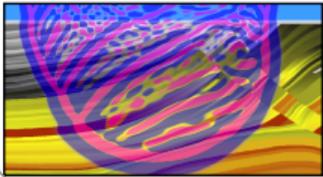


Einführung in die Geophysik I

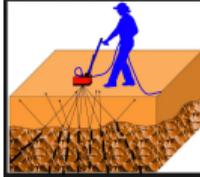
Elektromagnetik

T. Bohlen, Geophysikalisches Institut, Fakultät für Physik

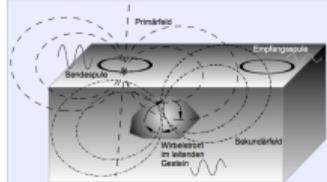
Seismik



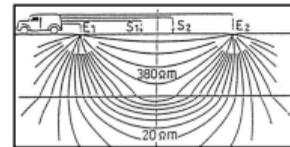
Georadar



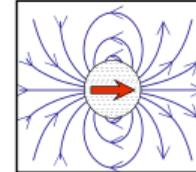
Elektromagnetik



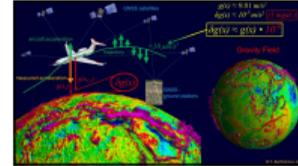
Geoelektrik



Magnetik



Gravimetrie



Inhalte der Vorlesung

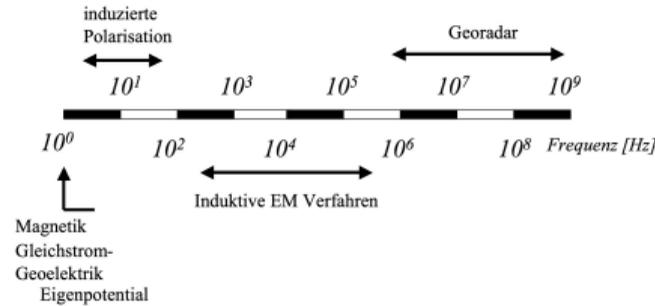
Einführung in die Geophysik I, WS 2024/25

	Datum	Vorlesung (09:45-11:15h) Kl. HS B	Übungen (11:30-12:30h Kl. HS B oder 17:30-18:30h Physikhochhaus Raum 2/17)
1	23.10.24	Einführung, Wellenausbreitung	
2	30.10.24	Wellenausbreitung	
3	06.11.24	Refraktionsseismik	U1: Moduln
4	13.11.24	Reflexionsseismik	Ü2: Refraktionsseismik
	20.11.24	Studieninformationstag	
5	27.11.24	Elektromagnetische Wechselwirkungen	Ü3: Reflexionsseismik
6	04.12.24	Georadar	
7	11.12.24	Elektromagnetik	Ü4: Georadar
8	18.12.24	Elektromagnetik	
9	08.01.25	Geelektrik	
10	15.01.25	Magnetik	Ü5: Geoelektrik
11	22.01.25	Magnetik	
12	29.01.25	Gravimetrie	Ü6: Magnetik
13	05.02.25	Gravimetrie	Ü7: Gravimetrie
	12.02.25	Klausur	

Agenda

1. Einführung
2. Ausbreitungsverhalten
3. Prinzip der Frequenzbereich-Elektromagnetik (FEM)
4. Prinzip der Transienten-Elektromagnetik (TEM)
5. Frequenzbereich-Elektromagnetik (FEM)
 - Messprinzip und Auswertung
 - Interpretation von Anomalien
 - Messgeräte
 - Beispiele
6. Zusammenfassung

Spektrum geophysikalischer EM-Verfahren



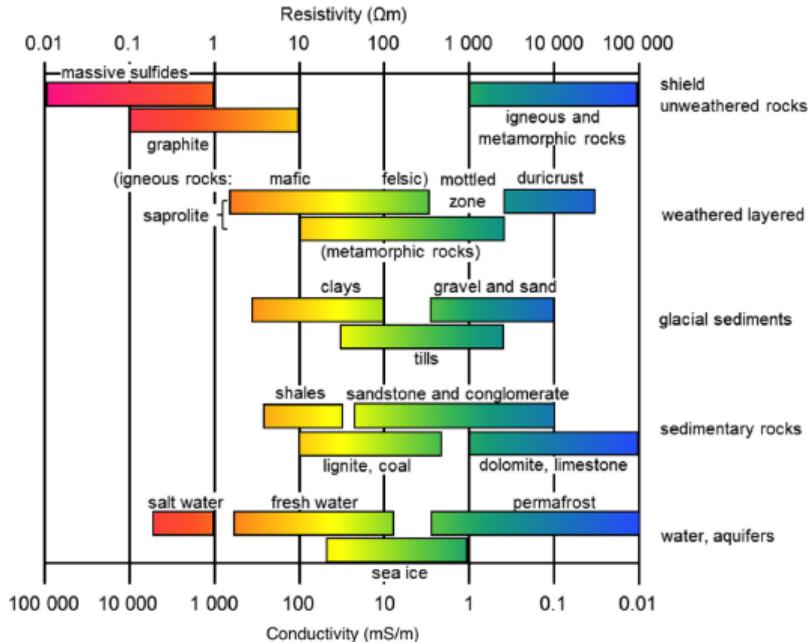
[Maurer, 2024]

Methode	Frequenz	Grundgl.	Materialpar.	Quelle	Messgr.
Geoelektrik	0 Hz	$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon}, \vec{j} = \sigma \vec{E}$	σ	Stromeinspeisung	E_z
Magnetik	0 Hz	$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0, \vec{B} = \mu_r \mu_0 \vec{H}$	μ_r	Erdmagnetfeld	\vec{B}
Diffusive EM-Verfahren	$10^2 - 10^6$ Hz	$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} = \mu \sigma \frac{E_y}{\partial t}$	σ	Antennen	\vec{E}
Georadar	$10^6 - 10^9$ Hz	$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} = \frac{\epsilon_r^2}{c_0^2} \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2} + \mu \sigma \frac{E_y}{\partial t}$	ϵ_r, σ	Antennen	\vec{E}

Einführung Elektromagnetik

- In der Elektromagnetik werden künstlich erzeugte oder natürliche EM-Felder verwendet, um die Leitfähigkeitsstruktur der Erde zu erkunden.
- Der Frequenzbereich ist geringer als beim Georadar. Es dominiert die Induktion über die Wellenausbreitung.
- Die EM-Felder diffundieren in die Erde. Die Eindringung kann bei geringen Frequenzen mehrere Kilometer betragen.
- Die Verfahren können in 2 Kategorien unterteilt werden
 - ① "Frequenzbereich-Elektromagnetik" (FEM)
 - ② "Zeitbereich-Elektromagnetik" oder "Transienten-Elektromagnetik" (TEM)
- Die EM-Verfahren erlauben eine effiziente (flächenhafte) Messung und 3D Rekonstruktion, da kein Bodenkontakt erforderlich ist.
- Es wird die elektrische Leitfähigkeit des Untergrundes rekonstruiert.

