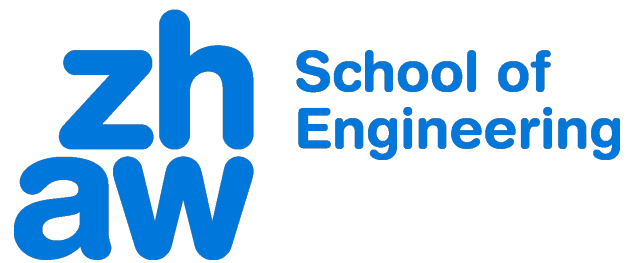


ZHAW Zurich University of Applied Sciences
Winterthur



Zusammenfassung PHY3FW

Studienwochen 1-14

Written by: Severin Sprenger
(w/ inputs from lienhyan)
June 17, 2026
Zf. PHY3FW SW 1-14

1 Gravitationsfeld

$$\vec{E}_G = \frac{\vec{F}_G}{m}$$

$$\vec{F}_G = -G \cdot \frac{M \cdot m}{r^2} \cdot \vec{e}_r$$

$$G = 6.67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{s}^2}$$

$$V^G(r) = -G \cdot \frac{M \cdot m}{r}$$

$$W_{12}^G = -(V_2^G - V_1^G)$$

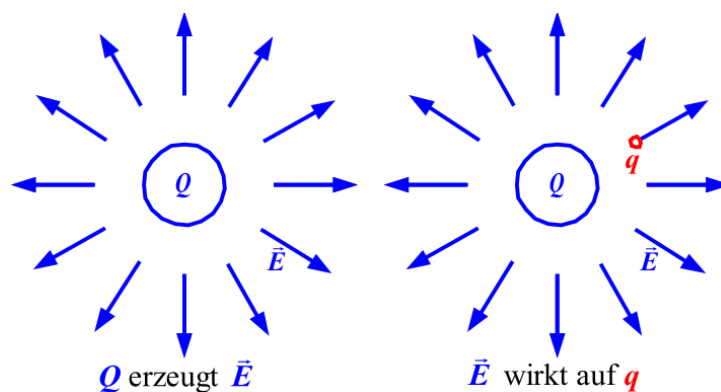
2 Elektrische Felder

$$\vec{F}_{el} = k \cdot \frac{Q \cdot q}{r^2} \cdot \vec{e}_r$$

$$\vec{E}_{el} = \frac{\vec{F}_{el}}{q} = k \cdot \frac{Q}{r^2} \cdot \vec{e}_r$$

$$k = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \approx 8.99 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$$

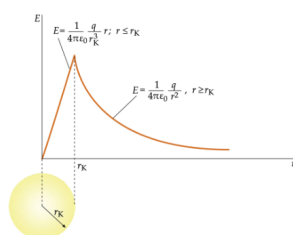
$$\varepsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{C}^2}{\text{N} \cdot \text{m}^2}$$



nicht leitende Kugel:

$$E(r) = \frac{Q_{\text{Kugel}}}{4\pi\varepsilon_0 r^3}, \quad (r_K \geq r)$$

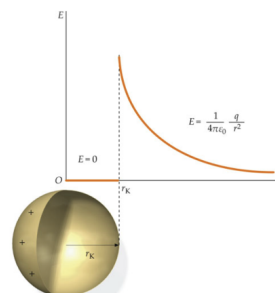
$$E(r) = \frac{Q_{\text{Kugel}}}{4\pi\varepsilon_0 r^2}, \quad (r_K \leq r)$$



Kugelschale:

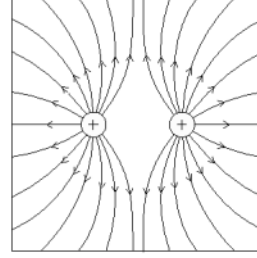
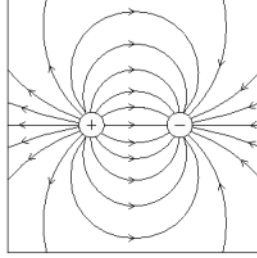
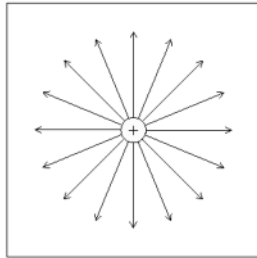
$$E(r) = 0, \quad (r_K \geq r)$$

$$E(r) = \frac{Q_{\text{Kugel}}}{4\pi\varepsilon_0 r^2}, \quad (r_K \leq r)$$



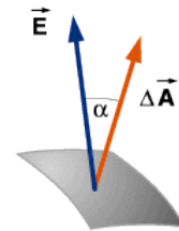
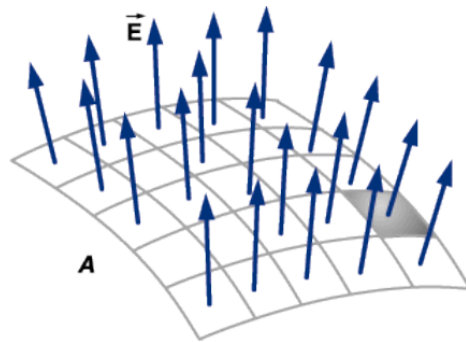
2.1 Ladungsverteilungen

