EM im großen phys. Hörsaal (hier): Mo 16.6. D.AT 20^{45}

Elektrizitätslehre

Literatur:
- Berkeley Physik Kurs 2 (Purcell)
- Demtröder: Exp. physik 2
- Gehrtsen Physik
- Feynman-Lectures

Bisher: Materialeigenschaft der Masse m & Anziehung durch Gravitation

Neu: Zusätzlich elektrische Ladung q [C, Coulomb]

Kraft $F \sim \frac{q_1 q_2}{r^2} \cdot \frac{\vec r}{r}$ (ähnlich zum Grav.-Gesetz)

ABER: Zwei verschiedene Ladungen + und − ziehen sich an, gleiche Ladungen stoßen sich ab.

· Kräfte zwischen Ladungen sind viel größer als zwischen Massen. z.B. 2 Protonen:

Elektrostat. Abstoßung $= 10^{36} \times$ Grav. Anziehung

Exp: 600 v. Chr. Bernstein (ηλεκτρον) gerieben an Wolle hat kleine Partikel angezogen.

Ladungserhaltung

In einem abgeschlossenen System bleibt die gesamte Ladung konstant. Beispiel: $e^- + e^+ \longrightarrow \gamma + \gamma$ (Ruhemasse $\neq$ const)

Ladungsinvarianz

Ladung ändert sich nicht mit der Geschwindigkeit (im Gegensatz zur Masse)

Das Coulombgesetz

Elektrische Kraft zwischen ruhenden Ladungen

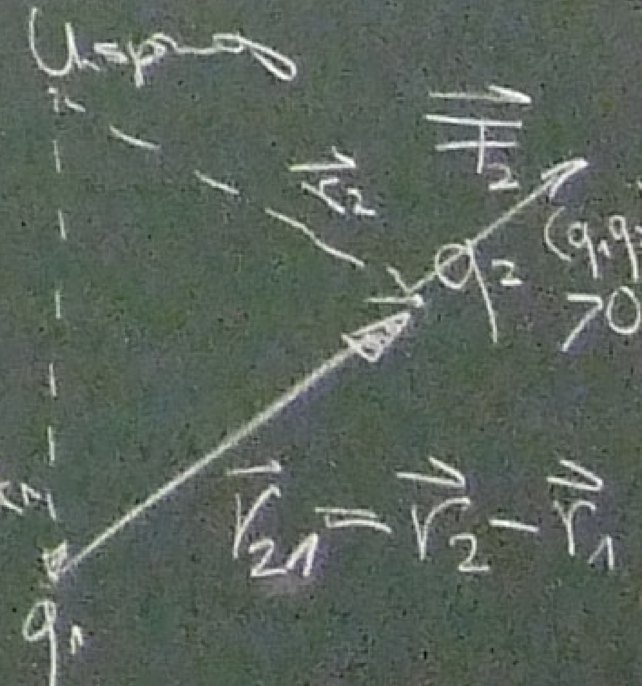
$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad \text{mit}$$

elektrische Feldkonst.

$$\varepsilon_0 = 8{,}854 \cdot 10^{-12} \frac{C^2}{N m^2}$$

· Vektoriell

$$\vec F_2 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{21}^2} \frac{\vec r_{21}}{r_{21}} \qquad r_{21} = |\vec r_{21}|$$



q_1 & q_2 gleich geladen: $q_1 \cdot q_2 > 0 \leadsto \vec F_2 \parallel \vec r_{21}$: Abstoßend

ungleich < 0 $\quad \uparrow\downarrow$: Anziehend

Wie genau $\frac{1}{r^{2+n}} \sim F$

E. R. Williams et al PRL, 26, 721 (1971)

Physical Review Letters

New Experimental test of Coulomb's law

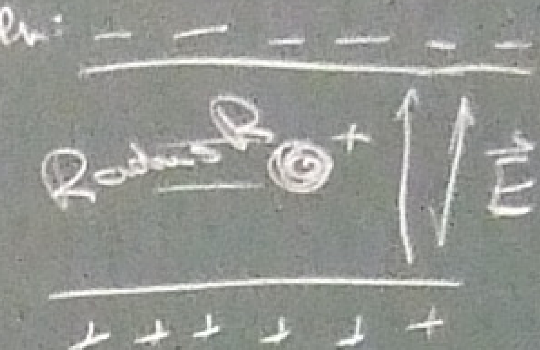
$n = (2.7 \pm 3.1) \cdot 10^{-16}$!

