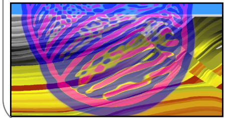
Karlsruher Institut für Technologie

# Einführung in die Geophysik I

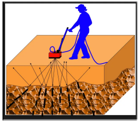
## Elektromagnetische Felder

T. Bohlen, Geophysikalisches Institut, Fakultät für Physik

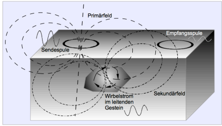
**Seismik**



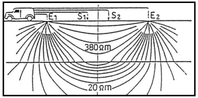
**Georadar**



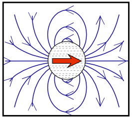
**Elektromagnetik**



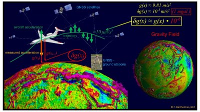

**Geoelektrik**




**Magnetik**



**Gravimetrie**



# Inhalte der Vorlesung

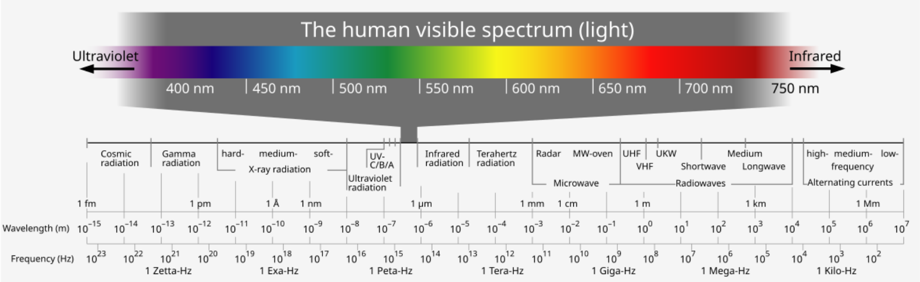
| Einführung in die Geophysik I, WS 2024/25 | | | |
|---|---|---|---|
| | Datum | Vorlesung (09:45-11:15h) Kl. HS B | Übungen (11:30-12:30h Kl. HS B oder 17:30-18:30h Physikhochhaus Raum 2/17) |
| 1 | 23.10.24 | Einführung, Wellenausbreitung | |
| 2 | 30.10.24 | Wellenausbreitung | |
| 3 | 06.11.24 | Refraktionsseismik | Ü1: 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 | Geoelektrik | |
| 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

# Agenda

1. Einführung
2. Das elektrische Feld
3. Das magnetische Feld
4. Maxwell-Gleichungen
5. Telegraphengleichung
6. Zusammenfassung

# Elektromagnetische Phänomene und Verfahren




Optik Georadar EM-Verfahren Geoelektrik Magnetik

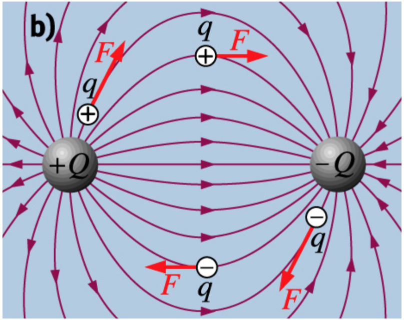
Physikalische Grundlage sind die Maxwellgleichungen und Materialgleichungen. Deren Lösungen sind stark frequenzabhängig.

# Agenda

1. Einführung
2. Das elektrische Feld
3. Das magnetische Feld
4. Maxwell-Gleichungen
5. Telegraphengleichung
6. Zusammenfassung

# Das elektrische Feld

- Das elektrische Feld beschreibt die auf eine Probeladung $q$ wirkende Coulomb-Kraft $\vec{F} = \vec{E}q$.




Das elektrische Feld eines Dipols und die Kraft auf eine Probeladung

Die resultierende Stromdichte (=Ladungsmenge pro Zeit pro Querschnitt) ist

$$\vec{J} = \vec{J}_C + \vec{J}_D$$

1. $\vec{J}_C$ : Leitungsstrom (conduction current)
2. $\vec{J}_D$ : Verschiebungsstrom (displacement current)

