PHYSIK FÜR CHEMIKER II
Prof. H. Lacker, C. Lange, H. Schulz

Webseite: * http://www-eep.physik.hu-berlin.de/~lacker/physik2chemiker.html

Übungen: * 14-tägig, Mo 9-11, Mi 15-17 jeweils in New 14 1'02, Start: 21./23.4.08
Insgesamt 7 Termine

* Bitte in die Liste für die jeweilige Übung eintragen (Ideal: Gleichverteilung).

* Bearbeitete Hausaufgabenblätter werden korrigiert (C. Lange und H. Schulz)
  Ausgabe: in der Vorlesung
  Abgabe: darauffolgende Vorlesung

* Aktive Beteiligung empfohlen (Starke Korrelation mit Klausurergebnis)

* Hausaufgaben und Anwesenheitsübungen
  Mind. einmal vorrechnen => 1/3 Note Bonus in Klausur

Klausur: 21.7. oder 22.7.08 (Termin wird im Mai bekanntgegeben)

1. Statische elektrische und magnetische Felder

1.1. Elektrische Ladungen und elektrische Felder

1.1.1. Elektrische Ladung

Beobachtung (Griechenland, Altertum):

Bernstein (gr. „elektron“) zieht nach Reibung Stroh und Federn an

---> Versuch: Reibungs-/Berührungselektrizität (E1.1)

Moderne Erklärung:

Eigenschaft der Elementarteilchen	Erzeugt/erfährt Kraft durch
• Masse m	Gravitationsfeld
• (bewegte) elektrische Ladung Q	Elektrisches (Magnetisches) Feld
• Farbladung	Starkes Feld (Kernkräfte)
• schwache Ladung	Schwaches Feld (Radioaktivität)

Empirische Tatsachen:

a) Quantisierung:

Millikan-Versuch (1907): statisch geladene Öltröpfchen im E-Feld

$\Rightarrow$ „Elementarladung“

$$e = 1{,}602 \cdot 10^{-19}\,\mathrm{C} \quad (\text{Coulomb})$$

Elektron e^-	$Q(e^-) = -e$	Teilchen / Antiteilchen
Positron e^+	$Q(e^+) = +e$	$m(e^-) = m(e^+)$
Proton p	$Q(p) = +e$	

Ungelöstes Rätsel: $$\frac{|Q(e^-)|}{Q(p)} \equiv 1 \quad \text{aber} \quad \frac{m(e^-)}{m(p)} \approx 5 \cdot 10^{-4}$$

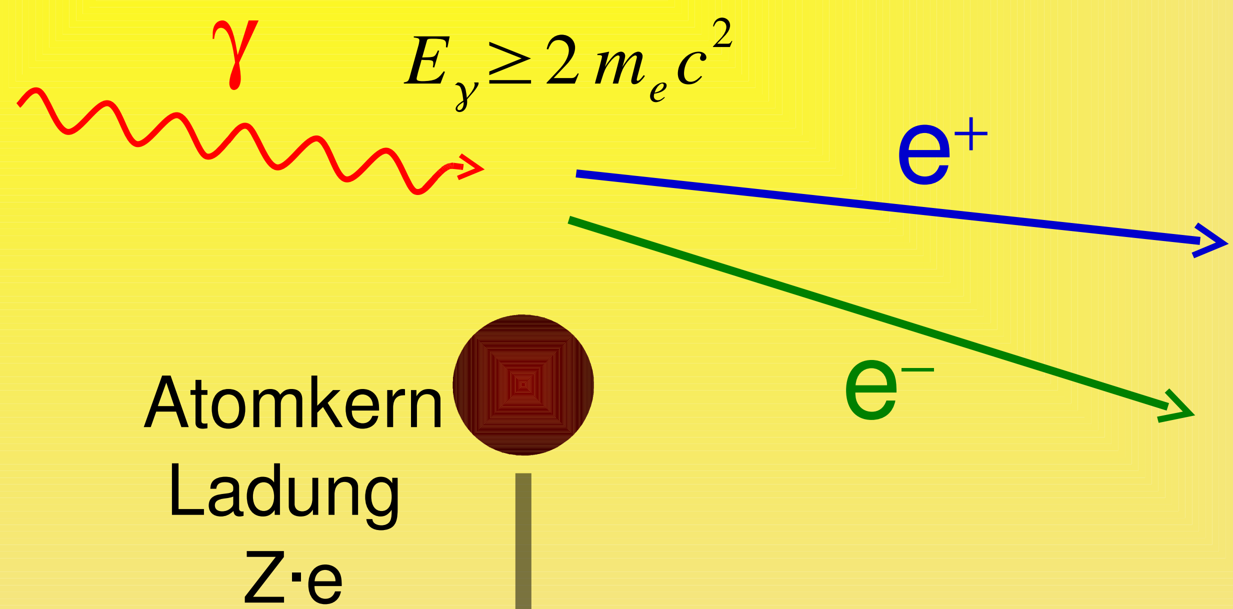
$$\frac{|Q(e^-) + Q(p)|}{Q(p)} < 10^{-21}$$

Essentiell für Stabilität gravitativ wechselwirkender Systeme

a) Ladungserhaltung:

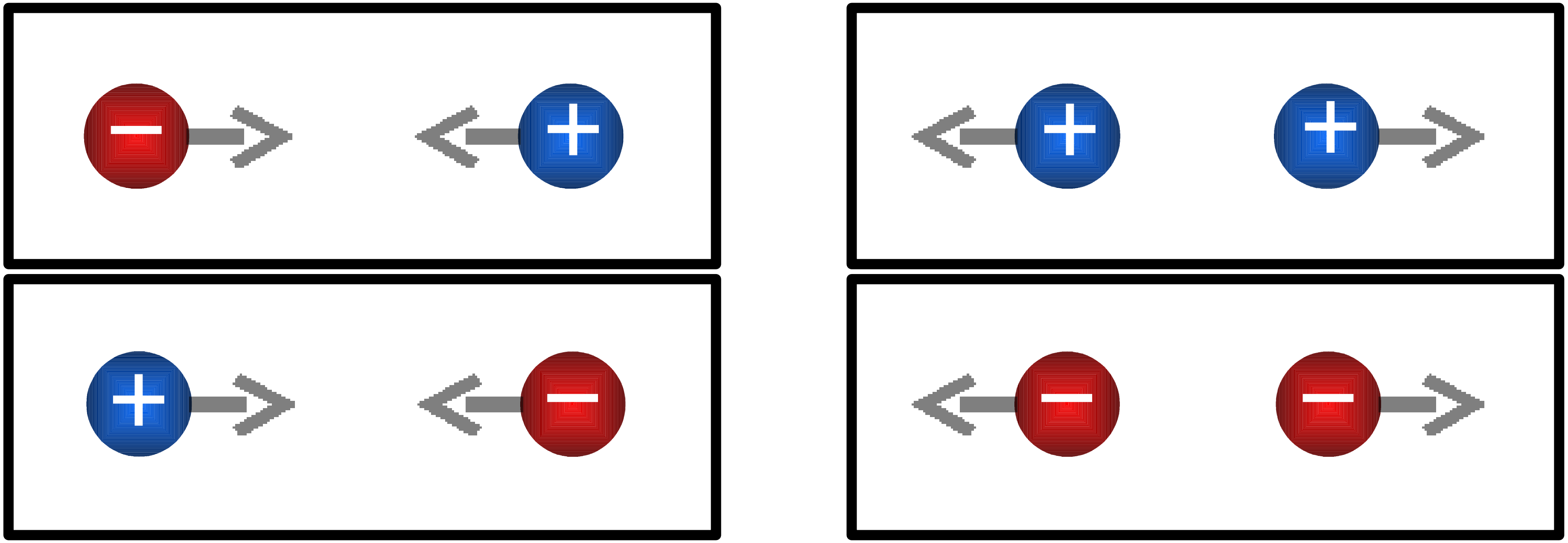
Abgeschlossenes System $\Rightarrow \mathrm{Q}_{\mathrm{tot}} = \sum_i Q_i = \mathrm{const}.$

Beispiel: Konversion von Gamma-Quanten



$$Q_{\mathrm{tot}} = Q(\gamma) = 0 \qquad Q_{\mathrm{tot}} = Q(e^+) + Q(e^-) = 0$$

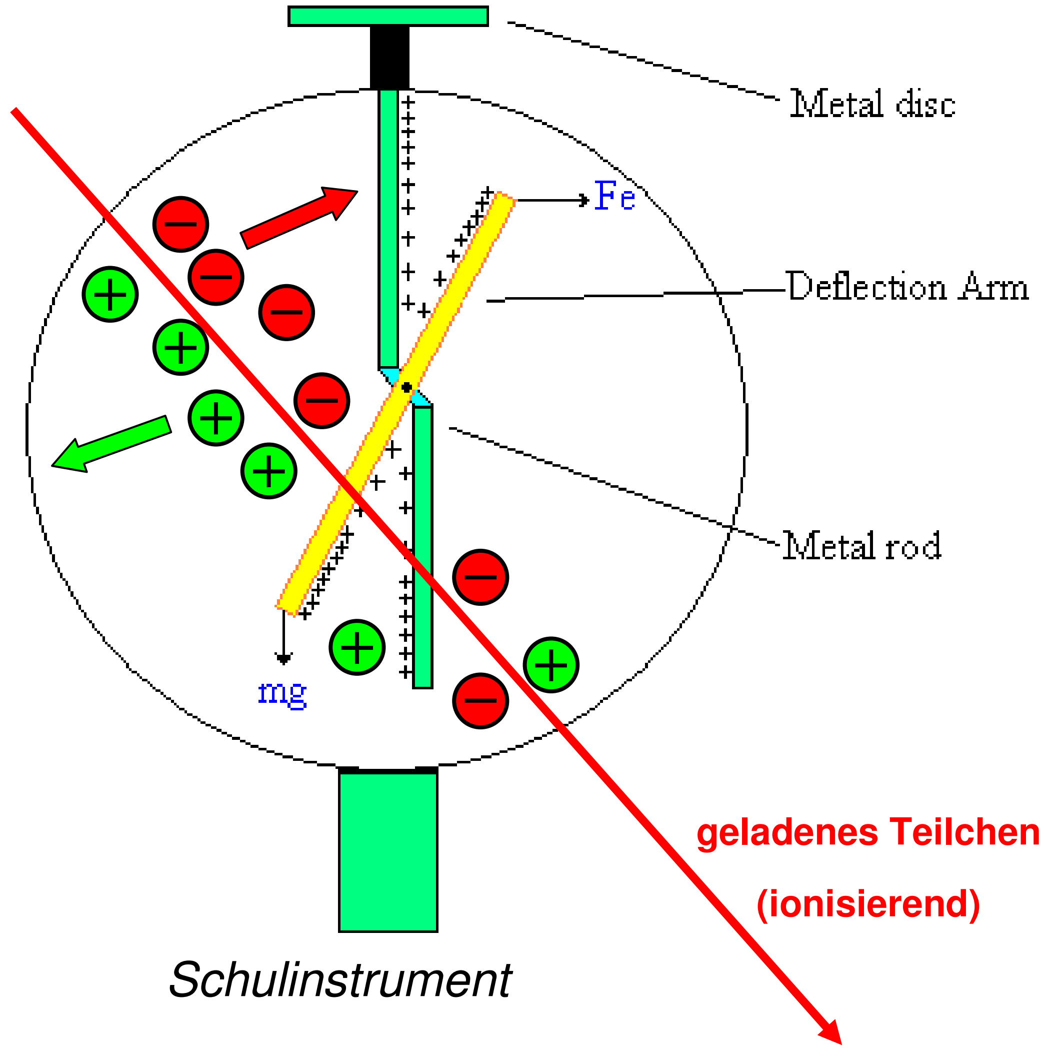
a) Richtung elektrischer Kräfte zwischen Ladungen:



Ungelöstes Rätsel:

Für Elementarteilchen gilt $$\frac{F_{\text{Gravitation}}}{F_{\text{elektrisch}}} \approx O\left(10^{-40}\right)$$

Messung von |Q|: Elektrometer

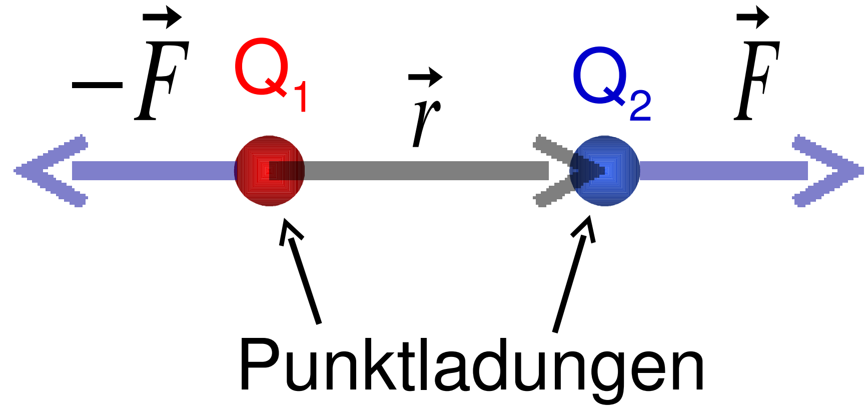


Schulinstrument

---> Versuch: Elektrometer (E1.2)

1.1.2. Das Coulomb-Gesetz

$$\vec{F} = k \cdot \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \cdot \vec{e}_r$$



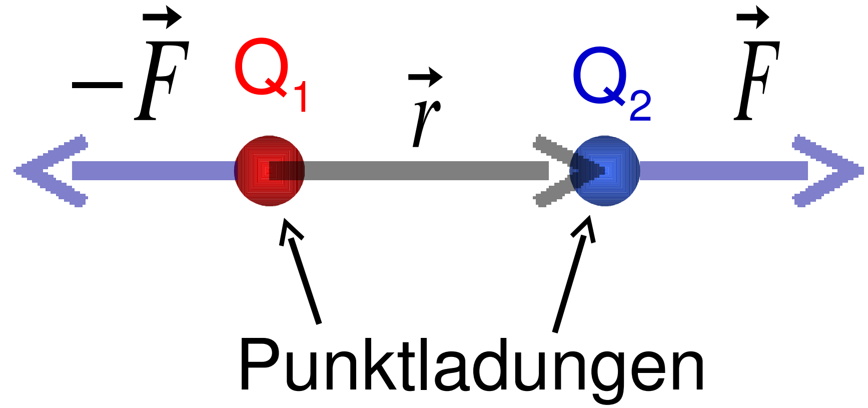
Beliebige Systeme von Punktladungen:

- Gesamtkraft durch Vektoraddition
- Für elektrische (Kraft-)Felder gilt das Superpositionsprinzip

---> Versuch: Coulombgesetz (E4.1)

Einheiten im SI: $[Q] = C = \text{Coulomb} \qquad 1\text{C} = 1\text{A}\,s$

$$\vec{F} = k \cdot \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \cdot \vec{e}_r$$



Mechanische Definition der Stromstärke: 1 A(mpere) = Stromstärke in zwei unendlich langen parallelen geraden Leitern in 1 m Abstand, die pro m Leiterlänge eine Kraft von $2 \cdot 10^{-7}$ N verursacht.