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^N \vec{E}_i(\vec{r}) = k \cdot \sum_{i=1}^N Q_i \cdot \frac{\vec{e}_{r_i}}{|\vec{r} - \vec{r}_i|^2}$$



2.2 Quellen(stärke)

$$I_Q = \oint \vec{v} \cdot d\vec{A} \implies \frac{Q}{\varepsilon_0} = \oint_A \vec{E} \cdot d\vec{A}$$



2.3 Potenzielle Energie / Arbeit

$$V(R) = - \int_{\infty}^R \vec{F} \cdot d\vec{r}$$

$$V(r) = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \frac{Q \cdot q}{r}$$

$$dV = -q \cdot \vec{E} \cdot d\vec{r}$$

$$V_2 - V_1 = - \int_{r_1}^{r_2} q \cdot \vec{E} \cdot d\vec{r}$$

$$dW = -dV$$

$$W = V_1 - V_2 = \int_{r_1}^{r_2} q \cdot \vec{E} \cdot d\vec{r}$$

2.4 Potenzial

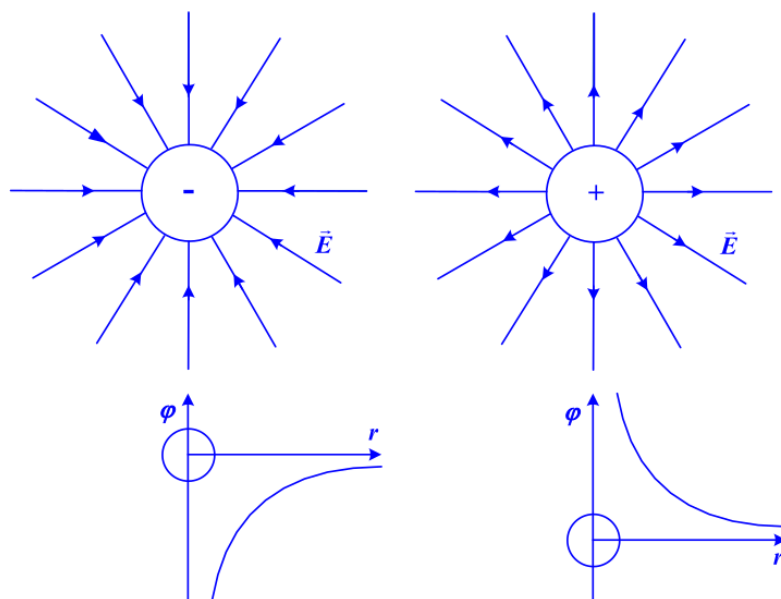
$$\varphi(R) = - \int_{\infty}^{\vec{R}} \vec{E} \cdot d\vec{r}$$

$$\varphi(r) = k \cdot \frac{Q}{r}$$

$$d\varphi = -\vec{E} \cdot d\vec{r}$$

$$\varphi(R) = - \int_{BZ}^{\vec{R}} \vec{E} \cdot d\vec{r}$$

$$V(r) = r \cdot \varphi(r)$$



2.5 Spannung

$$U_{12} = \int_{r_1}^{r_2} \vec{E} \cdot d\vec{r}$$

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$$

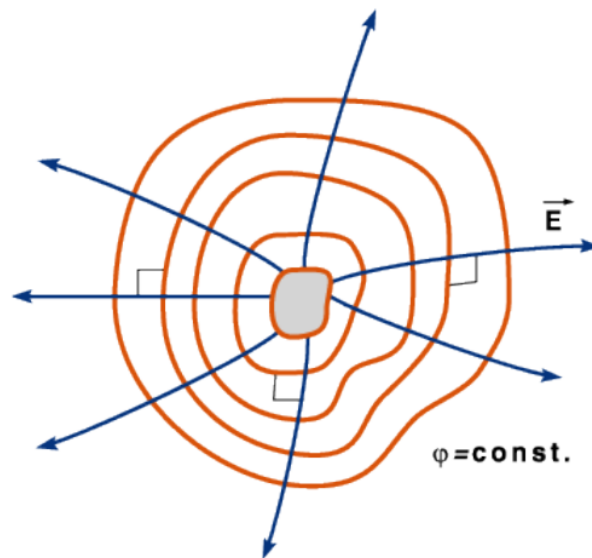
$$W_{12} = q \cdot U_{12}$$

$$1.602 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 1 \text{ eV}$$

2.6 Äquipotenzialflächen/-linien

Mit Äquipotenzialflächen/-linien werden die Flächen/Linien bezeichnet an denen auf allen Stellen das gleiche Potenzial existiert. Diese Flächen/Linien stehen rechtwinklig auf den Feldlinien, durch welches das Potenzial hervorgerufen wird.