# Leitungsstrom $\vec{J}_C$

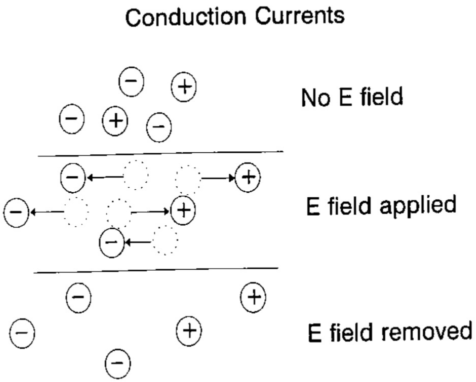



Illustration des Leitungstroms (Annan [2003])

- **Freie** Ladungen bewegen sich über größere Distanzen.
- Bei diesem Ladungstransport geht durch Reibung Energie verloren (Wärme)
- Ohmsches Gesetz für Kontinua:

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

- $\sigma$: spezifische elektrische Leitfähigkeit (Siemens/m)
- $\varrho = \sigma^{-1}$: spezifischer elektrischer Widerstand ($\Omega m$)

# Verschiebungsstrom $\vec{J}_D$

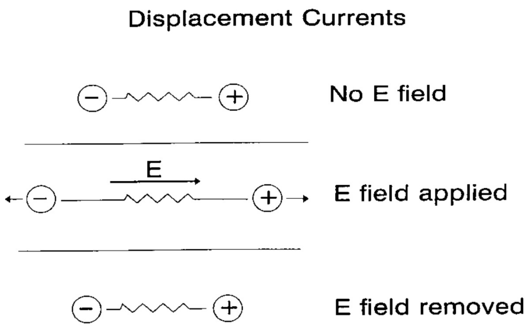
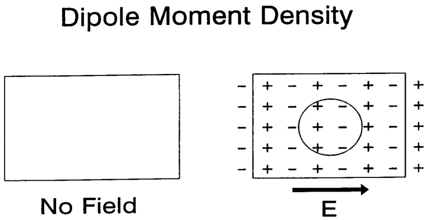



Illustration des Verschiebungsstromes (Annan [2003])

- **Gebundene** Ladungen schwingen bei zeitabhängigen E-Feld um einen Mittelpunkt.
- Mechanismen: Ladungstrennung an Oberflächen, Orientierung molekularer Dipole,...
- Energieverlust ist gering

# Verschiebungsstrom $\vec{J}_D$




$$\vec{D} = \text{Dipol Momenten Dichte}$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}$$

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

$$\epsilon = \text{elektrische Permittivität}$$

Im Vakuum gilt

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E}, \quad \epsilon_0 = 8.85418...10^{-12} N/m$$

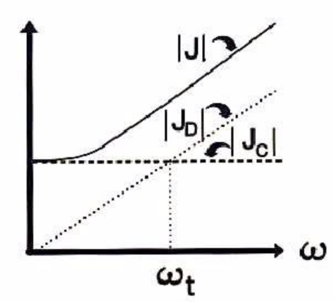
In einem Dielektrikum kommt es zu einer Verstärkung um den Faktor $\epsilon_r$:

$$\vec{D} = \epsilon_r \epsilon_0 \vec{E}$$

$\epsilon_r$ wird als relative elektrische Permittivität (relative Dielektrizitätszahl) bezeichnet.

Annan [2003]

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




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

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

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

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

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

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

# Elektrische Eigenschaften Geo-Materialien

| *Material* | $\varepsilon_r$ | $\sigma$ *(mS/m)* |
|---|---|---|
| Luft | 1 | 0 |
| Asphalt | 2-12 | 1-100 |
| Lehm | 4-40 | 2-1000 |
| Kohle | 4-25 | 10-100 |
| Zement | 4-20 | 1-100 |
| Granit | 4-7 | 0.01-5 |
| Eis | 3-4 | 0.01-1 |
| Kalk | 4-8 | 0.1-5 |
| Permafrost | 4-8 | 0.01-10 |
| Steinsalz | 5-7 | 0.01-1 |
| Sand (trocken) | 3-6 | 0.01-0.1 |

| *Material* | $\varepsilon_r$ | $\sigma$ *(mS/m)* |
|---|---|---|
| Sandstein | 2-10 | 0.01-10 |
| Silt | 5-30 | 1-100 |
| Schnee | 8-12 | 0.1-1000 |
| Distilliertes Wasser | 80 | 0.01 |
| Grundwasser | 80 | 0.1-5 |
| Meerwasser | 80 | 1000-4000 |

