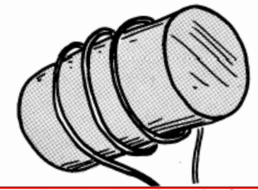
Magnetisme

- **Magnetostatikk** (ingen tidsvariasjon): $\boxed{\partial \boldsymbol{B}/\partial t = 0}$
- Kap 27. Magnetiske krefter
- Kap 28: Magnetiske kilder

- **Elektrodynamikk:** $\boxed{\partial \boldsymbol{B}/\partial t \neq 0}$
- Kap 29: Elektromagnetisk induksjon
- Kap 30: Induktans
- Kap 31: Vekselstrømskretser

FARADAY'S PARADOX

This is a coil of wire with a hunk of iron locked in it.



Hvilke er rett, a,b,c eller d?

a) If current is made to flow in the wire, the iron becomes a magnet

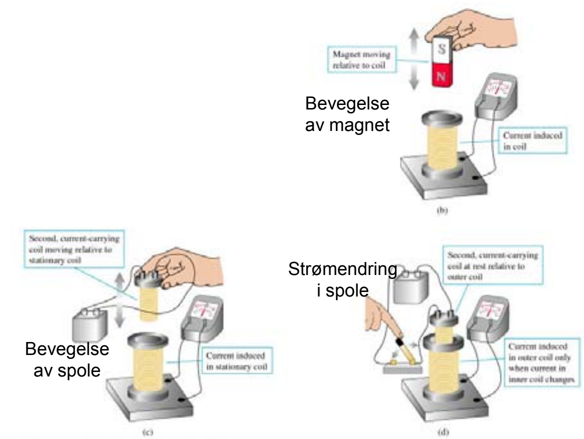
b) If the iron is a magnet, current is made to flow in the wire

c) Both of the first two statements are true

d) Both of the first two statements are false

Michael **Faraday** (eng. 1791-1867) og Joseph **Henry** (amer. 1797-1878):
1832: Strøm produseres ved **induksjon:**

Flere muligheter for induksjon:



(Fig 29.1)

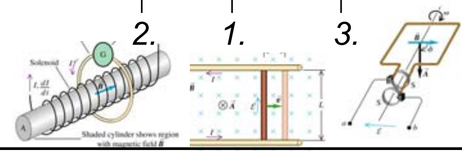
Faradays lov:

Indusert ems: $\mathcal{E} = -\, d\Phi_B/dt$, der $\Phi_B = \iint \boldsymbol{B}\cdot d\boldsymbol{A}$

eller indusert $\boldsymbol{E}$-felt: $\int \boldsymbol{E}\cdot d\boldsymbol{s} = -\, d\Phi_B/dt$

Homogen $\boldsymbol{B}$ og plan strømsløyfe:

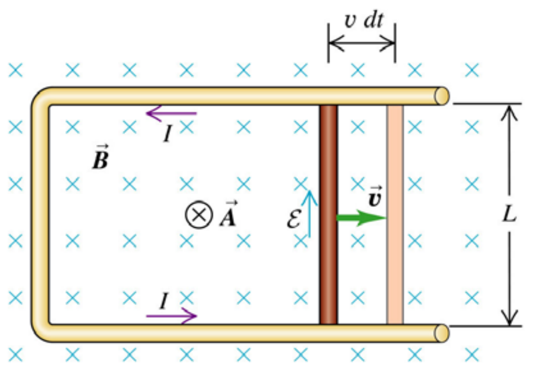
$$\Phi_B = B\,A\cos\varphi = \underset{\substack{\uparrow \\ 2.}}{B(t)} \cdot \underset{\substack{\uparrow \\ 1.}}{A(t)} \cdot \underset{\substack{\uparrow \\ 3.}}{\cos\varphi(t)}$$



Bevis av Faradays lov:

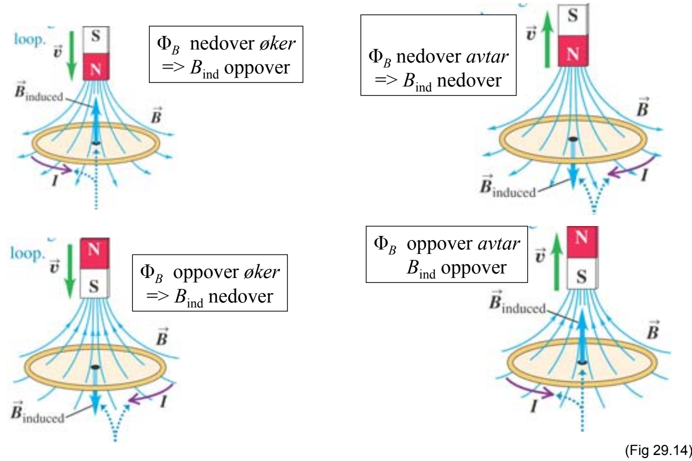
1. Endring $A(t)$:

$\mathcal{E} = -\,d\Phi_B/dt = -\,B \cdot dA(t)/dt \;\cdot \cos 0^{o}$



(Fig 29.11)

Induksjon: Lenz' lov



(Fig 29.14)

Le Chateliers prinsipp:

Et system i likevekt som påtvinges en endring: Systemet reagerer med å motvirke endringen.

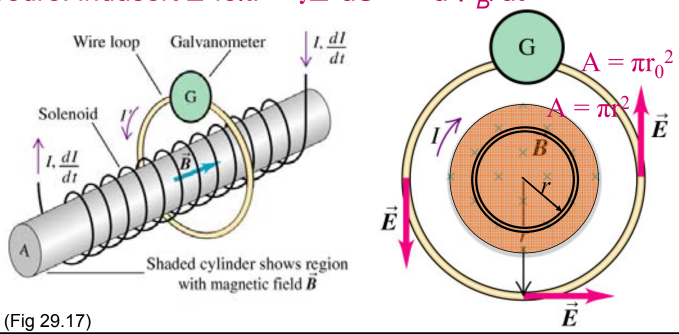
(naturen er konservativ)

Faradays lov:

2. Endring $B(t)$:

Indusert e.m.s: $\mathcal{E} = -\,d\Phi_B/dt = -\,dB(t)/dt \cdot A \;\cdot \cos 0^{o}$

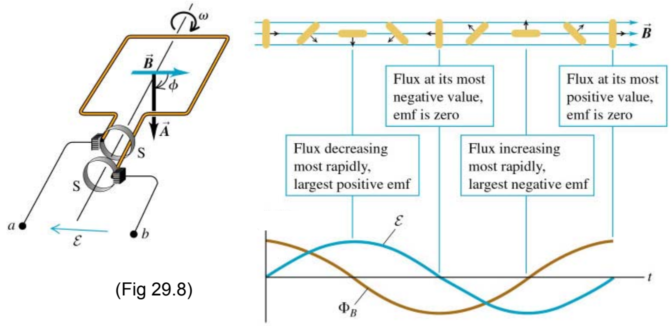
bedre: indusert $\boldsymbol{E}$-felt: $\int \boldsymbol{E}\cdot d\boldsymbol{s} = -\,d\Phi_B/dt$



(Fig 29.17)

Faradays lov:
3. Endring *φ(t)*:

$\mathcal{E} = -\, \mathrm{d}\Phi_B/\mathrm{d}t = -\, B \cdot A \;\cdot \mathrm{d}(\cos\varphi)\,/\mathrm{d}t$

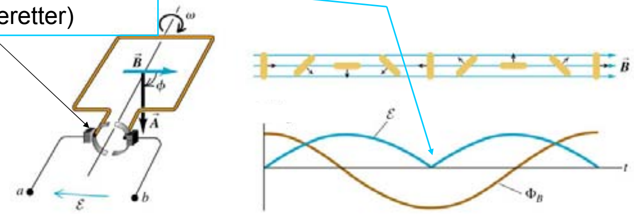


(Fig 29.8)

