# Experimentalphysik II

Vorlesung von Prof.Dr. Schumacher im Sommersemester 2018

Markus Österle
Andréz Gockel

16.04.2018

# Inhaltsverzeichnis


**I Elektrostatik** **3**
- I.1 Elektrische Ladung . . . 3
  - I.1.1 Reibungselektrizität . . . 3
  - I.1.2 Die elektrische Ladung . . . 3
  - I.1.3 Die Elementarladung . . . 4
- I.2 Kraft und Feld . . . 6
  - I.2.1 Coulomb - Gesetz . . . 6
  - I.2.2 Influez . . . 7
  - I.2.3 Das Elektrische Feld . . . 7
  - I.2.4 Das elektrische Potential . . . 10
  - I.2.5 Der elektrische Fluss . . . 14
  - I.2.6 Quellstärke des elektrischen Feldes . . . 15
  - I.2.7 Maxwell-Gleichungen . . . 16
- I.3 Multipole . . . 17
  - I.3.1 Kräfte auf Dipol . . . 19
  - I.3.2 Quadrupol . . . 20
- I.4 Elektrostatische Energie und Kapazität . . . 22
  - I.4.1 Spannung . . . 22
  - I.4.2 Kapazität . . . 22
  - I.4.3 Kondensatorschaltungen . . . 24
  - I.4.4 Elektrische Energie . . . 24
- I.5 Materie in elektrischen Feldern . . . 26
  - I.5.1 Polarisation des Mediums . . . 26
  - I.5.2 Felder und Maxwell gl. im Medium . . . 27
  - I.5.3 Mikroskopische Beschreibung der Polarisation (Pol.) . . . 29
  - I.5.4 Kondensator im Dielektrikum . . . 30

**II Magnetostatik** **32**
- II.6 Ströme . . . 32
  - II.6.1 Elektrischer Strom . . . 32
  - II.6.2 Ohmsches Gesetz . . . 33
  - II.6.3 Arbeit und Leitung . . . 33
  - II.6.4 Leitungsvorgänge in Metallen und Halbleitern . . . 34
  - II.6.5 Kirchhoffsche Gesetze KHG . . . 35
  - II.6.6 Leitungsvorgänge in Flüssigkeiten . . . 35
  - II.6.7 Stromleitung in Gasen . . . 36
  - II.6.8 Stromquellen . . . 37
- II.7 Das magnetische Feld . . . 38
  - II.7.1 Eletromagnetische Kräfte . . . 38

II.7.2 Magnetisches Feld . . . 38
II.7.3 Maxwell-Gleichung der Magnetostatik . . . 39
II.7.4 Das Vektorpotential $\vec{A}(\vec{r})$ . . . 40
II.7.5 Berechnung von Magnetfeldern . . . 40
II.8 Magnetische Kräfte . . . 42
II.8.1 Die Lorenz Kraft . . . 42
II.8.2 Kräfte auf Stöme . . . 43
II.8.3 Der Magnetische Dipol . . . 44
II.9 Magnetische Felder in Materie . . . 45
II.9.1 Magnetisierung der Materie . . . 45
II.9.2 Diamagnetismus . . . 46
II.9.3 Paramagnetismus . . . 47
II.9.4 Ferromagnetismus . . . 47
II.9.5 Elektromagnet . . . 48

**III Elektrodynamik 49**
III.10 Elektromagnetische Induktion . . . 49
III.10.1 Indutionsgesetz . . . 49
III.10.2 Selbstinduktion . . . 51
III.10.3 Feldenergie . . . 52
III.10.4 Maxwell-Gleichungen . . . 52
III.11 Wechselstromkreise . . . 53
III.11.1 Wechselstrom . . . 53
III.11.2 Diodenschaltungen . . . 54
III.11.3 Zeigerdiagramme . . . 55
III.11.4 Komplexe Widerstände . . . 55
III.11.5 Frequenzfilter . . . 56
III.11.6 Blindleistung . . . 57
III.11.7 Transformator . . . 58
III.12 Elektromagnetische Schwingungen . . . 61
III.12.1 Einfache Schwingungen . . . 61
III.12.2 Gekoppelte Schwingungen . . . 64
III.12.3 Ungedämpfte Schwingungen . . . 65
III.13 Elektromagnetische Wellen . . . 65
III.13.1 Lecher-Leitung (LL) . . . 66
III.13.2 Vakuumwellen . . . 69
III.13.3 Hohlleiter . . . 74
III.13.4 Energietransport . . . 76

# Kapitel I

# Elektrostatik

## I.1 Elektrische Ladung

### Exp: Auf Thales Spuren

(PVC Rohr mit Filz gerieben, Lametta zum schweben gebracht)

### I.1.1 Reibungselektrizität

- Reibung von Kunststoff und Filz $\Rightarrow$ Aufladung des Stabes
- Berührung Lametta mit Stab $\Rightarrow$ Abstoßung

Anziehende/Abstoßende Kräfte: Elektrizität

### Exp:

i) 2 Kunststoffstäbe $\Rightarrow$ Abstoßung, gleiche Ladung

ii) Kunststoff-, Glasstab $\Rightarrow$ Anziehung, ungleiche (entgegengesetzte) Ladung

$\Rightarrow$ Es gibt zwei Arten von Ladungen

$\Rightarrow$ Aufladung ist Materialabhängig. „Reihenfolge“: Triboelektrische Reihe [1]

Zwei Materialien A und B und $W_A < W_B$
Energiefreisetzung wenn Elektron $e^-$ von A nach B wandert
$\Rightarrow$ A positiv (Elektronenmangel), B negativ (Elektronenüberschuss)
Ladungen „wandern“, werden aber nicht erzeugt oder vernichtet.

### I.1.2 Die elektrische Ladung

Elektrische Ladung Q quantifiziert Elektrizität. Q bezeichnet die Menge Elektrizität die ein Körper trägt.
Neues Phänomen $\Rightarrow$ nicht Rückführbar auf „m,kg,s“
$[Q] = C$ Coulomb (C.A. de Coulomb)

[1](Erklärung in Festkörperphysik: Austrittsarbeit $W_{Aus}$ ist die Arbeit um ein Elektron aus einer Oberfläche zu entfernen bzw. die freigesetzte Energie wenn es von einer Oberfläche absorbiert wird)

keine basiseinheit Def. mittels Stromstärke
$[A] = A$ Ampere
$1C =$ Ladung die von einem Strom mit Stärke $I = 1A$ in der Zeit $\Delta t = 1s$
$1C$ ist eine relativ große Ladung:
Vergleich:

- $Q_{\text{Elektron}} = -1,602 \cdot 10^{-19}C$
- $Q_{\text{Reibungselektrizität}} = \mu Q = 10^{-6}C$

Elektrometer: Messung von Ladung ohne Vorzeichen. Beobachtung: 2 Ladungsvorzeichen, Ladungen sind Additiv

| |
|---|
| Erhaltungssatz der Ladungen: In einem geschlossenen System ist die Summe der Ladungen konstant. |

Erinnerung: geschlossenes System $\widehat{=}$ kein Austausch von Materie mit Umgebung (Ladung gekoppelt an Materie)

Noether - Theorem
Erhaltungssatz $\Leftrightarrow$ Symmetrie des Systems/ Gesetzes. hier: Eichsymmetrie $U(1)_Q \Leftrightarrow$ Ladungserhaltung (später fortgeschrittene Quantenmechanik, Teilchenphysik)

### I.1.3 Die Elementarladung

Faraday Elektrolyseexperimente
Bei der Umsetzung von einem Mol eines Elements wird eine feste Ladung umgesetzt.
1 wertig: $96486C/mol$ (Faraday Konstante)
Also bei der Reaktion eines Moleküls wird $Q = 1,6 \cdot 10^{-19}C$ (Annahme Avogardozahl bekannt, erste Bestimmung 1865 Loschschmidt)

Frage: Mittelwert über viele Reaktionen oder fester Wert für jede Reaktion.

### Exp: $\rightarrow$ 1913 Millikan - Experiment

Kräfte:
Gewichtskraft:

$$\vec{F} = m \cdot \vec{g} = (\frac{4}{3}\pi r^3_{\text{tröpf}})\rho_{\text{Öl}}\vec{\rho} \downarrow$$

Elektrische Kraft:

$$\vec{F_{el}} = Q_{\text{tröpf}}\vec{E} \downarrow\uparrow$$

Auftrieb:

$$\vec{F_A} = -\frac{4}{3}\pi T^3_{\text{tröpf}}\rho_{\text{Luft}}\vec{g} \uparrow$$

Reibungskraft:

$$\vec{F_R} = -G\pi\eta_{\text{Luft}}\vec{v_{\text{tröpf}}} \uparrow\downarrow$$

Laminare Strömung
Da $r_{\text{tröpf}} \sim \lambda_{\text{frei}}$
$\rightarrow$ Conningham - Korrektur

$$F_R = 1 + \frac{\lambda_{\text{frei}}}{r_{\text{tropf}}}(A_1 + A_2 e^{-A_3} \frac{r_{\text{tropf}}}{\lambda_{\text{frei}}}$$

Luft: $A_1 = 1,257 A_2 = 0,4 A_3 = 1,1$

- Suche Tröpfchen
- Beobachtete Bewegung bei 2. Spannung
- Bestimme Sink- bzw. Steiggeschwingigkeit
- $\rightarrow r_{\text{tröpf}}$ und $Q_{\text{tröpf}}$

a) Suchmethode
   - sinken bei $0V = U$
   - Erhöhung von U bis Schwebung der Tropfen $\vec{v}_{\text{tropf}} = \vec{0}$

b) Steig-/Sink Methode
   - zwei Spannungen $U_c(> 0)$ Messe $\vec{r}_{\text{tropf}}$

Mathode a) (ohne Conningham Korrektur)
$U = 0V$,

$$|\vec{F}_G| = |\vec{F}_A| + |\vec{F}_R|$$

(Stationärer Zustand ($\vec{a} = \text{const}$))

$$\frac{4}{3}\pi\rho_{\text{Oel}} r_{\text{tropf}}^3 g = \frac{4}{3}\pi\rho_{Luft} r_{\text{tropf}}^3 g + 6\pi\eta_{\text{Luft}} + r|\vec{v}|$$

$$\Rightarrow r_{\text{tropf}} = \sqrt{\frac{9}{2g}\frac{\eta_{\text{Luft}} + |\vec{r}|}{\rho_{\text{Oel}} - \rho_{\text{Luft}}}}$$

Bei Schwebung:

$$U = 0V \quad |\vec{F}_G| = |\vec{F}_A| + |\vec{F}_{el}|$$

$$\frac{4}{3}\pi r^3 \rho_{\text{Oel}} g = \frac{4}{3}\pi r_\pi^3 \rho_{\text{Luft}} + Q_{\text{tropf}}\frac{U}{d}$$

d = Abstand Kondensatorplatten

$$Q\pi = \frac{4}{3}\pi g(\rho_{\text{Oel}} - \rho_{\text{Luft}}\frac{d}{U})$$

viele Tröpfchen $\rightarrow$ Statische Auswertung
Ergebnis von Millikan
Elektrische Ladung ist gequantelt $+-e; +-2e; \ldots$

$$e = 1.6021766208(88) \cdot 10^{-19} C$$

Erstmals gequantelte Größe
Drittelzahlige Ladungen der Quarks
Quarks sind Konstituenten von Protonen und Neutronen

Proton $p \widehat{=}$ (uud) Neutron $n \widehat{=}$ (udd)

$$Q_u = +\frac{2}{3}, Q_d = -\frac{1}{3} \Rightarrow Q_p = 1 Q_n = 0$$

$$Q_p + Q_e < 10{-}21e$$

aus Stabilität der Materie

underlineHistorisch:
$Q = 4,774 + -0,009 \cdot 10^{-10}$esu (Elactrostatic unit)
1 esu= $3,34 \cdot 10^{-10} C$
Millikans wert für Elementarladung:

$$\text{esu} \Rightarrow \text{SI} : e = 1,592 + -0,003 \cdot 10^{-19} C$$

„$5\sigma$“ - Effekt → Fehler unterschätzt.

## I.2 Kraft und Feld

### I.2.1 Coulomb - Gesetz

Elektrische Kraft zwischen zwei Körpern (punktförmig) mit Laungen $Q_1$ und $Q_2$ im Abstand r

$$\vec{F}_{el} = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2}, \quad \hat{r}_{12} = \frac{\vec{r}_{12}}{|\vec{r}_{12}|}$$

Kraft auf $Q_2$ von $Q_1$

### Exp: Coulomb - Waage

$k = 8,99 \cdot 10^9 \frac{\text{N m}^2}{C^2}$
für $Q_1 = Q_2 = 1C$, $r = 1m \Rightarrow |\vec{F}_{el}| 8,99 \cdot 10^9 N$ Im SI-System: $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ $\epsilon_0$
Dielektrizitätskonstante $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{12} \frac{e^2}{\text{Nm}^2}$
(cgs-System k = 1 ⇒ Umdefinition der Ladung)

$$\vec{F}_{el} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \hat{r}_{12}$$

Coulomb - Gesetz
Motivation der Abhängigkeit:

- $\sim Q_2$ Additivität der Ladungen
- $\sim Q_1$ „actio = reactio“
- $\sim \frac{1}{r^2}$ dreidimensionaler (für 4 Raumdimensionen wäre es $\sim \frac{1}{r^3}$ )

### I.2.2 Influez

Beobachtung: Ausschlag des Elektrometers ohne Berührung. Anhängig von der nähe des Stabes.
Erklärung: Kraft von $e^-$ auf dem Stab verdrängen die $e^-$ aus der Kugel in die Zeiger. $\Rightarrow$ Kugel positiv geladen, Zeiger negativ geladen

Influenz: Trennung von Ladungen in einem neutralen Körper.

In Metallen und Leitern sind die Elektronen (zu einem bestimmten vom Material abhängigen Grad) frei beweglich.
$Q_1 = Q_2$ da neutral

$$|\vec{F}_1| = k\frac{Q_1 Q}{r_1^2} \quad |\vec{F}_2| = k\frac{Q_2 Q}{r_2^2} \text{ da } r_1 < r_2 \quad |\vec{F}_1| > |\vec{F}_2|$$

Leiter angezogen
Nichtleiter:
Ladungen/Elektronen nicht Frei beweglich Verschiebung bei Polaren Molekülen. Wasser $H_2O$ $\alpha = 105$ $e^-$ vom H zum O verschoben $\rightarrow$ Dipol

### I.2.3 Das Elektrische Feld

Bisher: Kraft zwischen zwei Ladungen $q$ und $Q \rightarrow \vec{F}$
Frage : woher kennt $q$ die Existenz von $Q$ ?
$\rightarrow$ abstraktes Konzept: elektrisches Feld $\vec{F}$

- um jede Ladung $Q$ bildet sich ein Feld $\vec{E}$
- Probeladung $q$ spürt eine Kraft $\vec{F} = q\vec{E}$

Quantenelktrodynamik (QED):

- Anregung des Feldes = Photonen $\gamma$
- Kraft/Wechselwirkung = Austausch von $\gamma$

Pragmatisch: gegben: beliebige Ladungsverteilung wie sieht die Kraft auf eine pkt.förmige $q$ ? ($q$ klein $\rightarrow$ keine Verzerrung von $\vec{E}$)

$$\rightarrow \vec{E} = \frac{\vec{F}}{F_{\text{Probe}}} \quad \text{unabhängig von } q_{\text{Probe}}$$

El. Feld einer Pktladung

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_{\text{Punkt}}}{q_{\text{Probe}}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{Qq_{\text{Probe}}}{r^2 q_{\text{Probe}}}\hat{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{Q}{r^2}\hat{r}$$

Zsf:

- jede Ladung $Q$ von $\vec{E}$-Feld umgeben

- es gilt Superpositonsprinzip $\vec{E}_{Q_1+Q_2} = \vec{E}_{Q_1} + \vec{E}_{Q_2}$ folgt aus Addition von Kräften
- Nahwirkung der Kraft: Feld breitet sich mit Lichtgeschwindigkeit $c$ aus

Superposition:

- N Punktladungen $Q_i, i = 1, \dots, N$ $\qquad \vec{F} = \sum_{i=1}^{N} \vec{F}_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^{N} \frac{Q_i}{r_i^2} \hat{r}_i$

$$\Rightarrow \vec{E} = \sum_{i=1}^{N} \vec{E}_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^{N} \frac{Q_i}{r_i^2} \hat{r}_i$$

- kontinuierliche Ladungsverteilung $\rho(\vec{r})$
  Gesamtladung $Q = \int dV \rho(\vec{r}') \quad (dV = d\vec{r}'^3)$

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int d^3\vec{r}' \frac{\rho(\vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^2} \frac{\vec{r} - \vec{r}'}{|\vec{r} - \vec{r}'|}$$

Visualisierung:

a) Feldvektoren an vorgegebenen Gitterpunkten im Raume oft Vektor $\widehat{=}$ Projektion von $\vec{E}$ in Ebene

b) Feldlinien:
   - Tangenten $\widehat{=}$ Richtung von $\vec{E}$
   - Dichte der Linie $\widehat{=}$ Stärke $|\vec{E}|$

**Exp: Feldlinien**

- Feldlinien kreuzen sich nicht [Falls Kreuzung: dann 2 Felder $\vec{F}$ , 2 $\vec{E}$ in einem Punkt wid: Superpositionsprinzip ]
- Feldlinien $\perp$ orthogonal auf Oberfläche der Leiter
- keine Feldlinien innerhalb geschlossener Leiter

Elektrisches Feld im Leiter

- $e^-$ frei beweglich und sie stoßen sich ab
- „Kräftegleichgewicht“ wenn $e^-$ an der Oberfläche sitzen
- $\vec{E}, \vec{F} \perp$ Oberfläche
- $\vec{E}$-Feld im Inneren verschwindet

Kugel mit Radius:

$$\vec{E}(\vec{R}) = 0 \qquad |\vec{r}| < R$$

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} \hat{r} \qquad |\vec{r}| \geq R$$

pkt. förmige Ladung im Zentrum

Beliebige Flächen:
Approximation durch Ebenen und Kugelschalen Kugel:

$$|\vec{E}| \sim \frac{1}{r^2}$$

kleiner Krümmungsradius $\rightarrow$ großes $|\vec{E}|$
„Spitze“ $\rightarrow$ kleines r $\rightarrow$ großes $|\vec{E}| \rightarrow$ führt zur Entladungen

Faradaysche Becher:

- begränzte Ladungsaufnahme von außen

$\rightarrow$ Ladungen von innen aufbringen

Feldberechnung:

1) homogen geladener Ring Radius R, Dicke vernachlässigbar
   - $\lambda = \frac{Q}{2\pi R}$ $\quad [\lambda] = \frac{C}{m}$ Linienladungsdichte
   - gesucht: $\vec{E}(a)$ auf Symmetrieachse (y=z=0)
   - Symmetrie: $\vec{E}(a) = E\vec{e}_x$ [andere Komponenten kompensieren sich]
   - Element auf Ring trägt Ladung $\lambda dx$, liefert Feldbeitrag

$$dE_x = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{1}{r^2}\cos\phi dQ$$

   - Es gilt:

$$E_x = \cos\phi|\vec{E}| \qquad \cos\phi = \frac{a}{r} \qquad r = \sqrt{R^2 + a^2}$$

   - Integration über Ring in Polarkoordinaten

$$\begin{aligned} E_x &= \int_{\text{Ring}} dQ \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{1}{r^2}\cos\phi \\ &= \int_{\text{Ring}} dQ \end{aligned}$$

$$\int_{\text{Ring}} dQ \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{1}{R^2+a^2}\frac{a}{\sqrt{R^2+a^2}} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0}\frac{a}{(R^2+a^2)^{(\frac{3}{2})}}$$

$$\begin{aligned} \text{große Entfernung: } a \gg R: &\qquad E_x \sim \frac{1}{a^2} \text{ wie Pkt.ladung} \\ \text{Nähe des Rings: } a \sim R: &\qquad \text{langsamer Anstieg von} \\ &\qquad |\vec{E}| \text{ als für Pkt.ladung} \\ a = 0: &\qquad E_x = 0 \text{ aus Symmetrie} \end{aligned}$$

2) unendlich dünne, unendlich ausgedehnte leitende Platte
   Ladungsflächendichte $\sigma$ $\quad [\sigma] = \frac{C}{m^2}$

– Symmetrie: $\vec{E} = \vec{E}_z \vec{e}_z \perp$ auf Platte

$$Q = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{V Platte} d^3\vec{r}\; \rho(\vec{r})$$

$$\begin{aligned}\vec{E}(\vec{r}) &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{V Platte} d^3\vec{r}\; \frac{\rho(\vec{r})}{r^2}\hat{r} \qquad \hat{r} \perp Platte \\ &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{A Platte} d^2\vec{r}\; \frac{\sigma}{r^2}\hat{r}\end{aligned}$$

– Es gilt: $E_z = \cos\beta |\vec{E}| \qquad \cos\beta = \frac{a}{d}$
Integration in kleinen Ringen bzw. Polarkoordinaten ($dA = r\; dr\; d\varphi$)

$$E_z(a) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_0^\infty dr \int_0^{2\pi} d\varphi\; r \frac{\sigma}{a^2} \cos\beta$$

$$= \frac{\sigma}{4\pi\epsilon_0 a^2} \int_0^\infty dr \int_0^{2\pi} d\varphi \cos^3\beta$$

mit

$$r = a\tan\beta \qquad dr = \frac{a}{\cos^2\beta} d\beta$$

$$\begin{aligned} r = 0 &\widehat{=} \beta = 0 \\ r = \infty &\widehat{=} \beta = \frac{\pi}{2}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}E_z(a) &= \frac{\sigma}{4\pi\epsilon_0 a^2} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\frac{\pi}{2}} a^2 \sin\beta\; d\beta \\ &= \frac{\sigma}{2\epsilon_0} (-\cos\beta) \Big|_0^{\frac{\pi}{2}} \\ &= \frac{\sigma}{2\epsilon_0}\end{aligned}$$

– homogenes Feld in z-Richtung (d.h. senkrecht $\perp$ zur Platte)

### I.2.4 Das elektrische Potential

- Bewegung von Ladung im elektrischen Feld

$$W = -\int\limits_{Weg} \vec{F}\; d\vec{s} = -q \int\limits_{Weg} \vec{E}\; d\vec{s}$$

$W > 0$ : von außen gegen $\vec{E}$-Feld verrichten
$W < 0$ : Feld verrichtet Arbeit Charakteristik der Feldes: Arbeit pro Einheitsladung

$$\frac{W}{q} = -\int\limits_{Weg} \vec{E}\; d\vec{s}$$

- Arbeit im Feld einer Punktladung $\vec{E} \perp d\vec{s}$ keinen Beitrag

$$\frac{W_{ACB}}{q} = -\int_A^C |\vec{E}| ds = -\frac{1}{a\pi\epsilon_0}\int_{r_A}^{r_C} \frac{Q}{r^2} dr = -\frac{1}{a\pi\epsilon_0}(-\frac{Q}{r})\Big|_{r_A}^{r_C} = -\frac{Q}{a\pi\epsilon_0}(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_C})$$

analog:

$$\frac{W_{ADB}}{q} = -\int_D^B |\vec{E}| ds = -\frac{Q}{a\pi\epsilon_0}(\frac{1}{r_D} - \frac{1}{r_B})$$

$$r_A = r_D \quad r_B = r_C \Rightarrow \frac{W}{q} \text{ auf beiden Wegen gleich}$$

$$\Rightarrow \oint_{\text{geschlossenem Weg}} \vec{E}\, d\vec{s} = 0 \quad W \text{ unabh. von Weg}$$

$+$ Superpositionsprinzip $\Rightarrow$ Arbeit auf einem geschlossenen Weg verschwindet (i.e $= 0$)
Erlaubt Definition der potentiellen Energie

$$E_{pot}(\vec{r}) = -\int_{\vec{r}_0}^{\vec{r}} \vec{E}\, d\vec{s}$$

$\vec{r}_0$ ist ein Bezugspunkt (Referenzpunkt) oft im unendlichen da ($\vec{E}(|\vec{r}| \to \infty) \to 0$)
In Praxis: nur

$$\Delta E_{pot} = E_{pot}(\vec{r}_2) - E_{pot}(\vec{r}_1)$$

relevant.
Normierung von $E_{pot}$ auf im Feld bewegte Ladung: el. Potential

$$\varphi(\vec{r}) - \varphi(\vec{r}_0) = \int \vec{E}\, d\vec{s} \text{ oft } \phi(\vec{r}_0) = 0$$

Für Punktladung Q $\vec{r}_0 \to \infty : \varphi(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{Q}{|\vec{r}|}$

- Superpositionsprinzip:

  i) N Punktladungen $Q_i$ bei $\vec{r}_i$

  $$\varphi(\vec{r}) = \sum_{i=1}^{N} \varphi_i(\vec{r}) = \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{Q_i}{|\vec{r} - \vec{r}_i|}$$

  Potential ist Skalarfeld $\to$ Rechnungen oft einfacher graphische Darstellung mittels Äquipotentialflächen:
  (auf diesen gilt $\varphi(\vec{r}) = const$)

  * für Pkt. Ladung: Äquipotentialflächen $=$ Kugelschalen
  * Feldlinien / $\vec{E}$-Feld $\perp$ Äquipotentialflächen
  * Bewegung in Äquipotentialflächen $\to$ keine Arbeit wird verrichtet

Zusammenhang el. Feld $\vec{E}$ und Potential $\varphi$ Wir hatten:

$$\varphi(\vec{r}) = -\int_{\vec{r}_0}^{\vec{r}} \vec{E}\, d\vec{s} \qquad \varphi(\vec{r}_0) = 0$$

Ist dies umkehrbar?

a) infinitesimaler Weg dx, Probeladung q

$$\begin{aligned} dW &= -q[\varphi(x,y,z) - \varphi(x+dx,y,z] \\ &= q\frac{\varphi(x+dx,y,z) - \varphi(x,y,z)}{dx}dx \\ &= q\frac{\partial\varphi(x,y,z)}{\partial x}dx \end{aligned}$$

b)

$$dW = -q\vec{E}(\vec{r})\, d\vec{s} \qquad d\vec{s} = \begin{pmatrix} dx \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = -qE_x\, dx$$

Vgl:

$$E_x = -\frac{\partial\varphi}{dx}$$

analog zu Bewegung in y- und in z-Richtung

$$\begin{aligned} \vec{E}(\vec{r}) &= \Big(-\frac{\partial\varphi}{\partial x}\vec{e}_x\Big) + \Big(-\frac{\partial\varphi}{\partial y}\vec{e}_y\Big) + \Big(-\frac{\partial\varphi}{\partial z}\vec{e}_z\Big) \\ &= -\text{grad}\ \varphi(\vec{r}) = -\vec{\nabla}\varphi(\vec{r}) \end{aligned}$$

$$\vec{\nabla} = \begin{pmatrix} \frac{\partial\varphi}{\partial x} \\ \frac{\partial\varphi}{\partial y} \\ \frac{\partial\varphi}{\partial z} \end{pmatrix}$$

Elektrostatik: äquivalente Beschreibung durch entweder $\vec{E}$-Feld oder $\varphi$

Wirbelfreiheit von $\vec{E}$ Rotation von

$$\begin{aligned} \vec{E}:\ rot(\vec{E}) &= \vec{\nabla}\times\vec{E} \\ &= \Big(\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z}\Big)\vec{e}_x + \Big(\frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x}\Big)\vec{e}_y + \Big(\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y}\Big)\vec{e}_z \end{aligned}$$

da $\vec{E} = \text{grad}\varphi$ und

$$\frac{\partial^2\varphi}{\partial y\partial x} = \frac{\partial^2\varphi}{\partial x\partial y}$$

Partielle Ableitungen vertauschbar

$$\Rightarrow \quad \mathrm{rot}\vec{E} = -\mathrm{rot}(\mathrm{grad}\varphi) = \vec{0}$$

$\vec{E}$-Felder in Elektrostatik sind Wirbelfrei
Zusammenhang: mit Stokesschem Satz

$$\int\limits_A \vec{\nabla} \times \vec{V}(\vec{r})\, d\vec{A} \oint\limits_{S=dA} \vec{V}(\vec{r})\, d\vec{s} \qquad \vec{V}(\vec{r})\text{Vetorfeld}$$

hier

$$\int_A rot(\vec{E})\, d\vec{A} \oint_{\delta A} \vec{E}\, d\vec{s} \overset{\text{Elektrostatik}}{=} 0$$

Bedeutung: wirbelfrei bzw. keine geschlossenen Feldlinien
Beispiele Potentialberechung:

1) Potential eines homogenen ringförmigen Leiters. Beitrag $d\varphi$ aus $dQ$ auf Ring

$$d\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{1}{r}\, dQ$$

Aus Abbildung: $r = \sqrt{R^2 + a^2}$

$$\varphi(a) = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0}\frac{1}{\sqrt{R^2 + a^2}}$$

da $r = const$ auf x-Achse
für $a \gg R \quad \varphi(a) = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0}\frac{1}{a}$ Potential einer Pkt. Ladung

$$E_x = -\frac{\partial\varphi(a)}{\partial a} = -\frac{\partial\varphi(x)}{\partial x} = -\frac{Q}{4\pi\epsilon_0}\frac{1}{(R^2 + a^2)^{\frac{3}{2}}}(-\frac{1}{2})2a = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{Qa}{(R^2 + a^2)^{\frac{3}{2}}}$$

2) Beispiel 2: leitende Kugel Radius R

$$\varphi(a) = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0}\frac{1}{a} \qquad a \geq R$$

$$\varphi(a) = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0}\frac{1}{R} = \text{const.}$$

$$\begin{aligned} \rightarrow \vec{E} = -\mathrm{grad}\varphi &= \frac{Q}{4\pi\epsilon_0}\frac{1}{a^2}\vec{e}_R \qquad a \geq R \\ &= 0 \Rightarrow \qquad a < R \end{aligned}$$

Bisher: $\varphi(\vec{r})$ aus $\rho(\vec{r})$ via Poisson-Integral teilweise $\rho(\vec{r})$ nicht bekannt, aber Randbedingungen $\varphi(\vec{r}) = 0$ auf Leiteroberfläche. ($\rho(\vec{r})$ kann komlex sein)
$\Rightarrow$ Randwertproblem (Theo II.)