Veränderung mit

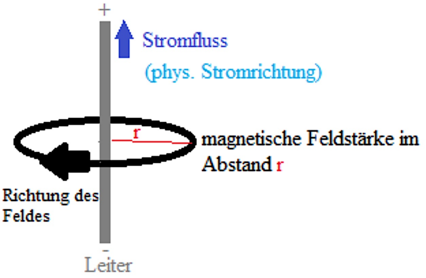
- Wassergehalt
- Porosität
- Metalle/Erze
- Tongehalt

# Agenda

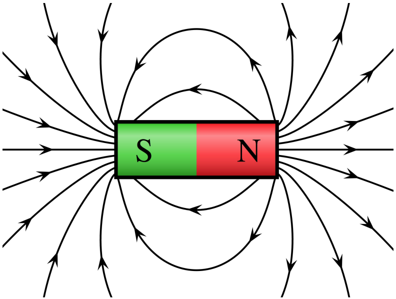
1. Einführung
2. Das elektrische Feld
3. Das magnetische Feld
4. Maxwell-Gleichungen
5. Telegraphengleichung
6. Zusammenfassung

# Das magnetische Feld $\vec{H}$

- Ein vom Strom durchflossener Leiter erzeugt im Abstand $r$ ein magnetisches Feld $|\vec{H}| = \frac{I}{2\pi r}$
- Die magnetische Feldstärke hat die Einheit Ampere/Meter (A/m).




Magnetfeld $H$ eines Leiters




Magnetfeld eines Stabmagneten

*(Wikipedia)*

# Die magnetische Flussdichte $\vec{B}$

Ein Material kann den Fluss (die Dichte der Feldlinien) des Erreger-Feldes $\vec{H}$ verändern. Die Feldlinien werden unterschiedlich gebündelt bzw. verdichtet.

$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$

Die magnetische Flussdichte $\vec{B}$ beschreibt die resultierende Dichte der Feldlinien pro Fläche. $\vec{B}$ kann daher als eigentliches Wirkungsfeld aufgefasst werden. Im Vakuum gilt

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H}, \quad \mu_0 = 4\pi 10^{-7} N/A^2 \quad \text{magn. Feldkonstante}$$

In Materialien kann es zu einer Verstärkung/Abschwächung von $\vec{B}$ um den Faktor $\mu_r$ kommen.

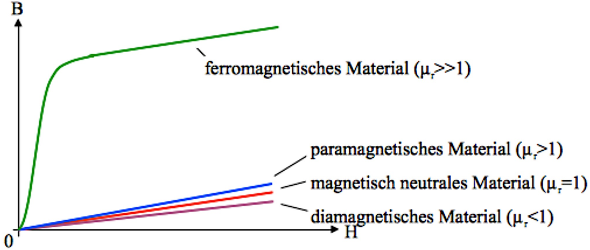
$$\vec{B} = \mu_r \mu_0 \vec{H}$$

$\mu_r$ ist ein Materialparameter und wird als relative Permeabillitätszahl bezeichnet.

# Relative Permeabillitätszahl $\mu_r$

1. $\mu_r < 1$: Diamagnetismus - Verdrängung des Magnetfeldes (z.B. Wasser)
2. $\mu_r \approx 1$: neutral - gilt für die meisten Gesteine
3. $\mu_r > 1$: Paramagnetismus - Verstärkung durch Ausrichtung magnetischer Momente (z.B. Luft)
4. $\mu_r >> 1$: Ferromagnetismus - Starke parallele Ausrichtung zahlreicher magnetischer Momente und Bildung von "Weißscher Bezirke" (z.B. Eisen, Ferrit).

$$\vec{B} = \mu_r \mu_0 \vec{H}$$




*(Wikipedia)*

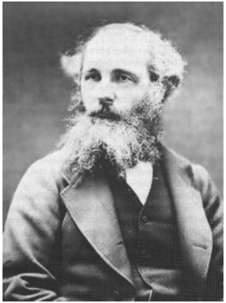
# Agenda

1. Einführung
2. Das elektrische Feld
3. Das magnetische Feld
4. Maxwell-Gleichungen
5. Telegraphengleichung
6. Zusammenfassung

# Die Maxwell-Gleichungen

- Um 1860 erstellte der schottische Physiker eine mathematisch knappe Zusammenfassung des
  1. Faraday'schen Gesetzes
  2. Ampére'schen Gesetzes
  3. Gauss'schen Gesetzes für $\vec{E}$ bzw. $\vec{D}$
  4. Gauss'schen Gesetzes für $\vec{H}$, bzw. $\vec{B}$