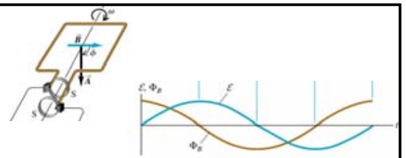
Faradays lov:
3. Endring *φ(t)*:

$\mathcal{E} = -\, \mathrm{d}\Phi_B/\mathrm{d}t = -\, B \cdot A \;\cdot \mathrm{d}(\cos\varphi)\,/\mathrm{d}t$

Med kommutator (likeretter)



(Fig 29.10)



Eksempel AC-motor:

(eller se Y&F: Ex. 29.5)

$B = 0{,}20$ T
$N = 500$
$A = (0{,}10 \text{ m})^2 = 0{,}010 \text{ m}^2$

Hva er tilbakeindusert ems ved 1680 RPM?

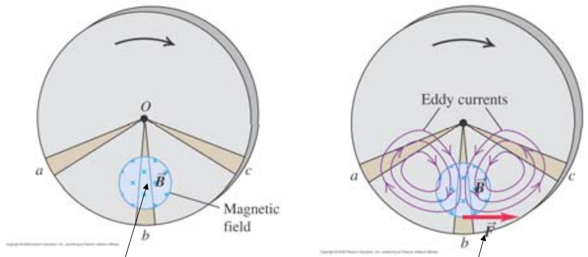
$f = 1680$ RPM $= 1680\ (\text{min})^{-1}$
tilsvarer radianer per sekund:
$\omega = 1680/60\ \text{s}^{-1} \cdot 2\pi = 176\ \text{s}^{-1}$

Gir ems'en:

$\mathcal{E} = N \cdot B \cdot A \cdot \omega \cdot \sin \omega t$
$= 500 \cdot 0{,}20\ \text{T} \cdot 0{,}010\ \text{m}^2 \cdot 176\ \text{s}^{-1} \cdot \sin \omega t$
$= \underline{176\ \text{V}} \cdot \sin \omega t$

Hvis $V_{\text{inn}} = \underline{200\ \text{V}} \cdot \sin \omega t$
er
$I(t) = (V_{\text{inn}} - \mathcal{E})/R = \underline{24\ \text{V}} \cdot \sin \omega t\,/R$

Virvelstrømmer (Y&F 29.6, ikke pensum).
Eks: *B*-felt over en del av arealet i roterende metallskive.



Ems induseres i "staven" som sveiper over *B*-feltet

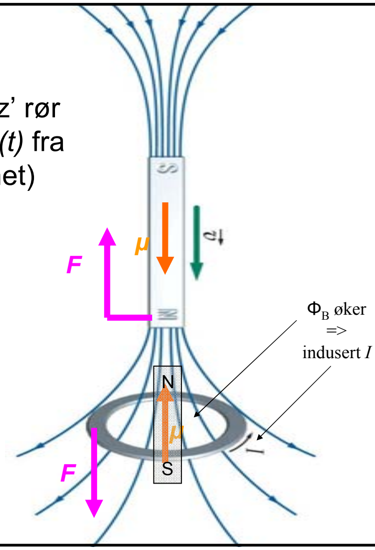
Bremsende kraft

(Fig 29.19)

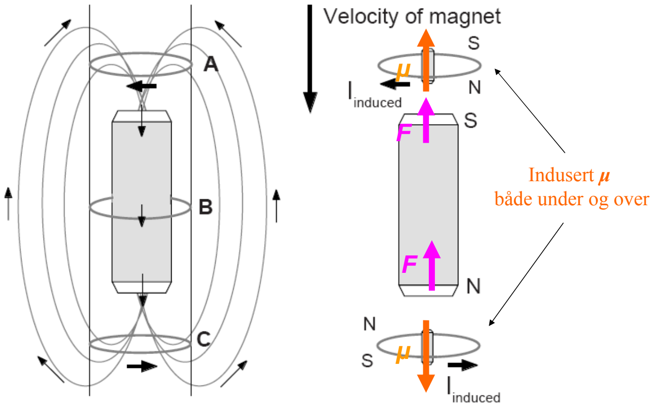
"Eddy current pendulum"

