II Makroskopische Beschreibung

1. Räumliche Mittlung

bisher: mikroskopische Adressierung der Punktladungen
nicht mgl. für makroskopische Systeme (10^{23} Teilchen)

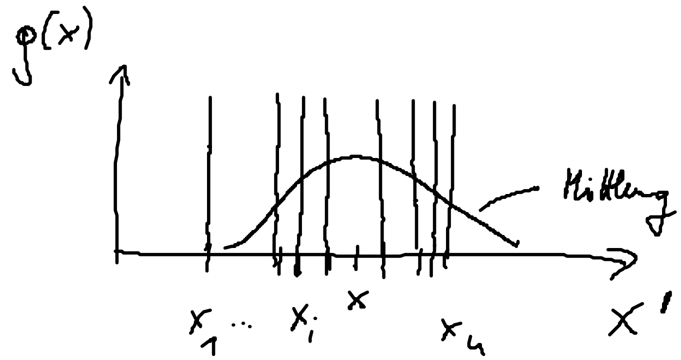
→ Reduktion der Information

Ansatz

a_0 (Bohrradius) < ℓ < λ (Wellenlänge)
„atomare Skala" „mesoskopische Skala" „Feldvariation"

abstrahieren — beschreiben

betrachten: Grobraumskala zwischen atomaren und Wellenlängenvariationen („Auflösung")



Exp.: z.B. Mikroskop

um den Meßprozeß zu beschreiben müsse die

mikroskopische Maxwellgl. gemittelt werden,
erfolgt über Mittlungsfunktion $g(\vec{r})$

mittlere Ladungsdichte:

$$\underbrace{\langle \rho(r) \rangle}_{\text{Mittlungsprozedur}} = \int d^3r' \, g(\vec{r}\,' - \vec{r}) \, \rho(\vec{r}\,')$$

$\rho(r')$ wird gezählt (Ladungen zählen)
unterhalb der Mittlungsfunktion,
dann wird Mittlungsprozedur wiederholt
mit $\vec{r}$ an einem anderen Ort
(Weiterschieben der Funktion)

Eigenschaft: $g(\vec{r}) = g(-\vec{r})$

$g(\vec{r})$ hat Ausdehnung groß gegen atomaren Abständen, aber klein gegen Länge in experimentellen Fragestellg.

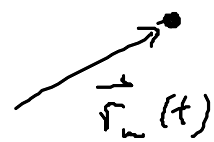
$\longrightarrow$ nutzen um Materialgleichungen und Maxwellgleichungen zu mitteln.

2. Makroskopische Ladungen und Ströme

a) Ladungsdichten

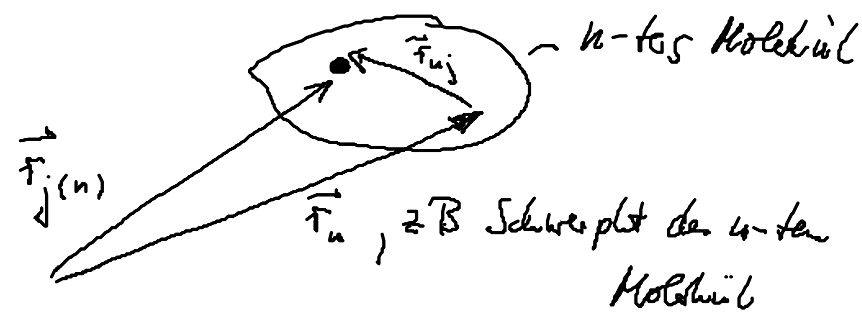
$$\langle \rho(r) \rangle = \sum_i q_i \left\langle \delta(\vec{r} - \vec{r}_i) \right\rangle$$

Unterscheidung: (i) freie Ladungen, Index „m"



(Metalle, Plasma)

