

# 2D-SIP-Modellierung mit anisotropen Widerständen

Johannes Kenkel<sup>a\*</sup>, Andreas Hördt<sup>a</sup>, Andreas Kemna<sup>b</sup>

<sup>a</sup> *Institut für Geophysik und extraterrestrische Physik, TU Braunschweig*

<sup>b</sup> *Fachbereich Angewandte Geophysik, Universität Bonn*

## 1 Einleitung

Die Modellierung von Messdaten der spektralen induzierten Polarisation (SIP) geschieht üblicherweise unter der Annahme makroskopisch, also in der Größenordnung einer Zelle der Modellrechnung, isotroper komplexer Widerstände im Untergrund. Für diese Art der Modellierung von Daten der SIP wurde von A. Kemna das Finite-Elemente-Programm CRMod entwickelt ([1], [2]). Mit der Annahme isotroper Widerstände lassen sich viele Messdaten hinreichend erklären. Nguyen et al. ([3]) zeigten jedoch für den reellwertigen gleichstromgeoelektrischen Fall, dass, wenn der Untergrund aus vielen abwechselnd gelagerten Schichten besteht, die eine geringe räumliche Ausdehnung gegenüber der bei der Inversion benutzen Gitterzellen haben, die Annahme isotroper Leitfähigkeiten zu Fehlinterpretationen führen kann. Hier kann die Erweiterung auf anisotrope Widerstände Abhilfe schaffen, weil diese auf makroskopischer Skala, also Zellenebene, Schichtlagerungen beschreiben können. Das Auftreten von Anisotropieeffekten auch bei SIP wurde von Winchen et al. ([4]) demonstriert. Das Programm CRMod wurde zum Zweck der Modellierung anisotroper komplexer Widerstände erweitert. In diesem Artikel sollen anhand von verschiedenen modellierten Beispielen verschiedene Effekte eines Untergrund mit anisotropen komplexen Widerständen gezeigt werden.

## 2 Methodik

### 2.1 Spektrale Induzierte Polarisation (SIP)

Die spektrale induzierte Polarisation (SIP) ist ein elektrisches Verfahren, das wie die Geoelektrik aus dem Messen von Potentialverläufen künstlicher elektrischer Quellen Rückschlüsse auf die Leitfähigkeitsverteilung im Untergrund zieht.

---

\* Adresse: Mendelssohnstraße 3, D-38106 Braunschweig, E-Mail: j.kenkel@tu-bs.de

Das Aufnehmen der Messwerte geschieht in einem wiederum der Geoelektrik sehr ähnlichen Aufbau, jedoch werden zusätzlich Phasenbeziehungen zwischen Sende- und Empfangssignal aufgezeichnet. Als Quellsignal werden Wechselströme unterschiedlicher Frequenzen gewählt. Die Messdaten sind dann Spannungswerte und deren Phasenverschiebungen zum Quellsignal. Aus diesen Daten und den Positionen der Elektroden ergeben sich mit den Geometriefaktoren die Messwerte als scheinbare spezifische Widerstände (Amplituden) und deren Phasen. Diese lassen sich zur Abschätzung der Eigenschaften des Profils als Pseudosektion auftragen.

Das physikalische Problem der spektralen induzierten Polarisation und der Geoelektrik lässt sich für den Fall anisotroper komplexer Widerstände in x-, y- und z-Richtung in Form der Poisson-Gleichung

$$\partial_x(\sigma_x \partial_x \phi) + \partial_y(\sigma_y \partial_y \phi) + \partial_z(\sigma_z \partial_z \phi) + I \delta(x - x_s) \delta(y - y_s) \delta(z - z_s) = 0 \quad (1)$$

mit dem Potential  $\phi = \phi(x, y, z)$ , dem Strom  $I$  und der Diracschen Delta-Funktion  $\delta$  schreiben. Die Anisotropie beschränke sich dabei auf die Diagonalelemente des Leitfähigkeitstensors

$$\underline{\underline{\sigma}} = \begin{pmatrix} \sigma_x & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Die Stromeinspeisung findet an den Koordinaten  $(x_s, y_s, z_s)$  statt.

