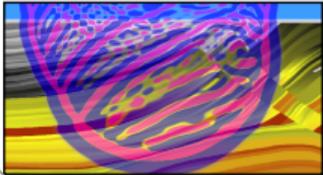


Einführung in die Geophysik I

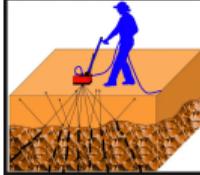
Georadar

T. Bohlen, Geophysikalisches Institut, Fakultät für Physik

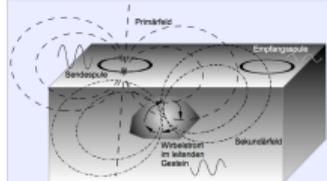
Seismik



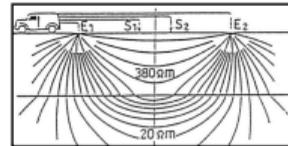
Georadar



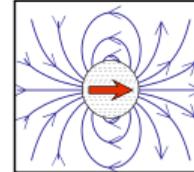
Elektromagnetik



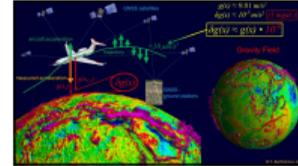
Geoelektrik



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	

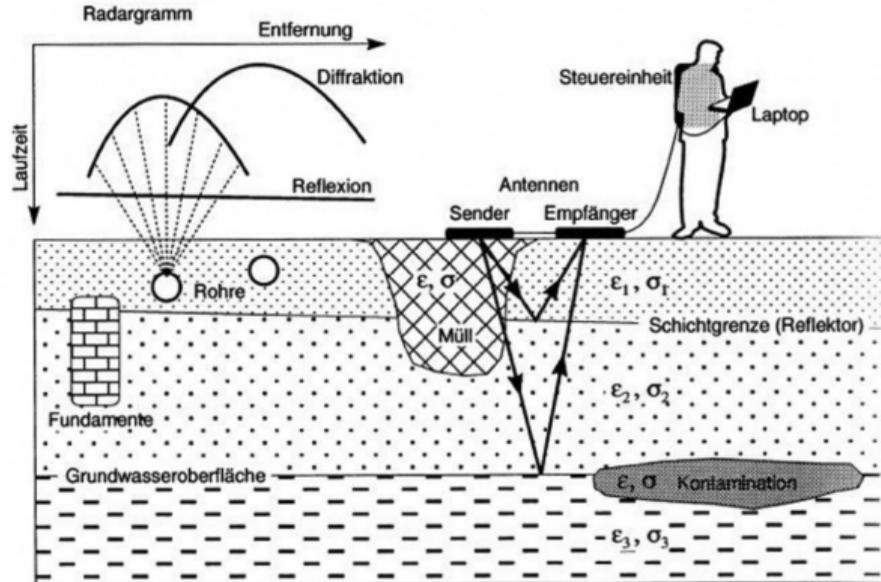
Agenda

1. Einführung
2. Lösung der Telegraphengleichung: Ausbreitungsgeschwindigkeit und Dämpfung
3. Wellenausbreitung
 - Reflexion
 - Streuung
4. Räumliche Auflösung
5. Beispiele
6. Zusammenfassung

Agenda

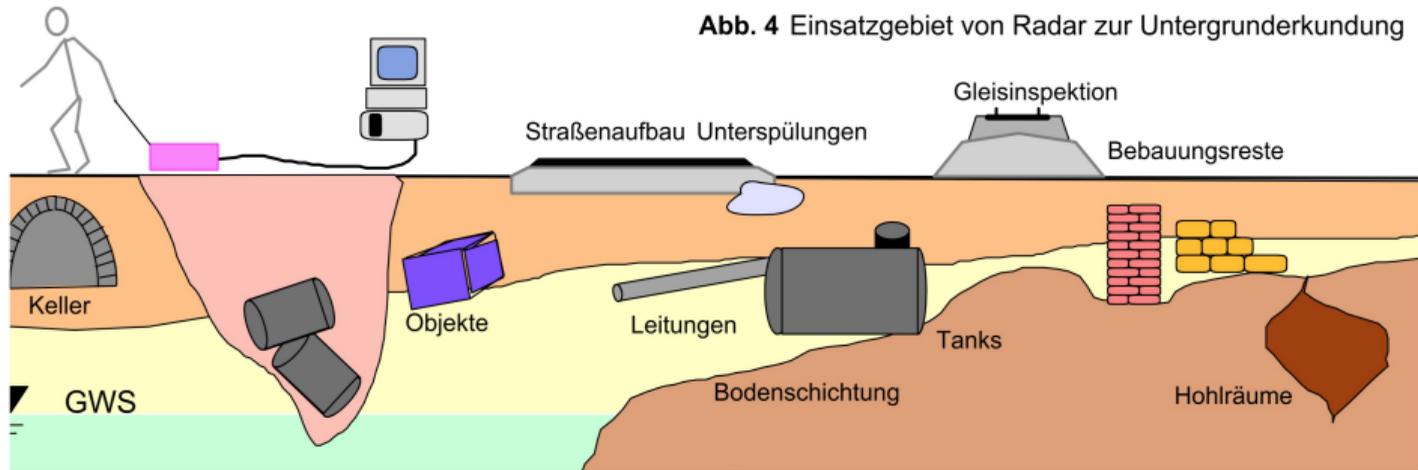
1. Einführung
2. Lösung der Telegraphengleichung: Ausbreitungsgeschwindigkeit und Dämpfung
3. Wellenausbreitung
 - Reflexion
 - Streuung
4. Räumliche Auflösung
5. Beispiele
6. Zusammenfassung

Messprinzip beim Georadar



- 1-2 Antennen
- Frequenzbereich 1 MHz – 1 GHz
- Kurze Laufzeit $\approx 10^{-9}$ s
- Geringe Eindringung
- Hohe Auflösung
- Diffraktionen und Reflexionen

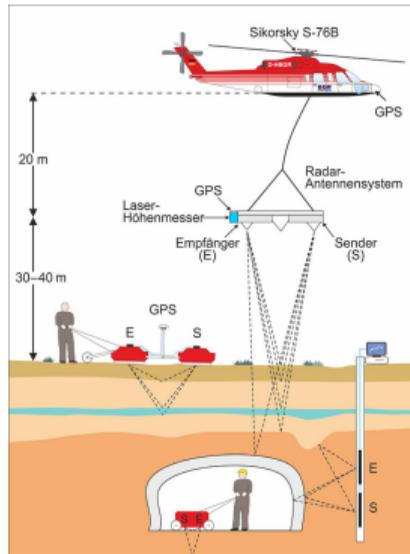
Einsatzgebiete des Georadar



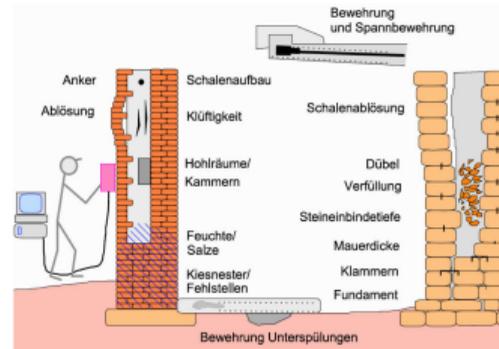
(Quelle GGU Karlsruhe)

Einsatzgebiete des Georadar

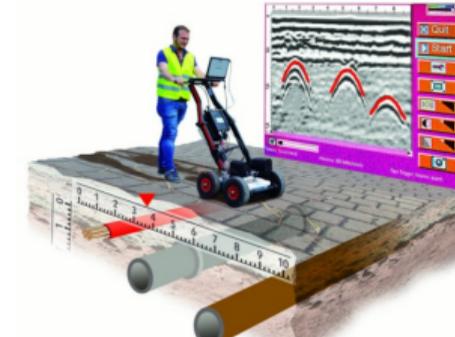
Luft-Boden-Untertage



Zerstörungsfreie Prüfung



Baugrunduntersuchungen



(Quelle GGU Karlsruhe)

Agenda

1. Einführung
2. Lösung der Telegraphengleichung: Ausbreitungsgeschwindigkeit und Dämpfung
3. Wellenausbreitung
 - Reflexion
 - Streuung
4. Räumliche Auflösung
5. Beispiele
6. Zusammenfassung

Lösung der Maxwell-Gleichung für ebene EM-Welle

Die allgemeine Lösung der 1D Telegraphengleichung

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

lautet

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

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

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

Relevante Materialparameter

1 Elektrische Permittivität

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$$

2 Magnetische Permeabilität

$$\mu = \mu_r \mu_0 \approx \mu_0$$

3 Elektrische Leitfähigkeit

$$\sigma$$

Material	ϵ_r	$\sigma [\Omega m]^{-1}$
Luft	1	0
Süßwasser	80	$< 10^{-2}$
Meerwasser	80	4
Eis	3-4	10^{-5}
Trockener Sand	3-5	$10^{-7} - 10^{-3}$
Nasser Sand	20-30	10^{-2}
Lehm	4-8	10^{-2}
Ton	5-40	$10^{-3} - 1$
Granit	4-6	$10^{-5} - 10^{-3}$
Bernstein	2.5	$< 10^{-16}$

Für die meisten Geomaterialien: $\mu_r = 1$, $\epsilon_r = 1 - 25$, $\sigma = 10^{-5} - 10^{-2}$

Ausbreitungsgeschwindigkeit

Ausbreitungsgeschwindigkeit nach Gl. 1

$$c = \frac{\omega}{k} = \sqrt{\frac{2}{\mu\epsilon}} \left[\left(1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon} \right)^2 \right)^{1/2} + 1 \right]^{-1/2} = \begin{cases} \sqrt{\frac{2\omega}{\mu\sigma}}, & \omega\epsilon \ll \sigma \quad \text{Diffusion/Dispersion} \\ \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r}}, & \sigma \ll \omega\epsilon \quad \text{GPR} \end{cases}$$

Der Fall $\omega\epsilon \ll \sigma$ tritt bei geringen Frequenzen und hoher Leitfähigkeit auf.

