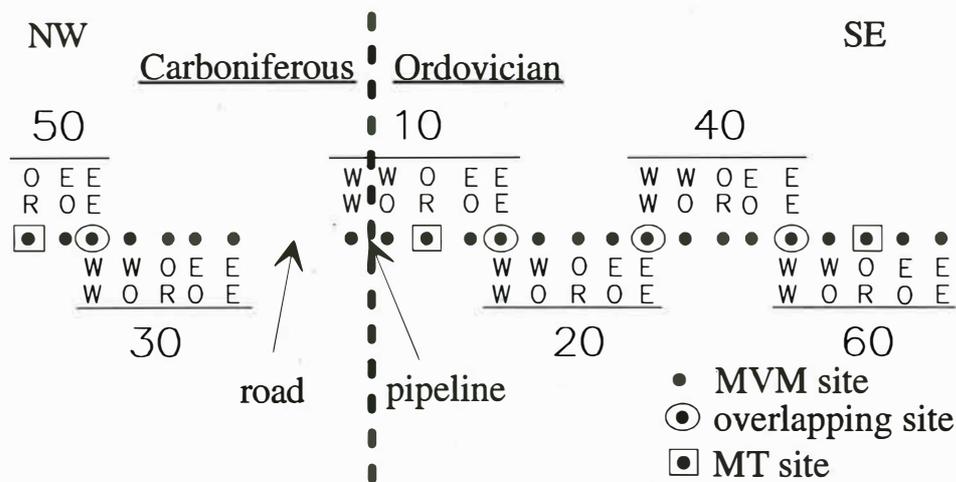


Abbildung 2: Projektion der Stationen auf ein Profil

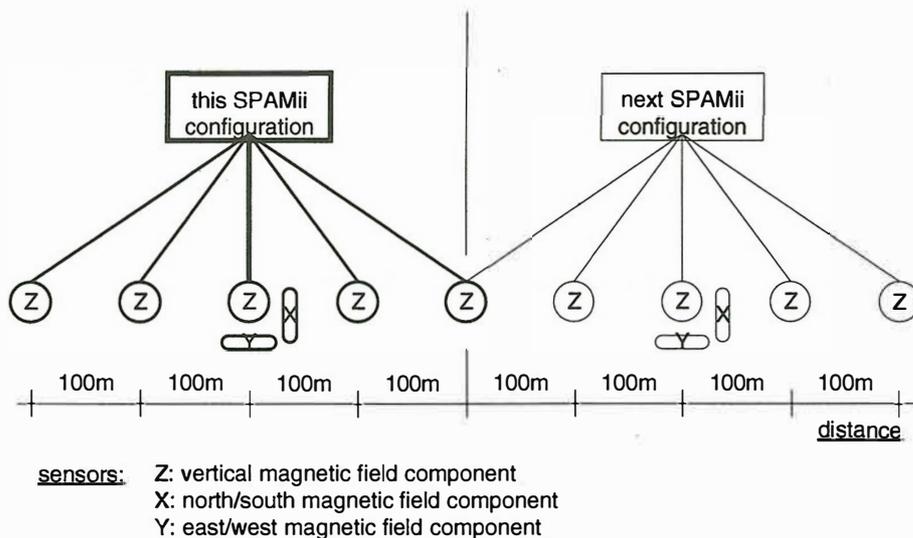


Abbildung 3: S.P.A.M. MkIIb Gerätekonfiguration für das MVM Experiment

$B_x, B_y$  und  $B_z$ , die Elemente der vertikalen Übertragungsfunktionen ( $\ddot{U}Fs$ )  $Z_H$  und  $Z_D$ :

$$B_z(\omega) = Z_H B_x(\omega) + Z_D B_y(\omega) + \delta B_z(\omega)$$

Bekanntermaßen problematisch ist hierbei die Bestimmung der Rauschkomponente  $\delta B_z(\omega)$ .

Wie bereits erwähnt verläuft praktisch unmittelbar parallel zum vermuteten geologischen Streichen eine Gaspipeline und zusätzlich waren im gesamten Meßgebiet elektrische Weidezäune im Betrieb, so daß der Einfluß von Noise sicher zu beachten ist. Im Bereich der höchsten Frequenzen sind starke 100 Hz Signale auffällig. Diese überschreiten aber nicht den Bereich der Gerätedynamik und beeinflussen daher nur ein sehr eingeschränktes Frequenzband, welches beim Datenprocessing berücksichtigt werden kann. Schwerwiegender sind die Einflüsse von Störsignalen, wie sie in Abbildung 4 dargestellt<sup>2</sup> sind.

Besonders bei den vertikalen Magnetfeldern (Hz) deutlich erkennbar sind periodisch (alle 11.5s) einsetzende künstliche Signale. Die horizontalen Magnetfelder scheinen von diesen

<sup>2</sup>Alle Magnetfeldkanäle sind ungefähr auf nT skaliert, lediglich die Einflüsse der bandbegrenzenden Filter sind nicht mitberücksichtigt.

