

**Aufgabe 1**

[60 Punkte (15 × 2)]

Siehe die Fragensammlung

**Aufgabe 2**

[8+7=15 Punkte]

Betrachten Sie eine Kugel mit Radius  $R$ , deren Mittelpunkt im Ursprung des Koordinatensystems liegt. Die Kugeloberfläche trägt die Flächenladungsdichte  $\rho_F(\theta, \phi) = \rho_0 \cos \theta$ . Im Innenraum ( $|\vec{x}| < R$ ) und im Außenraum ( $|\vec{x}| > R$ ) der Kugel befindet sich Vakuum.

Es sollen jeweils nur die führenden, d.h. die ersten nicht verschwindenden Terme der entsprechenden Entwicklung berechnet werden.

- a) Bestimmen Sie eine geeignete Näherung für das Potential  $\Phi(\vec{x})$  in  $|\vec{x}| \gg R$  und daraus das  $\vec{E}$ -Feld

**Lösung**

Man verallgemeinere die Ladungsdichte zunächst mit die  $\delta$ -Distribution.

$$\rho(r, \theta) = \rho_0 \cos \theta \delta(r - R) \quad (1)$$

**Potential: Kartesische Entwicklung**

Man sehe direkt aus symmetrie Gründen dass  $Q_{ges} = 0$  (wegen  $\rho \propto \cos \theta$ ). Das heißt, dass der führenden Term höchstens das Dipolmoment sein kann. Für das Dipolmoment gilt:

$$p_i = \int d^3x x_i \rho(\vec{x}) \quad (2)$$

Dabei ist  $x_1 = x = r \sin \theta \cos \phi$ ,  $x_2 = y = r \sin \theta \sin \phi$ ,  $x_3 = z = r \cos \theta$

Aus symmetrie Gründen würde es Sinn machen wenn  $p_x$  und  $p_y$  verschwinden. Dies ist leicht zu überprüfen denn

$$p_x = \int d^3r r \sin \theta \cos \phi \rho(\vec{r}) \propto \int_0^{2\pi} \cos \phi = 0$$

und analog

$$p_y = \int d^3r r \sin \theta \sin \phi \rho(\vec{r}) \propto \int_0^{2\pi} \sin \phi = 0$$

Es würde auch Sinn machen, dass  $p_z$  nicht verschwindet, wegen der Polarität der Ladungsdichte.

$$\begin{aligned} p_z &= \int d^3r \underbrace{(r \cos \theta)}_z \underbrace{\rho_0 \cos \theta \delta(r - R)}_{\rho(\vec{r})} \\ &= \rho_0 \int_0^{2\pi} d\phi \int_{-1}^1 d \cos \theta \int_0^\infty dr r^3 \cos^2 \theta \delta(r - R) \\ &= 2\pi \rho_0 \int_{-1}^1 d \cos \theta \cos^2 \theta \int_0^\infty dr r^3 \delta(r - R) \\ &= 2\pi \rho_0 \left[ \frac{2}{3} \right] [R^3] = \frac{4\pi}{3} R^3 \rho_0 = V_k \rho_0 \end{aligned}$$

Sodass  $\vec{p} = V_k \rho_0 \hat{e}_z$  mit  $V_k$  das Volumen der Kugel (bemerke, dass, obwohl nicht zufällig, das Kugelvolumen nur ein mathematisches Ergebnis ist, und keine tiefere Bedeutung hat).

Das Potential wird nun bis zur führende Ordnung gegeben durch

$$\Phi(\vec{r}) = k \frac{\vec{r} \cdot \vec{p}}{|\vec{r}|^3} = k V_k \rho_0 \frac{r \cos \theta}{r^3} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} V_k \rho_0 \frac{\cos \theta}{r^2} \quad (3)$$

### Potential: Spährische Entwicklung

Man Schreibe  $\rho(\vec{r})$  zunächst als linearkombination von Kugelflächenfunktionen.

$$\rho(\vec{r}) = \rho_0 \cos \theta \delta(r - R) = \rho_0 \sqrt{\frac{4\pi}{3}} Y_{10}(\theta, \phi) \delta(r - R)$$

