# Physik Zusammenfassung

Christian Leser & Noa Sendlhofer
cleser & nsendlhofer
Version: November 2, 2023
Template by Micha Bosshart

# 1 Elektrizitätslehre

## 1.1 Ladung Q $[C]$

- Elementarladung: $q_{Elektron} = e = -1.602 \cdot 10^{-19} C$

Coulomb-Kraft:

$$\boxed{\vec{F_C} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} \cdot \vec{e_r}}$$

$\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$
$q_{1/2} =$ Punktladungen
$r =$ Abstand zw. Punktladungen
$\vec{e_r} =$ Einheitsvektor

- Ladungen mit gleichem Vorzeichen stossen sich ab.
  $F_C < 0 \to$ abstossend, $F_C > 0 \to$ anziehend
- Ladungen leitender Körper stets an Oberfläche.
  $\to$ Inneres: Ladungs und Feldfrei

### 1.1.1 Ladungsdichte

Liniendichte $\lambda$: $\lambda = \frac{Q}{l}\left[\frac{C}{m}\right]$

Oberflächendichte $\sigma$: $\sigma = \frac{Q}{A}\left[\frac{C}{m^2}\right]$

Volumendichte $\rho$: $\rho = \frac{Q}{V}\left[\frac{C}{m^3}\right]$

## 1.2 Strom I $[A]$

Strom A:

$$\boxed{I = \frac{dQ}{dt}\left[\frac{C}{s}\right]} \longleftrightarrow \boxed{Q = \int_{\Delta t} I dt}$$

Stromdichte j:

$$\boxed{j = \frac{I}{A}\left[\frac{A}{m^2}\right]} \longleftrightarrow \boxed{I = \iint_A j dA \overset{(I \text{ gleichm. auf } A)}{=} j \cdot A}$$

### 1.2.1 Stromdichte

Flächendichte $j$
$j = \frac{I}{A}\left[\frac{C}{s \cdot m^2}\right]$

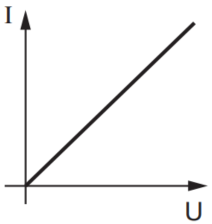
## 1.3 Elektrischer Widerstand R $[\Omega]$

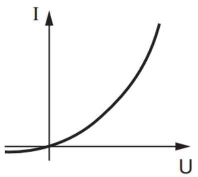
Widerstand:

$$\boxed{R = \frac{U}{I}, I \sim U}$$

Ohmsche Leiter
$I = \frac{U}{R}$

nicht-ohmsche Leiter
$R_{\text{diff}} = \frac{dU}{dI}$




U > 0 : Durchlassrichtung
U < 0 : Sperrichtung

### 1.3.1 Spezifischer Widerstand

nach Grösse:

$$\boxed{R = \rho\frac{l}{A}}$$

$l =$ Leiterlänge
$A =$ Leiterquerschnitt
$\rho =$ spezifischer Widerstand
$K = \frac{1}{\rho} =$ Spezifische Leitfähigkeit

nach Temperatur:

$$\boxed{\rho(T) = \rho_0(1 + \alpha(T - T_0))}$$

$\rho_0 =$ spezifischer Widerstand bei $T_0$
$T_0 =$ Bezugstemperatur
$\alpha = \frac{1}{K} =$ Temperaturkoeffizient

## 1.4 Elektrische Kapazität C $[F]$

Materie (Dielektrikum mit $\varepsilon_m$):

Im Vakuum:

$$\boxed{C_0 = \frac{Q}{U} = \varepsilon_0\frac{A}{l}}$$

$$\boxed{\begin{aligned} C_m &= \varepsilon_m C_0 \\ U_m &= \frac{U_0}{\varepsilon_m} \\ \varepsilon_m &= \frac{\vec{E}_0}{\vec{E}_m} \end{aligned}}$$

Ladestrom Kondensator:

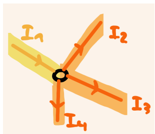
$$\boxed{\begin{aligned} I(t) &= I_0 \cdot e^{\left(-\frac{t}{R \cdot C}\right)} \\ I(0) &= I_0 = \frac{U}{R_{\text{tot}}} \\ I(\infty) &= 0 \end{aligned}}$$

Einschieben von Dielektrika in einen Plattenkondensator:
Die Energieverteilung verändert sich bis ein Gleichgewichtszustand erreicht ist:

$$\boxed{0 = dW_{\text{tot}} = dW_{\text{Feld}} - dW_{\text{Batt}} + dW_{\text{Diel}}}$$

## 1.5 Kirchhoffsche Regeln

### 1.5.1 Knotenregel

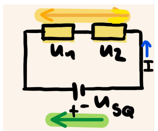



Widerstände: $\sum_k I_k = 0$

Kondensatoren: $\sum_k Q_k = 0$

$\sum I_{\text{zufliessend}} = \sum I_{\text{abfliessend}}$

### 1.5.2 Maschenregel




Widerstände: $\sum_i U_i = \sum_k R_k I_k$

Kondensatoren: $\sum_i U_i = \sum_k \frac{Q_k}{C_k}$

$i = \#$ Spannungsquellen
$k = \#$ Spannungsabfälle

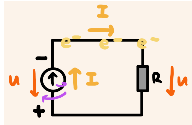
$\sum U_{\text{Quelle}} = \sum U_{\text{Abfälle}}$