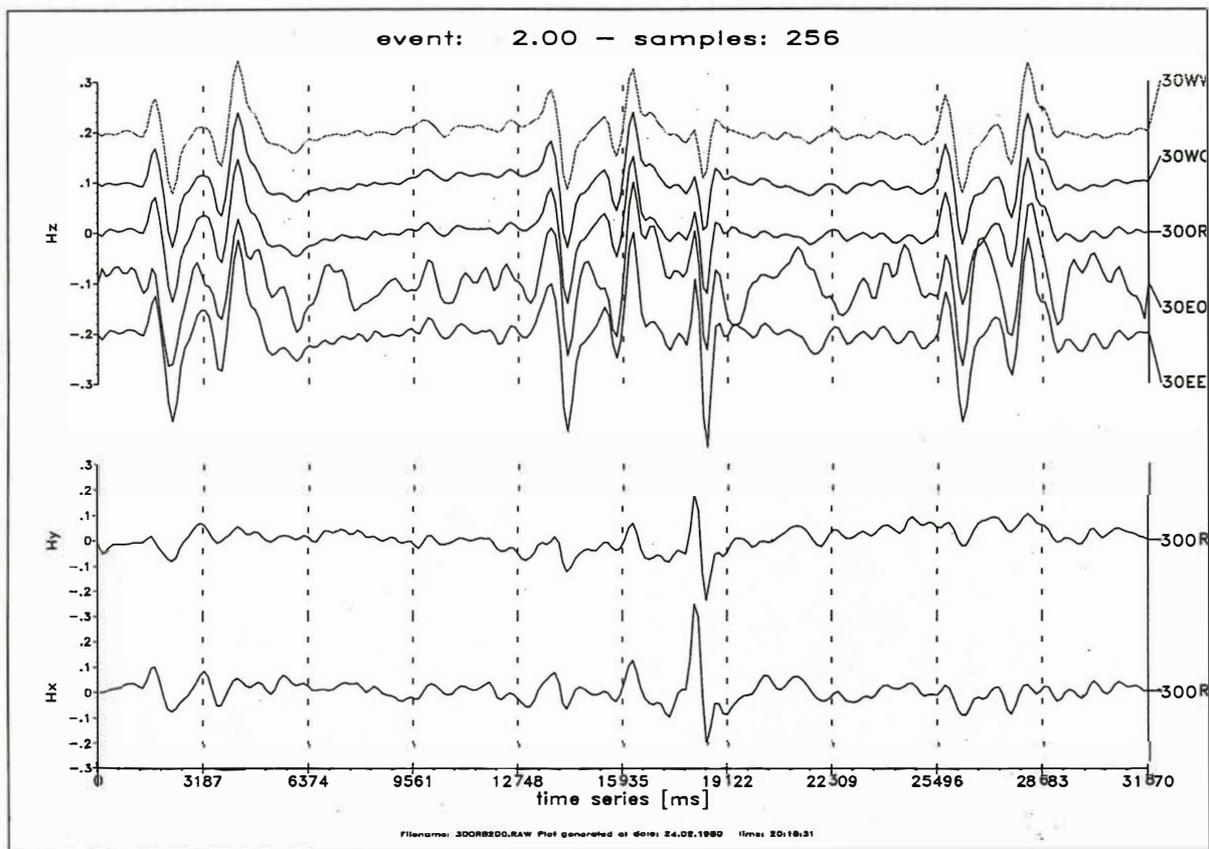


Abbildung 4: Zeitreihenbeispiel mit Störsignalen für Stationen von der nördlichen Profilstseite.

Störungen weniger stark beeinflusst zu sein. Was man in der Abbildung sieht, dürfte das bandpassgefilterte Resultat eines ursprünglich mehr impulsartig verlaufenden Signals sein. Impulsförmige Signale sind die schädlichsten Rauschformen, da sie weite Teile des Frequenzspektrums beeinträchtigen. Oftmals verfälschen diese Signale alle Komponenten der elektromagnetischen Felder gleichermaßen und können daher nicht von den auf Kohärenz beruhenden (on-line) Processingverfahren unterdrückt werden. Auch durch ein robustes Nachprocessing der Daten<sup>3</sup> können diese Störer nicht immer wirkungsvoll unterdrückt werden.

Bevor wir mit der eigentlichen Diskussion der Ergebnisse beginnen, ist es hilfreich sich mit dem für diese geologische Situation zu erwartenden Resultat vertraut zu machen. Abbildung 5 zeigt dazu als eine erste Approximation an die Geologie ein einfaches 2D Modell, welches mit Geotools erstellt worden ist. Das Modell ist im unteren Teil des Bildes geplottet und es besteht aus einer  $10 \Omega m$  gutleitenden,  $1 km$  dicken Schicht, welche in eine  $1000 \Omega m$  schleitende Umgebung eingebettet ist. Das Modell erstreckt sich horizontal über  $5 km$  und darauf verteilt sind 14 Modellstationen. Für diese Stationen sind in den oberen beiden Graphen die ÜFs der vertikalen Magnetfelder als Isolinienpläne dargestellt.

Die obere linke Abbildung zeigt eine Pseudo-Tiefensektion des Realteils der ÜF<sup>4</sup>  $Z_H$ , während die rechte obere Abbildung die Imaginärteile zeigt. Die Realteile schwanken zwischen negativen (dunkel) und Werten um Null (hell). Der Rand der Leitfähigkeitsgrenze wird dabei sichtbar als Übergang von leicht negativen ( $< -0.4$ ) zu stark negativen Werten (bis  $-1$ ). Die Anomalie ist deutlich über einen weiten Frequenzbereich ( $1000 Hz - 10 s$ ) zu erkennen, wobei die laterale Leitfähigkeitsgrenze das ausgeprägteste Merkmal ist. Bei den höchsten Frequenzen ist die hori-

<sup>3</sup>basierend auf A. Junges Verfahren.

<sup>4</sup>In einem geeigneten Koordinatensystem ist im 2D Fall die  $Z_D$  Komponente immer 0.