Wobei wir benutzt haben dass  $Y_{10} = \sqrt{\frac{3}{4\pi}} \cos \theta$

Das Potential wird für  $r \gg 0$  gegeben durch

$$\Phi(\vec{r}) = k \sum_{lm} \frac{4\pi}{2l+1} \frac{q_{lm}}{r^{l+1}} Y_{lm}(\theta, \phi) \quad l \in \mathbb{N}_0 \quad m \in \mathbb{Z} \quad -l \leq m \leq l \quad (4)$$

mit

$$q_{lm} = \int d^3r r^l \rho(\vec{r}) Y_{lm}^*(\theta, \phi) \quad (5)$$

Wir möchten jetzt die Orthogonalität der Kugelflächenfunktionen anwenden. Es gilt

$$\int_{\Omega} d\Omega Y_{lm}(\Omega) Y_{l'm'}^*(\Omega) = \delta_{ll'} \delta_{mm'} \quad (6)$$

Wobei man über den gesamten Raumwinkel  $\Omega$  integriert.

Wegen der Orthogonalität aus Formel 6 zusammen mit unser Ladungsverteilung sieht man sofort, dass alle  $q_{lm} = 0$  mit  $l \neq 1, m \neq 0$ .

$$q_{10} = \int dr r^2 \int d\Omega (r^1) \rho_0 \sqrt{\frac{4\pi}{3}} Y_{10} Y_{10}^* \delta(r - R) = \rho_0 \sqrt{\frac{4\pi}{3}} R^3$$

Sodass sich für das Potential ergibt, dass

$$\begin{aligned} \Phi(r, \theta) &= k \left( \frac{4\pi}{3} \right) \left( \rho_0 \sqrt{\frac{4\pi}{3}} R^3 \right) \frac{1}{r^2} Y_{10}(\theta, \phi) \\ &= k \underbrace{\frac{4\pi}{3} R^3}_{V_k} \rho_0 \frac{1}{r^2} \sqrt{\frac{4\pi}{3}} \sqrt{\frac{3}{4\pi}} \cos \theta \\ &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} V_k \rho_0 \frac{\cos \theta}{r^2} \end{aligned} \quad (7)$$

### E-Feld

Nun das wir wissen, dass  $\Phi(r, \theta) = \frac{V_k \rho_0 \cos \theta}{4\pi\epsilon_0 r^2}$  können wir das elektrische Feld finden.

$$\vec{E}(\vec{r}) = -\nabla \Phi(\vec{r}) \quad (8)$$

Das Problem lässt sich am einfachsten lösen indem wir  $\nabla$  in Kugelkoordinaten anwenden. Es gilt

$$\nabla = \nabla_k = \hat{\mathbf{e}}_r \partial_r + \hat{\mathbf{e}}_\theta \frac{1}{r} \partial_\theta + \hat{\mathbf{e}}_\phi \frac{1}{r \sin \theta} \partial_\phi$$

sodass sich für das Elektrische Feld ergibt dass

$$\vec{E}(r, \theta) = -\frac{V_k \rho_0}{4\pi \epsilon_0} \left[ -2 \frac{\cos \theta}{r^3} \hat{\mathbf{e}}_r - \frac{\sin \theta}{r^3} \hat{\mathbf{e}}_\theta \right] = \frac{V_k \rho_0}{4\pi \epsilon_0} \frac{1}{r^3} (2 \cos \theta \hat{\mathbf{e}}_r + \sin \theta \hat{\mathbf{e}}_\theta) \quad (9)$$

- b) Bestimmen Sie eine geeignete Näherung für das Potential  $\Phi(\vec{x})$  in der Nähe des Ursprungs  $|\vec{x}| \ll R$  und daraus das  $\vec{E}$ -Feld

### Lösung

#### Potential: Sphärische Entwicklung

Mit der kartesischen Entwicklung findet man hier keine Lösung, denn sie funktioniert nur bei  $r \gg 0$ . Man muss also eine sphärische Multipol-Entwicklung durchführen.

