

Literat

Einleitung

Geoelektrik

Elektromagnetik

Wahlpflichtmodul 35 Geophysikalische Datenanalyse

Geoelektrik und Elektromagnetik

Dr. Jens Oeser

Geophysik Department für Geo- und Umweltwissenschaften Ludwig-Maximilians-Universität München



Einleitur

< 日 > < 同 > < 三 > < 三 > < 三 > <

Veröffentlicht zu den Creative-Commons-Bedingungen: http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0



Stand: 8. Juli 2020



Literatur

Börner, Ralph-Uwe (2016). Vorlesungsskripte zu Geoelektrik und Elektromagnetik. URL: http://tu-freiberg.de/geophysik/research/ electromagnetics/members/ralph-uwe-boerner/teaching (besucht am 16.06.2016).
Knödel, Klaus, Heinrich Krummel und Gerhard Lange, Herausgeber (1997). Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten – Geophysik. Band 3. Springer Verlag Berlin, Heidelberg. ISBN: 3-540-59462-0.

Loke, Dr. M. H. (2004). *Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys*.
Militzer, Heinz und Franz Weber, Herausgeber (1985). *Angewandte Geophysik*. Band 2. Springer Verlag Wien/Akademie-Verlag Berlin.

ISBN: **3-211-81797-2**.



- 4 同 ト 4 戸 ト - 4 戸 ト

Motivation

"Sie müssen die Seele des Stroms verstehen!"

Dr. Wolfgang Goethe (Geophysik, TU Bergakademie Freiberg)



《曰》 《聞》 《臣》 《臣》

Zweckmäßige Einteilung der Verfahren

Empfänger Sender		Elektroden	Elektroden und Spulen	Spulen an der Ober- fläche	Spulen in der Luft
Kabel	Galvanisch	Geoelektrik, IP		MMR	
	Induktiv		CSAMT	LOTEM	
Spule				Slingram, TEM	Aero-TEM
Langes Kabel, Große Spule				TURAM, TEM	
Ebene	Vertikale Antenne		VLF-R	VLF	VLF
Welle	Natürl. EM-Felder	Tellurik	МТ		

E



Einteilung der Verfahren nach Merkmalen der Felder

Physikalischer Begriff	$\nabla \times \vec{H}$	$ abla imes ec{E}$	Applikation	Oberbegriff
Wellenvor- gänge	$\vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$	$-\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	Georadar/GPR	HF-Methoden
Quasistatio- näre Vorgänge	j	$-\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	MT, VLF, EM	NF-Methoden
Stationäre Felder	j	0	Geoelektrik, Tellurik	DC-Methode
Statische Fel- der	0	0		

E



Geoelektrik – Beispiele

• Widerstandsverteilung innerhalb einer Schlackehalde (Börner 2016):





Elektromagnetik

Geoelektrik – Beispiele

• Oberkante einer Tonschicht (Börner 2016):





Geoelektrik – Beispiele

• 3-D-Geoelektrik und Topographie (Börner 2016):





Einleitu

Geoelektrik

Elektromagnetik

《曰》 《聞》 《臣》 《臣》

Geoelektrik – Beispiele

• Rothschönberger Stollen (Börner 2016):



10/181

Э



Geoelektrik

• Messprinzip der Gleichstromgeoelektrik mit einer Vierpunktanordnung (Knödel, Krummel und Lange 1997):





< 同 > < 三 > < 三 >

Merkmale der Geoelektrik

- technisch erzeugte Stromquellen
- Punktquellen
- simultane Strom- und Spannungsmessung
- scheinbarer spezifischer elektrischer Widerstand (ρ_s in $\Omega \cdot m$)





Messung

- elektrische Potentiale
- Potentialdifferenzen
- Stromstärke
- Kontrolle über Messgrößen

Э



・ 同 ト ・ ヨ ト ・ ヨ ト

Praxis

- hohe Empfindlichkeit bzgl. oberflächennaher Leitfähigkeitsunterschiede
- permanenter elektrischer Rauschpegel
- mehrkanalige Multielektroden-Apparaturen
- numerische Simulation/Inversion durchführbar
- 3D-Messungen
- Beziehungen zwischen spezifischem elektrischen Widerstand und hydrologischen Parametern gut verstanden



< 同 > < 三 > < 三 >

Einsatz

- räumliche Verteilung der elektrischen Eigenschaften
- Strukturaussagen
- Stoffaussagen
- Polarisationseigenschaften (IP)
- dielektrische Eigenschaften
- Beobachtung räumlicher elektrischer Felder



Spezifischer Elektrischer Widerstand ϱ

- Wertebereich umfasst 25 Dekaden
- Diamant: $10^{18} \Omega \cdot m$
- Kupfer: $10^{-7} \ \Omega \cdot m$
- isotrop/anisotrop
- ϱ abhängig von:
 - Porenraumstruktur
 - Porosität
 - Wassersättigung
 - Chemismus des Porenfluids (Salzgehalt)
- ϱ sinkt mit:
 - steigender Wassersättigung
 - wachsendem Anteil toniger Bestandteile
 - zunehmendem Ionengehalt des Porenraumelektrolyt



Leitfähigkeitsmechanismen

- elektronische (metallische) Leitfähigkeit
- elektrolytische Leitfähigkeit
- Grenzflächenleitfähigkeit

Э



Spezifischer Elektrischer Widerstand von Gesteinen

Material	Minimum in $\Omega \cdot m$	Maximum in $\Omega \cdot m$
Kies	50 (wassergesättigt)	$> 10^4$ (trocken)
Sand	50 (wassergesättigt)	$> 10^4$ (trocken)
Schluff	20	. 50
Geschiebemergel	30	70
Lößlehm	30	100
Lehm (als Ziegel)	500	5000
Ton (erdfeucht)	3	30
Ton (trocken)		> 1000
Torf, Humus, Schlick	15	25
Faulschlamm	10	40
Moorböden	10	150
Braunkohle	10	150
Erdöl	10 ⁹	10 ¹²
Haus- u. Industriemüll	< 1	> 1000 (Plaste)
Sandstein	< 50 (klüftig, feucht)	$> 10^5$ (kompakt)
Kalkstein	100 (klüftig, feucht)	$> 10^5$ (kompakt)
Tonschiefer	50 (klüftig, feucht)	$> 10^5$ (kompakt)
Magmatite, Metamorphite	150 (verwittert, feucht)	> 10 ⁶ (kompakt)
Schwarzschiefer	< 1	50
Steinsalz	30 (feucht)	$> 10^6$ (trocken)
Destilliertes Wasser		$> 10^{3}$
Schneefirn		$> 10^{5}$
Natürliche Wässer	10	300
Meerwasser (35 ‰NaCl)	0.25	
Salzlaugen	< 0.1	

 aus Knödel, Krummel und Lange 1997 entnommen

∃ >

Dr. Jens Oeser



Einleitun

・ 同 ト ・ ヨ ト ・ ヨ ト

Elektronische Leitfähigkeit

- spezifischer Widerstand gesteinsbildender Minerale ist mit Werten von $10^{10}\,\ldots\,10^{14}~\Omega{\cdot}{\rm m}$ sehr hoch
- in diesem Bereich liegen spezifische Widerstände trockener Gesteine
- wasserfreie Gesteine, welche bei Raumtemperatur einen geringen spezifischen Widerstand aufweisen, enthalten Erzminerale oder Kohlenstoff in hochentkohlter Form (Graphit)
 - Stromfluss wird durch freie Elektronen realisiert
- im Allgemeinen ist Gesteinsmatrix jedoch Isolator
- helle Gesteinsbestandteile schlechter leitend als dunkle



Elektrolytische Leitfähigkeit

- Bildung elektrolytischer Stromleitung in Gesteinsporen ab gewisser Wassersättigung
- Realisierung des Ladungstransports über im Porenfluid enthaltene ionische Anteile gelöster Salze
- wesentlich für Zustandekommen eines Stromflusses ist galvanische Kopplung der Wassereinschlüsse
- selbst bei niedriger Wassersättigung kann so ein dünner Feuchtigkeitsfilm die elektrische Leitfähigkeit um mehrere Zehnerpotenzen erhöhen
- da meisten oberflächennahen Sedimente zumindest teilgesättigt sind, wird ihre Leitfähigkeit von der Leitfähigkeit der Porenfüllung beschrieben



 spezifischer Widerstand tonfreier Sedimente wird in guter N\u00e4herung durch Archie-Beziehung beschrieben (Widerstand des Gesamtgestein – engl. "bulk resistivity"):

$$\varrho_0 = \varrho_w \frac{a}{\Phi^m} S^{-n} \tag{1}$$

• mit:

- ρ_0 ... spezifischer elektrischer Widerstand des Sediments
- ϱ_w ... spezifischer elektrischer Widerstand des Porenfluids
 - S ... Sättigungsgrad
 - n ... Sättigungsexponent ($n \simeq 2$)
 - m ... Zementationsexponent (1.3 < m < 2.4)
 - Φ ... effektive Porosität
 - *a* ... Proportionalitätsfaktor (0.5 < a < 1)