Anwendungen der induktiven Elektromagnetik



Variation der elektrischen Leitfähigkeit [Palacky, 1988]

- Exploration von Erzkörpern
- Salzwasserkartierung und Monitoring von Kontaminationsfahnen
- Verfolgung von Kluft- und Störungszonen im Festgestein (Tongehalt)
- Geologische Kartierung (Sediment gegen Kristallin)
- Lokalisierung vergrabener metallischer Objekte (Tanks, Fässer, Container)
- Nachweis von Munition und Blindgängern

Agenda

1. Einführung
2. Ausbreitungsverhalten
3. Prinzip der Frequenzbereich-Elektromagnetik (FEM)
4. Prinzip der Transienten-Elektromagnetik (TEM)
5. Frequenzbereich-Elektromagnetik (FEM)
 - Messprinzip und Auswertung
 - Interpretation von Anomalien
 - Messgeräte
 - Beispiele
6. Zusammenfassung

Lösung der Maxwell-Gleichung für ebene EM-Welle

Die allgemeine Lösung der 1D Telegraphengleichung

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} = \mu\epsilon \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2} + \mu\sigma \frac{E_y}{\partial t} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2} + \mu\sigma \frac{E_y}{\partial t} \approx \mu\sigma \frac{E_y}{\partial t}$$

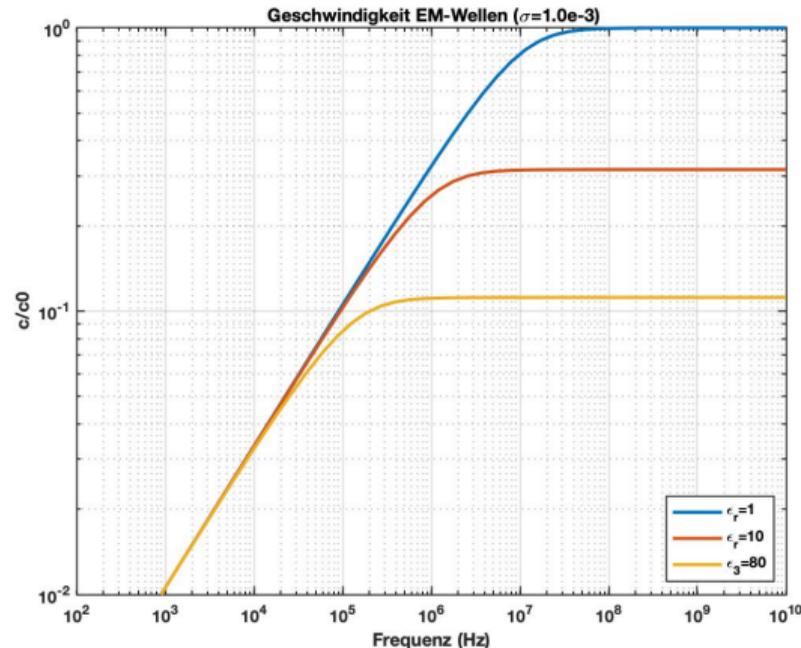
lautet

$$E_y(x) = E_0 \exp(i(\omega t - kx)) \exp(-\alpha x)$$

$$k = \frac{\omega}{c} = \sqrt{\frac{\omega^2 \mu\epsilon}{2} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\epsilon^2 \omega^2}} \right)} \quad \text{Wellenzahl} \quad (1)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{\omega^2 \mu\epsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\epsilon^2 \omega^2}} - 1 \right)} \quad \text{Absorptionskoeffizient} \quad (2)$$

Ausbreitungsgeschwindigkeit: ϵ_r



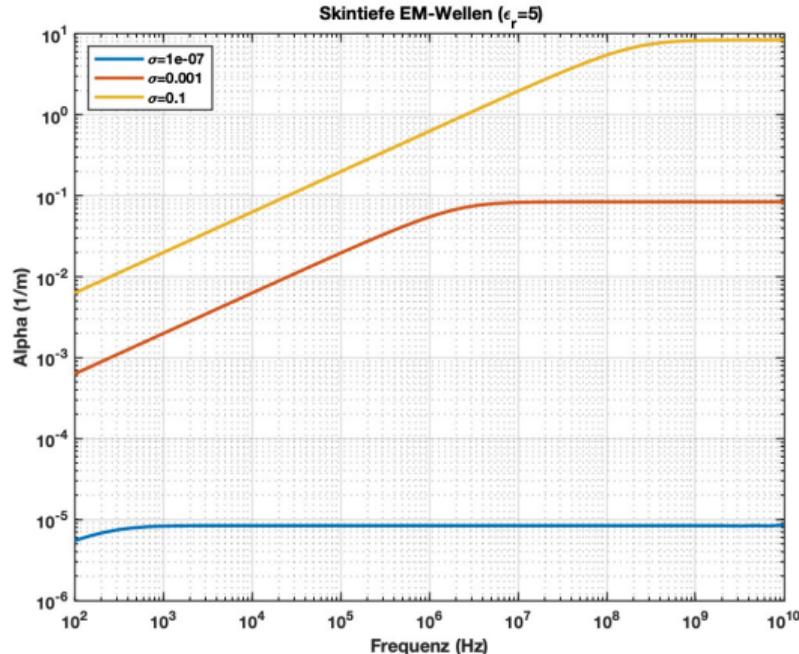
$$\frac{c}{c_0} = \frac{1}{\epsilon_0} \sqrt{\frac{2}{\mu\epsilon}} \left[\left(1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon} \right)^2 \right)^{1/2} + 1 \right]^{-1/2} \quad (3)$$

- Übergangsfrequenz $\omega_t = \frac{\sigma}{\epsilon}$
- GPR-Plateau: $\omega > \omega_t : c = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r}}$

■ Diffusion (EM)

$$\omega < \omega_t : c = \sqrt{\frac{2\omega}{\mu\sigma}} \propto \sqrt{\omega}$$

Absorptionskoeffizient (Dämpfung)



$$\alpha = \sqrt{\frac{\omega^2 \mu \epsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\epsilon^2 \omega^2}} - 1 \right)} \quad (4)$$

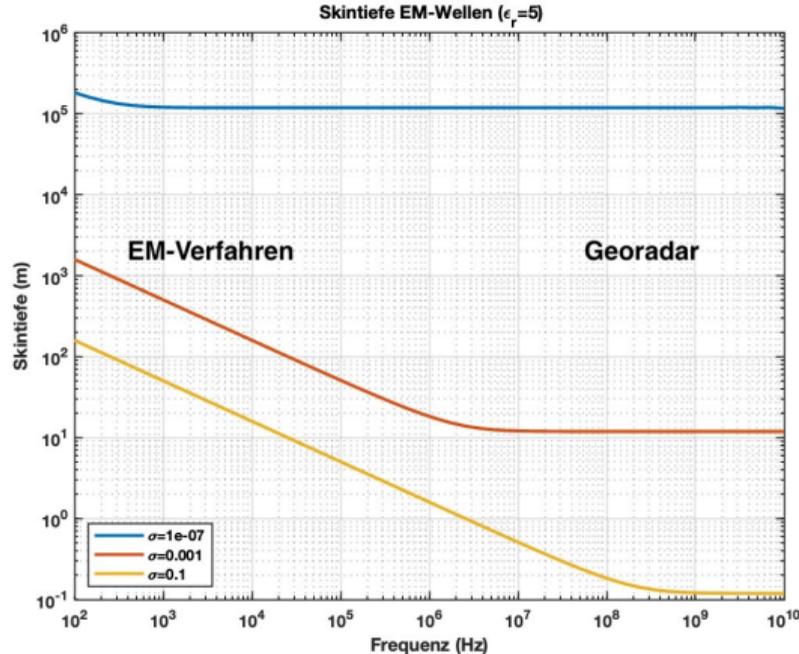
■ Übergangsfrequenz $\omega_t = \frac{\sigma}{\epsilon}$

■ GPR-Plateau:

$$\omega > \omega_t : \alpha = \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$$

■ Diffusion (EM)

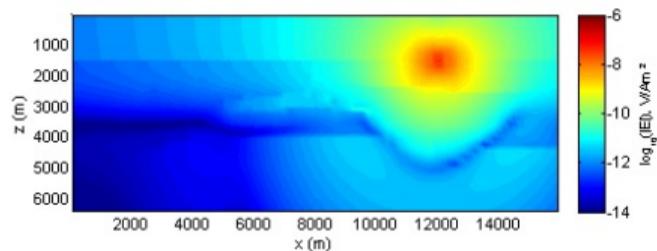
$$\omega < \omega_t : \alpha = \sqrt{\frac{\omega \mu \sigma}{2}}$$