## 2.2 Modellierung

Für die Modellierung wird das oben aufgeführte Problem der Potentialverteilung durch einen 2D-Finite-Elemente-Algorithmus gelöst (vgl. [2]). Die Ergebnisse sind Potentialverläufe und zugehörige Phasen an jedem Gitterpunkt. Aus diesen Informationen und den Messelektrodenpositionen lassen sich damit die zum Modell gehörigen synthetischen Messdaten - Amplituden und Phasen der scheinbaren spezifischen Widerstände - berechnen und in Pseudosektionen auftragen. Das hier benutzte Finite-Elemente-Programm CRMod ist von einer bereits bestehenden Version für die Modellierung isotroper spezifischer Widerstände und Phasen ([2]) um die Möglichkeit der Modellierung von Anisotropie erweitert worden.

Die Poisson-Gleichung 1 wird unter der Annahme eines konstanten Leitfähigkeitstensors in y-Richtung durch die Fourier-Transformation in den Wellenzahlbereich mit

$$\begin{aligned} F(k) &= \int_{-\infty}^{\infty} f(y) e^{iky} dy \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} f(y) \cos(ky) dy + i \int_{-\infty}^{\infty} f(y) \sin(ky) dy \end{aligned}$$

und der Wellenzahl  $k$  transformiert. Bei Reduktion auf Funktionen, die in y-Richtung zum Nullpunkt symmetrisch sind, fällt das zum Nullpunkt  $y = 0$  antisymmetrische Teilintegral weg, so dass sich die Fourier-Kosinus-Transformation

$$F(k) = \int_{-\infty}^{\infty} f(y) \cos(ky) dy \quad (3)$$

ergibt. Das Ergebnis der Transformation der Gleichung 1 in den Wellenzahlbereich entlang der y-Achse ist dann

$$\partial_x(\sigma_x \partial_x \tilde{\phi}) - \sigma_y k^2 \tilde{\phi} + \partial_z(\sigma_z \tilde{\phi}) + \frac{I}{2} \delta(x - x_0) \delta(z - z_0) = 0 \quad (4)$$

mit  $\tilde{\phi} = \tilde{\phi}(x, k, z)$ . Diese Gleichung wird von dem hier verwendeten Finite-Elemente-Programm auf einem zweidimensionalen Gitter in  $x$ - und  $z$ -Richtung gelöst. Aus den erhaltenen Werten für  $\tilde{\phi}$ , bzw. nach Fourier-Kosinus-Rücktransformation  $\phi$  lassen sich mit den Geometriefaktoren der Elektrodenkonfiguration die synthetischen Messwerte für Amplitude und Phase der scheinbaren spezifischen Widerstände angeben.

### 2.3 Bewertung der Genauigkeit

Das Programm muss auf seine Gültigkeit und Genauigkeit in Bezug sowohl auf analytisch berechenbare Probleme als auch auf verschiedene, mit dem bisherigen Programm zum Modellieren isotroper spezifischer Widerstandsverteilungen berechnete Modelle geprüft werden. Für einen homogenen Halbraum mit spezifischem Widerstand  $\rho_h$  und Phase  $\phi_h$  erwartet man eine Pseudosektion mit dem konstanten Wert  $\rho = \rho_h$  des scheinbaren spezifischen Widerstands und  $\phi = \phi_h$  für die scheinbare Phase. Die Messwerte werden mit einer simulierten Dipol-Dipol-Anordnung mit Elektrodenabstand 1 m berechnet. Die Abweichungen der Modellierungsergebnisse zum analytischen Ergebnis betragen weniger als 10 % in den scheinbaren spezifischen Widerständen und weniger als 1 % in den scheinbaren Phasen. Ein homogener Halbraum mit anisotropen spezifischen Widerständen in Horizontal- und Vertikalrichtung,  $\rho_{horizontal}$  und  $\rho_{vertikal}$ , weist nach analytischen Berechnungen einen scheinbaren spezifischen Widerstand von

$$\rho = \sqrt{\rho_{hori.} \cdot \rho_{vert.}} \quad (5)$$

(nach z.B. [5, S. 95]) auf. In Abb. 1 ist ein Modellierungsergebnis für diesen Fall dargestellt. Der spezifische Widerstand des Halbraums beträgt 100  $\Omega\text{m}$  in horizontaler Richtung ( $x$ - und  $y$ -Richtung) und 25  $\Omega\text{m}$  in  $z$ -Richtung. Dies entspricht einem scheinbaren spezifischen Widerstand von 50  $\Omega\text{m}$  in der Pseudosektion. Die Phase des Halbraums beträgt gleichmäßig (homogen und isotrop)  $-5$  mrad. Die Abweichung des Modellierungsergebnisses zu diesem analytischen Wert beträgt an keiner Stelle mehr als 3 % sowohl für den scheinbaren spezifischen Widerstand als auch für die scheinbare Phase.

