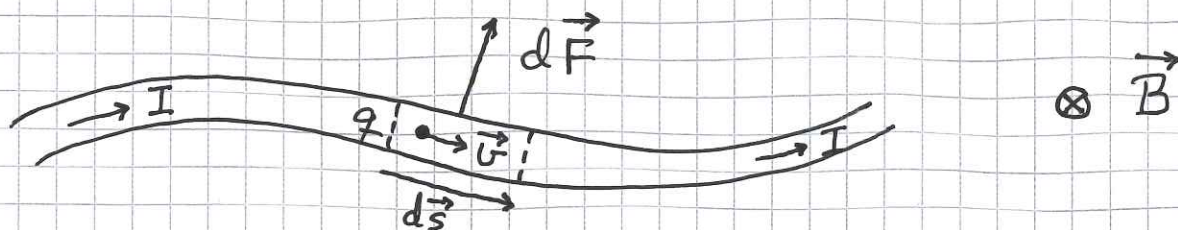


Magnetisk kraft på strøm [OS2 11.4 ; YF 27.6 ; LHL 23.2] (48)



N frie ladninger q med driftshastighet $\vec{v}$ på lederbit med lengde (og orientering) $d\vec{s}$

$$\Rightarrow d\vec{F} = Nq\vec{v} \times \vec{B} = \text{kraft på lederbiten}$$

$$I = dQ/dt = Nq / (ds/v)$$

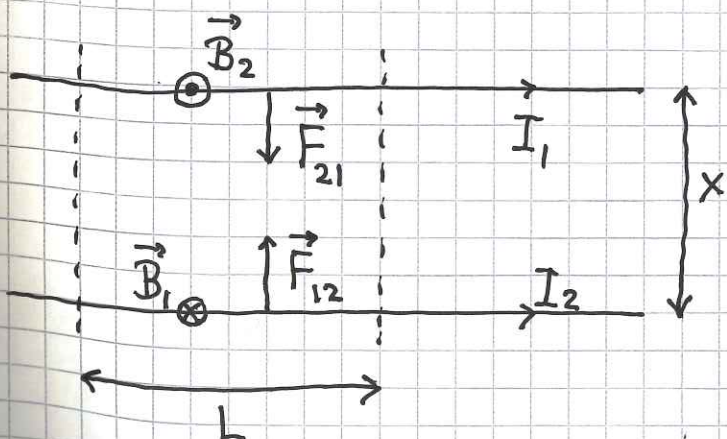
$$\Rightarrow Nq\vec{v} = I d\vec{s}$$

$$\Rightarrow \underline{d\vec{F} = I d\vec{s} \times \vec{B}}$$

Total kraft på hele ledaren:

$$\boxed{\vec{F} = \int d\vec{F} = I \int d\vec{s} \times \vec{B}}$$

Eks 1: Kraft mellom parallelle strømmer
[OS2 11.4 ; YF 28.4 ; LHL 23.5]



$$B_{1,2} = \frac{\mu_0 I_{1,2}}{2\pi x} =$$

feltstyrke i avstand

x fra leder 1, 2

Innbyrdes kraft på lengde ~~enheter~~ L : $F_{12} = F_{21} = F$ (N3)

