Institutt for fysikk, NTNU
TFY4155/FY1003: Elektrisitet og magnetisme
Vår 2007, uke17

Mandag 23. april

Magnetisk fluks og Gauss' lov for $\boldsymbol{B}$
[FGT 29.2; YF 27.3; TM 28.1, 27.3; AF 26.3; LHL 23.7; DJG 5.3]

Magnetisk fluks ϕ_B gjennom flate S:

$$\phi_B = \int_S \boldsymbol{B} \cdot d\boldsymbol{A}$$

Magnetfeltstyrken B er proporsjonal med antall magnetiske feltlinjer pr flateenhet. Dermed blir den magnetiske fluksen ϕ_B proporsjonal med antall feltlinjer gjennom flaten. (Sammenlign med elektrisk fluks!)

Siden magnetiske feltlinjer alltid er *lukkede*, får vi Gauss' lov for magnetfeltet:

$$\oint \boldsymbol{B} \cdot d\boldsymbol{A} = 0$$

for lukket flate. Uttrykker at det ikke finnes magnetiske monopoler.

Oppsummering, elektrostatikk og magnetostatikk: Maxwells ligninger

Gauss' lov for elektrostatisk felt:

$$\oint \boldsymbol{E} \cdot d\boldsymbol{A} = q_{\text{in}}/\varepsilon_0$$

Elektrostatisk felt er konservativt:

$$\oint \boldsymbol{E} \cdot d\boldsymbol{l} = 0$$

Gauss' lov for magnetfelt:

$$\oint \boldsymbol{B} \cdot d\boldsymbol{A} = 0$$

Amperes lov:

$$\oint \boldsymbol{B} \cdot d\boldsymbol{l} = \mu_0 I_{\text{in}}$$

Med gitte "kilder", dvs statiske ladninger og stasjonære strømmer, gir dette oppskriften på beregning av $\boldsymbol{E}$ og $\boldsymbol{B}$.

Lorentzkraften,

$$\boldsymbol{F} = q\boldsymbol{E} + q\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B}$$

bestemmer deretter hvordan en ladning q med hastighet $\boldsymbol{v}$ vil bevege seg i feltene $\boldsymbol{E}$ og $\boldsymbol{B}$

Magnetisme
[FGT 31.1 - 31.4; YF 28.8; TM 27.5; AF 26.3; LHL 26.1 - 26.5; DJG 6.4]

(Ferromagnetisme forelest tirsdag 24.04.07)

- Paramagnetisme: I materiale med atomære magnetiske dipolmoment $\boldsymbol{m} \neq 0$ rettes $\boldsymbol{m}$ inn langs det påtrykte magnetfeltet $\boldsymbol{B}$, analogt en elektrisk dipol som rettes inn langs et påtrykt elektrisk felt $\boldsymbol{E}$.
- Diamagnetisme: Det påtrykte feltet $\boldsymbol{B}$ påvirker elektronets banebevegelse slik at vi får indusert en endring $\Delta \boldsymbol{m}$ i magnetisk dipolmoment med motsatt retning av $\boldsymbol{B}$. Har en slik diamagnetisk respons i alle atomer, men da den er svak, observeres den typisk bare i materialer med null permanent atomært magnetisk dipolmoment.
- Ferromagnetisme: Har *vekselvirkende* atomære magnetiske dipolmoment på naboatomer, slik at det blir energetisk foretrukket med en bestemt orientering av de ulike $\boldsymbol{m}$. Ferromagnet: Parallelle $\boldsymbol{m}$ foretrekkes. Antiferromagnet: Antiparallelle $\boldsymbol{m}$ foretrekkes.

Magnetiske domener: Inne i et ferromagnetisk materiale kan vi ha områder som er små i forhold til en typisk makroskopisk lengdeskala men store i forhold til atomær lengdeskala, og der alle atomer har magnetisk dipolmoment pekende i samme retning. Ett slik *domene* vil dermed være en liten magnet. Men hvis vårt makroskopiske stykke ferromagnetisk materiale består av mange slike domener, der ulike domener har de magnetiske dipolene pekende i ulike retninger, vil magnetfeltet omkring bli omtrent lik null, dvs materialet vårt er alt i alt *ikke* en magnet. En kniv av stål er et slik eksempel. I en stavmagnet, derimot, har vi (essensielt) ett magnetisk domene der alle dipoler peker i samme retning. Dermed får vi et betydelig magnetfelt i rommet omkring stavmagneten, dvs vi har en magnet!