„Einfaches“ Beispiel mit Methode der Spiegelladung

Platte geerdet $\varphi(x,y,z) \stackrel{!}{=} 0$ Punktladung $q_1$ bei $\vec{r} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ z_1 \end{pmatrix}$

Realisierung der Randbedingungen durch Spiegelladung $q_2$
Brauche: $\varphi(x,y,z=0) = 0$
Superposition $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2$
$\Rightarrow q_2 = -q_1 \quad z_2 = -z_1$ erfüllen Randbedingung

$$\varphi(\vec{r}) = \frac{a_1}{4\pi\epsilon}\{\frac{1}{|\vec{r}-\vec{r}_1|} - \frac{1}{|\vec{r}-\vec{r}_2|}\}$$

$\vec{E}$-Feld aus $-\vec{\nabla}^2\varphi$

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{a_r}{4\pi\epsilon_0}\left\{\frac{\vec{r}-\vec{r}_1}{|\vec{r}-\vec{r}_1|^3} - \frac{\vec{r}-\vec{r}_2}{|\vec{r}-\vec{r}_2|^3}\right\}$$

für z=0 : $E_x = E_y = 0 \quad \vec{E} \perp (x,y)$-Ebene
Flächenladungsdichte: $\sigma \quad [\sigma] = \frac{C}{m^2}$ Später: $\sigma = 2\epsilon_0 E_z$

$$\sigma = -\frac{q_1}{2\pi}\frac{z_1}{(x^2+y^2+z_1^2}$$

$$\vec{r}_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ z_1 \end{pmatrix}$$

### I.2.5 Der elektrische Fluss

Elektrischer Fluss $\Phi$ ist ein Maß für die dichte der el. Feldlinien. Er ist definiert für eine gegebene Fläche A.

$$\Phi_A = \int_A \vec{E}\, d\vec{A} \qquad \vec{A} = \text{infinitisimaler Normalvektor}$$

$$\vec{A} \perp \text{ Fläche}$$

offene Fläche: Orientierung beliebig
geschlossene Fläche: Orientierung nach außen
Fluss durch geschlossene Fläche
Bsp: Würfel im Plattenkondensator (Abb.) nur Beiträge von linker und rechter Fläche

$$\Phi = \Phi_l + \Phi_r = \vec{E}\vec{A}_l + \vec{E}\vec{A}_r = 0$$

$$\vec{A}_l = -\vec{A}_r$$

Superposition bzw. Approximation von Körper durch inf. Würfel $\Rightarrow$ Fluss durch geschlossene Oberfläche im homogenen Feld verschwindet.
Bsp: Kugelschale

$$\vec{A}(r) = 4\pi r^2 \vec{e}_R \begin{cases} + & \text{für äußere} \\ - & \text{für innere} \end{cases}$$

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0}\frac{1}{r^2}$$

$$\left|\vec{E}(\vec{r}) * \vec{A}(\vec{r})\right| = \text{ const}$$

$$\Phi = \Phi(r_1) + \Phi(r_2) = + \text{ const} - \text{ const} = 0$$

In elektrischen Feldern (wenn keine Ladungen im Volumen) $\Rightarrow$ Fluss durch geschlossene Oberfläche verschwindet.

### I.2.6 Quellstärke des elektrischen Feldes

$\Phi_A \neq 0$ wenn Ladungen innerhalb geschlossener Oberfläche. Bsp: Kugel mit Radius R. Pkt.Ladung im Ursprung $s\vec{A}$ und $\vec{E}$ radial nach außen $\sim \vec{e}_r$

$$\Phi = \oint_{\text{R = const}} \vec{E}\, d\vec{A} = \underbrace{\frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{Q}{R^2}}_{|\vec{E}|}\underbrace{4\pi R^2}_{A} = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

Ergebnis unabhängig von:

- Form der Oberfläche
- Position der Ladung innerhalb der Oberfläche

Mehrere Ladungen $Q_i$ aus Superposition der $\vec{E}_i$

$$\Phi = \oint (\sum_i \vec{E}_i)\, d\vec{A} = \frac{\sum_i Q_i}{\epsilon_0}$$

„externe“ $Q_i$ liefern keinen Beitrag
Es gilt:

$$\Phi = \oint \vec{E}\, d\vec{A} = \frac{Q_{ein}}{\epsilon_0}$$

Gaußsches Gesetz (Integralform)
Mit Gaußschen Satz : Oberflächen- $\rightarrow$ Volumenintegral

$$\oint_A \vec{E}\, d\vec{A} = \int_V \text{div}\vec{E}\, d\vec{V} \quad \text{mit} \quad Q_{ein} = \int_V \rho(\vec{r})\, dV$$

$$\int_V \text{div}\vec{E}\, dV = \frac{1}{\epsilon_0}\int_V \rho(\vec{R})\, dV$$

gültig für beliebige Volumen
$\Rightarrow \text{div}\vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$ differentielle Form des Gaußschen Gesetzes
Ladungen die Quellen ($\rho > 0$) bzw. Senken $\rho < 0$) des elektrischen Feldes sind.

### I.2.7 Maxwell-Gleichungen

für statische (unbewegte) Ladungen Integral- und Differentialform

$$\begin{array}{lll} 1. & \oint \vec{E}\, d\vec{s} = 0 & rot\vec{E} = \vec{0} \text{ Wirbelfrei} \\ 3. & \oint \vec{E}\, d\vec{A} = \frac{Q_{ein}}{\epsilon_0} & div\vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \text{ Quellen/Senken} \end{array}$$

1. gilt allgemein in Zentralkraftfeldern d.h. $\rho(\vec{r}) \sim |\vec{r}|$
3. gilt nur für $\varphi \sim \frac{1}{|\vec{r}|} |\vec{E}| \sim \frac{1}{|\vec{r}|^2}$ im 3-dimensionalen Raum

MW-Gleichungen sind Axiome der Elektrostatik d.h. $F_{coulomb}$ ableitbar
betrachte Ladungen $Q_1 = Q_{ein}$
1.Gl:

$$\oint_A \vec{E}\, d\vec{A} = \frac{Q_1}{\epsilon_0}$$

$$|\vec{E}(r)| 4\pi r^2 = \frac{Q_1}{\epsilon_0}$$

Kraft auf Ladung $Q_2$: $\vec{F}_{Q_2} = \vec{E}_{Q_1} \cdot Q_2$

$$|\vec{F}_{Q_2}| = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r^2}$$

□

Bsp.: homogene geladene Kugel, Radius R, $\rho(\vec{r}) = \text{const} \quad |\vec{r}| \leq R$

$$Q_{ges} = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho$$

Symmetrie: $\vec{E} = |\vec{E}|\vec{e}_r$ radial $|\vec{E}| = E_r$

$|\vec{r}| \geq R$:

$$\Phi = \oint_A \vec{E}\, d\vec{A} = \int_A E_r\, dA = E_r 4\pi r^2 \overset{!}{=} \frac{Q_{ein}}{\epsilon_0}$$

$$E_r = \frac{\rho_0 R^3}{\epsilon_0 3 r^2}$$

wie bei Punktladung

$|\vec{r}| \leq R$:

$$Q_{ein} = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho \qquad \Phi = \frac{Q_{ein}}{\epsilon_0}$$

$$E_r = \frac{\rho_0 r}{3\epsilon_0}$$

linearen Anstieg

Potential $\varphi(\vec{r})$:
$\varphi(r_0 = \infty) = 0$

$$\varphi(r) = -\int_{\infty}^{r} \vec{E}\, d\vec{r} \overset{(r \geq R)}{=} -\int_{\infty}^{r} \frac{\rho R^3}{\epsilon_0 3 r'^2}\, dr' = \int_{r}^{\infty} \frac{\rho}{\epsilon_0} \frac{R^3}{r'^2}\, dr' = \frac{\rho R^3}{\epsilon 3 r}$$

$$(\frac{\partial(\hat{r})}{\partial r} = -\frac{1}{r^2})$$

Innenraum: $(r \leq R)$

$$\varphi(r) = -\int \frac{\rho r'}{3\epsilon_0}\, dr' = -\frac{1}{2}\frac{\rho_0}{\epsilon_0}\frac{r^2}{3} + \text{const}$$

Wähle c so, dass $\varphi$ stetig bei $r = R$ ist
$\rightarrow c = \frac{R^2 \rho}{2\epsilon_0}$

$$\varphi(r) = \frac{R^2\rho}{2\epsilon_0}(1 - \frac{r^2}{3R^2}) \quad \text{für } r \leq R$$

<u>Maxwell-Gl. und Potential $\phi$</u>

$$\vec{E} = -\text{grad}(\varphi)$$

1. Gl

$$\text{rot}\vec{E} = -\text{rot}(\text{grad}\varphi) \overset{linear}{=} 0$$

da rot$\vec{E} = 0$ können wir $\vec{E}$ als grad$\varphi$ schreiben
3. Gl

$$\text{div}\vec{E} = \text{div}(-\text{grad}\phi) = -[\frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2}] = -\Delta\phi$$

$$\rightarrow -\Delta\phi = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

Poisson-Gl. ($\rho = 0$ Laplace-Gl.)
Poisson-Gl. äquivalent zu beiden Maxwell-Gl.
MW-Gl: 2 Gl. erster Ordnung in Ableitungen $(\frac{\partial}{\partial x}, \dots)$
Poisson-Gl: 1.Gl. zweiter Ordnung in Ableitung $(\frac{\partial^2}{\partial x^2}, \dots)$

## I.3 Multipole

- für beliebige Ladungsverteilung $\rho(\vec{r})$ ist

  $$\Phi(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\int d^3\vec{r'}\,\frac{\rho(\vec{r}\,')}{|\vec{r} - \vec{r'}|}$$

  komplex i.a.

- oft interessiert nur Fernfeld $\rho(\vec{r}), \vec{E}(\vec{r}), |\vec{r}| \gg |\vec{r'}|$ mit $\rho(\vec{r'}) = 0$ Abstand $\gg$ Ausdehnung der Ladungsverteilung

- Approximation von $\rho(r)$ in Taylor-Entwicklung
  $\rightarrow$ Multipolentwicklung

$$\rho(\vec{r}) = \underbrace{\frac{a}{T}}_{Monopol} + \underbrace{\frac{b}{T^2}}_{Dipol} + \underbrace{\frac{c}{T^3}}_{Quadropol} + \dots$$

Monopol

$$\vec{E}_{Mono}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{Q}{r^2}\hat{r} \qquad \rho_{Mono}(\vec{r}) = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0}\frac{1}{r}$$

dominiert für $r \to \infty$ wenn $Q_{ges} \neq 0$

$$Q_{Mono} = \sum_{i=1}^{N} Q_i \text{ Pkt. Ladungen} \qquad Q_{Mono} = \int d^3\vec{r}\rho(\vec{r})$$

$Q_{Mono}$ bei $\vec{r}_s$ Ladungsschwerpunkt platzieren

$$\vec{r}_s = \frac{\sum_i |Q_i|\vec{r}_i}{\sum_i |Q_i|}$$

$$\vec{r}_s = \frac{\int |\rho(\vec{r})|\vec{r}d^3\vec{r}}{\int |\rho(\vec{r})|d^3\vec{r}}$$

Dipol

zwei entgegengesetzte, gleich große Ladungen $Q > 0$ im Abstand $d = |\vec{d}|$. Richtung von $\vec{d}$ von -Q nach +Q

$$\vec{r}_- = \vec{r}_0 - \frac{\vec{d}}{2} \qquad \vec{r}_+ = \vec{r}_0 + \frac{\vec{d}}{2}$$

Potential $\varphi(\vec{r})$ aus Superposition

$$\varphi_{Dipol}(\vec{r}) = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0}\left\{\frac{1}{|\vec{r}_0 - \frac{\vec{d}}{2}|} - \frac{1}{|\vec{r}_0 - \frac{\vec{d}}{2}|}\right\}$$

für $(|\vec{r}_0| \gg |\vec{d}|)$ nutze Näherung

$$\frac{1}{|\vec{r}_0 \pm \frac{\vec{d}}{2}|} = \frac{1}{\sqrt{\vec{r}_0^2 \pm r_0\vec{d} + \frac{\vec{d}^2}{4}}} = \frac{1}{|\vec{r}_0|}\frac{1}{\sqrt{1 \pm \frac{r_0\vec{d}}{|\vec{r}_0|^2} + \frac{\vec{d}^2}{4\vec{r}_0^2}}} = \frac{1}{|\vec{r}_0|}\left(1 \mp \frac{\vec{r}_0\vec{d}}{\vec{r}_0^2}\right)$$

$$\varphi_{Dipol} \sim \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r}\frac{\vec{r}\vec{d}}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{\vec{p}\,\vec{r}}{r^2}$$

$\vec{p} = Q\vec{d} = [\vec{p}] = c_m$ Dipolmoment

$$\varphi_{Dipol}(\vec{r}) = \frac{Qd}{4\pi\epsilon_0}\frac{\cos\theta}{r^2} \qquad \theta = \angle(\vec{d}, \vec{r})$$

- Potential richtungsabhängig $\sim \cos\theta$
  maximal entlang $\vec{d}$ verschwindend $\perp \vec{d}$
- $\varphi \sim \frac{1}{r^2} \Rightarrow$ Erwartung $|\vec{E}| \sim \frac{1}{r^3}$

Bestimmung des $\vec{E}$-Feldes

$\vec{d}$ entlang z-Achse

Geometrie $\to$ Zylindersymmetrie des Feldes, d.h. keine Abhängigkeit vom Azimutalwinkel $\phi$

$$\vec{E}(\vec{r}) = -\vec{\nabla}\varphi(\vec{r}) = -\frac{\partial\varphi}{\partial r}\vec{e}_r - \frac{1}{r}\frac{\partial\varphi}{\partial\theta}\vec{e}_\theta = \frac{1}{r\sin\theta}\underbrace{\frac{\partial\varphi}{\partial\phi}}_{\varnothing}\vec{e}_\varphi$$

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 r^3}\ |\vec{p}|\ (2\cos\theta\vec{e}_r + \sin\theta\vec{e}_\theta)$$

- für N Punktladungen $\vec{p} = \sum_i Q_i\vec{r}_i$
- für Ladungsverteilung $\vec{p} = \int d^3\vec{r}\ \rho(\vec{r})\vec{r}$

$\vec{p}$ abhängig von Wahl des Koordinatenursprungs

Bsp.: Pkt.Ladung bei $\vec{r}_0 \Rightarrow \begin{cases} \text{i)} & \vec{r}_0 = \vec{0} \quad \text{dann} \quad \vec{p} = \vec{0} \\ \text{ii)} & \vec{r}_0 \neq \vec{0} \quad \text{dann} \quad \vec{p} \neq \vec{0} \end{cases}$

Konvention: Ursprung bei $\vec{r}_s$ Ladungsschwerpunkt

- punktsymmetrische Ladungsverteilung $\rho(\vec{r}) = \rho(-\vec{r})$ gilt $\vec{p} = \vec{0}$
- wenn $Q_{ges} = 0$ dann $\vec{p}$ unabhängig von Ursprung

### I.3.1 Kräfte auf Dipol

a) homogenes $\vec{E}$-Feld (Bsp. Plattenkondensator)
Beobachtung: Dipol richtet sich im Kondensator wie erwartet aus: Plus zu Minus, Minus zu Plus
Kraft:

$$\vec{F}_{ges} = Q\vec{E} + (-Q)\vec{E} = \vec{0}$$

$\rightarrow$ keine Translation
Drehmoment:

$$\begin{aligned} \vec{T}_{ges} &= \sum_{i=1}^{2} \vec{r}_i \times \vec{F}_i \\ &= \frac{\vec{d}}{2} \times Q\vec{E} + \frac{-\vec{d}}{2} \times (-Q\vec{E}) = Q\vec{d} \times \vec{E} \end{aligned}$$

$$\vec{T}_{ges} = \vec{p} \times \vec{E}$$

$\vec{p} \perp \vec{E} \quad \vec{T}$ Maximal
$\vec{p} \parallel \vec{E} \quad \vec{T}$ verschwindet
$\rightarrow$ Ausrichtung im $\vec{E}$-Feld
Potentiellen Energie:

$$\begin{aligned} E_{Dip} &= Q\varphi(\vec{r}_1) - Q\varphi(\vec{r}_2) \\ \varphi(\vec{r}_1) - \varphi(\vec{r}_2) &= \vec{\nabla}\varphi(\vec{r})\vec{d} = -\vec{E}\vec{d} \\ E_{Dip} &= -Q\vec{E}\vec{d} = -\vec{p}\vec{E} \end{aligned}$$

$p \uparrow\uparrow E$ minimiert $E_{Dip} \quad \rightarrow$ Richtung von $\vec{p}$ im $\vec{E}$

b) inhomogenes $\vec{E}$-Feld
zusätzliche Kraft:

$$\vec{F}_{ges} = Q\vec{E}(\vec{r}+\vec{d}) - Q\vec{E}(\vec{r})$$

$$\vec{E}(\vec{r}+\vec{d}) \overset{\text{Taylor-Entwicklung}}{=} \vec{E}(\vec{r}) + (\vec{d}\cdot\nabla)\vec{E}(\vec{r})$$

$$\vec{F}_{ges} = Q(\vec{q}\cdot\nabla)\vec{E}(\vec{r}) = (\vec{p}\cdot\nabla)\vec{E}(\vec{r})$$

i) Ausrichtung von Dipol durch $\vec{T}_{ges}$

ii) Bewegung ins Gebiet höherer Feldstärke $\vec{E}$

### I.3.2 Quadrupol

- vier Ladungen $2: +Q$, $2: -Q$ , jeweils im Abstand $d$
- zwei Dipole $\vec{p}$ bei $(x,z) = (\frac{d}{2}, 0)$ $\quad -\vec{p}$ bei $(x,z) = (-\frac{d}{2}, 0)$

$$\varphi_{Dipol} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{\vec{p}\vec{r}}{r^3} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{p\cos\theta}{r^2} \qquad \vec{r}_s = \vec{0} \quad \theta = \angle(\vec{r}, \vec{e}_z)$$

$$\varphi_{Quadrupol} = \varphi_{oben}(\vec{r} - \frac{\vec{d}}{2}) - \varphi_{unten}(\vec{r} + \frac{\vec{d}}{2})$$

für $|\vec{d}|$ klein :

$$\approx -d\frac{\partial}{\partial x}\varphi_{Dipol}(\vec{r})$$

$$\frac{\partial}{\partial x}\varphi_{Dipol} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\Big[-2\frac{p\cos\theta}{r^3}\frac{\partial r}{\partial x} - \frac{p\sin\theta}{r^2}\frac{\partial\theta}{\partial x}\Big]$$

Kettenregel:

$$\frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial r}{\partial x}\frac{\partial}{\partial r} \qquad \frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial\theta}{\partial x}\frac{\partial}{\partial\theta}$$

Kugelkoordinaten:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r\sin\theta\cos\phi \\ r\sin\theta\sin\phi \\ r\cos\phi \end{pmatrix}$$

$$\frac{\partial r}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x}\sqrt{x^2+y^2+z^2} = \frac{1}{r^2}2x = \frac{x}{r} = \sin\theta\cos\phi$$

$$\frac{\partial\cos\theta}{\partial x} = -\frac{1}{r}\sin\theta\sin\phi\cos\phi$$

$$\varphi_{Quadrupol}(\vec{r}) = -\frac{|\vec{p}||\vec{d}|}{4\pi\epsilon_0}\Big\{-\frac{2\cos\theta}{r^3}\sin\theta\cos\phi - \frac{\sin\theta}{r^2}\frac{1}{r}\cos\theta\cos\phi\Big\}$$

$$= \frac{3|\vec{p}||\vec{d}|}{4\pi\epsilon_0 r^3}\cos\theta\sin\theta\cos\varphi$$

$$Q_{Mono} = 0 \quad \vec{p}_{gesamt} = \vec{0}$$

Fernferld:

$$\varphi(\vec{r}) \sim \frac{1}{r^3} \quad \text{bzw.} \quad \vec{E}(\vec{r}) \sim \frac{1}{r^4}\vec{e}_R$$

Bsp.: linearer Quadrupol

$$\varphi_{Quad}^{lin} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{|\vec{a}|^2 Q}{r^3}(3\cos^2\theta - 1)$$

**Kraft und Elektrische Energie des Quadrupols**

- homogenes Feld: $\vec{F}_{ges} = \vec{0} \quad ; \quad \vec{T}_{ges} = \vec{0}$
- inhomogenes Feld : komplexe $\vec{F}_{ges}$ , $\vec{T}_{ges}$

Elektrische Energie

$$E_{el} = \sum_{i=1}^{4} Q_i \varphi_{ext}(\vec{r}_i) \quad \text{(eine kleine Rechnung)}$$

$$E_{el} = Q|\vec{d}|^2 \frac{\partial^2 \varphi_{ext}}{\partial x \partial y} = \frac{1}{3}\hat{Q}_{xy}\frac{\partial^2 \varphi_{ext}}{\partial x \partial y}$$

$$\hat{Q}_{x_1} = 3Q|\vec{d}|^2 \text{ Quadrupol}$$

allgemein gilt : für $x_1 \widehat{=} x, x_2 \widehat{=} y, x_3 \widehat{=} z$

$$E_{el} = \frac{1}{6}\sum_{i,j=1}^{3} \hat{Q}_{ij}\frac{\partial^2 \varphi_{ext}}{\partial x_i \partial x_j}$$

$$\hat{Q}_{ij} = \int d^3\vec{r}\{3x_i x_j - |\vec{r}|^2 \delta_{ij}\}\rho(\vec{r})$$

Tensor 2. Stufe $i, j = 1 \rightarrow 3$
für N Punktladungen :

$$\hat{Q}_{ij} = \sum_{k=1}^{N}(3x_i x_j)_n - |\vec{r}|^2 \delta_{ij} \qquad \delta_{ij} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$E_{el}$ in Multipolentwicklung

$$\begin{aligned} E_{el} &= Q_{ges}\varphi_{ext}(\vec{r}) + \sum_{i=1}^{3} p_i \frac{\partial \varphi_{ext}}{\partial x_i} + \frac{1}{6}\sum_{i,j=1}^{3} \hat{Q}_{ij}\frac{\partial^2 \varphi_{ext}}{\partial x_i \partial x_j} \\ &= Q_{Mono}\varphi_{ext}(\vec{r}) + \underbrace{\vec{p}\,\vec{\nabla}\varphi_{ext}(\vec{r})}_{Dipolanteil} + \underbrace{\frac{1}{6}\sum_{i,j=1}^{3} \hat{Q}_{ij}\frac{\partial^2 \varphi_{ext}}{\partial x_i \partial x_j}}_{Quadrupolanteil} \end{aligned}$$

Bem.: $\vec{p}, \hat{Q}$ abhängig von Wahl des Koordinatensystems

## I.4 Elektrostatische Energie und Kapazität

### I.4.1 Spannung

Erinnerung:

$$\varphi(\vec{r}) = \frac{\text{“}W(\vec{r}_0 \to \vec{r})\text{“}}{q} = \int_{\vec{r}_0}^{\vec{r}} \vec{E}\, d\vec{s} + \varphi(\vec{r}_0)$$

