Onlinetraining zur 2. Runde IPhO 2027

E-Lehre Felder (Stefan P. 02.11.2026)

1. Worum geht's eigentlich?

- E-Dynamik ist eine der fundamentalen Theorien d. Physik
- Es geht um Ladungen, el. und magn. Felder und deren Wechselwirkungen
- E-Dyn ist Grundlage f. alle elektrischen Phänomene aber auch f. Optik, Strahlung, ...
- Beschreibung (Ind. f. Felder) ist eher mathematisch

2. Ladung und Coulombkraft

- historisch: Reibungselektrizität und Kraftwirkung

- elektrostatische Phänomene durch Ladung verursacht

Ladung q, Q

- positiv oder negativ
- Ladung ist quantisiert

$$Q = n \cdot e \qquad n \in \mathbb{Z}$$

e: Elementarladung

$$e \approx 1{,}602 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{C} = \mathrm{As}$$

Proton: $n = +1$

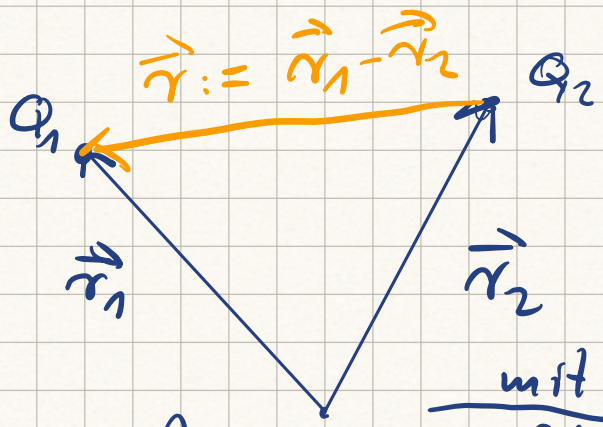
Elektron: $n = -1$

Neutron: $q = 0$

- Ladung ist erhalten
- Superposition

$$Q_{ges} = q_1 + q_2 + \dots + q_N = \sum_{i=1}^{N} q_i$$

- Kraft zwischen Ladungen - Coulombkraft



vektoriell $\vec{F}_C = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \vec{e}_r$

Skalar $|\vec{F}_C| = F_C = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{|Q_1 Q_2|}{r^2}$

mit $\varepsilon_0 = 8{,}8542 \cdot 10^{-12}\ As/Vm$ elektrische Feldkonstante oder Vakuumpermittivität

Einheitsvektor in $\vec{r}$ Richtung

$$\vec{e}_r = \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|}$$

Beispiel Vergleich mit Gravitationskraft

$$F_G = G \frac{M_1 \cdot M_2}{r^2}$$

Phänomene auf mikroskopischer Skala werden durch F_C dominiert, auf makroskopischen dominiert aber F_G.

Warum?

↳ Aufhebung d. Ladungen f. makroskopische Objekte, während Gravitationskraft immer größer wird

Aufgabe Bestimme F_C/F_G für ein Wasserstoffatom. Größenordnung langt.

Größen $r \approx 10^{-10}\,m$ $\quad \varepsilon_0 \approx 10^{-11}\,\frac{As}{Vm}$

$m_e \approx 10^{-30}\,kg$ $\quad G \approx 10^{-10}\,\frac{m^3}{kg\,s^2}$

$m_p \approx 10^3 \cdot m_e$

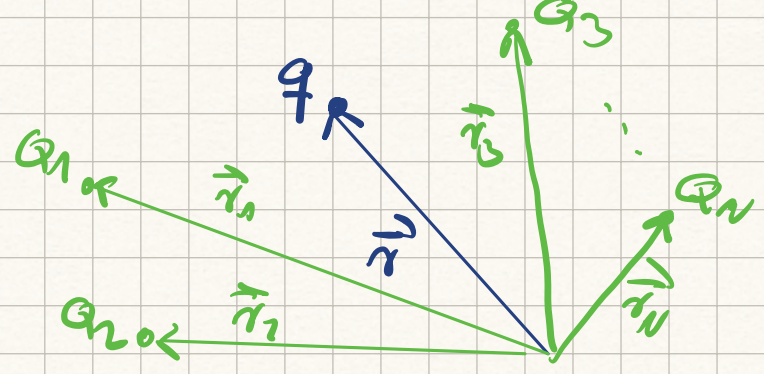
$e \approx 10^{-19}\,As$

$$\frac{F_C}{F_G} = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 G \cdot 10^3 m_e^2} = \frac{10^{-38}}{10^4 \cdot 10^{-11} \cdot 10^{-10} \cdot 10^{-60}} = 10^{38}$$

$$\left[\frac{F_C}{F_G}\right] = \frac{kg\,A^2 s^4 Vm}{As\,m^3\,kg^2} = \frac{VA\,s^3}{m^2\,kg} = \frac{VAs}{kg\,\frac{m^2}{s^2}} = \frac{J}{J} = 1 \quad \checkmark$$

3. Das elektrische Feld

- Situation: Ladung q im $\vec{r}$ und Konfiguration von Ladungen $Q_1, \dots, Q_N$ im Raum an Positionen $\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_N$



