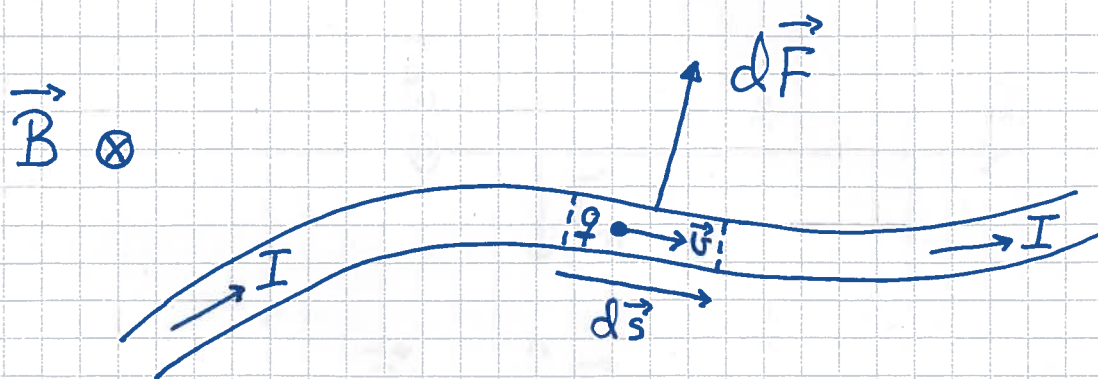


Magnetisk kraft på strøm [YF 27.6 ; LHL 23.2]

(161)



Lederbit ds , lengde $d\vec{s}$, N frie ladn. q , driftshast. \vec{v}

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

$$I = \frac{dQ}{dt} = \frac{Nq}{ds/v} = \frac{1}{ds} Nqv \Rightarrow Nq\vec{v} = I d\vec{s}$$

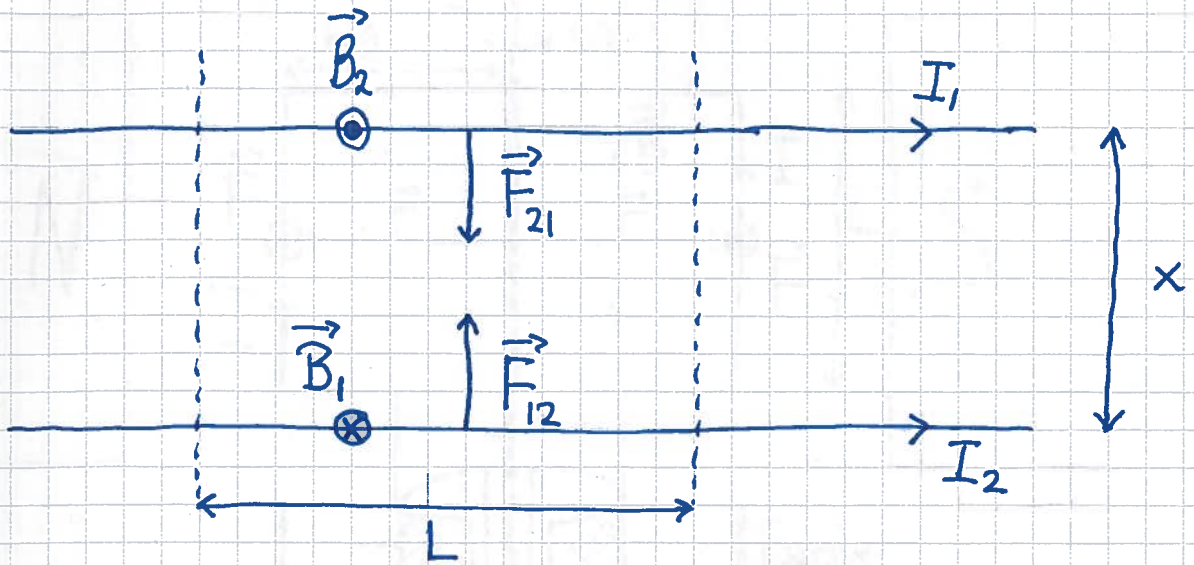
$$\Rightarrow d\vec{F} = I d\vec{s} \times \vec{B}$$

