

Experimental Physik II Kapitel 17

author

email

June 24, 2016

Contents

17 Magnetfelder in Materie / Magnetismus	2
17.1 Betrachte Magnetischesmoment eines kreisenden geladenen Teilchens	3

17 Magnetfelder in Materie / Magnetismus

- Magnetische Momente durch Elektronen in Atomen
- Magnetische Momente (MMe) des Elektronensystems von Atomen als Ursache der magnetischen Wechselwirkung
- Je nach Art der WW zwischen Materie und Magnetfeldern lassen sich die Materialien in die folgenden "Klassen" unterteilen:
 - Paramagnetische
 - Diamagnetische
 - Ferromagnetische
 - Antiferromagnetische
 - Ferrimagnetische

Materialien

Wie äußert sich entsprechend Magnetismus?

Experiment: Spule mit Luft: $\vec{B} = \vec{B}_0$

Spule mit Eisenkern: $\vec{B} \gg \vec{B}_0$; $\vec{B} \approx 4...5 \times \vec{B}_0$

17.1 Betrachte Magnetischesmoment eines kreisenden geladenen Teilchens

BILD fehlt hier noch

$$\begin{aligned}\mu_{mg} &= I \cdot A = \left(\frac{q}{T}\right) \cdot (\pi r^2) = \frac{1}{2} \cdot q \cdot \omega r^2 \\ &= \frac{q}{2m} \cdot |\vec{L}|\end{aligned}$$

$$\text{Es gilt: } \vec{\mu}_{mg} = \frac{q}{2m} \cdot \vec{L}$$

Für Elektronen im Atom:

$$\boxed{\vec{\mu}_{mg} = \frac{-e}{2m_e} \cdot \vec{L}}$$

⇒ MM durch Bahndrehimpuls!

Bohr'sches Atommodell: Drehimpuls ist quantisiert

$$|\vec{L}| = n \cdot \hbar \quad \left(\hbar = \frac{h}{2\pi}\right)$$

kleinster Wert: $n = 1$:

$$\mu = -\frac{e}{2m_e} \cdot \hbar = \mu_{Bohr} = -9.13 \times 10^{-24} \text{ Am}^2$$

μ_{Bohr} : Bohr'sches Magnetton

$$\underline{\underline{\Rightarrow \mu = n \cdot \mu_{Bohr}}}$$

Gyromagnetisches Verhältnis (g-Faktor):

$$g = \frac{(\mu/|\vec{L}|)}{\frac{1}{2} \frac{e}{m_e}} = 1 \text{ für Bahnelektronen}$$

Zusätzlich berücksichtigen: Eigendrehimpuls des Elektrons (Spin) $S = \frac{1}{2}\hbar$ (Quantenmechanik)

Bei der Berechnung des zugehörigen MM tritt ein zusätzlicher Faktor auf:

g_S :

$$\vec{\mu}_S = -q_S \cdot \frac{e}{2m_e} \cdot \vec{S}$$

$$g_S \approx 2,0$$

\Rightarrow gesamtes MM eines e^- ist die Summe aus Beitrag von \vec{L} und \vec{S} .

\Rightarrow gesamtes MM eines Atoms ist \sum der MM alle einzelnen e^- !

\Rightarrow Je nach Elektronkonfiguration (Besetzung der verschiedenen Schalen) ist Kompensation möglich

\Rightarrow Komplette gefüllte Schalen liefern keinen Beitrag zum MM!

\Rightarrow Materialien wie He, Ne, Ar, ... sind nicht magnetisierbar

\Rightarrow Diese Effekte bestimmen die "Magnetisierung" des Materials!

Äußeres Feld \vec{B}_0 :

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \overbrace{\mu_0 \vec{M}}^{\text{Magnetisierung}}$$

\vec{M} : mittleres magnetisches Moment/Volumen

$$\vec{M} = n \cdot \underbrace{\langle \vec{\mu}_{mg} \rangle}_{\text{mittl. MM/Atom(Molekül)}}$$

n : Dichte der Atome (Moleküle)

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \mu_0 \cdot \vec{M}$$

Anschauliche Erklärung: Ampere: "Atomare Ringströme"

BILD fehlt hier noch

BILD fehlt hier noch

Naives Bild: "Ausrichtung der Elementarmagnete" (..Schale)

Magnetische Feldstärke: \vec{H}

Im Vakuum/Luft: $\vec{B}_0 = \mu_0 \cdot \vec{H}$

Mit Materie:

$$\begin{aligned}\vec{B} &= \vec{B}_0 + \mu_0 \cdot \vec{M} = \mu \cdot \vec{H} \\ &\quad \mu_0 \cdot \vec{H} + \mu_0 \vec{M} \\ \Rightarrow &= \mu_0 \cdot \vec{H} \left(1 + \underset{\text{magnetische Suszeptibilität}}{X_m} \right) \\ &= \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \vec{H} \\ \mu_r(1 + X_m) &\text{ relative Permeabilität} \\ \mu &= \mu_0 \mu_r \text{ Permeabilität}\end{aligned}$$