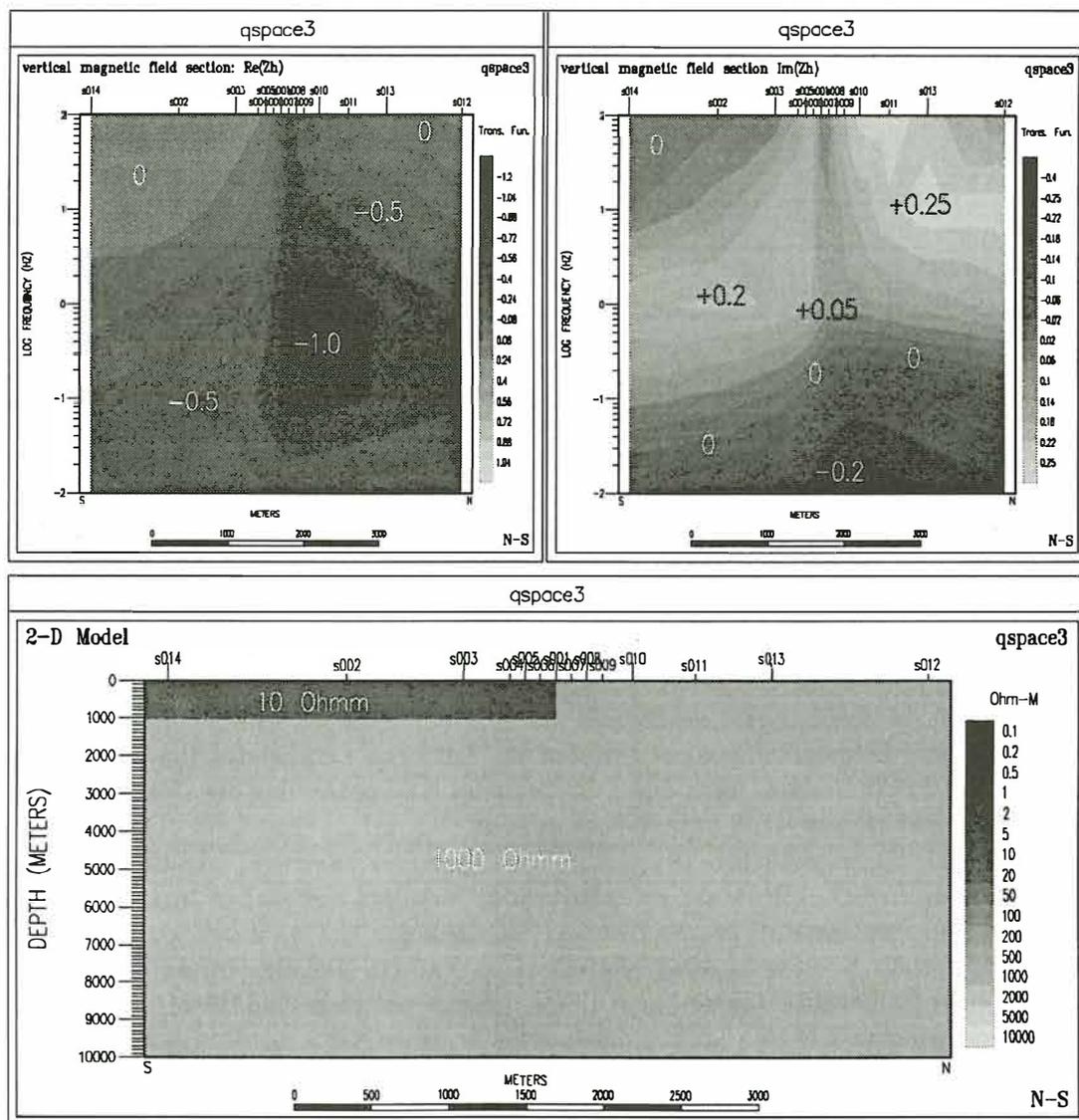


Abbildung 5: 2D Model als eine erste elektromagnetische Approximation an die zu erwartende geologische Situation.

zontale Erstreckung der Anomalie gering, während sie sich zu längeren Perioden hin ausweitet.

Die Anomalie ist auch durch die Imaginärteile angedeutet, allerdings im Vergleich zu den Realteilen mit geringeren Amplituden. Mit zunehmender Eindringtiefe, bei einer Periode von ca. 1 s, ändert sich jedoch das Vorzeichen der ÜFs. In der Zone zwischen 1 s und 10 s sind die Imaginärteile minimal und dies korrespondiert mit einer Zone maximaler Realteile. Mit diesem charakteristischen Verhalten der ÜFs werden die zugrundeliegenden physikalischen Prozesse wiedergespiegelt. Für die höchsten Frequenzen (kleine Eindringtiefen) ist Induktion der dominierende Vorgang, die anomalen Ströme werden im guten Leiter durch die Anomalie selbst erzeugt. Die Tiefe der maximalen anomalen Ströme ist dann erreicht, wenn die anomalen Felder gerade in Phase mit den induzierenden Feldern sind. Zu den längeren Perioden hin werden die Ströme außerhalb der Anomalie in viel größerer Tiefe erzeugt und zu dem Oberflächenleiter hin abgelenkt; dieses Phänomen kann also als *Gleichstromverzerrung* betrachtet werden.

Abbildung 6 zeigt als Beispiel für die Ergebnisse der Felddaten ÜFs von den Stationen vom südlichen Teil des Profils. Dargestellt sind die Real- und Imaginärteile von  $Z_H$ . Die Stationen 60 stammen vom südlichsten Teil des Profils und sind ca. 1.2 km von den 10er Stationen entfernt, die über die Störung hinweggehen. Von der letzten 60er-Station (60ww) bis zur ersten 10er-Station (10EE) hat sich das negative Maximum der Anomalie fast verdoppelt (unterschiedliche Achsenskalierung!). Während sich zwischen den 60er-Stationen nur wenig ändert, sind die Unterschiede zwischen den einzelnen Stationen des 10er Sets gewaltig. Zunächst vermerken wir einen moderates aber beständiges Anwachsen der Anomalie zwischen 10EE, 10EO und 10OR, dann aber, bei 10WO, einen enormen Anstieg auf Werte bis zu -8 und nur 100 m weiter entfernt einen umgekehrten Verlauf der ÜFs.

Mit Ausnahme von 10ww scheinen diese Stationen ein ähnliches Ergebnis anzudeuten wie für das vorher diskutierte Modell. Die Stationen im SO zeigen die schlechter leitende Seite des Profils durch negative Werte an. Maximal negative Werte werden bei den Stationen in der Nähe des Leitfähigkeitskontrastes im Frequenzbereich zwischen 1 Hz und 10 Hz erreicht. Mit zunehmendem Abstand von der Störungslinie flacht die Anomalie langsam nach SO hin ab.