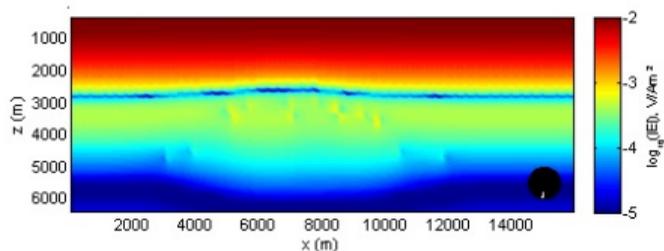
$$\delta = \frac{1}{\alpha} \quad (5)$$

- Geringe Eindringung bei GPR
- Hohe Einbringung der EM-Verfahren

Ausbreitungsverhalten



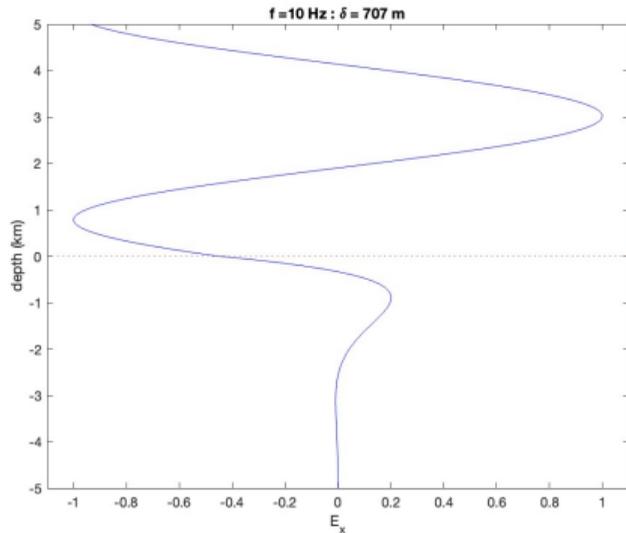
1 Nahfeld



2 Fernfeld

Diffusion des E-Feldes in die Erde (Movie)
 (Quelle GFZ)

Ausbreitungsverhalten



Diffusion des E-Feldes in die Erde (Movie)

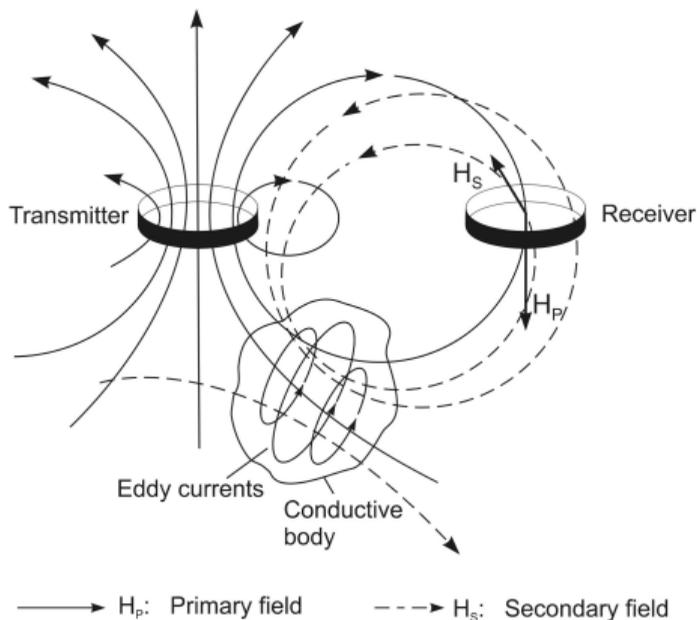
Diffusion des E-Feldes

- 1 Einbringung \approx Skintiefe
 $\delta = \alpha^{-1} \propto \sqrt{\omega^{-1}}$
- 2 Geschwindigkeit $c \propto \sqrt{\omega}$

Agenda

1. Einführung
2. Ausbreitungsverhalten
3. Prinzip der Frequenzbereich-Elektromagnetik (FEM)
4. Prinzip der Transienten-Elektromagnetik (TEM)
5. Frequenzbereich-Elektromagnetik (FEM)
 - Messprinzip und Auswertung
 - Interpretation von Anomalien
 - Messgeräte
 - Beispiele
6. Zusammenfassung

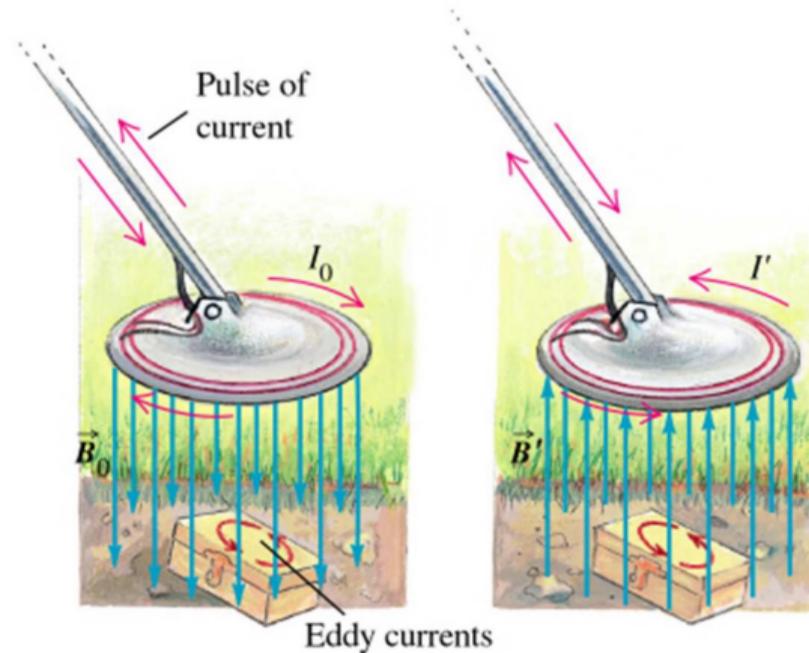
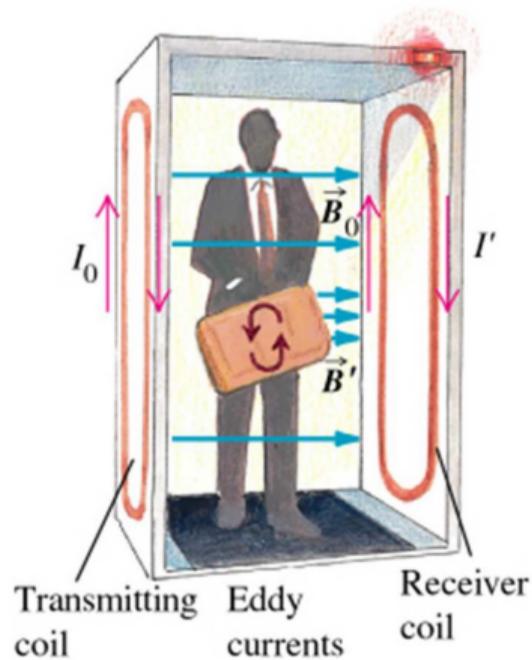
Prinzip der Frequenzbereich-Elektromagnetik (FEM)



Messprinzip von Zweispulensystemen [Lange and Seidel, 2007]

- 1 Eine Sendespule TX erzeugt ein monochromatisches primäres Magnetfeld \vec{H}_p der Frequenz ω .
- 2 Das Magnetfeld diffundiert mit der Geschwindigkeit c (Gl. 3) bis zur Skintiefe δ (Gl. 5) in die Erde hinein.
- 3 Es werden (an gut leitfähigen Objekten) sekundäre Wirbelströme induziert. Diese "Eddy-Ströme" sind dem Strom in der Sendespule entgegengesetzt.
- 4 Die Wirbelströme erzeugen ein sekundäres Magnetfeld \vec{H}_s .
- 5 An der Empfangsspule RX erzeugt das Totalfeld eine Oszillation der Spannung mit der Frequenz ω .