$\vec{r}_0$ Bezugspunkt
Spannung U als Potentialdifferenz zwischen $\vec{r}_A$ und $\vec{r}_B$

$$U_{ba} = \varphi(\vec{r}_B) - \varphi(\vec{r}_A) = \int_{\vec{r}_A}^{\vec{r}_B} \vec{E}\, d\vec{s} \quad \text{unabhängig von} \vec{r}_0$$

$$[U] = 1V = 1\frac{J}{C}$$

### I.4.2 Kapazität

- alle Potentiale $\sim$ Ladung: $\varphi(\vec{r}) \sim Q$
  N Punktladungen

  $$\varphi(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^{N} \frac{Q_i}{|\vec{r} - \vec{r}_i|}$$

  für $Q_i \to zQ_i$ gilt $\varphi(\vec{r}) \to z\varphi(\vec{r})$
  Es folgt: $U = \frac{1}{C}Q$ C Kapazität $[C] = 1F(Farad) = a\frac{C}{V}$
  typische Werte für C: pF bis mF $(10^{-12}F - 10^{-3}F)$ Bei gegebener Spannung U ist die Kapazität C ein Maß dafür wieviel Ladung eine Konfiguration von Leitern aufnehmen kann

- C abhängig von Geometrie der Leiter
  Beispiele:

  a) homogene Kugel Radius R, Ladung Q

  $$\varphi(\vec{r}) = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0}\frac{1}{r} \quad r_0 = \infty \quad \varphi(\vec{r}_0) = 0$$

  $$U(R) = \varphi(R) - \varphi(\infty) = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0}\frac{1}{R}$$

  $$C_{Kugel} = 4\pi\epsilon_0 R$$

  b) Plattenkondensator (homogenes Feld)

  $$\vec{E} = \frac{\sigma}{\epsilon_0}\vec{e}_z \qquad \sigma = \frac{Q}{A} \quad \text{Flächenladungsdichte}$$

  $$\varphi(\vec{r}) = \int_{z=0}^{z} \vec{E}\, d\vec{z} = \frac{1}{\epsilon_0}\frac{Q}{A}z \qquad \varphi(z=0) = 0$$

  $$U = \varphi(d\vec{e}_z) - \varphi(o\vec{e}_z) = \frac{1}{\epsilon_0}\frac{Q}{A}d = |\vec{E}|d$$

  $$\boxed{C_{Platte} = \frac{\epsilon_0 A}{d}}$$

c) Zylinderkondensator, Länge l

$$Q_1 = -Q - 2$$

$\vec{E}$-Feld aus Gaußschem Gesetz
für $r < R_1, r > R_2 \quad \vec{E} = 0$ da $Q_{ein} = 0$
für $R_1 \leq r \leq R_2$:

$$\oint_{Zylinder(r)} \vec{E}\, d\vec{A} \int_0^l \int_0^{2\pi} dz d\varphi E_r(|\vec{r}|) = l2\pi r E_r$$

$$E_r = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{Q}{l} \frac{1}{l}$$
$$\varphi = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{Q}{l} \ln r$$

$$U = \varphi(R_2) - \varphi(R_2) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{Q}{l} \ln \frac{R_2}{R_1}$$
$$C_{\text{Zylinder}} = 2\pi\epsilon_0 \frac{l}{\ln \frac{R_2}{R_1}}$$

d) Lecherleitung / parallele Drähte
einzelner Draht mit Radius R, Ladungsdichte $\frac{Q}{l}$

$$\varphi(\vec{r}) = -\frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{Q}{l} ln(\frac{r}{R})$$

Drahtpaar mit $\mp\frac{Q}{l}$, Abstand a

$$\varphi(\vec{r}) = -\frac{Q}{2\pi\epsilon_0} \left[ ln(\frac{r_+}{R}) - \ln(\frac{r_-}{R}) \right]$$

Sei $R \ll a$ . U aus 2 Punkten auf Drähten
pos. Draht: $r_+ \approx R \quad r_- \approx a$
neg. Draht: $r_+ \approx a \quad r_- \approx R$

$$\begin{aligned} U &= \varphi(\text{pos. D}) - \varphi(\text{neg- D}) \\ &= -\frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{Q}{l} [\ln \frac{R}{R} - \ln \frac{a}{R} - \ln \frac{a}{R} + \ln \frac{R}{R}] \\ &= \frac{1}{\pi\epsilon_0} \frac{Q}{l} \ln \frac{a}{R} \end{aligned}$$
$$C_{\text{Lecher}} = \frac{\pi\epsilon_0 l}{\ln \frac{a}{R}}$$

e) Kugelkondensator

$$C_{\text{Kugelkond.}} = \frac{4\pi\epsilon_0 R_1 R_2}{R_2 - R_1} = \frac{4\pi\epsilon_0 R_1}{1 - \frac{R_1}{R_2}}$$

für $R_2 \to \infty \quad C_{Kugel} = 4\pi\epsilon_0 R_1$

### I.4.3 Kondensatorschaltungen

a) Parallelschaltung

$$C_1 : Q_1 = C_1 U \quad C_2 : Q_2 = C_2 U$$

Potentiale / Spannungen gleich $U_1 = U_2 = U = \varphi_+ - 0$
$Q_{ges} = Q_1 + Q_2$ Ladungserhaltung
$Q_{ges} = C_{ges} U$ Frage: $C_{ges}$

$$Q_{ges} = Q_1 + Q_2 = U(C_1 + C_2) \quad \text{also} \quad C_{ges} = C_1 + C_2$$

allgemein für n parallele $C_i$:

$$C_{ges} = \sum_{i=1}^{n} C_i$$

Parallelschaltung erlaubt großes $C_{ges}$

b) Reihenschaltung
Es gilt: $Q_1^+ = -Q_1^- = Q_2^+ = -Q_2^-$
$Q_1 \equiv Q$
$U = U_1 + U_2$

$$U = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} = Q(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}) = \frac{Q}{C_{\text{ges}}}$$

also

$$\frac{1}{C_{\text{ges}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

allg. für serielle $C_i$:

$$\frac{1}{C_{\text{ges}}} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{C_i} \quad C_{\text{ges}} < C_i$$

### I.4.4 Elektrische Energie

- wie viel Energie notwendig um Ladungen im $\vec{E}$-Feld zu bewegen
- Punktladung q von $A \to B$
  $W_{A \to B} = q\varphi(\vec{r}_B) - q\varphi(\vec{r}_A)$
- zwei Punktladungen $Q_1$ und $Q_2$ von $\infty$ an $\vec{r}_1$ und $\vec{r}_2$
  $Q_1 : \infty \to \vec{r}_1$ : kein $\vec{E}$-Feld, kein $\varphi \to$ keine Arbeit
  $Q_2 : \infty \to \vec{r}_2$ : Arbeit im Feld von $Q_1$

$$W_2 = Q_2 \varphi_1(\vec{r}_2) = Q_2 \frac{Q_1}{4\pi\epsilon_0 |\vec{r}_2 - \vec{r}_1|}$$

andere Reihenfolge:

$$W_1 = Q_1 \varphi_2(\vec{r}_1) = Q_1 \frac{Q_2}{4\pi\epsilon_0 |\vec{r}_1 - \vec{r}_2|}$$

$$E_{el} = \frac{1}{2} \sum_{i,j=1 \ i \neq j}^{2} Q_i \varphi_j(\vec{r}_i)$$

dritte Punktladung $Q_3 : \infty \to \vec{r}_3$

$$W_3 = Q_3\varphi_1(\vec{r}_3) + Q_3\varphi_2(\vec{r}_3)$$

Es gilt: $Q_3\varphi_i(\vec{r}_3) = Q_i\varphi_3(\vec{r}_i) \quad 1 = 1, 2$

$$\begin{aligned} E_{el} &= \frac{1}{2}Q_1[\varphi_2(\vec{r}_1) + \varphi_3(\vec{r}_1)] \\ &+ \frac{1}{2}Q_2[\varphi_1(\vec{r}_2) + \varphi_3(\vec{r}_2)] \\ &+ \frac{1}{2}Q_1[\varphi_1(\vec{r}_3) + \varphi_2(\vec{r}_3)] \end{aligned}$$

$$E_{el} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N} Q_i \varphi(\vec{r}_i) \quad \text{für N Punktladungen}$$

mit

$$\varphi(\vec{r}_i) = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{N} \varphi_j(\vec{r}_i)$$

konst. Ladungsvertielung $\varphi(\vec{r}) : \sum Q_i \to \int dQ$

$$E_{el} = \frac{1}{3} \int \frac{d^3\vec{r}\rho(\vec{r})}{dQ} \varphi(\vec{r})$$

Bsp.: homogengeladene Kugelschale mit Radius R

$$\varphi(\vec{r}) = \text{const} \quad r < R \qquad = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0}\frac{1}{r} \quad r \geq R$$

Sei zunächst $Q = 0$. $dQ$ aus $\infty \to R$
$dE_{el} = \varphi(e)dQ = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{Q}{R}\, dQ$
$E_{el} = \int_0^Q \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{Q^1}{R}\, dQ^1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{1}{2}\frac{Q^{12}}{R}\Big|_0^{???R} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{1}{2}\frac{Q}{R} = \frac{1}{2}Q\varphi(R)$ wie oben
Bsp.: homogen geladene Kugel Radius $R$, Ladung $Q$:

$$E_{el} = \frac{3}{5}\ k\ \frac{Q^2}{R}$$

Andere Form von $E_{el}$ mit $\vec{E}$

$$E_{el} = \frac{1}{2} d^3\tilde{r}\rho(\tilde{r})\varphi(\tilde{r}) \quad \text{3. MW-Gl.)} \quad div(\tilde{E}) = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$= \frac{\epsilon_0}{2} \int d^3\vec{r}\vec{\nabla}\vec{E}(\vec{r})\varphi(\vec{r})$$

partielle Integraltion (1 dim: $\int_a^b dx f(x)g'(x) = fg\Big|_a^b - \int dx f'(x)g(x)$) in 3 Dimensionen:

$$E_{el} = \frac{\epsilon_0}{2}\left[\oint\limits_{\substack{\text{Rand des}\\\text{Volumens}}} \varphi(\vec{r})\vec{E}(\vec{r})\, d\vec{s} - \int d^3\vec{r}\, \vec{E}(\vec{r})\vec{\nabla}\varphi(\vec{r})\right]$$

Volumen $\to \infty; E(\vec{r}) \to 0$ auf Rand $\Rightarrow \oint_{\text{Rand}} \to 0$ verschwindet

$$E_{el} = \frac{\epsilon_0}{2}\int |\vec{E}(\vec{r})|^2 d^3\vec{r} \qquad \vec{\nabla}\varphi = -\vec{E}$$

$E_{el} \sim |\vec{E}|^2$ Energie im $\vec{E}$-Feld gespeichert
Energiedichte $W_{el} = \frac{\epsilon_0}{2}|\vec{E}|^2$

Bsp.: Plattenkondensator mit Spannung $U(q)$
$E_{el}$ und $dq$ auf Platte hinzufägen?
$dE_{el} = Udq = \frac{q}{C}\, dq$ Energie um Kondensator von $\varnothing$ nach Q laden

$$E_{el} = \int_0^Q \frac{q}{C}\, dq = \frac{1}{2}\frac{q^2}{C}|_0^Q = \frac{1}{2}\frac{Q^2}{C}$$

$$E_{el} = \frac{1}{2}\frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2}QU = \frac{1}{2}CU^2 = \frac{1}{2}\epsilon_0 V_{\text{Kondensator}}|\vec{E}|^2$$

$$V_{\text{Kond}} = Ad \quad C = \epsilon_0\frac{A}{d} \quad |\vec{E}| = \frac{U}{d}$$

# I.5 Materie in elektrischen Feldern

## I.5.1 Polarisation des Mediums

Betrachte Nichtliter, $Q = 0$ im externen $\vec{E}$-Feld

- keine freien Elektronen $e^-$
- Verschiebung der $e^-$ im Atom / Molekül.
  $\to$ mikroskopische Dipole $\vec{p_i} = q_i\vec{d_i}$
  $\to$ Ausrichtung im $\vec{E}$-Feld: $\vec{E} \uparrow\uparrow \vec{p_i}$ parallel

Effekt:

- Polarisation des Mediums $\vec{P}$ oder ($\underline{P}$)
- Flächenladungsdichte $\sigma_{pol}$ am Rand des Mediums

Polarisation $\vec{P}$: $\vec{P} \equiv \frac{1}{V}\sum_i \vec{p_i}$ Mittelung der mikroskopischen Dipole über Volumen V
$[\vec{P}] = \frac{C}{m^2}$ Annahme: alle $\vec{p_i}$ gleich $\vec{P}$, gleich ausgerichtet, Dipoldichte $\eta$
Gilt: $P = |\vec{P}| = \eta|\vec{p}| = \eta qd$

Flächenladungsdichte $\sigma_{pol}$
Betrachte $V = dA$ am Rand des Mediums

$$P = \frac{\eta q da}{A} = \frac{\eta qV}{A} = \frac{Q}{A} = \sigma_{pol}$$

d.h. Polarisation $\widehat{=}$ Flächenladungsdichte am Rand

**Polarisationsfeld $\vec{E}_{pol}$ im Medium**

Anwendung von Maxwell-Gl auf Bereich mit $\sigma_+$

$$\oint_{\sigma_+} \vec{E}_{pol}\, d\vec{A} = \frac{Q_{ein}}{\epsilon_0}$$

rechts $\vec{E}_{pol} = 0$ keine Beitrag zum Fluss
links $\vec{E}_{pol} \uparrow\uparrow \vec{A}$

$$E_{pol} A = \frac{Q_{ein}}{\epsilon_0} \Rightarrow E_{pol} = \frac{Q_{ein}}{A\epsilon_0} = \frac{\sigma_{pol}}{\epsilon_0} = \frac{p}{\epsilon_0}$$

Richtung von $\vec{E}_{pol}$:
$\vec{p}$ von neg. Pol zur pos Pol
$\vec{E}_{pol}$ von pos. Ladung zur neg Ladung

$$\rightarrow \vec{P} = -\epsilon_0 \vec{E}_{pol}$$

?????
$\vec{E}_{\text{Mol}}$ (tsl?) Überlagerung von ???????
a) $\vec{E}_{\text{frei}}$ ohne Medium $\quad \vec{E}_{\text{pol}}$ aus Dipolen

$$\vec{E}_{\text{Med}} = \vec{E}_{\text{frei}} + \vec{E}_{\text{Pol}} = \vec{E}_{\text{frei}} - \frac{\vec{P}}{\epsilon_0}$$

Polarisation abhängig von $\vec{E}_{\text{Mol}} : \vec{P} = \epsilon_0 \chi_e \vec{E}_{\text{Med}}$
$\chi_e \widehat{=}$ diielektrische Suszeptibilität

$$\vec{E}_{\text{Med}} = \frac{\vec{E}_{\text{frei}}}{1+\chi_e}$$

$\epsilon = 1 + \chi_e$ relative Dielektrizitätskonstante / Permitivität
$\vec{E}_{\text{Med}} = \frac{\vec{E}_{\text{frei}}}{\epsilon}$ $\quad \epsilon$ Faktor um den Feld geschwächt wird
$\epsilon, \chi_e$ abhängig von der Art und Struktur des Mediums

## I.5.2 Felder und Maxwell gl. im Medium

3. MW-Gl:

$$\text{div}\vec{E}_{\text{Med}} = \frac{P}{\epsilon_0} = \frac{1}{\epsilon_0}(\rho_{\text{frei}} + \rho_{\text{Pol}}) \qquad (*)$$

$\rho_{\text{frei}}$ freie Ladung, $\rho_{\text{Pol}}$ Polarisationsladungen
Polarisationsladung in V mit Rand A

$$\Delta Q_{\text{Pol}} = \int_A \sigma_{\text{Pol}}\, dA = \int_A \vec{P}\, dA \qquad (1)$$

Außerdem:

$$\Delta Q_{\text{Pol}} = -\int \rho_{\text{Pol}}\, dV \qquad (2)$$

$\vec{P} \uparrow\uparrow, \vec{E}_{\text{frei}} \rightarrow \vec{P} \uparrow\downarrow \vec{A}$ auf rechter Grenze also mit „+“ $\Delta Q_{\text{Pol}} < 0$ in (1)
$\rho_{\text{Pol}} > 0$ in (2) $\rightarrow$ „-“ Zeichen in (2)

Gaußscher Satz:

$$\oint \vec{P}\, d\vec{A} = \int \mathrm{div}\vec{P}\, dV = \int -\rho_{\mathrm{Pol}}\, dV$$

Es folgt:

$$\rho_{\mathrm{Pol}} = -\mathrm{div}\vec{P} = \epsilon_0 \mathrm{div}\vec{E}_{\mathrm{Pol}}$$

In (*):

$$\mathrm{div}\vec{E}_{\mathrm{Med}} = \frac{1}{\epsilon_0}(\rho_{\mathrm{frei}} + \epsilon_0 \mathrm{div}\vec{E}_{\mathrm{Pol}})$$

$$\mathrm{div}(\vec{E}_{\mathrm{Med}} - \vec{E}_{\mathrm{Pol}}) = \frac{1}{\epsilon_0}\rho_{\mathrm{frei}}$$

Definiere $\vec{D}$ als Flussdichte / eleektrische Erregung / dielektrische Verschiebung

$$\vec{D} = \epsilon_0(\vec{E}_{\mathrm{Med}} - \vec{E}_{\mathrm{Pol}}) = \epsilon_0 \vec{E}_{\mathrm{frei}} = \epsilon_0 E_{\mathrm{Med}} + \vec{P}$$

$$\boxed{\begin{array}{ll} \text{3.MW-GL}: & \mathrm{div}\vec{D} = \text{frei} \\ \text{1.MW-GL}: & \mathrm{rot}\vec{E}_{\mathrm{Med}} = 0 \end{array}}$$

**Feldverhalten an Grenzflächen**

Betrachte Grenzfkäche: Medium/Dielekktrikum ($\epsilon > 1$) $\leftrightarrow$ Volumen ($\epsilon = 1$)

- nur Polarisation $\rho_{\mathrm{frei}} = 0 \quad \cdot \vec{E}_{\mathrm{ext}}$
- $\rho_{\mathrm{frei}} = 0 \Rightarrow D \perp \text{Med} = D \perp \text{Vak} \qquad E^{\perp}_{\mathrm{Med}} = \frac{1}{\epsilon} E^{\perp}_{\mathrm{Vak}}$

$$\oint \vec{D}\, dA = 0 \text{ da frei } = 0$$

$d \to 0$ : Beiträge von linker und rechter Stirnfläche

$$D^{\perp}_{\mathrm{Med}}(A) + D^{\perp}_{\mathrm{Vak}}(-A) = 0 \to D^{\perp}_{\mathrm{Med}} = D^{\perp}_{\mathrm{Vak}}$$

- parallele Komponenten $D^{\|}, E^{\|}$

$$\oint_{ABCD} \vec{E}\, d\vec{s} = 0 \text{ da rot}\vec{E} = 0$$

$\overline{AB}, \overline{CD} \to 0$ nur $\overline{BC}$ und $\overline{AD}$ tragen bei

$$\int_{\overline{BC}} \vec{E}\, d\vec{s} + \int_{\overline{AD}} \vec{E}\, d\vec{s} = 0 \quad d\vec{s}_{\overline{AD}} = -d\vec{s}_{\overline{BC}}$$

$$\int_B^C E^{\|}_{\mathrm{Med}}\, d\vec{s} + \int_A^D E^{\|}_{\mathrm{Vak}}\, d\vec{s} = 0$$

$$\Rightarrow E^{\|}_{\mathrm{Med}} = E^{\|}_{\mathrm{Vak}} \to D^{\|}_{\mathrm{Med}} = \epsilon D^{\|}_{\mathrm{Vak}}$$

**Berechnungsgesetz der Elektrostatik**

$$\tan \alpha_{\text{Med}} = \frac{E^{\parallel}_{\text{Med}}}{E^{\perp}_{\text{Med}}} = \epsilon \frac{E^{\parallel}_{\text{Vak}}}{E^{\perp}_{\text{Vak}}} = \epsilon \tan \alpha_{\text{frei}}$$

### I.5.3 Mikroskopische Beschreibung der Polarisation (Pol.)

angenommen $\vec{P} \sim \vec{E}_{\text{Med}}$

- Verhalten von Nichtleitern ohne permanentes Dipolmoment $\vec{p} = 0$
  z.B. $H_2$ Ladungsschwerpunkt ($\vec{r}_s$) mittig

- im $\vec{E}$-Feld verschiebung der $e^-$ bzw. $\vec{r}_s$ $\quad \vec{F}_e \sim \vec{E}$
  $\rightarrow \vec{p} = \alpha \vec{E}$, $\quad \alpha \widehat{=}$ elektrische Polarisierbarkeit solche Materialien: verschiebungs Pol. dominiert, sind Dielektrika im engeren Sinne

- Makroskopische Polarisation $\vec{P}$

$$\vec{P} = n\vec{p} = n\alpha \vec{E}_{\text{Med}} \quad n \mathrel{\widehat{=}} \text{Moleküle} \quad n = \frac{N_A \rho}{m_{\text{Mol}}}$$

$N_A$ Avogadrokonst. $\quad \rho$ Massendichte $\quad m_{\text{Mol}}$ Molmasse

- Hatten $\vec{P} = \epsilon_0 \chi_e \vec{E}_{\text{Med}}$
  Zusammenhang $\alpha$ und $\chi_e \epsilon$

$$\boxed{\alpha = \frac{\epsilon_0}{n}\chi_e = \frac{\epsilon_0}{n}(\epsilon - 1)}$$

  gut für kleine $P$ (z.B. Gase)
  wen $P$ groß, dann Dipol-Dipol-Wechselwirkung
  $\rightarrow$ Clausius-Mosotti-Beziehung: $\alpha = \epsilon \frac{\epsilon_0}{n} \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2}$

Bsp.: $H_2$-Molekül im E-Feld $1 \frac{\text{MV}}{\text{m}}$

$$\alpha_{H_2} = 8,7 \cdot 10^{-41} \frac{\text{Cm}}{\text{V}} (\alpha_{\text{typ}} \approx 100 \alpha_{H_2})$$

$$|\vec{p}|_{H_2} = 8,7 \cdot 10^{-35} \text{Cm}$$

$$d = 2,7 \cdot 10^{-16} \text{m} \quad L = 7,4 \cdot 10^{-11} \text{m (Abstand H Atome)}$$

$d/L = 3,6 \cdot 10^{-6}$

Orientierungspolarisation

- polare Moleküle (z.B. $H_2O$) mit permanentem Dipolmoment $\vec{p}$
  R $\rightarrow$ paraelektrisch

- $\vec{E}_{\text{Med}} = 0$ Richtung der $\vec{p}$ statistisch / gleichverteilt $\rightarrow$ kein $\vec{p}$

- $\vec{E}_{\text{Med}} \neq 0$ Ausrichtung der $\vec{p}$ im $\vec{E}$-Feld

Wärmebewegung behindert vollständige Ausrichtung. Ausrichtungsgrad beschrieben durch Boltzmannverteilung ($\rightarrow$ Ex1)

$$f(\Delta E) = f_0 e^{-\Delta E/kT} \quad \text{T Temperatur, k Boltzmannkonstante}$$

$\Delta E = -|\vec{p}||\vec{E}|\cos\theta$ pot Energie des Dipols
$\vec{E} = E\vec{e}_z$ Beitrag von 1 Molekül $p_z = |\vec{p}|\cos\theta$
Polarisation aus $f(\theta)$
Ergibt:

$$P = n\bar{p}_2 \underbrace{\{\coth\frac{p|\vec{E}|}{kT} - \frac{kT}{p|\vec{E}|}\}}_{\text{Langevin fkt.} L(\frac{p|\vec{E}|}{kt})}$$

$l(x) = 1$ d.h. alle Dipole ausgerichtet. oft $p|\vec{E}| << kT$ dann $L(x) \approx \frac{1}{3}x$ für $|x| << 1$
dann $P = np\frac{1}{3}\frac{p|\vec{E}|}{kt} = \frac{1}{3}\frac{p^2|\vec{E}|}{kt}$ wieder linear in $|\vec{E}|$

- für $|\vec{E}|$ groß, oder $T$ klein nicht lineare Effekte und schließlich Sättigung
- Suszeptibilität abhängig von Temperatur $\chi_c(T)$

Bsp.: $H_2O$-Molekül in E-Feld $100\frac{\text{kV}}{\text{m}}$
$P_{H_2O} = 6,15 \cdot 10^{-30}\text{Cm} \quad \epsilon_{H_2O} \approx 80$
$\Delta E = |\vec{p}||\vec{E}| = 7,7 \cdot 10^{-27}\text{J} = 4,8 \cdot 10^{-8}\text{eV}$
Ausrichtungsgrad: $\frac{1}{3}\frac{p|\vec{E}|}{kT} = 1,9 \cdot 10^{-6}$
d.h. für 1 Million Moleküle, 2 mit $\vec{p} \uparrow\uparrow \vec{E}$ Paraelektrisch: Überlagerung von Verschieb. pol. und Orientierungs pol.

$$P = n(\alpha + \frac{1}{3}\frac{p^2}{kT})E_{\text{Med}}$$

plus Clausius-Moretti-Korrektur $3\frac{\epsilon-1}{\epsilon+2}\epsilon_0 = n(\alpha + \frac{1}{3}\frac{p^3}{kT})$ hieraus $\chi_e, \epsilon \quad P = \epsilon_0\chi_e E_{\text{Med}}$
Esp. Bestimmung: Messung $C(T) \rightarrow \chi_e(T)$
Ferroelektrika

- große permanente Dipolmomente $\vec{p}$ (Kristalle, kein Eisen)
- Dipol-Dipol-Wechselwirkung $\rightarrow$ Domänenbildung ohne $\vec{E}$-Feld (durcheinander)
- in $\vec{E}$-Feld: Ausrichtung der Domänen sehr große $\epsilon$ bis $10^5$

### I.5.4 Kondensator im Dielektrikum

Meist: Dielektrikum zwischen den Platten
Ziel:

- Erhöhung der Spannungsfelder
- Erhöhung der Kapazität

Exp:

a) Ladung $Q = \text{const.}$ $C = \frac{Q}{C}$
Beobachtung: $U(|\vec{E}|)$ kleiner $\rightarrow C$ größer

b) Spannung $U = \text{const.}$
Beobachtung: $Q$ größer $\rightarrow C$ größer

Erklärung: (a)

- Dielektrikum polarisiert
- Oberflächenladung $\sigma_{\text{pol}}$ an Grenzflächen
$\rightarrow \vec{E}_{\text{pol}} \uparrow\downarrow \vec{E}_{\text{ext}} \Rightarrow \vec{E}_{\text{Med}}$ geschwächt $\rightarrow U$ kleiner $U = |\vec{E}|d$

U def. über Arbeit um $dq$ von „+“ nach „-“ zu bewegen. Feld schwächer $\rightarrow U$ kleiner um Faktor $\epsilon$ also

$$C = \epsilon\epsilon_0 \frac{A}{d}$$

und

$$E_{\text{el}} = \frac{1}{2}CU^2 = \frac{1}{2}\epsilon\epsilon_0|\vec{E}|^2 V$$

Energiedichte

$$W_{\text{el}} = \frac{E_{\text{el}}}{V} = \frac{1}{2}\epsilon\epsilon_0|\vec{E}|^2 0\frac{1}{2}\epsilon_0\vec{D}\vec{E}$$

