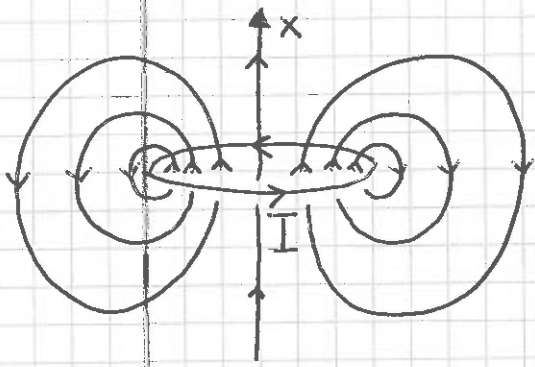


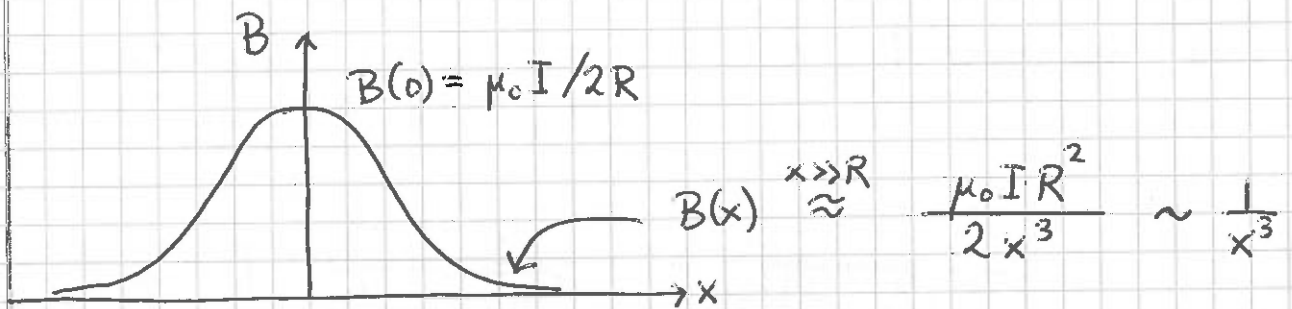
Eks 2: \vec{B} fra sirkulær strømsløyfe [YF 28.5; LHL 23.6] (102)



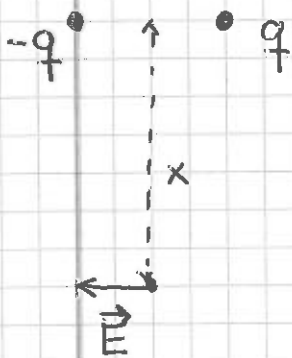
- strømsløyfe, strøm I , radius R , i yz -planet ($x=0$)
- nær lederen: \vec{B} omtrent som for lang rett leder
- på x -aksen: $\vec{B} \parallel \hat{x}$ pga symmetri

Biot-Savart gir [s 128B]

$$B(x) = \frac{\mu_0 I R^2}{2(x^2 + R^2)^{3/2}} \quad \text{på } x\text{-aksen (sløyfas akse)}$$