(1) Zeichne $\vec{U}_{sq}$ an der Spannungsquelle ein (minus nach plus)

(2) Wähle Stromrichtung $\vec{I}$ (gegen $U_{sq}$)

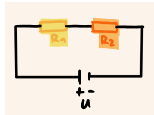
(3) Trage $\vec{U}_R$ an Widerständen (ein gleich wie Stromrichtung)

## 1.6 Schaltkreis



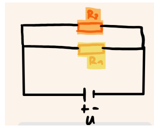

$\vec{I} =$ Stromrichtung
$R =$ Widerstand
$\vec{U} =$ Richtung des Spannungsabfall
Spannungsquelle: von mius nach plus
Widerstand: in Stromrichtung

### 1.6.1 Serieschaltung




Ladung: $Q_{\text{ges}} = Q_i$
Stromstärke: $I_{\text{ges}} = I_i$
Spannung: $U_{\text{ges}} = \sum_i U_i$
Widerstände: $R_{\text{res}} = \sum_i R_i$
Kondensatoren: $\frac{1}{C_{\text{res}}} = \sum_i \frac{1}{C_i}$
zwei Kondensatoren: $C_{res} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$

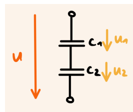
### 1.6.2 Parallelschaltung




Ladung: $Q_{\text{ges}} = \sum_i Q_i$
Stromstärke: $I_{\text{ges}} = \sum_i I_i$
Spannung: $U_{\text{ges}} = U_i$
Widerstände: $\frac{1}{R_{res}} = \sum_i \frac{1}{R_i}$
zwei Widerstände: $R_{res} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$
Kondensatoren: $C_{res} = \sum_i C_i$

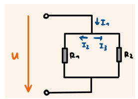
## 1.7 Strom/Spannnungsteiler

Spannungsteiler (Kondensator/Widerstand):




$$\boxed{\begin{aligned} U_1^C &= U \cdot \frac{C_2}{C_1 + C_2} \\ U_2^C &= U \cdot \frac{C_1}{C_1 + C_2} \\ U_1^R &= U \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} \\ U_2^R &= U \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \end{aligned}}$$

Stromteiler:

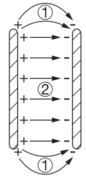


$$\boxed{\begin{aligned} I_1 &= I \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} \\ I_2 &= I \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \end{aligned}}$$

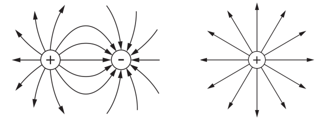
# 2 Elektrostatik

## 2.1 Elektrisches Feld

Homogenes Feld (Plattenkondensator)




Inhomogenes Feld (Punktladung)



Quick facts:

- Jede Ladung erzeugt ein $E$ - Feld
- Feldlinien von $+$ nach -
- Feldlinien immer $\perp$ auf leitfähigen Körpern
- Feldlinien schneiden sich nie
- Innerhalb von Leitern gibt es kein Feld

### 2.1.1 Elektrische Feldstärke E $\left[\frac{V}{m}\right]$

$$\boxed{E = -grad(\Phi) = -\frac{d\Phi(P)}{ds}}$$

Inhomogen (Punktladung):

$$\boxed{\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_2} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{q_1}{|\vec{r}|^2} \cdot \vec{e}}$$

$\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$
$\vec{r} =$ Abstand zw. Punktladungen (- nach +)
$\vec{e_r} =$ Einheitsvektor Richtung Feldlinien

$\longrightarrow$ Feld mehrer Punktladungen

Summierbar (Vektorsumme)
Homogene (Plattenkondensator):

$$\boxed{\vec{E} = \frac{U}{l}\vec{e}}$$

$l =$ Abstand der Platten

### 2.1.2 Elektrische Flussdichte/Verschiebungsdichte D

Dichte der Ladung:

$$\boxed{\vec{D} = \frac{Q}{A}\vec{e}}$$

$$\boxed{\vec{D} = \varepsilon \cdot \vec{E}}$$

$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$

### 2.1.3 Elektrisches Potential $\Phi$

Allgemein: $\Phi(P) = -\int \vec{E}d\vec{s}$

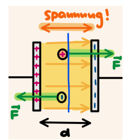
Punktladung: $\Phi(r) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1}{r}$

### 2.1.4 Elektrische Spannung U $[V]$

Inhomogen:

$$\boxed{U = \Phi(P) - \Phi(P_0) = -\int_{P_0}^{P} \vec{E}d\vec{s}}$$

Homogen:




$$\boxed{U = E \cdot d}$$

Auf Linie stets selbes Potential/Spannung

## 2.1.5 Elektrisches Dipolmoment

Für zwei gleich stark, mit unterschiedlichem Vorzeichen geladene Ladungen:

$$\vec{p} = Q\vec{l}$$
$$\vec{E_{dip}} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{3(\vec{p}\hat{r})\hat{r} - \vec{p}}{r^3}$$

