

# Anwendung der spektralen Induzierten Polarisation in der archäologischen Prospektion

Dissertation  
zur Erlangung des Doktorgrades  
der Naturwissenschaften

vorgelegt beim Fachbereich Geowissenschaften/Geographie (11)  
der Johann Wolfgang Goethe-Universität  
in Frankfurt am Main

von  
Norbert Schleifer  
aus München

Frankfurt, den 16. Dezember 2002

vom ..... der  
Johann Wolfgang Goethe-Universität als Dissertation angenommen.

Dekan: .....

Gutachter: .....

Datum der Disputation: ..... 21.03.03

# Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung.....	11
1.1 Das Graduiertenkolleg „Archäologische Analytik“ .....	11
1.2 Problemstellung und Ziel der Arbeit .....	11
1.2.1 Technischer Aspekt .....	11
1.2.2 Wissenschaftlicher Aspekt .....	11
1.3 Gliederung der Arbeit .....	12
2 Stand der Forschung .....	13
2.1 Geophysikalische Prospektionsmethoden in der Archäologie.....	13
2.2 Die Induzierte Polarisaiton in der Archäologischen Prospektion.....	14
2.3 Anwendungsgebiete der Induzierten Polarisisation .....	14
3 Grundlagen der Induzierten Polarisisation .....	15
3.1 Einleitung.....	15
3.2 Der scheinbare spezifische Widerstand .....	15
3.3 Elektrische Eigenschaften polarisierbarer Medien .....	16
3.4 Messmethoden und Messgrößen.....	17
3.4.1 Zeitbereich .....	17
3.4.2 Frequenzbereich .....	18
3.4.3 Die komplexe Leitfähigkeit .....	18
3.4.4 Die Spektrale Induzierte Polarisisation (SIP) .....	19
3.4.5 Beziehungen zwischen den Messgrößen.....	19
3.5 Ursachen und theoretische Modelle.....	20
3.5.1 Metallische Leiter .....	21
3.5.2 Tonminerale.....	25
3.5.3 Porosität .....	26
3.5.4 Ionenkonzentration und chem. Zusammensetzung der Porenlösung.....	27
3.5.5 Störeffekte .....	29
4 Die Multielektrodenapparatur SIP-256 .....	31
4.1 Das Konzept.....	31
4.2 Die Messapparatur .....	31
4.3 Die Steuerung .....	32

4.4 Messablauf.....	34
4.4.1 Messkonfiguration .....	34
4.4.2 Aufbau der Messanordnung.....	36
4.4.3 Sendesignal .....	37
4.4.4 Bestimmung des Signal/Rausch-Verhältnisses .....	38
4.4.5 Messung .....	38
4.4.6 Normale und reverse Messung.....	40
4.5 Kalibrierung der Remote Units.....	41
5 Datenverarbeitung.....	45
5.1 Einleitung.....	45
5.2 Das Präprozessing in den Remote Units.....	46
5.3 Abschluss des Datenprozessings, Driftkorrektur und erste Beurteilung der Datenqualität .....	47
5.3.1 Das Programm con_a2a .....	47
5.3.2 Driftkorrektur .....	48
5.3.3 Erste Beurteilung der Datenqualität (Varianzen) .....	49
5.4 Erstellen und Bearbeiten der Pseudosektionen.....	49
5.4.1 Das Programm section .....	49
5.4.2 Visualisierung.....	50
5.4.3 Korrektur des Geometriefaktors.....	50
5.4.4 Entfernen von Elektroden Spuren.....	50
5.4.5 Beseitigung einzelner Messwerte.....	51
5.4.6 Berechnung des Percent Frequency Effect (PFE).....	51
5.5 Datenselektion .....	51
5.6 Filterung und Konvertierung der Daten.....	53
5.7 Inversion .....	53
6 Vergleichende Untersuchungen zur Auswahl der Messelektroden.....	55
6.1 Einleitung.....	55
6.2 Bewertungskriterien.....	56
6.2.1 Varianzen.....	56
6.2.2 Reziprozität .....	56
6.2.3 Reziprozität in Abhängigkeit von Stromamplitude und Frequenz.....	57
6.3 Resultate.....	57
6.3.1 Pandelbachtal bei Seesen am Harz.....	57
6.3.1.1 Messgebiet und -aufbau.....	57
6.3.1.2 Varianz.....	58
6.3.1.3 Reziprozität .....	59

6.3.1.3.1 Vergleich A-B .....	59
6.3.1.3.2 Vergleich A-C .....	60
6.3.1.3.3 Vergleich B-C .....	61
6.3.1.3.4 Zusammenfassung .....	62
6.3.1.4 Frequenzverhalten .....	62
6.3.1.5 Zusammenfassung .....	64
6.3.2 Büraberg (Nordhessen) .....	65
6.3.2.1 Messgebiet und -aufbau.....	65
6.3.2.2 Varianz.....	65
6.3.2.3 Reziprozität .....	66
6.3.2.4 Frequenzverhalten .....	67
6.3.2.5 Zusammenfassung .....	69
6.3.3 Federseemoor .....	69
6.3.3.1 Messgebiet und -aufbau.....	69
6.3.3.2 Varianz.....	70
6.3.3.3 Reziprozität .....	71
6.3.3.4 Frequenzverhalten .....	72
6.3.3.5 Zusammenfassung .....	73
6.4 Zusammenfassung .....	74
7 Ergebnisse.....	75
7.1 Zur Auswahl der Messobjekte .....	75
7.2 Verhüttungsplatz im Pandelbachtal bei Seesen am Harz.....	76
7.2.1 Archäologischer Hintergrund.....	76
7.2.2 Untersuchungsobjekt.....	76
7.2.3 Messanordnung .....	76
7.2.4 Ergebnisse .....	78
7.2.4.1 Auswertung der 2D-Messung.....	78
7.2.4.1.1 Phase und Widerstand.....	79
7.2.4.1.2 PFE .....	81
7.2.4.1.3 Inversion .....	82
7.2.4.1.4 Interpretation .....	83
7.2.4.2 Auswertung der 3D-Messung.....	83
7.2.5 Zusammenfassung.....	86
7.3 Frühmittelalterlicher Siedlungshorizont in Pliska (Bulgarien).....	87
7.3.1 Archäologischer Hintergrund.....	87
7.3.2 Untersuchungsobjekt.....	87
7.3.3 Messanordnung .....	89

7.3.4 Messergebnisse .....	89
7.3.5 Inversion.....	93
7.3.6 Grabungsbefund .....	96
7.3.7 Zusammenfassung der Ergebnisse .....	97
7.3.8 Schlussfolgerung .....	98
7.4 Untersuchung eines bronzezeitlichen Bohlenwegs.....	99
7.4.1 Archäologischer Hintergrund.....	99
7.4.2 Untersuchungsobjekt.....	99
7.4.3 Labormessungen .....	100
7.4.3.1 Messaufbau.....	100
7.4.3.2 Präparation der Proben .....	101
7.4.3.3 Ergebnisse .....	102
7.4.3.3.1 Eschenprobe.....	102
7.4.3.3.2 Erlenprobe .....	103
7.4.3.4 Zusammenfassung .....	104
7.4.4 Feldmessung.....	105
7.4.4.1 Aufbau .....	105
7.4.4.2 Ergebnisse .....	106
7.4.4.2.1 Profil A-B .....	106
7.4.4.2.2 Profil C-D .....	107
7.4.4.3 Inversion .....	109
7.4.4.3.1 Profil A-B .....	109
7.4.4.3.2 Profil C-D .....	109
7.4.4.4 Zusammenfassung .....	111
7.4.5 Frequenzspektrum des Bohlenwegs.....	111
7.4.6 Äquivalenzmodelle .....	113
7.4.6.1 Anpassung der 2D-Modelle an die Messdaten.....	116
7.4.6.2 Schlussfolgerungen .....	116
7.4.7 Zusammenfassung.....	119
8 Zusammenfassung .....	121
9 Summary.....	125
Anhang A: Das Programm eichpop.exe und die Korrekturparameter der RU's.....	131
Anhang B: Software zur Datenbearbeitung .....	133
Anhang C: Das Programm d3d und alle verfügbaren d3d-Filter.....	137
Anhang D: Visualisierung der Daten .....	139
Literatur .....	141

# Kapitel 1: Einleitung

## 1.1 Das Graduiertenkolleg „Archäologische Analytik“

Das Graduiertenkolleg „Archäologische Analytik“ an der Johann Wolfgang Goethe-Universität existiert seit 1997 und ist auf eine Gesamtlaufzeit von neun Jahren konzipiert. Ziel dieses, von der Deutschen Forschungsgesellschaft (DFG) getragenen Projekts, ist, die Zusammenarbeit von Geisteswissenschaftlern und Naturwissenschaftlern zu fördern. Promotionen, die im Rahmen des Kollegs durchgeführt werden, sollen zur Lösung interdisziplinärer Fragestellungen beitragen oder beinhalten interdisziplinäre Lösungsansätze fachspezifischer Fragestellungen. Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen des Graduiertenkollegs „Archäologische Analytik“ am Institut für Meteorologie und Geophysik, Fachbereich Geowissenschaften, angefertigt.

## 1.2 Problemstellung und Ziel der Arbeit

Die vorliegende Arbeit umfasst zwei Schwerpunkte. Einen Schwerpunkt bildet die Weiterentwicklung der Multielektrodenapparatur SIP-256, den zweiten Schwerpunkt bildet die Erforschung möglicher Anwendungsgebiete der spektralen Induzierten Polarisation (SIP) in der archäologischen Prospektion mit Hilfe dieser Apparatur.

### 1.2.1 Technischer Aspekt

Die Basis für die Realisierung dieser Arbeit wurde durch die Weiterentwicklung der Apparatur SIP-256 (Bigalke et al., 1999) gelegt. Angefangen vom Zusammenbau einzelner Komponenten bis zur Entwicklung einer weitgehend automatisierten Bedienungs- und Auswertesoftware, umfasste dieser Schwerpunkt eine breite Palette von Aufgaben. Im Vordergrund der Weiterentwicklung stand der Gedanke, mit der SIP-256 eine Apparatur zu konzipieren, die es erlaubt flexibel auf unterschiedlichste wissenschaftliche Fragestellungen zu reagieren. Da sich die wissenschaftliche Fragestellung während dieser Promotion auf die Erkundung archäologischer Objekte beschränkt, lag der Schwerpunkt der Entwicklung zunächst in der Realisierung von Messabläufen, die es erlauben, die komplexe elektrische Leitfähigkeit kleinräumiger zwei-, bzw. dreidimensionaler Strukturen zu erfassen.

### 1.2.2 Wissenschaftlicher Aspekt

Bisher ist die Induzierte Polarisation (IP) ein in der archäologischen Prospektion kaum verwendetes Verfahren. Eine zentrale wissenschaftliche Fragestellung war, ob die spektrale Induzierte Polarisation in der Lage ist, archäologische Objekte aus Holz zu detektieren und deren Struktur zu erfassen. Holz spielt durch die dendrochronologische Datierung von Fundstellen eine wichtige Rolle in der Archäologie. Bisher konnten aber mit keiner geophysikalischen Methode Holzobjekte zufriedenstellend prospektiert werden (Bauerochse, 2000). Gut erhaltene Holzfunde werden meist nur aus einem feuchten Milieu geborgen. Die hohe elektrische Leitfähigkeit dieser Feuchtböden begrenzt die Eindringtiefe elektromagnetischer Wellen und unterscheidet sich kaum von der Leitfähigkeit der wassergesättigten Hölzer.

Im Rahmen dieser Arbeit sollte grundsätzlich untersucht werden, ob sich durch den Einsatz von Multielektrodenapparaturen die Polarisierbarkeit als zusätzlicher Bodenparameter in der archäologischen Prospektion etablieren lässt. Durch den Einsatz einer Multielektrodenapparatur, die sowohl den elektrischen Widerstand als auch die Polarisierbarkeit erfasst, sollte gezeigt werden, dass die gleichzeitige Erfassung der Polarisierbarkeit wichtige Zusatzinformationen über verborgene archäologische Objekte liefern kann.

### 1.3 Gliederung der Arbeit

Einen kurzen Abriss über geophysikalische Verfahren in der archäologischen Prospektion und einen Überblick über die Anwendungsgebiete der Induzierten Polarisation gibt *Kapitel 2*. Die Ursachen für die Polarisierbarkeit von Objekten und die theoretischen Grundlagen, die zum Verständnis der Arbeit benötigt werden, sind in *Kapitel 3* „Grundlagen der Induzierten Polarisation“ beschrieben. In *Kapitel 4* wird die Multielektrodenapparatur SIP 256 vorgestellt. Dabei wird noch einmal das Grundkonzept erläutert, das dieser Apparatur zugrunde liegt. Anschließend folgt eine detaillierte Beschreibung der Einzelkomponenten, der Steuerung und des Messablaufs. Die einzelnen Schritte des Datenprozessings, das die Beurteilung der Datenqualität und die Visualisierung der Messdaten bereits im Feld erlaubt, sind in *Kapitel 5* dokumentiert. In *Kapitel 6* folgt eine qualitative Vergleichsstudie unterschiedlicher Messelektroden unter Berücksichtigung unterschiedlicher Messgebiete. In *Kapitel 7* werden schließlich die Ergebnisse der Feldmessungen präsentiert. Drei Messobjekte wurden im Rahmen dieser Arbeit untersucht. Ein mittelalterlicher Verhüttungsplatz der Zisterzienser bei Seesen am Harz, ein frühmittelalterlicher Siedlungshorizont in Pliska (Bulgarien) und ein bronzezeitlicher Bohlenweg in Bad Buchau (Kr. Biberach). Bei jedem Untersuchungsobjekt wird dabei kurz auf den archäologischen Hintergrund und auf durchgeführte Voruntersuchungen eingegangen. Dazu gehören Prospektionsergebnisse anderer geophysikalischer Verfahren und Laboruntersuchungen an vor Ort entnommenen Proben. Die Zusammenfassung und Diskussion der Resultate unter Berücksichtigung der Problemstellung und Zielsetzung dieser Arbeit findet in *Kapitel 8* statt.

## Kapitel 2: Stand der Forschung

### 2.1 Geophysikalische Prospektionsmethoden in der Archäologie

Neben der Luftbildarchäologie (Scollar et al., 1990) haben sich zahlreiche geophysikalische Anwendungen in der archäologischen Prospektion etabliert. Vor etwa 50 Jahren wurden in England erstmals Messungen des elektrischen Widerstands des Untergrunds zur Detektion archäologischer Strukturen durchgeführt (Atkinson, 1952; Aitken, 1974). Heutige Fragestellungen an die Geophysik reichen von der Untersuchung großflächiger Fundplätze bis zur hochauflösenden Abbildung kleinräumiger, dreidimensionaler Strukturen (Wynn, 1986; Hesse, 1999; David, 1995; Doneus et al., 2001; Fassbinder und Irlinger, 1999; Becker et al., 1996; Scollar et al., 1990; Zickgraf, 1999). Ohne in die Substanz verborgener Strukturen einzugreifen liefern geophysikalische Verfahren eine detailgenaue Abbildung archäologischer Objekte, was sie zu einem wertvollen Hilfsmittel in der Archäologie und Bodendenkmalpflege macht.

Die am häufigsten angewandte Methode ist die Magnetometerprospektion. Unterscheidet sich eine archäologische Struktur, z. B. eine Mauer, in ihrer magnetischen Eigenschaft vom benachbarten, ungestörten Boden, führt dies zu einer messbaren Anomalie im Erdmagnetfeld. Eine positive magnetische Anomalie wird von einem Objekt hervorgerufen, das mit magnetischen Mineralen angereichert ist. In der Archäologie gehören dazu Feuerstellen, Öfen, gebrannte Ziegel, Gruben, Gräben und Gräber (David, 1995). Le Borgne (1955), der erstmals die Anreicherung von magnetischen Mineralen in Oberflächennähe durch Feuereinwirkung beobachtete und das Wechselspiel von Reduktion und Oxidation für die Bildung von magnetischen Mineralen in Betracht zog, legte den Grundstein für die ersten Magnetometermessung von archäologischen Strukturen (Belshe, 1957). Mullins (1977) beschreibt bereits vier Möglichkeiten, die zu einer Anreicherung von Magnetit in Böden führen und erwähnte in diesem Zusammenhang erstmals Mikroorganismen. Die Entdeckung von Fassbinder und Stanjek (1990) bestätigte die Vermutung, dass Bakterien zur Anreicherung magnetischer Minerale im Boden beitragen. Neben dem Verständnis der Ursachen (Maher, 1986; Maher and Taylor, 1989; Cornell und Schwertmann, 1996; Thompson and Oldfield, 1986; Verosub and Roberts, 1995), trugen vor allem Entwicklungen auf dem Gebiet der Messtechnik und Datenauswertung (Scollar, 1965; Scollar et al., 1986; Becker, 1996; Neubauer and Eder-Hinterleitner, 1997; Eder-Hinterleitner et al., 1996; Tabbagh et al., 1997; Tsokas et al., 1997) dazu bei, dass die Magnetometerprospektion heute die führende Rolle in der Anwendung geophysikalischer Verfahren einnimmt. Der Vorteil der magnetischen Prospektion liegt in einer hochauflösenden Messung großer Flächen in relativ kurzer Zeit.

Elektromagnetische Verfahren, wie das Ground Penetrating Radar (GPR) sind ebenfalls von großer Bedeutung und eignen sich vor allem zur Untersuchung von Fundamenten, befestigten Strassen, Steinstrukturen und Hohlräumen (David, 1995). GPR ermöglicht es, archäologische Prospektionen auf versiegelten Flächen durchzuführen und ein hochauflösendes, dreidimensionales Abbild der verborgenen Strukturen zu liefern (Vaughan, 1986; Lorra, 1996; Neubauer et al., 2002; Leckebusch and Peikert, 1999; Basile et al., 2000; Leckebusch, 2001).

Die Transientenelektromagnetik (TEM) (Scollar, 1962; Tite and Mullins, 1970; Tabbagh, 1974; Tabbagh, 1986; Hesse, 1999), deren Messgeschwindigkeit mit der Magnetik vergleichbar ist, hat den Vorteil, ohne eine direkte Ankopplung an die Oberfläche betrieben zu werden. Obwohl das Auflösungsvermögen einer TEM Messung nicht mit einer magnetischen Prospektion vergleichbar ist, besteht ihr Vorteil in der Bestimmung zweier Parameter, der elektrischen Leitfähigkeit und der magnetischen Suszeptibilität (Tabbagh, 1986; Hesse, 1999), was die Unterscheidung von metallischen von nichtmetallischen Objekten erlaubt.

Wie bereits zu Beginn angesprochen, besitzen die geoelektrischen Verfahren zur Messung des Widerstands die längste Tradition in der archäologischen Prospektion. Flächenhafte Messungen und Tiefensondierungen gehören auch heute noch zu den wichtigsten Methoden (Hesse et al., 1986; Herbich et al., 1997; Noel and Xu, 1991; Tsokas and Tsourlos, 1997) und haben sich vor allem bei der Erkundung von Gebäudestrukturen bewährt (David, 1995). Zu den geophysikalischen Verfahren, die nur bei speziellen Fragestellungen zum Einsatz kommen, gehören die Seismik (Carson, 1962; Stright, 1986; Karastathis et al., 2002), die Gravimetrie (Linford, 1998) und die Eigenpotentialmessung (SP) (Wynn und Sherwood, 1984).

Die Induzierte Polarisation (IP) ist ein geoelektrisches Verfahren und gehörte bislang zur Gruppe, die sich durch einen erhöhten Messaufwand auszeichnet oder deren Anwendungsmöglichkeiten nur auf wenige archäologische Fragestellungen begrenzt ist. Im folgenden Abschnitt sollen einige archäologische Objekte vorgestellt werden, bei denen die Induzierte Polarisation zum Einsatz kommt.

## 2.2 Die Induzierte Polarisation in der Archäologischen Prospektion

Über die Anwendung der Induzierten Polarisation in der archäologischen Prospektion berichteten erstmals Aspinall und Lynam in den Jahren 1968 und 1970. Die Anwendung kam dabei zur Detektion von Gräben und mit Schlacke und Kohle verfüllten Abfallgruben zum Einsatz. Seit Anfang der 70er Jahre gibt es kaum noch Veröffentlichungen über archäologische Objekte, die mit Hilfe der Induzierten Polarisation prospektiert wurden. Erst Ende der 90er Jahre finden sich wieder Veröffentlichungen, in denen das Verfahren im Zusammenhang mit archäologischen Fragestellungen erwähnt wird. Weller (2000) greift auf die Erfahrungen aus der Erzprospektion zurück und wendet das Verfahren zum Auffinden von Schlackegruben an. Eine Arbeitsgruppe aus Florenz (Losito, 2001; Finzi-Contini, 2001) präsentiert während der Tagung der European Geophysical Society (EGS) 2001 in Nizza zwei Beiträge über in-situ Messungen an römischen Schiffen, die einen ersten Ansatz darstellen, Holzobjekte mit Hilfe der Induzierten Polarisation (IP) zu untersuchen.

## 2.3 Anwendungsgebiete der Induzierten Polarisation

Die Induzierte Polarisation (IP) wurde ursprünglich zur Exploration von Erzvorkommen entwickelt (Wait, 1959). Elektronische Leiter wie Metalloxide, Metallsulfide und Graphit (van Voorhis et al., 1973; Pelton und Smith, 1976; Pelton et al., 1978; Klein und Shuey, 1978a; Klein und Shuey, 1978b; Bigalke und Junge, 1999) produzieren starke Polarisierungseffekte und lassen sich durch IP hervorragend prospektieren.

Unter bestimmten Rahmenbedingungen lassen sich auch Erdöl- und Erdgasvorkommen (Sternberg, 1991; Yanzhong und Guiqing, 1998) mit Hilfe dieses geophysikalischen Verfahrens explorieren. Zu den neueren Anwendungsgebieten gehört die Detektion von Altlasten (Weller et al., 2000; Aristodemou und Thomas-Betts, 2000) und der Grundwasserschutz (Olhoeft, 1985; Vanhala et al., 1992; Börner et al., 1993; Slater und Lesmes, 2002). Bei hydrogeologischen (Weller et al., 1996; Börner et al., 1996), sedimentologischen (Iliceto et al., 1982; Bussian, 1983; Vinegar und Waxman, 1984) und bodenkundlichen (Saarenketo, 1998; Vanhala und Soininen, 1995; Slater und Reeve, 2002) Fragestellungen kommt die Induzierte Polarisation ebenfalls zum Einsatz.

## Kapitel 3: Grundlagen der Induzierten Polarisation

### 3.1 Einleitung

Die Induzierte Polarisation (IP) ist eine geoelektrische Methode, welche die Frequenzabhängigkeit des spezifischen elektrischen Widerstands untersucht. Der untersuchte Frequenzbereich reicht in der Regel von 1 mHz bis 1 kHz. Die Apparaturen und Messkonfigurationen zur Anwendung der IP unterscheiden sich kaum von denen einer konventionellen Widerstandsmessung. Analog zur Gleichstromgeoelektrik werden Ergebnisse in Form von Sondierungskurven oder Pseudosektionen dargestellt (Edwards, 1977; Aspinall and Crummett, 1997).

### 3.2 Der scheinbare spezifische Widerstand

Der resultierende scheinbare spezifische Widerstand  $\rho_a$  einer geoelektrischen Messung mit einer Vierpunktanordnung (Abb. 3.2) definiert sich über den Geometriefaktor  $K$  und das Verhältnis zwischen eingespeistem Strom  $I$  und gemessener Potentialdifferenz  $\Delta V$ .

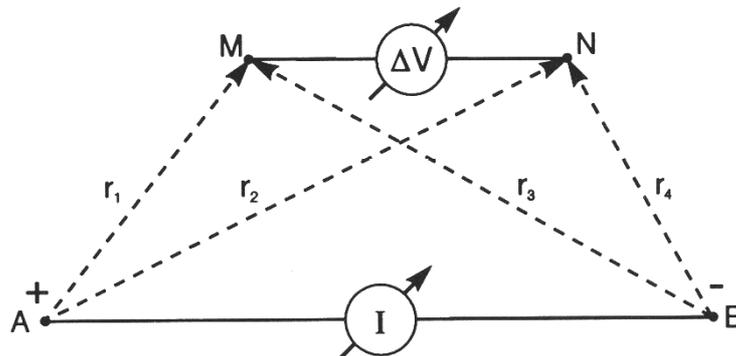


Abb. 3.2: Schematische Darstellung einer Vierpunktanordnung (aus Knödel et al., 1997).  
 A, B: Stromelektroden; M, N: Potentialelektroden

$$K = 1 / \left[ \frac{1}{2\pi} \cdot \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} \right) \right] \quad (3.2.1)$$

$K$ : Geometriefaktor [m];  $r_1$ : Abstand  $\overline{AM}$  [m] (siehe Abb. 3.2);  $r_2$ : Abstand  $\overline{AN}$  [m].  
 $r_3$ : Abstand  $\overline{BM}$  [m];  $r_4$ : Abstand  $\overline{BN}$  [m].

$$\rho_a = K \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (3.2.2)$$

$\rho_a$ : scheinbarer spezifischer Widerstand [ $\Omega\text{m}$ ];  
 $\Delta V$ : Potentialdifferenz [V];  $I$ : Stromstärke [A]

Man unterscheidet zwischen dem spezifischen Widerstand  $\rho$  und dem scheinbaren spezifischen Widerstand  $\rho_a$ . Der scheinbare spezifische Widerstand  $\rho_a$  ist eine reine Rechengröße und lässt nur bedingt Rückschlüsse auf die tatsächliche Widerstandsverteilung innerhalb des stromdurchflossenen Halbraums zu.

Eine Übersicht über die am häufigsten eingesetzten Elektrodenanordnungen finden sich unter anderem in Knödel et al., (1997) und Telford et al. (1990).

Als Leitfähigkeit  $\sigma_a$  ist der Kehrwert des scheinbaren spezifischen Widerstands definiert. Sie hat die Einheit Siemens pro Meter [S/m].

### 3.3 Elektrische Eigenschaften polarisierbarer Medien

Die elektrische Leitfähigkeit polarisierbarer Medien ist frequenzabhängig. Vergleicht man den zeitlichen Verlauf eines rechteckigen Stromsignals mit dem gleichzeitig gemessenen Potential (Abb. 3.3) über einem polarisierbaren Untergrund, lässt sich beobachten, dass sich die maximale Spannung erst mit Verzögerung einstellt (Shuey und Johnson, 1973).

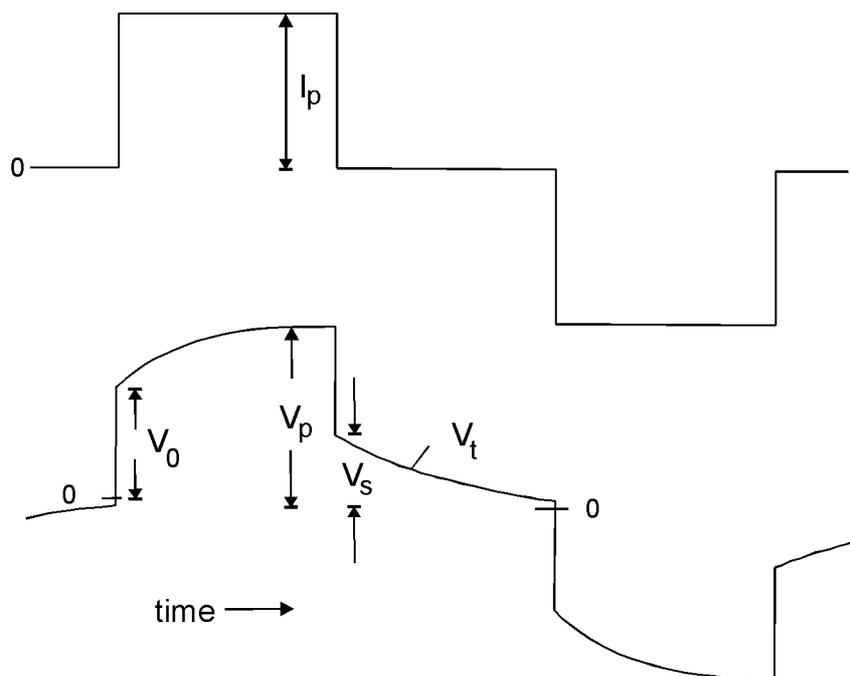


Abb. 3.3: Schematische Darstellung des zeitlichen Verlaufs des Einspeisestroms  $I$  (oben) und des Potentials  $V$  (unten) über einem polarisierbaren Untergrund (nach Zonge et al., 1972).

Als wichtige Größen sind der maximale Strom  $I_p$ , die maximal gemessene Potentialdifferenz  $V_p$ , die Potentialdifferenz  $V_s$  zu Beginn der Abklingkurve  $V_t$ , und  $V_0$  als Differenz zwischen  $V_p$  und  $V_s$  gekennzeichnet.

Dieselbe zeitliche Verzögerung beobachtet man nach dem abrupten Abschalten des anregenden Signals. Der Anstieg bzw. das Abklingen ist eine direkte Folge der Polarisierbarkeit des Untergrunds.

Als elektrochemischer Parameter hängt die Polarisierbarkeit (Bleil, 1953; Henkel, 1958; Seigel, 1959; Schön, 1996; Luo und Zhang, 1998) sehr stark von der Mineralogie, Porenstruktur und der chemischen Zusammensetzung der Porenlösung ab (Olhoeft, 1985).

### 3.4 Messmethoden und Messgrößen

Messungen der Induzierten Polarisation können im Zeitbereich und im Frequenzbereich durchgeführt werden. Beide Verfahren sind in ihrer Aussagefähigkeit gleichwertig, unterscheiden sich aber in ihren Messgrößen (Zonge et al., 1972). Die Messparameter der Verfahren stehen in enger Beziehung zueinander und lassen sich über eine Laplace-Transformation oder mit Hilfe empirischer mathematischer Modelle umrechnen (Seigel, 1959; Zonge et al., 1972; Weller et al., 1996; Johnson, 1984) .

#### 3.4.1 Zeitbereich

Abbildung 3.3 zeigt eine Messung im Zeitbereich. Bestimmt man während des Abklingvorganges die Spannungskurve  $V_t$  zwischen zwei verschiedenen Zeitpunkten  $t_1$  und  $t_2$ , ergibt sich aus dem resultierenden Integral und der maximalen Spannung  $V_p$  die Aufladbarkeit  $M$  als Maß für die Polarisierbarkeit.

$$M = \frac{1}{V_p} \int_{t_1}^{t_2} V(t) dt \quad (3.4.1.1)$$

$M$  : Aufladbarkeit [ms]

$V_p$  : Maximalspannung [V],  $V(t)$  : Spannung zur Zeit  $t$  [V]

$t_1, t_2$  : Zeitpunkt der Spannungsmessung [ms]

Eine zweite Definition der Aufladbarkeit wurde von Seigel (1959) formuliert. Dabei bestimmt man das Verhältnis zwischen  $V_s$  und  $V_p$  (Abb. 3.3). Mit  $V_s$  bezeichnet man die Potentialdifferenz, die sich unmittelbar vor der quasiexponentiellen Abklingkurve einstellt.

$$m = \frac{V_s}{V_p} \quad (3.4.1.2)$$

$m$ : „theoretische“ Aufladbarkeit [mV/V]

$V_s$  : Potential unmittelbar nach der Unterbrechung der Stromzufuhr [V]

Da während der Unterbrechung der Stromzufuhr induktive Störeffekte auftreten, bestimmt man die Aufladbarkeit meist über das Integral in Formel 3.4.1.1. Die Definition nach Formel 3.4.1.2 trägt deshalb auch den Namen „theoretische“ Aufladbarkeit.

### 3.4.2 Frequenzbereich

Bei Messungen im Frequenzbereich wird der scheinbare spezifische Widerstand bei mindestens zwei unterschiedlichen Frequenzen bestimmt. Die Frequenzen sollten sich dabei um eine Dekade unterscheiden. Alle Messgrößen im Frequenzbereich basieren auf der Frequenzabhängigkeit der gemessenen Widerstände.

Beim Frequenzeffekt (FE) wird die Differenz zweier Widerstandsmessungen durch den scheinbaren spezifischen Widerstand der höherfrequenten Messung geteilt.

$$FE = \frac{\rho(\omega_1) - \rho(\omega_2)}{\rho(\omega_2)} \quad (3.4.2.1)$$

$\omega_1 < \omega_2$  [Hz],

$\rho(\omega_1), \rho(\omega_2)$  : scheinbarer spezifischer Widerstände bei den entsprechenden Frequenzen [ $\Omega\text{m}$ ]

Multipliziert man den Frequenzeffekt mit dem Faktor 100, ergibt sich der prozentuale Frequenzeffekt (PFE).

$$PFE = FE \times 100 \quad (3.4.2.2)$$

Der dritte Messparameter, der Metallfaktor (MF), wurde von Marshall und Madden (1959) eingeführt. Beim Metallfaktor wird der Frequenzeffekt auf den niederfrequent scheinbaren spezifischen Widerstand normiert. Durch diese Normierung berücksichtigt man den Einfluß der elektrischen Leitfähigkeit auf die Polarisierbarkeit des Untergrundes.

$$MF = 2\pi \times 10^5 (\rho(\omega_1) - \rho(\omega_2)) / (\rho(\omega_2)\rho(\omega_1)) = 2\pi \times 10^5 \cdot FE / \rho(\omega_1) \quad (3.2.2.3)$$

MF: Metallfaktor [ $\Omega\text{m}$ ]<sup>-1</sup>

### 3.4.3 Die spezifische Leitfähigkeit

Die Frequenzabhängigkeit polarisierbarer Medien lässt sich durch die komplexe Leitfähigkeit beschreiben. Sowohl der Realteil, als auch der Imaginärteil sind frequenzabhängig. Ausgehend von der komplexen Leitfähigkeit können Betrag und Phase berechnet werden.

$$\sigma(\omega) = \sigma'(\omega) + i\sigma''(\omega) \quad (3.4.3.1)$$

$\sigma$  : komplexe Leitfähigkeit [S/m],

$\sigma'$  : Realteil [S/m];  $\sigma''$  : Imaginärteil [S/m],

$\omega$  : Frequenz [Hz];  $i^2 = -1$ ,

Der komplexe spezifische Widerstand  $\rho(\omega)$  ist als Kehrwert der komplexen Leitfähigkeit definiert.

$$\rho(\omega) = \frac{1}{\sigma(\omega)} \quad (3.4.3.2)$$

Der Betrag der komplexen Leitfähigkeit, bzw. dessen Kehrwert ergeben schließlich die Leitfähigkeit  $\sigma_a$ , bzw. den scheinbaren spezifischen Widerstand  $\rho_a$  (Kap. 3.2).

$$|\sigma(\omega)| = \sqrt{\sigma'(\omega)^2 + \sigma''(\omega)^2} \quad (3.4.3.3)$$

Die Phase  $\varphi(\omega)$ , genauer die Phasenverschiebung zwischen Strom und gemessener Potentialdifferenz, ist ein direktes Maß für die Polarisierbarkeit des Untergrundes.

$$\varphi(\omega) = \text{atan}\left(\frac{\sigma''(\omega)}{\sigma'(\omega)}\right) \quad (3.4.3.4).$$

$\varphi(\omega)$  : Phase [rad]

### 3.4.4 Die Spektrale Induzierte Polarisation (SIP)

Die Spektrale Induzierte Polarisation umfasst eine Messung der komplexen elektrischen Leitfähigkeit über ein Frequenzspektrum von mehreren Dekaden ( $10^{-3}\text{Hz}$ - $10^5\text{Hz}$ ). Mit Hilfe des Spektrums der komplexen elektrischen Leitfähigkeit lassen sich Materialien und Polarisations-effekte unterscheiden (Pelton et al., 1978; Olhoeft, 1985).

### 3.4.5 Beziehungen zwischen den Messgrößen

Seigel (1959) definierte seine „theoretische“ Aufladbarkeit  $m$  (3.4.1.2) über die Tatsache, dass die Leitfähigkeit eines polarisierbaren Untergrundes gegenüber der eines unpolarisierbaren Mediums reduziert wird.

$$\sigma = \sigma_0(1 - m) \quad (3.4.5.1)$$

$\sigma_0$ : Leitfähigkeit in Abwesenheit von Polarisierungseffekten

$\sigma$ : Leitfähigkeit des polarisierbaren Untergrundes

$m$ : Aufladbarkeit

Formuliert man diese Beziehung mit den Widerständen ergibt sich,

$$\rho = \rho_0 \cdot \frac{1}{(1-m)} \quad (3.4.5.2)$$

$\rho_0$ : Widerstand in Abwesenheit von Polarisierungseffekten

$\rho$ : Widerstand des polarisierbaren Untergrunds

Für sehr kleine Frequenzen ( $\omega \sim 0$  Hz) lässt sich der Widerstand  $\rho(\omega_1)$  eines polarisierbaren Mediums mit dem Gleichstromwiderstand abschätzen. Die Annäherung von  $\rho$  durch den Widerstand  $\rho(\omega_2)$ , folgt aus der Beobachtung, dass der Widerstand im Allgemeinen mit zunehmender Frequenz abnimmt. Damit ergibt sich eine direkte Beziehung zwischen dem Frequenzeffekt FE (3.4.2.1) und der Aufladbarkeit  $m$  (3.4.1.2) (Zonge et al., 1972; Weller et al., 1996)

$$FE = \frac{\rho(\omega_1) - \rho(\omega_2)}{\rho(\omega_2)} \cong \frac{\rho_0 - \rho}{\rho} = \frac{m}{m-1} \quad (3.4.5.3)$$

Entsprechend lassen sich auch für den prozentuellen Frequenzeffekt (3.4.2.2) und den Metallfaktor (4.2.2.3) Beziehungen zur Aufladbarkeit herstellen.

### 3.5 Ursachen und theoretische Modelle

In einem offenen Porensystem führt das Anlegen eines äußeren elektrischen Feldes dazu, dass die Ionen innerhalb des Elektrolyten versuchen, wieder ein Ladungsgleichgewicht im Untergrund herzustellen. (Abb. 3.5a). Elektrochemische Prozesse an den Grenzflächen zwischen Mineralen und Porenlösung können zu einer Verzögerung dieser Ausgleichsbewegung führen oder einen Ladungsausgleich verhindern.

Die Ursache für eine Elektrodenpolarisation sind metallische Minerale, an deren Oberfläche ein Wechsel von elektrolytischer zu elektronischer Leitfähigkeit stattfindet (Abb. 3.5b). Die mit unterschiedlicher Geschwindigkeit ablaufenden Leitungsmechanismen führen zu einer Phasenverschiebung zwischen Einspeisestrom und gemessener Spannung.

Die große spezifische Oberfläche von Tonmineralen verbunden mit deren negativer Oberflächenladung führt zu einer Bildung von Kationenwolken, welche die Tonminerale umgeben (Abb. 3.5c). Ähnlich einer Verjüngung des Porenquerschnitts (Abb. 3.5e) behindern diese Kationenwolken die Bewegung freier Ionen in der Porenlösung (Abb. 3.5d). Die Folge ist eine Membranpolarisation. Bereiche des Porenraums, die einen Beitrag zur Membranpolarisation liefern, nennt man aktive Zonen (Abb. 3.5e), während man Bereiche ohne Beitrag als passive Zonen bezeichnet (Abb. 3.5e).

Da es sich bei der Induzierten Polarisation um einen elektrochemischen Prozess handelt, hängt die Polarisierbarkeit sehr stark von der chemischen Zusammensetzung und Ionenkonzentration der Porenlösung ab. Olhoeft (1985) konnte zeigen, dass sich Polarisierungseffekte hinsichtlich ihrer Ursache unterscheiden lassen.

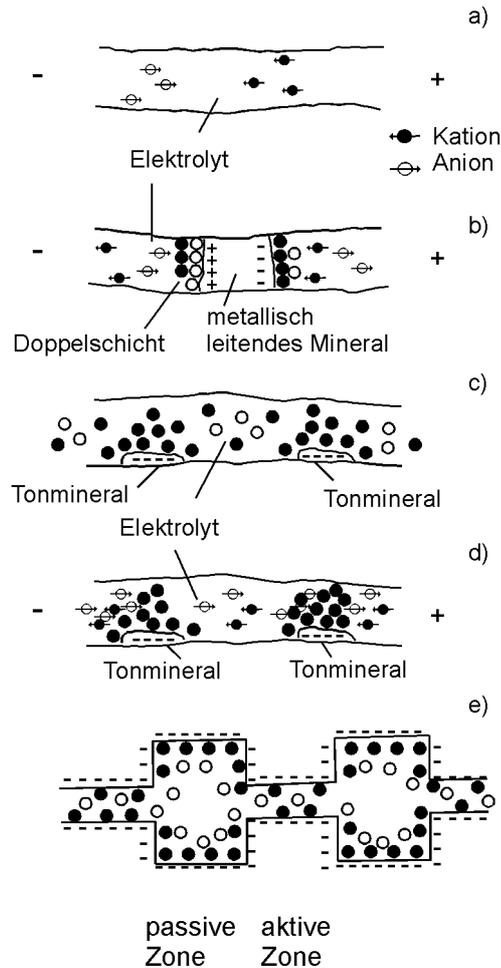


Abb. 3.5: Mechanismen die zu einer Polarisation des Untergrundes führen (nach Schön, 1996).

- a) frei bewegliche Ionen im Elektrolyt.
- b) Elektrodenpolarisation, hervorgerufen durch ein metallisches Mineral.
- c) Ionenverteilung in einem Porenang mit Tonmineralen ohne Stromfluss.
- d) Membranpolarisation, ausgelöst durch das Anlegen eines äußeren elektrischen Feldes. Der Porenang ist für die Anionen blockiert.
- e) Membranpolarisation ausgelöst durch eine Verengung des Porenquerschnitts (aktive Zone).

### 3.5.1 Metallische Leiter (Elektrodenpolarisation)

Minerale von metallischen Leitern wie Graphit, Metalloxiden und -sulfiden sind die Ursache für die sogenannte Elektrodenpolarisation bzw. metallische Polarisation (Abb. 3.5.1b). Es laufen Elektronenaustauschprozesse an der Grenzfläche zwischen Mineral und Elektrolyt ab. Durch den Stromfluss innerhalb des Minerals baut sich ein elektrisches Feld auf, das dem äußeren Feld entgegen gerichtet ist. Die Stärke dieses inneren Feldes ist proportional zum Stromamplitude (Bleil, 1953).

Beim Verschwinden des äußeren Feldes geht das System wieder in seinen Ausgangszustand über. Der Übergang in den Ausgangszustand wird von einem quasiexponentiellen Abklingen des Potentials begleitet (Abb. 3.3).

Entscheidend für den Ablauf dieses Prozesses ist, wie schnell Ionen aus dem Elektrolyt nach-

geliefert bzw. wie schnell der Ladungsaustausch zwischen Ionenleiter und elektronischem Leiter abläuft (Olhoeft, 1985; Luo und Zhang, 1998).

Aufgrund der Bedeutung der Elektrodenpolarisation für die Erkundung von Erzlagerstätten wurden zahlreiche Grundlagenuntersuchungen zum Verständnis dieses Mechanismus durchgeführt (Bleil, 1953; Wong, 1979; Klein et al., 1984; Pelton et al., 1978; van Voorhis et al., 1973, Pelton und Smith, 1976; Klein und Shuey, 1978 a, 1978b; Scott und West, 1969; Bigalke und Junge, 1999). Als Folge dieser Untersuchungen entstanden theoretische Modelle, welche das Frequenzverhalten wirtschaftlich bedeutender Erzminerale sowie Graphit erklären.

Pelton et al. (1978) gelang es mit Hilfe eines Relaxationsmodell von Cole & Cole (1941), die Frequenzspektren zahlreicher in-situ Messungen anzupassen. Das Cole-Cole Modell setzt sich aus dem ohmschen Widerstand  $R_0$  und einer parallel dazu angeordneten Reihenschaltung aus Impedanz  $(i\omega X)^{-c}$  und ohmschen Widerstand  $R_1$  zusammen (Abb. 3.5.1.1).  $R_0$  steht für die frei durchgängigen Porengänge und  $R_1$  sowie die Impedanz für die Porengänge, in denen Polarisationseffekte auftreten. Die Impedanz, für  $c=1/2$  auch Warburg Impedanz genannt, simuliert die elektrochemischen Prozesse an den Grenzflächen zwischen den metallischen Mineralen und dem Elektrolyt. Die Grösse  $c$  ( $0.5 \leq c \leq 1$ ) steht für die Frequenzabhängigkeit der Diffusionsprozesse an den Grenzflächen.  $X$  [ $s/\Omega^{1/c}$ ] ist eine reelle Konstante und  $\omega$  ist die Kreisfrequenz.

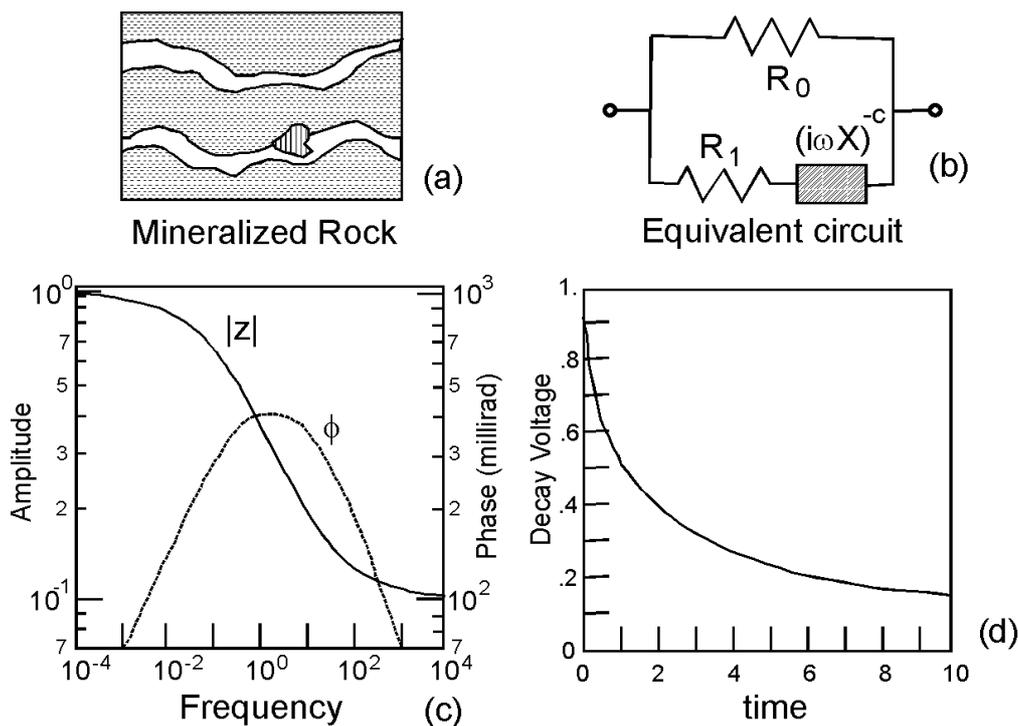


Abb. 3.5.1.1: nach Pelton et al., 1978

a) Vereinfachte Skizze der Porenstruktur eines Erzgesteins mit freien und blockierten Porengängen.

b) Ersatzschaltkreis des Cole-Cole Modells.

$R_0$  : ohmscher Widerstand des freien Porengangs.

$R_1$  : ohmscher Widerstand des blockierten Porengangs.

$(i\omega X)^{-c}$  : Impedanz (Warburg Impedanz für  $c=1/2$ )

c) Typisches Impedanz- und Phasenspektrum des Cole-Cole Modells.

d) Abklingkurve der Zeitbereichsmessung für das Cole-Cole Modell.

Für die Impedanz bzw. den komplexen elektrischen Widerstand  $Z(\omega)$  des Schaltkreises ergibt sich.

$$Z(\omega) = R_0 \left[ 1 - m \left( 1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^c} \right) \right] \quad (3.5.1.1) \quad \text{mit}$$

$$m = \frac{1}{1 + \frac{R_1}{R_0}} \quad (3.5.1.2), \text{ siehe auch 3.4.5.2, Seigel (1959)}$$

und

$$\tau = X \left( \frac{R_0}{m} \right)^{1/c} \quad [\text{s}] \quad (3.5.1.3)$$

Für die Abklingkurve des Potentials für Messungen im Zeitbereich (Abb. 3.3.1) folgt nach Pelton et al. (1978).

$$V(t) = m \cdot \frac{I_0}{R_0} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n \cdot \left( \frac{t}{\tau} \right)^{nc}}{\Gamma(nc + 1)} \quad (3.5.1.4)$$

$I_0$  : Stromamplitude [A]

$\Gamma$  : Gamma-Funktion

t : Zeit [sec]

Für  $c=1$  (Kondensator) geht die Summenfunktion in die Exponentialfunktion

$$V(t) = m \cdot \frac{I_0}{R_0} e^{-t/\tau} \quad (3.5.1.5)$$

über. Johnson (1984) konnte mit Zeitbereichsmessungen zeigen, dass die Messverfahren der Induzierten Polarsiation bei der Bestimmung der Frequenzabhängigkeit  $c$  und Zeitkonstanten  $\tau$  gleichwertig sind. Weiterentwicklungen des Cole-Cole-Modells sind das Multi-Cole-Cole- und das Modell von Dias (Pelton et al., 1978; Dias, 2000), die es erlauben komplexere Spektren zu modellieren.

Eine analytische Funktion zur Beschreibung der Spektren von Porphyry-Kupfer Erzen formulierten van Voorhis et al. (1973) für den Frequenzbereich 0.001-10 Hz. Das Modell ist nach einem der Co-Autoren benannt und trägt den Namen Drake-Modell. Die Formel für die Frequenzabhängigkeit des spezifischen Widerstands lautet

$$\rho(\omega) = \begin{cases} K\omega_l^{-b}, & \text{für } \omega \leq \omega_l \\ K\omega^{-b}, & \text{für } \omega > \omega_l \end{cases} \quad (3.5.1.6)$$

K: Konstante [ $\Omega\text{m} \cdot \text{Hz}^b$ ],  $b$  : positive rationale Zahl ( $b < 0.1$ )

$\omega$  : Frequenz [Hz];  $\omega_l$  : unteres Frequenzplateau, für das gilt  $\rho_0 = \text{const.}$  [Hz]

Für die Phase  $\varphi$  ergibt sich

$$\varphi = -\frac{\pi}{2}b \quad (3.5.1.7)$$

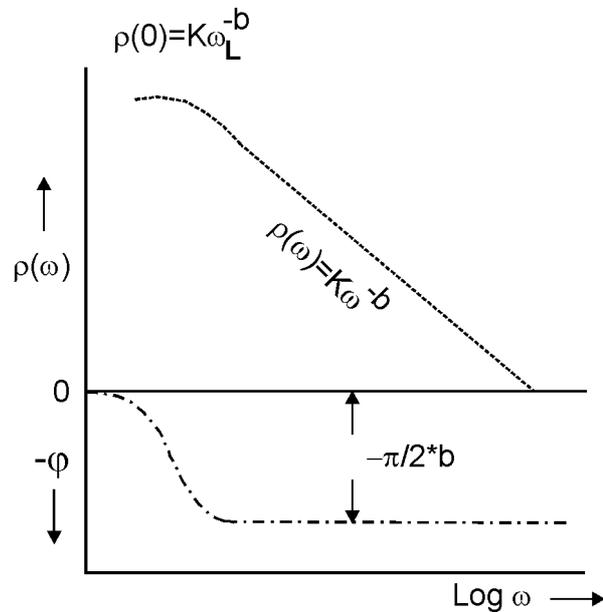


Abb. 3.5.1.2: Spektrum des komplexen Widerstands des Drake Modells  
(nach van Voorhis et al., 1973)

Ein elektrochemischer Ansatz, der sowohl Spektren des Typs Cole-Cole Modelle, als auch Drake Modelle erklären kann, stammt von Wong (1979). Im Modell von Wong werden die metallischen Minerale als fein verteilte Kugeln approximiert. Je nach Volumenanteil tragen die verschiedenen Korngrößenfraktionen zum Frequenzverhalten der komplexen Leitfähigkeit bei. Der frequenzabhängige Reflektionskoeffizient  $f$  charakterisiert die Abläufe an der Grenzfläche von Mineral zu Elektrolyt. Diffusionsprozesse und die Geometrie des Minerals beeinflussen diese Abläufe. Die komplexe elektrische Leitfähigkeit berechnet sich nach folgender Formel:

$$\sigma(\omega) = \sigma_0 \cdot \frac{1 + 2 \sum v_i f(\omega; a_i)}{1 - 2 \sum v_i f(\omega; a_i)} \quad (3.5.1.8)$$

mit  $\sum v_i < 0.16$  (Volumenanteil der metallischen Kornfraktion  $< 16$  Vol-%)

$\sigma(\omega)$  : komplexe elektrische Leitfähigkeit

$\sigma_0$ : Leitfähigkeit des Elektrolyts

$v_i$  : Volumenanteil der metallischen Korngrößenfraktion  $i$

$a_i$  : Radius der metallischen Korngrößenfraktion  $i$

$f(\omega; a_i)$ : frequenzabhängiger Reflektionskoeffizient

### 3.5.2 Tonminerale (Membranpolarisation)

Neben der großen spezifischen Oberfläche zeichnen sich Tonminerale vor allem durch ihre negative Oberflächenladung aus. Der negative Ladungsüberschuss sorgt dafür, dass sich eine Doppelschicht an der Mineraloberfläche ausbildet (Abb. 3.5c). Eine Doppelschicht baut sich aus einer Kationen-, einer Anionenschicht und einer diffusen Schicht auf, in der die Konzentration der Kationen mit dem Abstand zur Oberfläche abnimmt, während die Konzentration der Anionen mit wachsendem Abstand von der Mineraloberfläche ansteigt.

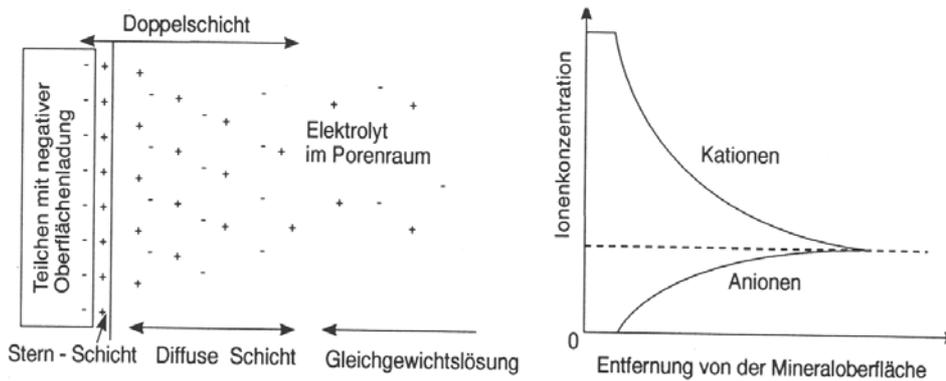


Abb. 3.5.2.1 Ionenverteilung (links) und Konzentrationsverlauf (rechts) in der elektrischen Doppelschicht eines Tonminerals (nach Wienberg, 1990; aus Knödel et al., 1997)

Die Dicke einer Doppelschicht  $d_{int}$  wird von zahlreichen elektrochemischen Parametern beeinflusst, die in die Formel von Grahame (1947) einfließen.

$$d_{int} = \sqrt{\frac{k \cdot T \cdot \epsilon_{fl}}{2 \cdot n \cdot e^2 \cdot v^2}} \quad (3.5.2.1)$$

- n: Ionenkonzentration des Elektrolyts
- v: Oxidationszahl der Ionen
- $\epsilon_{fl}$ : Dielektrizitätszahl der Porenlösung
- e: Elementarladung
- k: Boltzmann-Konstante
- T: Temperatur

Bei der induzierten Polarisation können Kationenwolken, welche die Tonminerale umhüllen, zu einer Membranpolarisation führen. Die Kationenwolke stellt eine ionenselektive Membran dar, welche von Kationen passiert werden kann, aber Anionen blockiert (Abb. 3.5d). Ob ein Tonmineral mit seiner Doppelschicht den Anionenfluss blockiert, hängt im Wesentlichen vom Porenquerschnitt in der entsprechenden Zone ab. Ist der Porenquerschnitt groß gegenüber  $d_{int}$ , wird der ablaufende Ladungsausgleich kaum beeinflusst. Entsprechend werden Zonen, die nicht zur Polarisation beitragen, als passive Zonen (Abb. 3.5e) bezeichnet, während Zonen, in denen eine Membranpolarisation auftritt, als aktive Zonen (Abb. 3.5e) bezeichnet werden.

Waxman und Smits (1968) formulierten erstmals ein theoretisches Erklärungsmodell der komplexen elektrischen Leitfähigkeit, welches die Kationenaustauschkapazität (CEC) berücksichtigt. Die CEC wird von Mineralen mit großer spezifischer Oberfläche, also den Tonmineralen, bestimmt. Labormessungen der komplexen elektrischen Leitfähigkeit an tonigen Sandproben durch Vinegar und Waxman (1984) verifizierten diese Formel. Die Formel für die komplexe elektrische Leitfähigkeit  $\sigma_0$  lautet wie folgt

$$\sigma_0(\omega) = \frac{1}{F}(\sigma_w + BQ_v) + i \cdot \frac{\lambda Q_v}{F\Phi} \quad (3.5.2.2)$$

F: Formationsfaktor

$\sigma_w$ : Leitfähigkeit des Porenfluids

B : Ionenleitfähigkeit der Austauschkatonen

$Q_v$  : CEC pro Einheitsporenvolumen

$\lambda$  : linearer Modellierungsparameter

$\Phi$  : Porosität

Das Modell von Waxman und Smits simuliert eine Parallelschaltung zweier leitfähiger Elemente. Das erste Element repräsentiert die Ionenleitfähigkeit in den passiven Zonen, das zweite Element die Leitfähigkeitsmechanismen in den aktiven Zonen. Alle, an den Laborproben gemessenen Phasen, waren über einen Frequenzbereich von 3-1000 Hz näherungsweise konstant. Dies ist eine wichtige Grundbedingung für die Gültigkeit dieser Formel. Weitere Modelle, die speziell für tonige Sande entwickelt wurden, stammen von Bussian (1983) und Samstag und Morgan (1991).

### 3.5.3 Porosität

Die Geometrie des Porenraums entscheidet, ob und wie stark ein Untergrund polarisierbar ist. Ist der Untergrund frei von Tonmineralen und metallischen Mineralen und verfügt über ein dichtes Netz von Porengängen, deren Querschnitt die Bewegung der Ionen nicht beeinflusst, sind keine Polarisierungseffekte zu erwarten. Variieren die Porenquerschnitte entlang eines Porenraums sehr stark (Abb. 3.5.1e), können Engstellen zu einer Ionenselektion führen. Das Resultat ist ein messbarer Polarisierungseffekt. Die Rolle der Porosität für die Polarisierbarkeit von Sedimenten wird in der Formel 3.5.2.2 von Waxman und Smits (1968) deutlich. Der Imaginärteil der komplexen elektrischen Leitfähigkeit ist invers proportional zur Porosität. Dieser Zusammenhang wird deutlich, wenn man sich in Erinnerung ruft, dass Polarisierungseffekte auf Mechanismen beruhen, die an Mineraloberflächen stattfinden. Börner et al. (1996) konnten durch Labormessungen der Induzierten Polarisierung an verschiedenen tonhaltigen Sedimentproben einen Zusammenhang zwischen den Messgrößen der Induzierten Polarisierung und charakteristischen hydraulischen Parametern herleiten. Die Zusammenhänge sind in einem Schema (Abb. 3.5.3.1) verdeutlicht.

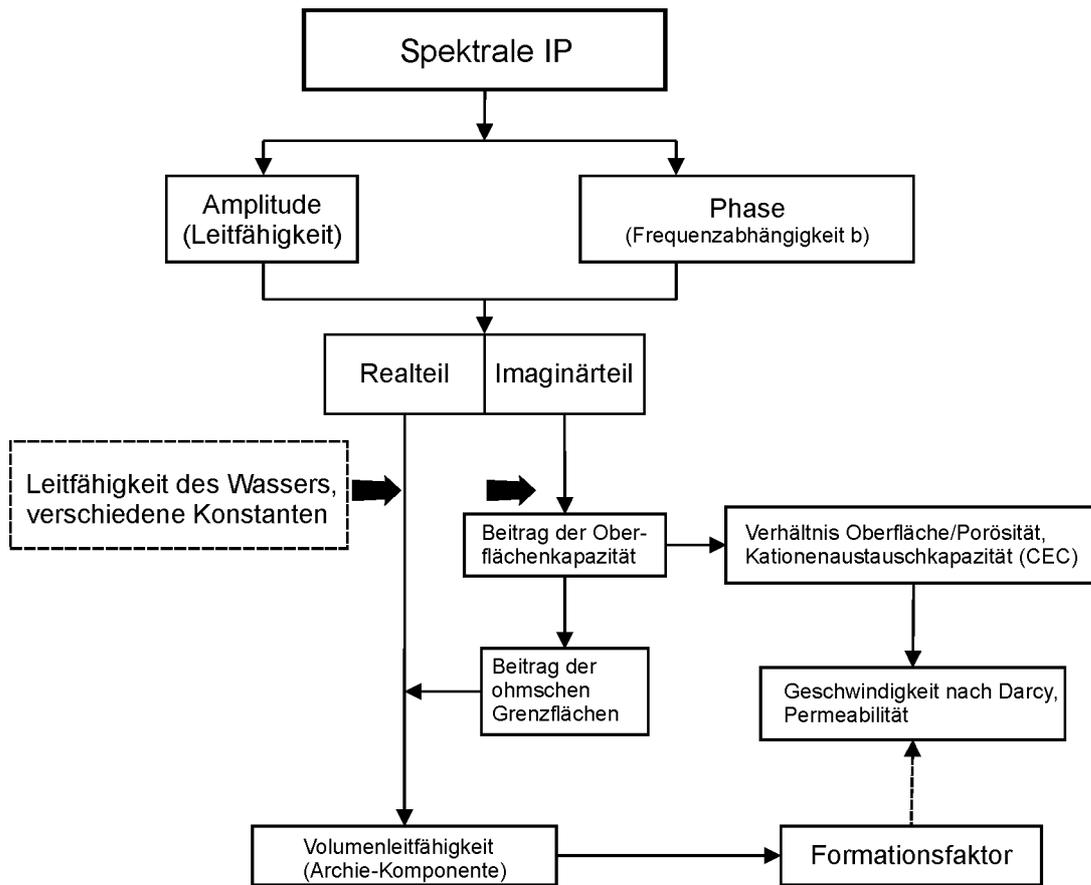


Abb. 3.5.3.1: Zusammenhänge zwischen den Messgrößen der Induzierten Polarisation und hydraulischen Parametern des Untergrundes (nach Börner et al., 1996).

Aus dem Schema lässt sich entnehmen, dass der Realteil Aussagen über den Formationsfaktor erlaubt und der Imaginärteil im Zusammenhang mit dem Verhältnis von innerer Oberfläche zur Porosität steht. Der Formationsfaktor oder auch Formationswiderstandsfaktor  $F$  eines Gesteins ist dimensionslos und definiert sich über das Verhältnis des spezifischen elektrischen Widerstand der vollgesättigten Probe  $\rho_0$  zum spezifischen elektrischen Widerstand der Porenflüssigkeit  $\rho_w$ ,

$$F = \frac{\rho_0}{\rho_w} \quad (3.5.2.3)$$

### 3.5.4 Ionenkonzentration und chemische Zusammensetzung der Porenlösung

An allen Polarisierungseffekten sind Ionen beteiligt. Untersuchungen der Polarisierbarkeit in Abhängigkeit von der Ionenkonzentration wurden von Vinegar und Waxman (1986) an Sandproben durchgeführt. Die Phasen der untersuchten Proben nehmen mit zunehmenden Salzgehalt ab (Abb. 3.5.4.1). Aus Formel 3.5.2.1 lässt sich entnehmen, dass die Dicke einer Doppelschicht mit zunehmender Ionenkonzentration abnimmt. Die Folge ist eine Abschwächung der Membranpolarisation. Außerdem verbessert sich die Leitfähigkeit des Untergrundes mit zunehmendem Salzgehalt, was zu kleineren Potentialdifferenzen führt.

Natürlich spielt nicht nur die Konzentrationen, sondern auch der Ionentyp eine Rolle. Größen wie der Ionenradius oder die Oxidationszahl haben einen messbaren Einfluss auf die Induzierte Polarisation (Angoran und Madden, 1977, Börner et al., 1996).

