Wh:

$$\uparrow p(t) = p_0 e^{i\omega t}$$

Nahzone: $a \ll r \ll \lambda = \frac{2\pi}{k}$, $\omega = ck$

Retardierung vernachlässigbar!

Fernzone: $a \ll \lambda \ll r$

$$\underline{E}^{(F)}(\underline{r},t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{1}{r^2} \left(\underline{r} \times \ddot{p}\left(t - \frac{r}{c}\right) \right) \times \frac{\underline{r}}{r}$$

$$= c\, \underline{B}^{(F)}(\underline{r},t) \times \frac{\underline{r}}{r}$$

Poynting-Vektor: $\underline{S}(\underline{r},t) = \underline{E}(\underline{r},t) \times \underline{H}(\underline{r},t)$

$$= -\frac{1}{\mu_0} \underline{B}(\underline{r},t) \times \underline{E}(\underline{r},t)$$

Fernzone:

$$\underline{S}^{(F)}(\underline{r},t) = -\frac{c}{\mu_0 r} \underbrace{\underline{B} \times (\underline{B} \times \underline{r})}_{\cancel{(\underline{B}\cdot\underline{r})\underline{B}} - (\underline{B}\cdot\underline{B})\underline{r}}$$

$$= \frac{c}{\mu_0 r}\left(\underline{B}(\underline{r},t)\right)^2 \cdot \underline{r}$$

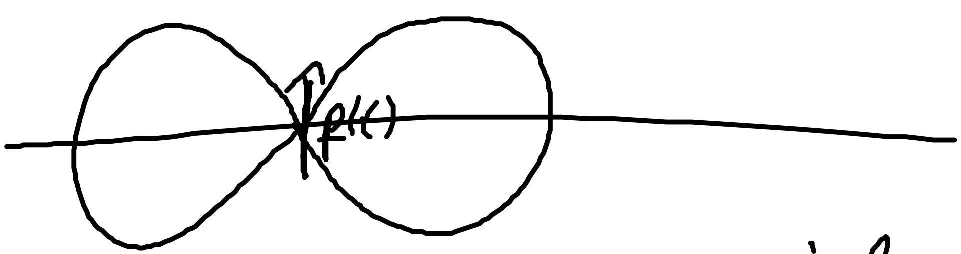
$$= \frac{c}{\mu_0 r}\left(\frac{\mu_0}{4\pi c}\frac{1}{r^2}\right)^2 \left(\underline{r}\times\ddot{\underline{p}}(t-\tfrac{r}{c})\right)^2 \underline{r}$$

$$= \frac{\mu_0}{(4\pi)^2 c}\frac{1}{r^4}\left|\ddot{\underline{p}}\right|^2 r^2 \sin^2\vartheta \cdot \frac{\underline{r}}{r}$$

$$\longrightarrow \boxed{\underline{S}^{(F)}(\underline{r},t) = \frac{\mu_0}{(4\pi)^2 c}\left|\ddot{\underline{p}}\right|^2 \frac{1}{r^2}\sin^2\vartheta \,\frac{\underline{r}}{r}}$$

Bemerkungen

- Abstandsabhängigkeit $\sim \frac{1}{r^2}$
- starke Richtungsabhängigkeit !



„Dipol-Strahlungscharakteristik"

– maximaler Energiestrom in Richtung $\vartheta = \frac{\pi}{2}$
d.h. $\perp \ddot{\underline{p}}$

– keine Abstrahlung für $\vartheta = 0, \pi$
d.h. $\parallel \ddot{\underline{p}}$

Spezielle harmonische Schwingung:

$$p(t) = p_0 e^{-i\omega t}$$

$$\ddot{p}(t) = \omega^2 p(t) = \omega^2 p_0 e^{-i\omega t}$$

$$\Rightarrow |\ddot{p}|^2 = \omega^4 p_0^2$$

$$\Rightarrow \underline{S}^{(4)}(\underline{r},t) = \frac{\mu_0}{(4\pi)^2 c}\,\omega^4 p_0^2 \,\frac{1}{r^2}\,\sin^2\vartheta\,\frac{\underline{r}}{r}$$

Frequenzabhängigkeit $\sim \omega^4$

Betrachte schließlich die gesamte Strahlungsleistung des Hertz'schen Dipols

$$P_S = \int d\underline{F} \cdot \underline{S}(\underline{r},t) = \frac{\mu_0}{(4\pi)^2 c}\,\omega^4 p_0^2 \underbrace{\int_0^{2\pi} d\varphi \int_{-1}^{1} d(\cos\vartheta)\,\frac{\sin^2\vartheta}{R^2}\cdot R^2}_{\frac{8\pi}{3}}$$

Kugel um den Dipol mit Radius R

$$\Rightarrow \boxed{P_S = \frac{\mu_0}{6\pi c}\,\omega^4 p_0^2}$$ Gesamte Strahlungsleistung!

VI. Materie in elektrischen und magnetischen Feldern

Vorbemerkung:

Die bisher betrachteten „Quellen" elektromagnetischer Felder waren sog. "freie" Ladungen $\rho(\underline{r},t)$ und Ströme $\underline{j}(\underline{r},t)$

"frei" $\longleftrightarrow$ extern kontrollierbar und bekannt!