In der nächsten Abbildung (7) sind die ÜFs an diskreten Frequenzen für alle Stationen über dem Profil dargestellt. Dabei wird deutlich wie abrupt die Anomalie im NW abbricht. Überhaupt ist durch die unglückliche Profillücke der Verlauf der Anomalie über den besser leitenden Sedimenten nur sehr schlecht aufgelöst. Ausschließlich an Station 10ww sieht man eindeutig eine Vorzeichenumkehr, während die anderen nördlichen Stationen 30ww-50OR nur neutrale bis leicht positive Werte einnehmen. Die Imaginärteile der  $Z_H$  ÜFs zeigen aber das erwartete Muster, mit der Vorzeichenumkehr im Frequenzbereich der maximalen Realteile. Beginnend mit der höchsten Frequenz von 68 Hz bis hin zu 2.2 Hz wachsen die Realteile auf maximal negative Werte an, während die Imaginärteile von leicht positiven zu Werten um 0 wechseln. Es wird aber auch deutlich, wie ungenau die ÜFs im nördlichen Teil des Profils bestimmt sind. Interessant ist, daß sie bei 2.2 Hz positive Werte annehmen und damit einen schlechten Leiter weiter im Norden anzudeuten scheinen. Ein schnelleres Abklingen der Anomalie über den gutleitenden Sedimenten ist hingegen zu erwarten.

Im Vergleich zu den  $Z_H$  Resultaten sind die  $Z_D$  ÜFs wesentlich kleiner und auch weniger einheitlich. Die Imaginärteile von  $Z_D$  scheinen sogar zweimal den Verlauf zu ändern. Bei entsprechenden Versuchen  $Z_D$  durch Rotation des Koordinatensystems zu minimieren, konnten keine konsistenten Drehwinkel gefunden werden. Da das Profil bereits in etwa senkrecht zum erwarteten Streichen verläuft, muß bei diesen Daten daher von einer dreidimensionalen Struktur des Untergrundes ausgegangen werden. Dies wird auch durch die Stärke der Anomalie unterstützt, die bei den Felddaten Werte von -2 übersteigt, während mit 2D Modellen auch bei extremen Leitfähigkeitskontrasten nur Maximalwerte um -1 erzielt werden können.

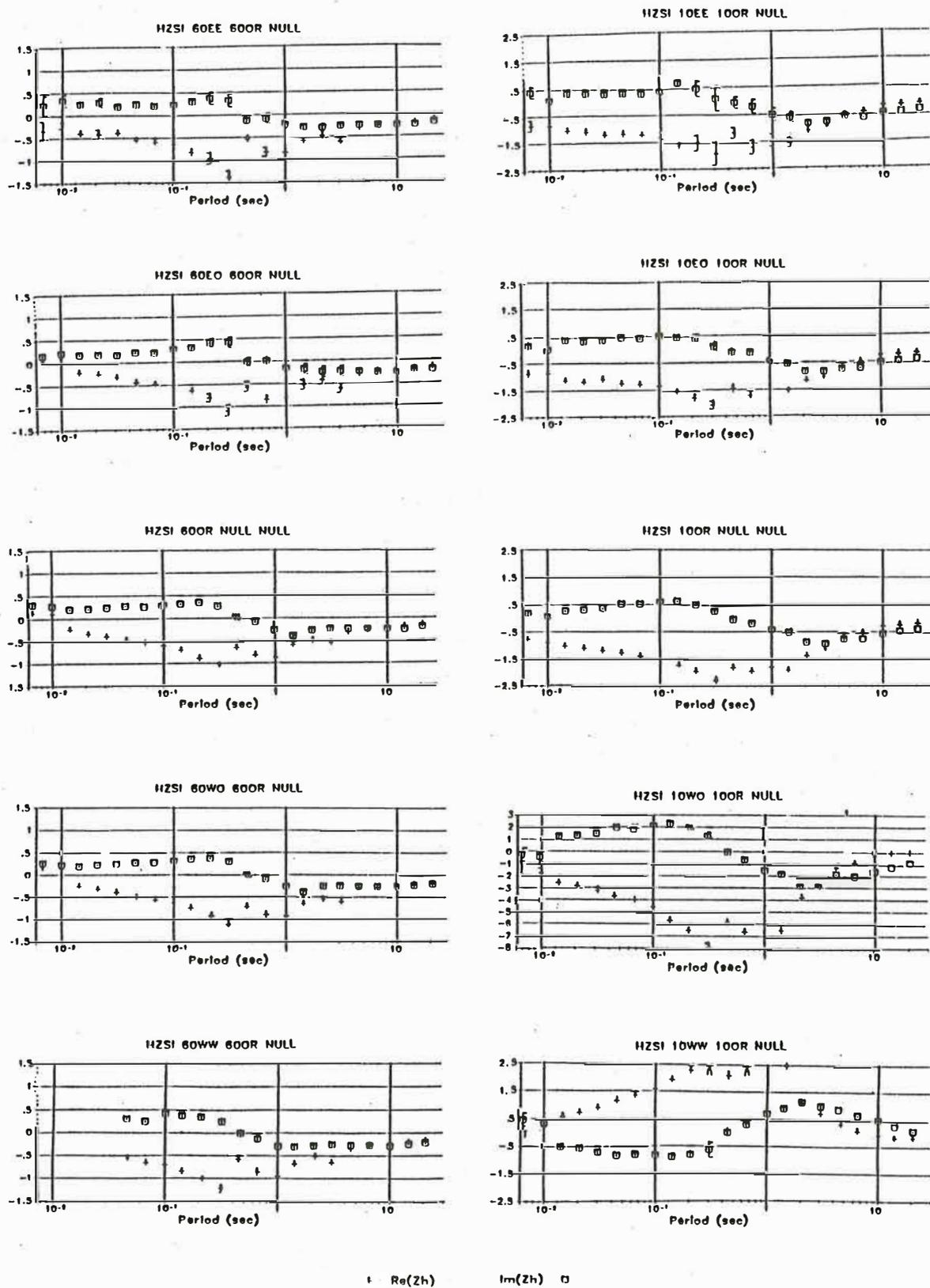
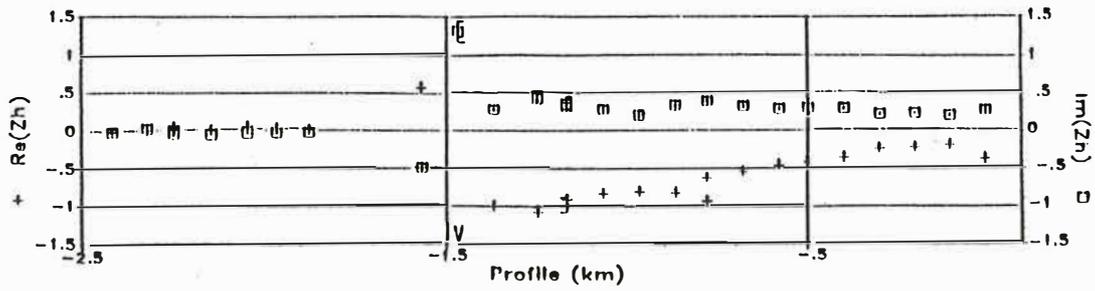


