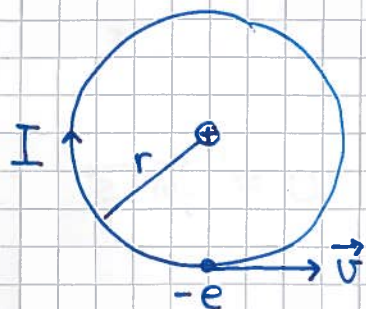


Magnetisme

[YF 28.8]

63

Elektron i sirkulær bane rundt atomkjernen er essensielt en liten magnetisk dipol:



$$I = \frac{e}{T} ; T = \frac{2\pi r}{v} ; A = \pi r^2$$

$$\Rightarrow m = IA = \frac{e \cdot v}{2\pi r} \cdot \pi r^2 = \frac{1}{2} e v r$$

$$\sim 10^{-19} \text{ C} \cdot 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

$$\sim 10^{-23} \text{ A} \cdot \text{m}^2$$

Med kvantemekanikk (mer om det i FY6019) viser det seg at elektronet har et spinn (en "indre dreieimpuls") som tilsvarer et magnetisk dipolmoment

$$\mu_B = \frac{e \cdot h}{4\pi m_e} \approx 9.274 \cdot 10^{-24} \text{ A} \cdot \text{m}^2$$

$$= 1 \text{ Bohr magneton}$$

Her er $h \approx 6.6 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$, Plancks konstant.

Atomer er dermed små magnetiske dipoler, med dipolmoment

$$m \sim \mu_B \quad (\text{"av størrelsesorden en Bohr magneton"}).$$

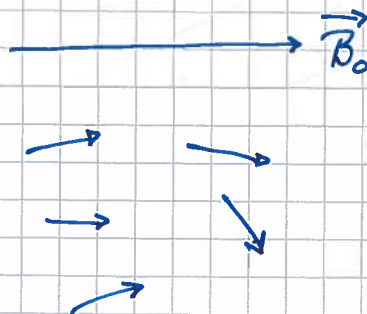
I et ytre felt $\vec{B}_0$ påvirkes slike atomære dipoler av et dreiemoment $\vec{\tau} = \vec{m} \times \vec{B}_0$, slik at de får en tendens til å rettes inn med $\vec{m}$ i samme retning som $\vec{B}_0$ (slik at pot. energi $U = -\vec{m} \cdot \vec{B}_0$ minimeres):

Uten ytre felt
($B_0 = 0$)



$$\sum_i \vec{m}_i \approx 0$$

Med ytre felt



$$\sum_i \vec{m}_i \neq 0$$

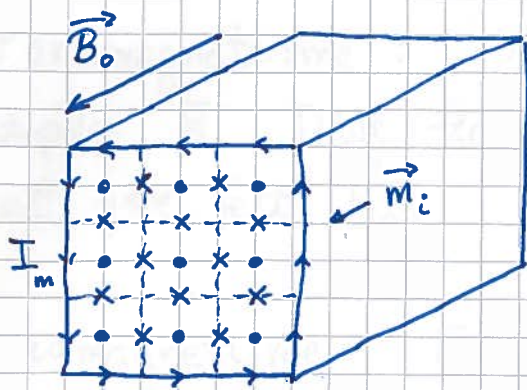
(64)

Dette er helt tilsvarende at elektriske dipoler $\vec{p}$ får en tendens til å rettes inn langs et ytre elektrisk felt $\vec{E}_0$ (se s. 30 - 32).

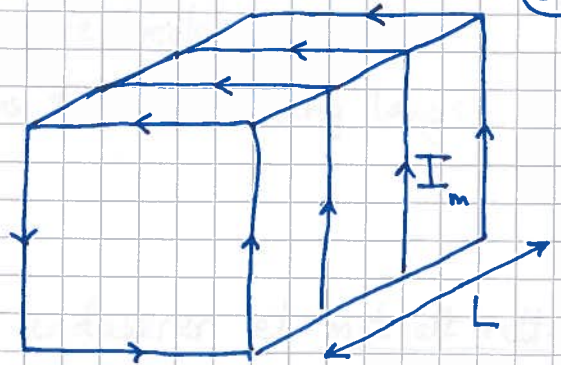
Vi sier at materialet magnetiseres i det ytre feltet $\vec{B}_0$.