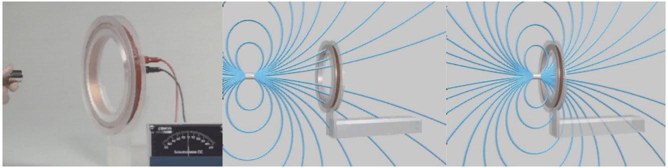
  $\rightarrow$ Maxwell-Gleichungen
- Sie besitzen in der klassischen Elektrodynamik eine ähnliche Bedeutung wie die Newton'schen Axiome in der klassischen Mechanik
- Sie bilden zusammen mit den Materialgleichungen die Grundlage für die geophysikalischen Verfahren: Geolekektrik, Magnetik, EM, Georadar



James Clerk Maxwell 1831-1879

# 1. Maxwellgleichung

- Induktionsgesetz nach Faraday



- Beobachtung: Eine Veränderung von $\vec{B}(\vec{r}, t)$ induziert eine Spannung
- Erklärung: Eine Veränderung von $\vec{B}(\vec{r}, t)$ erzeugt eine Veränderung von $\vec{E}(\vec{r}, t)$, dies erzeugt eine Ladungsbewegung und dies induziert einen Spannungsabfall

Michael Faraday 1770-1845

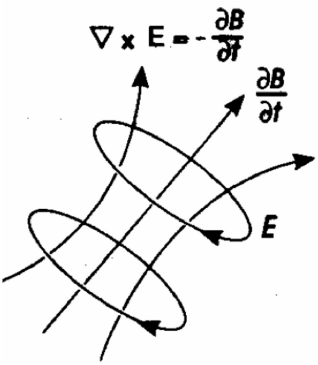
# 1. Maxwellgleichung

- Mathematische Formulierung des Induktionsgesetzes nach Maxwell

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

- Ein zeitlich variabler magnetischer Fluss verursacht ein senkrecht dazu stehendes elektrisches Feld.
- Anwendung: Generator (rotierender Magnet erzeugt Strom)

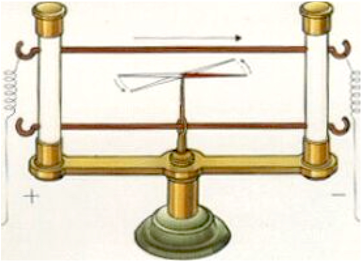
$\vec{E}$: elektrisches Feld ($V/m$), $\vec{B}$: magnetische Fluss ($T$)




1. Maxwellgleichung: Induktionsgesetz

# 2. Maxwellgleichung

- Experiment




- Beobachtung: Strom in elektrischem Leiter verursacht Ablenkung einer Kompass-Nadel
- Erklärung: Eine Magnetfeld entsteht durch bewegte Ladungen (Ströme)

Hans Christian Oersted & André Marie Ampére

1820

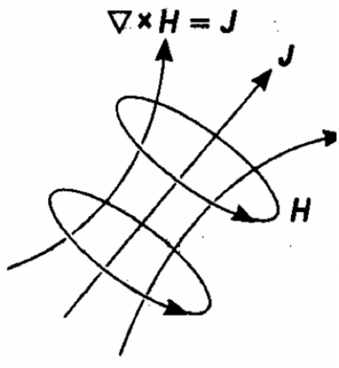
# 2. Maxwellgleichung

- Mathematische Formulierung des Ampére'schen Gesetzes nach Maxwell

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J}_C + \vec{J}_D$$

- Verschiebungs- und Leitungsströme induzieren ein senkrecht auf dem Stromfluss stehendes magnetisches Feld.
- Anwendung: Elektromagnet (stromduchflossene Spule mit EIsenkern)

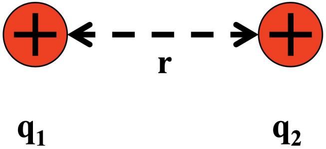
$\vec{H}$: Magnetfeld (A/m), $\vec{D}$: dielektrische Verschiebung ($C/m^2$), $\vec{j}$: Stromleitungsdichte ($A/m^2$)