$$F_{12} = I_2 L B_1 = \frac{\mu_0 L}{2\pi x} I_2 I_1$$

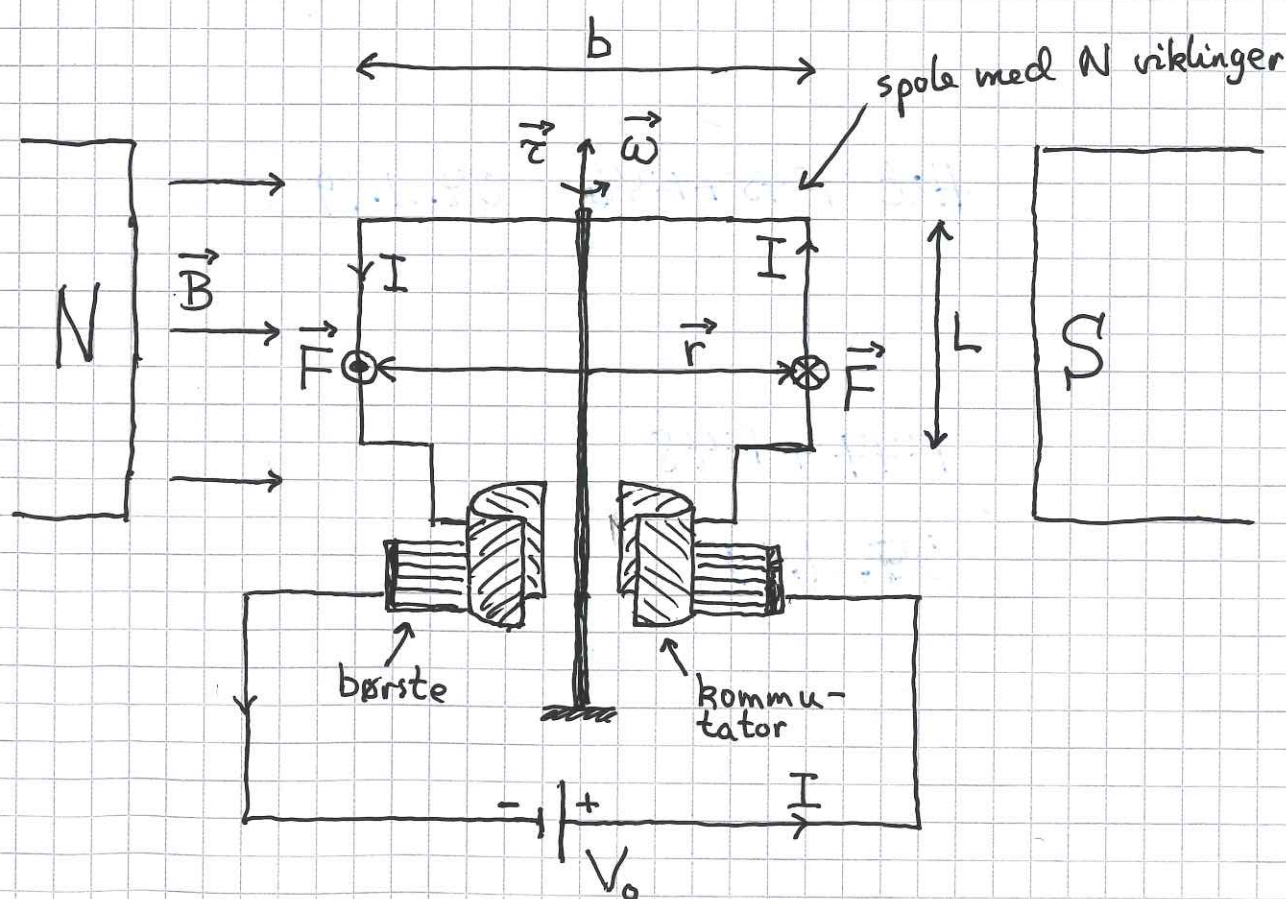
$$F_{21} = I_1 L B_2 = \frac{\mu_0 L}{2\pi x} I_1 I_2 = F_{12}$$