Video på nettside http://demoroom.physics.ncsu.edu/html/demos/163.html

Virvelstrøm i Lenz' rør (tidsvarierende *B(t)* fra bevegende magnet)

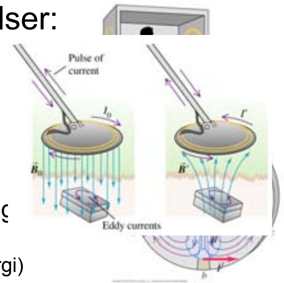


Lenz' rør



(a) (b)

Virvelstrømmer. Anvendelser:



- Metalldetektor:
  - Minesøking
  - Sikkerhetskontroll flyplasser
  - Søke etter vannrør
  - Deteksjon foran lyskryss
  - Søppelsortering (glass/metall)
- Bremser i tog/trikk/buss/sirkelsag
  (virvelstrøm gir varme,
  evt. induksjonsbrems gir el.energi)
- Wattmålere (husholdning)
- Fartsmålere bil (før digitalt og GPS).
- Induksjonskomfyrer
  (ferromagn.materiale i gryter for å gi høy *B*. Litt hysterese-bidrag)
- Induksjonssveising.

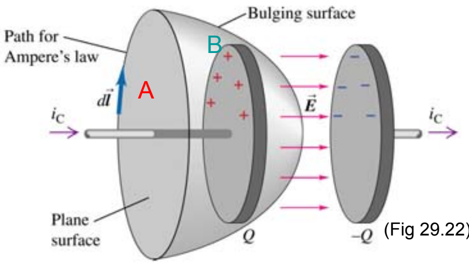
Problem med Amperes lov?

$\int \boldsymbol{H} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{s} = i_{\text{encl}}$

= strøm gjennom enhver valgt flate omsluttet av intgegrasjonsvegen

Plan flate A: strøm i_C gjennom flata

Kurvet flate B: ingen strøm gjennom flata!



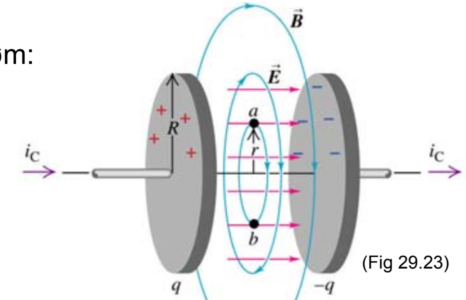
(Fig 29.22)

Løsning: "Forskyvningsstrøm"

Forskyvningsstrøm:

$i_D = \mathrm{d}\Phi/\mathrm{d}t$, der

$\Phi = \int \boldsymbol{D} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{A}$



(Fig 29.23)

Strømmen i_C som lader kondensatoren fortsetter mellom platene som forskyvningsstrøm i_D som gir B-felt mellom platene.

Modifikasjon av Amperes lov:

$\int \boldsymbol{B} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{s} = \mu_0 (i + i_D)$ $\qquad$ $\int \boldsymbol{H} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{s} = i + i_D$

Differensialform: curl $\boldsymbol{H} = \boldsymbol{J} + \partial \boldsymbol{D}/\partial t$

Superledere (Y&F 29.8, ikke pensum)

1. Resistans faller brått til ≈ 0 under gitt temp T_C

	Resistivitet:
Halvledere:	$\rho \approx 1\ \Omega\text{m}$
Metaller:	$\rho \approx 10^{-7}\ \Omega\text{m}$
Superledere:	$\rho < 10^{-20}\ \Omega\text{m}$

- 1911: H Kammerlingh Onnes: Kvikksølv under T_C = 4,1 K (Nobelpris fysikk 1913)
- 1957: BCS-teori (J Bardeen, LN Cooper, JR Schrieffer): Kvantemekanisk forklaring. (Nobelpris fysikk 1972)
- 1986: J. Bednorz, KA Müller: Visse oksider: superledning opp til $T_C \approx 100$ K. (Flytende N_2 har temp 77 K.) (Nobelpris fysikk 1987)

Metaller	T_c (K)
Al	1.18
In	3.41
Sn	3.72
Ta	4.47
V	5.40
Pb	7.20
Nb	9.25
Hg	4.12
Ga	1.07
Legeringer og sammensetninger	
Pb–In	7
Pb–Bi	8.3
Nb–Ti	9.5
Nb–Zr	10.7
Nb–N	16.0
V_3Ge	15.3
V_3Si	16.3
Nb_3Sn	18.0
Nb_3Ge	23.2

Kritiske temperaturer for superledere

(Flytende N_2 har temp 77 K.)

