Karlsruher Institut für Technologie

Klassische Physik 2 Elektrodynamik SS2013

Johannes Blümer

V07 14. Mai

KIT-Centrum Elementarteilchen- und Astroteilchenphysik KCETA

Semesterkalender

	KW	Di	Mi	Do
April	15	**16**		**18**
April	16	**23**	**Ü**	**25**
April/Mai	17	**30**	**Ü**	**2**
Mai	18	*7*	**Ü**	*9 F*
Mai	19	**14**	**Ü**	**16**
Mai	20	*21*	**Ü**	*23*
Mai/Juni	21	**28**	**Ü**	*30 F*
Juni	22	**4**	**Ü**	**6**
Juni	23	**11v**	**Ü**	*13*
Juni	24	*18*	**Ü**	**20**
Juni	25	**25**	**Ü**	**27**
Juli	26	**2**	**Ü**	**4**
Juli	27	**9**	**Ü**	**11**
Juli	28	**16**	**Ü**	**18**

V7

Grundkonzepte der Elektrostatik

(punktförmige) Ladungen und Kräfte; Coulombgesetz;

elektrisches Feld, Feldlinien, Probeladung: Demonstrationen;

Coulombkräfte und Lorentzkräfte;

el. Feldstärke, el. Fluss, “Flussregel”;

Spannung und Potential

Vektoranalysis

Poisson-Gleichung

Ladungsverteilungen, praktische Feldberechnungen

frühe Anwendung auf Atomphysik und Kernspaltung

Kapazität, Kondensator

Dielektrika

Dipole -> v7 ... und Übergang zum Gleichstrom

Wo „steckt" die Energie? → Potentielle Energie getrennter Ladungen

→ im elektr. Feld

2 Deutungen unterschiedl. „leistungsfähig"

Plattenkond.

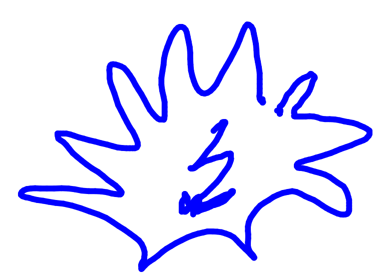
$$W = \frac{1}{2} C U^2 = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \frac{A}{d} U^2 = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \underbrace{A \cdot d}_{\text{Volumen!}} \cdot \underbrace{\frac{U^2}{d^2}}_{= E^2} = \frac{1}{2} \varepsilon_0 V E^2$$

abstrahieren

$W = w \cdot V$ Energie des el. Feldes

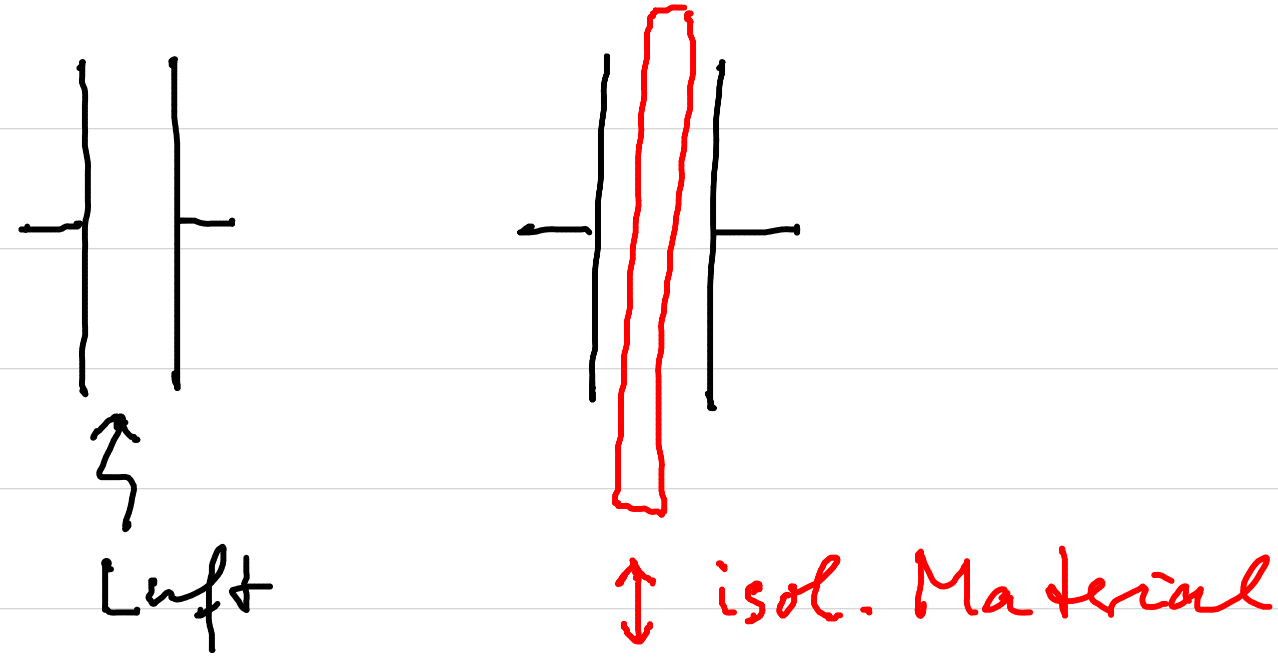
mit der Energiedichte $\boxed{w = \frac{1}{2} \varepsilon_0 E^2}$