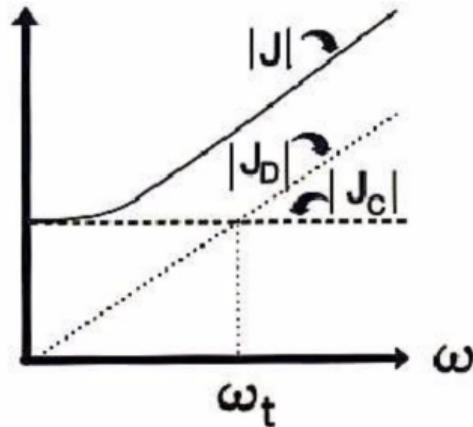
Der Fall $\sigma \ll \omega\epsilon$ tritt bei hohen Frequenzen und geringer Leitfähigkeit auf.

Die Grenzfrequenz zwischen diffusiver Ausbreitung (EM-Verfahren) und Wellenausbreitung (GPR) liegt bei

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

Im Frequenzbereich des Georadar $10^6 - 10^9 \text{ Hz}$ liegen wir bei hoher Leitfähigkeit im Grenzbereich.

Frequenzabhängigkeit von \vec{J}_C und \vec{J}_D



Frequenzabhängigkeit des Verschiebungsstromes \vec{J}_D und des Leitungsstromes \vec{J}_C (Annan [2003])

$$\vec{J}_C = \sigma \vec{E}$$

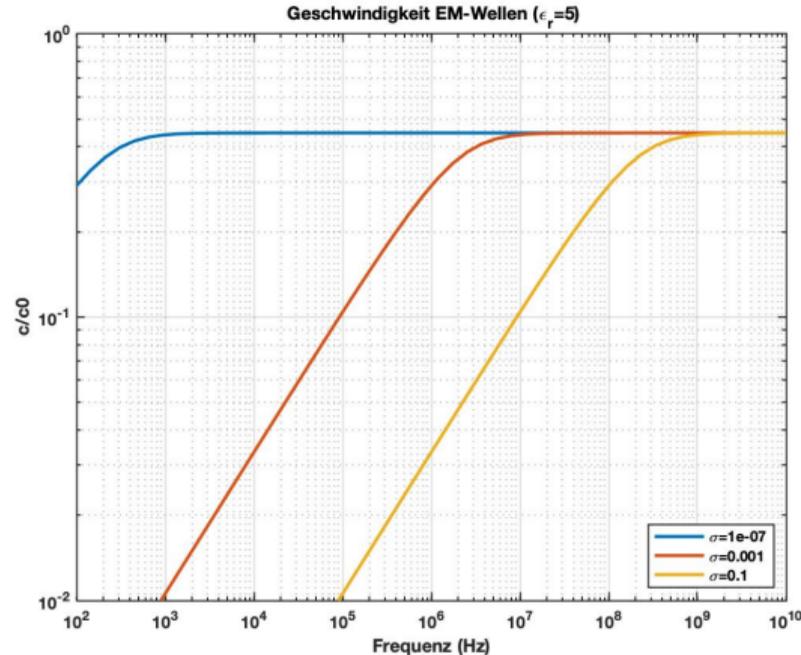
$$\vec{J}_D = \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \propto \omega$$

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

$\omega < \omega_t : \vec{J}_C \gg \vec{J}_D$ (EM-Verfahren)

$\omega > \omega_t : \vec{J}_C \ll \vec{J}_D$ (GPR)

Ausbreitungsgeschwindigkeit : σ



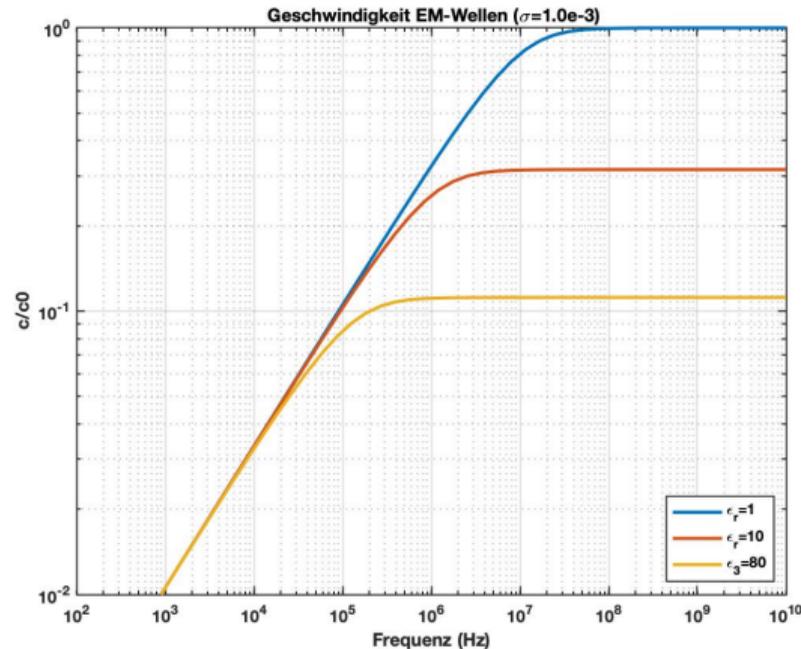
$$\frac{c}{c_0} = \frac{1}{c_0} \sqrt{\frac{2}{\mu\epsilon}} \left[\left(1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon} \right)^2 \right)^{1/2} + 1 \right]^{-1/2}$$

■ GPR-Plateau: $\omega \rightarrow \infty : c = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r}}$

■ Diffusion (EM)

$$\omega \rightarrow 0 : c = \sqrt{\frac{2\omega}{\mu\sigma}} \propto \sqrt{\omega}$$

Ausbreitungsgeschwindigkeit: ϵ_r



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

■ GPR-Plateau: $\omega \rightarrow \infty : c = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r}}$

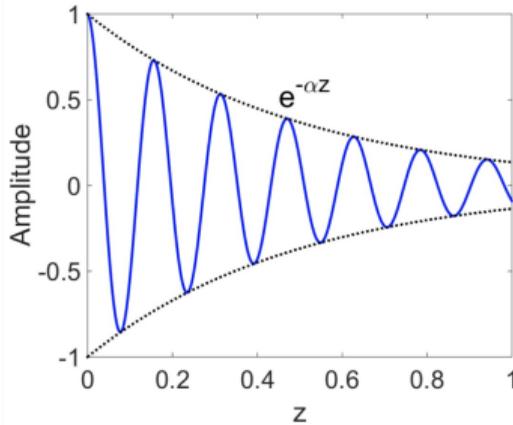
■ Diffusion (EM)

$$\omega \rightarrow 0 : c = \sqrt{\frac{2\omega}{\mu\sigma}} \propto \sqrt{\omega}$$

Absorptionskoeffizient (Dämpfung)

Absorptionskoeffizient nach Gl. 2

$$\alpha = \sqrt{\frac{\omega^2 \mu \epsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\epsilon^2 \omega^2}} - 1 \right)} = \begin{cases} \sqrt{\frac{\omega \mu \sigma}{2}}, & \omega \epsilon \ll \sigma \quad \text{EM} \\ \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}, & \sigma \ll \omega \epsilon \quad \text{GPR} \end{cases}$$