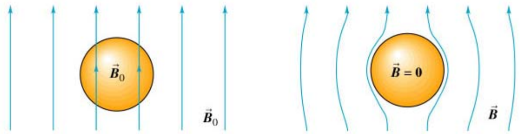
Oksider	
$BaPb_{0.75}B_{0.25}O_3$	13
$La_{1.85}Ba_{0.15}CuO_4$	36
$Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$	84
$Tl_2Ba_2Ca_2Cu_3O_{10}$	125
Fullerener	
K_3C_{60}	18
Rb_3C_{60}	28
Cs_2RbC_{60}	33

(Tab. 21.4 i Lillestøl,Hunderi,Lien)

Superledere

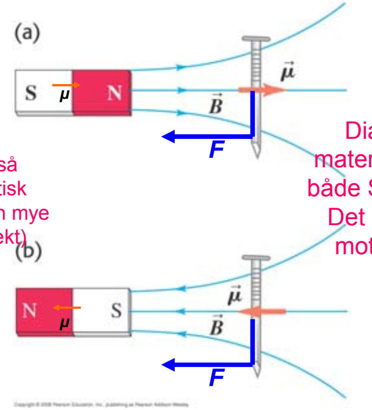
2. Perfekt diamagnetisk: $\chi_m = -1$; $\mu_r = 0$
   ved rimelig svake magnetfelt.
   (Meissnereffekt)

=>Magnetfelt trekker ikke inn i superledere, $B = \mu_r\mu_0 H = 0$ inni.



Ikke superledende — Superledende (Fig 29.25)

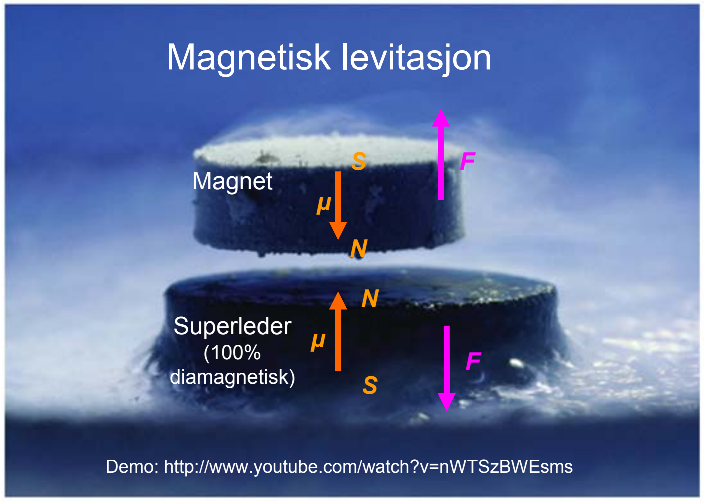
Jern tiltrekkes både S-pol og N-pol
(i inhomogent felt).



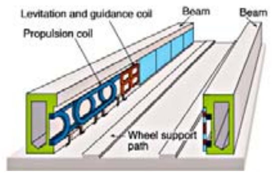
Gjelder også paramagnetisk materiale (men mye svakere effekt)

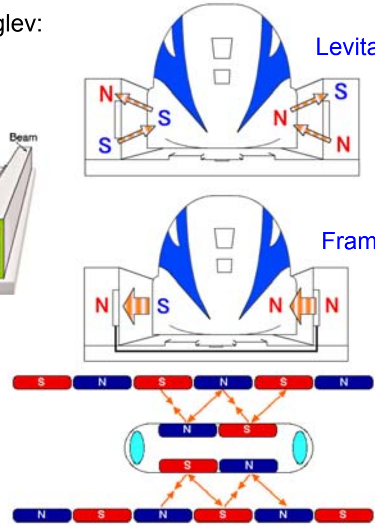
Diamagnetisk materiale **frastøtes** både S-pol og N-pol: Det induseres μ i motsatt retning.