Quantelung der Ladung

1910: Millikanversuch

Man nimmt geladene Öltröpfchen

a) Schweben:



$F = qE = mg$ (1)

b) Fallen lassen:

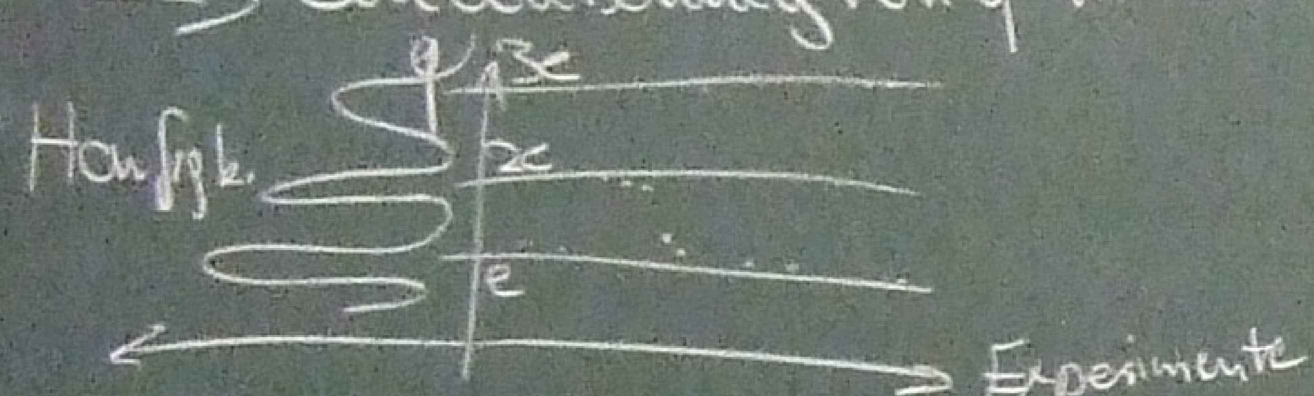
$mg = 6\pi\eta R v$ (2)

(Luftreibung)

$m = \frac{4\pi}{3} R^3 \cdot \rho_{Öl}$

$\rightsquigarrow R \rightsquigarrow m \underset{(1)}{\rightsquigarrow} q$

$\Longrightarrow$ Quantelung von q in Schritten von e



$e = 1.602 \cdot 10^{-19}\,C$

Die Coulombkraft

- Hält Atomkern & Elektron zusammen (Quantenmech verbietet bel. Annäherung)
- Verbindet Atome zu Molekülen & Festkörpern
- Protonen halten sich gegen die Coulombkraft im Kern zusammen, weil stärkere Kernkräfte existieren.

Das elektrische Feld $\vec{E}$

Feldstärke $\vec{E}$ gibt Kraft auf eine positive Einheitsladung q

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad \left[\frac{\text{Kraft}}{\text{Ladung}} = \frac{N}{C}\right] = \left[\frac{\text{Volt}}{\text{Meter}} = \frac{V}{m}\right]$$

$\vec{E}$ ist die Veränderung des Raumes, so daß eine Ladung eine Kraft erfährt.