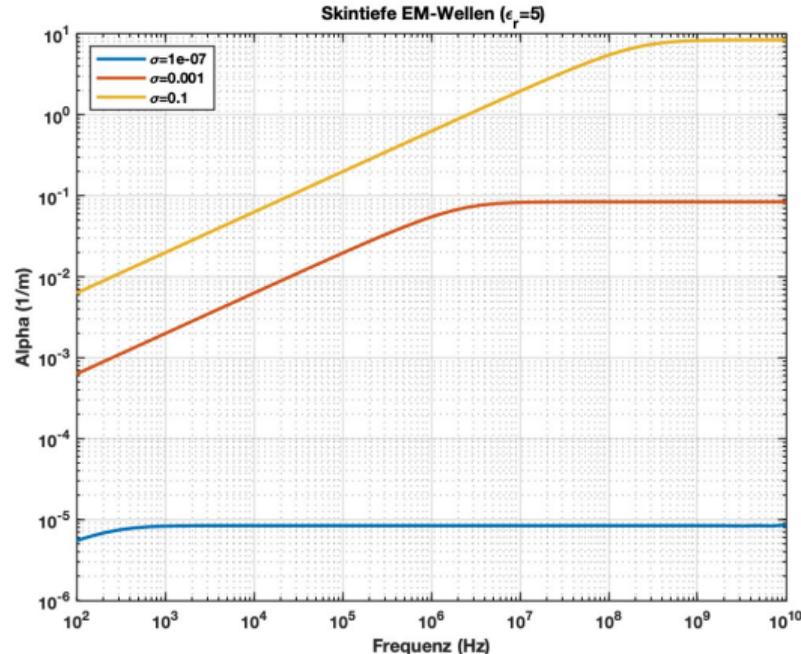


In der Skintiefe hat die Amplitude um den Faktor $\frac{1}{e} \approx 0.37$ abgenommen

$$z_s = \delta = \frac{1}{\alpha}$$

Eindringung $\approx \delta$

Absorptionskoeffizient (Dämpfung)



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

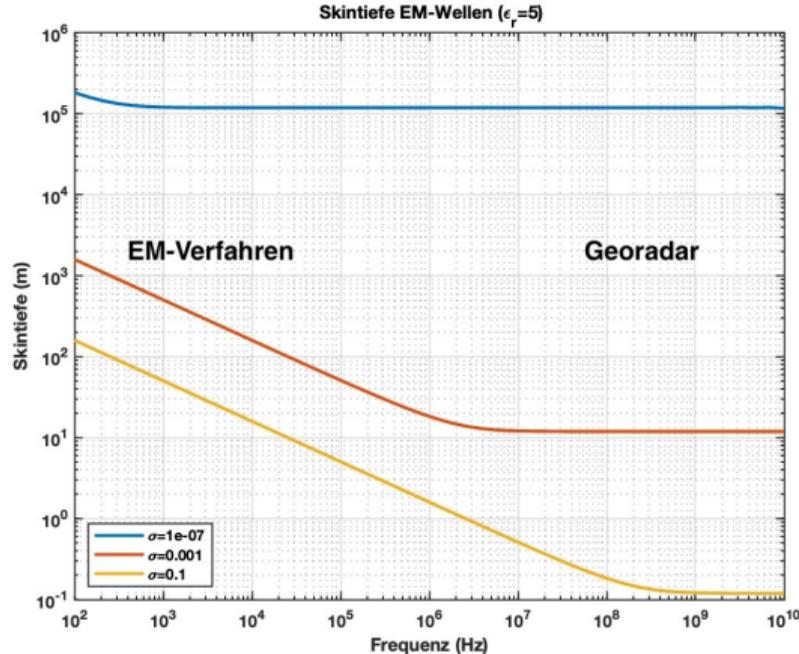
■ GPR-Plateau:

$$\omega \rightarrow \infty : \alpha = \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$$

■ Diffusion (EM)

$$\omega \rightarrow 0 : \alpha = \sqrt{\frac{\omega \mu \sigma}{2}}$$

Skintiefe

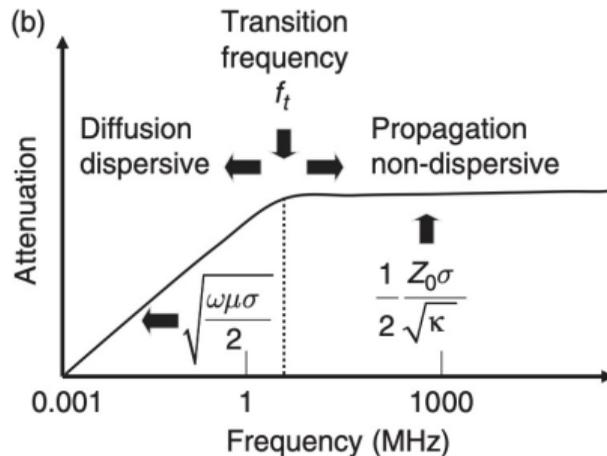
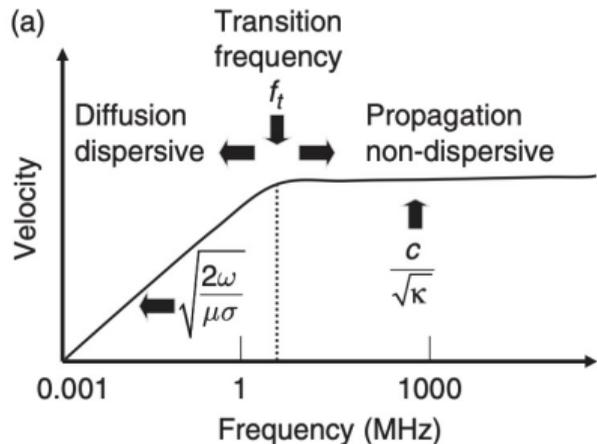


$$\delta = \frac{1}{\alpha}$$

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

Zusammenfassung zum Frequenzverhalten der Ausbreitungsgeschwindigkeit und Dämpfung

$$f_t = \frac{\sigma}{2\pi\epsilon}$$



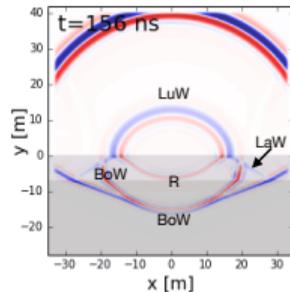
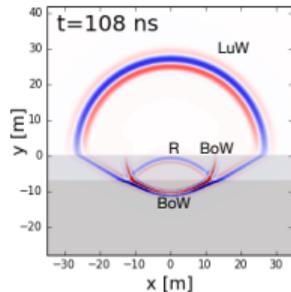
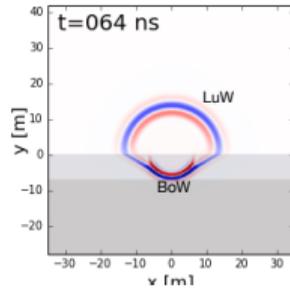
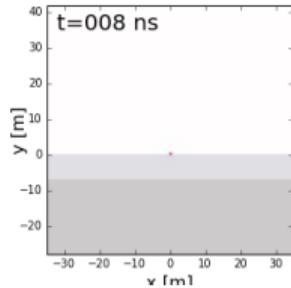
Agenda

1. Einführung
2. Lösung der Telegraphengleichung: Ausbreitungsgeschwindigkeit und Dämpfung
3. Wellenausbreitung
 - Reflexion
 - Streuung
4. Räumliche Auflösung
5. Beispiele
6. Zusammenfassung

Agenda

1. Einführung
2. Lösung der Telegraphengleichung: Ausbreitungsgeschwindigkeit und Dämpfung
3. Wellenausbreitung
 - Reflexion
 - Streuung
4. Räumliche Auflösung
5. Beispiele
6. Zusammenfassung

Wellenausbreitung in einem Zweischichtfall

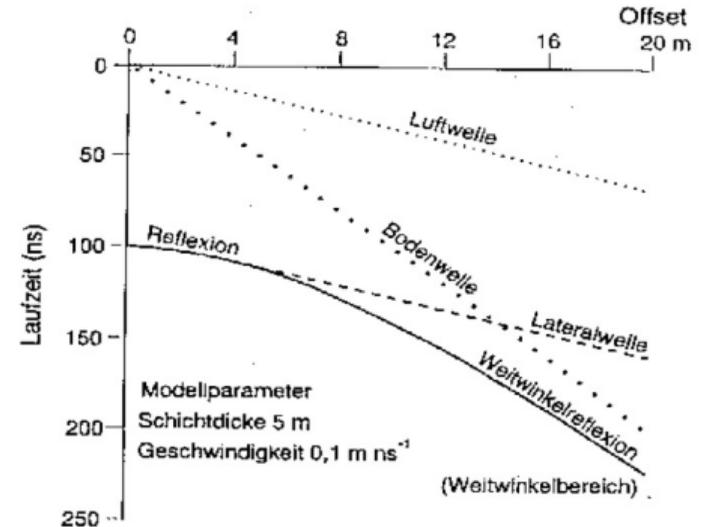
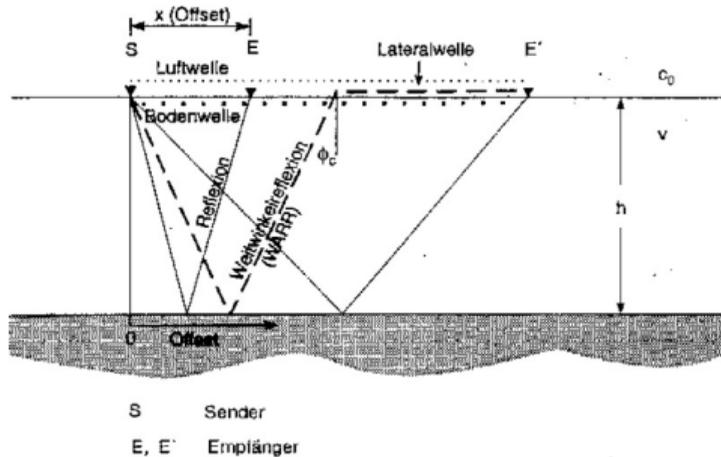


LuW: Luftwelle LaW: Lateralwelle BoW: Bodenwelle R: Reflexion

Movie

- Ungedämpfte Luftwelle
- Reflexion erzeugt Lateralwelle
- Welche Schicht hat geringere Permittivität und höhere Leitfähigkeit ?