Für die sphärische Multipol-Entwicklung nahe  $r = 0$  gilt nun

$$\Phi(\vec{r}) = k \sum_{lm} \frac{4\pi}{2l+1} r^l q_{lm} Y_{lm}(\theta, \phi) \quad (10)$$

mit

$$q_{lm} = \int d^3r \frac{1}{r^{l+1}} \rho(\vec{r}) Y_{lm}^*(\theta, \phi) \quad (11)$$

Sowie in Aufgabe a) verschwinden alle  $q_{lm}$  außer  $q_{10}$ .

$$\begin{aligned} q_{10} &= \int d^3r \frac{1}{r^{1+1}} \delta(r-R) \sqrt{\frac{4\pi}{3}} Y_{10} Y_{10}^* \\ &= \rho_0 \sqrt{\frac{4\pi}{3}} \underbrace{\int dr \frac{r^2}{r^2} \delta(r-R)}_1 \underbrace{\int d\Omega Y_{10}(\Omega) Y_{10}^*(\Omega)}_1 \end{aligned}$$

Daraus ergibt sich dann das Potential

$$\begin{aligned} \Phi(\vec{r}) &= k \frac{4\pi}{3} r \sqrt{4\pi/3} \sqrt{3/4\pi} \cos \theta \\ &= \frac{4\pi}{4\pi \epsilon_0} \frac{\rho_0}{3} r \cos \theta = \frac{\rho_0}{3\epsilon_0} r \cos \theta \end{aligned} \quad (12)$$

### E-Feld

Das  $\vec{E}$ -Feld lässt sich einfach finden wie in a)

$$\vec{E}(\theta) = -\frac{\rho_0}{3\epsilon_0} (\cos \theta \hat{\mathbf{e}}_r - \sin \theta \hat{\mathbf{e}}_\theta) = -\frac{\rho_0}{3\epsilon_0} \hat{\mathbf{e}}_z \quad (13)$$

(Alternativ hätte man auch sehen können dass  $\Phi \propto r \cos \theta = z$  und dann die kartesische definition von  $\nabla$  einsetzen können)

**Die Korrektheit der Lösungen wurde überprüft und ist garantiert.**

(Nach Aufgabe 2.3.13 aus “Grundkurs Theoretische Physik 3: Elektrodynamik” von Wolfgang Nolting [10. Auflage])

### Aufgabe 3

[3+8+4=15 Punkte]

Betrachten Sie eine zeitlich veränderliche Stromdichte  $J(\vec{x}, t)$ , deren räumliche Ausdehnung so klein ist, dass Sie in komplexer Schreibweise durch  $\vec{J}(\vec{x}, t) = J_0 e^{-i\omega t} \delta(\vec{x}) \vec{e}_z$  approximiert werden kann. ( $J_0$  und  $\omega$  konstant). Die Quelle befindet sich im Vakuum.

- a) Zeigen Sie ausgehend von einem geeigneten Integralausdruck, dass das zugehörige Vektropotential durch

$$\vec{A}(\vec{x}, t) = J_0 e^{-i\omega t} \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{e^{-ikr}}{r} \vec{e}_z$$

mit  $r = |\vec{x}|$  gegeben ist.

- b) Berechnen Sie mit dem Ergebnis aus a) das  $\vec{B}$ -Feld und daraus das  $\vec{E}$ -Feld.
- c) Hier sollen nur noch die Teile der in b) berechneten Felder betrachtet werden, die nicht stärker als  $1/r$  abfallen, d.h. man betrachtet eine Näherung für die Felder weit weg von der Quelle. Berechnen Sie damit den zeitlich gemittelten Poyntingvektor und die zeitlich gemittelte Leistung  $\frac{dP}{d\theta}$ , die unter dem Winkel  $\theta$  zur  $z$ -Achse abgestrahlt wird.

**Aufgabe kommt aus Nachklausur WS18/19, dazu wurde eine Lösung veröffentlicht, womit diese Lösung überprüft wurde**