\Rightarrow Kraft på hele ledere:

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

Eks 1: Parallell strømmer [YF 28.4 ; LHL 23.5]

(162)



$$B_{1,2} = \frac{\mu_0 I_{1,2}}{2\pi x} = \text{feltstyrke i avstand } x \text{ fra } I_{1,2}$$

Innbyrdes kraft på lengde L :

$$F_{12} = F_{21} = F \quad (N3)$$

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

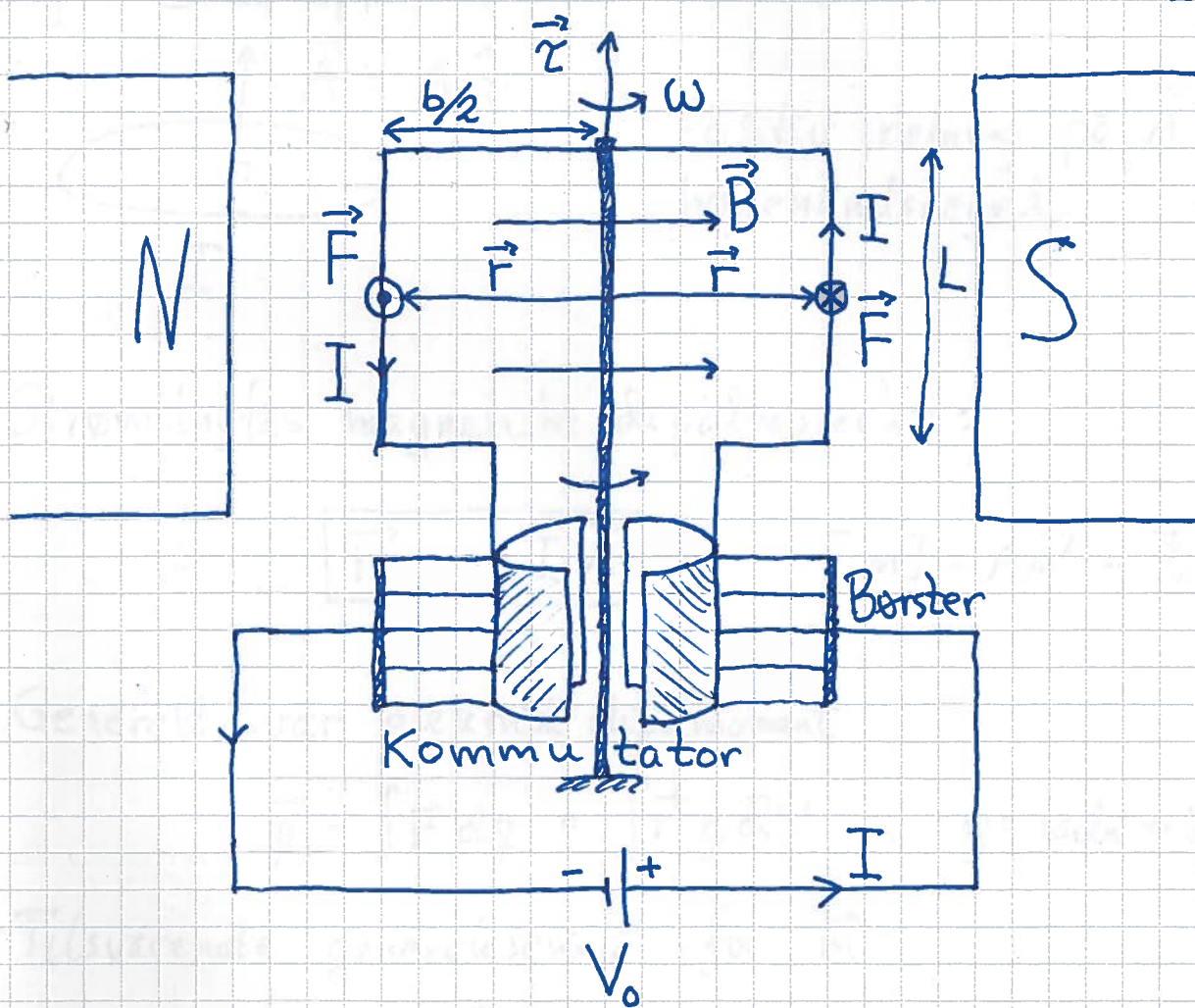
$$F_{21} = I_1 L B_2 = \frac{\mu_0 L}{2\pi x} I_1 I_2 = F_{12} \quad (\text{OK!})$$

Kraft pr lengdeenhet :
$$\underline{f = \frac{F}{L} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi x}}$$

Tiltrekning når I_1 og I_2 i samme retning.