(ii) gebundene Ladungen, Index „j"



$$\vec{r}_{j(n)} = \vec{r}_n + \vec{r}_{nj}$$

$$\rho(r) = \sum_m q_m \, \delta(\vec{r} - \vec{r}_m) + \sum_n \sum_{j(n)} q_{j(n)} \, \delta(\vec{r} - \vec{r}_{j(n)})$$

alle Moleküle ↘ alle Teilchen im n-ten Molekül

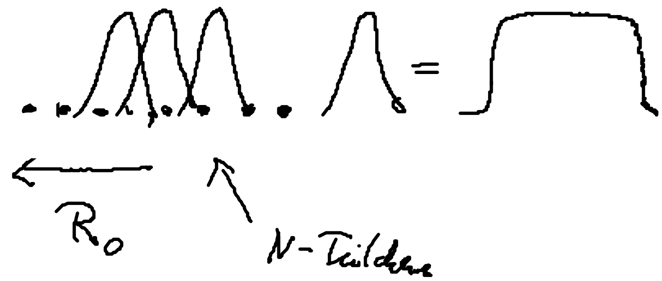
(i) freibewegliche Ladungen

$$\langle \rho(r) \rangle_{frei} = \sum_m q_m \, g(\vec{r} - \vec{r}_m) = \rho_m(\vec{r})$$

Makroskopische Ladung, entstanden durch Verschmierung der mikroskopischen Ladungen

<u>Bsp</u>: Ladung in einer Kugel

$$\rho_m(\vec{r}) = \sum_{Kugel} q_m \, g(\vec{r} - \vec{r}_m) =$$



$$= q \frac{N}{V} \, \theta(R_0 - |r|)$$

Ladungsdichte einer geladenen Kugel mit Konstantem $\rho = \frac{N}{V} q$

<u>(ii) gebundene Ladungen</u>

$|\vec{r}_{nj}| \ll |\vec{r}_n|$, Taylorentwicklung:

$$\langle \rho(r) \rangle_{gebunden} = \sum_n \sum_{j(n)} q_{j(n)} \int d^3r' \, g(\vec{r} - \vec{r}\,') \, \delta(\vec{r}\,' - \vec{r}_n - \underline{\underline{\vec{r}_{nj}}})$$

$$= \underbrace{\sum_n \sum_{j(n)} q_{j(n)}} \int d^3r' \, g(\vec{r} - \vec{r}\,') \, \delta(\vec{r}\,' - \vec{r}_n)$$

Summe über alle Ladungen im n-ten Molekül, elektrisch neutral $\rightarrow$ ist Null

$$+\sum_n \sum_{j(n)} q_{j(n)} \int d^3r'\, g(\vec{r}-\vec{r}\,')\left(-\vec{r}_{nj}\right)\cdot\nabla_{r'}\,\delta(\vec{r}\,'-\vec{r}_n)$$

partielle Integration

$$=\sum_n \underbrace{\sum_{j(n)} q_{j(n)}\, \vec{r}_{nj}} \int d^3r'\, \vec{\nabla}_{r'}\, g(\vec{r}-\vec{r}\,')\,\delta(\vec{r}\,'-\vec{r}_n)$$

$$=-\sum_n \vec{d}_n \cdot \vec{\nabla}_r\, g(\vec{r}-\vec{r}_n)$$

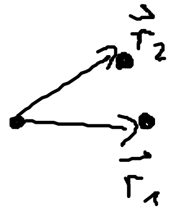
$$=-\vec{\nabla}_r \cdot \sum_n \vec{d}_n\, g(\vec{r}-\vec{r}_n)$$

$$\rho_{geb}(\vec{r}) = -\vec{\nabla}_r \cdot \vec{P}(r,t)$$

Interpretation: ρ_{geb} kann als Divergenz einer Dipoldichte $\vec{P}$ (Polarisation) geschrieben werden