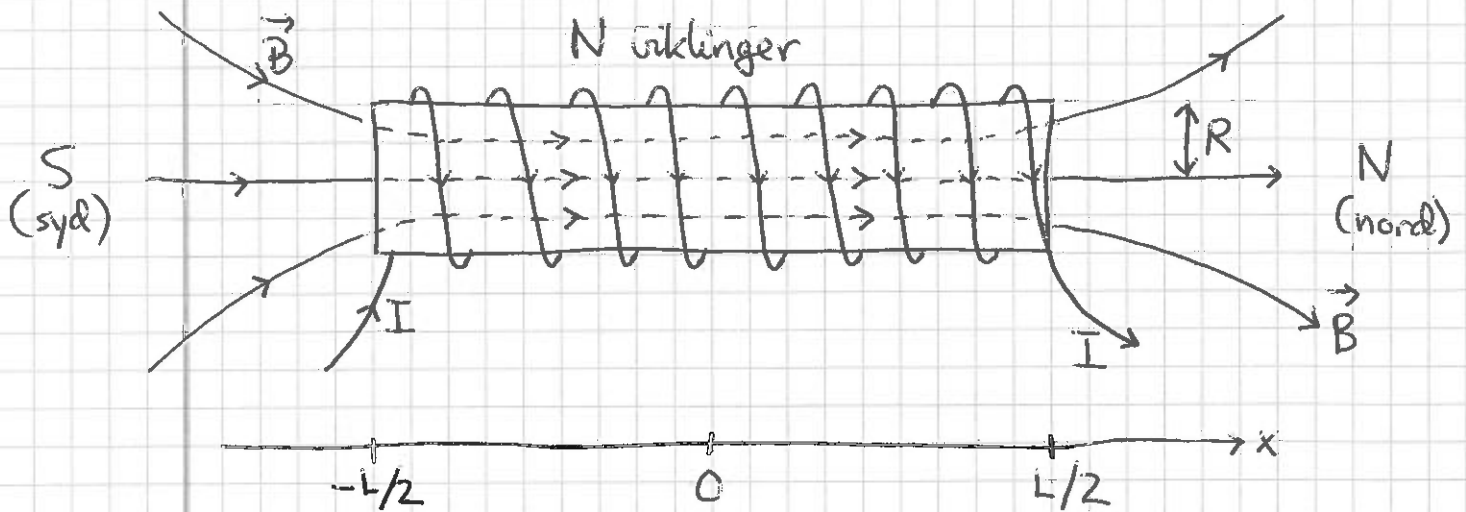


Fra før (s. 65):



- $E(x) \sim \frac{1}{x^3}$ langt unna elektrisk dipol.
- Den sirkulære strømsløyfa er en magnetisk dipol.

Eks 3: \vec{B} fra strømførende spole [YF 28.7; LHL 23.6] (103)



- $n = N/L =$ viklinger pr lengdeenhet (= vikingstetthet)
- tettliggende viklinger, slik at \vec{B} blir omtrent som for N sirkulære strømsløyfer jevnt fordelt på lengden L

Biot-Savart gir [s 129 B, C, D] for feltstyrken $B(x)$ på spolens akse (radius R):

$$B(x) = \frac{1}{2} \mu_0 n I \left\{ \frac{\frac{L}{2} - x}{\sqrt{(\frac{L}{2} - x)^2 + R^2}} + \frac{\frac{L}{2} + x}{\sqrt{(\frac{L}{2} + x)^2 + R^2}} \right\}$$

Hvis spolen er lang, dvs $L/2 \gg R$:

$$B \approx \frac{1}{2} \mu_0 n I \quad \text{nær spolens ender} \quad (x = \pm \frac{L}{2})$$

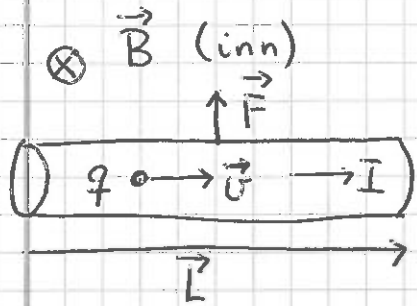
$$\boxed{B \approx \mu_0 n I} \quad \text{inne i spolen} \quad (|x| \ll \frac{L}{2})$$

$$B \approx 0 \quad \text{utenfor spolen}$$

Magnetisk kraft på strøm

[YF 27.6; LHL 23.2]

(104)



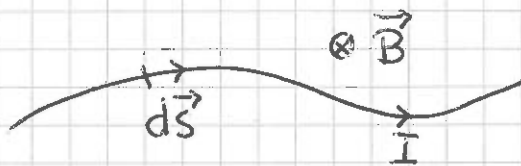
Lederbit med N frie ladninger q ,
driftshastighet \vec{v} , lengde \vec{L}

$$\Rightarrow \vec{F} = Nq\vec{v} \times \vec{B} \quad (\text{oppover})$$

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{Nq}{L/v} = \frac{1}{L} Nqv \Rightarrow Nqv = I\vec{L}$$

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

Generelt:



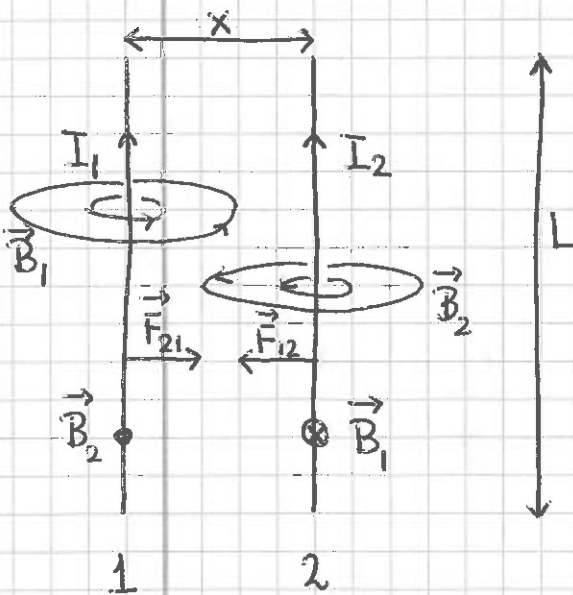
$$d\vec{F} = I d\vec{s} \times \vec{B}$$

\Rightarrow

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

(= total kraft på ledere)

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



Innbyrdes kraft på lengde L :

$$F_{12} = F_{21} = F$$

$$F = I_1 L B_2 = I_1 L \frac{\mu_0 I_2}{2\pi x}$$

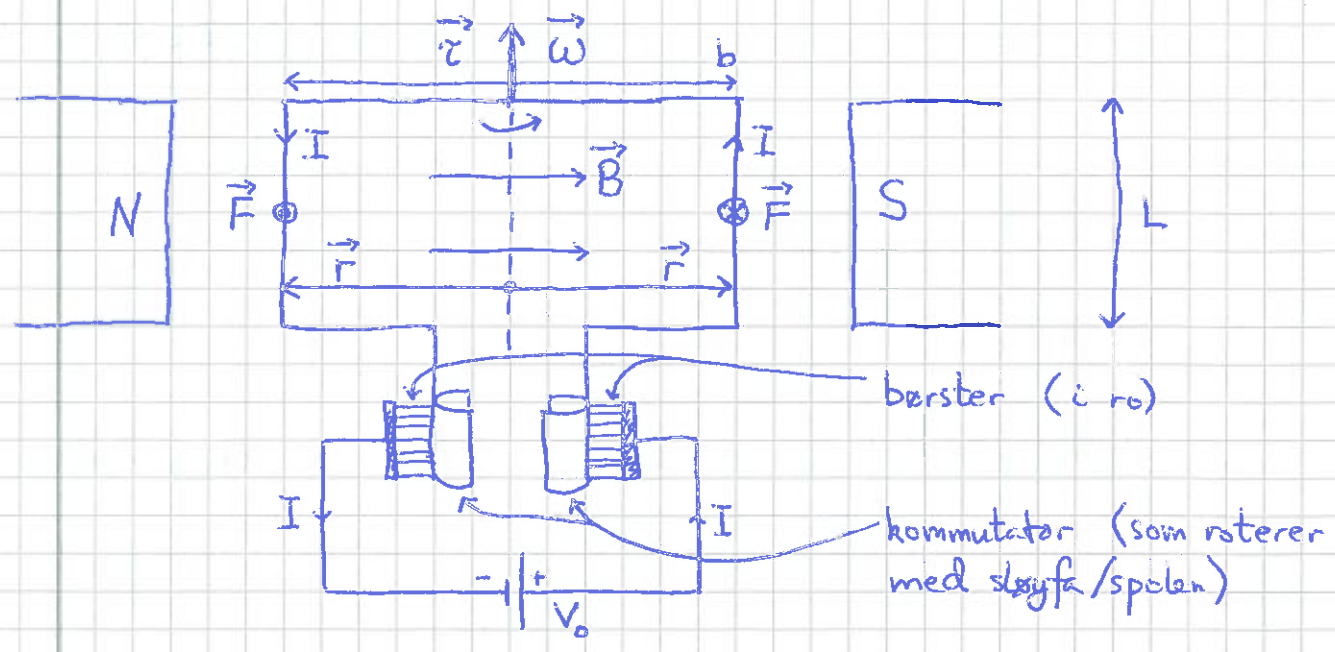
$$(\text{=} I_2 L B_1)$$

Kraft pr lengdeenhet:

$$f = F/L = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi x}$$

$I_1 \parallel I_2 \Rightarrow$ Tiltrekning ; $I_1 \parallel -I_2 \Rightarrow$ Frstøtning