På s. 32 viste vi at innretting av molekylære elektriske dipoler $\vec{p}$ langs det ytre feltet $\vec{E}_0$ gav en netto makroskopisk effekt, i form av en induert overflateledning. Dette gav et induert el. felt $\vec{E}_i$ motsatt rettet det ytre feltet $\vec{E}_0$, og dermed et svekket totalfelt $\vec{E}$ ($= \vec{E}_0 + \vec{E}_i$) inni isolatoren.

Vi får en lignende effekt nå, men med "motsatt fortegn" :



$\hat{=}$
(tilsværer)



- innretting av atomære $\vec{m}$ langs $\vec{B}_0$ gir bundet strøm i samme retning i hvert atom
- indre strømmmer kansellerer
- induert overflatestrøm I_m "overlever"; pr lengdeenhet er denne $i_m = I_m / L$
- materialbiten blir essensielt som en spole
- magnetfeltet styrkes inne i materialet: $\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_m$
- lineær respons: B_m prop. med B_0
- materialets relative permeabilitet μ_r defineres ved

$$\boxed{B = \mu_r B_0}$$

enhet: $[\mu_r] = 1$; jf. $E = \frac{1}{\epsilon_r} E_0$ for dielektrikum

- noen tallverdier:

Stoff	Vakuum	Luft	Al	Fe	Cu	Vann
μ_r	1	1.000 000 4	1.0000 2	~ 5000	0.999999 4	0.999999 2
Type magnetisme	—	Param.	Param.	Ferrom.	Diam.	Diam.

- stoffets permeabilitet: $\mu = \mu_r \mu_0$ (jf. $E = \epsilon_r \epsilon_0$)

Paramagnetisme: Stoffet har atomære/molekylære dipoler $\vec{m}$. Disse får en liten tendens til innretting langs et ytre felt $\vec{B}_0$.

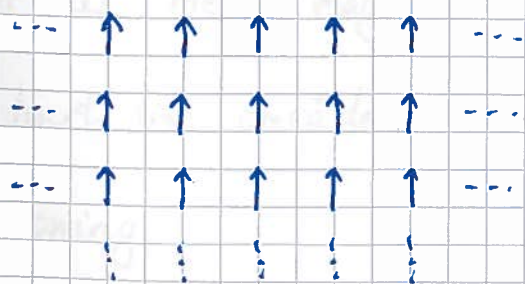
Diamagnetisme: Et ytre felt $\vec{B}_0$ induserer et motsatt rettet dipolmoment $\vec{m}$ i atomene. Dette er en meget svak effekt i de fleste materialer, inkl. de fleste metaller. Men: I en superleder induserer $\vec{B}_0$ så store strømmer at det induserte feltet er $\vec{B}_i = -\vec{B}_0$, og det totale feltet blir $\vec{B} = 0$ inne i superlederen. Dette ligner på de elektrostatiske egenskapene til et metall: Da induserer et ytre el. felt $\vec{E}_0$ et motsatt rettet felt $\vec{E}_i = -\vec{E}_0$ slik at det totale feltet inne i metallet blir $\vec{E} = 0$.

Ferromagnetisme:

Alle permanente magneter er ferromagneter.