Variablen erklären

## 2.2 Elektrischer Fluss $\Psi$

$$\Psi = \int \vec{E}d\vec{A}$$

$E$ = Elektrisches Feld
$A$ = Fläche, durch die das Feld hindurchfliesst

$$\oint \vec{E}d\vec{A} = \frac{1}{\varepsilon_0}\int \rho dV = \frac{Q}{\varepsilon_0}$$
$$div(\vec{E}) = \frac{1}{\varepsilon_0}\rho$$

Mittels dem Satz von Gauss erhält man die erste Maxwell Gleichung
$\rho$ = Ladungsdichte
$Q$ = Gesamtladung innerhalb der Fläche

## 2.3 Kraft, Arbeit, Leistung

### 2.3.1 Kraft im $\vec{E}$ Feld $[N]$

$$\vec{F_E} = Q\vec{E_0}$$

### 2.3.2 pot. Energie von Ladungen $[J]$

$$E_{pot} = Q\Phi = Q\int \vec{E}d\vec{s}$$

Im Plattenkondensator:

$$E_{pot} = Q \cdot E \cdot l = Q \cdot U$$

$Q$ = Ladung
$U$ = Spannung
$\Phi$ = el. Potential
$E$ = el. Feldstärke
$l$ = Entfernung zwischen Kondensatorflächen

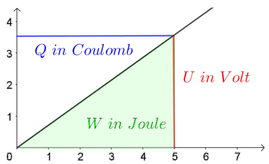
### 2.3.3 Arbeit im $\vec{E}$ Feld $[J]$

Die gespeicherte Energie ist jeweils die verrichtete Arbeit: $\Delta E = W$ Arbeit = Kraft · Weg

$$W = \int \vec{F}d\vec{s} = \int \vec{E}\cdot Qd\vec{s} = Q\Delta\Phi = QU = CU^2 = U \cdot I \cdot t$$
$$dW = UIdt$$

**Gespeicherte Energie im Kondensator:**

- Energie entspricht Fläche unter Q-U-Diagramm.
- Ladevorgang eines Kondensators verläuft linear.
- Somit: Energie entspricht Dreiecksfläche mit Seitenlänge Ladung und Spannung nach Ladevorgang.




$$W = \int U dq = \frac{QU}{2} = \frac{Q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2} = \frac{1}{2}\varepsilon_0 E_0^2 V$$
$$\rho_{el} = \frac{W}{V} = \frac{1}{2}\varepsilon_0 E_0^2$$

$Q$ = Ladung
$U$ = Spannung
$C$ = Kapazität
$E_0$ = Elektrische Feldstärke
$V$ = Volumen zwischen Kondensatorflächen
$\rho_{el}$ = Energiedichte

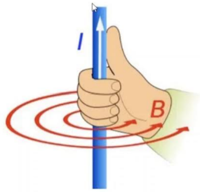
### 2.3.4 Leistung im $\vec{E}$ Feld $[\frac{J}{s}]$

$$P = \frac{W}{t} = F \cdot v = U \cdot I$$

# 3 Magnetisches Feld

## 3.1 Magnetische Feldstärke H $[\frac{A}{m}]$

- Stromdurchflossene Leiter bauen magnetisches Feld auf
- Rechte-Hand-Regel




**Spule**

$$|\vec{H}| = I\frac{n}{l}$$

$H$ = Magnetische Feldstärke
$I$ = Stromstärke
$n$ = Windungen der Spule
$l$ = Länge der Spule

## 3.2 Magnetische Flussdichte B $[T]$

$$B = \frac{\Phi}{A} = \mu H$$

$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$ = Mag. Permeabilität
$A$ = Durchflossene Fläche
$H$ = Mag. Feldstärke
$\Phi$ = Mag. Fluss

**Langer Leiter**

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi r}$$

**Spule**

$$B = \mu\mu_0 I\frac{n}{l}$$

## 3.3 Magnetischer Fluss $\Phi$ $[Tm^2]$

$$\Phi = \mu AH = \int \vec{B}d\vec{A}$$

$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$ = Mag. Permeabilität
$A$ = Durchflossene Fläche
$H$ = Mag. Feldstärke
$B$ = Mag. Flussdichte

## 3.4 Magnetisches Dipolmoment

$$\vec{m} = I\vec{A}$$

$I$ = el. Strom
$\vec{A}$ = Vektor normal zu durchflossener Fläche

## 3.5 Induktivität L $[H]$

$$L_i = \frac{n\Phi}{I} = \mu n^2\frac{A}{l} \text{ dünne Spule}$$

Serie: $L_{tot} = \sum_i L_i$

Parallel: $\frac{1}{L_{tot}} = \sum_i \frac{1}{L_i}$

$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$ = Mag. Permeabilität
$\Phi$ = Magnetischer Fluss durch die Spule
$n$ = Windungen der Spule
$l$ = Länge der Spule
$A_i$ = Querschnittsfläche der Spule