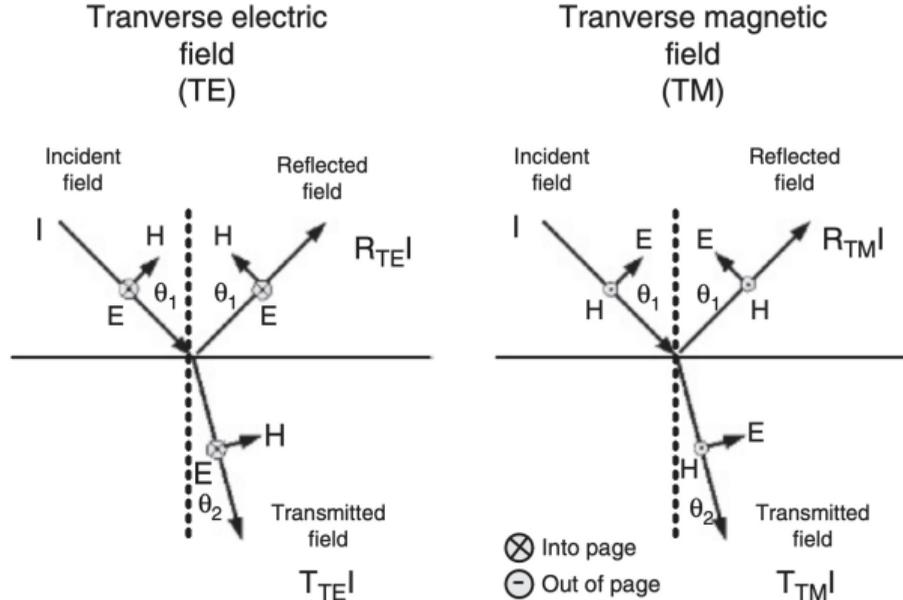
Wellenausbreitung in einem Zweischichtfall



Laufzeitdiagramm für den söhligem Zweischichtfall

Besonderheit: Lateralwelle bei jeder Reflexion

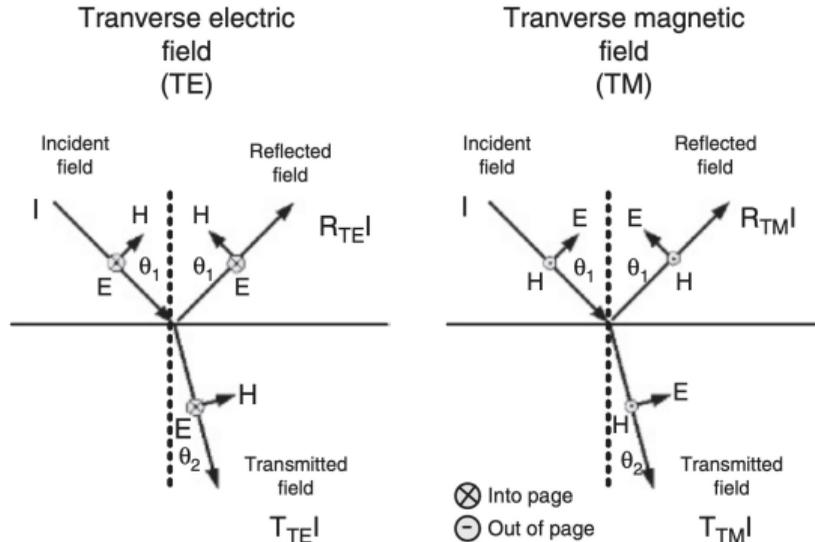
TE und TM Aufzeichnungsmoden



- EM Wellen schwingen transversal und orthogonal zueinander
- TE (Transverse Electric) und TM (Transverse Magnetic) sind 2 unabhängige Auszeichnungskonfigurationen.
- TE: E-Feld transversal zur Erdoberfläche
- TM: H-Feld transversal zur Erdoberfläche

[Annan, 2003]

Brechungsgesetz und Reflexionsamplituden



Brechungsgesetz

$$\frac{\sin(\theta_1)}{c_1} = \frac{\sin(\theta_2)}{c_2}, \quad c_i = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_{r,i}}}$$

Reflexionsamplituden

$$R_{TE} = \frac{Y_1 \cos(\theta_1) - Y_2 \cos(\theta_2)}{Y_1 \cos(\theta_1) + Y_2 \cos(\theta_2)}$$

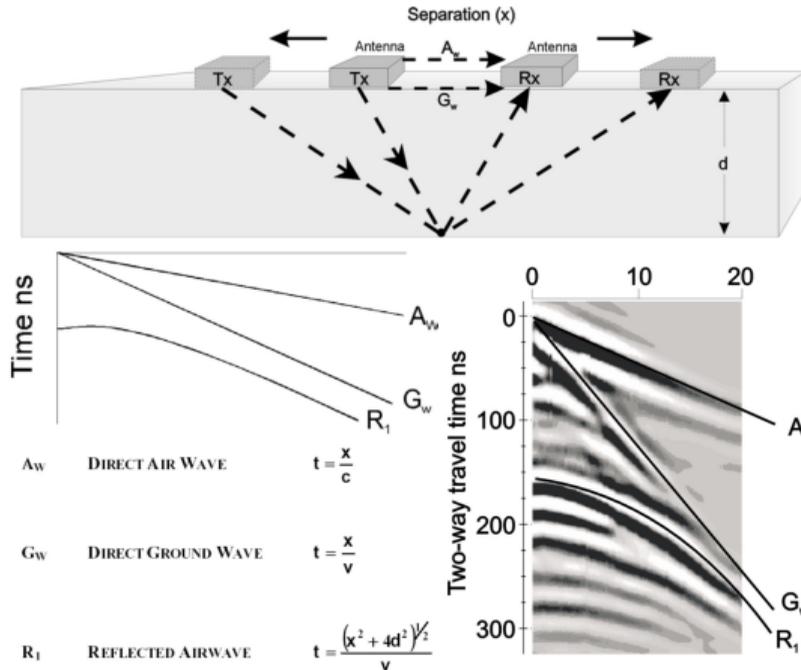
$$R_{TM} = \frac{Z_1 \cos(\theta_1) - Z_2 \cos(\theta_2)}{Z_1 \cos(\theta_1) + Z_2 \cos(\theta_2)}$$

Elektromagnetische Impedanz (GPR)

$$Z_i = \sqrt{\frac{\mu_i}{\epsilon_i}} = \frac{1}{Y_i} \quad \omega > \omega_t = \sqrt{\frac{\sigma}{\mu}}$$

[Annun, 2003]

Abbildung von Reflexionen



Analog zur Reflexionsseismik

- CMP-Sortierung
- Geschwindigkeitsanalyse

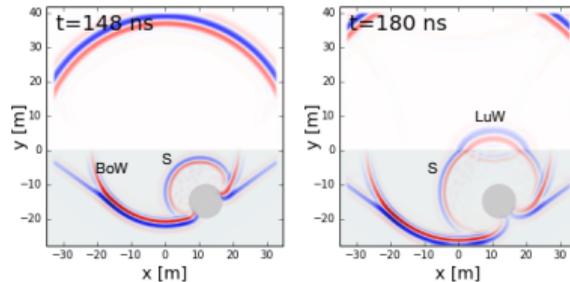
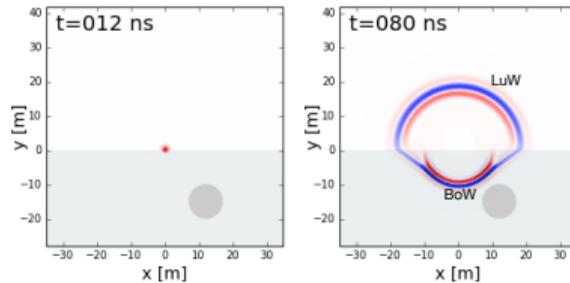
$$t^2(x) = t_0^2 + \frac{x^2}{v^2}, \quad t_0 = \frac{2d}{v}$$

- Anwendung der Dix-Formel
- Moveout-Korrektur
- Stapelung
- Migration

Agenda

1. Einführung
2. Lösung der Telegraphengleichung: Ausbreitungsgeschwindigkeit und Dämpfung
3. Wellenausbreitung
 - Reflexion
 - Streuung
4. Räumliche Auflösung
5. Beispiele
6. Zusammenfassung