- Kraft auf Ladung q

$$\vec{F}_C = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{qQ_1}{|\vec{r}-\vec{r}_1|^2}\vec{e}_{\vec{r}-\vec{r}_1} + \dots \frac{qQ_N}{|\vec{r}-\vec{r}_N|^2}\vec{e}_{\vec{r}-\vec{r}_N}\right)$$

$$= \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\sum_{i=1}^{N}\frac{q \cdot Q_i}{|\vec{r}-\vec{r}_i|^2}\vec{e}_{\vec{r}-\vec{r}_i}$$

$$= q \cdot \sum_{i=1}^{N} \frac{q_i}{4\pi\varepsilon_0} \frac{\vec{r} - \vec{r}_i}{|\vec{r} - \vec{r}_i|^3}$$

$$=: q\,\vec{E}(\vec{r})$$

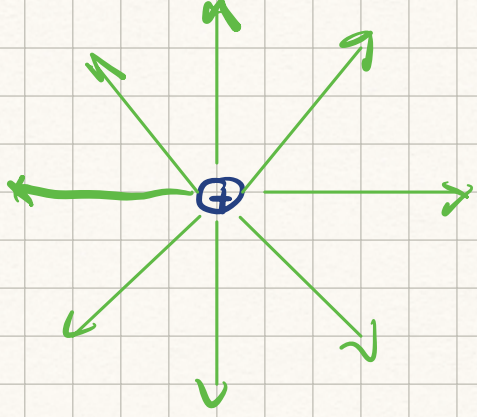
$\vec{E}(\vec{r})$: elektrisches Feld in $\vec{r}$

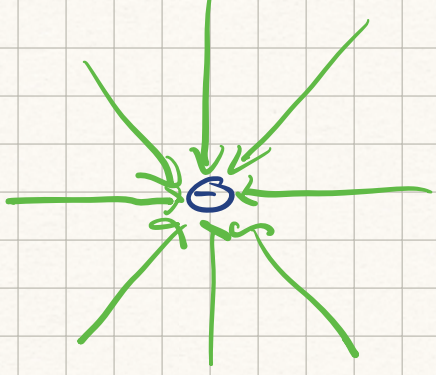
- $\vec{E}(\vec{r})$ ist durch Ladungen q_i festgelegt und schreibt damit jedem Punkt im Raum ein elektrisches Feld zu
- Anstatt Ladungsverteilung zu kennen, langt die Kenntnis von $\vec{E}(\vec{r})$
- Visualisieren durch Feldlinien
- Feldlinien zeigen an jedem Punkt in die Richtung in die eine positive Ladung beschleunigt würde
- Eigenschaften von Feldlinien
  - von positiven Ladungen weg
  - schneiden sich nicht
  - dichter, wo Feld stärker ist
  - Krümmung in Richtung negativer Ladg.
  - Aber: Feldlinienbilder sind nicht eindeutig