Frastøtning ————— " ————— motsatt ————— " —————.

Eks 2: Likestrømsmotor [VF 27.8; LHL 26.3]

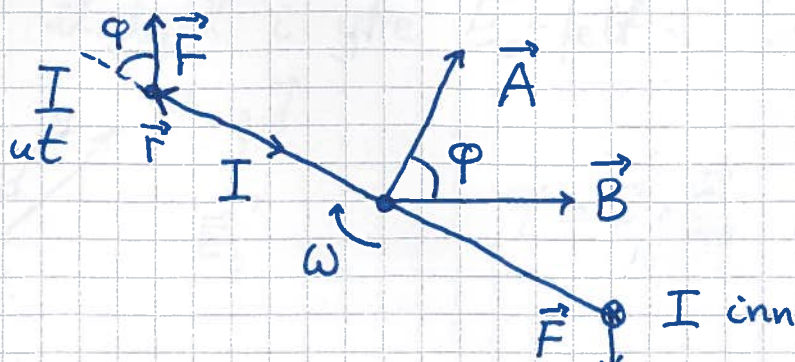


Kommutator roterer med sløyfa (evt spolen) og gir strømretning som i figuren; dermed dreiemoment $\vec{\tau}$ i samme retning hele tiden:

$$\tau = |\vec{\tau}| = 2 \cdot \frac{b}{2} \cdot I L B \cdot \sin\varphi$$

$$= I A \cdot B \cdot \sin\varphi \quad ; \quad A = b \cdot L$$

Sett ~~langs~~ langs rotasjonsaksen ($\vec{\tau}$ inn):



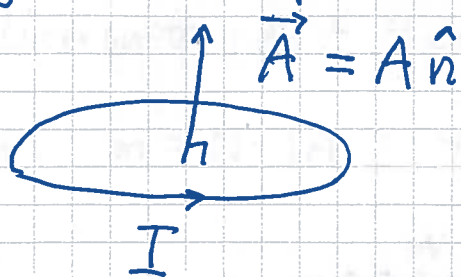
$$\vec{F} = I \vec{L} \times \vec{B}$$

$$\vec{\tau} = I \vec{A} \times \vec{B}$$

(N viklinger: $\vec{\tau} = N \cdot I \vec{A} \times \vec{B}$)

Magnetisk dipolmoment [YF 27.7; LHL 23.3, 26.2]

164



Positiv retning på \vec{A} med høyrehandsregel.

Strømsløyfas magnetiske dipolmoment:

$$\boxed{\vec{m} = I \vec{A}} \quad [m] = \text{Am}^2 = \text{J/T}$$

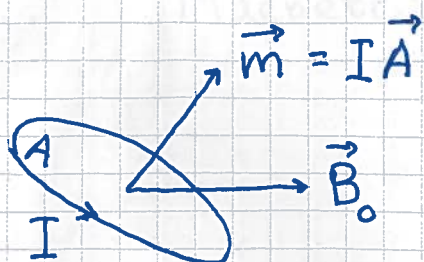
[Generelt var elektisk dipolmoment

$$\vec{p} = \int \vec{r} dq = \int \vec{r} \rho dV \quad ; \quad \rho = \text{ladn. tetthet}$$

Tilsvarende generalisering for \vec{m} :

