

Experimental Physik II Kapitel 17

author

email

July 2, 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

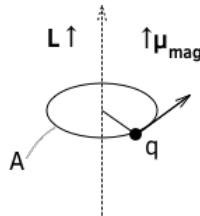
Materialien

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



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

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

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 :

$$\vec{\mu}_S = -g_S \cdot \frac{e}{2m_e} \cdot \vec{S}$$
$$g_S \approx 2,0$$

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

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

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

⇒ Komplette gefüllte Schalen liefern keinen Beitrag zum MM!

⇒ Materialien wie He, Ne, Ar, ... sind nicht magnetisierbar

⇒ Diese Effekte bestimmen die "Magnetisierung" des Materials!

Äußeres Feld \vec{B}_0 :

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

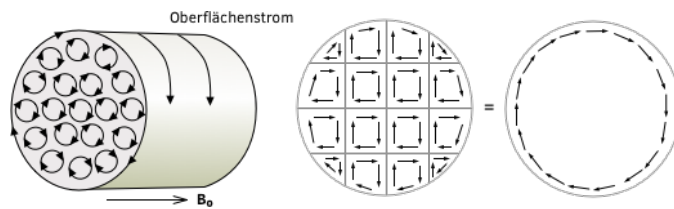
\vec{M} : mittleres magnetisches Moment/Volumen

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

n : Dichte der Atome (Moleküle)

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

Anschauliche Erklärung: Ampere: "Atomare Ringströme"



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

Magnetische Feldstärke: \vec{H}

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

Mit Materie:

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

$$\mu_0 \cdot \vec{H} + \mu_0 \vec{M}$$

$$\Rightarrow = \mu_0 \cdot \vec{H} \left(1 + \underbrace{X_m}_{\text{magnetische Suszeptibilität}} \right)$$

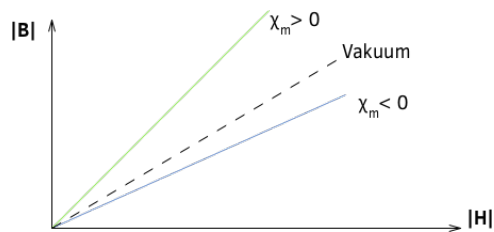
$$= \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \vec{H}$$

$\mu_r(1 + X_m)$ relative Permeabilität

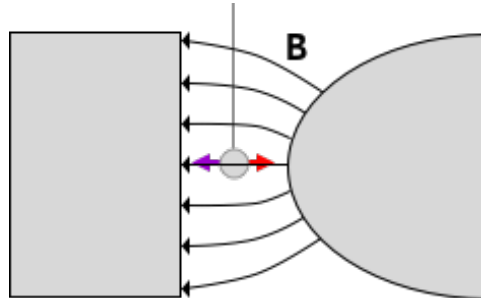
$\mu = \mu_0 \mu_r$ Permeabilität

$X_m > 0$: Paramagnet •

$X_m < 0$: Diamagnet •



Experiment: Materie im inhomogenen Magnetfeld



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

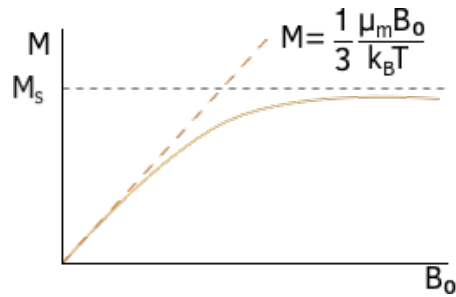
\exists permanente MMe aus Bahn- und Spinmagnetismus der Valenzelektronen, die im äußeren \vec{B} -Feld entgegen der thermischen Bewegung ausgerichtet werden:

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

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



Curie-Gesetz: $M = \frac{1}{3} \frac{\mu_m B_0}{k_B T} \cdot M_s$ ($\chi_m \sim T^{-1}$)

- Ferromagnetismus

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

Beitrag zur freien Energie:

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

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

⇒ Kompetitiv: Energieminimierung/Entropiemaximierung !

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

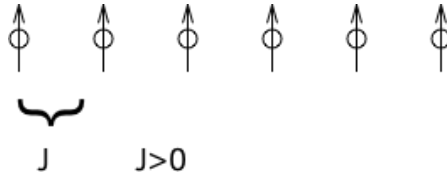
⇒ permanente Magnetisierung, wenn Temperatur nicht zu hoch!

⇒ 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

⇒ Barkhausen-Effekt !

- i Ferromagnetismus: Mikroskopisch



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

- ii $J < 0$



Antiferromagnetismus Gesamtmagnetisierung "0"

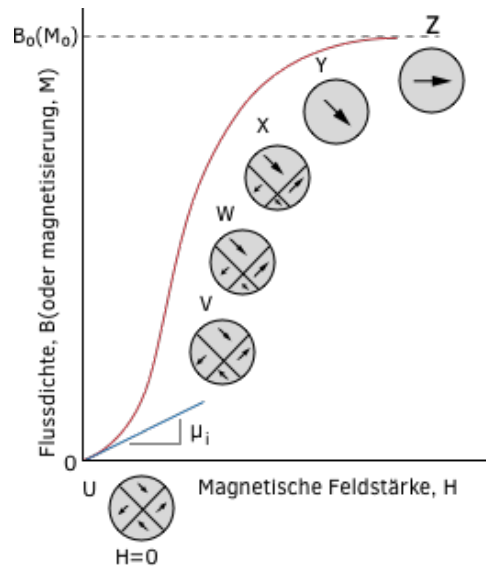
- iii



Ferrimagnetismus (nicht verschwindende Gesamtmagnetisierung)

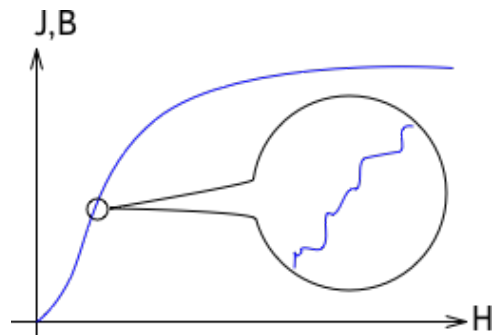
\Rightarrow Ferromagnetische Kopplung \Rightarrow Domänenstruktur

Magnetisierung im äußeren Feld:



1. Domänenwachstum
2. Drehung der Magnetisierung

Zu 1. : Kein Kontinuierlicher Prozess, sondern:

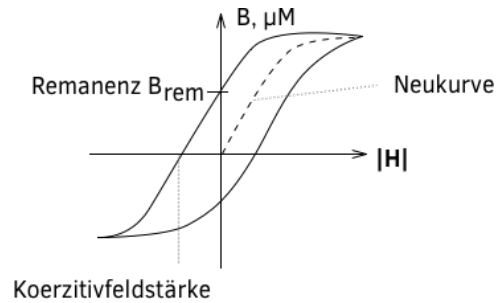


⇒ *Barkhausen-Effekt*

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!)



\Rightarrow Hysterese

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

Hartmagnetische Stoffe: schwer magnetisierbar, große Fläche