Streuung an einem Objekt

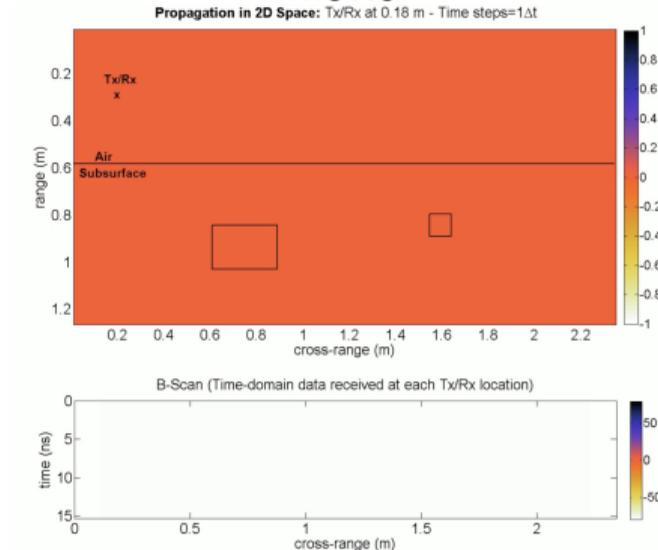


Movie

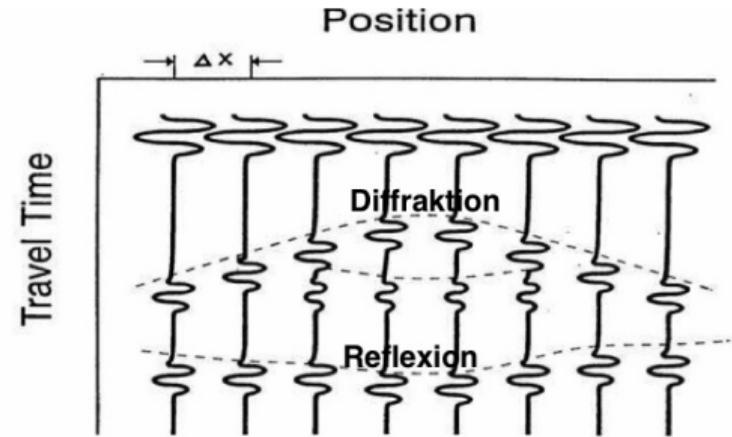
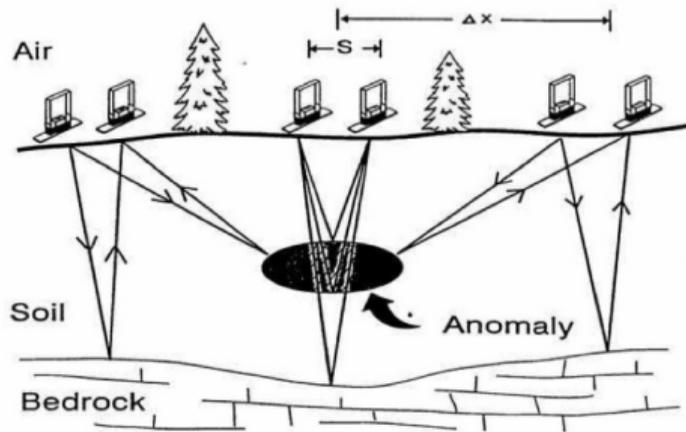
- Lokale Anomalien in ϵ_r und/oder σ erzeugen Streuung

Messung von gestreuten Signalen in monostatischer Anordnung (B-Scan)

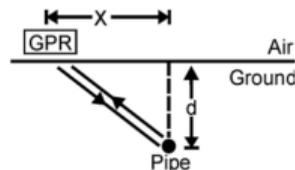
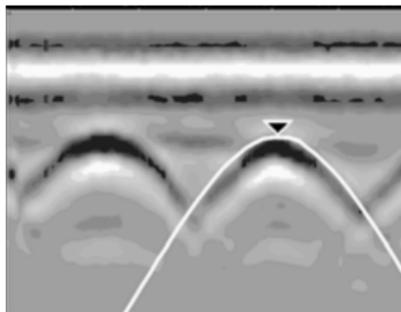
Movie



Messung von gestreuten Signalen in monostatischer Anordnung (B-Scan)



Abschätzung der Objektiefe bei monostatischer Anordnung



GPR Travel Time

$$T = \frac{2(x^2 + d^2)^{1/2}}{v}$$

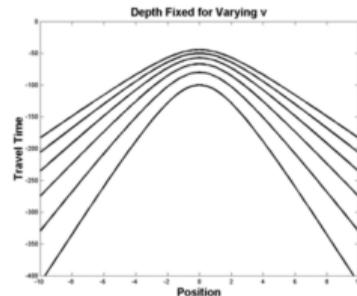
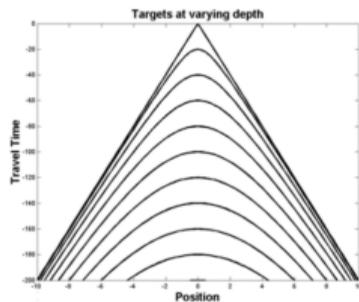
or

$$T = \left(\frac{4x^2}{v^2} + T_0^2 \right)^{1/2}$$

where

$$T_0 = \frac{2d}{v}$$

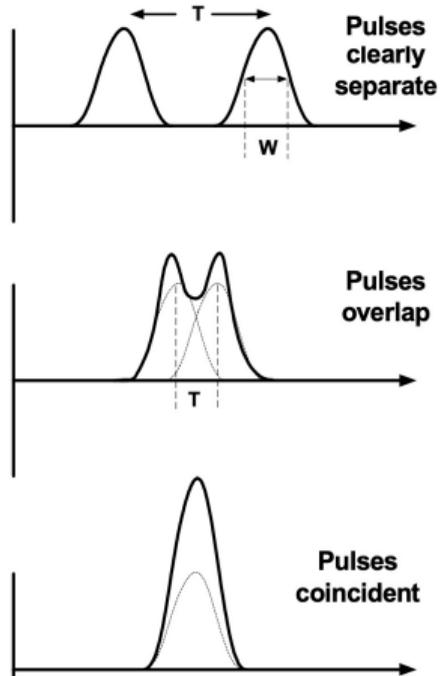
- Steigung im $T^2 - x^2$ -Diagramm beträgt $v^2/4$
- v entspricht der Durchschnittsgeschwindigkeit oberhalb des Objektes
- Abschätzung der Tiefe aus $d = \frac{T_0 v}{2}$



Agenda

1. Einführung
2. Lösung der Telegraphengleichung: Ausbreitungsgeschwindigkeit und Dämpfung
3. Wellenausbreitung
 - Reflexion
 - Streuung
4. Räumliche Auflösung
5. Beispiele
6. Zusammenfassung

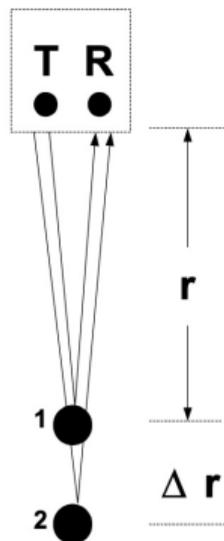
Auflösung bei GPR



- T : Laufzeitunterschied der Signale von zwei verschiedenen Objekten
- W : Pulsdauer des eingespeisten Signals
- Signale sind gut trennbar wenn $T \gg W$ (oben)
- Die Auflösungsgrenze liegt bei $T \approx \frac{W}{2}$ (Mitte)
- Signale sind nicht mehr trennbar wenn $T \leq \frac{W}{2}$ (unten)
- Kriterium für die räumliche Auflösung ist daher $T \geq \frac{W}{2}$

Vertikale und laterale räumliche Auflösung

Vertikal



$$t_1 = \frac{2r}{v}$$

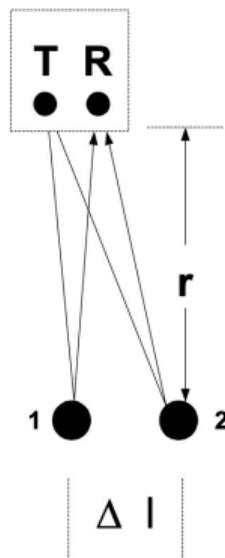
$$t_2 = t_1 + \frac{2\Delta r}{v}$$

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2\Delta r}{v} \geq \frac{W}{2}$$

$$\Delta r \geq \frac{Wv}{4} \propto W$$

Vertikale Auflösung
nimmt mit Pulslänge
ab.