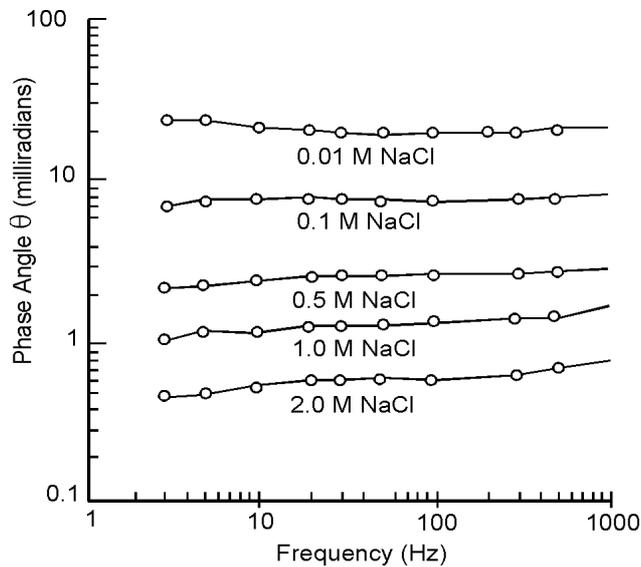


Abb. 3.5.4.1: Phasenspektren einer Sedimentprobe bei variierendem Salzgehalt (0.01- 2 mol NaCl) der Porenlösung (aus Vinegar und Waxman, 1986)

Im Hinblick auf die Umweltgeophysik spielt die Detektion von Kontaminationen eine wichtige Rolle. Untersuchungen von Olhoeft (1985) und Börner et al. (1993) konnten zeigen, dass verschiedene gelöste organische Stoffe das Frequenzspektrum der komplexen elektrischen Leitfähigkeit von Sedimenten verändern (Abb. 3.5.4.2).

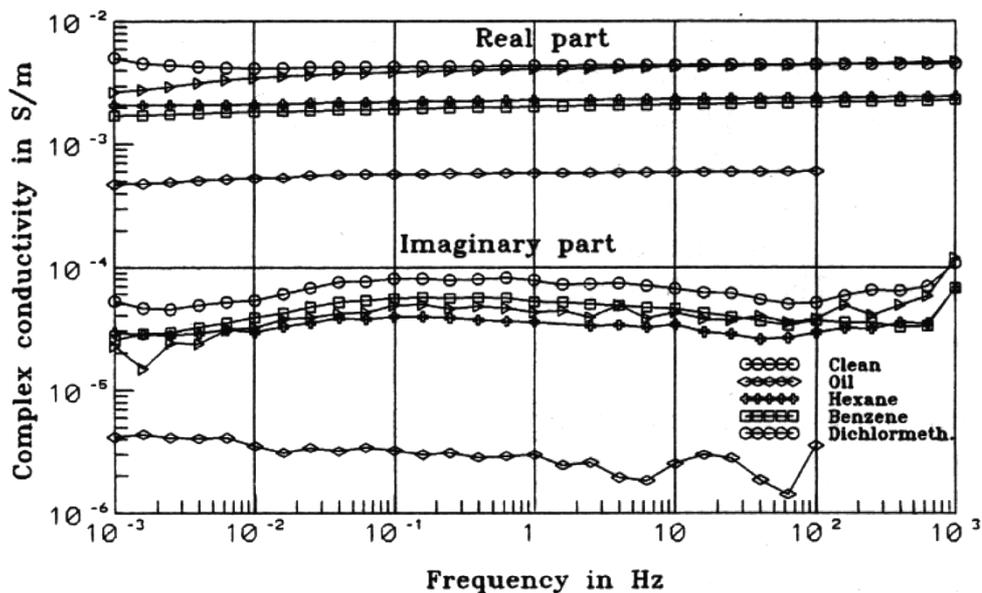


Abb. 3.5.4.2: Frequenzspektren einer Sedimentprobe nach Kontamination mit verschiedenen organischen Stoffen (aus Börner et al., 1993).

Reaktionen, die zwischen Tonmineralen und organischen Stoffen ablaufen, spielen dabei eine entscheidende Rolle. In einem gesteuerten hydraulischem Experiment konnten diese Laborergebnisse von Weller et al. (1996) bestätigt werden.

### 3.5.5 Störeffekte

Messungen der Induzierten Polarisation mit langen Kabelauslagen können durch elektromagnetische Effekte verfälscht werden. Die Unterdrückung dieser elektromagnetischen Effekte spielt vor allem in der Erzprospektion eine wichtige Rolle. Dort werden große Untersuchungstiefen benötigt, was mit langen Kabelauslagen verbunden ist.

Neben der Länge und Anordnung der Kabel beeinflussen die Frequenz des Einspeisestroms, die Elektrodenanordnung und die Leitfähigkeit des Untergrunds das Auftreten von Störeffekten (Routh und Oldenburg, 2001).

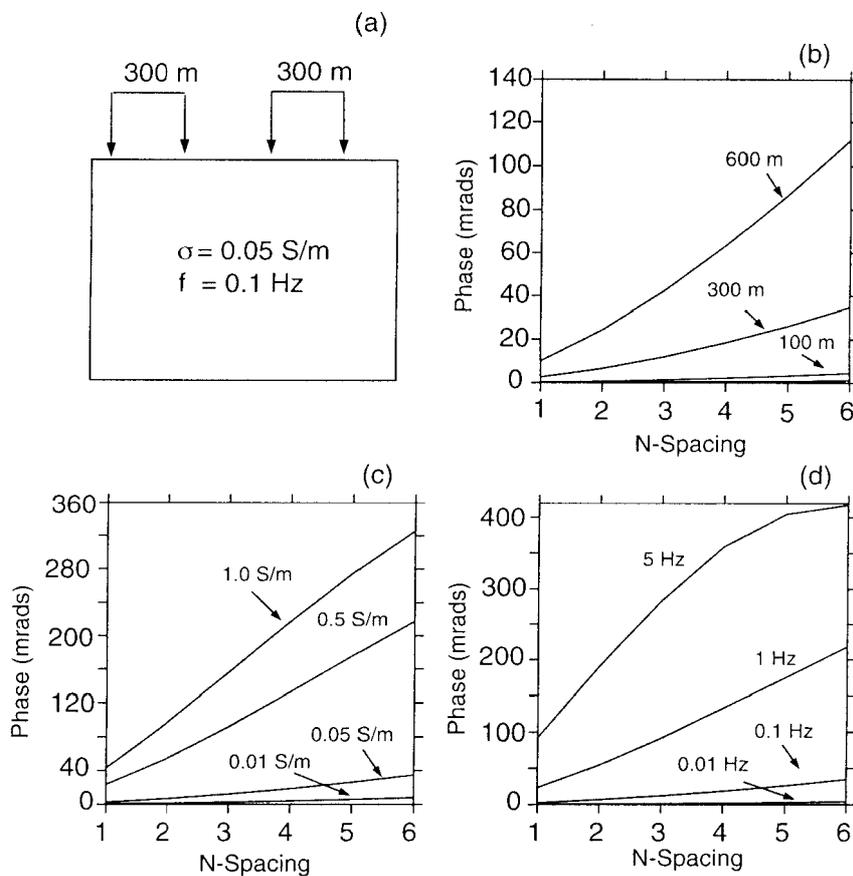


Abb. 3.5.5.1: Faktoren, welche zu elektromagnetischen Kopplungseffekten beitragen (aus Routh & Oldenburg, 2001).

- Simulierte Dipol-Dipol-Anordnung über einem unpolarisierbaren, homogenen Untergrundmodell mit Leitfähigkeit  $0.05 \text{ S/m}$ , Messfrequenz  $0.1 \text{ Hz}$ , Dipollänge  $300 \text{ m}$ .
- Effekt zunehmender Dipolabstand. Es sind die Phasenwerte für sechs verschiedene Dipolabstände  $n=1..6$  (Vielfaches der Dipollänge) berechnet.
- Variation der Leitfähigkeit des Untergrunds.
- Variation der Messfrequenz.

Wegen der Bedeutung der Induzierten Polarisation für die Erzprospektion gibt es zahlreiche Veröffentlichungen, die sich mit dem Problem der elektromagnetischen Kopplung befassen (Dey und Morrison, 1973; Pelton et al., 1978; Hohmann, 1973; Caglar, 2000; Routh und Oldenbourg, 2001). Die Trennung von Nutz- und Störsignal bei homogenen und geschichteten Untergrundmodellen wird dabei ausführlich behandelt.

Der Einfluss von kulturellen Störeffekten bei der Anwendung der Induzierten Polarisation, wie metallische Rohrleitungen, wird in den Arbeiten von Parra (1984) und Wait & Williams (1985) behandelt.

## Kapitel 4: Die Multielektrodenapparatur SIP-256

### 4.1 Das Konzept

Die Multielektrodenapparatur SIP-256 (Bigalke, et al., 1999) erlaubt die schnelle Bestimmung der komplexen elektrischen Leitfähigkeit des Untergundes. Analog zu den üblicherweise in der Geoelektrik verwendeten Multielektrodenapparaturen (Panissod et al., 1997; Hesse et al., 1986; Alekseyev et al., 1996; Stummer, 2000; Piro et al., 2001; Beresnev et al., 2002), gewährleistet die SIP-256 die vollautomatische Abfolge von Vierpunktanordnungen. Damit lassen sich beliebige Elektrodenarrays in relativ kurzer Zeit realisieren. Der wesentliche Unterschied zu konventionellen Apparaturen findet sich in der Verwendung von Remote Units. Als Remote Unit (RU) bezeichnen wir autonom arbeitende Mess- und Rechneinheiten, die sich direkt an den Elektroden befinden. Mit Hilfe der RU's werden die Daten direkt an der Elektrode aufgezeichnet und weiterverarbeitet. Dieses Datenpräprozessing trägt erheblich zu einer Reduzierung der zu übertragenden Datenmenge und damit zu einer Verkürzung der Messzeit bei. Zusätzlich reduziert sich durch die Datenaufnahme direkt an den Elektroden der Einfluss elektromagnetischer Störeffekte bei hohen Messfrequenzen und großen Gesamtauslagen (Kap. 3.5.5). An jeder RU lassen sich eine Strom- und eine Spannungselektrode getrennt voneinander anschließen. Damit vermeidet man das Auftreten von Polarisierungseffekten an den Messelektroden (Dahlin, 2000).

### 4.2 Die Messapparatur

Der Aufbau der Messapparatur ist in Abbildung 4.2.1 skizziert. Die SIP 256 setzt sich aus einer Zentraleinheit (Base), den Remote Units (RU) und optional, einem digital programmierbaren externen Generator zusammen. Gesteuert wird die Apparatur über einen Laptop, der direkt mit der Zentraleinheit verbunden ist.

In der Base befindet sich eine interne Remote Unit zur Messung des eingespeisten Stroms und ein Generator, der ein periodisches Signal im Frequenzbereich von einigen mHz bis 1kHz liefert. Es besteht jedoch die Option, über einen externen, digital programmierbaren Generator synthetische Kurvenformen und Frequenzspektren einzuspeisen. Wahlweise kann mit einer Einzelfrequenz oder einem Frequenzspektrum gearbeitet werden. Die Base verfügt über acht Anschlusskanäle, wobei man pro Kanal maximal 20 RU's anschließen kann. Zur Zeit lässt sich ein Array aus 50 Elektroden mit der Apparatur realisieren. Jede Remote Unit kann über eine individuelle Kennziffer von der Base identifiziert und angesprochen werden. Die Kommunikation (Abb. 4.2.1) zwischen den RU's und der Base findet über eine serielle Schnittstelle, den SIP-Bus statt. Dieser SIP-Bus realisiert sowohl die Stromversorgung als auch die Datenübertragung. Zur Datenaufzeichnung und -weiterverarbeitung verfügt jede RU über einen 24bit Analog-Digital-Wandler (ADC) sowie über eine central processing unit (CPU), die für die Steuerung des ADC und die Abspeicherung der Messdaten im Arbeitsspeicher (RAM) sorgt. Die maximale Abtastrate des ADC ist 1kHz, reduziert sich aber durch die digitale Filterung und Summation während der Messung auf maximal 815Hz. Die Auflösung des 24 bit ADC-Wandlers ist von der Abtastrate abhängig. Bei einer Abtastraten größer 1 kHz sinkt das Auflösungsvermögen des ADC unter 20 bit (Burr-Brown, 1996).

Während eines Einspeisevorgangs werden die Relais der RU's an den aktiven Stromelektroden geschaltet. Alle anderen RU's verbleiben im Modus Potentialmessung. Die Relais der RU's an den Potentialelektroden befinden sich dabei in der Ausgangstellung.

Erst unmittelbar vor dem Einspeisevorgang werden die Relais (Abb. 4.2.1) geschaltet.

Potentiale können differenziell, das heißt zwischen zwei benachbarten RU's oder gegenüber einer gemeinsamen Referenzelektrode gemessen werden (Bigalke et al., 1999). Alle Remote Units sind bei diesem Messmodus über den SIP-Bus mit einer Potentialelektrode verbunden.

Die Einstellung des Messmodus erfolgt über Kurzschlussbrücken (Abb. 4.4.1.1) an den RU's. Am Ende jedes Einspeisezyklus folgt die Übertragung der aufgezeichneten Daten über den SIP-Bus an die Base und weiter zum Laptop.

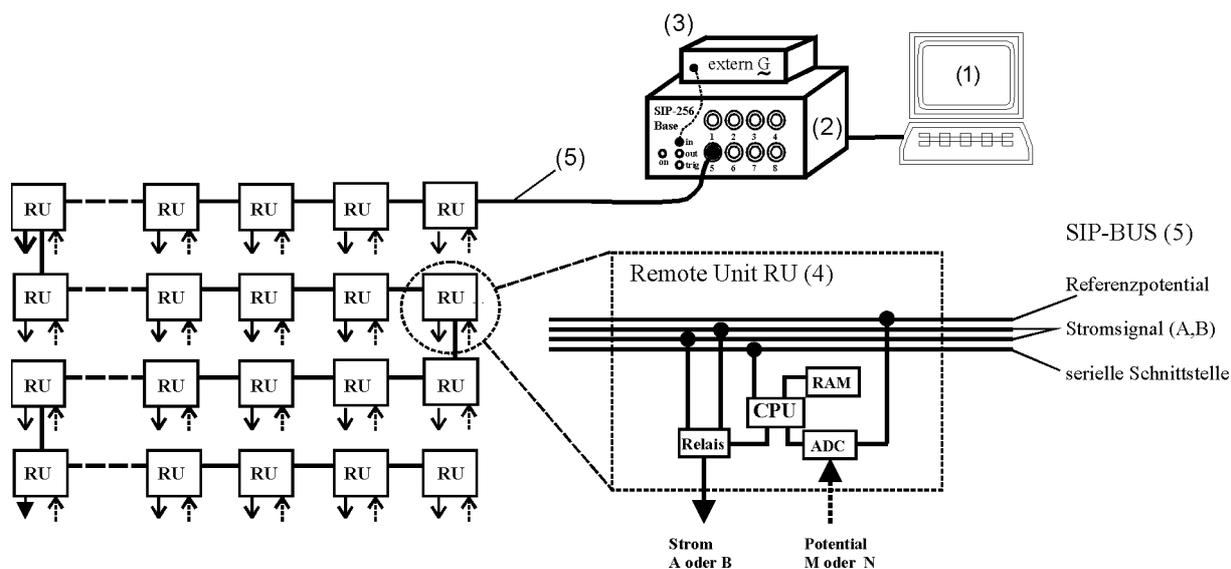


Abb. 4.2.1: Die Multielektrodenapparatur SIP 256. Alle Remote Units sind über den SIP-Bus (5) mit der Zentraleinheit (Base) (2) verbunden. An jeden Kanal der Base können maximal 20 RU's angeschlossen werden. Im vereinfachten Schaubild einer Remote Unit (RU) (4) sind die wichtigsten Komponenten verdeutlicht. Die programmierbare Kontrolleinheit (CPU) steuert den Analog-Digital-Wandler (ADC) und sorgt für die Speicherung der Messdaten (RAM). Durch das Schalten eines Relais wird der Strom an die Elektrode weitergeleitet. Durch die Trennung der Anschlüsse für Strom- und Potential kann man an einer Remote Unit eine Strom- und eine Potentialelektrode betreiben. Für Messungen mit nur einer Elektrode schließt man die Ausgänge kurz. Die gesamte Messung wird von einem Laptop (1) gesteuert. Optional kann das Stromsignal von einem externen Generator (3) eingespeist werden.

### 4.3 Steuerung

Die gesamte Messung wird über einen Laptop (Kötter, 2001) gesteuert, der direkt mit der Base verbunden ist (Abb. 4.2.1). Der Start einer Messung erfolgt mit dem Programm *steuerip*. Während der Messung arbeitet das Programm die einzelnen Befehlszeilen eines Scriptfiles ab, deren Parameter der Laptop an die Zentraleinheit (Base) weitergibt. Ein Scriptfile ist im Wesentlichen aus vier Blöcken aufgebaut (Tab. 4.3.1).

Im ersten Block befinden sich die Angaben zur Geometrie des Messaufbaus, der Konfiguration, und die Liste der verwendeten RU's.

Der zweite Block beinhaltet das Präprozessing. Nacheinander sind Programme mit ihren Verzeichnissen angegeben, die vor jeder Messung in die RU's eingelesen werden. Dazu gehören digitale Filter, Programme zur Synchronisation des Messablaufs und das eigentliche Präprozessing. Die Frequenz des Einspeisesignals, dessen Form und Amplitude, sowie die Länge der aufgezeichneten Zeitreihe folgen in Block 3.

Im letzten Abschnitt des Scriptfiles wird jeder Messschritt bis zum Abschalten der SIP 256 detailliert vorgegeben. Dabei wird pro Zeile ein Einspeisezyklus beschrieben.

	Befehlszeile	Kommentar
Block 1	start: datei; 'comment'	//Name der Datei, in der die Zeitreihen abgespeichert werden+ Kommentar (optional);
	config: dprofile 1 0 0 0;	Beschreibung des Messaufbaus: Konfiguration (dprofile: Dipol-Dipol, Pol-Dipol; profile: Pol-Pol), Elektrodenabstand in m, Winkel des Messprofils innerhalb eines rechtwinkligen Bezugssystems (optional), gefolgt von den x- und y- Koordinaten der 1. Elektrode im Bezugssystem (optional).
	table: 1=2, 2=4, 3=14, ..., 20=61, 21=102/2, ...;	//Liste der angeschlossenen RU's;
	digitspeed: f;	//digitale Übertragungsrate (baudrate) zwischen RU und Base; Optionen (s=slow, m=medium, f=fast)
Block 2	<i>Steuerbefehle für das Präprozessing (optional)</i>	<i>in den RU's {</i>
	sync: "\sip\c5prg\ruprg\filter\sync1.hex";	//Synchronisation der RU's; gewährleistet Gleichlauf der Einheiten während eines Einspeisezyklus.
	runprog: 0, 1, "\sip\c5prg\ruprg\lib\rulib.hex";	//Initialisierung des Präprozessing;
	filter: 6, "\sip\c5prg\ruprg\filter\fl560202.001";	//Aufruf des digitalen Filters;
	download: "\sip\c5prg\ruprg\fft\rufftsco.hex";	//Aufruf der Fouriertransformation
	<i>} Ende der Befehlszeilen für das Präprozessing</i>	
Block 3	cablelength: 1=0,2=5,3=8,4=11,...., 9=26;	//Liste mit den Kabellängen in m, zwischen der Base und jeder einzelnen RU
	delay: 8;	//Verzögerungszeit bis zur Messung in 10ms. Ablauf: 1. Starten des Generators, 2. delay, 3. Messung beginnt.
	samples: 2594;	//Anzahl der Messwerte pro Zeitreihe RU
	range: 512/544,576/592,...	//selektive Auswahl von Zeitfenstern mit Signalanteil (optional)
	samplerate: 815	//Abtastrate in Hz
	generator: ext;	//Option externer/interner Generator
		(Fortsetzung nächste Seite)

	Befehlszeile	Kommentar
	frequency: 0	//Frequenz des internen Generators in Hz
	amplitude: 0	//Amplitude des internen Generators (0-100)
	extwavelet: sinus4.dat;	//Signalform des Einspeisestroms
	extfreq: 1.06;	//Frequenz des externen Generators in Hz
	extamplitude: 4;	//Amplitude des externen Generators (0-20)
	files: o;	//Ausgabeformat (o: für jeden Einspeisezyklus wird eine ASCII-Datei angelegt; a: alle Daten in einer ASCII-Datei)
	stack: 8;	//Anzahl der gestapelten Einzelmessungen
Block 4	measure { call prepro ; wait 22; quit; }:  2,3: a ; 3,4: a; 4,5: a; : : : : : :	//Start der Messung. Aktivierung des Präprozessings, Vorgabe der Ruhephase (default = 22 sec.) zwischen den einzelnen Einspeisezyklen, Tabelle der Einspeisezyklen  Konvention:  A,B: M;  A: Position der Stromelektrode A (siehe table) B: Position der Stromelektrode B M: Liste der Potentialelektroden durch Kommas getrennt. a= alle RU's messen.
	sip off ;	//Generator abschalten.
	END	//Ende des Programms.

*Tabelle 4.3.1: Scriptfile zur Steuerung des Messablaufs einer Dipol-Dipol-Messung. Falls nicht anders angegeben, handelt es sich bei den Parametern in den Befehlszeilen um Grundeinstellungen, die verändert werden können. Kommentare werden im Scriptfile mit „//“ eingeleitet.*

## 4.4 Messablauf

### 4.4.1 Messkonfiguration

Mit der SIP-256 lassen sich grundsätzlich alle aus der Gleichstromgeoelektrik bekannten Messkonfigurationen realisieren (Parasnis, 1973; Habberjam, 1979; Schulz, 1985; Telford et al., 1990; Panissod et al, 1997; Dahlin and Bing, 2001). Beim Einsatz der Multielektrodenapparatur SIP-256 haben sich Dipol-Dipol-, Pol-Dipol- und Pol-Pol-Konfigurationen bewährt, deren Aufbau und Messabfolge sich für eine große Anzahl von Elektroden leicht umsetzen lässt. Der Vorteil einer Dipol-Dipol-Anordnung liegt in ihrem guten Auflösungsvermögen oberflächennaher Strukturen (Beard und Tripp, 1995; Sasaki, 1992).

Besondes wegen ihrer kurzen Kabelauslagen ist diese Anordnung für die Induzierte Polarisation geeignet. Ein Nachteil der Methode liegt im raschen Abklingen des Einspeisesignals mit der Entfernung und damit einer geringen Untersuchungstiefe (Roy und Apparao, 1971; Edwards, 1977; Barker, 1989) bei begrenzter Gesamtauslage und Stromamplitude.

Die Pol-Dipol Anordnung besitzt eine größere Tiefenreichweite und stellt einen Kompromiss zwischen einer Dipol-Dipol- und einer Pol-Pol-Konfiguration dar (Sasaki, 1992; Kampke, 1999, Oldenburg und Li, 1999). Durch die Asymmetrie der Anordnung ist es aber schwieriger, Messdaten zu interpretieren. Selbst symmetrische Anomalien erscheinen in der Pseudosektion asymmetrisch.

Ein weiterer Vorteil neben der größeren Tiefenreichweite ist die Platzierung einer Stromelektrode im „Unendlichen“. Entlang der Profilauslage verändern also immer nur drei Elektroden ihre Position. Dies ermöglicht einen zusätzliche Einspeisezyklus pro Auslage. Da nur drei Elektroden ihre Postion entlang des Profils ändern, ist die Anordnung außerdem unempfindlicher gegenüber oberflächennahen Inhomogenitäten.

Bei der Pol-Pol- Anordnung arbeitet man nur mit einer Strom- und einer Potentialelektrode entlang des Messprofils. Die Pol-Pol-Konfiguration mit ihren beiden „unendlichen“ Elektroden hat die größte Tiefenreichweite aller Anordnungen und liefert die größte Untergrundinformation, ist aber aufgrund der langen Kabelauslagen (Kap. 3.5.5) für IP-Messungen kaum geeinigt. Speziell ihr begrenztes Auflösungsvermögen für kleinräumige Strukturen (Beard und Tipp, 1995; Sasaki, 1992) ist in der archäologischen Prospektion ein Nachteil (Kampke, 1999). In der nachfolgenden Tabelle 4.4.1.1 sind die Geräteeinstellungen aufgeführt, die bei den drei beschriebenen Messkonfigurationen vorzunehmen sind.

	Dipol-Dipol	Pol-Dipol	Pol-Pol
Position der Kurzschlußbrücke an der RU (Abb. 4.4.1.1)	rot-grün	rot-grün	rot-blau
Messmodus	differenziell Potentialelektrode am Ende des Messprofils	differenziell Potentialelektrode am Ende des Messprofils	absolut (relativ zur internen RU) „unendliche“ Potentialelektrode
unendliche Stromelektrode (Anschluß direkt an einen der Kanalausgänge an der Base )	nein	ja	ja
Konventionen für die Einträge im Scriptfile:			
<i>config:</i> //Elektrodenabstand 1m	dprofile 1 0 0 0	dprofile 1 0 0 0	profile 1 0 0 0 INF INF INF
<i>measure:</i>	3,4:a;	3,0:a;	3,0:a;

Tabelle 4.4.1.1: Einstellungen an der SIP-256 für die Konfigurationen Dipol-Dipol, Pol-Dipol, und Pol-Pol.

Je nach Fragestellung gilt es, die richtige Elektrodenkonfiguration zu wählen (Beard und Tripp, 1995; Loke und Barker, 1996a). Die Wahl des Elektrodenabstands definiert das Auflösungsvermögen der Messung und sollte sich nach der Größe und Tiefenlage des zu untersuchenden Objekts richten.

Bei archäologischen Objekten sollte der Elektrodenabstand in der Regel einen Meter nicht überschreiten (David, 1995). Die zu wählende Gesamtlänge eines Messprofils ergibt sich aus der erwarteten Tiefenlage und lateralen Ausdehnung des Objekts. Elektrodenabstand und Gesamtauslage des Profils bestimmen die Anzahl der Einzelmessungen und damit die Dauer des automatisierten Messablaufs (Friedel, 1999; Dietrich, 1999).

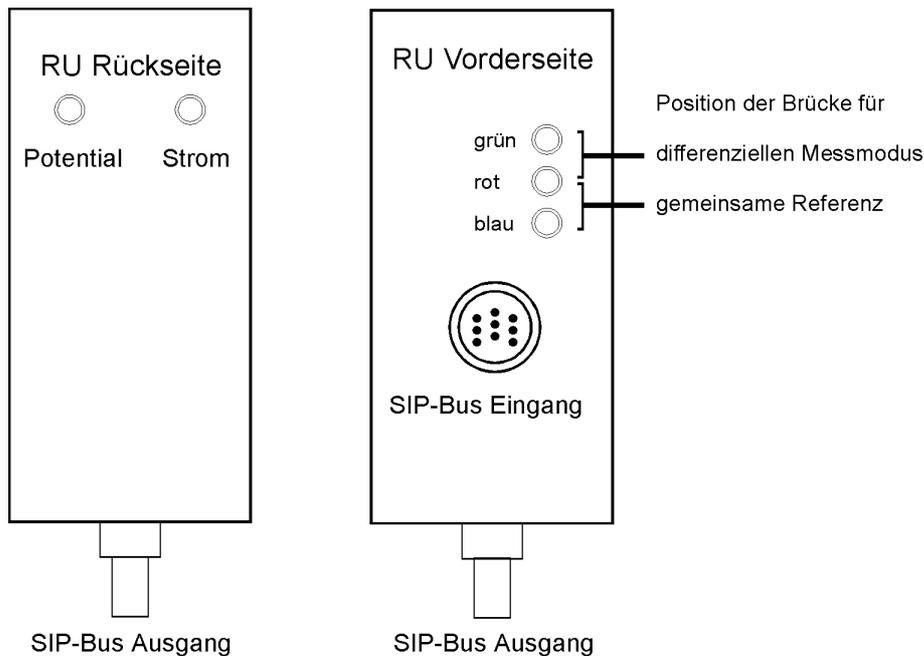


Abb. 4.4.1.1: Ansicht der Stirnseiten einer Remote Unit. Auf der Rückseite befinden sich die Anschlüsse für die Elektroden. Auf der Vorderseite wird der Messmodus durch eine Kurzschlußbrücke festgelegt (rot-blau = gemeinsame Potentialreferenz, z. B. Pol-Pol-Konfiguration; rot-grün = differenzielle Messung gegenüber benachbarter RU, Pol-Dipol- und Dipol-Dipol-Anordnung).

#### 4.4.2 Aufbau der Messanordnung

Ein kompletter Messaufbau der SIP-256 (Abb. 4.2.1) ist von zwei Personen innerhalb einer Stunde realisierbar. Für den Betrieb der SIP 256 werden handelsübliche 12 V Autobatterien verwendet. Zuerst sollte stets das Messprofil mit den Elektroden und Remote Units aufgebaut werden. Als Messelektroden stehen Stahl- und unpolarisierbare  $\text{CuCuSO}_4$ -Elektroden zur Verfügung. Durch die Remote Units besteht die Möglichkeit, mit entkoppelten Elektroden zu arbeiten. Das heißt, daß sich pro RU eine Strom- und eine Potentialelektrode getrennt voneinander anschließen lassen. Maximal können 20 RU's mit einem Ausgangskanal der Base verbunden werden. Zur Zeit lässt sich ein Array von 50 Remote Units umsetzen. Die Adressen der RU's sind entsprechend der Reihenfolge des Messaufbaus im Scriptfile einzutragen (Tab. 4.3.1). An erster Position ist stets die interne RU mit der Kennziffer 2 aufzuführen. Die Zählung für die extern angeschlossenen RU's beginnt ab Position zwei. Remote Units, die an einen höheren Kanal als Ausgang 1 an die Base angeschlossen sind, werden mit einem Zusatz, z.B. 35/2, entsprechend der Nummer des Ausgangs gekennzeichnet. Alle RU's müssen über den SIP-Bus miteinander verbunden sein.

Nach Abschluß des Profilaufbaus empfiehlt sich, noch einmal alle Anschlüsse auf ihre Richtigkeit zu überprüfen. Im differenziellen Messmodus ist darauf zu achten, daß die letzte RU jedes Profils über ein Adapterkabel mit einer abschließenden Potentialelektrode verbunden ist. Bei Messungen im Modus „gemeinsame Referenz“ wird das Potential gegenüber einer Referenzelektrode gemessen. Alle Remote Units sind in diesem Fall über den SIP-Bus mit dieser Potentialelektrode verbunden.

Eine „unendliche“ Stromelektrode wird direkt an einen der Ausgangskanäle der Base angeschlossen. Für den externen Generator steht ein Signaleingang (*in*) an der Base zur Verfügung. Nach dem Aufbau der Elektroden und dem Anschluss der RU's an die Messapparatur erfolgt die Erstellung des Scriptfiles (Tab. 4.3.1). Dabei gilt es zu überprüfen, ob sich alle Dateien, auf die während der Messung zugegriffen wird, in den angegebenen Verzeichnissen befinden.

#### 4.4.3 Sendesignal

Die Verwendung eines externen, digital programmierbaren Signalgenerators erlaubt es, monofrequente periodische Signalformen oder Frequenzspektren einzuspeisen. Form und Amplitude des Stromsignals werden im Scriptfile festgelegt. Die Amplitude des Einspeisestroms wird durch eine ganze Zahl zwischen 0 und 20 (externer Generator) oder 0 und 100 (interner Generator) vorgegeben. In beiden Fällen kann ein Strom von maximal 100 mA eingespeist werden. Bei Einspeisung eines Frequenzspektrums verteilt sich die Amplitude auf die Einzelfrequenzen. Die Modellierung der Signalform geschieht über Dateien, z. B. sinus4.dat, welche vor der Messung in den externen Generator geladen werden. Die in Abbildung 4.4.3.1 dargestellte Zeitreihe zeigt ein Stromsignal, das während einer Labormessung aufgezeichnet wurde. Das Signal setzt sich aus vier sinusförmigen Einzelfrequenzen zusammen. Die Frequenzen wurden unter Berücksichtigung der in Deutschland auftretenden Störfrequenzen  $16\frac{2}{3}$  Hz (Bundesbahn) und 50 Hz (Netzfrequenz) ausgewählt und betragen 6.37, 19.1, 57.3 und 171.9 Hz. Bei der aufgezeichneten Zeitreihe ist ein Offset des Operationsverstärkers der RU zu beobachten. Für die weitere Auswertung der Daten im Frequenzbereich werden die Zeitreihen offsetkorrigiert.

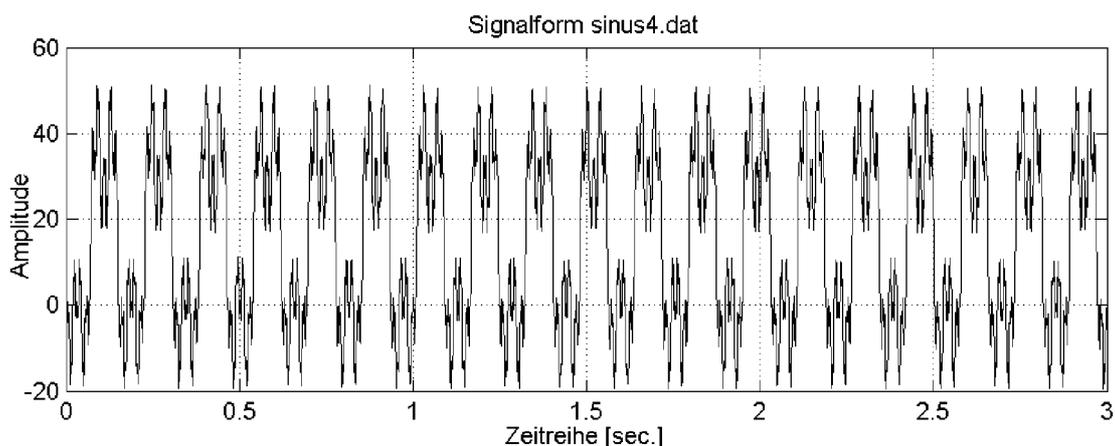


Abb. 4.4.3.1: Aufgezeichnetes Sendesignal einer Labormessung, zusammengesetzt aus vier überlagerten sinusförmigen Einzelfrequenzen. Grundfrequenz 6.37 Hz. Die Oberwellen ergeben sich durch dreimalige Multiplikation der Grundfrequenz mit dem Faktor drei (19.1, 57.3 und 171.9 Hz).

#### 4.4.4 Bestimmung des Signal/Rausch-Verhältnisses

Da eine Messung, je nach Anzahl der Elektroden und gewählter Frequenz, bis zu einer Stunde dauern kann, erfolgt nach dem Festlegen aller Parameter zunächst eine Testmessung. Die Testmessung dient dazu, das Signal-Rausch Verhältnis zu optimieren (Schneider, 2002).

Um eine unkomprimierte und ungefilterte Zeitreihe zu erhalten, wird vor der Testmessung das Präprozessing auskommentiert (Tab. 4.3.1) und die Stapelung auf eins gesetzt. Für den Test sollten man nur ausgewählte Einspeisezyklen mit Stromelektroden an Anfang und Ende des Messprofils ausführen. Um die Charakteristik des Hintergrundrauschens zu erfassen, empfiehlt sich eine Messung der Eigenpotentiale. Abbildung 4.4.4.1 zeigt die Frequenzanalyse des in Abbildung 4.4.3.1 dargestellten Einspeisesignals.

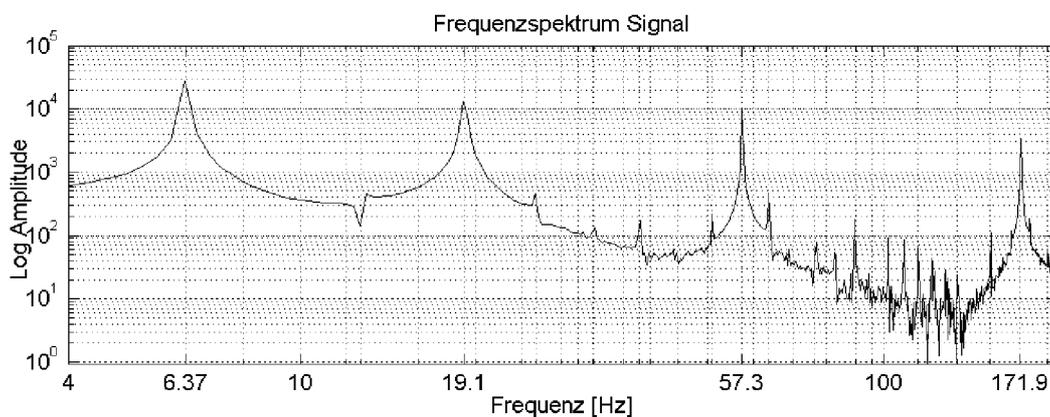


Abb. 4.4.4.1: Frequenzspektrum des, in Abbildung 4.4.3.1 dargestellten, Sendesignals. Die Grundfrequenz von 6.37 Hz und die Oberwellen (19.1, 57.3 und 171.9 Hz) heben sich deutlich vom Untergrundrauschen ab.

In der Frequenzanalyse des aufgezeichneten Einspeisesignals lassen sich die vier überlagerten Einzelfrequenzen klar identifizieren. Die üblicherweise auftretende Störfrequenz der Bundesbahn (16 2/3 Hz) zeichnet sich im Spektrum nicht ab. Dies ist auf die fehlende Bahnanbindung im Messgebiet zurückzuführen. Die 50 Hz des Versorgungsnetzes sind dagegen als Peak oberhalb des Rauschniveaus zu erkennen. Genauso wie die Vielfachen der Grundfrequenz 6.37 Hz (12.7, 25.4, 31.8, 38.2, 44.6, 51.0 usw.), die sich über das gesamte Spektrum fortsetzen. Bei 14 Hz zeigt sich eine Spitze im Frequenzspektrum, die nicht erklärt werden kann. Das Signal-Rausch Verhältnis beträgt für alle vier Messfrequenzen mindestens 10 dB. Neben den natürlichen und anthropogenen Einflüssen tragen hauptsächlich der Verstärker und die Elektroden zum beobachteten Rauschniveau bei.

#### 4.4.5 Messung

Nach Abschluss der Tests folgt die eigentliche Messung. Gestartet wird eine Messung mit dem Steuerprogramm *steuerip* unter MS-DOS. Über den Fortschritt einer laufenden Messung informiert das Kommandofenster. Während einer Messung wird die Tabelle der Einspeisezyklen der Reihe nach abgearbeitet. Die Strom- und Potentialelektroden sind für jeden Zyklus vorgegeben. Nach Ende eines Einspeisezyklus folgt optional das Präprozessing. Es umfasst die digitale Filterung, eine Reduktion der Datenmenge, sowie eine partielle Fouriertransformation. Ein Teil des Datenprozessings erfolgt bereits in den RU's.

Anschließend werden die prozessierten Daten digital über den SIP-Bus auf den Laptop übertragen und in ASCII-Files abgespeichert. Diese Vorgehensweise erlaubt eine Beurteilung der Datenqualität bereits während einer laufenden Messung. Alle \*.asc Files besitzen den im Scriptfile vorgegebenen Dateinamen mit einer dreistelligen Nummer als Zusatz, welche dem Messzyklus entspricht, z. B. datei001.asc, datei002.asc, usw. In Abbildung 4.4.5.1 ist ein automatisierter Messablauf am Beispiel einer Dipol-Dipol-Messung skizziert.

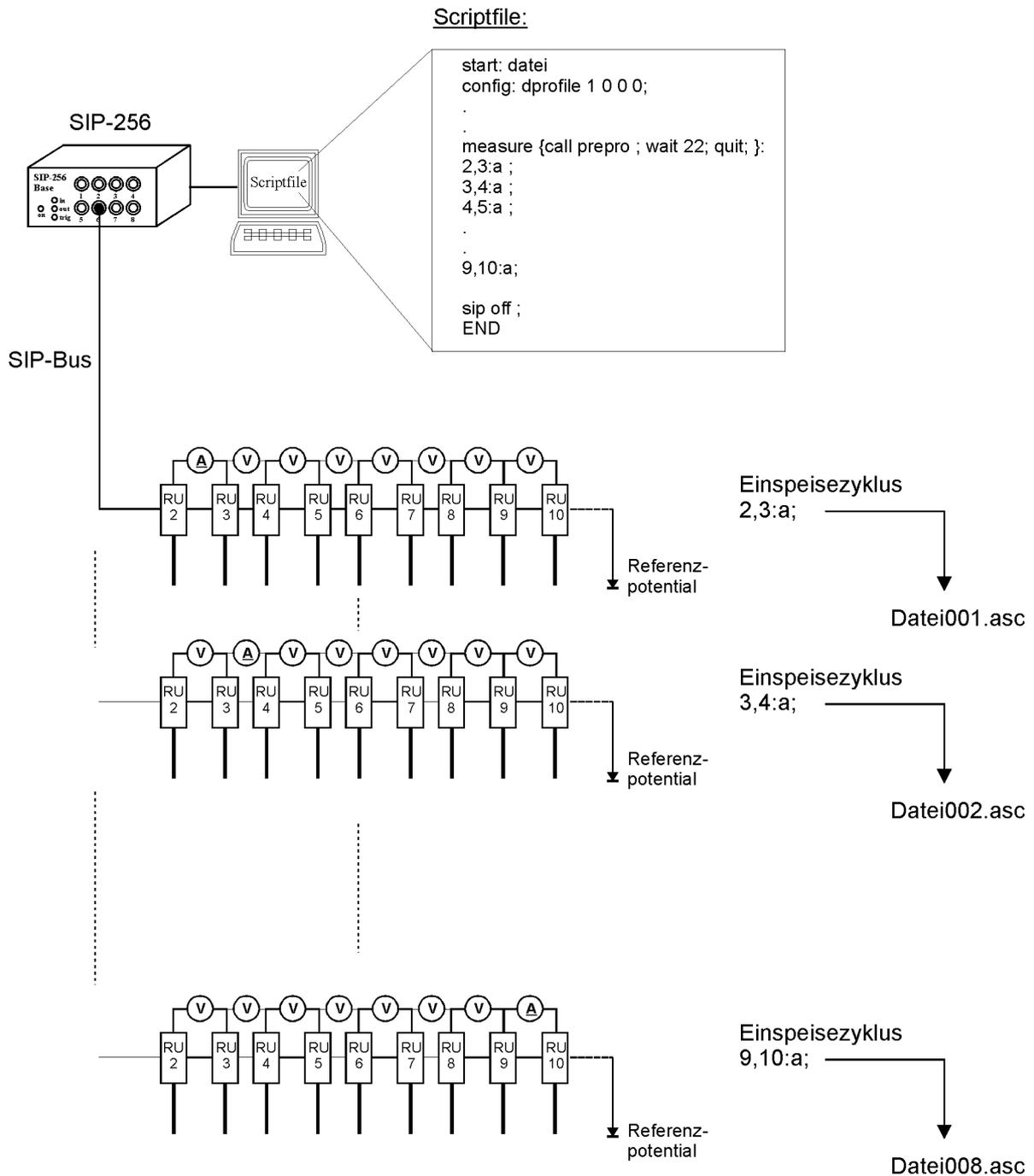


Abb. 4.4.5.1: Messablauf einer Dipol-Dipol-Profilmessung. Jeder im Scriptfile vorgegebene Einspeisezyklus wird in einer \*.asc-Datei abgelegt. Die Stromelektroden sind durch ein Ampe-re-Symbol (A) gekennzeichnet. Alle anderen Dipole messen das Potential (V). Am Ende des Messprofils ist eine Elektrode über den SIP-Bus mit der RU 10 verbunden.

#### 4.4.6 Normale und reverse Messung

Während einer Messung mit der SIP-256 wird automatisch die reverse Elektrodenanordnung aufgezeichnet. Bei einer reversen Messanordnung sind Potential- und Stromelektroden vertauscht. Im Falle einer symmetrischen Messanordnung wie einer Dipol-Dipol- oder Pol-Pol-Konfiguration, entspricht die reverse Messung der bekannten reziproken Messung. Bei unsymmetrischen Messanordnungen gilt dies nicht. Die Voraussetzung für das Reziprozitätsprinzip (Parasnis, 1988) ist in diesem Fall nicht erfüllt. Abbildung 4.4.6.1 verdeutlicht den Unterschied zwischen einer reversen und einer reziproken Messung am Beispiel einer Pol-Dipol- und einer Dipol-Dipol-Konfiguration.

Alle Potentialmessungen, die rechts von den Einspeiseelektroden stattfinden, werden der normalen Messung zugeordnet (Messrichtung links nach rechts) (Abb. 4.4.6.1). Messungen die links von den Stromelektroden stattfinden, werden der reversen Messung zugeordnet (Messrichtung rechts nach links) (Abb. 4.4.6.1). Im Gegensatz zur normalen Messrichtung, sind alle Potentialelektroden der reversen Messanordnung bereits zur Stromeinspeisung verwendet worden. Auf diesen wesentlichen Unterschied wird in Kapitel 6 noch ausführlich eingegangen.

Durch Aufzeichnung des normalen und reversen Datensatzes erhält man nach jeder Messung zwei Pseudosektionen pro Frequenz und Messgröße.

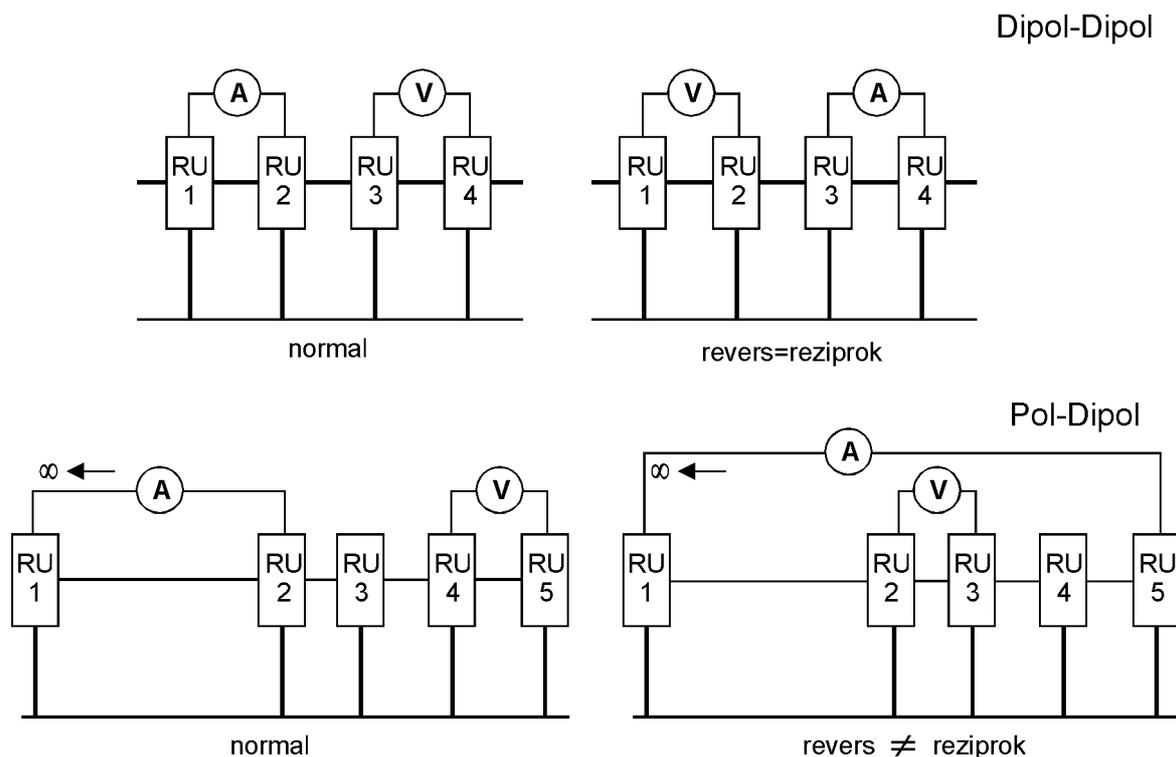


Abb. 4.4.6.1: Darstellung einer normalen und reversen Messung mit der SIP-256 am Beispiel einer Dipol-Dipol- und einer Pol-Dipol-Messung. Die Stromelektroden(A) befinden sich jeweils links bzw. rechts von den Potentialelektroden(V).

## 4.5 Kalibrierung der Remote Units

Jede Remote Unit ist eine individuelle elektronische Einheit, die durch das Zusammenspiel ihrer Bauteile einen spezifischen Einfluss auf die Messwerte hat. Zum Beispiel ist dem ADC ein Tiefpass mit einer Eckfrequenz von etwa 2 kHz vorgeschaltet, die im Rahmen der Bauteiltoleranzen variiert. Diese RC-Reihenschaltung führt zu einer kapazitiven Einstreuung bei der Phasenmessung. Neben den elektronischen Bauteilen haben auch die digitalen Filter in den RU's und elektromagnetische Kopplungseffekte durch die Kabelverbindungen einen Einfluss auf die komplexe Leitfähigkeit. Um all diese Effekte zu eliminieren, wurden mit jeder RU Eichmessungen an einem Widerstandsschaltkreis durchgeführt und beobachtete Abweichungen rechnerisch korrigiert. Abbildung 4.5.1 zeigt den Aufbau des Widerstandsnetzwerkes.

Pro Messung wurden jeweils vier Remote Units im Referenz-Modus angeschlossen. Die RU's sind an den Positionen A (Stromelektrode) und M (Potentialelektrode) angeschlossen.

Als gemeinsame Referenz während der Kalibrierung dient die Potentialelektrode N, die über den SIP-BUS mit allen RU's verbunden ist. Die Stromelektrode B ist direkt mit dem Ausgangskanal 2 an der Base verbunden. Der Aufbau simuliert eine Feldmessung mit Pol-Pol-Konfiguration.

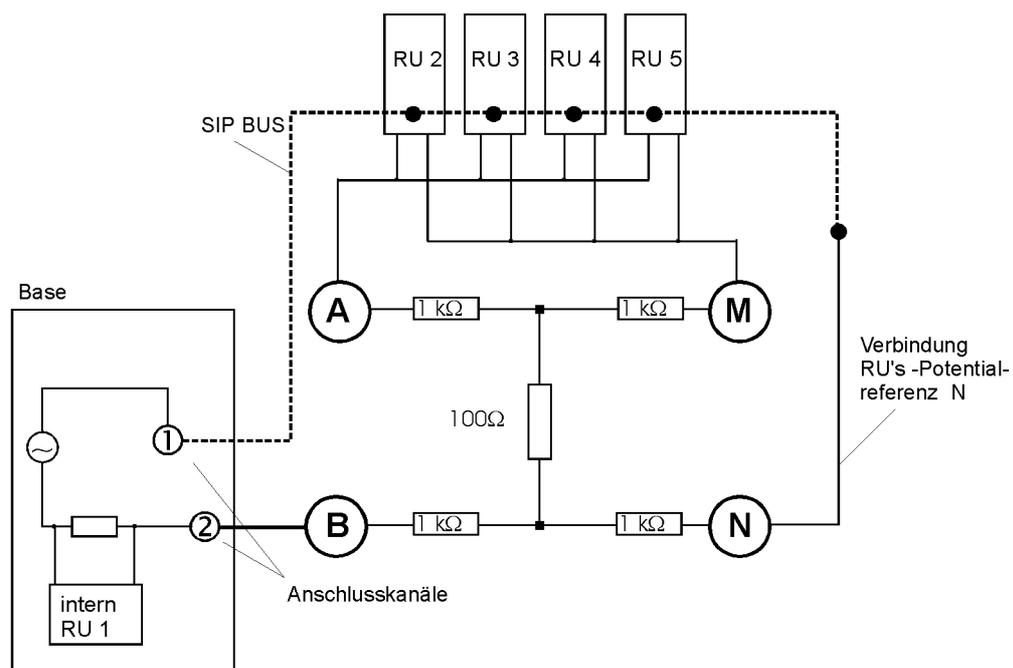


Abb. 4.5.1: Schaltkreis zur Kalibrierung der Remote Units; A, B: Anschlüsse für die Stromelektroden; M und N: Anschlüsse für die Potentialelektroden. Der Eichwiderstand von  $100\Omega$  simuliert einen homogenen Untergrund. Als Übergangswiderstand wurde  $1\text{ k}\Omega$  gewählt.

Eine Kalibrierung enthält vier Wiederholungsmessungen, an Hand derer die Mittelwerte und Standardabweichungen bestimmt werden. Da es sich um ein reines Widerstandsnetzwerk handelt, sind beobachtete Phasenwerte auf die oben beschriebenen Störeffekte zurückzuführen. Während einer Kalibrierung werden Betrag und Phase der komplexen elektrischen Leitfähigkeit für zwölf Wechselstromfrequenzen bestimmt.

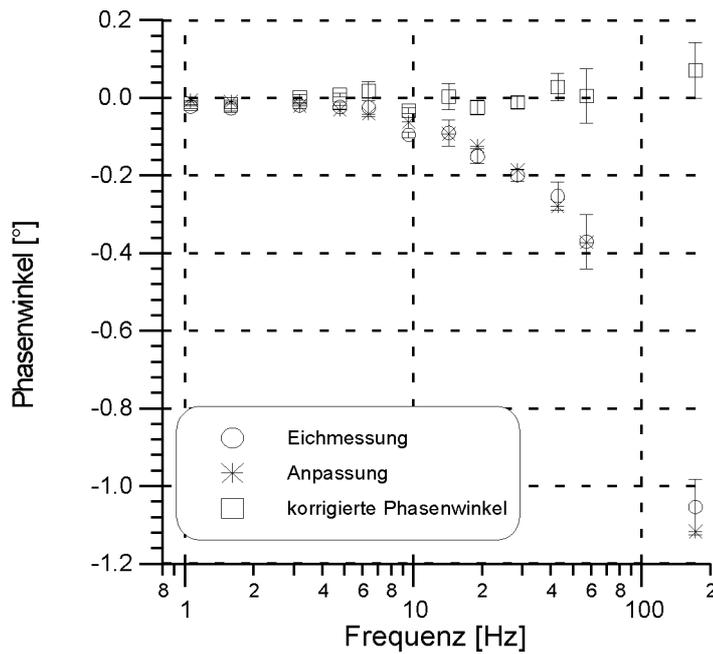


Abb. 4.5.2: Resultat einer Phasenmessung mit RU 12 am Eichschaltkreis. Die Fehlerbalken stellen die Standardabweichung der vier Wiederholungsmessungen dar. Zu sehen sind die unkorrigierten Messwerte (offene Kreise), die mit einer  $\arctan$ -Funktion berechneten Daten (Sterne) und die Phasen nach der durchgeführten Korrektur (offene Quadrate).

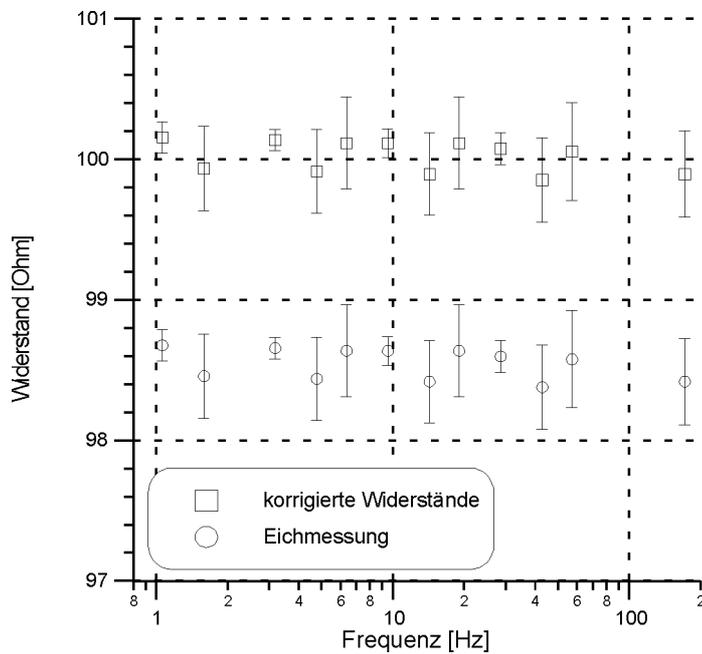


Abb. 4.5.3: Resultat einer Widerstandsmessung mit RU 12 am Eichschaltkreis. Die Fehlerbalken stellen die Standardabweichung der vier Wiederholungsmessungen dar. Zu sehen sind die unkorrigierten Messwerte (offene Kreise) und die Amplituden nach Korrektur des Offsets (offene Quadrate).

Trägt man die Phasenwinkel gegenüber der Messfrequenz auf, beobachtet man einen Anstieg mit zunehmender Frequenz (Abb. 4.5.2).

Die Widerstände der Eichmessung besitzen bei allen Messfrequenzen ein nahezu konstanten Offset (Abb. 4.5.3). Für jede RU lassen sich aus den Ergebnissen Korrekturfaktoren für Real- und Imaginärteil der komplexen elektrischen Leitfähigkeit bestimmen. Die Bestimmung der Korrekturfaktoren erfolgt über die komplexe Zahl  $z$ :

$$z = a + i \cdot b \cdot f \quad (4.5.1)$$

a: frequenzunabhängige, reelle Zahl (1. Korrekturparameter) [ $\Omega\text{m}$ ]

b: frequenzunabhängige, reelle Zahl (2. Korrekturparameter) [ $\Omega\text{ms}$ ]

f: Frequenz [Hz]

Ausgehend von der komplexen Zahl  $z$ , können Phase und Betrag des spezifischen Widerstands berechnet werden (Kap. 3.4.3).

Die ermittelten Korrekturwerte (*eichpop*, Anhang A) werden in die abschließende Datenauswertung am Laptop einbezogen. Die Korrekturwerte aller Remote Units sind in einer Datei (*sipcal.tab*, Anhang A) abgelegt, auf die während des abschließenden Datenprozessings zugegriffen wird. In den Abbildungen 4.5.2 und 4.5.3 sind die korrigierten Phasen und Amplituden dargestellt.

# Kapitel 5: Datenverarbeitung

## 5.1 Einleitung

Nach Abschluss einer Messung folgt die statistische Auswertung und visuelle Umsetzung der Daten am Arbeitsplatz (Kötter, 2001). Die Auswertung (Abb.5.1.1) umfasst das Erstellen von Pseudosektionen sowie die Selektion und Filterung der Daten. Ein Inversionsprogramm erstellt abschließend ein Modell, das eine Interpretation der Messergebnisse erlaubt. In diesem Kapitel sind die einzelnen Schritte der Datenverarbeitung vom Präprozessing in den Remote Units bis zum Untergrundmodell beschrieben.

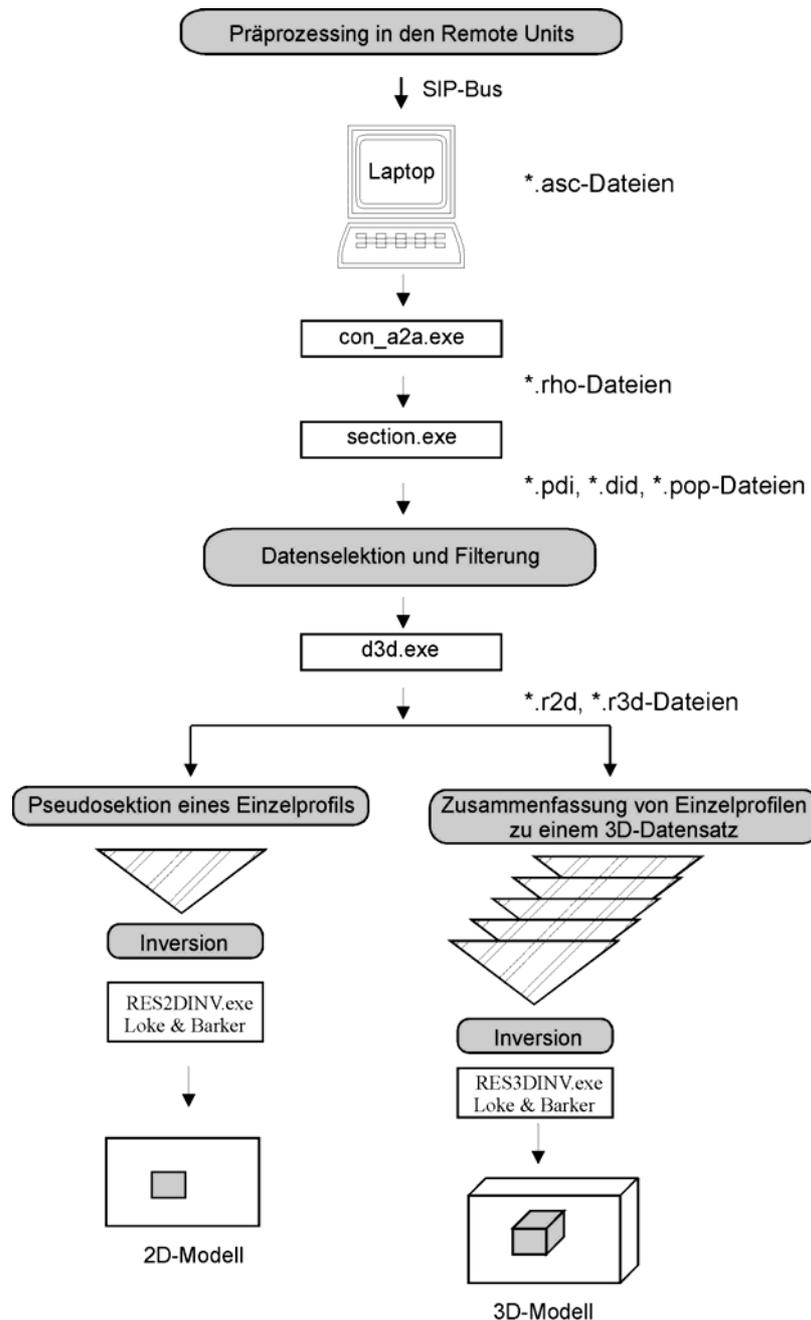


Abb. 5.1.1: Flussdiagramm der Datenverarbeitung, angefangen vom Präprozessing in den RU's bis zur Erstellung eines 2D- bzw. 3D- Untergrundmodells.

## 5.2 Das Präprozessing in den Remote Units

Das Präprozessing (Abb. 5.2.1), d.h. die Bearbeitung der Zeitreihen in den RU's, trägt zu einer Reduzierung der Datenmenge und damit zu einer Verkürzung der Messzeit bei. Vor der Digitalisierung der Daten erfolgt eine analoge Tiefpassfilterung und Verstärkung der Potentialdifferenzen. Nach dem Analog-Digitalwandler (ADC) ist eine weitere Filterung der Zeitreihe in Form eines gleitenden Medians oder einem digitalen Bandpassfilter, einer Reihenschaltung aus rekursiven Filtern (Hochpass-Tiefpass-Tiefpass), möglich. Zusätzlich zur digitalen Filterung lässt sich optional die Samplingrate verändern (Dezimierung). Mehrere Daten der Zeitreihe werden in diesem Fall gemittelt.

