Onlinetraining zur 2. Runde IPhO 2027

E-Lehre Felder (Stefan P. 27.10.2026)

1. Worum geht's eigentlich?

- E-Lehre oder Elektrodynamik ist eine d. fundamentalen Themen der Physik
- Es geht um Ladungen, elektrische u. magnetische Felder und deren Wechselwirkungen
- E-Dyn. ist theoretische Grundlage für alle elektrischen Phänomene aber auch für Optik
- Beschreibung, insb. durch Felder, mathematisch. → wir schauen, dass wir auch auf Phänomene schauen.

2. Ladungen und Coulombkraft

- historisch Reibungselektrizität und eine ungewöhnliche Kraft

- elektrostatische Phänomene durch Ladung bestimmt.

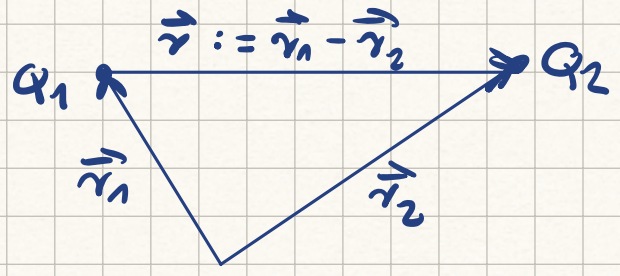
Ladung q, Q
- positiv oder negativ
- skalare Zahl
- Superposition $Q_{ges} = Q_1 + Q_2 + \ldots = \sum_i Q_i$
- Ladung ist gequantisiert

- Ladung ist erhalten

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

$n \in \mathbb{Z}$ Elektron $n = -1$, Proton $n = +1$, Neutron $n = 0$

- Kraft zwischen Ladungen - Coulombkraft



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

mit $\vec{e}_r := \frac{\vec{r}}{r}$

$= \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^3} \vec{r}$

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

$\varepsilon_0 = 8{,}854 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm}$ elektrische Feldkonstante, Vakuumpermittivität

Beispiel Phänomene auf atomaren Skalen werden durch elektrische Kräfte dominiert, auf astronomischen Skalen hingegen dominiert die Gravitationskraft.

WARUM? Gravitationsgesetz $F_G = G \frac{M_1 M_2}{r^2}$

↳ Aufhebung d. Ladung f. makroskopische Objekte, aber Massen addieren sich immer

Aufgabe Wie groß ist das Verhältnis von F_C zu F_G beim Wasserstoffatom? F_C / F_G

$r \approx 10^{-10}\,m$

$m_e \approx 10^{-30}\,kg$

$m_p \approx 1000\,m_e$

$\varepsilon_0 \approx 10^{-11} \frac{As}{Vm}$ $\quad (VAs = kg \frac{m^2}{s^2})$

$G \approx 10^{-10} \frac{m^3}{kg\,s^2} = 10^{-10} \frac{VAs\,m}{kg^2}$

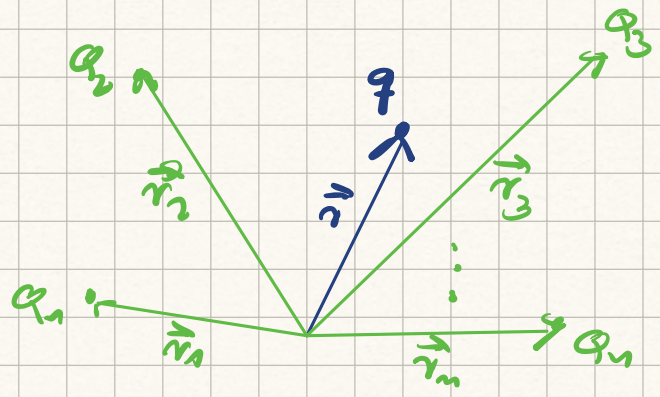
$e \approx 10^{-19}\,As$

$$\left|\frac{F_C}{F_G}\right| \approx \frac{c^2}{\underbrace{4\pi}_{\approx 10} \varepsilon_0 G \cdot 1000 \cdot m_e^2} \approx \frac{10^{-38}}{10^1 \cdot 10^{-11} \cdot 10^{-10} \cdot 10^3 \cdot 10^{-60}} \approx 10^{39}$$

$$\left[\frac{F_C}{F_G}\right] = \frac{\cancel{As}\ \cancel{Vm}\ \cancel{kg}\ \cancel{m}}{\cancel{As}\ \cancel{m^2}\ \cancel{VAs}\ \cancel{m}\ \cancel{kg^2}} = 1$$

3. Das elektrische Feld

- Einzelne Ladung q in $\vec{r}$ und Konfiguration von Ladungen $Q_1, \dots, Q_n$ an Positionen $\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_n$



- ? Kraft auf q

$\vec{F}_C$ = Kraft von Ladung q_1 auf q + ... + Kraft von Ladung q_n auf q

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

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

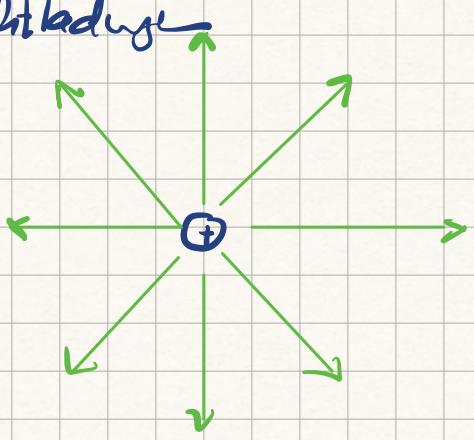
$$\vec{F}_C =: q\,\vec{E}(\vec{r})$$ elektrisches Feld

$\vec{E}$ ist Kombination von $\vec{E}$ ausreichend zur Beschreibung von Wechselwirkungen.