## 3.6 elektromagnetische Induktion

**Spannungsstoss $S_U$**

Änderung des magnetischen Feldes erzeugt Strom in Spule

$$S_U = \int U_i dt = \mu n_i \Delta H A_i$$

$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$ = Mag. Permeabilität
$U_i$ = Spannung in der Spule i
$n_i$ = Windungen der Spule i
$H$ = Mag. Feldstärke
$A_i$ = Querschnittsfläche der Spule i

**Induktionsgesetz**

$$U_i = -n_i\frac{d\Phi}{dt} = \underbrace{-n_i\frac{d}{dt}\iint \vec{B}d\vec{A}}_{\vec{B}\text{ hom. auf } A \text{ und } \vec{B}\parallel d\vec{A},} = -n_i BA$$

Minus wegen Lenzscher Regel
$U_i$ = Induzierte Spannung in Spule
$n_i$ = Windungen der Spule i
$\Phi$ = Mag. Fluss
$B$ = mag. Flussdichte
$A$ = Querschnittsfläche Spule, normal zu Fläche

**Induktionsspule**

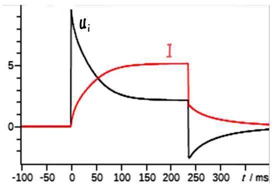
$$\int U_i dt = \alpha\int \vec{H}\cdot d\vec{s}$$
$$\alpha = \mu\frac{n_i}{l}A_i$$
$$B = \frac{LI}{nA}$$

$U_i$ = Spannung in der Spule i
$\vec{H}$ = magnetische Feldstärke
$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$ = Mag. Permeabilität
$n_i$ = Windungen der Spule i
$l$ = Länge der Spule
$B$ = mag. Flussdichte
$L$ = Induktivität
$A$ = Querschnittsfläche Spule, normal zu Fläche

### 3.6.1 Selbstinduktion

$$U_i = -L\frac{dI}{dt}$$

$U_i$ = induzierte Spannung
$L$ = Induktivität
$I$ = el. Strom




### 3.6.2 Gegeninduktion

$$U_{i2} = L_{12}\frac{dI_1}{dt}$$
$$L_{12} = L_{21}$$

- Feldspule$_1$: Spannung per Batterie
- Induktionsspule$_2$: Induzierte Spannung

Übereinanderliegende Spulen gleicher Länge bzw. Fläche:

$$L_{12} = n_2\frac{\Phi_1}{I_1} = \mu_0 n_1 n_2\frac{A_1}{l_1}$$

$U$ = el. Spannung
$L$ = Induktivität
$n$ = Windungen der Spule
$\Phi$ = mag. Fluss durch Spule
$A$ = Querschnittsfläche Spule
$l$ = Länge Spule

## 3.7 Lenzsche Regel

- System reagiert der zeitlichen Änderung des magnetischen Feldes entgegen / wehrt sich gegen Änderung des magnetischen Feldes
- Bedingung: Strom muss in System fliessen können (Bsp metallischer Ring ohne Lücken)
- Richtung des induzierten Feldes entgegengesetzt der Richtung der Änderung des äusseren Feldes.

Aus Induktionsgesetz folgt:

$$\oint \vec{E}d\vec{s} = -\frac{d}{dt}\int \vec{B}d\vec{A}$$
$$rot(\vec{E}) = -\dot{\vec{B}}$$

$\vec{E}$ = Elektrische Feldstärke
$\vec{B}$ = Magnetische Flussdichte

## 3.8 Durchflutungsgesetz

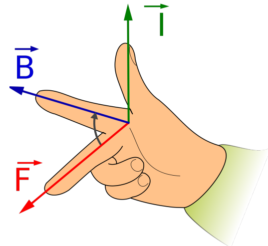
$$\oint \vec{H}ds = n \cdot I_{tot} = \int \vec{j} + \frac{d\vec{D}}{dt}d\vec{A}$$
$$rot(\vec{H}) = \vec{j} + \dot{\vec{D}}$$

$\vec{H}$ = mag. Feldstärke
$I = j \cdot A$ = el. Strom
$j$ = Stromflächendichte
$D$ = el. Flussdichte

## 3.9 Lorenzkraft $\vec{F_L}$

$$\vec{F_L} = \underbrace{I(\vec{l}\times\vec{B})}_{\text{falls } \vec{I},\ \vec{l} \text{ und } \vec{B}\perp} = I \cdot l \cdot B$$
$$\vec{F_L} = \int \vec{j}\times\vec{B}dV = \int \rho(\vec{v}\times\vec{B})dV = q(\vec{v}\times\vec{B})$$

$l$ = Länge stromdurchflossener Leiter in Magnetfeld
$A$ = Querschnittsfläche Leiter
$V = A \cdot l$ = Volumen Leiter
$j = \frac{I}{A}$ = Flächenstromdichte
$\rho$ = Volumenladungsdichte
$\vec{B}$ = Magnetfeld
$I = \rho A v$ = el. Strom
$v$ = Geschwindigkeit der Ladungen
$q$ = Ladung !Vorzeichen!