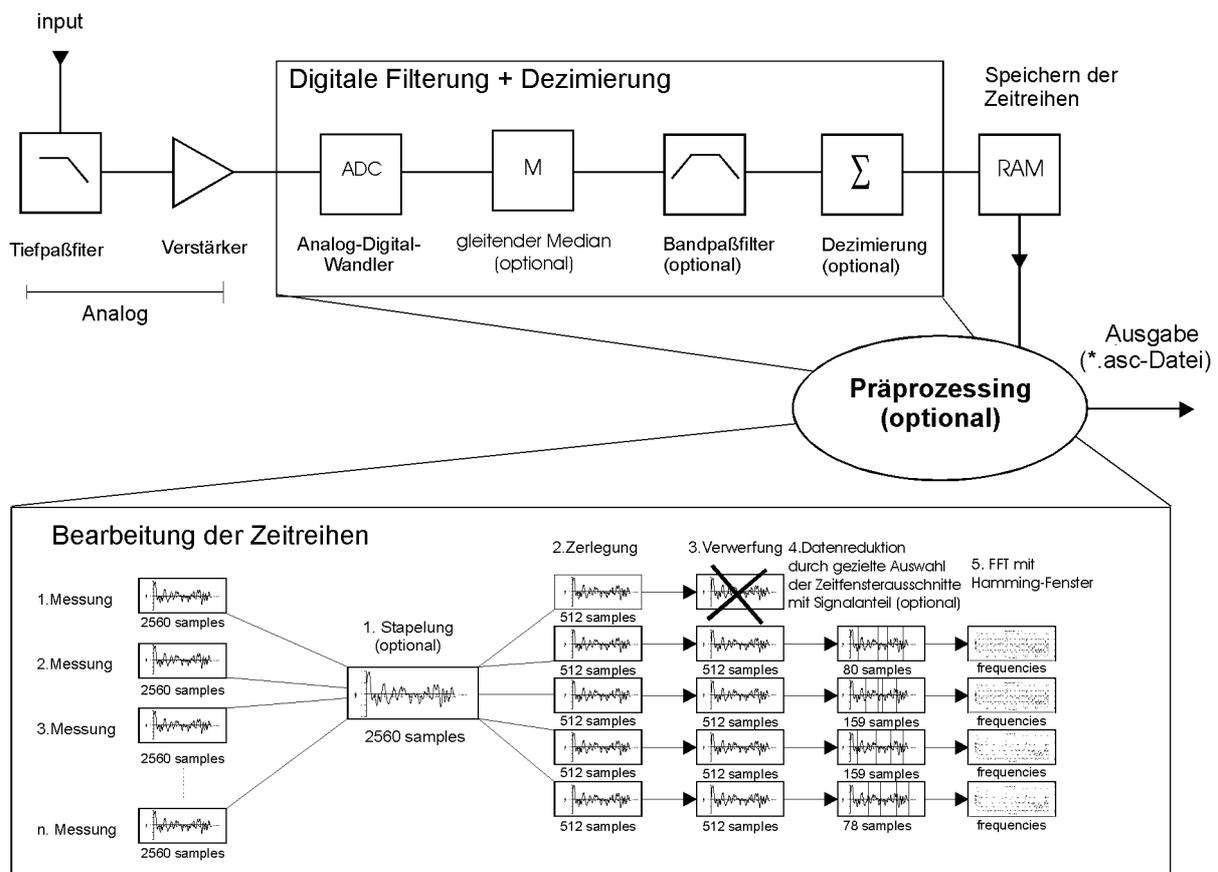


Abb. 5.2.1: Übersicht über das Präprozessing in den Remote Units (RU).

Die einzelnen Bearbeitungsschritte sind am Beispiel einer n-fach gestapelten Zeitreihe mit 2560 Samples skizziert. Dem Präprozessing sind ein Verstärker und Filter vorgeschaltet. Mehrere Zeitreihen können in den RU's gestapelt werden.

Alle Programmdateien für die digitale Datenverarbeitung in den RU's sind auf dem Laptop abgelegt. Ihre vollständige Pfadangabe erfolgt im Scriptfile (Tab. 4.3.1). Unmittelbar nach dem Start der Messung beginnt die Übertragung der Programme in die RU's, die nach jedem Einspeisezyklus aktiviert werden. Die aus der Stapelung von Einzelmessungen resultierende Zeitreihe wird im nächsten Schritt in fünf gleichlange Zeitfenster mit je 512 Messwerten (Abb. 5.2.1) unterteilt. Das erste Fenster wird verworfen. Dadurch vermeidet man Messfehler, hervorgerufen durch die Einschwingvorgänge der Filter.

Die verbleibenden vier Zeitfenster werden für die komplexe Fouriertransformation vorbereitet. Dazu gehört optional eine gezielte Auswahl von Fensterausschnitten mit Signalanteil. Die Festlegung dieser Abschnitte erfolgt im Scriptfile (Kap. 4.3). Unter Verwendung von Hamming-Fenstern (Hamming, 1977) erfolgt eine Verknüpfung der gewählten Zeitabschnitte und die komplexe Fouriertransformation. Nach jedem Einspeisezyklus folgt die Übertragung der Daten von den RU's auf den Laptop. Zu jedem Einspeisezyklus wird eine \*.asc-Datei angelegt, in der die präprozessierten Zeitreihen für den Einspeisestrom und die gemessenen Potentiale in der Reihenfolge des Messaufbaus spaltenweise angeordnet sind.

## 5.3 Abschluss des Datenprozessings, Driftkorrektur und erste Beurteilung der Datenqualität

### 5.3.1 Das Programm *con\_a2a*

Nach dem Auslesen der Daten des letzten Einspeisezyklus wird die Messung beendet. Die Messdaten aller Einspeisezyklen liegen in Form von ASCII-Files (Endung \*.asc) auf dem Laptop vor. Das Programm *con\_a2a* beendet das in den RU's begonnene Processing und berechnet mit der im Scriptfile (Kap. 4.3) angegebenen Messgeometrie die scheinbaren spezifischen Widerstände und scheinbaren Phasen. Falls das Präprocessing in den RU's deaktiviert war, beginnt *con\_a2a* zunächst mit der Fourier-Transformation (FFT). Der Aufruf des Programms lautet wie folgt :

```
con_a2a -del20 -tabsipcal.tab -fft -rho "lte-Frequenz, ..., nte-Frequenz" datei.*
```

Bedeutung der angegebenen Parameter:

- tab\*.\*        mit dem Aufruf -tab(Kalibrierdatei) werden die Phasen und Widerstände mit den für jede RU bestimmten Eichfaktoren korrigiert (siehe Kapitel 4.4).
- rho "....."    Liste der auszuwertenden Frequenzen. Für jeden Einspeisevorgang wird dabei eine \*.rho-Datei angelegt, in der sich die Stromamplituden, Spannungswerte, scheinbaren spezifischen Widerstände und scheinbaren Phasen zu jeder Messfrequenz finden.
- del(int)        mit dieser Option ist die Eingabe einer ganzzahligen Prozentangabe verbunden, die vorgibt, welcher Datenanteil zu Beginn der Zeitreihe verworfen wird, um der Einschwingzeit der elektronischen Bauteile gerecht zu werden. Dieser Vorgang wird beim Präprocessing in den RU's automatisch durchgeführt. Die Grundeinstellung beträgt del20.
- fft             Fouriertransformation (falls kein Präprocessing)
- datei\*          Name der fortlaufenden \*.asc-Dateien mit den aufgezeichneten Zeitreihen.

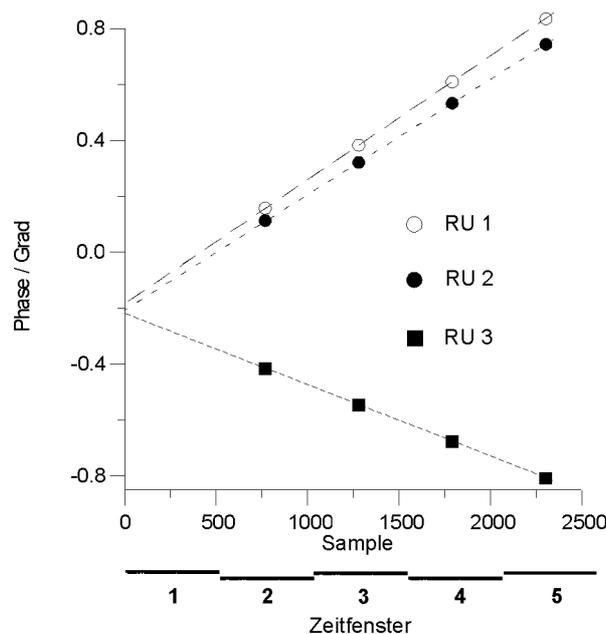
Beispiel mit  $f_1 = 1.06$  Hz,  $f_2 = 3.18$  Hz,  $f_3 = 9.54$  Hz,  $f_4 = 28.6$  Hz und Dateinamen „test“:

```
con_a2a -tabsipcal.tab -rho "1.06, 3.18, 9.54,28.6" test*
```

Nach Ablauf des Programms erhält man zu jeder \*.asc-Datei eine \*.rho Datei, in der sich zu jeder Frequenz und zu jedem ausgewerteten Zeitfenster die Amplitude des Einspeisestroms, die gemessene Spannung, die Phase und scheinbare spezifische Widerstände finden. Im Prinzip ist die Auswertung der scheinbaren spezifischen Widerstände mit dem Erstellen der \*.rho-Dateien abgeschlossen.

### 5.3.2 Driftkorrektur

Durch die Auswertung von vier aufeinanderfolgenden Zeitfenstern ergeben sich zu jedem Messpunkt zunächst vier Widerstands- und Phasenwerte. Mit den vier Phasenwerten wird nun eine Driftkorrektur durchgeführt. Mit der Annahme, daß die ADC-Quarzfrequenzen der einzelnen RU's zwar voneinander abweichen, aber bei störungsfreiem Messablauf zu einer nahezu linearen Abweichung der Phasen führen, lässt sich mittels einer Regression der vier fortlaufenden Zeitabschnitte der korrigierte Wert zur Zeit  $t=0$  s durch Extrapolation ermitteln. Bei Labormessungen an Widerstandsnetzwerken konnten die Phasen dabei mit einer Genauigkeit von  $0.05^\circ$  (etwa 1 mrad) reproduziert werden. Die Standardabweichungen, die sich aus der linearen Regression ergeben, werden als Fehler angegeben.



*Abb. 5.2.2.1: Driftkorrektur der Phasenwerte. Labormessung an einem Widerstandsnetzwerk (aus Bigalke et al., 1999). Die Messfrequenz betrug 64 Hz, die Abtastrate 815 Hz. Pro Zeitreihe wurden 2560 Messwerte aufgezeichnet.*

### 5.3.3 Erste Beurteilung der Datenqualität (Varianzen)

Eine erste Beurteilung der Datenqualität erfolgt mit Hilfe der getrennt ausgewerteten Zeitfenster. Für jedes Zeitfenster werden die scheinbare Phase, der scheinbare spezifische Widerstand  $\rho_a$ , sowie der scheinbare Widerstand ( $\rho_1=U/I$ ) aller Messfrequenzen ermittelt. Es ergeben sich also pro Messfrequenz und Parameter vier Werte, aus denen sich die Varianz berechnet. Die aufsteigend sortierten Varianzen einer kompletten Pseudosektion werden als Verteilungsfunktion dargestellt (siehe Kap. 6). Dabei werden die Varianzen der normalen und reversen Messrichtung getrennt voneinander betrachtet. Die Berechnung und Visualisierung realisiert das Programm *variance.m* (Matlab-Anwendung, Anhang B).

## 5.4 Erstellen und Bearbeiten der Pseudosektionen

### 5.4.1 Das Programm *section*

Um einen Eindruck über die räumliche Verteilung der Messwerte im Untergrund zu erhalten, werden alle Werte einer ausgewählten Messfrequenz aus den \*.rho Dateien ausgelesen und in einer Pseudosektion angeordnet. Diese Aufgabe übernimmt das Programm *section*. Die Datei mit der Pseudosektion erhält als Endung das Kürzel \*.did, \*.pdi, \*.pop, usw., gemäß der gewählten Messkonfiguration.

Die Position jedes Messpunkts ist dabei durch den Abstand der Elektroden und deren Position entlang des Profils vorgegeben (Abb. 5.4.1). Bei der Anordnung der Messpunkte benutzt man die Pseudotiefe, die mit wachsendem Elektrodenabstand zunimmt, jedoch nicht mit einem eindeutigen Tiefenwert zu verwechseln ist.

**section** *-frequ -konfig datei\**

**-frequ**           Angabe der Messfrequenz, z.B. bedeutet -f10 die Auswertung der Messfrequenz 10Hz.

**-konfig**           Die Ausgabedatei wird mit einer Endung versehen, die der Messkonfiguration entspricht, z.B. -did=Dipol-Dipol, -pdi=Pol-Dipol, -pop= Pol-Pol.  
datei\* : Dateiname der fortlaufenden \*.rho-files.

Beispiel, mit frequ=1.06 Hz, Pol-Dipol-Konfiguration und Dateinamen „test“:

**section** -f1.06 -pdi test\*

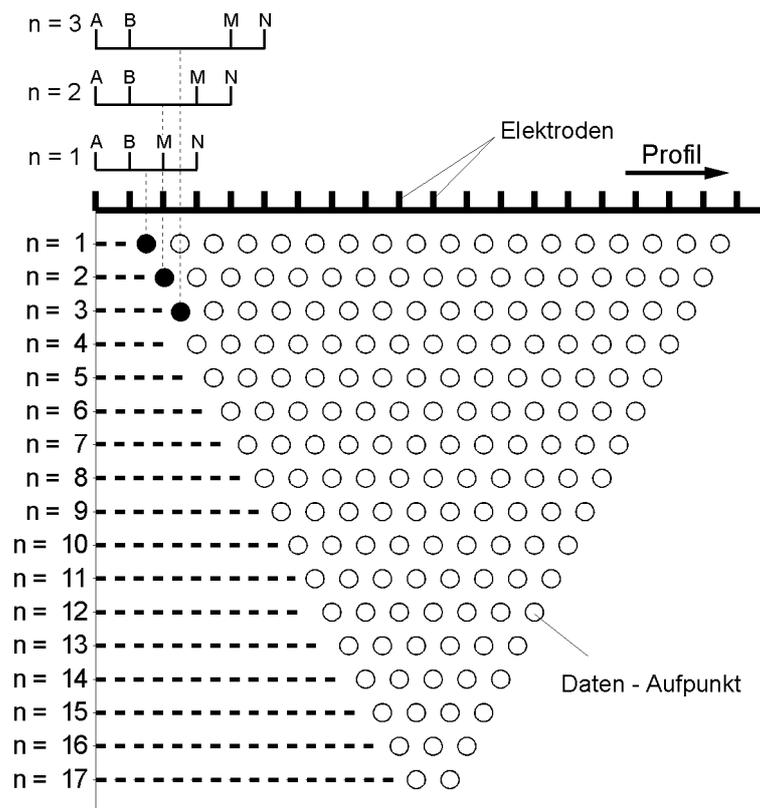


Abb. 5.4.1: Aufbau einer Pseudosektion am Beispiel einer Dipol-Dipol-Anordnung.

## 5.4.2 Visualisierung

Die Pseudosektionen können unmittelbar nach Ende der Messung mit Hilfe der Benutzeroberfläche dargestellt werden. Alternativ stehen Surfer-Scripts (Anhang D) zur Verfügung.

## 5.4.3 Korrektur des Geometriefaktors bei Pol-Pol-Anordnung

Das Problem bei Feldmessungen in Pol-Pol-Anordnungen ist die Realisierung „unendlicher“ Strom- und Potentialelektroden innerhalb eines räumlich begrenzten Messgebiets. Oft entspricht der Messaufbau einer Pol-Pol-Messung nicht den Vorgaben, die einen gleichmäßigen Einfluß der „unendlichen“ Elektroden auf alle „endlichen“ Messelektroden vorschreibt (Robain et al., 1999). In diesem Fall kann durch das Programm *optipop* (Anhang B) der aus den Lehrbüchern bekannte Geometriefaktor ( $k = 2\pi a$ ) durch den Faktor der tatsächlich vorliegenden Messgeometrie ersetzt werden.

## 5.4.4 Entfernen von Elektrodenspuren

Als Elektrodenspuren bezeichnet man charakteristische, diagonal verlaufende Spuren in der Pseudosektion, die durch eine schlechte Ankopplung der Elektroden oder kleinräumige, oberflächen nahe Inhomogenitäten entstehen (Ritz et al, 1999).

Dabei ist jedoch zu beachten, dass Anomalien in zahlreichen Messkonfigurationen, vor allem Dipol-Dipol und Pol-Dipol, ebenfalls diagonale Spuren ausbilden. Zur Beseitigung der Elektrodenspuren wurde das Programm *eleffekt* (Anhang B) nach dem Algorithmus von Ritz et al. (1999) programmiert. Das Verfahren basiert auf einem Medianalgorithmus (Tukey, 1981), der auf alle Horizontalen und Diagonalen einer Pseudosektion angewandt wird.

#### 5.4.5 Beseitigung einzelner Messwerte

Werte mit großem Messfehler innerhalb der Pseudosektion lassen sich mit dem Programm *datacheck.m* (Anhang B) entfernen und durch den Mittelwert der benachbarten Werte, den entsprechenden reziproken Wert, den Median der Pseudotiefe oder einen manuell vorgegebenen Wert ersetzen. Die Option, einzelne Datenpunkte zu eliminieren, besteht auch in den Inversionsprogrammen Res2Dinv und Res3Dinv der Firma Campus Geophysical Instruments Ltd. (Loke und Barker, 1996a).

#### 5.4.6 Berechnung des Percent Frequency Effect (PFE)

Liegen die Widerstandswerte von zwei Messfrequenzen vor, die etwa eine Dekade auseinanderliegen, kann mit der Berechnung des PFE (Kap 3.4.2) eine zusätzliche Messgröße der Spektralen Induzierten Polarisation gewonnen werden. Bei einer Messung mit einem Sendesignal aus vier überlagerten Einzelfrequenzen ergeben sich durch den PFE zwei zusätzliche Datensätze. Die Berechnung des PFE realisiert das Programm *pfecalc* (Anhang B).

### 5.5 Datenselektion

Zur Beurteilung der Datenqualität in Abhängigkeit von der Pseudotiefe erfolgt eine Betrachtung der Tiefenfunktionen (Abb. 5.5.1) aller Parameter und deren Messfehler (*statistic.m*, Anhang B). Weiter werden die Messwerte in normaler und reverser Messrichtung zueinander korreliert (Abb. 5.5.2). Abschließend werden die Verteilungsfunktionen von Real- und Imaginärteil, sowie der resultierenden scheinbaren spezifischen Widerstände und Phasen (Abb. 5.5.3) berechnet. Vor jeder Datenselektion werden die wichtigsten statistischen Größen der gemessenen Parameter ermittelt (Schönwiese, 2000). Mit Hilfe dieser charakteristischen Größen (Tab. 5.5.1) lassen sich Kriterien definieren, nach der die Auswahl durchgeführt wird.

```
#Rhoa:      ave = 25.531551 (Mittelwert in Ωm)
             adev = 4.789357 (durchschnittliche Abweichung in Ωm)
             sdev = 5.838590 (Standardabweichung in Ωm)
             var = 34.089134 (Varianz in [Ωm]2)
             skew = -0.020780 (Schiefe)
             curt = 1.068292 (Kurtosis)
             median = 26.969999 (median in Ωm)
#Phase:     ave = 7.194234 (Mittelwert in mrad)
             adev = 3.256950 (durchschnittliche Abweichung in mrad)
             sdev = 6.724647 (Standardabweichung in mrad)
             var = 45.220875 (Varianz in [mrad]2)
             skew = 4.839994 (Schiefe)
             curt = 46.872974 (Kurtosis)
             median = 6.602470 (Median in mrad)
```

*Tabelle 5.5.1: Auszug aus einer logfile.r3d Datei mit den statistischen Größen einer Dipol-Dipol- Messung.*

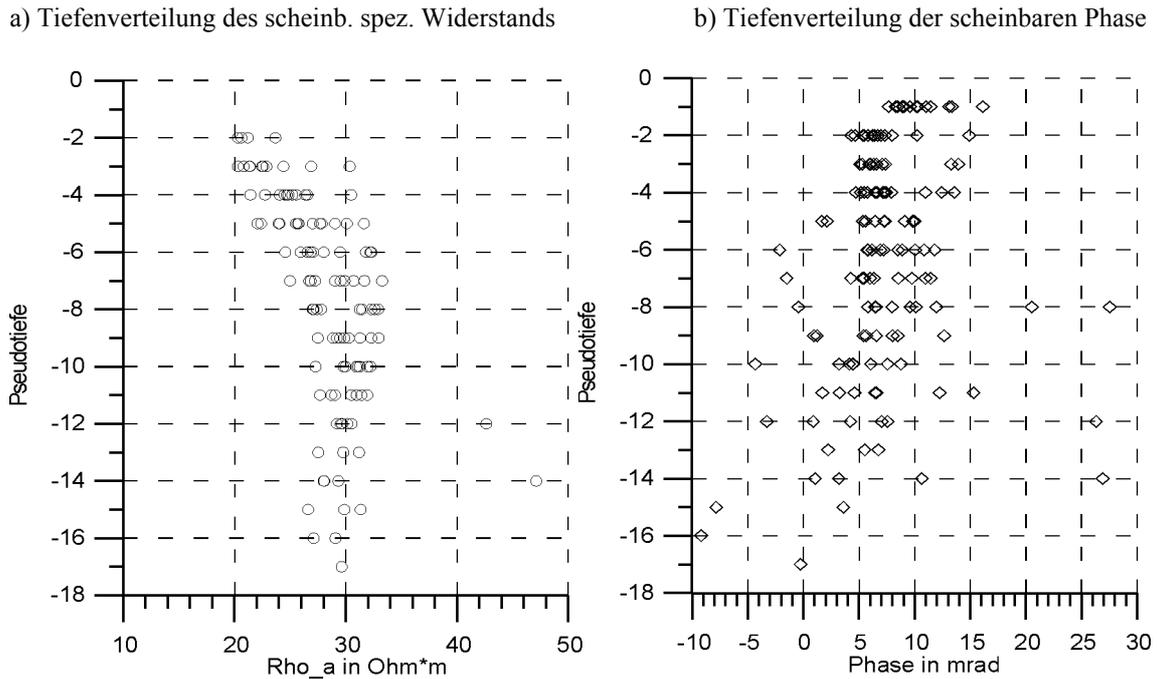


Abb. 5.5.1 Tiefenverteilung der scheinbaren spezifischen Widerstände und der scheinbaren Phasen am Beispiel einer Dipol-Dipol Messung. Die Skalierung ist auf die Wertebereiche 10-50  $\Omega m$  bzw. -10-30 mrad begrenzt.

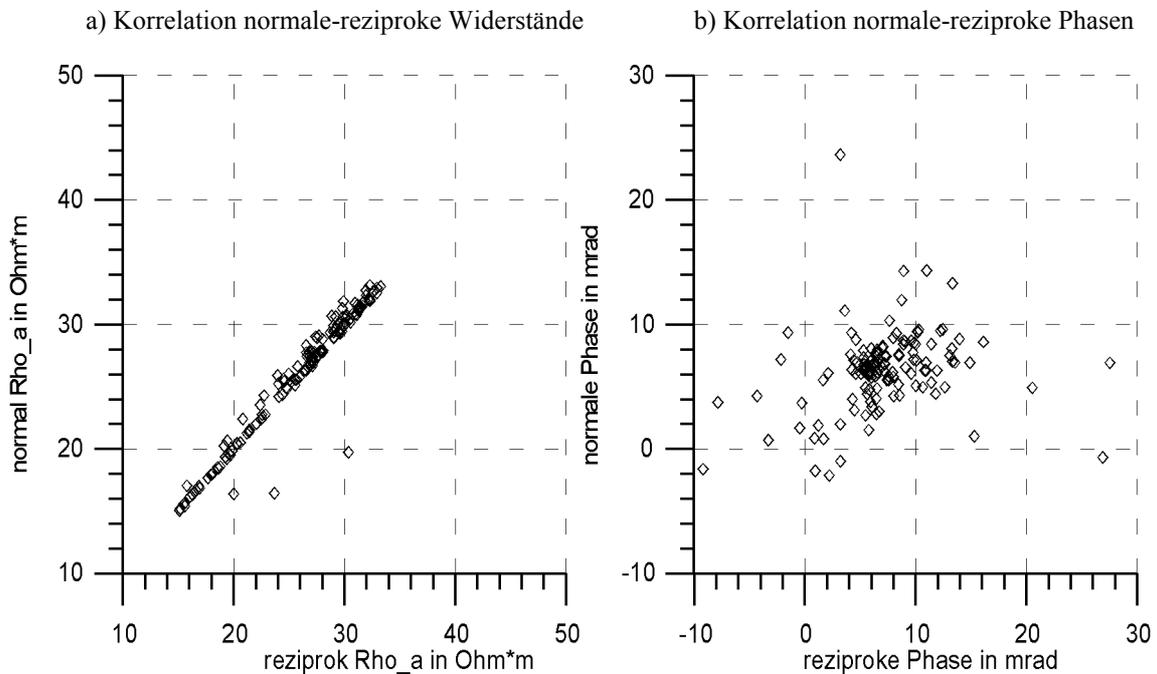


Abb. 5.5.2 Darstellung der Korrelation zwischen den Werten der normalen und der reziproken Messrichtung am Beispiel einer Dipol-Dipol-Messung.

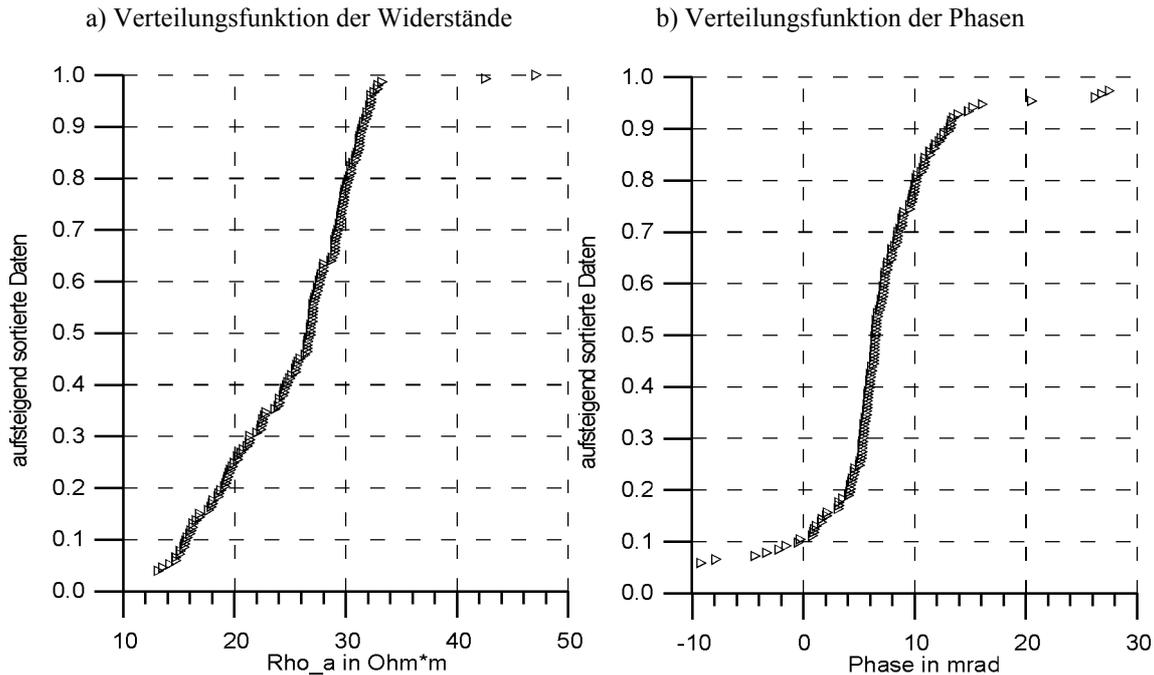


Abb. 5.5.3 Verteilungsfunktionen der scheinbaren spez. Widerstände und Phasen einer Dipol-Dipol-Messung. Anzahl der Messwerte:  $Rho_a$   $n=148$ ; Phase  $n=141$ .

## 5.6 Filterung und Konvertierung des Datenformats

Mit dem Programm *d3d* werden die Datensätze selektiert und in ein, für das Inversionprogramm lesbares Datenformat konvertiert. In das Programm sind zahlreiche Filter integriert, die nach dem oben beschriebenen Muster arbeiten. Zur Selektion werden dabei Ober- und Untergrenzen für die Messwerte festgelegt. Je nach Konfiguration und statistischer Verteilung der Messdaten lassen sich diese Grenzwerte individuell festlegen. Dazu besteht die Möglichkeit, sich aller wichtigen statistischen Parameter zu bedienen.

Daneben können mehrere Messparameter bei der Wahl des Filterkriteriums verknüpft werden. Das bedeutet zum Beispiel, dass reziprok und normal ermittelte Messwerte miteinander verglichen und deren Differenzen als Filterkriterium herangezogen werden können.

Daneben existieren Filter, bei denen als Auswahlkriterien die  $2\sigma$ -Grenze einer Normalverteilung oder alternativ ein Prozentsatz der Daten bezogen auf den Median festgelegt wird. Als einfachste Form der Filterung besteht die Möglichkeit, manuell eine Ober- und Untergrenze des Wertebereichs festzulegen. Eine Kurzbeschreibung (Anhang C) der verfügbaren Filter erhält man mit dem Aufruf *d3d ?*.

## 5.7 Inversion

Die Programme Res2Dinv und Res3Dinv (Campus Geophysical Instruments Ltd.) ermöglichen die Inversion von Datensätzen, die durch einzelne Profilmessungen oder Elektroden-Arrays gewonnen wurden. Im Gegensatz zu anderen Programmen (Weller et al., 1996; Dabas et al., 1994; Pelton et al., 1978; Oldenburg et al., 1993; Oldenburg und Li, 1994) werden Phase und Widerstand als eigenständige reelle Zahlen behandelt und unabhängig voneinander invertiert. Die Inversion der Datensätze erfolgt prinzipiell nach der „smoothness-constrained, least-squares optimization method“ (Smith & Vozoff, 1984; Tripp et al., 1984).

Zur Stabilisierung des Inversionsprozesses trägt ein Dämpfungsfaktor (damping factor, Lagrange Filter), sowie ein Glättungsfilter (flatness filter) bei (de Groot-Hedlin & Constable, 1990; Sasaki, 1992). Das Resultat sind Strukturen mit weichen Konturen und geringem Kontrast zur Umgebung. Schärfere Konturen und höhere Kontraste können durch einen robusteren Median-Algorithmus erzielt werden (Claerbout & Muir, 1973).

Beim ersten Inversionsschritt wird der synthetische Datensatz eines homogenen Halbraum berechnet. Die Verwendung eines homogenen Halbraums als Startmodell erlaubt die analytische Berechnung der Jacobi-Matrix.

Die Matrix der entsprechenden Konfiguration wird vor der ersten Iteration einer Datenbank entnommen, die während der Installation des Programms angelegt wird. Zur Reduzierung der Rechnerzeit und Speicherkapazität bedienen sich Loke und Barker der quasi-Newton Methode (Broyden, 1972). Gegenüber der Gauss-Newton Methode wird dabei die Jacobi-Matrix, welche die partiellen Ableitungen der synthetischen Messwerte nach den in-situ Parametern der einzelnen Gitterelemente enthält, approximiert. Diese approximierte Sensitivitätsmatrix wird bei jedem dritten Iterationsschritt neu berechnet.

Bei der Inversion der Widerstände wird der natürliche Logarithmus der Messwerte benutzt. Dadurch stabilisiert man den Inversionsprozess und erkennt Eingabefehler bei den  $\text{Rho}_a$ -Werten, wie Nullen und negative Zahlen .

Bei jedem Inversionsschritt  $i$  wird folgende Gleichung (Loke & Barker, 1995) gelöst:

$$(J_i^T J_i + \lambda_i C^T C) p_i = J_i^T g_i \quad (5.7.1)$$

$J_i$  : Jacobi-Matrix

$g_i$  : Vektor mit den Abweichungen der synthetischen von den gemessenen logarithmischen Messwerten

$\lambda_i$  : Dämpfungs-Faktor (Lagrange-Faktor)

$p_i$  : Vektor zur Änderung der Modellparameter (Perturbation)

$C$  : Filter zur Gewährleistung der Glattheit des Modells; smoothness-constraint

Bei der Berechnung der Vorwärtsmodelle wird die Methode der finiten Differenzen angewandt (Loke and Barker, 1996a; Loke und Barker 1996b). Erwartet man komplexe Strukturen oder muss die Topographie des Messgebiets berücksichtigt werden (Sutherland et al., 1998; Panagiotis et al., 1999; Fox et al, 1980; Tsourlos, 1999), steht die Methode der Finiten-Elemente zur Verfügung (Coggon, 1971; Pridmore et al., 1981; Sasaki, 1994). Zusätzlich lassen sich Informationen aus Archäologie, Geologie oder Ergebnisse aus Bohrlochmessungen in die Inversion integrieren.

Das Modell wird schrittweise solange verändert, bis nach der Methode der kleinsten Quadrate (rms-error) ein Konvergenzkriterium erreicht oder die maximale Anzahl an Iterationen durchlaufen wurde. Als Konvergenzkriterium dient die relative Änderung des rms-error  $\varepsilon$  (Loke & Barker, 1995) zwischen zwei Iterationenschritten  $i$  und  $(i+1)$  :

$$e_i = (\varepsilon_i - \varepsilon_{i+1}) / \varepsilon_i \quad (5.7.2)$$

Der rms-error jeder Iteration  $i$  berechnet sich wie folgt:

$$\varepsilon_i = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_1^n g_i^2} \quad (5.7.3)$$

Das gewählte Konvergenzkriterium orientiert sich am Messfehler und beträgt in der Grundeinstellung 5 %. Das Konvergenzkriterium wird meist nach dem dritten Iterationsschritt erreicht.

## Kapitel 6: Vergleichende Untersuchungen zur Auswahl der Messelektroden

### 6.1 Einleitung

Bei der Verwendung von Multielektrodenapparaturen werden Elektroden innerhalb weniger Minuten sowohl als Strom-, als auch Potentialelektroden eingesetzt. Aus Untersuchungen ist bekannt (Dahlin, 2000), dass Stahlelektroden direkt nach der Stromeinspeisung über ein Eigenpotential verfügen können, welches deutlich über der Potentialantwort des Untergrundes liegt und erst nach einigen Minuten vollkommen abgeklungen ist.

Allgemeine Lehrbücher (Parasnis, 1973; Telford et al., 1990) schreiben für die Induzierte Polarisation die Verwendung von unpolarisierbaren Potentialelektroden vor. Diese Elektroden sind aus der Eigenpotentialmessung bekannt (Telford et al, 1990). Sie bestehen meist aus Kupferelektroden, die sich in gesättigter  $\text{CuSO}_4$ -Lösung befinden (Telford et al, 1990). Der Kontakt zum Untergrund wird über die Lösung und poröse Keramiktöpfe hergestellt. Auf der anderen Seite existiert die Meinung (Bertin, 1976), dass man Stahlspieße bei Messungen im Frequenzbereich (Kap. 3.2.2) bedenkenlos einsetzen kann und nur im Zeitbereich (Kap. 3.2.1) unpolarisierbare Elektroden zwingend notwendig sind.

An jede Remote Unit der SIP-256 lassen sich eine Strom- und eine Potentialelektrode getrennt voneinander anschließen (Abb. 4.4.1.1). Die von Dahlin beschriebenen Polarisationseffekte vermeidet man dadurch. Analog zu den Untersuchungen von Dahlin et al. (2002) im Zeitbereich soll in diesem Kapitel überprüft werden, ob sich qualitative Unterschiede zwischen einer entkoppelten Messanordnung und einer Anordnung mit nur einer Elektrode für Stromeinspeisung und Potentialmessung bei IP im Frequenzbereich ergeben.

Der Einfluss standortspezifischer Bodenparameter wird durch Messungen an drei verschiedenen Lokationen berücksichtigt. Als Messlokationen wurden das Pandelbachtal bei Seesen am Harz, der Büraberg in Nordhessen und das Federseemoor nördlich des Bodensees ausgewählt. Das Reziprozitätsprinzip (Keller und Fischknecht, 1966) spielt eine wesentliche Rolle beim Vergleich. Aus diesem Grund wurde mit der Dipol-Dipol-Konfiguration eine Messgeometrie gewählt, bei der das Prinzip gewährleistet ist. Zu den Untersuchungen sei angemerkt, dass alle Messungen mit der SIP-256 durchgeführt wurden und Schlussfolgerungen nur bedingt auf andere Messgeräte übertragbar sind. Insgesamt wurden drei verschiedene Anordnungen miteinander verglichen:

#### Anordnung A:

Eine einzelne Edelstahlelektrode für Stromeinspeisung und Potentialmessung

#### Anordnung B:

Zwei entkoppelte Elektroden; eine Edelstahlelektrode für die Stromeinspeisung und eine unpolarisierbare  $\text{Cu-CuSO}_4$ -Elektrode für die Potentialmessung.

#### Anordnung C:

Eine einzelne unpolarisierbare  $\text{Cu-CuSO}_4$ -Elektrode für die Stromeinspeisung und Potentialmessung.

Alle Profilmessungen, die für die Vergleiche herangezogen werden, erfolgten unmittelbar hintereinander und wurden in Dipol-Dipol Konfiguration durchgeführt. Bei allen Messungen wurde ein Spektrum aus vier Frequenzen (1.06, 3.18, 9.54 und 28.6 Hz) eingespeist. Die Stromamplitude verteilt sich dabei logarithmisch auf die vier Frequenzen. Folglich nimmt mit zunehmender Frequenz die Amplitude ab. Bei den Daten, die von der SIP-256 in normaler Messrichtung (Profil von links nach rechts) aufgenommen werden, findet kein Wechsel von Strom- zu Potentialelektrode statt. Das bedeutet, dass diese Messrichtung von Polarisierungseffekten (Dahlin, 2000) unbeeinflusst ist. Dagegen waren bei allen Daten, die in reziproker bzw. reverser Messrichtung (Profil von rechts nach links) aufgenommen sind, alle Potentialelektroden bereits Stromelektroden. Sollten Polarisierungseffekte an den Elektroden wegen des Wechsels von Strom- zu Potentialelektrode auftreten, die bei Gleichstrommessungen ( $\sim 0.1$  Hz) um ein Vielfaches über der Untergrundantwort liegen können (Dahlin, 2000), sollte sich das auch bei niederfrequentem Wechselstrom (3.18 und 9.54 Hz) in erhöhten reziproken Messwerten widerspiegeln. Abbildung 4.4.6.1 verdeutlicht den Unterschied zwischen normaler und reziproker bzw. reverser Messrichtung.

## 6.2 Bewertungskriterien

### 6.2.1 Varianzen

Als erstes Kriterium dient die Verteilungsfunktion aller Varianzen der scheinbaren Widerstände und scheinbaren Phasen einer kompletten Pseudosektion. Bei der Bewertung wird dabei zwischen den Messrichtungen unterschieden.

Die Varianzen der Daten zweier Messfrequenzen werden bewertet. Dies soll zeigen, wie stabil sich die Anordnungen gegenüber einer Änderung der Frequenz bzw. Stromamplitude verhalten. Da die Geometriefaktoren eine Gewichtung der Messwerte darstellen, wurden die scheinbaren Widerstände verwendet. Grundlage für die Berechnung waren vier gleichlange Zeitfenster, in welche jede Zeitreihe während der Auswertung unterteilt wird (Kap. 5.2). Aus den aufsteigend sortierten Varianzen der normalen und reziproken Richtung sind die 25 %, 50 % (Median) und 75 % Quartile extrahiert und graphisch dargestellt. Die Quartile entsprechen dem Wert, unterhalb dessen 25 %, 50 % bzw. 75 % der aufsteigend sortierten Varianzen des Datensatzes liegen. Bei einer Gauß'schen Normalverteilung entspricht das 50 % Quartil, d.h. der Median, der mittleren Varianz des Datensatzes. Der Vergleich der Quartile der Phasen und Widerstände soll zeigen, ob sich zwischen den Anordnungen und Messrichtungen Unterschiede in der Datenqualität ergeben.

### 6.2.2 Reziprozität

Die Abweichung zwischen normalen und reziproken Messwert wird als zweites Kriterium herangezogen. Das Reziprozitätsprinzip besagt, dass das Vertauschen der Strom und Potentialelektroden keinen Einfluss auf den Messwert hat. Entsprechend müssten die Werte der normalen und reziproken Richtung im Bereich der Messfehler übereinstimmen. Ausgehend von der Annahme, dass die Daten der normalen Messrichtung von Polarisierungseffekten unbeeinflusst sind, ist ein veränderter reziproker Messwert ein Anzeichen für auftretende Effekte. Die Differenz zwischen den beiden Messwerten kann somit als Kriterium verwendet werden. Bei einer entkoppelten Anordnung sollten sich keine Differenzen ergeben.

Um die Reziprozität der Anordnungen A bis C miteinander vergleichen zu können, werden nur Messwerte zum Vergleich herangezogen, welche sich in normaler Messrichtung maximal um 10 % (Widerstände) oder 10 mrad (Phasen) unterscheiden.

Die Festlegung dieser Rahmenbedingung erfolgte unter Abschätzung eines Messfehlers von 5 % bzw. +/- 5 mrad für jede Anordnung. Für alle berücksichtigten Werte wird die Differenz zum reziproken Messwert gebildet. Die Verteilungsfunktionen der einzelnen Anordnungen, welche sich aus den aufsteigend sortierten Differenzen ergeben, werden in Diagrammen verglichen. Je steiler die Verteilungskurve, desto geringer sind die Differenzen bzw. die Abweichung von einer idealen Reziprozität. Ergibt sich eine negative Differenz, liegt der reziproke Messwert über dem Wert gemessen in normaler Messrichtung. Entsprechend bedeutet eine positive Differenz, dass der Wert in normaler Messrichtung über dem reziproken Wert liegt.

Elektrochemische Prozesse im Untergrund führen zu einer zeitlichen, linearen Drift des Eigenpotentials. Diese Drift beträgt bei Stahlelektroden etwa 2 mV/min (Dahlin et al., 2002). Bei einer vollautomatischen Multielektroden-Messung von 45 Minuten ergäbe sich eine Drift von 90 mV. Dahlin et al. (2002) konnten zeigen, dass ein Wechsel von Strom- zu Potentialelektrode bei Stahlelektroden zu einem negativem Offset der Aufladbarkeit führt. In der Gleichstromgeoelektrik kann dieser Wechsel einen markanten positiven Offset des scheinbaren spezifischen Widerstands verursachen, der erst nach 20 Minuten exponentiell abgeklungen ist (Dahlin, 2000).

Der Vorteil von Stahlelektroden ist der schnelle Aufbau des Messprofils. Unpolarisierbare Cu-CuSO<sub>4</sub>-Elektroden benötigen einige Minuten, bis die CuSO<sub>4</sub>-Lösung über poröse Keramiktöpfe einen guten Kontakt zum Untergrund herstellt. Dieser Ankopplungseffekt kann sich in einer zeitlichen Veränderung der Messwerte bemerkbar machen.

### 6.2.3 Reziprozität in Abhängigkeit von Stromamplitude und Frequenz

Als letztes Kriterium wird die Reziprozität in Abhängigkeit der Frequenz und Stromamplitude untersucht. Die SIP-256 speist ein Spektrum aus vier Frequenzen ein. Dabei verteilt sich die Stromamplitude logarithmisch auf vier Frequenzen. Durch die exponentielle Verteilung der Stromamplitude auf die vier eingespeisten Frequenzen kann man zwischen dem Einfluss der Frequenz und der Stromamplitude nicht unterscheiden.

Am Beispiel der Frequenzen 3.18 Hz und 9.54 Hz soll untersucht werden, ob sich die Reziprozität der einzelnen Anordnungen unter den gerätespezifischen Einstellungen mit Frequenz und Stromamplitude ändert. Dazu wird bei allen Daten einer Pseudosektion die Differenz zwischen normalen und reziproken Messwert ermittelt und aufsteigend sortiert. Die resultierenden Verteilungskurven der beiden Frequenzen werden anschließend graphisch verglichen.

## 6.3 Resultate

### 6.3.1 Pandelbachtal bei Seesen am Harz

#### 6.3.1.1 Messgebiet und -aufbau

Die erste Vergleichsmessung wurde während eines Feldpraktikums des Instituts für Geophysik der Technischen Universität Clausthal durchgeführt.

Bei der Untersuchungsfläche handelt es sich um einen mittelalterlichen Verhüttungsplatz (Kap. 7.2). Über die Messfläche sind zahlreiche oberflächennahe Schlackegruben und Verhüttungsöfen verteilt. Entsprechend zeichnet sich das Messgebiet durch eine stellenweise sehr starke Polarisierbarkeit des Untergrunds aus.

Das Messprofil hatte eine Gesamtauslage von 20 m. Der Elektroden- und Dipolabstand betrug 1m.

Die Stromamplitude war bei den Anordnungen A und B identisch und betrug bei der Messfrequenz von 3.18 Hz 46 mA und 9.54 Hz 30 mA. Für Anordnung C wurde die Stromamplitude um den Faktor 4 herabgesetzt. Die Amplitude wurde zur Vermeidung einer zu großen Stromdichte und damit verbundenen elektrochemischen Effekten an der Grenzfläche Kupferstab-Elektrolyt herabgesetzt.

### 6.3.1.2 Varianz

In Abbildung 6.3.1.2.1 und 6.3.1.2.2 sind die Varianzen der scheinbaren Widerstände (a) und Phasen (b) für die Messfrequenzen 3.18 Hz und 9.54 Hz dargestellt.

Vergleicht man die Quartile (25 %, 50 % (med) und 75 %) der Verteilungsfunktionen der scheinbaren Widerstände und Phasen, besitzt Anordnung C mit einer einzelnen Cu-CuSO<sub>4</sub>-Elektrode höhere Varianzen als die beiden übrigen Anordnungen.

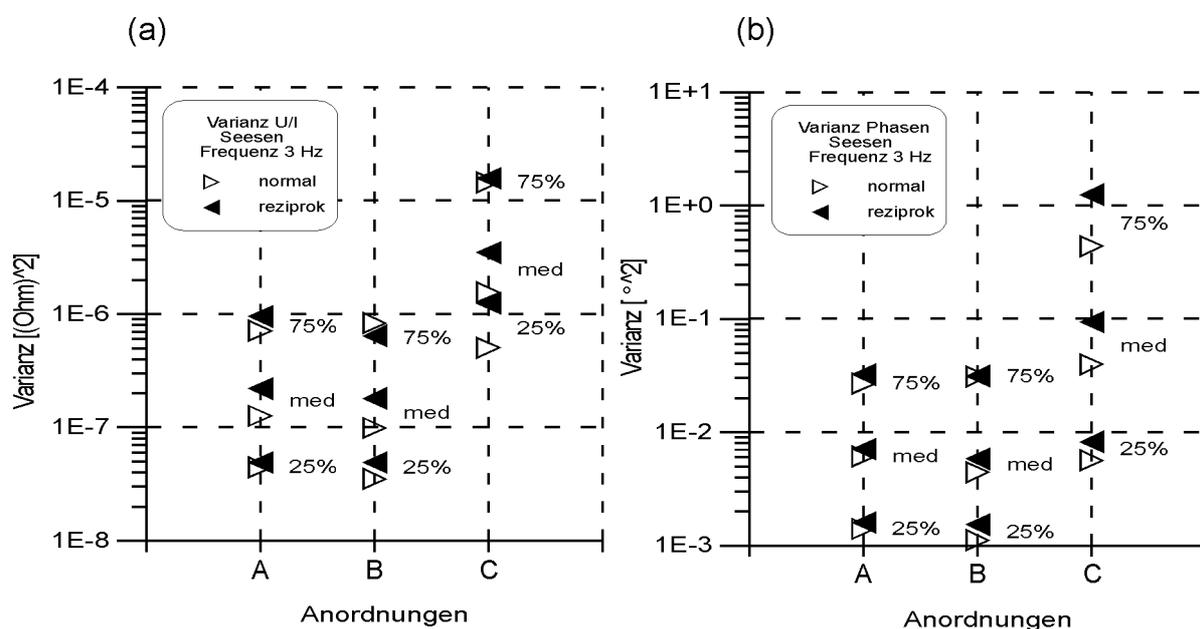


Abb. 6.3.1.2.1: Quartile (25 %, 50 %=med(Median) und 75 %) der aufsteigend sortierten Varianzen der scheinbaren Widerstände (a) und Phasen (b). Messfrequenz 3.18 Hz; Messgebiet Seesen am Harz; Konfiguration: Dipol-Dipol. Anordnungen: A: einzelne Stahlelektrode, B: entkoppelte Strom- und Potentialelektroden, C: einzelne Cu-CuSO<sub>4</sub>-Elektrode.

Diese Beobachtung gilt für die Frequenzen 3.18 Hz und 9.54 Hz. Zwischen den Anordnungen A und B ergeben sich kaum Unterschiede.

Die Abweichungen zwischen den Varianzen der normalen und reziprok gemessenen Werte sind bei Anordnung C am größten. Überall liegen bei beiden Parametern die Quartile der reziproken Messung über denen der normalen Messrichtung. Offensichtlich steht dieses Verhalten im Zusammenhang mit der vorhergehenden Benutzung als Stromelektrode. Die elektrochemischen Veränderungen, die bei der Benutzung als Stromelektrode auftreten, sind offensichtlich noch nicht abgeklungen.

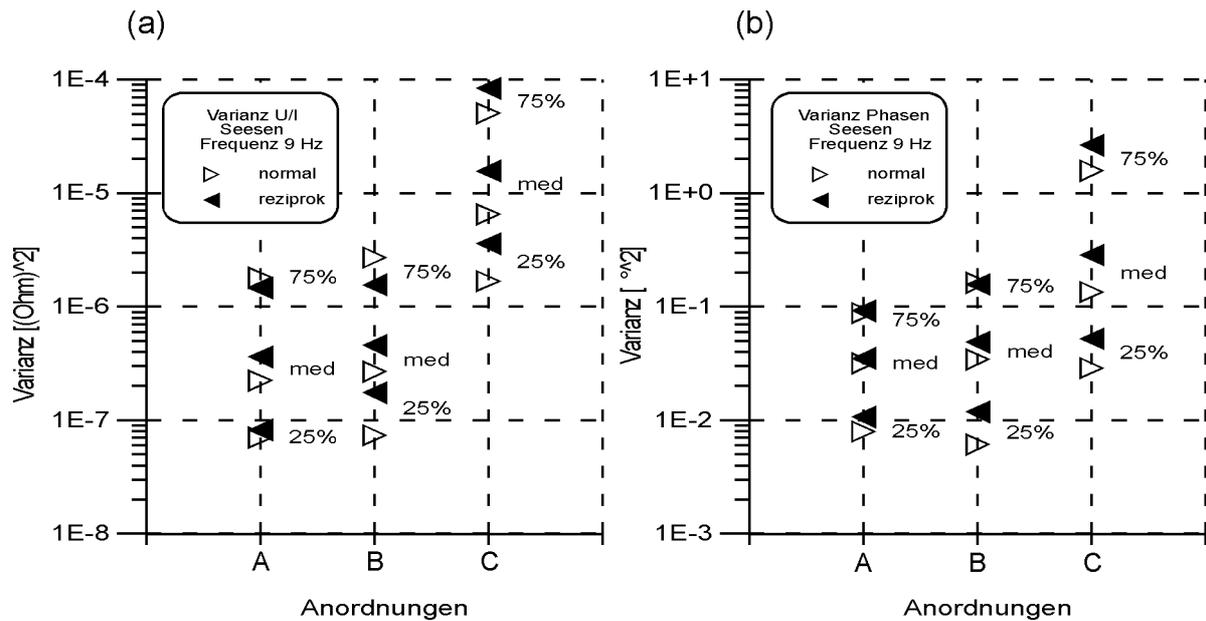


Abb. 6.3.1.2.2: Quartile (25 %, 50 %=med(Median) und 75 %) der aufsteigend sortierten Varianzen der scheinbaren Widerstände (a) und Phasen (b). Messfrequenz 9.54 Hz; Messgebiet Seesen am Harz; Konfiguration: Dipol-Dipol. Anordnungen: A: einzelne Stahlelektrode, B: entkoppelte Strom- und Potentialelektroden, C: einzelne Cu-CuSO<sub>4</sub>-Elektrode.

Bei den Phasen ist zu beobachten, dass die Varianzen der reziproken Messwerte mindestens gleich oder größer als die Varianzen der normalen Richtung sind. Da sich diese Beobachtung nicht auf eine Anordnung beschränkt, und bei Anordnung B Polarisationseffekte auszuschließen sind, muss in diesem Fall auf eine interne gerätetechnische oder externe Ursache geschlossen werden. Mit zunehmender Messfrequenz sind bei allen Parametern höhere Varianzen zu beobachten. Der Anstieg beträgt dabei bis zu einer Dekade. Diese Beobachtung deckt sich mit den erhöhten Varianzen von Anordnung C und lässt sich durch die herabgesetzte Stromamplitude bzw. der abnehmenden Amplitude bei zunehmender Frequenz erklären.

### 6.3.1.3 Reziprozität

Wie zu Beginn des Kapitels erläutert, erfolgt der Vergleich und die Überprüfung der Reziprozität der Anordnungen nur mit scheinbaren spezifischen Widerständen und scheinbaren Phasen, welche sich in normaler Messrichtung maximal um 10 % (Widerstände) bzw. 10 mrad (Phasen) unterscheiden. Die Verteilungsfunktionen der drei Anordnungen, die sich aus den aufsteigend sortierten Differenzen zwischen normalem und reziproken Messwert ergeben, werden in den folgenden Abbildungen miteinander verglichen.

#### 6.3.1.3.1 Vergleich A-B

Anordnung B (□) zeigt verglichen mit Anordnung A (△) (Abbildung 6.3.1.3.1a) eine geringere Variation der Differenzen der ρ<sub>a</sub>-Werte. Während bei Anordnung B (□) 50 % der Daten innerhalb der Differenzen +/- 20 Ωm liegen, finden sich bei Anordnung A (△) nur 30 % der Daten in diesem Bereich. Die Kurve von Anordnung B (□) zeigt einen symmetrischen Verlauf, während sich bei Anordnung A (△) ein größerer Anteil negativer Differenzen ergibt.

Das bedeutet, dass etwa 55 % der reziproken Widerstandswerte größer als die entsprechenden Werte in normaler Messrichtung sind.

Die Verteilungsfunktionen der Phasendifferenzen sind bei beiden Anordnungen symmetrisch (Abb. 6.3.1.3.1b). Gegenüber 60 % bei Anordnung A ( $\Delta$ ) finden sich für Anordnung B ( $\square$ ) 70 % der berücksichtigten Daten innerhalb einer Differenz von  $\pm 5$  mrad.

Der Verlauf der Verteilungsfunktionen lässt sich im Bereich der negativen Phasendifferenzen kaum unterscheiden. Auffällig ist jedoch die Abweichung der beiden Anordnungen im positiven Bereich. Oberhalb 60 % der Daten verläuft die Verteilungsfunktion von Anordnung A ( $\Delta$ ) flacher. Bei gleicher Datenanzahl treten mehr positive Differenzen bei Anordnung A ( $\Delta$ ), als bei Anordnung B ( $\square$ ) auf.

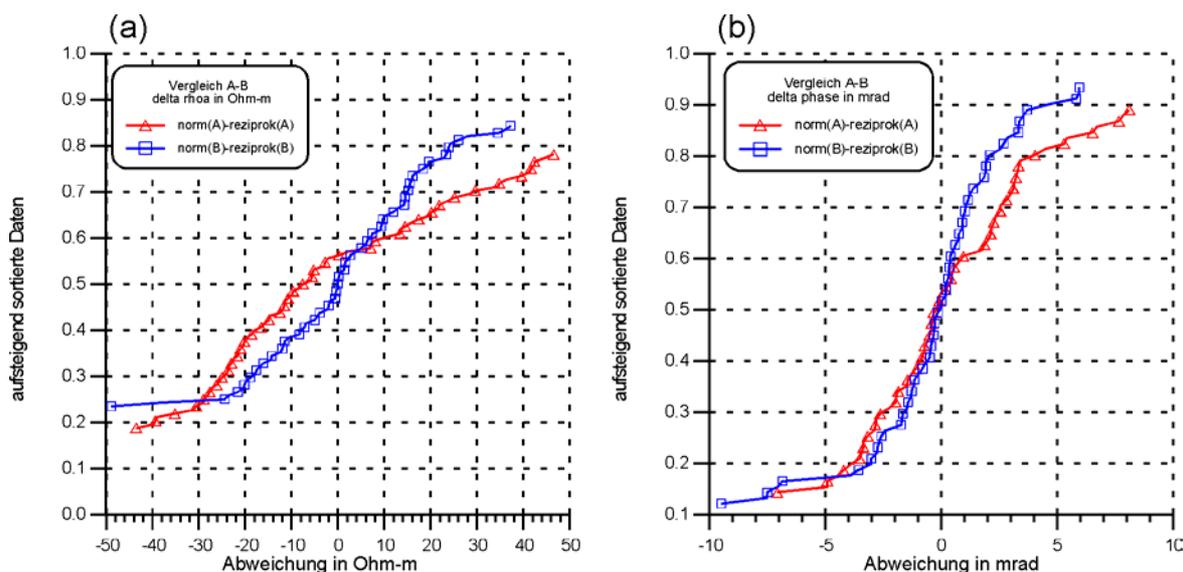


Abb. 6.3.1.3.1: Kriterium Reziprozität. Vergleich Anordnung A mit B. (a) Verteilungsfunktion der Differenzen des scheinb. spez. Widerstands. 83 % aller Daten der Pseudosektion wurden berücksichtigt. (b) Verteilungsfunktion der Phasendifferenzen. 59 % aller Daten berücksichtigt. Die Abszissenwerte sind in den Abbildungen auf  $\pm 50 \Omega m$  bzw.  $\pm 10$  mrad beschränkt.

### 6.3.1.3.2 Vergleich A-C

Auch gegenüber C ( $+$ ) zeigt Anordnung A ( $\Delta$ ) bei den Differenzen der Widerstände eine flachere Verteilungskurve (Abb. 6.3.1.3.2a) und größere Streuung der Werte. Auffällig ist die Asymmetrie beider Verteilungskurven. Anordnung A ( $\Delta$ ) besitzt einen Anteil von 55 % negativen Differenzen, C ( $+$ ) einen Anteil von 55 % positiven Differenzen.

Ein anderes Bild zeigt sich bei den Phasendifferenzen (Abb. 6.3.1.3.2b). Beide Verteilungsfunktionen verlaufen steiler verglichen zu den Kurven der Widerstandsdifferenzen. Auch ist bei beiden Anordnungen eine symmetrische Verteilung zu erkennen. Zwischen den Ordinatenwerten 0.1 und 0.8 zeigt Anordnung A ( $\Delta$ ) einen fast linearen Anstieg, während Anordnung C ( $+$ ) einer Gauss'schen Verteilungskurve ähnelt. Die Folge ist, dass die Phasendifferenzen zwischen den Ordinatenwerten 0.25 und 0.75 in einem engen Bereich von  $\pm 2$  bis  $\pm 2$  mrad liegen.

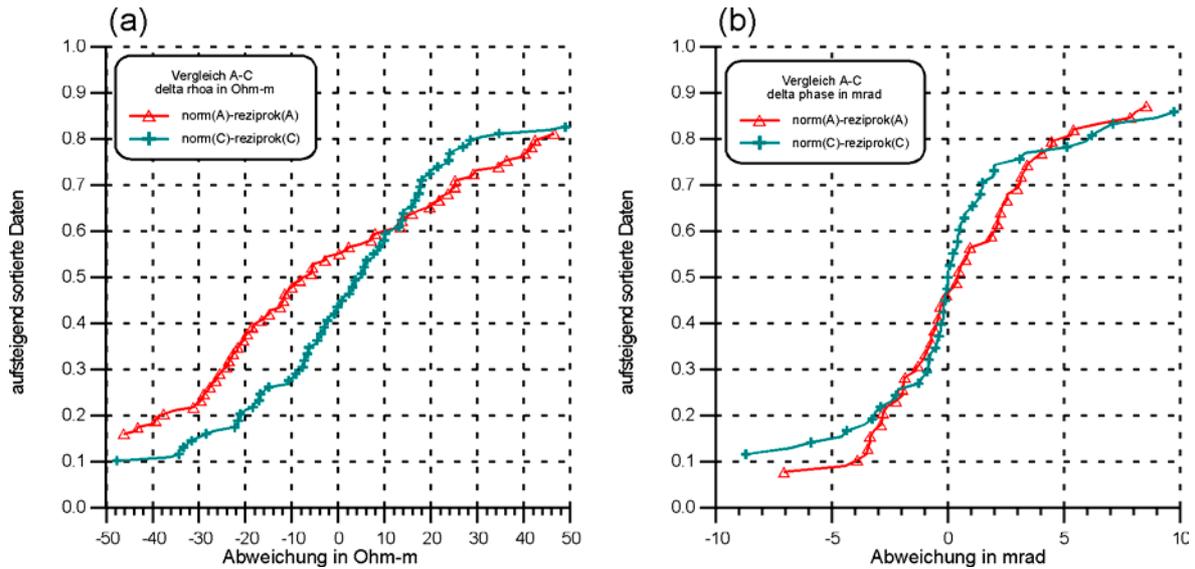


Abb. 6.3.1.3.2: Kriterium Reziprozität. Vergleich Anordnung A mit C. (a) Verteilungsfunktion der Differenzen des scheinb. spez. Widerstands. 90 % aller Daten der Pseudosektion berücksichtigt. (b) Verteilungsfunktion der Phasendifferenzen. 50 % aller Daten berücksichtigt. Die Abszissenwerte sind in den Abbildungen auf  $\pm 50 \Omega m$  bzw.  $\pm 10 \text{ mrad}$  beschränkt.

### 6.3.1.3.3 Vergleich B-C

Ein Vergleich zwischen B ( $\square$ ) und C (+) verdeutlicht erneut den asymmetrischen Verlauf der Anordnung mit unpolarisierbaren Cu-CuSO<sub>4</sub>-Elektroden (Abb. 6.3.1.3.3a). Der eigentliche Verlauf der Funktionen ist ähnlich. Nur im Bereich der negativen Widerstandsdifferenzen ist ein steilerer Abfall von Anordnung C (+) zu beobachten.

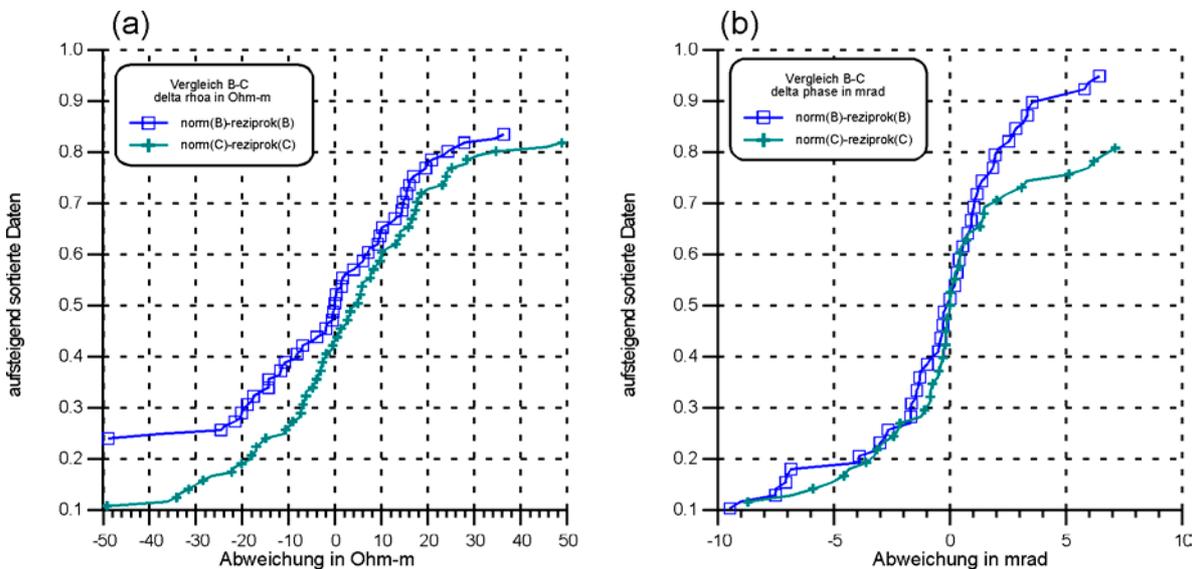


Abb. 6.3.1.3.3: Kriterium Reziprozität. Vergleich Anordnung B mit C. (a) Verteilungsfunktion der Differenzen des scheinb. spez. Widerstands. 78 % aller Daten berücksichtigt. (b) Verteilungsfunktion der Phasendifferenzen. 50 % aller Daten berücksichtigt. Die Abszissenwerte sind in den Abbildungen auf  $\pm 50 \Omega m$  bzw.  $\pm 10 \text{ mrad}$  beschränkt.

Die Phasendifferenzen sowohl von Anordnung B ( □ ), als auch von C ( + ) sind symmetrisch verteilt (Abb. 6.3.1.3.3a). Deutlich unterscheiden sich die beiden Kurven bei Ordinatenwerten oberhalb 0.7. Dort verläuft die Verteilungsfunktion von Anordnung C ( + ) flacher, während Anordnung B ( □ ) einen steileren Verlauf zeigt. Eine Zunahme der Phasendifferenz von 1 auf 7 mrad umfasst bei B ( □ ) über 30 % der Daten, während in diesem Bereich nur etwa 10 % der berücksichtigten Daten von C ( + ) liegen.

