

E-Lehre - Felder (Stefan P. 04.11.2025)

Vorweg: Quellen im Überfluss vorhanden, z.B.

Bücher: - Physikschulbücher

- Standardlehrbücher (Gerthsen, Tipler,
Giancoli, Young & Freedman)

- Experimentalphysik 2 (Dentöden)

- Elektrodynamik (Griffiths)

- Electricity and Magnetism (Purcell & Morin)

- Grundkurs Theoretische Physik 3 (Nottling)

- Classical Electrodynamics (Jackson)

- ... und natürlich Feynman Lectures (Bd. II)

Web: - Leifiphysik

- Jaan Kalda Study guides

- Kevin Zhan IPHO material

- Orpheus-Skripte (Vortrag war daran)

1. Worum geht's eigentlich?

• E-Lehre oder ED ist fundamentale Theorie d. Physik

• Es geht um Ladungen, d. und magn. Felder und deren Wechselwirkungen

- Basis für Phänomene der Elektrizität, Modernste Übermittlung aber Optik.
- Beschreibung, insbesondere durch Felder ist mathematisch anspruchsvoll.

2. Ladungen und Coulombkraft

- historisch: Reibungselektrizität

- elektrostatische Phänomene durch Ladung bestimmt.

Ladung q, Q

- positiv oder negativ sein
- Superposition $Q_{\text{ges}} = \sum_i Q_i$
- Ladung ist erhalten
- Ladung ist quantisiert

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

mit Elementarladung

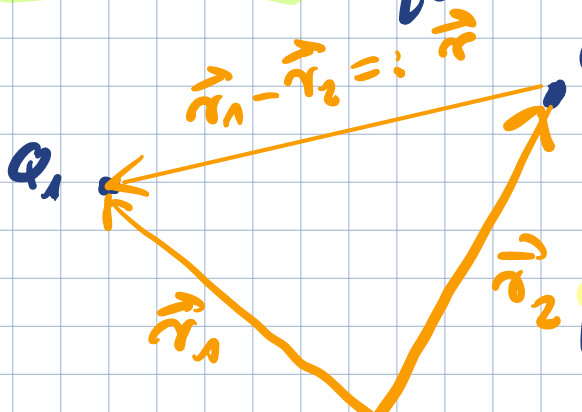
$$e \approx 1,602 \cdot 10^{-19} \frac{\text{As}}{\text{C}}$$

Proton $n=1$

Elektron $n = -1$
Neutron $n = 0$

Kraft zwischen Ladungen

Coulombkraft



$$\vec{F}_C = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \vec{e}_r$$

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

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

mit $\epsilon_0 \approx 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm}$

ϵ_0 : elektrische Feldkonstante od. Vakuumpermittivität

Beispiel

auf atomarem Skalen dominiere elektrostatische Kräfte auf großen Gravitationskräfte. Warum?

Erinnerung: $F_G = G \frac{M_1 M_2}{r^2}$ Gravitationskraft

↳ makroskopische Objekte oft durch große Gewichtskraft aber Masse addiert sich auf.

Aufgabe

Bestimme das Verhältnis F_C/F_G beim Wasserstoffatom. Es liegt eine Abkürzung

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

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

$$\epsilon_0 \approx 10^{-11} \frac{As}{Vm}$$

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

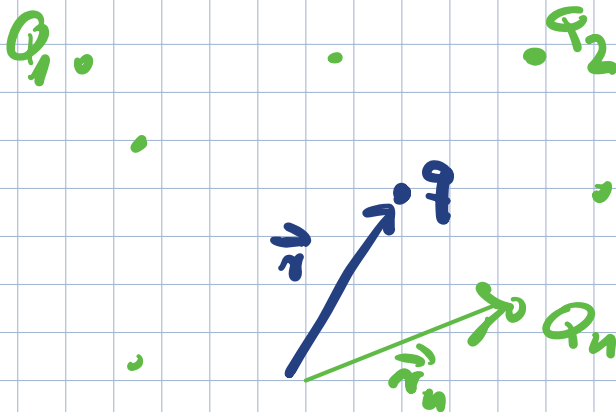
$$m_p \approx 10^{-27} \text{ kg}$$

$$e \approx 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ As}$$

$$\frac{F_C}{F_G} = \frac{e^2}{4\pi \epsilon_0 G m_e m_p} = \frac{10^{-38}}{10^1 \cdot 10^{-11} \cdot 10^{-30} \cdot 10^{-27}} = 10^{39}$$