(Fig 27.38)



JR-Maglev:





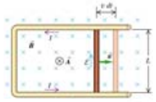
Nytte av superledere:

- Produksjon av sterke B-felt (> 1 T):
  - MR-instrument i medisin og NMR-instrument i vitenskapen
  - Maglev-tog (magnet-svevetog):
    http://en.wikipedia.org/wiki/Maglev_train
- Elektrisk kraftoverføring?
  Forsøk på gang (korte strekninger).

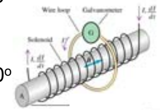
Kap. 29: Oppsummering: Elektromagnetisk induksjon

- Faradays lov for homogent ***B***-felt og plan strømsløyfe:
  $\mathcal{E} = - \mathrm{d}\Phi_B/\mathrm{d}t = - \mathrm{d}/\mathrm{d}t \{B(t) \cdot A(t) \cdot \cos\varphi(t)\}$
- Tre ulike tilfeller:

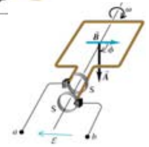
  1) Bevegelsesindusert, endring i $A(t)$:
  $\mathcal{E} = - \mathrm{d}\Phi_B/\mathrm{d}t = - B \cdot \mathrm{d}A(t)/\mathrm{d}t \cdot \cos 0^\circ$



  2) Tidsvariasjon i $B(t)$:
  $\mathcal{E} = - \mathrm{d}\Phi_B/\mathrm{d}t = - \mathrm{d}B(t)/\mathrm{d}t \cdot A \cdot \cos 0^\circ$



  3) Rotasjon, endring i $\varphi(t)$:
  $\mathcal{E} = - \mathrm{d}\Phi_B/\mathrm{d}t = - B \cdot A \cdot \mathrm{d}(\cos\varphi)/\mathrm{d}t)$



Kap. 29: Oppsummering: Elektromagnetisk induksjon

- Faradays lov:
  $\mathcal{E} = - \mathrm{d}\Phi_B/\mathrm{d}t$, der $\Phi_B = \int \boldsymbol{B} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{A}$.
  Dvs: endring i magnetisk fluks Φ_B induserer ems.
  Generelt, induksjon av ***E***-felt i lukket kurve:
  $\int \boldsymbol{E} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{s} = \mathcal{E} = - \mathrm{d}\Phi_B/\mathrm{d}t$
- Lenz' lov: Indusert strøm motsetter seg fluksendringen.
- Virvelstrømmer.
- Forskyvningsstrøm: $I_D = \mathrm{d}\Phi/\mathrm{d}t$, der $\Phi = \int \boldsymbol{D} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{A}$.
  Modifikasjon av Amperes lov:
  $\int \boldsymbol{B} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{s} = \mu_0 (I + I_D)$ $\qquad$ $\int \boldsymbol{H} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{s} = I + I_D$

  Differensialform: $\quad$ curl $\boldsymbol{H} = \boldsymbol{J} + \partial \boldsymbol{D}/\partial t$

Maxwells fire likninger

Integralform		Differensialform
$\oint \vec{D} \cdot \mathrm{d}\vec{A} = Q$	Gauss' lov ***D***	$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho$
$\oint \vec{B} \cdot \mathrm{d}\vec{A} = 0$	Gauss' lov ***B***	$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$
$\oint \vec{H} \cdot \mathrm{d}\vec{\ell} = I + \frac{\partial \Phi}{\partial t}$	Amperes lov	$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$
$\oint \vec{E} \cdot \mathrm{d}\vec{\ell} = -\frac{\partial \Phi_B}{\partial t}$	Faradays lov	$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$,