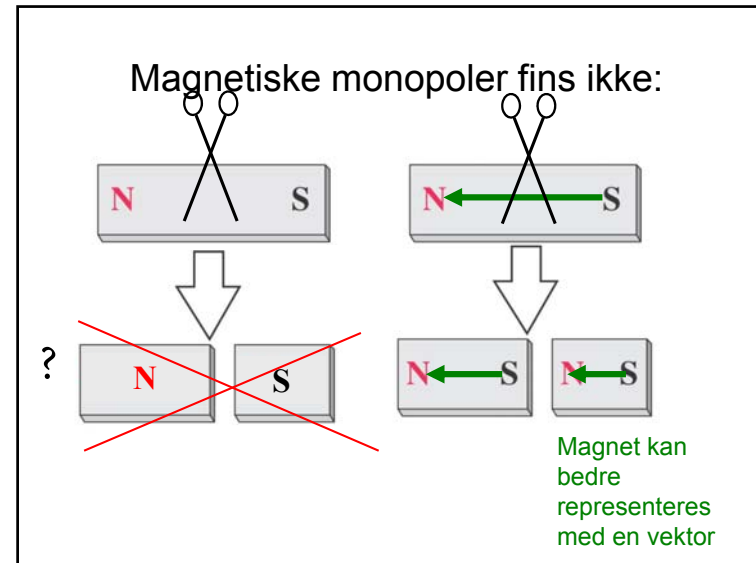


## Kap. 27 Magnetisk felt og magnetiske krefter

### Kortfatta målsetning:

- Lære at permanente magneter og elektromagneter har samme årsak:
  - ladninger i bevegelse / strømsløyfer
- Formelapparatet i magnetostatikk, analogt til det i elektrostatikk
- Forstå at magnetiske monopoler ikke fins, kun dipoler.
  - (mens elektriske monopoler fins, dvs.  $+q$ ,  $-q$ )



## Kap. 27 Kjapp historie



- 1000 f.Kr.: Kompass brukt i Kina og i Mexico
- 800 f.Kr.: Magnetisk materiale i Magnesia i Hellas  
Magnetitt:  $\text{Fe}_3\text{O}_4$
- 1270: Nord- og sydpol
- 1600: Jordmagnetisme beskrives
- 1750: Magnetisk kraft prop. med  $1/r^2$
- 1819-25: Vitenskapelig arbeid:  
*Hans Christian Ørsted, André Ampere, Jean Baptist Biot, Felix Savart, Michael Faraday, Joseph Henry*
- 1864: Systematisering av teorien  
v/*James Clerk Maxwell.*

## Kap. 27 Magnetisme

- **Magnetostatikk** (ingen tidsvariasjon):
  - Kap 27. Magnetiske krefter
  - Kap 28: Magnetiske kilder
- **Elektrodynamikk:**
  - Kap 29-32:
  - Tidsvariasjon: Induksjon mm.

### Kraft på ledningsbit

$$d\mathbf{F} = I \, ds \times \mathbf{B}$$

"bit"  
= infinitesimalt  
strømelement  
=  $I \, ds$

Copyright © 2004 Pearson Education, Inc., publishing as Addison Wesley  
(Fig 27.25)

### Gauss' lov for magnetfelt:

Nettofluks ut av lukka flate =  $\Phi_B = \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0$   
ALLTID

⇔ Feltlinjer er lukka kurver

⇔ Magnetiske monopoler  
fins ikke:

### Kap. 27: Magnetisk felt og magnetiske krefter

$\mathbf{F}_B = q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$  (27.2)  
(magnetisk flukstetthet  $\mathbf{B}$  defineres fra denne kraftvirkningen)

Lorentzkrafta = elektrisk kraft + magnetisk kraft:

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_E + \mathbf{F}_B = q\mathbf{E} + q\mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (27.4)$$

(i ro og i bevegelse)      (i bevegelse)

$\mathbf{E}$  kan øke farten (og energien).  
 $\mathbf{B}$  kan kun endre retningen for  $\mathbf{v}$ , ikke energien, fordi  $\mathbf{F}_B \perp \mathbf{v}$