(Ursache für Kraft: Magnetfeld)

$\Rightarrow$ durch einen Drahtquerschnitt fließt pro s die Ladung 1 C

Messung: $k = 8{,}9875 \cdot 10^9$ N m^2 C^{-2}

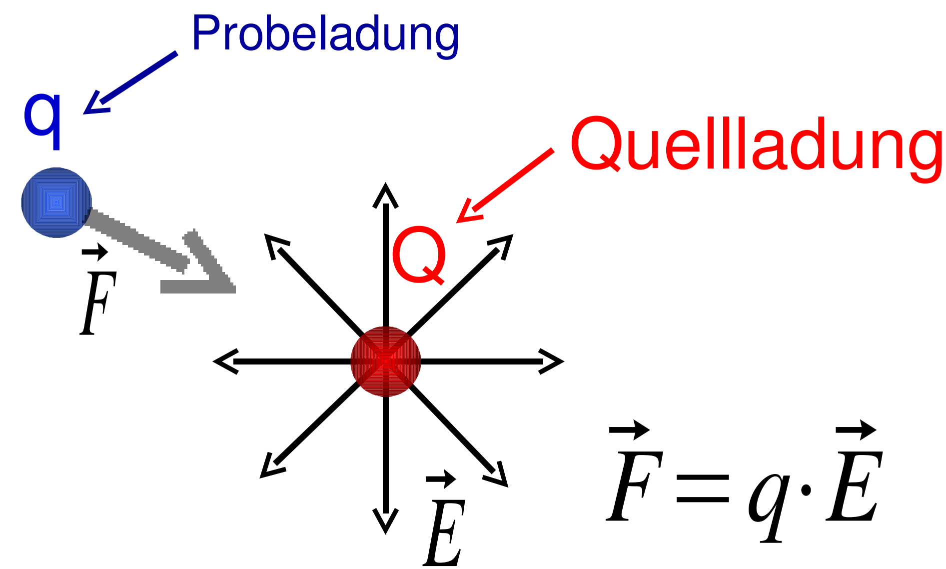
Definition: $$\text{k} = \frac{1}{4\,\pi\,\epsilon_0}$$

Dielektrizitätskonstante

$$\epsilon_0 = 8{,}854 \cdot 10^{-12}\, A^2 s^4 \text{kg}^{-1} m^{-3}$$

1.1.3. Das elektrische Feld

Coulomb-Gesetz:



$$\vec{F} = \underbrace{\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{r^2}}_{} \cdot \vec{e}_r \cdot \mathrm{q}$$

<u>Elektrisches Feld</u> $\vec{E}$
(Eigenschaft der Quellladung Q)

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E}$$

<u>Superpositionsprinzip:</u>

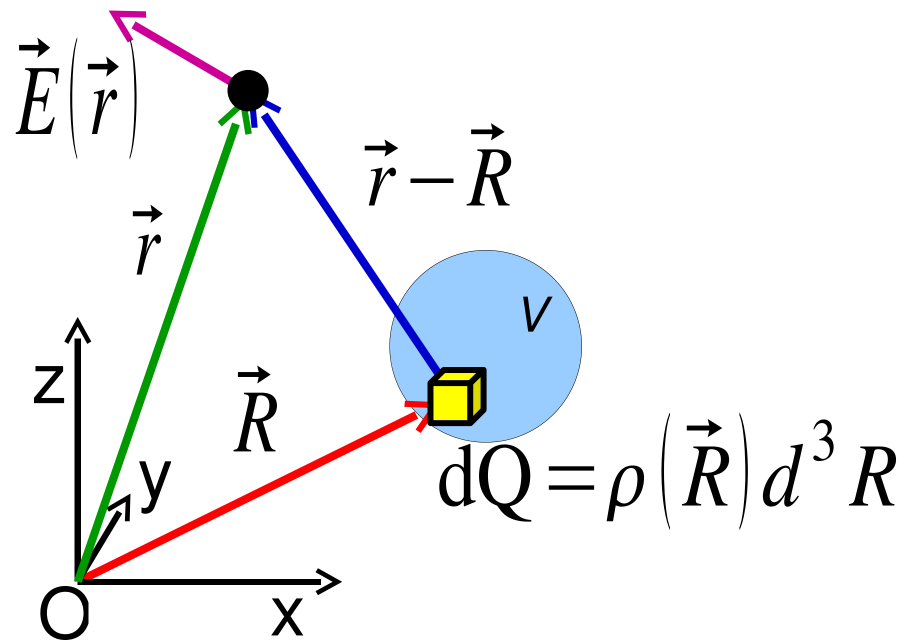
$$\vec{E}\left(Q_1, \ldots, \mathrm{Q}_n\right) = \sum_{i=1}^{n} \vec{E}\left(Q_i\right)$$

<u>Kontinuumsübergang:</u>

$$\sum_i Q_i \;\rightarrow\; \int \mathrm{dQ} = \int \mathrm{dV}\, \frac{dQ}{dV}\left(\vec{r}\right)$$

<u>Ladungsdichte</u> $\rho\left(\vec{r}\right) = \dfrac{\mathrm{dQ}}{\mathrm{dV}}$

$$\vec{E}(\vec{r}) = \int_V d^3R \, \frac{\rho(\vec{R})}{4\pi \epsilon_0} \cdot \frac{\vec{r}-\vec{R}}{|\vec{r}-\vec{R}|^3}$$



$$\mathrm{div}\,\vec{E} = \vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\vec{\nabla} = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z}\right)$$

Ladungen sind die <u>Quellen</u> ($\rho > 0$) bzw. <u>Senken</u> ($\rho < 0$) des elektrischen Feldes