Grenzflächenleitfähigkeit

- vor allem als Eigenschaft der Tonminerale bekannt
 - ► steht in Verbindung zu deren Kationenaustauschkapazität
- Tonminerale bilden auf Grund ihrer Kristallstruktur elektrische Doppelschichten, welche aufgebaut sind aus Ionen der im Schichtwasser enthaltenen Salze
- hohe Kationenkonzentration der tonigen Gesteins- bzw. Porenbereiche ist Ursache für deren gegenüber dem tonfreien Bereich verändertes elektrochemisches Verhalten
- Grenzflächenleitfähigkeit liefert einen zum Porenwasser zusätzlichen Leitfähigkeitsbeitrag:
 - umso stärker je geringer Leitfähigkeit des Porenwassers selbst und je höher Tongehalt

(4 戸) (日) (日)



Theoretische Grundlagen

• Basis aller Überlegungen zu elektromagnetischen Problemstellungen bilden die von James Clerk Maxwell zwischen 1861 und 1864 zusammengetragenen Gleichungen:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$
(2)

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$
(3)

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$
(4)

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho$$
(5)



- erste MAXWELLsche Gleichung (Formel 2)
 - ► AMPEREsches Durchflutungsgesetz
 - ► beschreibt Beziehung zwischen magnetischer Feldstärke \vec{H} , elektrischer Stromdichte \vec{j} und elektrischer Flussdichte \vec{D}
 - Wirbel des magnetischen Feldes werden durch elektrische Stromdichte und zeitliche Veränderung der elektrischen Flussdichte hervorgerufen
- zweite MAXWELLsche Gleichung (Formel 3)
 - FARADAYsches Induktionsgesetz
 - ▶ verknüpft elektrische Feldstärke \vec{E} und magnetische Flussdichte \vec{B} miteinander
 - Wirbel des elektrischen Feldes entstehen durch zeitliche Veränderung der magnetischen Flussdichte

A (1) > (1) > (1)

E 14



iteratur

Einleitung

・ 吊 ト ・ ヨ ト ・ ヨ ト

- dritte MAXWELLsche Gleichung (Formel 4)
 - ► GAUSSsches Gesetz für Magnetfelder
 - magnetische Flussdichte \vec{B} besitzt keine Quellen
 - es gibt keine magnetischen Monopole
- vierte Maxwellschen Gleichung (Formel 5)
 - GAUSSSches Gesetz
 - elektrische Ladungsdichte ρ ist Quelle des elektrischen Feldes



• vier Feldgleichungen sind über Materialgleichungen miteinander verknüpft:

$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$
(6)
$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E}$$
(7)
$$\vec{j} = \sigma \vec{E}$$
(8)

《曰》 《聞》 《臣》 《臣》

• mit Materialgrößen:

$\mu = \mu_0 \mu_r$	magnetische Permeabilität	$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$	dielektrische Permittivität
μ_0	magnetische Feldkonstante	ε_0	elektrische Feldkonstante
μ_r	relative Permeabilitätszahl	εr	relative Permittivität

Э



- erste und zweite Materialgleichung (Formeln 6 und 7)
 - verknüpfen die Feldstärke (magnetische oder elektrische) mit der entsprechenden Flussdichte über Materialparameter
- dritte Materialgleichung (Formel 8)
 - OHMsches Gesetz
 - ▶ verbindet die elektrische Stromdichte \vec{j} mit der elektrischen Feldstärke \vec{E} über die elektrische Leitfähigkeit $\sigma = 1/\varrho$
 - ϱ ist spezifischer elektrischer Widerstand
- Materialparameter $\mu,\,\varepsilon$ und σ sind im Allgemeinen tensorielle Größen, welche von Druck, Temperatur und den Feldgrößen selbst abhängen können
- meist geht man von linearen, isotropen und homogenen Materialparametern aus



- Gleichstromgeoelektrik verwendet stationäre Felder und Ströme
 - ► MAXWELLsche Gleichungen vereinfachen sich
 - partielle Ableitungen nach Zeit sind gleich Null
 - zweite MAXWELLsche Gleichung (3) wird zu:

$$\nabla \times \vec{E} = 0 \tag{9}$$

- damit ist elektrisches Feld wirbelfrei
- darstellbar als Gradient des elektrischen Skalarpotentials φ :

$$\vec{E} = -\nabla\varphi \tag{10}$$

A A

E 14



• im gesammten Gebiet gilt Kontinuitätsgleichung, welche sich durch Bilden der Divergenz von der ersten MAXWELLsche Gleichung (2) ergibt (Q bezeichnet Quellterm):

$$\nabla \cdot \vec{j} = Q \tag{11}$$

- in Geoelektrik sind Elektroden die Quellen über diese wird Boden galvanisch Strom zugeführt
- Stromelektrode wird näherungsweise betrachtet als Punktquelle
- mit Quelle bei r
 _s und es flie
 ßt elektrischer Strom der St
 ärke I, so l
 ässt
 sich Q schreiben als:

$$Q = I\delta(\vec{r} - \vec{r_s}) \tag{12}$$

• δ ist DIRACsche Deltadistribution / \vec{r} Ortsvektor innerhalb des Gebietes



• durch Einsetzen folgt aus Gleichungen (8), (10), (11) und (12) die partielle Differentialgleichung zweiter Ordnung, welche als Gleichstrom-Grundgleichung bezeichnet wird:

$$\nabla \cdot (\sigma(\vec{r}) \nabla \varphi(\vec{r})) = -I\delta(\vec{r} - \vec{r}_s)$$
(13)

- Gleichung (13) ist für beliebige Verteilungen von $\sigma(\vec{r})$ nur numerisch lösbar
- befindet sich Quelle der Stromeinspeisung an der Oberfläche eines homogenen Halbraumes (homogen bedeutet, σ ist konstant), so hat Gleichung (13) mit der Randbedingung lim_{|r|→∞} φ = 0 die Lösung:

$$\varphi(\vec{r}) = \frac{l}{2\pi\sigma|\vec{r} - \vec{r_s}|} = \frac{\varrho l}{2\pi|\vec{r} - \vec{r_s}|}$$
(14)



• für homogene (σ ist konstant), quellenfreie (Q = 0), elektrisch leitfähige Medien folgt:

$$0 = \nabla \cdot (\sigma \nabla \varphi) \tag{15}$$

$$0 = \nabla \sigma \cdot \nabla \varphi + \sigma \nabla^2 \varphi \tag{16}$$

$$0 = \Delta \varphi \tag{17}$$

• Potential des elektrischen Feldes genügt der Laplace-Gleichung



Punktelektrode im Vollraum

- für Fall der Stromeinspeisung über eine einzelne Elektrode lässt sich auf Grundlage der Gleichung (13) das Potential in Entferung $r = |\vec{r} \vec{r_s}|$ von Punktelektrode berechnen
- Symmetrie des Problems legt Wahl des kugelsymmetrischen Koordinatensystems nahe
 - Potential wird Funktion von r
- Laplace-Gleichung vereinfacht sich für diesen Fall:

$$\Delta \varphi = \frac{d^2 \varphi}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{d\varphi}{dr} = 0$$
 (18)

• Integration liefert:

$$\frac{d\varphi}{dr} = \frac{C_1}{r^2} \tag{19}$$



• führt zur Lösung

$$\varphi(r) = -\frac{C_1}{r} + C_2 \tag{20}$$

- Integrationskonstanten C_1 und C_2 sind noch unbestimmt
- Untersuchung des Verhaltens des Potentials für $r
 ightarrow \infty$

•
$$C_2 = 0$$

• Gesamtstrom / durchströmt eine Kugelfläche mit der Oberfläche:

$$A = 4\pi r^2 \tag{21}$$

< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 > < 0 >

• somit erhält man mit der Stromdichte *j*:

$$I = 4\pi r^2 j = -4\pi r^2 \sigma \frac{d\varphi}{dr} = -4\pi\sigma C_1$$
(22)



• somit ist C₁ bestimmt und man erhält:

$$\varphi(r) = \frac{\varrho I}{4\pi r} \tag{23}$$

+ für das Potential einer Punktelektrode im homogenen Vollraum des spezifischen elektrischen Widerstands ϱ

3



Einleitung

Geoelektrik

- 4 周 ト 4 日 ト 4 日 ト

Punktelektrode an Oberfläche

- Stromelektrode auf Oberfläche eines homogenen isotropen Halbraums
 - Gesamtstrom flie
 ßt im unteren Halbraum durch eine Halbkugeloberfläche
- wichtig ist das Verhalten des elektrischen Feldes auf der Oberfläche des Halbraums
 - ► wegen $\sigma \approx 0$ wird für Vertikalkomponente des elektrischen Feldes an der Erdoberfläche $E_z = -\frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0$ gefordert
- Forderung wird erfüllt für z = 0 durch:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(-\frac{C_1}{r} \right) = -\frac{d}{dr} \frac{\partial r}{\partial z} = C_1 \frac{z}{r^3} = 0$$
(24)



- Nachweis, dass der Strom in diesem Fall tatsächlich durch eine Halbkugeloberfläche fließt
- für elektrische Potential im homogenen Halbraum mit spezifischen elektrischen Widerstand ϱ erhält man:

$$\varphi(\mathbf{r}) = \frac{\varrho I}{2\pi r} \tag{25}$$



E


Zwei Elektroden an Oberfläche

- bei endlichem Abstand der beiden Einspeisungspunkte r₁ und r₂ wird das Potential von beiden Stromelektroden beeinflusst
- berücksichtigt man Polarität der Stromeinspeisung und überlagert berechnete Potentiale der jeweiligen Stromelektroden (Superposition), kann das Potential im Punkt r gemäß folgender Beziehung berechnet werden:

$$\varphi(r) = \frac{\varrho I}{2\pi} \left(\frac{1}{|r-r_1|} - \frac{1}{|r-r_2|} \right)$$
(26)