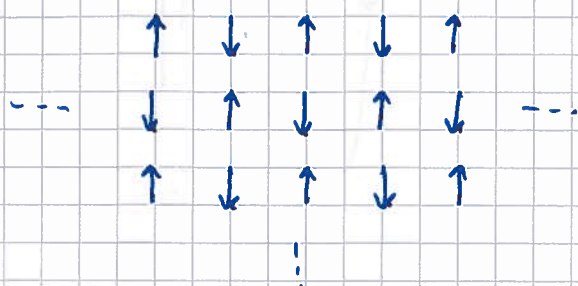
Hovedpoenget i slike materialer er at atomære dipoler $\vec{m}$ vekselvirker med sine nærmeste nabo-dipoler.

Dvs, systemet har lavest mulig potensiell energi når alle dipolene peker i samme retning:



Gjelder Fe, Ni, Co
og noen legeringer,
f.eks $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$
(Nd = neodym)

[I noen materialer vekselvirker nabo-dipoler på en slik måte at det blir energetisk gunstig at nabo-dipolene peker motsatt vei:



Slike materialer kalles antiferromagneter. Eksempler: Cr, FeMn, NiO, ...]

Magnetisering og (elektrisk) polarisering

For å "tallfeste" graden av innretting av dipoler kan vi bruke størrelsen dipolmoment pr volumenet.

$$\text{Magnetisering: } \vec{M} = \sum_i \vec{m}_i / V \quad (V = \text{volumet})$$

$$\text{Polarisering: } \vec{P} = \sum_i \vec{p}_i / V \quad (-||-)$$

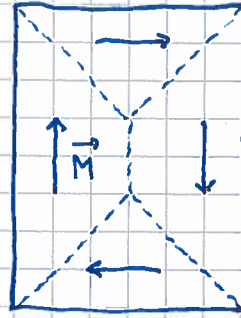
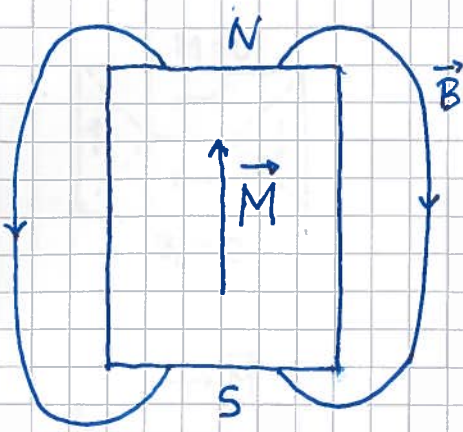
$$\text{Enheter: } [M] = A/m ; [P] = C/m^2$$

Magnetiske domener

Hvorfor er ikke (f.eks.) ei teskje av stål en permanent-magnet?

Fordi det kan lønne seg (energetisk) med mange små områder med magnetisering $\vec{M}$ i ulike retninger.

Inne i hvert lite område, domene, peker alle $\vec{m}$ i samme retning.