Kraft pr lengdeenhet: $f = F/L = \mu_0 I_1 I_2 / 2\pi x$

I_1 og I_2 i samme retning $\Rightarrow$ Tiltrekning

— " — motsatt — " — $\Rightarrow$ Frastøtning

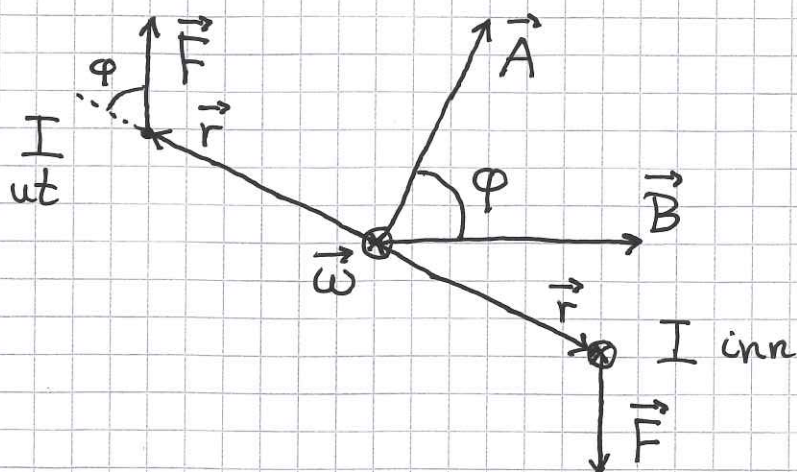
Eks 2. Likestrømsmotor [OS2 11.5 ; VF 27.8 ; LHL 26.3]



Kommutatoren roterer med spolen og gir strømretning slik at $\vec{\tau}$ peker i samme retning hele tiden.

Børstene sørger for kontakt mellom DC-kilden (V_0) og kommutatoren.

Sett langs rot. aksen, med $\vec{\omega}$ inn i planet:



$$\vec{F} = I \vec{L} \times \vec{B}$$

$$\vec{\tau} = \sum \vec{r} \times \vec{F}$$

$$\tau = |\vec{\tau}| = 2 \cdot \frac{b}{2} \cdot ILB \cdot \sin \varphi \cdot N$$

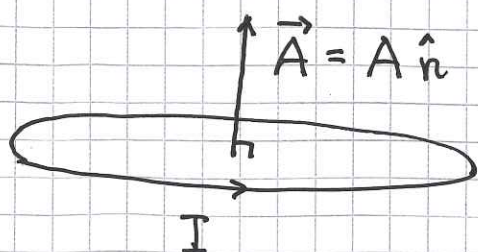
$$= N \cdot IA \cdot B \cdot \sin \varphi \quad (A = b \cdot L)$$

$$= |N I \vec{A} \times \vec{B}|$$

$$\Rightarrow \vec{\tau} = N I \vec{A} \times \vec{B} = \text{dreiemoment p\aa spole med } N \text{ vindinger}$$

Magnetisk dipolmoment [OS2 11.5 ; YF 27.7 ; LHL 23.3, 26.2]

Ei str\u00f8msl\u00f8yfe er en magnetisk dipol:



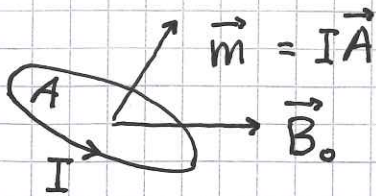
Positiv retning p\aa $\vec{A}$ med h\u00f8yreh\u00e5ndsregel.

Str\u00f8msl\u00f8yfas magnetiske dipolmoment:

$$\vec{m} = I \vec{A}$$

$$\text{Enhet: } [m] = A m^2 = J/T$$

Magn. dipol i ytre $\vec{B}$ -felt :

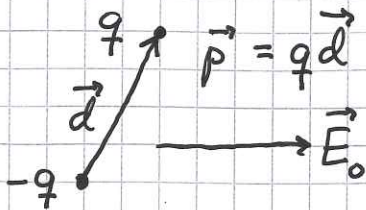


$$\vec{\tau} = \vec{m} \times \vec{B}_0$$

$$U = -\vec{m} \cdot \vec{B}_0$$

(Øving 13)

Elektrisk dipol i ytre $\vec{E}$ -felt :



$$\vec{p} = q\vec{d}$$

$$\vec{\tau} = \vec{p} \times \vec{E}_0 ; U = -\vec{p} \cdot \vec{E}_0$$

Generelle dipol-definisjoner (ikke pensum) :
(for $\vec{m}$)