Med $x = L = 1\text{m}$ og $I_1 = I_2 = 1\text{A}$ blir $F = 2 \cdot 10^{-7}\text{N} = 0,20 \mu\text{N}$



Dreiemoment på strømsløyfa (evt: pr vikling av en spole)

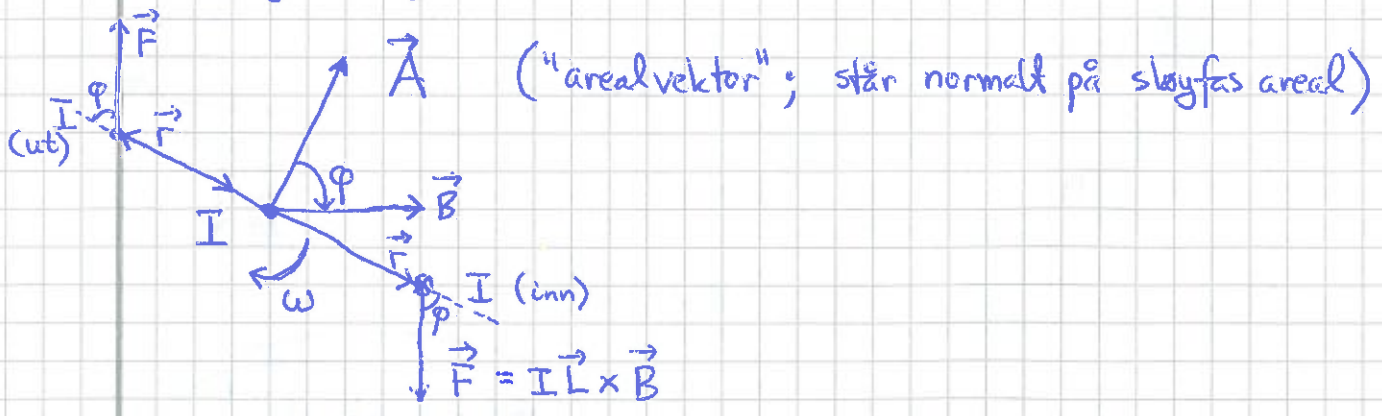
$$\tau = |\vec{\tau}| = \left| \sum_i \vec{r}_i \times \vec{F}_i \right| = 2 \cdot \frac{b}{2} \cdot ILB \cdot \sin \varphi$$

[φ = vinkel mellom \vec{r} og \vec{F} ; $\varphi = 90^\circ$ i figuren]

$$\Rightarrow \tau = IA \cdot B \cdot \sin \varphi ; \quad A = bL = \text{omsluttet areal}$$

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

Sett med langs rotasjonsakseni:

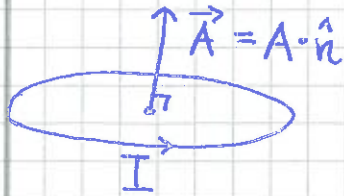


Kommutatoren sørger for strømretning i sløyfa/spolen slik at $\vec{\tau}$ hele tiden peker i samme retning.

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

(106)

ei strømsløyfe er en magnetisk dipol:



- \hat{n} er enhetsvektor \perp omsluttet areal
- A = omsluttet areal
- fortegn på \vec{A} med h.h. regel

strømsløyfas magnetiske dipolmoment:

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

$$[m] = A \cdot m^2 = \frac{N \cdot m}{T} = \frac{J}{T} \quad (\text{sidan } [\tau] = [IAB] = [mB])$$

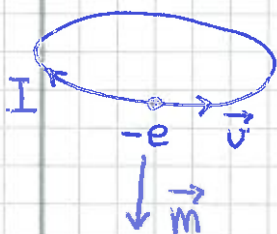
[Generelle definisjoner av dipolmoment:

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

$$\vec{p} = \int \vec{r} \rho dV; \quad \rho = \text{ledningstetthet}; \quad \text{--- " " ---}]$$

Eksempler på små og store magnetiske dipoler:

Eks 1: Atom med 1 elektron i sirkulær bane, $r = 1 \text{ \AA}$, $v = 10^6 \text{ m/s}$.