Vierpunktanordnung

- bisher war immer von elektrische Potentiale die Rede
- diese lassen sich messtechnisch nur gegen ein Bezugspotential erfassen
- so gelangt man zur elektrischen Potentialdifferenz oder Spannung
- Erweiterung der oben genannten Beziehungen, indem die Potentiale über zwei Sonden als Spannung abgegriffen werden
- aus der Berechnung der Potentiale f
 ür die Vierpunktanordnung (Stromeinspeisung
 über Elektroden A und B, Spannungsmessung über M und N) sowie unter Beachtung der Vorzeichen erh
 ält man:

$$U = \Delta \varphi = \varphi_M - \varphi_N = \frac{\varrho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} - \frac{1}{r_{AN}} + \frac{1}{r_{BN}} \right)$$
(27)

・ロト ・ 日 ・ ・ 日 ・ ・ 日 ・



• über einem homogenen Halbraum liefert die Messung von *U* und *I* bei bekannten Abständen den spezifischen elektrischen Widerstand

$$\varrho = \frac{U}{I} \frac{2\pi}{\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} - \frac{1}{r_{AN}} + \frac{1}{r_{BN}}} = k \cdot \frac{U}{I}$$
(28)

- mit k als Geometrie- oder Konfigurationsfaktor
- Gleichung (28) wird als NEUMANNsche Formel bezeichnet
 - ► liefert im Falle eines inhomogenen Untergrunds den scheinbaren spezifischen Widerstand *Qs*

- 4 昂 ト 4 戸 ト 4 戸 ト



< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < □ > <

Scheinbarer spezifischer elektrischer Widerstand

- bei natürlichen Bedingungen ist der Erdhalbraum nicht homogen
- hat Veränderung der Potentialverteilung gegenüber Gleichung (27) zur Folge
- in diesem Fall folgt bei Anwendung der NEUMANNschen Formel (28) als berechnete Größe der scheinbare spezifische Widerstand
- Größe ist von Abmessungen der Elektrodenanordnung abhängig
- für jeweils verwendete Elektrodenanordnung verhält sich der inhomogene Erdhalbraum am Ort der Messung wie ein homogener Erdhalbraum mit dem spezifischen elektrischen Widerstand *ρ* = *ρ*_s(*L*) = konstant



Übergangswiderstand

- Übergangswiderstände an Elektroden spielen erhebliche Rolle
- Widerstände *R_A* und *R_B* entstehen als Folge von Kontaktpotentialen an Grenzfläche Metall/Elektrolyt und sind messtechnisch nicht erfassbar
- U bei Zweipunktmessung jedoch proportional zu $R = R_E + R_A + R_B$
- über gesonderten Messkreis mit stromloser Spannungsmessung wird ausschließlich *R_E* bestimmt:





Erdungswiderstand

- reale Elektroden sind keine Punktelektroden
- meist Stabelektroden der Länge e mit verschiedene Durchmessern
- halbkugelförmige Elektrode mit Radius a auch möglich





• Potential der Punktelektrode:

$$\varphi_P = \frac{\varrho I}{2\pi r} \tag{29}$$

• Potential der Stabelektrode nach Sommerfeld:

$$\varphi_{S} = -\frac{\varrho I}{4\pi e} \ln \left| \frac{z - e + \sqrt{r^{2} + (z - e)^{2}}}{z + e + \sqrt{r^{2} + (z + e)^{2}}} \right|$$

• Potential auf der Halbkugeloberfläche:

$$\varphi_H = \frac{\varrho I}{2\pi r} \tag{31}$$

E

(30)



• Fehler für Potential in x - z-Ebene := $(\varphi_s - \varphi_P)/\varphi_P \cdot 100\%$



E



- Stabelektrode pprox Rotationsellipsoid mit Halbachsen a und b (b \ll a)
- Äquipotentialflächen ($\varphi(r, z) = konstant$) sind gestreckte Ellipsoide mit Brennpunktabstand $e = \sqrt{a^2 b^2}$
- Spannung auf Elektrode beträgt mit r = 0 und z = a:

$$\varphi(0,a) = U = -\frac{\varrho I}{4\pi e} \ln \frac{|a-e|}{a+e}$$
(32)

• somit ergibt sich Erdungswiderstand für Stabelektrode:

$$R_E = \frac{U}{I} = \frac{\varrho}{4\pi e} \ln \frac{a+e}{|a-e|}$$
(33)

• wegen $b \ll a$ ist:

$$R_E \approx \frac{\varrho}{2\pi a} \ln \frac{2a}{b} \tag{34}$$



• Stabelektrode $r = 0.01 \,\mathrm{m}$, $\varrho = 100 \,\Omega \cdot \mathrm{m}$:



Э



• Erdungswiderstand für Halbkugelelektrode:

$$R_E = \frac{\varrho}{2\pi a} \tag{35}$$

• somit ergeben sich folgende Erdungswiderstände R_E von Stabelektroden ($b = 0,01 \,\mathrm{m}$) verschiedener Länge *a* für $\varrho = 100 \,\Omega \cdot \mathrm{m}$ und äquivalenten Radien a_K einer Halbkugelelektrode:

a [m]	$R_E[\Omega]$	а_К [m]
0,40	174	0,09
0,80	101	0,16
1,20	73	0,22



- Stabelektroden praktischer obwohl Halbkugelelektroden kleiner sind:
 - inniger Kontakt durch Einschlagen der Elektroden
 - Eindringen in tiefere und eventuell weniger trockene Bereiche möglich
 - ▶ falls Untergrund zu trocken \rightarrow anfeuchten
- weitere Erniedrigung des Erdungswiderstands R_E durch Gruppierung möglich (für große *I* ist R_{E3} ≈ R_E/3):





Stromverteilung

• Welcher Stromanteil fließt in einer gewissen Tiefe des homogenen Halbraums?



49/181



• horizontale Stromdichte:

$$j_{x} = -\sigma \frac{\partial \varphi}{\partial x} = -\frac{I}{2\pi} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{r_{1}} - \frac{1}{r_{2}} \right) = \frac{I}{2\pi} \left(\frac{x}{r_{1}^{3}} - \frac{x-L}{r_{2}^{3}} \right)$$
(36)

• gilt $r = r_1 = r_2$ und $x = \frac{L}{2}$, dann ist die Gesamtstromdichte: $j_x = \frac{I}{2\pi} \frac{L}{(z^2 + \frac{L^2}{4})^{\frac{3}{2}}}$ (37)

< □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > □ □



- Stromdichteverteilung für z = konstant:
 - Maximum bei $L = \sqrt{2}z$



Э



Stromdichte in einem Teufenintervall

• betrachtet man einen ∞ ausgedehnten Streifen im Intervall zwischen z_1 und z_2 in der Symmetrieebene zwischen den Stromelektroden, so ist:

$$r^2 = \frac{L^2}{4} + y^2 + z^2 \tag{38}$$

- 4 月 ト 4 日 ト 4 日 ト

• Anteil des horizontalen Stroms durch Flächenelement ist:

$$\delta I_x = j_x \, dy \, dz = \frac{I}{2\pi} \frac{L}{(y^2 + z^2 + L^2/4)^{3/2}} \, dy \, dz \tag{39}$$



• über Integration kann Anteil des Gesamtstroms im Intervall $(z_2 - z_1)$ bestimmt werden:

$$\frac{l_x}{l} = \frac{L}{2\pi} \int_{z_1}^{z_2} dz \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{dy}{(y^2 + z^2 + L^2/4)^{3/2}}$$
(40)
$$= \frac{2}{\pi} \left(\arctan \frac{2z_2}{L} - \arctan \frac{2z_1}{L} \right)$$
(41)

- Funktion hat breites Maximum für $L = 2(z_1 z_2)^{1/2}$
 - ▶ für Konzentration des maximalen Stroms zum Beispiel in einer Schicht zwischen 10 und 20 m muss L = 28 m sein

・ロト ・ 日 ・ ・ 日 ・ ・ 日 ・ ・ 日



 Anteil am Gesamtstrom von Erdoberfläche z₁ = 0 bis zur Teufe z₂ beträgt:

$$\frac{I_x}{I} = \frac{2}{\pi} \arctan \frac{2z_2}{L}$$
(42)

- genau 50% des Gesamtstroms fließt zwischen $z_1 = 0$ und $z_2 = L/2$
 - Grundlage der Widerstandstiefensondierung

3



Stromverteilung im Untergrund



Э



Verhalten an Grenzflächen

- bevor Aussagen zum Verhalten der Feldgrößen getroffen werden können, müssen zunächst Annahmen gemacht werden über Stetigkeit von:
 - Potential
 - elektrischem Feld
 - Stromdichte
- Stetigkeitsbedingungen an einer Grenzfläche:
 - 1. Tangentialkomponenten des elektrischen Felds sind stetig
 - 2. Normalkomponente der Stromdichte ist stetig
 - 3. Potential ist stetig

< A > <

물 비 비 물 비







• mit Hilfe des OHMschen Gesetz $\vec{j} = \sigma \vec{E}$ erhalten wir die Komponenten der Stromdichte:

$$j_{x_1}\varrho_1 = j_{x_2}\varrho_2$$
 (43)
 $j_{z_1} = j_{z_2}$ (44)