$$\vec{p} = \int \vec{r} dq = \int \vec{r} \rho dV$$

ρ = ladning pr volumenhet

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

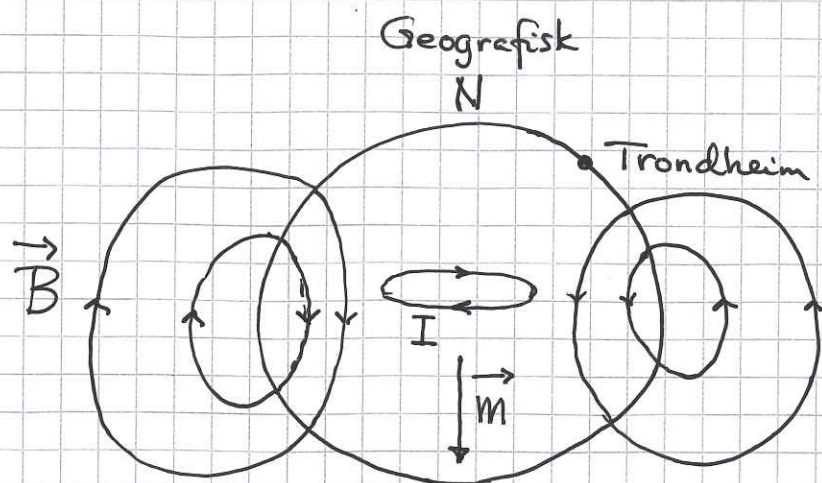
$\vec{j}$ = strøm pr flateenhet

Eks 1. (a) Bestem $|\vec{m}|$ for spole med 800 viklinger og tverrsnitt 4 cm^2 når strømstyrken i spoletråden er 0.5 A .

(b) Bestem max $|\vec{\tau}|$ på spolen i ytre felt $B_0 = 0.3 \text{ T}$.

Løsning: (a) $m = NIA = 800 \cdot 0.5 \text{ A} \cdot 4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 = \underline{\underline{0.16 \text{ Am}^2}}$

(b) $\tau_{\max} = m \cdot B_0 = 0.16 \cdot 0.3 \text{ Nm} = \underline{\underline{0.048 \text{ Nm}}}$



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

Magnetisk N (Betegnes ofte som magn. syd.)

Magnetiske poler der $\vec{B}$ er vertikal (dvs $\perp$ jordkloden)

"World Magnetic Model":

Magn. S : 86.4° N , 175.3° Ø (Mellom Alaska og Svalbard)

Magn. N : 64.1° S , 136.0° Ø (Ved Antarktis, i retning Sydney)

Trondheim (4/11-2019):

$$|\vec{B}| \approx 52.00 \mu\text{T}$$

$$B_{\perp} \approx 50.19 \mu\text{T}$$

$$B_{\parallel} \approx 13.59 \mu\text{T}$$

$$B_N \approx 13.56 \mu\text{T}$$

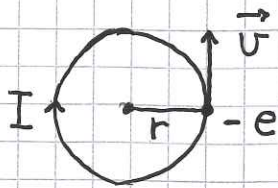
$$B_{\text{Ø}} \approx 0.90 \mu\text{T}$$

$$\frac{d|\vec{B}|}{dt} \approx 46 \text{ nT pr år}$$

Magnetisme [OS2 12.7; YF 28.8; LHL 26.1-26.6]

(53)

Atomer er magnetiske dipoler (noen har $m=0$) :



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

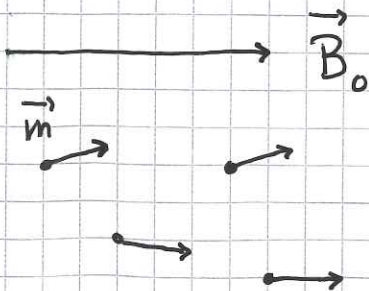
$$\Rightarrow m = IA = \frac{1}{2} e v r \sim 10^{-19} \text{ C} \cdot 10^6 \text{ m/s} \cdot 10^{-10} \text{ m} \sim 10^{-23} \text{ Am}^2$$

Kvantemekanikk (og eksperimenter) viser at et elektron har en indre dreieimpuls, et spinn $\vec{S}$, tilsvarende et magn. dipolmoment

$$\mu_B = \frac{e h}{4\pi m_e} \approx 9.274 \cdot 10^{-24} \text{ Am}^2 = 1 \text{ Bohr magneton}$$