## 3 Modellparameter

Unter der Annahme einer horizontalen Wechsellagerung unterschiedlich leitfähiger Schichten wurde ein Modell mit isotropen spezifischen Widerständen erstellt und mit einem entsprechenden Modell mit anisotropen spezifischen Widerständen verglichen. Zur Abschätzung der Stärke der Anomalien wird ein Hintergrundmodell mit homogenem und

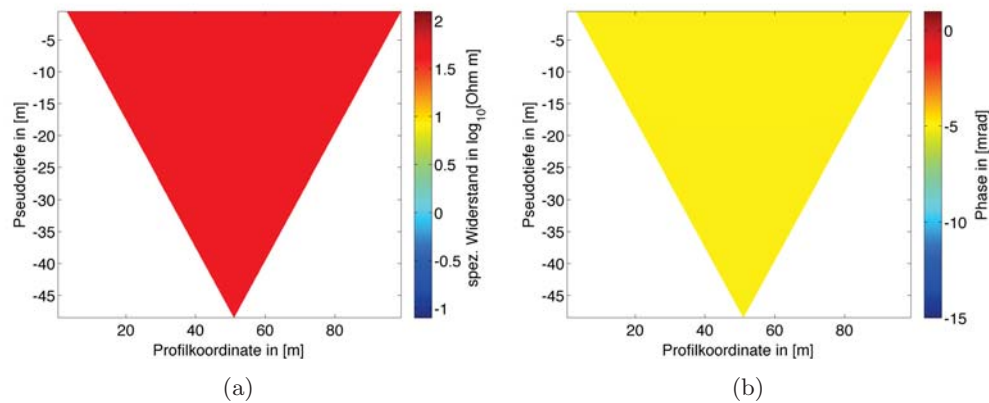


Abbildung 1: Dipol-Dipol-Pseudosektion von spezifischem Widerstand und Phase eines homogenen Halbraums mit den anisotropen spezifischen Widerständen (Amplituden)  $100 \Omega\text{m}$  in x- und y-Richtung und  $25 \Omega\text{m}$  in z-Richtung und der isotropen Phase  $-5 \text{ mrad}$ .

isotropem spezifischen Widerstand angegeben. Abb. 2 zeigt die Diskretisierung des Modellraumes in 233 Zellen in x-Richtung und 114 Zellen in z-Richtung mit variablem Gitterlinienabstand in den Außenbereichen und konstantem Gitterlinienabstand von  $0,5 \text{ m}$  in einem Bereich von  $0 \text{ m}$  bis  $100 \text{ m}$  in x-Richtung.

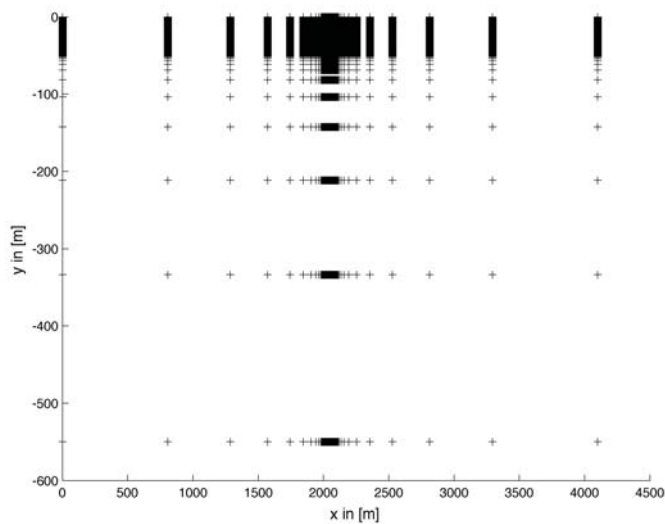


Abbildung 2: Gittermodell des Profils mit  $233 \times 114$  Gitterzellen und einem Gitterlinienabstand von  $0,5 \text{ m}$  im linearen Bereich.

Für das Hintergrundmodell wurde wie im vorherigen Abschnitt ein homogener und

isotroper spezifischer Widerstand mit Amplitude  $100 \Omega m$  und Phase  $-5$  mrad gewählt.