• nach Division beider Gleichungen:

 ρ

$$\varrho_1 \frac{j_{x_1}}{j_{z_1}} = \varrho_2 \frac{j_{x_2}}{j_{z_2}}$$

$$oder$$

$$_1 \tan \theta_1 = \varrho_2 \tan \theta_2$$
(45)

< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ >

Э



• als Brechungsgesetz erhält man die Beziehung:

$$\frac{\tan \theta_2}{\tan \theta_1} = \frac{\varrho_1}{\varrho_2} = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \tag{47}$$

- Stromlinien werden beim Eintreten in guten Leiter vom Lot weg- und beim Eintritt in schlechten Leiter zum Lot hingebrochen
- Zusammenhänge komplizierter, wenn Verlauf der Äquipotentiallinien auf Grund der Verzerrung der Stromlinien berechnet werden soll





- Stromkanalisierung in guten Leitern (links)
- Stromverdrängung in schlechten Leitern (rechts)



Knödel, Krummel und Lange 1997 entnommen

Э

・ロッ ・ 一 ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・



Elektrodenanordnung

- Elektroden können im Prinzip beliebig platziert werden
- zweckmäßig ist allerdings eine Anordnung in radialer Richtung mit teilweiser Symmetrie
- so erhaltene Konfigurationen haben spezifische Vor- und Nachteile mit Blick auf:
 - messtechnischem Aufwand
 - Messgenauigkeit
 - Nutz/Stör-Verhältnis



・ロッ ・ 一 ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・

Anordnungen und ihre Konfigurationsfaktoren

Name	Anordnung	<i>k</i> =		
Wenner Alpha	A-a-M-a-N-a-B	2π <i>a</i>		
Wenner Beta	B-a-A-a-M-a-N	6π <i>a</i>		
Wenner GAMMA	A-a-M-a-B-a-N	$3\pi a$		
Dipol-Dipol	B-a-A-na-M-a-N	$\pi n(n+1)(n+2)a$		
Pol-Dipol	A-na-M-a-N $(B ightarrow\infty)$	$2\pi n(n+1)a$		
Pol-Pol	A-a-M $(B, N ightarrow \infty)$	2π <i>a</i>		
Schlumberger	A–M-N–B ($AB \gg MN$)	$\frac{\pi}{MN} \left[\left(\frac{AB}{2}^2 \right) - \left(\frac{MN}{2}^2 \right) \right]$		

• n ist die Separation

Э



• a) Wenner- und b) Schlumberger-Anordnung



- Konfigurationsfaktor bestimmt wesentlich die messtechnische Realisierbarkeit geoelektrischer Studien
- bekannter Zusammenhang:

$$U = \frac{\varrho I}{k} \tag{48}$$

< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ >

- für ρ , I = konstant gilt daher:
 - ► je größer der Konfigurationsfaktor, desto geringer die Messspannung



Dipol-Dipol: $\varrho = 100 \ \Omega \cdot m$, I = 0, 10 A, a = 2 m





Scheinbarer spezifischer Widerstand

- für homogenen Untergrund ist aus NEUMANNscher Formel erhaltener spezifischer Widerstand unabhängig von der Anordnungskonfiguration
- für inhomogenen Untergrund wird weiterhin die NEUMANNsche Formel verwendet
 - ▶ es kann jetzt nur noch ein scheinbarer spezifischer Widerstand ρ_s oder ρ_a (von "apparent resistivity") bestimmt werden
 - dieser ist Funktion der Konfiguration, insbesondere der Auslagenweite AB bzw. L:

$$\varrho_s = \varrho_s(k) = \varrho_s(L)$$

• scheinbarer spezifischer Widerstand, da sich der Messwert so verhält, als wäre der Untergrund scheinbar aufgebaut aus homogenen Material des spezifischen Widerstands $\varrho = \varrho_s = konstant$



(日) (문) (문) (문) (문)

Englische Fachbegriffe

spezifischer elektrischer Widerstand	ρ	resistivity
ohmscher Widerstand	Ω	resistance
scheinbarer spezifischer Widerstand	Qs	apparent resistivity
Widerstand des Gesamtgestein		bulk resistivity
Leitfähigkeit	σ	conductivity
Leitwert	S	conductance



Einleitun

Geoelektrik

Widerstandstiefensondierung

- "DC Resistivity Sounding"
- "Vertikale Elektrische Sondierung Vertical Electrical Sounding"
- Aufgabe: Bestimmung der vertikalen Schichtenfolgen bei horizontaler Lagerung von Schichten mit jeweils unterschiedlicher Mächtigkeit und spezifischem elektrischen Widerstand

h_1	ϱ_1	Sand
h_2	ϱ_2	Grundwasserleiter
<i>h</i> 3	ϱ_3	Ton
÷	÷	:



Methodik

- Untersuchung der Veränderung von ρ_s in Abhängigkeit von:
 - Auslagenlänge (\overline{AB}) oder
 - Abstand zwischen Messpunkt und Stromeinspeisung
- damit gilt:

$$\varrho_s = f(\overline{AB}) \quad \text{oder} \quad \varrho_s = f(Abstand)$$

• Ergebnis der Messungen ist eine Sondierungskurve



Sondierungskurve



69/181

Э

∃ ⊳



Anordnungen für Sondierung

- prinzipiell ist jede Anordnung zur Tiefensondierung geeignet
- am häufigsten werden symmetrische Anordnungen verwendet
 - insbesondere Schlumberger
- unter Beibehaltung des Mittelpunktes werden Elektroden nach außen versetzt
- Wenner-Anordnung:
 - immer vier Elektroden zu versetzen
 - keine maßstabsgetreue Skizze:





- Schlumberger-Anordnung:
 - nur zwei Elektroden zu versetzen
 - keine maßstabsgetreue Skizze:



Э

< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ >



- Spannungsabfall zu gering $\rightarrow \overline{MN}$ vergrößern, d.h. Umsetzen der Elektroden M und N
- Astkorrektur
- Drehsondierung
- übliche Darstellung der Sondierungskurve erfordert logarithmisch äquidistante Abstände für $\overline{AB}/2$ (8 pro Dekade), z.B.:

1,0 m	1,3 m	1,8 m	2,4 m	3,2 m	4,2 m	5,6 m	7,5 m
10,0 m	13,0 m	18,0 m	24,0 m	32,0 m	42,0 m	56,0 m	75,0 m
100,0 m	130,0 m	180,0 m	240,0 m	320,0 m	420,0 m	560,0 m	750,0 m

3


Auswertung

früher:

- Masterkurven
- Asymptotik
- veraltet
- heute:
- Modellierung
- Inversion
- bevorzugt

E



Einleitung

<ロ> <同> <同> < 同> < 同>

Interpretation einer Zweischicht-Sondierungskurve



Militzer und Weber 1985 entnommen

74/181

Э



(ロ) (部) (E) (E) (E)

Musterkurven



Militzer und Weber 1985 entnommen

75/181



Besonderheiten bei Auswertetechniken

- Darstellung doppelt logarithmisch:
 - historische Gründe \rightarrow Kurvenatlanten
 - invariant gegen Verschiebung
- zu homogenen Einzelschichten in Schichtmodellen werden reduziert:
 - Stapel nicht aufgelöster dünner Schichten
 - Gradientzonen
- Aquivalenzprinzip gilt bei allen Potentialverfahren, daher gilt zusätzlich:
 - ► Äquivalenz im Rahmen der Messgenauigkeit → äquivalente Modellantworten
 - Äquivalenz auf Grund diskreter Messung (Tiefenabstände)
 - Dünnschicht-Äquivalenz



Detektierbarkeit und Unterscheidbarkeit

- Sondierungskurventyp
 - gutleitende Schicht
 - schlechtleitende Schicht
- minimale Zahl beteiligter Schichten
 - OCCAM Rassiermesser: nicht mehr Einzelschichten annehmen als notwendig
- Können ϱ und *h* einer eingebetteten Schicht aus einer Sondierungskurve ermittelt werden?

\uparrow	ϱ_1	h_1
н	ϱ_2	h_2
••	:	:
	•	•
\downarrow	Qn	hn



Äquivalenzprinzip

- Unterscheidbarkeit von hochohmigen bzw. niederohmigen Schichten
- schematisches Modell:

			hochohmig	niederohmig
1 m	ϱ_1	=	$1 \ \Omega \cdot m$	100 Ω·m
$1\mathrm{m}$	ϱ_2	=	200 Ω·m	5 Ω·m
	<i>Q</i> 3	=	$1 \ \Omega \cdot m$	100 Ω·m

Э

◆□ > ◆□ > ◆□ > ◆□ >



Vertikaler Stromfluss

• dünne schlecht leitende Schicht



Börner 2016 entnommen

• Ohmsches Gesetz:

$$R_i = \varrho_i rac{ ext{Länge}}{ ext{Querschnitt}} = \varrho_i rac{l}{A} o \varrho_i h_i$$

• $R = \text{konstant für } \rho \cdot h = \text{konstant}$

< □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > □ □



• entspricht einer elektrischen Reihenschaltung:

$$R_{Ges} = \sum_{i=1}^{n} R_i$$

• Gesamtwiderstand daher:

$$R_{Ges} = \sum_{i=1}^{n} \varrho_i h_i = T$$

• Transversaler spezifischer Widerstand (Querwiderstand):

$$\varrho_t = \frac{T}{H} = \frac{\sum_{i=1}^n \varrho_i h_i}{\sum_{i=1}^n h_i}$$