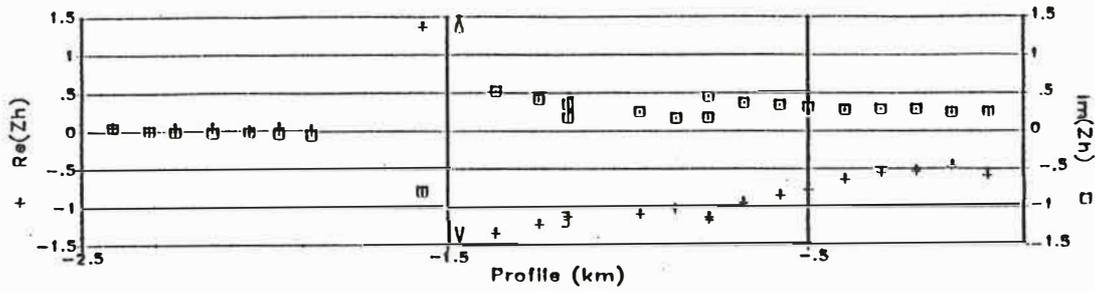
Abbildung 6: Darstellung der Real- und Imaginärteile der  $Z_H$  Übertragungsfunktionen über der Frequenz.

Local Vertical H-Field (profiling)

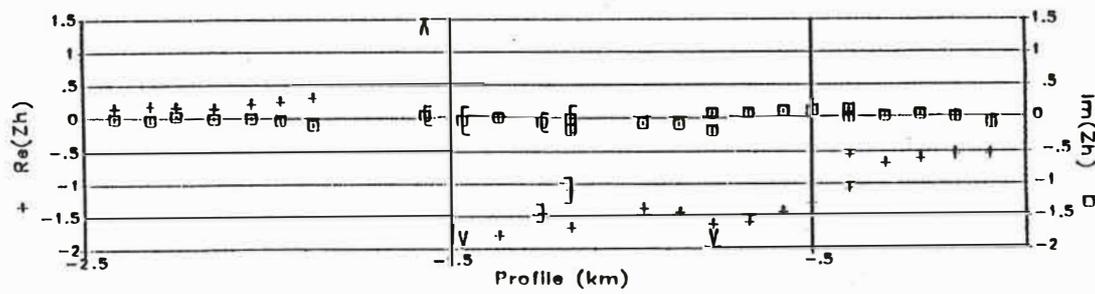
F = 68.13Hz



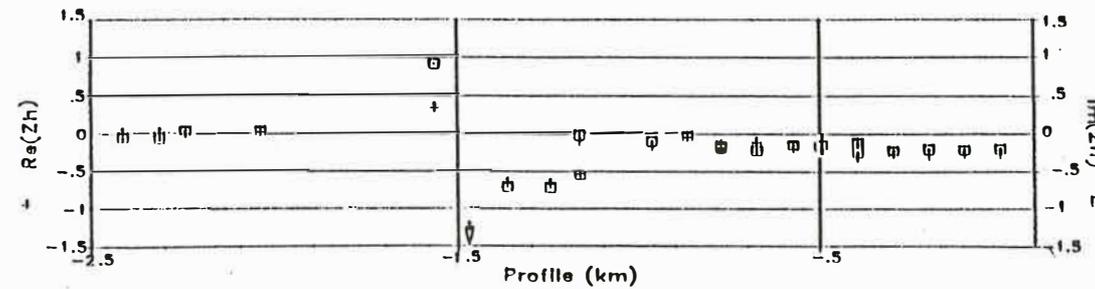
F = 14.68Hz



F = 2.15Hz



T = 4.64 s



T = 14.68 s

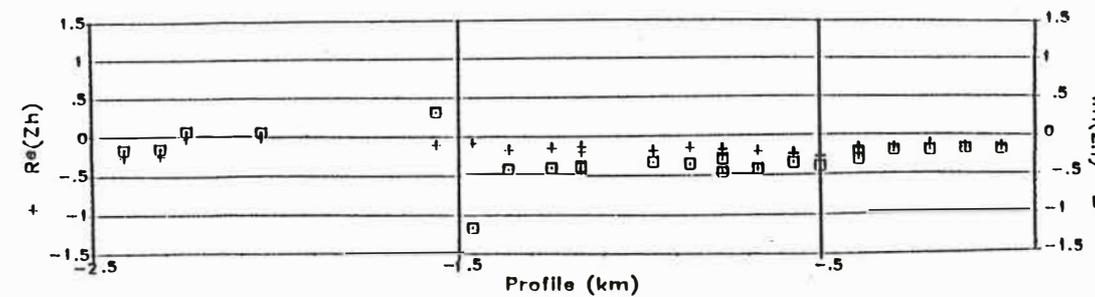


Abbildung 7: Darstellung der Real- und Imaginärteile der  $Z_H$  Übertragungsfunktionen an diskreten Frequenzen über dem Profil.