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

Materialer magnetiseres når atomære dipoler rettes inn med $\vec{m}$ langs et ytre felt $\vec{B}_0$:

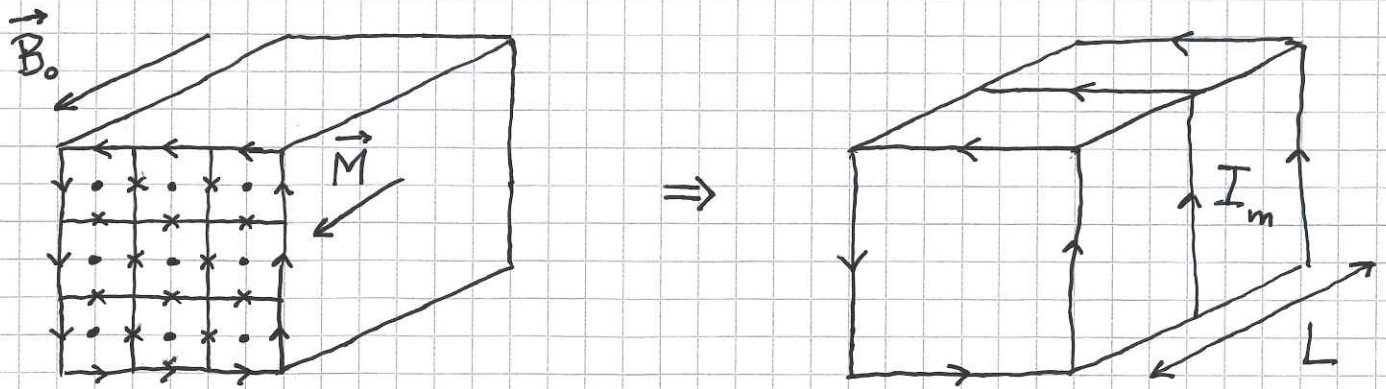


$$\text{Magnetisering : } \vec{M} = \sum_i \vec{m}_i / V \quad \left(\begin{array}{l} \text{dipolmoment} \\ \text{volumenhet} \end{array} \right) \text{ pr}$$

$$[M] = \text{A/m}$$

$$(\text{Elektrisk polarisering : } \vec{P} = \sum_i \vec{p}_i / V)$$

Nettoeffekten er en overflatestrøm (magnetiseringsstrøm):



- bundet strøm i hvert atom:
- alle indre strømmer kansellerer
- $i_m = I_m / L =$ induert overflatestrøm pr lengdeenhet
- som en spole!
- feltet styrkes inni materialet: $\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_m$
- lineær respons: B_m prop. med $B_0 \Rightarrow B$ prop. med B_0
- materialets relative permeabilitet μ_r :

$$B = \mu_r B_0 \quad ; \quad [\mu_r] = 1$$

If. dielektrikum: $E = E_0 / \epsilon_r$ (svekket felt inni)

- materialets permeabilitet:

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0$$

If. dielektrikum: $\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0$

Paramagnetisme:

Svak innretting av $\vec{m}$ langs $\vec{B}_0$. Al: $\mu_r = 1.00002$

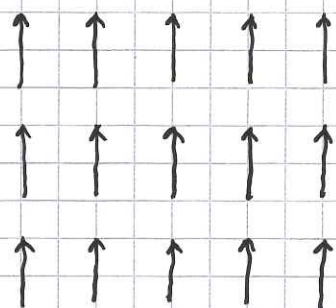
Diamagnetisme:

$\vec{B}_0$ induserer ~~en~~ motsatt rettet $\vec{m}$. Cu: $\mu_r = 0.999994$

Superledere: $\mu_r = 0 \Rightarrow \vec{B} = 0$ inni en (normal) superleder

Ferromagnetisme:

Nabospinn vekselvirker $\Rightarrow$ Parallell $\vec{m}$ gir lavest energi:



$\vec{M} \neq 0$ selv med

null ytre felt

Eks: Fe, Ni, Co, $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$

(Nd = neodym;
metall; $Z = 60$)

$\Rightarrow$ Stor verdi for μ_r , opp mot 10^3 eller mer.