Beispiele:

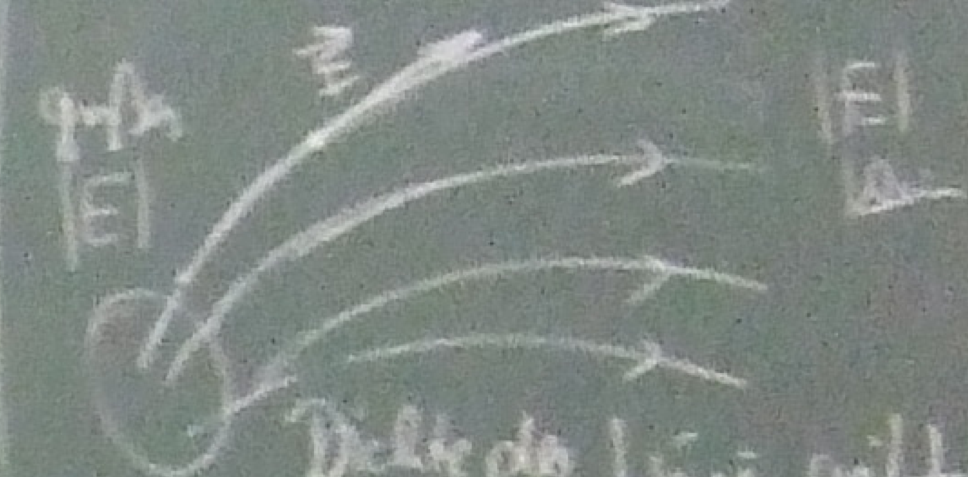
1) Punktladung

Ladung q_1 am Ort $\vec{r}_1$ erzeugt im Punkt $\vec{r}_0$ ein Feld $\vec{E}(\vec{r}_0)$

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\,\frac{q_1}{r_{01}^2}\,\frac{\vec{r}_{01}}{r_{01}}$$

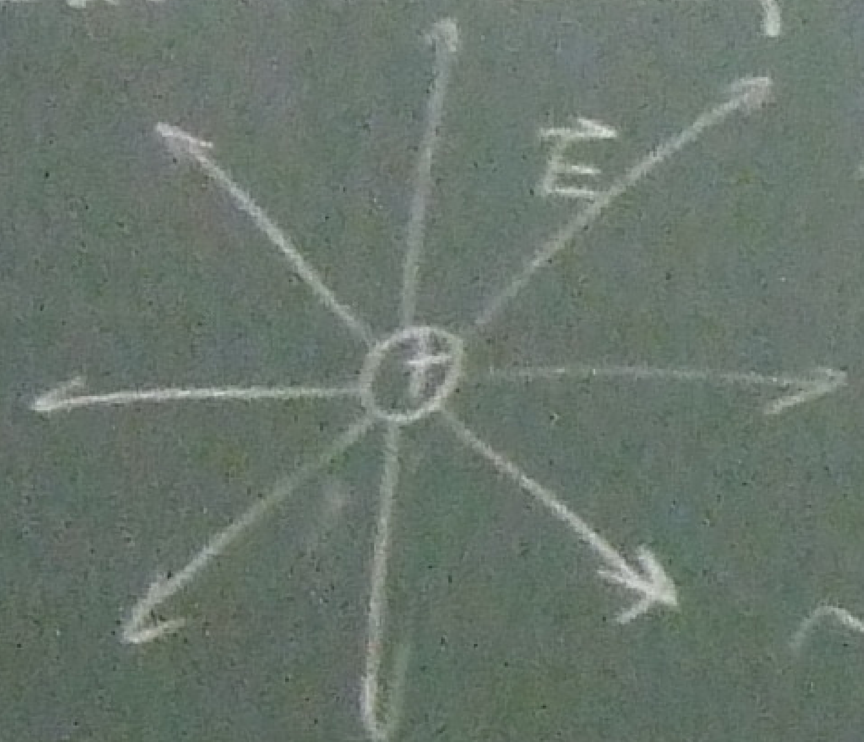
Darstellung mit Kraftlinien (Feldlinien)