Vgl. von elektrischer Energie ohne und mit Dielektrikum

$$\begin{array}{ccc} \text{ohne} & & \text{mit} \\ C_0 & \rightarrow & \epsilon C_0 \\ U_0 & \rightarrow & U_0/\epsilon \quad \text{bei } Q = \text{const.} \\ & \Downarrow & \\ E_{\text{el}} & \rightarrow & E_{\text{el}}/\epsilon \end{array}$$

Teilweise mit $\epsilon > 1$ gefüllter Kondensator

- Ladungsdichte größer bei $\epsilon > 1$ da $E_{\parallel}^{\text{Med}} = E_{\parallel}^{\text{Vak}}$
- Parallelschaltung von 3 Kondensatoren
- $C_{\text{Med}} = \epsilon C_{\text{Vak}} \rightarrow Q_{\text{Med}} = \epsilon Q_{\text{Vak}}$ da $U = \text{const.}$

# Kapitel II

# Magnetostatik

## II.6 Ströme

### II.6.1 Elektrischer Strom

Bisher: ruhende Ladungen, räumlich getrennt $\to \vec{E}, \varphi$
Jetzt: leitende Verbindung $\to$ pos. und/oder neg. Ladungen bewegen sich
Strom: Laungsfluss pro Zeit durch eine gegebene Fläche

$$\boxed{I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}} \quad \text{bzw.} \quad \boxed{I = \frac{dQ}{dt}}$$

1. wenn $y = \text{const.}$ ist in $\Delta t$ und 2.für $I(t)$
$[I] = 1A$ Ampére SI-Basiseinheit
Richtung: von „+“-Pol zu „-“-Pol $\to$ technische Stromrichtung
in Leitern (metall): $\uparrow\downarrow$ Richtung der Elektronen

Stromdichte:

$$\vec{j}(\vec{r}) = \frac{dy}{dA}\vec{e}_j \quad \vec{e}_j \text{ in Stromrichtung}$$

$$\text{Zshg.: } I = \int_A \vec{j}\, d\vec{A}$$

Bsp.: Vakuumdiiode
$V_e$ (Kathode) $\approx$ 0m/s Beschleunigung in $\vec{E} = E\vec{e}_z$
wieviele $e^-$ treffen in $dt$ auf pos. Platte?
Alle $e^-$ im Abstand $< ds = v\ dt$ bzw. Volumen $ds\ A$ befinden $V = ds\ A = Av\ dt$ Anzahlt $e^-$ in V: $n_e V$ $n_e$ Elektronendichte. Transponierte Ladung $dQ = en_e Av\ dt$

$$\text{Strom } \boxed{I = en_e Av} \quad \text{Stromdichte } \boxed{\vec{j} = en_e\vec{v}}$$

$\vec{j}$ konstant entlang Flugrichtung wegen Ladungserhaltung
$\Rightarrow$ Kathode: kleine $v$, große $n_e$ ; Anode: große $v$, kleine $n_e$

#### Kontinuitätsgleichung

Betrachte Volumen V, mit Oberfläche A
Strom (oder) Ladungsdichte/Zeit druch A = Änderung der Ladung in V

$$I = \oint_{A(v)} \vec{j}\, d\vec{A} = -\frac{dQ}{dt}$$

Gaußscher Satz:

$$\Rightarrow \int_V \text{div}\vec{j}\, dV = -\frac{d}{dt}\int \rho_Q\, dV$$

$$\Rightarrow \boxed{\text{div}\vec{j}(\vec{r},t) = -\frac{\partial}{\partial t}\rho_Q(\vec{r},t)} \quad \text{Kontinuitätsgleichung}$$

Ladungen erhalten; werden nicht erzeugt oder vernichtet

### II.6.2 Ohmsches Gesetz

G.S. Ohm (1826): ($I \sim U$) in vielen Leitern

$$\Rightarrow \boxed{U = RI}$$

Ohmsche Gesetze (OG.) makroskopische Form R: el./ohmscher Widerstand

$$[R] = 1\frac{\text{V}}{\text{A}} = 1\Omega \quad \text{Ohm}$$

**Exp: Strom-Spannungs Charakteristika** $I(U)$

$R(U) = \frac{dU}{dI}$

| <u>Kohlefaden</u> | <u>Glühlampe</u> | <u>Konstantandraht</u> |
|---|---|---|
| $R$ kleiner für große $U$ | $R$ größer für große $U$ | $R$ konstant |

Ursache: Temperaturabhängigkeit $R(T)$ ($\rightarrow$später)
Strikt: Ohmscher Widerstand $I \sim U^1$; nicht-ohmsch $I \sim U^k \quad k \neq 1$

#### Supraleitung

Flüssiger Stickstoff: $T_{W_2} = 77K \widehat{=} -196°C$
Messung: $R(\Delta T) \quad \Delta T = T_{\text{Probe}} - T_{W_2}$ Zeitabstand $\Delta t \approx 5s$ Beobachtung:
Hochtemperatursupraleiter $R = 0\Omega$ bis zu $\Delta T \approx 8K$
$\rightarrow$ Sprungtemperatur $T_c = 77K + 8K = 85K \widehat{=} -188°C$
Kupfer:
$R = 0,7\text{m}\Omega$ für kleine $\Delta T$, danach ohmscher Widerstand Supraleitung: gewisse Materialien die für $T < T_c$ Widerstand Verlieren

### II.6.3 Arbeit und Leitung

An Ladung q (von $\varphi_1$ nach $\varphi_2$ gebracht) wird Arbeit verrichtet/gewonnen

$$W = q(\varphi_1 - \varphi_2) = qU$$

In $dt$ wird $dQ$ transportiert, dann wird Leistung p verrichtet.

$$\boxed{p = \frac{dW}{dt} = \frac{dQ}{dt}U = UI} \quad \text{el. Leistung}$$

Umkehrung:
$$W = \int_0^t p(t)\,dt = \int_0^t U(t)I(t)\,dt$$
$[p] = 1\text{W} = 1\text{VA} = 1\frac{\text{I}}{\text{s}}$
Leistung wird im Leiter in Wärme umgewandelt geht aus Stromkreis verloren.

**Exp: Widerstände**

Widerstände aus Fe und Cn in Reihe geschalten $R_{Cn} < R_{Fe}$ Strom I gleich
$p = UI = RI^2 \quad \rightarrow \quad P_{Fe} > P_{Cn}$

## II.6.4 Leitungsvorgänge in Metallen und Halbleitern

Metalle:
Strom durch die $e^-$ im Leitungsband, U an Drahtenden $\rightarrow$ $\vec{E}$-Feld
Beschleunigung der $e^-$ $\quad \vec{F}_{e^-} = -e\vec{E}$
Aber: thermische Bewegung $hT(300\text{K}) = 0,0025\text{eV} \rightarrow v_{\text{therm}} \approx 10^5\frac{\text{m}}{\text{s}}$ Stöße mit den Atomen („Reibungseffekt“)
$\rightarrow$ Drift der Elektronen mit $v_{\text{drift}}$

Stromdichte $\vec{I}$: in dt passieren alle $e^-$ die Fläche A in $dl = v_0 t$ bzw $V = dl\ A$
$dQ = N_e e = e n_e V\ dA\ dt$
$N_e$ Anzahl $e^-$, $n_e$ $e^-$-Dichte
$\boxed{\vec{I} = -n_e\vec{v}_0}$ „-“ weil $\vec{v}_0 \uparrow\downarrow \vec{E}$
Driftgeschewindigkeit $v_D$
$$v(t) = at = \frac{e|\vec{E}|}{m_e}t \qquad m_e \text{ Elektronenmasse}$$
Sei $\mathcal{T}_s$ mittlere Zeit zwischen 2 Stößen
$$v_0 = \frac{e|\vec{E}|\mathcal{T}_s}{m_e} = \boxed{\frac{n_e e^2\mathcal{T}}{m_e}}|\vec{E}|$$
$$\boxed{\sigma_{el} = \frac{1}{\rho_{el}} = \frac{n_e e^2\mathcal{T}}{m_e}}$$
$\sigma_{el}$ Elektrische Leitfähigkeit?!?!? $\rho_{el}$ spezifischer Widerstand $[\rho_{el}] = \Omega m$
$$\boxed{\vec{I} = \sigma_{el}\vec{E}}$$
ohmsches Gesetz in mikroskopischer/originaler Form
„Rückkehr“ zu makroskopischem OG $\vec{I} = \text{const.}$ über A
$$I = |\vec{j}|A = \frac{1}{\rho_{el}}|\vec{E}|A = \frac{1}{\rho_{el}}\frac{U}{l}A$$
d.h. $\boxed{R = \frac{\rho_{el} l}{A}}$ Widerstand eines Drahtes
Halbleiter:
Bandlücke $\Delta E$ zwischen Valenz- und Leitungsband
$$n_e = n_0 e^{-\frac{\Delta E}{kT}} \quad \text{steigt mit T}$$

- für $T < T_{\text{Sättigung}}$: $\frac{dR}{dT} < 0$
- für $T > T_{\text{Sättigung}}$: $\left.\begin{array}{ll} n_e & \to \text{const.} \\ \mathcal{T}_s & \text{sinkt mit T} \end{array}\right\} \sigma$ sinkt mit $T$

### II.6.5 Kirchhoffsche Gesetze KHG

- 2 KHG + OG Grundlage für U bzw. I in R-Netzwerken
- 1.KHG (auch Kontenregel): im Knoten gilt $\sum_i I_i = 0$ aus Ladungserhaltung
- 2.KHG (auch Maschenregel): in Maschen gilt $\sum_i U_i = 0$ folgt $\oint \vec{E}; d\vec{S} = 0$

Widerstandsschaltungen

- Reihenschaltung:
  Knotenregel: $I = I_1 = I_2$
  Machenregel: $U = U_1 + U_2$
  OG: $U = R_1 I_1 + R_2 I_2 = (R_1 + R_2)I$
  $\to R_{\text{ges}} = R_1 + R_2$
  bzw. für $n\ R_i$ : $\quad R_{\text{ges}} = \sum_{i=1}^{n} R_i$
- Parallelschaltung:
  Knotenregel: $I = I_1 + I_2$
  Maschenregel: $U = U_1 = U_2$
  $I = I_1 + I_2 = \frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} = U(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2})$
  $\frac{1}{R_{\text{ges}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$
  bzw. für $nR_i$ : $\frac{1}{R_{\text{ges}}} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{R_i}$

Wheatstonesche Brückenschaltung
Ziel: Messung von unbekannten $R_x$
Spannungen an den grünen Punkten:

$$U_L = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_0 \qquad U_R = \frac{R_x}{R_0 + R_x} U_0$$

kein Strom $I$ wenn $U_L = U_R$ dann gilt: $\frac{R_2}{R_1+R_2} = \frac{R_x}{R_0+R_x}$

### II.6.6 Leitungsvorgänge in Flüssigkeiten

Beobachtung: reines $H_2O$ kein Strom, Zugabe von $NaCl$ Strom $\sim$ Konzentration des $NaCl$

- Elektrolyt: Lösung von Salz, Säure, Lauge die Strom leitet
- Dissoziation in Lösung (Ionisation/Hydratisierung)

  $$NaCl \to Na^+(H_2O) + Cl^-(H_2O)$$

  wenn E(Anlagerung) > E(Ionisation)
- Wanderung der$Na^+, Cl^-$-Ionen im $\vec{E}$-Feld.
  Materialabscheidung an Elektroden (fest, gasförmig)
  $Na^+$ zu Kathode(-): Abscheidung von $Na$ ($Na^+ + e^- = Na$)
  $CL^-$ zu Anode(+): Abscheidung von Chlorgas ($2Cl^- \to Cl_2 + 2e^-$)

**Exp:**

Glas bei $T = 300\text{K}$ Isolator, erstarrte Flüssigkeit bei $T = 600°\text{C}$ Funken, erster Stromfluss
Strom $\rightarrow T \nearrow \rightarrow I \nearrow \rightarrow T \nearrow \ldots$ bis das Glas schmilzt
Ionenleitung:
pos. Ionen mit Ladung $Z_+$ und Dichte $n_+$
neg. Ionen mit Ladung $Z_-$ und Dichte $n_-$

Drift im $\vec{E}$-Feld: $\vec{v}_{x/-} = \pm\beta_\pm\vec{E}$ $\beta_\pm$ ist die Beweglichkeit der Ionen (teilweise: $u, \mu$) $[\beta] = \frac{\text{m}^2}{\text{Vs}}$

Stromdichte:

$$|\vec{j}| = e(n_+Z_+V_+ + n_-Z_-V_-)$$

$$\sigma_{el} = e(n_+\beta_+Z_+ + n_-\beta_-Z_-)$$

für kleine n: $\beta \neq \beta(n)$ typisches $\beta \sim 10^{-8} \rightarrow 10^{-7}\frac{\text{m}^2}{\text{Vs}}$

**Voltasche Spannungsreihe**

Metall in Wasser: wenn $E_{\text{Ionisation}} < E_{\text{Hydratisierung}}$
Atom $\rightarrow A^+(H_2O) + e^-$ (Elektrode)
$\vec{E}$-Feld zwischen neg. Elektrode und pos. Elektrode bewirkt $E_{\text{Ionisation}}$ wächst $\rightarrow$ Sättigung der Ionisation
$n_{\text{Gleichgewicht}}$ und $U_{\text{Gleichgewicht}}$ (Elektrode und Flüssigkeit) $\rightarrow$ elektrolytische Tension

- zwei Elektroden aus
  a) gleichem Metall $\rightarrow$ keine Spannung zwischen Elektroden
  b) unterschiedliche Metalle $\rightarrow \Delta U$ Galvanisches Element
- Messung von $\Delta U$ zu Referenzelektrode ($H_2$ umspültes Platin)
  $\rightarrow$ Voltasche Spannungsreihe („$-$“ unedel $\rightarrow$) „+“edler)

## II.6.7 Stromleitung in Gasen

- Gase: keine (minimale) freie Ladungsträger
- Entladung: Stromfluss durch Gas
- Ladungsträger: Ionen ($A^+$, $M^+$) und $e^-$, $n_+ \approx n_-$
- 2 Arten:
  - unselbstständige von außenerzeugte $A^+, e^-$
  - selbsständige: initialer Strom wird verstärkt

Unselbsständige Ionisation:

a) als Röntgenstralung $\gamma + A \rightarrow A^+ + e^-$

b) therm. Bewegung in Stößen
   $T \nearrow$ dann $E_{\text{kin}} \nearrow$ für $E_{\text{kin}}$

Erzeugungsrate für Ionen $(e^-, A^+) : (\frac{dn}{dt})_{\text{erz}} = \alpha$
Vernichtungsrate/Rekombinationsrate: $(\frac{dn}{dt})_{\text{Reh}} = -\beta n_+ n_- = -\beta n^2$

$$n_+ = n_- = n$$

- Summe: $(\frac{dn}{dt})_{\text{Gesamt}} = \alpha - \beta n^2$

- Gleichgewicht: $(\frac{dn}{dt})_{\text{gesamt}} = 0 \to n_{\text{Gleichgew}} = \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}}$
  $n_{\text{Gleich.}} = \text{const.} \to$ ohmscher Bereich

$$\vec{j} = e\sqrt{\frac{\alpha}{\beta}}(\beta^+ + \beta^-)\vec{E}$$

- $U, \vec{E}$ sehr groß: $\lambda_{\text{frei}} \gg$ Abstand der Platten
  $\to$ keine Rakombination $\beta \to 0$
  Sättigungsstrom $I_s$ : alle $e^- A^+$ abgesagt

$$I_s \sim \alpha$$

### II.6.8 Stromquellen

Innenwiderstand

- $U_v < U_0$

- Stromquelle hat maximale Leitung

$\to$ Effekt beschrieben durch Ersatzschaltbild (Reale Stromquelle als Spannungsquelle in reihe mit Widerstand)

Spannungs/Stromquelle mit $U_0$ in Serie mit Innenwiderstand $R_I$ $U_0$ Elektromotorische Kraft EMK

$$I = \frac{U_0}{R_I + R_V} \qquad U_{kl} = R_V I = \frac{R_V}{R_I + P_V} U_0$$

Leistung:

$$P_V = U_{kl} I = \frac{R_V}{(R_V + R_I)^2} U_0^2$$

Grenzfälle:

a) $R_V \to \infty$ $U_{kl} \to U_0$ $I \to 0$ $P_V \to 0$ offene Stromstärke

b) $R_V \to 0$ $U_{kl} \to 0$ $I = \frac{U_0}{R_I}$ $P_V \to 0$ kurz schluss

dazwischen $P_V$ maximal

**Thermoelektrizität**

Kontaktpotential

- 2 unterschiedliche Metalle in Kontakt
  Fermi-Energie / Austrittsarbeiten sind unterschiedlich
  $E_F(A) < E_F(B)$ : wandern $e^-$ von $B$ nach $A$, $B$ pos. geladen / $A$ neg. geladen
  $\rightarrow \vec{E}(A \rightarrow B)$ entgegengesetzt zu Strom

$\rightarrow$ Kontaktspannung $U_{\text{kon}} = E_F(B) - E_F(A)$
Geschlossener Kreis: $\sum_i U^i_{\text{kon}} = 0$ bei konstanter Temperatur

Seebeck-Effekt

- $U_{\text{kon}}$ temperaturabhängig
- kontakte 1 und 2 bei $T_1$ und $T_2$
  $\rightarrow$ Seebeck koeffizienten $[S_i] = \frac{\text{V}}{\text{K}}$ typ: $10^{-5\rightarrow-6}$ in Metall $10^{-3}$ in Halbleiter
- $\Delta T$ bewirkt Spannung

Peltier-Effekt
Strom durch Material A, B, A

- Strom durch Kontaktstellen bewirkt $\Delta T$
- $E_F^A > E_F^B$ AB heiß BA kühl

$A \rightarrow B : \frac{dW}{dt} > 0$ T steigt, Energie dem Gitter zugeführt
$B \rightarrow A : \frac{dW}{dt} < 0$ T sinkt, Energie dem Gitter entzogen

$$\frac{dW}{dt} = (\Pi_A - \Pi_B)I \qquad \text{Peltierkoeffizienten}[\Pi] = \frac{\text{J}}{\text{K}} \quad (\text{typ } 10^2 J/K)$$

Es gilt: $\Pi_A = S_A T$

# II.7 Das magnetische Feld

## II.7.1 Eletromagnetische Kräfte

$\rightarrow$ Folie

## II.7.2 Magnetisches Feld

- Elektrostatik: Coulombkraft $\vec{F}_e$
  $\rightarrow \vec{E}$-Feld $\quad \vec{E} = \frac{\vec{F}_e}{q_{\text{Probe}}}$
- Beobachtung $\rightarrow$ Feld $\rightarrow$ Kraft
- Beobachtung:
  - Feldlinien immer geschlossen
    [auch innerhalb von Permanentmagneten]
    $\Rightarrow$ quellenfrei

- in Nähe von Pol und Stromdurchflossener Leiter Feldlinien Dichter
  $\rightarrow$ Feld größer $\sim \frac{1}{r^k} \quad k > 0$
- Konvention:
  Außenbereich von Nord $\rightarrow$ Süd
  Innenbereich von Süd $\rightarrow$ Nord
  in Permanentmagneten

Idee: math. Beschreibung durch Vektorfeld $\vec{B}(\vec{r})$ „magnetische Feldstärke“, „Flussdichte“, „Induktion“
$[\vec{B}] = 1\text{T (Tesla)} = 1\frac{Vs}{m^2}$ (Zshg. später)
magnetischer Fluss $\Phi_M \equiv \int_A \vec{B}\, d\vec{A}$

### II.7.3 Maxwell-Gleichung der Magnetostatik

- geschlossene Feldlinien ohne Anfang und Ende
  $\boxed{\begin{array}{c} \text{div } \vec{B} = 0 \\ \Phi_M = \oint_A \vec{B}\, d\vec{A} \end{array}}$ 4. MW-Gl. $\vec{B}$ ist quellenfrei.
  Äquivalenz mittels Gaußschen Satzes
  $$\oint_A \vec{B}\, d\vec{A} = \int_V \text{div}\vec{B}\, dV = 0 \quad \text{für beliebige Volumina } \Rightarrow \text{ div}\vec{B} = 0$$
- kein skalares Potential $\varphi_M$ definierbar
- Feld von stromdurchflossenen Leiter.
  $$\vec{B}(\vec{r}) = B(|\vec{r}|)\vec{e}_\varphi \text{nur von r abhängig}$$
  $$\oint_{r=r_0} \vec{B}\, d\vec{s} = 2\pi r_0 B(r_0) \neq 0. I \text{experimentell}$$
  $\rightarrow \boxed{\oint \vec{B}\, d\vec{s} = \mu_0 I}$ Ampéresches Gesetz $\mu_0$ magnetische Feldkonstante Permeabilität des Volumens
  $$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \qquad \mu_0 \text{ ohne Felder } \rightarrow \text{später}$$
- Anwendung des stokeschen Satzes mit $I = \int \vec{j}\, d\vec{A}$
  $$\oint_{R(A)} \vec{B}\, d\vec{s} = \int_A \text{rot } \vec{B}\, d\vec{A} = \mu_0 \int \vec{j}\, d\vec{A}$$
  Weg $\vec{s}$ auf dem Rand $R(A)$ pos. Schraube um $\vec{A}$

$\boxed{\text{rot}\vec{B} = \mu_0 \vec{j} \qquad \oint \vec{B}\, d\vec{s} = \mu_0 I}$ 2 MW-Gl. Wirbelkerne = Orte mit Stromdichte $\neq 0$

Def: magnetische Feldenergie $E_{\text{mag}}$ bzw. Energiedichte $w_{\text{mag}}$
$$E_{\text{mag}} = \frac{1}{2\mu_0} \int |\vec{B}|^2\, dV \qquad hierfehltwas$$

Zsfg:
$\vec{E}$ ist wirbelfreies Quellfeld
$\vec{B}$ ist quellfreies Wirbelfeld

### II.7.4 Das Vektorpotential $\vec{A}(\vec{r})$

- da $\mathrm{div}\vec{B} = 0$ gibt es $\vec{A}$, so dass $\vec{B} = \mathrm{rot}\vec{A}$
- Frage:
    - wie bestimmt man $\vec{A}$
    - ist $\vec{A}$ „real“ oder nur mathematisches Hilfsmittel
        * klassische Physik: lediglich Hilfsmittel
        * Quantenmechanik: Aharahou-Bohm-Effekt
          $\vec{A} \neq 0$ beeinflusst eine $e^-$-Strahl obwohl
          $\vec{B} = 0$ auf Weg des Strahls
        * QED: $(\varphi_{\mathrm{el}}), \vec{A})$ ist „Wellenfunktion“ des Photon
- $\vec{A}$ ist nicht eindeutig
  $\vec{A}$ und $\vec{A}' = \vec{A} + \mathrm{grad}f \quad f$ skalarfeld liefern selbes $\vec{B}$, da $\mathrm{rot}(\mathrm{grad}f) = 0$
  $\rightarrow$ Eichfreiheit durch Wahl von f oft:
  Coulombgleichung: $\mathrm{div}\vec{A} \stackrel{!}{=} 0$
- f eindeutig ? Nein.
  Alle $f$ mit $\Delta f = \mathrm{div}\ \mathrm{grad}f = 0$ erfüllen $\div(\vec{A}) = 0$
  nutze freiheit in $f$, so dass $|\vec{A}(\vec{r}) \stackrel{|\vec{r}| \to \infty}{\longrightarrow} 0$
- Betrachte 2. MG.
  $$\mathrm{rot}\vec{B} = \vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{A}) = \cdots = -\Delta\vec{A}$$
  also

$$\boxed{\begin{matrix}\Delta\vec{A} = \mu_0\vec{j} \\ t = 1\end{matrix}}$$

### II.7.5 Berechnung von Magnetfeldern

Aus MW-Gl. bzw. Ampéresches Gesetz

1) gerader Leiter, Strom I
   $\int \vec{B}\, d\vec{s} = \mu_0 I \quad B$ nur abhängig von r, in Richtung $\vec{e_r}$
   $B(r)2\pi r = \mu_0 I$
   $$\boxed{B(r) = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}}$$
2) Koaxialkabel
   $$B(r) = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \qquad \begin{matrix}\frac{r}{R_s} \text{ für } r<R_s \\ \frac{1}{r} \text{ für } R_s<r<R-n \\ 0 \text{ für } R_n<r\end{matrix}$$
3) Solenoid
   $$\oint \vec{B}\, d\vec{s} = \int_C^D \vec{B}\, d\vec{s} + \int_A^B \vec{B}\, d\vec{s} \quad \text{auf anderen Wegen} \quad \vec{B} \perp d\vec{s}$$

$B$ homogen und entlang Symmetrieachse
für „AB“$\to\infty \quad B(\infty)\to 0$

$$= \int_C^D \vec{B}\, d\vec{s} = Bl = \mu_0 NI$$

l Länge des Solenoiden N Windungszahl

$$\boxed{B = \frac{\mu_0 NI}{l}}$$

- Toroidspule $\vec{B} = \frac{\mu NI}{2\pi R}\vec{e}_\varphi$

Biot-Savart-Gesetz BSG

- Ziel: Verfahren zur Berechnung von $\vec{B}$ für beliebige gegebene $\vec{j}, I$
- Betrachte infinitisimales Leeiterstück mit inf Stromdichte $d\vec{j} \to d\vec{V}$
  $\vec{B}_{\text{Gesamt}}$ aus Summe/Integral über $d\vec{j}$
- Es gilt: $\Delta\vec{A} = -\mu_0\vec{j} \quad [\text{Vgl:}\Delta\varphi_{\text{el}} = -\frac{\rho}{\epsilon_0}]$
  Lsg: $\vec{A} = \frac{\mu_0}{4\pi}\int d^3\vec{r'}\frac{\vec{j}(\vec{r'})}{|\vec{r}-\vec{r'}|}$
  $\vec{B} = \text{rot}\vec{A} = \cdots = \frac{\mu_0}{4\pi}\int d^3\vec{r}'[\frac{1}{|\vec{r}-\vec{r'}|}\vec{\nabla}\times\vec{j}(\vec{r}') = +\frac{1}{|\vec{r}-\vec{r}'|}^3\vec{j}\times(\vec{r}\times\vec{r}')]$
  $\text{rot}\vec{j} = 0$ kein Kreisstrom ohne externen Antrieb in Magnetostatik

$$\boxed{\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi}\int d^3\vec{r}'\frac{\vec{j}(\vec{r}')\times(\vec{r}-\vec{r}')}{|\vec{r}-\vec{r}'|^3}}$$

$$\boxed{\vec{B} = -\frac{\mu_0 I}{4\pi}\int\frac{(\vec{r}-\vec{r}')\times d\vec{l}}{|\vec{r}-\vec{r}'|^3}} oder sonachschauen$$

hier fehlt was

Bestimmung von $\vec{B}$ mit BSG

1) Leiterschleife mit Radius R, Strom I
   ges: Magnetfeld auf der Achse aus $d\vec{l}\sim\vec{j} \quad d\vec{B}\sim-(\vec{r}-\vec{r'})\times d\vec{l}$
   Symmetrie bzw Kompensatioen von $d\vec{l}$ bei $\varphi$ und $\varphi+\pi \Rightarrow \vec{B} = B_z\vec{e}_z$
   $dB_z = \cos\alpha dB \quad \cos\alpha = \frac{R}{|\vec{r}-\vec{r'}|} = \frac{R}{\sqrt{R^2+z^2}}$
   $d\vec{l}\perp\vec{r}-\vec{r'} \Rightarrow$ Beträge ausreichend

$$B_z = \frac{\mu_= I}{4\pi}\int dl\frac{\cos\alpha}{|\vec{r}-\vec{r'}|} \qquad \text{auf Kreis} \qquad R, z = \text{const.}$$
$$= \frac{\mu_0 I}{4\pi}\frac{R}{(R^2+z^2)^{\frac{3}{2}}}2\pi R = \frac{\mu_0 I}{2}\frac{R^2}{(R^2+z^2)^{\frac{3}{2}}}$$

hier fehlt was

## II.8 Magnetische Kräfte

### II.8.1 Die Lorenz Kraft

Erinnerung: Anziehung $I_1 \uparrow\uparrow I_2$, Abstoßung $I_1 \uparrow\downarrow I_2$ keine Coulombkräfte, da Leuter neutral