Anm. 70 J im Kondensator



7.3 kV

Dielektrika



Einbringen des Dielektrikums verändert die Ladung im Kondensator nicht
└ ohne Spannungsquelle

el. Feld greift durch das isol. Material hindurch
[i.d. Leiter: sperren das Feld]

$Q = C \cdot U$

U └ sinkt

Q └ konst.

} → C erhöht sich mit Dielektrikum

Dielektrika vergrößern die Kapazität v. Kondensatoren um einen Faktor $\varepsilon_{(r)} = C_{Di.} / C_{vak.}$ dimensionslose Materialkonstante

Pertinax : $\varepsilon \simeq 2$

Presspappe : $\varepsilon = 1/0.82$ ☺ Wasser : $\varepsilon = 81$

Glas 5 ... 10

Luft 1,0006

Plattenkondensator : $C = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{A}{d}$

Q_0 „freie, echte" Ladung auf den (leitenden) Platten

↪ el. Feld $E_0 = U_0 / d$ im Vakuum

↪

$E_D = E_0 / \varepsilon$

$U_D = U_0 / \varepsilon$

} mit Dielektrikum

$\Rightarrow Q_D = Q_0 / \varepsilon$ ./. Q_0

$Q_D < Q_0$, aber Q_0 nach Entfernen des Diel. würde vorh. ...

Interpretation: teilkompensierende Ladungen im Isolator

└ gebundene Ladungen

Polarisation = Verschieben von — " —

└ 2 Ausprägungen: Verschiebungspolarisation (1)

Orientierungs — " — (2)

(1) Modell: Ladungen als elastisch gebundene Teilchen

≃ lineare Rückstellkräfte $F = -k \cdot d$ └ Skizze

$\pm q$

$d = F/k = qE/k$

makrosk. Effekt der Verschiebung: $\propto q$, $\propto d$

massgebl.: $q \cdot d = q^2 \cdot E/k = \alpha \cdot E$

└ „Polarisierbarkeit" $\alpha = q^2/k$

(2) ohne Feld: ungerichtete Ladungspaare — Dipole

mit Feld: teilweise Ausrichtung

Polarisation (vgl oben) für „jedes Atom" $\vec{p} = q\,\vec{d} = \alpha \cdot \vec{E}$

„ global = Vektorsumme aller Dipolmomente „aller N Atome pro Volumeneinheit"

$$\vec{P} = \frac{1}{V} \sum \vec{p}_i$$

$$P = N \cdot q \cdot d = \frac{Nq\,\overbrace{d \cdot A}^{V}}{A} = \frac{Q_{pol}}{A}$$

Q_{pol} Polarisationsladung

$= \sigma_{pol}$ Flächenladungsdichte der Pol. Lad.

Erinnerung Flussregel $\phi_{el} = \int_A \vec{E}\, d\vec{A} = \frac{Q}{\varepsilon_0}$

ergibt beim Kondensator $E \cdot A = \frac{Q}{\varepsilon_0} \Rightarrow \vec{E} = \frac{\vec{\sigma}}{\varepsilon_0}$

... im Dielektrikum: $\vec{E}_D = \frac{\vec{\sigma}_{frei} - \vec{\sigma}_{pol}}{\varepsilon_0} = \underbrace{\vec{E}_0 - \frac{\vec{P}}{\varepsilon_0}}$ (*)

die Feldstärke wird im Dielektrikum kleiner

$\vec{P} = N \cdot \alpha \cdot \vec{E}_D = \varepsilon_0 \chi \vec{E}_D$ mit $\chi = N \cdot \alpha / \varepsilon_0 = \varepsilon - 1$