· Richtung Vektor $\vec{E}$



Dichte der Linien gibt |E|

Feld um Punktladung



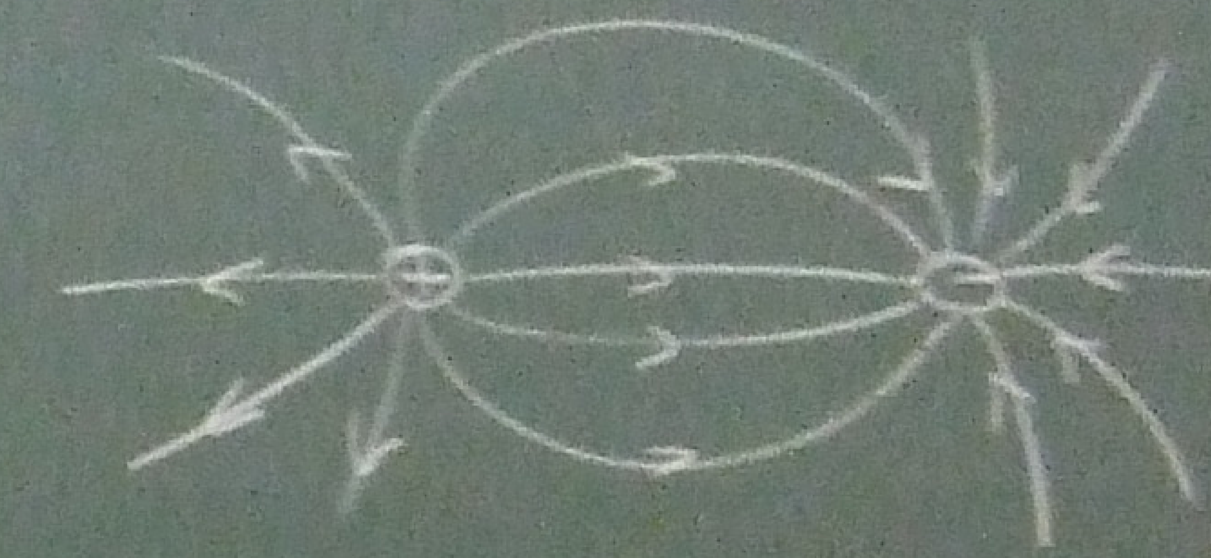
Radial vom Zentrum weg für $q_1 > 0$

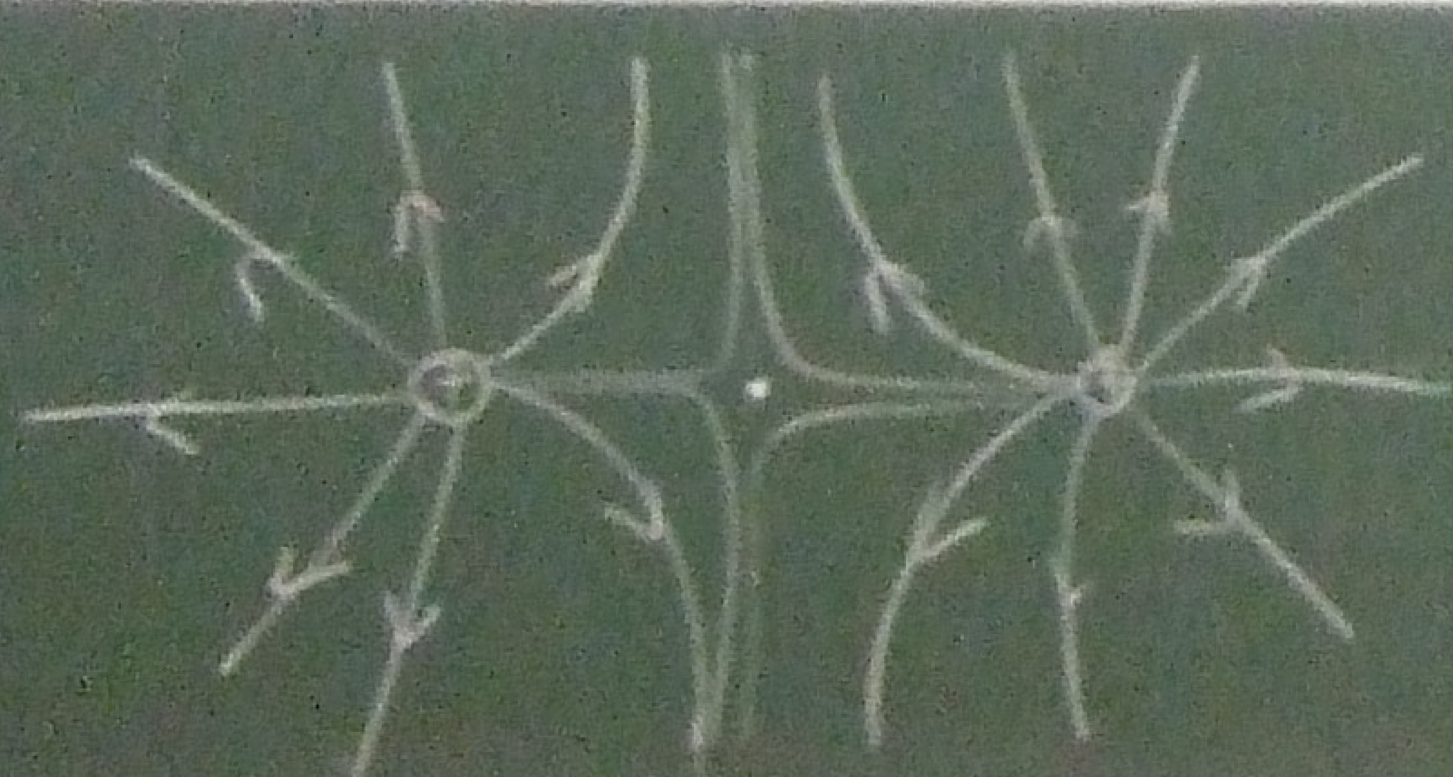
Dichte = $\frac{\#\ \text{Feldlinien}}{4\pi r^2}$