**Exp: Fadenstrahlrohr**

Beobachtung: $R \sim \frac{1}{I} \sim \frac{1}{|\vec{B}|}$
Richtung der Kraft: $-\vec{v}_e \times \vec{B}$ rechte-Hand-Ragel „+"$Q_e = -e$

keine Arbeit verrichtet durch $F_{\text{Mag}}$ (Loranzkraft) $W = \int F_{\text{Mag}}\ d\vec{s} = 0 \quad F_{\text{Mag}} \perp \vec{v} \Rightarrow$ Richtung von $\vec{v}$ ändert sich, Betrag von $\vec{v}$ konstant

$$\boxed{\vec{F}_{\text{Mag}} = \vec{F}_L = q\vec{v} \times \vec{B}} \quad \text{Lorenzkraft}$$

Fadenstrahlrohr:

Beschleunigung in $\vec{E}$-Feld: $eU_B = \frac{1}{2}mv^2 \quad v = \sqrt{\frac{2eU_B}{m}}$
für $U_B = 300\text{V} \quad v = 0,03$ Lichtgeschwindigkeit
$\vec{F}_L = \vec{F}_{\text{Zent}} \quad -e\vec{v} \times \vec{B} = -\frac{mv^2}{r}\vec{e}_r$
$\Rightarrow r = \frac{|\vec{p}|}{eB} \quad \vec{p} = m\vec{v}$
$T_{\text{Umlauf}} = \frac{\text{Umfang } 2\pi r}{v} = \frac{2\pi m}{eB} \quad W_{\text{Umlauf}} = \frac{2\pi}{T_{\text{Umlauf}}} = \frac{e}{m_e}B$ Zyklotronfrequenz
gilt für $v << C$ Lichtgeschw.
für $v \to c$ wird $T \nearrow, w \searrow$
Wenn $\vec{v} \perp \vec{B}$ dann in Gl. $\vec{v}, \vec{p} \to \vec{v}_{\perp\vec{B}}, \vec{p}_{\perp\vec{B}}$
$eB = \frac{=\perp B}{\rho} \quad \rho$ Radius in Ebene $\perp \vec{B}$
$\vec{v}_{\parallel B}$ unbeeinflusst $\to$ Helixbahn des Elektronenstrahls
Anwendung: $\frac{e}{m}$- Bestimmung
Hall-Effekt

- Hall-Effekt (Erwin Hall 1879 in Doktorarbeit)

Exp: Strom durch (Halb)leiter in Magnetfeld
$\to$ Spannung $U_{\text{Hall}} \perp \vec{B}$ und $\perp \vec{j}$

- $e^-$ durch $\vec{F}_L$ abgelenkt $\to \vec{E}$-Feld wegen $e^-$-Mangel/Überschuss

- Gleichgewicht wenn $\vec{F}_{\text{el}} + \vec{F}_L = \vec{0}$
  $e|\vec{v}_D||\vec{B}| = e|\vec{E}| \qquad |\vec{E}| = \frac{U_H}{b}$
  $I = |\vec{j}|A = jbd \quad j = n_e|\vec{v}_D|e \quad ev_D = \frac{j}{n_e}$
  Also: $F_L = \frac{I}{bdn_e}B \quad F_{\text{el}} = e\frac{U_H}{b}$
  $\to \boxed{U_H = \frac{IB}{edn_e}} \qquad (n_e)_{H_L} \ll (n_e)_{\text{Leiter}} \Rightarrow$ für $I = \text{const.}$ wird $U_H$ größer

- Anwendung: Hall-Sonde zur Messung von B-Feldern.

### II.8.2 Kräfte auf Stöme

Leiter mit Querschnitt $A$: $I = jA \quad \vec{j} = en_e\vec{v}_D$
Kraft auf infinitisimales Leiterstück $dl \quad dq = en_eA\ dl$
$d\vec{F} = dq(\vec{v}_D \times \vec{B}) = en_eA\ dl(\vec{v} \times \vec{B}) = A\ dl\vec{j} \times \vec{B}$
$d\vec{l} \equiv dl\frac{\vec{j}}{|\vec{j}|}$
$d\vec{F} = Ajd\vec{l} \times \vec{B} = Id\vec{l} \times \vec{B}$
Integration über Leiter: $\vec{F} = I\vec{e} \times \vec{B} \rightarrow$ erklärt rollenden Stab/Leiterschaukel

- parallele Ströme (galvanische Kräfte)
  $I_2$ erzeugt $\vec{B}(I_2)$ am Ort von $I_1$
  $\rightarrow$ Lorenzkraft auf $I_1$ gemäß obiger Gleichung
  Abstand der Leiter $r$ , länge $l \gg r$
  Kraft auf $dl_1$ im Leiter 1
  $d\vec{F}_1 = I_1 d\vec{l}_1 \times \vec{B}(I_2)$
  Hatten: $\vec{B}(I_2) = \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{I_2}{r}\vec{e}_\varphi$
  $\vec{B}(I_2) \perp I_1 \Rightarrow$ Beträge ausreichend
  $dF_1 = I_1\frac{\mu_0}{2\pi}\frac{I_2}{r}dl_1$

  $$\boxed{|\vec{F}_1| = \int_0^L \frac{\mu_0}{2\pi r} I_1 I_2\ dl_1 = \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{L}{r} I_1 I_2}$$

  $d\vec{l}_1 \times \vec{B}$ mit Rechte-Hand-Regel
  $\rightarrow$ Abstoßung für $I_1 \uparrow\downarrow I_2$
  actio = reactio Aymmtrie zwischen $I_1$ und $I_2$

**Exp: „Stromwaage“**

Masse con 200 mg zum Beschweren
$F_L = F_G \quad F_G = m \cdot g \quad F_L = \frac{\mu_0}{2\pi} I^2 \frac{L}{r}$
$\rightarrow I = \sqrt{\frac{mg2\pi r}{L\mu_0}} = 15,1A$ Vgl. Exp: I = 14,9 A

**Exp: Meissler-Ochsenfeldeffekt**

Hochtemperatursupraleiter (Ytrium Barium Kupferoxid)

- Für $T < T_{\text{sprung}}$ supraleitend
- Magnetfeld aus Körper hinausgedrängt Erklärung in Festkörperphysik (Ginzburg-Landau-Th, BCS-Theorie)
- warum scheben über Magnetbahn ? $\rightarrow$ Übung

### II.8.3 Der Magnetische Dipol

Def. magnetiischer Dipol C $\rightarrow$ Leiterschleife
$\vec{p}_M = I\vec{A}$ Richtung von $\vec{A}$ aus $\vec{j}$ über „Rechte-Hand-Regel“
Hatten B auf Achse:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{2}\frac{l^2}{(R^2+z^2)^{\frac{3}{2}}}\vec{e}_z$$

für $R^2 \ll z^2$:

$$= \frac{\mu_0 I}{2}\frac{R^2}{z^3}\vec{e}_z \sim \boxed{\frac{1}{z^3}}$$

$$= \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{\vec{p}_M}{z^3} \qquad \boxed{\vec{p_M} \uparrow\uparrow \vec{B}}$$

Allgemein (außerhalb Achse)

$$\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{1}{|\vec{r}|^3}\left(\frac{3\vec{r}(\vec{p}_M\cdot\vec{r})}{r^2} - \vec{p}_M\right)$$

Nordpol bei + z - Richtung, Südpol bei - z - Richtung
$\rightarrow \vec{p}_M$ zeigt von Süd- nach Nordpol

- Dipol des $e^-$ im Wasserstoffatom (klassisch)
  $\vec{F}_{\text{el}} = \vec{F}_{\text{zen}} \quad \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{e^2}{r^2} = m_e\frac{v^2}{r} = \frac{Lv}{r^2} \quad L \equiv m_e vr$
  In QM: L quantisiert $n\hbar \quad \hbar = \frac{h}{2\pi} \quad h$ Planksches Wirkungsquantum
  $e^-$-Bewegung $\widehat{=}$ Kreisstrom $I = \frac{e}{T} \quad T$ Umlaufzeit
  $\vec{p}_H = U\vec{A} = \frac{-e}{r}\vec{A} = \frac{-ev}{2\pi r}\pi r^2\vec{e}_n = -\frac{e}{2m_e}\vec{L}$
  für $L = 1\hbar$: $|\vec{p}_H| = \underbrace{\frac{e\hbar}{2m_e}}_{\mu_B} = 9,26\cdot 10^{-24}$ A m$^2$ $\mu_B$ = Bohrsches Magneton

**Kräfte auf magnetischen Dipol**

Leiterschleife $\vec{F} = I\oint d\vec{l}\times\vec{B} \quad \vec{M} = I\oint \vec{r}\times(d\vec{l}\times\vec{B})$

a) homogenes $\vec{B}$-Feld
   $\vec{F}_{\text{ges}} = 0$ da Kompensation von $d\vec{l}$ bei $\varphi$ und $d\vec{l}$ bei $\varphi+\pi$
   $\vec{M} = IB\sin\alpha\pi R^2\vec{e}_y = \vec{e}_M\times\vec{B}$
   $\vec{B}\downarrow\rightarrow\vec{p}_M \qquad \vec{p}_M\uparrow\uparrow\vec{B}$ energetisch günstiger
   $\Delta E_{\text{mag}} \equiv -\int_{\frac{\pi}{2}}^{d}\vec{M}\,d\vec{\alpha} = -\vec{p}_M\vec{B}$ Nullpunkt für $E_{\text{mag}}$ bei $\alpha = \pi/2$

b) inhomogenes $\vec{B}$-Feld
   Taylorentwicklung $\vec{B}(\vec{r}) = \underbrace{\vec{B}(\vec{r}_0)}_{\text{const.}} + (\vec{r}\cdot\vec{\nabla}\vec{B}(\vec{r}))\,|_{\vec{r}=\vec{r}_0}$ $\vec{B}(\vec{r}_0)$ kein Beitrag zur Kraft
   Rechnung zeigt: $\vec{F} = \vec{\nabla}(\vec{B}\vec{p}_M)$
   d.h. Kraft in Richtung $\vec{B}$-Gradient. Dipol wird in Bereich großer Feldstärke gezogen

# II.9 Magnetische Felder in Materie

## II.9.1 Magnetisierung der Materie

- Atom: Elektronen und Kern. $e^-$ mit $\vec{p}_M$ verbunden
  $\vec{p}_M$ im Magnetfeld $\vec{B}$ ausgerichtet
- $\vec{B}(\vec{p}_M) \equiv \vec{B}_{\text{Mag}}$ überlagert sich externes $\vec{B}$-Feld $\rightarrow \vec{B}_{\text{Med}}$
- $e^-$ mit $\vec{L} \Rightarrow \vec{p}_M = \underbrace{-\frac{e}{2m_e}}_{\gamma_L} \vec{L} \quad |\vec{L}| = n\hbar$
  $\gamma_L =$ gyromagnetisches Verhältnis manchmal auch ohne -
  für $|\vec{L}| = 1\hbar \quad |\vec{p}_M = \mu_B$ Bohrsche Magneton (des $e^-$)
- komplexe Atome: viele $e^- \rightarrow$ vektorielle Summe der $\vec{L}_i$
  $\rightarrow$ Quantenmechanik, Atomphysik
- Kern: $\gamma_{L,\text{ Photon}} = \frac{e}{2m_p} \approx \frac{1}{1836}\gamma_{L,e^-} \rightarrow$ vernachlässigbar
- Spin des $e^-$ (Eigendrehimpuls) $\vec{S} : |\vec{S}| = \frac{1}{2}\hbar$

$$\vec{p}_M = \gamma_S \vec{S} \quad \gamma_S = -\frac{e}{m_e} = 2\gamma_L$$

- Gesamt Dipolmoment eines $e^-$ : $\vec{p}_M = \vec{p}_{M,L} + \vec{p}_{M,S}$
  komplexes Atom: $\vec{p}_{M,\text{gesamt}}$ aus $c^-$-Konfiguration
  aber: $\vec{p}_{\text{Atom}}$ fixiert, $\vec{B}_{\text{ext}}$ ändert nur Orientierung von $\vec{p}_{\text{Atom}}$

**Magnetisierung der Materie**

- Ziel: Einfluss der atomaren $\vec{p}_M$ auf $\vec{B}$-Feld in Materie quantifizieren
- Magnetisierung $\vec{M} \equiv \frac{1}{V}\sum_i \vec{p}_{M,i}$ aus Überlagerung von atomaren Kreisströmen
  - im Inneren Kompensation von entgegengerichteten Strömen
  - auf Rand Oberflächenstrom $I_{\text{Mag}}$

$$\vec{M} = \frac{I_{\text{Mag}}\vec{A}}{V} \qquad |\vec{M}| = \frac{I_{\text{Mag}}A}{Ad} = \frac{I_{\text{Mag}}}{d} \quad d = \text{Dichte der schicht}$$

- $\vec{B}_{\text{Mag}}$ aus $I_{\text{Mag}}$ über Ampéresches Gesetz Annahme: $\vec{B}_{\text{Mag}}$ homogen, im Vakuum verschwindet

$$\oint \vec{B}_{\text{Mag}} d\vec{s} = \mu_0 I_{\text{Mag}} \qquad B_{\text{Mag}} d = \mu_0 I_{\text{Mag}}$$

$$|\vec{B}_{\text{Mag}}| = \mu_0 \frac{I_{\text{Mag}}}{d} = \mu_0 |\vec{M}| \text{ Rechte-Hand-Regel} \vec{M} \uparrow\uparrow \vec{B}$$

- Vgl: Elektrostatik $\vec{E}_{\text{Pol}} = -\frac{1}{\epsilon_0}\vec{P}$
  $\vec{E}_{\text{Pol}} \uparrow\downarrow \vec{P} \rightarrow$ Schwächung des E-Feldes
  $\vec{B}_{\text{Mag}} \uparrow\uparrow \vec{M} \rightarrow$ Stärkung des B-Feldes

- Feld im Medium $\vec{B}_{\text{Med}} = \vec{B}_{\text{frei}} + \vec{B}_{\text{Mag}} = \vec{B}_{\text{frei}} + \mu_0\vec{M}$
  $\vec{B}_{\text{Mag}}/\vec{M}$ proportional zu $\vec{B}_{\text{frei}}$ $\quad \vec{B}_{\text{Mag}} = \chi_m\vec{B}_{\text{frei}}$
  $\chi_m$ magnetische Suszeptibilität
  Achtung: $\vec{E}_{\text{Pol}} = \chi_e\vec{E}_{\text{Med}}$ (nicht via $\vec{E}_{\text{frei}}$)
  Zsgh: $\vec{B}_{\text{Med}} = (1+\chi_m)\vec{B}_{\text{frei}} \equiv \mu\vec{B}_{\text{frei}}$ $\mu$ relative Permeabilität $\mu = 1 + \chi_m$

**Maxwell- Gleichungen im Medium**

Def: neues Feld

$$\vec{H} \equiv \frac{1}{\mu_0}\vec{B}_{\text{frei}} \qquad \text{magnetische Erregung}$$

Es gilt: $\vec{M} = \chi_m\vec{H} \qquad \vec{B}_{\text{Med}} = \vec{B}_{\text{frei}} + \vec{B}_{\text{Mag}} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M})$
Verwendung von $\vec{B}$ und $\vec{H}$ $\rightarrow$ kompaktere MW-Gl.

- Ab jetzt: „ Med “ unterdrücken
  $\vec{B}$ und $\vec{E}$ sind Felder (im Medium oder Vakuum) die gemessen werden

- Vorteil der MW-Gl in $\vec{B}, \vec{H}, \vec{E}, \vec{D}$

  - keine Kenntnis über $\rho, \vec{j}$ im Medium
  - nur externen $\rho, \vec{j}$

  $\vec{H}$ Teil des $\vec{B}$-Feldes $(\cdot\frac{1}{\mu_0})$ das aus der Externen Anregung/Erregung stammt

- keine magnetischen Monopole div$\vec{B} = 0$
  $\text{div}(\mu, \mu_0, \vec{H}) = \mu\mu_0 \ \text{div}\vec{H} + \mu_0 \ \text{grad}\mu \cdot \vec{H} \stackrel{!}{=} 0$

  - homogenes Medium $\mu = \text{const.} \rightarrow \text{div}\vec{H} = 0$
  - inhomogenes Medium $\mu = \mu(\vec{r}) \rightarrow \text{div}\vec{H} = -\frac{\text{grad}\mu\vec{H}}{\mu} \neq 0 \quad txi.a.$

- Verhalten an Grenzflächen
  d.h.überlagerung von Vakuum ($\mu = 1$) zu Medium ($\mu \neq 1$)
  $\text{rot}\vec{H} = \vec{j} = 0 \Rightarrow \vec{H}^{\parallel}_{\text{frei}} = \vec{H}^{\parallel}_{\text{Med}} \quad \vec{B}^{\parallel}_{\text{frei}} = \frac{1}{\mu}\vec{B}^{\parallel}_{\text{Med}}$
  $\text{div}\vec{B} = 0 \Rightarrow \vec{B}^{\perp}_{\text{frei}} = \vec{B}^{\perp}_{\text{Med}} \quad \vec{H}^{\perp}_{\text{frei}} = \mu\vec{H}^{\perp}_{\text{Med}}$

### II.9.2 Diamagnetismus

- keine permanente Dipole ($\vec{I}_{\text{Atom}} = \vec{L}_{\text{Atom}} + \vec{S}_{\text{Atom}} = 0$)
  wenn abgeschlossene Schulen in Hülle (reist)

- $\vec{B}_{\text{ext}}$ induziert magnetische Dipole
  $\vec{P}^{\text{ind}}_{M} \uparrow\downarrow\rightarrow$ nächstes Kapitel
  $\rightarrow$ Schwächung des B-Feldes, $\chi_m < 0, \mu < 1$
  typ: $\chi_m \sim -10^{-5} \rightarrow -10^{-6}$

- Kraft im inhomogenen Feld $\vec{F} = \vec{\nabla}(\vec{B} \cdot \vec{p}_M)$
  $\vec{M} = \frac{1}{V}\sum_i \vec{p}_{M,i}$
  $\vec{p}_M = V\vec{M} = V\chi_m\vec{H} = \frac{V\chi_m}{\mu_0}\vec{B}$

$\vec{F} = \vec{\nabla}(\vec{B}\frac{V\chi_m}{\mu_0}\vec{B}) = \frac{V\chi_m}{\mu_0}\vec{\nabla}|\vec{B}|^2$

- Probe aus Bereich von hohem Feld herausgedrängt
- alle Substanzen zeigen Diamagnetismus aber durch paramagnetismus und ferromagnetismus Effekt überdeckt

### II.9.3 Paramagnetismus

- $x > 0 \quad \vec{M} \uparrow\uparrow \vec{B}_{\text{ext}}$ permanente magnetische Dipole
- $\vec{B}_{\text{ext}} = 0$ keine Ausrichtung des atomaren $\vec{p}_{M,i} \Rightarrow \vec{M} = 0$
- $\vec{B}_{\text{ext}} \neq 0$ teilweise Ausrichtung des $\vec{p}_{M,i}$
  Gegenwirkung durch thermische Bewegung
  Ausrichtung durch Boltzmannvtlg. $ce^{-\frac{\Delta E}{kT}} \approx c(1 - \frac{\Delta E}{kT})$
  $\Delta E = \mu_B|\vec{B}| = 9,26 \cdot 10^{-24}\text{J}$ für $B = 1T$
  $kT(T = 300\text{K}) = 4,14 \cdot 10^{-21}\text{J} \quad \Rightarrow \frac{\Delta E}{kT} \ll 1$
- Mittleres Dipolmoment eines Atoms

$$|\overline{\vec{p}_M}| = \frac{1}{3}\frac{|\vec{p}_m}{|}^2|\vec{B}|kTn_p \quad \text{Dipoldichte}$$

$$\vec{M} = n_p\overline{\vec{p}_m} = \frac{1}{3}\frac{n_p|\vec{p}_m|^2}{kT}\vec{B}$$

$$\boxed{\chi_m = \frac{\mu_0\vec{M}}{|\vec{B}|} = \frac{1}{3}\frac{n_p\mu_0|\vec{p}_m|^2}{kT} \sim \frac{1}{T}} \quad \text{Curie- Gesetz}$$

$\chi_m(300\text{K}) \overset{\text{typ}}{\approx} 10^{-6} \to 10^{-4}$

- Probe in den Bereich größeres B-Feldes gezogen

### II.9.4 Ferromagnetismus

- grosse $\chi$, $\vec{M}$ aus WW der atomaren Dipole
- hohe Temp.: Dipole statistisch verteilt $E_{therm} > E_{Austausch}$
- temperatursink: $E_{therm} > E_{Austausch}$
  $\to$ ausrichtung der dipole an mehreren stellen
  $\to$ bildung der wißschen Bezirke / Domänen
- für $\vec{B} = \vec{O}$ gilt $\vec{M} = \vec{O}$ (zunächst)
- $\vec{B} \neq \vec{O}$ : ausrichtung der domänen $\vec{M} \uparrow\uparrow \vec{B}$
  - sprungweise $\to$ Barkhausen effekt
  - sättigung $\to$ alle Domänen ausgerichtet

- Phasenübergang bei Temperatur erhöhung
  bei $T > T_c$: $E_{therm} > E_{Austausch}$ $(N_i : T_c = 358\text{C})$
  $\rightarrow$ auflösen der domänen
  $\rightarrow \vec{M} \rightarrow 0$ Entmagnetisierung
  Phasenübergang: Ferro- $\rightarrow$ Paramagnetismus

$$\text{obehalb } T_c : \chi = \frac{d}{(T - T_c)^r} \quad c = \text{const.},\ r = 1 \rightarrow 1,5$$

### II.9.5 Elektromagnet

- Kombination Spule und Eisenkern
  $\rightarrow$ Formung des Magnetfeldes
  $\rightarrow$ Luftspalt zur Nutzung des Feldes
  Amperesches Gesetz:

$$\oint \vec{H} d\vec{s} = H_{Fe} + l_{Fe} + H_0 d = NI$$

Grenze: $B_\perp = \text{const.}\ \mu_{Fe} H_{Fe} = H_0$
$\rightarrow B = \frac{\mu_0 NI}{\frac{l_{Fe}}{\mu_{Fe}} + d} \approx \frac{\mu_o NI}{d} \quad \mu_{Fe} \approx 4000$ hier fehlt was
spalt kleiner, dann $B$ größer
vgl: Luftspule $B = \frac{\mu_0 NI}{L_{spule}}$ hier Verstärkung $\frac{dL_{spule}}{d}$

# Kapitel III

# Elektrodynamik

## III.10 Elektromagnetische Induktion

### III.10.1 Indutionsgesetz

**1831 Faraday:** in veränderlichem $\vec{B}$-Feld wird entlang Leiter Spannung induziert $U_{\text{ind}}$

**Beobachtung:** $U_{\text{ind}} \sim \frac{d}{dt}A,\ \frac{d}{dt}\vec{B},\ \frac{d}{dt}$ Winkel $(\vec{A}, \vec{B})$

$$U_{\text{ind}} \sim \frac{d}{dt}\Phi_M \quad \Phi_M = \int_M \vec{B} d\vec{A}$$

- Wer verursacht $U_{\text{ind}}$?
- $F_L$ auf beweglichen $e^-$ und ortsfesten $A^+$
- $e^-$ verschoben $\to$ $E$-Feld bis Gleichgewicht $F_{el} = F_L$

$$e|\vec{E}| = e|\vec{v}||\vec{B}| \quad U_{\text{ind}} = l|\vec{E}| = l|\vec{v}||\vec{B}|$$

$$v = \frac{ds}{dt},\ l = \text{const.},\ |\vec{B}| = \text{const.}$$

$$|U_{\text{ind}}| = |\vec{B}|\frac{d}{dt}(ls) = |\vec{B}|\frac{d}{dt}|\vec{A}| = \frac{d}{dt}\Phi_M \quad \Phi_M = |\vec{B}|A$$

  Lorentzkraft bewirkt $U_{\text{ind}}$. Hier: aus Änderung von A

- Leiterschleife ($A$ =const.) im $\vec{B}$-Feld
  $\boxed{A}$ $\vec{B}$ homogen, $\vec{v} \uparrow\uparrow \vec{B} \to \Phi_M = \text{const.}, U_{\text{ind}} = 0$
  $\boxed{B}$ $B$ inhomogen, $B_z = f(z)B_0$ $\quad f(z)$ stetige, monoton fallend

$$B_z \uparrow\uparrow \vec{v} \text{ keine } F_L,\ \text{keine } U_{\text{ind}}$$

$$\text{radiale komponente } B_r,\ \vec{B}_r \perp \vec{v} \to F_L \to U_{\text{ind}} \neq 0$$

$$\text{aus div } \vec{B} = 0 \text{ folgt } B_r = \frac{B_0}{r}\int dr\ r\frac{df(z)}{dz}$$

  Ring geschlossen: fließt Induktionstrom $I_{ind}$
  Offen: Induktionsspannung an Enden

$$F_{el} = e|\vec{E}| = e\frac{|U_{\text{ind}}|}{2\pi r} \stackrel{!}{=} e|\vec{v}|B_r = F_L$$

$$|U_{\text{ind}} = 2\pi r|\vec{v}|B_r \ (1)$$

Betrachte Fluss durch Leiterschleife

$$\Phi_M = \int_A \vec{B} d\vec{A} = \oint_A B_z dA = \int d\varphi \int dr \ r B_0 f(z)$$

$$\frac{d\Phi_M}{dt} = \underbrace{2\pi}_{\int d\varphi} B_0 \frac{d}{dt} \int dr \ r F(z) = 2\pi B_0 \int \frac{df(z)}{dz} \underbrace{\frac{dz}{dt}}_{V} r \ dr$$

$$= 2\pi B_0 |\vec{v}| \int dr \ r \frac{df(z)}{dz} = f 2\pi B_r r |\vec{v}| \quad (2)$$

also aus Vgl (1) und (2) $|U_{\text{ind}}| = \frac{d\Phi_M}{dt}$

**Lenzsche Regel**

- Richtung von $U_{\text{ind}}$ und $I_{ind}$?
- Betrachte Leiterschleife $\vec{A} \uparrow\uparrow z$-Achse /symmetrieachse
  Ring nach links bewegen $\frac{d\Phi_M}{dt} > 0$
  für $U_{\text{ind}} = -\frac{d\Phi_M}{dt}$ strom Linkschrauve um $\vec{A}$ machen oben $I$ nach hunten, $e^-$ Lorntz-kraft nach vorne Richtung von $I$ konstant mit Herleitung aus $F_L$
- Gedanken experiment: $\vec{B}_{ind}(I_{ind}) \uparrow\downarrow \Delta\vec{B}_{sol}$ sonst Verletzung der Energieerhaltung