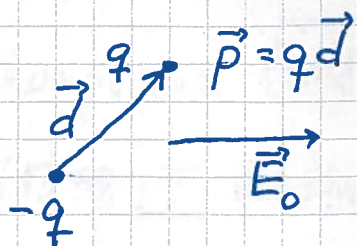
$$\vec{m} = \frac{1}{2} \int (\vec{r} \times \vec{j}) dV \quad ; \quad \vec{j} = \text{strømtetthet}]$$

Magn. dipol i ytre \vec{B} -felt (jf DC-motoren):



$$\boxed{\begin{aligned} \vec{\tau} &= \vec{m} \times \vec{B}_0 \\ U &= -\vec{m} \cdot \vec{B}_0 \end{aligned}} \quad (\text{\O u. 13})$$

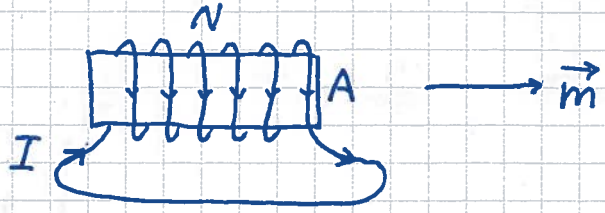
Jf. el. dipol i ytre \vec{E} -felt: (s. 125; \O u. 9)



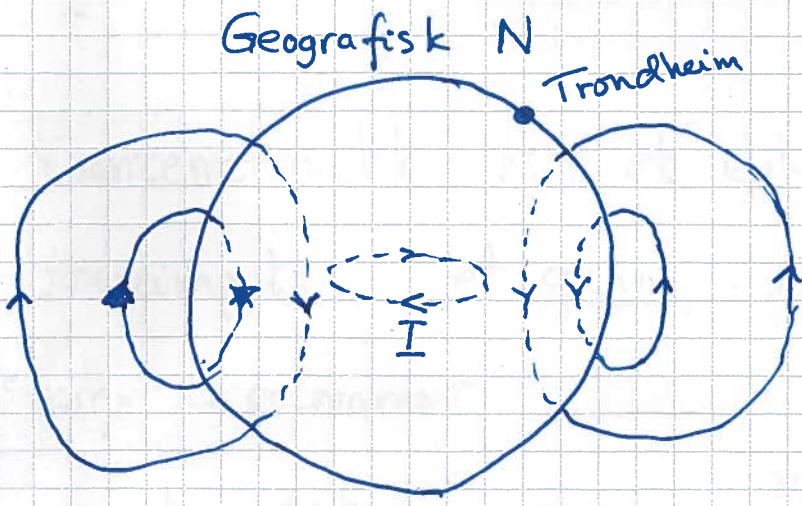
$$\vec{\tau} = \vec{p} \times \vec{E}_0, \quad U = -\vec{p} \cdot \vec{E}_0$$

Eks 1: Hva er $|\vec{m}|$ for spole med $N = 400$ viklinger og tverrsnitt $A = 4 \text{ cm}^2$ når strømmen er $I = 0.2 \text{ A}$?

Løsn: $m = N \cdot IA = 400 \cdot 0.2 \text{ A} \cdot 4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 = \underline{0.032 \text{ Am}^2}$



Eks 2: Jordkloden



Magnetisk N [Betegnes ofte magn. syd!]



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

Magn. poler der \vec{B} er vertikal. World Magnetic Model 2015:

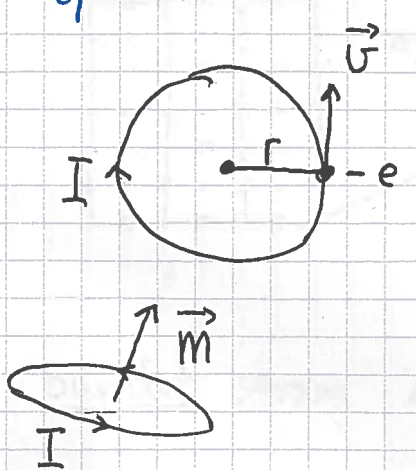
Magn. Nord: $64.3^\circ \text{ S}, 136.6^\circ \text{ Ø}$
Magn. Syd: $86.3^\circ \text{ N}, 159.2^\circ \text{ V}$