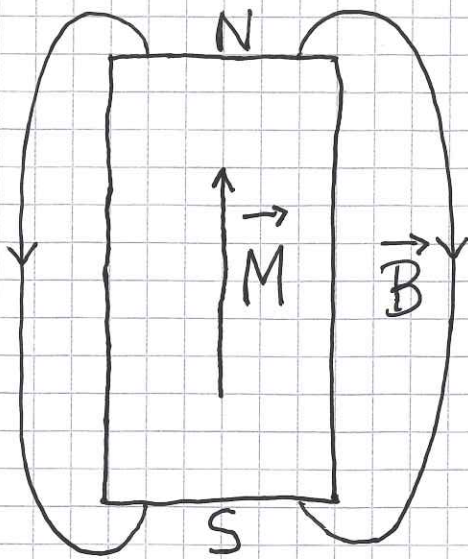
Curie-temperaturen:

Økende T ødelegger innrettingen av $\vec{m}$.

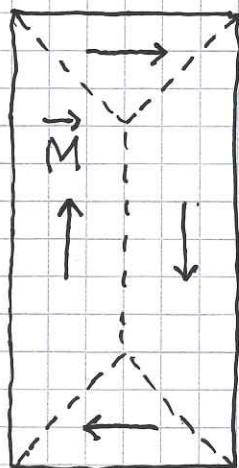
Gir faseovergang, fra ferromagnet til paramagnet, ved en kritisk temperatur T_c .

Eks: For rent jern (Fe) er $T_c = 770^\circ\text{C}$

Permanent-magnet vs unmagnetisk ferromagnet:



- Ganske mye energi i feltet omkring magneten; energi pr volumenhet $u_B = B^2/2\mu_0$
- Minimal vekselvirkningsenergi mellom atomære $\vec{m}$
- Eks: Neodymmagnet