#### 6.3.1.3.4 Zusammenfassung

Die Überprüfung des Reziprozitätsprinzips im Pandelbachtal ergab, dass Anordnung B sowohl bei der Messung des scheinbaren spezifischen Widerstands als auch der scheinbaren Phase das Kriterium der Reziprozität am besten erfüllt. Die Verteilungskurve von Anordnung A zeigt im Vergleich mit den anderen Anordnungen die geringste Variation. Asymmetrische Verteilungskurven sind bei den  $\rho_a$ -Werten von A und C zu beobachten. Bei Anordnung A überwiegt der Anteil an negativen Differenzen. Die Ursache könnten elektrochemische Prozesse im stellenweise stark polarisierbaren Untergrund sein, die zu einer zeitlichen Drift des Eigenpotentials führen (Dahlin et al., 2002). Wahrscheinlich sind auch Polarisierungseffekte an den Elektroden, die durch den Wechsel von Strom- zu Potentialelektrode auftreten (Dahlin, 2000). Das Resultat ist ein positiver Offset des gemessenen Potentials zwischen den Elektroden. Im vorliegenden Fall also eine Erhöhung der reziproken Messwerte. Da diese Effekte exponentiell abklingen, wirkt sich während des automatischen Ablaufs einer SIP-Messung dieser Offset nicht auf alle reziproken Messwerte aus (Abb. 4.4.5.1).

Anordnung C zeigt einen erhöhten Anteil positiver Differenzen. Eine Erklärung könnte eine Verbesserung der Ankopplung der unpolarisierbaren Elektroden mit Verlauf der Messung sein, jedoch waren die Cu-CuSO<sub>4</sub>-Elektroden bereits am Vortag in den Boden eingebracht worden. Mögliche Polarisierungseffekte an den Elektroden, ebenfalls hervorgerufen durch den Wechsel von Einspeisung zu Potentialmessung, hätten in diesem Fall einen gegenteiligen Effekt im Vergleich zu den Stahlelektroden.

Überraschend ist, dass die Verwendung von Anordnung C trotz herabgesetzter Stromamplitude zu einer geringeren Variation der Widerstandsdifferenzen als bei Anordnung A führt. Ursache dafür ist vermutlich eine zeitliche Variation des Eigenpotentials des Untergrunds.

Alle Anordnungen zeigen symmetrische Verteilungskurven der Phasendifferenzen. Auffallend ist, dass Anordnung B vor allem im Bereich der positiven Differenzen eine geringere Variation zeigt. Das bedeutet, dass die, gegenüber der normalen Messrichtung, erniedrigten reziproken Phasenwerte stärker variieren. Da dieser Effekt sowohl bei Anordnung A, als auch bei C zu beobachten ist, kann er auf Polarisierungseffekte an den Elektroden zurückgeführt werden.

Dies deckt sich mit den Untersuchungen von Dahlin et al. (2002), die einen negativen Offset der Aufladbarkeit bei reziproker Messung mit Stahlelektroden, begleitet von einer verstärkten Streuung der Messwerte, beobachten konnten.

#### 6.3.1.4 Frequenzverhalten

Im oberen Teil von Abbildung 6.3.1.4 sind die Differenzen der Widerstände (a-c) und im unteren Bereich die Differenzen der Phasen (d-f) dargestellt. In jedem Diagramm finden sich zwei Verteilungskurven. Einmal die Differenz zwischen normaler und reziproker Messrichtung bei einer Messfrequenz von 3.18 Hz ( ◆ ) und einmal die Differenz bei einer Frequenz von 9.54 Hz ( ◆ ). Die Anordnungen sind in alphabetischer Reihenfolge von links nach rechts abgebildet.

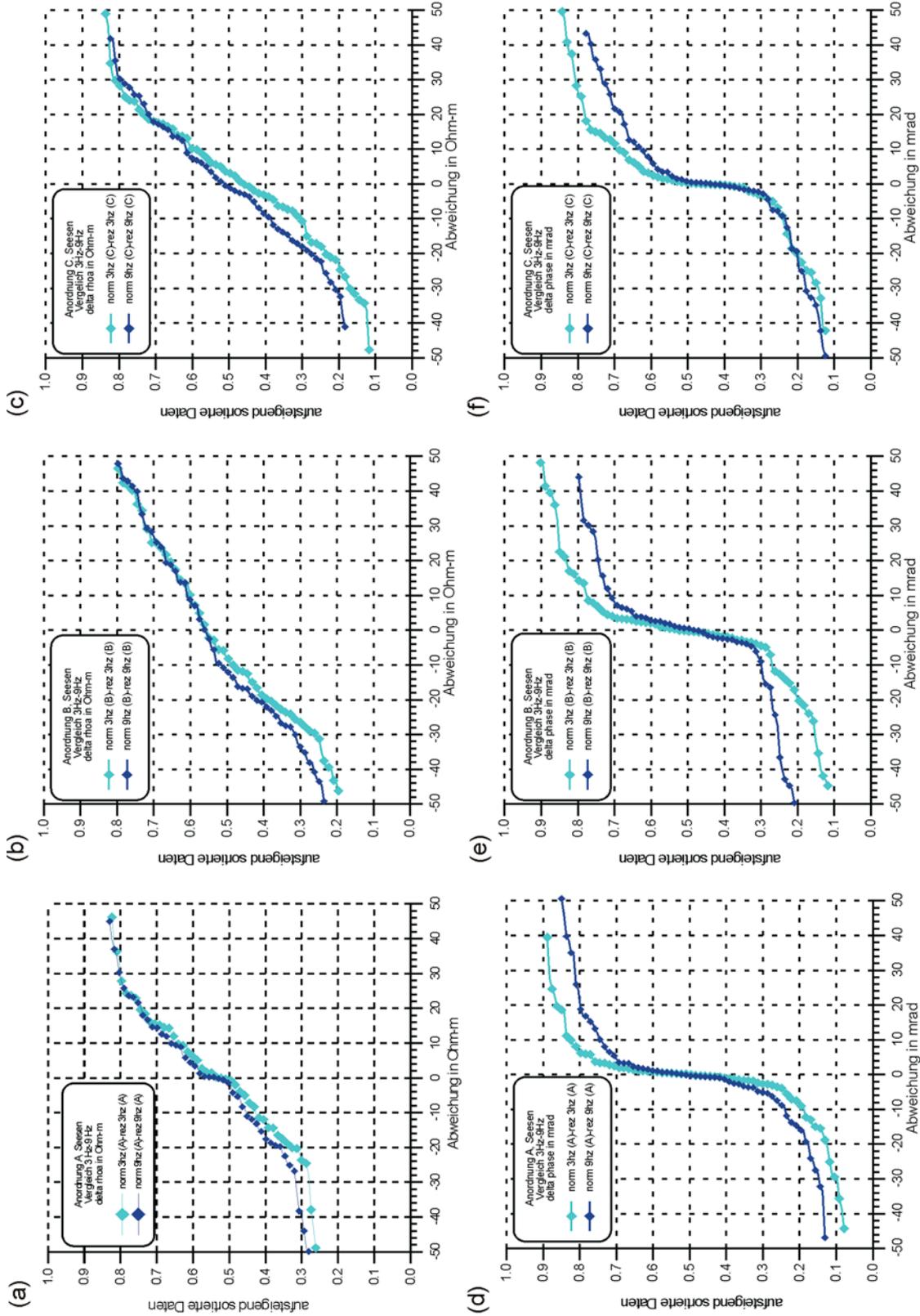


Abb. 6.3.1.4: Seesen, Frequenzverhalten der Reziprozität. (a)-(c) Scheinbare spez. Widerstände. (d)-(f) Phasen. Alle Werte sind berücksichtigt. Die Darstellung der Verteilungsfunktionen ist auf die Abszissenwerte  $-/+ 50$  Ohm-m bzw.  $-/+ 50$  mrad beschränkt.

Bei den Widerständen lassen sich kaum Veränderungen mit zunehmender Frequenz erkennen. Auffällig ist jedoch die Abweichung vor allem im Bereich der negativen Differenzen. Mit zunehmender Messfrequenz werden die Verteilungsfunktionen flacher und zeigen damit eine größere Streuung. Diese systematische Abweichung ist vermutlich mit der geringeren Stromamplitude zu erklären. Jedoch wirkt sich die Abweichung nicht bei allen Anordnungen gleich stark aus. Bei Anordnung C (Abb.6.3.1.4c) beginnt die Abweichung etwa bei einem Ordinatenwert von 0.6, bei B (Abb.6.3.1.4fb) zwischen 0.5 und 0.6 und bei Anordnung A (Abb.6.3.1.4a) unterhalb 0.5. Offensichtlich führt die Erhöhung der Messfrequenz, verbunden mit einer Abnahme der Stromamplitude, zu einer stärkeren Streuung der Werte bei den Anordnungen B und C.

Daneben ist bei Anordnung B bei beiden Frequenzen eine Asymmetrie der Verteilungsfunktionen zu erkennen, die sich bei Anordnung C nur bei 3 Hz zeigt.

Das Verschwinden der Asymmetrie bei 9 Hz zeigt, dass die Ursache bei C im Zusammenhang mit der Messfrequenz steht, während bei B die Asymmetrie frequenzunabhängig ist.

Die Phasen reagieren deutlicher auf eine Änderung der Messfrequenz bzw. Stromamplitude.

Charakteristisch für alle Anordnungen ist eine Tendenz zu größeren Differenzbeträgen mit zunehmender Messfrequenz. Bei Anordnung C (Abb.6.3.1.4f) ist der Kurvenverlauf im Bereich negativer Differenzen für beide Messfrequenzen identisch. Bei Anordnung B (Abb.6.3.1.4e) ist die Abweichung am stärksten. Insgesamt sind bei Anordnung A (Abb.6.3.1.4d) etwa 40 % der Differenzen unverändert, bei B (Abb.6.3.1.4e) und C (Abb.6.3.1.4f) etwa 30 %.

Die geringere Stromamplitude bei Einspeisung des 9.54 Hz (◆) Signals erklärt die insgesamt flacheren Verteilungsfunktionen vor allem im äußeren Bereich. Jedoch deutet der unveränderte Kurvenverlauf bei den negativen Differenzen bei Anordnung C (Abb.6.3.1.4f) darauf hin, dass sich die verringerte Stromamplitude nicht auf alle Anordnungen gleich stark auswirkt.

Das Aufspalten der Verteilungsfunktionen im Bereich der negativen Differenzen lässt sich nicht allein durch Polarisierungseffekte an den Elektroden erklären, da Anordnung B (Abb.6.3.1.4e) mit den entkoppelten Elektroden am stärksten auf die Veränderung der Stromamplitude und Frequenz reagiert.

### 6.3.1.5 Zusammenfassung

Bezieht man alle drei Kriterien in die Beurteilung mit ein, hat sich bei den Profilmessungen im Pandelbachtal die entkoppelte Anordnung B für Messungen über einem stark polarisierbaren Untergrund bewährt. Die Varianzen (6.3.1.2.1 und 6.3.1.2.2) waren bei beiden Parametern zusammen mit Anordnung A am geringsten. Die Überprüfung der Reziprozität der Widerstände ergab, dass Anordnung B nur eine geringfügig flachere Verteilungskurve als Anordnung C (6.3.1.3.3a) besitzt, aber deutlich geringere Differenzen als Anordnung A (6.3.1.1a) aufweist. Auch bei den Phasen besitzt Anordnung B (6.3.1.3.1b und 6.3.1.3b) eine steilere Verteilungskurve als die beiden anderen Anordnungen. Die Erhöhung der Messfrequenz in Verbindung mit einer Abnahme der Stromamplitude führte bei den Widerständen kaum zu einer Veränderung der Verteilungskurve (Abb. 6.3.1.4b). Jedoch ergaben sich bei den Phasen große Abweichungen bei etwa 60 % der Daten (Abb. 6.3.1.4e).

Trotz der um Faktor vier kleineren Stromamplitude empfiehlt sich Anordnung C für eine Widerstandsmessung. Überraschend zeigte die Anordnung die geringsten Differenzen zwischen den Messrichtungen (Abb. 6.3.1.3c). Jedoch führt das begrenzte Stromsignal bei beiden Messparametern zu erhöhten Varianzen (6.3.1.2.1 und 6.3.1.2.2) und zu großen Differenzen zwischen den Phasen der Messrichtungen (Abb. 6.3.1.3f). Das mit der höheren Stromamplitude verbundene Signal sorgt dafür, dass die Verwendung von nur einer Stahlelektrode (Anordnung A) zu geringeren Differenzen zwischen den normalen und reziproken Phasen führt.

Am Beispiel der Varianzen wurde deutlich, wie stark die Datenqualität von der Stromamplitude abhängt. Eine Verringerung der Stromamplitude von 46 auf 30 mA führt bereits zu einer messbaren Zunahme der Varianzen. Am Beispiel Pandelbachtal konnte gezeigt werden, dass die Phasen wesentlich sensibler auf eine Veränderung der Messfrequenz bzw. Stromamplitude reagieren. Dies zeigt sich vor allem in den Abbildungen 6.3.1.4d-f. Im Gegensatz bleiben die Verteilungskurven der Widerstände nahezu unverändert (Ab. 6.3.1.4a-c). Diese Abhängigkeit erklärt sich durch die Definition der Phase (Kap. 3.2.3). Während sich der Widerstand als Betrag einer komplexen Zahl darstellt, berechnet sich die Phase aus dem Verhältnis zwischen Imaginär- und Realteil. Entsprechend wirken sich kleine Variationen des Imaginärteils vor allem auf die Phase aus, während die Amplitude hauptsächlich vom wesentlich größeren Realteil beeinflusst wird.

## 6.3.2. Büraberg (Nordhessen)

### 6.3.2.1 Messgebiet und -aufbau

Auf dem Büraberg in Nordhessen fanden im Jahre 2000 archäologische Ausgrabungen des Seminars für Vor- und Frühgeschichte der J.W. Goethe Universität Frankfurt am Main statt. Untersuchungsgebiet war das Vorburgareal der mittelalterlichen Büraburg. Während der Voruntersuchungen wurde eine magnetische Prospektion durchgeführt. Es zeigten sich Grabenstrukturen, deren Tiefenlage anschließend mit geoelektrischen Messungen bestimmt wurde. Die Untersuchungsfläche wird landwirtschaftlich genutzt. Als Folge erschwerte der frisch gepflügte, oberflächennah sehr grobe und trockene Lehmboden die Ankopplung der unpolarisierbaren Cu-CuSO<sub>4</sub>-Elektroden.

Das Profil auf dem Büraberg wurde deshalb nur mit den Anordnungen A und B gemessen. Das Profil hatte eine Gesamtlänge von 15 m bei einem Elektrodenabstand von 0.5 m. Als Messkonfiguration wurde Dipol-Dipol gewählt. Die Stromamplitude war bei den Anordnungen A und B identisch und betrug bei der Messfrequenz von 3.18 Hz 36 mA und bei der Frequenz 9.54 Hz 24 mA.

### 6.3.2.2 Varianz

Die Quartile der aufsteigend sortierten Varianzen liegen bei Anordnung B (Abb. 6.3.2.2.1 und Abb. 6.3.2.2.2) etwa eine Dekade über denen von Anordnung A.

Dies gilt sowohl für die Widerstände, als auch für die Phasen beider Messfrequenzen. Bei beiden Anordnungen und Parametern liegen die Quartile der reziproken Varianzen unterhalb derer der normalen Messrichtung. Eine Erklärung für diese Beobachtung wurde bislang nicht gefunden.

Die Messung mit einer Messfrequenz von 9.54 Hz führt zu einer allgemeinen Erhöhung der Varianzen. Dies deckt sich mit den Beobachtungen im Pandelbachtal und lässt sich mit der geringeren Stromamplitude erklären.

Obwohl die Varianzen der Anordnung B bei allen Messparametern über denen von Anordnung A liegen, ergeben sich zwischen den Quartilen der einzelnen Messrichtungen geringere Abweichungen.

Dies bedeutet, dass die Varianzen von Anordnung B im Mittel etwa eine Dekade über den Varianzen von A liegen, aber bezüglich der Messrichtung ein stabileres Verhalten zeigen.

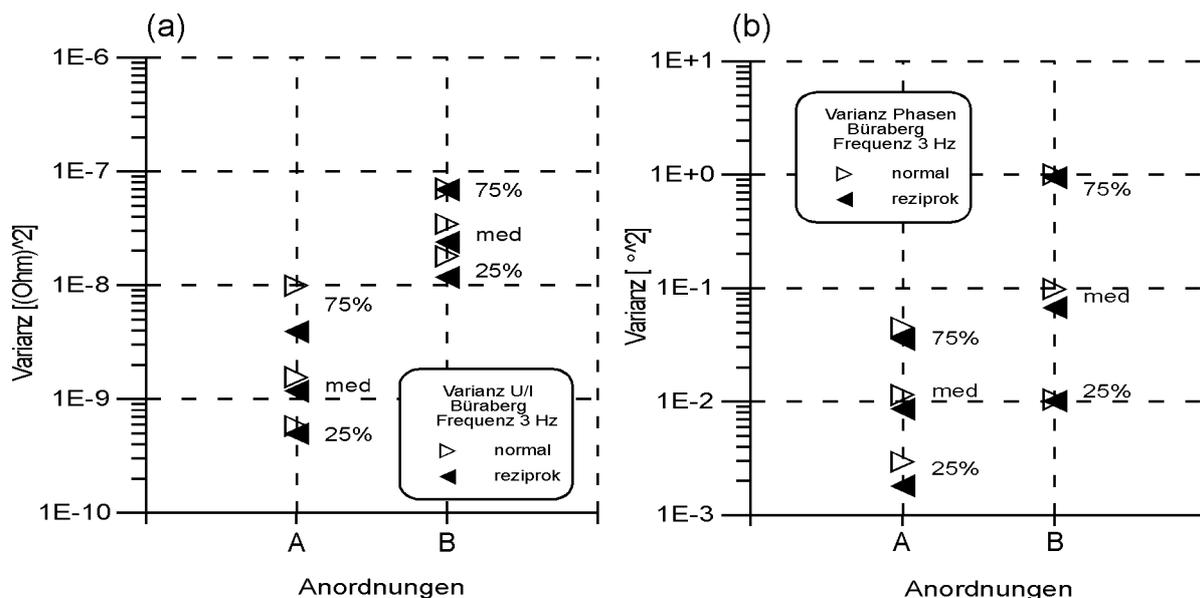


Abb. 6.3.2.2.1: Quartile der aufsteigend sortierten Varianzen der scheinbaren Widerstände (a) und Phasen (b). Messfrequenz 3.18 Hz; Messgebiet Büraberg; Konfiguration: Dipol-Dipol. Anordnungen: A: einzelne Stahlelektrode, B: entkoppelte Strom- und Potentialelektroden.

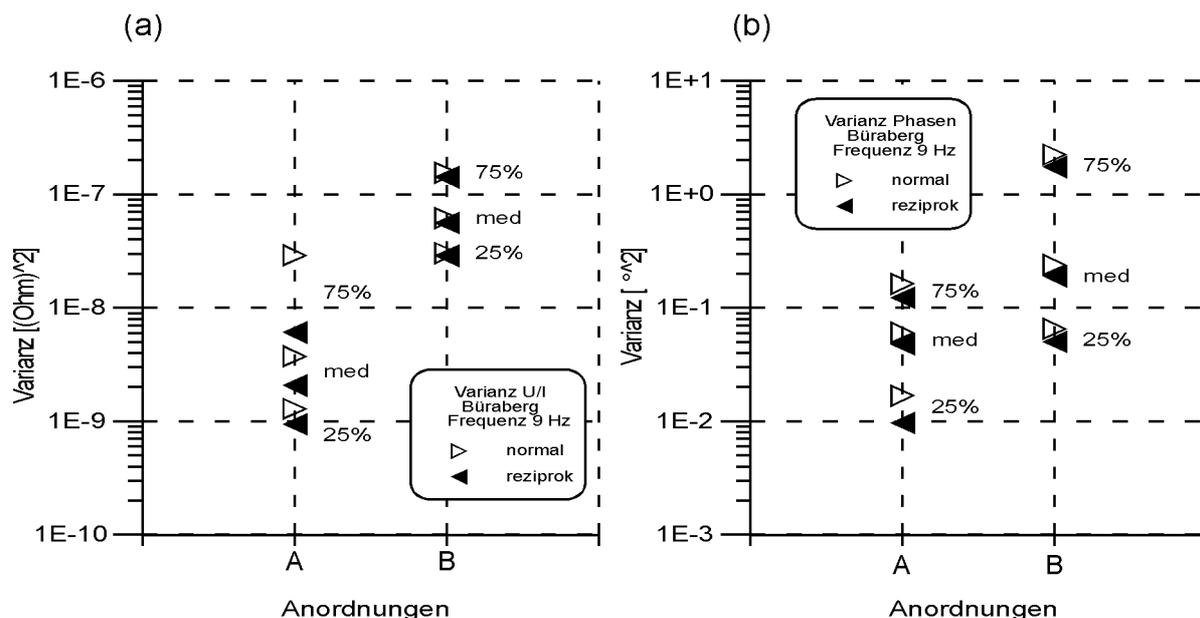


Abb. 6.3.2.2.2: Quartile der aufsteigend sortierten Varianzen der scheinbaren Widerstände (a) und Phasen (b). Messfrequenz 9.54 Hz; Messgebiet Büraberg; Konfiguration: Dipol-Dipol. Anordnungen: A: einzelne Stahlelektrode, B: entkoppelte Strom- und Potentialelektroden.

### 6.3.2.3 Reziprozität

Zur Beurteilung der Reziprozität wurden nur Messwerte der jeweiligen Anordnung verwendet, deren Widerstände und Phasen sich in normaler Messrichtung maximal um 10 % des Mittelwertes bzw. 10 mrad unterscheiden. Bei den Widerständen wurden 73 % der Messwerte berücksichtigt, bei den Phasen 52 %.

In der Verteilung der Differenzen der Widerstände (Abb. 6.3.2.3a), berechnet durch Subtraktion des reziproken vom normalen Messwert, unterscheiden sich Anordnung A ( $\Delta$ ) durch eine etwas steilere Kurve von Anordnung B ( $\square$ ). Das bedeutet, dass die Differenz zwischen den beiden Messrichtungen geringer ist, als bei Anordnung B ( $\square$ ) und damit die Reziprozität besser erfüllt. Bei den Phasen ergibt sich ein signifikanter Unterschied (Abb. 6.3.2.3b). Während bei Anordnung A ( $\Delta$ ) über 80 % der Differenzen innerhalb von  $\pm 5$  mrad liegen, liegen bei Anordnung B ( $\square$ ) nur etwa 70 % der Verteilungskurve in diesem Bereich. Die Verteilung beider Anordnungen ist symmetrisch, d. h. die Verteilungskurve schneidet den Abszissenwert 0 bei einem Ordinatenwert von 0.5. Das Kriterium der Reziprozität erfüllt Anordnung A ( $\Delta$ ) bei beiden Parametern besser als Anordnung B ( $\square$ ).

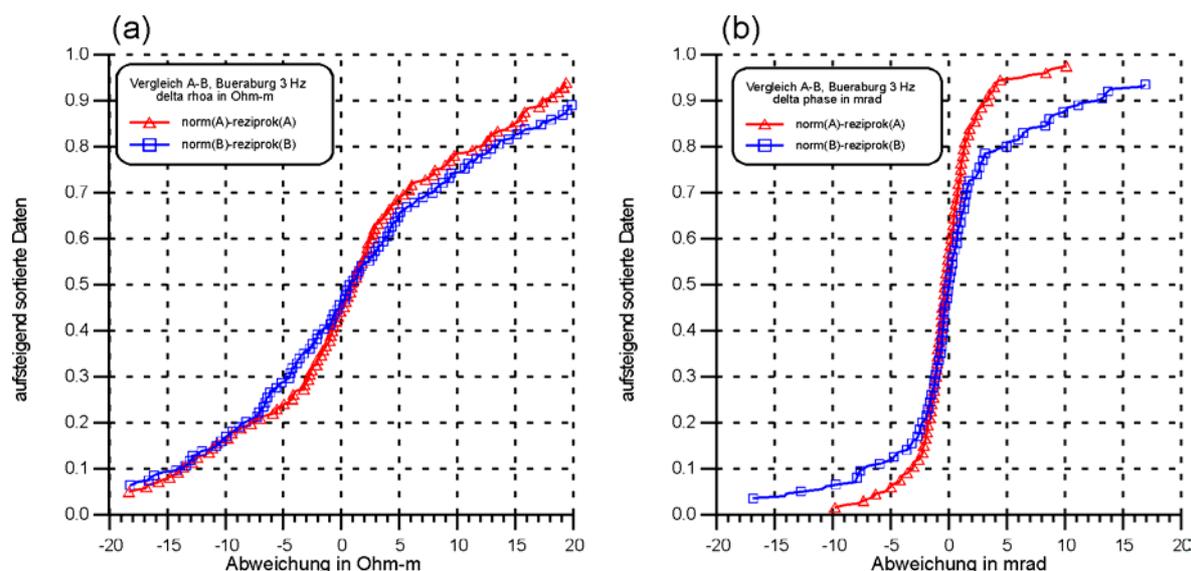


Abb. 6.3.2.2: Büraberg, Frequenz 3.18 Hz. Reziprozität der Anordnungen A und B im Vergleich. (a) scheinb. spez. Widerstände. 75 % aller Daten berücksichtigt. (b) scheinbare Phasen. 53 % aller Daten berücksichtigt. Nur die Werte von A und B wurden verwendet, die sich in normaler Richtung nur um  $10 \Omega m$  bzw.  $10 \text{ mrad}$  unterscheiden. Die Abszissen sind auf  $\pm 20 \Omega m$  bzw.  $\text{mrad}$  beschränkt.

Da die gemessenen Phasen beider Profile in einem Wertebereich von 0 bis 20 mrad liegen, d. h. der Untergrund nur schwach polarisierbar ist, beeinflussen vermutlich bereits geringe elektrochemische Prozesse innerhalb der unpolarisierbaren Elektrode die Messung. Zusätzlich ist eine gute Ankopplung der unpolarisierbaren Elektroden an den getrockneten Lehmboden auf dem Büraberg nicht gewährleistet. Die porösen Keramiktöpfe verfügen für die Ankopplung über eine Oberfläche von  $35 \text{ cm}^2$ . Ein Stahlspieß der 15 cm tief in den Boden gesteckt wird, verfügt über eine Kontaktfläche von  $38 \text{ cm}^2$ .

#### 6.3.2.4 Frequenzverhalten

In Abbildung 6.3.2.4.1a sind für Anordnung A die Differenzen der Widerstände für die Messfrequenzen 3.18 Hz ( $\blacklozenge$ ) und 9.54 Hz ( $\blacklozenge$ ) dargestellt. Der Vergleich zeigt, dass die Verteilungsfunktionen für beide Frequenzen identisch sind. Auf der rechten Seite (Abb. 6.3.2.4.1b) sind analog die Phasen dargestellt. Ein Kernbereich von 40 % der Kurven bleibt unverändert, während mit Verwendung einer, um den Faktor drei höheren Frequenz und einer um 12 mA verringerten Stromamplitude eine deutliche Aufspaltung im Bereich der positiven und negativen Differenzen zu beobachten ist.

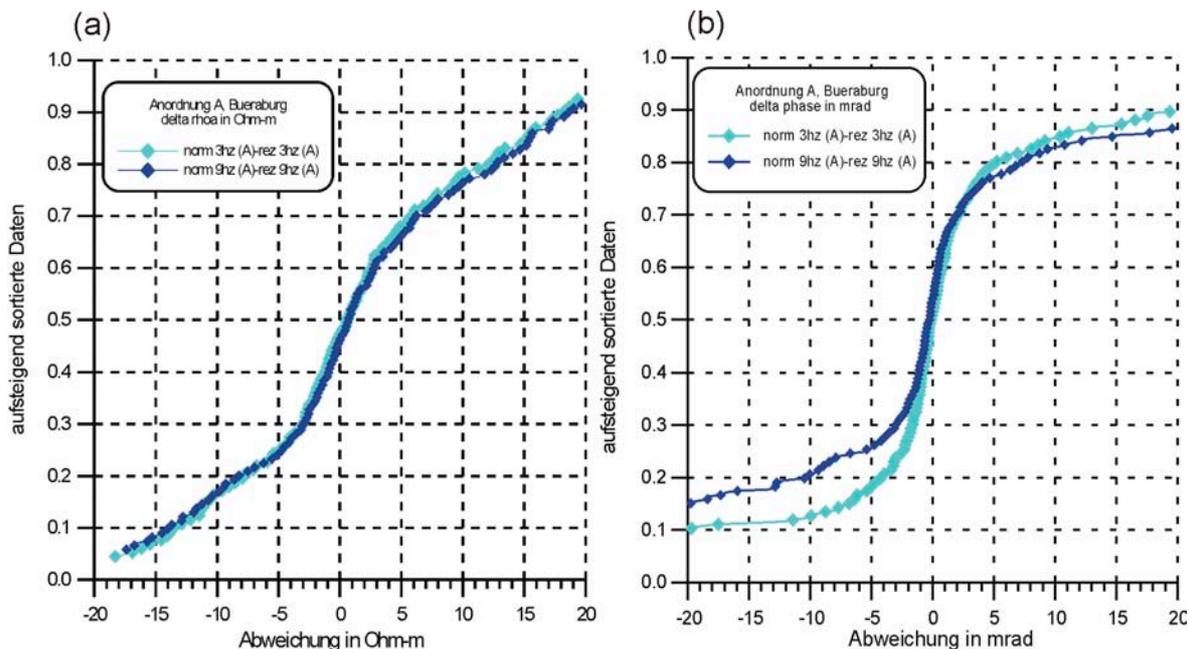


Abb. 6.3.2.4.1 Bueraburg, Anordnung A. Reziprozität in Abhängigkeit von der Messfrequenz. (a) Scheinbare spez. Widerstände, (b) Phasen. Frequenzen 3.18 Hz u. 9.54 Hz. Alle Werte wurden berücksichtigt. Die Abszissen sind auf die Skalenwerte  $\pm 20 \Omega m$  bzw. mrad beschränkt.

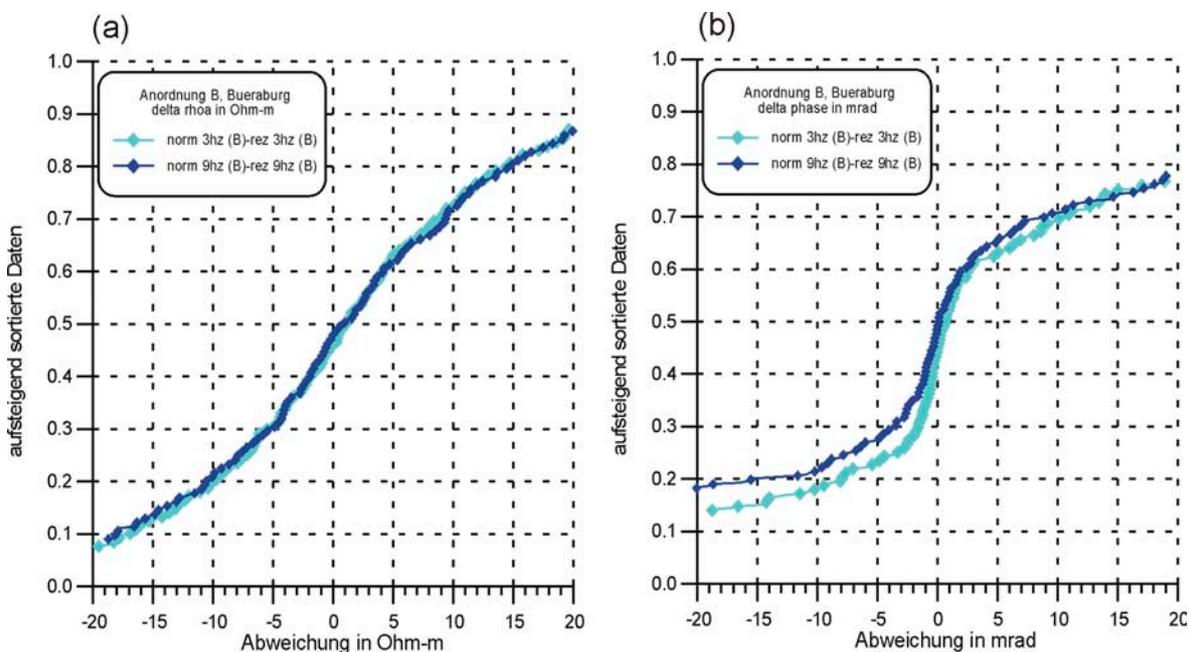


Abb. 6.3.2.4.2 Bueraburg, Anordnung B. Reziprozität in Abhängigkeit von der Messfrequenz. (a) Scheinbare spez. Widerstände, (b) Phasen. Frequenzen 3.18 Hz u. 9.54 Hz. Alle Werte wurden berücksichtigt. Die Abszissen sind auf die Skalenwerte  $\pm 20 \Omega m$  bzw. mrad beschränkt.

Das höherfrequente Stromsignal hat bei Anordnung B ebenfalls keinen Einfluss auf den Verlauf der Verteilungsfunktion der Widerstände (Abb. 6.3.2.4.2a).

Dagegen reagieren die Phasen auch bei der entkoppelten Elektrodenanordnung (Abb. 6.3.2.4.2b). Zwischen 3 und 10 mrad und im Bereich negativer Differenzen unterscheiden sich bei Anordnung B die Kurven der einzelnen Frequenzen. Etwa 40 % des Verlaufs der Verteilungsfunktion bleiben unverändert.

Die Ursache für die größere Variation der 9.18 Hz Verteilungsfunktionen der Phasendifferenzen ist offensichtlich die mit höherer Frequenz abnehmende Stromamplitude. Dabei unterscheiden sich der Verlauf der 3.18 Hz und 9.54 Hz Phasenkurven von Anordnung A wesentlich stärker als bei Anordnung B. Welche Ursache die Verstärkung dieses Effekts bei Stahlelektroden hat, ist noch nicht geklärt.

### 6.3.2.5 Zusammenfassung

Auf dem Büraberg liefert Anordnung A die eindeutig besseren Ergebnisse. Die Varianz sowohl der Widerstands-, als auch der Phasenwerte ist signifikant besser als bei Anordnung B. Bei der Beurteilung der Reziprozität der Widerstände beider Anordnungen ergeben sich kaum Unterschiede (6.3.2.3a). Die Verteilungskurve von Anordnung A ist nur geringfügig steiler als bei Anordnung B. Die Phasendifferenz beider Messrichtungen liegt bei 80 % der verglichenen Daten unterhalb 5 mrad (6.3.2.3b). Die Reziprozität ist damit besser gewährleistet als bei Anordnung B.

Im Frequenzverhalten der Widerstände unterscheiden sich die Anordnungen nicht (Abb. 6.3.2.3.1 und 6.3.2.3.2). Die Phasen der beiden Anordnungen reagieren bei beiden Anordnungen deutlich auf das veränderte Stromsignal. Vor allem im Bereich der hohen positiven und negativen Differenzen ergeben sich signifikante Unterschiede (Abb. 6.3.2.4.1b und 6.3.2.4.2b).

Am Beispiel der Vergleichsmessungen auf dem Büraberg konnte gezeigt werden, dass die Messlokation einen entscheidenden Einfluss auf die Wahl der Elektrodenanordnung hat. Im Gegensatz zum Pandelbachtal bewährte sich hier Anordnung A und zwar sowohl bei der Widerstands- als auch bei der Phasenmessung. Ein Grund für das Untersuchungsergebnis ist sicherlich die schlechte Ankopplung der unpolarisierbaren Elektroden an den oberflächennah sehr groben und trockenen Lehmboden.

## 6.3.3. Federseemoor

### 6.3.3.1 Messgebiet und -aufbau

Das Federseemoor etwa 50 km nördlich des Bodensees ist das dritte Messgebiet, in dem eine Vergleichsmessung zwischen Anordnung A und B durchgeführt wurde. Der Moorboden ist von einer etwa 30 cm mächtigen Grasnarbe bedeckt. Der Untergrund ist sehr homogen und zeichnet sich durch einen hohen Wassergehalt aus. Für die Profilmessung wurde eine Dipol-Dipol Anordnung gewählt. Die Gesamtlänge des Profils betrug 20 m, der Elektrodenabstand 0.5 m. Das eingespeiste Frequenzspektrum ist identisch zu den Messungen in Seesen und am Büraberg. Die Stromamplitude war bei beiden Anordnungen identisch und betrug bei der Messfrequenz 3.18 Hz 27 mA und bei der Messfrequenz 9.54 Hz 22 mA. Die beiden Profilmessungen wurden unmittelbar hintereinander durchgeführt.

## 6.3.3.2 Varianz

Anordnung A zeigt bei beiden Frequenzen und Parametern kleinere Varianzen als Anordnung B ( Abb. 6.3.3.2.1 und 6.3.3.2.2 ).

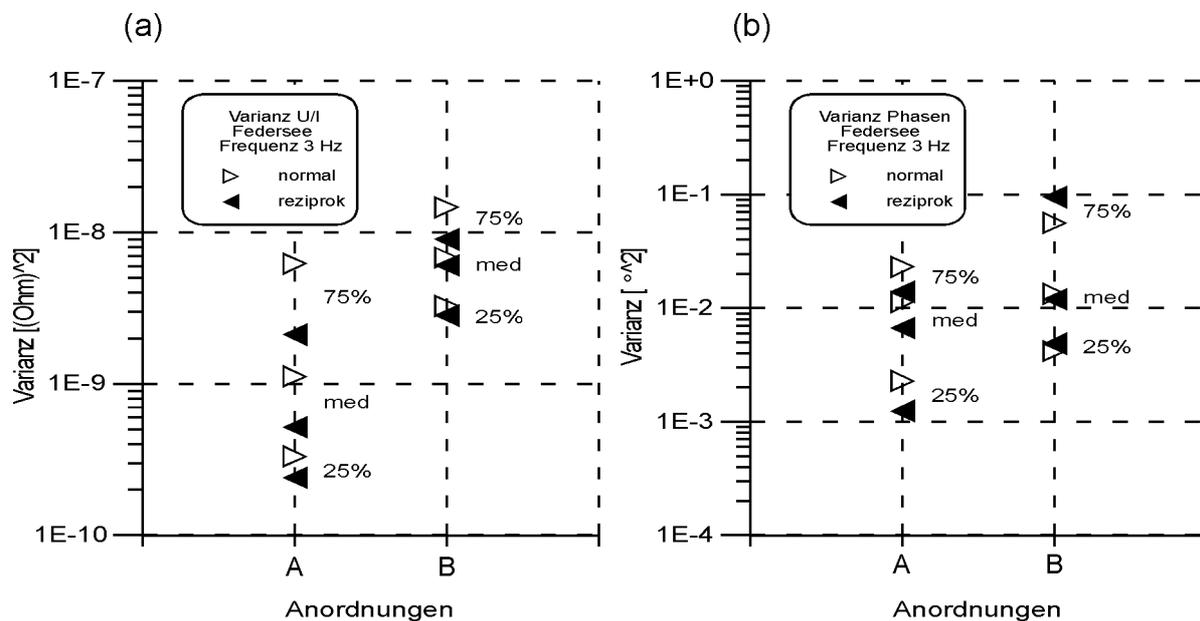


Abb. 6.3.3.2.1: Quartile der aufsteigend sortierten Varianzen der scheinbaren Widerstände (a) und Phasen (b). Messfrequenz 3.18 Hz; Messgebiet Federsee; Konfiguration: Dipol-Dipol. Anordnungen: A: einzelne Stahlelektrode, B: entkoppelte Strom- und Potentialelektroden.

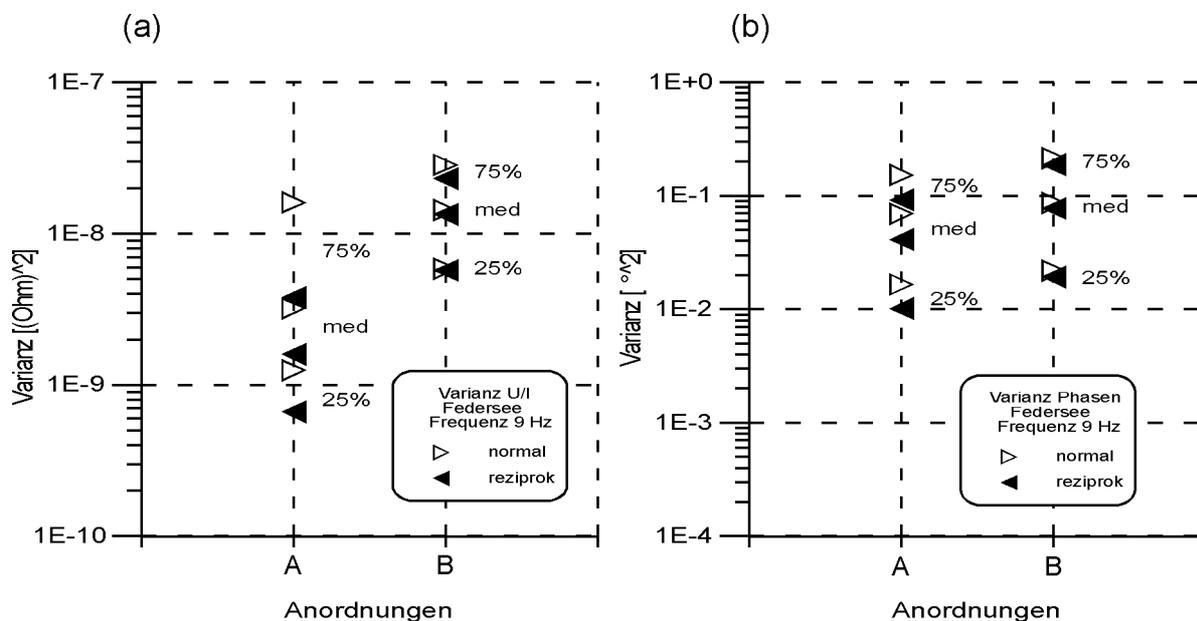


Abb. 6.3.3.2.2: Quartile der aufsteigend sortierten Varianzen der scheinbaren Widerstände (a) und Phasen (b). Messfrequenz 9.54 Hz; Messgebiet Federsee; Konfiguration: Dipol-Dipol. Anordnungen: A: einzelne Stahlelektrode, B: entkoppelte Strom- und Potentialelektroden.

Dabei fällt auf, dass bei Anordnung A die Quartile der Varianzen der reziproken Messrichtung immer unterhalb derer der normalen Richtung liegen. Diese Beobachtung konnte auch auf der Büraburg gemacht werden (Kap. 6.3.1). Das erneute Auftreten über einem schwach polarisierbaren Untergrund deutet darauf hin, dass der Wechsel von Strom- zu Potentialelektrode in Kombination mit dieser Rahmenbedingung die Ursache ist. Anordnung B zeigt kein konsistentes Verhalten der Varianzen der Messrichtungen zueinander. Auch die Größe der Abweichung zwischen den beiden Messrichtungen variiert bei Anordnung A sehr stark. Vor allem bei den Widerständen weichen die 75 % Quartile zwischen der normalen und reziproken Messung stark voneinander ab. Mit zunehmender Frequenz sind bei beiden Parametern und Anordnungen größere Varianzen ( Abb. 6.3.3.2.1 und 6.3.3.2.2 ) zu beobachten.

### 6.3.3.3 Reziprozität

Es ergeben sich sehr geringe Differenzen zwischen den Messrichtungen. Für die Beurteilung der Reziprozität der Widerstände wurden 86 % (Abb. 6.3.3.3a) aller Messdaten verwendet. Bei den Phasen 72 % (Abb. 6.3.3.3b).

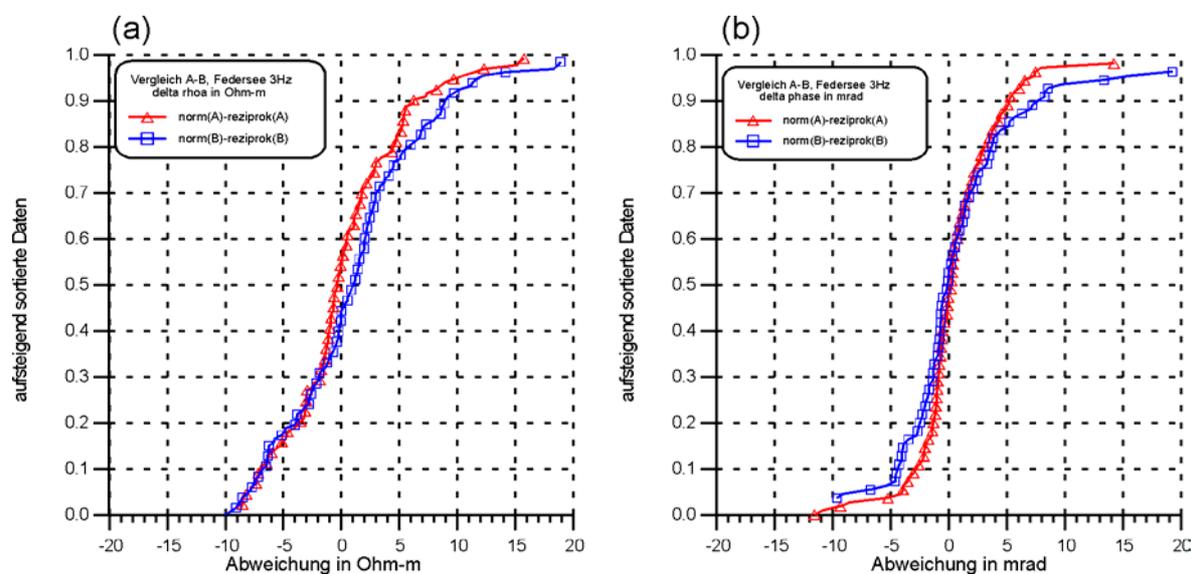


Abb. 6.3.3.3: Federsee, Frequenz 3.18 Hz. Reziprozität der Anordnungen im Vergleich. (a) scheinb. spez. Widerstände. 86 % aller Daten verwendet. (b) scheinbare Phasen. 71 % aller Daten verwendet. Nur die Werte von A und B wurden verwendet, die sich in normaler Richtung nur um 10  $\Omega m$  bzw. 10 mrad unterscheiden. Die Abszissen sind auf  $\pm 20 \Omega m$  bzw. mrad beschränkt.

Anordnung A ( $\Delta$ ) (Abb. 6.3.3.3a) zeigt bei den Amplituden ab einem Ordinatenwerte von 0.3 einen etwas steileren Verlauf der Verteilungsfunktion der Differenzen. Bei beiden Anordnungen liegen über 90 % der verwendeten Daten innerhalb einer Differenz von  $\pm 10 \Omega m$ . Die negativen Differenzen erreichen einen Wert von  $-10 \Omega m$ , die positiven einen maximalen Wert von  $20 \Omega m$ .

Etwa 65 % der Differenzen der Phasen (Abb. 6.3.3.3b) unterscheiden sich kaum. Nur im Bereich großer positiver und vor allem im Bereich großer negativer Differenzen ergeben sich Abweichungen.

Innerhalb einer Differenz von  $\pm 5$  mrad finden sich bei Anordnung A ( $\Delta$ ) etwa 90 % der verwendeten Daten, bei Anordnung B ( $\square$ ) etwa 85 %.

Im Federseemoor ergeben sich kaum Unterschiede, was die Reziprozität der Anordnungen betrifft. Anordnung A ( $\Delta$ ) erfüllt das Kriterium der Reziprozität sowohl bei Widerstand als auch Phase sogar besser als die entkoppelte Elektrodenanordnung B ( $\square$ ). SIP-Messungen auf Feuchtböden wie dem Federseemoor lassen sich also im Bezug auf die Reziprozität mit einer einzigen Stahlelektrode pro Remote Unit realisieren.

#### 6.3.3.4 Frequenzverhalten

Die Verteilungsfunktionen der Differenzen beider Messfrequenzen (3.18 Hz  $\blacklozenge$  und 9.54 Hz  $\blacklozenge$ ) sind bei den Widerständen sowohl bei Anordnung A, als auch bei Anordnung B nicht zu unterscheiden (Abb. 6.3.3.4.1a und 6.3.3.4.2a). Während die Anordnungen im Bereich der positiven Differenzen einen fast identischen Kurvenverlauf zeigen, beobachtet man im Bereich der negativen Werte einen deutlichen Unterschied. Anordnung B erreicht maximale negative Differenzen von  $-10 \Omega\text{m}$ . Die etwas häufigeren und größeren negativen Differenzen sind ein Hinweis auf auftretende Polarisierungseffekte bei Anordnung A

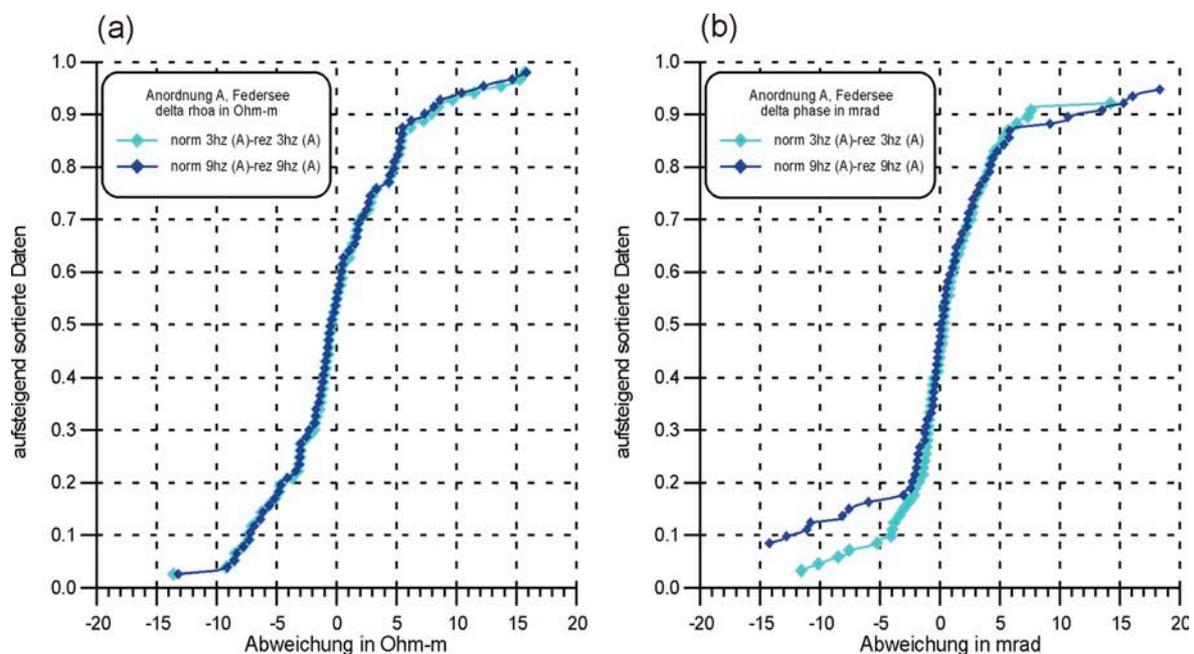


Abb. 6.3.3.4.1 Federsee, Anordnung A. Reziprozität in Abhängigkeit von der Messfrequenz. (a) Scheinbare spez. Widerstände, (b) Phasen. Frequenzen 3.18 Hz u. 9.54 Hz. Alle Werte wurden berücksichtigt. Die Abszissen sind auf die Skalenwerte  $\pm 20 \Omega\text{m}$  bzw. mrad beschränkt.

Die Phasen reagieren wie erwartet empfindlicher auf eine Änderung der Messfrequenz und eine um 5 mA kleinere Stromamplitude. Signifikant sind dabei die Differenzen größer als  $\pm 3$  mrad. Bei Anordnung A und B weichen mindestens 25 % der Phasendifferenzen im negativen und mindestens 13 % im positiven Bereich beim Wechsel der Frequenz voneinander ab. Da die zunehmenden Abweichungen bei beiden Anordnungen auftreten, ist wahrscheinlich, dass die geringere Stromamplitude für diesen Effekt verantwortlich ist.

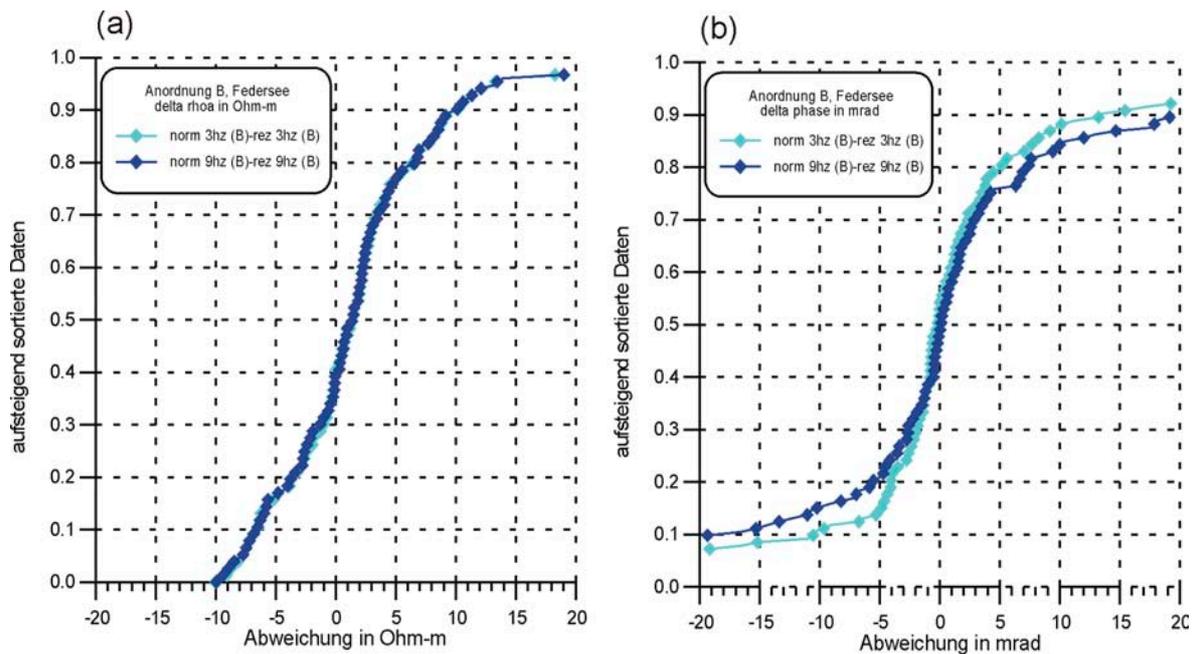


Abb. 6.3.3.4.2 Federsee, Anordnung B. Reziprozität in Abhängigkeit von der Messfrequenz. (a) Scheinbare spez. Widerstände, (b) Phasen. Frequenzen 3.18 Hz u. 9.54 Hz. Alle Werte wurden berücksichtigt. Die Abszissen sind auf die Skalenwerte  $\pm 20 \Omega m$  bzw.  $mrad$  beschränkt.

### 6.3.3.5 Zusammenfassung

Die Vergleichsmessungen zwischen Anordnungen A und B am Federsee zeigen, dass der Aufbau einer entkoppelten Messanordnung in bestimmten Messgebieten nicht mit einer besseren Datenqualität verbunden ist. Bei allen Bewertungskriterien schneidet der Aufbau A mit nur einer Stahlelektrode für Stromeinspeisung und Potentialmessung besser ab als die entkoppelte Anordnung B. Die Varianzen beider Parameter sind bei Anordnung A kleiner und das Reziprozitätsprinzip ist bei beiden Parametern durch die Messung mit einer Stahlelektrode besser erfüllt. Kaum Unterschiede ergeben sich im Frequenzverhalten. Sowohl Anordnung A, als auch Anordnung B zeigen bei den Widerständen keine Veränderung mit dem Wechsel der Messfrequenz. Ein Trend zu größeren Differenzen zwischen den Messrichtungen ergibt sich bei den Phasen sowohl im Bereich der negativen als auch positiven Differenzen. Dies ist auf die geringere Stromamplitude bei zunehmender Messfrequenz zurückzuführen.

## 6.4 Zusammenfassung

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass in Messgebieten, in denen mit einem schwach polarisierbaren Untergrund zu rechnen ist, mit Anordnung A eine mindestens gleichwertige Datenqualität erzielt wird. Anordnung A empfiehlt sich damit für SIP-Messungen bei denen Objekte mit geringer Polarisierbarkeit untersucht werden sollen, z.B. Verfüllungen oder hydrologische Fragestellungen. Wenig überraschend war, dass die Verwendung von Anordnung B und C zu besseren Ergebnissen bei einem stark polarisierbaren Untergrund führte. Am mittelalterlichen Verhüttungsplatz im Pandelbachtal konnte außerdem festgestellt werden, dass die Verwendung von Anordnung C selbst bei geringerer Stromamplitude die Datenqualität der Widerstandsmessung verbessert und nicht wie erwartet die Qualität der Phasenmessung.

Da die Vergleichsmessungen nur mit der SIP-256 und in einem begrenzten Frequenzbereich durchgeführt wurden, bleibt offen, ob sich die Ergebnisse mit anderen Apparaturen reproduzieren lassen bzw. auf einen größeren Frequenzbereich übertragbar sind. Ungeklärt bleibt nach diesen Untersuchungen, ob Anordnung C in einem anderen Frequenzbereich und bei vergleichbarer Stromamplitude nicht doch zu einer besseren Qualität der Phasenmessung führt.

# Kapitel 7: Ergebnisse

## 7.1 Zur Auswahl der Messobjekte

Ziel dieser Arbeit war es, archäologische Objekte zu finden, die sich mit Hilfe der spektralen Induzierten Polarisation (SIP) nachweisen lassen oder bei deren Untersuchung die SIP wichtige Zusatzinformationen zu einer konventionellen Widerstandsmessung liefert.

Die Auswahl der Messobjekte erfolgte unter Berücksichtigung der Mechanismen, die zu einem Polarisierungseffekt führen (Kap 3.4).

Ziel war es, zu allen bekannten Mechanismen ein geeignetes archäologisches Untersuchungsobjekt zu finden. Eine zusätzliche Anforderung, die an die Objekte gestellt wurde, war, dass die gewonnenen Messergebnisse durch Ausgrabungen verifiziert werden sollten. Dies ließ sich nicht bei allen Objekten realisieren.

Insgesamt fanden Feldmessungen an drei unterschiedlichen archäologischen Objekten statt.

Den Messergebnissen von Aspinall und Lynam (1968, 1970) und Weller et al.(2000) folgend, wurde für die Elektrodenpolarisation (Kap. 3.4.1) ein frühmittelalterlicher Verhüttungsplatz im Pandelbachtal bei Seesen am Harz als Untersuchungsobjekt ausgewählt. Das Objekt wurde freundlicherweise vom Institut für Geophysik der TU Clausthal vermittelt.

Lehmablagerungen, oft ein Hinweis auf alte Siedlungshorizonte, schienen ein geeignetes Untersuchungsobjekt, um den Mechanismus der Membranpolarisation in der archäologischen Prospektion zu nutzen (Kap. 3.4.2). Die Membranpolarisation wird vor allem von Tonmineralen verursacht.

Während der deutsch-bulgarischen Grabungskampagne 1999 in Pliska (Bulgarien) kam die SIP-256 erstmals zum Einsatz. Mit Hilfe einer flächenhaften Messung konnten Siedlungsreste gefunden werden. Die Überreste eines Gebäudes konnten über einer abgelagerten Lehmschicht gefunden werden. Der Lehm diente als Baumaterial und blieb nach Aufgabe des Hauses an Ort und Stelle erhalten.

Eine zentrale Fragestellung dieser Arbeit war, ob Holz, mit seiner komplexen Zell- und Porenstruktur (Schweingruber, 1990) (Kap. 3.4.3) zu Polarisierungseffekten führt. Nachdem sich in einem bronzezeitlichen Bohlenweg im Federseemoor (Kr. Biberach) ein geeignetes Objekt gefunden hatte, erfolgten zunächst Laboruntersuchungen an geborgenen Feuchtbodenhölzern. Die Proben wurden vom Landesdenkmalamt Baden-Württemberg, Außenstelle Hemmenhofen zur Verfügung gestellt. Alle Untersuchungen fanden im petrophysikalischen Labor der TU Clausthal statt.

Abschließend erfolgte eine Feldmessung im Federseemoor. Dort sollten mit den im Labor gewonnenen Erkenntnissen Profilmessungen über dem Bohlenweg durchgeführt werden.

Dies war ein erster Versuch, archäologische Holzobjekte mit der spektralen Induzierten Polarisation nachzuweisen.

## 7.2 Verhüttungsplatz im Pandelbachtal bei Seesen am Harz

### 7.2.1 Archäologischer Hintergrund

Die mittelalterliche Wasserwirtschaftsanlage des Zisterzienserordens im Pandelbachtal, nahe Seesen am Harz, war mehr als 200 Jahre in Betrieb (Bauerndorf, 1997; Bode, 1928). Buntmetallerze vom nahegelegenen Rammelsberg bei Goslar wurden hier zwischen den Jahren 1225 und 1445 verhüttet. Die Anlage wurde autonom von den Mönchen betrieben und verwaltet und diente zur Gewinnung von Kupfer, Blei und Silber, das damals Münzmetall war.

### 7.2.2 Untersuchungsobjekt

Im Rahmen von Praktika und Studienarbeiten (Kansy & Hennig, 2000) führte das Institut für Geophysik der Technischen Universität Clausthal Feldmessungen im Pandelbachtal durch. Ziel war es, die Ausdehnung der Produktionsstätte zu erfassen und die Lage von Transportwegen, Verhüttungsöfen und Schlackegruben zu lokalisieren (Weller et al., 2000; Weller, 2003). Auf Einladung des Instituts bestand die Möglichkeit, an ausgewählten Stellen die spektrale Induzierte Polarisation anzuwenden. Abbildung 7.2.2 zeigt das Ergebnis der magnetischen Prospektion und die erste Interpretation der Anomalien. Bei der magnetischen Prospektion wurde mit einem Protonenmagnetometer der vertikale Gradient des Magnetfeldes bestimmt. Das resultierende Magnetogramm hat eine Dynamik von +/-180 nT.

Die Bezeichnungen S2 bis S6 markieren vermutete Verhüttungsöfen und Schlackegruben, die sich als stark magnetische Anomalien abzeichnen. S1 wird als Anfahrtsweg zur Produktionsstätte interpretiert. Daneben ergaben sich Anomalien und Strukturen, die auf sichtbare, neuzeitliche Störungen zurückzuführen waren (Abb. 7.2.2, I-III). Die mit S3 und S4 bezeichneten Anomalien waren Untersuchungsobjekt der nachfolgenden SIP-Messungen.

### 7.2.3 Messanordnung

Zur Realisierung einer 3D-Anordnungen wurden vier parallele Profile im Abstand von 1 m gemessen (Abb. 7.2.3). Die Profile haben eine Gesamtlänge von 27 m und wurden in Nord-Süd Richtung ausgerichtet. Die Messfläche ( $y = 66-69$  m,  $x = 6-33$  m) (Abb. 7.2.3) überdeckt die beiden magnetischen Anomalien S3 und S4 (Abb. 7.2.2). Als Messkonfiguration wurde die Dipol-Dipol-Anordnung mit einem Dipol- und Elektrodenabstand von 1 m gewählt. Ein Spektrum zusammengesetzt aus vier Frequenzen wurde je Profil eingespeist (1.06, 3.18, 9.54 und 28.6 Hz). Die Stromamplitude verteilte sich logarithmisch auf die vier Frequenzen und reicht von 75 mA (1.06 Hz) bis 17 mA (28.6 Hz). Stahlspeie dienten zur Stromeinspeisung und Potentialmessung.