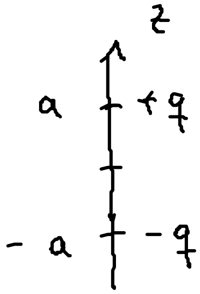
- Dipolmoment des n-ten Moleküls: $\vec{d}_n$

$$\vec{d}_n = \sum_{j(n)} \vec{r}_{nj}\, q_{j(n)}$$ „Ladungsschwerpunkt“



Σ ausführen

Gas von Wasserstoffatomen :



mikroskop. Dichte $\rho(\vec r) = q\,\delta(\vec r - a\vec e_z) - q\,\delta(\vec r + a\vec e_z)$

makroskopische Dichte $\rho_{geb}(\vec r) = -\vec\nabla \cdot \sum_n \sum_{j(n)} \underbrace{q_{j(n)} \vec r_{nj}}_{\vec d_n} g(\vec r - \vec r_n)$

$$\vec d_n = q a \vec e_z - q(-a\vec e_z) = 2 q a \vec e_z$$

f. 1 H-Atom am Ort $\vec r$:

$$\langle \rho(\vec r)\rangle = -\vec\nabla \cdot \vec d\, g(r)$$

$\widehat{=}$ Dipolverteilung am Ort $\vec r$

- $P(\vec r, t)$ ist eine Dipoldichte $\left(\dfrac{\text{Dipolmoment}}{\text{Volumen}}\right)$

$$\vec P = \sum_n \vec d_n(t)\, g(\vec r - \vec r_n)$$

Dipolmoments

$\dfrac{1}{V}$ normierte Funktion

$\vec{P}$ ist also die Anzahl der Dipole pro Volumeneinheit

Klassifizierung von Stoffen:

Metalle: freibewegl. LT

Dielektrika: $\vec{P}$ im angelegt Feld $\vec{E}$

Ferroelektrika: $\vec{P}$ $\exists$ auch ohne Feld

Zeitabhängigkeit steckt in den zeitlich beweglichen $r_\nu(t)$.

insgesamt: $\langle \rho(\vec{r}) \rangle = \rho_m(\vec{r}) - \vec{\nabla} \cdot \vec{P}(r) + \underbrace{\vec{\nabla} \cdot (\vec{\nabla} \cdot \overleftrightarrow{Q})}$

Übung $\leftarrow$ Quadrupolanteil

b) Mittlung der Stromdichte

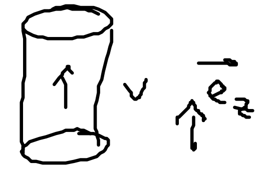
(i) freie Ladungen

$$\langle j(r,t) \rangle_{\text{frei}} = \underbrace{\sum_m q_m \dot{\vec{r}}_m \, g(\vec{r} - \vec{r}_m)}_{j_m(r,t) \text{ makroskopischer Strom}}$$

(Einsetzen der Mittlungsprozedur)

Bsp: Strom entlang eines Drahts mit Radius R_0.

$$\vec{j}_m(r) = v\,\vec{e}_z\,\frac{qN}{V}\,\theta(R_0-|r|)$$



v ist Geschwindigkeit der LT

(ii) gebundene Ladungen

$$\langle \vec{j}(r)\rangle_{geb} = \sum_n \sum_{j(n)} q_{j(n)} \big(\underbrace{\dot{\vec{r}}_n}_{=0} + \dot{\vec{r}}_{nj}\big) \int d^3r'\, g(\vec{r}-\vec{r}\,')\,\delta(\vec{r}\,'-\vec{r}_n-\vec{r}_{nj})$$

ruhende Moleküle ohne Schwerpktsbewegg.