Anwendung der FEM bei der Metaldetektion



Verfahren in der FEM

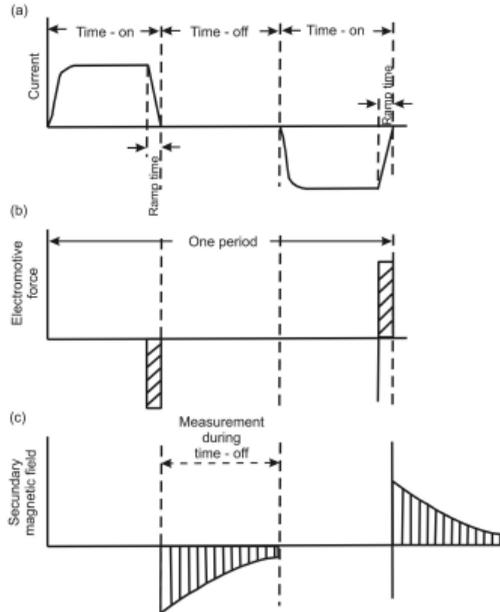
Die Verfahren der FEM unterscheiden sich vor allem bezüglich des verwendeten Frequenzbereichs sowie der Quelle des EM-Feldes. Einige gängige Verfahren sind:

Methode	Frequenz	Quelle
Zweispulensysteme (EM 31, 34, 38)	100 Hz - 60 kHz	Sendespule (\vec{H})
Radiomagnetotellurik (RMT)	1 kHz - 1 MHz	Radiosender
VeryLowFrequency (VLF)	10 kHz - 30 kHz	Kurzwellensender
Controlled Source Audiomagnetotellurik (CSAMT)	1 Hz - 10 kHz	Dipol
Magnetotellurik (MT)	0.001 Hz - 1 Hz	Atmosphärenströme

Agenda

1. Einführung
2. Ausbreitungsverhalten
3. Prinzip der Frequenzbereich-Elektromagnetik (FEM)
4. Prinzip der Transienten-Elektromagnetik (TEM)
5. Frequenzbereich-Elektromagnetik (FEM)
 - Messprinzip und Auswertung
 - Interpretation von Anomalien
 - Messgeräte
 - Beispiele
6. Zusammenfassung

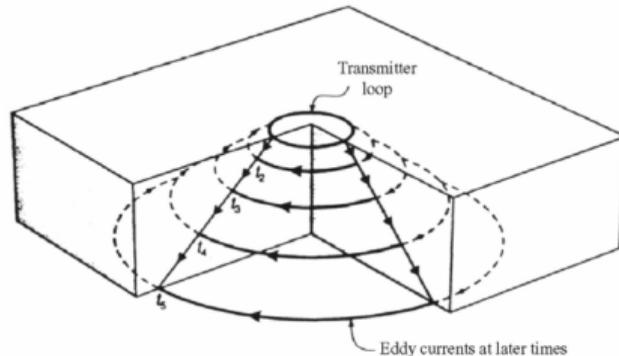
Prinzip der Transienten-Elektromagnetik (TEM)



- 1 In die Sendespule wird ein Rechteck-Strom induziert.
- 2 Der abrupte Abschaltvorgang induziert eine starke elektromotive Kraft, die starke 'Eddy-Ströme' erzeugt.
- 3 Das sekundäre Magnetfeld diffundiert aus verschiedenen Tiefen zurück an die Erdoberfläche. Je tiefer desto später kommt das Signal am Empfänger an.
- 4 Die Empfangsspule registriert nach dem Abschalten der Sendespule. Dadurch findet eine Entkopplung des Primär- und Sekundärfeldes statt.
- 5 Die Dauer des Abklingens ist ein Maß für die Tiefeneindringung und der Kurvenlauf enthält Informationen über die Tiefenstruktur der Leitfähigkeit.

Messung bei der TEM [Lange and Seidel, 2007]

Prinzip der Transienten-Elektromagnetik (TEM)



Ausbreitung der Stromsysteme unterhalb einer Sendespule [Lange and Seidel, 2007]

- 1 Unterhalb der Sendespule diffundieren konzentrische Eddy-Ströme mit der Geschwindigkeit c (Gl. 3) in die Tiefe.
- 2 Der Radius nimmt mit der Tiefe zu.
- 3 Die Ströme verlieren aufgrund von Dämpfung (Gl. 4) mit der Tiefe an Stärke (Ohmsches Gesetz).
- 4 Die maximale Tiefe der Einbringung entspricht der Skintiefe (Gl. 5).

Agenda

1. Einführung
2. Ausbreitungsverhalten
3. Prinzip der Frequenzbereich-Elektromagnetik (FEM)
4. Prinzip der Transienten-Elektromagnetik (TEM)
5. Frequenzbereich-Elektromagnetik (FEM)
 - Messprinzip und Auswertung
 - Interpretation von Anomalien
 - Messgeräte
 - Beispiele
6. Zusammenfassung

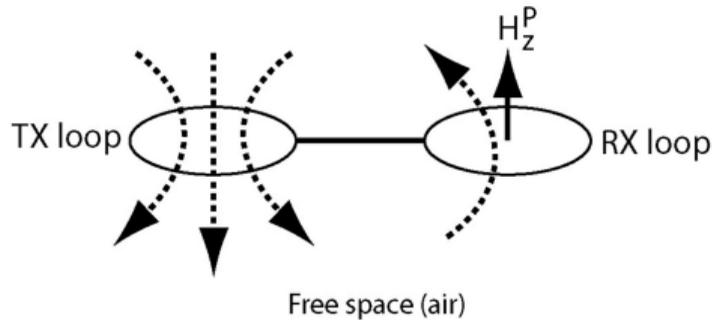
Agenda

1. Einführung
2. Ausbreitungsverhalten
3. Prinzip der Frequenzbereich-Elektromagnetik (FEM)
4. Prinzip der Transienten-Elektromagnetik (TEM)
5. Frequenzbereich-Elektromagnetik (FEM)
 - Messprinzip und Auswertung
 - Interpretation von Anomalien
 - Messgeräte
 - Beispiele
6. Zusammenfassung

Auswertung in der FEM

- 1 Zur Herleitung der Auswertung betrachten wir zunächst zwei Spulen in der freien Luft. Dabei wird nur das (monofrequente) Primärfeld \vec{H}_p in der Empfangsspule registriert.
- 2 Dann fügen wir einen leitfähigen homogenen Halbraum mit der Leitfähigkeit σ hinzu. Hier entsteht ein sekundäres Magnetfeld \vec{H}_s .
- 3 Es ergibt sich eine Bestimmungsgleichung für $\sigma = f(\omega, \vec{H}_p, \vec{H}_s)$
- 4 Diese wird für das Nahfeld (Zweispulensysteme) betrachtet.
- 5 Bei der Analyse werden nur monochromatische Schwingungen der Frequenz ω verwendet. Die Methodik wird daher als "Frequenzbereich-Elektromagnetik" bezeichnet. Sie unterscheidet sich von der "Transienten-Elektromagnetik", in der transiente Signale eingespeist werden.

Zwei Spulen in freier Luft



Referenz

- Strom in Sendespule TX:

$$I = I_0 \sin(\omega t)$$

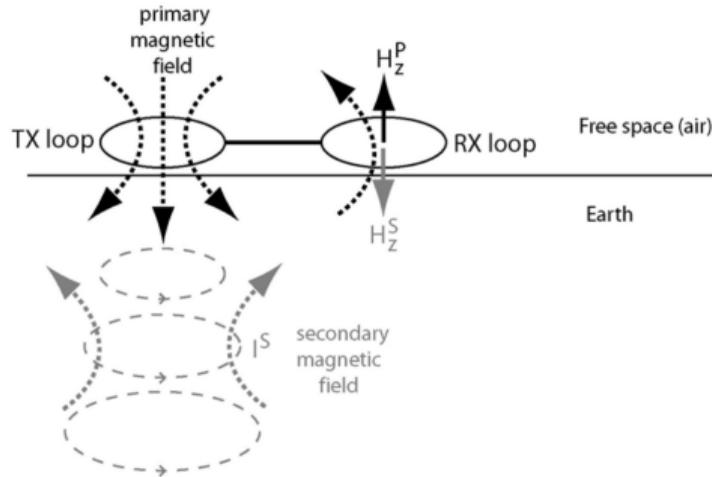
- erzeugt Feld in Empfangsspule RX

$$H_z^p = -\frac{IA}{4\pi s^3} \quad (6)$$

A =Fläche der Spule TX. s Abstand der Spulen.