Gaußscher (Integral-)Satz

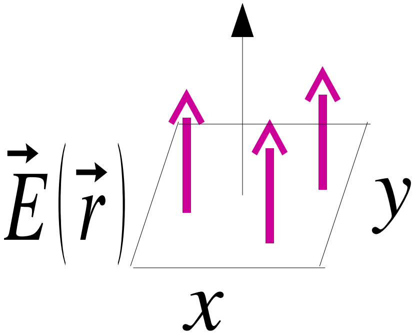
$$\Phi = \oint_A \vec{E} \cdot d\vec{A} = \int_V \vec{\nabla} \cdot \vec{E} \, dV = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

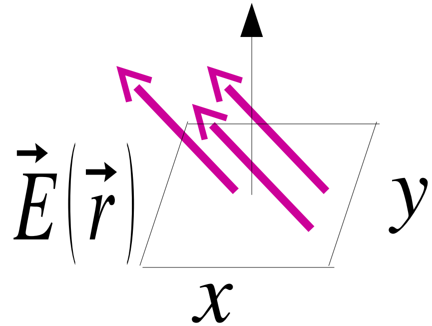
Gaußsches Gesetz

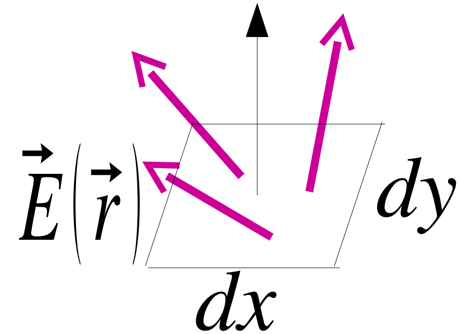
elektrischer Fluss durch A

$$\vec{A} = A\,\vec{e} = x\,y\,\vec{e} \parallel \vec{E}$$

$$d\vec{A} = dA\,\vec{e} = dx\,dy\,\vec{e}$$





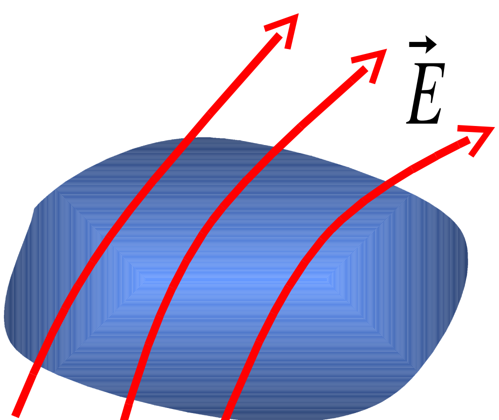


$$\Phi = E \cdot A$$

$$\Phi = \vec{E} \cdot \vec{A}$$

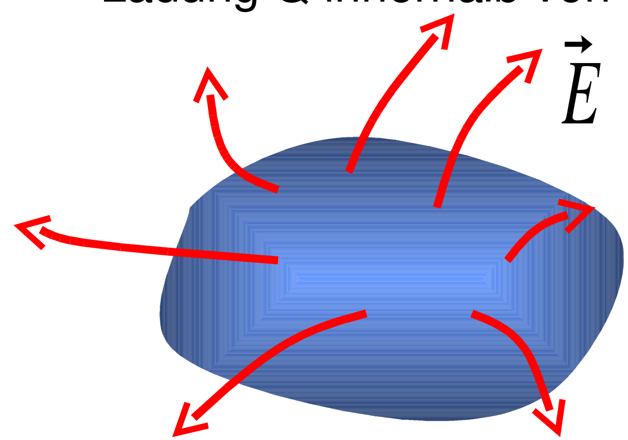
$$\Phi = \int_A \vec{E} \cdot d\vec{A}$$

Ladung Q ausserhalb von V
=> Zahl der eintretenden Feldlinien
= Zahl der austretenden Feldlinien



$$\Phi = \oint_A \vec{E} \cdot d\vec{A} = 0$$

Oberfläche A von Volumen V
Ladung Q innerhalb von V



$$\Phi = \oint_A \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

Folgerung: Das elektrische Feld einer Ladungsverteilung ist als Superposition von Zentralfeldern wirbelfrei.

$$\mathrm{rot}\,\vec{E} = \vec{\nabla} \times \vec{E} = \vec{0} \quad \Rightarrow$$

Es existiert ein elektrisches Potiential ϕ

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = \left(\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z}, \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x}, \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} \right)$$

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}\phi$$

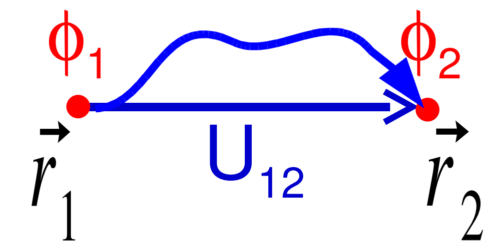
$$\phi(\vec{r}) = -\int_{\vec{r}_0}^{\vec{r}} \vec{E}(\vec{R})\, d\vec{R}$$

$\vec{r}_0$ beliebig; oft $r_0 \to \infty$

Poisson-Gleichung

$$\mathrm{div}\,\vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad \Rightarrow \quad \Delta\phi = -\frac{\rho}{\epsilon_0}$$

Definition: Die Potentialdifferenz zwischen zwei Punkten heißt elektrische Spannung



$$U_{12} = \phi_1 - \phi_2 = \int_{\vec{r}_1}^{\vec{r}_2} \vec{E}\, d\vec{s}$$

Bewegung einer Testladung q durch U_{12}:

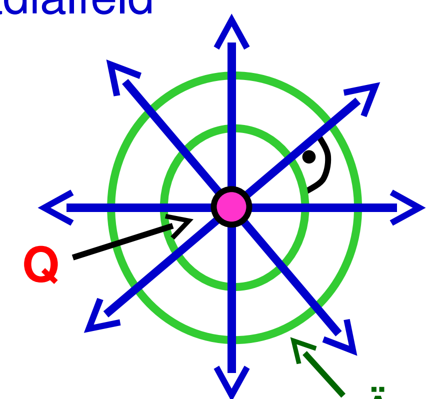
$$E_{\text{pot}} = -\int_{\vec{r}_1}^{\vec{r}_2} \underbrace{q\,\vec{E}}_{\vec{F}}\, d\vec{s} = -qU_{12} \qquad E_{\text{kin}} = +qU_{12}$$

Einheiten:

$$[U] = V = \text{Volt} \qquad 1\text{V} = 1\ \text{kg}\ m^2 A^{-1} s^{-3}$$

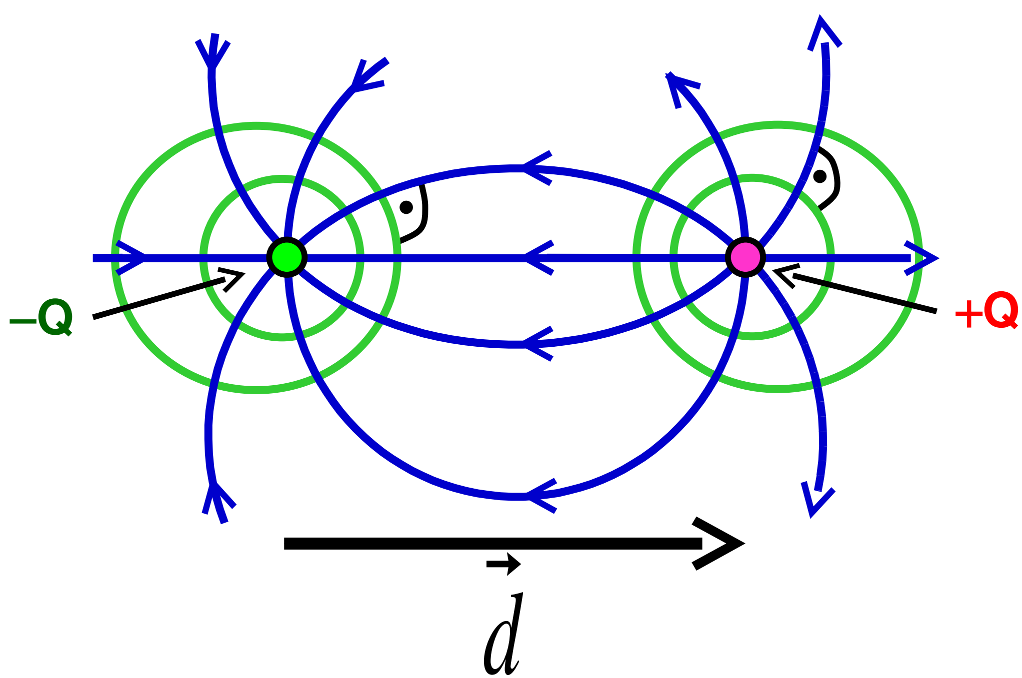
$$[E] = V\ m^{-1} \qquad 1\text{V}\,As = 1\ \text{kg}\ m^2 s^{-2} = 1\ J = 1\ W\ \text{s}$$

Beispiel 1: Feld des elektrischen Monopols



$$\vec{E} = \frac{1}{4\,\pi\,\epsilon_0}\,\frac{Q\,\vec{r}}{r^3} \qquad \phi = \frac{1}{4\,\pi\,\epsilon_0}\,\frac{Q}{r}$$

Beispiel 2: Feld des elektrischen Dipols



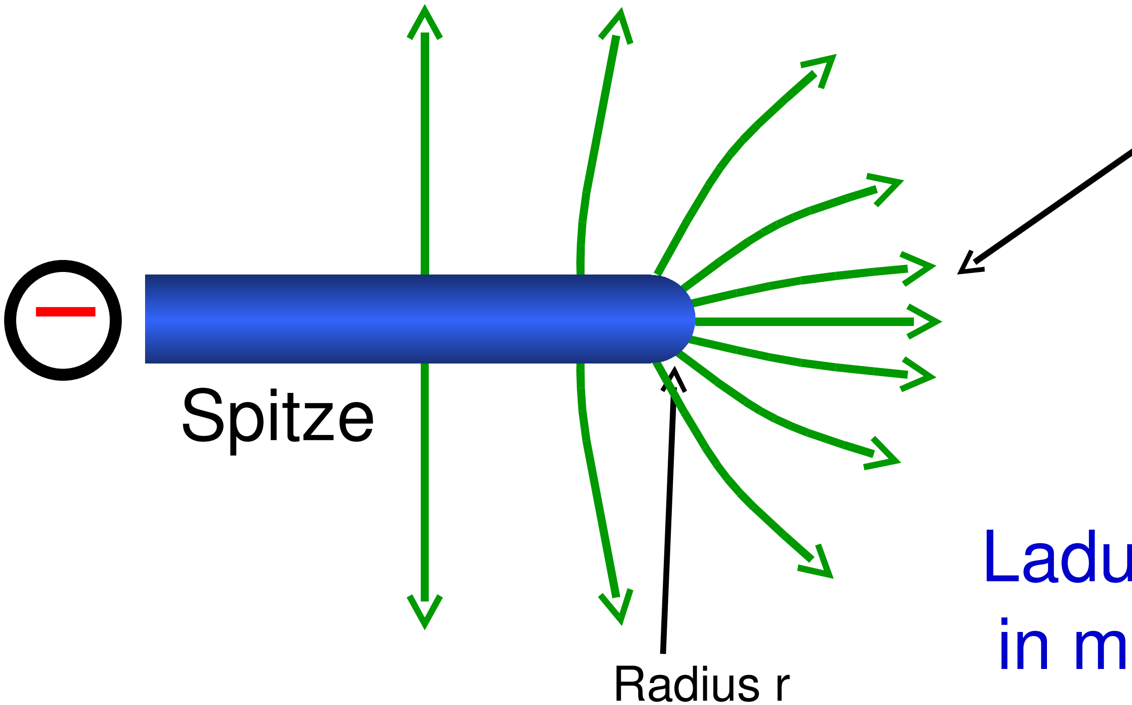
Elektrisches Dipolmoment: $\vec{p}_e = Q \cdot \vec{d}$