Э



Horizontaler Stromfluss

• dünne gut leitende Schicht



Börner 2016 entnommen

• OHMsches Gesetz:

$$R_i = \varrho_i rac{\mathrm{Länge}}{\mathrm{Querschnitt}} = \varrho_i rac{l}{A} o rac{\varrho_i}{h_i}$$

•
$$R = \text{konstant für } \varrho/h = \text{konstant}$$

E



• entspricht einer elektrischen Parallelschaltung:

$$\frac{1}{R_{Ges}} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{R_i}$$

• Gesamtwiderstand daher:

$$\frac{1}{R_{Ges}} = \sum_{i=1}^{n} \frac{h_i}{\varrho_i} = \sum_{i=1}^{n} \sigma_i h_i = S$$

• Longitudinale Leitfähigkeit (Längsleitfähigkeit):

$$\sigma_{I} = \frac{S}{H} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \sigma_{i} h_{i}}{\sum_{i=1}^{n} h_{i}} \qquad \varrho_{I} = \frac{1}{\sigma_{I}}$$

Э



Literat

Einleitung

Geoelektrik

Elektromagnetik



Knödel, Krummel und Lange 1997 entnommen

83/181



Anisotropie

• Anisotropie:

$$\varrho_I < \varrho_t$$

• Anisotropiekoeffizient:

$$\lambda = \sqrt{\frac{\varrho_t}{\varrho_l}} > 1 \tag{49}$$

・ロッ ・ 一 ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・

- beispielhaft eine Wechsellagerung:
 - ► *H* = 100 m
 - Schichten mit 50 und 200 $\Omega{\cdot}{\rm m}$ im Wechsel
 - 1 m Schichtmächtigkeit

Э



(日) (문) (문) (문) (문)

• Berechnen Sie folgende Werte:

- Querwiderstand:
 - ► *T* =
 - $\varrho_t =$
- Längsleitfähigkeit:
 - ► *S* =
 - ▶ *Q*₁ =
- Anisotropiekoeffizient:
 - $\blacktriangleright \ \lambda =$



・ロッ ・ 一 ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・

• Berechnen Sie folgende Werte:

- Querwiderstand:
 - $T = 12500 \ \Omega \cdot \mathrm{m}^2$
 - $\rho_t = 125 \ \Omega \cdot m$
- Längsleitfähigkeit:
 - ► *S* = 1,25 S
 - ▶ ρ_l = 80 Ω·m
- Anisotropiekoeffizient:
 - ▶ λ = 1,25

E



Anisotropie Paradoxon

- horizontal (longitudinal): $\varrho_l = \frac{H}{S}$
- vertikal (transversal): $\varrho_t = \frac{T}{H}$
- Stromdichtekomponenten:

$$j_x = \frac{E_x}{\varrho_I}, \qquad j_y = \frac{E_y}{\varrho_I}, \qquad j_z = \frac{E_z}{\varrho_t}$$

• Lösung der Laplace Gleichung für Potential führt auf:

$$\varphi = \frac{I\lambda \varrho_I^{3/2}}{2\pi \varrho_I^{1/2} \sqrt{x^2 + y^2 + \lambda^2 z^2}}$$
(50)







- $\varrho_x = \varrho_y = \varrho_I$, $\varrho_z = \varrho_t$
- Potentialmessung in z = 0, $a = \sqrt{x^2 + y^2}$:

$$\varphi = \frac{I\lambda\varrho_I}{2\pi a}$$

• *ρ*_s für Pol-Pol-Messung:

$$\varrho_s = 2\pi a \frac{U}{I} = \lambda \varrho_I = \sqrt{\varrho_t \varrho_I} = \varrho_m$$

 allein aus Potentialmessungen bei z = 0 ist der anisotrope Halbraum nicht vom isotropen Halbraum zu unterscheiden

Dr. Jens Oeser





•
$$\varrho_x = \varrho_z = \varrho_I, \ \varrho_y = \varrho_t$$

 $\varphi = \frac{I \varrho_m}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{x^2 + \lambda^2 y^2 + z^2}}$

- Potentialmessung in z = 0: Äquipotentiallinien sind Ellipsen
- Potentialmessung entlang x-Achse || Schieferung: $\rho_s = \rho_m = \lambda \rho_l$
- Potentialmessung entlang y-Achse \perp Schieferung: $\varrho_s = \varrho_l$

3



Anisotropieparadoxon

- maximales ρ_s wird entlang der Streichrichtung gemessen
- quer zu Streichrichtung ist ρ_s kleiner
- bei Sondierung ist $\rho_s = \lambda \rho_l$ und daher werden Mächtigkeiten überschätzt
- wichtige Konsequenz der Anisotropie ist prinzipielle Mehrdeutigkeit der Geoelektrik
 - jede isotrope Schicht der Leitfähigkeit σ und Mächtigkeit h kann durch eine anisotrope Schicht ersetzt werden mit:

•
$$\sigma_l = \sigma \cdot \lambda$$

•
$$\sigma_t = \sigma / \lambda$$

- Schichtmächtigkeit ^h/λ
- Anisotropiekoeffizient kann beliebig gewählt werden $\lambda > 1$



- mit unterschiedlichen Verfahren (Geoelektrik, Elektromagnetik) werden unterschiedliche Leitfähigkeiten gemessen:
 - bei Gleichstromverfahren verlaufen Stromlinien vorwiegend schräg bis vertikal und daher Messung geringerer Leitfähigkeiten
 - ► bei elektromagnetischen Verfahren fließen induzierte Wirbelströme quasi horizontal
 - damit erhält man unterschiedliche Schichtenmodelle
- Lösung: kombinierte Messungen und gemeinsame Inversion \rightarrow gesteigertes Auflösungsvermögen

・ 同 ト ・ ヨ ト ・ ヨ ト



Widerstandskartierung

Aufgabe: Erkundung von lateralen Widerstandsänderungen

- Informationen über 2D-Strukturen, nur wenn 2D gemessen wird
- gesamte Anordnung unter Beibehaltung der gegenseitigen Abstände über das Profil verschoben
- über Konfiguration wird bestimmte Erkundungstiefe festgelegt
- grobe Fausregel für symmetrische Vier-Punkt-Anordnung:

Erkundungstiefe
$$\approx \frac{1}{3}\overline{AB}$$

・ 同 ト ・ ヨ ト ・ ヨ ト



Wirkungstiefe

Anordnung	z _e /a	z _e /L
Wenner Alpha	0,519	0,173
Wenner Beta	0,416	0,139
Wenner GAMMA	0,594	0,198
Dipol-Dipol $n = 1$	0,416	0,139
n = 2	0,697	0,174
n = 3	0,962	0,192
n = 4	1,220	0,203
n = 5	1,476	0,211
n = 6	1,730	0,216
Pol-Dipol $n = 1$	0,519	
n = 2	0,925	
n = 3	1,318	
n = 4	1,706	
n = 5	2,093	
n = 6	2,478	
Pol-Pol	0,867	
Schlumberger $n = 1$	0,519	0,173
n = 2	0,925	0,186
n = 3	1,318	0,189
n = 4	1,706	0,190
n = 5	2,093	0,190
n = 6	2,478	0,191
n = 7	2,863	0,191
n = 8	3,247	0,191

Legende:

L: Arraylänge

《曰》 《聞》 《臣》 《臣》

- a: Elektrodenabstand
- ze: Erkundungstiefe

Loke 2004 entnommen

E



• Wirkungstiefe hängt zusätzlich noch von spezifischen elektrischen Widerständen ab:



500 Ω⋅m

- Strom fließt in Schicht mit geringstem Widerstand \rightarrow 1. Schicht
- Struktur mit 500 $\Omega{\cdot}m$ wird maskiert



Durchführung

- günstigste Messanordnung:
 - Modellierung \rightarrow Abschätzung der zu erwartenden Anomalie
 - Versuchsmessung (teuer)
- vor Ort:
 - Profilrichtung möglichst \perp zu vermuteter Streichrichtung
 - Parallelprofile mit quadratischem Gitter
 - optimal: Profilabstand = Messpunktabstand

3

< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < □ > <



Anordnungen

- symmetrisch:
 - Wenner
 - Schlumberger
 - ► (Dipol-Dipol)
- unsymmetrisch:
 - Pol-Dipol
- Multielektrodenarrays



Э



- es besteht Möglichkeit aus einem vollständigen Datensatz neue Messungen zu generieren
- Voraussetzung ist vollständige Basis

2-Punkt $n = n_e(n_e-1)/2$ 3-Punkt $n = n_e(n_e-2)/2$ 4-Punkt $n = n_e(n_e-3)/2$

• beispielsweise Pol-Pol auf 11×11 -Array: $\frac{121 \cdot 120}{2} = 7260$

(4 同) (目) (目)



Beachten

- Ankopplung der Elektroden
- Reproduzierbarkeit:
 - Wiederholungsmessungen
 - \blacktriangleright Reziprozitätsprinzip: Strom- und Spannungselektroden vertauschen \rightarrow trotzdem gleicher Messwert, sonst liegt Fehler vor
- Witterung



Interpretation

- Qualitativ:
 - Profile von *Qs*
 - Isoohmenkarten (bei ausreichender Messdichte)
 - Pseudosektion:



E





Э



• Quantitativ:

Modellierung: Struktur → num. Simulation (FD, FE)→ "künstliche Messung "→ Vergleich mit Messdaten → Anpassung der Struktur (trial and error) Inversion: automatische Anpassung der Struktur über Minimierung des Fehlers (http://www.resistivity.net)



- Wenner:
 - vertikale Kontraste
 - größtes Signal
 - schwache horizontale Überdeckung
- Dipol-Dipol:
 - populär für IP
 - laterale Auflösung
 - Messapperatur: $\Delta U \sim 1/n^3$ Nutz-/Störverhältnis
- Pol-Dipol:
 - ähnlich zu Dipol-Dipol
 - Messapperatur: $\Delta U \sim 1/n^2$

3

▲ □ ▶ ▲ □ ▶ ▲ □ ▶



Sensitivität

- Auslagenlänge \overline{AB} beeinflusst zum Beispiel maßgeblich das Eindringen des Stroms in den Untergrund
- Welche weiteren Faktoren beeinflussen *ps*?
- Hängt *ρ*_s auch beispielsweise von Störkörpergeometrie (Tiefe, Ausdehnung usw.) ab?
- Was trägt zum Messwert bei?