I følge ngdc.noaa.gov online calculator er, i Trondheim: $|\vec{B}| \approx 52 \mu\text{T}$, med vertikal komponent (ned) ca $50 \mu\text{T}$ og horisontal komp. ca $13.6 \mu\text{T}$ ($13.58 \mu\text{T}$ nordover, $0.81 \mu\text{T}$ østover). $\frac{d|\vec{B}|}{dt} \approx 27 \text{ nT pr år}$

Materialers magnetiske egenskaper: Magnetisme

[YF 28.8 ; LHL 26.1 - 26.6]

Atomer er små strømsløyfer, og derfor små magn. dipoler:

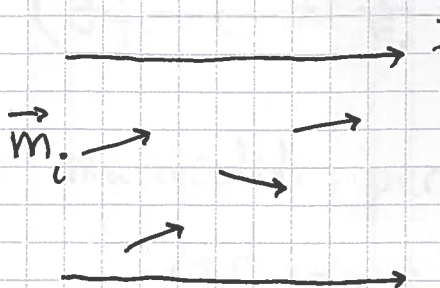

$$I = \frac{e}{T}, \quad T = \frac{2\pi r}{v}, \quad A = \pi r^2$$
$$\Rightarrow m = IA = \frac{1}{2} e v r$$
$$\approx 10^{-19} \text{ C} \cdot 10^6 \text{ m/s} \cdot 10^{-10} \text{ m}$$
$$\approx 10^{-23} \text{ A m}^2$$

Kvantemekanikk viser at elektroner har indre dreieimpuls, et spinn, som tilsvarer et magn. dipolmoment

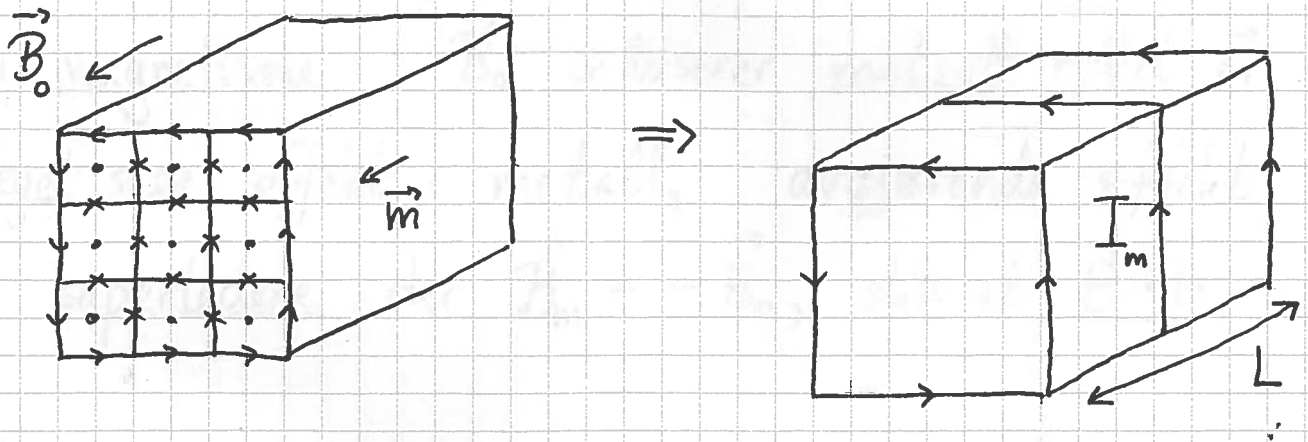
$$\mu_B = \frac{e \cdot h}{4\pi m_e} \approx 9.274 \cdot 10^{-24} \text{ A m}^2 = \text{et Bohr magneton}$$


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

Materialer kan magnetiseres ved at atomære dipoler rettes inn med \vec{m} langs ytre felt \vec{B}_0 :


$$\vec{M} = \sum_i \vec{m}_i / V \neq 0$$
$$\vec{M} = \text{magnetiseringen} \quad (\text{A/m})$$

Netto makroskopisk effekt er en
overflatestrøm:



- bundet strøm i hvert atom: 
- indre strømmer kansellerer
- induert overflatestrøm pr lengdeenhet: $i_m = \frac{I_m}{L}$
- ligner en spole!
- magnetfeltet 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 :

$$\boxed{B = \mu_r B_0} \quad [\mu_r] = 1$$

(Jf. $E = \frac{1}{\epsilon_r} E_0$ for dielektrikum)

- materialets permeabilitet: $\mu = \mu_r \cdot \mu_0$
(Jf. $\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0$)

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

Diamagnetisme : \vec{B}_0 induserer motsatt rettet \vec{m} .