Lateral



$$t_1 = \frac{2r}{v}$$

$$t_2 = \frac{2\sqrt{r^2 + (\Delta l)^2}}{v}$$

$$\Delta t = \frac{2\left[\sqrt{r^2 + (\Delta l)^2} - r\right]}{v}$$

$$\Delta t \approx \frac{(\Delta l)^2}{vr} \geq \frac{W}{2}$$

$$\Delta l \geq \sqrt{\frac{Wvr}{2}} \propto r$$

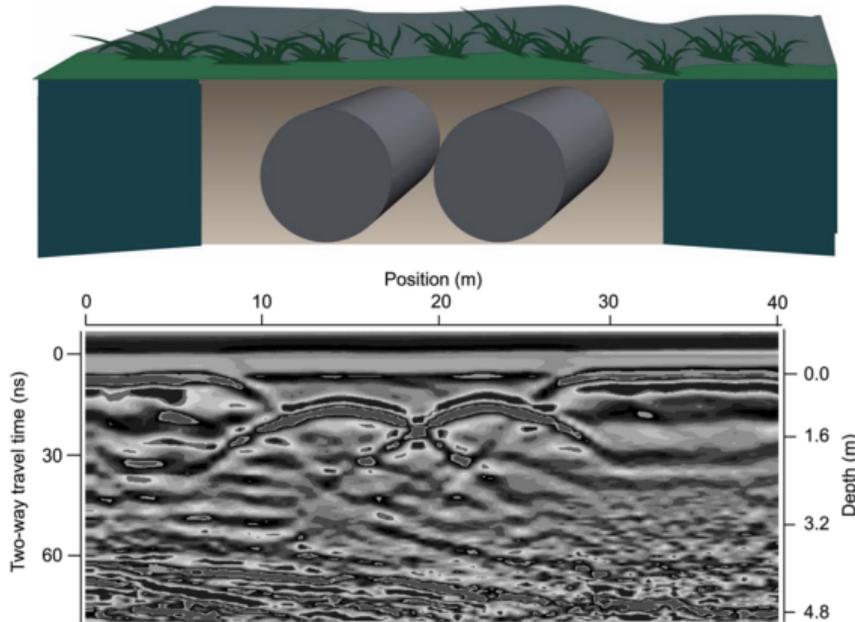
Laterale Auflösung
nimmt mit Tiefe ab.

[Annan, 2003]

Agenda

1. Einführung
2. Lösung der Telegraphengleichung: Ausbreitungsgeschwindigkeit und Dämpfung
3. Wellenausbreitung
 - Reflexion
 - Streuung
4. Räumliche Auflösung
5. Beispiele
6. Zusammenfassung

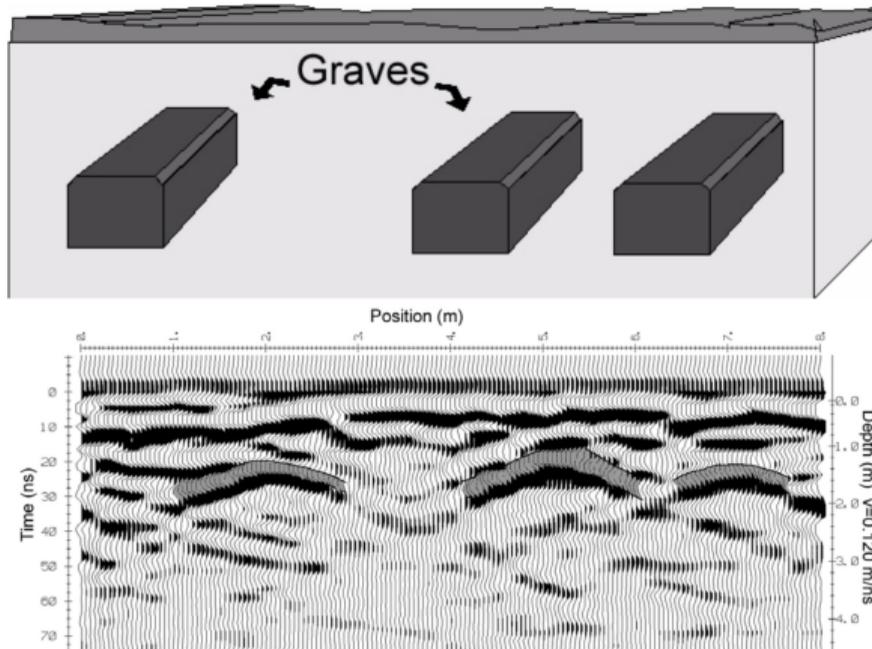
Detektion unterirdischer Tanks



Detektion von vergrabenen Tanks, die Chemikalien enthalten. pulseEKKO-System mit 200-MHz-Antennen.

[Annan, 2003]

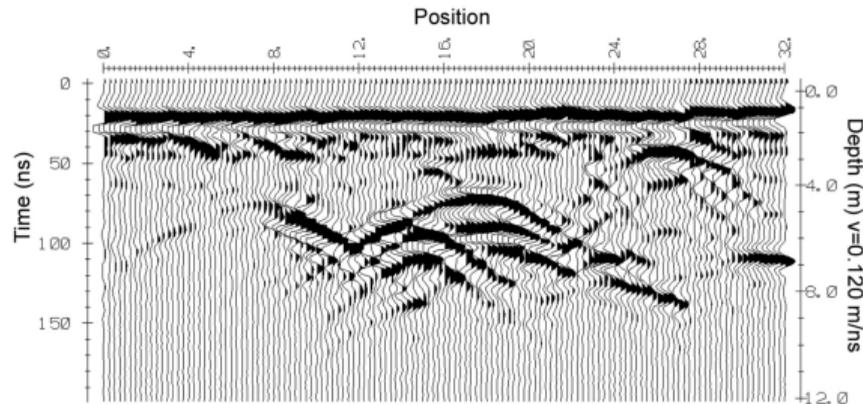
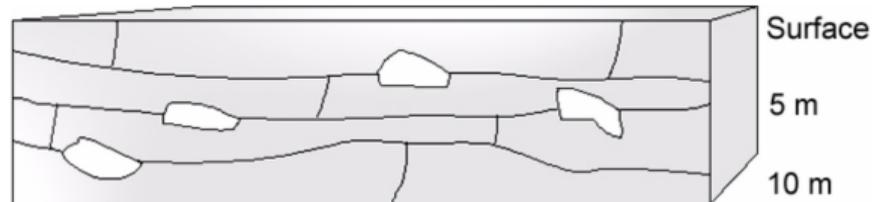
Grabsuche



Die Ortung von nicht gekennzeichneten Gräbern auf Friedhöfen ist eine ungewöhnliche, aber regelmäßige Anwendung des Bodenradars. Bodenradarsysteme (GPR) reagieren sowohl auf vergrabene Objekte als auch auf gestörten Boden. In diesem Fall wurde ein pulseEKKO GPR-System mit einer 200-MHz-Antenne verwendet.

[Annan, 2003]

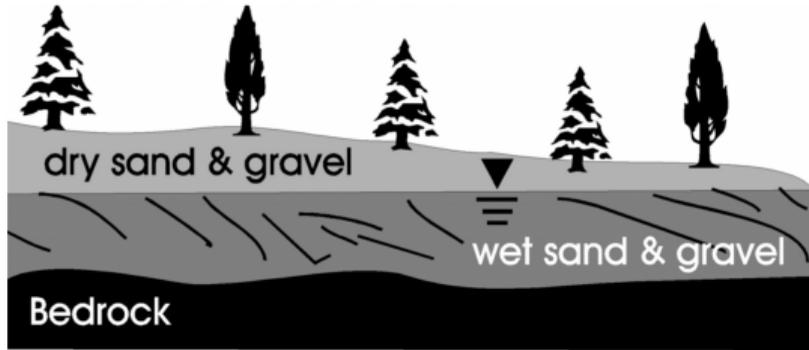
Hohlraumdetektion im Karst



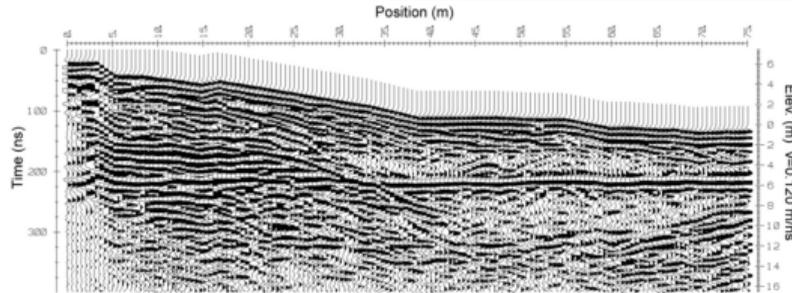
Detektion von 1-2 m großen Hohlräumen, die durch Auslaugung in einem Kalkgestein in Italien entstanden sind. 100 MHz-Antennen. Tiefeneindringung ca. 8m.

[Annan, 2003]

Kartierung des Grundwasserspiegels



Diese Untersuchung wurde in der Nähe des Lake Superior in Ontario, Kanada, durchgeführt, als eine Erweiterung einer Zellstoff- und Papierfabrik geplant wurde. Ein pulseEKKO GPR-System mit 100-MHz-Antennen wurde eingesetzt, um die Grundwasser-Verhältnisse und die Tiefe des Untergrunds genau zu kartieren.