- Kraft på lederbit med lengde  $ds$ :  $d\mathbf{F} = I \, ds \times \mathbf{B}$
- Magnetiske feltlinjer
- Magnetisk fluks:  $\Phi_B = \iint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}$
- Gauss lov for  $\mathbf{B}$ -feltet  $\Phi_B = \iint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0 \Leftrightarrow$  magn. monopoler finnes ikke
- Bevegelser av ladninger i  $\mathbf{B}$  og  $\mathbf{E}$ -felt, med eksempler/anvendelser:
  - Hastighetsfilter
  - Thomsons  $e/m$ -eksperiment
  - Massespektrometer
- Kraftmoment på strømsløyfe
- Magnetisk moment  $\boldsymbol{\mu} = I \cdot \mathbf{A}$

} Idag

### Alle magnetiske feltlinjer er lukka kurver:

(a) Magnetic field lines through the center of a permanent magnet

(b) Magnetic field lines through the center of a cylindrical current-carrying coil

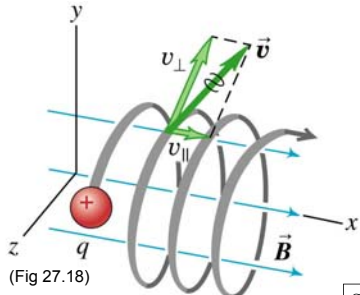
(c) Magnetic field lines through the center of an iron-core electromagnet

(d) Magnetic field lines in a plane containing the axis of a circular current-carrying loop

(e) Magnetic field lines in a plane perpendicular to a long, straight, current-carrying wire

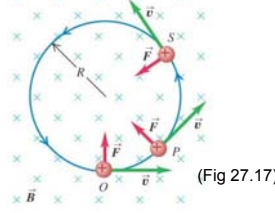
(f) Magnetic field lines in a plane containing a long, straight, current-carrying wire

### Heliksformet bane pga. Lorentzkrafta $F = (qE +) qv \times B$



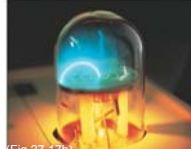
(Fig 27.18)

Sett langs x-akse:



(Fig 27.17)

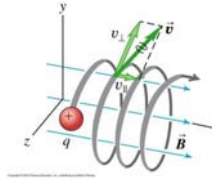
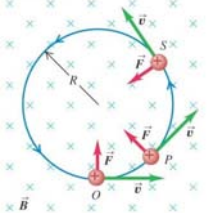
Syklotronradius:  $R = mv_{0z}/qB$  (27.11)  
 Syklotronfrekvens:  $\omega = qB/m$  (27.12)  
 Syklotronperiode:  $T = 2\pi / \omega$



(Fig 27.17b)

Elektronstråle i magnetisk felt  
Laboppgave 3

### Heliksformet bane. Typiske tallstørrelser (Ex. 27.4)

**Oppgitte data:**  
 Proton:  $B_x = 0,50 \text{ T}$   
 $q = +e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$   $v_{0x} = 1,5 \cdot 10^5 \text{ m/s}$   
 $m = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$   $v_{0z} = 2,0 \cdot 10^5 \text{ m/s}$


Finn:

- Syklotronradius  $R$
- Syklotronfrekvens  $\omega$
- Heliksens stigning ( $\Delta x$  per omdreining)

a) Syklotronradius (27.11):  $R = mv_{0z}/qB_x = 4,2 \text{ mm}$   
 b) Frekvens (27.12):  $\omega = v_{0z}/R (= qB_x/m) = 4,8 \cdot 10^7 \text{ s}^{-1}$ ,  
 dvs. periode  $T = 2\pi/\omega = 1,3 \cdot 10^{-7} \text{ s}$   
 c)  $\Delta x = v_{0x}T = 20 \text{ mm}$  per periode  $T$

**Kraft og aks.:**  
 $F = |F| = qv_{0z}B_x = 1,6 \cdot 10^{-14} \text{ N}$   
 Aksel =  $a = F/m = 9,6 \cdot 10^{12} \text{ m/s}^2$