Meget svak effekt i metall, avgjørende effekt i superledere der $\vec{B}_m = -\vec{B}_0$, slik at $\vec{B} = 0$.

Ferromagnetisme

"Nabospinn" vekselvirker slik at parallelle \vec{m} gir lavest energi :



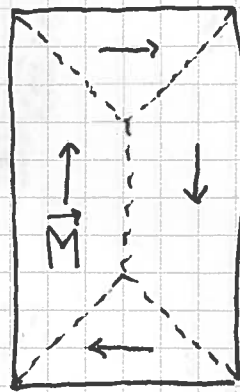
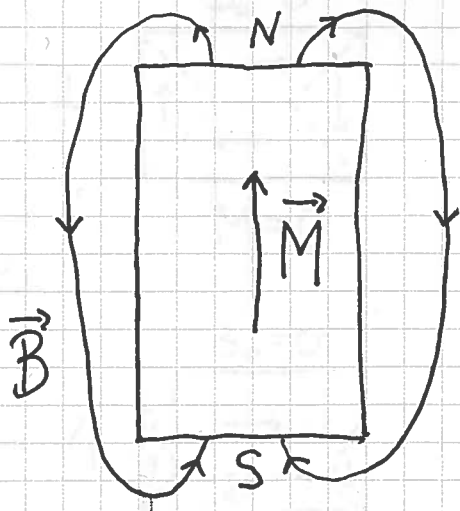
Eks: Fe, Ni, Co, $Nd_2Fe_{14}B$ (Nd = neodym)

μ_r opptil 10^3 og mer

Curie-temperaturen : Økende temp. T ødelegger innrettingen av \vec{m} . Gir faseovergang fra ferromagnet til paramagnet ved kritisk temp. T_c

Eks: Fe ; $T_c = 770^\circ C$

Permanent-magnet vs unmagnetisk ferromagnet:

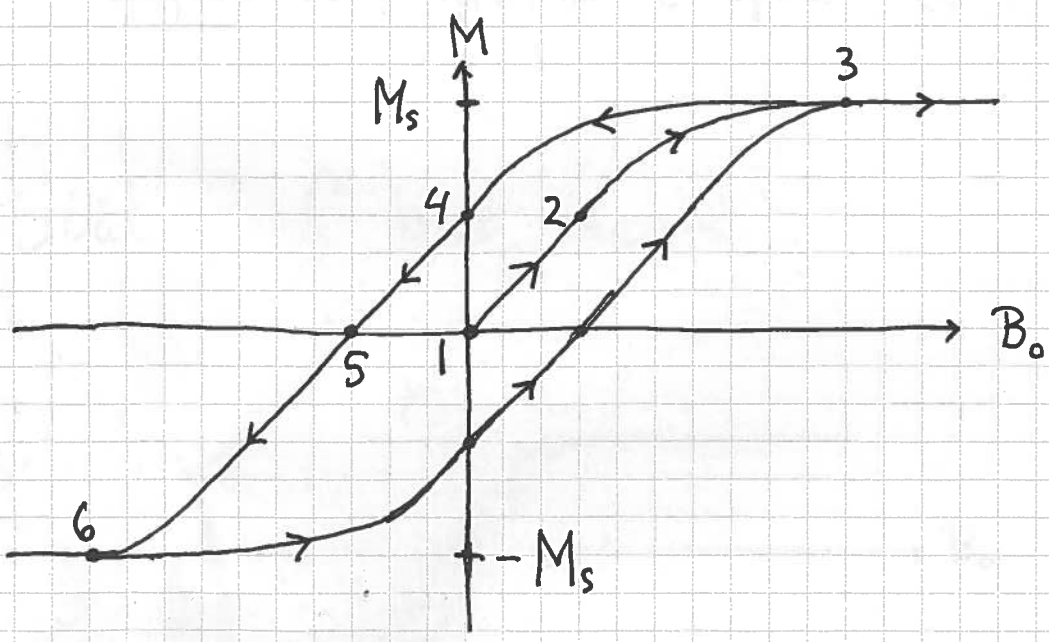
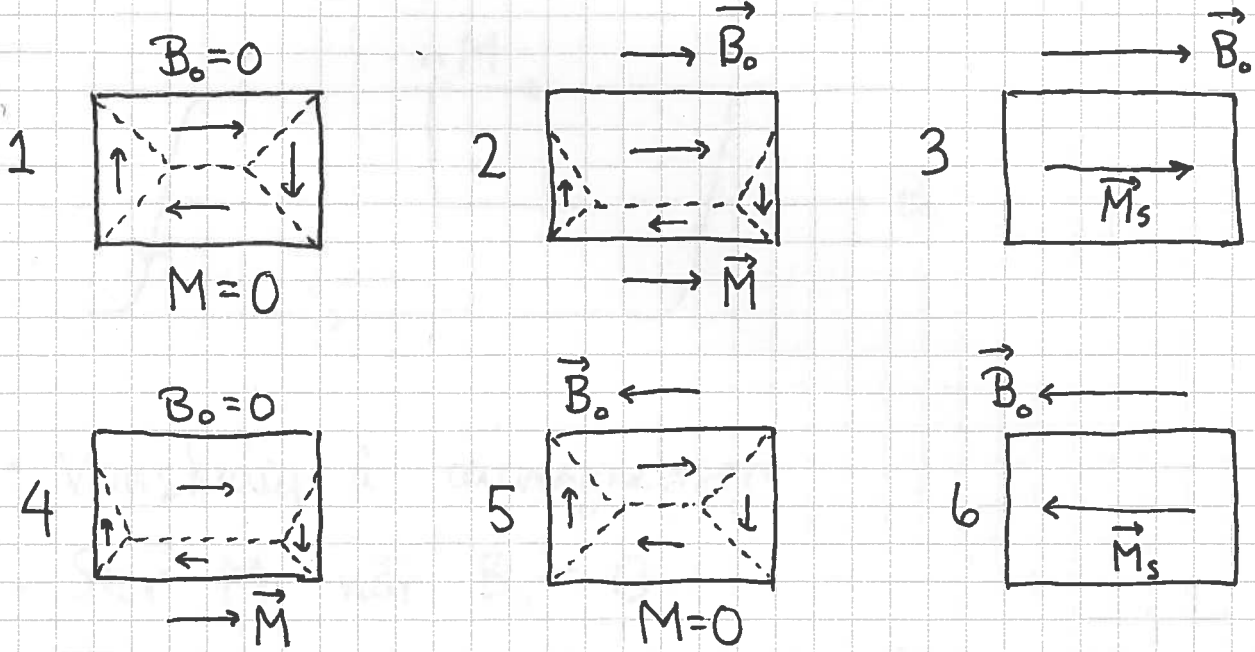


$B \approx 0$
utenfor

- Stor energi omkring magneten, $u_B = B^2/2\mu_0$
- Minimal vekselvirkningsenergi mellom atomere \vec{m}
- Eks: Neodymmagnet

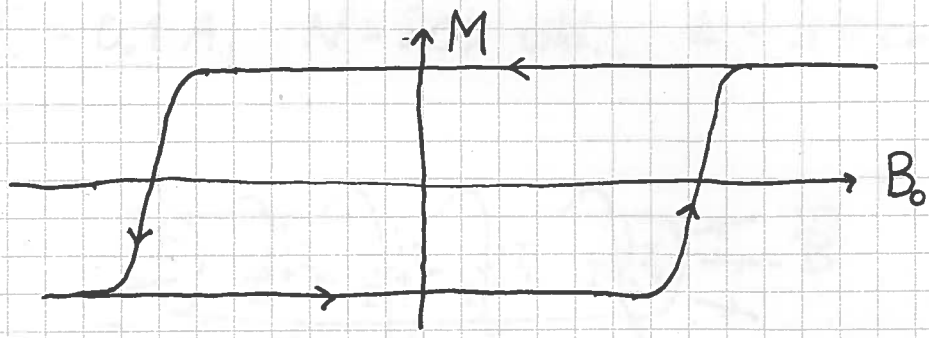
- Liten energi omkring ($B \approx 0$)
- Større v.v. energi nær domeneveggene (-----)
- Typisk domene-størrelse: $10^{-4} - 10^{-6}$ m
- Eks: Stål
- Magnetiseres i ytre felt \vec{B}_0