Beispiele Feldlinien

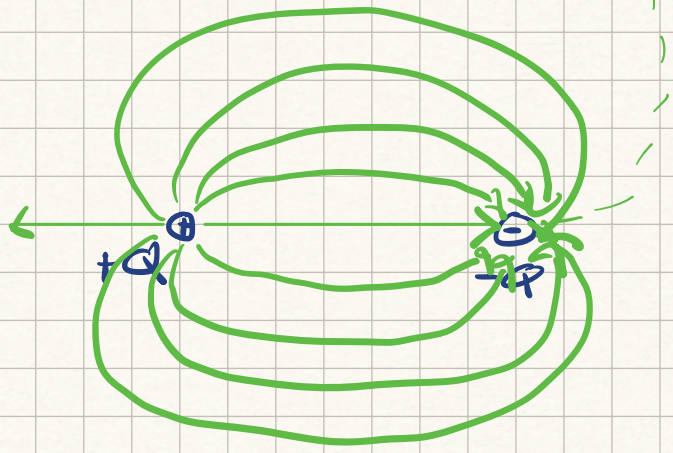
- Punktladungen

isotrop verteilt





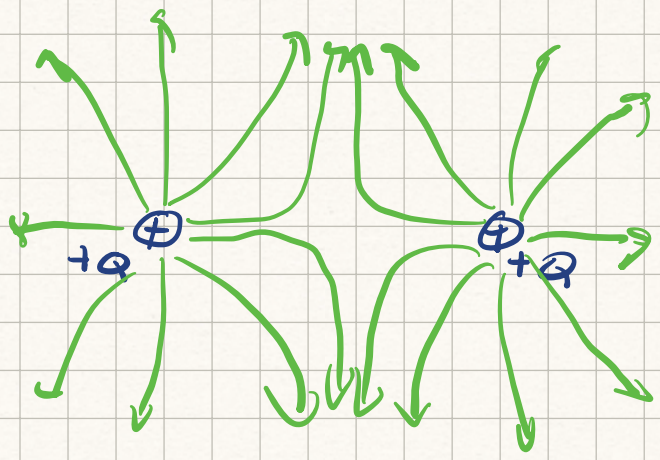
- Ladungspaare



alle geschlossen

↓ Fernbild

⊕⊖ Ladung = 0

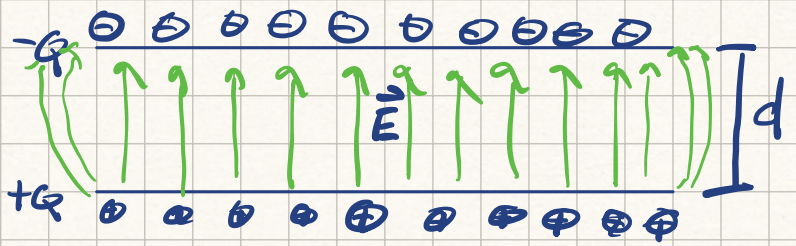


alle offen

↓ Fernbild

⊕⊕ Ladung = +2Q

Beispiel Plattenkondensator



- zwei leitende Platten mit Fläche A und Abstand d
- Ladung ±Q

- Feld im Inneren sehr homogen

$$\vec{E} = \frac{Q}{\varepsilon_0 A}$$ (Beweis s. Skript Orpheus)

4. Arbeit im elektrischen Feld

- Welche Arbeit / Energie wird benötigt, um eine Ladung im elektrischen Feld zu bewegen?

Beispiel Plattenkondensator (q von einer zur anderen Platte)

$$F_C = qE \quad \rightsquigarrow \quad W = F_C \cdot d = Eqd$$
$$= q \cdot \frac{Qd}{\varepsilon_0 A} =: qU$$

Spannung U = Arbeit, die pro Ladung aufgebracht werden muss, um diese von einer auf die andere Platte zu bringen

U ↑ Arbeit pro Ladung (Spannung)

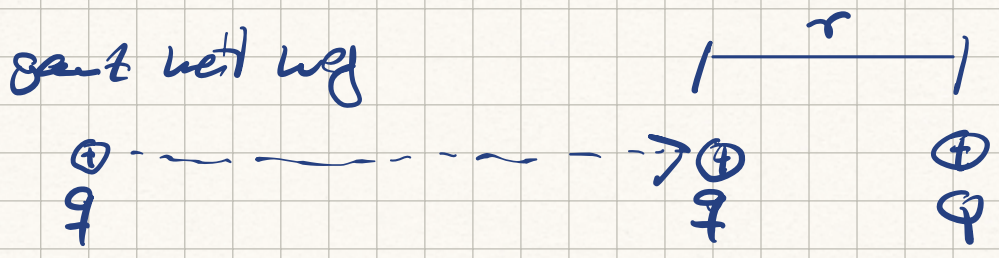
Bemerkung: Im $U = Q\frac{d}{\varepsilon_0 A}$ ist $\frac{d}{\varepsilon_0 A}$ eine Bauteilgröße und wird mit der Kapazität im Verbindung gebracht

$C = \varepsilon_0 \frac{A}{d}$. Damit gilt $C = \frac{Q}{U}$.

Bzw. $C = \frac{Q}{U} = \frac{Q}{E \cdot d} \Rightarrow E = \frac{Q}{C}$

Beispiel Punktladungen

- Punktladung Q im Ursprung und Ladung q, die wir aus dem Unendlichen holen wollen



- Welche Arbeit muss dafür aufgebracht werden

- $F_C = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{qQ}{r^2} \Rightarrow W = -\int_\infty^r dr' \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{qQ}{r'^2}$

$$= -\frac{qQ}{4\pi\varepsilon_0}\int_\infty^r dr' \frac{1}{r'^2}$$

$$= -\frac{qQ}{4\pi\varepsilon_0}\left[-\frac{1}{r'}\right]_\infty^r$$

$$= \frac{qQ}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{1}{r} - 0\right)$$

$$= \frac{qQ}{4\pi\varepsilon_0 r}$$

$$= q\,\frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r}$$

($\frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r}$: unabhg. von q)

$$=: q\,\phi(r)$$

- also $\phi(r) = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r}$ (elektrisches Potential)

- el. Potential heißt jedem Pkt. im Raum eine Potentialhöhe zu.

= Arbeit, um Ladung q von $\vec{r}_1$ zu $\vec{r}_2$ zu bewegen ist

$$W_{\vec{r}_1 \to \vec{r}_2} = q\left(\phi(\vec{r}_2) - \phi(r_1)\right)$$

↳ Spannung

Literatur: Quellen im Überfluss vorhanden, z.B.

Bücher:
- Physikschulbücher
- Standardlehrbücher (Gerthsen, Tipler, Giancoli, Young & Freedman)
- Experimentalphysik 2 (Demtröder)
- Elektrodynamik (Griffiths)
- Electricity and Magnetism (Purcell & Morin)
- Grundkurs theoretische Physik 3 (Nolting)
- Classical Electrodynamics (Jackson)
- ... und natürlich Feynman Lectures (Bd. II)

Web:
- Leifiphysik
- Jaan Kalda Study guides
- Kevin Zhou IPhO material
- Orpheus-Skripte (Vortrag nah daran)