### 3.1 Wechsellagerungen mit unterschiedlichen spezifischen Widerständen

Im ersten Beispiel wird eine Wechsellagerung von unterschiedlich resistiven, isotropen Schichten ( $100 \Omega m$  und  $1 \Omega m$ ) in einem Hintergrund mit spezifischem Widerstand von  $100 \Omega m$  betrachtet. Die Phase des spezifischen Widerstands beträgt überall  $-5$  mrad. Eine Skizze der Anordnung findet sich in Abb. 3(a). Die Schichtung beginnt 1 m unter

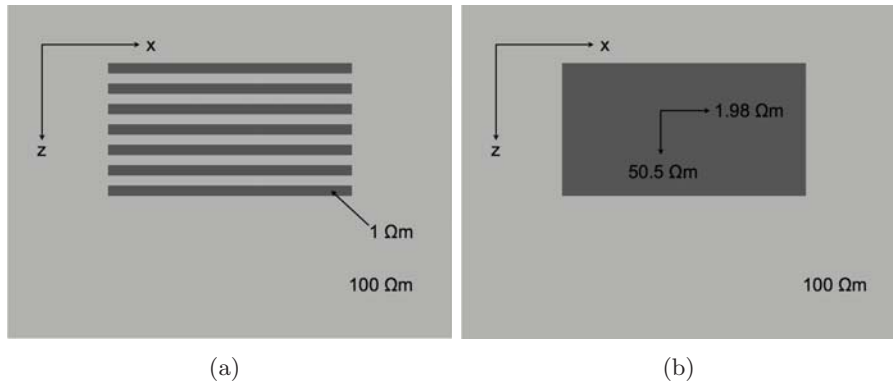


Abbildung 3: Schema des Untergrundmodells: a) vertikale Schichtung mit den spezifischen Widerständen  $100 \Omega m$  in hellgrau und  $1 \Omega m$  in dunkelgrau. b) Vertikale Schichtung mit spezifischem Widerstand  $1,98 \Omega m$  in x- und y- sowie  $50,5 \Omega m$  in z-Richtung. Der spezifische Hintergrundwiderstand beträgt  $100 \Omega m$  in x-, y- und z-Richtung. Die Phase beträgt überall  $-5$  mrad.

der Oberfläche und reicht bis zu einer Tiefe von  $7,5$  m. Die Ausdehnung in x-Richtung beträgt  $40$  m.

Die gleiche Schichtung wird in Abb. 3(b) durch einen Block mit anisotropem spezifischen Widerstand beschrieben. Die anisotropen spezifischen Widerstandswerte berechnen sich nach

$$\begin{aligned} \rho &= R \frac{A}{l} \\ \Leftrightarrow R &= \rho \frac{l}{A} \end{aligned} \quad (6)$$

mit dem Widerstand  $R$  eines Blocks der Länge  $l$  und der Querschnittsfläche  $A$ . Bei Reihenschaltung von zwei Schichten mit den Widerständen  $R_1$  und  $R_2$  mit je der Querschnittsfläche  $A$  und der Länge  $l$  ergibt sich aus dem Gesamtwiderstand  $R$ , der die Querschnittsfläche  $A$  und die Länge  $2 \cdot l$  hat:

$$\begin{aligned} R_{Serie} &= R_1 + R_2 \\ \Leftrightarrow \rho_{Serie} \frac{2 \cdot l}{A} &= \rho_1 \frac{l}{A} + \rho_2 \frac{l}{A} \\ \Leftrightarrow \rho_{Serie} &= \frac{\rho_1 + \rho_2}{2}. \end{aligned} \quad (7)$$

Bei Parallelschaltung von zwei Schichten gleicher Querschnittsfläche  $A$  und gleicher Länge  $l$  und den Widerständen  $R_1$  und  $R_2$  ergibt sich der Gesamtwiderstand  $R$ , der die Querschnittsfläche  $2 \cdot A$  und die Länge  $l$  hat:

$$\begin{aligned} \frac{1}{R_{\text{Serie}}} &= \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \\ \Leftrightarrow \frac{2 \cdot A}{l} \frac{1}{\rho_{\text{Serie}}} &= \frac{A}{l} \rho_1 + \frac{A}{l} \rho_2 \\ \Leftrightarrow \rho_{\text{Parallel}} &= 2 \cdot \frac{1}{\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2}}. \end{aligned} \quad (8)$$