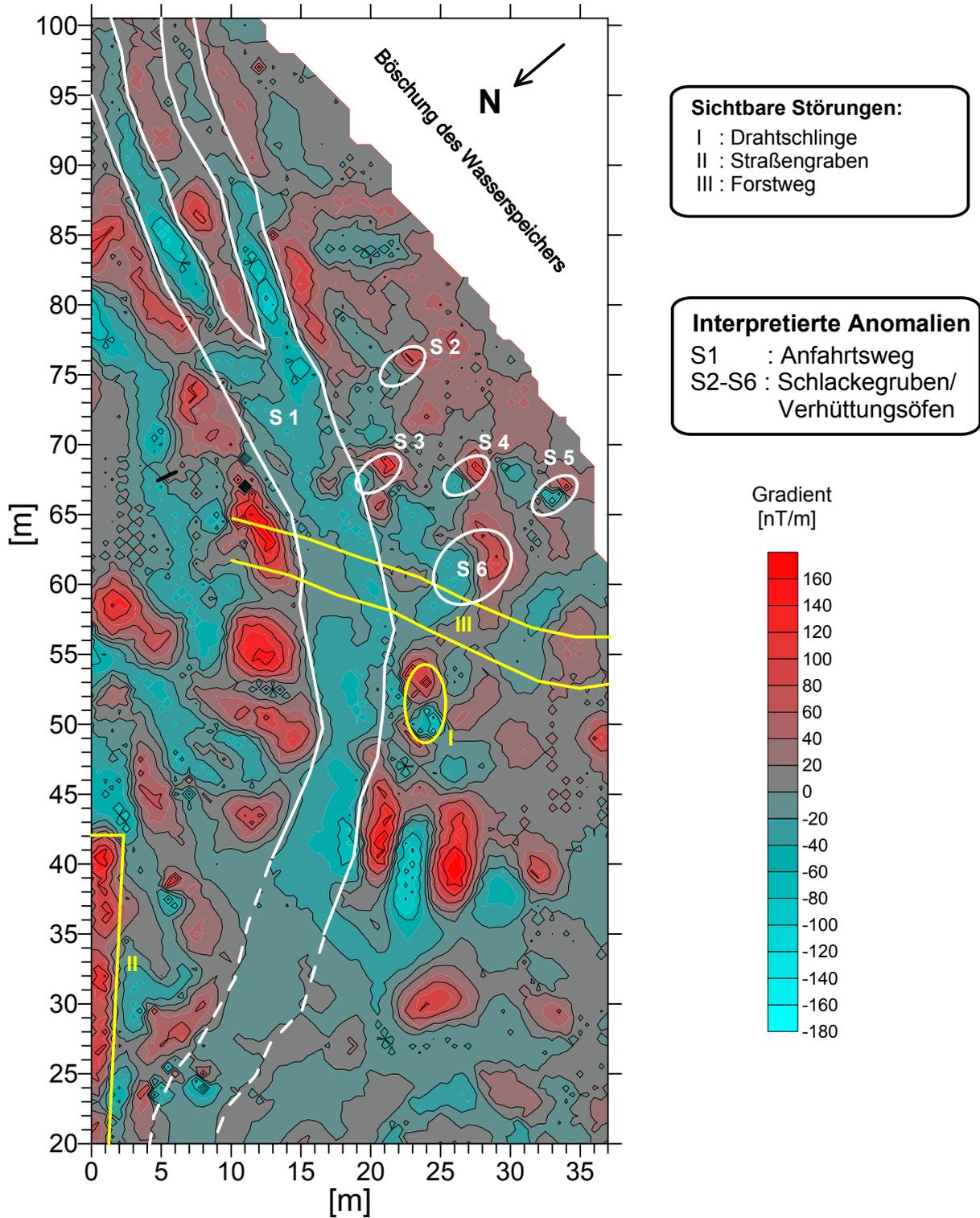


Abb. 7.2.2: Ergebnis der magnetischen Prospektion im Pandelbachtal mit der Interpretation einzelner Anomalien (S1-S6) und sichtbarer, neuzeitlicher Störungen (I-III); (Gradiometermessung, Dynamik +/- 180 nT); (aus Kansy & Hennig, 2000).

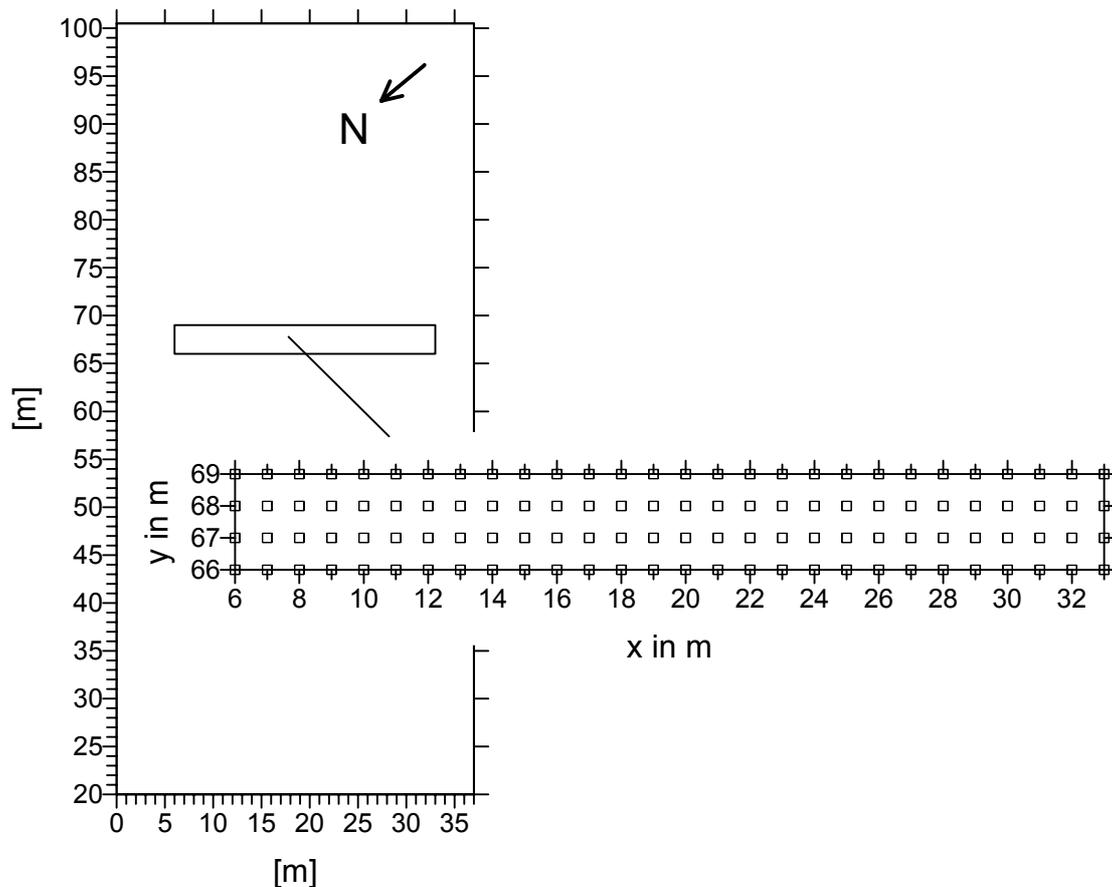


Abb. 7.2.3: Untersuchungsfläche der SIP-Messungen im Pandelbachtal. Vier Profile im Abstand von 1 m wurden gemessen. Die Fläche überdeckt die beiden Anomalien S3 und S4 der magnetischen Prospektion (Abb. 7.2.2)

## 7.2.4 Ergebnisse

Nach Abschluss der Feldmessungen lagen die Ergebnisse der SIP für vier Messprofile vor. Es folgte die Auswertung der Einzelprofile und des 3D-Datensatzes, der sich aus allen vier Messprofilen zusammensetzt. Bei den magnetischen Anomalien S3 und S4 (Abb. 7.2.2) rechneten die Archäologen damit, dass es sich um Schlackegruben oder Verhüttungsöfen handelt. In beiden Fällen waren große Polarisierungseffekte zu erwarten. Durch die Aufzeichnung von vier Frequenzen konnte eine Auswertung der Phasen und des Frequenzeffekts (Kap. 3.2.2) durchgeführt werden.

### 7.2.4.1 Auswertung der 2D-Messung

Am Beispiel von Profil 68 (Abb. 7.2.2 und 7.2.3) und der Messfrequenzen 1.06 Hz und 9.54 Hz erfolgte die Auswertung zweier klassischer Messparameter der Induzierten Polarisation im Frequenzbereich, Phase und Frequenzeffekt (Kap. 3.2.2)

## 7.2.4.1.1. Phase und Widerstand

Da es sich bei der Dipol-Dipol Konfiguration um eine symmetrische Anordnung handelt, ist eine Mittelwertbildung aus den Daten der normalen und reziproken Messrichtung erlaubt. Abbildung 7.2.4.1.1.1 zeigt die Pseudosektionen der Mittelwerte der scheinbaren spezifischen Widerstände und scheinbaren Phasen der 1.06 Hz Messung entlang Profil 68 (Abb. 7.2.2).

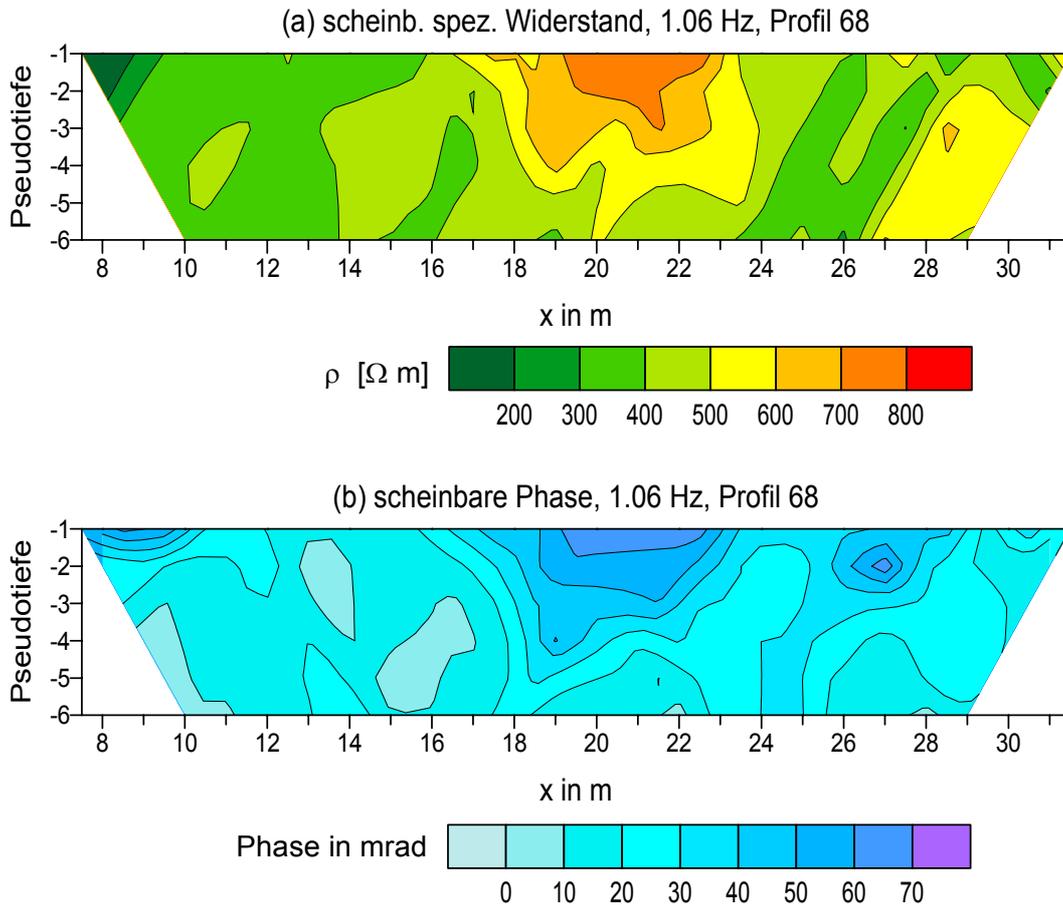


Abb. 7.2.4.1.1.1: Pseudosektionen entlang Profil 68, Messfrequenz 1.06 Hz.

(a) scheinbarer spezifischer Widerstand, (b) scheinbare Phase

In den Widerständen (Abb. 7.2.4.1.1.1a) ist an der Oberfläche zwischen  $x = 16$  und  $24$  m eine hochohmige Anomalie von  $600\text{--}800\ \Omega\text{m}$  zu erkennen, die sich bis in Pseudotiefe  $-4$  erstreckt. Die Widerstände des umgebenden Materials liegen unterhalb  $500\ \Omega\text{m}$ . Am rechten Rand der Pseudosektion ( $x > 26$  m) deutet sich mit über  $500\ \Omega\text{m}$  eine Veränderung des Untergrunds an. Die zentrale Anomalie ist auch in den Phasen zu sehen (Abb. 7.2.4.1.1.1b). Sie erreicht Phasenwerte von über  $50$  mrad.

Anders als bei den Widerständen zeigt sich eine zweite Anomalie ( $x = 26\text{--}28$  m), die ebenfalls oberflächennah ist und bis in Pseudotiefe  $-3$  reicht. Auch diese Anomalie besitzt Werte von über  $50$  bis  $70$  mrad. Zum umgebenden Material mit Phasen kleiner  $30$  mrad ergibt sich damit ein Kontrast von über  $20$  mrad. Die extrem hohen Phasenwerte deuten auf stark polarisierbares Material hin. Die hochohmige Anomalie in der Widerstandsmessung deutet auf den ersten Blick nicht auf ein metallhaltiges Objekt hin.

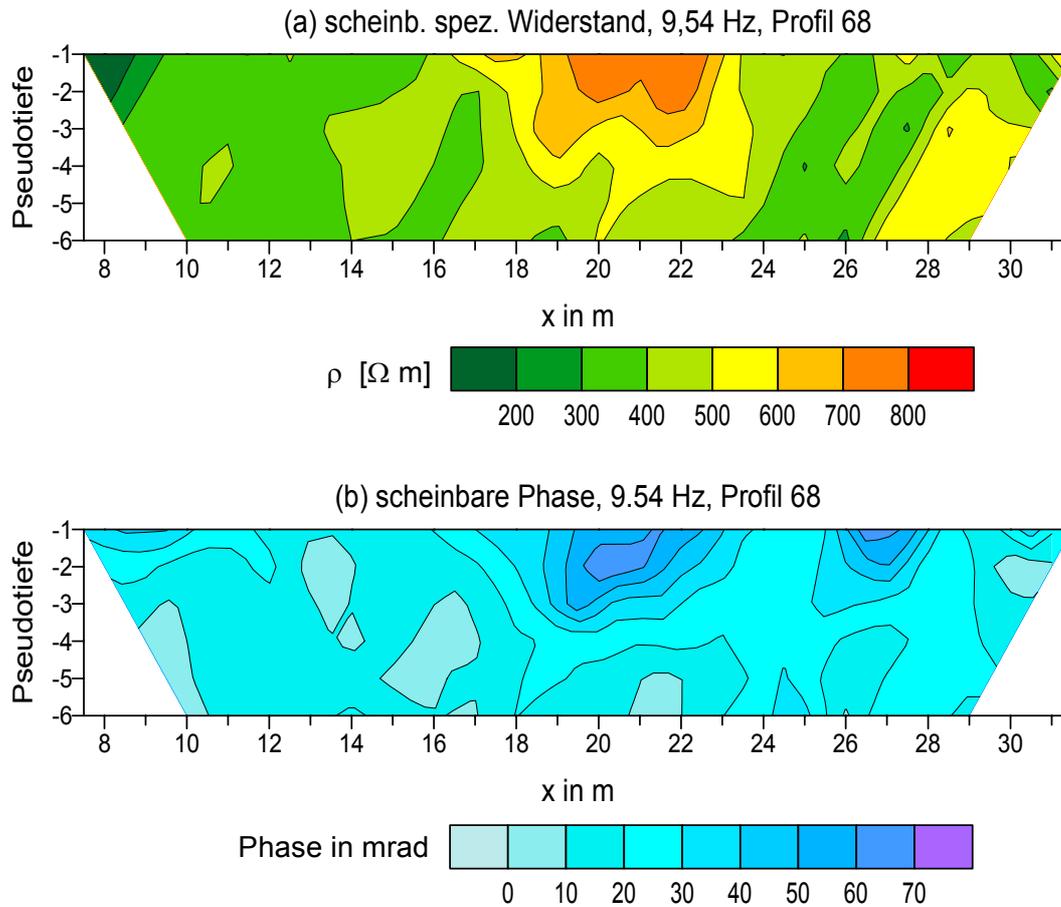


Abb. 7.2.4.1.1.2: Pseudosektionen entlang Profil 68, Messfrequenz 9.54 Hz.  
 (a) scheinbarer spezifischer Widerstand, (b) scheinbare Phase

Ein nahezu identisches Bild wie bei der 1.06 Hz Messung liefern die Pseudosektionen der 9.54 Hz Messung entlang Profil 68 (Abb. 7.2.4.1.1.2). Die Anomalie der Phasenmessung im rechten Bereich der Pseudosektion zeichnet sich bei der höheren Messfrequenz etwas klarer vom umgebenden Material ab (Abb. 7.2.4.1.1.2b).

## 7.2.4.1.2 PFE

Für die Berechnung des Frequenzeffekts in Prozent (PFE) entlang Profil 68 (Abb. 7.2.2 und 7.2.3) wurden die Widerstände der Messfrequenzen 1.06 Hz und 9.54 Hz ausgewählt. Der Frequenzeffekt wurde für beide Messrichtungen berechnet (Abb. 7.2.4.1.2a und b).

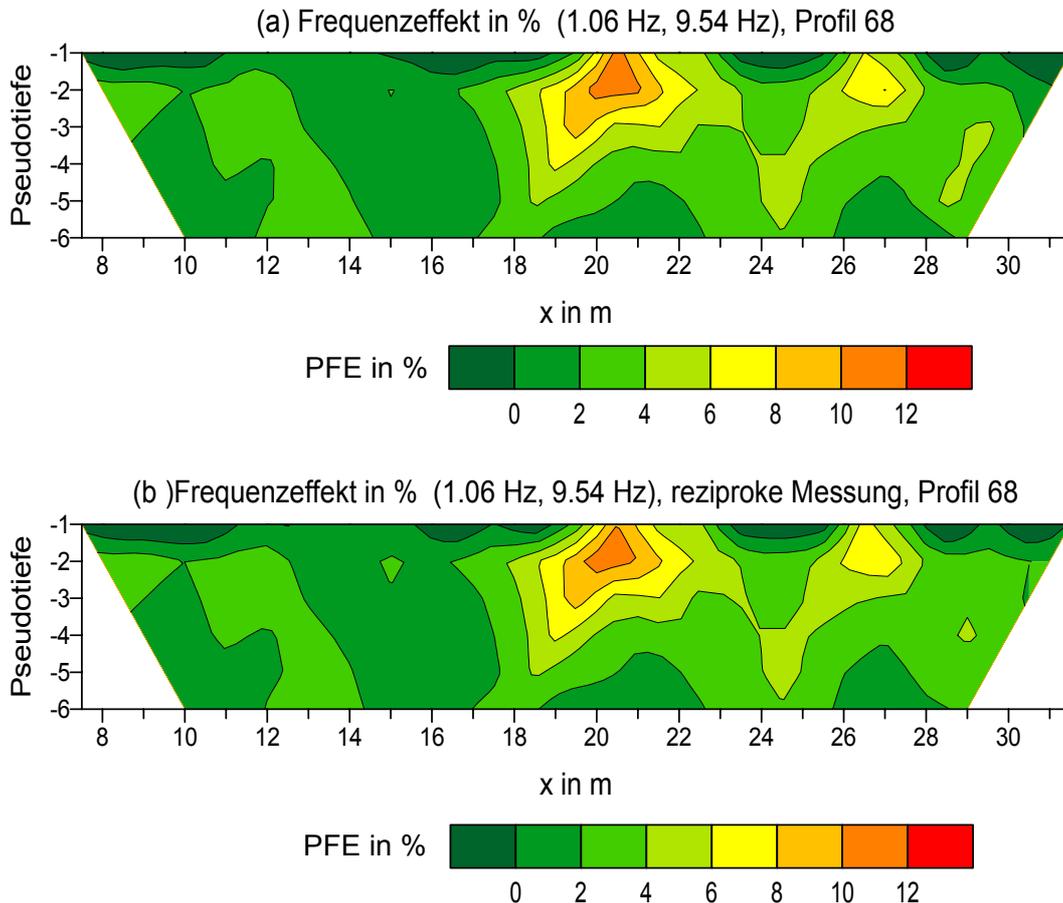


Abb. 7.2.4.1.2: Frequenzeffekt in % (PFE) berechnet aus den Widerstandsmessungen bei 1.06 und 9.54 Hz, Profil 68. Die Effekte der einzelnen Messrichtungen wurden getrennt voneinander berechnet. (a) normale, (b) reziproke Messrichtung.

Die Pseudosektionen der Frequenzeffekte (FE) bestätigen das Ergebnis der Phasenmessungen (Abb. 7.2.4.1.1.1b und Abb. 7.2.4.1.1.2b). Deutlich sind zwei Anomalien in Oberflächennähe zu erkennen. Eine zwischen  $x = 18-22$  m und eine zweite zwischen  $x = 26-28$  m. Die Anomalien zeichnen sich durch den PFE schärfer von der Umgebung ab und reichen bis in eine Pseudotiefe von  $-4$  bzw.  $-2$  (Abb. 7.2.4.1.2). Die Anomalien besitzen Effekte von 6 bis 12 % und liegen damit über den Werten des umgebenden Materials mit kleiner 5 %. Ein Wert von 5 % entspricht etwa dem maximal zu erwartenden Messfehler während einer Widerstandsmessung. Die Anomalien liegen über diesem Wert. Die deutliche Abnahme des Widerstands mit zunehmender Messfrequenz deutet auf stark polarisierbares Material (Kap. 3.3.1) hin. Diese Beobachtung deckt sich mit dem Ergebnis der Phasenmessung.

## 7.2.4.1.3 Inversion

Die Inversion des Profil 68, Messfrequenz 1.06 Hz erfolgte mit dem Programm Res2DINV (Loke & Barker, 1986a; Loke & Barker 1986b). Der Untergrund wurde für die Inversion in Gitterelemente unterteilt, die innerhalb des Messprofils eine Breite von 0.5 m und Dicke von 0.2m besitzen. Mit der Tiefe und im Randbereich des Modells vergrößern sich die Elemente schrittweise um 10 %. Die Inversion wurde nach 3 Iterationen abgebrochen. Bei den Widerständen wurde ein rms-error von 4.1 % erreicht, bei den Phasen eine Abweichung von 4 mrad.

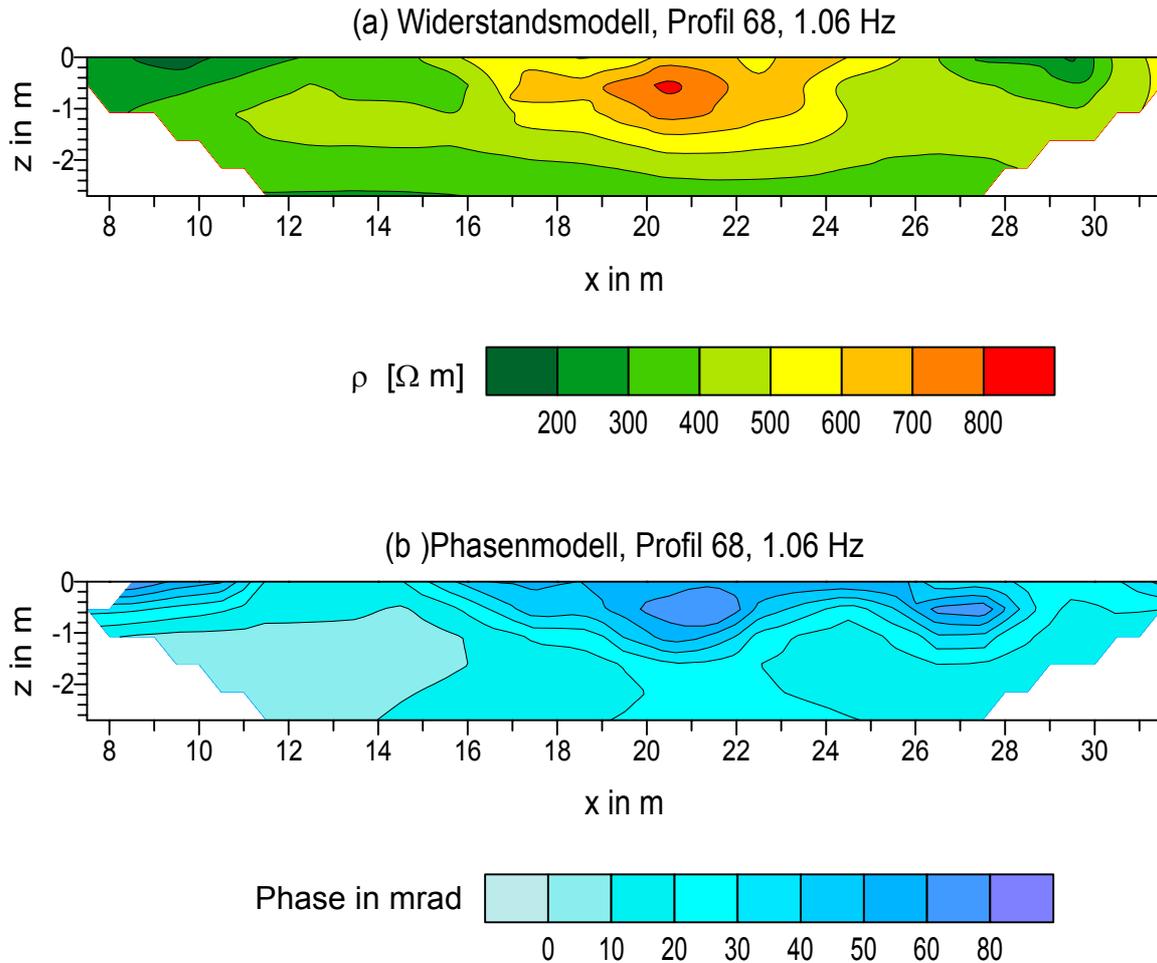


Abb. 7.2.4.1.3.: Inversionsergebnis der Messung entlang Profil 68, Frequenz 1.06 Hz.  
(a) Widerstandsmodell, (b) Phasenmodell

Die Position der Störkörper entlang des Profils hat sich gegenüber den Pseudosektionen nicht verändert, lediglich eine Tiefenzuordnung in Metern ist erfolgt. Die Oberkante der zentralen Anomalie ( $x = 20-22$  m) befindet sich in einer Tiefe von 0.2 m. Die Unterkante der Anomalie wird in einer Tiefe von 60 bis 80 cm erreicht. Die Widerstände der Anomalie liegen zwischen 600 und 800  $\Omega\text{m}$  und die Phasen zwischen 60 und 80 mrad.

Die zweite Anomalie ( $x = 26-28$  m), die nur in den Phasen sichtbar ist, reicht von 40 cm unterhalb der Oberfläche bis in eine Tiefe von 60 bis 80 cm. Die Phasen liegen zwischen 60 und 80 mrad und entsprechen den Werten der zentralen Anomalie. Der Wertebereich der Untergrundmodelle reicht von 100 bis 800  $\Omega\text{m}$  und 0 bis 80 mrad.

#### 7.2.4.1.4 Interpretation

Die Interpretation der resultierenden Untergrundmodelle ist zunächst widersprüchlich. Während sich im Widerstandsmodell eine oberflächennahe, hochohmige Anomalie zeigt, die sich mit einem Kontrast von über  $200 \Omega\text{m}$  vom umgebenden Material unterscheidet, ergeben sich durch die SIP zwei oberflächennahe Anomalien, die sich durch hohe Phasen bzw. Frequenzefekte auszeichnen.

Die SIP erlaubt eine Interpretation der Anomalien als metallische Störkörper, während die klassische Widerstandsmessung diese Deutung auf den ersten Blick nicht zulässt.

Tatsächlich lassen sich die Aussagen der beiden Parameter in Einklang bringen.

Eine Lösung ist, dass das umgebende Material tatsächlich hochohmiger ist als die archäologischen Objekte. Eine wahrscheinlichere Erklärung ergibt sich durch die Annahme, dass die Schlacke von einer Oxidationsschicht überzogen ist, die wie ein Isolator wirkt. Folglich findet kein Stromfluss durch die metallische Schlacke statt und die Verfüllung erscheint als hochohmiger Störkörper.

Die induzierte Polarisierung, die auf Oberflächeneffekten beruht, wird durch die oxidierte Schicht kaum beeinflusst. Der Polarisierungseffekt verstärkt sich durch den erhöhten Widerstandskontrast sogar (Bleil, 1953).

#### 7.2.4.2 Auswertung der 3D-Messung

Ziel der dreidimensionalen Feldmessung war, die räumliche Ausdehnung der magnetischen Anomalien S3 und S4 (Abb. 7.2.2) zu erfassen. Zur Berechnung eines 3D-Untergrundmodells wurden die vier Parallelprofile zu einem Datensatz zusammengefasst (Abb. 7.2.3). Zwar entspricht der Messaufbau keiner wirklichen 3D-Messung, jedoch erlaubte der damalige Entwicklungsstand der Apparatur SIP-256 keine andere Umsetzung.

Vor der Inversion des Datensatzes mit dem Programm Res3DINV wurden die Werte der beiden Messrichtungen gemittelt. Das Untergrundmodell wurde in Gitterelemente von  $0.35 \text{ m}$  Dicke und  $0.5 \text{ m}$  Breite unterteilt. Die Inversion wurde nach 6 Iterationsschritten abgebrochen. Das Widerstandsmodell konnte mit einem rms-error von  $9 \%$  angepaßt werden. Das Phasenmodell hat eine Abweichung von  $5.7 \text{ mrad}$ .

Die Abbildung 7.2.4.2.1 zeigt das resultierende Widerstandsmodell von  $0.35$  bis  $2.7 \text{ m}$  Tiefe für die Messfrequenz von  $1.06 \text{ Hz}$ . Analog zum 2D-Modell zeigt sich bereits in den beiden oberflächennahen Horizontalschnitten eine zentrale Anomalie ( $x = 19 - 22$ ), die sich durch Widerstände von über  $700 \Omega\text{m}$  auszeichnet (Abb. 7.2.4.1a und b). Die Anomalie lässt sich bis in eine Tiefe von  $1.6 \text{ m}$  verfolgen (Abb. 7.2.4.2.1c). Im Nordwesten reicht der Störkörper bis  $y = 67.5 \text{ m}$ . Im Südosten setzt sich der Störkörper über die Messfläche fort. Die Widerstände am südwestlichen Rand der Messfläche sind leicht erhöht und erreichen Werte von  $600 \Omega\text{m}$ . Die Ursache für diese Veränderung ist ungeklärt. Unterhalb von  $2.1 \text{ m}$  zeigt sich ein nahezu homogener Untergrund mit Widerständen unterhalb  $400 \Omega\text{m}$  (Abb. 7.2.4.2.1d und e).

Im Phasenmodell (Abb. 7.2.4.2.2) zeigen sich zwei Anomalien. Die zentrale Anomalie ist identisch mit dem Störkörper im Widerstandsmodell und besitzt Phasen von  $50$  bis  $70 \text{ mrad}$  (Abb. 7.2.4.2.2 a-c). Sie reicht von  $0.35$  bis  $1.6 \text{ m}$  Tiefe. Daneben ist noch ein zweiter Störkörper zu erkennen ( $x = 26 - 29 \text{ m}$ ) mit Phasen zwischen  $50$  und  $60 \text{ mrad}$  (Abb. 7.2.4.2.2 a-c). Diese Anomalie reicht von  $0.35$  bis  $1.2 \text{ m}$  Tiefe und dehnt sich wie die zentrale Anomalie von Südost nach Nordwest über die Messfläche aus (Abb. 7.2.4.2.2 a-c).

Damit ist die laterale Ausdehnung im Phasenmodell größer als im Widerstandsmodell. Im Bereich  $x = 8 - 18 \text{ m}$  zieht sich von Südost nach Nordwest ein breites Band mit Phasen von  $0$  bis  $10 \text{ mrad}$  durch das Modell. Vergleicht man diese Struktur mit der als Anfahrtsweg interpretierten Struktur im Magnetogramm (Abb. 7.2.2), so stimmt die Lage der beiden Anomalien überein.

Im Widerstandsmodell ist diese Struktur nur schwach angedeutet. Die Struktur ist bis in eine Tiefe von 2.7 m zu verfolgen.

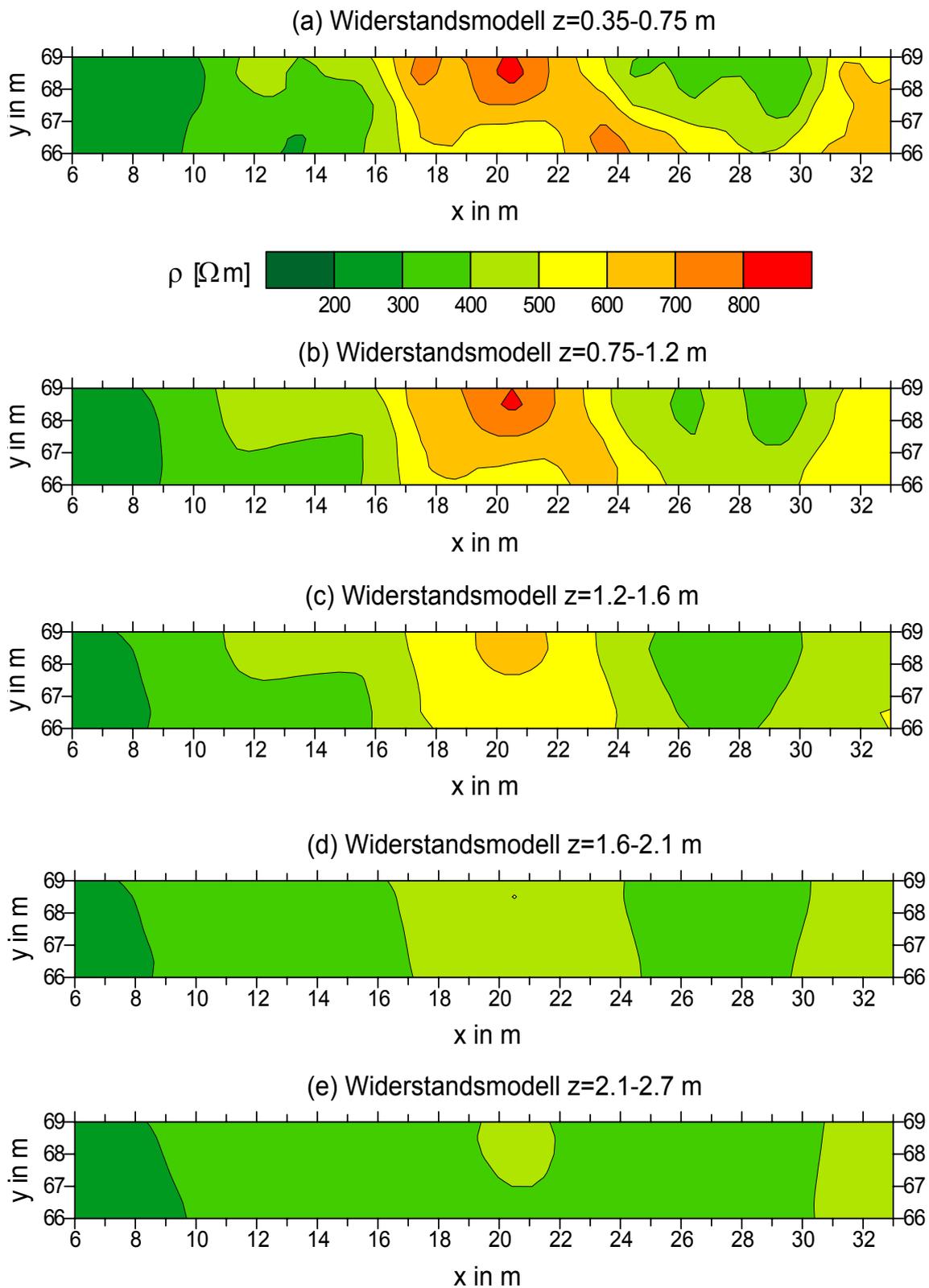


Abb. 7.2.4.2.1: Widerstandsmodell der 3D-Messung (Abb. 7.2.3), Frequenz 1.06 Hz. Das Modell ist in Form von horizontalen Tiefensektionen dargestellt.

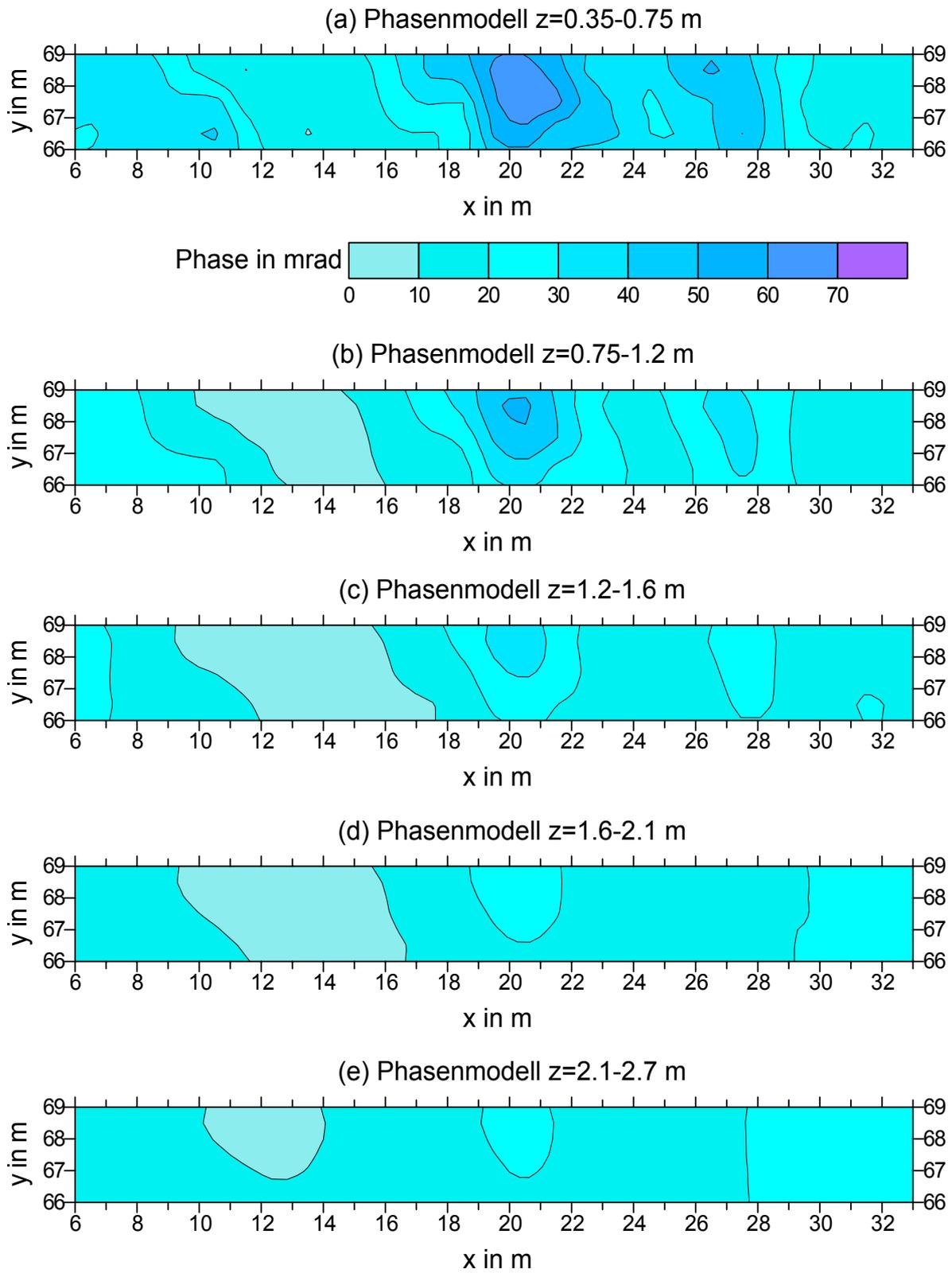


Abb. 7.2.4.2.2: Phasenmodell der 3D-Messung (Abb. 7.2.3), Frequenz 1.06 Hz. Das Modell ist in Form von horizontalen Tiefensektionen dargestellt.

### 7.2.5 Zusammenfassung

Auf dem mittelalterlichen Verhüttungsplatz der Zisterzienser im Pandelbachtal konnten die aus der Erzprospektion bekannten Vorteile der Induzierten Polarisation genutzt werden (Kap. 2.3). Mit Hilfe der erwarteten starken Polarisierungseffekte (Kap. 3.3.1) konnten zwei Schlackegruben eindeutig identifiziert werden. Dies gelang sowohl bei der Auswertung der Phasen als auch des Frequenzeffekts.

Mit einer konventionellen Widerstandsmessung wäre nur eine der beiden Gruben erkannt worden. Probebohrungen im Anschluss an die Feldmessungen bestätigten, dass es sich bei der zentralen Anomalie ( $x = 19 - 22$  m) um eine mit Holz ausgekleidete Schlackegrube handelt. Die Schlacke findet sich an der Lokation  $x = 20$  m im Tiefenbereich von 0.25 bis 0.60 m.

Damit ist die Unterkante der Anomalie im 3D-Modell der SIP nicht gut aufgelöst. Dort lässt sich die Grube bis in eine Tiefe von 1.2-1.6 m verfolgen. Mit einer Messanordnung mit Kreuzprofilen und geringerem Elektrodenabstand kann das Auflösungsvermögen vermutlich verbessert werden. Im Rahmen dieser Arbeit bestand nicht mehr die Möglichkeit, eine entsprechende Messung umzusetzen.

Das zweite wichtige Ergebnis der flächenhaften Messung, war, dass es sich bei Struktur S1 in der Magnetik nicht um einen Anfahrtsweg handelt, sondern wahrscheinlich um einen ehemaligen Bachlauf. Dafür sprechen die geringen Phasen in diesem Bereich (Abb. 7.2.4.2.1) und die bei einer Probegrabung nachgewiesenen fluviatilen Sedimente. Die kiesig-sandigen Ablagerungen sind unpolarisierbar und erklären damit die niedrigen Phasenwerte in diesem Bereich. Die Widerstandsmessung lieferte keinerlei Hinweis auf diesen Bachlauf (Abb. 7.2.4.2.1).

Die Ergebnisse im Pandelbachtal knüpfen an die ersten Ergebnisse von Aspinall und Lynam (1968, 1970) an, IP zur Detektion von Schlacken und Erzen in der archäologischen Prospektion einzusetzen. In Kombination mit einer flächenhaften magnetischen Prospektion hat sich der Einsatz der Methode bewährt und den Archäologen wichtige Zusatzinformationen geliefert.

## 7.3 Frühmittelalterlicher Siedlungshorizont in Pliska (Bulgarien)

### 7.3.1 Archäologischer Hintergrund

Neben den beiden europäischen Großmächten Frankenreich und Byzanz spielte das bulgarische Reich eine wichtige Rolle im frühmittelalterlichen Europa (Abb. 7.3.1.1).

Die erste Hauptstadt des frühmittelalterlichen Bulgarenreichs Pliska (Henning, 1980; Rasev, 1983) wird seit 1997 im Rahmen eines deutsch-bulgarischen Forschungsprojekts unter Beteiligung des Seminars für Vor- und Frühgeschichte der J.W. Goethe-Universität Frankfurt am Main untersucht (Henning, 2000). Pliska liegt im Nordosten des heutigen Bulgariens (Abb. 7.3.1.1) etwa 75 km westlich der Schwarzmeerküste und etwa 100 km südlich der Donau. Pliska unterteilt sich in eine innere Stadt mit den Herrschaftsgebäuden und eine äußere Stadt, in der sich die Produktionsstätten und die Wohngebäude der Handwerker befanden. Die äußere Stadt umfasst eine Gesamtfläche von 23 km<sup>2</sup>.

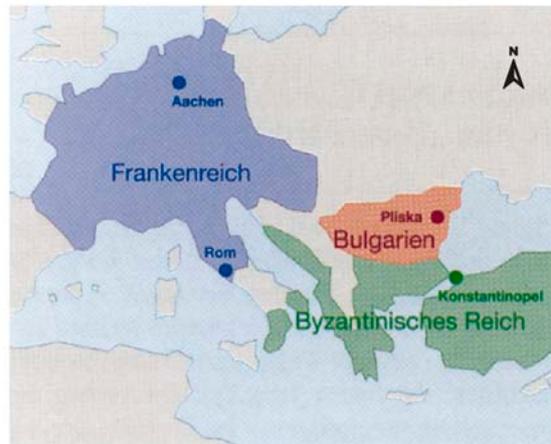


Abb. 7.3.1.1: Karte der europäischen Großmächte des Frühmittelalters mit der Lage Pliskas, der ersten Hauptstadt des bulgarischen Reiches (aus Henning, 2000).

### 7.3.2 Untersuchungsobjekt

Während der deutsch-bulgarischen Grabungskampagnen der Jahre 1997 bis 1998 konnte mit Hilfe einer magnetischen Prospektion (Hartlaub, 2001) das Gebiet der Produktionsstätten eingegrenzt und lokalisiert werden (Abb. 7.3.2.2). Das Produktionsgebiet westlich der inneren Stadt (Abb. 7.3.2.1, (2)) liegt in der Flur „Asar-dere“ (Abb. 7.3.2.1, (3)) und ist teilweise mit einer mächtigen Sedimentschicht bedeckt. Aus diesem Grund wurde im folgenden Jahr die SIP-256 gezielt an Stellen eingesetzt, an denen man weitere Siedlungsreste vermutete. Zur Orientierung ist die Lokation von Grabungsschnitt 16 und die Fläche auf der die Messungen der Spektralen Induzierten Polarsiation durchgeführt wurden in Abbildung 7.3.2.1 als S16 gekennzeichnet.

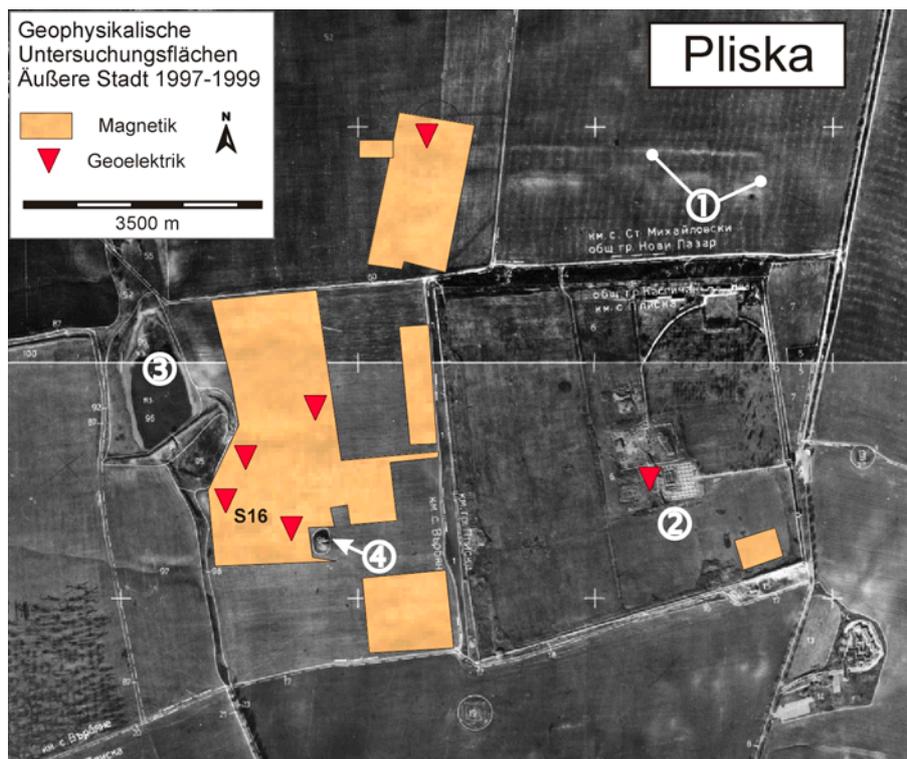


Abb. 7.3.2.1: Geophysikalische Untersuchungsflächen von 1997 bis 1999. (1) Befestigungsgraben der äußeren Stadt, (2) Innere Stadt, (3) Asar-derer, (4) Mogila, S16 Lokation des Grabungsschnitt 16 und der flächenhaften SIP-Messung. (Quelle: Prof. Henning, Seminar f. Vor- und Frühgeschichte, unveröffentlichte Luftbildaufnahme).

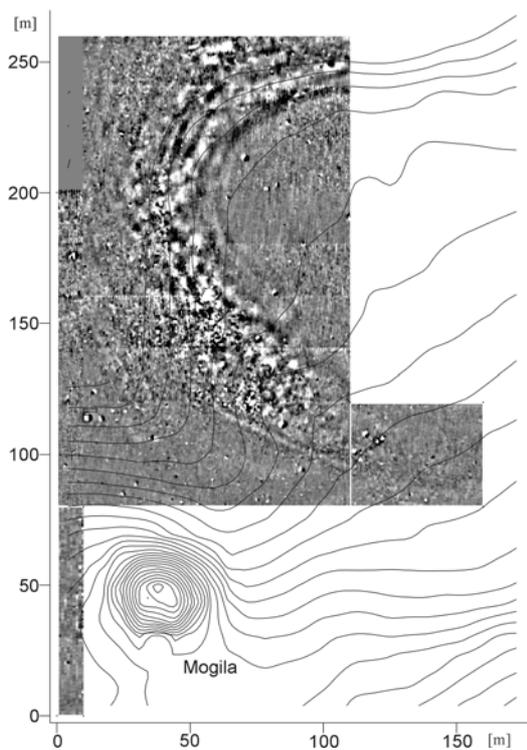


Abb. 7.3.2.2: Ergebnis der magnetischen Prospektion 1997, [-3 nT; + 3 nT] [schwarz; weiß]. Zu erkennen ist die sichelförmige Struktur der Produktionsstätten (Hartlaub, 2001).

### 7.3.3 Messanordnung

Das gesamte Elektrodenarray setzt sich aus 12 einzeln durchgeführten Profilmessungen zusammen (Abb. 7.3.3). Jedes Profil hat eine Gesamtlänge von 14 m bei einem Elektroden- und Dipolabstand von 1 m. Es ergibt sich also eine Messfläche von 11 x 14 m. Als Messkonfiguration wurde eine Dipol-Dipol Anordnung gewählt. Eine Stahlelektrode pro Remote Unit wurde für Stromspeisung und Potentialmessung verwendet. Eingespeist wurde ein Stromsignal von 19.1 Hz mit einer Amplitude von 42 mA.

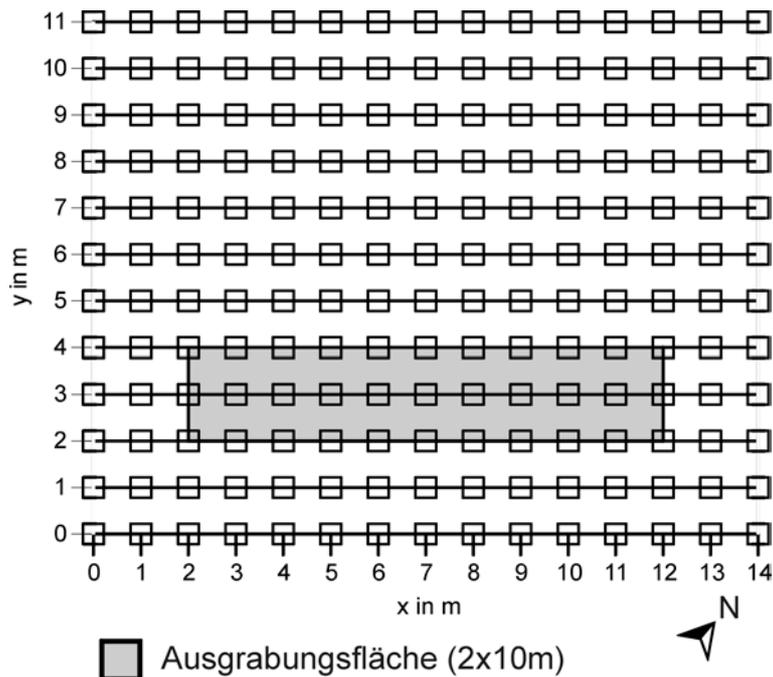


Abb. 7.3.3: Aufbau des Elektrodenarrays. Insgesamt wurden 12 Einzelprofile gemessen. Die Fläche der anschließenden Ausgrabung ist grau unterlegt.

### 7.3.4 Messergebnisse

Zunächst wurden die Pseudosektionen der 12 Einzelprofile zu einem 3D-Datensatz zusammengefasst. Die symmetrische Dipol-Dipol Anordnung erlaubt es, den Mittelwert aus beiden Messrichtungen zu bilden. Anschließend erfolgte eine flächenhafte Darstellung der Mittelwerte jeder Pseudotiefe (Kap. 5.4). Diese Art der Darstellung liefert erste Hinweise auf Strukturen im Untergrund. Mit zunehmendem Abstand der Dipole zueinander, also mit zunehmender Pseudotiefe, verringert sich die Anzahl der Messwerte und damit der Informationsgehalt. Im Folgenden sind die einzelnen Pseudotiefen der scheinbaren Phasen und der scheinbaren spezifischen Widerstände dargestellt (Abb. 7.3.4.1 u. 7.3.4.2). In jede Abbildung ist die Lage der Fläche des anschließenden Grabungsschnitts (schwarzes Rechteck) eingezeichnet.

In den ersten beiden Pseudotiefen ist sowohl in der Widerstandsmessung aber noch deutlicher in der Phasenmessung (Abb. 7.3.4.1 u. 7.3.4.2) eine von Südost nach Nordwest laufende Struktur zu erkennen. Die Struktur zeichnet sich durch höhere Widerstände und Phasen gegenüber der Umgebung aus und kreuzt den Grabungsschnitt etwa zwischen 8 und 9 m entlang der x-Achse.

Ab Pseudotiefe -3 wandert die Struktur im Widerstandsbild (Abb. 7.3.4.1) an den nordöstlichen Rand der Messfläche bis sie in Pseudotiefe -6 völlig verschwunden ist. Dagegen bleibt sie im Phasenbild ortsfest und verschwindet in Pseudotiefe -5.

Eine etwa 2.5 x 3 m große Struktur zeigt sich in dieser Tiefe (Abb. 7.3.4.2). Sie zeichnet sich durch erhöhte Werte gegenüber der Umgebung aus und reicht in die Ausgrabungsfläche. Ihre Ausdehnung reicht in x-Richtung von 4.5 bis 6.5 m und in y-Richtung von etwa 2 bis 6 m. Ab Pseudotiefe -7 ist eine flächenhafte Zunahme der Phasenwerte zu beobachten (Abb. 7.3.4.2). Lagen die Phasen in geringeren Tiefen meist unterhalb 20 mrad, erreichen sie jetzt Werte von bis zu 40 mrad.

Im Widerstandsbild ist ab Pseudotiefe -7 im östlichen Bereich der Messfläche eine hochohmige rechteckige Struktur sichtbar, die sich bereits in der darüberliegenden Pseudotiefe andeutet (Abb. 7.3.4.1). Diese rechteckige Struktur reicht in y-Richtung von 2 m bis etwa 9 m. Ab Pseudotiefe -8 löst sich die Struktur auf, während die Phasen weiterhin Werte von bis zu 40 mrad erreichen (Abb. 7.3.4.1 u. 7.3.4.2). Die Widerstände scheinen ab Pseudotiefe -9 abzunehmen, jedoch lassen sich wegen der geringen Anzahl an Messpunkten in dieser Tiefe keine zuverlässigen Aussagen machen (Abb. 7.3.4.1).

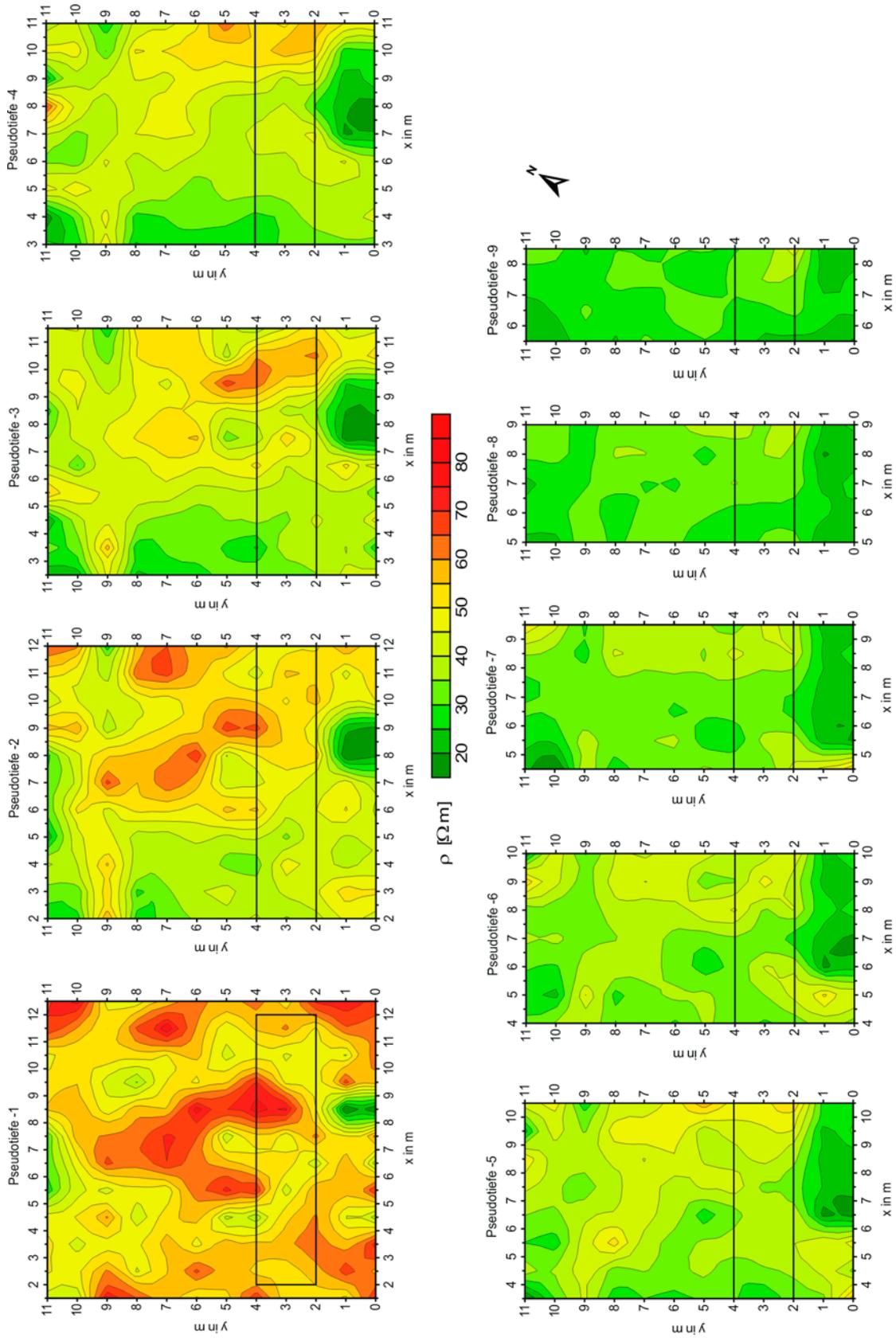


Abb. 7.3.4.1: Darstellung der einzelnen Pseudotiefen der flächenhaften Widerstandsmessung in Pliska (Bulgarien). Die Fläche der anschließenden Ausgrabung ist als schwarzes Rechteck dargestellt ( $x=2-12\text{ m}$ ;  $y=2-4\text{ m}$ ).

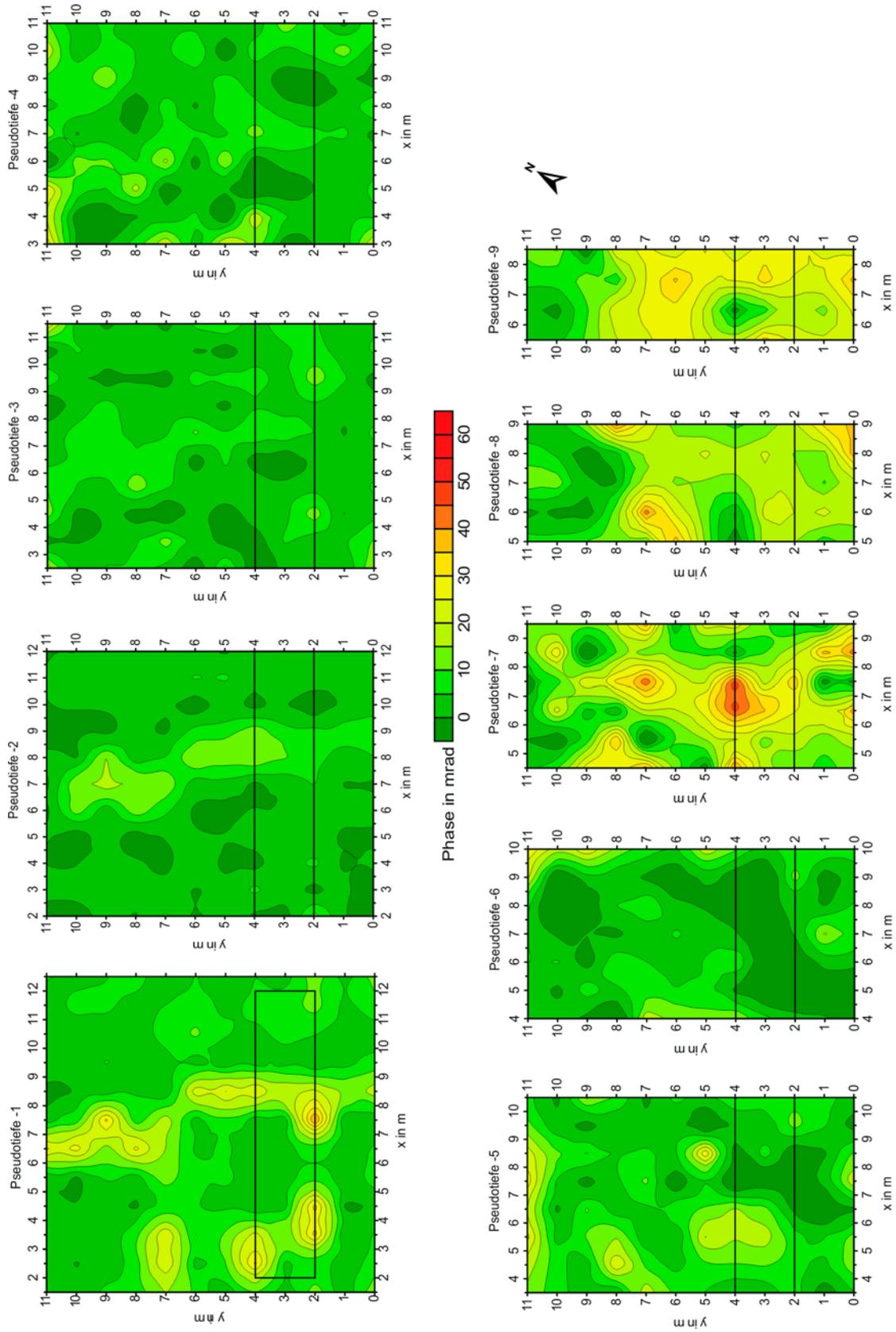


Abb. 7.3.4.2: Darstellung der einzelnen Pseudotiefen der flächenhaften Phasenmessung in Pliska (Bulgarien). Die Fläche der anschließenden Ausgrabung ist als schwarzes Rechteck dargestellt (x=2-12 m; y=2-4 m).

### 7.3.5 Inversion

Vor der Inversion fand eine Filterung der Daten statt. Es wurden nur Daten zugelassen, die innerhalb der Wertebereiche 10 bis 70  $\Omega\text{m}$  bzw. -10 bis 55 mrad lagen. Da die symmetrische Dipol-Dipol-Konfiguration die Bedingungen der Reziprozität erfüllt (Kap. 6.2.2), wurde der Mittelwert aus normalem und reziprotem Messwert gebildet. Die Inversion der Mittelwerte erfolgte mit dem Programm Res3Dinv von Loke und Barker (1996a, 1996b). Das Untergrundmodell unterteilt sich in quadratische Gitterelemente, die innerhalb der Messfläche eine Breite von 0.5 m und Höhe von 0.3 m besitzen. Außerhalb der Messfläche und mit der Tiefe nimmt die Größe der Elemente jeweils um 10 % zu. Das Modell hat eine maximale Tiefe von 3.4 m. Die Berechnung des Untergrundmodells sollte mit maximal 6 Iterationsschritten erfolgen. Abbruchkriterium war eine relative Änderung des rms-error von weniger als 5 % des Widerstandsmodells (Kap. 5.7). Die Inversion wurde nach 4 Iterationen und einem rms-error von 4.6 % für die Widerstände und 3.9 mrad bei dem Phasen abgebrochen (Abb. 7.3.5).