・ 同 ト ・ ヨ ト ・ ヨ ト



• Sensitivität ist Maß für Änderung des elektrischen Potentials infolge einer Leitfähigkeitsänderung



• partielle Ableitung der Messwerte nach den Modellparametern

$$S_{mn} = \frac{\partial \varphi_m}{\partial \varrho_n} \tag{51}$$

 S ist Sensitivitätsmatrix oder auch Jacobi-Matrix (m × n) Zeilen: m ≡ Messwerte Spalten: n ≡ Modellparameter / Zellen im Untergrund



- Berechnungsmöglichkeit für homogenen Halbraum
 - Pertubationsmethode "brute-force":

$$\frac{\partial \varphi_m}{\partial \varrho_n} \approx \frac{\varphi^0 - \varphi^{\Delta \varrho}}{\Delta \varrho}$$
 (52)

(日)

• mit:

$$\varphi^0$$
 ... "ungestörter Messwert"
 $\varphi^{\Delta \varrho}$... Messwert bei $\Delta \varrho$ Änderung
 $\Delta \varrho$... Änderung in Zelle

Э



- Sensitivität ist abhängig von Messanordnung und Leitfähigkeit
- Sensitivitätswerte können positiv und negativ sein
- zwischen je zwei Stromelektroden bzw. je zwei Potentialelektroden existiert ein Bereich positiver Sensitivität
- zwischen Stromelektrode und Potentialelektrode beobachtet man einen Bereich negativer Sensitivität
- Tiefenausdehnung des Bereichs negativer Sensitivität zwischen benachbarten Elektroden hängt von deren Abstand ab
- Betrag der Sensitivität nimmt mit zunehmendem Abstand von den Elektroden ab
- alle Elektroden auf einer Geraden \rightarrow Sensitivitätsverteilung rotationssymmetrisch um diese Gerade

(4 戸) (日) (日)



- Bereich positiver Sensitivität:
 - ► spezifischer elektrischer Widerstand im Boden wächst → gemessener scheinbarer Widerstand wächst auch
- Bereich negativer Sensitivität:
 - \blacktriangleright spezifischer elektrischer Widerstand im Boden wächst \rightarrow aber gemessener scheinbarer Widerstand fällt ab



Sensitivität: Pol-Pol



108/18


Sensitivität: Pol-Pol





Sensitivität: Pol-Dipol





Geoelektrik

Sensitivität: Pol-Dipol





Sensitivität: Dipol-Dipol





Sensitivität: Dipol-Dipol





Sensitivität: Wenner



114/18



Sensitivität: Wenner





Sensitivität: Schlumberger





Sensitivität: Schlumberger





- Wenner Anordnung:
 - verfügt über günstiges Signal-Rausch-Verhalten
 - großer Detektionsbereich unter der gesamten Auslage
 - weist unterhalb von AB/3 nur schwache vertikale und kaum horizontale Gradienten auf
 - nur bedingt zur genauen, insbesondere lateralen, Lokalisierung kleinräumiger Anomalien geeignet
- Dipol-Dipol Anordnung:
 - Detektionsbereich ist auf Regionen unter den Dipolen relativ eng eingegrenzt
 - weist sehr scharfe Gradienten in Profilrichtung auf
 - daher zur lagegenauen, insbesondere lateralen, Abgrenzung gut geeignet
 - schlechteres Signal-Rausch-Verhältnis
- Wahl der Anordnung ist immer Kompromiss zwischen Auflösungseigenschaften und Rauschverhalten



Beispielmessung: Messgebiet





Elektromagnetik

Beispielmessung: Inversionsergebnisse - Wenner





Beispielmessung: Inversionsergebnisse - Schlumberger



Dr. Jens Oeser

Geoelektrik und Elektromagnetik

121/18



< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ >

Beispielmessung: Inversionsergebnisse - Dipol-Dipol



Dr. Jens Oeser

122/18

Э



Beispielmessung: Inversionsergebnisse – Pol-Pol



Dr. Jens Oeser

Geoelektrik und Elektromagnetik

123/18

Э



Elektromagnetik

Beispielmessung: Inversionsergebnisse – Pol-Dipol (forward)





Beispielmessung: Inversionsergebnisse – Pol-Dipol (reverse)



Dr. Jens Oeser



Beispielmessung: Inversionsergebnisse – Pol-Dipol (forward + reverse)



Dr. Jens Oeser

Geoelektrik und Elektromagnetik



Literat

Einleitun

Elektromagnetik

Beispielmessung: A-priori-Information – Bohrlochmessung



Э



Nicht besprochene Themengebiete

• Induzierte Polarisation



- Eigenpotential
- Tensorgeoelektrik
- Verfahren bei der Bohrlochgeophysik
- numerische Modellierung und Inversion



Elektromagnetik

Elektromagnetik

- Prinzip:
 - Messung elektrischer und magnetischer Wechselfelder
 - Aussagen über räumliche Verteilung elektrischer (und magnetischer) Eigenschaften im Untergrund



E ► < E ►

< □ > <



< □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ >

Beispiel I



(Internetseite des Scripps entnommen)



<ロ> <同> <同> <巨> <巨> <三> < □> <

Beispiel II



(Internetseite der BGR entnommen)

Geoelektrik und Elektromagnetik

131/18



Beispiel III







< □ > < □ > < □ > < □ > < □ > .



(folgenden Internetseiten entnommen: www.georeva.eu, www.geonics.com, www.geomatrix.co.uk, www.ipgp.fr)

132/18



- 4 同 2 4 回 2 4 U

Einsatzmöglichkeiten

- Skalenlängen:
 - Kampfmittelsuche (Landminen 1 Volumenprozent Zünder)
 - Archäologie (Metalldetektoren / EM38)
 - Hydrogeophysik (Seewasser / hochohmiger Aquifer)
 - Störungszonen
 - Lagerstätten (Sulfiderze gegen Nebengestein / Kohlenwasserstoffe)
 - Leitfähigkeit im oberen Mantel (Magnetotellurik)
- Zielgröße ist Leitfähigkeit:
 - σ umfasst 25 Dekaden (Diamant Kupfer)
 - großer Kontrast im Parameter



<ロ> <同> <同> < 同> < 同> < 同>

Chaos

- Techniken
- Untersuchungsmethoden
- Applikationen
- Interpretation
- Produktbezeichnungen



Ordnen

- alle elektromagnetische Verfahren messen eine oder mehrere elektrische und/oder magnetische Feldkomponenten, welche von natürlichen oder technisch erzeugten Quellen elektromagnetischer Energie abgestrahlt werden
- Einteilung:
 - 1. Herkunft des Primärfelds
 - 2. Struktur des Primärfelds
 - 3. Ankopplung des Primärfelds
 - 4. Messung des Sekundärfelds
- Sender oder Transmitter (Tx)
- Empfänger oder Receiver (Rx)

∃ >



Literat

Einleitung

Geoelektrik

Elektromagnetik

< 🗇 ▶

프 + - 프 +

Einteilung der EM-Verfahren

Methode	Frequenz bzw. Zeitbereich	Anregung /Ankopplung	Empfänger / direkte Meßgrößen	Abgeleitete Meßgrößen
Eigenpotential	DC1	Natürliche Potentiale	Potentialsonden / Potentialdifferenzen	
Gleichstromgeoelektrik	DC, AC < 50 Hz	Elektroden /galvanisch	Potentialsonden / Potentialdifferenzen und Speisestromstärke	Scheinbarer spezifischer Widerstand
Mise-à-la-masse	DC	Eine der Elektroden auf gutleitender Struktur	Potentialsonden / Potentialdifferenzen Spulen / magnetisches Feld	Scheinbarer spezifischer Widerstand
Induzierte Polarisation (Complex Resistivity)	10 mHz - 10 kHz	Elektroden / galvanisch und induktiv	Potentialsonden / Potentialdifferenzen, Speisestromstärke, Phasenverschiebung zum Speisestrom	Aufladevermögen, Metallfaktor, frequenz- abhängiger komplexer scheinbarer spezi- fischer Widerstand (Cole - Cole-Parameter)
Elektromagnetik Zweispulensysteme	100 Hz - 60 kHz	Sendespule / induktiv	Induktionsspule (einachsiger Magnetsensor) / magnetische Felder	Normiertes sekundäres Magnetfeld, Schein- leitfähigkeit
CSAMT	1 Hz – 10 kHz	1-2 geerdete elektrische Dipole/galvanisch und induktiv	Dreiachsiger Magnetfeldsensor und Poten- tialelektroden / magnetische und elektrische Felder	Scheinbarer spezifischer Widerstand, Impedanztensor, Induktionsvektor
VLF, VLF-R, LF, LF-R (RMT) ²	15 kHz – 1 MHz	Längst- und Mittelwellen- sender/induktiv	Spulen, Potentialsonden / magnetische und elektrische Felder	Magnetische und elektrische Über- tragungsfunktionen, scheinbarer spezifischer Widerstand
TEM Transient- Elektromagnetik	5 µs - 5 ms nach Stromabschaltung	Spule / induktiv	Spule/Abklingkurven der induzierten Spannung	Scheinbarer spezifischer Widerstand
Radiowellen- Schattenmethode	15 kHz – 20 MHz	Antenne / induktiv, kapazitiv	Antenne / elektromagnetische Feldstärke, Phasenverschiebung	Normierte elektromagnetische Dämpfung, normierte Phasenverschiebung
Georadar	20 MHz - 1 GHz Impuls	Antenne / kapazitiv	Antenne / elektrische Feldstärke	Leitfähigkeit, dielektrische Konstante, Ausbreitungsgeschwindigkeit