### 3D dünne Schichten Modellierung

Im letzten Abschnitt haben wir aus der Größe der Anomalie und dem Nichtverschwinden der  $Z_D$ -Komponente gefolgert, daß die Daten eine dreidimensionale Situation widerspiegeln. Die Resultate der 3 MT- Stationen, die auch nach Bahr'scher Dekomposition hohe Skew-Werte aufweisen, bestätigen dieses Ergebnis. Gegenwärtig ist es jedoch kaum möglich, anhand von 3D Modellierungen eine Anpassung an Meßdaten zu erreichen. Die Rechenzeit für die 3D-Vorwärtsrechnung liegt in der Größenordnung von Stunden für jede Frequenz und die Anzahl der Gitterpunkte für die Modelle ist sehr begrenzt. Wir beschränken uns daher auf die Betrachtung eines Teilaspektes, indem wir untersuchen, ob die Maximalwerte der Anomalie ( $Z_H > -2$ ) mit dreidimensionalen Strukturen zu erreichen sind.

Zur Verfügung stand uns hierzu das 3D dünne Schichtenprogramm nach [McKirby et al., 1985] in einer Implementierung von P. Jones auf einer SUN workstation. Maximal können damit 22x22 Zellen in die dünne Schicht eingebaut werden. Ein solches Eingabemodell ist in Abbildung 8 dargestellt. Wie man sieht, besteht das Modell aus einem  $10 \Omega m$  gutleitenden Kanal, der in

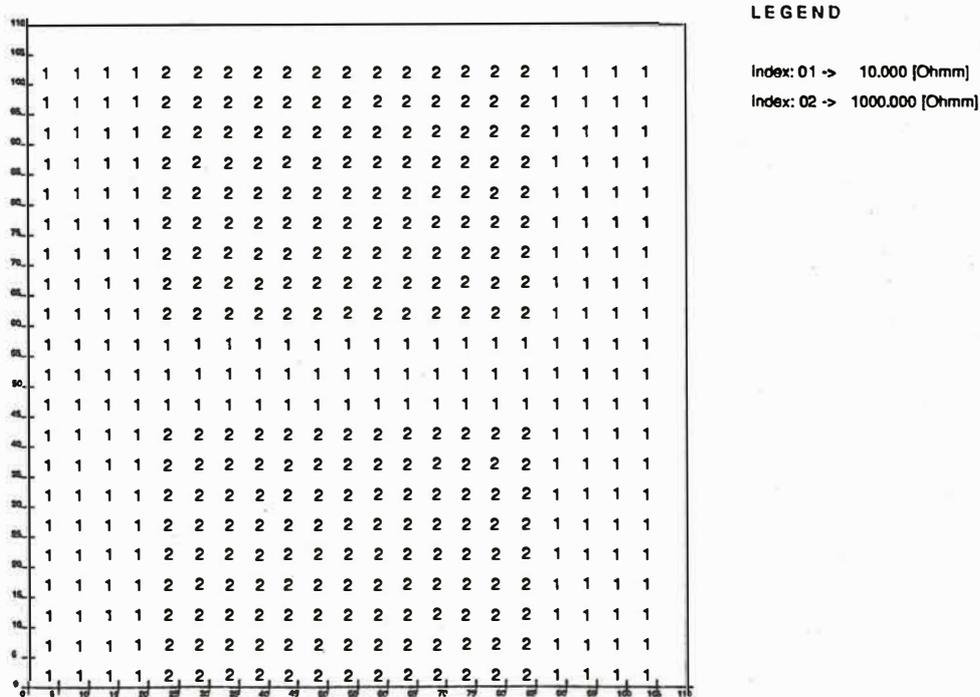


Abbildung 8: Dünne Schicht: Eingabemodell

eine schlechtleitende Umgebung eingebettet ist ( $1000 \Omega m$ ); die Tiefe der dünnen Schicht beträgt  $500m$ , die horizontalen Erstreckungen des Modells jeweils  $2000m$ . Mit einem solchen Modell erreicht man eine starke Bündelung der Ströme in den gutleitfähigen Kanal an der Oberfläche hinein, und die Auswirkungen auf die Parkinson-Induktionspfeile<sup>5</sup> sind in der Abbildungen 9 dargestellt.

Bei der höchsten Frequenz von  $10 Hz$  ist die Anomalie noch wenig ausgeprägt, lediglich die Imaginärpfeile (rechtes oberes Bild in Abb.9) deuten auf die Ränder der Leitfähigkeitsanomalie hin. Einschränkend muß man aber darauf hinweisen, daß die Eindringtiefe der elektromagnetischen Felder für die leitenden Bereiche des Modells gerade der Tiefe der dünnen Schicht entspricht

<sup>5</sup>in der Parkinson Konvention zeigen die Realpfeile zum guten Leiter hin, während die Wiesepfeile davon wegdeuten. Die Imaginärpfeile sind in beiden Konventionen einheitlich.

und daher die Voraussetzung für eine solche Betrachtung eigentlich verletzt ist. Bei der nächsten Frequenz (1 Hz) ist die Anomalie deutlich erkennbar. Die Realpfeile erreichen Werte bis zu 1.5, die Imaginärpfeile sind ebenfalls groß und zeigen in die Richtung der Realpfeile. Bei 10 s in Abb. 9 nehmen die Realpfeile Maximalwerte  $> 1.75$  ein, während die Imaginärpfeile auf minimale Werte abfallen. Zu den längsten Perioden hin (100 s) werden die Realpfeile wieder kleiner, die Länge der Imaginärpfeile bleibt in der gleichen Größenordnung, sie sind um  $180^\circ$  gedreht und zeigen entgegengesetzt zu den Realpfeilen.