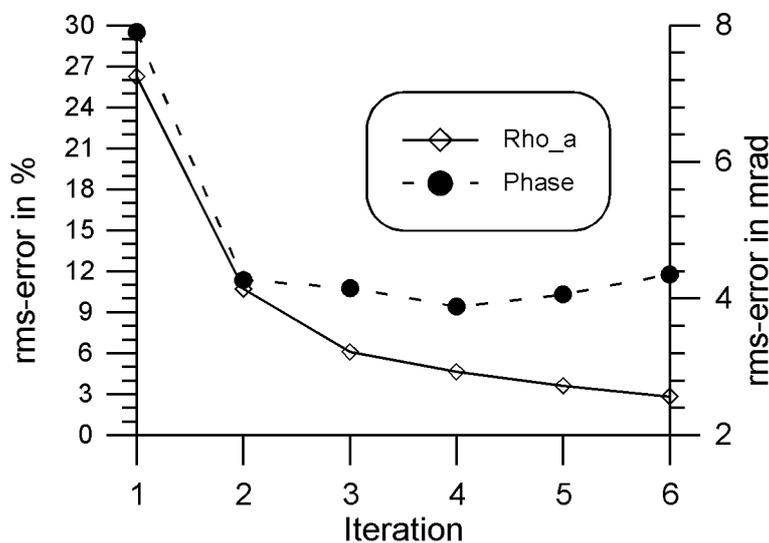


Abb. 7.3.5: Verlauf des rms-error der Widerstände und Phasen während der Inversion des 3D-Datensatzes.

Das Inversionsmodell bestätigt die Beobachtungen aus den Kartierebenen (Abb. 7.3.4.1 u. 7.3.4.2). Jedoch zeigt die Inversion, dass die Lage einer Anomalie in einer Pseudosektion nur bedingt mit der Position einer Struktur im Untergrundmodell übereinstimmt. Speziell bei der Dipol-Dipol Anordnung, bei der sich Anomalien in Form von V-förmigen Elektroden Spuren abbilden, gilt eine Übereinstimmung nur dort, wo die Anomalie unmittelbar einsetzt. Mit zunehmender Tiefe divergieren die Spuren und geben keinen Hinweis auf die tatsächliche Tiefenlage des Störkörpers. Dies verdeutlicht noch einmal den Charakter einer Pseudosektion, die nur ein grobes Abbild der Verhältnisse im Untergrund sein kann.

Die Darstellung des ermittelten Untergrundmodells (Abb. 7.3.5.1 u. 7.3.5.2) ist auf den Tiefenbereich zwischen 0.3 bis 2.9 m begrenzt. Die obersten 30 cm des Modells sind von Ankopplungseffekten der Elektroden stark beeinflusst und gegen keine Hinweise auf verborgene Strukturen. Die Schichten ab einer Tiefe von 2.9 m sind wegen der geringen Datenbasis in ihrer Aussagefähigkeit begrenzt und liegen am Limit der mit der gewählten Anordnung erreichbaren Eindringtiefe.

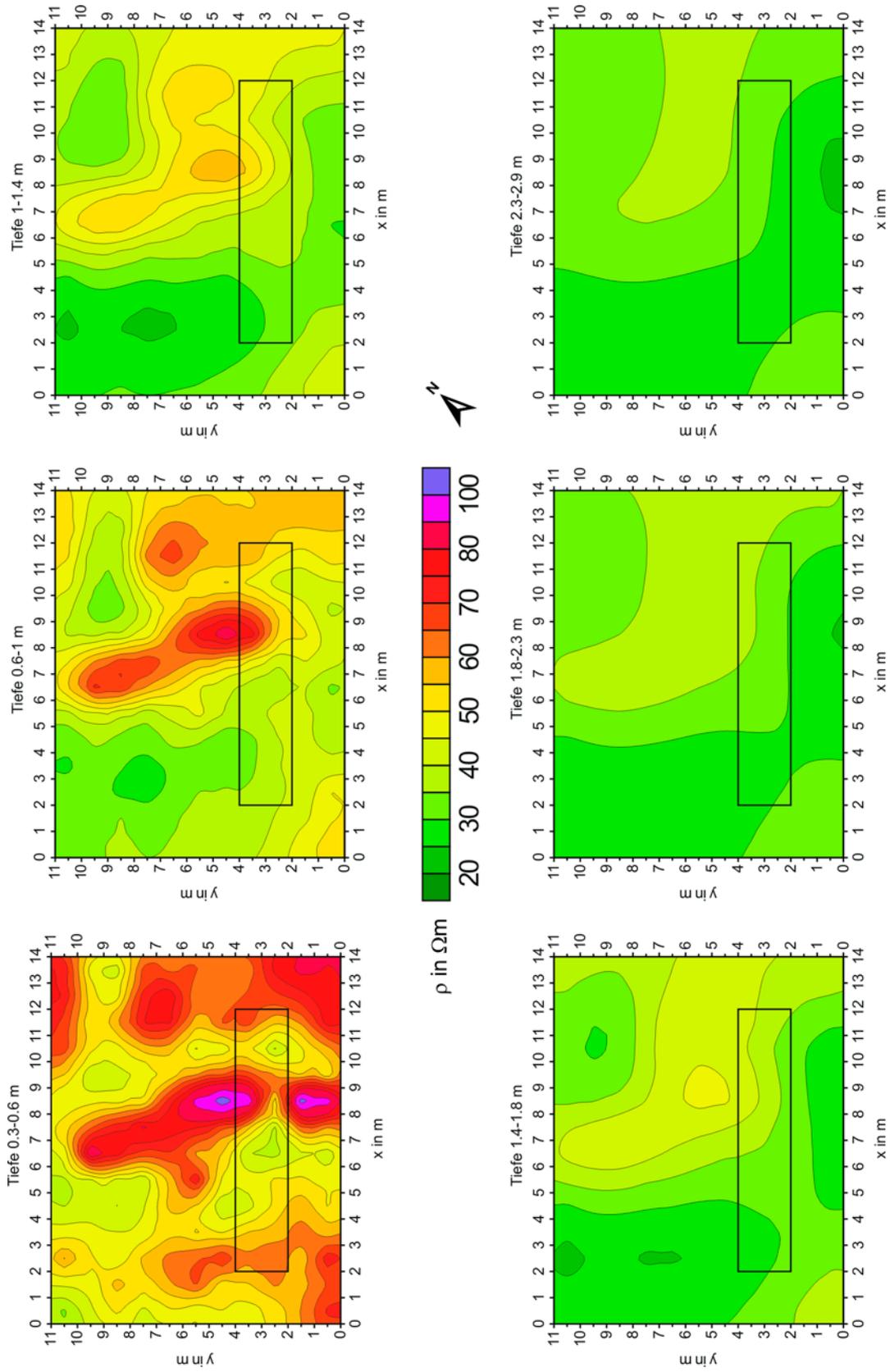


Abb. 7.3.5.1: Darstellung der horizontalen Tiefensegmente des berechneten Widerstandmodells. Die Fläche der anschließenden Ausgrabung ist als schwarzes Rechteck dargestellt (x=2-12 m; y=2-4 m).

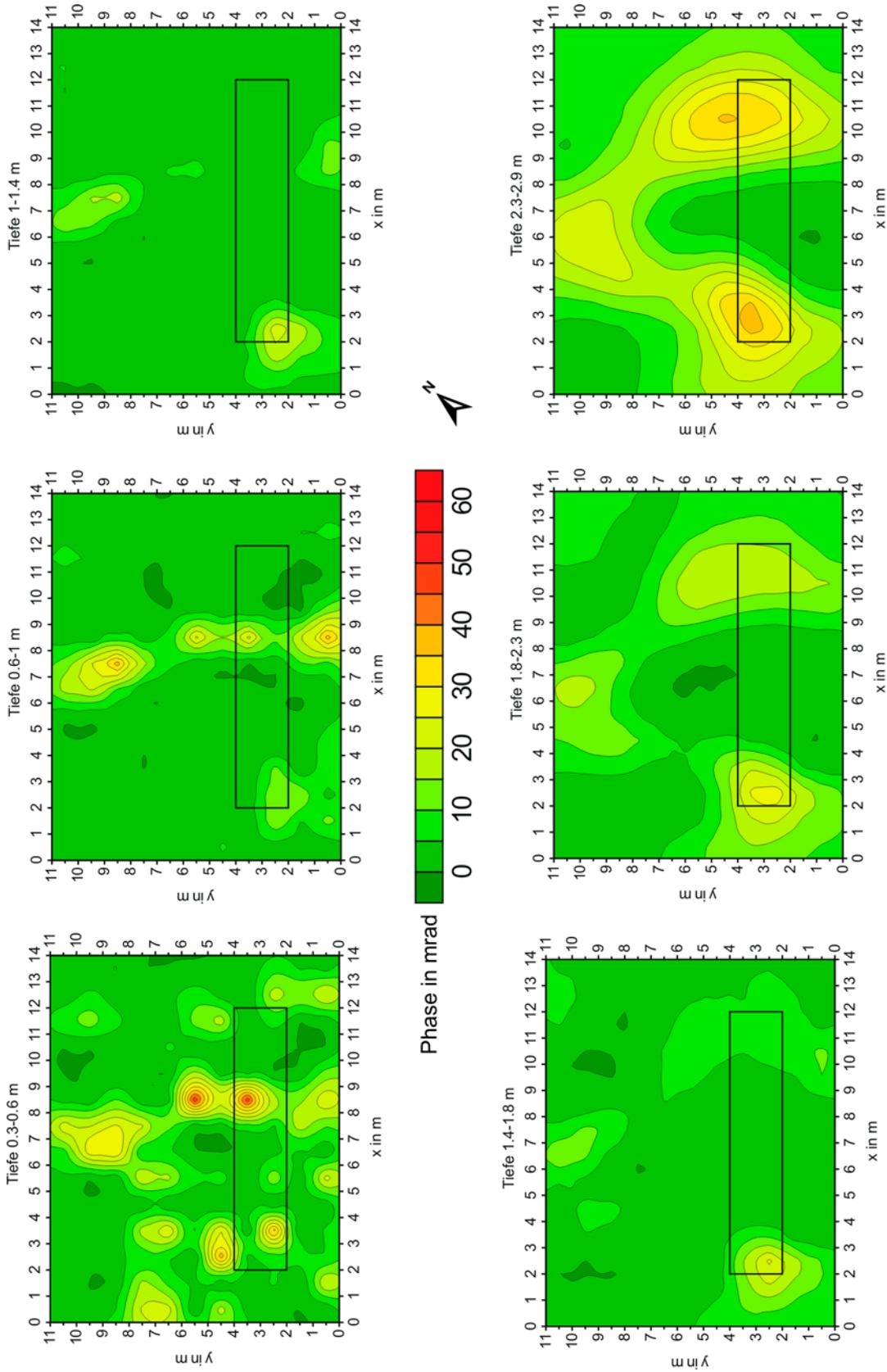


Abb. 7.3.5.2: Darstellung der horizontalen Tiefensegmente des berechneten Phasenmodells. Die Fläche der anschließenden Ausgrabung ist als schwarzes Rechteck dargestellt ( $x=2-12$  m;  $y=2-4$  m).

In einer Tiefe von 0.3 m bis 0.6 m zeigt sich im Widerstandsmodell eine lineare Struktur, die von Südost nach Nordwest verläuft und die Grabungsfläche schneidet (Abb. 7.3.5.1). Mit zunehmender Tiefe verringert sich die Ausdehnung dieser Struktur, bis sie in einer Tiefe von 1.4 bis 1.8 m völlig verschwindet. Im Phasenmodell (Abb. 7.3.5.2) ist der Verlauf der linearen Struktur in beiden oberflächennahen Tiefensegmenten deutlich zu sehen. Ab einer Tiefe von 1 bis 1.4 m deutet sich die Anomalie nur noch am südöstlichen und nordwestlichen Ende der Messfläche an.

Ab einer Tiefe von 1.4 bis 1.8 m durchschneidet ein niederohmiges Band das Modell (Abb. 7.3.5.1). Es teilt den Untergrund in eine geringfügig höherohmige Nordost- und Südwestfläche. An den Stirnseiten der Grabungsfläche zeigen sich im Phasenmodell (Abb. 7.3.5.2) ab einer Tiefe von 1.4 bis 1.8 m Anomalien mit erhöhten Phasen. Die Ausdehnung dieser Anomalien nimmt mit der Tiefe zu, bis sich ein Dreieck aus drei Anomalien aufspannt. Zwei der Anomalien liegen innerhalb der Ausgrabungsfläche und besitzen Phasen von etwa 30-40 mrad. Die dritte Anomalie im Nordwesten liegt außerhalb der Grabungsfläche, scheint aber in Verbindung mit den beiden anderen Anomalien zu stehen.

### 7.3.6 Grabungsbefund

Die anschließende Ausgrabung sollte Aufschluss darüber bringen, worum es sich bei den geoelektrisch bestimmten Anomalien handelt. Ein Sondageschnitt von 10 m Länge und 2 m Breite wurde angelegt, der bis in eine Tiefe von etwa 3.5 m reichte. Die nachfolgende Zeichnung zeigt die Umzeichnung des nordwestlichen Profils der Sondage (Abb. 7.3.6.1).

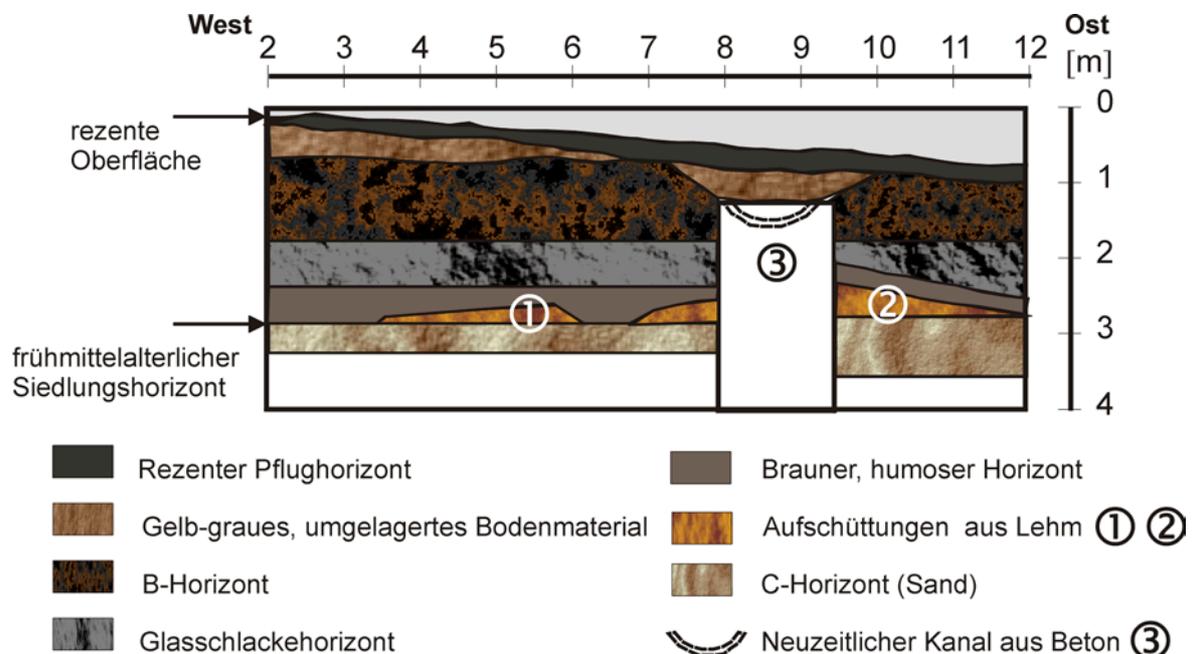


Abb. 7.3.6.1: Umzeichnung des Nordwestprofils des Grabungsschnitt 16 mit den Befunden. (1) westliche Lehmaufschüttung, (2) östliche Lehmaufschüttung, (3) neuzeitliche Wasserrinne.



Abb. 7.3.6.2: Siedlungshorizont in Grabungsschnitt 16 (oranger Pfeil); links: Lehmablagerung 2 (siehe Abb. 7.3.6.1), Foto von Osten.; rechts: Lehmablagerung 2, Foto von Westen.

Knapp unterhalb des Pflughorizonts ( $A_p$ -Horizont) fand man bei den Ausgrabungen eine neuzeitliche Wasserrinne aus Beton. Die Rinne liegt zwischen 8 und 9.5 m entlang des Profils und befindet sich in einer Tiefe von etwa 1 m. Bedeckt ist die Rinne mit einem 0.5 m mächtigen Lehmpaket. Der gewachsene Boden (B-Horizont) reicht bis in eine Tiefe von etwa 1.7 m und überdeckt einen Glasschlackehorizont, der sich über das gesamte frühmittelalterliche Produktionsgebiet ausdehnt und für eine stark magnetische, halbmondförmige Struktur im Magnetogramm verantwortlich ist (Ab. 7.3.2.2). Unterhalb dieses Schlackehorizonts stieß man auf eine humose Bodenschicht, vermutlich ein ehemaliger A-Horizont. Diese Vermutung wurde durch das Auffinden von zwei Aufschüttungen aus Lehm in einer Tiefe von 2.2 bis 2.6 m bestätigt. Dieser Lehm ist ein Zeichen für Besiedlung und stellt die Überreste von Behausungen dar. Die Abbildung 7.3.6.2 zeigt zwei Fotos des frühmittelalterlichen Siedlungshorizonts. Deutlich zeichnen sich die hellen Lehmablagerungen vom umgebenden Material ab.

### 7.3.7 Zusammenfassung der Ergebnisse

Vergleicht man die Tiefenlage der neuzeitlichen Wasserrinne in den Inversionsmodellen (Abb. 7.3.5.1 u. 7.3.5.2) mit der tatsächlichen Tiefe im Grabungsschnitt, stellt man fest, dass offensichtlich das überdeckende Lehmpaket für die Phasen-anomalie verantwortlich ist und weniger die neuzeitliche Wasserrinne. Sowohl das Widerstands- als auch das Phasenmodell lösen die Lage von Rinne und Lehmpaket sehr gut auf.

Keinerlei Hinweise auf den frühmittelalterlichen Siedlungshorizont finden sich im Inversionsmodell der Widerstandsmessung. Eine Korrelation scheint mit dem durchgängigen Schlackehorizont zu bestehen. Diese lässt sich aber aufgrund der kleinen Grabungsfläche nicht verifizieren. Eine eindeutige Korrelation besteht zwischen den Anomalien im Phasenmodell und den Lehmablagerungen auf dem Siedlungshorizont. Das Einsetzen der Anomalie in einer Tiefe von etwa 2 m entspricht dem Grabungsbefund.

Dagegen ist die Unterkante der Anomalie nicht exakt aufgelöst. Die gewählte Größe der Gitterelemente bestimmt das Auflösungsvermögen. Im Tiefenbereich der Anomalie haben die Elemente eine Dicke von 0.5 m. Im Rahmen der Fehler ist die Lage des Siedlungshorizonts damit gut bestimmt. Die laterale Ausdehnung der Anomalie kann ebenfalls mit einer Genauigkeit von  $\pm 0.5$  m bestimmt werden.

In der Profilzeichnung befindet sich die westliche Ablagerung (Abb. 7.3.6.1 (1)) in einer Tiefe von 2.5 m zwischen den x-Koordinaten 3 und 6 m. Im Inversionsmodell reicht sie in dieser Tiefe bis  $x=6$  m. Eine Ausdehnung der Anomalie über den Rand der Messfläche hinaus ist mangels Messdaten in diesem Bereich nicht auszuschließen.

Die östliche Ablagerung (Abb. 7.3.6.1 (2)) liegt etwa in einer Tiefe von 2 m und hat eine laterale Ausdehnung von  $x=7$  m bis zum östlichen Rand des Grabungsprofils. Das Phasenmodell platziert die Anomalie in eine Tiefe von 1.8 bis 2.9 m, wobei die Lage der Unterkante durch die geringe Datenbasis in dieser Tiefe nicht exakt zu bestimmen ist. Die Anomalie dehnt sich von  $x=8.5$  m bis zum östlichen Rand der Messfläche aus. Dabei ist wiederum zu berücksichtigen, dass die Modellierung im Randbereich nicht durch Messdaten untermauert ist.

### 7.3.8 Schlussfolgerung

Am Beispiel des frühmittelalterlichen Siedlungshorizonts konnte gezeigt werden, dass die Phasenmessung entscheidende Informationen für den Archäologen liefert, die durch eine klassische Widerstandsmessung nicht vorhanden wären. Die Lehmaufschüttungen führen zu einer Membranpolarisation, ausgelöst durch den eingespeisten Wechselstrom. Der Siedlungshorizont konnte durch die Bestimmung der Phasen nachgewiesen werden, während im Widerstandsbild keine der Anomalien auf die archäologische Struktur hinweist.

Dieses Ergebnis zeigt, dass Lehmaufschüttungen, die mit Siedlungsschichten korrelieren, durch die spektrale induzierte Polarisation erfasst werden. Vergangene Siedlungsaktivitäten lassen sich durch die Integration der Methode in die archäologische Prospektion nachweisen.

## 7.4 Untersuchung eines bronzezeitlichen Bohlenwegs in Bad Buchau (Kr. Biberach)

### 7.4.1 Archäologischer Hintergrund

Das Federseemoor, etwa 50 km nördlich des Bodensees und etwa 10 km östlich der Donau, gilt als eines der bedeutendsten Fundgebiete für die Pfahlbauforschung. Die Pfahlbausiedlungen rund um den Federsee (Schlichterle, 1997; Heumüller et al., 1999; Heumüller und Schlichterle, 1997) gelten als einzigartige Fundlandschaft Südwestdeutschlands. Durch die optimalen Erhaltungsbedingungen im Moor konnten bislang 18 Dorfanlagen mit über 180 Häusern freigelegt werden. Siedlungsspuren fanden sich von der Mittelsteinzeit (~ 5000 v. Chr.) bis in die Hallstattzeit (~600 v. Chr.). Dabei wird aber nicht von einer kontinuierlichen Besiedlung ausgegangen. Im Federseemoor entdeckte man zahlreiche neue Siedlungs- und Kulturgruppen, die nach ihren Erstfundplätzen benannt wurden, z. B. Aichbühler Kultur, Schussenrieder Kultur. Dies hebt die überregionale Bedeutung des 1875 entdeckten Fundgebietes hervor.

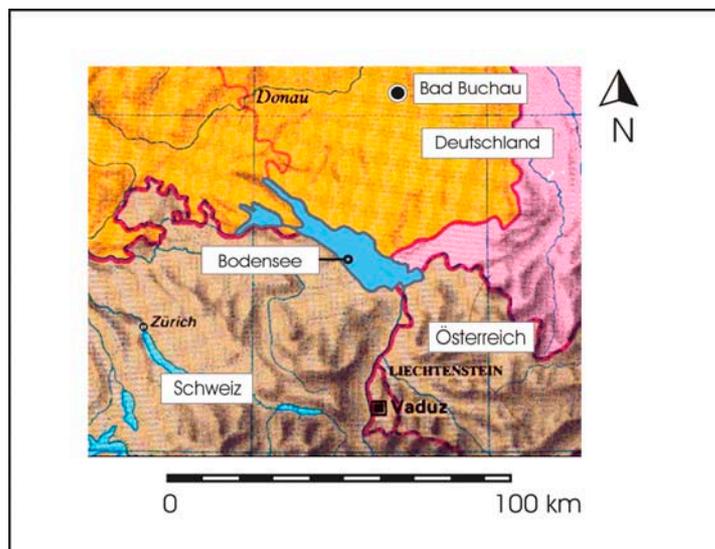


Abb. 7.4.1: Übersichtskarte

### 7.4.2 Untersuchungsobjekt

Während der mittleren Bronzezeit (1500-1400 v. Chr.) verband ein Bohlenweg (Abb. 7.4.2a) das Festland mit einer, auf einer Schotterterrasse gelegenen, Siedlung innerhalb des Moors. Mit Hilfe dendrochronologischer Untersuchungen (Billamboz, 1997; Hohl et al., 1998) konnte nachgewiesen werden, dass der Bohlenweg in Abständen von etwa 50 Jahren zweimal erweitert wurde, bis er eine Breite von etwa 9 m besaß. Der südlichste und älteste Abschnitt des Bohlenwegs besteht hauptsächlich aus Erlenholz (Abb. 7.4.2b) und wurde stellenweise mit Buchenholz ausgebessert. Für die mittlere und nördliche Bahn wurden Bohlen aus Buchen- und Eschenholz verwendet (Abb. 7.4.2b). Insgesamt setzt sich der Bohlenweg aus vier verschiedenen Holzarten zusammen: Buche, Erle, Esche und Birke. Der Verlauf des Bohlenwegs ist durch mehrere Sondagen, die seit 1994 durchgeführt wurden, gut bekannt.

Der Bohlenweg ist heute von einer etwa 90 cm dicken Sedimentschicht bedeckt und besitzt an gut erhaltenen Stellen eine Dicke von etwa 30 cm.

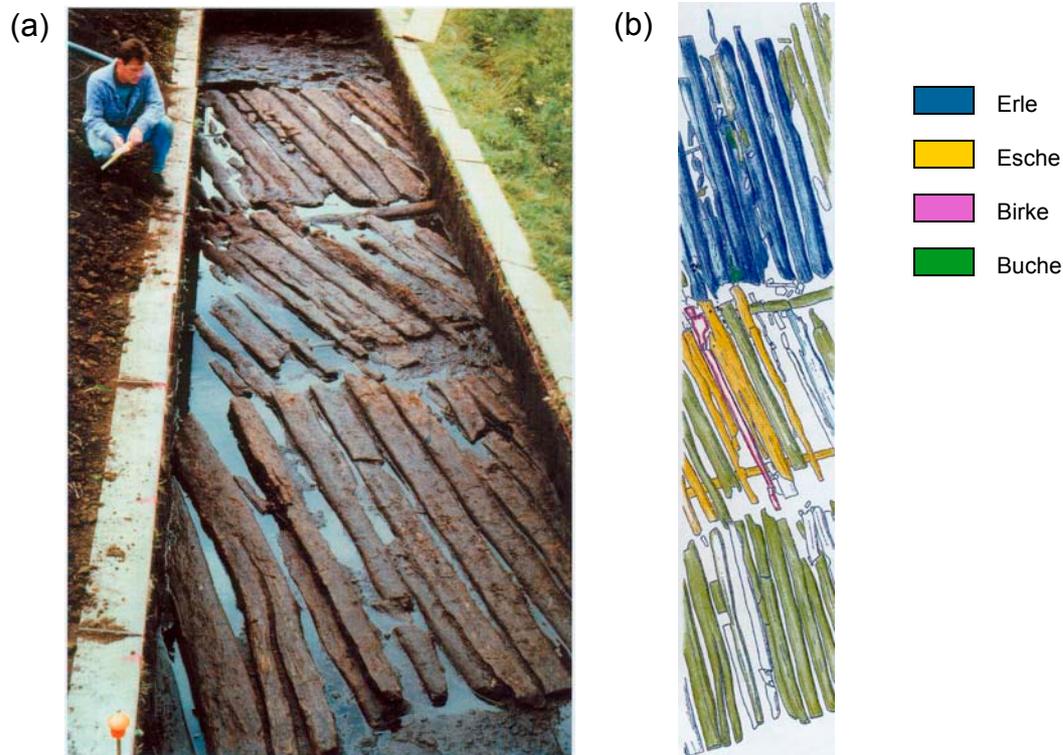


Abb. 7.4.2: Freigelegter bronzezeitlicher Bohlenweg (a) mit der Verteilung der Holzarten (b) (aus Schlichtherle und Strobl, 1999)

### 7.4.3 Labormessungen

Holzproben des Bohlenwegs, entnommen während einer Ausgrabung im Jahre 2000, wurden für Labormessungen zur Verfügung gestellt. Bei den entnommenen Proben handelt es sich um Erlen- und Eschenholz, die am Institut für Geophysik der Technischen Universität Clausthal untersucht wurden. Ergänzend zu den Holzproben wurde eine Torfprobe aus dem Federseemoor entnommen.

#### 7.4.3.1 Messaufbau

Die Labormessungen wurden mit einer SIP-Fuchs Apparatur durchgeführt. Die Apparatur arbeitet analog zur SIP-256 mit zwei Remote Units, die das Stromsignal und das gemessene Potential aufzeichnen. Nach Abschluss jeder Frequenzmessung werden die Daten an die Base weitergeleitet, wo der scheinbare spezifische Widerstand und die Phase berechnet werden. Mit Hilfe eines Laptops lassen sich die Frequenzspektren der beiden Parameter während einer laufenden Messung in Echtzeit darstellen. Die SIP-Fuchs arbeitet in einem Frequenzbereich von 1.4 mHz bis zu 12 kHz.

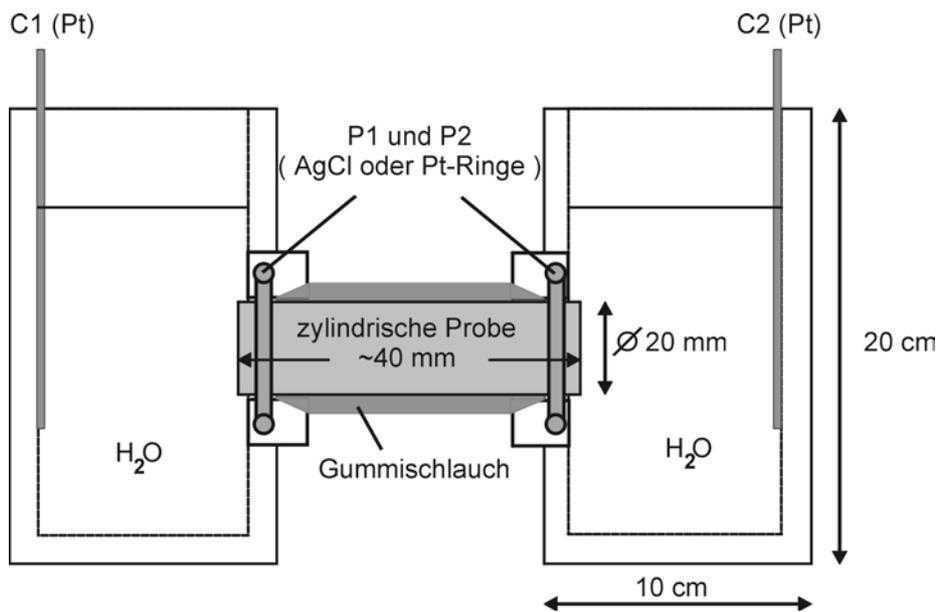


Abb. 7.4.3.1: Skizze des Laboraufbaus. Die Elektroden aus Platin (Pt) sind mit P1 und P2 (Potentialmessung) und C1 und C2 (Stromeinspeisung) gekennzeichnet. Die Größenverhältnisse sind nicht maßstabsgetreu wiedergegeben.

Der Aufbau besteht aus zwei Wassertanks (Abb. 7.4.3.1), die mit Leitungswasser gefüllt sind. Der elektrische Widerstand des Wassers wird vor jeder Messung bestimmt und beträgt etwa  $100 \Omega$ . Eine zylindrische Probe mit einem Durchmesser von 20 mm und einer Länge von etwa 35 mm wird zwischen den beiden Wassertanks eingespannt und mit Hilfe eines Gummischlauchs abgedichtet. Zwei konische Probenhalter justieren die Probe zwischen den Tanks (Abb. 7.4.3.1). In jeden Probenhalter ist eine ringförmige Potentialelektrode integriert, die optional aus Platin oder Silberchloriddraht bestehen kann. Platinelektroden, die sich in den Wassertanks befinden, speisen das Stromsignal ein. Der Stromfluss wird dabei über das Leitungswasser gewährleistet.

#### 7.4.3.2 Präparation der Proben

Um Anisotropie-Effekte zu berücksichtigen, wurden aus den Handstücken zylindrische Proben parallel und senkrecht zu den Jahrringen (Schweingruber, 1990) entnommen (Abb. 7.4.3.2). In Analogie zu Bohrkernen bezeichnet man erstere als axiale und letztere als radiale Probe. Der Durchmesser jeder Probe betrug 20 mm und die Länge mindestens 35 mm.

Bei der Entnahme aus dem Federseemoor waren die Handstücke wassergesättigt und wurden in diesem Zustand auch gemessen. Die Labormessungen wurden in Abständen von wenigen Tagen wiederholt, um eine Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Abweichungen waren durch die Vermischung des Leitungswassers mit dem in den Proben enthaltenen Moorwasser zu erwarten.

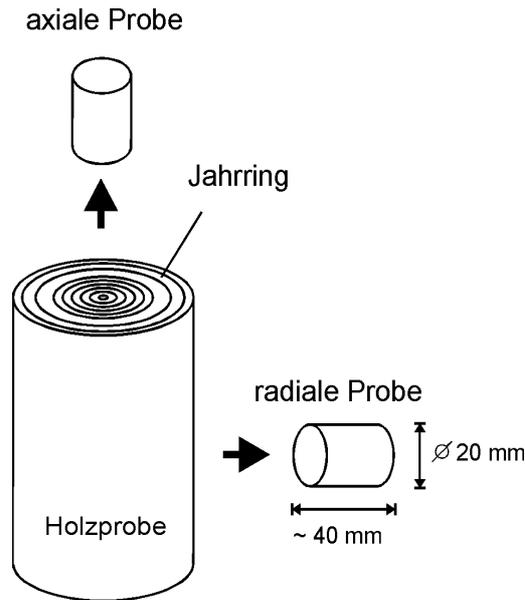


Abb. 7.4.3.2: Orientierung der radialen und axialen zylindrischen Probe zur Jahrringstruktur des Baumes.

### 7.4.3.3 Ergebnisse

#### 7.4.3.3.1 Eschenprobe

Abbildung 7.4.3.3.1 zeigt die Spektren der bronzezeitlichen Eschenprobe. Im oberen Diagramm (Abb. 7.4.3.3.1a) sind die Amplituden der Widerstandsmessung dargestellt. Das Spektrum der axialen Probe (Dreiecke) zeigt eine kontinuierliche Abnahme von 52  $\Omega\text{m}$  im niederfrequenten Bereich, auf 48  $\Omega\text{m}$  im hochfrequenten Bereich. Die Wiederholungsmessung am darauffolgenden Tag zeigt um etwa 6  $\Omega\text{m}$  erhöhte Werte. Dies ist vermutlich auf die bereits oben angedeutete Vermischung des Leitungswassers im Tank mit dem Moorwasser in der Probe zurückzuführen. Offensichtlich besitzt das Leitungswasser einen höheren Widerstand als das Moorwasser. Trotz des Anstiegs des Widerstands bleibt aber die charakteristische Abnahme der Amplitude mit zunehmender Frequenz bestehen.

Die Widerstände der radialen Probe (Abb. 7.4.3.3.1a, Kreise) liegen im gesamten Frequenzspektrum über den Werten der axialen Probe. Die Widerstandskurve zeigt einen markanten Abfall im Frequenzbereich von 1 bis 30 Hz. Unterhalb 1 Hz besitzt die Probe Werte von über 66  $\Omega\text{m}$ , oberhalb 30 Hz liegen die Widerstände unterhalb 56  $\Omega\text{m}$ . Analog zur axialen Probe lieferte die Wiederholungsmessung leicht erhöhte Widerstände.

Das Frequenzspektrum der Torfprobe (Abb. 7.4.3.3.1a, Quadrate) liegt mit 40 bis 44  $\Omega\text{m}$  deutlich unter den Werten der Holzproben und zeigt ähnlich der axialen Eschenprobe eine kontinuierliche Abnahme des Widerstandes mit zunehmender Frequenz.

Die Phasenspektren sind im unteren Diagramm (Abb. 7.4.3.3.1b) dargestellt. Die Kurven der axialen Probe besitzen ein Maximum von 18 mrad im Frequenzbereich von 1 bis 30 Hz. Wie erwartet findet sich das Phasenmaximum der radialen Probe zwischen 1 und 30 Hz, wo die Widerstandskurve die größten Steigungsbetrag aufweist. Mit einem Maximum von fast 70 mrad liegt die Probe dabei deutlich über den Werten der axialen Probe.

Die Torfprobe besitzt Phasenwerte von 4 bis 15 mrad, was dem Bereich der axialen Eschenprobe entspricht. Zwischen den Frequenzen 0.01 Hz und 0.4 Hz und oberhalb 10 Hz liegen die Werte der Torfprobe über denen der axialen Eschenprobe.

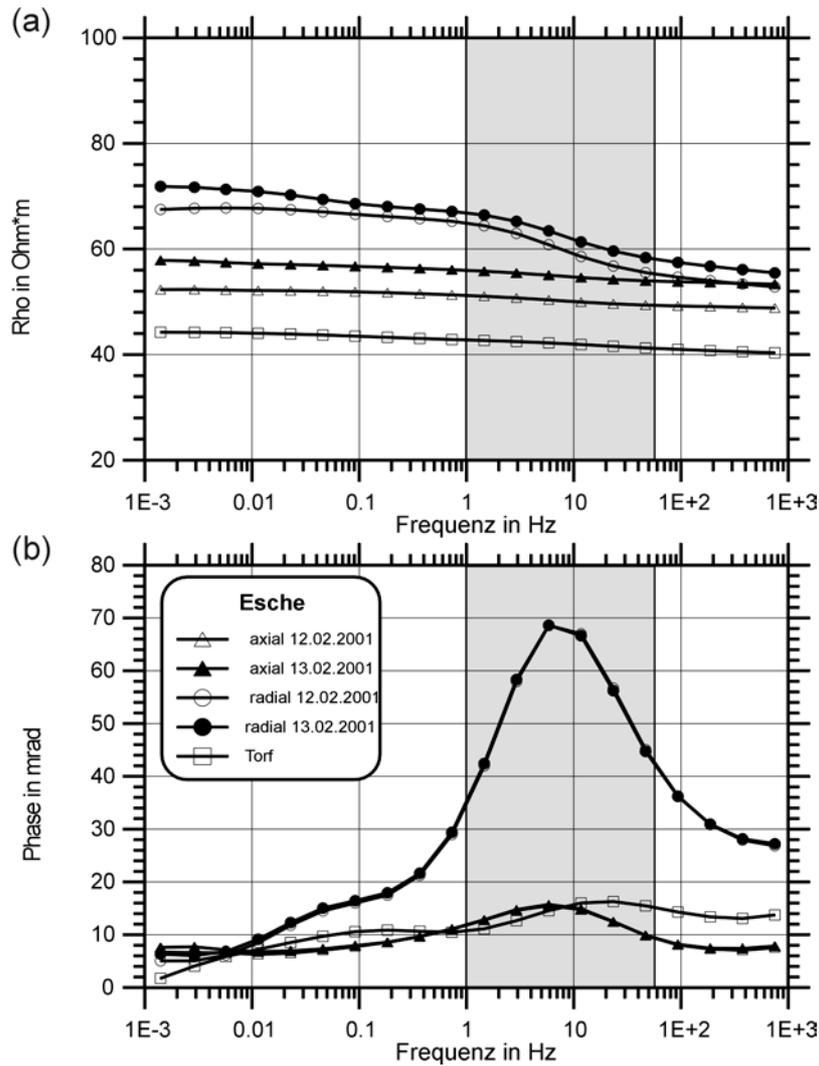


Abb. 7.4.3.3.1: Frequenzspektren der Eschenprobe. (a) Widerstände (b) Phasen. Der Frequenzbereich der nachfolgenden Feldmessung ist grau hinterlegt.

### 7.4.3.3.2 Erlenprobe

Die Phasen und Widerstände der Erlenprobe zeigen ein vergleichbares Frequenzverhalten wie die Eschenprobe. Das obere Diagramm (Abb. 7.4.3.3.2a) zeigt den Verlauf der Widerstandskurven. Der Widerstand der axialen Probe bleibt über das gesamte Frequenzspektrum nahezu konstant und variiert nur zwischen  $38 \Omega\text{m}$  im niederfrequenten und  $34 \Omega\text{m}$  im hochfrequenten Bereich. Eine stärkere Variation zeigt die Kurve der radialen Probe.

Bei Frequenzen unterhalb 1 Hz liegt die Amplitude bei über  $54 \Omega\text{m}$ , während oberhalb 10 Hz nur noch Werte von knapp über  $45 \Omega\text{m}$  erreicht werden. Die größte Steigung der Kurve findet sich zwischen 1 und 10 Hz. Bei beiden Erlenproben ist eine Zunahme der Widerstände bei der Wiederholungsmessung am darauffolgenden Tag zu beobachten. Vergleicht man die Widerstände der axialen Probe mit denen der Torfprobe, so liegen die Werte der Erle etwa  $8 \Omega\text{m}$  unterhalb des umgebenden Materials.

Die Maxima der Phasenspektren (Abb. 7.4.3.3.2b) liegen bei beiden Erlenproben im klassischen IP Bereich von 1 bis 10 Hz. Die radiale Probe erreicht dabei Werte von 50 mrad, während die axiale Probe einen maximalen Wert von 15 mrad erreicht.

Analog zur Eschenprobe schneiden sich die Phasenkurven der axialen Holz- und der Torfprobe. Oberhalb 10 Hz liegt die Phase des Sediments über der Phase der axialen Erlenprobe und erreicht ein Maximum von 16 mrad.

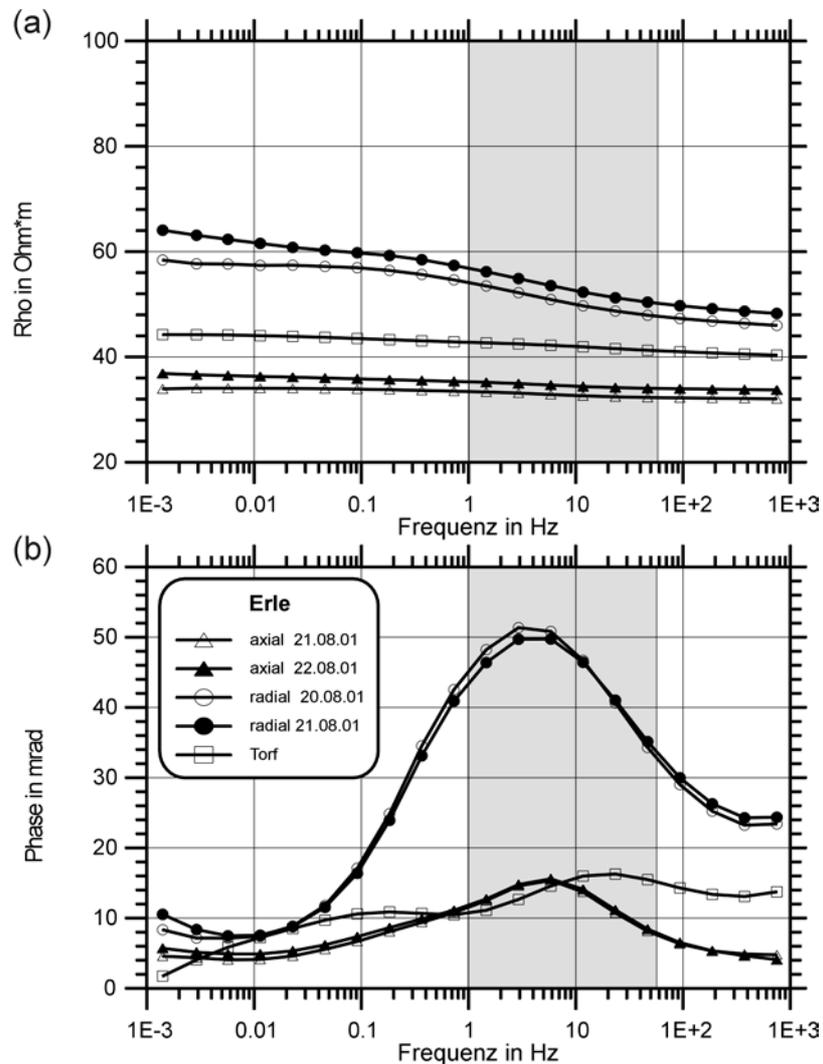


Abb. 7.4.3.3.2: Frequenzspektren der Erlenprobe. (a) Widerstände (b) Phasen.  
Der Frequenzbereich der nachfolgenden Feldmessung ist grau hinterlegt.

#### 7.4.3.4 Zusammenfassung

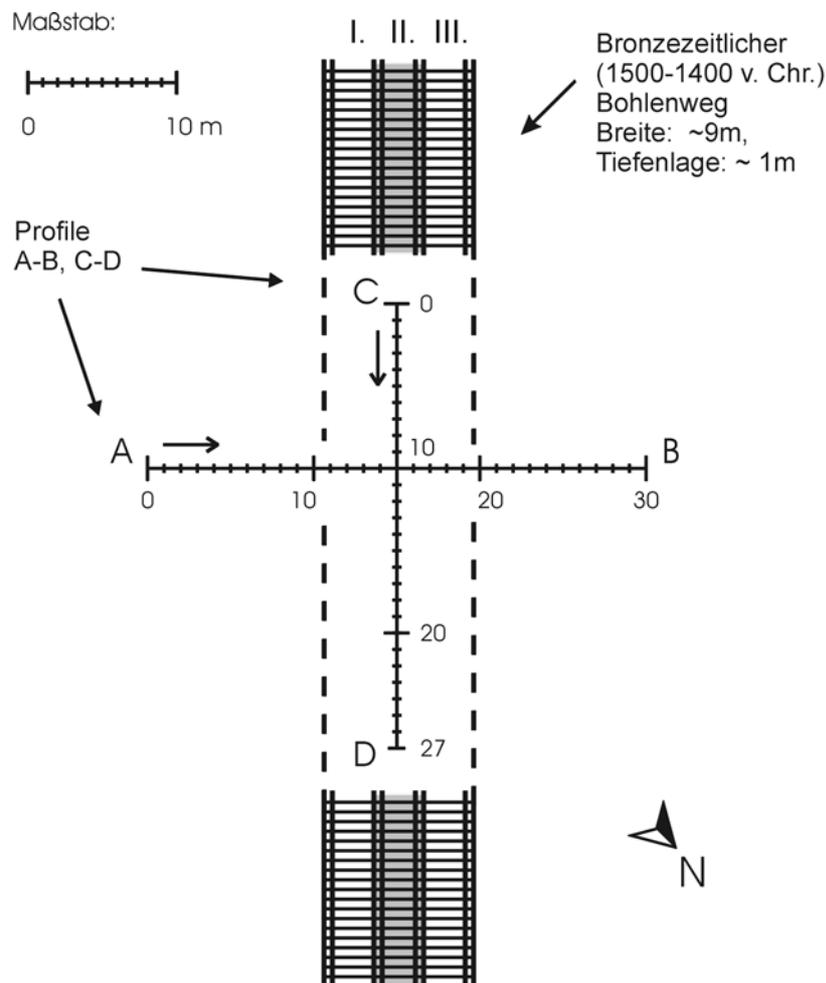
Mit Phasenmaxima von 50 bis 70 mrad wiederholten sich bei den bronzezeitlichen Proben aus dem Federseemoor die bereits bei rezenten Proben beobachteten Polarisierungseffekte. Offensichtlich ist die Zellstruktur der Hölzer, welche für die Effekte verantwortlich ist, noch nach mehr als 3000 Jahren im Feuchtboden erhalten. Die Proben des Bohlenwegs zeigen vor allem in radialer Richtung erstaunlich hohe Phaseneffekte. Die ausgeprägte Anisotropie, die sich sowohl in den Phasen als auch in den Widerständen widerspiegelt, erklärt sich vermutlich durch die saisonale Variation der Jahrringbreiten. Diese Variation der Jahrringbreiten scheint zu stark variierenden Durchmesser der Porenquerschnitte zu führen. In radialer Richtung des Baumes, ergeben sich folglich eine Vielzahl von „aktiven Zonen“ (Kap.3.3.3) und damit erhöhte Phasenwerte.

Dagegen scheinen die Porenquerschnitte in axialer Richtung nicht so stark zu variieren. Eine Erklärung für diese Beobachtung könnte sein, dass die Nährstoffversorgung des Baumes in dieser Richtung stattfindet und die Transportwege folglich durchlässiger sind. Die Maxima der Phasenspektren finden sich an den Stellen, an denen auch die größte Steigung in den Widerstandsspektren zu beobachten sind.

## 7.4.4 Feldmessung

### 7.4.4.1 Aufbau

Im August 2001 erfolgten zwei Profilmessungen über dem Bohlenweg (Abb.7.4.4.1).



#### Legende :

Profil A-B: Pol-Dipol, Dipol 1m, Elektrodenabstand 1m, Auslage 30m.

Profil C-D: Pol-Dipol, Dipol 1m, Elektrodenabstand 1m, Auslage 27m.

I. älteste Bahn des Bohlenwegs; Holzarten: Erle und Birke.

II. erste Erweiterung; Holzarten: Buche und Esche.

III. zweite Erweiterung; Holzarten: hauptsächlich Buche.

Abb. 7.4.4.1: Skizze des Messaufbaus über dem Bohlenweg. Lage der Profile A-B und C-D. Die einzelnen Bauabschnitte des Bohlenwegs sind mit römischen Ziffern (I-III) gekennzeichnet (siehe Legende).

Ein Profil (A-B) war senkrecht zur Laufrichtung des Bohlenwegs angeordnet und hatte eine Gesamtauslage von 30 m. Das zweite Profil (C-D) war 27 m lang, lag über dem Bohlenweg und war in Laufrichtung ausgerichtet.

Als Messanordnung wurde eine Pol-Dipol-Konfiguration gewählt. Der Elektroden-, sowie der Dipolabstand betragen 1 m. Für die Stromeinspeisung wurden Edelstahlspieße benutzt und als Potentialelektroden unpolarisierbare Cu-CuSO<sub>4</sub>-Elektroden verwendet. Insgesamt wurden je Profil 11 Frequenzen zwischen 1 und 60 Hz aufgezeichnet (1, 3.18, 4.77, 6.37, 9.54, 10, 14.3, 19.1, 28.6, 42.9 und 57.3 Hz). In diesem Frequenzbereich (grau hinterlegter Bereich in den Abb.7.4.3.3.1 und 7.4.3.3.2) waren die Maxima der Labormessungen zu beobachten.

## 7.4.4.2 Ergebnisse

### 7.4.4.2.1 Profil A-B

Die Pseudosektionen von Profil A-B sind in den Abbildungen 7.4.4.2.1.1 und 7.4.4.2.1.2 dargestellt. Repräsentativ für die SIP sollen hier die Rohdaten der Messung bei 4.77 Hz präsentiert werden. Vereinzelt Hinweise auf die verborgene archäologische Struktur zeigen sich bei den scheinbaren spezifischen Widerständen (Abb. 7.4.4.2.1.1). Eine hochohmige vertikale Spur, charakteristisch für die Pol-Dipol Anordnung, ist sowohl in Abbildung 7.4.4.2.1.1 a, als auch Abbildung 7.4.4.2.1.1b sichtbar. Die hochohmige Spur liegt bei  $x = 10.5$  m und deutet auf eine Anomalie hin. Daneben finden sich bei der normalen Messrichtung (A nach B) und der reversen Messrichtung (B nach A) weitere Anomalien, die in ihrer Lage nicht konsistent sind. Elektrodeneffekte sind in diesem Fall nicht auszuschließen. Eine kontinuierliche Zunahme des Widerstands mit der Tiefe ist zu beobachten. Die Werte variieren dabei von etwa 30  $\Omega$ m an der Oberfläche bis zu 50  $\Omega$ m in Pseudotiefe -6 (Abb. 7.4.4.2.1.1).

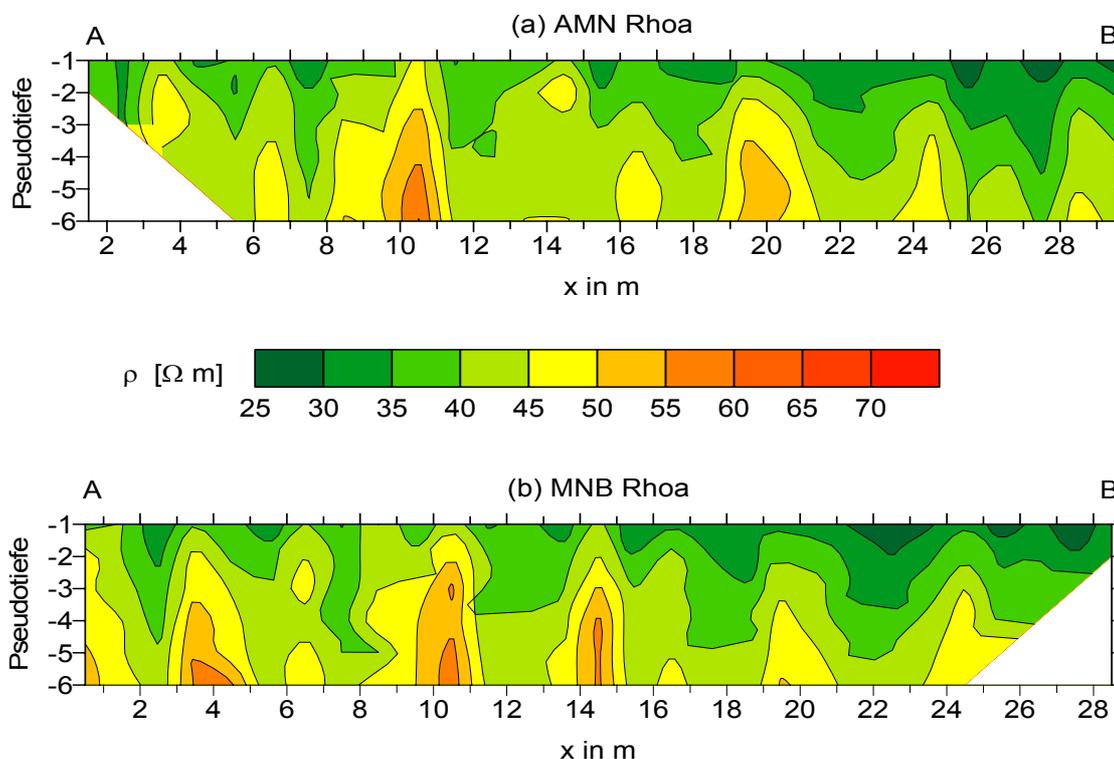


Abb. 7.4.4.2.1.1: Pseudosektionen Profil A-B, Frequenz 4.77 Hz, scheinb. spez. Widerstand, (a) Messrichtung A nach B, (b) Messrichtung B nach A.

Die Abbildungen 7.4.4.2.1.2a und 7.4.4.2.1.2b zeigen die scheinbaren Phasen für 4 Hz. Beide Messrichtungen sind dargestellt. Die Phasen nehmen mit Werten von 0-10 mrad von oben nach unten ab. Ausgeprägte Anomalien finden sich in normaler Messrichtung (A nach B) (Abb. 7.4.4.2.1.2a) bei  $x = 21$  m und in reverser Messrichtung (B nach A) (Abb. 7.4.4.2.1.2b) bei  $x = 11$  m. Die Phasenwerte der Anomalien liegen bei 6 bis 7 mrad.

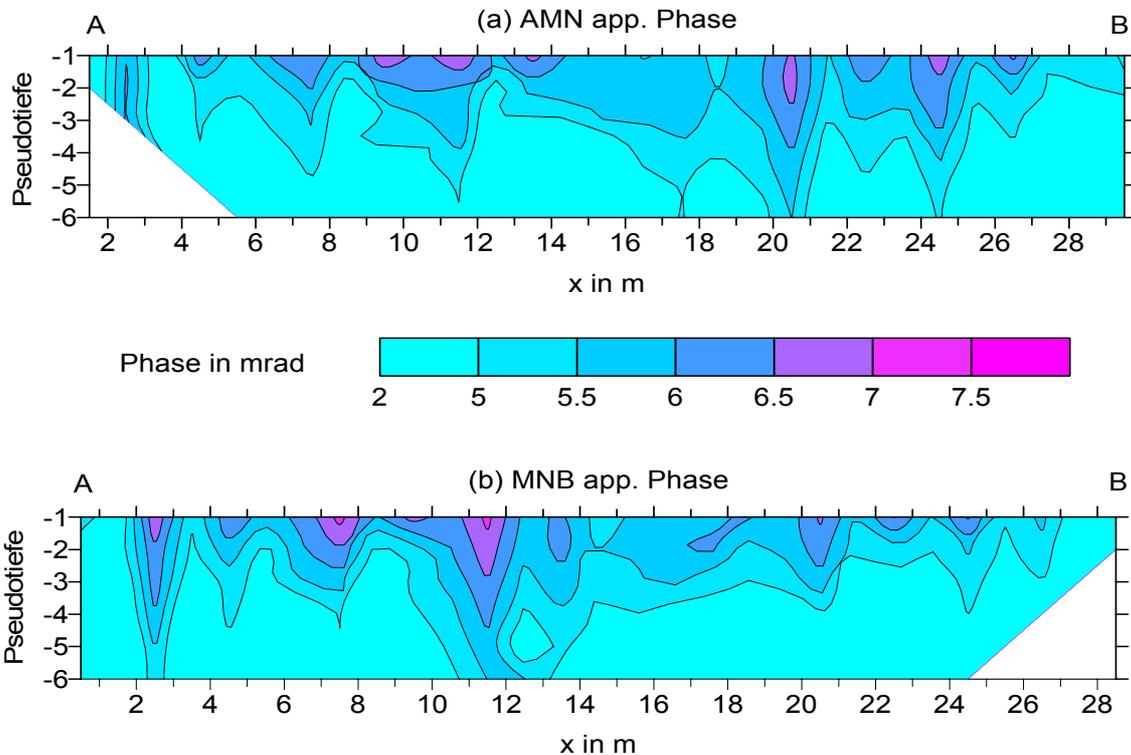


Abb. 7.4.4.2.1.2: Pseudosektionen Profil A-B, Frequenz 4.77 Hz, scheinbare Phase, (a) Messrichtung A nach B, (b) Messrichtung B nach A.

#### 7.4.4.2.2 Profil C-D

Die Pseudosektionen von Profil C-D (Abb. 7.4.4.2.2.1 und 7.4.4.2.2.2) zeigen ein ähnliches Bild wie die Sektionen des Profils A-B. Jedoch liegen die Widerstände (Abb. 7.4.4.2.2.1) insgesamt etwas höher als bei Profil A-B (Abb. 7.4.4.2.1.1). Vergleicht man die Widerstände der einzelnen Pseudotiefen miteinander, so ist zu beobachten, dass die Werte entlang Profil C-D immer geringfügig über den Werten von Profil A-B liegen. Ab Pseudotiefe -5 werden Werte von über  $50 \Omega\text{m}$  erreicht (Abb. 7.4.4.2.2.1). Hochohmige Anomalien von etwa  $65 \Omega\text{m}$  sind in beiden Messrichtungen bei  $x = 4, 16, 18$  und  $22$  m zu beobachten.

Bei den Phasen (Abb. 7.4.4.2.2.2) lässt sich keine Richtungsabhängigkeit feststellen. Der Gradient bei Profil A-B (Abb. 7.4.4.2.1.2) ist auch in Profil C-D zu beobachten. Der Maximalwert von 10 mrad wird bei den dargestellten Pseudotiefen von Profil C-D nicht überschritten. Die scheinbaren Phasen nehmen mit zunehmender Tiefe ab. Die in den Widerständen zu beobachtenden Anomalien bestätigen sich durch die Phasen nicht. Die kontinuierliche Abnahme der Widerstände mit der Tiefe überdecken möglicherweise die Anomalie, welche vom Bohlenweg verursacht wird. Zu erwarten wäre eine horizontale, durch das Profil verlaufende Erhöhung der Widerstände ab Pseudotiefe -3, gefolgt von einem Abklingen der Werte in den folgenden Tiefen.

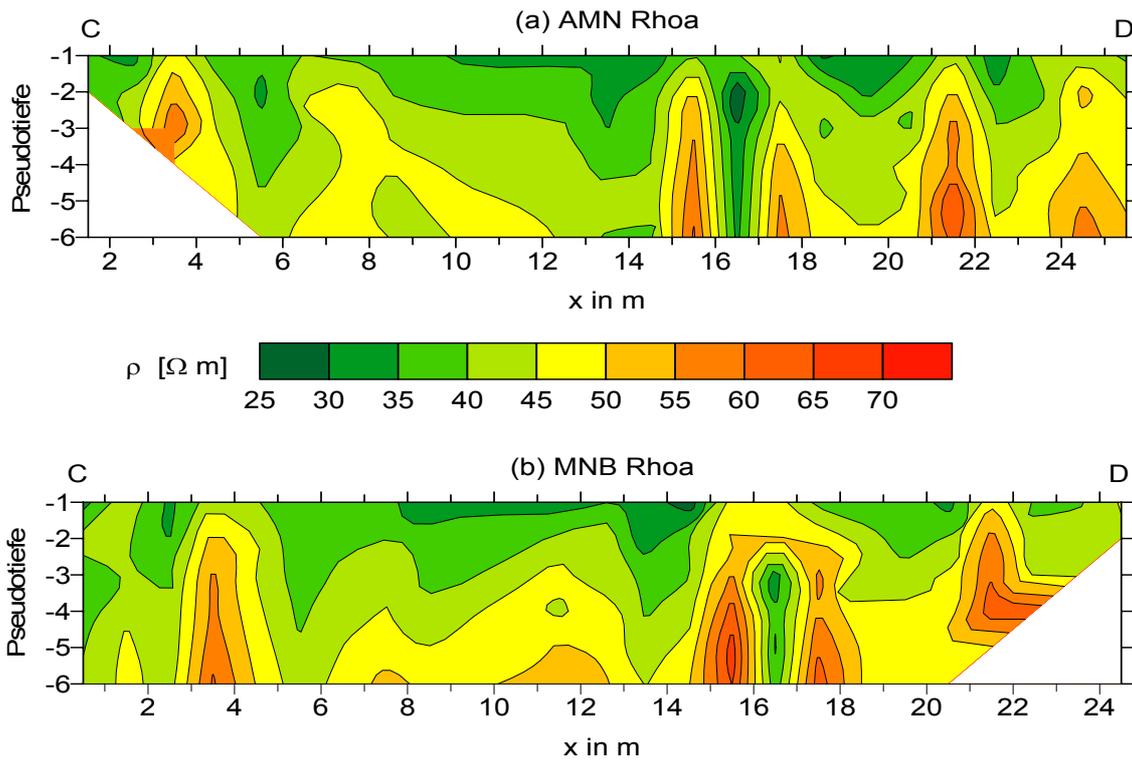


Abb. 7.4.4.2.2.1: Pseudosektionen Profil C-D, Frequenz 4.77 Hz, scheinb. spez. Widerstand, (a) Messrichtung C nach D, (b) Messrichtung D nach C

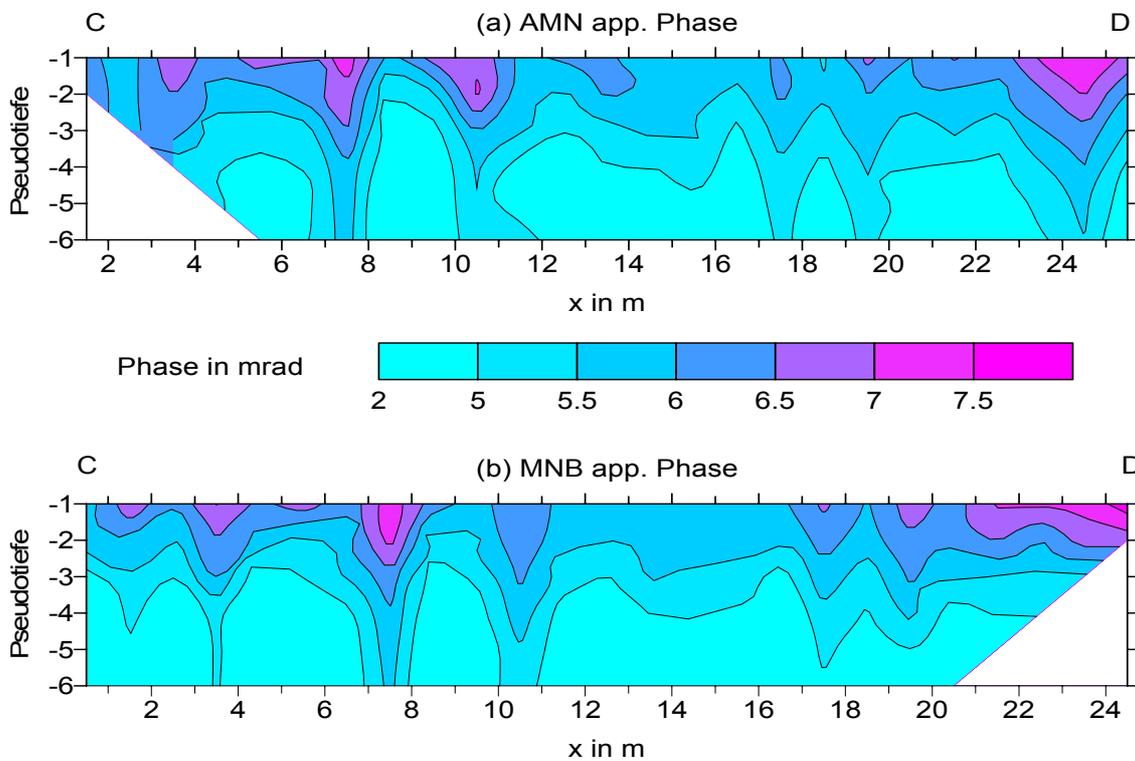


Abb. 7.4.4.2.2.2: Pseudosektionen Profil C-D, Frequenz 4.77 Hz, scheinbare Phase, (a) Messrichtung C nach D, (b) Messrichtung D nach C.