ACHTUNG: Richtung Bild = Richtung technischer Strom! Elektronenfluss in entgegengesetzte Richtung zu Fluss des technischen Stroms

## 3.10 Biot-Savart Gesetz

Magnetische Wirkung eines Abschnittes eines elektrischen Leiters $\vec{dl}$ auf einen Punkt im Abstand $|\vec{r}|$

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi}\int \frac{I\vec{dl}\times\hat{r}}{r^2}$$

## 3.11 Energie im magnetischen Feld

$$E_p = \int_0^\infty -U_i I dt = \frac{1}{2}LI_0^2 = \frac{1}{2}\mu_0 V H^2$$
$$\rho_m = \frac{W}{V} = \frac{\vec{B}\vec{H}}{2}$$

$P = U \cdot I = \frac{W}{t} = -P_i = -U_i \cdot I$
$U$ = el. Spannung
$I$ = el. Strom
$P$ = Leistung
$L$ = Induktivität Spule
$V$ = Eingeschlossenes Volumen der Spule
$H$ = mag. Feldstärke
$B$ = mag. Flussdichte
$\rho_m$ = Volumenenergiedichte

## 3.12 Maxwell Gleichungen

**Gauss'sches Gesetz** $\vec{E}$ 2.2

$$\vec{\nabla}\vec{E}(\vec{r}) = \frac{\rho\vec{r}}{\varepsilon_0}$$

$$\int_{\partial V} \vec{E}(\vec{r})d\vec{A} = \frac{1}{\varepsilon_0}\int_V \rho(\vec{r})dV$$

**Gauss'sches Gesetz** $\vec{B}$

$$\vec{\nabla}\vec{B}(\vec{r}) = 0$$

$$\oint_{\partial V} \vec{B}(\vec{r})d\vec{A} = 0$$

**Induktionsgesetz** 3.6

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

$$U_{\text{ind}} = \oint_L \vec{E}_{\text{ind}}(\vec{r})d\vec{L} = -\frac{d}{dt}\int_A \vec{B}(\vec{r})d\vec{A}$$

**Durchflutungsgesetz** 3.8

$$\vec{\nabla}\times\vec{B}(\vec{r}) = \mu_0\vec{j}(\vec{r}) + \mu_0\varepsilon_0\frac{\partial\vec{E}(\vec{r})}{\partial t}$$

$$\oint_L \vec{B}(\vec{r})d\vec{L} = \mu_0\int_A \vec{j}(\vec{r})d\vec{A}$$

## 3.13 Magnetismus der Materie

Magnetische Suszeptibilität:

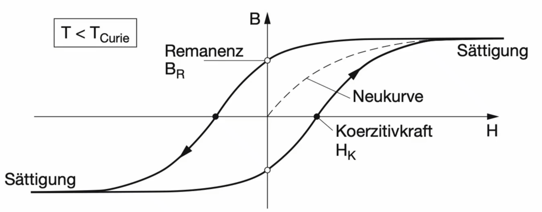
$$\boxed{X = \mu - 1}$$

Magnetisierung:

$$\boxed{\vec{M} = X\vec{H}}$$

- paramagnetische Materialien: $X > 0$, Magnetisierung in gleiche Richtung wie Feld.
- diamagnetische Materialien: $X < 0$, Magnetisierung in entgegengesetzte Richtung wie Feld.

Elektronen bewegen sich auf einer Kreisbahn im Atom -¿ magnetisches Moment entsteht. Bei angelegtem magnetischem Feld werden die magnetischen Momente aller Atome parallel ausgerichtet **Schema mit magnetischem Moment einfügen**
Hysterese: Wenn nach der Magnetisierung eines ferromagnetischen Materials das magnetische Feld wieder ausgeschalten wird, setzt ein "Memory-Effekt ein. Eine verbleibende magnetische Wirkung im Material bezeichnet man als **Remanenz**. Das Feld, welches benötigt wird, um die Remanenz auszulöschen, bezeichnet man als **Hoerzitivkraft**




Meissner Effekt: Keine magnetischen Feldlinien treten in einen Supraleiter ein, perfektes diamagnetisches Verhalten.
Anwendung: Magnet kann auf abgekühltem supraleiter-Material schweben, bsp. Magnetschwebebahn

## 3.14 Wechselspannung

**Komplexe Schreibweise:**

$$\tilde{I}(t) = I_0 e^{j\omega t}, \quad \tilde{U} = \tilde{Z}\cdot\tilde{I} = I_0 Z\cdot e^{j\omega t}e^{j\rho}$$

**Impedanz Spule:**

$$\tilde{Z}_S = R + j\omega L = \sqrt{R^2+\omega^2 L^2}\cdot e^{j\rho}$$

Phasenverschiebung $\rho$: $U(t) \sim I(t+\frac{\pi}{2})$

**Impedanz Kondensator:**

$$\tilde{Z}_C = -j\frac{1}{\omega C} = \frac{1}{\omega C}\cdot e^{j\rho}$$

Phasenverschiebung $\rho$: $U(t) \sim I(t-\frac{\pi}{2})$

**Impedanz Widerstand:**

$$\tilde{Z}_R = R = R\cdot e^{j\rho}$$

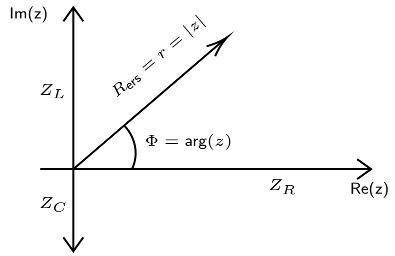
Phasenverschiebung $\rho$: $U(t) \sim I(t)$

