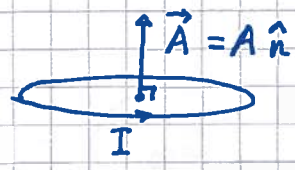


Magnetisk dipol og dipolmoment [YF 27.7; LHL 23.3, 26.2]

Strømsløyfe er magnetisk dipol.



Positiv retning på $\vec{A} = A \hat{n}$ med h.h.regel.

Strømsløyfas magn. dipolmoment: $\vec{m} = I \vec{A}$

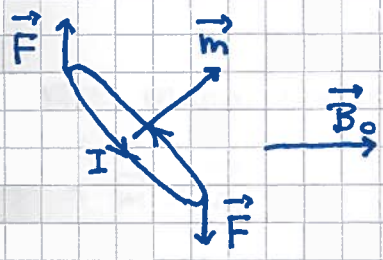
Enhet: $[m] = A \cdot m^2 = N \cdot m / T = J / T$

[Generelle definisjoner av magn. og el. dipolmoment:

$\vec{m} = \frac{1}{2} \int (\vec{r} \times \vec{j}) dV$; \vec{j} = strømtektthet ; dV = volumeelement

$\vec{p} = \int \vec{r} \rho dV$; ρ = ladningstetthet ; ——— " ———]

Magn. dipol i ytre magnetfelt (jf DC-motor s 97):



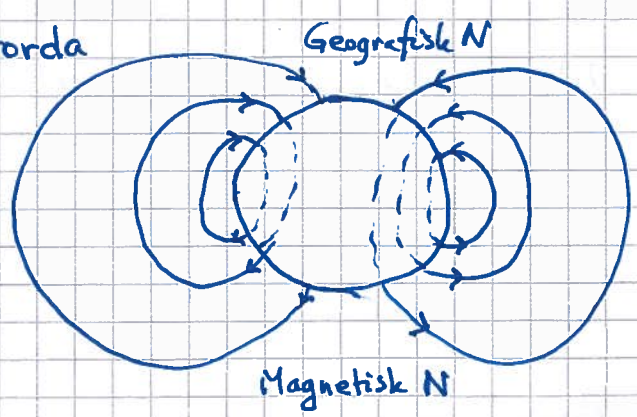
$\vec{\tau} = \vec{m} \times \vec{B}_0$; $U = -\vec{m} \cdot \vec{B}_0$ (Øv.13)

(Jf. el. dipol: $\vec{\tau} = \vec{p} \times \vec{E}_0$; $U = -\vec{p} \cdot \vec{E}_0$; Øv.9)

Eks 1 : Spole med 1600 viklinger, tverrsnitt 4 cm^2 ,
Hva er magn. dipolmoment når strømmen er 1 A ?

Løsn : $m = NIA = 1600 \cdot 1 \text{ A} \cdot 4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 = \underline{0.64 \text{ Am}^2}$

Eks 2 : Jorda

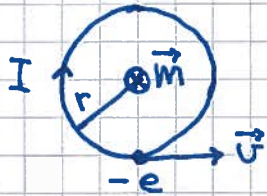


$m \approx 8 \cdot 10^{22} \text{ Am}^2$

Magnetisme [YF 28.8; LHL 26.1-26.6]

99

Betrakt elektron i sirkulær bane i atom:



$$I = e/T, \quad T = 2\pi r/v, \quad A = \pi r^2$$

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

$$\sim 10^{-19} \text{ C} \cdot 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 10^{-10} \text{ m} \sim 10^{-23} \text{ Am}^2$$

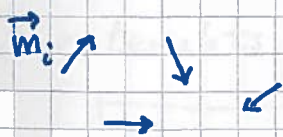
Kvantemekanikk viser at elektronet har et spinn (indre dreieimpuls) som tilsvarer et magnetisk dipolmoment

$$\mu_B = \frac{e \cdot h}{4\pi m_e} \approx 9.274 \cdot 10^{-24} \text{ Am}^2 \quad (\text{Bohr magneton})$$

($h \approx 6.6 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ = Plancks konstant)