Zum Vergleich hierzu nun die Induktionspfeile der Meßdaten, die aber in der Wiese Konvention gezeichnet sind (Abb. 10). Real und Imaginärpfeile zeigen deshalb bei der höchsten Frequenz von 68.1 Hz - in Übereinstimmung mit den Modellergebnissen - um  $180^\circ$  entgegengesetzt. Mit abnehmenden Frequenzen verschwinden die Imaginärpfeile (2.2 Hz), während in der Nähe der Leitfähigkeitgrenze die Realpfeile Maximalwerte um 2 einnehmen. Mit zunehmenden Eindringtiefen wachsen die Imaginärpfeile wieder an und zeigen, wie erwartet, in Richtung der Realpfeile. Das Abdrehen der Induktionspfeile mit zunehmender Periode von SO nach SW und der Winkel zwischen Real- und Imaginärpfeil bei 14.7 s können durch das dünne Schichtenmodell allerdings nicht erklärt werden. Auch die Richtung der Induktionspfeile an Station 10wo kann durch natürliche Ursachen kaum erklärt werden.

In diesem Band befindet sich ein sehr interessanter Beitrag von T. Hanstein, der sich mit dem Einfluß von Pipelines auf MT Ergebnisse befasst. Es wird gezeigt, daß insbesondere die vertikalen ÜFs stark betroffen sind, wenn das Verhältnis der Leitfähigkeiten von Pipeline zur Umgebung  $10^9$  oder mehr ist. Die künstlich erzeugten Induktionspfeile zeigen dann immer weg von der Pipeline. Ein solcher Effekt scheint sich in den Daten tatsächlich bei 68 Hz in (Abb.10) einzustellen, allerdings zeigen die Induktionspfeile bei längeren Perioden fast senkrecht zur Pipeline.

In dem Beitrag wird die Pipeline als Linienstrom eines unendlich langen Zylinders modelliert. Da Pipelines aber normalerweise elektrisch unterbrochen werden, dürften die Auswirkungen letztlich geringer sein.

### Zusammenfassung

In einem Experiment im Südosten Schottlands wurde über eine bekannte geologische Struktur hinweg (Southern Uplands Fault) mit 24 Meßstationen auf einem Profil von ca. 2.5 km Länge eine dichte Kartierung der Vertikalfeldvariationen durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen überraschend hohe anomale Werte ( $> -2$ ) für die vertikalen magnetischen Übertragungsfunktionen im Bereich des erwarteten Verlaufs der Störung.

Obwohl die Daten sicherlich sehr ungewöhnlich sind und Probleme mit Störsignalen bestehen, ist eine genauere Untersuchung der Ergebnisse interessant. Generell ist die Datenqualität befriedigend. Die Übertragungsfunktionen variieren glatt und konsistent zwischen benachbarten Stationen und über den gesamten Frequenzbereich hinweg. Eine Zone anomaler Leitfähigkeit ist klar erkennbar, belegt mit vielen dicht vermessenen Stationen und im richtig gewählten Frequenzbereich (100 Hz - 100 s).

Extreme Anomaliewerte für die ÜFs des Vertikalfeldes können durch Strombündelung in einem oberflächennahen leitfähigen Kanal erklärt werden. Letztlich handelt es sich bei diesem Datensatz wohl aber um eine nicht trennbare Überlagerung von künstlich und natürlich erzeugten Anomalien, die eine abschließende geologische Interpretation außerordentlich schwierig macht.

### Literatur

McKirdy, D. M., Weaver, J. T., and Dawson, T. W. [1985]. Induction in a thin sheet of variable conductance at the surface of a stratified Earth - II. Three-dimensional theory. *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 80:177-194.