$$\begin{aligned}\vec{E} &= -\frac{\partial \varphi}{\partial x} \cdot \vec{e}_x - \frac{\partial \varphi}{\partial y} \cdot \vec{e}_y - \frac{\partial \varphi}{\partial z} \cdot \vec{e}_z \\ \vec{E} &= -\frac{\partial}{\partial \vec{r}} \cdot \varphi \\ d\varphi &= -\vec{E} \cdot d\vec{r} \\ d\varphi = 0 &\implies \text{Äquipotenzialfläche/-linie}\end{aligned}$$



2.7 Spitzeneffekt

Mit dem Konzept der Äquipotenzialfläche/-linie wird ebenfalls ersichtlich das zwei Körper unterschiedlicher Grössen mit dem gleichen Potenzial an Oberfläche über unterschiedlich Starke E-Felder verfügen müssen.

Am Beispiel zweier Kugeln mit gleichem Potenzial, können die beiden Kugeln und deren Ladung als Punktladungen in deren Zentrum modelliert werden. Es kann dann das E-Feld an der Oberfläche der beiden Körper berechnet und verglichen werden.

$$\begin{aligned}d\varphi &= 0 \\ \vec{E}_1 &= -\frac{\varphi}{r_1} \\ \vec{E}_2 &= -\frac{\varphi}{r_2} \\ \vec{E}_1 &= \vec{E}_2 \cdot \frac{r_2}{r_1}\end{aligned}$$

2.8 Energiedichte im E-Feld (Gespeicherte Energie)

$$\begin{aligned}w_{el} &= \frac{\varepsilon_0 \cdot E^2}{2} \\ W &= \frac{\varepsilon_0 \cdot E^2}{2} \cdot V\end{aligned}$$

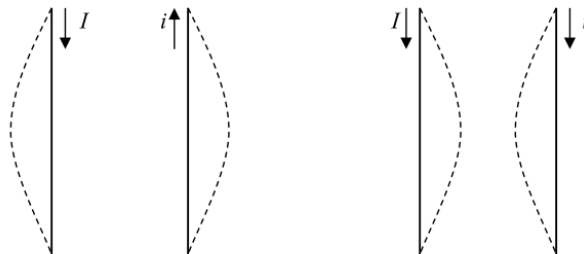
2.9 Übersicht der Grössen

	Gesamtgrösse		Zugeh. elektr. Grösse	
Elektrostatik	Kraft $\vec{F} = q\vec{E}$	$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qQ}{r^2} \vec{e}_r$	Elektrisches Feld, Kugel	$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} \vec{e}_r$
	Potenzielle Energie $V = q\phi$	$V(\vec{r}') = - \int_{BZ}^{\vec{r}'} q\vec{E} \cdot d\vec{r}$	Potenzial, allgemein	$\phi(\vec{r}') = - \int_{BZ}^{\vec{r}'} \vec{E} \cdot d\vec{r}$
	Potenzielle Energie 2 Kugelladungen	$V(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qQ}{r}$	Potenzial, Kugel	$\phi(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r}$
Gravitation	$\vec{F} = m\vec{g}$	$\vec{F} = -G \frac{mM}{r^2} \vec{e}_r$	Gravitationsfeld, Kugel	$\vec{g} = -G \frac{M}{r^2} \vec{e}_r$
	Potenzielle Energie $V = m\phi$	$V(\vec{r}') = - \int_{BZ}^{\vec{r}'} m\vec{g} \cdot d\vec{r}$	Potenzial, allgemein	$\phi(\vec{r}') = - \int_{BZ}^{\vec{r}'} \vec{g} \cdot d\vec{r}$
	Potenzielle Energie 2 Kugelmassen	$V(r) = -G \frac{mM}{r}$	Potenzial, Kugel	$\phi(r) = -G \frac{M}{r}$

3 Magnetfeld

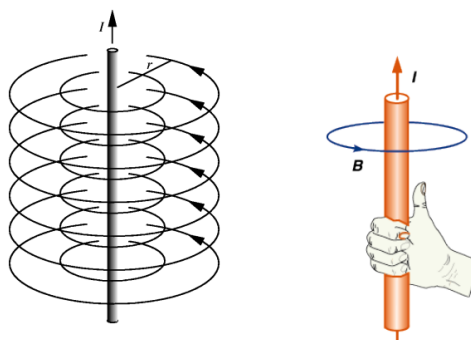
$$F = \mu_0 \cdot \frac{I \cdot i}{2 \cdot \pi \cdot r} \cdot l$$

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A} \cdot \text{m}}$$



$$B = \frac{F}{i \cdot l}$$

$$B(r) = \mu_0 \cdot \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot r}$$



3.1 Magnetfeld im Leiter

Bei einem realen Leiter (mit finitem radius) besteht auch ein Magnetfeld im Leiter selbst. Diese Tatsache führt zu einer Zunahme des Magnetfeldes im Leiter und einer erneuten Abnahme ausserhalb des Leiters.