2. Maxwellgleichung: Ampére'sches Gesetz

# 3. Maxwellgleichung

- 1785 Experimente zur Messung der Kraft durch geladene Kugeln




- Beobachtung

$$|\vec{F}| = \pm K_e \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

- inverses quadratisches Gesetz

Charles Augustin de Coulomb 1736-1806

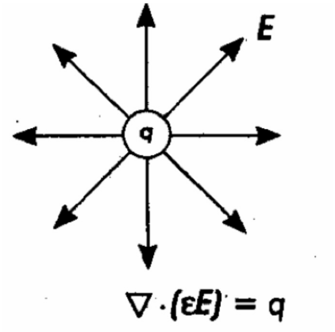
# 3. Maxwellgleichung

- Mathematische Formulierung des Coloumb'schen Gesetzes nach Maxwell als Gauss'sches Gesetz für das elektrische Feld

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{q}{\epsilon}$$

- Das elektrische Feld muss geschlossene Feldlinien bilden oder an der Ladung enden.

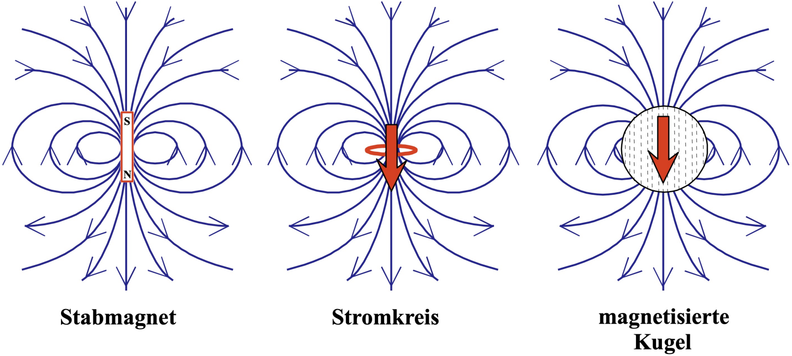
$\vec{E}$: elektrisches Feld $(V/m$, $\vec{q}$: Ladungsdichte $(C/m^3))$




3. Maxwellgleichung: Gauss'sches Gesetz für $\vec{E}$

# 4. Maxwellgleichung

- Beobachtung




- Die Magnetfeldlinien sind immer in in sich geschlossen

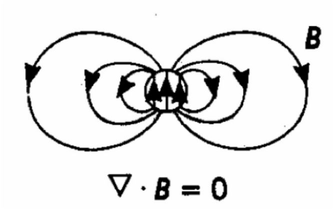
# 4. Maxwellgleichung

- Mathematische Formulierung des Gauss'schen Gesetzes für das Magnetfeld nach Maxwell

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

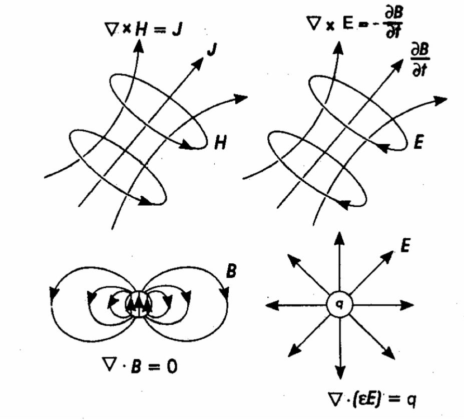
- Es gibt weder Quellen noch Senken für das magn. Feld, d.h. keine isolierten magn. Ladungen oder Monopole

$\vec{B}$: magnetische Fluss ($T$)




4. Maxwellgleichung: Gauss'sches Gesetz für $\vec{B}$

# Die Maxwell-Gleichungen




Veranschaulichung der Maxwell-Gleichungen

1. Induktionsgesetz

$$\boxed{\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}}$$

2. Duchflutungsgesetz

$$\boxed{\vec{\nabla} \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J}_C}$$

3. Coulomb'sches Gesetz

$$\boxed{\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{q}{\epsilon}}$$

4. Gauss'sches Gesetz

$$\boxed{\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0}$$

# Materialgleichungen

Die Materialgleichungen beschreiben die Veränderung der Felder in Materialien.