$X_m > 0$: Paramagnet •

$X_m < 0$: Diamagnet •

BILD fehlt hier noch

Experiment: Materie im inhomogenen Magnetfeld

BILD fehlt hier noch

Paramagnet: wird in inhom. \vec{B} -Feld hineingezogen

Diamagnet: wird aus \vec{B}_{inhom} heraus-gedrängt

Ferromagnet: Wie Paramagnet, aber viel stärker

- Diamagnetismus

- Störung der e^- -Bahnen durch äußeres Feld
- Verursacht kleine MMe, die $\uparrow\downarrow$ zu \vec{B}_0 sind.

$$\vec{M} \uparrow\downarrow \vec{B}_0 \Rightarrow \chi_m < 0 !$$

- Tritt bei allen Materialien auf, wird aber fast immer durch Paramagnetismus überlagert.

- Paramagnetismus

\exists permanente MMe aus Bahn- und Spinmagnetismus der Valenzelektronen, die im äußeren \vec{B} -Feld entgegen der thermischen Bewegung ausgerichtet werden:

$$\vec{M} \uparrow\uparrow \vec{B}_0 \Rightarrow \chi_m > 0 !$$

Für kleine Magnetfelder: $|\vec{M}| \sim |\vec{B}_0|/T$

Für große Felder (und/oder kleine Temperaturen; $\mu_{mag} \cdot B_0 \gg k_B T$)

komplette Ausrichtung, dann $|\vec{M}| = |\vec{M}_S| \leftarrow$ Sättigungsmagnetisierung

BILD fehlt hier noch

Curie-Gesetz: $M = \frac{1}{3} \frac{\mu_{mg} \cdot B_0}{k_B T} \cdot M_S \quad (\chi_m \sim T^{-1})$

- Ferromagnetismus

Hier: WW der MMe untereinander ("Spin·Spin-WW")

Beitrag zur freien Energie:

$$E = -\frac{1}{2} \cdot \overset{\text{Austauschkonstante}}{J} \sum_{\substack{i,j \\ \text{Gitterplätze}}} S_i S_j$$

$$S_{i,j} = \pm \frac{1}{2}, \quad +\frac{1}{2} : \uparrow, \quad -\frac{1}{2} : \downarrow \quad MM$$

\Rightarrow Kompetitiv: Energieminimierung/Entropiemaximierung !

\Rightarrow Benachbarte MMe "wollen" parallel stehen! $\Rightarrow \chi_m = \chi_m(\vec{B}_0)$

\Rightarrow permanente Magnetisierung, wenn Temperatur nicht zu hoch!

\Rightarrow Parallele Ausrichtung der MMe in mikroskopischem Bereich

"Domänen" (Weiss'sche Bezirke) $10^{-8} \dots 10^{-12} \text{ m}^3$, $10^{21} \dots 10^{17}$ Atome

\Rightarrow Barkhausen-Effekt !

- i Ferromagnetismus: Mikroskopisch

BILD fehlt hier noch

Beitrag zur Energie $E = -\frac{1}{2}J \sum_{i,j} s_i s_j \quad s_{i,j} = \pm 1/2$

- ii $J < 0$

BILD fehlt hier noch

Antiferromagnetismus Gesamtmagnetisierung "0"

- iii

BILD fehlt hier noch

Ferrimagnetismus (nicht verschwindende Gesamtmagnetisierung)

\Rightarrow Ferromagnetische Kopplung \Rightarrow Domänenstruktur

Magnetisierung im äußeren Feld:

BILD fehlt hier noch

1. Domänenwachstum
2. Drehung der Magnetisierung

Zu 1. : Kein Kontinuierlicher Prozess, sondern:

BILD fehlt hier noch

\Rightarrow *Barkhausen-Effekt*

Energiebilanz (Einfluss der Entropie!): Ferromagnetische Ordnung nicht temperaturstabil, d.h. einer "kritischen Temperatur" (Curie-Temperatur) Übergang zu paramagnetischem Verhalten.

Exp: Drehender Ni.Ring

"Stabilen" ferromagnetische Ordnung: \Rightarrow "Arbeit" notwendig, um Magnetisierung aufzuheben (oder: äußeres Feld in Gegenrichtung!)

BILD fehlt hier noch

⇒ Hysterese

Weichmagnetische Stoffe: leicht magnetisierbar (Kleine Fläche von Hysterese umschlossen)

Hartmagnetische Stoffe: schwer magnetisierbar, große Fläche