$$B(r \leq R) = \mu_0 \cdot I \cdot \frac{r}{2 \cdot \pi \cdot R^2}$$

3.2 Durchflutungsgesetz

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{r} = \mu_0 \cdot I$$

3.3 Zylinderspule

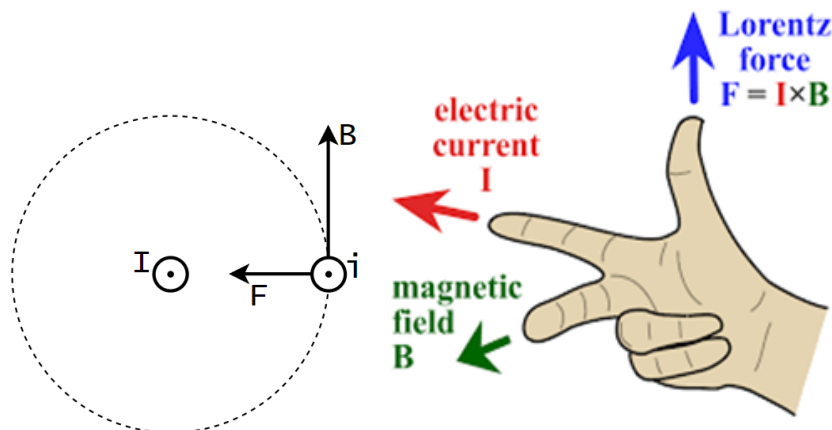
$$B = \mu_0 \cdot \frac{N \cdot I}{l}$$

3.4 Lorentzkraft

$$\vec{F}_L = q \cdot (\vec{v} \times \vec{B})$$

$$F_L = q \cdot v \cdot B \cdot \sin(\alpha)$$

$q \rightarrow$ Bewegte Ladung, $\vec{v} \rightarrow$ Geschwindigkeit der Ladung, $\alpha \rightarrow$ Winkel zwischen $\vec{v}$ und $\vec{B}$



$$\vec{F}_L = I \cdot (\vec{l} \times \vec{B})$$

$$F_L = I \cdot l \cdot B \cdot \sin(\alpha)$$

4 Quellen- und Wirbelfelder

4.1 Quellendichte

$$I_v = \oint_A \vec{v} \cdot d\vec{A}$$

$I_v \rightarrow$ Volumenstrom

$$\rho_{I_v} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta I_v}{\Delta V}$$

$$\rho_{I_v} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \oint_A \vec{v} \cdot d\vec{A}$$

$\rho_{I_v} \rightarrow$ Dichte des Volumenstromes

$$\frac{dI_v}{dV} = \frac{\partial}{\partial \vec{r}} \cdot \vec{v}$$

$$\frac{\partial}{\partial \vec{r}} \cdot \vec{v} = \text{div } \vec{v}$$

Die Divergenz des Vektorfelds $\vec{v}$ wird auch als Quellendichte bezeichnet.

$\text{div } \vec{v} > 0 \rightarrow$ Quelle

$\text{div } \vec{v} < 0 \rightarrow$ Senke

$$I_v = \oint_A \vec{v} \cdot d\vec{A}$$

$$\frac{dI_v}{dV} = \frac{\partial}{\partial \vec{r}} \cdot \vec{v}$$

4.2 Wirbeldichte

$$\Omega = \oint_C \vec{v} \cdot d\vec{r}$$

$$j = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta \Omega}{\Delta A}$$

$$j = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta A} \oint_C \vec{v} \cdot d\vec{r}$$

$j \rightarrow$ Wirbeldichte

$$\vec{j} = \frac{\partial}{\partial \vec{r}} \times \vec{v}$$

$$\frac{\partial}{\partial \vec{r}} \times \vec{v} = \text{rot } \vec{v}$$

Die Rotation des Vektorfelds $\vec{v}$ wird auch als Wirbeldichte bezeichnet.

$$I = \oint_C \vec{v} \cdot d\vec{r}$$

$$\vec{j} = \frac{\partial}{\partial \vec{r}} \times \vec{v}$$

4.3 Gausscher Satz der Elektrostatik

Die beiden Schreibweisen des Gausscher Satzes der Elektrostatik beschreiben die Ladung Q (Quellenstärke) des elektrischen Feldes und die Ladungsdichte ρ (Quelldichte) des elektrischen Feldes.

$$\frac{Q}{\varepsilon_0} = \oint_A \vec{E} \cdot d\vec{A}$$

$$\frac{\rho}{\varepsilon_0} = \frac{\partial}{\partial \vec{r}} \cdot \vec{E} = \operatorname{div} \vec{E}$$

4.4 Durchflutungsgesetz der Elektrostatik

Die beiden Schreibweisen des Durchflutungsgesetzes der Elektrostatik beschreiben den Strom I und die Wirbeldichte $\vec{j}$ des Magnetfeldes.

$$I \cdot \mu_0 = \oint_C \vec{B} \cdot d\vec{r}$$

$$\vec{j} \cdot \mu_0 = \frac{\partial}{\partial \vec{r}} \times \vec{B} = \operatorname{rot} \vec{B}$$