Mit diesen Beziehungen folgt für die äquivalenten anisotropen spezifischen Widerstände  $50,5 \Omega\text{m}$  in x- und  $1,98 \Omega\text{m}$  in z-Richtung. In y-Richtung beträgt der spezifische Widerstand wie in x-Richtung  $1,98 \Omega\text{m}$ . Die Phasen der spezifischen Widerstände betragen homogen und isotrop  $-5$  mrad. Die Modellierungsergebnisse sind als Pseudosektionen einer Dipol-Dipol-Anordnung in den Abb. 4(a) bis 5(b) jeweils für Betrag und Phase des spezifischen Widerstands dargestellt.

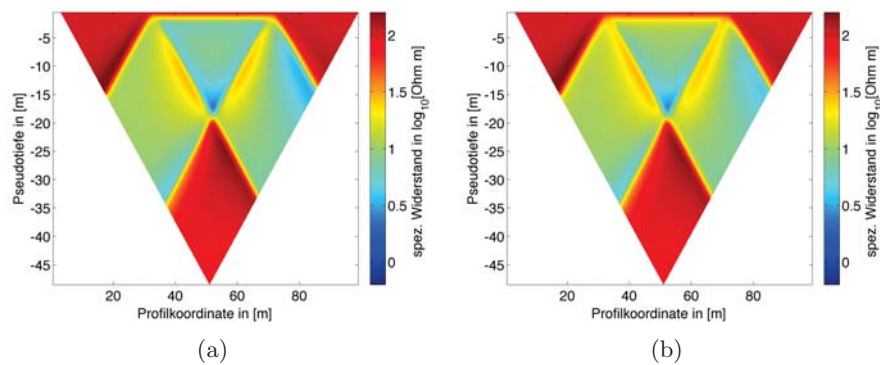


Abbildung 4: Pseudosektion des Betrags des scheinbaren spezifischen Widerstands. a.) Vertikale Wechsellagerung isotroper Schichten mit  $1 \Omega\text{m}$  und  $100 \Omega\text{m}$ . b.) Anisotrope Beschreibung der Wechsellagerung durch spez. Widerstände  $50,5 \Omega\text{m}$  in x- und  $1,98 \Omega\text{m}$  in y- und z-Richtung. Die Phase beträgt in beiden Modellen überall  $-5$  mrad.

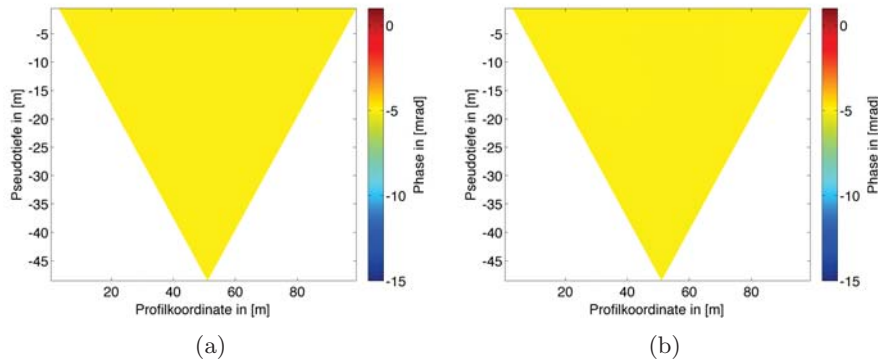


Abbildung 5: Pseudosektion der scheinbaren Phase. a) Vertikale Wechsellagerung isotroper Schichten mit  $1 \Omega\text{m}$  und  $100 \Omega\text{m}$ . b) Anisotrope Beschreibung der Wechsellagerung durch spez. Widerstände  $50,5 \Omega\text{m}$  in x- und  $1,98 \Omega\text{m}$  in y- und z-Richtung. Die Phase beträgt in beiden Modellen überall  $-5 \text{ mrad}$ .