3. Das elektrische Feld

- Einzelne Ladung q im $\vec{r}$ und Konfiguration von $n \in \mathbb{N}$ Ladungen Q_i im $\vec{r}_i$ $i=1, \dots, n$



- Kraft auf q durch Superposition

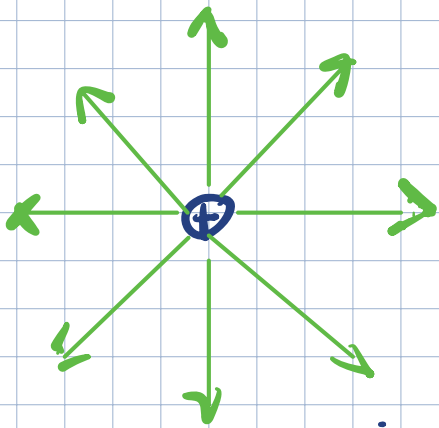
$$\vec{F}_C = \sum_{i=1}^n \frac{q Q_i}{4\pi \epsilon_0} \frac{\vec{r} - \vec{r}_i}{|\vec{r} - \vec{r}_i|^3}$$

$$= q \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{4\pi \epsilon_0} \frac{\vec{r} - \vec{r}_i}{|\vec{r} - \vec{r}_i|^3}$$

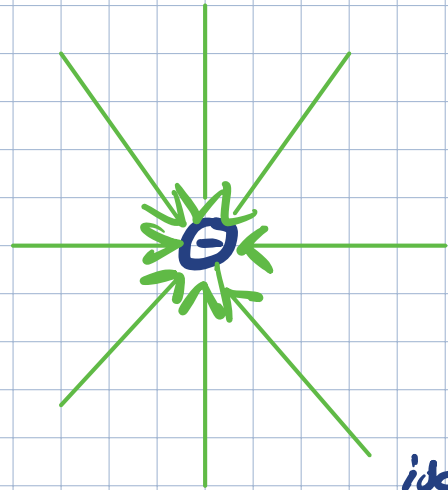
$$=: q \vec{E}(\vec{r})$$

$\vec{E}$: elektrisches Feld

- $\vec{E}$ schreibt jedem Punkt $\vec{r}$ eine Feldstärke $\vec{E}(\vec{r})$ zu $\rightarrow$ Vektorfeld
- Visualisierung durch Feldlinienbilder. Diese zeigen den Weg, den ein positiv geladenes Teilchen aufgrund Coulombkraft folgen würde
- **Feldlinien** (elektrisch)
 - von positiven Ladungen weg
 - schneiden sich nicht
 - Krümmung in Richtung negativer Ldg.
 - dichter, wo elektrisches Feld stärker (Feldlinienbilder sind nicht eindeutig)
- **Beispiele** Feldlinien
Punktladungen

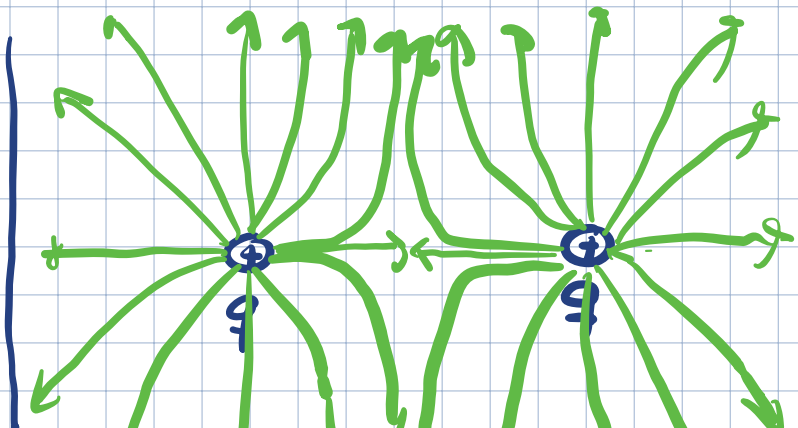
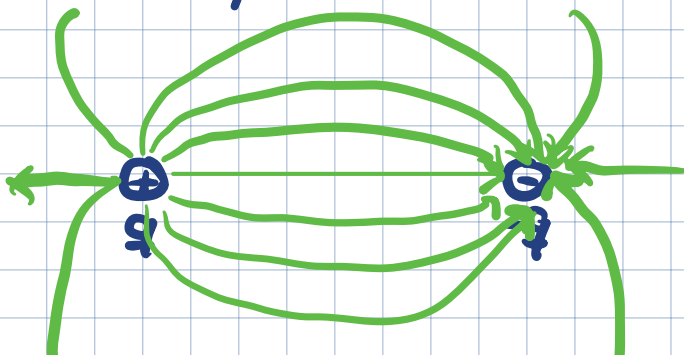