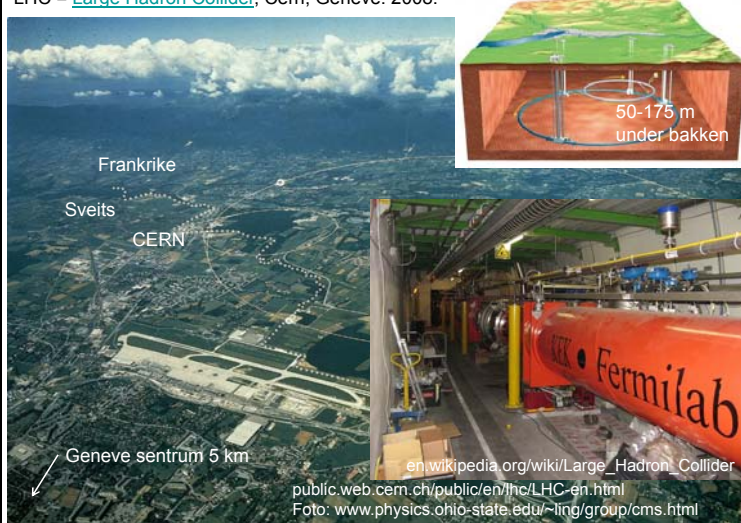
### ESRF (European Synchrotron Radiation Facility) Grenoble, Frankrike.



$R = 134,3 \text{ m}$

Storage Ring  
Accelerators  
Experimental Hall

### LHC = Large Hadron Collider, Cern, Geneve. 2008.

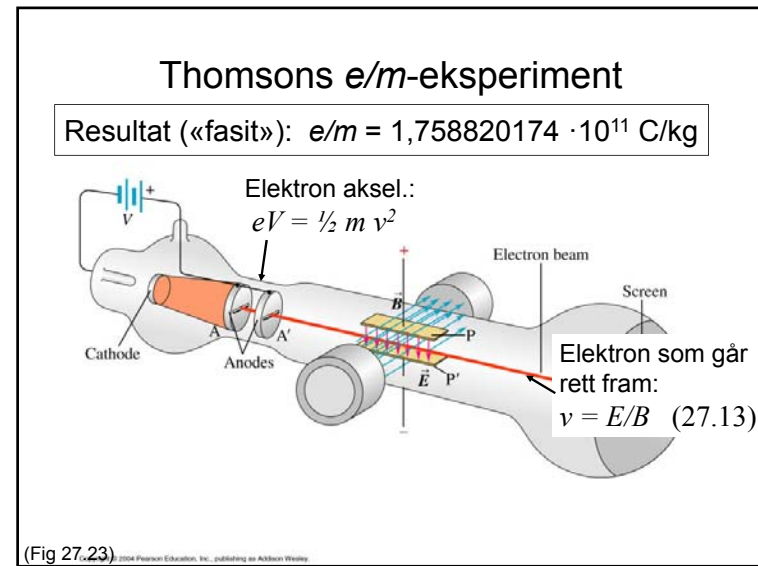
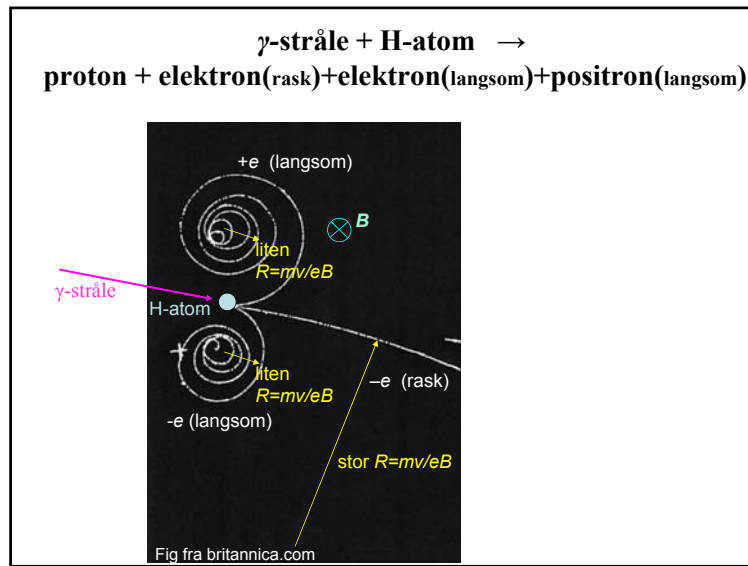
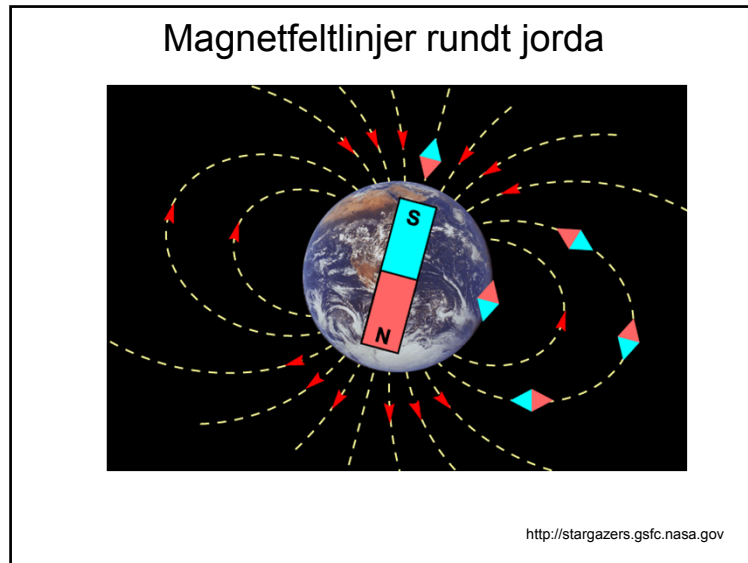