5 Induktionsgesetz

$$-\frac{d}{dt} \int_A \vec{B} \cdot d\vec{A} = \oint_C \vec{E} \cdot d\vec{r}$$

$$-\frac{\partial}{\partial t} \cdot B_y = \frac{\partial}{\partial z} \cdot E_x$$

$$U_{ind} = \oint_C \vec{E} \cdot d\vec{r}$$

$U_{ind} \rightarrow$ Umlaufspannung

5.1 Konstantes Magnetfeld

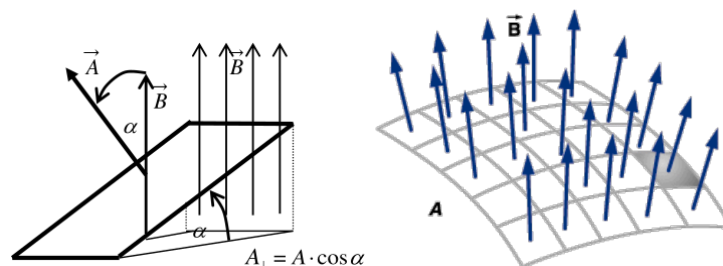
$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{r} = -\frac{\vec{B} \cdot d\vec{A}}{dt}$$

5.2 Magnetische Fluss

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{A}$$

$$U_{ind} = -\frac{d\Phi}{dt}$$

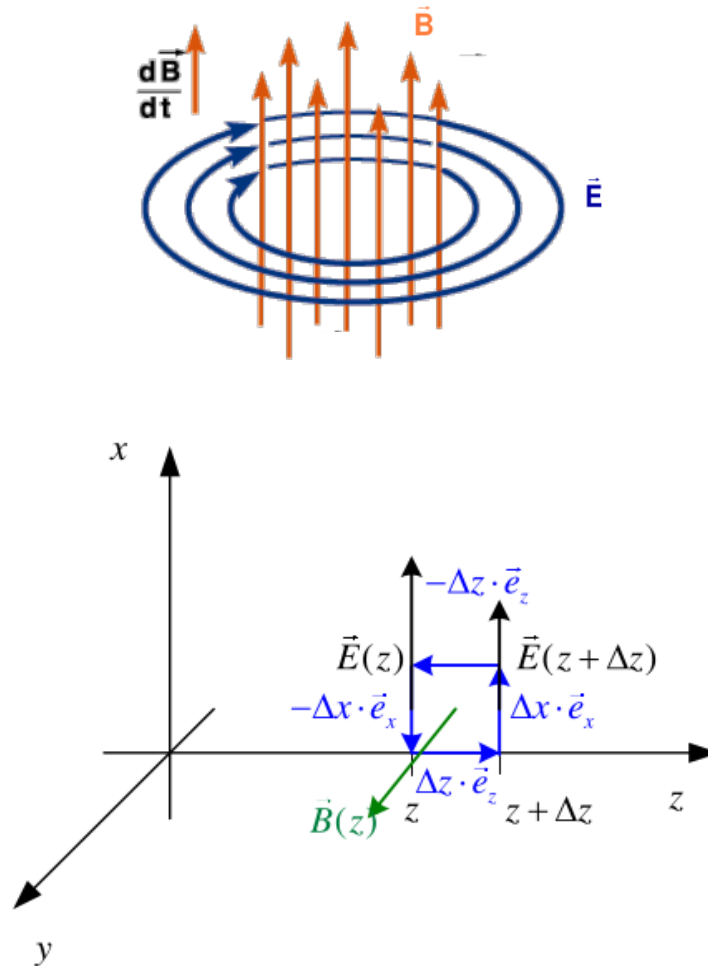
$$\Phi = \int_A \vec{B} \cdot d\vec{A}$$



5.3 Lenzsche Regel

Bei der elektromagnetischen Induktion ist der induzierte Strom immer so gerichtet, dass das von ihm hervorgerufene Magnetfeld der Induktionsursache, also der Änderung des äusseren magnetischen Feldes, entgegenwirkt.

5.4 Linke-Hand-Regel

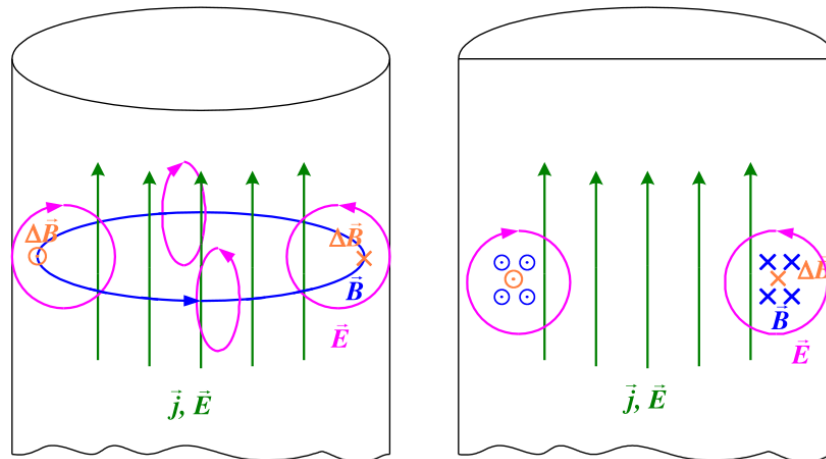


5.5 Energiedichte im B-Feld (Gespeicherte Energie)

$$w_B = \frac{B^2}{2 \cdot \mu_0}$$

$$W = \frac{B^2}{2 \cdot \mu_0} \cdot V$$

5.6 Skineffekt



$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu_0 \cdot \sigma}} = \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \sigma}}$$