Taylor

$$= \sum_n \sum_{j(n)} q_{j(n)}\,\dot{\vec{r}}_{nj}\, g(\vec{r}-\vec{r}_n) \longrightarrow \frac{\partial}{\partial t}\vec{P}(\vec{r},t)$$

$$+ \sum_n \sum_{j(n)} q_{j(n)}\,\underbrace{\dot{\vec{r}}_{nj}\,\vec{r}_{nj}\cdot\vec{\nabla}_{r_n}\, g(\vec{r}-\vec{r}_n)}$$

$$\Bigg(\underbrace{\frac{1}{2}\partial_t\big(\vec{r}_{nj}\,\vec{r}_{nj}\cdot\vec{\nabla}_{r_n}\big)}_{\text{Quadrupolanteil}} + \underbrace{\frac{1}{2}\dot{r}_{nj}\,r_{nj}\cdot\vec{\nabla}_{r_n} - \frac{1}{2} r_{nj}\,\dot{r}_{nj}\cdot\vec{\nabla}_{r_n}}_{\vec{\nabla}\times\big(\underbrace{\vec{r}_{nj}\times\dot{\vec{r}}_{nj}}_{\sim\ \text{Drehimpuls}}\big)}\Bigg) g$$

Quadrupolanteil ↙ unterliegt oft Dipolterm

$(\longrightarrow 0)$

$$\langle j(r,t)\rangle = \underbrace{\vec{j}_m(r,t)}_{\substack{\text{Makroskopischer}\\ \text{Strom}\\ \text{„Elektron im Draht"}}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial t}\vec{P}(r,t)}_{\text{Dipolstrom}} + \underbrace{\frac{1}{\mu_0}\vec{\nabla}\times\underline{\underline{\vec{M}(r,t)}}}_{\text{Magnetisierungsstrom}}$$

$\vec{M}$ ist die Magnetisierungsdichte

$$\vec{M} = \sum_n \vec{\ell}_n(t)\, g(\vec{r}-\vec{r}_n), \quad \vec{\ell}_n = \frac{\mu_0}{2}\sum_{j(n)} \frac{q_{jn}}{m_{jn}} \underbrace{\vec{\ell}_{jn}}_{\substack{\text{Drehimpuls}\\ m_{jn}\vec{r}_{jn}\times\dot{\vec{r}}_{jn}}}$$

$$\vec{P} = \sum_n \vec{d}_n(t)\, g(\vec{r}-\vec{r}_n) \quad \vec{d}_n = \sum_{j(n)} q_{jn}\vec{r}_{jn}$$

Die Magnetisierungsdichte wird durch die Drehimpuls-eigenschaften bestimmt, Spin fehlt (allerdings oft dominant)

3 Makroskopische Maxwellgleichungen

werden durch Einsetzen hergeleitet aus den mikroskopischen.

a) $\langle \vec{\nabla}\cdot\vec{E}\rangle = \langle \frac{\rho}{\varepsilon_0}\rangle \longrightarrow \vec{\nabla}\cdot\langle\vec{E}\rangle = \frac{\langle\rho\rangle}{\varepsilon_0}$

$$\vec{\nabla}\cdot\langle\vec{E}\rangle = \frac{1}{\varepsilon_0}\left(\rho_m - \vec{\nabla}\cdot\vec{P}\right)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \left(\langle \vec{E} \rangle + \frac{\vec{P}}{\varepsilon_0} \right) = \frac{\rho_M}{\varepsilon_0}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \big(\underbrace{\varepsilon_0 \langle \vec{E} \rangle + \vec{P}}_{} \big) = \rho_M$$

$\vec{D}$: dielektrisch Verschiebungsfeld

$$\boxed{\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho_M}$$

Quelle des dielektrisch Verschiebungsfelds sind die makroskopischen Ladungen

b) $\vec{\nabla} \cdot \langle \vec{B} \rangle = 0$

c) $\vec{\nabla} \times \langle \vec{E} \rangle = -\partial_t \langle B \rangle$

d) $\vec{\nabla} \times \langle B \rangle = \mu_0 \langle \vec{j} \rangle + \frac{1}{c^2} \partial_t \langle \vec{E} \rangle$

$$\vec{\nabla} \times \langle \vec{B} \rangle = \mu_0 \left(j_M + \partial_t \vec{P} + \frac{1}{\mu_0} \vec{\nabla} \times \vec{M} \right) + \frac{1}{c^2} \partial_t \langle E \rangle$$

$$\vec{\nabla} \times \left(\frac{\langle \vec{B} \rangle - \vec{M}}{\mu_0} \right) = \vec{j}_M + \partial_t \vec{D}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{j}_M + \partial_t \vec{D}$$