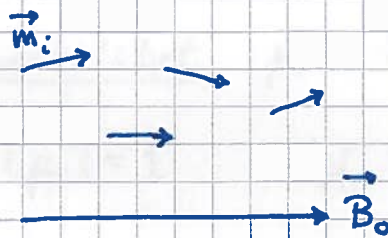
Atomære magn. dipoler kan rettes inn med \vec{m} langs ytre felt \vec{B}_0

$$(\vec{\tau} = \vec{m} \times \vec{B}_0, \quad U = -\vec{m} \cdot \vec{B}_0) :$$



$$(B_0 = 0)$$

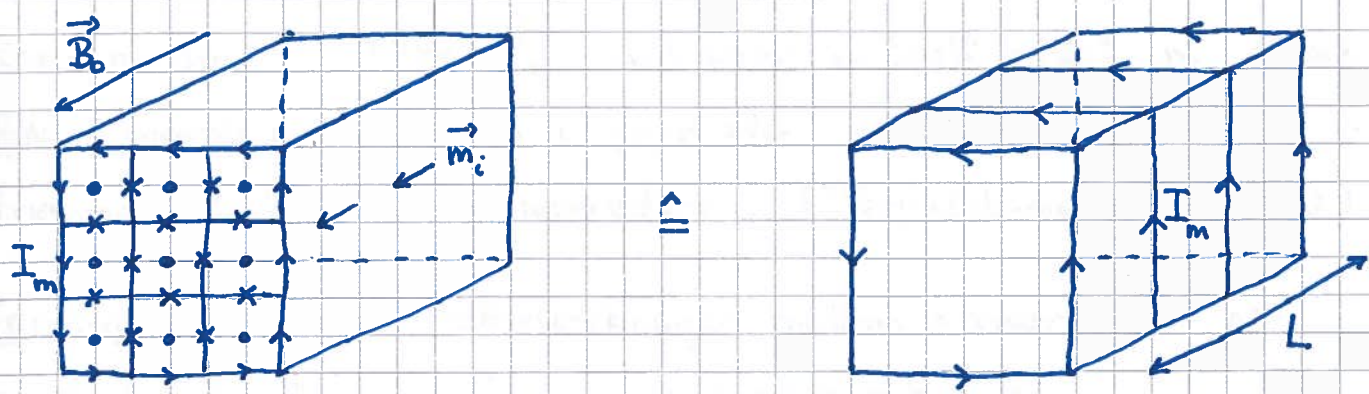
$$\sum_i \vec{m}_i \approx 0$$



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

\Rightarrow Materialet magnetiseres i ytre felt \vec{B}_0 .

Netto makroskopisk effekt av ytre felt \vec{B}_0 :



- innretting av atomære \vec{m} langs \vec{B}_0 ; bundet strøm i hvert atom
- indre strømmer kansellerer
- induisert overflatestrøm I_m ; pr lengdeenhet $i_m = I_m/L$
- materialet blir som en spole
- magnetfeltet styrkes i materialet : $\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_m$
- linear respons : B_m prop. med B_0
- materialets relative permeabilitet μ_r definert ved

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

$[\mu_r] = 1$ (jf $E = \epsilon_r E_0$ for dielektrikum)

• tallverdier :

	Vakuum	Luft	Al	Fe	Cu	Vann
μ_r	1	1.0000004	1.00002	5000	0.9999994	0.9999992
Type	—	Paramagnet	Param.	Ferrom.	Diamagnet	Diamagnet

• stoffets permeabilitet : $\mu = \mu_r \mu_0$

Paramagnetisme: Svak innretting av \vec{m} langs ytre \vec{B}_0

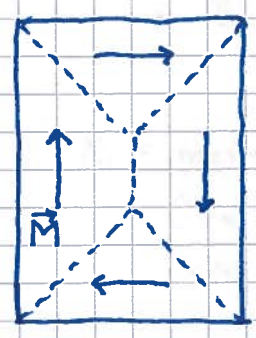
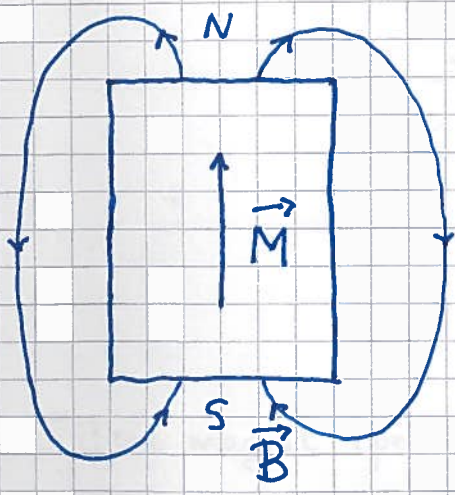
Diamagnetisme: Ytre \vec{B}_0 inducerer motsatt rettet \vec{m} . Svak effekt i normalt metall, men i superleder induseres så store strømmer at $B=0$ inni superlederen. ("Perfekt diamagnet", $\mu_r = 0$)