$\delta \rightarrow$ Eindringtiefe, $\sigma \rightarrow$ Spezifischer Leitwert

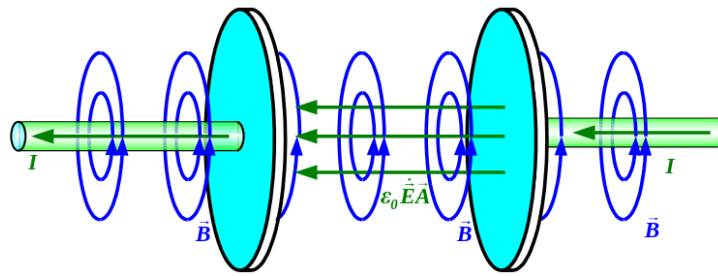
$$R = R_0 \cdot \left(\frac{r}{2 \cdot \delta} \right)$$

$R_0 \rightarrow$ Gleichstromwiderstand

$$A = 8.686 \cdot \frac{R}{2} \cdot \sqrt{\frac{C}{L}}$$

$A \rightarrow$ Dämpfungspegel

6 Verschiebungsstrom & Maxwellsche Gleichungen



6.1 Quellen des E-Feldes (1. Maxwellsche Gleichung)

$$\frac{q}{\varepsilon_0} = \oint_A \vec{E} \cdot d\vec{A}$$

$$\frac{\rho}{\varepsilon_0} = \frac{\partial}{\partial t} \vec{E}$$

6.2 Quellenfreiheit B-Feld (2. Maxwellsche Gleichung)

$$\oint_A \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \vec{B} = 0$$

6.3 Induktionsgesetz (3. Maxwellsche Gleichung)

$$-\frac{d}{dt} \oint_A \vec{B} \cdot d\vec{A} = \oint_C \vec{E} \cdot d\vec{r}$$

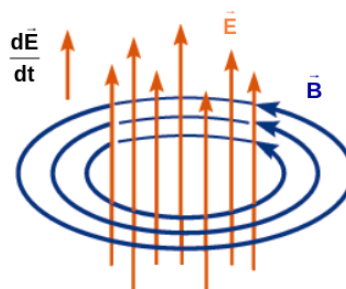
$$-\dot{\vec{B}} = \frac{\partial}{\partial t} \times \vec{E}$$

6.4 Durchflutungsgesetz (4. Maxwellsche Gleichung)

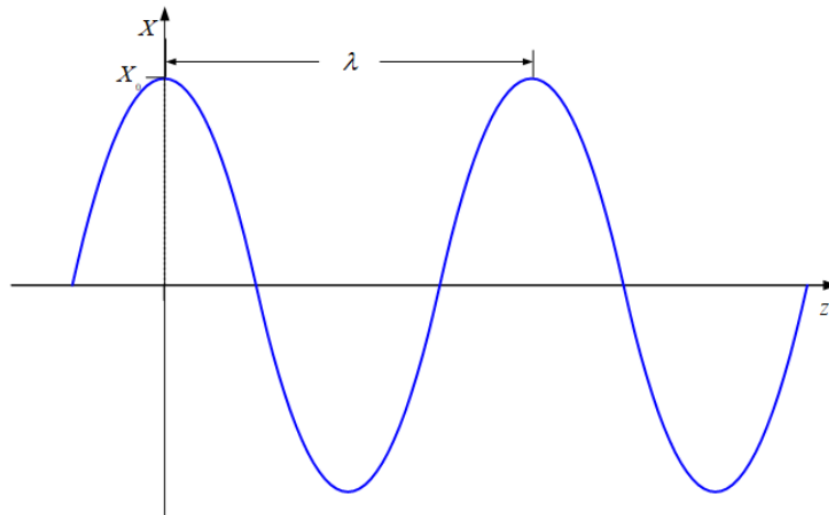
$$\mu_0 \cdot I + \frac{d}{dt} \oint_A \mu_0 \cdot \varepsilon_0 \cdot \vec{E} \cdot d\vec{A} = \oint_C \vec{B} \cdot d\vec{r}$$

$$\mu_0 \cdot \vec{j} + \mu_0 \cdot \varepsilon_0 \cdot \dot{\vec{E}} = \frac{\partial}{\partial t} \times \vec{B}$$