Lensche regel:

$$\boxed{I_{\text{ind}} \text{ so gerichtet, dass erzeugte } \vec{B}_{\text{ind}} \text{ der Änderung von } \Phi_M \text{ entegenwirkt.}}$$

**Zusammenfassung:** Änderung von $\Phi_M$ in $A$ erzeugt/induziert $U_{\text{ind}}$ auf Rand des Leiters gemäß Faradasches Induktionsgesetz

$$\boxed{U_{\text{ind}} = -\frac{d\Phi_M}{dt}}$$

- $I_{ind}$ ist Kreisstrom (z.B. in Ring) $\rightarrow$ kreis/ring förmiges $\vec{E}$-Feld
  $\oint \vec{E} d\vec{s} = U_{\text{ind}} \neq 0$ zunächst widerspuch zu 1. MX-Gl.
  aber bisger: $\Phi_M = \text{const.} \rightarrow U_{\text{ind}} = 0$
  neues term in MW-Gl.

$$\boxed{\oint_{dA} \vec{E} d\vec{s} = -\frac{d}{dt} \int_A \vec{B} d\vec{A} + \text{satz von Stokes}}$$

$$\oint_{dA} \vec{E} d\vec{s} = \int_A rot \vec{E} d\vec{A} = -\frac{d}{dt} \int_A \vec{B} d\vec{A}$$

$$A \text{ beliebig } \Rightarrow \boxed{\text{rot } \vec{E} = -\frac{d}{dt} \vec{B}}$$

1. MW- Gl...

„zeitlich veränderliche $\vec{B}$-Feld erzeugt el. Wirbelfeld“

**"Wirbelströme"**

- bisher: Leiterschleifen, Spulen
- generell: in geschlossenem Leiter erzeugt el. Wirbelfeld Kreisströme / Wirbelströme
- Wirbelströme erzeugen $\vec{B}$-Feld gemäß Lenzscher Regel
  [Folie: wibelstrom bremese des ICE3]

## III.10.2 Selbstinduktion

- Schleife/ Spule mit Induktion und separates veränderliches Magnetfeld
- aber: Induktion im feldererzeugenden Leiter → Selbstinduktion

Betrachte Spule: Strom $I \to \vec{B}$-Feld erzeugt

$$\Phi_M \sim |\vec{B}| \sim I \quad \Phi_M \equiv LI$$

(selbst-)Induktion $L$ $[L] = 1\frac{\text{Vs}}{\text{A}} = 1\text{H}$ (Henry)

**Lenzsche Regel** $U_{\text{ind}} = \frac{d\Phi_M}{dt} = -L\frac{dI}{dt}$

$L$ abhängige von Geometrie des Leiters, zeitlich konstant

**Maschenregel** $U_0 = U_L + U_R$

**Gegenspannung** $U_L = -U_{\text{ind}}$

$\to U_0 = U_R - U_{\text{ind}} = RI + L\frac{dI}{dt}$

$$\frac{dI}{dt} = -\frac{R}{L}I + \frac{U_0}{L}(\text{DGL})$$

Lösungsansatz: $I(t) = Ae^{-\chi t} + B$

$$\frac{dI}{dt} = -\chi Ae^{-\chi t}$$

Einsetzen: $-\chi Ae^{-\chi t} = -\frac{R}{L}Ae^{-\chi t} - \frac{R}{L}B + \frac{U_0}{L}$
für belt: $\to \chi = \frac{R}{L}A_{\text{bel}}B = \frac{U_0}{R}$

$$\to I(t)\frac{U_0}{R}(1 - e^{-\frac{R}{L}t}$$

starker Anstieg, asymptotisch gegen $\frac{U_0}{R}(\hat{=}L = 0)$

**Ausschaltvorgang**

[Folie: Ausschaltvorgang]

**Knotenregel** $I_1 = -I_2$

**Maschenregel** $0 = U_2 - U_1 = R_2I_2 - U_{\text{ind}} - R_1I_1 = R_2I_2 + L\frac{dI_2}{dt} - R_1I_1$

$$\frac{d}{dt}I_2(t) = -\frac{R_1 + R_2}{L}I_2(t)$$

**Lösung** $I_2(t) = \frac{U_0}{R_2}e^{-\frac{R_1+R_2}{L}t} \quad I_2(0) = \frac{U_0}{R_2}$

**Beispiele für Induktivitäten**

1. Solenoid spule

$$B = \mu_0 \frac{N}{l} I \text{ Wicklungsdichte } \eta = \frac{N}{l}$$

$$\Phi_M = \int_A \vec{B} d\vec{A} = \mu_0 \eta A I \quad \vec{B} \uparrow\uparrow \vec{A}, \quad \vec{B} \text{ homogen}$$

in jeder Windung Spannung induziert

$$\begin{aligned} U_{\text{ind}} = -N \frac{d\Phi_M}{dt} &= -\mu_0 N \eta A \frac{dI}{dt} \\ &= -\mu_0 \eta^2 l A \frac{dI}{dt} \end{aligned}$$

Da $U_{\text{ind}} = -L \frac{dI}{dt}, \quad L = \mu_0 \eta^2$ V

2. Koaxialkabel $L = \frac{\mu_0}{2\pi}(\frac{1}{2} + ln \frac{R}{R_s})l$

3. Lecherleitung $L = \frac{\mu_0 l}{\pi}[\frac{1}{2} + ln \frac{d-r_0}{r_0}]$ minimal für $d = 2r_0$

## III.10.3 Feldenergie

- Betrachte Schaltvorgänge in Spule
  Einschalten $\rightarrow$ Aufbau $\vec{B}$-Feld Energie im $\vec{B}$-Feld gespeichert
  - Ausschalten $U_{\text{ext}} = 0$, Stromfluss $\rightarrow$ Energiefreisetzung
    strom ducht $R_1$ und $R_2$ in serie $\rightarrow P = I^2 R \quad R = R_1 + R_2$

$$W_m = \int_0^\infty I^2(t) R \, dt = \int_0^\infty I_0^2 e^{-\frac{2R}{L}t} R \, dt = -I_0^2 \frac{LR}{2R} e^{-\frac{2R}{L}t} \Big|_0^\infty$$

$$\boxed{W_m = \frac{1}{2} I_0^2 L}$$

Solenoid: $L = \mu_0 n^2 A l \quad B = \mu_0 n I_0$
dann $w_m = \frac{W_m}{V} = \frac{1}{2} I_0^2 \mu_0 = \frac{1}{2\mu_0} |\vec{B}|^2$
Ergebnis ist allgemeingültig

| | | | |
|---|---|---|---|
| Zsfg : | $W_{\text{el}} = \frac{1}{2}\epsilon_0 |\vec{E}^2$ | Kondensators | $W_{\text{el}} = \frac{1}{2} C U^2$ |
| | $W_{\text{mag}} = \frac{1}{2\mu_0} |\vec{B}|^2$ | spule | $W_{\text{mag}=\frac{1}{2}LI^2}$ |
| | mit $\epsilon_0 \mu_0 = \frac{1}{c^2}$ | | $c$ für Lichtgeschwindigkeit |
| | $W_{??} W_{\text{ges}} = \frac{1}{2}\epsilon_0 (|\vec{z}|^2 + c^2 |\vec{B}|^2)$ | | |

## III.10.4 Maxwell-Gleichungen

- Gl. für statische Situation
  + Faradays Induktionsgesetz
  + neuer Term "Verschiebungstromäus theo. Argument (Maxwell)

Betrachte

$$\oint \vec{B} d\vec{s} = \mu_0 I$$

**Links** ringförmigen Weg am Leiter $\oint \vec{B}\; ds = 0$
wiederspruch zu Ampereschen Gesetz/ Maxwell-Gl.

**Rechts** keinen Strom $I$ im Kondensator aller el. Fluss $\Phi_{\text{el}}$ ducht Zylinderfläche $\rightarrow$ zusätzlicher Beitrag $\frac{d\Phi_{\text{el}}}{dt}$ nur wenn $\frac{d\Phi_{\text{el}}}{dt} \neq 0$ fließt $I$ und erzeugt $\vec{B}$-Feld

**Rechnung** $I_V = \frac{dQ}{dt}$ $\frac{dQ}{dt}$ Änderung auf Kondensatorplatten

$$|\vec{E}| = \frac{Q}{\epsilon_0 A} \quad Q = |\vec{E}| A \epsilon_0$$

$$\begin{aligned} I_V &= \frac{dQ}{dt} = \epsilon_0 \frac{d}{dt}(|\vec{E}|A) \\ &= \epsilon_0 \frac{d}{dt} \int_A \vec{E}\; d\vec{A} = \epsilon_0 \frac{d\Phi_{\text{el}}}{dt} \end{aligned}$$

Addition von $I_V$ zu normalen Strom in MW-Gl.

$$\boxed{\oint \vec{B}\; d\vec{s} = \mu_0 (I + I_V) = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d}{dt} \Phi_{\text{el}}}$$

Diff. Form: $I = \int_A \vec{j}\; d\vec{A}$ und Stokescher Satz

$$\int_A \text{rot}\; \vec{B}\; d\vec{A} = \mu_0 \int \vec{j}\; d\vec{A} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d}{dt} \int \vec{E}\; d\vec{A}$$

A beliebig: rot $\vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d}{dt} \vec{E}$
Finale Form der MW-Gl. im Vakuum Kopplung von $\vec{E}$ und $\vec{B}$ durch „$\frac{d}{dt}$"-Therme

## III.11 Wechselstromkreise

### III.11.1 Wechselstrom

- periodische Änderung der Polarität der Spannungsquelle meist sunsuförmig:

$$U(t) = U_0 \sin \frac{2\pi}{T} t \quad \frac{1}{T} = f \text{ Frequenz}$$

$$I(t) = I_0 \sin \omega t \quad \frac{2\pi}{T} = 2\pi f = \omega$$

$I_0$ bzw. $U_0$ Maximal o. Spitzenwete
Leistung am ohmschen Wiederstant $P(t) = U(t) I(t)$
Spitzenwert $U_0 I_0 = \frac{U_0^2}{R} = R_0 I_0^2$

$$P(t) = \frac{U_0^2}{R} \sin^2 \omega t = R I_0^2 \sin^2 \omega t$$

$$\begin{aligned} \overline{P} =& \frac{1}{T} \int_0^T \frac{U_0^2}{R} \sin^2 \omega t\; dt \\ &= \frac{1}{2} \frac{U_0^2}{R} = \frac{1}{2} I_0^2 R = \frac{1}{2} U_0 I_0 \end{aligned}$$

→ Effektivwerte: Werte die Gleichstrom hat mit gleichem Leistungverbrauch

$$U_{\text{eff}} = \frac{U_0}{\sqrt{2}} \quad I_{\text{eff}} = \frac{I_0}{\sqrt{2}}$$

[Folie: Netzspannung in Deutschland]
[Folie: Drei-Phasen-Wechelspannung]
[Folie: Generator zur Erzeugung der Netzwechselspannung]

## III.11.2 Diodenschaltungen

**Diode** Bauelement, dass Strom nur in eine Richtung fließt Schaltsymbol durchlässig

[Folie: Kennlinie und Schaltsymbol]

$U_{Ak} > 0,5$V Diode wird leitend
$U_{Ak} \gg 0,7$V $l_{in}$ $I-U$-Charakteristik $I = k(U - 0,7\text{V})$
$U_{Ak} < 0,5$V fließt Sperrstrom $I_{\text{sperr}} \approx pA \to \mu A$
$U_{Ak} \ll 0$ Durchbruch

### Gleichrichter

[Folie: Brückengleichrichtung]

- Ziel: Erzeugung von Gleichspannung aus Wechselspannung

i) Einweggleichrichtung
   - nur in pos. Halbperiode Diode leitend
   - $U_{\text{aus}}^{\text{max}} = U_{\text{ein}} - 0,7\text{V}$
   - Glättung durch Kondensator $U_{\text{aus}}(t) = U_{\text{max}} e^{-t/RC} \approx U_{\text{max}}(1 - \frac{t}{RC})$

ii) Grätzschaltung
   - in jeder Halbperiode 2 Dioden leitend
   - $U_{\text{max}}^{\text{aus}} = U_{\text{ein}} - 1,4\text{V}$
   - Glättung wie oben

iii) Villardschaltung
Einschalten: $U_C$ bis $U_0 - 0,7$V geladen
Maschenregel: $U_{\text{aus}} = U_{\text{ein}} + U_C = U_{\text{ein}} + U_0 \approx U_0 + U_0 \cos\omega t$
→ Spannungshub um $U_0$
+ Gleichrichter → Greinacher Schaltung
$U_{D_1} = U_0 + U_0 \cos\omega t$
$U_{\text{max}}^{\text{aus}} 2U_0(-1,4\text{V})$

iv) Kaskadenschaltung nach Greinacher

1. Stufe $U_{A_0} = 2U_0 - 1,4\text{V}$ gleichgerichtet
$U_{D_2} = 2U_0 \sim \omega t \rightarrow$ Eingang für 2. Stufe

2. Stufe $U_{AB} = 2U_0 - 1,4\text{V}$ gleichgerichtet
$\rightarrow U_{B0}^{\max} = 4U_0 - 2,8\text{V}$ viele Kaskaden $\rightarrow$ Hochspannung
Begrenzung: Feldstärke in letzter Stufe
Anwendung: Cockroft-Walton-Kaskade in Beschleunigern

## III.11.3 Zeigerdiagramme

- komplexe Schaltungen $\rightarrow$ Rechnen mit $\cos, \sin$ und Additionsth. schwierig
  $\rightarrow$ komplexe Schreibweise sin und cos als Realteile der komplexen Exponentialfunktion
  z.B. $U_0 \cos\omega t = \mathrm{Re}(U_0 e^{i\omega t})$ $\quad U_0 \sin\omega t = \mathrm{Re}(U_0 r^{i\omega t - \pi/2})$
  $\exp(ia) = \cos ai \sin a \quad \cos(a - \frac{\pi}{2}) \sin a$
  $a + ib = \sqrt{a^2 + b^2} e^{i\Phi} \quad \Phi = \arctan\frac{b}{a}$
  oft Re weggelassen: $U = U_0 e^{i\omega t}$
  - nur Hilfsmittel, an Ende Realteil bilden
  - Veranschaulichung im Zeigerdiagramm

## III.11.4 Komplexe Widerstände

Gilt: $U = \frac{Q}{C} \quad \frac{d}{dt} : \frac{dU}{dt} = \frac{I}{C}$
$U(t) = U_0 \cos\omega t$ gegeben
$I(t) = C\frac{dU}{dt} = -\omega U_0 C \sin\omega t = I_0 \cos(\omega t + \frac{\pi}{2})$
Spitzenwert $I_0 = \omega C U_0$ $\quad I$ teilt $U$ um $\frac{\pi}{2}(90°)$ voraus

**Spule:** Maschenregel: $U - U_L = 0 \quad U_L = -U_{\text{ind}}$
$-U_{\text{ind}} = L\frac{dI}{dt} = U(t)$
Geg: $U(t) = U_0 \cos\omega t$
$\frac{dI}{dt} = \frac{1}{L}U(t) = \frac{U_0}{L}\cos\omega t$
$I(t) = \int \frac{U_0}{L}\cos\omega t\, dt = \frac{U_0}{L\omega} = \frac{U_0}{L\omega}\cos(\omega t - \frac{\pi}{2})$
Spitzenwert $I_0 = \frac{U_0}{\omega L}$ Spannung eilt Strom um $\frac{\pi}{2}$ voraus

**Impedanz Z:** Widerstand für Bauteil um $\frac{U}{I}$ zu beschreiben. naiv: $\frac{U(t)}{I(t)}$ „Widerstand“ zeitabhängig, negativ
alternativ: $\boxed{Z = \frac{U(t)}{I(t)}}$ wobei $U, I$ komplexwertige Funktionen sind.

i) Kondensator mit Kapazität
   $U(t) = U_0 e^{i\omega t} \quad I(t) = \omega C U_0 r^{i(\omega t + \frac{\pi}{2})}$
   $Z_C = \frac{1}{\omega C}\frac{1}{e^{i\pi/2}} = \frac{1}{i\omega C}$
   $\omega \rightarrow 0 : Z_C \nearrow \infty \quad \omega \rightarrow \infty : Z_C \searrow 0$

ii) Spule mit Induktivität L
$U(t) = U_0 e^{i\omega t} \quad I(t) = \frac{U_0}{\omega L} e^{i(\omega t - \frac{\pi}{2})}$
$\boxed{Z_L = \omega \frac{1}{e^{-i\pi/2}} = i\omega L} \; \omega \to 0 : Z_L \searrow 0 \quad \omega \to \infty : Z_L \nearrow \infty$

iii) Ohmscher Widerstand
$Z_R = R$ (trivial)

Kirchhoffsche Gesetze auch hier gültig (da auf Q- und E-Erhaltung basierend) Berechnung von Netzwerken mit KHG und den Impendanzen.

### III.11.5 Frequenzfilter

**Bem:** periodisches Signal mit beliebigem Amplitudenverlauf aus überlagerung von cos- und sin-förmigen Signalen
$\to$ Fourierzerlegung

**Komplexe Widerstände**

- Ändern das Frequenzspektrum
- Beeinflussen Form des Signals/Größe in Abhängigkeit von $\omega$

**Hochpass:** Spannungsteiler mit $Z_1 = \frac{1}{i\omega C} \quad Z_2 = R$
Übertragungsfaktor $k = \frac{U_{\text{aus}}}{U_{\text{ein}}} = \frac{Z_{\text{aus}}}{Z_{\text{ges}}}$

$$K = \frac{R}{R + \frac{1}{i\omega C}} \frac{R + \frac{i}{\omega C}}{R + \frac{i}{\omega C}} = \frac{R^2 + i\frac{R}{\omega C}}{R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}} = \frac{\omega^2 C^2 R^2}{\omega^2 C^2 R^2 + 1} + i \frac{\omega C R}{\omega^2 C^2 R^2 + 1}$$

$$|k| = \frac{|U_{\text{aus}}|}{|U_{\text{ein}}|} \quad |k|^2 = \frac{\omega^2 C^2 R^2}{\omega^2 C^2 R^2 + 1} = \frac{1}{1 + \frac{\omega_0^2}{\omega^2}} \quad \omega_0 \equiv \frac{1}{RC}$$

Phase $\Phi$ $\quad \tan \Phi = \frac{\text{Im}}{\text{Re}} = \frac{1}{\omega C R} = \frac{\omega_0}{\omega}$
für $\omega \to \infty \quad |k| \to 1$ „Hochpass“
für $\omega \to 0 \quad Z_C \to \infty$ Kondansator sperrt
für $\omega$ klein eilt Spannung um $\frac{\pi}{2}$ hinterher

**Def: Grenzfrequenz $\omega_{\text{Gr}}$** Frequenz bei der $|k(\omega_{\text{Gr}})| = \frac{1}{\sqrt{2}}$
Hochpass: $\omega_{\text{Gr}} = \omega_0 = \frac{1}{RC}$

**Tiefpass:**

a) RC-Serienschaltung mit Abgiff über C

b) LR-Serienschaltung mit Abgriff über R

$Z_1 = i\omega L \quad Z_2 = R \quad k = \frac{R}{R+i\omega L}$
$|k|^2 = \frac{R^2}{R^2+\omega^2 L^2} = \frac{1}{1+\frac{\omega^2}{\omega_0^2}} \quad \omega_0 \equiv \frac{R}{L}$
$\tan\Phi = \frac{-\omega L}{R} = \frac{-\omega}{\omega_0}$
für $\omega \to 0 \quad |k| \to 1 \quad \Phi \to 0$ Tiefpass
für $\omega \to \infty \quad |k| \to 0 \quad \Phi \to -\frac{\pi}{2}$

**Bandpass:**

1. R-L-C-Serienschaltung
2. nur Durchlass in einem gewissen Frequenzbereich
3. zwei frequenzabhängige Impadanzen $\sim \omega, \sim \frac{1}{\omega}$
$$|k| = \frac{R}{\sqrt{R^2[\omega L - \frac{1}{\omega C}]}} \qquad \tan\Phi = \frac{\frac{1}{\omega C} - \omega L}{R}$$
4. $|k| = 1$ maximal bei $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ dort Sprung in $\Phi$ von $+\pi/2 \to -\pi/2$
5. Breite des Bereichs in $\omega$ mit $|k| > \frac{1}{\sqrt{2}}$
$$\Delta\omega = \sqrt{\frac{R^2}{L^2} + \frac{4}{LC}}$$

### III.11.6 Blindleistung

- Bestimmung von Leistung P an Impendanz Z
- Gleichspannung: $P = UI$ zeitlich konstant
- An Ipendanz Z: $U(t) = U_0 \cos\omega t \quad I(t) = I_0 \cos(\omega t - \Phi)$
Mittlere Leistung $\overline{P} \equiv \frac{1}{T}\int\limits_0^T U(t)I(t)dt$
$$\overline{P} = \frac{1}{T}\int\limits_0^T U_0 I_0 \cos(\omega t)\cos(\omega t - \Phi) \cdots = \frac{1}{2} U_0 I_0 \cos\Phi$$
ohmscher Widerstand $Z = R \quad \Phi = 0 \quad \overline{P} = \frac{U_0 I_0}{2} \equiv U_{\text{eff}} I_{\text{eff}}$
- für reine C, reine L $\quad \Phi = \pm\frac{\pi}{2} \to \overline{P} = 0$
- Blindleistung: Leistung von C und / oder L aufgenommen wird
- $$Z = \frac{U(t)}{I(t)} = \frac{U_0 e^{i\omega t}}{I_0 e^{i(\omega t - \Phi)}} = \frac{U_0}{I_0} e^{+i\Phi}$$
Wirkwiderstand $\text{Re}(z) = \frac{U_0}{I_0}\cos\Phi$
Blindwiderstand $\text{Im}(z) = \frac{U_0}{I_0}\sin\Phi$

- Wirkleistung $\overline{P} = \frac{1}{2} I_0^2 \text{ Re}(z) = \frac{1}{2} \frac{U_0^2}{\text{Re}(z)}$
  Blindleitung $\overline{Q} = \frac{1}{2} I_0^2 \text{ Im}(z) = \frac{1}{2} \frac{U_0^2}{\text{Im}(z)}$

[Folie: Wirk- und Blindleistung]

**Leistungsanpassung** Betrachte Spule mit $R \ll \omega L \rightarrow$ geringe Wirkleistung aber eventuell sehr großer Strom

- optimale Leistungsübertragung $\rightarrow$ weitere Anpassungimpedanz $Z_A$ in Reihe an Last $\overline{P} = \frac{1}{2} I_0^2 \text{ Re}(Z_L)$
$$I(t) = \frac{U(t)}{Z_A + Z_L} \rightarrow I_0 = \frac{U_0}{|Z_A + Z_L|}$$
$$\overline{P} = \frac{1}{2} \frac{U_0^2}{|Z_A + Z_L|^2} \text{ Re } Z_L = \frac{1}{2} \frac{U_0^2}{(\text{Re } Z_A + \text{ Re } Z_L)^2 (\text{Im } Z_A + \text{ Im } Z_L)^2} \text{ Re } Z_L$$
  $\overline{P}$ maximal wenn $\text{Im}(Z_A) = \text{Im}(Z_L)$

Impedanz verhaltern, die $\Delta\Phi$ kompensiert.
hier: Kondensator mit $\frac{1}{\omega C} = \omega L$.
weiterhin: $\text{Re}(Z_A) = 0$ damit $\overline{P}(Z_n) = 0$
wenn $R_z$ gegeben, dann $R_L = R_Z$ maximal $\overline{P}$

### III.11.7 Transformator

**Ziel** Strom oder Spannung erhöhen/erniedrigen

**Prinzip** Induktion zwischen gekoppelten Spulen

[Folie: Transformator - Schaltzeichnung und tech. Umsetzung]

**Ideale, unbelaster Trafo**

- ideal: reine $L$, keine $R$
- unbelastet: $I_2 = 0$, keinen Verbraucher

Primärspule: $U_1(t) = U_0 \cos \omega t$
$$I_1 \rightarrow \Phi_{m,1} \rightarrow U_{\text{ind},1} = -N_1 \frac{d\Phi_{m,1}}{dt} = -U_1$$
Also
$$\frac{d\Phi_{\omega,1}}{dt} = -\frac{U_{\text{ind , 1}}}{N_1} = \frac{U_1}{N_1}$$
Flussänderung in Spule 1 = Flussänderung in Spule 2
$$\frac{d\Phi_{m,1}}{dt} = \frac{d\Phi_{m,2}}{dt}$$
Induziert
$$U_2(t) = -N_2 \frac{d\Phi_{m,1}}{dt} = -\frac{N_2}{N_1} U_1(t) \text{ also } \frac{U_2}{U_1} = -\frac{N_2}{N_1} \quad \Delta\phi = \pi \text{ gegenphasig}$$

ideal: kein Leistungsverbrauch

$$U_1(t)\ I_1(t)\ = U_2(t)\ I_2(t) \rightarrow \frac{I_2(t)}{I_1(t)} = -\frac{N_1}{N_2}$$

großes $N_2/N_1 \rightarrow$ Erzerugung von Hochspannung
kleines $N_2/N_1 \rightarrow$ Erzeugung von hohe Ströme
aber: wenn $I_2 \neq 0$ dann Gegeninduktion

**Realer, belastender Trafo**

a) $R \neq 0 \rightarrow$ Maschenregel

$$U_1(t) - R_1 I_1(t) = N_1 \frac{d\Phi_{m,1}}{dt} \qquad (*) \text{ Primärspule}$$

$$U_2(t) - R_2 I_2(t) = N_2 \frac{d\Phi_{m,1}}{dt} \qquad (*) \text{ Sekundärspule}$$

b) Gegeninduktion
Gilt: $U_L = -U_{\text{ind}} = L\frac{dI}{dt} = N\frac{d\Phi_m}{dt}$
$LI = N\Phi_m$