### 7.4.4.3 Inversion

Die Inversion der Messprofile wurde bei allen elf Frequenzen mit dem Programm Res2DInv, Version 3.44L von Loke & Barker (Campus Geophysical Instruments Ltd., 2000) durchgeführt. Daten bis zu einer maximalen Pseudotiefe von -6 wurden berücksichtigt. Daneben wurden Messwerte, die außerhalb der Wertebereiche 20-70  $\Omega\text{m}$  oder 0-10 mrad lagen, aussortiert. Die Daten der beiden Messrichtungen wurden getrennt voneinander bearbeitet und vor der Inversion zu einem Datensatz zusammengefasst. Die Untergrundmodell ist im Zentrum aus 0.5 m breiten und 0.25 m mächtigen Gitterelementen aufgebaut. Mit der Tiefe und an den Rändern des Messprofils nimmt die Größe der Elemente um 10 % zu. Für die Inversion wurde eine maximale Anzahl von 6 Iterationen bzw. ein relativer rms-error von 5 % als Abbruchkriterium gewählt.

#### 7.4.4.3.1 Profil A-B

Abbildung 7.4.4.3.1 zeigt das Inversionsergebnis des Messprofils A-B bei einer Frequenz von 4.77 Hz. Die obere Darstellung (Abb. 7.4.4.3.1a) zeigt das Inversionsergebnis der Widerstandsmessung. Verglichen mit den Laborergebnissen (Abb. 7.4.3.3.1 u. 7.4.3.3.2) ergaben sich für den Torfhorizont, der eine Mächtigkeit von etwa einem Meter hat, mit 30 bis 40  $\Omega\text{m}$  etwas geringere Widerstände.

Die erwartete Lage des Bohlenwegs ist mit einem Rechteck angedeutet. Neben einer Zunahme der Widerstände mit der Tiefe, ist ein Plateau zu erkennen, das mit der Lage des Bohlenwegs korreliert. Das Plateau ist ein indirekter Hinweis auf die verborgene archäologische Struktur. Zwei Erklärungsmodelle bieten sich für die Ausbildung dieses hochohmigen Plateaus an. Zum einen kann die Benutzung des Bohlenwegs zu einer Komprimierung des Materials unterhalb der Fahrbahnen geführt haben. Zum anderen ist es möglich, dass der Untergrund während des Baus des Bohlenwegs verfestigt wurde.

Im Gegensatz zum Widerstand ist der Bohlenweg im Phasenmodell deutlich zu erkennen (Abb. 7.4.4.3.1b). Die Anomalie mit Phasen von 7 bis 9 mrad liegt fast exakt im Bereich des Rechtecks und stimmt damit mit der vorhergesagten Position des Weges überein. Während die rechten, d.h. nördlichen beiden Bahnen zu sehen sind, fehlt die älteste Bahn des Bohlenwegs im Phasenmodell. Vermutlich ist der schlechte Erhaltungszustand der ältesten Fahrbahn für das Verschwinden im Phasenmodell verantwortlich. Diese Frage konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht geklärt werden. Die Inversion des Datensatzes wurde nach 3 Iterationen abgebrochen. Der erreichte rms-error beträgt bei den Widerständen 4.6 % und bei den Phasen 1.3 mrad.

#### 7.4.4.3.2 Profil C-D

Das Inversionsergebnis von Profil C-D, Messfrequenz 4.77 Hz, ist in Abbildung 7.4.4.3.2a dargestellt. Der Bohlenweg deutet sich in einer Tiefe von etwa 1 m bis  $x = 9$  m als hochohmige Anomalie von etwa 50  $\Omega\text{m}$  an, lässt sich aber nicht weiter verfolgen. Die Interpretation eines Bohlenwegs ist nicht möglich. Im Nordosten, etwa bei  $x = 14$  m steigen die Widerstände unterhalb 2 m auf über 50  $\Omega\text{m}$  an. Die Ursache für diesen Anstieg ist bislang nicht bekannt. Der, in den Pseudosektionen (Abb. 7.4.4.2.1.1) zu beobachtende Widerstandsgradient bestätigt sich in einer niederohmigen, oberflächennahen Schicht mit Werten von 30  $\Omega\text{m}$ .

Im Phasenmodell (Abbildung 7.4.4.3.2b) ist der Bohlenweg deutlich zu erkennen. Die Anomalie ist über das gesamte Profil zu verfolgen und besitzt Phasenwerte von bis zu 9 mrad. Die Tiefenlage reicht von 0.4 bis 1 m, was gegenüber der vorhergesagten Tiefe von 0.9 bis 1.2 m etwas zu oberflächennah ist. Oberhalb und unterhalb des Bohlenwegs liegen die Phasenwerte bei 0 bis 5 mrad. Die Inversion des Profils C-D brach nach 3 Iterationen ab. Der rms-error des Widerstandsmodells beträgt 5.2 % und des Phasenmodells 1.2 mrad.

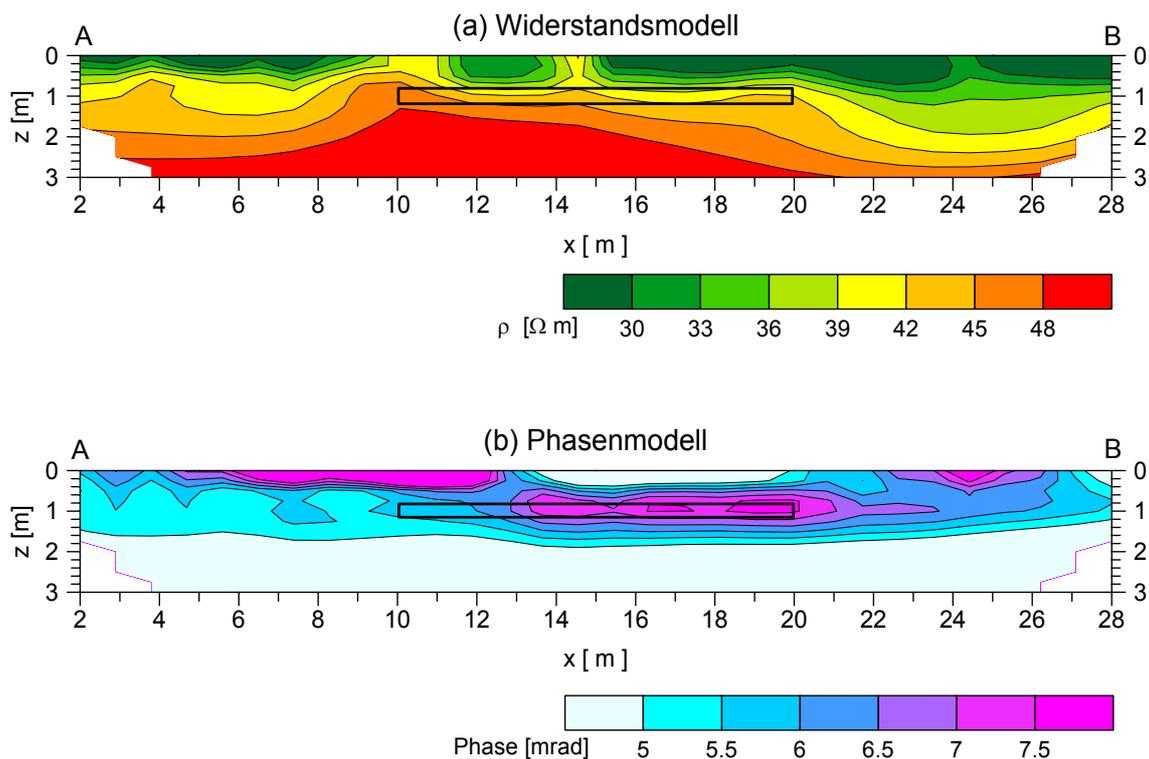


Abb. 7.4.4.3.1: Inversionsmodelle Profil A-B, Messfrequenz 4.77 Hz. (a) Widerstandsmodell, (b) Phasenmodell. rms-error 4.6 % bzw. 1.3 mrad. Der Bohlenweg ist als Rechteck angedeutet.

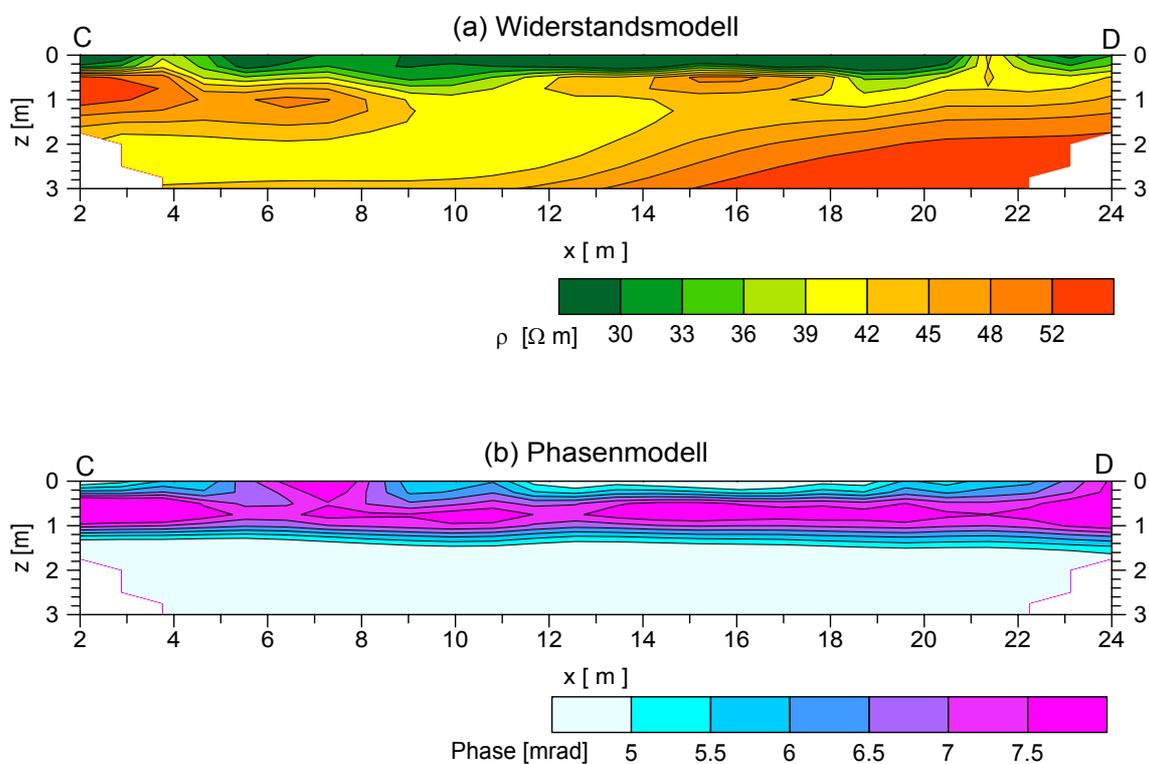


Abb. 7.4.4.3.2: Inversionsmodelle Profil C-D, Messfrequenz 4.77 Hz. (a) Widerstandsmodell, (b) Phasenmodell. rms-error 5.2 % bzw. 1.2 mrad.

#### 7.4.4.4 Zusammenfassung

Der bronzezeitliche Bohlenweg, der sich über 3000 Jahre im Federseemoor erhalten hat, konnte mit Hilfe der spektralen induzierten Polarisation in beiden Messrichtungen nachgewiesen werden. Dagegen gelang es nicht, das archäologische Objekt mit einer konventionellen Widerstandsmessung zu erfassen.

Die hohen Phasenwerte der Labormessungen konnten nicht erreicht werden. Anders als im Labor repräsentieren die Phasenwerte der Feldmessung einen Wert aller erfassten Materialien im Untergrund. Nur ein Teil des Stroms durchfließt das Holzobjekt, während der größte Teil Oberboden, Torf und Moorwasser, durchströmt. Die Folge waren Phasen unterhalb 10 mrad. Der Kontrast zwischen Bohlenweg und umgebenden Material liegt unterhalb 2 mrad, womit man die Grenze des Auflösungsvermögens der Apparatur erreicht.

Trotzdem konnte mit diesen Feldmessungen erstmals nachgewiesen werden, dass sich die SIP zur Prospektion von Holzobjekten eignet. Dadurch eröffnet sich dieser Methode ein großes Anwendungsgebiet in der archäologischen Prospektion.

#### 7.4.5 Frequenzspektrum des Bohlenwegs

Eine wichtige Fragestellung war, ob sich das im Labor beobachtete Frequenzverhalten der Holzproben im Feld reproduzieren lässt. Nachdem sich der Bohlenweg im Inversionsmodell von Profil A-B bei 4.77 Hz deutlich abzeichnet, wurden die Widerstände und Phasen aus dem Bereich der Anomalie für alle elf Messfrequenzen extrahiert. Aus diesen Daten wurde der Mittelwert der Parameter aller Gitterelemente zwischen  $13 \text{ m} < x < 21 \text{ m}$  aus unterschiedlichen Tiefen gebildet und Spektrum graphisch dargestellt (Abb. 7.4.5.1a und b).

Zum Vergleich ist das Laborspektrum (Abb. 7.4.3.3.2) der axialen Erlensprobe (roter Graph) in das Diagramm integriert. Für die Darstellung wurden 6 mrad von den Phasenwerten der Labormessung subtrahiert.

Der bei beiden Messprofilen mit der Tiefe zunehmende Widerstand (Kap. 7.4.4.2 u. Kap. 7.4.3.3) spiegelt sich auch im Inversionspektrum (Abb. 7.4.5.1a) wider.

Die oberflächennahen Widerstandsspektren besitzen Werte von 30 bis 40  $\Omega\text{m}$ , während die Schichten unterhalb des Bohlenwegs Werte von etwa 45  $\Omega\text{m}$  erreichen. Die Mittelwerte aus dem Bereich der Bohlenweg-Anomalie ( $z = 1.0 \text{ m}$ ) liegen bei 42  $\Omega\text{m}$ . Die Spektren der einzelnen Tiefenlagen variieren kaum und können über den gemessenen Frequenzbereich als konstant angesehen werden.

Das Spektrum der Laborprobe liegt mit 35  $\Omega\text{m}$  innerhalb des Wertebereichs der Inversionspektren. Die Widerstände der im Labor untersuchten Holzprobe liegen etwa 5 bis 10  $\Omega\text{m}$  unter den Werten der Anomalie ( $z = 1 \text{ m}$ ) und stellen einen Mittelwert der oberflächennahen Schichten ( $z = 0.4 \text{ m}$  und  $0.7 \text{ m}$ ) dar. Von den Phasenwerten der Laborprobe mussten für den qualitativen Vergleich mit den Inversionsspektren 6 mrad subtrahiert werden (Abb. 7.4.5.1b). Die Spektren aus dem Bereich der Bohlenweg-Anomalie liegen im Phasendiagramm etwa 0.5 bis 1 mrad über den Werten der darüber- und darunterliegenden Schichten. Die geringsten Phasen werden in einer Tiefe von 1.7 m erreicht.

Betrachtet man alle Spektren, deutet sich ein Phasenmaximum um 10 Hz an. Die im Rahmen der Messgenauigkeit ( $\pm 0.5 \text{ mrad}$ ) bestimmten Phasen erlauben jedoch keine Zuordnung zu einer einzelnen Frequenz. Qualitativ stimmen die Spektren der Feldmessung mit den Spektren der Labormessungen überein. Dies ist ein wichtiges Resultat der Untersuchungen. Durch die geringen Kontraste zwischen Sediment und Holzobjekt entscheidet die Wahl des Frequenzbereichs über den Erfolg einer Feldmessung. Wie man im Diagramm erkennen kann, lässt sich der Bohlenweg bei Frequenzen kleiner 1 Hz und größer 20 Hz nicht mehr auflösen.

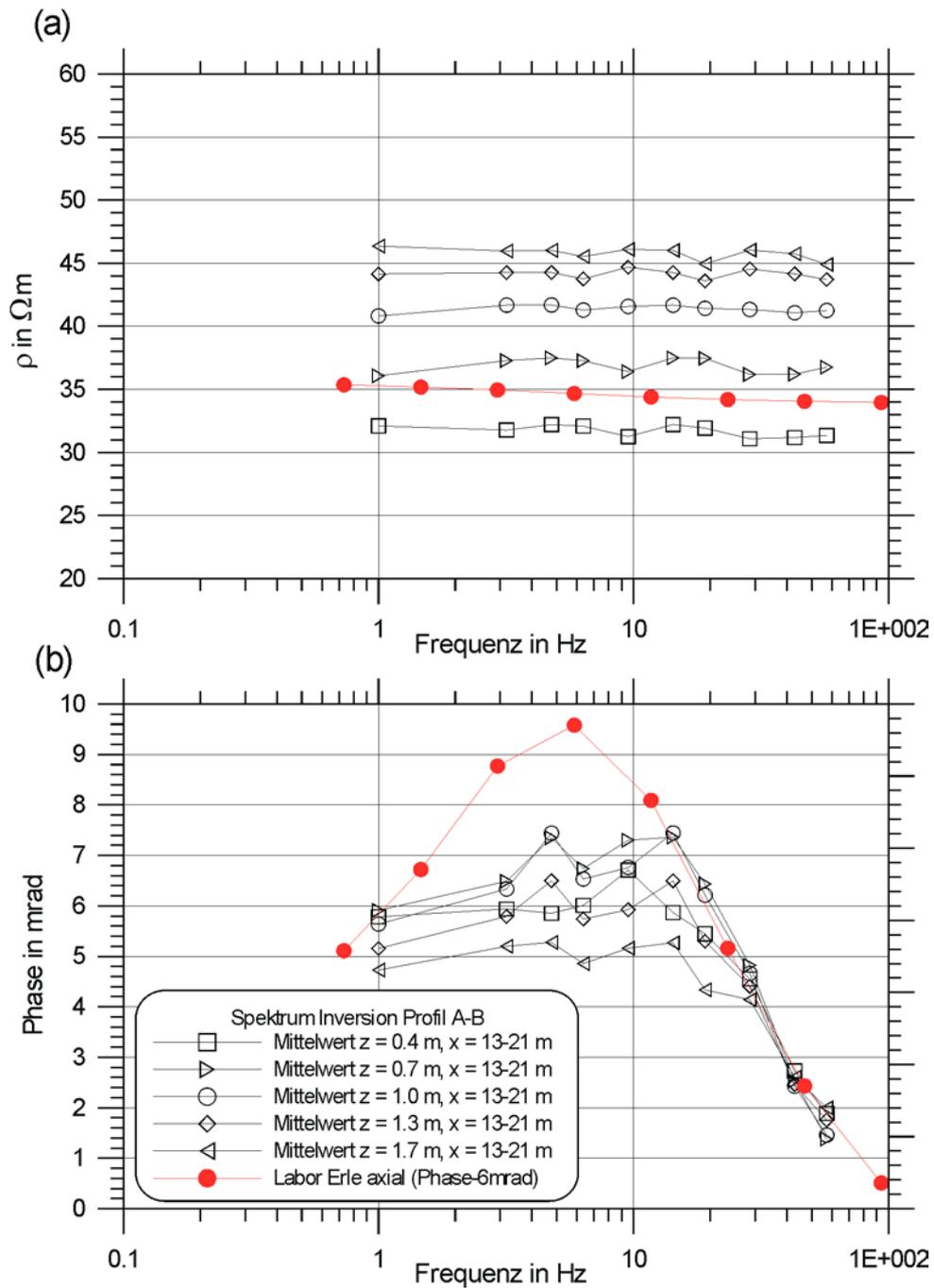


Abb. 7.4.5.1: Inversionspektren (Profil A-B). (a) Widerstände, (b) Phasen. Für die Spektren wurde der Mittelwert einzelner Schichten des Inversionsmodells im Bereich  $x = 13 - 21$  m (Anomalie) berechnet. Zum Vergleich sind die Spektren der Labormessung an einer axialen Erlenprobe dargestellt. Von den Phasenwerten der Labormessung wurden für den Vergleich 6 mrad subtrahiert.

### 7.4.6 Äquivalenzmodelle

Im Inversionsmodell von Profil C-D, Messfrequenz 4.77 Hz, (Kap. 7.4.4.3.2) liegt der Bohlenweg mit einer Tiefe von 0.4 bis 1 m näher an der Oberfläche und ist mit 60 cm stellenweise doppelt so mächtig wie von den Archäologen vorhergesagt.

Da die Lösung einer Inversion nicht eindeutig ist (Olayinka and Weller, 1997), sondern mehrere äquivalente Untergrundmodelle existieren, welche die Messdaten erklären, sollte untersucht werden, mit welcher Genauigkeit man die Tiefenlage und Mächtigkeit des Weges mit der gegebenen Messanordnung angeben kann. Als äquivalent werden bei dieser Untersuchung die Inversionsmodelle bezeichnet, bei denen die maximale Abweichung zwischen synthetischen und gemessenen Daten unterhalb 2 % bzw. 0.5 mrad liegt.

Die Fragestellung bei Messprofil C-D lässt sich näherungsweise auf einen geschichteten Halbraum reduzieren. Damit ergibt sich ein 1D-Fall, der mit Hilfe des Inversionsprogramms VESK der TU Clausthal (Weller, 1993) behandelt werden kann. Das Programm führt eine Inversion der komplexen elektrischen Leitfähigkeit einer Schlumberger-Sondierung durch. Die resultierenden Untergrundmodelle von Widerstand und Phase sind damit über den Real- und Imaginärteil miteinander verknüpft und beeinflussen sich gegenseitig.

Um mit VESK arbeiten zu können, wurde aus jeder Pseudotiefe der 4.77 Hz Messung der Median des scheinbaren spezifischen Widerstands und der scheinbaren Phase extrahiert.

Zuerst wurde eine Inversion unter Vorgabe eines 4-Schicht-Falls durchgeführt. Das Ergebnis ist in Abbildung 7.4.6.1a dargestellt. Das Resultat ist ein niederohmiger Bohlenweg (28  $\Omega\text{m}$ ) eingebettet zwischen zwei hochohmigen Schichten (50 und 54  $\Omega\text{m}$ ). An der Oberfläche besitzt das Modell eine gutleitfähige Schicht (15  $\Omega\text{m}$ ). Der Bohlenweg befindet sich in einer Tiefe von 1.1 bis 1.5 m. Im Phasenmodell zeichnet sich der Weg mit 10 mrad deutlich von der Umgebung ab. Im Allgemeinen nehmen die Phasen mit der Tiefe ab. Besitzt das Modell an der Oberfläche noch Phasen von 8 mrad, sinken die Werte unterhalb des Weges auf 3 mrad.

Bei der zweiten Inversion wurde die Tiefenlage des Bohlenwegs mit 0.9 bis 1.2 m festgelegt. Es ergaben sich ähnliche Kontraste wie bei Modell 1 (Abb. 7.4.6.1b). Jedoch ist die oberste Schicht jetzt hochohmiger (25  $\Omega\text{m}$ ) und die zweite Schicht niederohmiger (38  $\Omega\text{m}$ ). Der rms-error des 2. Modells betrug 1 % bei den Widerständen und 0.3 mrad bei den Phasen. Die Anpassung hat sich damit gegenüber Modell 1 bei den Widerständen nur um 0.3 % verschlechtert. In Abbildung 7.4.6.2 ist die Anpassung von Modell 2 an die Messdaten dargestellt. Die maximale Abweichung der synthetischen von den gemessenen Daten beträgt 1.8  $\Omega\text{m}$  bzw. 0.5 mrad. Das folgende Inversionsmodell wurde unter Vorgabe einer Bohlenweg-Tiefe von 0.6 bis 0.9 m durchgeführt. Das Ergebnis der Inversionen ist in Abbildung 7.4.6.1c dargestellt. Modell 3 erklärt die Messdaten mit einer mittleren Abweichung von 1.1 % bei den Widerständen und 0.3 mrad bei den Phasen. Auch bei diesem Modell zeigt sich der Weg nicht als hochohmige Schicht, sondern liegt mit 22  $\Omega\text{m}$  deutlich unterhalb des Hangenden (48  $\Omega\text{m}$ ) und Liegenden (51  $\Omega\text{m}$ ). Dagegen hebt sich wie bei allen Modellen das archäologische Objekt mit seinen Phasen vom ungestörten Boden ab.

Ein Versuch, den Bohlenweg als hochohmige Schicht zu interpretieren wurde bei Modell 4 unternommen. Der Widerstand wurde mit 50  $\Omega\text{m}$  festgelegt. Das Resultat war ein Bohlenweg in einer Tiefe von 1.1 bis 1.4 m (Abb. 7.4.6.1d), der sich im Widerstand kaum vom Liegenden (51  $\Omega\text{m}$ ) unterscheidet. Der Kontrast in den Phasen verstärkte sich durch die Wahl eines hochohmigen Weges zusätzlich.

Im Rahmen äquivalenter Untergrundmodelle lässt sich die Tiefe der Oberkante des Bohlenwegs von 0.6 bis 1.1 m variieren und die Dicke kann 0.2 bis 0.5 m betragen. Auffällig bei allen Modellen ist, dass sich der Weg nicht als klare hochohmige Struktur von der Umgebung abhebt, wogegen die Phasenwerte immer deutlich über der Umgebung liegen.

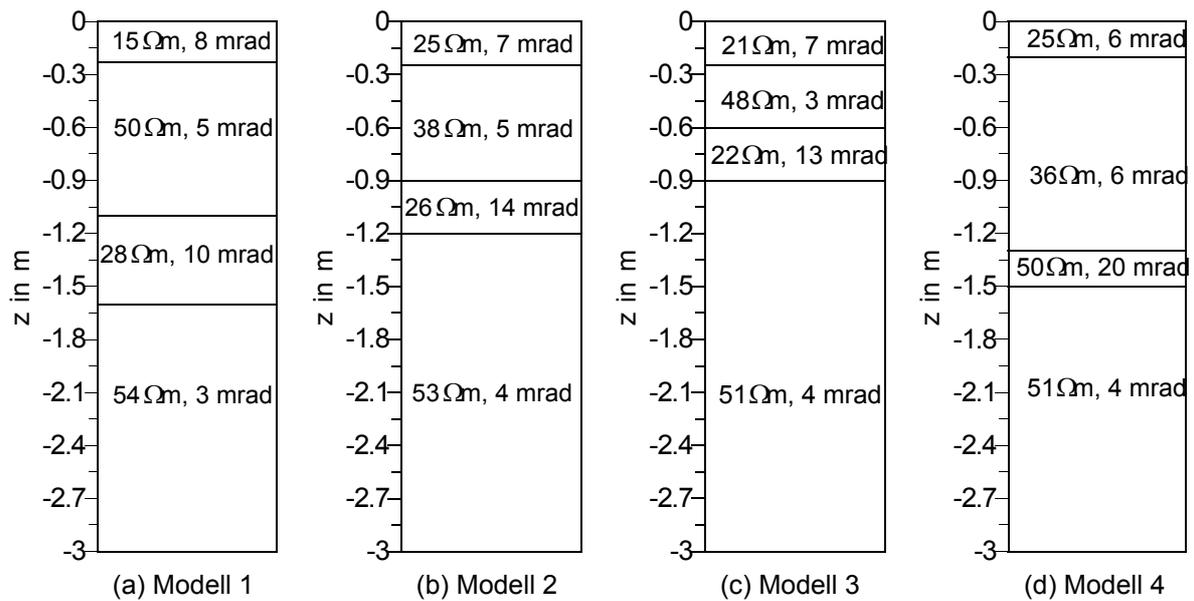


Abb. 7.4.6.1: Äquivalente 1D-Inversionmodelle (Profil C-D, 4.77 Hz).

Für die Inversion wurden die Mediane der einzelnen Pseudotiefen extrahiert.

(a) Modell 1: ohne Parametervorgabe; rms: 0.7 %, 0.3 mrad;  $\delta_{max}$ : 1.1  $\Omega m$ , 0.4 mrad

(b) Modell 2: Tiefe des Bohlenweges (BW) mit  $z = 0.9-1.2$  m festgelegt; rms: 1.5 %, 0.4 mrad;  
 $\delta_{max}$ : 2.9  $\Omega m$ , 0.5 mrad

(c) Modell 3: BW mit  $z = 0.6-0.9$  m festgelegt; rms: 1.1 %, 0.3 mrad;  $\delta_{max}$ : 1.4  $\Omega m$ , 0.4 mrad

(d) Modell 4: BW mit  $\rho = 50 \Omega m$ ; rms: 1.0 %, 0.3 mrad;  $\delta_{max}$ : 1.9  $\Omega m$ , 0.4 mrad

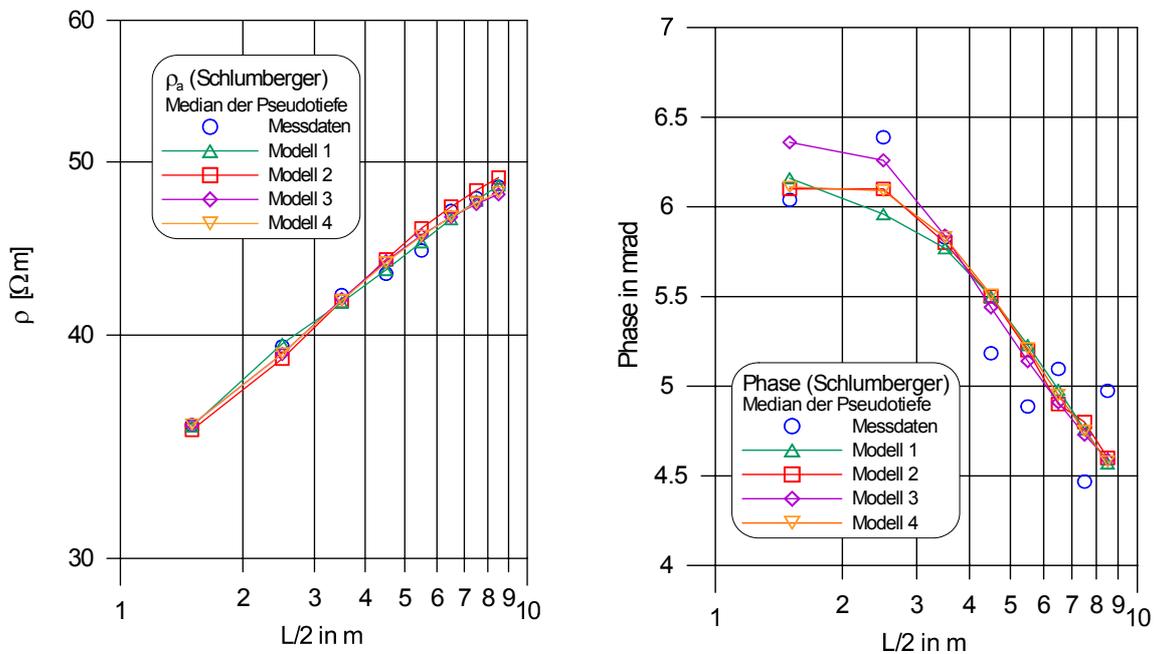


Abb. 7.4.6.2: Anpassung der synthetischen Daten aller Modelle (Abb. 7.4.6.1) an die gemessenen Daten von (Profil C-D, 4.77 Hz).

Für die Inversion wurden die Mediane der einzelnen Pseudotiefen extrahiert.

Nach den Untersuchungen mit 1D-Modellen wurde eine erneute 2D- Inversion der Messdaten von Profil C-D, 4.77 Hz durchgeführt. Die Inversion erfolgte mit dem Programm AC2DSirt (Kampke, 1996). Das Programm führt analog zu VESK eine Inversion der komplexen elektrischen Leitfähigkeit durch. Für die Inversion kann ein Startmodell vorgegeben werden, das in den folgenden Iterationsschritten optimiert wird.

Als Startmodell diente das Modell 2 der 1D-Studie (Abb. 7.4.6.1b und Abb. 7.4.6.2), bei dem sich der Bohlenweg in einer Tiefe von 0.9 -1.2 m Tiefe befindet und einen Widerstand von 26  $\Omega\text{m}$  bzw. eine Phase von 14 mrad besitzt. Wie in Modell 2 wurde ein 4-Schicht-Fall angenommen und die entsprechenden Parameter der einzelnen Schichten übernommen.

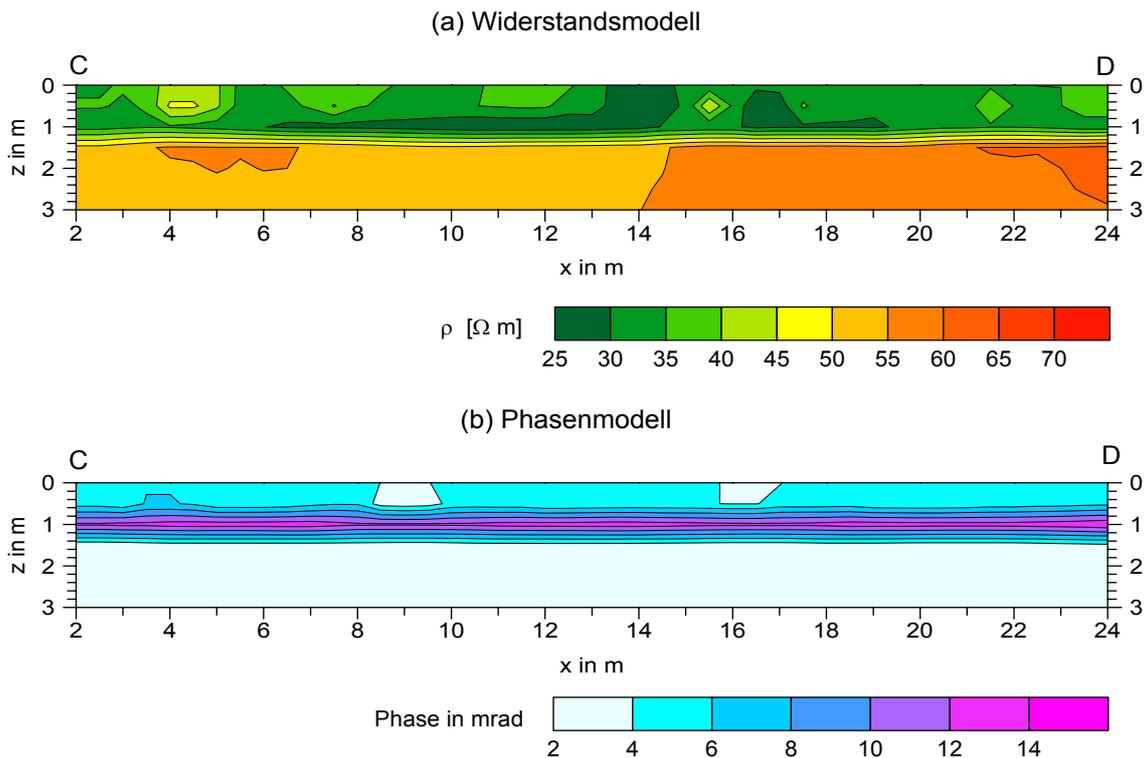


Abb. 7.4.6.3: Inversionsergebnis mit Startmodell. Als Startmodell diente Modell 2 der 1D-Studien (Abb. 7.4.6.1b und 7.4.6.2). Die Inversion wurde mit dem Programm AC2DSirt durchgeführt. rms-error 14.1 % bzw. 1.9 mrad.

In Abbildung 7.4.6.3 ist das Ergebnis dargestellt. Deutlich ist der Bohlenweg als durchgängige Struktur im Phasenmodell zu erkennen (Abb. 7.4.6.3b). Gegenüber dem Untergrundmodell ermittelt ohne Startmodell, liegt der Weg in einer Tiefe von 0.8 bis 1.2 m und erreicht Phasen von 14 mrad. Damit hat sich mit der Tiefenlage auch der Kontrast zur Umgebung verändert. Der Bereich oberhalb des Weges erreicht Phasen von bis zu 6 mrad, während unterhalb des Objekts nur Phasen von maximal 4 mrad zu finden sind.

Im Widerstandsmodell ist der Bohlenweg noch als dünner gelber Streifen (45-50  $\Omega\text{m}$ ) zu erkennen, jedoch hat er gegenüber dem Startmodell deutlich an Dicke verloren. Offensichtlich lassen die Widerstandsdaten diese Interpretation nicht zu. Übereinstimmend mit dem Modell, berechnet mit Res2Dinv, erhöht sich der Widerstand im Untergrund im Nordosten. Bei  $x = 14$  m steigen die Widerstände unterhalb des Bohlenwegs auf über 55  $\Omega\text{m}$  an

Die Inversion erfolgte in 5 Iterationschritten, mit einem rms-error von 14.1 % bzw. 1.9 mrad. Die Anpassung des Widerstandmodells ist damit deutlich schlechter als bei der Inversion ohne Startmodell, durchgeführt mit Res2DInv, wo ein rms-error von 5.2 % erreicht wurde. Die Anpassung der beiden Phasenmodelle ist dagegen vergleichbar (Res2DInv 1.2 mrad).

#### 7.4.6.1 Anpassung der 2D-Modelle an die Messdaten

Ein Vergleich der synthetischen Messdaten der beiden 2D-Modelle mit den Ergebnissen der Feldmessung (Profil C-D) soll zeigen, welche der durchgeführten Inversionen die Messdaten besser erklärt. Speziell soll überprüft werden, welche der Bereiche der Pseudosektion besser, welche schlechter angepasst sind.

Sowohl für die Inversion mit Startmodell (AC2DSirt) als auch für die Inversion ohne Startmodell (Res2DInv) wurden deshalb die prozentualen Abweichungen, die auch Berechnungsgrundlage des rms-error sind, der synthetischen  $\rho_a$ -Werte der Vorwärtsmodelle von den tatsächlichen Messdaten berechnet. Für die scheinbaren Phasen wurden die Differenzen gebildet. Die Abweichungen der scheinbaren spezifischen Widerstände und der scheinbaren Phasen sind für die einzelnen Messrichtungen (AMN und MNB) in den folgenden Abbildungen dargestellt.

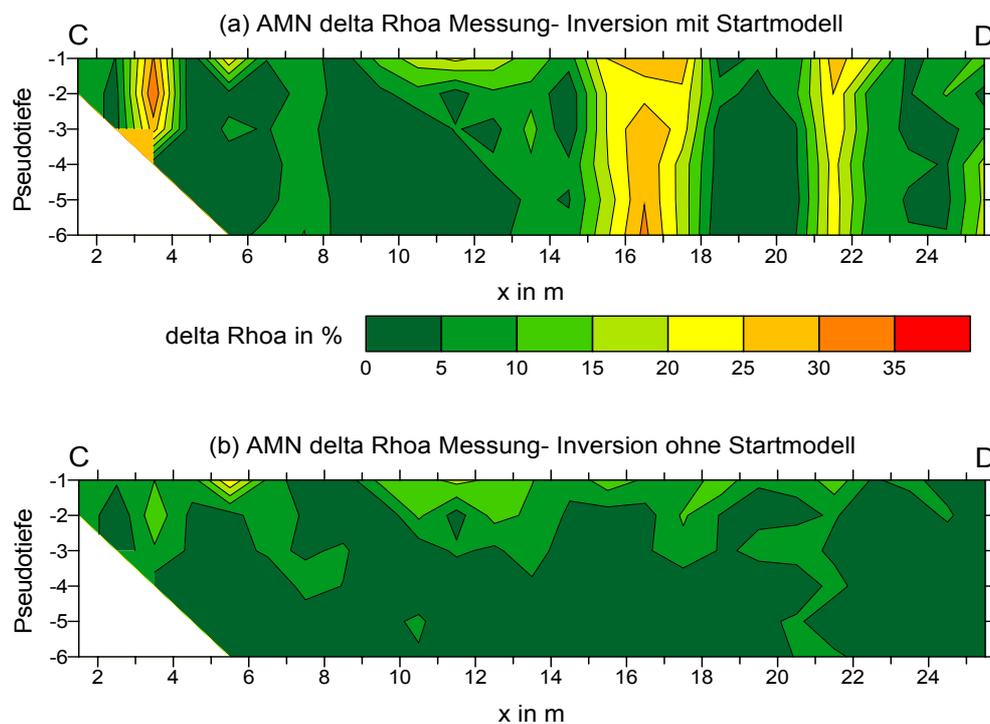


Abb. 7.4.6.1.1: Abweichung der synthetischen von den gemessenen scheinbaren spezifischen Widerständen in Prozent (Profil C-D, 4.77 Hz), Messanordnung AMN.  
(a) Abweichung mit Startmodell (AC2DSirt).  
(b) Abweichung ohne Startmodell (Res2DInv).

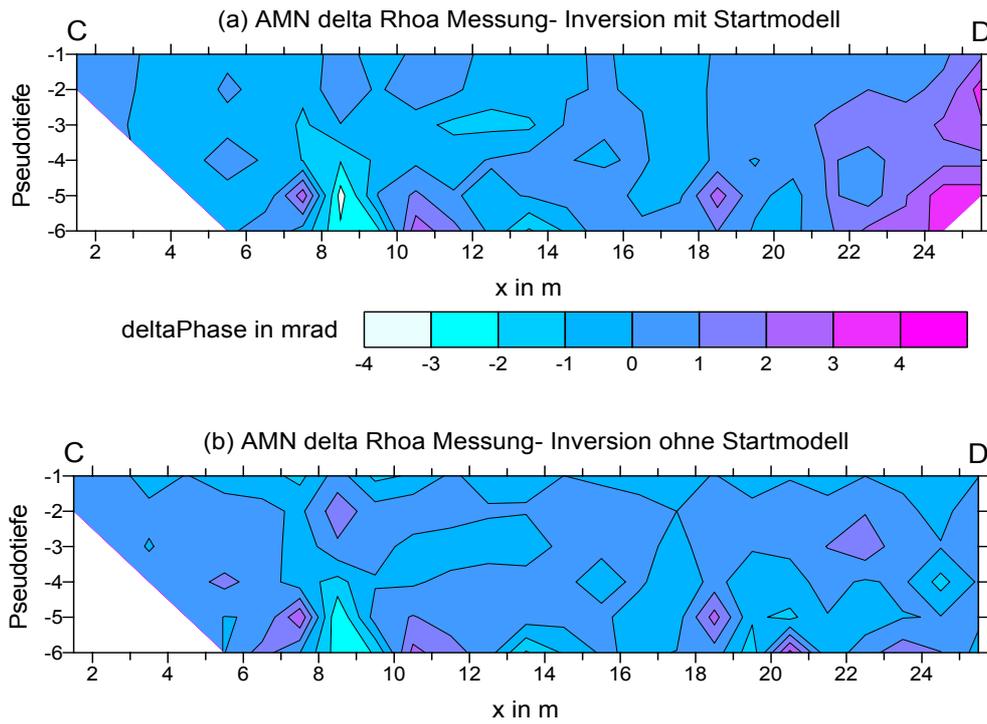


Abb. 7.4.6.1.2: Abweichung der synthetischen von den gemessenen scheinbaren Phasen in mrad (Profil C-D, 4.77 Hz), Messanordnung AMN. (a) Abweichung mit Startmodell (AC2DSirt). (b) Abweichung ohne Startmodell (Res2DInv).

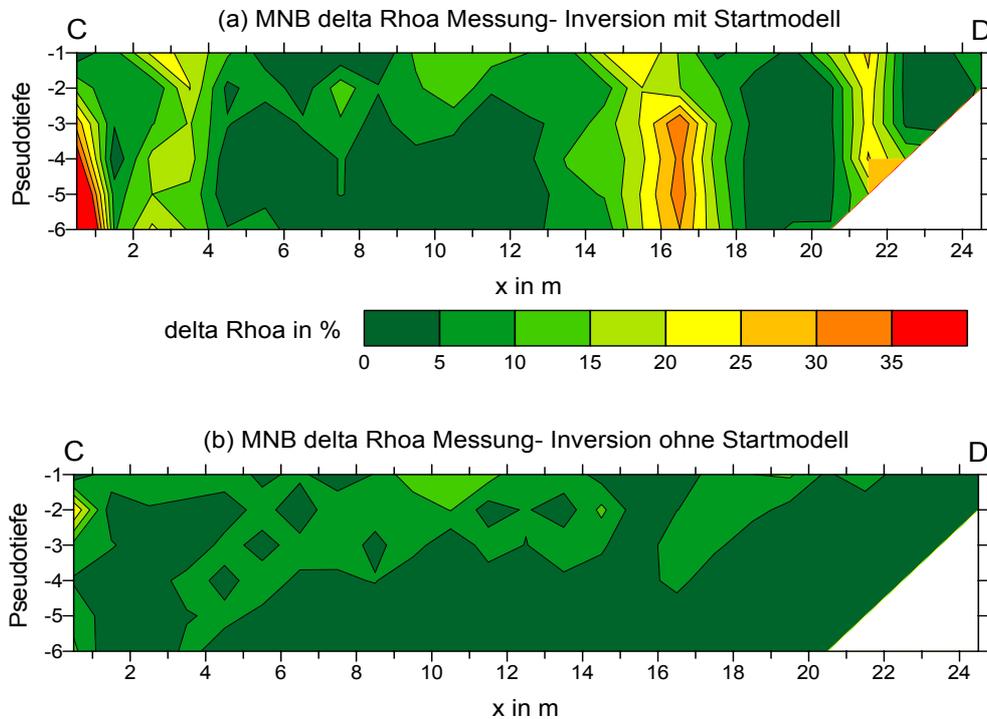


Abb. 7.4.6.1.3: Abweichung der synthetischen von den gemessenen scheinbaren spezifischen Widerständen in Prozent (Profil C-D, 4.77 Hz), Messanordnung MNB. (a) Abweichung mit Startmodell (AC2DSirt). (b) Abweichung ohne Startmodell (Res2DInv).

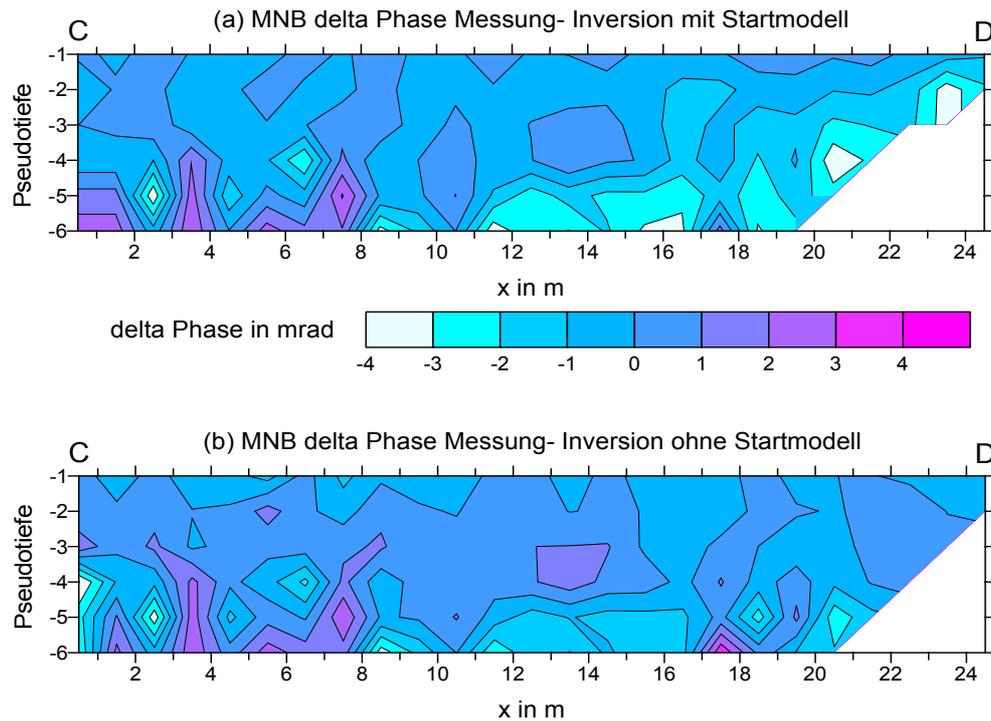


Abb. 7.4.6.1.4: Abweichung der synthetischen von den gemessenen scheinbaren Phasen in mrad (Profil C-D, 4.77 Hz), Messanordnung MNB. (a) Abweichung mit Startmodell (AC2DSirt). (b) Abweichung ohne Startmodell (Res2DInv).

Nach Betrachtung der Pseudosektionen wird deutlich, dass der erhöhte rms-error von 14.1 % der Inversion mit Startmodell gegenüber 5.2 % ohne Startmodell auf die schlechtere Anpassung der hochohmigen Anomalien zurückzuführen ist. Dort (Abb. 7.4.6.1.1 u. 7.4.6.1.3) erreichen die prozentuellen Abweichungen der synthetischen Daten Werte von 10 bis 35 %. Generell ist bei der Anpassung beider Widerstandsmodelle zu beobachten, dass die oberflächennahen Pseudotiefen geringfügig schlechter angepasst sind.

Die Anpassung Phasenmodelle ist ist vergleichbar. Die Inversion mit Startmodell zeigt stellenweise in den Randbereichen geringfügig erhöhte Differenzen (Abb. 7.4.6.2 u. 7.4.6.1.4)

#### 7.4.6.2 Schlussfolgerungen

Die 1D-Modellstudien haben gezeigt, dass eine Vielzahl von Modellen existieren, welche die Messdaten gleichwertig erklären. Am Beispiel von Profil C-D gelang es nicht, den Bohlenweg als hochohmige Struktur zu modellieren, die sich deutlich von der Umgebung absetzt.

Dagegen hebt sich der Weg in allen Modellen mit erhöhten Phasen von der Umgebung ab.

Die Studien bestätigen also das Ergebnis der ersten 2D-Inversion (Kap. 7.4.4.3), wo sich der Weg in den Phasenmodellen deutlich abzeichnet, aber im Widerstandsmodell nicht zu erkennen ist. Unter Vorgabe eines Startmodells gelingt es, ein 2D-Widerstandsmodell mit angedeutetem Weg zu erhalten, das aber die Messdaten mit einem rms-error von 14.1 % wesentlich schlechter erklärt als das Inversionsergebnis ohne Startmodell (rms-error 5.2 %).

Ursache dieser schlechteren Anpassung sind hochohmige Anomalien in den Messdaten (Abb. 7.4.4.2.2.1). Ob diese Anomalien auf eine schlechte Ankopplung der Elektroden zurückzuführen sind, oder Informationen über Strukturen im Untergrund enthalten, konnte im Rahmen der Arbeit nicht geklärt werden.

Zum Auflösungsvermögen der Messanordnung kann gesagt werden, dass sich mit einer Pol-Dipol Anordnung und einem Elektrodenabstand von einem Meter die Tiefenlage und Dicke des Bohlenwegs mit einer Genauigkeit von  $\pm 0.3$  m angeben lässt.

#### 7.4.7 Zusammenfassung

Mit den Untersuchungen am bronzezeitlichen Bohlenweg konnte nachgewiesen werden, dass Holz ein polarisierbares Material ist und sich die spektrale Induzierte Polarisation (SIP) zur Detektion von archäologischen Objekten aus Holz eignet.

Eine konventionelle Widerstandsmessung wäre nicht in der Lage gewesen, die Struktur des Bohlenwegs eindeutig aufzulösen. Dies verdeutlicht den Vorteil der SIP, mit Hilfe derer die Lage des Bohlenwegs mit einer Genauigkeit von  $\pm 0.3$  m bestimmt werden konnte.

Ein zusätzliches, wichtiges Resultat war, dass sich die Spektren der Labormessungen im Feld qualitativ reproduzieren lassen. Dies war eine Bestätigung der Laborergebnisse und erlaubt bei kommenden Messungen die Übertragung der entscheidenden Frequenzen für eine SIP im Feld. Diese ersten positiven Ergebnisse gilt es durch weitere Untersuchungen zu verifizieren, jedoch deutet sich an, dass mit der Weiterentwicklung von Multielektroden-Apparaturen die SIP eine wichtige Rolle bei der archäologischen Prospektion von Holzobjekten spielen könnte.

Bei den vorgestellten Ergebnissen lag der Kontrast zwischen Bohlenweg und dem umgebenden Material unterhalb 2 mrad. Damit ist die Grenze des Auflösungsvermögens der SIP-256 mit 1 mrad fast erreicht.

## Kapitel 8: Zusammenfassung

Die Induzierte Polarisation wurde ursprünglich zur Exploration von Erzvorkommen entwickelt. Doch ist die Polarisierbarkeit eines Untergrundes auch von Tongehalt, Porosität und chemischer Zusammensetzung der Porenlösung abhängig.

Die spektrale Induzierte Polarisation (SIP) untersucht die Polarisierbarkeit über ein breites Frequenzspektrum und nutzt diese Frequenzspektren zur Unterscheidung von Materialien. Mit dem gerätetechnischen Fortschritt kommt die spektrale Induzierte Polarisation (SIP) vermehrt in der Umweltgeophysik zum Einsatz. Zur Fragestellung gehören die Detektion von Altlasten und der Grundwasserschutz.

In der Archäologie ist die Induzierte Polarisation ein bisher kaum verwendetes geoelektrisches Verfahren. Obwohl der Messaufbau einer konventionellen Widerstandsmessung gleicht, führte der enorme messtechnische Aufwand und die begrenzten Anwendungsmöglichkeiten dazu, dass sich die Methode bislang nicht in der archäologischen Prospektion etablieren konnte.

Im Rahmen des Graduiertenkollegs „Archäologische Analytik“ wurde die Entwicklung einer Multielektroden-Apparatur SIP-256 begonnen. Die Verwendung der SIP-256 führt zu einer erheblichen Verkürzung der Messzeit und erlaubt die Bestimmung der komplexen elektrischen Leitfähigkeit dreidimensionaler Strukturen mit hoher Messgenauigkeit. Ziel war es, mit dieser Apparatur die SIP auch in der Archäologischen Prospektion zu etablieren und flächenhafte Messungen vollautomatisch umzusetzen.

Ein Schwerpunkt der Arbeit umfasst die Kalibrierung der Apparatur, die Umsetzung von Messabläufen und die Entwicklung eines Auswertalgorithmus. Dies bildete die Grundlage für die später durchgeführten Feldmessungen.

Es galt archäologische Objekte zu finden, für welche die Methode geeignet ist. Vor allem sollte untersucht werden, ob sich die Methode zur Detektion von Holzobjekten eignet. Holz spielt für die Datierung von Fundstellen eine übergeordnete Rolle in der Archäologie.

### Die Multielektroden-Apparatur SIP 256

Die Multielektroden-Apparatur SIP-256 erlaubt die Bestimmung der komplexen elektrischen Leitfähigkeit dreidimensionaler Strukturen.

Das Konzept der SIP-256 beruht auf der Verwendung von eigenständigen Messeinheiten, sogenannten Remote Units (RU) direkt an den Elektroden. Über Relais in den RU's wird die Stromspeisung und Potentialmessung gesteuert.

Die Datenübertragung erfolgt über einen SIP-Bus, der alle Remote Units mit einer Basiseinheit verbindet. Jede RU verfügt über eine zentrale Speichereinheit und einen Prozessor. Ein Teil des Datenprozessings (Präprozessing) erfolgt bereits in den Einheiten. Die Folge ist eine Reduktion der zu übermittelnden Datenmenge und eine erhebliche Verkürzung der Messzeit. Eine benutzerfreundliche Oberfläche erlaubt das Editieren von Scriptfiles und die Steuerung der Apparatur von einem Laptop.

Über eine externe Signalquelle kann ein frei definierbares periodisches Signal von einigen mHz bis ca. 1 kHz generiert werden. Eine Messung mit 30 Elektroden und vier überlagerten Messfrequenzen zwischen 1 und 30 Hz dauert etwa 45 Minuten.

Messanordnungen von 50 Elektroden lassen sich vollautomatisch realisieren.

Maximal können Ströme von 100 mA eingespeist werden.

Eine im Rahmen dieser Arbeit entwickelte und weitgehend automatisierte Auswertesoftware ermöglicht die Bearbeitung der Daten unmittelbar nach Abschluss der Messung. Die schnelle graphische Umsetzung der Messdaten in 2D- bzw. 3D-Untergrundmodelle erlaubt, über den

weiteren Ablauf der Messkampagne noch vor Ort zu entscheiden.

Zur Beurteilung der Datenqualität erfolgt eine statistische Betrachtung und Korrelation aller Parameter. Filter und Korrekturverfahren stehen zur Verbesserung der Datenqualität zur Verfügung. Eine graphische Umsetzung der Daten und die Dokumentation jedes Bearbeitungsschritts ist in den Auswertalgorithmus integriert. Den Abschluss bildet die Inversion des Datensatzes und die graphische Umsetzung des resultierenden Untergrundmodells.

## Vergleichende Untersuchungen zur Auswahl der Messelektroden

Das Ergebnis der Datenqualität in Abhängigkeit von der Verwendung unterschiedlicher Messelektroden oder Kombination von Messelektroden wurde in drei Messgebieten untersucht. Die Vergleichsstudien erfolgten getrennt für Widerstand und Phase. Die Untersuchungen zeigen, dass bei schwach polarisierbarem Untergrund, Effekte an den Elektroden zu vernachlässigen sind und man Stahlelektroden bedenkenlos bei der Anwendung der SIP einsetzen kann. Unpolarisierbare Elektroden, bzw. getrennte Strom- und Potentialelektroden führen zu einer besseren Qualität der Phasen über stark polarisierbarem Untergrund. Dies konnte am Beispiel eines mittelalterlichen Verhüttungsplatzes gezeigt werden.

Alle Vergleichsstudien wurden mit der SIP-256 durchgeführt und waren auf einen Frequenzbereich von 1 - 10 Hz begrenzt. Schlussfolgerungen, die aus den Untersuchungen folgen, lassen sich deshalb nur bedingt auf andere Apparaturen oder Frequenzbereiche übertragen.

## SIP in der archäologischen Prospektion

### (a) Schlacke

Das Hauptanwendungsgebiet der Induzierten Polarisation ist die Erzprospektion. An einem mittelalterlichen Verhüttungsplatz bei Seesen am Harz konnten die Vorteile der Induzierten Polarisation auf diesem Gebiet genutzt werden.

Im Vergleich zur konventionellen Widerstandsmessung gelang es, mit der spektralen Induzierten Polarisation mehrere Schlackegruben zu finden. Auch die korrekte Interpretation der Anomalien gelang mit der SIP. Während die Schlackegruben höhere elektrischen Widerstände als der umgebende Waldboden besitzen, erlauben die hohen Phasen einen klaren Rückschluss auf die metallhaltige Verfüllung der Gruben.

Ein zweites wichtiges Ergebnis der flächenhaften Messung im Pandelbachtal war, dass sich mit der SIP ein ehemaliger Bachlauf nachweisen ließ. Dies war ein überraschendes Ergebnis, das durch Probebohrungen verifiziert werden konnte.

Das Ergebnis der SIP führte dazu, dass eine nur auf der magnetischen Prospektion beruhende Interpretation als Anfahrtsweg revidiert wurde.

### (b) Siedlungshorizont

Während einer deutsch-bulgarischen Grabungskampagne des Schwerpunkts Frühmittelalter in Pliska (Bulgarien) 1999 kam die Apparatur erstmals erfolgreich zum Einsatz. Durch eine flächenhafte Anwendung der SIP konnte ein Siedlungshorizont anhand von Lehmablagerungen nachgewiesen werden.

Der Lehm, vermutlich die Überreste eines Gebäudes, erzeugte einen messbaren Polarisations-effekt. Die Ablagerungen befinden sich mit 2 bis 3 m in relativ großer Tiefe und kamen während der anschließenden Ausgrabung zum Vorschein.

Die Siedlungsüberreste, die mit der Widerstandsmessung nicht zu erkennen waren, stellen ein neues Anwendungsgebiet für die SIP in der Archäologie dar. Vor allem zum Auffinden von Siedlungshorizonten in großen Untersuchungstiefen, die durch eine magnetische Prospektion nicht erfasst werden können, bietet sich die SIP an.

### (c) Bohlenweg

Eine zentrale Fragestellung war, ob Holzobjekte mit der SIP zu detektieren sind. Zuerst wurde durch Labormessungen geklärt, dass Holz ein polarisierbares Material ist. Bei den untersuchten Proben handelte es sich um Hölzer aus einem bronzezeitlichen Bohlenweg, die von Ausgrabungen im Federseemoor stammten.

Durch die Untersuchungen im Labor motiviert, folgte eine Feldmessung über dem Bohlenweg. Der Weg setzt sich aus vier Holzarten zusammen (Birke, Buche, Erle, Esche) und bildet eine etwa 9 m breite Fahrbahn.

Der Verlauf des Weges ist gut bekannt und so konnten zwei Profile, eines parallel und eines senkrecht, über dem Verlauf des Weges angeordnet werden. Je Profil wurden 12 Frequenzen im Bereich von 1 bis 170 Hz aufgenommen.

Es gelang, den Bohlenweg in beiden Messprofilen nachzuweisen. Der Bohlenweg ist in den resultierenden Phasenmodellen deutlich zu erkennen. Damit gelang es erstmals, ein Holzobjekt mit der spektralen Induzierten Polarisation zu detektieren.

Die konventionelle Widerstandsmessung lieferte zwar indirekte Hinweise auf die Existenz des Weges, war aber nicht in der Lage, die Struktur des Bohlenwegs selbst zu erkennen.

Dies verdeutlicht den Vorteil der SIP, mit Hilfe derer die Lage des Bohlenwegs mit einer Tiefengenaugigkeit von  $\pm 0.3$  m bestimmt werden konnte.

Ein zusätzliches Resultat der Untersuchungen war, dass sich der Verlauf der Laborspektren im Feld reproduzieren lässt. Zwar erreichen die im Feld gemessenen Phasen nicht die Werte der Labormessungen, jedoch stimmt die Lage der Phasenmaxima überein. Diese Beobachtung erlaubt bei künftigen Feldmessungen die Übernahme der relevanten Messfrequenzen.

Der Kontrast zwischen Bohlenweg und dem umgebenden Material liegt unterhalb 2 mrad. Die Grenze des Auflösungsvermögens der SIP-256 (1 mrad) ist damit fast erreicht. Weitere Messungen müssen zeigen, ob sich dieses Ergebnis reproduzieren lässt.

## Schlussfolgerungen und Ausblick

An drei Beispielen konnte gezeigt werden, dass die spektrale Induzierte Polarisation eine wertvolle geophysikalische Methode in der archäologischen Prospektion sein kann.

Die Verwendung der Multielektroden-Apparatur SIP-256 erlaubt es, die Methode gezielt zur Untersuchung dreidimensionaler Objekte einzusetzen und kleinräumige, flächenhafte Messanordnungen automatisch zu realisieren.

Mit der vorliegenden Arbeit etablierte sich die Polarisierbarkeit als zusätzlicher Bodenparameter, der wichtige Erkenntnisse für den Archäologen liefert. Archäologische Objekte, die bei der Anwendung anderer geophysikalischer Methoden verborgen bleiben oder falsch interpretiert würden, lassen sich durch die Bestimmung der Phase identifizieren und sichtbar machen.

Der große Vorteil der Methode liegt in der Exploration von Erzen. Dies bestätigte sich auf einem Verhüttungsplatz, auf dem zahlreiche Schlackegruben mit Hilfe der SIP identifiziert werden konnten.

Daneben gelang es einen ehemaligen Wasserlauf zu verfolgen. Die Struktur wurde nach einer magnetischen Prospektion zunächst als Anfahrtsweg interpretiert. Die niedrigen Phasenwerte,

die im Bereich der magnetischen Anomalie auftraten, erlaubten Rückschlüsse auf eine Ablagerung von fluviatilen Sedimenten. Eine Probebohrung bestätigte dies.