- Die in RX induzierte Spannung oszilliert mit der Frequenz ω .
- RX misst die Magnetfeldkomponente des Primärfeldes parallel zur Spulennachse.

Zwei Spulen an der Erdoberfläche



Referenz

- Das Primärfeld diffundiert in die Erde.
- Durch die Oszillation des Primärfeldes werden sekundäre elektrische Ströme $\vec{I}_c = \vec{I}^S$ induziert. Diese fließen rechtwinklig zum Primärfeld.
- Die Sekundärströme verlieren durch Dissipation Energie nach dem Ohmschen Gesetz.
- Dies führt zur Amplitudenabnahme des EM-Feldes (Skintiefe).
- Nach der Lenz'schen Regel fließen die sekundären Ströme entgegengesetzt zum Primärstrom.
- Die sekundären Ströme erzeugen ein sekundäres Magnetfeld.

Zwei Spulen an der Erdoberfläche

Die Fourierkomponente des Gesamtfeldes (primär plus sekundär) in der Empfängerspule RX in einem homogenen Halbraum lässt sich wie folgt darstellen [Spies and Frischknecht, 1991]

$$H_z = \frac{IA}{2\pi k^2 s^5} [9 - (9 + 9iks - 4k^2 s^2 - ik^3 s^3) e^{-iks}] \quad (7)$$

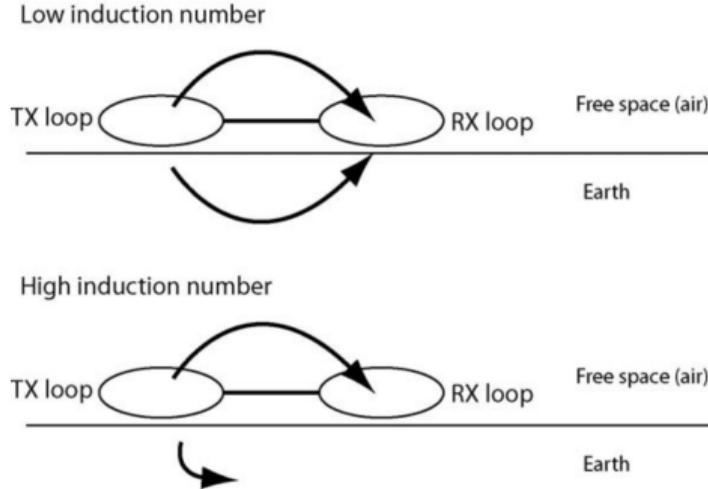
mit der Wellenzahl $k = \sqrt{i\omega\mu\sigma}$. Wir dividieren durch das Primärfeld (Gl. 6) und erhalten

$$\frac{H_z}{H_z^p} = \frac{2}{k^2 s^2} [9 - (9 + 9iks - 4k^2 s^2 - ik^3 s^3) e^{-iks}]$$

Dieser Ausdruck lässt sich für das Fernfeld und das Nahfeld vereinfachen.

(Es gibt entsprechende Lösungen für andere Orientierungen von TX und RX).

Nahfeld und Fernfeld



Referenz

Induktionszahl

$$B := \frac{s}{\delta}$$

(s =Spulenabstand, δ =Skintiefe)

- Im Nahfeld propagiert das EM-Feld verlustfrei durch die Luft und die Erde. Dies entspricht einer kleinen Induktionszahl. Dies ist bei Zweispulenverfahren der Fall.
- Im Fernfeld propagiert das EM-Feld verlustfrei durch die Luft und induziert lokal am Empfänger ein sekundäres Feld. Dies entspricht einer großen Induktionszahl. Dies ist bei dem VLF-Verfahren der Fall.

Nahfeld

Im Nahfeld (kleine Induktionszahl, $ks \ll 1$) ergibt sich

$$\frac{H_z}{H_z^p} = 1 - \frac{k^2 s^2}{4} = 1 - \frac{i\omega\mu\sigma s^2}{4}$$

Das ergibt für den Realteil (\Re) und den Imaginärteil (\Im)

$$\Re\left(\frac{H_z}{H_z^p}\right) = 1, \quad \Im\left(\frac{H_z}{H_z^p}\right) = \frac{\omega\mu\sigma s^2}{4}$$

Damit lässt sich aus dem Imaginärteil die scheinbare Leitfähigkeit des Halbraumes berechnen:

$$\sigma_a = \frac{4}{\omega\mu s^2} \Im\left(\frac{H_z}{H_z^p}\right)$$

ω =Frequenz der Sendespule TX, s : Abstand TX-RX, H_z Magnetfeld in RX, H_p : Primärfeld in RX

Meßgrößen in der FEM

Es wird in der Empfangsspule RX das **Totalfeld** H_z **gemessen**. Das Primärfeld H_z^p , das in RX in freier Luft registriert wird, wird (für verschiedene ω , s) einmalig bestimmt durch Eichmessungen. Es dient zur Normierung der Messdaten.

Die **Quadratur** (=Imaginärteil)

$$\Im \left(\frac{H_z}{H_z^p} \right) \quad (8)$$

enthält Informationen über die **Phasenverschiebung** zwischen H_z und H_z^p .

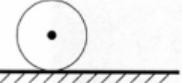
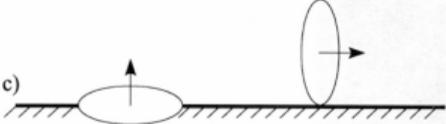
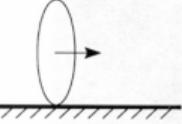
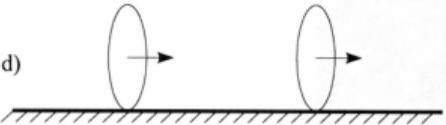
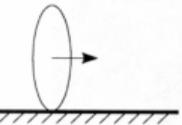
Die **In-Phase** (=Realteil)

$$\Re \left(\frac{H_z}{H_z^p} \right) \quad (9)$$

enthält Informationen über die **relativen Amplituden** zwischen H_z und H_z^p .

Die Messgeräte geben die Quadratur und die In-Phase direkt aus. Aufgrund des vektoriellen Charakters von \vec{H} und \vec{E} können andere Vektorkomponenten sowie auch abgeleitete Größen wie zum Beispiel die Einfallrichtung und Polarisation untersucht werden.

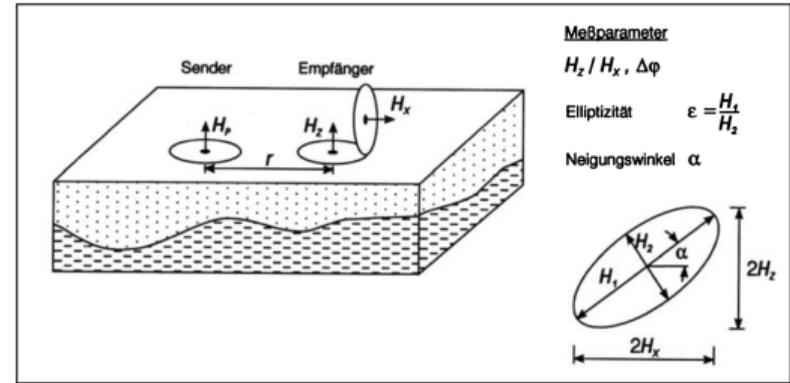
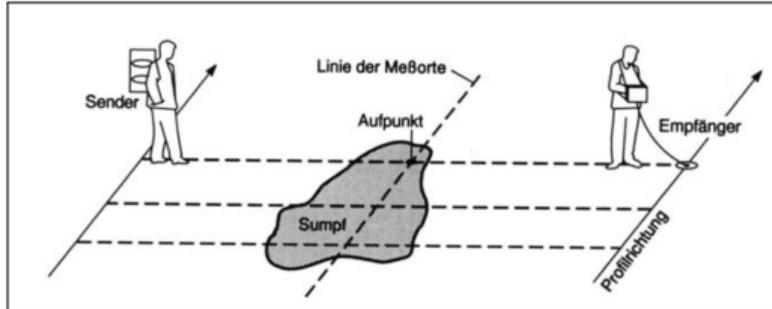
Gängige Konfigurationen in der FEM

	Transmitter	Receiver	loop orientation	dipole orientation
a)			horizontal coplanar (HCP, HLEM)	vertical magnetic dipole (VMD)
b)			vertical coplanar (VCP, VLEM)	horizontal magnetic dipole (HMD)
c)			loops perpendicular to each other (PERP)	dipols perpendicular to each other (PERP)
d)			vertical coaxial (HCA)	horizontal magnetic dipole (HMD)

[Lange and Seidel, 2007]

- Es lassen sich für alle Konfigurationen analytische Formeln (wie Gl. 7) für den Halbraum (Nah- und Fernfeld) definieren zur Berechnung der (scheinbaren) Leitfähigkeit des Halbraumes [Spies and Frischknecht, 1991].
- Die Konfigurationen haben unterschiedliche Sensitivitäten als Funktion der Tiefe.