$I_2 \neq 0$: Überlagerung der magnetischen Flüssse
$\rightarrow$ Beiträge zu $U_{\text{ind}}$ in beiden Spulen
Sei $\Phi_{ij}$ der Fluss erzeugt durch $I_j$ in Spule i
$L_{11}, L_{22}$ Selbstinduktivitäten
$L_{12}, L_{21}$ Gegeninduktivitäten
perfekte koppelung, keine Verluste von $\Phi_m$ dann $L_{12} = L_{21} = \sqrt{L_{11}L_{22}}$

$$N_1\Phi_{m,1} = N_1[\Phi_{m,11} + \Phi_{m,12}] = L_{11}I_1 + L_{12}I_2$$

$$N_2\Phi_{m,2} = N_2[\Phi_{m,21} + \Phi_{m,22}] = L_{21}I_1 + L_{22}I_2$$

Einsetzen in $(*) \rightarrow$ Transfromatior gleichungen

$$U_1 - R_1 I_1 = L_{11}\frac{dI_1}{dt} + L_{12}\frac{dI_2}{dt}$$

$$U_2 - R_2 I_2 = L_{21}\frac{dI_1}{dt} + L_{22}\frac{dI_2}{dt}$$

Für Spitzenwete $U_0,\ I_0$ mit $U_1 = U_0 e^{i\omega t}$

$$U_1 - R_1 I_1 = i\omega L_{11} I_1 + \omega L_{12} I_2$$

$$U_2 + R_2 I_2 = -i\omega L_{21} I_1 - \omega L_{22} I_2$$

Phasenverschiebung $U_2$ zu $U_1$ von $\pi \rightarrow$ „ - " Zeichen
Für weitere Diskussion $R_1^{\text{spule}} = R_2^{\text{spule}} = 0$ aber Last $Z$ sekundärkreis
Nutze $U_2 = ZI_2$ und nach Strömen auflösen

$$I_1 = \frac{i\omega L_{22} + Z}{i\omega L_{11} Z + \omega^2(l_{12}^2 - L_{11}L_{22})} U_1$$

$$I_2 = \frac{i\omega L_{12}}{i\omega L_{11} Z + \omega^2(L_{12}^2 - L_{11}L_{22})} U_1 (evtl auch U_1)$$

Darus Übersetzungsverhältnisse für $U_i, I_i$

$$\frac{I_2}{I_1} = -\frac{i\omega L_{12}}{i\omega L_{22} + Z} \quad \frac{U_2}{U_1} = -\frac{i\omega L_{12} Z}{i\omega L_{11} Z + \omega^2(L_{12}^2 l L_1 L_2)}$$

**Def:** Kppelungsgrad $k =\longrightarrow \frac{L_{12}}{\sqrt{L_{11}L_{22}}}$ $0 < k < 1$ $k = 1$ vollständige koppelung $k = 0$ entkoppelt

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{iL_{12}}{iL_{11} + \omega^2(k^2-1)\frac{L_{11}L_{22}}{Z}}$$

Beträge:

$$\frac{|I_2|}{|I_1|} = \frac{\omega L_{12}}{\sqrt{Z^2 + \omega^2 L_{12}^2}} \quad \frac{|U_2|}{|U_1|} = \frac{L_{12}}{\sqrt{L_{11}^2 + \omega^2 \frac{L_{11}^2 L_{22}^2}{|Z|^2}(1-k^2)}}$$

a) $k = 1$ $L_{12} = L_{21} = \sqrt{L_{11}L_{22}}$

$$|\frac{U_2}{U_1}| = \frac{L_{12}}{L_{11}} = \sqrt{\frac{L_{22}}{L_{11}}} = \frac{N_2}{N_1} \text{ wie beim idealen unbelasteten Trafo}$$

unabhängig von Last $Z$

$$\frac{|I_2|}{|I_1|} \xrightarrow{|Z|\to 0} \frac{N_1}{N_2} \text{ sonst } I_2 \text{ kleiner wgen Last } Z$$

b) $k < 1$

i) $Z = R$ $\frac{|U_2|}{|U_1|}$ sinkt mit sinkendem $R$

$$\tan\phi_{U_1,U_2} = -\frac{\omega L_{22}(L-k)}{R}$$

$k = 1$ $\phi = \pi$ unabhängig von $R$
$k < 1$ $\phi < \pi$

ii) $Z = i\omega L$

$$\frac{U_2}{U_1} = -\frac{L_{12}/L_{11}}{1 + L_{22}/L_{11}(1-k^2)}$$

$\Delta\phi = \pi$ unabhängig von Last

iii) $Z = \frac{1}{i\omega C}$
$\frac{U_2}{U_1} = \frac{L_{12}}{L_{11} - \omega^2 C L_{11} L_{22}(1-k^2)}$
$U_2/U_1$ größer als bei Leerlauf $|Z| = \infty$
Resonanzverhalten $\omega_R = \frac{1}{\sqrt{CL_{22}(1-k^2)}}$

Anwendungen/Experimenten:

1. „Hörnerblitz" $N_1 = 500$ $N_2 = 2300$ $U_1 = 230$ V $\to U_2 \approx 10$ kV
2. „Punktschweißen" $N_1 = 500$ $N_2 = 5$ $U_1 = 230$ V $\to U_2 \approx 10$ kV
3. Leistungsübertragung über Kabel
   Ziel: $P_{\text{el}} = U_I$ übertragen
   Leitung mit $R_L \to$ Leistungsverlust $I^2 R_L = \Delta P_{\text{el}}$
   Relativer Leistungsverlust:

$$\frac{\Delta P_{\text{el}}}{P_{\text{el}}} = \frac{I^2 R_L}{UI} = \frac{IR_L}{U} = \frac{R_L}{U^2} P_{\text{el}}$$

   d.h. bei gegebener Leistung $P_{\text{el}}$ sinkt $\Delta P_{\text{el}}$ mit $\frac{1}{U^2}$
   [Folie: Leistungsübertragung]

## III.12 Elektromagnetische Schwingungen

### III.12.1 Einfache Schwingungen

RLC-Serienschaltung $\rightarrow$ Bandpass (ohne $R$)

- Exp: Resonanz bei $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}(\approx 2,2 \text{ kHz}) \quad \Delta\phi = 0$
- Suche $I(t)$

$$\begin{aligned} &\text{Knotenregel} \quad I \text{ gleich in allen Bauteilen} \\ &\text{Maschenregel} \quad U_{\text{ext}} = \underbrace{U_L}_{-U_{\text{ind}}} + U_C + U_R = L\frac{dI}{dt} + \frac{1}{C}Q + RI \end{aligned}$$

[Folie: Serienschwingkeris]

$$\frac{d}{dt}: \quad \frac{dU_{\text{ext}}}{dt} = L\frac{d^2I}{dt^2} + R\frac{dI}{dt} + \frac{1}{C}I$$

$U_{\text{ext}} = U_0 \sin\omega t \cdot \frac{1}{C}$

$$\frac{s^2I}{dt^2} + \frac{R}{L}\frac{dI}{dt} + \frac{1}{LC}I = \frac{U_0\omega}{L}\cos\omega t$$

inhomogene DGL 2. Ordnung für den Strom $I(t)$

**Lösung:** mit komplexwertigem Ansatz
zunächst $U_{\text{ext}} = U_0 e^{i\omega t}$

$$\frac{d^2I}{dt^2} + \frac{R}{L}\frac{dI}{dt} + \frac{1}{LC}I = \frac{iU_0\omega}{L}e^{i\omega t}$$

Ansatz : $I(t) = I_0 e^{i(\omega t - \Phi)}$
Bilden zeitliche Ableitung und Einsetzen

$$(\underbrace{i\omega L}_{Z_L} + \frac{1}{\underbrace{i\omega L}_{Z_C}} + \underbrace{R}_{Z_R})I_0 = U_0 e^{i\Phi}$$

wie erwartet für Impedanzen in Serie
$I(t) = \frac{U(t)}{Z_{\text{ges}}}$ Resonanz wenn $Z_{\text{ges}}$ minimal

$$\left.\frac{dZ_{\text{ges}}}{d\omega}\right|_{\omega_R} \stackrel{!}{=} 0 \qquad iL\omega - \frac{1}{i\omega_R C} = 0 \Leftrightarrow \omega_R = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

**Freie, ungedämpfte Schwingung**

- LC-Kreis $R = 0$ keine externe Anregung
- 
- Kondensator laden, bei $t = 0$ mit Spule verbinden
  $\rightarrow$ Schwingungen

- periodisches Umladen des Kondensators, periodische Ströme in Spule
  [Folie: El.-mag. Schwingkreis und mech. Modell eines Oszillators im Vergleich]

- Maschenregel $U_C + U_L = 0 \quad U_L = -U_{\text{ind}}$
  $\frac{Q}{C} + L\frac{dI}{dt} = 0$

- Lösungsansatz: $Q = Q_0 \cos \omega t$
  Einsetzen: $-Q_0\omega^2 \cos \omega t + \frac{1}{LC} Q_0 \cos \omega t = 0$
  also:

$$\boxed{\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \qquad f = \frac{1}{2\pi}\frac{1}{\sqrt{LC}}} \qquad \text{Thomson-Formel}$$

  harmonische Schwinung mit Randbedingung $Q(t=0) = Q_0$ andere Sartbedingung:
  $Q(t) = Q_0 \cos(\omega t + \phi)$
  $I(t) = \frac{dQ}{dt} = -Q_0\omega \sin(\omega t + \phi) = Q_0 \omega \cos(\omega t - \frac{\pi}{2} + \phi)$
  d.h. I eilt $U_C$ bzw. $Q_C$ um $\frac{\pi}{2}$ hinterher

**Gedämpfte Schwingung** $R \neq 0$

- RLC-Kreis $\quad Q(t=0) = Q_{\max}$

- $t = 0$ Kreis schließen $\to$ Schwinung mit abnehmender Amplitude

- Maschenregel: $U_L + U_C + U_R = 0$

$$\frac{d^2Q}{dt^2} + \underbrace{\frac{R}{L}}_{2\gamma}\frac{dQ}{dt} + \underbrace{\frac{1}{LC}}_{\omega_0^2} Q = 0$$

  $\gamma$ ist die Dämpfungskonstante, $2\gamma$ Dämpfungsterm

$$\frac{d}{dt} : \frac{d^2I}{dt^2} + 2\gamma\frac{dI}{dt} + \omega_0^2 I = 0$$

  homogene DGL 2. Ordnung für Strom I
  Lösungsansatz: $I(t) = ae^{\lambda t}$
  Fallunterscheidung: $I(0) = I_0$

  i) starke Dämpfung/Kriechfall $\gamma > \omega_0 \quad \frac{R}{2L} > \frac{1}{\sqrt{LC}}$

$$I(t) = I_0 e^{-\gamma t} \cosh \alpha t \quad \alpha^2 = \gamma^2 - \omega_0^2$$

  ii) kritische Dämpfung/aperiodischer Grenzfall
  $\gamma = \omega_0 \quad \frac{R}{2L} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$

$$I(t) = I_0(1 + \gamma t)e^{-\lambda t}$$

  iii) Schwache Dämpfung/Schwingfall

$$\gamma < \omega_0 \quad R/2L < \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$I(t) = I_0 e^{-\gamma t} \cos(\omega t + \phi)$$

  Frequenz $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \gamma^2}$ kleiner als bei freien schwingungen.
  Zeitkonstante der Dämpfung $\gamma = \frac{R}{2L}$

**Erzwungene Schwinung**

- Serien- und Parallelschwingkreis
- Nach dem Einschwingverhalten stationäre Lösung
  d.h. Amplitude unabhängig von Zeit

$$U(t) = U_0 e^{i\omega t} \quad I(t) = \frac{U(t)}{Z_{\text{ges}}}$$

  Kreis schwingt mit externer Frequenz $I_0 = \frac{U_0}{|Z_{\text{ges}}|}$

- Serienkreis $\;Z_{\text{ges}} = i\omega L + \frac{1}{i\omega C} + R$
  Parallelkreis $Z_{\text{ges}} = (i\omega L + \frac{1}{i\omega C} + R)^{-1}$
  Resonanzverhalten in beiden Fällen

**Serienkreis**

$$\frac{dI_0}{d\omega} \stackrel{!}{=} 0$$

Maximum bei $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad I_0 ? \frac{U_0}{R}$
$U_C(t) = \frac{I_0(\omega_0)}{\omega_0 C} = \frac{U_0}{R}\sqrt{\frac{L}{C}}$
$U_L(t) = \omega_0 L I_0(\omega_0) = \frac{U_0}{R}\sqrt{\frac{L}{C}}$
Bem: $U_C, U_L \gg U_0$ werden $\rightarrow$ Spannungsresonanz

umgesetzte Leistung (nur R)

$$\begin{aligned} P_{\text{wirk}} &= \frac{1}{2} U_0 I_0 \cos\Phi \qquad \cos\Phi = \frac{R}{|Z_{\text{ges}}|} \\ &= \frac{1}{2}\frac{U_0^2}{|Z_{\text{ges}}|}^2 R \end{aligned}$$

maximal bei $\omega_0$, dann $Z_{\text{ges}}$ minimal

**Parallelkreis**

- Resonanzfrequenz $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$
- Strom über R und $P_{\text{wirk}}$ minimal bei $\omega_0$ großer Strom im Kreis von Kondensator und Spule
  $I_C(\omega_0) = I_L(\omega_0) = U_0\sqrt{\frac{C}{L}}$
  $I_C \gg I_R$ Stromresonanz

**Bem:** In Mechanik: Resonanzfrequenz verschoben
Hier: beide Fälle $\omega_{\text{Resonanz}} = \omega_0^{\text{Thomson}}$
Mechanik: Resonanz def. über max. Auslenkung von Pendel/Feder
E-Dynamik: Analogon wäre el. Ladung Q. Aber: Resonanz def. über $I = \frac{dQ}{dt}$ Resonanz für Q auch bei $\omega_R < \omega_0^{\text{Thomson}}$
[Folie: Gekoppelte Schwingkeise]

### III.12.2 Gekoppelte Schwingungen

Zwei induktiv gekoppelte Schwingkreise magnetischer Fluss durch beide Spulen
→ Schwingung in Kreis 1 durch gemeinsamesn magnetischen Fluss bzw. Gegeninduktivitäten $L_{12}, L_{21}$ auf Kreis 2 übertragen
[Folie: Induktive gekoppelte Schwingkreise]

Differentialgl. aus Maschenregel in Kreis 1 und 2

$$L_1 \frac{dI_1}{dt} + R_1 I_1 + \frac{Q_1}{C_1} + L_{12} \frac{dI_2}{dt} = 0$$

$$L_2 \frac{dI_2}{dt} + R_2 I_2 + \frac{Q_2}{C_2} + L_{21} \frac{dI_1}{dt} = 0$$

Terme 1 bis 3 wie bei Serienschwingkreis und letzter Term aus Gegeninduktion

$$\frac{d}{dt} : L_1 \frac{d^2 I_1}{dt^2} + R_1 \frac{dI_1}{dt} + \frac{I_1}{C_1} = -L_{12} \frac{d^2 I_2}{dt^2}$$
$$\frac{d}{dt} : L_2 \frac{d^2 I_2}{dt^2} + R_2 \frac{dI_2}{dt} + \frac{I_2}{C_2} = -L_{21} \frac{d^2 I_1}{dt^2}$$

Lösungsansatz: $I_1(t) = \hat{I}_1 e^{i\omega t} \quad I_2(t) = \hat{I}_2 e^{i\omega t}$
Einsetzen in DGL und sortieren

$$\underbrace{\begin{pmatrix} R_1 + i(L_1\omega - \frac{1}{\omega C_1}) & iL_{12}\omega \\ iL_{21}\omega & R_2 + i(L_2\omega - \frac{1}{\omega C_2}) \end{pmatrix}}_{\text{Impedanzmatrix}\mathcal{M}} \begin{pmatrix} \hat{I}_1 \\ \hat{I}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Triviale Lösung: $\hat{I}_1 = \hat{I}_2 = 0$
Nicht triviale Lösung: Bedingung $\det \mathcal{M} = 0$

$$\det \mathcal{M} = (R_1 + i(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}))(R_2 + i(\omega_2 L_2 - \frac{1}{\omega_2 C_2})) + \omega^2 L_{12} L_{21} \stackrel{!}{=} 0$$

allgemeiner Lösungsansatz
Thomsonfrequenz $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$
Kopplungsparameter $k = \frac{L_{12}}{L}$
Wir haben 2 Eigenfrequenzen ($h \ll 1 \quad \Delta\omega = \omega_1 - \omega_2 = \omega_0 k$)
$k = 0$: Entkopplung Schwingung bei $\omega_0$
$k \to 1$: $\omega_2 \to \infty \quad \omega_1 = \frac{\omega_0}{\sqrt{2}}$ verständlich 1 Kreis mit doppelter Kapazität
$0 < k < 1$: Beobachtung beider Frequenzen bzw. Überlagerung → Schebung

$$\cos \frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t \sin \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t$$

Nun Anregung in Kreis 1: $U(t) = U_0 e^{i\omega t}$
obige Matrix-Gl mit rechter Seite $\begin{pmatrix} U(t) \\ 0 \end{pmatrix}$
Gekoppelte DGL mit Inhomogenität $U(t)$
Allgemeine Lsg: = Allg. Lsg der homogenen DGL (A) + Spezielle Lsg der inhomogenen DGL (B)

(A) freie, gedämpfte Schwingung (s.o.)
Amplitude abklingend ($R \neq 0$) $\rightarrow$ Einschwingvorgang für $t$ groß $A(t) \rightarrow 0$: d.h. kein Beitrag

(B) $t$ groß dominant. Sationäre Lösung Amplitude zeitlich konstat, abhängig von $\omega$

Hier: Bestimmung von (B)
„homogene“ Zeile der DGL:

$$I_1 = -\frac{R_2 + i(L_2\omega - \frac{1}{\omega C_2})}{iL_{21}\omega}\hat{I}_2$$

Einsetzen in „inhomogene“ Zeile

$$-\{R_1 + i(L_1\omega - \frac{1}{\omega C_1})\}\frac{R_2 + i(L_2\omega - \frac{1}{\omega C_2})}{iL_{21}\omega}\hat{I}_2 + iL_{12}\omega\hat{I}_2 = U(t)$$

Daraus $\hat{I}_2$ messen als $U_2$ an $R_2$

$$-\{R_1 + i(L_1\omega + \frac{1}{\omega C_1})\}\{R_2 + i(L_2\omega + \frac{1}{\omega C_2})\} - L_{12}L_{21}\omega^2 = iR_2L_{21}\omega\frac{U(t)}{U_2} \qquad (*)$$

Spezialfall $R \equiv R_1 = R_2 \quad C \equiv C_1 = C_2 \quad L \equiv L_1 = L_2 \quad L_{12} = L_{21}$
Definiere Blindwiderstand $x \equiv \omega L - \frac{1}{\omega C}$
($*$) vereinfacht zu

$$-(R + ix)^2 - L_{12}^2\omega^2 = iRL_{12}\omega\frac{U(t)}{U2}$$

Multipliziere mit $(-\frac{i}{RL_{12}\omega})$ und Kehrwert bilden

$$\frac{U_2}{U(t)} = \frac{RL_{12}\omega}{i(R^2 - X^2 + \omega^2L_{12}^2 - 2RX}$$

$$\frac{|U_2|}{|U(t)|} = \frac{RL_{12}\omega}{\sqrt{(R^2 - X^2 + \omega^2L_{12}^2)^2 + 4R^2X^2}}$$

Bei $\omega = \omega_{1/2}$ Signifikante Übertragung von Leistungen aus Kreis 1 und Kreis 2

### III.12.3 Ungedämpfte Schwingungen

$\rightarrow$ [Folie: Erzeugung einer ungedämpften Schwingung durch manuelle Pulsierung]
[Folie: Erzeugung einer ungedämpften Schwingung mittels Rückkopplung]

## III.13 Elektromagnetische Wellen

1864 Vorhersage von el-magnetischen Wellen J.C.Maxwell

1886 Nachweis von Heinrich Hertz (heute Mikrowellen $\lambda \sim \mathcal{O}(10\text{ cm})$)

1888 Untersuchung der Ausbreitung durch E.lecher
Ausbreitungsgeschwindigkeit $\approx$ Lichtgeschw. c
$\rightarrow$ Licht ist eine el.-mag. Welle
$v_{\text{Welle}} = f\lambda$ $\lambda$ Wellenlänge, $f$ Frequenz

### III.13.1 Lecher-Leitung (LL)

Induktieve Kopplung von offener/geschlossener LL an Schwingkreis mit Frequenz f

**Exp:**

$f \approx 250$MHz Annahme: $v_{\text{Welle}} = c \to \lambda \approx 120$cm
Beobachtung:
Spannungsmaxim (Bäuche) und .minima (Knoten)
Strom minima (Knoten) und -maxima(Bäuche)
Abstand der Knoten $\approx 60$ cm $\approx \frac{\lambda}{2}$ erwartet
Nur für „gute“ Länge der LL Knoten und Bäuche

Erklärung:

- Bildung eines periodischen Strom bzw. Ladungverschiebung
- offenes Ende $I = 0 \to$ Spannungsband
- geschlossenes Ende $U = 0 \to$ Strombauch
- Entstehung einer stehenden Welle wenn $l_{LL}$ auf $\lambda$ abgestimmt ist
  2 abgeschlossene Enden: $l_{LL} = n\frac{\lambda}{2}$
  [Folie: Lecher-Leitung und davor]

**Mathematische Beschreibung**

Ersatzschaltbild $\to$ [Folie: Lecher-Leitung: Ersatzschaltbild]
$l \equiv \frac{L}{z} = \frac{\mu_0\mu}{\pi}\ln(\frac{2a}{d}) \quad c = \frac{C}{z} = \frac{\pi\epsilon_0\epsilon}{\ln(\frac{2a}{d})}$ d Durchmesser der Leiter, a Abstand der Leiter
$r = \frac{R}{z} \quad g = \frac{G}{z} \quad G = \frac{1}{R_{\text{Luft}}}$
ideal: $r \to 0 \quad g \to 0$

**Telegraphengleichung (TGl):**

Leiterstück $dz$ Taylorentwicklung (an Stelle z) für $U(z+dz), I(z+dz)$ bis lin. Term

$$U(z+dz) = U(z) + \frac{\partial U}{\partial z}dz$$

$\partial U$ durch

i) Abfall über r

ii) Induktion in l

$R = \frac{\partial U}{\partial I} \quad G = \frac{\partial I}{\partial U}$

$$\boxed{\frac{\partial U}{\partial z} = -rT - l\frac{dI}{dt}} \tag{1}$$

$$I(z+dz) = I(z) + \frac{\partial I}{\partial z}dz$$

Stromfluss über c und g

$$\boxed{\frac{\partial I}{\partial z} = -\frac{U}{g} - c\frac{dU}{dt}} \tag{2}$$

$I_C = C\frac{\partial U}{\partial t}$ $\quad \frac{1}{g} \to g \quad \frac{\partial I}{\partial z} = \delta U_\pm$
Ableiten von (1) und (2) nach $\frac{d}{dt}$ bzw $\frac{d}{dz}$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial^2 U}{\partial z^2} &= -r\frac{\partial I}{\partial z} - l\frac{\partial^2 I}{\partial z \partial t} \quad \frac{\partial^2 I}{\partial z^2} = -\frac{1}{g}\frac{\partial Z}{\partial z} - c\frac{\partial^2 U}{\partial z \partial t} \\
\frac{\partial^2 U}{\partial t \partial z} &= -r\frac{\partial I}{\partial t} - l\frac{\partial^2 I}{\partial t^2} \quad \frac{\partial^2 I}{\partial t \partial z} = -\frac{1}{g}\frac{\partial U}{\partial t} - c\frac{\partial^2 U}{\partial t^2}
\end{aligned}$$

„Gemischte“ Ableitung aus Zeile 2 in Zeile 1 einsetzen und Ersetzen von 1. Abl durch (1) und (2)

$$\begin{aligned}
\frac{\partial^2 U}{\partial z^2} &= -r\Big(-\frac{U}{g} - c\frac{\partial U}{\partial t}\Big) - l\Big(-\frac{1}{g}\frac{\partial U}{\partial t} - c\frac{\partial^2 U}{\partial t^2}\Big) \\
\frac{\partial^2 I}{\partial z^2} &= -g\Big(-rI - l\frac{\partial I}{\partial t}\Big) - c\Big(-r\frac{\partial I}{\partial t} - l\frac{\partial^2 I}{\partial t^2}\Big)
\end{aligned}$$

Entkopplung von U und I in DGL

TGl.:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial^2 U}{\partial z^2} &= grU + (rc + gl)\frac{\partial U}{\partial t} + lc\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} \\
\frac{\partial I}{\partial z^2} &= grI + (rc + gl)\frac{\partial I}{\partial t} + lc\frac{\partial^2 I}{\partial t^2}
\end{aligned}$$

Beschreibung der Ausbreitung von Signalen auf LL

**Wellengleichung**

approximative Lsg. der TGl für $r = 0, \ g = 0$

$$\boxed{\frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = lc\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} \qquad \frac{\partial^2 I}{\partial z^2} = lc\frac{\partial^2 I}{\partial t^2}}$$

homogene Wellengleichung
hier: $\partial U, \ \partial I$ in z-Richtung
Für bel. Richtung der LL: $\Delta U(\vec{r}, t) = lc\frac{\partial U(\vec{r},t)}{\partial t^2} \quad \Delta I(\vec{r}, t) = lc\frac{\partial I(\vec{r},t)}{\partial t^2}$
Lösungsansatz: $U(z, t) = U_0 e^{i(\omega t \mp kz - \phi)} \quad I(z, t) I_0 e^{i(\omega t \mp kz - \phi)}$
Einsetzen von $U(z, t)$ in Wellen-Gl
$k^2 = lc\omega^2 \quad v_{\text{ph}} = \frac{\omega}{k} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$
$v_{\text{ph}}$ Phasengeschwindigkeit der Welle
Werte für lecher-Leitung einsetzen

$$\begin{aligned}
v_{\text{ph}} &= \frac{1}{\sqrt{\frac{\mu_0 \mu}{\pi} \ln(\frac{2a}{d}) \frac{\pi \epsilon_0 \epsilon}{\ln(\frac{2a}{d})}}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0 \epsilon \mu}} \\
&= \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}} c
\end{aligned}$$

in Medium $v_{\text{ph}} < c$
$v_{\text{ph}}$ unabhängig von Geometrie der LL
„$\mp kz$"-Lösungen: „$-$" Ausbreitung in pos. z-Richtung, „$+$" Ausbreitung in neg. z-Richtung

$$\text{Wellengleichung:} \quad \left(\Delta - \frac{1}{v_{\text{ph}}^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}\right)U(\vec{r},t) = 0$$

Bisher: ideale, unendlich lang
Nun: Verbraucher aus Ende mit Impedanz $Z_V$
Betrachte LL: Stromquelle mit Innenwiderstand $Z_L$

$$Z_L = \frac{U}{I} = \frac{\partial U/\partial z}{\partial U/\partial z} = \frac{-rI - l\frac{\partial I}{\partial t}}{den}$$

hier fehlt was

$$Z_L = \sqrt{\frac{r + il\omega}{g + ic\omega}} \overset{\text{ideal}}{=} \sqrt{\frac{l}{c}}$$

$$\text{Für LL:} \ = \sqrt{\frac{\mu_0\mu}{\epsilon_0\epsilon}}\frac{\ln\frac{2a}{d}}{\pi} = 377\Omega\sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}\frac{\ln\frac{2a}{d}}{\pi}$$