6.5 Rechte-Hand-Regel



7 Elektromagnetische Wellen



$$X_+(z, t) = X_0 \cdot \cos(k \cdot z - \omega \cdot t + \varphi_0)$$

$$\tilde{X}_+(z, t) = X_0 \cdot \exp(i \cdot (k \cdot z - \omega \cdot t + \varphi_0))$$

$$X_-(z, t) = X_0 \cdot \cos(k \cdot z + \omega \cdot t + \varphi_0)$$

$$\tilde{X}_-(z, t) = X_0 \cdot \exp(i \cdot (k \cdot z + \omega \cdot t + \varphi_0))$$

$X_+(\cdot) \rightarrow$ nach links laufende Welle, $X_-(\cdot) \rightarrow$ nach rechts laufende Welle

$$k = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda}$$

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi}{T} = 2 \cdot \pi \cdot f$$

$$\varphi = (k \cdot z - \omega \cdot t + \varphi_0)$$

$$v_P = \frac{\omega}{k}$$

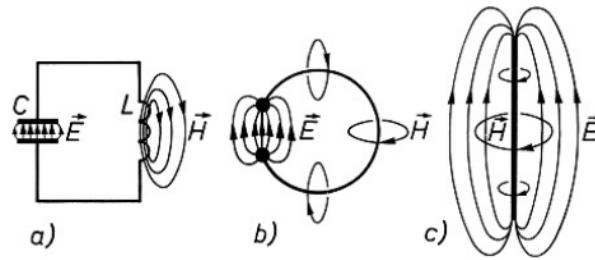
$k \rightarrow$ Wellenzahl, $\omega_0 \rightarrow$ Kreisfrequenz, $\varphi \rightarrow$ Wirbelargument, $v_P \rightarrow$ Phasengeschwindigkeit

$$c = \lambda \cdot f = 3.00 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

7.1 Phasengleichheit

Im Vakuum, fernab von allen Antennen, lichtemittierenden Atomen etc., sind elektrische Feldstärke E und magnetische Flussdichte B einer elektromagnetischen Welle zueinander proportional und schwingen in Phase.

7.2 Wellengleichung

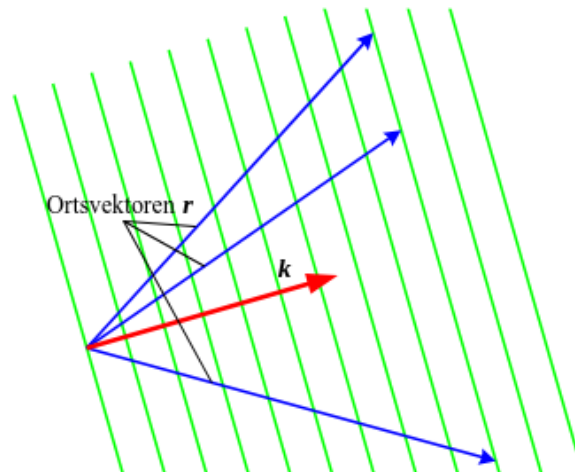


Die folgende Gleichung gilt für die Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen in einem Vakuum.

$$E_x''(z, t) - \mu_0 \cdot \varepsilon_0 \cdot \ddot{E}_x(z, t) = 0$$

$$B_y''(z, t) - \mu_0 \cdot \varepsilon_0 \cdot \ddot{B}_y(z, t) = 0$$

7.3 Wellengleichung bei Ebener Ausbreitung

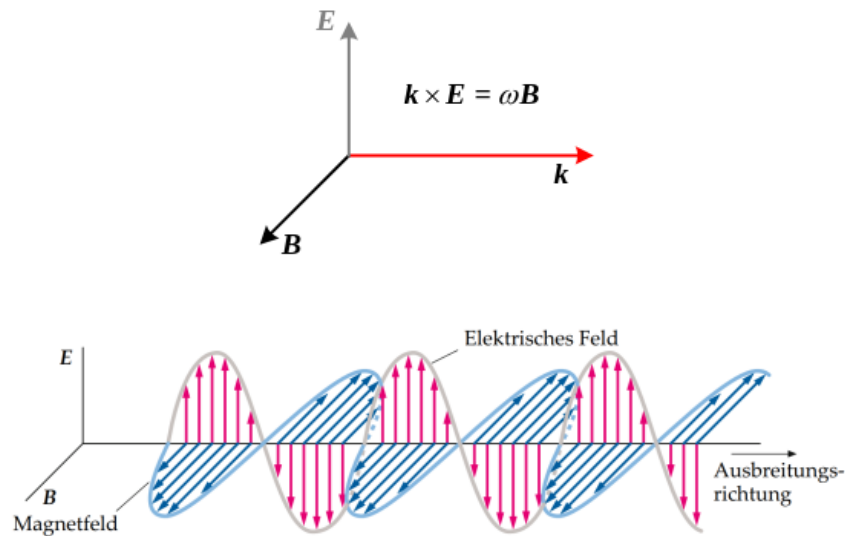


$$E(r, t) = E_0 \cdot \cos(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega \cdot t + \varphi_0)$$