$B \approx 0$
utenfor
materialet

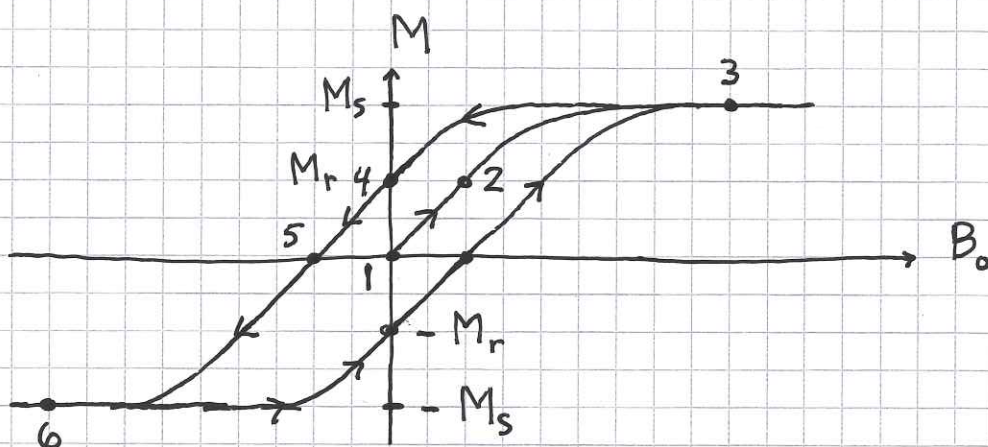
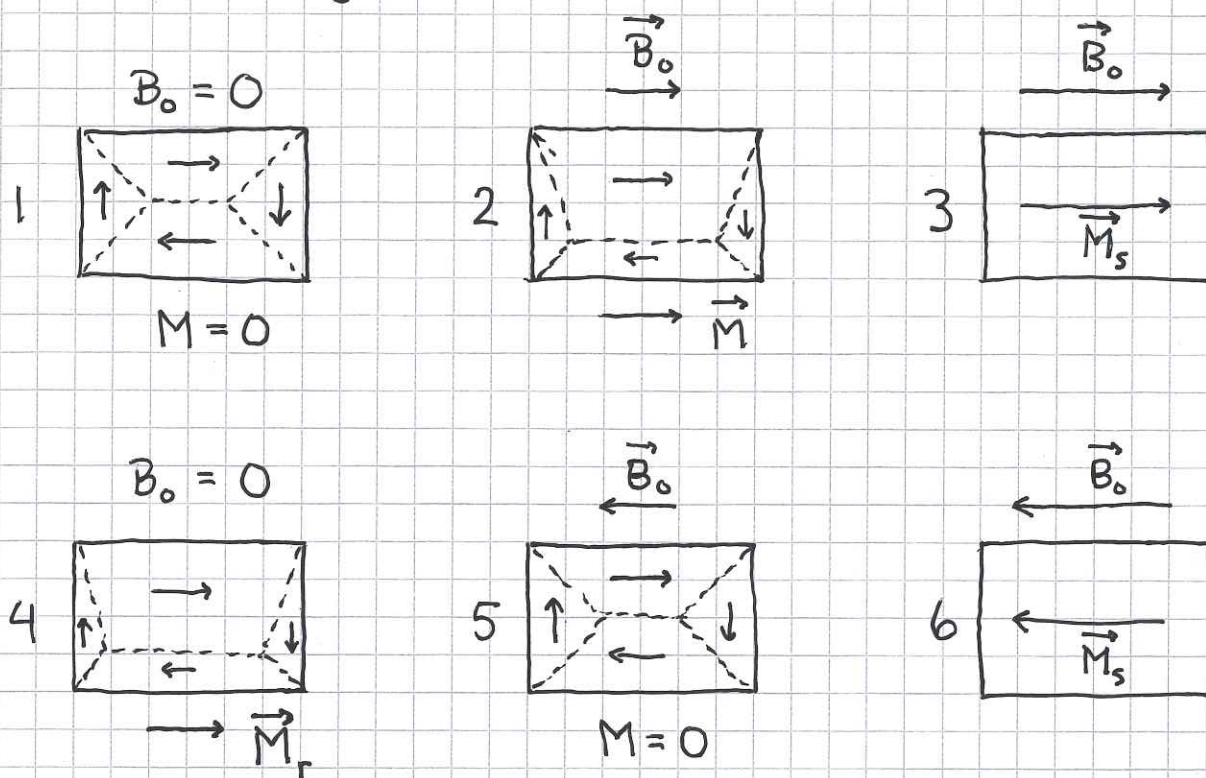
- Liten energi i feltet omkring ($B \approx 0$)
- Større v.v. energi nær domeneveggene (-----). Her endres retningen på atomære $\vec{m}$:



- Domenestørrelse: $10^{-4} - 10^{-6}$ m
- Eks: Stål
- Magnetiseres i et ytre felt $\vec{B}_0$

Magnetisk hysteresese:

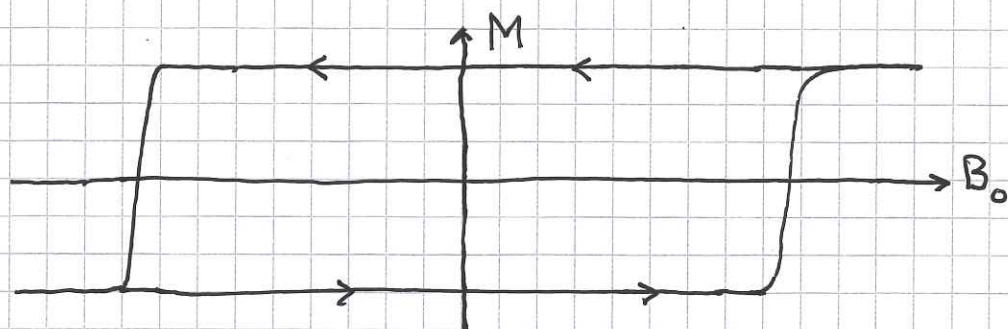
(57)