**Leistung:**

$$P = \frac{1}{2}I_0 U_0 cos(\rho)$$

**Winkel Phasenverschiebung im Schaltkreis:**

$$\tan(\Phi) = \frac{|Z_L| - |Z_C|}{Z_R}$$



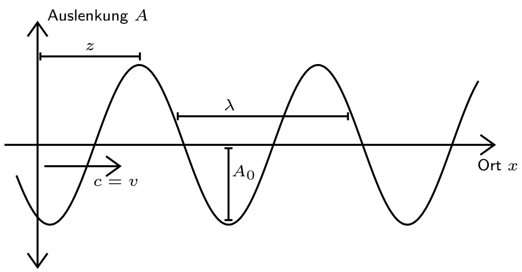

## 4 Elektromagnetische Wellen

## 4.1 Wellen Allgemein

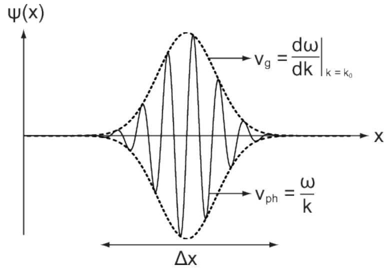
Wellengleichung:

$$\boxed{\begin{aligned} A(z,t) &= A_0 cos(\omega t - kz)\\ k &= \frac{2\pi}{c}\cdot f = \frac{2\pi}{\lambda}\\ f &= \frac{1}{T}\\ \lambda &= \frac{c}{f}\\ \omega &= 2\pi f \end{aligned}}$$

$A_0$ = Maximale Amplitude
$\omega$ = Kreisfrequenz
$k$ = Wellenzahl
$f$ = Frequenz
$\lambda$ = Wellenlänge
$T$ = Periode
$c = v$ = Geschwindigkeit der Welle
Für Licht in Vakuum: $c = c_0$
$z$ = Abstand zu Ursprung der cos-Funktion zu Zeitpunkt $t_0$



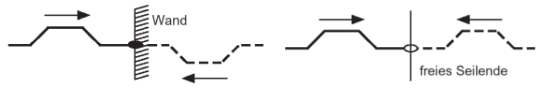

### 4.1.1 Gruppengeschwindigkeit $v_g$




Geschwindigkeit, mit der sich das Wellenpaket fortbewegt

### 4.1.2 Reflektion von Wellen

Phasensprung bei Welle im Seil mittels Superposition mit einer Welle von der anderen Seite




### 4.1.3 Energie von Wellen

Intensität einer Welle: Energie Potentielle Energie:

$$\boxed{\Delta E_p = \int \vec{F}d\vec{x} = \frac{1}{2}Dx_0^2 \text{mit} D = \omega^2 m}$$

Kinetische Energie:

$$\boxed{\Delta E_k = \frac{1}{2}\Delta m v^2 \text{mit} v = \omega s}$$

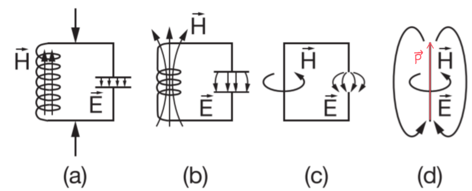
$$\rightarrow \Delta E_p = \Delta E_k$$

Energiestromdichte:

$$\boxed{\vec{j_E} = \frac{1}{A}\frac{\Delta E_k}{\Delta t} = \rho_E v_p h}$$

## 4.2 Herzscher Dipol

"Elektrisches Pendel": Kondensator und Spule sind Energiespeicher. Wenn das magnetische Feld abgebaut wird, so wird das elektrische aufgebaut und umgekehrt. Idealisiert (ohne Reibung) "pendelt" dieses System unendlich lange




$$\boxed{\begin{aligned} \vec{p} &= q\vec{l} = \vec{p_0}cos(\omega t)\\ \vec{E} &= \vec{E_0}cos(\omega t - kr)\\ \vec{H} &= \vec{H_0}cos(\omega t - kr) \end{aligned}}$$

$\vec{p}$ = Dipolmoment (alternierende Richtung)

Fernfeld: Entfernt man sich weit vom Sender (Herzschen Dipol), verschwindet der Phasenunterschied zwischen $\vec{E}$ und $\vec{B}$.