$\rightsquigarrow \vec{E}$ nimmt mit $1/r^2$ ab

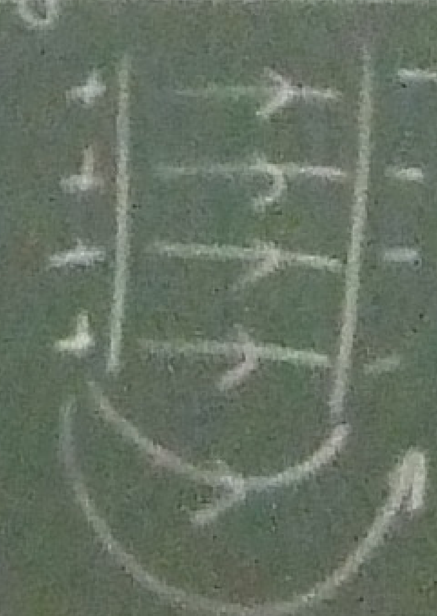
Elektrische Feldlinien beginnen & enden stets auf Ladungen

Feld eines elektrischen Dipols





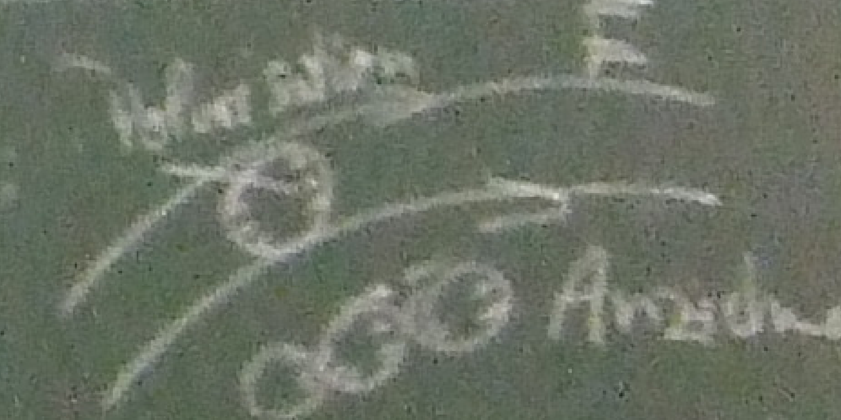
Homogenes E-Feld



Sichtbarmachung elektrisches Feldes

Gries in Rizinusöl:

$\rightsquigarrow$ $\boxed{\text{Feldlinienbilder}}$



Superposition

N Ladungen q_j ($j=1,2,\dots N$) an Orten $\vec r_j$ erzeugen am Ort $P_0(\vec r_0)$ das Gesamtfeld

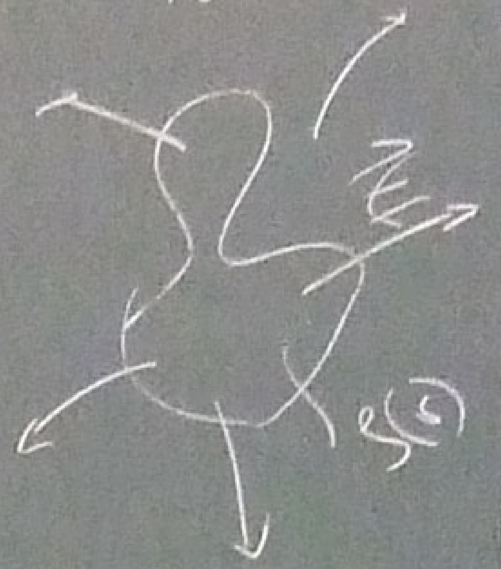
$$\vec E(\vec r_0) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\sum_{j=1}^{N}\frac{q_j}{r_{0j}^2}\cdot\frac{\vec r_{0j}}{r_{0j}}$$

$$= \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\int_V \frac{\rho(\vec r_1)}{r_{01}^2}\cdot\frac{\vec r_{01}}{r_{01}}\,dV_1$$

Kontinuierliche Ladungsverteilung

$$\rho(\vec r) = \frac{dq(\vec r)}{dV}$$

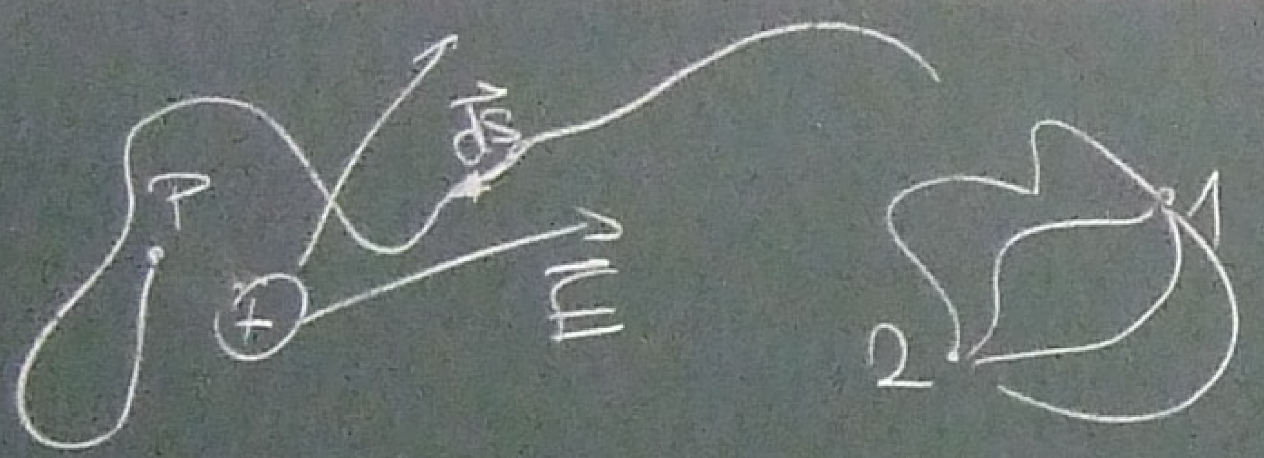
Ladungsdichte pro Volumen



Elektrostatische Potential φ

$\varphi(P)$ ist die Arbeit, die aufgewandt wird, um die Einheitsladung $q=1C$ von ∞ bis zum Punkt P zu bringen:

$$\varphi(P) = -\int_\infty^P \vec E\cdot d\vec s$$



Damit ist die Arbeit W, um q von Punkt 1 nach 2 zu bringen

$$W = -q\int_1^2 \vec E\, d\vec s = -q\int_\infty^2 \vec E\, d\vec s - q\int_1^\infty \vec E\, d\vec s$$

$$= q[\underbrace{\varphi(2)-\varphi(1)}_{U_{21}}] = q\,U_{21}$$

U_{21}: Spannung (oder Potentialdifferenz) zwischen 2 und 1

Spannungseinheit: $\frac{\text{Arbeit}}{\text{Ladung}} = \frac{J}{C} = \text{Volt}$

$$\begin{pmatrix}E_x\\E_y\\E_z\end{pmatrix}\cdot\begin{pmatrix}dx\\dy\\dz\end{pmatrix} \rightsquigarrow \int dx \int dy \int E_z dz$$

Bemerkung

Potential ist unabhängig vom Weg.

$$\oint \vec E\cdot d\vec s = 0$$

Linienintegral eines geschl. Kurve über $\vec E$ ist 0.

Umkehrung: Feld aus Potential

$$\varphi = -\int \vec E\, d\vec r \rightsquigarrow d\varphi = -\vec E\cdot d\vec r$$

Skalarprodukt $= -(E_x dx + E_y dy + E_z dz)$

Total $= \frac{\partial\varphi}{\partial x}dx + \frac{\partial\varphi}{\partial y}dy + \frac{\partial\varphi}{\partial z}dz$

$\vec p = q\vec d$

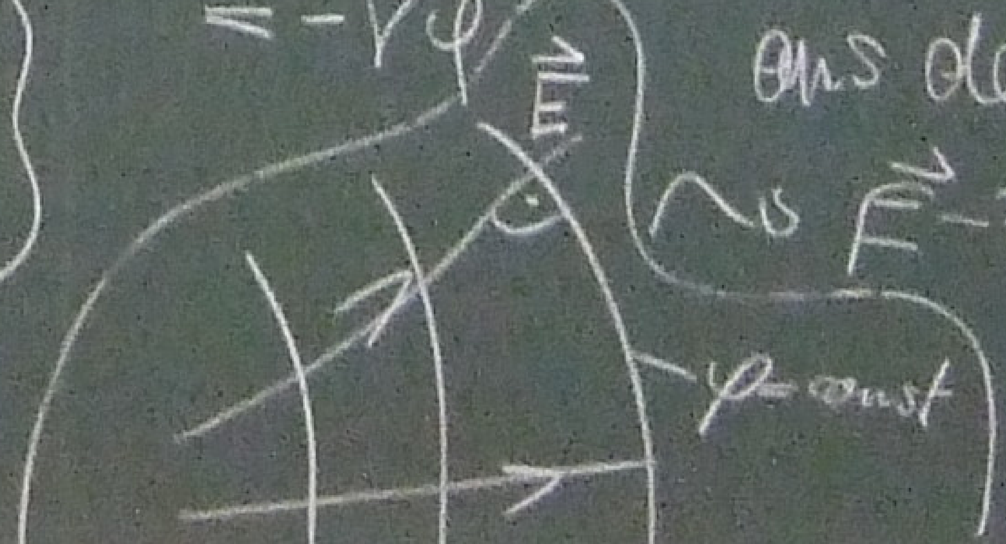
$W = -\vec E\vec p \sim -\vec m\cdot\vec B$

$$\rightsquigarrow E_x = -\frac{\partial\varphi}{\partial x},\quad E_y = -\frac{\partial\varphi}{\partial y},\quad E_z = -\frac{\partial\varphi}{\partial z}$$

$$\vec F = -\vec m(\nabla\cdot\vec B)$$

$\vec B$

$$\vec E = -\text{grad}\,\varphi = -\nabla\varphi$$



Elektrisches Feld $\vec E$ erhält man durch räumliches Differenzieren aus dem Potential $\varphi(r)$

$\rightsquigarrow \vec E$-Feldlinien $\perp$ Äquipotentiallinien