$\sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \approx 377\Omega$ Wellenwiderstand des Volumens
Vollständige Leistungsanpassung: $Z_L = Z_V$

$Z_V \neq Z_L$: nur Teil der Leistung in $Z_V$ umgesetzt der Rest der Leistung reflektiert

Extremfälle: $Z_V = 0$ (Kurzschluss) und $Z_V = \infty$ (offene LL)

$Z_V = 0$ : $U(Z_V) = 0$ Spannungsknoten

$Z_V = \infty$ : $I(Z_V) = 0$ Stromknoten

komplette oder teilweise Reflexion der Welle
$\rightarrow$ Überlagerung von einlaufender und auslaufender Welle $\rightarrow$ stehende Welle (wie in Mechanik bei Seilen)

**Rechnung: zur Entstehung der stehenden Welle**

einlaufend: $U_{\text{ein}}(z,t) = U_0 e^{i(\omega t - kz)}$
Annahme vollständige Reflexion: $\Delta\phi = 0$ an losen Ende
rücklaufend: $U_{\text{rück}}(z,t) = U_0 e^{i(\omega t + kz)}$
Gesamt: $U_{\text{ges}} = U_{\text{ein}} + U_{\text{rück}} = U_0 e^{i(\omega t)}(e^{ikz} + e^{-ikz}) = 2U_0 \cos kz \cos \omega t$ (übergang zu Realteil)
Dies ist stehende Welle mit $\omega = 2\pi f \quad k = 2\pi\lambda$
Weise Beobachtung wenn LL $\infty$-lang, offene Leitung
Hier/Exp: geschlossenes Ende $\Delta\phi = \pi$ beii Reflexion
Endliche Länge $\rightarrow$ viele Reflexionen und Überlagerungen
Bedingung für stehende Welle/konstruktive Interferenz
1 lose / 1 fest (offen/geschlossen) : $l = \frac{2n-1}{4}\lambda$
2 lose oder 2 feste (offen/geschlossen) : $l = n\frac{\lambda}{2}$

#### Wellenausbreitung mit Absorption

jetzt: $r, g \neq 0 \quad r, g < \omega L < \frac{1}{\omega L}$
d.h. Term: „$r \cdot gU(z,t)$“ vernachlässigbar
Ansatz: $U = U_0 e^{i(\omega t - \overline{k}z)}$
Einsetzen in Telegraphen Gl. teile durch $U_0 e^{i(\omega t - \overline{k}z)}$
$-k^{-2} = i(rc + lg)\omega - lc\omega^2$
$\overline{k} = \sqrt{lc}\omega\sqrt{1 - i\frac{rc+lg}{lc}\omega} \approx \sqrt{lc}\omega - i\frac{1}{2}\frac{rc+lg}{\sqrt{lc}}\omega^2$
$(\sqrt{1-x} \approx 1 + \frac{x}{2})$
Def: $k = \text{Re } \overline{k} = \sqrt{lc}\omega$
$\frac{1}{s} = -\text{Im } \overline{k} = \frac{1}{2}\frac{rc+lg}{\sqrt{lc}}\omega^2$
Dann: $U(z,t) = U_0 e^{-z/s} e^{i(\omega t - kz)}$
Welle mit Frequenz $\omega$, Wellenzahl $k$ mit Abnehmender Amplitude ($e^{-z/s}$)

**Exp:**

Koaxialkabel $v^{-1} = 5\frac{\text{ns}}{\text{m}}$ Länge = 20 m
Rechteckimpuls von 75 ns
[Folie: Signalausbreitung auf Koaxialkabel]

## III.13.2 Vakuumwellen

Einleitung: el.-mag. Welle auf Leiter eingeschränkt auch Ausbreitung im Raum (Vakuum/Medien)
[Folie: Vom Schwingkreis zum Hertzschen Dipol]

#### Vom Schwingkreis zum Hertzschen Dipol

C vom Kondensator → C Endplatten → C Stab

- L von Spule → L Windung → L Stab
  offener Schwingkreis: C und L pro Länge
- geschlossener Schwingkreis: $\vec{E}$- und $\vec{B}$-Feld lokalisiert Streufelder vernachlässigbar
- gerader Draht: Ladungen schwingen zwischen Enden $\vec{E}$ und $\vec{B}$ im ganzen Raum ausgedehnt. Ausbreitung mit Lichtgeschwindigkeit $c$
- Antenne für stehende Welle $l = n\frac{\lambda}{2}$
  Sender induktiv an Schwingkreis gekoppelt
  Empfänger: Nachweis von $U/I$ durch Glimmlage / Glühlampe

[Folie: Stabsendesantenne und -empfängerantenne]
[Folie: Wellenlänge in Wasser]

**Wellengleichung**

Betrachte Maxwell Gl. im Vakuum ($\rho = 0, \vec{j} = 0$)

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{rot } \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t}$$

$$\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{E}) = -\vec{\nabla} \times \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial t} \vec{\nabla} \times \vec{B} = -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

Auswertung:

$$\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{E}) = \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) - \Delta \vec{E}$$

3 Maxwell Gl. im Vakuum: $\vec{\nabla} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} = 0$

$$\boxed{\Delta \vec{E} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}} \text{ Wellen gleichung für } E_x, E_y, E_z$$

Ausbreitungsgeschwindigkeit durch Faktor von $\frac{\partial^2}{\partial t^2}$

$$\boxed{\frac{1}{c^2} = \mu_0 \epsilon_0}$$

Kompakte Schreibweise:

$$\underbrace{(\Delta - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2})}_{\partial' \text{ Alambert/Quabla-Operator}} \qquad \vec{E} = 0 \quad \Box \vec{E} = 0$$

Analog für $\vec{B}$-Feld : $\boxed{\Box \vec{B} = 0}$ wellen gl. für $\vec{B}$-Feld

Lsg: $\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_0 e^{i(\omega t \mp \vec{k}\vec{r})}$ Ausbreitung in + bzw. - $\vec{k}$- richtung

<u>**Ebene Welle**</u>

Sei $\vec{k} = k \vec{e}_z$

Ebene Welle: Amplitude konstant in Wellenfront für feste Zeit; Wellenfront: Ebene $\perp \vec{k}$

[Folie: Ebene Welle in z-Richtung]

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial x} = \frac{\partial \vec{E}}{\partial y} = 0 \quad \text{für festes z und t}$$

3MW-Gl: $\vec{\nabla} \vec{E} \overset{\text{Vakuum}}{=} 0 \Rightarrow \frac{\partial E_z}{\partial z} = 0 \Rightarrow E_z = \text{const. in } z$

Aus Wellengl.: $\frac{\partial E_z}{\partial t} = 0 \;\; E_z = \text{const. in } t \; = 0$ durch Randbedingungen

$$\rightarrow \vec{E}(\vec{r}, t) = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\vec{E} \perp \vec{k} \quad \text{d.h. transversale Welle}$$

$$\text{div} \vec{E}(\vec{r}, t) \overset{\text{Ansatz}}{=} \vec{E}_0 i(\mp \vec{k}) e^{i(\omega t \mp \vec{k}\vec{r})} \overset{!}{=} 0$$

$$\vec{E}_0 \cdot \vec{k} \stackrel{!}{=} 0 \Rightarrow \vec{E}_0 \perp \vec{k}$$

für g. Ausbreitungsrichtung 2 lin. unabhängige Lsg.

$$\vec{E}_1(\vec{r},t) = A_x \vec{e}_x e^{i(\omega t - kz)}$$
$$\vec{E}_2(\vec{r},t) = A_y \vec{e}_y e^{i(\omega t - kz)}$$

$A_i$ konstante Amplituden

Einsetze in Welengleichung (z.B. $\vec{E}_1(\vec{r},t)$)

$$-A_x \vec{e}_x k^2 - \frac{1}{c^2}(-A_x \vec{e}_x \omega^2) = 0$$

$$\text{d.h. } c = \frac{\omega}{k} \quad \text{bzw.} \quad V_{\text{ph}} \equiv \frac{\omega}{k} = c$$

keine Dispersion im Vakuum $V_{\text{ph}} \neq V_{\text{ph}}(\omega)$

Räumliche Periodizität

$$\omega t - k(\lambda + z) - (\omega t - kz) = 2\pi \quad k\lambda = 2\pi$$

Zeitliche Periodizität

$$\omega(t+T) - kz - (\omega t - kz) = 2\pi \quad \omega T = 2\pi$$

[Folie: Eben Welle in z-Richtung]

**Polarisation**

- lineare Polarisation: $\vec{E}$ zeigt immer in die selbe Richtung $\perp \vec{k}$
  $\vec{E}_1$ und $\vec{E}_2$ sind linear polarisierte Lösungen

  Phasengleiche Überlagerung von $\vec{E}_1$ und $\vec{E}_2$

  $$\vec{E}_{\text{ges}} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 = A_x \vec{e}_x e^{i(\omega t - kz)} + A_y \vec{e}_y e^{i(\omega t - kz)}$$

  $\vec{E}$-Feld schwingt in Richtung

  $$\hat{a} = \frac{1}{\sqrt{A_x^2 + A_y^2}} \begin{pmatrix} A_x \\ A_y \\ 0 \end{pmatrix}$$

  linear Polarisiert
  [Folie: Linear polarisierte Wellen]

- zirkulare Polarisation
  $\vec{E}$-Vektor dreht sich um $\vec{k}$ mit konstanter Kreisgeschwindigkeit $\omega$
  2 unabhängige Lsg: links/rechts zirkular links/rechts polarisiert
  Aus Überlagerung von 2 lin. polarisierten Wellen mit Phasenverschiebung $\pm\frac{\pi}{2}$

  $$\vec{E}_1'(\vec{r},t) = E_0 \vec{e}_x e^{i(\omega t - kz)}$$

  $$\vec{E}_2'(\vec{r},t) = E_0 \vec{e}_y e^{i(\omega t - kz - \frac{\pi}{2})}$$

$$\vec{E}_2 = \vec{E}_1' + \vec{E}_2' = (E_0\vec{e}_x + iE_0\vec{e}_y)e^{i(\omega t - kz)} = \vec{E}_1 - i\vec{E}_2$$

Richtung von $\vec{E}_L$ aus Realteil

$$\vec{E}_L = \vec{e}_x E_0 \cos(\omega t - kz) + E_0\vec{e}_y \sin(\omega t - kz)$$

festes z: Rotation um k-Achse
[Folie: Zirkular Polarisierte Wellen]
$\sigma_{+/-}$ Drehimpuls der Welle $\sigma_+ : \vec{L} \uparrow\uparrow k$ links zirkular $\quad \sigma_- : \vec{L} \uparrow\downarrow k$ rechts zirkular
elliptische Polarisation: wenn $E_{0,x} = E_{0,y}$ oder $\Delta\phi = \pm\frac{\pi}{2}$
$\vec{E}$-Vektor beschreibt Ellipse um k-Achse

$$\vec{E}_{R,\text{el}} = A_x\vec{E}_1 + iA_y\vec{E}_2 \quad A_x \neq A_y$$

unpolarisiert: wenn $\vec{E}$-Vektor keine zeitlich konstante Richtung und keine Ellipsen periodisch durchläuft, bzw. Richtung in Raum und Zeit statistisch verteilt i.A. Lichtquelle unpolarisiert weil Überlagerung von vielen Emissionen von Atomen/Dipolen.
[Folie: Das Spektrum der el.mag. Strahlung]
[Folie: Messung der Lichtgeschwindigkeit nach B.L. Foucault]

**Stehende Welle**

- Reflexion von ebener Vakuumwelle an Metalloberfläche
- Überlagerung von ein- und rücklaufender Welle
  → stehende Welle

z.B. Welle in z-Richtung, lin. polarisiert in x-Richtung

$$\vec{E}_{\text{ein}} = E_0\vec{e}_x e^{i(\omega t - kz)}$$

$$\vec{E}_{\text{rück}} = -E_0\vec{e}_x e^{i(\omega t - kz)}$$

Metalloberfläche bildet festes Ende. d.h. Phasensprung $\Delta\phi = \pi$ da $\vec{E}_{\text{tangetial}} = 0 \Rightarrow$ „$-E_0$“

$$\vec{E}_{\text{ges}} = \vec{E}_{\text{ein}} + \vec{E}_{\text{Rück}} = -E_0\vec{e}_x e^{i\omega t} \underbrace{\{\overbrace{e^{ikz}}^{\text{Rück}} - \overbrace{e^{-ikz}}^{\text{Ein}}\}}_{2\sin kz}$$

$$|\Re(\vec{E}_{\text{ges}})| = 2E_0\vec{e}_x \sin kz \sin\omega t$$

zwei Metallflächen: Abstand $a = n\frac{\lambda}{2}$ stehende Welle

**Magnetfeld der Wellen**

Betrachte: $\vec{E} = E_0\vec{e}_x e^{i(\omega t - kz)}$ lin. pol. in x-Richtung, Ausbreitung in +z-Richtung

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = E_0(\vec{e}_y)e^{i(\omega t - kz)}$$

$$\text{Maxwell-Gl:} \quad \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \vec{\nabla} \times \vec{E}$$

$$\frac{\partial B_x}{\partial t} = \frac{\partial B_z}{\partial t} = 0$$

$B_x, B_z$ zeitlich konstant und können $= 0$ gewählt werden

$$\frac{\partial B_y}{\partial t} = +ikE_x = ikE_0 e^{i(\omega t - kz)}$$

Integration t: $B_y = ikE_0 \int dt e^{i(\omega t - kz)} = \frac{k}{\omega} E_0 e^{i(\omega t - kz)}$
Also: $\vec{B} = \frac{1}{c}|\vec{E}|\vec{e}_y$ mit $\frac{\omega}{k} = c$
$\vec{B} \perp \vec{E}; \vec{B}, \vec{E} \perp \vec{k}$
Kompakt:

$$\boxed{\vec{B} = \frac{1}{\omega}(\vec{k} \times \vec{E})} \quad \text{im Vakuum}$$

$\vec{B}$ und $\vec{E}$ in Phase schwingen
[Folie: Momentanaufnahme der lin. pol. Welle von E- und B-Feld]

**Hohlraumresonator**

- 3-dim „Einsperrung der Welle“ $\rightarrow$ leitender Hohlraum (Metallquader)
- Betrachte Quader: $l_x, l_y, l_z$ $(a, b, c)$
  [Folie: Hohlraumresonator]
- Tangentialkomponente des $\vec{E}$-Feldes verschwindet auf Wänden
- El.-mag. Welle wird vielfach reflektiert und überlagert
  $\rightarrow$ stehende Welle wenn folgende Bedingungen erfüllt sind

  $$k_x = \frac{l\pi}{l_x} \quad k_y = \frac{n\pi}{l_y} \quad k_z = \frac{m\pi}{l_z} \quad l, n, m \text{ ganze Zahlen} \geq 0$$

  Zsgh:

  $$|\vec{k}| = k = \pi\sqrt{\frac{l^2}{l_x^2} + \frac{n^2}{l_y^2} + \frac{m^2}{l_z^2}}$$

  Mögliche Frequenzen $\omega = V_{\text{ph}} k = ck = c\pi$[siehe oben]
  stehende Welle der Form:

  $$E_{lnm} = E_0(l, n, m) \cos \omega t$$

  [Folie: Resonanzbedingung im Hohlraumresonator]

$E_0(l, m, n)$ ergibt sich aus den Bedingungen

i) $\vec{E} \perp \vec{k}$

ii) $\vec{E}_{\text{tangential auf Wänden}} = 0$

- Frage: wie viele Moden unterhalb Grenzfrequenz $\omega_0$ gibt es ?
  wichtig bei der Quantenmechanik Entwicklung

Vereinfachung: Würfel $l_x = l_y = l_z = a$
Bestimme alle $\vec{k} \leq k_G \quad k_G = \frac{\omega_G}{c}$
Punkte $(n, m, l)$ im $\vec{k}$-Raum mit Gitterkonstanten $\frac{\pi}{a}$
Für $\omega_G$ bzw. $k_G$ groß d.h. $n^2 + m^2 + l^2 \gg 1$
$N_G$ Anzahl der Gitterpunkte durch $\frac{V_{\text{Kugel}}(|\vec{k}|)}{V_0}$
$V_0$ Volumen der Einheitszelle im $\vec{k}$-Raum: $V_0 = (\frac{\pi}{a})^3$
$V_{\text{Kugel}}(|\vec{k}|) = \frac{1}{8}\frac{4\pi}{3}k_G^3 \quad \frac{1}{8}$ nur pos. Oktanten $(n, m, l \geq 0)$
Anzahl der Resonatormoden ergibt sich dazu:

$$\begin{aligned} N_G &= 2\frac{V_{\text{Kugel}}(k_G)}{V_0} \quad \text{2 für Polarisationsfreiheitsgrade} \\ &= 2\frac{\pi}{6}(\frac{a\omega_G}{\pi c})^3 = \frac{8\pi f_G^3 a^3}{3c^2} \quad F_G = 2\pi\omega_G \end{aligned}$$

$$\text{Modendichte:} \quad \frac{N_G}{V} = \frac{8\pi f_G^3}{3c^2}$$

$$\text{Spektrale Modendichte:} \quad \frac{dN_G/V}{df} = \frac{8\pi f_G^2}{c^2}$$

### III.13.3 Hohlleiter

Hohlraumresonator mit zwei offenen Enden
Ziel: Transport von Mikrowellen

a) planparallele Platten in y/z-Ebene im Abstand d Drehung des Koordinatensystems
$\rightarrow \vec{k} = (k_x, 0, k_z) \quad k_z > 0$
Reflexion an Platten mit Phasensprung $\pi$

$$k_x \rightarrow -k_x \quad k_z \rightarrow k_z$$

Polarisation in y-Richtung $(\vec{E} \perp \vec{k})$

$$\begin{aligned} \vec{E} &= E_0\vec{e}_y e^{i(\omega t - k_x x - k_z z)} + E_0\vec{e}_y e^{i(\omega t + k_x x - k_z z)} \\ &= 2iE_0\vec{e}_y \sin k_x x e^{i(\omega t - k_z z)} \end{aligned}$$

aus Bedingungen, $\vec{E}_{\text{tang.}} \overset{!}{=} 0$ folgt $k_x = \frac{n\pi}{d}$ keine Einschränkung auf $k_z$
Resultat: Welle in z-Richtung mit modulierter Amplitude $\sin \frac{\pi k_x}{d} x$
Algemeine Lösung:

a) $\vec{E} \perp$ Ausbreitung $E_0 = (E_{x0}, E_{y0}, 0)$
TE-Wellen transversal elektrisch
b) $E_z \neq 0$ dann $B_0 = (B_{x0}, B_{y0}, 0)$
d.h. $\vec{B} \perp$ Ausbreitung
TM-Wellen transversal magnetisch

„$e^{i(\omega t - k_z z)}$" beschreibt Ausbreitung. Phasengeschwindigkeit $v_{\text{ph}} = \frac{\omega}{k_z}$
Weiterhin gilt $c = \frac{\omega}{|k|} = \frac{\omega}{\sqrt{k_x^2 + k_z^2}}$

$$\rightarrow v_{\text{ph}} = \frac{c}{k_z}\sqrt{k_z^2 + k_x^2} = c\sqrt{1 + \frac{k_x^2}{k_z^2}} \geq c$$

Aber Gruppengeschwindigkeit

$$v_{\mathrm{Gr}} = \frac{\partial\omega}{\partial k_z} = \frac{\partial\omega}{\partial k}\frac{\partial k}{\partial k_z} = \frac{c^2}{\omega}k_z = \frac{c^2}{v_{\mathrm{ph}}} \leq c$$

kleiner als für Wellen im Vakuum
Mit Bedingung $k \overset{!}{=} \frac{n\pi}{d}$ ergibt sich:

$$k_z = \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} - \frac{n^2\pi^2}{d^2}}$$

[Folie: Phasen- und Gruppengeschwindigkeit zwischen parallelen Grenzflächen]

b) <u>Wellenleiter</u>

- Rechteckiger Querschnitt
- Mechanismus wie bei parallelen Platten Reflexion + Überlagerung → Welle entlang Achse eines Hohlleiters
  zusätzliche Bedingung in y-Richtung

  $$\vec{E} = \vec{E}_0(x,y)e^{i(\omega t - k_z z)} \tag{$*$}$$

  Tangentialkomp von $\vec{E} = 0$ auf 4 Wänden
  $(*)$ in Wellengleichung:

  $$\frac{\partial^2\vec{E}_0}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\vec{E}_0}{\partial y^2} + \vec{E}_0\left(\frac{\omega^2}{c^2} - k_z^2\right) = 0 \tag{$**$}$$

  wieder TE und TM - Lsg.
  Hier: TE- Moden, d.h. $\vec{E} \perp$ Ausbreitungsrichtung

  $$\text{Ansatz:} \quad \vec{E}_0 = \begin{pmatrix} E_0x \cos k_x x \sin k_y y \\ E_0y \sin k_x x \cos k_y y \\ 0 \end{pmatrix}$$

  Aus Randbed.: $k_x = \frac{n\pi}{e_x} \quad k_y = \frac{n\pi}{e_y}$
  $l_x, l_y$ Abmessungen des Hohlleiters
  Aus $(**)$ erhalten wir Bedingungen für $k_z$

  $$-k_x^2 - k_y^2 - k_z^2 + \frac{\omega^2}{c^2} = 0$$

  $$k_z = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{c^2}{\omega^2}(k_x^2 + k_y^2)}}$$

  Phasengeschwindigkeit:

  $$v_{\mathrm{ph}} = \frac{\omega}{k_z} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{c^2}{\omega^2}(k_x^2 + k_y^2)}}$$

  Räumliche Periode:

  $$\lambda_{\mathrm{eff}} = \lambda_z = \frac{2\pi}{k_z} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{\omega^2}{c^2}(k_x^2 + k_y^2)}} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \lambda_0^2\left(\frac{1}{\lambda_x^2} + \frac{1}{\lambda_z}^2\right)}}$$

$\lambda_0$ Wellenlänge im Vakuum bei $\omega$
$\lambda_x \equiv \frac{2\pi}{k_x} \quad \lambda_y \equiv \frac{2\pi}{k_y}$
$\lambda_z \geq \lambda_0$ da $v_{\text{ph}} \geq c$
$k_z$ muss reelle Zahl sein

$$\rightarrow \frac{\omega^2}{c^2} \geq k_x^2 + k_y^2$$

$$\frac{\omega^2}{c^2} \geq \left(\frac{n\pi}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{m\pi}{l_y}\right)^2 \quad \text{oder}$$

$$f \geq f_{\text{Grenz}} = c\sqrt{\left(\frac{n}{2l_x}\right)^2 + \left(\frac{m}{2l_y}\right)^2}$$

Hohlleiter wirkt als Hochpass
$f < f_{\text{Grenz}}(n, m)$ können sich nicht ausbreiten
[Folie: Radiowellen in Erdatmosphäre]

### III.13.4 Energietransport

**Intensität der Welle**

Energiedichte des el-mag. Feldes

$$w = \frac{1}{2}E_o(\vec{E}^2 + c^2\vec{B}^2)$$

Mit $\vec{B} = \frac{1}{\omega}(\vec{k} \times \vec{E}) = \frac{1}{c}(\frac{\vec{k}}{|\vec{k}|} \times \vec{E})$ im Vakuum $|\vec{B}| = |\vec{E}|/c$

$$w = \epsilon_0|\vec{E}|^2$$

Ebene Welle unendlich ausgedehnt $\rightarrow E$ unendlich Groß.
Intensität $\equiv$ Energie der Welle die Pro Zeit $dt$ durch die Fläche $A \perp$ zur Ausbreitungsrichtung transportiert wird.

$$I = \frac{E_{\text{em}}}{dt\ A} = \frac{w_{\text{em}V}}{dt\ A} = \frac{w_{\text{em}}\ c\, dt\ A}{dt\ A}$$

Mittellung über Wellenlänge $\overline{\cos^2 \omega t} = \frac{1}{2}$

$$\vec{E} = E_0\vec{e}_x \cos(\omega t - kz_0) \quad \text{an Stelle } z_0$$

$$I(t) = I_0 \cos^2(\omega t - kz_0) \quad I_0 = \epsilon c E_0^2$$

$$\begin{aligned}\overline{I} &= \frac{1}{T}\int_0^T I_0 \cos^2(\omega t - kz_0) dt \\ &= \frac{1}{2}I_0 = \frac{1}{2}c\epsilon_0 E_0^2\end{aligned}$$

Für zirkular polarisierte Welle:

$$\overline{I} = c\epsilon_0 E_0^2 \quad \text{da } |\vec{E}| = \text{const.}$$

Intensität $\sim$ (Amplitude der Welle)$^2$

**Poynting-Vektor $\vec{S}$**

Def:

$$\vec{S} \equiv \vec{E} \times \vec{H} \overset{\text{Vakuum}}{=} \epsilon_0 c^2 (\vec{E} \times \vec{B})$$

Vakuum:

$$\vec{E}, \vec{B} \perp \vec{k} \Rightarrow \vec{S} \upuparrows \vec{k}$$

$$S = |\vec{S}| = \epsilon_0 c^2 |\vec{E}||\vec{B}| = \epsilon_0 c |\vec{E}|^2 = I$$

$\vec{S}$ beschreibt Richtung und Betrag des Energieflusses
Betrachte Volumen V

$$E_{\text{em}} = \epsilon_0 \int_V |\vec{E}|^2 dV$$

keine Verbrauch von $E_{\text{em}}$ in $V$ lediglich Zu- oder Abfluss

$$-\frac{\partial E_{\text{em}}}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_V \epsilon_0 |\vec{E}|^2 dV = \oint_A \vec{S} d\vec{A} = \int_{\substack{\text{Gausscher} \\ \text{Satz}}} \text{div } \vec{S} dV$$

$$\boxed{-\frac{\partial}{\partial t}(\epsilon_0 |\vec{E}|^2) = \text{div } \vec{S}}$$

[Folie: Impulstransport/Strahlungsdruck und davor]

**Impulstransport**

el.-mag. Welle transportiert auch Impuls

| | |
|---|---|
| Impulstransport | $\vec{\pi} \equiv \frac{1}{c^2} \vec{S} = \epsilon_0 (\vec{E} \times \vec{B})$ |
| Strahlungsdruck | $P_{\text{St}} = \frac{F}{A} = \frac{dp}{dt} \frac{1}{A}$ |
| Impulsänderung | $dp = |\vec{\pi}| V = |\vec{\pi}| Ac\, dt$ |

$$\Rightarrow P_{\text{St}} = \epsilon_0 |\vec{E}|^2 = w_{\text{em}} \quad \text{für Absorption}$$

Spiegel mit Reflexion der Welle $\Delta p \to 2\Delta p$

# Kapitel IV

# Test