Theoret. Physik IIa: Elektrodynamik

Klass. el. u. magnet. Erscheinungen im Vakuum und in Materie (nichtrelativist.)

Lit.: J. D. Jackson: Klass. Elektrodynamik 4. Auflage 2006
Nolting Bd. 3
P. Reineker, M. Schulz, B. Schulz: Theor. Ph. II (Wiley 2006)
H. Mitter
H. Stumpf, W. Schuler: Elektrodynamik

Struktur der Theorie der El.dynamik

- Feldtheorie (Nahewirkungstheorie, Kontinuumstheorie, endliche Ausbreitungsgeschw. von Wirkungen)
- lokale Theorie ($\underline{E}(\underline{r},t)$, $\underline{B}(\underline{r},t)$)
- relativist. invariant (relativist. Formulier. mit Vierer-Vektoren im Minkowski-Raum)

Histor. Perspektive:

Vereinheitlichung der el. und magn. WW: Elektrodynamik (Maxwell 1864)

Vereinheitlichung der el.magn. + schwachen WW elektroschwache WW (~ 1970er Jahre)

starke WW : Quantenchromodynamik
Vereinheitlichung von elektroschwacher
+ starker + Gravitations-WW
(nichtlinear, allg. relativist.) :
Grand Unified Theory (GUT)
— noch nicht gelöst

<u>Gliederung</u>

- el. magn. Felder im <u>Vakuum</u>, erzeugt durch lokalisierte Ladungs- und Strom-verteilungen
- el. magn. Felder in <u>Materie</u> :
  Unterscheidung von freien u. gebundenen Ladungen
  → Zus. fassung des Beitrags der <u>mikroskop.</u> gebundenen Ladungen in phänomenolog. Materialkonst. (Dielektrizitätskonst., Permeabilität)
  → phänomenolog. <u>makroskop.</u> Theorie

Klass. Mechanik ⟷ Quantenmechanik

- determinist.
- nichtrelativist.
- nichtlinear

- probabilist.
- nichtrelativ.
- linear

Elektrodynamik

- Feldtheorie (Kontin.theorie, Nahewirkungsth.)
- relativist. invariant
- linear (Superpos.prinzip → Interferenz)
- lokal (nur im Vakuum)

4 fundamentale WW:

Stärke nimmt zu ↓

- gravitations-WW (Masse)
- elektromagn. WW (Ladung)
- schwache WW (β-Zerfall)
- starke WW (Kernkräfte)

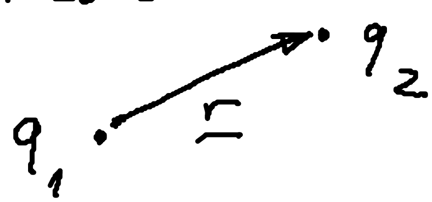
↑ Reichweite nimmt zu

Wichtigste WW auf atomaren bis makroskop. Längenskalen: el. magn. WW

1. Elektrostatik

1.1. Coulomb-WW

C. Coulomb 1736-1806)



$$\boxed{\begin{aligned} \underline{F} &= q_2\, \underline{E}(\underline{r}) \\ \underline{E}(\underline{r}) &= \frac{q_1}{4\pi\varepsilon_0}\,\frac{\underline{r}}{r^3} \end{aligned}}$$

Kraft auf Pkt. lad. q_2 bei $\underline{r}$

el. Feld einer Pkt. lad. q_1 bei $\underline{r}=0$

(i) Einheitensystem: SI (Système International d'Unités) = MKSA

$\Rightarrow$ Ladungseinheit $1\,C = 1\,As$

$\Rightarrow$ Dielektrizitätskonst. $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \frac{C^2 s^2}{kg\, m^3}$

(früher: Gauss-System = cgs $\Rightarrow \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 1$

$\Rightarrow$ elektrostat. Ladungseinheit

$1\,LE = 1\,cm\,dyn^{1/2}$

$1\,C = 3 \times 10^9\,LE$

- zweckmäßig bei mikr. Rechn.
- unzweckmäßig in der makr. E-Dyn. wegen Lad. einheit

(ii) Coulomb-Gesetz gilt bis zu Abständen $r > 10^{-11}\,cm$
darunter: quantenel. dyn. Korrekturen

(iii) Ladung tritt quantisiert auf: $e = 1.6 \times 10^{-19}\,C$

1.2 El. Feld und Potential

Warum wird ein Feld eingeführt?

- Feld als Medium für die Übertragung physikalischer WW (Nahewirkung)
- Feld $\underline{E}(\underline{r})$ ist phys. Zustand des leeren Raumes bei $\underline{r}$
- Eigenständige Felddynamik (Maxwell-Gln.) zur Beschreibung endlich schneller Ausbreitung (Retardierungseffekt)

- Feld kann Energie, Impuls, Drehimpuls aufnehmen und abgeben

Verallgemeinerung des Punktladungsmodells:

Superpositionsprinzip für Kräfte (4. Newton'sches Axiom)

$$\Rightarrow \quad \underline{E}(\underline{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{j=1}^{n} q_j \frac{\underline{r}-\underline{r}_j}{|\underline{r}-\underline{r}_j|^3}$$

Kontinuierliche Ladungsverteilung $dq = \rho(\underline{r}')d^3r'$
(Ladungsdichte $\rho(\underline{r}')$)

$$\Rightarrow \quad \underline{E}(\underline{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int d^3r' \, \rho(\underline{r}') \frac{\underline{r}-\underline{r}'}{|\underline{r}-\underline{r}'|^3}$$

El. stat. Potential:

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

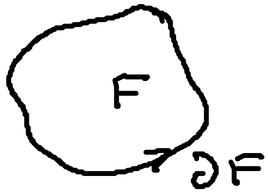
$$\underline{E}(\underline{r}) = -\nabla\phi(\underline{r})$$

Grundgleichungen der Elektrostatik:

$$\boxed{\begin{array}{c} \mathrm{rot}\,\underline{E} = 0 \\ \Updownarrow \\ \underline{E} = -\underline{\nabla}\phi \\ \Updownarrow \\ \oint_{\partial F} \underline{E}\cdot d\underline{s} = 0 \end{array}}$$

wirbelfreies Feld

es ex. ein Pot.



$W = q \int_1^2 \underline{E}\cdot d\underline{s}$ · wegunabh.

$$\boxed{\begin{aligned} &\epsilon_0 \,\mathrm{div}\, \underline{E} = \rho \\ &\quad\Updownarrow \\ &\epsilon_0 \oint_{\partial V} \underline{E} \cdot d\underline{f} = \int_V \rho(\underline{r}')\, d^3r' \end{aligned}}$$

diff. Form } des gauß'sche Gesetz

Integralform

* gauß'scher Int. satz $\int_V d^3r \,\mathrm{div}\, \underline{E}(\underline{r}) = \oint_{\partial V} d\underline{f} \cdot \underline{E}(\underline{r})$

$\underline{E} = -\underline{\nabla}\phi \Downarrow \quad \epsilon_0 \underline{\nabla} \cdot \underline{E} = \rho$

$$\boxed{\Delta \phi = -\frac{1}{\epsilon_0} \rho(\underline{r})}$$

Poisson-gl.

$$\Downarrow$$

$$\boxed{\phi(\underline{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{\mathbb{R}^3} d^3r' \frac{\rho(\underline{r}')}{|\underline{r} - \underline{r}'|}}$$

Coulomb-Gesetz

Lösung der Poisson-gl. zu den Randbed. $\phi(\underline{r}) \to 0$ für $|\underline{r}| \to \infty$