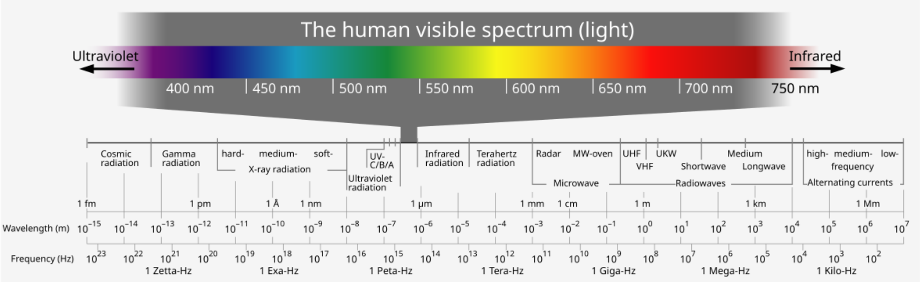
1. Elektrische Permittivität in einem Dielektrikum: $\vec{D} = \epsilon_r \epsilon_0 \vec{E}$
2. Magnetische Permeabilität: $\vec{B} = \mu_r \mu_0 \vec{H}$
3. Stromleitung: $\vec{J} = \vec{J}_C + \vec{J}_D = \sigma \vec{E} + \epsilon_r \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$

Die (geophysikalisch) relevanten Materialparameter sind

1. $\epsilon_r$: relative dielektrische Permittivität ($Vs/Am$)
2. $\mu_r$: relative magnetische Permeabilität ($Vs/Am$)
3. $\sigma$: elektrische Leitfähgkeit ($S/m$)

# Agenda

# Elektromagnetische Phänomene und Verfahren



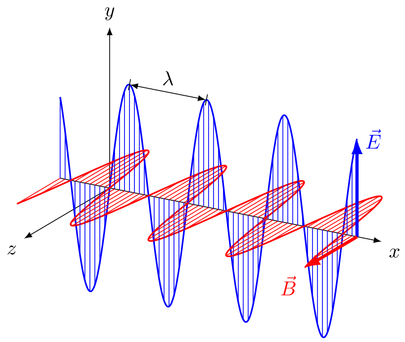

Optik | Georadar | EM-Verfahren | Geoelektrik Magnetik

Über die Telegraphengleichung kann man die Frequenzabhängigkeit der Lösungen gut beschreiben.

# Telegraphengleichung

Die Telegraphengleichung entsteht aus einer Kombination der 1. und 2. Maxwellgleichung. Wir leiten die Telegraphengleichung nur für bestimmte Komponenten her. Dafür betrachten wir eine ebene elektromagnetische Welle:

$$E_y(x) = E_0 \exp(i\omega(t - x/c))$$
$$H_z(x) = H_0 \exp(i\omega(t - x/c))$$




Ebene EM-Welle (Wikipedia)

# Telegraphengleichung

Karlsruher Institut für Technologie

Für diesen Fall der ebenen Welle vereinfacht sich die erste Maxwellgleichung

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

zu

$$\vec{\nabla} \times \vec{E}|_z = -\frac{\partial E_y}{\partial x} = -\frac{\partial B_z}{\partial t} = -\mu \frac{\partial H_z}{\partial t}$$

Wir differenzieren nochmal nach $x \quad \rightarrow \frac{\partial}{\partial x}$

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} = \mu \frac{\partial^2 H_z}{\partial x \partial t} \tag{1}$$

# Telegraphengleichung

Ebenso vereinfacht sich die zweite Maxwellgleichung

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \vec{J_C}$$

zu

$$\vec{\nabla} \times \vec{H}|_y = \frac{\partial H_z}{\partial x} = \epsilon \frac{\partial E_y}{\partial t} + J_{C_y} = \epsilon \frac{\partial E_y}{\partial t} + \sigma E_y$$

Wir differenzieren nochmal nach $t \quad \rightarrow \frac{\partial}{\partial t}$

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial x \partial t} = \epsilon \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2} + \sigma \frac{E_y}{\partial t} \tag{2}$$

# Telegraphengleichung

Wir setzen nun Gl. 2 in Gl. 1 ein:

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

Damit ergibt sich die Telegraphengleichung für $E_y$:

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

# Lösung Telegraphengleichung: Optik/Georadar

1 **Optik, Georadar (bei kleinem $\sigma$)**

$$\mu\sigma\frac{E_y}{\partial t} \lll \mu\epsilon\frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2}$$

Dies ist bei hohen Frequenzen $> 10^6 Hz$ und sehr kleinem $\sigma$ der Fall. Dann gilt die Wellengleichung

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

Diese beschreibt eine <u>ungedämpfte EM-Welle</u> mit der Geschwindigkeit

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\mu_r\epsilon_0\epsilon_r}} = \frac{c_0}{\sqrt{\mu_r\epsilon_r}} \approx \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad \mu_r \approx 1$$

mit der Lichtgeschwindigkeit $c_0 = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\epsilon_0}}$.