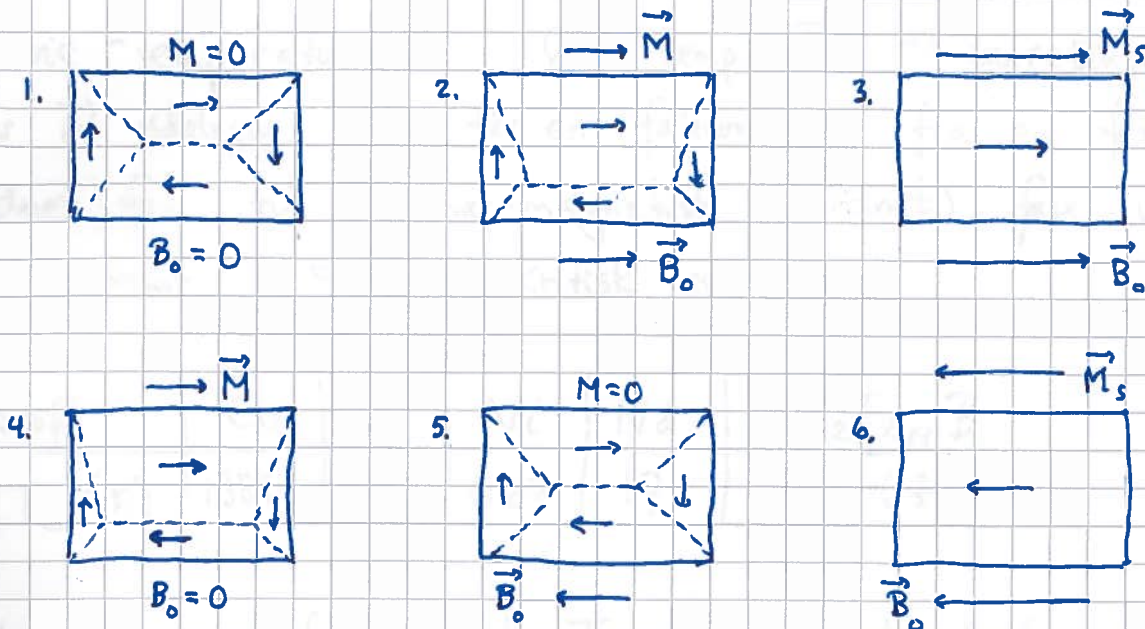


$B \approx 0$
utenfor

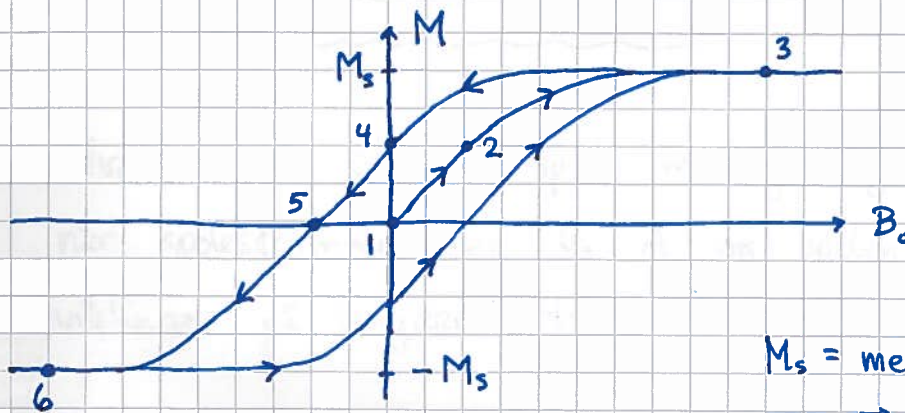
- Permanent-magnet
- Stor magnetisk energitethet omkring magneten; skal vise at $u_B = B^2/2\mu_0$
- Minimal vekselvirkningsenergi mellom atomære dipoler $\vec{m}$
- Eks: Neodym-magnet, starmagnet av jern
- Umagnetisk ferromagnet
- Lite magnetisk energitethet omkring ~~den~~ ($B \approx 0$)
- Større vekselvirkningsenergi nær domeneveggene (----); der må retningen til $\vec{m}$ endres
- Typisk domenestørrelse: $10^{-9} - 10^{-6}$ m
- Eks: Stål

Vi har erfaring for at en "stål-tings" tiltrekkes av en magnet. Dette skyldes at stålet magnetiseres i felld $\vec{B}_0$ fra magneten.

Da opptrer fenomenet magnetisk hysteresis.

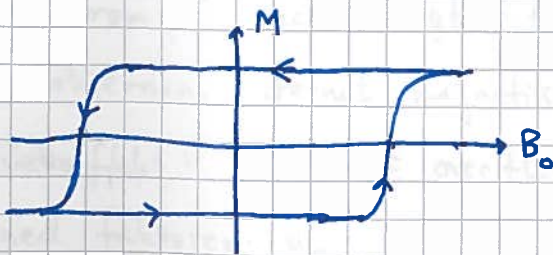


osv



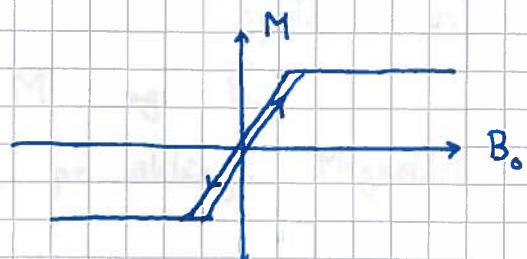
M_s = metningsmagnetisering;
alle $\vec{m}$ i samme retning
(s: saturation)