Magnetisk hysteresese:



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

Permanentmagnet ("hard magnet") :



- Vanskelig å avmagnetisere
- Stor M når $B_0 = 0$
- Egnet som kjerne i spole (i AC-kretser)

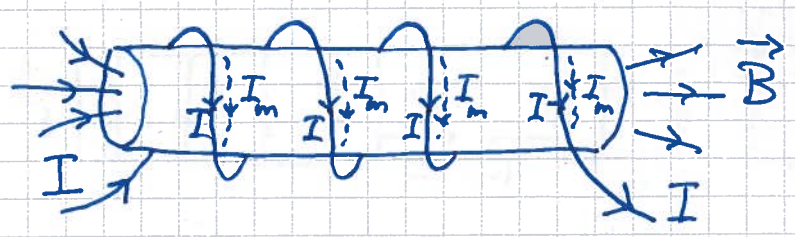
Stål ("bløt magnet") :



- Lett å (av-)magnetisere
- Liten M når $B_0 = 0$
- Egnet som kjerne i spole

Eks 1: B i spole med jernkjerne, $\mu_r = 1000$,

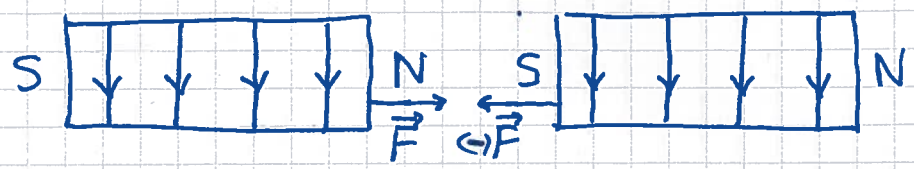
$I = 0.1 \text{ A}$, $N = 200$ vikl., $L = 40 \text{ cm}$



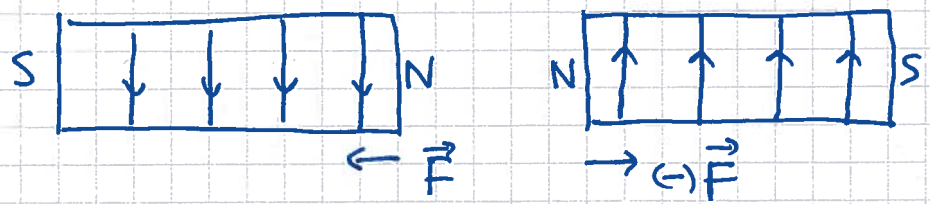
Spolestrøm $I \Rightarrow$ "ytrefelt" $\vec{B}_0 = \mu_0 n I$ inni spolen, der jernkjernen er. Jernet magnetiseres, med \vec{M} langs \vec{B}_0 . Overflatestrøm, I_m pr vikling, induseres. Magnetfeltet styrkes med faktor μ_r

$$\begin{aligned} \Rightarrow B &= \mu_r B_0 = \mu_r \mu_0 n I \quad (= \mu n I) \\ &= 1000 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{200}{0.40} \cdot 0.1 \text{ T} \\ &= 0.063 \text{ T} = \underline{\underline{63 \text{ mT}}} \end{aligned}$$

Eks 2: Tiltrekning mellom motsatte poler (N og S); frastøtning mellom like poler.



Parallele strømmer nærmest hverandre
 \Rightarrow Tiltrekning! (se s. 162)



Antiparallele strømmer nærmest hverandre
 \Rightarrow Frastøtning!