- $\vec{E}(\vec{r})$ ist das durch Ladungen $Q_1, \dots, Q_n$ hervorgerufene elektrische Feld. E-Feld schreibt jedem Pkt. $\vec{r}$ eine Feldstärke $\vec{E}(\vec{r})$ zu. (Vektorfeld)
- Visualisierung von E-Feldern durch Feldlinien. Feldlinien zeigen den Weg, den eine positive Ladung aufgrund der Coulombkraft folgen würde.

Beispiele Feldlinien

- Punktladungen

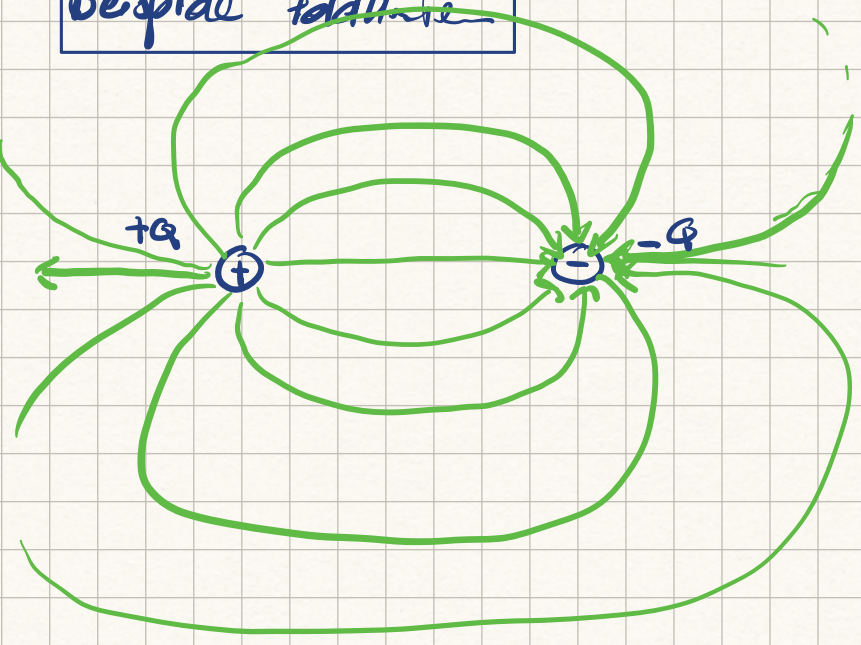




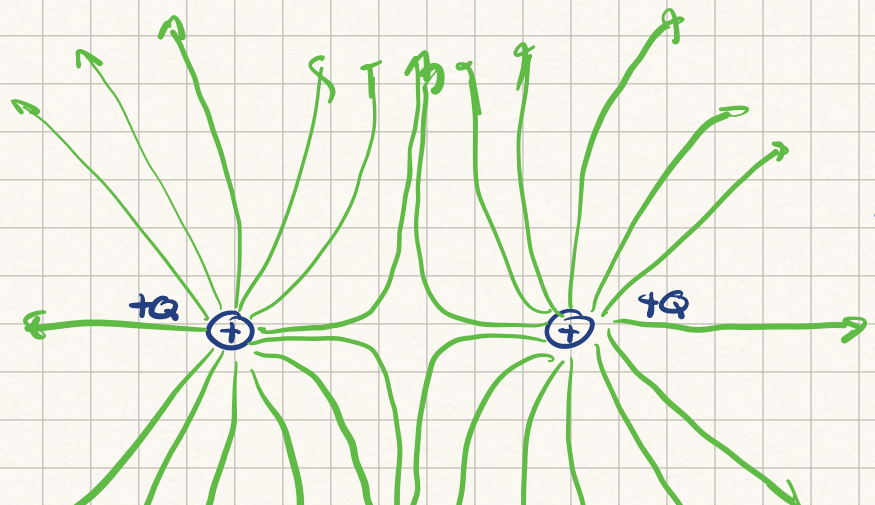
isotrop (immer in Nähe von Punkt-Ldg.)

- Konstruktionsprinzipien v. Feldlinien
  - von positiven Ladungen weg
  - schneiden sich nicht
  - dichter dort, wo Kraft größer ist (Ladungsabhängig)
  - Krümmung in Richtung negativer Ladungen

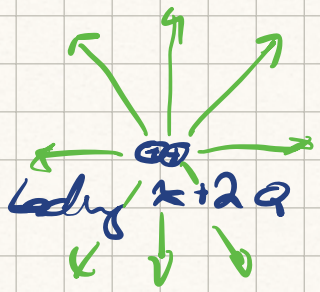
Beispiele Feldlinien



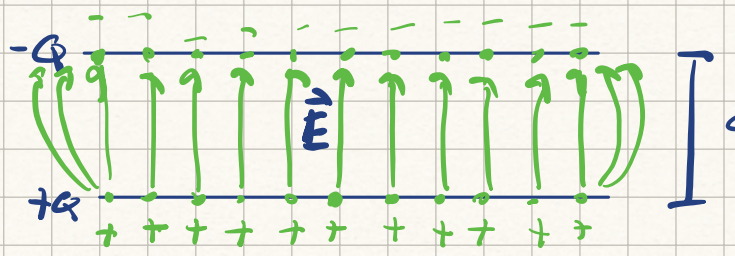
Feldbild alle geschlossen ⇒ ∞ Ladung



alle offen ⇒



Beispiel Plattenkondensator



- zwei leitende Platten im Abstand d
- Ladung $\pm Q$
- Feld im Inneren etwa konstant mit $E = \frac{Q}{\varepsilon_0 A}$ A: Fläche einer Kondensatorplatte

(Details im Orpheus Skript)

Literatur: Quellen in 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 dran)