Hard ferromagnet:



- Permanent-magnet
- Vanskelig å demagnetisere
- Stor $M(0)$
- Uegnet som "kjerne" i spole

Bløt ferromagnet:



- Umagnetisk ferromagnet, f.eks stål
- Lett å magnetisere
- Liten $M(0)$
- Velegnet som kjerne i spole

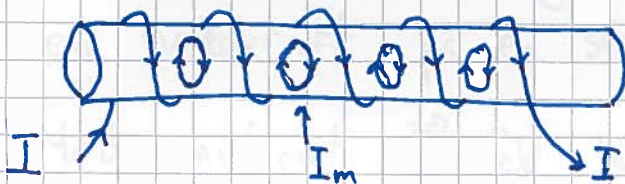
Curie-temperaturen: Økt temp. $T \Rightarrow$ innretningen av $\vec{m}$ ødelegges $\Rightarrow$ får en faseovergang fra en ferromagnetisk (ordnet) fase til en paramagnetisk (uordnet) fase ved en bestemt $T = T_c =$ kritisk temperatur

Stoff	Co	Fe	Ni	Nd	$\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$
T_c (K)	1388	1043	627	19	583-673

[Tilsvarende i antiferromagnet, T_c kalles da Neel-temperaturen]

Eks 1: Hva er B inni en spole med jernkjerne med $\mu_r = 1000$, når spolestrømmen er 0.1 A og spolen har 200 viklinger på lengden 40 cm ?

Løsn:



Spolestrøm I skaper "ytre" felt $\vec{B}_0 = \mu_0 n I$ inni spolen, dvs i jernkjernen. Jernet magnetiseres, med $\vec{M}$ langs $\vec{B}_0$.

Nettøffekt: Indusert overflatestrøm I_m pr vikling. Magnetfeltet styrkes med faktoren μ_r

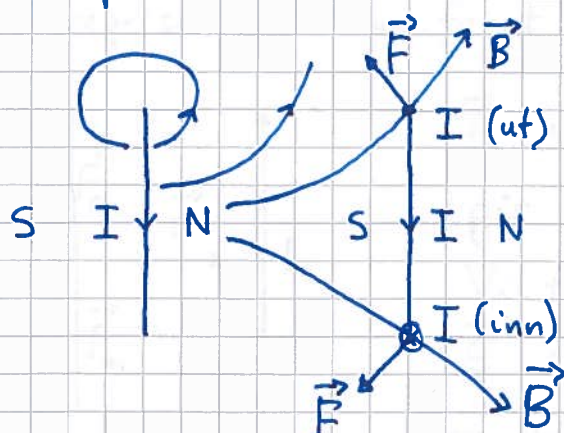
$$\Rightarrow B = \mu_r B_0 = \mu_r \mu_0 n I \quad (= \mu n I)$$

$$= 1000 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{200}{0.40} \cdot 0.1 \text{ T}$$

$$= 0.063 \text{ T} = \underline{\underline{63 \text{ mT}}}$$

Eks 2: Hvorfor tiltrekning mellom to motsatte magnetiske poler, N og S ?

Løsn: Se på to sirkulære strømsløyfer (sett fra siden) :



Vi ser at høyre sløyfe påvirkes av en nettokraft mot venstre, dvs tiltrekning.

Merk: Vi må ha et inhomogent $\vec{B}$ -felt for å få en nettokraft på en strømsløyfe (magn. dipol).

Med uniformt $\vec{B}$ -felt blir det null nettokraft.

(Men dreiemoment $\vec{\tau} = \vec{m} \times \vec{B}$)