$$m = IA = \frac{e}{T} \cdot \pi r^2; \quad T = \frac{2\pi r}{v}$$

$$\Rightarrow m = \frac{evr}{2} = \frac{1}{2} \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^6 \cdot 10^{-10} \text{ Am}^2 \\ = \underline{8 \cdot 10^{-24} \text{ Am}^2} \quad (\text{evt. J/T})$$

Kvantemekanikk gir at elektronet har et spinn

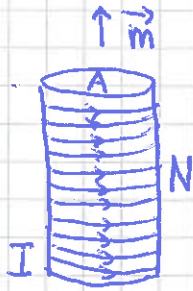
("indre dreieimpuls") som tilsvarer et magnetisk

dipolmoment $\mu_B = e \cdot h / 4\pi m_e \approx 9.274 \cdot 10^{-24} \text{ J/T}$,

et såkalt Bohr magneton. (h = Plancks konstant)

Eks 2: Spole med $N = 100$ viklinger, strøm $I = 1\text{ A}$,
 tværsnitt $A = 10\text{ cm}^2$.

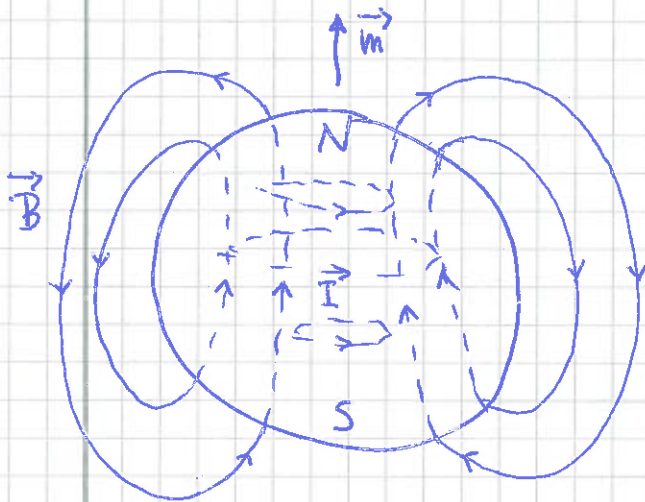
(107)



$$m = N \cdot IA = 100 \cdot 1 \cdot \pi \cdot 10 \cdot 10^{-4} \text{ Am}^2$$

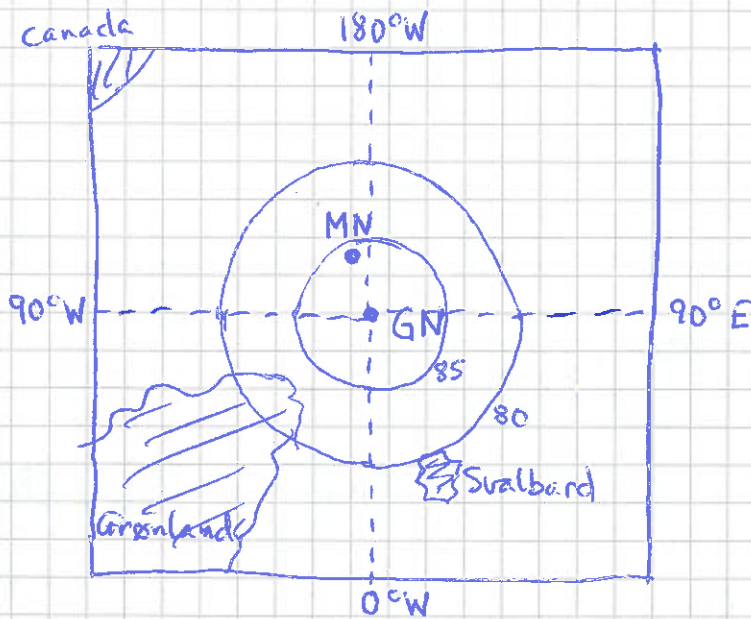
$$\approx \underline{0.3 \text{ Am}^2}$$

Eks 3: Jorda



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

(tilsværer (f.eks.)
 strømsløjfe med
 $I = 2 \cdot 10^{10} \text{ A}$ og $A = 4 \cdot 10^{12} \text{ m}^2$)