Tirsdag 24. april

Magnetisering og overflatestrøm
[FGT 31.1; YF 28.8; TM 27.5; AF 26.5; LHL 26.1; DJG 6.3]

Magnetisering $\boldsymbol{M}$ er, pr definisjon, magnetisk dipolmoment pr volumenhet:

$$\boldsymbol{M} = \frac{\Delta \boldsymbol{m}}{\Delta V}$$

dersom vi har et netto magnetisk dipolmoment $\Delta \boldsymbol{m}$ i volumet ΔV.

Magnetisering tilsvarer atomære strømsløyfer med strømmen i samme retning. Alle indre strømmer vil dermed kansellere, slik at nettoeffekten av magnetisering i et objekt er en *overflatestrøm*. Sammenlign med polarisering i dielektriske medier, der nettoeffekten av elektrisk polarisering er en *overflateladning*.
I tallverdi er

$$M = i_m$$

der i_m er overflatestrømmen pr lengdeenhet (dvs: der "lengden" er i retning langs $\boldsymbol{M}$).
På vektorform kan dette skrives

$$\boldsymbol{i}_m = \boldsymbol{M} \times \hat{n}$$

der $\hat{n}$ er en enhetsvektor som står normalt på overflaten der i_m går (samt normalt på $\boldsymbol{M}$).

H-feltet

[FGT 31.1; YF 28.8; TM 27.5; AF 26.6; LHL 26.1; DJG 6.3]

Definisjon:

$$\boldsymbol{H} = \frac{1}{\mu_0}\boldsymbol{B} - \boldsymbol{M}$$

Dvs:

$$\boldsymbol{B} = \mu_0 \boldsymbol{H} + \mu_0 \boldsymbol{M}$$

For uendelig lang spole fylt med magnetiserbart materiale viste vi da at

$$H = nI_f$$

der n er viklingstettheten på spolen og I_f er "fri", påtrykt strøm, dvs strømmen i spoletråden. Med andre ord: Slik H-feltet er definert, er det direkte gitt ved den påtrykte strømmen I_f.
Det *totale* magnetfeltet $\boldsymbol{B}$, derimot, er bestemt av *total* strøm, dvs summen av fri strøm I_f og bundet magnetiseringsstrøm I_m (pr vikling, slik at magnetiseringsstrøm pr lengdeenhet blir nI_m).

På samme måte som vi hadde Gauss' lov for den elektriske forskyvningen $\boldsymbol{D}$, uttrykt ved *fri ladning*, har vi Amperes lov for $\boldsymbol{H}$ uttrykt ved *fri strøm*:

$$\oint \boldsymbol{H} \cdot d\boldsymbol{l} = I_{\text{fri}}^{\text{in}}$$

Altså: Kurveintegralet av $\boldsymbol{H}$ rundt en lukket kurve er lik netto *fri* stasjonær strøm (dvs strøm som ikke er forårsaket av magnetisering) $I_{\text{fri}}^{\text{in}}$ som er omsluttet av den lukkede kurven.

Magnetisk susceptibilitet og permeabilitet

[FGT 31.1; YF 28.8; TM 27.5, AF 26.7; LHL 26.1; DJG 6.4.1]

Dersom magnetiseringen er proporsjonal med det påtrykte feltet, kan vi skrive

$$\boldsymbol{M} = \chi_m \boldsymbol{H}$$

Her er χ_m magnetisk susceptibilitet. Dermed, ut fra sammenhengen mellom $\boldsymbol{B}$, $\boldsymbol{H}$ og $\boldsymbol{M}$:

$$\boldsymbol{B} = \mu_0(\boldsymbol{H} + \boldsymbol{M}) = \mu_0(1 + \chi_m)\boldsymbol{H} = \mu_0\mu_r\boldsymbol{H} = \mu\boldsymbol{H}$$

Her er $\mu_r = 1 + \chi_m$ relativ permeabilitet mens μ er mediets permeabilitet. (Jfr lineær respons i dielektriske medier!)

Noen typiske tallverdier:
Diamagneter: $\chi_m \sim -10^{-5}$ til -10^{-4}
Paramagneter: $\chi_m \sim 10^{-4}$ til 10^{-3}
Ferromagneter: $\chi_m \sim 10^{3}$ til 10^{4} (eller mer)

Dette betyr at det bare er ferromagnetiske materialer (Fe, Co, Ni...) som "reagerer noe særlig" på et ytre magnetfelt.