$r \rightarrow \infty$: Dipol → Monopol der Ladung Q – Q = 0

$$\vec{E}\left(r \rightarrow \infty\right) \propto \frac{1}{r^3} \qquad \phi\left(r \rightarrow \infty\right) \propto \frac{1}{r^2}$$

--> Übung

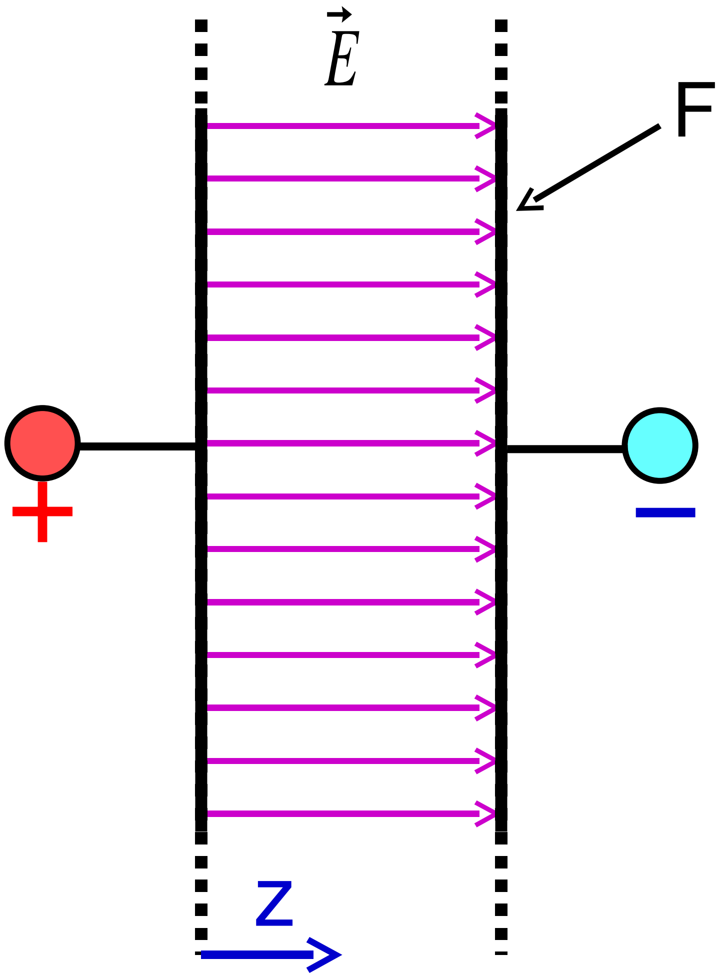
c) Zentralfeld, Spitzeneffekt:



$$E \propto \frac{1}{r^2} \quad \vec{r} \rightarrow 0 \quad \infty$$

Ladungsemission an Spitzen in metallischen Oberflächen

Beispiel 5: Homogenes Feld



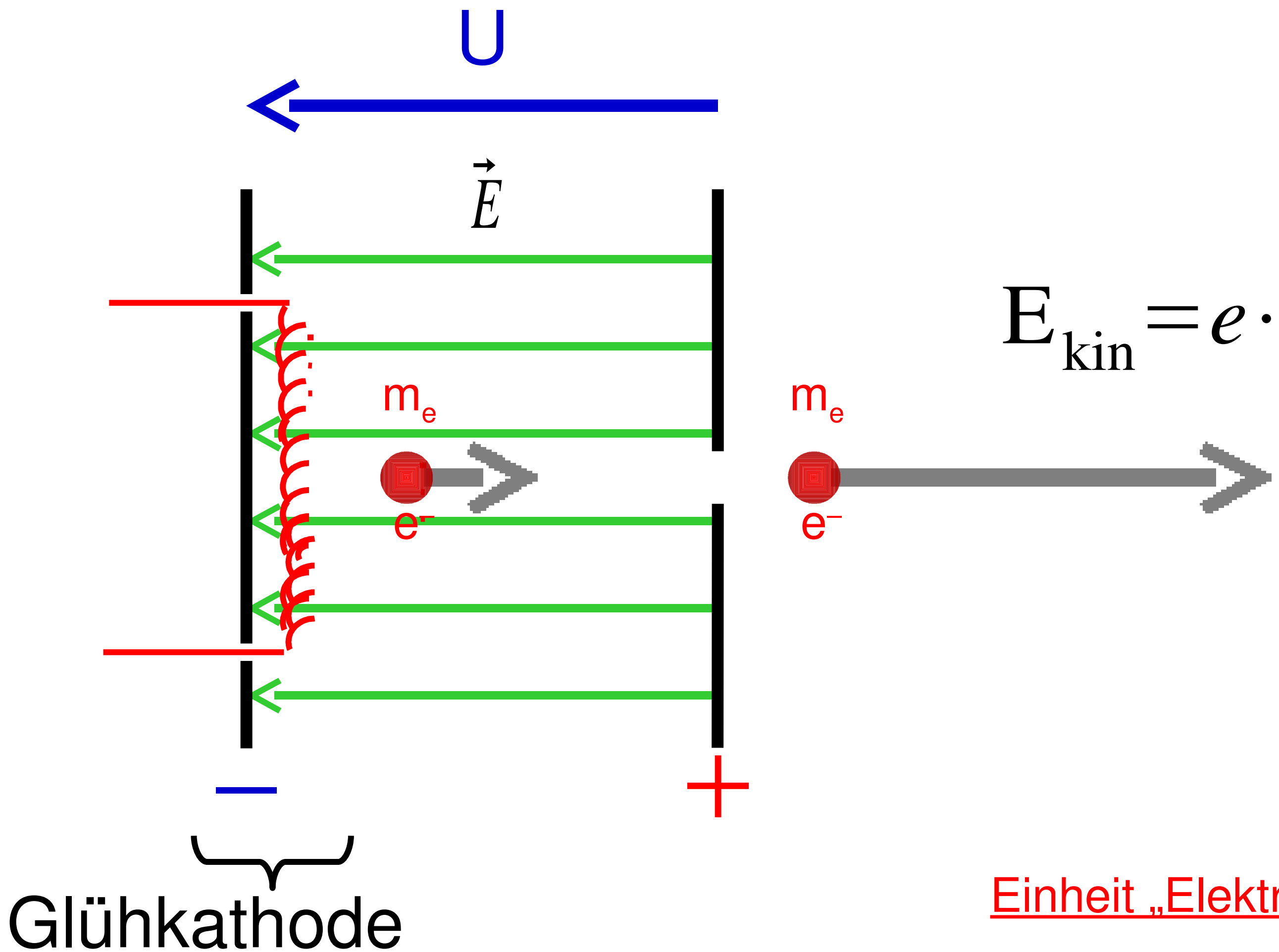
Plattenkondensator

Flächenladung: $\sigma = \dfrac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}A}$

$$\vec{E} = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \cdot \vec{e}_z = \text{const} \,.$$

$$\phi = -\frac{\sigma}{\epsilon_0} \cdot z + \phi_0$$

b) Homogenes Feld, Beschleunigung:



$$E_{kin} = e \cdot U$$

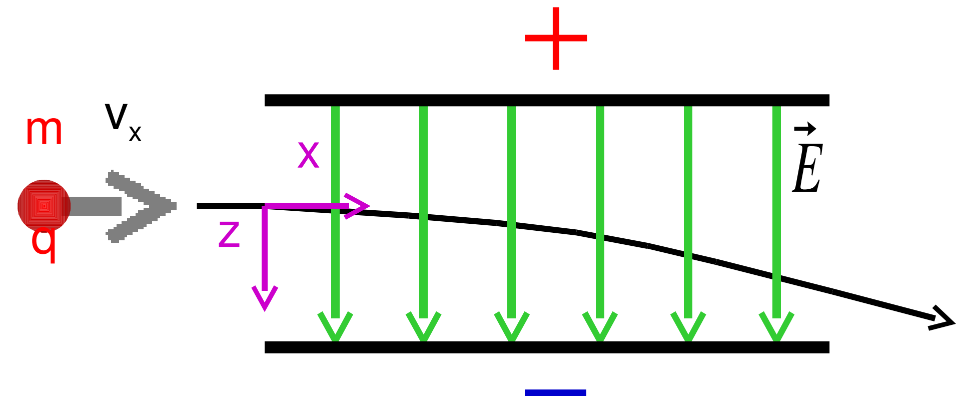
Einheit „Elektronenvolt“:

$$U = 1V \;\Rightarrow\; E_{kin} = e \cdot 1V \equiv 1eV$$

$$1eV = 1{,}602 \cdot 10^{-19}\,J$$

1.1.4. Punktladungen und Dipole im elektrischen Feld

a) Homogenes Feld, Ablenkung:



$$\vec{F} = q \cdot \vec{E} = q \cdot E \cdot \vec{e}_z$$
$$= m \cdot \ddot{z} \cdot \vec{e}_z$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \dot{v}_z = \dfrac{qE}{m} \Rightarrow v_z = \dfrac{qE}{m} t \quad , \quad z = \dfrac{1}{2} \dfrac{qE}{m} t^2 \\ \dot{v}_x = 0 \Rightarrow v_x = \text{const.} \quad , \quad x = v_x t \end{cases}$$

$$\Rightarrow \quad \mathrm{z}(x) = \frac{qE}{2\mathrm{mv}_x^2} \cdot x^2$$ Parabel