Ferromagnetisme: Vekselvirkninger mellom atomære \vec{m} gir lavest energi når alle \vec{m} peker i samme retning:



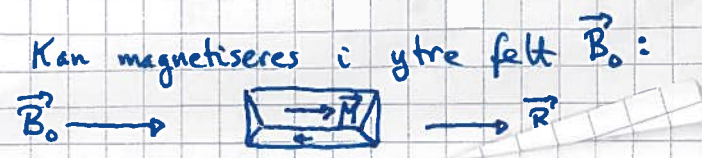
Gjelder Fe, Ni, Co og endel legeringer, f.eks. $Nd_2Fe_{14}B$ ↙ neodym

Magnetiske domener: $(\vec{M} = \sum_i \vec{m}_i / V = \text{magnetisering}; [M] = \frac{A}{m})$

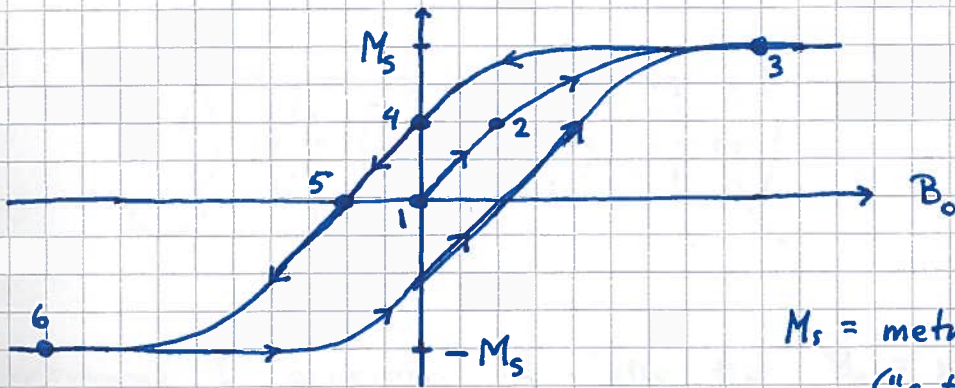
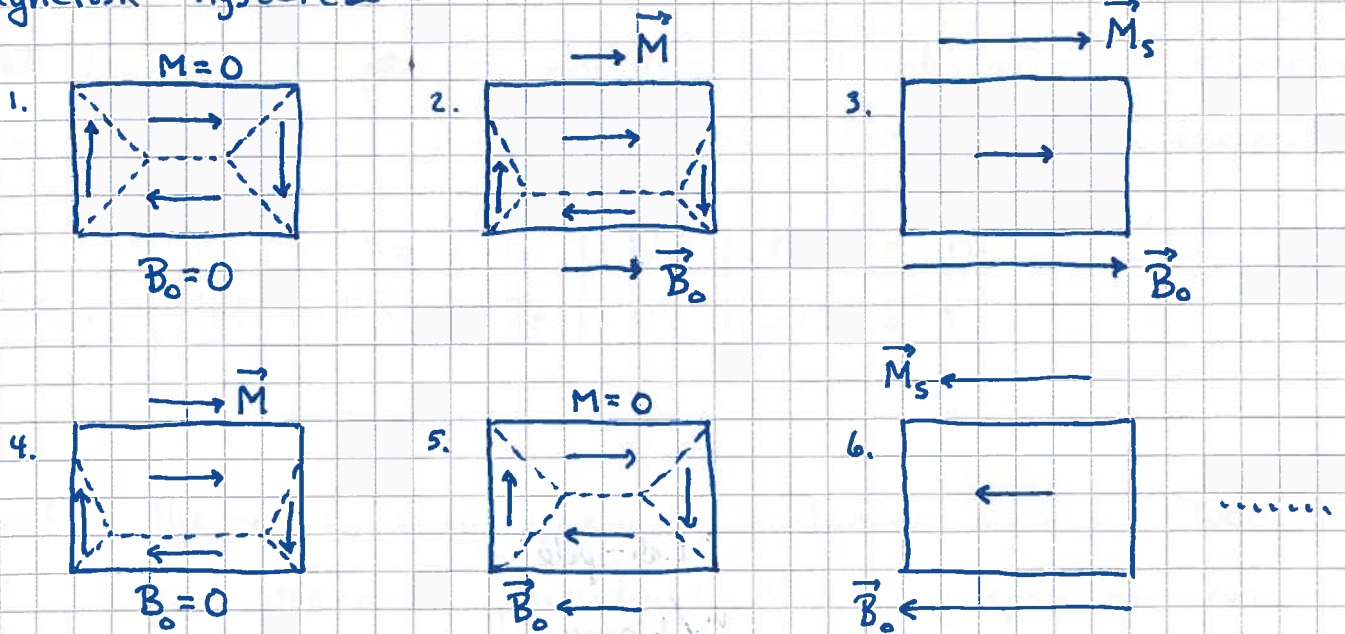