50-175 m  
under bakken

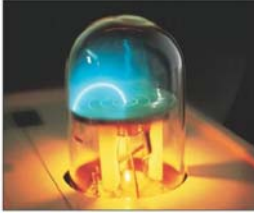
Frankrike  
Sveits  
CERN

Geneve sentrum 5 km

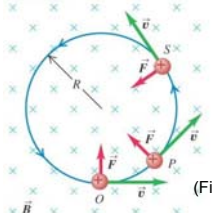
en.wikipedia.org/wiki/Large\_Hadron\_Collider  
 public.web.cern.ch/public/en/lhc/LHC-en.html  
 Foto: www.physics.ohio-state.edu/~ling/group/cms.html



### Laboppgave 3: Lorenz-krafta: Bestemmelse $e/m$ for elektroner



(Fig 27.18)



(Fig 27.17)

Måler syklotromradius  $R$  med linjal

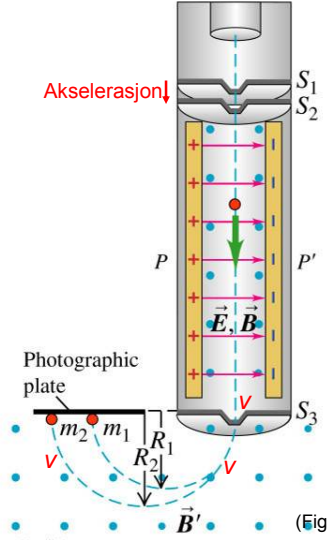
$$R = mv_0/qB \quad (27.11) \quad \text{og} \quad eV = \frac{1}{2} m v_0^2$$

$\Rightarrow$

$$e/m = 2V/(R^2 B^2)$$

### Masse- spektrometer = hastighetsfilter + sirkelbaner for IONER

(Øving 9, opg. 3)

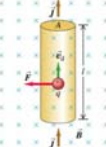


(Fig 27.24)

Copyright © 2004 Pearson Education, Inc., publishing as Addison Wesley.

## 27.2 Kraft og moment på strømsløyfe

- Kraft på lederbit med lengde  $ds$ :
 
$$d\mathbf{F} = I ds \times \mathbf{B} \quad (27.20)$$
- Kraft på ledning i homogent felt:
 
$$\mathbf{F} = I \mathbf{l} \times \mathbf{B} \quad (27.19)$$

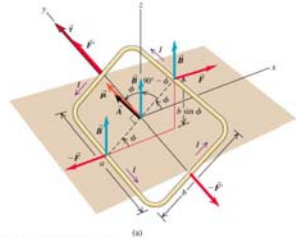


Fra Angell og Lian:

Koherente SI-enheter med egne symboler			
Symbol	Navn (uttale)	Definisjon	Enhet for
A	ampere (ampær)	s. II	elektrisk strøm
Bq	becquerel (bekkrell)	Bq = s <sup>-1</sup>	radioaktivitet
C	coulomb (kuldm)	C = As	elektrisk ladning
cd	candela (kandela)	s. II	lysstyrke
F	farad	F = C/V = A <sup>2</sup> s <sup>4</sup> /(kg m <sup>2</sup> )	kapasitans
Gy	gray (grei)	Gy = J/kg = m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	absorbert dose
H	henry	H = Vs/A = Wb/A = kg m <sup>2</sup> /(s <sup>2</sup> A <sup>2</sup> )	induktans
Hz	hertz	Hz = s <sup>-1</sup>	frekvens
J	joule (jul)	J = Nm = Ws = kg m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	energi
K	kelvin (kellvinn)	s. II	termodynamisk temperatur
kg	kilogram	s. II	masse
lm	lumen	lm = cd sr	lysluks
lx	lux	lx = lm/m <sup>2</sup> = cd sr/m <sup>2</sup>	betykning
m	meter	s. II	lengde
mol	mol	s. II	stoffmengde
N	newton (njutin)	N = kg m/s <sup>2</sup>	kraft
Pa	pascal (paskall)	Pa = N/m <sup>2</sup> = kg/(m s <sup>2</sup> )	trykk, spenning
rad	radian (radium)	rad = m/m = 1	vinkel
S	siemens (simens)	S = A/V = Ω <sup>-1</sup> = s <sup>4</sup> A <sup>2</sup> /(kg m <sup>2</sup> )	konduktans
Sv	sievert (sivert)	Sv = J/kg = m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	doseekvivalent
s	sekund	s. II	tid
sr	steradian	sr = m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> = 1	retningvinkel
T	tesla (tesla)	T = Wb/m <sup>2</sup> = kg/(s <sup>2</sup> A)	magnetisk flukstetthet
V	volt	V = W/A = J/C = kg m <sup>2</sup> /(s <sup>2</sup> A)	elektrisk potensial
W	watt (vatt)	W = J/s = kg m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup>	effekt
Wb	weber (veber)	Wb = Vs = kg m <sup>2</sup> /(s <sup>2</sup> A)	magnetisk fluks
Ω	ohm (om)	Ω = V/A = S <sup>-1</sup> = kg m <sup>2</sup> /(s <sup>3</sup> A <sup>2</sup> )	resistans
1	en	1	antall, forholdet mellom to

Siste = ved grunnenheter

### Kraft og kraftmoment på rektangulær ledersløyfe



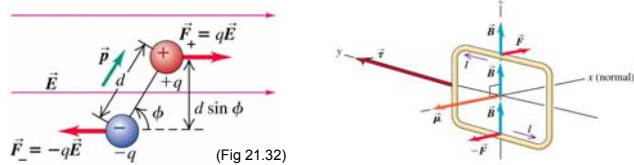
Nettokraft:  
 $\Sigma \mathbf{F} = \mathbf{0}$

Kraftmoment:  
 $\tau = I a b B \sin \Phi = \mu B \sin \Phi$   
 der magnetisk moment:  
 $\mu = I \cdot (\text{areal}) = I \cdot ab$

Med vektorer:  
 $\tau = \mu \times \mathbf{B}$   
 der  $\mu = I \cdot \mathbf{A}$

(Fig 27.31)

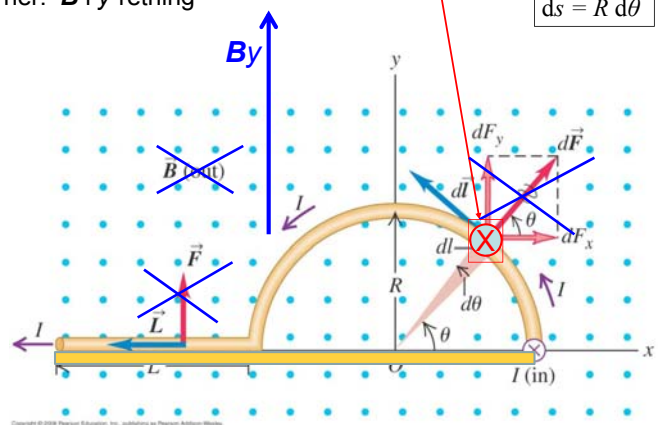
### Analogi mellom elektrisk dipol $\mathbf{p}$ og magnetisk dipol $\mu$



<p>Kraft <math>\mathbf{F} = q \mathbf{E}</math></p> <p>Kraftmoment <math>\tau = \mathbf{p} \times \mathbf{E}</math></p> <p>Pot.energi <math>U = -\mathbf{p} \cdot \mathbf{E}</math></p> <p><math>\mathbf{p}</math> søker seg paral. med <math>\mathbf{E}</math> (lavest energi)</p>	<p>Kraft <math>\mathbf{F} = I \mathbf{l} \times \mathbf{B}</math></p> <p>Kraftmoment <math>\tau = \mu \times \mathbf{B}</math></p> <p>Pot.energi <math>U = -\mu \cdot \mathbf{B}</math></p> <p><math>\mu</math> søker seg paral. med <math>\mathbf{B}</math> (lavest energi)</p>
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Ser dere at en magnetisk MONOPOL er utenkelig ?