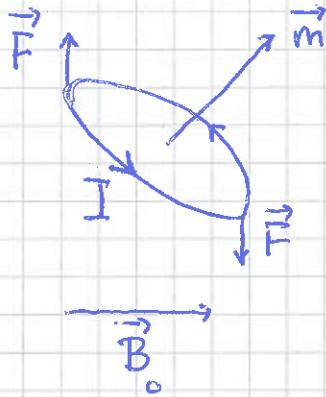
GN: geografisk nordpol (90°N)

MN (2016): magnetisk nordpol (86.4°N , 166.3°W)

(2001: 81.3°N , 110.8°W)

Materialers magnetiske egenskaper; magnetisme
[Jf. isolatorers dielektriske egenskaper s. 79-80]

Fra Eks 1 s. 106: Atomære magnetiske dipoler med dipolmoment \vec{m} kan rettes inn langs ytre felt \vec{B}_0 (jf. DC-motor s. 105):



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

(se Øving 13; jf. øving 9 for elektrisk dipol,

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

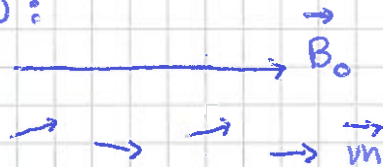
⇒ Materialer kan magnetiseres i et ytre felt \vec{B}_0 :

$B_0 = 0$:



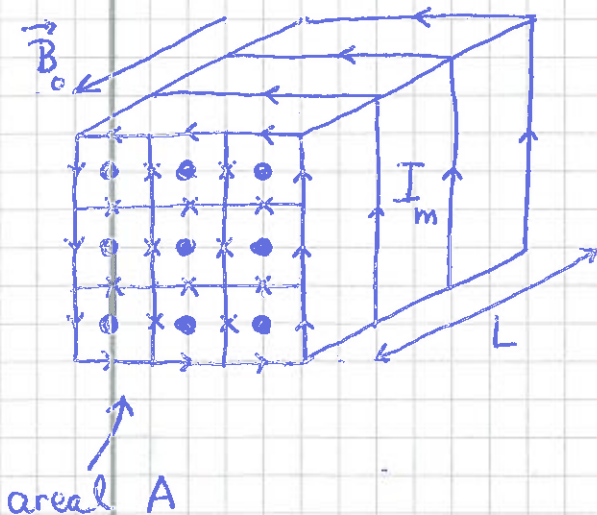
$\sum_i \vec{m}_i \approx 0$

$\vec{B}_0 \neq 0$:



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

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



- innretting av atomære \vec{m} langs \vec{B}_0 ; bundet strøm i hvert atom
- alle indre strømmer kansellerer (x)
- induert overflatestrøm I_m , pr lengdeenhet $i_m = I_m/L$
- materialet blir som en spole!
- magnetfeltet styrkes i materialet,
 $\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_m$

Stoffets relative permeabilitet μ_r defineres ved

$$B = \mu_r B_0$$

Jf $E = \frac{1}{\epsilon_r} E_0$ for dielektrikum (s. 80)

Stoff	Stoffets permeabilitet $\mu = \mu_r \mu_0$	Type magnetisme
Vakuum	μ_0	—
Luft	$1.0000004 \mu_0$	Paramagnet
Aluminium	$1.00002 \mu_0$	— " —
Rent jern	$5000 \mu_0$	Ferromagnet
Kobber	$0.999994 \mu_0$	Diamagnet
Vann	$0.999992 \mu_0$	— " —

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

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

Bare målbart hvis $\vec{m} = 0$ i null ytre felt.

Ferromagnetisme: Vekselvirkende atomære \vec{m} , lavest energi

når "alle" \vec{m} peker samme vei: ... $\uparrow \uparrow \uparrow \uparrow \uparrow \uparrow \dots$

Dette skjer i magneter (Fe, Ni, Co, ...).

Tilsvarende i ferroelektriske materialer: Spontan innretting

av elektriske dipoler: ... $\uparrow \uparrow \uparrow \uparrow \dots$

(BaTiO_3 , PbTiO_3)

Eks: Bestem B inni spole med 1000 viklinger p \grave{a} lengde 25 cm, fylt med jern med $\mu_r = 2000$, strøm 1 A i spoletråden.

Løsning: $B = \mu n I = \mu_r \mu_0 \frac{N}{L} I = 2000 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{1000}{0.25} \cdot 1 \text{ T} \approx \underline{\underline{10 \text{ T}}}$