¹ DC Abkürzung des englischen Begriffes Direct Current - Gleichstrom, AC Abkürzung von Alternating Current - Wechselstrom

² RMT Abkürzung für Radio-Magnetotellurik

(Knödel, Krummel und Lange 1997 entnommen)

 \equiv



Messung unter Verwendung von Wechselfeldern

- Sender strahlt Wechselfeld ab:
 - induziert sekundäre Stromsysteme (Wirbelströme) im leitfähigen Untergrund
- Empfänger misst Überlagerung von primären und sekundären Magnetfeldern
- für Interpretation wird beispielsweise die Größe H/H_p genutzt
 - abhängig von verschiedenen Faktoren:
 - Frequenz
 - Leitfähigkeit
 - Geometrie
 - werden zusammengefasst als Response-Parameter $\omega\mu\sigma L^2$
 - ► jede leitfähige Struktur antwortet mit eigenem Response-Parameter
 - Gesamtinduktion ist kompliziert wegen induktiver Kopplung:
 - auch sekundäre Magnetfelder induzieren Ströme



- Methodische Fortschritte:
 - Einbeziehung der Gesamtstruktur
 - Einsatz numerischer Methoden
 - höhere Empfindlichkeit der Messinstrumente
- Einflussfaktoren:
 - Geologisches Rauschen
 - Elektromagnetisches Rauschen
 - Verfügbarkeit von Interpretationswerkzeugen (Software)
 - Erfahrung
 - nichtgeophysikalische Faktoren, wie Geländebedingungen/Budget/Zeit usw.

▲ 同 ▶ ▲ 国 ▶ ▲ 国 ▶ …



Vielfalt der Verfahren

- unterschiedliche Array-Konfigurationen:
 - induktive oder galvanische Ankopplung des Primärsignals
 - Messung von E oder B
 - fester oder beweglicher Sender
 - Distanz zwischen Sender und Empfänger
 - Sondierung oder Profilierung
- unterschiedliche Primärsignale:
 - ▶ harmonisch e^{iωt}
 - transient

- 4 同 ト - 4 目 ト



▲ □ ▶ ▲ □ ▶ ▲ □ ▶

- unterschiedliche Abtrennung des Primärfeldes
 - Genauigkeit der Sekundärfeldbestimmung
 - Messung bei Abwesenheit des Primärsignals
 - Messung von Feldverhältnis (^{Bz}/_{Bh})
 - Kompensation
- interpretierter oder dargestellter Parameter
 - geometrische Beschreibung des Störkörpers aus Anomalienbild, Asymmetrie, Elliptizität
 - gegenseitige Impedanz (Verhältnis von in Empfangsspule induzierter Spannung zum Strom in Sendespule)
 - Verhältnis von Sekundärfeld zu Primärfeld
 - Felder
 - Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit aus Frequenz- oder Zeitverhalten des Signals



- Modellierung der Felder über beliebigen Leitfähigkeitsstrukturen
- Inversion
- elektromagnetische Messungen sind:
 - begrenzt
 - unvollständig
 - fehlerbehaftet

Э



Petrophysikalische Parameter

- elektrische Leitfähigkeit σ
- magnetische Permeabilität μ
- dielektrische Permittivität ε

Э



Elektrische Leitfähigkeit

- OHMsches Gesetz: $\vec{j} = \sigma \vec{E}$
- Einheit von σ ist ${\rm S/m}$
- im Allgemeinen ein symmetrischer Tensor:

$$\sigma = \left(\begin{array}{ccc} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{array}\right)$$

Isotropie: $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz}$, Nebendiagonalelemente = 0 Anisotropie: $\sigma_{xx} \neq \sigma_{yy} \neq \sigma_{zz}$

< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ >



• angepasste Gesteinsmodelle für unterschiedliche Tiefenbereiche erforderlich:

Sedimente: Archie-Gesetz, Mischungsgesetze für Mehrphasenfluide Festgesteine: Klüftigkeitsmodelle Untere Kruste/Mantel: Graphit, partielle Schmelzen, Peridotit, Perovskit Subduktionszonen: Wassereintrag


- 4 同 2 4 同 2 4 同 2 4

Magnetische Suszeptibilität

- im Allgemeinen untergeordnete Rolle bei Elektromagnetik
- Ausnahme ist magnetischer Phasenübergang in Curie-Tiefe



- 4 同 6 4 日 6 4 日 6

Dielektrische Permittivität

- bei niedrigen Frequenzen untergeordnete Rolle
- wichtig bei niedriger Leitfähigkeit und/oder hohen Frequenzen
- Anwendung bei Georadar



Wellenzahl

- separate Betrachtung der elektrischen, dielektrischen und magnetischen Eigenschaften ungünstig:
 - Berücksichtigung aller Gesteinseigenschaften und der Frequenz in einem Term:

$$k^2 = -i\omega\mu(\sigma + i\omega\varepsilon) \tag{53}$$

• Feldgleichung:

$$E = E^0 e^{-ikz} \tag{54}$$

$$= E^0 e^{-(\kappa_R + i\kappa_I)z}, \quad ik = \kappa_R + i\kappa_I$$
(55)

3



Diffusion

 κ_R : Dämpfung als Funktion von z führt auf Skintiefe (Eindringtiefe) mit:

$$\tau = \frac{1}{\kappa_R} \tag{56}$$

- Tiefe in der E auf 1/e abgeklungen ist wird als Skintiefe bezeichnet
- für ebene Welle (maximal):

$$\tau = 503\sqrt{\frac{f}{\sigma}} \tag{57}$$

κ_I : Wellenlänge:

$$\lambda = \frac{2\pi}{\kappa_I} \tag{58}$$



Designparameter

- Wellenzahl ist $k = k(\sigma, \omega, \mu, \varepsilon)$
- damit ist Frequenz ein Designparameter:

$$\omega \mid \text{klein} \mid \text{groß}$$

 $k^2 \mid = -i\omega\mu\sigma \mid \approx \omega^2\mu\varepsilon$

 Verhältnis von Leitungs- zu Verschiebungsstromdichte ist Verlustfaktor (zunehmende Umwandlung von elektrischer Energie in Wärme):

$$\frac{\omega}{\mu\varepsilon}$$

・ 同 ト ・ ヨ ト ・ ヨ ト



Abhängigkeiten

- Frequenzabhängigkeit für $\sigma(\omega)$, $\mu(\omega)$ und $\varepsilon(\omega)$:
 - IP-Effekte
 - Polarisationserscheinungen
- für reale Gesteine sind $\sigma,\,\mu$ und ε nicht nur aus mineralischen Eigenschaften ableitbar
- Wasser beeinflusst zum Beispiel σ und ε
 - kleine Anteile von Wasser im Porenraum \rightarrow Stromfluss
 - ▶ Wasserzusammensetzung unmineralisiert → σ hoch, aber $\varepsilon_r = 81$
 - mit steigender Temperatur sinkt ε_r
 - Wasser als Lösungsmittel für Salze \rightarrow Elektrolyt
- Mobilität und Geschwindigkeit der lonen $\rightarrow f(p, T, \text{Reibung}, \text{Porengeometrie})$
- Wechselwirkung zwischen Gestein und Fluid
 - Ton gefährlich

- 4 同 2 4 日 2 4 日 2 - 日



・ 同 ト ・ ヨ ト ・ ヨ ト

Elektromagnetische Kartierung

- Nachweis und Verfolgung lateraler Inhomogenitäten elektrischer Leitfähigkeit
- Profile orientieren überlicherweise senkrecht zum Streichen, besser:
 - Parallelprofile
 - quadratisches Messnetz
- Nutzung fester oder beweglicher Quellen



Zweispulensysteme

• Methodik



 Messgeräte sind beispielsweise Slingram, MaxMin, EM34, EM38, EM31

Э

(日) (同) (三) (三)



< 🗇 🕨 < 🖻 🕨

Vereinfachtes Modell zum Verständnis

- Induktion in einer elektrisch leitfähigen Drahtschleife
- Beschreibung der primären und sekundären Felder in der Empfängerspule in Abhängigkeit von Frequenz, Leitfähigkeit etc.
- Real- und Imaginärteil des Sekundärfelds
- oft werden normierte Größen verwendet, zum Beispiel $B_z(r)/B_z^0(r)$