Spezielle Konfigurationen in der FEM

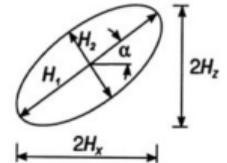


Meßparameter

$H_z / H_x, \Delta\varphi$

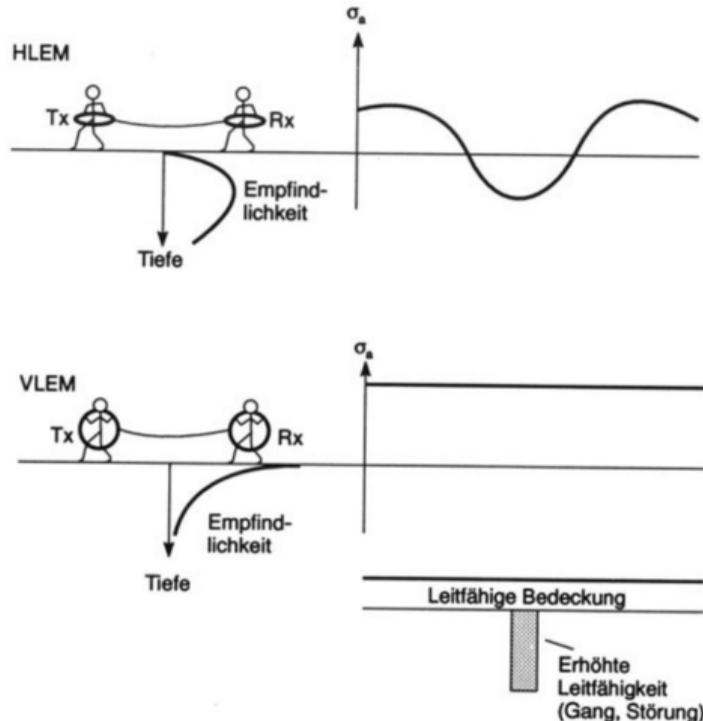
Elliptizität $\varepsilon = \frac{H_x}{H_z}$

Neigungswinkel α



[Knödel et al., 2005]

Empfindlichkeit in der FEM

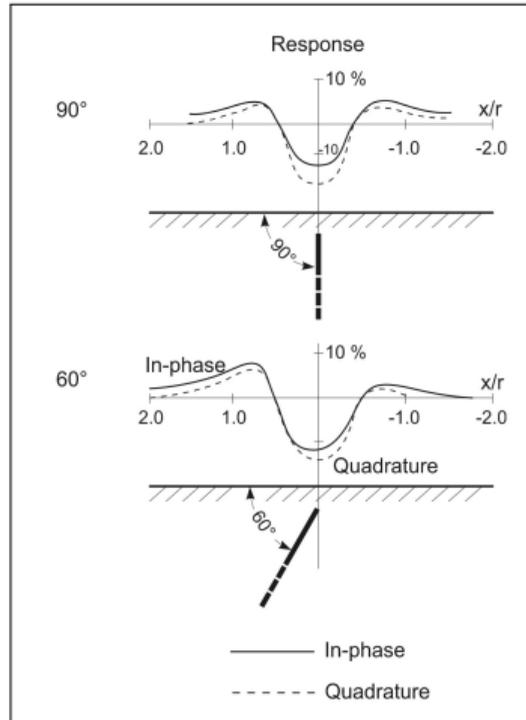


- Empfindlichkeiten der Quadratur für 2 typische Spulenorientierungen VLEM und HLEM [McNeill, 1980].
- Die Empfindlichkeit (engl. sensitivity) beschreibt, wie stark eine Modellveränderung sich auf die Messdaten auswirkt.
- VLEM ist besser geeignet für oberflächennahe Erkundung.
- HLEM ist besser geeignet für tiefere Erkundung .

Agenda

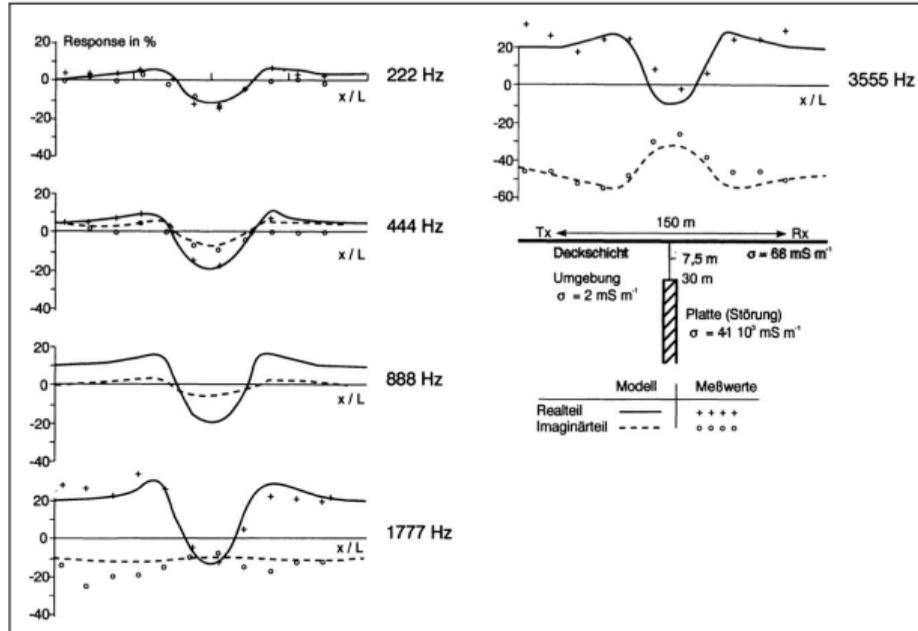
1. Einführung
2. Ausbreitungsverhalten
3. Prinzip der Frequenzbereich-Elektromagnetik (FEM)
4. Prinzip der Transienten-Elektromagnetik (TEM)
5. Frequenzbereich-Elektromagnetik (FEM)
 - Messprinzip und Auswertung
 - Interpretation von Anomalien
 - Messgeräte
 - Beispiele
6. Zusammenfassung

Interpretation von Anomalien



- I.d.R erfolgt Messung beider Komponenten
 - ① Quadratur (Gl. 8)
 - ② In-Phase (Gl. 9)
- Iterative Modellanpassung bei einfachen Modellen (einfache Struktur in einem homogenen Halbraum)
- Hier: Neigungswinkel einer leitfähigen Platte

Interpretation von Anomalien



- Frequenzabhängige Eindringung
- Sondierungskurven für Quadratur (= Imaginärteil) (Gl. 8) und In-Phase (=Realteil) (Gl. 9) unterschiedlich
- z.B. Polaritätswechsel der Quadratur (= Imaginärteil) zu hohen Frequenzen
- Iterative Anpassung durch Modellierung erforderlich

Agenda

1. Einführung
2. Ausbreitungsverhalten
3. Prinzip der Frequenzbereich-Elektromagnetik (FEM)
4. Prinzip der Transienten-Elektromagnetik (TEM)
5. Frequenzbereich-Elektromagnetik (FEM)
 - Messprinzip und Auswertung
 - Interpretation von Anomalien
 - Messgeräte
 - Beispiele
6. Zusammenfassung