Beide Modelle - isotropes mit Schichten und anisotropes mit Block - zeigen nahezu gleiche Ergebnisse in den Pseudosektionen. Sehr deutlich ist die durch die Schichtlagerung bzw. durch den Block anisotroper spezifischer Widerstände erzeugte Anomalie sichtbar. Der maximale Wert für den scheinbaren spezifischen Widerstand  $\rho_a$  ist etwa  $100 \Omega\text{m}$ , was dem Hintergrundmodell entspricht. Der minimale Wert für  $\rho_a$  beträgt etwa  $10^{0,5} \Omega\text{m} = 3 \Omega\text{m}$ . Der erwartete minimale scheinbare spezifische Widerstand beträgt im Fall des anisotropen Modells gemäß Gleichung 5 etwa  $10 \Omega\text{m}$ . Dieser Wert wird im Bereich des Blocks und darunter erreicht und sogar unterschritten. Der bis in  $7,5 \text{ m}$  Tiefe ausgedehnte Block führt einen "Schatten" mit, der in Form eines nach unten gerichteten Dreiecks bis in ca.  $20 \text{ m}$  Tiefe reicht. An beiden Flanken des Dreiecks zeigen schräge "Schatten" nach außen, die ebenfalls einen relativ niedrigen spezifischen Widerstand von etwa  $10 \Omega\text{m}$  aufweisen. Die scheinbaren Phasen betragen gleichmäßig  $-5 \text{ mrad}$ , entsprechend den Vorgaben der beiden Modelle.

### 3.2 Wechsellagerungen mit unterschiedlichen Phasen des spezifischen Widerstandes

In diesem Abschnitt soll die Schichtlagerung mit Schichten unterschiedlicher Phasen betrachtet werden. Dazu wird das Schichtmodell aus Abb. 3(a) für Schichten mit isotropen Phasen und das Blockmodell aus Abb. 3(b) als entsprechendes Modell mit anisotropen Phasen betrachtet. Die spezifischen Widerstände  $\rho$  sind in allen Schichten gleich und entsprechend auch im anisotropen Fall in allen Richtungen gleich. Die Reihenschaltung von Elementen mit unterschiedlichen Phasen - also komplexen Impedanzen  $X = R(\cos \phi_1 + i \sin \phi_1)$  - ergibt sich mit Realteil  $\Re(X)$  und Imaginärteil  $\Im(X)$  zu

$$\begin{aligned}
 X_{\text{Serie}} &= X_1 + X_2 \\
 &= \Re(X_1 + X_2) + i\Im(X_1 + X_2) \\
 &= (R \cos \phi_1 + R \cos \phi_2) + i(R \sin \phi_1 + R \sin \phi_2).
 \end{aligned} \tag{9}$$

Für kleine Winkel von  $\phi_1$  und  $\phi_2$  kann man die Kosinus-Terme über eine Taylor-Entwicklung in erster Ordnung um 0 mit

$$\cos \phi \approx 1 \quad (10)$$

und die Sinus-Terme mit

$$\sin \phi \approx \phi \quad (11)$$

annähern. Es ergibt sich dann für die Reihenschaltung

$$X_{Serie} \approx 2 \cdot R + iR(\phi_1 + \phi_2) \quad (12)$$

Diese Beziehung lässt sich zur Berechnung des komplexen spezifischen Widerstandes heranziehen. Zwei Elemente mit den Impedanzen  $X_1$  und  $X_2$  und je der Querschnittsfläche  $A$  und der Länge  $l$  ergeben in Reihenschaltung eine Impedanz  $X$  mit der gleichen Querschnittsfläche und der doppelten Länge  $2 \cdot l$ :

$$\begin{aligned} \rho &= X \frac{A}{l} \\ &= X_{Serie} \frac{A}{2l} \\ &\approx (R + iR \frac{\phi_1 + \phi_2}{2}) \frac{A}{l} \\ &\approx R(\cos \frac{\phi_1 + \phi_2}{2} + i \sin \frac{\phi_1 + \phi_2}{2}) \frac{A}{l}. \end{aligned} \quad (13)$$

Die Reihenschaltung zweier gleich mächtiger Schichten mit gleichem spezifischen Widerstand und unterschiedlicher Phase bedeutet folglich näherungsweise eine Mittelung der Phasen, also

$$\phi_{Serie} \approx \frac{\phi_1 + \phi_2}{2}. \quad (14)$$

Die Parallelschaltung unterschiedlicher Phasen bei gleichem Betrag des spezifischen Widerstands ergibt sich mit den obigen Näherungen und  $\phi \ll 1$  zu

$$\begin{aligned} X_{Parallel} &= \frac{1}{\frac{1}{X_1} + \frac{1}{X_2}} \\ &\approx R \frac{1}{\frac{1}{1+i\phi_1} + \frac{1}{1+i\phi_2}} \\ &\approx R(\frac{1}{2} + \frac{i}{2}(\frac{\phi_1 + \phi_2}{2})). \end{aligned} \quad (15)$$

Werden zwei Elemente mit gleichem spezifischen Widerstand und unterschiedlicher Phase und je der Querschnittsfläche  $A$  und der Länge  $l$  parallel geschaltet, ergibt sich die Impedanz  $X_{Parallel}$  mit der doppelten Querschnittsfläche  $2 \cdot A$  und der gleichen Länge.