Die Wirbel der magnetischen Feldstärke H

ist durch den makroskop. Strom und ein

zeitlich veränderliches $D(t)$ gegeben

<u>immer dran denken:</u> Einführung makroskopischer Größe gut für $a_0 \ll \lambda$, d.h. im optischen Bereich okay, nicht f. <u>Röntgen</u>

4. Bewegungsgleichungen für Ladungen – makroskopischer Zugang

Mittelung der Bewegungsgleichung für die Newtongleichung der Teilchen durchführen:

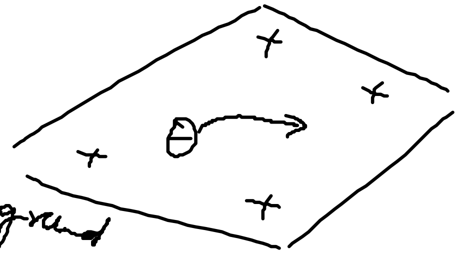
$$m \ddot{\vec{r}}_i = q_i \left(\vec{E}(r_i, t) + \dot{\vec{r}}_i \times \vec{B}(\vec{r}_i, t) \right)$$

ist nötig, um $\vec{P} = \vec{P}(E)$

2 Grenzfälle: $\vec{j}_m$: makroskopische Ströme (Metalle) (freie Ladungen)

$\vec{P}$: Dielektrika (gebundene Ladungen)

4.1. Makroskopische Ströme



Beschreibg. einer Elektronenflüssigkeit

Bewegg. vieler El. auf positivem Ladungshintergrund

(Jellium-Modell)

mittleres Geschwindigkeitsfeld $\underset{\text{makroskopisch}}{\vec{u}_m}(\vec{r},t)$,

beschreibt die Bewegg. eines Probeteilchens (Elektrons) in Elektronenflüssigkeit

1) Kontinuitätsgleichg.: $\partial_t \rho_m = -\vec{\nabla}\cdot(\rho_m \vec{u}_m)$

2) Gleichg. f. Geschwindigkeitsfeld:

$$\partial_t \vec{u}_m + \vec{u}_m \cdot \vec{\nabla}\, \vec{u}_m = \frac{q}{m}\left(\vec{E} + \vec{u}_m \times \vec{B}\right)$$

El.-Ladung + Masse

partielles Dgl.-System f. $\vec{u}_m$ am Ort $\vec{r}$ zur Zeit t und ρ_m am Ort $\vec{r}$ zur Zeit t.

+ Anfangs- und Randbedingg. $\rightarrow$ lösbar

beschreibt die Bewegung der Elektronenflüssigkeit im elektromagnetischen Feld,

kann selbstkonsistent mit Maxwellgleichungen

für $\vec E = E(j_m, \rho_m)$, $B = B(j_m, \rho_m)$

gelöst werden.

Einfachste Anwendung: Ohmsches Gesetz

- phänomenolog. Dämpfung der Geschwindigkeit
- kleine Geschwindigkeiten
- homogenes El.plasma

$$\partial_t \vec u_m + \cancel{\vec u_m \cdot \vec\nabla u_m} = \frac{q}{m}\left(\vec E + \vec u_m \times \vec B\right) - \gamma \vec u_m$$

stationäre Lsg. $\gamma \gg \partial_t$

$$u_m = \frac{q}{m\gamma}\left(\vec E + \vec u_m \times \vec B\right)$$

$$\vec j_m = \underbrace{\frac{\rho_m q}{m\gamma}}_{\sigma\ \text{Leitfähigkeit}}\left(\vec E + u_m \times \vec B\right)$$