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

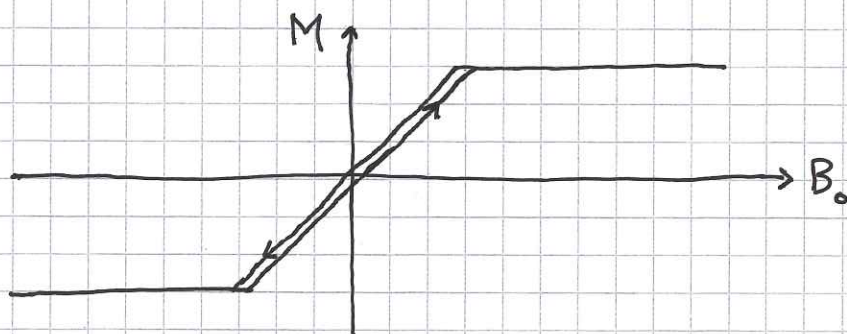
M_r = restmagnetisering ("remnant magnetization"); materialet "husker" at $\vec{M}_s$ pekte i en gitt retning for $\vec{B}_0$ ble redusert til null ; materialets tilstand avhenger av dets forhistorie

Permanentmagnet ("hard" magnet) :



- Vanskelig å armagnetisere
- Stor M når $B_0 = 0$ ($M_r \approx M_s$)
- Ikke egnet som kjerne i spole i AC-kretser (*)

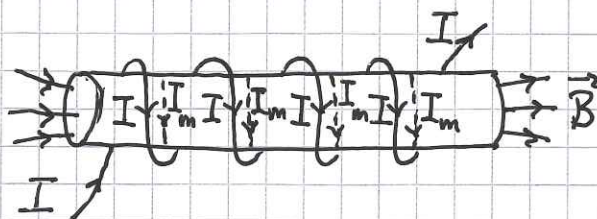
Stål ("bløt" magnet) :



- Lett å magnetisere og armagnetisere
- Liten M når $B_0 = 0$ ($M_r \approx 0$)
- Godt egnet som kjerne i spole i AC-kretser (*)

(*) Arealet omsluttet av hysteresekurven tilsvarer energi som omdannes til varme pr syklus, dvs for hver hele svingning av $\vec{B}_0$

Eks 1: Hva er B inne i en jernkjerne med $\mu_r = 100$, i en spole der $I = 0.3 \text{ A}$ og $N = 400$ viklinger på lengden $l = 6 \text{ cm}$?



Løsn: Ytre felt inne i spolen, dvs inne i jernkjernen:

$$B_0 = \mu_0 n I \quad ; \quad n = N/l$$

Jernet magnetiseres, med $\vec{M}$ langs $\vec{B}_0$, og det induseres en overflatestrøm I_m pr viking.

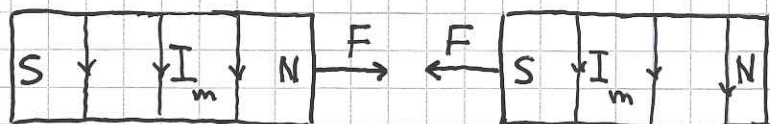
Magnetfeltet styrkes med faktoren μ_r inne i spolen:

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

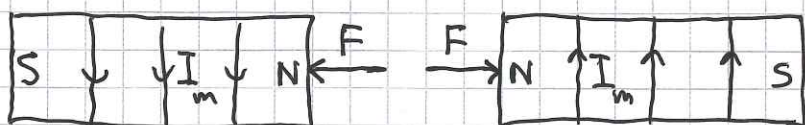
$$= 100 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{400}{0.06} \cdot 0.3 \text{ T}$$

$$\approx \underline{\underline{0.25 \text{ T}}}$$

Eks 2: Tiltrekning og frastøtning mellom magneter



Parallelle strømmer
 $\Rightarrow$ Tiltrekning



Antiparallelle strømmer
 $\Rightarrow$ Frastøtning