Messgeräte in der FEM



[link](#)

- Geonics EM 38-4
- Firma Geonics LTD (Kanada)
- 4 RX Spulen, 1 Sendespule
- $s = 0.5, 0.75, 0.88, 1.0$ m bei HCP
- Horizontale (HCP) wie auch vertikale Orientierung (VCP)
- Frequenz 14.5 kHz
- Einbringung bis zu 1.5m
- Anwendung: Bodenkunde, Archäologie

Messgeräte in der FEM



[link](#)

- Geonics EM 31
- Firma Geonics LTD (Kanada)
- 1 RX Spule, 1 Sendespule
- $s = 3.66 \text{ m}$
- Frequenz 9.8 kHz
- Einbringung bis zu 6m
- Anwendung: Grundwasser

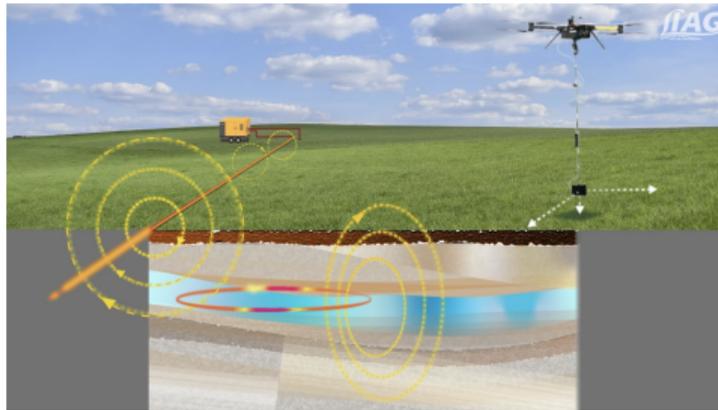
Messgeräte in der FEM



[link](#)

- Geonics EM 34
- Firma Geonics LTD (Kanada)
- 1 RX Spule, 1 Sendespule
- $s = 10, 20, 40$ m
- Frequenz 0.4, 1.6, 6.4 kHz
- Einbringung bis zu 60m
- Anwendung: Prospektion, Deponien, geologische Kartierung

Messgeräte in der FEM



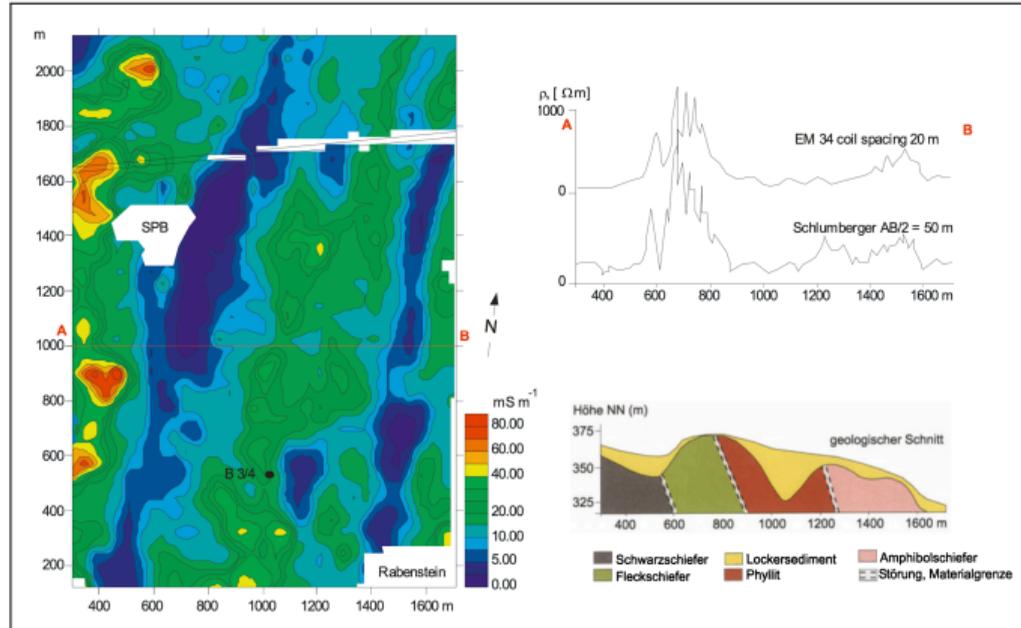
Film (Dauer: 30s)

- Semi-airborne FEM mit Drohnen (LIAG)
- Erzeugung des Magnetfeldes über einen Dipol (Stromkabel)
- Vermessung von \vec{B} über eine Drohne
- Eindringung einige 100 Meter

Agenda

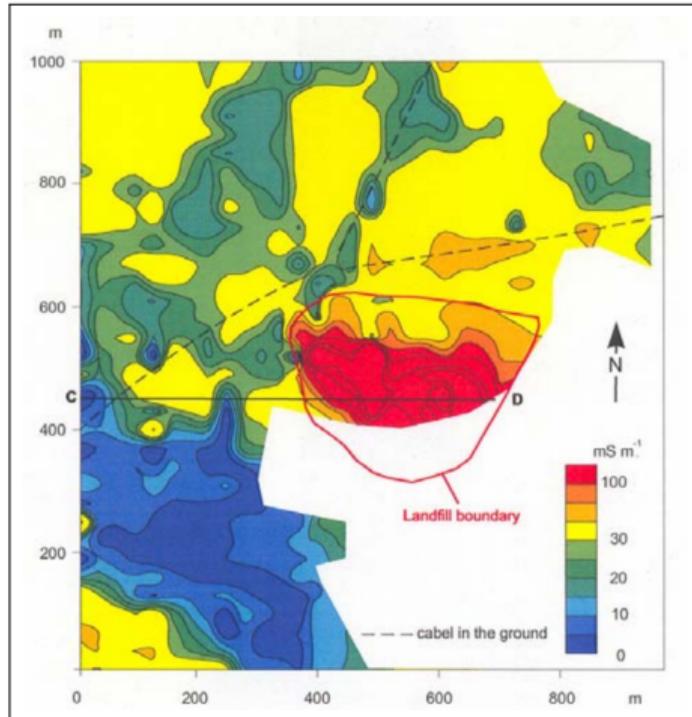
1. Einführung
2. Ausbreitungsverhalten
3. Prinzip der Frequenzbereich-Elektromagnetik (FEM)
4. Prinzip der Transienten-Elektromagnetik (TEM)
5. Frequenzbereich-Elektromagnetik (FEM)
 - Messprinzip und Auswertung
 - Interpretation von Anomalien
 - Messgeräte
 - Beispiele
6. Zusammenfassung

Anwendungsbeispiel FEM: Geologische Kartierung



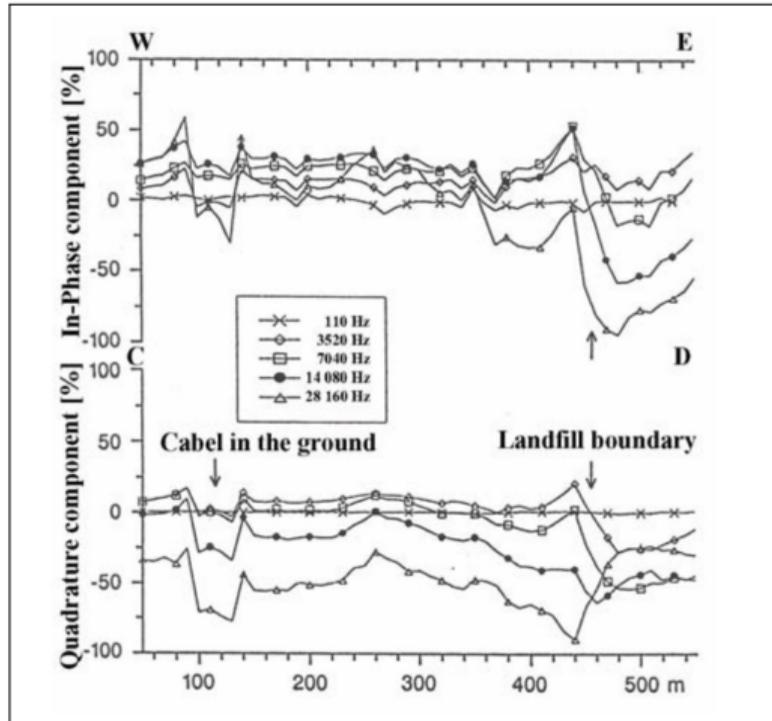
- Geologische Kartierung [Lange and Seidel, 2007]
- EM34, VCP-Konfiguration, $s=20\text{m}$
- Stationsabstand 10m, Linienabstand: 30m
- Scheinbare Leitfähigkeiten korrelieren mit der Mächtigkeit der Lockersedimente
- Gute Übereinstimmung mit Geoelektrik Schlumberger