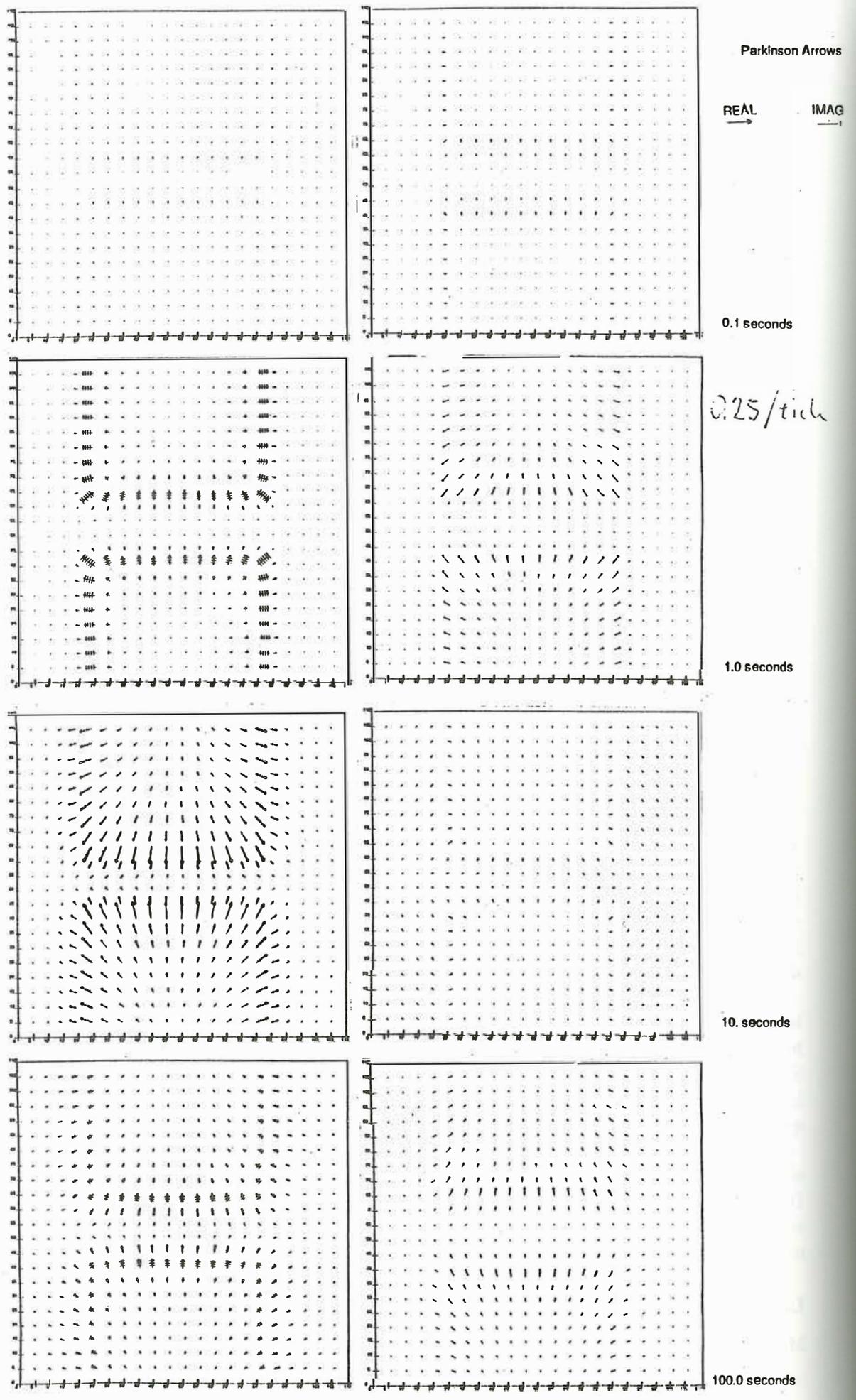


Abbildung 9: Induktionspfeile in Parkinson Konvention für die Frequenzen 10 Hz bis 100 s (Modelldaten).

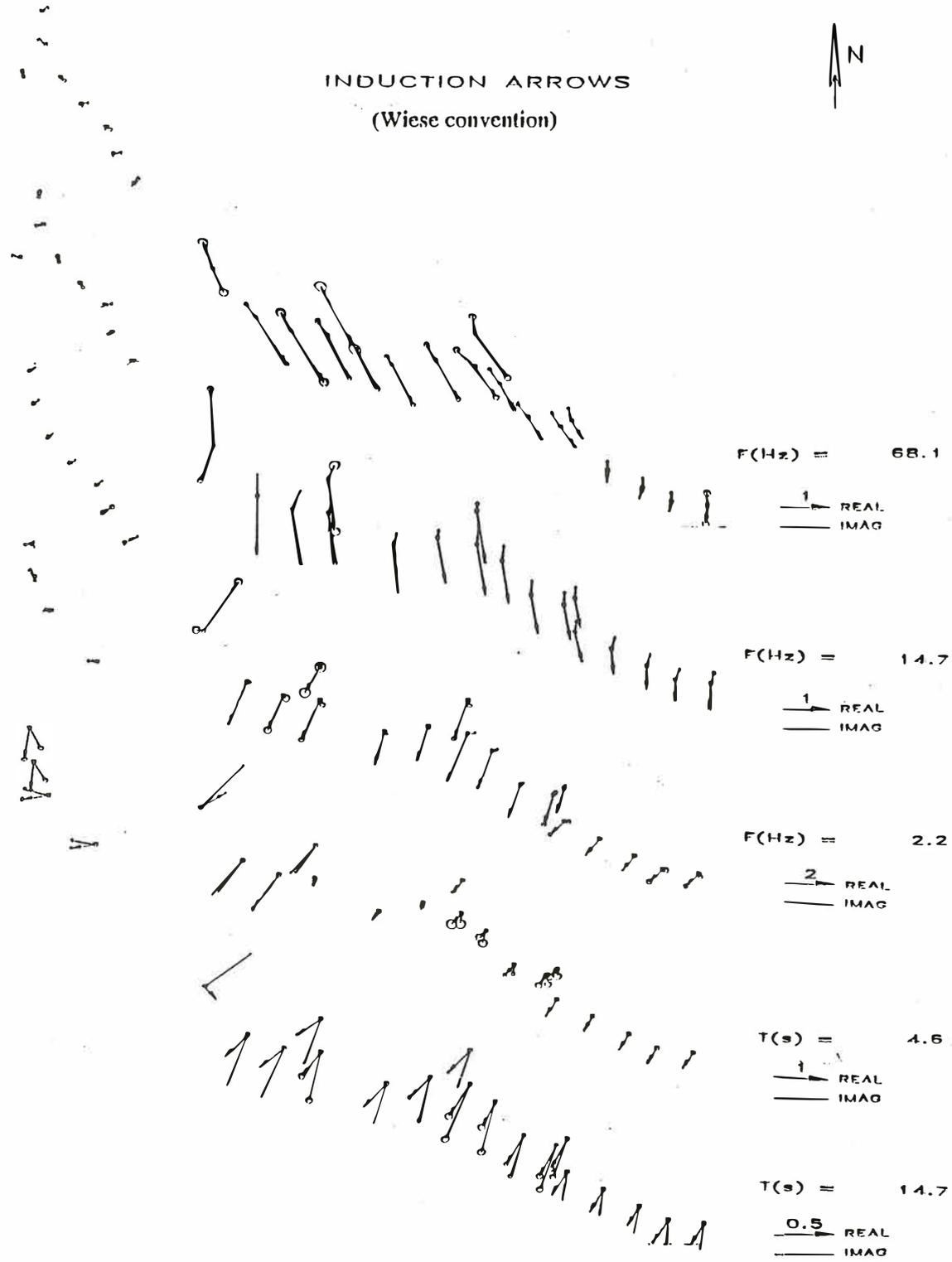


Abbildung 10: Unrotierte Real und Imaginärpfeile der Meßdaten an diskreten Frequenzen.