## 4.3 Wellengleichung

$$\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = \frac{1}{\varepsilon_0\mu_0}\frac{\partial^2 E}{\partial z^2}$$

$$\frac{\partial^2 H}{\partial t^2} = \frac{1}{\varepsilon_0\mu_0}\frac{\partial^2 H}{\partial z^2}$$

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} = c^2\frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2}, \quad \frac{1}{\varepsilon_0\mu_0} = c^2$$

## 4.4 Energie kombinierter El. und Mag. Felder

$$\boxed{\begin{aligned} \vec{j_E} &= \vec{S} = \vec{E}\times\vec{H}\\ |\vec{S}| &= E_0 H_0\cos^2(\omega t - kz)\\ \rho_E &= \frac{1}{2}\varepsilon_0 E^2 + \frac{1}{2}\mu_0 H^2\\ |\vec{S}| &\approx \rho_E \end{aligned}}$$

$\vec{j}_E = \vec{S}$ = Poynting-Vektor = Energiestromdichte
$|\vec{S}|$ = Intensität einer Welle
$\rho_E$ = Energiedichte
$\vec{E}$ = El. Feld
$\vec{H}$ = Mag. Feldstärke
$\omega t - kz$ : siehe 4.1 Wellen Allgemein

## 4.5 Doppler-Effekt

### 4.5.1 Ohne relativistischen Effekt (Bsp. Schall)

Wenn Empfänger sich auf Sender zubewegt:

$$\boxed{f' = f_0(1+\frac{v}{c})}$$

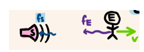
$$\boxed{\lambda_0 = \frac{c}{f_0}}$$

| | | |
|---|---|---|
| Schallgeschwindigkeit: | $= 340\frac{m}{s}$ |
| Lichtgeschwindigkeit: | $= 3\cdot 10^8\frac{m}{s}$ |

**Empfänger auf Sender:**

$$\boxed{f' = f_0(1+\frac{v}{c})}$$

**Empfänger von Sender weg:**



$$\boxed{f' = f_0(1-\frac{v}{c})}$$

**Sender auf Empfänger:**

$$\boxed{f' = f_0\frac{1}{1-\frac{v}{c}}}$$

**Sender von Empfänger weg:**

$$\boxed{f' = f_0\frac{1}{1+\frac{v}{c}}}$$

Für $v << c$ gilt, dass es nicht drauf ankommt ob Sender oder Empfänger sich in Ruhe befindet.

### 4.5.2 Mit relativistischem Effekt ($v \to c_0$)

$\beta = \frac{v}{c}$

**Quelle und Empfänger entfernen sich (Redshift):**

$$\boxed{f' = f_0\sqrt{\frac{1-\beta}{1+\beta}}}$$

**Quelle und Empfänger nähern sich (Blueshift):**

$$\boxed{f' = f_0\sqrt{\frac{1+\beta}{1-\beta}}}$$

## 4.6 DGL der harmonischen Schwingung

$$\boxed{\ddot{y} + ay = 0 \Rightarrow \omega = \sqrt{a}}$$

# 5 Variabeln und Konstanten

## 5.1 Variablen

| | | |
|---|---|---|
| $\vec{B}$ | Magnetische Induktion | $T=\frac{Wb}{m^2}=\frac{V\cdot s}{m^2}=\frac{kg}{A\cdot s^2}$ |
| $C$ | Kapazität | $F=\frac{C}{V}=\frac{A\cdot s}{V}=\frac{A^2\cdot s^4}{kg\cdot m^2}$ |
| $D$ | elek. Flussdichte / Verschiebungsdichte | $\frac{A\cdot s}{m^2}$ |
| $\vec{E}$ | e. Feld | $\frac{N}{C}=\frac{V}{m}=\frac{kg\cdot m}{s^3\cdot A}$ |
| $E$ | Energie $1eV\cdot e=1J$ | $J=Nm=CV=Ws\frac{kg\cdot m^2}{s^2}$ |
| $f=\nu=\frac{1}{T}$ | Frequenz | $\frac{1}{s}=Hz$ |
| $\vec{F}$ | Kraft | $N=\frac{V\cdot C}{m}=\frac{kg\cdot m}{s^2}$ |
| $\vec{H}$ | magn. Feldstärke | $\frac{A}{m}$ |
| $\vec{I}$ | el. Strom | $A=\frac{C}{s}$ |
| $\vec{j}=\frac{I}{A}$ | Stromdichte | $\frac{C}{s\cdot m^2}$ |
| $k$ | Federkonstante | $\frac{N}{m}$ |
| $L$ | Induktivität | $H=\frac{T\cdot m^2}{A}=\frac{V\cdot s}{A}=\frac{kg\cdot m^2}{A^2\cdot s^2}$ |
| $P$ | Leistung | $W=V\cdot A=\frac{J}{s}$ |
| $Q$ | Ladung | $C=A\cdot s$ |
| $R$ | el. Widerstand | $\Omega=\frac{V}{A}$ |
| $S$ | Siemens | $S=\frac{1}{\Omega}=\frac{A}{V}$ |
| $T$ | Periodendauer / Schwingungsdauer | $s$ |
| $U$ | Potentialdiff. / Spannung | $V=\frac{W}{A}=\frac{J}{C}=\frac{Nm}{As}=\frac{kg\cdot m^2}{A\cdot s^3}$ |
| $\vec{v}$ | Geschwindigkeit | $\frac{m}{s}$ |
| $W$ | Arbeit | $J=N\cdot m=\frac{kg\cdot m^2}{s^2}=C\cdot V$ |
| $Z$ | Impedanz | $\Omega=\frac{V}{A}=\frac{kg\cdot m^2}{A^2\cdot s^3}$ |
| $\varepsilon$ | Dielektrizitätskonst. Mat. | $\frac{C}{V\cdot m}=\frac{A\cdot s}{V\cdot m}$ |
| $\Psi_E$ | elek. Fluss | $V\cdot m=\frac{N\cdot m^2}{C}$ |
| $\Phi_M$ | magn. Fluss | $Wb=T\cdot m^2$ |
| $\Phi$ | elek. Potential | $[-]$ |
| $\lambda=\frac{c}{f}$ | Wellenlänge | $m$ |
| $\mu$ | magn. Feldk. / Permeabilität | $\frac{V\cdot s}{A\cdot m}$ |
| $\rho$ | spez. Widerstand | $\Omega\cdot m$ |
| $\omega=2\pi f$ | Kreisfrequenz | $s^{-1}=Hz$ |