100 MHz radar data mapping water table and bedrock in glacial sand and gravel deposits.

[Annan, 2003]

Monitoring von Kontaminationsfahnen

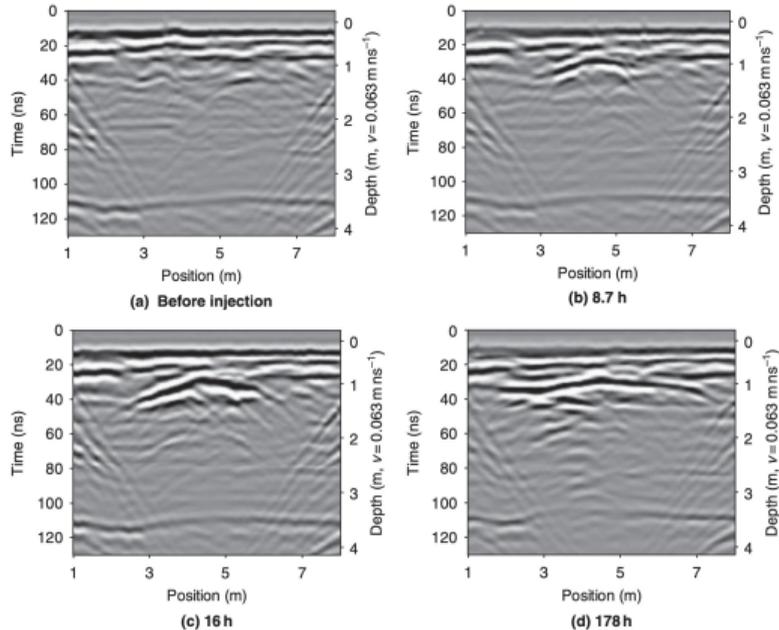
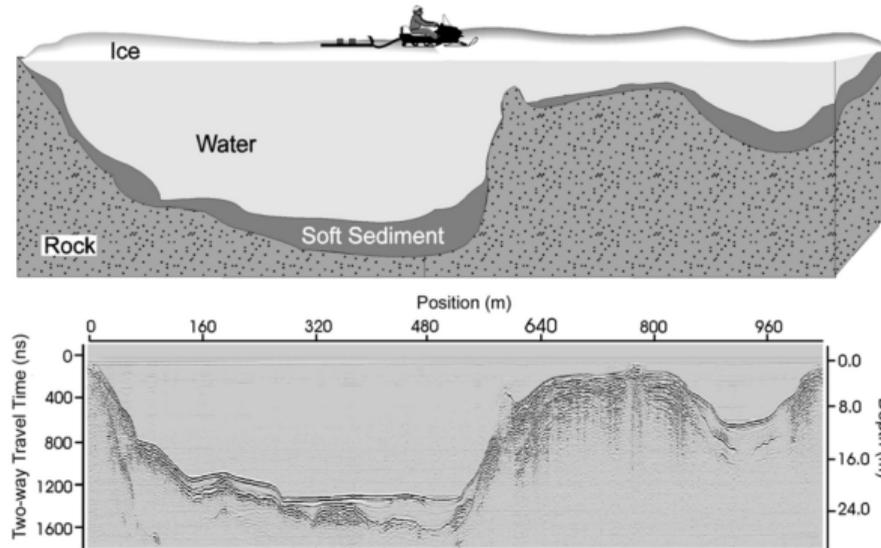


Figure 8.4 GPR sections acquired at 200 MHz, before the DNAPL injection (a), and at 8.7 h (b), at 16 h (c) and 178 h (d) after the start of the injection.

Injektion einer kontaminierten Flüssigkeit in einen wassergesättigten Boden. Die Ausbreitung der Kontamination lässt sich gut verfolgen. Durch die unterschiedliche chemische Zusammensetzung besteht ein Kontrast in der elektrischen Permittivität und der elektrischen Leitfähigkeit, die zu reflektierten/gestreuten Signalen führt.

[Annan, 2003]

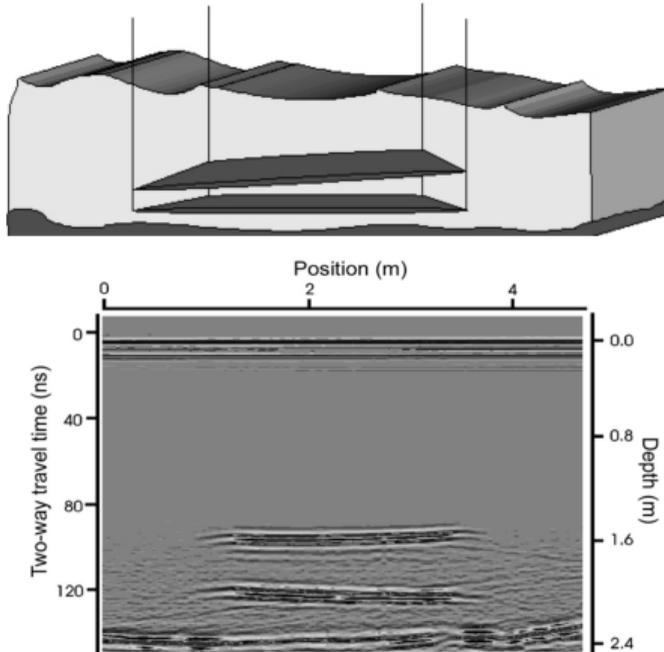
Kartierung mariner Sedimente



Kartierung der Wassertiefe und der Stratigraphie des Untergrunds in Süßwasserseen und Flüssen . Die Vermessungen werden in der Regel von Booten oder Flößen aus durchgeführt. Bei Eis mit einem Schlitten. Diese Studie wurde auf einem See in Nord-Saskatchewan durchgeführt. Das pulseEKKO GPR-System mit 50-MHz-Antennen war auf einem Schlitten montiert und wurde von einem Skidoo gezogen.

[Annan, 2003]

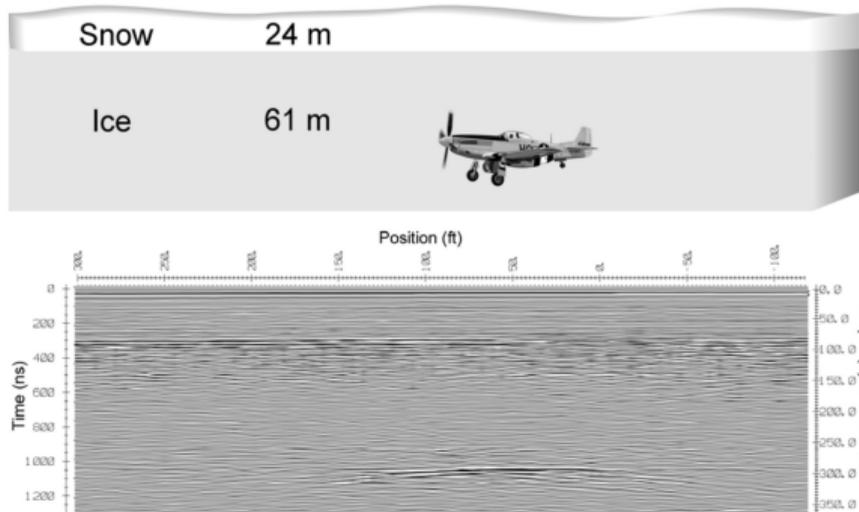
Flachwassererkundung



Detektion von Objekten Unterwasser. Das pulseEKKO 1000 GPR-System mit 450-MHz-Antennen wurde verwendet, um zwei kleine Platten zu orten, die 150 und 190 cm unter der Wasseroberfläche angebracht wurden. Die Platten wurden in verschiedenen Winkeln an einem Floß aufgehängt, und die Vermessung wurde auf dem Floß durchgeführt. Das GPR-System ortete die 6 mm dicken Platten erfolgreich und genau und lokalisierte auch den Flussgrund in der richtigen Tiefe.