Anwendungsbeispiel FEM: Deponieuntersuchung

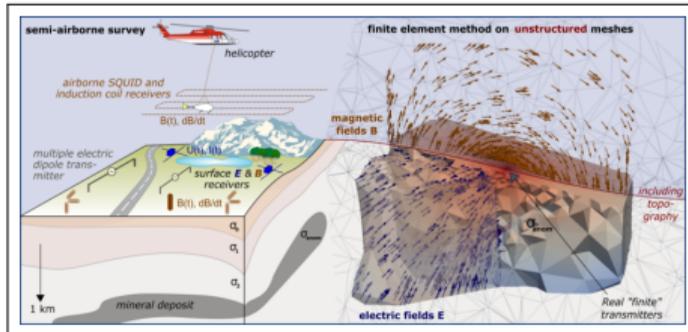


- Untersuchung einer alten Mülldeponie [Lange and Seidel, 2007]
- HCP-Konfiguration, $s=40\text{m}$
- Stationsabstand 10m, Linienabstand: 40m
- Frequenzen: 110 Hz, 3520 Hz, 7040 Hz, 14 kHz, 28 kHz
- Gemessene Größen: In-Phase, Quadratur, scheinbare Leitfähigkeit
- Die Karte zeigt die scheinbare Leitfähigkeit bei 7040 Hz.
- Die Mülldeponie äußert sich durch hohe Leitfähigkeiten.
- Stromkabel im Untergrund führen zu Anomalien.

Anwendungsbeispiel FEM: Deponieuntersuchung



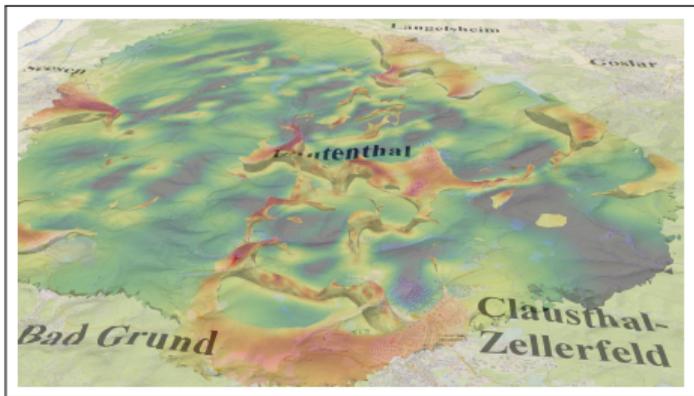
- Profil entlang CD
- Frequenzen: 110 Hz, 3520 Hz, 7040 Hz, 14 kHz, 28 kHz
- Hohe Frequenzen (geringere Eindringung) zeigen stärkere Anomalien
- Anomalien: Kabel und Deponie gut erkennbar



[Link](#)

- Kombination von Sende und Empfangsspulen auf der Erde und in der Luft
- Aufzeichnung und Anregung von \vec{E} und \vec{B}
- Auswertung mit FEM wie auch TEM
- Komplexe Modellierung und Inversion auf unstrukturierten FE-Gittern im Frequenz- und Zeitbereich.
- [Film](#) einer Masskampagne (Dauer: 5 Min.)

Erzkörpererkundung mit semi-airborne FEM/TEM



[Link](#)

[Film](#) des Ergebnismodells (Dauer: 20s)

3-D-Modell der elektrischen Leitfähigkeit zeigt potenzielle Erzkörper. Das Video zeigt Ergebnisse der Hubschrauber-Erkundungsflüge im Bereich des Altbergbaureviere um Lautenthal im Oberharz. Aus den Messdaten wurde ein 3-D-Modell der elektrischen Leitfähigkeit der im Untergrund vorliegenden Gesteine erstellt. Es deckt eine Gesamtfläche von ca. 200 Quadratkilometern bis in eine Tiefe von ca. 1500 Metern ab. Damit kann es Informationen über Strukturen liefern, die deutlich tiefer liegen als durch die vorhandenen Bergbauarbeiten bekannt war. Gute Leiter (in Rot) bedeuten potenzielle Erzkörper, zum Beispiel im Zellerfelder Gangzug (links im Bild) und im Lautenthaler Gangzug (mittig).

Quelle: Dr. Thomas Günther / LIAG-Institut für Angewandte Geophysik

Agenda

1. Einführung
2. Ausbreitungsverhalten
3. Prinzip der Frequenzbereich-Elektromagnetik (FEM)
4. Prinzip der Transienten-Elektromagnetik (TEM)
5. Frequenzbereich-Elektromagnetik (FEM)
 - Messprinzip und Auswertung
 - Interpretation von Anomalien
 - Messgeräte
 - Beispiele
6. Zusammenfassung

Zusammenfassung

- Das Grundprinzip in der Elektromagnetik ist die **Messung des sekundären Magnetfeldes, das vom Primärfeld induzierten Strömen in leitfähigen Strukturen erzeugt wird.**
- In der Frequenzbereich-Elektromagnetik (FEM) werden nur **bestimmte Frequenzen** durch eine Sendespule angeregt. Die Aufzeichnung erfolgt von einer Empfängerspule im Nahfeld.
- Es werden i.d.R. Anomalien der Komponenten **In-Phase und Quadratur** gemessen.
- Aus der Quadratur lässt sich die **scheinbare spezifische elektrische Leitfähigkeit** berechnen.
- Die FEM ist ein effizientes Verfahren zur **Kartierung von oberflächennahen Leitfähigkeitsanomalien.**



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

✉ Thomas.Bohlen@kit.edu

🔗 <http://www.gpi.kit.edu/>

Veröffentlicht unter  Lizenz.

Referenzen I

- K. Knödel, H. Krummel, and G. Lange. *Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten / BGR, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe Bd. 3: Geophysik*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2005. URL <http://dx.doi.org/10.1007/b137869>.
- G. Lange and K. Seidel. *Electromagnetic Methods*, pages 239–281. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2007. ISBN 978-3-540-74671-3. doi: 10.1007/978-3-540-74671-3_9. URL https://doi.org/10.1007/978-3-540-74671-3_9.
- H. Maurer. *Elektromagnetische Verfahren in der Ingenieurgeophysik. Einführung, Geoelektrik und diffusive Verfahren. Vorlesungsskript ETH Zürich, 2024.*
- J. McNeill. *Electromagnetic terrain conductivity measurements at low induction numbers*. Technical report, GEONICS Technical Note TN6, 1980. URL <https://geonics.com/pdfs/technicalnotes/tn6.pdf>.
- G. J. Palacky. *3. Resistivity Characteristics of Geologic Targets*, pages 52–129. Society of Exploration Geophysicists, Jan. 1988. ISBN 9781560802631. doi: 10.1190/1.9781560802631.ch3. URL <http://dx.doi.org/10.1190/1.9781560802631.ch3>.
- B. R. Spies and F. C. Frischknecht. *5. Electromagnetic Sounding*, pages 285–425. Society of Exploration Geophysicists, Jan. 1991. ISBN 9781560802686. doi: 10.1190/1.9781560802686.ch5. URL <http://dx.doi.org/10.1190/1.9781560802686.ch5>.