Eks. 2 Halvsirkel.  
 Y&F Ex. 27.8:  $\mathbf{B}$  normalt papirplan  
 her:  $\mathbf{B}$  i y-retning



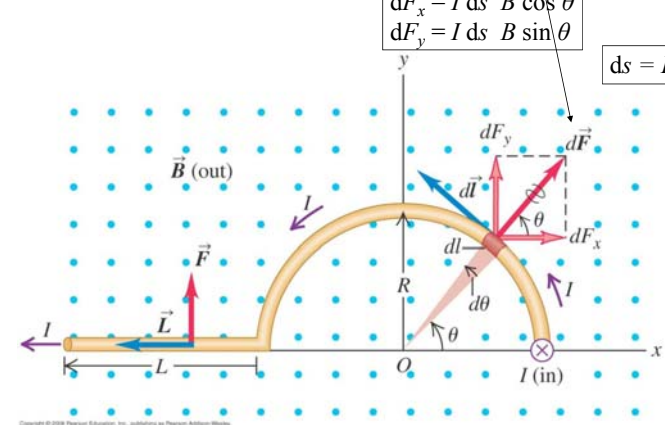
$$d\mathbf{F} = I ds \times \mathbf{B}$$

$$\Rightarrow dF_z = -I ds B \sin \theta$$

$$ds = R d\theta$$

Figure 27.30

Eks. 2 Halvsirkel:  $\mathbf{B}$  i y-retning  
 Y&F Ex. 27.8:  $\mathbf{B}$  normalt papirplan



$$d\mathbf{F} = I ds \times \mathbf{B}$$

$$ds \perp \mathbf{B}$$

$$dF_x = I ds B \cos \theta$$

$$dF_y = I ds B \sin \theta$$

$$ds = R d\theta$$

Figure 27.30

Strømsløyfe innrettes i et magnetisk felt, slik vil også magnet (f.eks. kompassnål) innrettes i et magnetisk felt

Magnetisk moment  $\mu$  innrettes langs  $B$

(Fig 27.37)

Copyright © 2004 Pearson Education, Inc., publishing as Addison Wesley.

Homogent magnetfelt: Dreiemoment  $\tau$ , men ingen nettokraft (translasjonskraft)

Inhomogent magnetfelt: Nettokraft på strømsløyfe  $\neq 0$ :

(Fig 27.36)

Jern tiltrekkes både S-pol og N-pol. Feltet må være inhomogent.

P.g.a. induert  $\mu$  parallellt med  $B$

(Fig 27.38)

Copyright © 2004 Pearson Education, Inc., publishing as Pearson Addison Wesley.

### 27.8. Likestrømmotor (DC-motor)

$\mu$  dreies mot  $B$   
Maks. dreiemoment  $\tau$

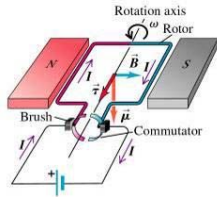

$\mu \parallel B$   
Null dreiemoment  $\tau$  (flyter på tregheten).  
Strømretn. endres med kommutatorer

Maks. dreiemoment  $\tau$

(Fig 27.39)

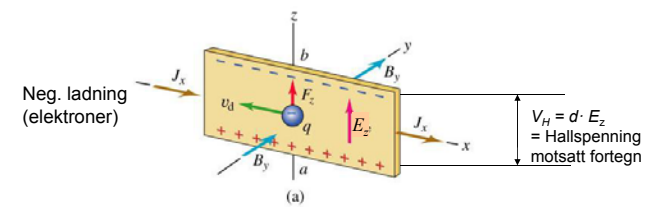
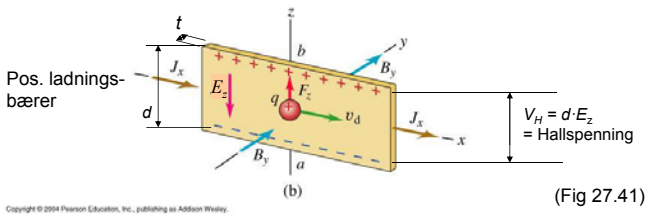
Simulering:  
<http://www.walter-fendt.de/ph14e/electricmotor.htm>