Der komplexe spezifische Widerstand ergibt sich damit zu

$$\begin{aligned}
 \rho &= X \frac{A}{l} \\
 &= X_{Parallel} \frac{2A}{l} \\
 &\approx R \left( \frac{1}{2} + i \left( \frac{\phi_1 + \phi_2}{2} \right) \right) \frac{2A}{l} \\
 &= R \left( 1 + i \left( \frac{\phi_1 + \phi_2}{2} \right) \right) \frac{A}{l} \\
 &\approx R \left( \cos \frac{\phi_1 + \phi_2}{2} + i \sin \frac{\phi_1 + \phi_2}{2} \right) \frac{A}{l},
 \end{aligned} \tag{16}$$

und für die Phasen wie schon bei der Reihenschaltung näherungsweise:

$$\phi_{Parallel} \approx \frac{\phi_1 + \phi_2}{2}. \tag{17}$$

Dieses Ergebnis macht klar, dass bei konstantem spezifischen Widerstand eine Wechsellagerung von Schichten unterschiedlicher Phasen wohl in ihrer Stärke im Mittel, nicht jedoch in ihrer Richtung erkannt werden kann. Nur in Verbindung mit unterschiedlich spezifischen Widerständen der einzelnen Schichten können auch die Phasenwerte der abwechselnden Schichten unterschieden werden.

Ein Schichtmodell mit den Phasen der einzelnen Schichten von  $-15$  mrad bzw.  $-5$  mrad (Hintergrund) hat demnach die anisotropen Phasen  $-10$   $\Omega$ m in x-, y- und z-Richtung. Die Ergebnisse sind in den Abb. 6(a) bis 7(b) als scheinbare spezifische Widerstände und scheinbare Phasen in Pseudosektionen dargestellt.

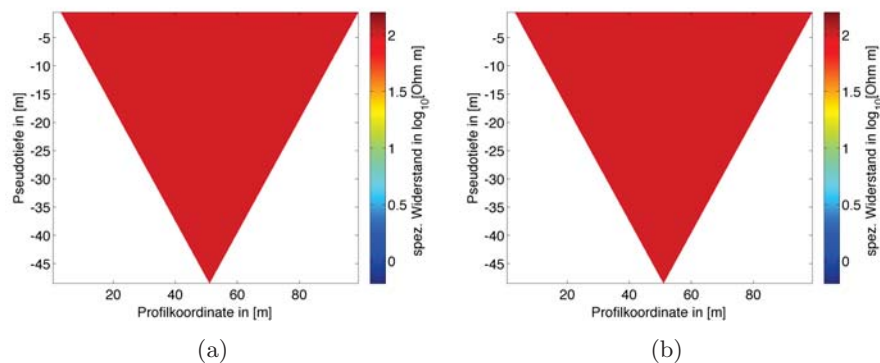


Abbildung 6: Dipol-Dipol-Pseudosektion der Amplitude des scheinbaren spezifischen Widerstands. a) Vertikale Wechsellagerung isotroper Schichten mit  $-15$  mrad und  $-5$  mrad. b) Anisotrope Beschreibung der Wechsellagerung durch Phasen  $-10$  mrad in x-, y- und z-Richtung