## 5.2 Einheiten

| | | |
|---|---|---|
| $eV$ | Elektronenvolt (Energie) | $1e\cdot 1V\approx 1.6\cdot 10^{-19}J$ |
| $u$ | Atomare Masseneinheit | $1{,}66054\cdot 10^{-27}kg$ |

$$1\frac{m}{s}\xrightarrow{\cdot 3.6}1\frac{km}{h}$$

### 5.2.1 Konstanten

| | | |
|---|---|---|
| $g$ | Fallbeschleunigung | $g\approx 9.81\frac{m}{s^2}=\frac{N}{kg}$ |
| $\varepsilon_0$ | el. Feldkonst / Dielektrizitätskonst. / Permittivität Vakuum | $\varepsilon_0=\frac{1}{\mu_0\cdot c_0^2}=\frac{10^7}{4\pi c_0^2}$ |
| $\varepsilon_{r,vak}$ | Permittivitätszahl Vakuum | $\varepsilon_{r,vak}=1$ |
| $c_0$ | Lichtgesch. Vakuum | $\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}\approx 3\cdot 10^8\frac{m}{s}$ |
| $\mu_0$ | magn. Feldk. / Permeabilität Vakuum | $\mu_0=\frac{1}{\varepsilon_0 c_0^2}=4\pi\cdot 10^{-7}\frac{V\cdot s}{A\cdot m}$ |
| $\mu_{r,vak}$ | Permeabilitätszahl Vakuum | $\mu_{r,vak}=1$ |
| $e$ | Elementarladung | $1{,}602\cdot 10^{-19}C$ |
| $m_e$ | Elektronenmasse | $=9{,}11\cdot 10^{-31}kg$ |

## 5.3 Nutzliche Formeln

**Kräfte**

| | | |
|---|---|---|
| $F$ | Kraft Allgemein | $=m\cdot a$ |
| $F_g$ | Gewichtskraft | $=m\cdot g$ |
| $F_{\text{Fed}}$ | Federkraft | $=R\cdot s$ |
| $F_Z$ | Zentripetalkraft | $=m\frac{v^2}{r}=m\omega^2 r$ |

**Energie**

| | | |
|---|---|---|
| $E$ | Energie Allgemein | $=\vec{F}\cdot\vec{s}$ |
| $E_{\text{pot}}$ | Potentielle Energie | $=m\cdot g\cdot h$ |
| $E_{\text{kin}}$ | Kinetische Energie | $=\frac{1}{2}m\cdot v^2$ |
| $W=\Delta E$ | Zusammenhang Arbeit Energie | |
| $\lvert\vec{a}\times\vec{b}\rvert$ | Kreuzprodukt | $=\lvert\vec{a}\rvert\cdot\lvert\vec{b}\rvert\cdot\sin(\alpha)$ |

$$\ddot{\vec{s}}=\dot{\vec{v}}=\vec{a}\Rightarrow\vec{s}=\vec{v}\cdot t=\frac{\vec{a}}{2}t^2$$

### 5.3.1 Rechengesetze für Exponenten & Logarithmen

$$B^a\cdot B^b=B^{a+b}\qquad \log_B(a\cdot b)=\log_B(a)+\log_B(b)$$

$$\frac{B^a}{B^b}=B^{a-b}\qquad \log_B\left(\frac{a}{b}\right)=\log_B(a)-\log_B(b)$$

$$(B^a)^b=B^{a\cdot b}\qquad \log_B(a^r)=r\cdot\log_B(a)$$

$$\text{Basiswechsel: }\log_a(x)=\frac{\log_b(x)}{\log_b(a)}$$

## 5.4 Vorsilben und Exponente

| **Symbol** | P | T | G | M | k | h |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Silbe** | Peta | Terra | Giga | Mega | kilo | hekto |
| **Exponent** | $10^{15}$ | $10^{12}$ | $10^9$ | $10^6$ | $10^3$ | $10^2$ |

| d | c | m | $\mu$ | n | p | f |
|---|---|---|---|---|---|---|
| deci | centi | milli | micro | nano | pico | femto |
| $10^{-1}$ | $10^{-2}$ | $10^{-3}$ | $10^{-6}$ | $10^{-9}$ | $10^{-12}$ | $10^{-15}$ |