## DC-motor

Én strømsløyfe                      Tre sett strømsløyfer: jammere gange  
[solarbotics.net/starting/200111\\_dcmotor/200111\\_dcmotor2.html](http://solarbotics.net/starting/200111_dcmotor/200111_dcmotor2.html)

## 27.9 Hall-effekt

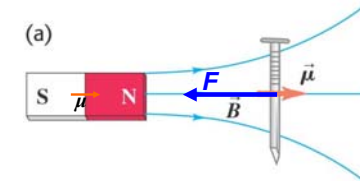
(Fig 27.41)


## Kap. 27: Oppsummering: Magnetisk felt og magnetiske krefter

- Lorentzkrafta = elektrisk kraft + magnetisk kraft:  

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} + q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$$
 (magnetflukstetthet  $\mathbf{B}$  defineres fra denne)
- Kraft på lederbit med lengde  $ds$ :  $d\mathbf{F} = I ds \times \mathbf{B}$
- Magnetisk fluks:  $\Phi_B = \iint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}$
- Magnetisk kilde ("magnet") angis ved alternativt:
  - N/S-pol** Monopol (separat S eller N) fins ikke.
  - Feltlinjer**: Lukka kurver, fra N→S ytre og S→N indre.
  - Magnetisk moment**  $\mu$ . Høyrehåndsregel, eller: i retning S→N.
- $\mu = I \mathbf{A}$ ,  $N$  strømsløyfer med areal  $A$ :  $\mu = N I \mathbf{A}$
- Kraftmoment på magnetisk moment i  $\mathbf{B}$ -felt,  $\tau = \mu \times \mathbf{B}$ , innretter momentet langs  $\mathbf{B}$ -feltet og momentet har potensiell energi:  $U = -\mu \cdot \mathbf{B}$
- Jern tiltrekkes både S-pol og N-pol.  $\mathbf{B}$ -feltet må være inhomogent.
- Anvendelser:  
 Hastighetsfilter, Thomsons e/m-eksperiment, katodestrålerør, massespektrometer, syklotron, DC-motor, Hall-effekt.

## Jern tiltrekkes både S-pol og N-pol. Feltet må være inhomogent.









Øving 8, opg. 6.

Alltid er  $V_a = \mathcal{E}$

$t=0^+$  (kond. som kortsluttet):  $I = \mathcal{E}/R_1$  og  $I_C = I$

$t \rightarrow \infty$  (kond. som åpen grein):  $I = \mathcal{E}/(R_1 + R)$  og  $I_C = 0$

alle  $t$  Enklest å løse likning for  $I_C$ , som ifølge ovenfor må ha form:  
 $I_C(t) = I_C(0) \exp(-t/\tau)$

Opg. 26.49 i Young & Freedman. Kondensatorer initielt unladet.  
 Finn strøm  $I$  i amperemeter A

a) umiddelbart etter bryter slått på:  $I(t=0^+)$ ,  
 b) etter svært lang tid:  $I(\infty)$ .

Figure 26.60

Opg. 26.49 i Young & Freedman. Kondensatorer initielt unladet.  
 Finn strøm  $I$  i amperemeter A

a) umiddelbart etter bryter slått på:  $I(t=0^+)$ , kondensatorer som kortslutning

Figure 26.60

Opg. 26.49 i Young & Freedman. Kondensatorer initielt uladd.  
Finn strøm  $I$  i amperemeter A

b) etter svært lang tid:  $I(\infty)$ . kondensatorer som åpen krets

Figure 26.60

Eksamen juni 2007, oppg. 3 a)

Finn  $I$ , samt  $Q_1, Q_2, Q_3, Q_4$  etter «lang tid»

Lang tid: Kondensatorer oppladd og kan "tas bort".

$R = 1.0 \text{ M } \Omega$   
 $C = 1.0 \text{ nF}$   
 $V_0 = 1.25 \text{ kV}$

Eksamen juni 2007, oppg. 3 a)

Finn  $Q_1, Q_2, Q_3, Q_4$  etter «lang tid»

Da må kondensatorene tegnes inn igjen!

$R = 1.0 \text{ M } \Omega$   
 $C = 1.0 \text{ nF}$   
 $V_0 = 1.25 \text{ kV}$

$Q_1 = C V_1 = C (V_A - V_D)$  etc.