isotrop



isotrop

Ladungspaar



Fernfeld

⊗ ⊗

• $Q=0$

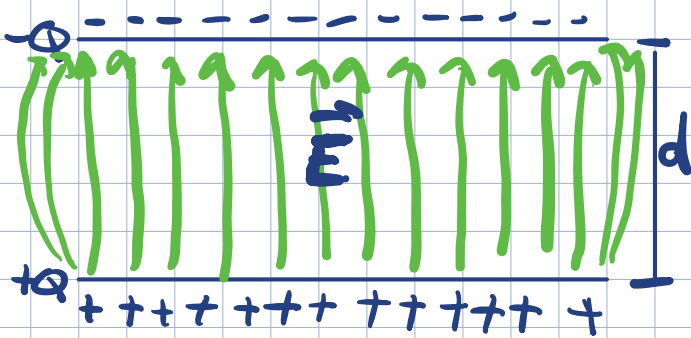
alle
geschlossen

nicht
geschlossen

⊕ ⊕

⊕ $Q=2q$

• Beispiel Plattenkondensator



- zwei leitende Platten mit Fläche A im Abstand d

- Ladung $\pm Q$

- Feld im Inneren eines Plattenkondensators

$$E = \frac{Q}{\epsilon_0 A}$$

(s. Orpheus-Skript)

4. Arbeit im elektrischen Feld, Spannung und Potential

• Welche Arbeit / Energie benötigt, um Ladung im E -Feld zu bewegen.

• Beispiel Plattenkondensator

(Ldg. q von einer zur anderen Platte)

$$F = q E$$

$$\rightarrow W = F \cdot d = q E \cdot d = \frac{q Q d}{\epsilon_0 A} =: q U$$

Spannung: Arbeit, die pro Ladung notwendig ist bzw. gewonnen wird, um diese Ladung zwischen zwei Pkt. im $\vec{E}$ -Feld zu verschieben.

Bemerkung: In $U = \frac{Qd}{\epsilon_0 A}$ ist $\frac{d}{\epsilon_0 A}$ Bauteilgröße

$$\leadsto \text{Kapazität } C := \epsilon_0 \frac{A}{d}$$

$$\Rightarrow C = \frac{Q}{U}$$

• **Beispiel** Punktladungen

- Punktladung Q im Ursprung und Ladung q aus dem Unendlichen bis auf Abstand r



$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qQ}{r^2} \Rightarrow$$

$$W = - \int_0^r dr' \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qQ}{r'^2}$$

$$= \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{1}{r'} \right]_0^r$$

$$= \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r}$$

$$= q \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r}$$

$$=: q \underbrace{\phi(r)}$$

elektrostatisches Potential

unabh. von q

- Analog zum elektrischen Feld $\vec{E}(\vec{r})$ definieren wir das elektrostatische Potential $\phi(\vec{r})$ als die Arbeit pro Ladung, die unendlich ist, bzw. frei wird, um eine Ladung aus dem Unendlichen nach $\vec{r}$ zu bringen

elektisches Potential $\phi(\vec{r}) = - \int_{\infty}^{\vec{r}} \vec{E} \cdot d\vec{s}$

- potentielle Energie ist dann $\phi(\vec{r}) \cdot q$
- Wahl $\phi(\infty) = 0$ ist Konvention
- Bei gegebenem $\vec{E}$ ist Weg für Integration egal (konservatives Kraftfeld)
- Spannung U ist Potentialdifferenz
 $U = \phi(\vec{r}_2) - \phi(\vec{r}_1)$
- Potential bestimmt das E -Feld
 $\vec{E}(\vec{r}) = \text{grad } \phi(\vec{r}) = \vec{\nabla} \phi(\vec{r})$

$\uparrow$
Gradient

Zwei Positronen und zwei Protonen befinden sich anfänglich in Ruhe an den Ecken eines Quadrates der Seitenlänge a . Dabei sitzen die Positronen auf gegenüberliegenden Ecken des Quadrates.

Schätze das Verhältnis der Geschwindigkeiten der Positronen zu der Geschwindigkeit der Protonen ab, wenn sich die Teilchen sehr weit voneinander entfernt haben.

a) potentielle Energie d. Systems

b) Aufgabe s.o.