Eine weitere Anwendungsmöglichkeit ergab sich durch das Auffinden eines frühmittelalterlichen Siedlungshorizonts. Der Lehm, der beim Bau eines Hauses verwendet wurde, lagerte sich nach Aufgabe der Behausung auf dem Siedlungshorizont ab. Die Struktur konnte mit einer konventionellen Widerstandsmessung nicht erkannt werden, zeichnete sich aber durch erhöhte Phasenwerte von der Umgebung ab.

Holzobjekte, welche für die Datierung von Fundstellen von großer Bedeutung sind, eröffnen der Methode ein gefragtes Anwendungsgebiet in der Archäologie. Holz ist ein polarisierbares Material. Mit der erfolgreichen Detektion des bronzezeitlichen Bohlenwegs gelang es erstmals die Laborergebnisse im Feld umzusetzen.

Die vorliegenden Ergebnisse müssen durch weitere Untersuchungen bestätigt werden, jedoch deutet sich an, dass die Induzierte Polarisation das Potential besitzt, sich in der archäologischen Prospektion zu etablieren.

Da in der Archäologie geophysikalische Methoden dominieren, welche eine schnelle, flächenhafte Untersuchung von Fundplätzen erlauben, sollte ein Schwerpunkt der Geräteentwicklung sein, großflächige IP-Kartierungen umzusetzen.

Die Umrüstung von gleichstromgeolektrischen Apparaturen bietet dafür einen Ansatz.

Zur Unterscheidung archäologischer Materialien tragen Aufzeichnungen eines breiten Frequenzspektrums bei. Obwohl die Dauer niederfrequenter Messungen den Ablauf eines Feld-einsatzes wesentlich verzögert, können wichtige Informationen aus den Daten abgeleitet werden. Sondierungen, bei denen komplette Frequenzspektren aufgezeichnet werden, sollten deshalb an ausgewählten Stellen durchgeführt werden.

## Kapitel 9: Summary

Induced Polarisation (IP) is a geoelectrical method whose measurement setup is comparable to a conventional resistivity survey. The method was originally developed for ore exploration. The transition from electronic to electrolytic conduction at the interface between metallic mineral and pore fluid leads to strong polarisation effects known as electrode polarisation.

Polarisation effects can be measured as a phase angle (time shift) between the applied harmonic current signal and the measured voltage. The amplitude of the apparent resistivity and the phase angle together are also known from complex resistivity. In spectral Induced Polarisation (SIP) or frequency domain IP, one measures the apparent resistivity at two or more frequencies. SIP usually investigates the polarisation effect in a range between 1 mHz and 1 kHz and uses the spectra to distinguish materials.

In time-domain IP, the decay curve of the voltage is recorded instantly after the current signal is shut off. The voltage is thus measured as function of time. Time- and frequency-domain measurements are related by a Fourier transform.

The successful use in ore prospection has promoted a better theoretical understanding of polarisation effects. Besides metallic minerals the interactions at the internal electrical double layer between the solid matrix and the pore fluid are the source of a membrane polarisation. Membrane polarisation is mainly influenced by the clay mineral content, porosity and the chemical composition of the pore fluid. Although membrane polarisation effects are generally around one to two orders of magnitude lower than electrode polarisation effects, modern IP equipment is able to resolve these phenomena. As a consequence the improvement of measurement techniques and the development of multichannel geoelectrical-instruments has opened new fields of application where small polarisation effects have to be considered, e. g. groundwater monitoring, hydrogeology and sedimentology.

Aspinall and Lynam (1968, 1970) were the first who recommended the application of IP in archaeological prospection. They developed equipment for time-domain IP and used the method for the detection of a ditch and a pit filled with slag and cinders. However, at that time, the accurate measurement of IP was very time consuming. Even though recent improvements in measurement techniques now enable the effective application in archaeological prospection the method has not been established. One reason is the lack of experience of which archaeological objects can be detected by SIP.

The large content of ore minerals, not extracted when smelting and left in slag, enabled the detection of furnaces and slag heaps by the IP method at medieval smelting sites (Weller, 2003). Losito et al. (2001) and Finzi-Contini (2001) carried out time-domain IP measurements near excavated roman boats. They observed increased IP effects originating from wooden boat fragments.

In order to establish the method in archaeological prospection the multichannel geoelectrical-instrument SIP-256 was developed within the postgraduate program 'Archäologische Analytik' at the Johann Wolfgang Goethe-Universität. The main objective of this PhD was to find archaeological objects that can be detected by SIP. Moreover any additional information that can be derived from an SIP measurement compared to a conventional resistivity measurement should also be investigated. The main focus was whether wood with its complex cell structure can be regarded as a polarisable material. Wood plays an important role in archaeology because dendrochronology allows the dating of excavated sites. As there is no distinct geophysical method especially in peatland archaeology that is able to detect wooden remains, this might be a field of application that establishes SIP in archaeological prospection.

The foundation for this work was the further development of the instrument including the realisation of 3D-surveys and an improvement of the data processing.

## Multichannel geoelectrical-instrument SIP-256

The SIP-256 instrument is able to measure both apparent resistivity and polarisation effect using a multi-electrode array. Remote units (RU's) at each measurement electrode reduce the duration of a field survey. In each RU a relay is switched to change from voltage measurement to current injection. Controlled by a base unit that is connected with a computer, measurements at various different electrode configurations are taken. These configurations are defined in a scriptfile. Immediately before a measurement cycle is started the relay in two RU's are switched and between the connected electrodes a current is injected into the ground. Meanwhile the voltage between the remaining electrodes is simultaneously recorded. After switching off the current signal the recorded time series are preprocessed in each remote unit and transmitted to a laptop computer where the apparent resistivity and the phase shift are determined. Due to the data processing in the RU's the amount of data that has to be transmitted is reduced and a multi-electrode array can be measured in a reasonable time. Using a frequency of 10 Hz a profile of 30 electrodes can be measured in 30 minutes.

The SIP-256 is controlled by an user interface that enables a real-time visualisation of the results. It is possible to use an external current source generating a periodical signal.

A maximum current amplitude of 100 mA can be injected into the ground using frequencies between 1 mHz and 1 kHz. Altogether a multi-electrode array of 50 electrodes can be realised. Beside the calibration of the RU's and the realisation of 3D-surveys the main focus of the further development was the realisation of a data processing that enables the visualisation of sub-surface models immediately after a field survey.

The statistical examination of the measured values is used to judge the range and quality of the data. As during a SIP-256 measurement each electrode configuration is repeated in the reverse manner the correlation of related datum points can be considered in order to delete bad datum points. The data processing is completed after the inversion. The computer programs Res2Dinv and Res3Dinv are used to calculate the resistivity and phase model. The visualisation of the sub-surface models is realised programming SURFER-scriptfiles.

## Investigation of the influence of different electrodes on SIP surveys

As there is a widespread discussion whether nonpolarising electrodes, known from self-potential field surveys, or conventional metal probes have to be used for the application of SIP the influence of measurement electrodes was investigated at three different archaeological sites.

Three electrode setups were compared. The first setup used metal spikes for the current and the voltage electrodes. The second is a decoupled setup. A metal spike was used as current electrode and a non-polarising electrode, Cu in CuSO<sub>4</sub>, was used as a voltage electrode.

The third setup used non-polarising electrodes for current and voltage measurement.

At a medieval smelting site it could be shown that it is necessary to use non-polarising electrodes at areas where strong polarisation effects are expected but at the remaining two sites where only small polarisation effects were measured no difference could be observed between setup one and two. The use of a single metal spike allows a faster progression of the field survey, whereas the use of a non-polarising electrode takes several minutes until the solution makes contact with the ground. As a consequence the measurement speed is that of a conventional resistivity survey, measuring phase angle and resistivity.

## Fields of application for SIP in archaeological prospection

### (a) smelting sites

As is known from ore exploration, SIP is a suitable method for the detection of metallic mineral deposits. At a medieval smelting site in the Harz mountain region SIP was used to detect several slag pits and heap furnaces. After a magnetic survey was carried out the depth extent of strong magnetic anomalies was investigated by SIP. Whereas all pits could be clearly identified due to their strong electrode polarisation effects, only a few of these archaeological structures could be detected by a conventional resistivity measurement. Compared to the forest soil they appeared as high resistive anomalies. Without the additional information yielded from SIP these anomalies would be hardly interpreted as pits filled with slag.

Beside this result which showed the advantages of SIP, the former course of a brook was detected. The course appeared in the magnetogram as a structure without any magnetic anomalies and was thus interpreted as an access road to the smelting site. The structure also appeared in the SIP survey. Obviously fluvial sediments showed almost no polarisation effects and were clearly visible as a broad band in a 3D survey. This additional information changed the archaeological interpretation of the feature and was later confirmed by drilling.

### (b) settlement horizons

In Pliska the first capital of Bulgaria another field of application for SIP was found.

An area of 150 m<sup>2</sup> was covered in order to find settlement remains. As SIP is sensitive to variations of the clay mineral content the method was able to detect loam deposits. Loam was used as building material and after the inhabitants had left was accumulated upon the settlement horizon. Displaying the subsurface models the lateral extension and the depth range of the remains of a house were clearly resolved by the phase angle. In the resistivity model this structure is not visible.

The following excavation confirmed that the settlement horizon lies at a depth of 3 m which is beyond the investigation depth of a magnetic survey. The field example of Pliska demonstrates that settlement horizons can be detected by SIP.

As loam is a common building material during all historical periods SIP might be a suitable method at sites where the necessary depth of investigation extends that of a conventional magnetic survey.

### (c) wooden remains

The results reported by Losito et al. (2001) and Finzi-Contini (2001) were the first indication that IP might be a suitable method for the detection of wooden remains.

It was assumed that wood with its characteristic year rings and complex pore structure causes membrane polarisation effects.

First wood samples of different type and age were investigated in the laboratory.

The astonishing result of the laboratory measurements was that all samples showed polarisation effects. Wood can therefore be regarded as a polarisable material.

As the objective of our research was the detection of wooden remains, a Bronze-Aged plankway was selected for a first field test. The plankway is located in the Federsee Bog near Lake Konstanz. This bog with its optimal preservation conditions is of international importance for archaeology. Pile dwelling settlements dating back to the Eneolithicum have been revealed.

Based on dendrochronological data archaeologists concluded that the plankway was renewed twice at intervals of 50 years until it formed a 9 m wide track. The southern lane is the oldest part of the plankway and consists mainly of alder wood, being repaired later with beech planks. For the middle and northern lane beech and ash was used. Altogether the plankway represents a heterogeneous mixture of four different wood species: beech, ash, birch and alder.

After an excavation pieces of ash and alder were provided for laboratory measurement in order to prove if the wood of the Bronze Age still causes polarisation effects.

Strong phase maxima were observed between 1 and 20 Hz and therefore the field measurements were carried out in the same frequency range. Moreover a strong anisotropy was observed between samples parallel and perpendicular to the year ring axis. As a result anisotropy effects had to be considered and two profiles were measured, one parallel and one perpendicular to the direction of the plankway.

In contrast to the resistivity measurement, the plankway could be identified by weakly increased polarisation effects. The observed contrast between the plankway and the surrounding soil is less than 2 mrad, which is almost the limit of accuracy of the SIP-256 instrument used. This is the first time wooden remains have been detected by SIP. Although it was not possible to detect the southern and thus oldest lane of the plankway the feature was located with an accuracy of  $\pm 0.3$  m in depth.

An important result of the investigation was that the remains could be found with a frequency of 4.77 Hz lying in the range where the phase maxima were observed in the laboratory.

The frequency spectra observed in the laboratory thus could be qualitatively reproduced in the field. This observation confirms the laboratory results and shows the importance of previous investigations.

## Conclusions

The development of the multichannel geoelectrical instrument SIP-256 enables the realization of 3D surveys in a reasonable time. This was important for the application of SIP in archaeological prospection, where 3D objects should be investigated.

The field results presented show that SIP can play an important role in archaeological prospection. Compared to a conventional resistivity survey the additional measurement of the phase angle yields important information about archaeological structures. The polarisation effect has been established as a groundspecific parameter that is able to detect archaeological remains that can not be detected by other geophysical methods.

As could be shown on a smelting site the advantage of SIP lies in the detection of slag pits. Numerous features could be detected by the method, whereas a resistivity survey was not able to identify all metal deposits. Moreover the course of a brook was identified by SIP.

In Pliska (Bulgaria) medieval settlement remains were found in a depth of 3 m. Loam was deposited on a former settlement horizon. As loam is a common building material that was accumulated after a house was abandoned the subsurface structure indicated a settlement.

A conventional resistivity survey was not able to detect the remains and as a result this important information would have been lost without the use of SIP.

The importance of wooden remains, because of their use for dendrochronological dating might open a wide field of application in archaeological prospection.

First laboratory investigations confirmed that wood can be regarded as a polarisable material. The laboratory results could be qualitatively reproduced in the field. A Bronze-Age plankway was found using SIP. As a result important parameters such as the most useful measurement frequency can be derived from laboratory results.

Although these first results have to be confirmed by further measurements including a 3D survey a new field of application was found for this electrical method. The observed contrast between the plankway and the surrounding soil is less than 2 mrad, which is almost the limit of accuracy of the used SIP-256 instrument.

However, the development of more accurate multichannel instruments will establish the SIP method in archaeological prospection.

Concluding the results it is recommended to carry out SIP measurements rather than a conventional resistivity survey. Using multichannel geoelectrical instruments it is nowadays possible to realise SIP in a reasonable time. Preliminary laboratory studies of archaeological materials yields important information. This not only opens new fields of application for the method but also helps to choose the right measurement frequency. In the case that very low frequencies, e. g. 0.01 Hz, have to be used which noticeable prolongs the measurements time it is recommended to carry out a vertical sounding at an appropriate location in order to verify the profit of SIP.

## Anhang A: Das Programm *eichpop.exe* und die Korrekturparameter der Remote Units

Programm: *eichpop.exe*

Aufruf: *eichpop*

Kurzbeschreibung:

Das Programm dient zur Ermittlung der Korrekturparameter in Abhängigkeit von der Messfrequenz. Messungen an einem Eichschaltkreis (Kap. 4.5) ergeben Abweichungen von der erwarteten 0-Phase. Diese Abweichungen sind auf elektronische Bauteile der RU's und Kabelverbindungen zurückzuführen.

Nach Durchführung der Eichmessung müssen insgesamt 48 Dateien, welche die Bezeichnungen *f01m1005.pop* bis *f12m4005.pop* tragen, vorliegen. Die zweite und dritte Ziffer steht für die Messfrequenz, die fünfte Ziffer für die Einzelmessung zur jeweiligen Frequenz. Die 12 Frequenzen sind 1.06 (f01), 1.59 (f02), 3.18 (f03), 4.77 (f04), 6.36 (f05), 9.54 (f06), 14.3 (f07), 19.1 (f08), 28.6 (f09), 42.9 (f10), 57.3 (f11) und 171.9 Hz (f12).

Der Korrekturwert muß innerhalb der Varianz liegen. Alle ermittelten Parameter werden in der Datei *newsipcal.tab* gespeichert. Die synthetischen Frequenzspektren und die erreichte Anpassung finden sich in der Datei *information.dat*. Ist die Kalibrierung abgeschlossen, werden alle Kalibrierfaktoren in die Datei *sipcal.tab* übernommen, auf die bei der Datenauswertung später zurückgegriffen werden kann. Inhalt der aktuellen Datei *sipcal.tab*:

RU	a	b	RU	a	b
5	1.024	0.000141	40	1.019	0.000133
6	1.021	0.000123	41	1.024	0.000136
7	1.024	0.000117	42	1.021	0.000118
8	1.020	0.000138	43	1.021	0.000189
12	1.020	0.000114	44	1.023	0.000103
13	1.033	0.000646	45	1.023	0.000128
14	1.020	0.000117	46	1.025	0.000140
15	1.020	0.000115	47	1.015	0.000125
16	1.021	0.000133	48	1.023	0.000119
19	1.021	0.000118	49	1.025	0.000141
20	1.020	0.000114	50	1.018	0.000124
21	1.026	0.000122	51	1.015	0.000015
25	1.018	0.000133	52	1.025	0.000113
26	1.023	0.000135	53	1.021	0.000110
28	1.025	0.000131	54	1.022	0.000141
29	1.024	0.000125	55	1.022	0.000132
30	1.023	0.000011	56	1.022	0.000154
33	1.020	0.000111	57	1.018	0.000125
34	1.020	0.000109	58	1.027	0.000136
35	1.008	0.000106	60	1.021	0.000133
36	1.011	0.000101	61	1.020	0.000130
37	1.019	0.000103	102	1.035	0.000134
38	1.018	0.000137	104	1.029	0.000144
39	1.021	0.000114			



## Anhang B: Software zur Datenbearbeitung

Programm: *variance.m* (Matlab-Anwendung)

Aufruf: *variance*('<datei>', '<generator>', '<stack>')

<datei>      Dateiname der ersten \*.rho-Datei, z. B. 'test001.rho'  
 <generator>   *int* für internen Generator; *ext* für externen Generator  
 <stack>       4 für 4fache Stapelung oder 8 für 8fache Stapelung

Kurzbeschreibung:

Berechnung und Visualisierung der Varianzen der scheinbaren Phasen und scheinbaren spezifischen Widerstände. Zur Berechnung werden die \*.rho-Dateien herangezogen. Die  $\rho_a$ -Werte und scheinbaren Phasen aller vier Zeitfenster dienen zur Berechnung einer Varianz, deren Häufigkeitsverteilung sowohl für die normale, als auch reverse Messung dargestellt wird. Eingabeparameter sind der Dateiname \*.rho, die Generatorbezeichnung 'int' bzw. 'ext' und die Anzahl der Stapelwerte stack=4,8, usw.

Programm: *optipop.exe*

Aufruf: *optipop* [<Geometrie>] <Datei.pop> <Zieldatei.pop>

Bei Aufruf *optipop* (ohne Parameter) erhält man eine Übersicht der Eingabeparameter.

Angaben zu <Geometrie>

-<B>   Kabelauslage unendl. Einspeiseelektrode B in Metern  
 -<b>   Winkel zwischen Auslage zu B zum Messprofil [int]  
 -<N>   Kabelauslage unendl. Potentialelekt. N in Meter  
 -<a>   Winkel zwischen dem Kabel zu N und dem Messprofil [int]

Kurzbeschreibung:

Programm zum Austausch des Pol-Pol-Geometriefaktors durch einen Faktor, der die wirklichen Kabelauslagen wiedergibt. (siehe auch paper von Robain et al., 1999)

### Programm: *statistik.m* (Matlab-Anwendung)

Aufruf: *statistik*('<datei>', '<plot>')

<datei>	Dateiname der gemessenen Pseudosektion
<plot>	norm Messwerte werden gegen die Pseudotiefe aufgetragen.
	corr Korrelation der Messwerte
	sdev Darstellung der Verteilungsfunktionen
	erro Darstellung der Messfehler

Kurzbeschreibung:

Das Programm erlaubt eine Beurteilung der Datenqualität und setzt die gewünschten Informationen graphisch um. Unter anderem werden Größen wie der Imaginär- und Realteil jedes Messwerts berechnet, Daten miteinander korreliert und die Messfehler in Abhängigkeit der Absolutwerte sowie der Pseudotiefe dargestellt.

### Programm: *datacheck.m* (Matlab-Anwendung)

Aufruf: *datacheck*(<Datei> <Zieldatei>)

Kurzbeschreibung:

Darstellung der Meßwerte der einzelnen Pseudotiefen in xy-plots.

Einzelne Daten können eliminiert oder durch Interpolation, den Median oder den reziproken-Messwert ersetzt werden.

Als Dateiname wird der komplette Name der Pseudosektion angegeben, inkl. Endung.

### Programm: *eleffekt.exe*

Aufruf: *eleffekt* [<Parameter>] <Profil1.did,pop,pdi> <zieldatei.dat>

Bei Aufruf *eleffekt* (ohne Parameter) erhält man eine Übersicht der Eingabeparameter.

Parameter:

-<c> -c(x)-> Position der Zaehlstelle im Filenamen (int)(default=5)

-<a> -a(x) -> Anzahl der zu bearbeitenden Profile(default=1)

-<f>

-f0 -> Glaettung mit dem Mittelwert

-f1 -> Glaettung mit dem Median (default)

-f2 -> Glaettung mit einem vorgegebenene Wert

-f3 -> Glaettung mit dem jeweils groessten Median

-<d>

-d0 -> alle Phasen und Widerstaende werden bearbeitet(default)

-d1 -> nur die normalen Widerstaende und Phasen werden bearbeitet

-d2 -> nur die reziproken Widerstaende und Phasen werden bearbeitet

-<e>  
 -e0 -> vertikaler Widerstandsgradient wird beseitigt  
 -e1 -> Effekte durch Einspeiseelektroden werden beseitigt  
 -e2 -> Effekt durch Potentialelektroden werden beseitigt  
 -<k>  
 -k0 -> did (default), Angabe der Konfiguration)  
 -k1 -> pdi  
 -k1 -> pop  
 -<x>  
 -x0 kein Kommentar(default),  
 -x1 Kommentar>

#### Kurzbeschreibung:

Das Programm orientiert sich an dem paper von Ritz et al. (1999). Improvement to resistivity pseudosection modelling by removal of near-surface inhomogeneity effects: Application to a soil system in south Cameroon. *Geophysical Prospecting*, 47, 85-101

Mit diesem Programm werden Störeffekte, die bei schlechter Ankopplung oder Inhomogenitäten der Oberfläche entstehen, beseitigt.

Dabei werden nacheinander die Mediane der Pseudotiefen, der Einspeise- und der Potentialspuren ermittelt. Nach Abzug des jeweiligen Medians von den Messdaten, bleiben im wesentlichen nur noch Effekte erhalten, die von Störkörpern im Untergrund zu erwarten sind.

Um das Rauschen der Störeinflüsse zu beseitigen wird der Hintergrund homogenisiert, d.h. im inversen Prozeß werden den Residuen geglättete Meridiane aufaddiert.

Das Resultat ist sind von Elektrodenspuren beseitigte Messdaten.

#### Programm: *pfecalc.exe*

Aufruf: *pfecalc* [<Parameter>] <Datei> <Zieldatei>

Bei Aufruf *pfecalc* (ohne Parameter) erhält man eine Übersicht der Eingabeparameter..

#### Parameter:

-<c> -c(x)-> Position der Frequenzangabe im Filenamen  
 -<a> -a(x) -> Anzahl der Referenzfrequenzen  $1 \leq a \leq 3$  (int)  
 -<f> -f(x) -> hoechste Frequenz des Spektrums in Hz (int), z.B. -f28(default), -f42 od. -f171  
 -<x> -x0=kein Kommentar, -x1=Kommentar>

#### Kurzbeschreibung:

Mit dem Programm *pfecalc* wird der percent frequency effect (PFE) nach Telford p.582, (9.2b) berechnet. Die Basisfrequenz, d.h.  $\rho(\text{dc})$  wird durch den Eingabefile vorgegeben. Die höchste gemessene Frequenz wir durch die Angabe -f(int) angegeben. Anschließend wird der PFE für alle vorhandenen höheren Frequenzen in Bezug auf die Basisfrequenz errechnet. Die berechneten PFE's finden sich in der Zieldatei wieder.



## Anhang C: Das Programm d3d und alle verfügbaren d3d-Filter

Programm: d3d.exe

Aufruf: *d3d* [<Parameter>] <inf-Datei> <Zieldatei>

Bei Aufruf *d3d* (ohne Parameter) erhält man eine Übersicht der Eingabeparameter.  
Bei Aufruf *d3d ?* erfolgt eine Kurzbeschreibung aller verfügbarer Filter.

Parameter:

<inf-Datei> : Datei mit Informationen zum Elektrodenarray und der Liste aller Pseudosektionen (\*.did, \*.pop, \*.pdi), die zu einem 3D-Datensatz zusammengefasst werden.

-f <Nummer des Filters> : Filternummer (siehe aktuelle Liste)

-p<Phasen> : Phasen werden berücksichtigt.

-P<pfad1>,<pfad2>,...,<pfadN> : Pfad der Dateien (optional)

-F<int> : Laborfaktor (optional). Multipliziert die Elektordenabstände mit einem konstanten Faktor.

-S : Pseudotiefe  $z = -1$  wird nicht berücksichtigt (optional)

Kurzbeschreibung:

Mit dem Programm *d3d* werden die Datensätze selektiert und in ein, für die Inversionprogramme Res2DInv bzw. Res3DInv lesbares, Datenformat konvertiert. In das Programm sind zahlreiche Filter integriert. Für das Programm muss eine \*.inf-Datei erstellt werden, die alle Informationen zum Elektrodenarray enthält und die Namen der Datensätze enthält, auf die das Programm zugreifen soll.

Am Ende des Programms wird eine Datei mit Namen *logfile.r3d* erstellt, in der sich alle Messdaten aufsteigend sortiert wiederfinden. Außerdem gibt die Datei Auskunft über die selektierten und nichtberücksichtigten Daten.

Liste der verfügbaren Filter:

*Filter 10:*

Filter zur Bearbeitung von Dipol-Dipol und Pol-Pol-Datensätzen.

Daten außerhalb eines vorgegebenen Wertebereichs werden ausgefiltert.

Bei Auswahl 0 (alle Daten werden einbezogen), wird eine Differenz (diff, phdiff) der normalen und reziproken Werte als zusätzliches Auswahlkriterium herangezogen.

Falls  $\Delta \rho < \text{diff}$  oder  $\Delta \text{Phase} < \text{phdiff}$  werden die Daten mit dem geringeren Messfehler übernommen. Auswahl 1 (normal) oder 2 (reziprok); Daten, die im vorgegebenen Wertebereich liegen werden übernommen.

*Filter 11:*

Filter zur Bearbeitung von Dipol-Dipol, Pol-Dipol und Pol-Pol-Datensätzen.  
 Daten außerhalb eines vorgegebenen Wertebereichse werden ausgefiltert.  
 Zusätzlich kann die Abweichung von der Rezirposität als Krieterium herangezogen werden.

*Filter 12:*

Filter zur Bearbeitung von Dipol-Dipol und Pol-Pol-Datensätzen.  
 Daten außerhalb eines vorgegebenen Wertebereichs werden ausgefiltert.  
 Falls  $\delta \rho_a < \text{diff}$  und  $\delta \text{phase} < \text{phdiff}$  wird versucht, einen Wert zu ermitteln,  
 der im Fehlerbereich beider Werte liegt. Sonst wird der Mittelwert aus normaler und reziproker  
 Messung gebildet.

*Filter 13:*

Filter zur Bearbeitung von Dipol-Dipol und Pol-Pol-Datensätzen.  
 Daten außerhalb des vorgegebenen Wertebereichs werden ausgefiltert.  
 Falls  $\rho_a$  außerhalb des Wertebereichs liegt und sein Fehler kleiner als der reziproke Wert ist,  
 werden beide Werte verworfen.  
 Analog umgekehrt. Falls nur einer der Werte im Wertebereich liegt und zudem einen geringern  
 Fehler besitzt als der reziproke Werte, wird der Wert übernommen.  
 Die Phasen müssen ebenfalls in einem vorgegebenen Bereich liegen. Grundsätzlich wird die  
 Phase übernommen, die dem übernommenen Rhoa-Wert zugeordnet ist.  
 Bei den übernommenen Phasen wird aber ebenfalls auf den Messfehler geachtet.  
 Um große Datenverlust aufzufangen, können gefilterte Werte durch den Median ersetzt wer-  
 den.

*Filter 14:*

Filter zur Bearbeitung von Dipol-Dipol (did), Pol-Dipol(pdi) und Pol-Pol (pop)-Datensätzen.  
 Voraussetzung:  $\rho_a$ -Daten besitzen Gauss'sche-Normalverteilung.  
 Daten außerhalb des vorgegebenen Wertebereichse werden ausgefiltert.  
 Der Wertebereich liegt bei Rhoa (normalverteilt) innerhalb der  $\pm 2.5 \cdot \text{sigma}$  Grenze und bei  
 den Phasen definiert sich die obere Grenze durch den Median+ 40% der Daten, die untere Gren-  
 ze durch den Median-40% Daten.  
 Während der Filterung findet eine Abfrage (data) statt:  
 1=nur Rhoa-Werte werden gefiltert  
 2=nur RevRhoa-Werte werden gefiltert  
 3=beide Rhoa-Werte werden gefiltert und der Mittelwert gebildet (nur für did und pop).  
 4=Phasen werden gefiltert  
 5=RevPhasen werden gefiltert  
 6=beide Phasen-Werte werden gefiltert und der Mittelwert gebildet (nur für did und pop).

## Anhang D: Visualisierung der Daten.

Zur Visualisierung von Pseudosektionen und 2D-Untergrundmodellen stehen sogenannte Surfer-Scripts zur Verfügung. Diese Scripts erlauben eine automatisierte Darstellung der Daten. Die Scripts sind in der Programmiersprache Basic geschrieben und im Programm Surfer der Firma Golden Software integriert.

Folgende Scripts stehen zur Verfügung:

*mrاد\_image.bas*

Darstellung der Pseudosektionen; Jedem Messwert wird ein Gitterpunkt und eine Farbstufe zugeordnet. Insgesamt werden vier Abbildungen erstellt. Je Messrichtung Phase und Widerstand. Die Darstellung werden abschließend automatisch abgespeichert. Vor dem Start des Programms muß die Anzahl der Koordinaten in x- und z-Richtung festgelegt werden. Es besteht die Möglichkeit den Wertebereich einzuschränken.

*mrاد\_contour.bas*

Analog *mrاد\_image* aber Konturplot.

*r2d\_image.bas*

Pseudosektionen, welche mit dem Programm *d3d* bearbeitet wurden. Die Pseudosektionen der gefilterten Phasen- und Widerstandswerte werden in einem Plot dargestellt und abgespeichert.

*r2d\_contour.bas*

Analog *r2d\_image* aber Konturplot.

*xyz\_image.bas*

Daten von 2D-Untergrundmodellen, welche das Programm *Res2DInv* in *xyz*-Dateien exportiert, können graphisch umgesetzt werden. Ein Plot beinhaltet die Inversionsmodelle von Phase und Widerstand.

*xyz\_contour.bas*

Analog *xyz\_image* aber Konturplot.

## Literatur:

- Aitken, M. J.** (1974): *Physics and archaeology*. 2nd edition Oxford (Clarendon Press).
- Alekseyev, V.; Zhurbin, I. and Malyugin, D.** (1996): Multigrid electrometry in the survey of archaeological remains. *Archaeological Prospection*, 3, 219-229.
- Angoran, Y. und Madden, T.** (1977): Induced Polarization: a preliminary study of its chemical basis. *Geophysics*, 42/4, S. 788-803.
- Aristodemou, E. und Thomas-Betts, A.** (2000): DC resistivity and induced polarization investigations at a waste disposal site and its environments. *Journal of Applied Geophysics*, 44, S. 275-302.
- Aspinall, A. and Crummett, J. G.** (1997): The electrical pseudo-section. *Archaeological Prospection*, 4, S. 37-47.
- Aspinall, A. und Lynam, J.** (1968): Induced polarization as a technique for archaeological surveying. *Prospezioni archeologiche*, 3, S. 91-93.
- Aspinall, A. und Lynam, J. T.** (1970): An induced polarization instrument for the detection of near-surface features. In: *Prospezioni archeologiche*, 5, S. 67-75.
- Atkinson, R. J. C.** (1952): *Methodes electriques de prospection en archaeologie*. La Decouvert de Passe, Picard.
- Barker, R. D.** (1989): Depth of investigation of collinear symmetrical four-electrode arrays. *Geophysics*, 54/8, S. 1031-1037.
- Basile, V.; Carrozzo, S.** (2000): A ground-penetrating radar survey for archaeological investigations in an urban area (Lecce, Italy). *Journal of Applied Geophysics*, 44, S. 15-32.
- Bauerndorf, K.** (1997): Die Wasserwirtschaftsanlage der Walkenrieder Zisterzienser im Pandelbachtal. *Unser Harz. Zeitschrift f. Heimatgeschichte, Brauchtum und Natur*, 45/8.
- Bauerochse, A.** (2000): Prospektionsmethoden in der Moorarchäologie. *Archäologische Mitteilungen aus Nordwestdeutschland, Sonderdruck*, 23, Landesmuseum f. Mensch und Natur.
- Beard, L. P. und Tripp, A. C.** (1995): Investigating the resolution of IP arrays using inverse theory. *Geophysics*, 60/5, S. 1326-1341.
- Becker, H.** (1996): *Archäologische Prospektion. Luftbildarchäologie und Geophysik*. Arbeitshefte des Bayer. Landesamtes f. Denkmalpflege, München, Band 59.
- Becker, H.** (1996): Entwicklung und Einsatz von Multi-Sensor-Konfigurationen zur magnetischen Prospektion archäologischer Denkmäler. *Das archäologische Jahr in Bayern*, S. 195-196.
- Belshè, J. C.** (1957): Recent magnetic investigations at Cambridge University. *Advances in Physics*, 6, S. 192-193.
- Beresnev, I. A., Hruby, C. E. and Davis, C. A.** (2002): The use of multi-electrode resistivity imaging in gravel prospecting. *Journal of Applied Geophysics*, 49, 245-254.

- Bertin , J. and Loeb, J.** (1976): Experimental and theoretical aspects of induced polarization. Vol. 1: Presentation and application of the IP method, case histories. GeosExploration monographs, 7, Borntraeger, Berlin-Stuttgart
- Bigalke, J.; Schleifer, N.; Kötter, M. und Junge, A.** (1999): SIP-256: Eine mehrkanalige IP-Apparatur zur schnellen Bestimmung der komplexen elektrischen Leitfähigkeit des Untergrundes. Mitteilungsheft der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft (DGG), 4, S. 36-44.
- Bigalke, J. und Junge, A.** (1999): Using evidence of non-linear induced polarization for detecting extended ore mineralization. Geophysical Journal International, 137, S. 516-520.
- Billamboz, A.** (1997): Zur dendrochronologischen Datierung der Bohlenwege an der Wührstraße westlich von Bad Buchau, Kreis Biberach. Archäologische Ausgrabungen Baden-Württemberg. S. 50-52.
- Bleil, D.F.** (1953): Induced Polarization, a method of geophysical prospecting. Geophysics, 18, S. 636-661.
- Bode, A.** (1928): Die Reste alter Hüttenbetriebe im Mittel- und Westtharz. Jb. d. Geograph. Ges., Hannover.
- Börner, F. D.; Gruhne, M. und Schön, J.** (1993): Contamination indications derived from electrical properties in the low frequency range. Geophysical Prospecting, 41, S. 83-98.
- Börner, F. D.; Schopper, J. R. und Weller, A.** (1996): Evaluation of transport and storage properties in the soil and groundwater zone from induced polarization measurements. Geophysical Prospecting, 44, 583-601.
- Broyden, C. G.** (1972): Quasi-Newton methods. Numerical methods for unconstrained optimization. Ed. W. Murray, Academic Press, Inc., S. 87-106.
- Burr-Brown** (1997): 24-bit analog-to-digital converter. Specification of the ADS1210/1211 ADC's. PDS-1284C, Burr-Brown Corporation, U.S.A.
- Bussian, A.** (1983): Electrical conductance in a porous medium. Geophysics, 48, S. 1258-1268.
- Caglar, I.** (2000): A method to remove electromagnetic coupling from Induced Polarization data for an „exponential earth model“. Pure and Applied Geophysics, 157/10, S. 1729-1748.
- Carson, H. H.** (1962): A seismic survey at Harpers Ferry. Archaeometry, 5, S. 119-122.
- Claerbout, J. F. und Muir, F.** (1973): Robust modeling with erratic data. Geophysics, 38/5, S. 826-844.
- Claerbout, J. F. und Muir, F.** (1973): Robust modelling with erratic data. Geophysics, 38/5, S. 826-844.
- Coggon, J. H.** (1971): Electromagnetic and electrical modeling by the finite element method. Geophysics, 36/1, S. 132-155.
- Cole, K. S. und Cole, R. H.** (1941): Dispersion and absorption in dielectrics; J. Chem. Phys., 9, S. 341.
- Cornell, R. M. und Schwertmann, U.** (1996): The iron oxides. Weinheim, VCH Verlagsgesellschaft.

- Dabas, M.; Tabbagh, A. und Tabbagh, J.** (1994): 3D-inversion in subsurface electrical surveying-I. Theory. *Geophysical Journal International*, 119, S. 975-990.
- Dahlin, T.** (2000): Short note on electrode charge-up effects in DC resistivity data acquisition using multi-electrode arrays. *Geophysical Prospecting*, 48, S. 181-187.
- Dahlin, T. und Bing, Z.** (2001): A numerical comparison of 2D resistivity imaging with eight electrode arrays. Proceedings of the 7th Meeting Environmental and Engineering Geophysics (EEGS-ES), Birmingham, ELEM 01.
- Dahlin, T.; Leroux, V. und Nisson, J.** (2002): Measuring techniques in induced polarisation imaging. *Journal of Applied Geophysics*, 50, S. 279-298.
- David, A.** (1995): Geophysical survey in archaeological field evaluation. Research & Professional Services Guidelines of the English Heritage. Ancient Monumentary Library.
- de Groot-Hedlin, C. und Constable S.** (1990): Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. *Geophysics*, 55, S. 1613-1624.
- Dey, A. und Morrison, F.** (1973): Electromagnetic coupling in frequency and time-domain induced polarization surveys over a multilayered earth. *Geophysics*, 38, S. 380-405.
- Dietrich, P.** (1999): Konzeption und Auswertung gleichstromgeoelektrischer Tracerversuche unter Verwendung von Sensitivitätskoeffizienten. Tübinger geowissenschaftliche Arbeiten (TGA). Reihe C: Hydro-, Ingenieur- und Umweltgeologie, C50. 130 S.
- Doneus, M.; Eder-Hinterleitner, A. und Neubauer, W.** (2001): Archaeological Prospection. 4th International Conference on Archaeological Prospection. Vienna, Austrian Academy of Science Press.
- Eder-Hinterleitner, A.; Neubauer, W. und Melichar, P.** (1996): Restoring magnetic anomalies. *Archaeological Prospection*, 3, S. 185-197.
- Edwards, L. S.** (1977): A modified pseudosection for resistivity and IP. *Geophysics*, 42/5, S. 1020-1036.
- Fassbinder, J. W. E. und Irlinger, W. E.** (1999): Archaeological Prospection. 3rd International Conference on Archaeological Prospection, Munich. Arbeitshefte des Bayer. Landesamtes f. Denkmalpflege, Band 108.
- Fassbinder, J. W. E. und Stanjek, H.** (1990): Occurrence of magnetic bacteria in soil. *Nature*, 343, S. 161-163.
- Finzini-Contini, G.** (2001): Resistivity/ IP surveys on a large ancient harbour (400 B. C.- 400 A. D.) produce unexpectedly reliable pseudo-tomographies of roman boats embedded by fluvial sediments (Pisa, Italy). *European Geophysical Society*, Nizza.
- Fox, R. C.; Hohmann, G. W.; Killpacks, T. J. und Rijo, L.** (1980): Topographic effects in resistivity and induced polarization surveys. *Geophysics*, 45, S. 75-93.
- Friedel, S.** (1999): Über die Abbildungseigenschaften der geoelektrischen Impedanz-tomographie unter Berücksichtigung von endlicher Anzahl und endlicher Genauigkeit der Meßdaten. Dissertation, Fakultät für Physik und Geowissenschaften der Universität Leipzig.

- Grahame, D. C.** (1947): The electrical double layer and the theory of electrocapillarity. *Chem. Rev.*, 41, 441-501.
- Habberjam, G. M.** (1979): Apparent resistivity observations and the use of square array techniques. *Geoexploration monographs*, 9, Borntraeger, Berlin-Stuttgart.
- Hamming, R. W.** (1977): *Digital filters*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Hartlaub, M.** (2001): Suche nach archäologischen Strukturen mit Hilfe von geomagnetischen Messungen. Diplomarbeit am Institut f. Meteorologie und Geophysik der J. W. Goethe-Universität Frankfurt/M.
- Henkel, J.** (1958): Some theoretical considerations on induced polarization. *Geophysics*, 23/2, S. 299-304.
- Henning, J.** (2000): Pliska - Machtzentrum Zwischen Byzanz und Abendland; Neue Wege in der Archäologie. *Forschung Frankfurt*, 2, S. 6-15.
- Henning, J.** (1980): Pliska - monumentales Zeugnis vom Beginn der Geschichte des bulgarischen Staates. *Das Altertum*, 26, S. 18-26.
- Herbich, T.; Misiewicz, K. und Teschauer, O.** (1997): Multilevel resistivity prospecting of architectural remains: The Schwarzach case study. *Archaeological Prospection*, 4, S. 105-112.
- Hesse, A, Jolivet, A. und Tabbagh, A.** (1986): New prospects in shallow depth electrical surveying for archaeological and pedological applications. *Geophysics*, 51, S. 585-594.
- Hesse, A.** (1999): Multi-parametric survey for archaeology: how and why, or how and why not? *Journal of Applied Geophysics*, 41, S. 157-168.
- Heumüller, M.; Hohl, W. und Schlichterle, H.** (1999): Weiter Untersuchungen an den Bohlenwegen zwischen Bad Buchau und Kappel am Federsee, Kreis Biberach. *Archäologische Ausgrabungen Baden-Württemberg*. S. 48-50.
- Heumüller, M. und Schlichterle, H.** (1997): Neolithische Siedlungen in den >>Torwiesen<< und weitere Erkenntnisse über die Bohlenwege bei der Wührstraße von Bad Buchau, Kreis Biberach. *Archäologische Ausgrabungen Baden-Württemberg*. S. 48-51.
- Hohl, W.; Schlichterle, H. und Strobel, M.** (1998): Weitere Grabungen in der endneolithischen Siedlung Torwiesen II und in den metallzeitlichen Bohlenwegen beim Moorheilbad in bad Buchau, Kreis Biberach. *Archäologische Ausgrabungen Baden-Württemberg*. S. 65-69.
- Hohmann, G.** (1973): Electromagnetic coupling between grounded wires at the surface of a two-layer earth. *Geophysics*, 38/5, S. 854-863.
- Iliceto, V.; Santarato, G. und Veronese, S.** (1982): An approach to the identification of fine sediments by induced polarization laboratory measurements. *Geophysical Prospecting*, 30, S. 331-347.
- Johnson, I.** (1984): Spectral induced polarization parameters as determined through time-domain measurements. *Geophysics*, 49/11, S. 1993-2003.
- Kampke, A.** (1999): Focused imaging of electrical resistivity data in archaeological prospecting. *Journal of Applied Geophysics*, 41, S. 215-227.

- Kampke, A.** (1996): Modellierung und Inversion von Daten der Induzierten Polarisation für zweidimensionale Verteilungen der elektrischen Leitfähigkeit. Diplomarbeit. Institut für Geophysik und Meteorologie, Braunschweig.
- Kansy, A. und Hennig, Th.** (2000): Magnetische Untersuchungen an einem mittelalterlichen Verhüttungsplatz. Studienarbeit am Institut f. Geophysik der TU Clausthal.
- Karastathis, V. K.; Arvanitits, M. and Jones, E. R.** (2002): 3D structures of the Xerxes canal. New data bolster the existence of the ancient canal. 3rd Balkan Geophysical Congress, Sofia, Bulgaria.
- Keller, G. V. und Fischknecht, F. C.** (1966): Electrical methods in geophysical prospecting. Pergamon Press, London.
- Klein, J.; Biegler, T. und Horne, M.** (1984): Mineral interfacial processes in the method of induced polarization. *Geophysics*, 49/7, S. 1105-1114.
- Klein J. und Shuey, R.** (1978a): Nonlinear impedance of mineral-electrolyte interfaces: part I pyrite. *Geophysics*, 43/6, S. 1222-1234.
- Klein, J. und Shuey, R.** (1978b): Nonlinear Impedance of mineral-electrolyte interfaces: part II. Galena, Chalcopyrite, and Graphite. *Geophysics*, 43/6, S. 1235-1249.
- Knödel, K.; Krummel, H. und Lange, G.** (1997): Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten. Bundesanstalt f. Geowissenschaften u. Rohstoffe (BGR), Springer Verlag, Berlin-Heidelberg.
- Kötter, M.** (2001): Modellstudien anhand geoelektrischer Messungen an einem archäologischen Objekt. Diplomarbeit am Institut f. Meteorologie und Geophysik der J. W. Goethe-Universität Frankfurt/M.
- Le Borgnè, E.** (1955): Susceptibilité magnétique anormale du sol superficiel. *Ann. Geophys.*, 11, S. 399-419.
- Leckebusch, J.** (2001): Die Anwendung des Bodenradars (GPR) in der archäologischen Prospektion. *Internationale Archäologie, Reihe Naturwissenschaft und Technologie*, Band 3, 161 S., Verlag Marie Leidorf GmbH
- Leckebusch, J. und Peikert, R.** (1999): Automated extraction of 3D Features from Georadar Data for Interpretation and Visualisation. *Arbeitshefte des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege*, 108, 52.
- Linford, N. T.** (1998): Geophysical survey at Boden Vean, Cornwall, including an assessment of the microgravity technique for the location of suspected archaeological void features. *Archaeometry*, 40, S. 187-216.
- Loke, M. H. und Barker, R. D.** (1995): Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections. *Geophysics*, 60, S. 1682-1690.
- Loke, M. H. und Barker, R. D.** (1996a): Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44, S. 499-523.
- Loke, M. H. und Barker, R. D.** (1996b): Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion. *Geophysical Prospecting*, 44, S. 499-523.

- Lorra, S.** (1996): Geophysikalische Prospektion und Modellierung archäologischer Fundplätze in Schleswig-Holstein, Bonn, Universitätsforschung zur Prähistorischen Archäologie, Band 36, Dr. Rudolf Habelt GmbH.
- Losito, G.** (2001): Frequency electrical behaviour of soils and archaeological woods at laboratory and field scales in Roman boat area of Pisa-San Rossore (Italy). European Geophysical Society, Nizza.
- Luo, Y. und Zhang, G.** (1998): Theory and Application of Spectral Induced Polarization. Geophysical Monograph Series, 8, Society of Exploration Geophysicists (SEG).
- Maher, B. A.** (1986): Characterization of soils by mineral magnetic measurements. Phys. Earth Planet. Int., 42, 76-92.
- Maher, B. A. und Taylor, R. M.** (1989): Origin of soil magnetite. Nature, 340, S. 106.
- Marshall, D. und Madden T.** (1959): Induced Polarization, a study of its causes. Geophysics, 24/4, S. 790-816.
- Mullins, C. E.** (1977): Magnetic susceptibility of soils and its significance in soil science - a review. J. Soil Sci., 36, S. 495-512.
- Neubauer, W. und Eder-Hinterleitner, A.** (1997): Resistivity and magnetics of the Roman Town Carnuntum, Austria: an example of combined interpretation of prospection data. Archaeological Prospection, 4, S. 179-189.
- Neubauer, W.; Eder-Hinterleitner, A.; Seren, S. and Melichar, P.** (2002): Georadar in the Roman civil town Carnuntum, Austria: an approach for archaeological interpretation of GPR data. Archaeological Prospection, 3, S.135-156.
- Noel, M. und Xu, B.** (1991): Archaeological investigation by electrical resistivity tomography: a preliminary study. Geophysical Journal International, 107, S. 95-102.
- Olayinka, A. I. und Weller, A.** (1997): The inversion of geoelectrical data for hydrological applications in crystalline basement areas of Nigeria. Journal of Applied Geophysics, 37, S 103-115.
- Oldenburg, D. W.; Mc Gillivray, P. R. und Ellis, R. G.** (1993): Generalized subspace methods for large-scale inverse problems. Geophysical Journal International, 114, S. 12-20.
- Oldenburg, D. W. und Li, Y.** (1994): Inversion of induced polarsiation data. Geophysics, 59/9, S. 1327-1341.
- Oldenburg, D. W. und Li, Y.** (1999): Estimating depth of investigation in DC resistivity and IP surveys. Geophysics, 64/2, S. 403-416.
- Olhoeft, G.** (1985): Low-frequency electrical properties. Geophysics, 50/12, S. 2492-2503.
- Panissod, C.; Lajarthe, M. und Tabbagh, A.** (1997): Potential focusing: a new multielectrode array concept, simulation study, and field tests in archaeological prospecting. Journal of Applied Geophysics, 38, S. 1-23.
- Parra, J.** (1984): Effects of pipelines on spectral induced-polarization surveys. Geophysics, 49, S. 1979-1992.

- Parasnis, D. S.** (1975): Mining Geophysics. Elseviere Scientific Publishing Company. 395 S.
- Pelton, S.; Ward, S.; Hallof, P.; Sill, W. und Nelson, P.** (1978): Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP. *Geophysics*, 43/3, S. 588-609.
- Pelton, W. und Smith, P.** (1976): Mapping porphyr copper deposits in the Philippines with IP. *Geophysics*, 41/1, S. 106-122.
- Piro, S.; Tsourlos, P. I. und Tsokas, G. N.** (2001): Cavity detection employing advanced geophysical techniques: A case study. *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 6, 3-31.
- Pridmore, D. F.; Hohmann, G. W.; Ward, S. H. und Sill, W. R.** (1981): An investigation of finite-element modeling for electrical and electromagnetic data in three dimensions. *Geophysics*, 46, S. 1009-1024.
- Rasev, R.** (1983): Pliska - The first capitol of Bulgaria. Ed. A. G. Poulter, Ancient Bulgaria, International Symposium, Nottingham.
- Ritz, M.; Robain, H.; Pervago, E.; Albouy, Y.; Camerlynck, C.; Descloitres, M. und Mariko, A.** (1999): Improvement to resistivity pseudosection modelling by removal of near-surface inhomogeneity effects: application to a soil system in south Cameroon. *Geophysical Prospecting*, 47, S. 85-101.
- Robain, H.; Albouy, Y.; Dabas, M.; Descloitres, M.; Camerlynck, C.; Mechler, P. und Tabbagh, A.** (1999): The location of infinite electrodes in pole-pole electric surveys: consequences for 2D imaging. *Journal of Applied Geophysics*, 41, S. 313-333.
- Routh, P. und Oldenburg, D.** (2001): Electromagnetic coupling in frequency-domain induced polarization data: a method of removal. *Geophysical Journal International*, 145, S. 59-76.
- Roy, A. und Apparao, A.** (1971): Depth of investigation in direct current methods. *Geophysics*, 36/5, S. 943-959.
- Saarenketo, T.** (1998): Electrical properties of water in clay and silty soils. *Journal of Applied Geophysics*, 40, S. 73-88.
- Samstag, F. und Morgan, F.** (1991): Induced polarization of shaly sands: salinity domain modelling by double embedding of the effective medium theory. *Geophysics*, 56/11, S. 1749-1756.
- Sasaki, Y.** (1992): Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation. *Geophysical Prospecting*, 40, S. 453-463.
- Sasaki, Y.** (1994): 3-D resistivity inversion using the finite-element method. *Geophysics*, 59/11, S. 1839-1848.
- Schlichtherle, H.** (1997): Pfahlbauten rund um die Alpen. *Archäologie in Deutschland, Sonderheft*. Theiss Verlag.
- Schlichtherle, H. und Strobl, M.** (1999). *Archäologie und Naturschutz im Federseemoor*. Landesdenkmalamt Baden-Württemberg, Stuttgart-Germany, 47 S.

- Schneider, S.** (2002): Gleichstromgeoelektrische Messungen an tertiären Terrassenschottern bei Laubenheim, Nahe. Diplomarbeit am Institut f. Meteorologie und Geophysik der J. W. Goethe-Universität Frankfurt/M.
- Schön, J.** (1996): Handbook of Geophysical exploration, Vol. 18, Physical properties of rocks. Fundamentals and principles of petrophysics. Redwood books, Trowbridge, 577 S.
- Schönwiese, C.-H.** (2000): Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler. Borntraeger, Berlin-Stuttgart.
- Schulz, R.** (1985): Interpretation and depth of investigation of gradient measurements in direct current geoelectrics. Geophysical Prospecting, 33, S. 1240-12532.
- Schweingruber, F. H.** (1990). Mikroskopische Holzanatomie. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, 226 S. Kommissionsverlag F. Flück-Wirth.
- Scollar, I., Tabbagh, A., Hesse, A. und Herzog, I.** (1990): Archaeological Prospection and Remote Sensing. Cambridge University Press, Cambridge.
- Scollar, I.; Weidner, B. und Segeth, K.** (1986): Display of archaeological magnetic data. Geophysics, 51/3, S. 623-633.
- Scollar, I.** (1962): Electromagnetic prospecting methods in archaeology. Archaeometry, 5, S. 146-153.
- Scollar, I.** (1965): A contribution to magnetic prospecting in archaeology. Archaeo-Physika,
- Scott, W. und West, G.** (1969): Induced Polarization of synthetic high resistivity rocks containing disseminated sulfides. Geophysics, 34/1, S. 87-100.
- Seigel, H.** (1959): Mathematical formulation and type curves for induced polarization. Geophysics, 24, S. 547-562.
- Shuey, R. und Johnson, M.** (1973): On the phenomenology of electrical relaxation in rocks. Geophysics, 38/1, S. 37-48.
- Smith, N. C. & Vozoff, K.** (1984): Two-dimensional DC resistivity inversion of dipole-dipole data. IEEE Trans. Geoscience Rem. Sens., GE-22, S. 21-28.
- Slater, L. D. und Lesmes, D.** (2002): IP Interpretation in environmental investigations. Geophysics, 67/1, S. 77-88.
- Slater, L. D. und Reeve, A.** (2002): Investigating peatland stratigraphy and hydrogeology using integrated electrical geophysics. Geophysics, 67/2, S. 365-378.
- Sternberg, B.** (1991): A review of some experience with the induced-polarization/resistivity method for hydrocarbon surveys: successes and limitations. Geophysics, 56/10, S. 1522-1532.
- Stright, M. J.** (1986): Evaluation of archaeological site potential on the outer continental shelf using high-resolution seismic data. Geophysics, 51, S. 605-622.
- Stummer, P., Maurer, H., und Boerner, D., E.** (1999): Optimizing model resolution in real-time with a new generation of 3D DC resistivity and IP instrumentation. 2nd Int. Symp. on 3D Electromagnetics, Salt Lake City, Utah. Expanded Abstracts. 240-243,

- Sutherland, T. L.; Schmidt, A. und Dockrill, S. J.** (1998): Resistivity Pseudosections and their topographic correction: a report on a case study at Scatness, Shetland. *Archaeological Prospection*, 5, S. 229-237.
- Tabbagh, A.; Desvignes, G. und Dabas, M.** (1997): Processing of Z gradiometer magnetic data using linear transforms and analytical signal. *Archaeological Prospection*, 4, S. 1-13.
- Tabbagh, A.** (1974): Methodes de prospection electromagnetique applicable aux problemes archaeologiques. *Archaeophys.*, 5, S. 350-437.
- Tabbagh, A.** (1986): Application and advantages of the Slingram EM method for archaeological prospection. *Geophysics*, 51, S. 576-584.
- Telford, W. M.; Geldart, L. P. und Sheriff, R. E.** (1990): *Applied Geophysics*. 2nd edition, Cambridge University Press. 770 S.
- Thompson, R. und Oldfield, F.** (1986): *Environmental Magnetism*. Allen & Unwin, London.
- Tite, M. S. und Mullins, C.** (1970): Electromagnetic prospecting on archaeological sites using a soil conductivity meter. *Archaeometry*, 12, S. 97-104.
- Tsokas, G.; Sarris, A.; Pappa, M.; Bessios, M.; Papazachos, C., Tsourlos, P und Giannopoulos, A.** (1997) : A large scale magnetic survey in Makrygialos (Piera), Greece. *Archaeological Prospection*, 4, S. 123-137.
- Tsokas, G. N. und Tsourlos, P.** (1997): Transformation of the resistivity anomalies from archaeological sites by inversion filtering. *Geophysics*, 62/1, S. 36-43.
- Tripp, A. C.; Hohmann, G. W. & Swift, C. M.** (1984): Two-dimensional resistivity inversion. *Geophysics*, 49, S. 1708-1717.
- Tsourlos, P. I.; Szymanski, J. E. und Tsokas, G. N.** (1999): The effect of terrain topography on commonly used resistivity arrays. *Geophysics*, 64/5, S. 1357-1363.
- Tukey, J. W.** (1981): *Exploratory data analysis*. Addison-Wesley Pub. Co.
- van Voorhis, G.; Nelson, P. und Drake, T.** (1973): Complex resistivity spectra of porphyry copper mineralization. *Geophysics*, 38/1, S. 49-60.
- Vanhala, H.; Soininen, H. und Kukkonen, I.** (1992): Detecting organic chemical contaminants by spectral-induced polarization method in glacial till environment. *Geophysics*, 57/8, S. 1014-1017.
- Vanhala, H. und Soininen, H.** (1995): Laboratory technique for measurement of spectral induced polarization response of soil samples. *Geophysical Prospecting*, Jg. 43, S. 655-676.
- Vaughan, C. J.** (1986): Ground-penetrating radar surveys used in archaeological investigations. *Geophysics*, 51, S. 595-604.
- Verosub, K. L. und A. P. Roberts** (1995). *Environmental magnetism: Past, present and future*. *Journal of Geophysical Research*, 100, 2175-2192.
- Vinegar, H. und Waxman, M.** (1984): Induced polarization of shaly sands. *Geophysics*, 49/8, S. 1267-1287.

- Wait, J. und Williams, J.** (1985): EM and IP response of steel well casing for a four-electrode surface array. Part I: theory. *Geophysical Prospecting*, 33, S. 723-735.
- Wait, J. R.** (1959): *Overvoltage research and geophysical applications*. Pergamon Press, Inc.
- Waxman, M. H. und Smits, L. J. M.** (1968): Electrical conductivities in oil-bearing shaly sands. *Trans. Am. Inst. Min., Metall. & Petr. Eng.*, 243, Part II, 107-122.
- Weller, A.** (1993): VESK, Programm zur 1D-Modellierung der komplexen elektrischen Leitfähigkeit, unveröffentlicht.
- Weller, A., Brune, S., Hennig, T. und Kansy, A.** (2000): Spectral induced polarisation at a medieval smelting site. *Proceedings of the 6th Meeting Environmental and Engineering Geophysics (EEGS-ES)*, Bochum-Germany, S. EL 11.
- Weller, A.** (2003): Spektrale Induzierte Polarisation in der Archäometrie. *Freiberger Forschungshefte*, C496, S. 14-29
- Weller, A.; Seichter, M. und Kampke, A.** (1996): Induced-polarization modelling using complex conductivities. *Geophysical Journal International*, 127, S. 387-398.
- Weller, A.; Frangos, W. und Seichter, M.** (2000): Three-dimensional inversion of induced polarization data from simulated waste. *Journal of Applied Geophysics*, 44, S. 67-84.
- Weller, A.; Gruhne, M.; Seichter, M. und Börner, F.** (1996): Monitoring hydraulic experiments by complex conductivity tomography. *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 1, S. 209-228.
- Wienberg, R.** (1990): Zum Einfluß organischer Schadstoffe auf Deponietone - Teil 1: Unspezifische Interaktionen. *Abfallwirtschaftsjournal* 2, EF - Verlag für Energie und Umwelttechnik, Berlin, 222-230.
- Wong, J.** (1979): An electrochemical model of the induced-polarization phenomenon in disseminated sulfide ores. *Geophysics*, 44/7, S. 1245-1265.
- Wynn, J. C. und Sherwood, S. I.** (1984): The self-potential (SP) method - an inexpensive reconnaissance and archaeological mapping tool. *Journal of Field Archaeology*, 11, S. 195-204.
- Wynn, J.C.** (1986): *Archaeological Prospection: An introduction to the Special issue*. *Geophysics*, 51/3, S. 533-537.
- Yanzhong, L. und Guiqing Z.** (1998): Theory and application of spectral induced polarization. *Geophysical monograph series*, 8, Society of Exploration Geophysicists (SEG).
- Zickgraf, B.** (1999): *Geomagnetische und geoelektrische Prospektion in der Archäologie*. *Internationale Archäologie, Reihe Naturwissenschaft und Technologie*, Band 2, 221 S., Verlag Marie Leidorf GmbH
- Zonge, K.; Sauck, W. und Sumner, J.** (1972): Comparison of time, frequency and phase measurements in induced polarization. *Geophysical Prospecting*, 20, S. 626-648.

# Danksagung

Herrn Prof. Dr. Andreas Junge, meinem Betreuer, danke ich für die Möglichkeit diese Dissertation am Institut für Meteorologie und Geophysik durchzuführen. Offen, gleichzeitig aber kritisch und aufmerksam, gewährte er mir die nötige Freiheit, eigene Ideen umzusetzen. Seiner Unterstützung konnte ich mir in den vergangenen vier Jahren stets sicher sein.

Ein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Andreas Weller, dem Leiter der Abteilung Bohrlochgeophysik und Petrophysik am Institut für Geophysik der TU Clausthal. Die enge Zusammenarbeit mit dem Institut in Clausthal trug wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit bei. Dazu gehören die zahlreichen Labormessungen an archäologischen Materialien, die Bereitstellung von Software und die vielen wertvollen Anregungen bei der Auswertung und Interpretation der Ergebnisse. Zu danken habe ich auch für die Einladung zum Feldpraktikum im Pandelbachtal und die Bereitschaft von Prof. Weller als Gutachter aufzutreten.

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) danke ich für das Promotionsstipendium im Rahmen des Graduiertenkollegs „Archäologische Analytik“ (DFG-Projekt Nr. 323/1-99).

Dr. Jürgen Bigalke, der Entwickler der SIP-256, legte den Grundstein für diese Arbeit. Für seine Geduld, mir die Funktionsweise der Apparatur zu erklären, möchte ich mich bedanken. Außerdem opferte er seine kostbare Freizeit für die Durchsicht der Arbeit.

Den Archäologen des Graduiertenkollegs Archäologische Analytik, sowie den Archäologen der Außenstelle Hemmenhofen, Landesdenkmalamt Baden-Württemberg, danke ich für die Bereitstellung der Messobjekte und Materialproben. Nicht alle Ergebnisse konnten im Kontext der Fragestellung verwendet werden, jedoch führte jede einzelne Feldmessung die Arbeit weiter in die richtige Richtung und trug entscheidend zur Weiterentwicklung der Apparatur bei.

Ohne die Diplom-Geophysiker Marc Kötter („Hessi James“) und Simon Schneider, meine beiden zuverlässigen Messhelfer, wäre keine einzige Feldmessung zustande gekommen. Viel Glück für die Zukunft.

Dr. Thomas Forbrigger danke ich für die Durchsicht des Manuskripts und für die Hilfestellung beim Ausdrucken der Arbeit.

Dr. Rainer Roßberg gebührt Dank für die Unterstützung in elektronischen Fragen. Wenn Not am Mann war, konnte ich immer auf ihn zählen.

Abschließend möchte ich mich bei allen Mitarbeitern und Studenten des Instituts für Meteorologie und Geophysik bedanken. Es hat Spaß gemacht an diesem Institut zu arbeiten.

# Lebenslauf

Norbert Schleifer

- 15.10 1968 geboren in München  
als Sohn von Hans und Therese Schleifer, geb. Tristl
- 1982-1986 Mittlere Reife an der Staatl. Realschule Taufkirchen (Ldkr. München).
- 1986-1989 Ausbildung zum Feinmechaniker bei der Siemens AG, München mit bestandener Gesellenprüfung.
- 1989-1991 Fachgebundene Fachhochschulreife an der Berufsoberschule München, Fachrichtung Technik.
- 1991-1992 Zivildienst in der Sozialpädiatrischen Klinik des Kinderzentrums Oberbayern in München.
- 1992-1998 Studiengang zum Diplom-Geophysiker an der Ludwig-Maximilians-Universität München.  
Nebenfach: Vor- und Frühgeschichtliche Archäologie.  
Diplomarbeit: Bodenmagnetische und bodenkundliche Untersuchung magnetischer Anomalien in der archäologischen Prospektion.  
Betreuer: Prof. Dr. Heinrich Soffel, Dr. Jörg Fassbinder, Dr. Helge Stanjek und Dr. Walter Irlinger
- 1998-2001 Promotionsstipendiat des Graduiertenkollegs Archäologische Analytik am Institut für Meteorologie und Geophysik der J. W. Goethe-Universität Frankfurt am Main.  
Betreuer: Prof. Dr. Andreas Junge
- 2002-2003 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Geophysik, Abteilung Petrophysik und Bohrlochgeophysik der TU Clausthal.
- seit April 2003 Universitätsassistent am Institut für Geophysik der Montanuniversität Leoben, Österreich