„dielektr. Suszeptibilität"

$$\vec{E}_D = \frac{\vec{E}_0}{1+\chi} = \frac{\vec{E}_0}{\varepsilon}$$

(*) $\Rightarrow \varepsilon_0 \vec{E}_D + \vec{P} = \varepsilon_0 \vec{E}_0 = \varepsilon_0 \varepsilon \vec{E}_D =: \vec{D}$ „Verschiebungsdichte"

Erinn. $\operatorname{div} \vec{E} = \varrho / \varepsilon_0 \quad \hookrightarrow \quad \operatorname{div} \vec{D} = \varrho$

$\varrho = \varrho_{frei}$

Vertiefung → Demtröder ... $w_{el} = \frac{1}{2} E \cdot D$

Änderungen der Energie im Kondensator → Kräfte auf Dielektrikum

↳ Messung der Kraft / Steighöhe → ε

$\boxed{\text{Dipole}}$

Dipol = Paar sehr benachbarter Ladungen $\pm Q$ im Abstand d, die aus großer Entfernung $r \gg d$ beobachtet werden

Fernfeld

Dipolmoment $\vec{p} = Q \cdot \vec{d}$

zeigt von ⊖ nach ⊕

$r \sim d$: Nahfeld

Feldstärke im Punkt P durch Vektoraddition der Punktladungsfelder oder Addition der (skalaren) Potentiale und Gradientenbildung

$$U_D = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{Q}{r_1} + \frac{-Q}{r_2}\right) \qquad r_1 = |\vec{r}_1| \text{ aus Skizze}$$

$$= \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{Q}{|\vec{r}-\vec{d}/2|} - \frac{Q}{|\vec{r}+\vec{d}/2|}\right)$$

Taylorentwicklung für $r \gg d$: $\frac{1}{|\vec{r} \pm \frac{\vec{d}}{2}|} = \frac{1}{\sqrt{r^2 \pm \vec{r}\cdot\vec{d} + d^2/4}}$

$$= \frac{1}{r}\cdot\frac{1}{\sqrt{1 \pm \frac{\vec{r}\cdot\vec{d}}{r^2} + \frac{d^2}{4r^2}}}$$

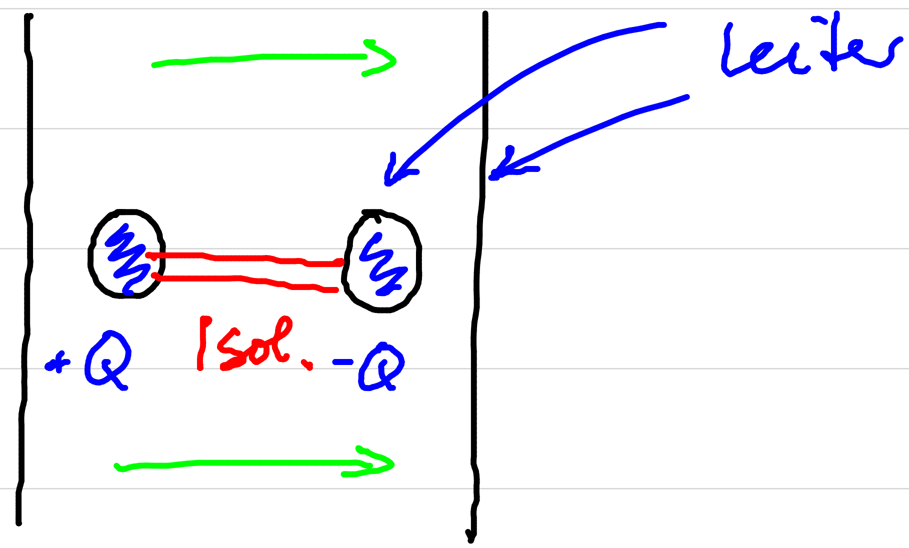
$$\approx \frac{1}{r}\left(1 \mp \frac{\vec{r}\,\vec{d}}{2r^2}\right)$$

$$U_D = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0}\,\frac{\vec{r}\cdot\vec{d}}{r^3} = \frac{\vec{p}\cdot\vec{r}}{4\pi\varepsilon_0 r^3} = \frac{p\cdot\cos\theta}{4\pi\varepsilon_0 r^2} \qquad \text{Also } U_D \propto \frac{1}{r^2}$$

vgl Pkt. Lad. $U \propto \frac{1}{r}$

E_D aus U_D durch $\vec{E}_D = -\operatorname{grad} U_D$ $\rightarrow$ Kräfte zwischen Dipol u. ext. Feld

Modelldipol



$\Rightarrow$ Dipol dreht sich im Feld des Kondensators

$\hookrightarrow$ Dipol erfährt im homogenen Feld nur ein Drehmoment

nur Drehung!