Beispiele: Elektronendichte in Metallen, Ionen in Elektrolyte

"frei" heißt auch:

Die Ladungen können beschleunigt werden in äußeren Feldern

$$\underline{F} = q\underline{E} + q\underline{v} \times \underline{B}$$

in Materie:

Hier gibt es auch nicht bewegliche, und damit nicht extern kontrollierbare Ladungen und Ströme!

Diese Zusatzladungen und Ströme wirken aber als Zusatzquellen elektromagnetischer Felder!

VI. 1. Polarisation und dielektrische Verschiebung in Materie

Betrachte Isolator

$\Longleftrightarrow$ Material ohne irgendwelche <u>freien</u> Ladungsträger !

also nur „gebundene" Ladungen

z.B. <u>Ionenkristall</u> , molekulare Flüssigkeiten
NaCl (z.B. H_2O)

Man unterscheidet 2 Arten von Zusatzladungen in einem Isolator

a) mikroskopische elektrische Dipole $\underline{p}$
(z.B. H_2O-Moleküle)

<u>Effekt eines externen $\underline{E}$-Feldes</u>

$\Rightarrow$ Ausrichtung der Dipole, vorzugsweise parallel zum Feld !

$$W = -\underline{p} \cdot \underline{E}^{ext}$$

potentielle Energie für <u>permanente</u> Dipole

<u>permanenter Dipol</u> :
Der Dipol ist auch ohne externes Feld vorhanden !

Beachte:

Der Grad der Ausrichtung (in einem System molekularer Dipole) ist temperaturabhängig, da die thermische Bewegung zufällig ist!

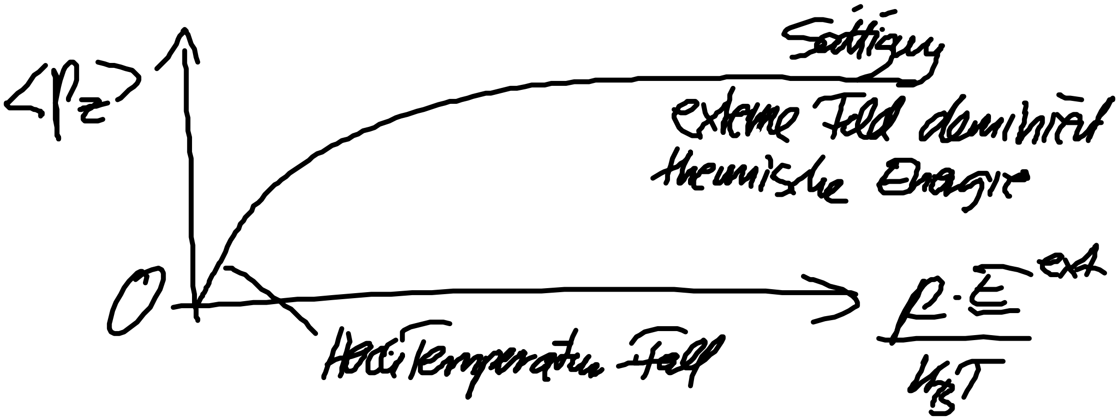
einfache Theorie dazu

$$\underline{E}^{ext} = E_0 \,\hat{e}_z$$

$$\underbrace{\langle (p)_z \rangle}_{\text{mittlere Ausrichtung in z-Richtung}} \sim \underbrace{\int d\omega}_{\text{Integral über die Winkel!}} \; e^{-\beta \cos\vartheta \, p E_0} \cos\vartheta \qquad \beta = \frac{1}{k_B T}$$

Boltzmannfaktor zur Energie W

$$e^{-p \cdot E^{ext}/k_B T}$$

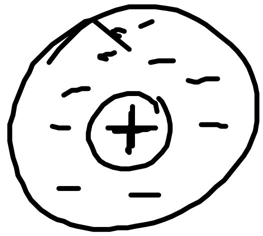


„Orientierungspolarisation"

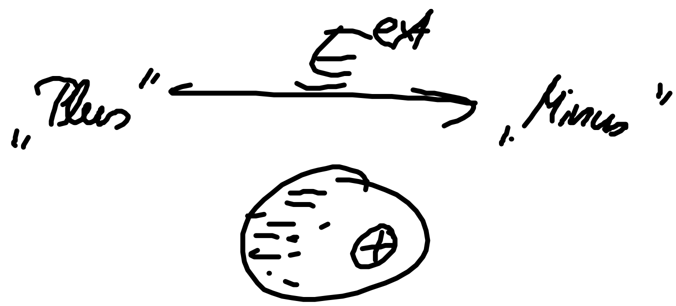
b) Nicht-polare Atome und Moleküle werden durch ein externes $\underline{E}$-Feld polarisiert
kein permanentes Dipolmoment

→ es entstehen induzierte Dipole
diese sind automatisch parallel zu $\underline{E}^{ext}$

„Atom“



$p = 0$
(kein permanentes Dipolmoment)
bei $\underline{E}^{ext} = 0$



$p \neq 0$
durch „Trennung“ (Verschiebung) der positiven und negativen Ladungsträger!