

E-Lecture - Felder (Stefan P. 28.10.2025)

Vorweg: Quellen im Überfluss vorhanden, z.B.

Bücher: - Physikschulbücher

- Standardlehrbücher (Görthsen, 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 (s. IPHO Website)

- Kevin Zhan IPHO material

- Orpheus-Skripte (Vortrag war daran)

1. Worum geht's eigentlich?

• E-Lecture über Elektrodynamik befasst sich mit
Ladungen, el. und magn. Feldern sowie deren
Wechselwirkungen

• Basis f. alle elektrischen Phänomene (Statik, Dynamik, ...)

Nachrichtentechnik, ...) → aber auch Optik

- Beschreibung durch (Vektor-)Felder unproblematisch ansprechbar.

2. Ladung und Coulombkraft

- historisch

- elektrostatische Phänomene durch Ladung bestimmt.

- Ladung q, Q
 - positiv oder negativ
 - Superposition $Q_{\text{ges}} = \sum Q_i$
 - Ladung ist erhalten
 - Ladung ist quantisiert

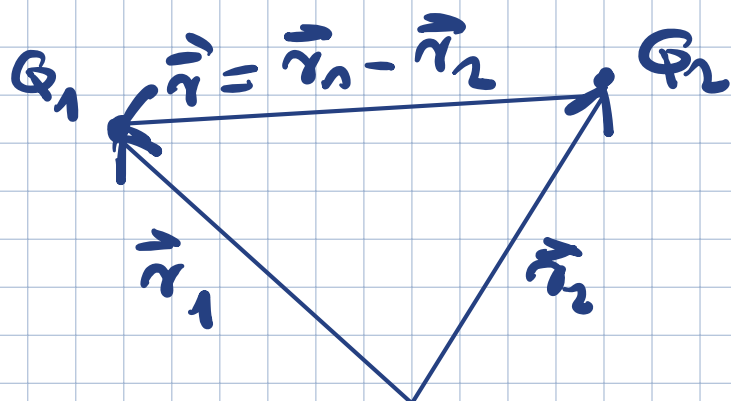
$$Q = n \cdot e \quad n \in \mathbb{Z}$$

e : Elementarladung

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

(Proton $n=1$, Elektron $n=-1$,
Neutron $n=0$)

- Kraft zwischen Ladungen - Coulombkraft



Einhitsvektor

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

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

ϵ_0 : elektrische Feldkonstante oder Vakuum-permeabilität mit

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

Beispiel Auf atomarer Ebene dominieren elektrische Kräfte. Warum werden kosmische Räumene durch Gravitation dominiert?

↳ weil astronomische i.d.R. Objekte elektrisch neutral sind.

Aufgabe Wie groß ist das Verhältnis

von Coulomb- zu Gravitationskraft
beim Wasserstoffatom?

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

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

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

$$G = 10^{-10} \frac{\text{m}^3}{\text{kg s}^2}$$

$$m_p = 1000 m_e$$

$$e = 10^{-19} \text{ As}$$

$$= \frac{\text{VAs m}}{\text{kg s}^2}$$

$$\frac{F_C}{F_G} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \cancel{r^2} \cancel{r^2}} \quad \frac{\cancel{r^2}}{G m_e m_p}$$

$$\approx 10$$

$$= \frac{10^{-38}}{10^1 10^{-11} 10^{-10} 10^3 10^{-60}}$$

$$= \frac{10^{-38}}{10^{-77}}$$

$$= 10^{39}$$

3. Das elektrische Feld

• Einzelne Ladung q in Bereich mit vielen
anderen Ladungen

Q_1 Q_2 Q_i mit $i = 1, \dots, n$
an Orten $\vec{r}_i$

$\vec{r}$

$$Q_n \quad \left| \quad \vec{r}_n \right.$$

- Kraft auf q durch Superposition

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

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

$$\vec{F}_c =: q \vec{E}(\vec{r}) \text{ elektrisches Feld}$$

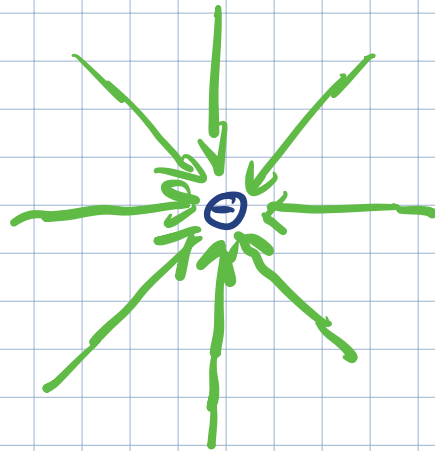
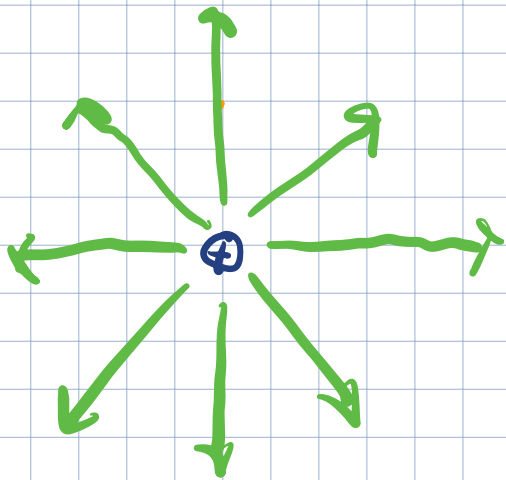
- $\vec{E}(\vec{r})$ durch Ladungen $Q_1 \dots Q_n$ in $\vec{r}$ erzeugte elektrische Feld. $\rightarrow \vec{E}$ jedem Pkt. eine Feldstärke zu.
- Visualisierung durch Feldlinienbilder.