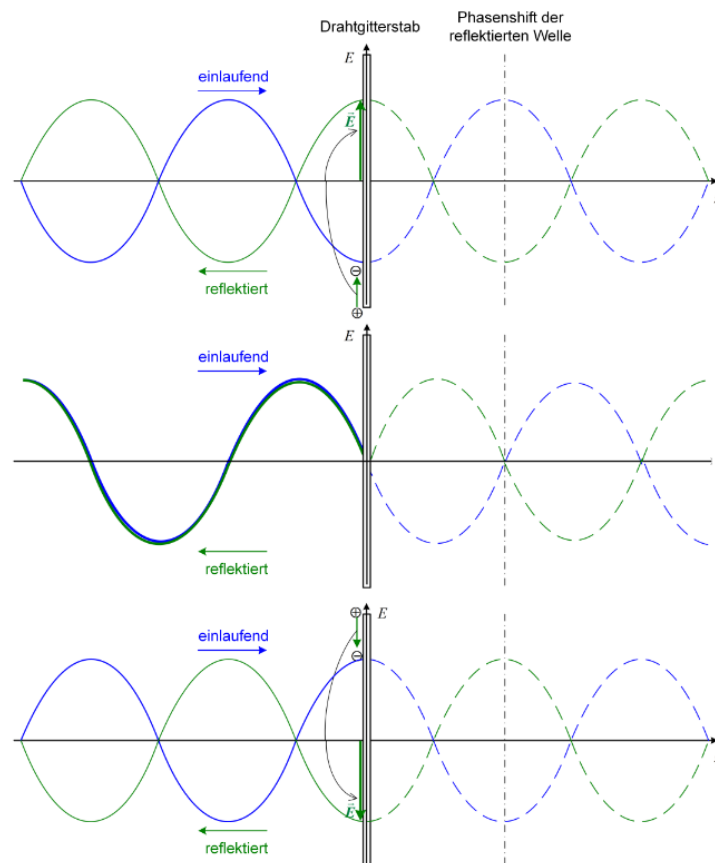
$$\tilde{E}(r, t) = E_0 \cdot \exp(i \cdot (\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega \cdot t + \varphi_0))$$

Wie in der obigen Abbildung dargestellt breitet sich die Welle in Richtung von $\vec{k}$ aus wobei für alle $\vec{r}$ die Ausbreitung gleich beschrieben wird aufgrund des Skalarprodukts der Wellengleichung.

7.4 Vektordreibein



7.5 Reflexion am festen Ende

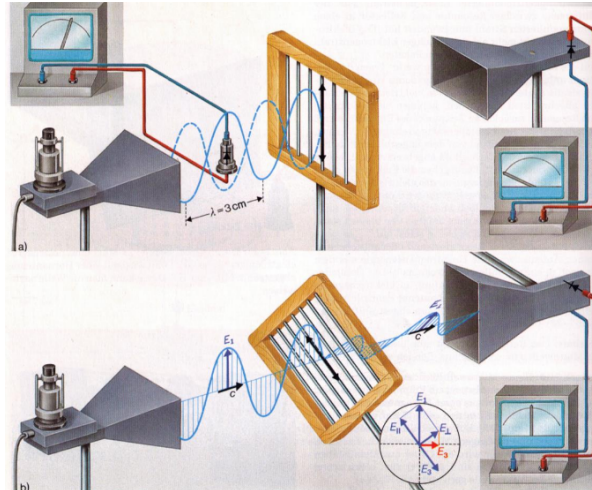


Wenn eine Welle an einem festen Ende reflektiert wird, erfährt diese Welle eine Phasenverschiebung von π . Ein festes Ende beschreibt ein Objekt oder Hindernis für die sich ausbreitende Welle welches zu jedem Zeitpunkt eine elektrische Feldstärke von 0 aufweist (Objekt oder Hindernis das geerdet ist).

7.6 Reflexion am offenen Ende

Im Gegensatz zur Reflexion am festen Ende, erfährt eine am offenen Ende reflektierte Welle keine Phasenverschiebung. Das offene Ende ist definiert als ein Objekt oder Hindernis das seine elektrische Feldstärke nur durch eintreffende Wellen verändern lässt. *In der echten Welt können beide Arten von Reflexion nur approximiert werden.*

7.7 Drahtgitterpoarisator



Bei beiden Experimenten wirken die Gitterstäbe als Dipole welche durch die Welle angeregt werden. In beiden Experimenten sind die Gitterstäbe an ein Potenzial gebunden (offenes Ende).

Beim Experiment a) führt dies zu einer Reflexion der Welle am offenen Ende und somit entsteht vor dem Gitter eine stehende Welle.

Beim Experiment b) führt dies zu einer nicht vollständigen Reflexion. Nur der Anteil der Welle, der mit den Dipolen parallel verläuft, wird reflektiert. Dies führt zu einer Drehung der Welle die nach dem Gitter auftritt.