$B \approx 0$ utenfor

- Permanent-magnet
- Stor magnetisk energi omkring magneten: $u_B = B^2 / 2\mu_0$
- Minimal vekselvirkningsenergi mellom atomære \vec{m}
- Eks: Neodymmagnet. Starmagnet av jern.
- Lokalt energiminimum.
- "Umagnetisk ferromagnet"
- Liten magnetisk energi omkring (utenfor)
- Større vekselvirkningsenergi nær domeneveggene (----)
- Typisk domenestørrelse: $10^{-4} - 10^{-6} \text{ m}$
- Eks: Stål
- Kan magnetiseres i ytre felt \vec{B}_0 :

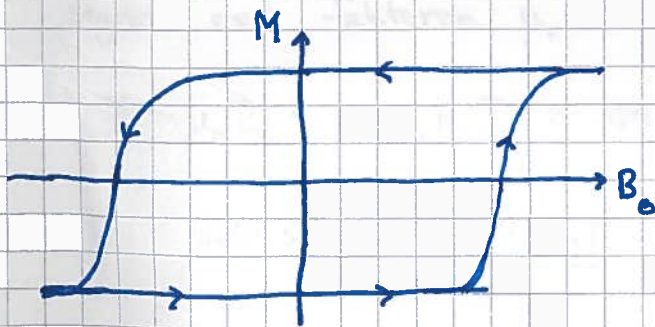


Magnetisk hysteresese :



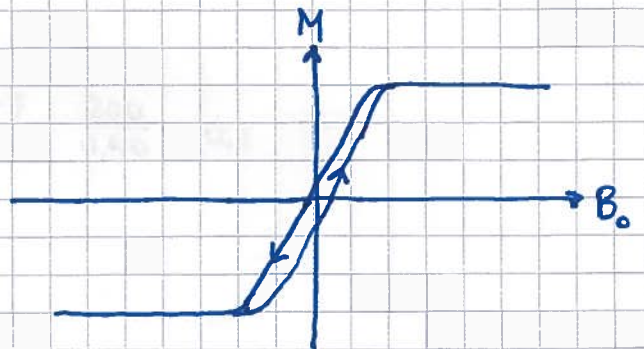
M_s = metningsmagnetisering ("saturation")
(alle \vec{m} i samme retning)

"Hard" magnet (permanent magnet):



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

"Bløt" magnet (stål):



- Lett å magnetisere
- Liten $M(0)$
- Velegnet som "kjerne" i spole

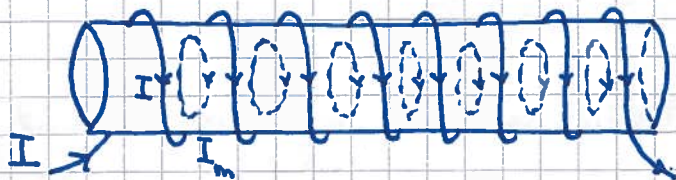
Curie - temperaturen:

Økt temperatur $T \Rightarrow$ innretting av \vec{m} ødelegges \Rightarrow faseovergang
 fra ferromagnet til paramagnet ved $T = T_c =$ kritisk temperatur

	Co	Fe	Ni	Nd	Nd ₂ Fe ₁₄ B
T_c (K)	1388	1043	627	19	583-673

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

Løsn:



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

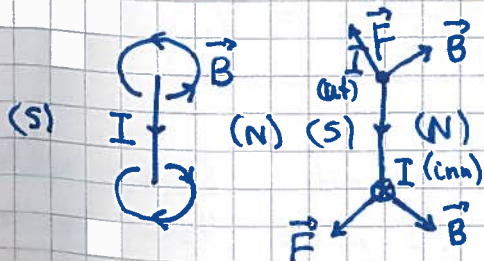
Nettoeffekten blir en induisert overflatestrøm (bundet strøm,
 magnetiseringsstrøm) I_m pr vikling av spoletråden. Magnetfeltet
 styrkes med faktoren μ_r :

$$B = \mu_r B_0 = \mu_r \mu_0 n I = 1000 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{200}{0.40} \cdot 0.1 \text{ T}$$

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

Eks 2: Hvorfor tiltrekker to motsatte magn. poler (N og S) hverandre ?

Løsn: Betrakt to sirkulære strømsløyfer (sett fra siden):



\Rightarrow Nettokraft på høyre løyfe rettet
mot venstre, dvs tiltrekning!

(NB: Må ha inhomogent \vec{B} -felt!)

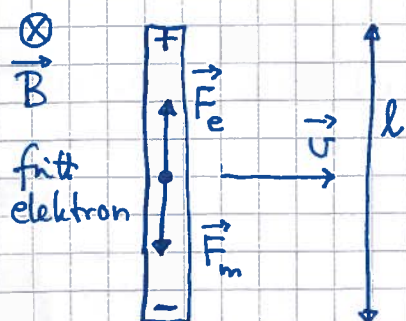
Elektrodynamikk

[YF 29-31; LHL 24, 25, 27]

(104)

Faradays induksjonslov [YF 29.1+2+4; LHL 24.1]

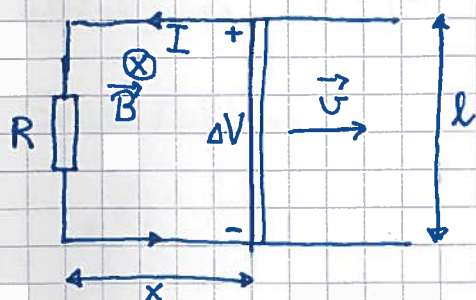
Leder i bevegelse i (uniformt) \vec{B} -felt:



$\vec{F}_m = -e\vec{v} \times \vec{B}$, nedover, gir induisert ladning på endene, dvs induisert elektrisk felt \vec{E} , nedover, dvs indusert spenning $\Delta V = E \cdot l$ i lederen.

$$\text{Likevekt: } \vec{F}_m + \vec{F}_e = 0 \Rightarrow eE = evB \Rightarrow E = vB \\ \Rightarrow \underline{\Delta V = vBl}$$

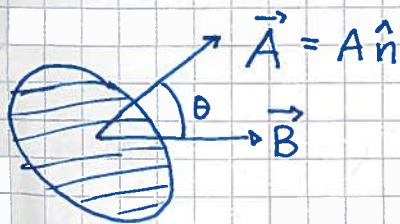
ΔV vil drive strøm hvis vi lager lukket krets; $I = \Delta V/R = vBl/R$



$$\Delta V = vBl = \frac{dx}{dt} Bl = \frac{d}{dt}(Blx) = \frac{d}{dt}(B \cdot A) \\ \text{der } A = lx = \text{areal omsluttet av strømsløyfa}$$

Magnetisk fluks

[YF 27.3; LHL 23.7 (19.7)]



Magnetisk fluks Φ gjennom flaten med areal A :

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{A} = B \cdot A \cdot \cos \theta$$

$$(\text{Generelt: } \Phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{A})$$

Dermed:

$$\Delta V = - \frac{d\Phi}{dt}$$

Faradays induksjonslov

Gjelder generelt, enten det er A (som her), \hat{n} eller \vec{B} som varierer med tiden t .