< □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □

Prinzip – Leiterkreistheorie





Phasendiagramm



(Börner 2016 entnommen)

$$\vec{H_r} = \vec{H_p} + \vec{H_s} \tag{59}$$

E



Phasenbeziehung

wo

• Phasendifferenz zwischen Primär- und Sekundärfeld beträgt:

$$\phi_{p} - \phi_{s} = \left(\frac{\pi}{2} + \arctan\frac{\omega L_{s}}{r_{s}}\right)$$
(60)
$$= \left(\frac{\pi}{2} + \phi\right)$$
(61)
bei : $\tan \phi = \frac{\omega L_{s}}{r_{s}}$ (62)

- Phasenverschiebung von $\pi/2$ entsteht durch induktive Kopplung zwischen der Sende- und Empfangsspule
- zusätzliche Phasenverschiebung ϕ ist indikativ für elektrische Eigenschaften der "Leiterschleife" \rightarrow elektrisch leitfähiger Störkörper



Dikussion

- guter Leiter im Untergrund:
 - ϕ geht gegen $\pi/2$ wegen $Q = {}^{\omega L_s}/r_s \to \infty$
 - ▶ sekundäre Feld ist um 180° (π) phasenverschoben gegen Primärfeld
- schlechter Leiter im Untergrund:
 - ϕ geht gegen 0 wegen $Q = {}^{\omega L_s}/r_s \rightarrow 0$
 - ▶ sekundäre Feld liegt 90° ($\pi/2$) hinter Primärfeld
- im Allgemeinen liegt H_s zwischen $\pi/2$ und π gegen H_p phasenverschoben



Einleitun

- 4 同 2 4 同 2 4 同 2 4

- Komponente $H_s \sin \phi$ bezeichnet als:
 - Realteil
 - in-phase-Komponente
- Komponente $H_s \cos \phi$ (um 90° phasenverschoben) bezeichnet als:
 - Imaginärteil
 - out-of-phase-Komponente
 - quadrature-Komponente



Responsefunktion und Induktionszahl

• dimensionsloser Responseparamter *Q* ist abhängig von Frequenz und Eigenschaften des elektrischen Leiters im Untergrund:

$$Q = \frac{\omega L_s}{r_s} \tag{63}$$

• als Responsefunktion oder Induktionszahl wird die von *Q* abhängige komplexe Funktion bezeichnet:

$$f(Q) = \frac{Q^2 + iQ}{1 + Q^2}$$
(64)

・ 同 ト ・ ヨ ト ・ ヨ ト



Responsefunktion

• zwei Kurven für den Real- bzw. Imaginärteil der Induktionszahl



Э



(4 同) 4 回) 4 回)

Diskussion I

- Q klein:
 - Real- und Imaginärteil der Funktion klein
 - Fall des schlechten Leiters
- Q wächst:
 - Imaginärteil nimmt schneller zu als der Realteil
 - Amplitude ist größer als die vom Realteil, solange Q kleiner 1
- zu größeren Werten von Q hin:
 - Imaginärteil nimmt ab
 - Realteil strebt gegen oberen Grenzwert der induktiven Sättigung



Diskussion II

- Der in Empfangsspule hervorgerufene Strom wächst zunächst linear mit zunehmender Frequenz, bis Sättigungseffekt eintritt. Antwort des Untergrunds stellt Übergang zwischen zwei Extremen dar – den Niederfrequenz– und Hochfrequenzlimits, welche durch hohen Widerstand bzw. hohe Leitfähigkeit gekennzeichnet sind.
- Im Widerstandslimit ist der Widerstand der Leiterschleife hoch. Induzierte Strom ist so schwach, dass er in Empfangsspule nur vernachlässigbar kleinen magnetischen Fluss produziert.
- Im induktiven Limit ist sekundäre Fluss so stark, dass er annähernd primären Fluss entspricht. Richtung des sekundären Flusses ist primären entgegengesetzt, was zur kompletten Auslöschung des Gesamtflusses führt. Folge ist wiederum ein vernachlässigbarer induzierter Strom in der Empfangsspule.



Kleine Induktionszahlen

- feste Kombination von Spulenabstand und Arbeitsfrequenz:
 - Responseparamter Q ist f
 ür breiten Leitf
 ähigkeitsbereich wesentlich kleiner als 1
 - es gilt $Q = r/\delta$ (Verhältnis Spulenabstand und Eindringtiefe)
 - Spulenabstand muss sehr viel kleiner sein als Skintiefe/Eindringtiefe
 - in-phase-Komponente ist vernachlässigbar
 - out-of-phase-Komponente steht in Beziehung zur Leitfähigkeit:
 - Messskala kann in Leitfähigkeitseinheit geeicht werden
 - geräteabhängige Messung von Leitfähigkeitswerten zwischen 1 und 1000 mS/m möglich
 - \blacktriangleright Leitfähigkeitsmessung bei kleinen Induktionszahlen \rightarrow LIN-Systeme (Low Induction Number)
 - Genauigkeit der Berechnung der in-phase- und out-of-phase Komponente hängt von Genauigkeit der H_p Bestimmung ab
 - Messgeräte sind EM31, EM34 und EM38

< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ >



EM34

- mögliche Spulenabstände sind 10, 20 und 40 $\rm m$
- mögliche Frequenzen sind 6400, 1600, 400 Hz
- Abstand der Spulen wird elektronisch überwacht
- Leitfähigkeit wird direkt am Messgerät abgelesen
- extrem hohe Leitfähigkeit im Untergrund → Induktionszahl Q hat größeren Wert → in-phase-Komponente dominiert → Instrument zeigt "Phantasiewerte "→ Hinweis auf anomale Leitfähigkeiten



Elektromagnetik

Spulenanordnungen

• mögliche Anordnungen für Tx und Rx:

Тx	Rx	Spulenachse	Spulenebene
_	_	vertikal, parallel	horizontal, koplanar (HCP)
\bigcirc	\bigcirc	horizontal, parallel	vertikal, koplanar (VCP)
		horizontal, koaxial	vertikal, parallel (VCA)
-		vertikal & horizontal	orthogonal (PERP)
\bigcirc	-	horizontal & vertikal	orthogonal (NULL)

- Kopplung
- Eindringtiefe
- Response

Э



Tiefenreichweite und Orientierung

• Tiefenreichweite für VCP und HCP bei EM34 (LIN Konzept)

rVCP [m]HCP [m]106 bis 7,512 bis 152012 bis 1525 bis 304025 bis 3050 bis 60

• Orientierung





Beispiel I – Erzgang



Э



Einleitun

Geoelektrik

Elektromagnetik

Beispiel II – Mülldeponie





Literat

Einleitung



Geoelektrik und Elektromagnetik

169/18



- 4 目 2 4 日 2 4 H

VLF – Very Low Frequency

- Längstwellensender 15 bis $30\,\rm kHz$
- U-Boot-Navigation
- Störungszonenerkundung
- Grundwassererkundung
- Methodik:
 - keine eigene Energieanregung erforderlich
 - ► Ausnutzung von ortsfesten Sendern mit hoher Sendeleistung (MW)
 - weltweiter Empfang
 - 25 Sender bekannt mit unterschiedlicher Qualität
 - Frequenztabelle:

https://en.wikipedia.org/wiki/Very_low_frequency



Sender

• vertikaler elektrischer Dipol:

▶ $f = 20 \, \mathrm{kHz} \
ightarrow \lambda = 15 \, \mathrm{km}$, Masthöhe beträgt ungefähr $100 \, \mathrm{m}$

- Ausbreitung zwischen lonosphäre und Erde
- geführte Welle, Raumwelle
- Fernzone: im Messgebiet homogene Anregung
- ebene Wellen



3



(日)

Induktionsmechanismus



(Militzer und Weber 1985 entnommen)

172/18

E



- große Entfernung zu Sendestationen \rightarrow Feld hat im Messgebiet nur noch eine Horizontalkomponente
- elektrisch leitfähige Körper im Untergrund \rightarrow Induktion eines elektrischen Wirbelstroms \rightarrow Aufbau eines magnetisches Felds, welches sich mit Primärfeld überlagert
- im Messgerät wird Verhältnis H_z zu H_y aufgezeichnet, wobei sich H_z und H_y aus entsprechenden Komponenten des Primär- und Sekundärfelds zusammensetzen (elliptische Polarisation)
- zur Darstellung wird das Verhältnis herangezogen, da es unabhänigig von Schwankungen des Primäfelds ist
- möglichst großen Meßeffekt \rightarrow Sender in Streichrichtung des Störkörpers (Profile parallel dazu)

・ロッ ・雪 ・ ・ ヨ ・



Literat

Einleitun

Geoelektrik

Elektromagnetik



(Börner 2016 entnommen)

174/18

Э



Beispiel – Erzgang



175/18

臣



















Geoelektrik und Elektromagnetik

180/18

E


・ 同 ト ・ ヨ ト ・ ヨ ト

Nicht besprochene Themengebiete

- Theorie elektromagnetischer Verfahren
- Magnetotellurik (MT)
- Slingram und Turam
- Marine EM, Aero EM und Bohrloch EM
- Transient Elektromagnetik (TEM) (https://www.youtube.com/watch?v=82xql8eLYcc)
- numerische Modellierung und Inversion