# Lösung Telegraphengleichung: Georadar

Karlsruher Institut für Technologie

2 **Georadar (bei großem $\sigma$)**

$$\mu\sigma\frac{E_y}{\partial t} \approx \mu\epsilon\frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2}$$

Dies is bei Frequenzen $10^6 Hz - 10^9 Hz$ und signifikanter Leitfähigkeit der Fall. Dann sind alle Terme in der Telegraphengleichung wirksam

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

Diese beschreibt eine gedämpfte EM-Welle mit dem Dämpfungsterm $\mu\sigma\frac{E_y}{\partial t}$. Die Dämpfung wird also durch $\sigma$ (Leitungsstrom) verursacht.

# Lösung Telegraphengleichung: Elektromagnetik

Karlsruher Institut für Technologie

## 3 Diffusive EM-Verfahren

$$\mu\sigma\frac{E_y}{\partial t} \ggg \mu\epsilon\frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2}$$

Dies ist bei sehr geringen Frequenzen $10^2 - 10^6 Hz$ der Fall. Dann lautet die Grundgleichung

$$\boxed{\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} = \mu\sigma\frac{E_y}{\partial t}}$$

Der Leitungsstrom dominiert. Keine Wellenausbreitung. Das elektrische Feld diffundiert durch die Erde. Verfahren heißt ”Induktive oder diffusive Elektromagnetik” .

# Lösung Telegraphengleichung: Geoelektrik/Magnetik

Im Fall $\omega = 0$ verlieren die Felder $\vec{E}$ und $\vec{H}$ ihre Zeitabängigkeit. Dann verschwinden die EM-Wechselwirkungen, die durch die 1. und 2. Maxwellgleichung beschrieben werden.

4 **Geoelektrik ($\omega = 0$)**

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{q}{\epsilon} \quad \text{(3. Maxwell)}$$

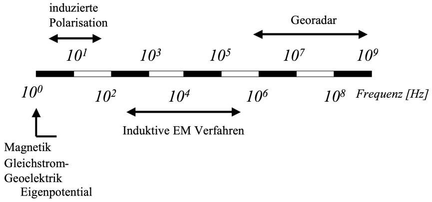
$$\vec{J}_C = \sigma \vec{E} \quad \text{(Materialgleichung Ohmsches Gesetz)}$$

5 **Magnetik ($\omega = 0$)**

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad \text{(4. Maxwell)}$$

$$\vec{B} = \mu_r \mu_0 \vec{H} \quad \text{(Materialgleichung Induktion)}$$

# Spektrum geophysikalischer EM-Verfahren




*[Maurer, 2024]*

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

# Agenda

1. Einführung
2. Das elektrische Feld
3. Das magnetische Feld
4. Maxwell-Gleichungen
5. Telegraphengleichung
6. Zusammenfassung

# Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

- Grundlage der Verfahren Georadar und Elektromagnetik sind die Maxwellgleichungen mit den Materialgleichungen.
- Beim **Georadar** breiten sich im Frequenzbereich MHz-GHz gedämpfte elektromagnetische Wellen aus. Es lässt sich
  1. die elektrische Permittivität $\epsilon$ aus der Auswertung der Ausbreitungsgeschwindigkeiten
  2. die elektrische Leitfähigkeitähigkeit $\sigma$ aus der Auswertung der Dämpfung bestimmen.
- In der **Elektromagnetik** diffundiert das EM-Feld bei Frequenzen kHz-MHz. Es lässt sich aus dem Abklingen der Felder die Leitfähigkeitähigkeit $\sigma$ quantifizieren.
- In der **Geoelektrik** ist das E-Feld stationär. Es tritt nur Leitungsstrom $\vec{J}_C$ auf. Es lässt sich die Leitfähigkeitähigkeit $\sigma$ quantifizieren.
- In der **Magnetik** ist das B-Feld stationär. Es tritt Induktion auf. Es lässt sich die magnetische Permeabilität $\mu$ quantifizieren.

Karlsruher Institut für Technologie

# Vielen Dank für
# Ihre Aufmerksamkeit

Thomas.Bohlen@kit.edu

http://www.gpi.kit.edu/

# 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`.

H. Maurer. Elektromagnetische Verfahren in der Ingeniuergeophysik. Einführung, Geoelektrik und diffusive Verfahren. *Vorlesungsskript ETH Zürich*, 2024.