Feldlinien:
(elektrische)

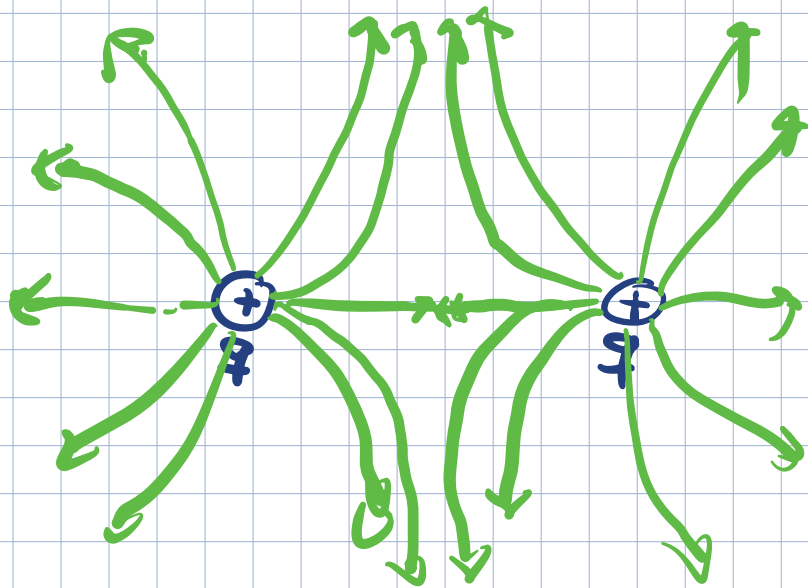
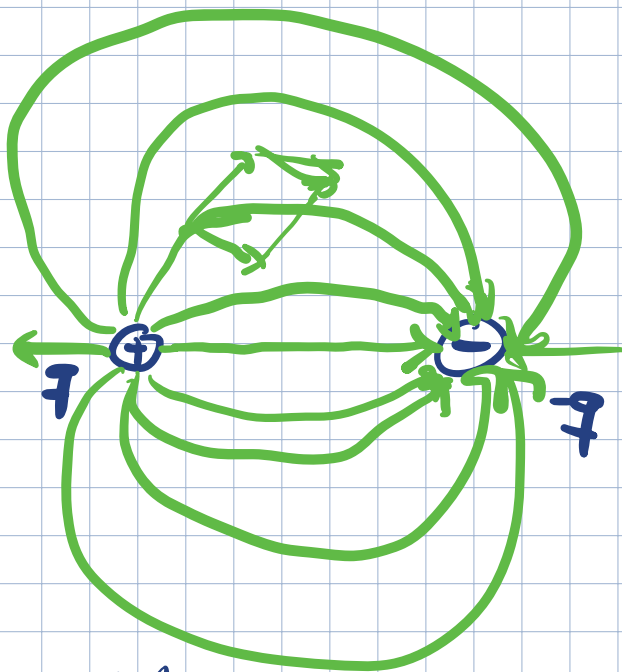
- Zeigen den Weg an, den eine positive Ladung folgt.
- von positiven Ladungen weg.
- schneiden sich nicht
- dichter, wo d. Feld stärker ist.
- gerichtet in Richtung neg. Ladung

Beispiele elektrische Feldlinien

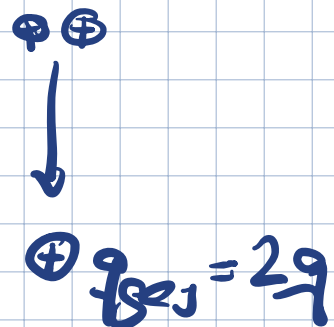
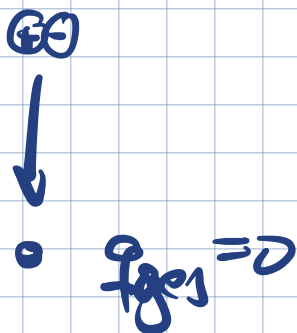
Punktladung (Projektion in Ebene)