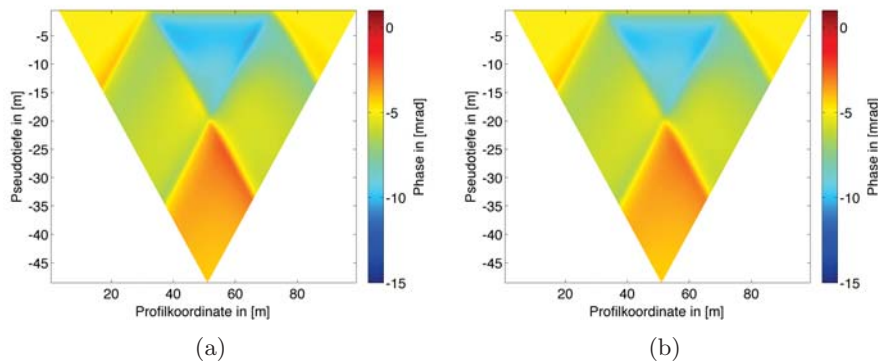


Abbildung 7: Dipol-Dipol-Pseudosektion der scheinbaren Phase. a) Vertikale Wechsellagerung isotroper Schichten mit  $-15$  mrad und  $-5$  mrad. b) Anisotrope Beschreibung der Wechsellagerung durch Phasen  $-10$  mrad in x-, y- und z-Richtung

Wie erwartet zeigt sich in den Pseudosektionen des scheinbaren spezifischen Widerstandes keine Variation mit der eingestellten Phase. Dadurch wird der in Gl. 14 und 17 aufgestellte Zusammenhang bekräftigt. Die Pseudosektionen der Phasen weisen wie die Pseudosektionen im Abschnitt 3.1 starke "Schatten" unterhalb der unteren Störkörpergrenze auf. Auch die seitlichen Flanken sind sichtbar.

## 4 Schlussfolgerungen

Es ist mit dem auf anisotrope spezifische Widerstände und Phasen erweiterten Programm CRMod nun möglich, Effekte von Anisotropie, z.B. bei Wechsellagerungen von Sedimenten, zu berücksichtigen. Die vorliegenden Ergebnisse zeigen in den möglichen Vergleichen zu analytischen Berechnungen die Gültigkeit des Programms. Es wurde hierbei insbesondere Wert auf die Vorschrift zur Berechnung des spezifischen Widerstands im Fall eines homogenen Halbraums mit anisotropen spezifischen Widerständen (vgl. Gleichung 5) gelegt. Im Zusammenhang mit der Wechsellagerung von Phasen wurde mittels der Gleichungen 14 und 17 gezeigt, dass horizontale und vertikale Wechsellagerungen gleicher Mächtigkeit und gleichen spezifischen Widerstands nicht unterschieden werden können.

Im Zusammenhang mit dieser Arbeit ist eine Messkampagne geplant, die auf stark anisotropem Untergrund stattfinden soll. Die Messdaten sollen mit entsprechenden Modellen mit anisotropen spezifischen Widerständen des vorliegenden Modellierungsprogramms erklärt werden. Zusätzlich zu dieser Anwendung besteht die Möglichkeit, auch das auf dem Modellierungsprogramm CRMod basierende Inversionsprogramm CRTomo ([2]) auf Anisotropie zu erweitern.

## 5 Danksagungen

Diese Arbeiten werden im Rahmen des Forschungsverbunds Geothermie und Hochleistungsbohrtechnik (GEBO) vom Niedersächsischen Ministerium für Wissenschaft und Kultur und von Baker Hughes/ Celle gefördert

## Literatur

- [1] A. Kemna, "Tomographic Inversion of Complex Resistivity - Theory and Application", *Berichte des Instituts für Geophysik der Ruhr-Universität Bochum*, Reihe A, Nr. 56, Der Andere Verlag, 2000, ISBN-13: 978-3934366923.
- [2] A. Kemna, "Tomographische Inversion des spezifischen Widerstandes in der Geoelektrik", Diplomarbeit, Institut für Geophysik und Meteorologie der Universität zu Köln, 1995.
- [3] F. Nguyen, S. Garambois, D. Chardon, D. Hermitte, O. Bellier, D. Jongmans, "Sub-surface electrical imaging of anisotropic formations affected by a slow active reverse fault, Provence, France", *Journal of Applied Geophysics* 62, Seiten 338 - 353, 2007.
- [4] T. Winchen, A. Kemna, H. Vereecken und J.A. Huisman, "Characterization of bimodal facies distributions using effective anisotropic complex resistivity: A 2D numerical study based on Cole-Cole models", *Geophysics* 74, Seiten A19 - A22, 2009.
- [5] K. Knödel, H. Krummel, G. Lange, "Geophysik", 2. überarbeitete Auflage, *Springer-Verlag*, Berlin, 2005, ISBN 3-540-22275-8.