[Annan, 2003]

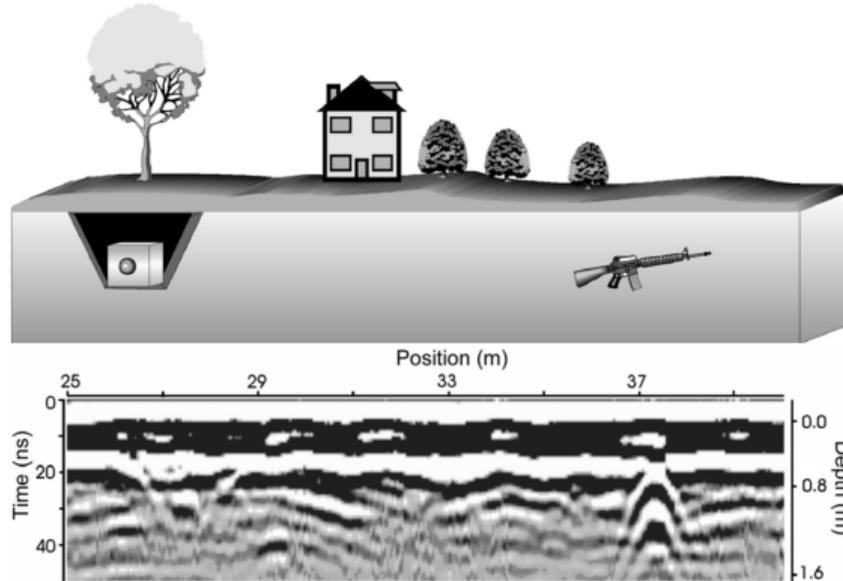
Verschollenes Geschwader



Das verlorene Geschwader des Zweiten Weltkriegs, bestehend aus sechs P-38F Lightning-Kampfbombern und 2 B-17E „Flying Fortresses“, wurde zuletzt im Juli 1942 auf dem grönländischen Eis gesehen. Im Mai 1992 konnte ein Ein-Mann-Team mit Hilfe eines Puls-EKKO-Systems den genauen Standort des Geschwaders kartieren. Im Anschluss an die GPR-Untersuchung wurde der Standort ausgegraben und u.a. ein fast vollständiges Flugzeug erfolgreich geborgen.

[Annan, 2003]

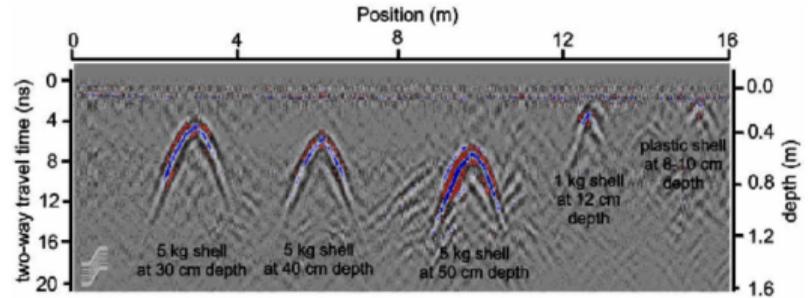
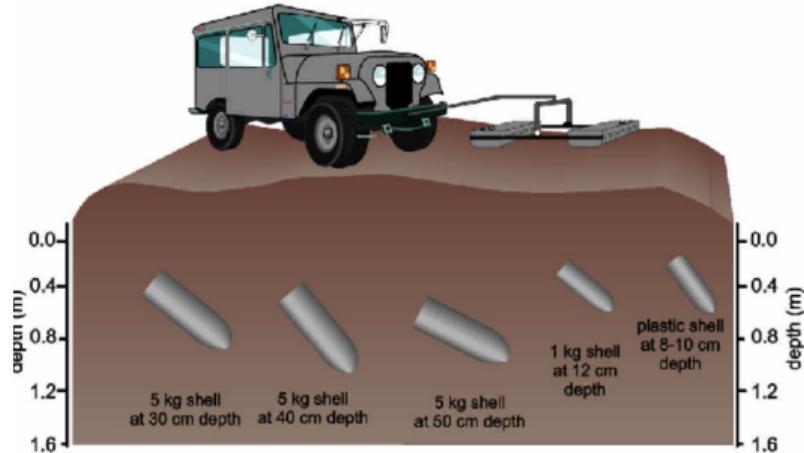
Forensische Untersuchungen



Das Bodenradar (Ground Penetrating Radar, GPR) wird von der Polizei häufig für forensische Untersuchungen eingesetzt. In diesem Fall hatte die Polizei einen Durchsuchungsbefehl und war auf der Suche nach Beweisen für eine verdeckte Ermittlungsaktion. Eine GPR-Untersuchung wurde eingesetzt, um Geld, Schusswaffen und Rauschgift zu finden, die auf einem Privatgrundstück vergraben sein sollten. Ein Mitarbeiter untersuchte den Vorder- und Hinterhof, die Garage sowie ein Waldstück hinter dem Grundstück mit einem pulseEKKO 100-System. Die Daten wurden in Echtzeit auf einem Computerbildschirm angezeigt, so dass die Polizeibesatzung die wichtigen Funde sofort ausgraben und als Beweismittel kennzeichnen konnte. (Forensik ist ein Sammelbegriff für wissenschaftliche und technische Arbeitsgebiete, in denen kriminelle Handlungen systematisch untersucht werden.)

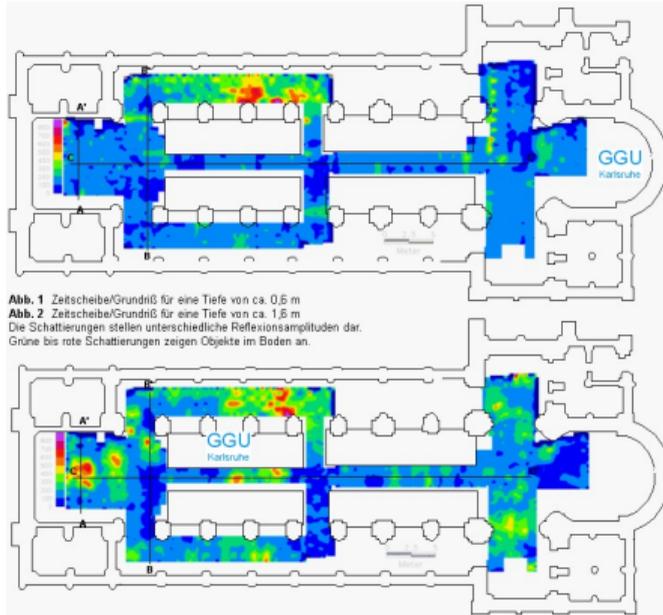
[Annan, 2003]

Kampfmitteldetektion



Data display of buried artillery shells.

”Schatzsuche” in einer Kirche



Gewölbeerkundung

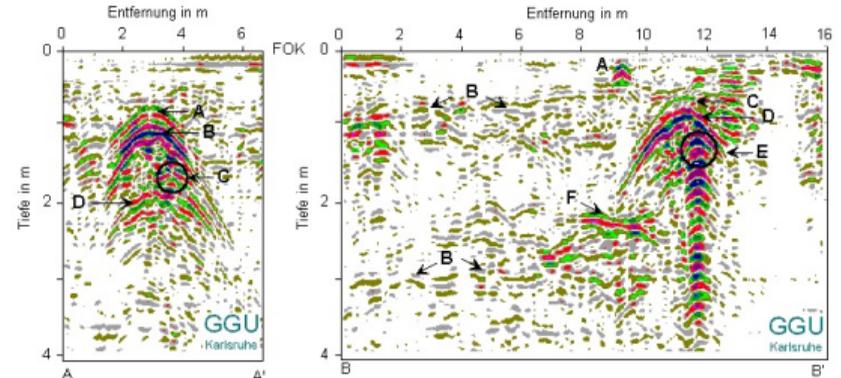


Abb. 3 Radargramm/Schnitt A - A'
 Interpretationen:
 A Gewölbeerkaute
 B Unterkante des Mauerwerks
 C Objekt im Hohlraum
 D Boden des Hohlraums

Abb. 4 Radargramm/Schnitt B - B'
 Interpretationen:
 A Leitung
 B Bodenschichten
 C Gewölbeerkaute
 D Unterkante des Mauerwerks
 E metallisches Objekt im Hohlraum
 F Schichtgrenze

Gewölbeerkaute und Objekte im Gewölbe

(Quelle: GGU Karlsruhe)

Agenda

1. Einführung
2. Lösung der Telegraphengleichung: Ausbreitungsgeschwindigkeit und Dämpfung
3. Wellenausbreitung
 - Reflexion
 - Streuung
4. Räumliche Auflösung
5. Beispiele
6. Zusammenfassung

Zusammenfassung Georadar

- Das Georadar ist ein hochauflösendes Wellenverfahren für die oberflächennahe Untersuchung von kleinräumigen Objekten und geologischen Strukturen.
- Es lassen sich
 - ① die elektrische Permittivität ϵ aus der Auswertung der Ausbreitungsgeschwindigkeiten sowie
 - ② die elektrische Leitfähigkeit σ aus der Auswertung der Dämpfung bestimmen.

Die Besonderheiten der Wellenausbreitung sind

- Es besteht eine hohe Auflösung und eine relativ geringe Einbringung
- Die Radargramme enthalten oft viele Diffraktionen von Objekten
- Lateralwellen an der Erdoberfläche bei jeder Reflexion.
- Die Verfahren der Reflexionsseismik können adaptiert werden.
- Die Anwendungen für die oberflächennahe Erkundung sind sehr vielfältig.



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

✉ Thomas.Bohlen@kit.edu

🔗 <http://www.gpi.kit.edu/>

Veröffentlicht unter  Lizenz.

Referenzen I

A. Annan. *Ground Penetrating Radar: Principles, Procedures & Applications*. Sensors & Software Incorporated, 2003. URL <https://geolportal.sdsu.edu/jiracek/sage/documents/Sensors%20and%20Software%20GPR%20Manual.pdf>.