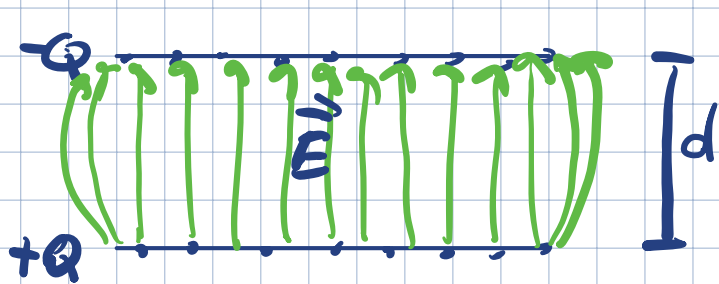
Aufgaben



Fernbild



Beispiel Plattenkondensator



Zwei leitenden Platten mit Fläche A und Ladung $\pm Q$

- Feld im Inneren etwa konstant

$$E = \frac{Q}{\epsilon_0 A} \quad (\text{Dauert im ED1 Ordners})$$

4. Arbeit im elektrischen Feld, Spannung und Potential

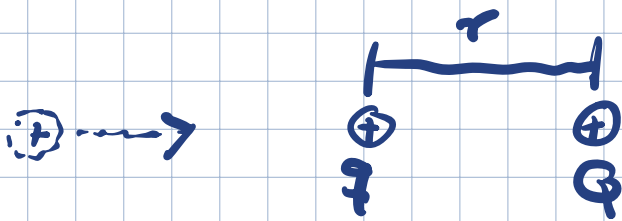
- Welche Arbeit/Energie wird benötigt, um eine Ladung im elektrischen Feld zu bewegen?
- Plattenkondensator, Ladung q von einer zur anderen Platte.

$$\begin{aligned} F &= Eq \quad \leadsto \quad W = F \cdot d \\ &= Eqd \\ &= q \frac{Qd}{\epsilon_0 A} =: qU \end{aligned}$$

- Spannung:** Arbeit, die pro Ladung aufgebracht werden muss / gewonnen wird, wenn eine Ladung von einer Platte zur anderen bewegt wird.

• Definition: In $U = \frac{qQ}{\epsilon_0 A}$ ist $\frac{1}{\epsilon_0 A}$ der Wert -
 grösste
 $\leadsto C := \epsilon_0 \frac{A}{d}$ ist kapazitätsbildend.
 $\Rightarrow C = \frac{Q}{U}$

Beispiel Potential einer Punktladung



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

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

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

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

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

Potential

potentielle Energie
der Ladungskonfiguration

elektrisches Potential

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

- potentielle Energie v. q ist $q\phi(\vec{r})$

- Wahl $\phi(\infty) = 0$ ist beliebig aber konvention
- Bei gegebenem $\vec{E}$ ist Weg von ∞ nach $\vec{r}$ egal
- Spannung U ist Potentialdifferenz

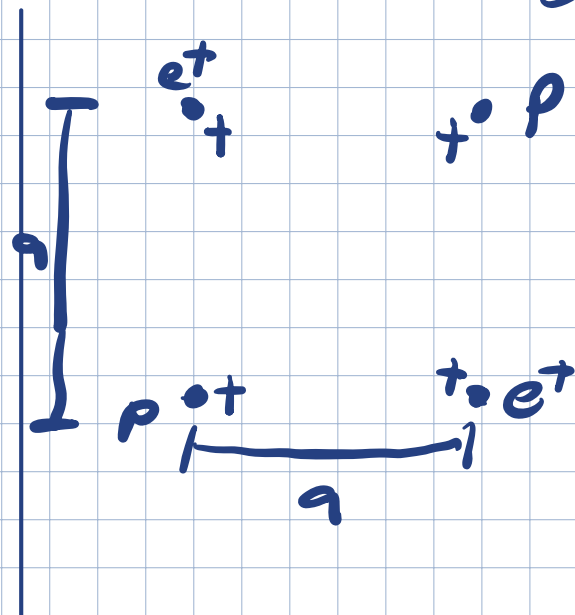
$$U = \phi(\vec{r}_2) - \phi(\vec{r}_1)$$
- Potential bestimmt $\vec{E}$ -Feld über

$$\vec{E}(\vec{r}) = - \underset{\uparrow}{\text{grad}} \phi(\vec{r}) = - \vec{\nabla} \cdot \phi(\vec{r})$$

Gradient $\hat{=}$ Vektorableitung

! im Vortrag habe ich Divergenz (div) genannt statt Gradient. Das war falsch! Sorry.

Aufgabe Ladungsquadrat (4. Rd. IPHO 2012)



a) potentielle Energie d. Anordnung

b) schätze das Verhältnis

$\frac{v_{e^+}}{v_p}$ ab, wenn Teilchen

sehr voneinander entfernt
(mit Trick!)

Originalaufgabe

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.