

Magnetisme

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

- **Elektrodynamikk (tidsvariasjon):** $\partial \mathbf{B} / \partial t \neq 0$
- Kap 29: Elektromagnetisk induksjon
- Kap 30: Induktans
- Kap 31: Vekselstrømskretser
- Kap 32: Elektromagnetiske bølger

FARADAY'S PARADOX

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

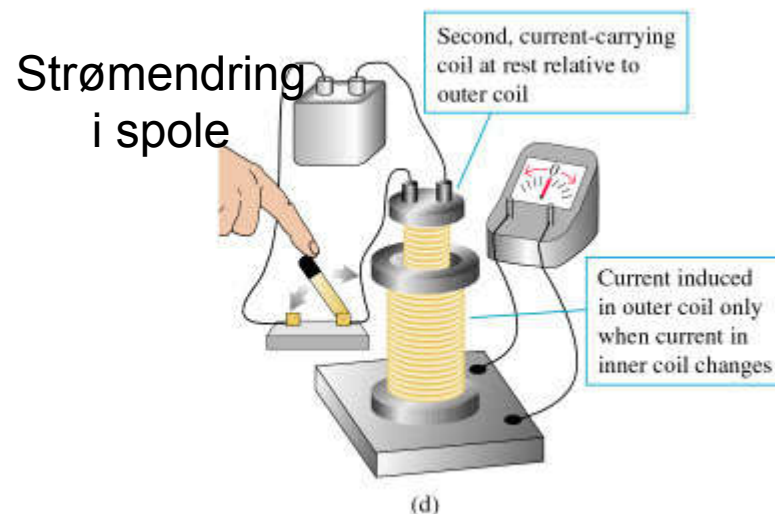
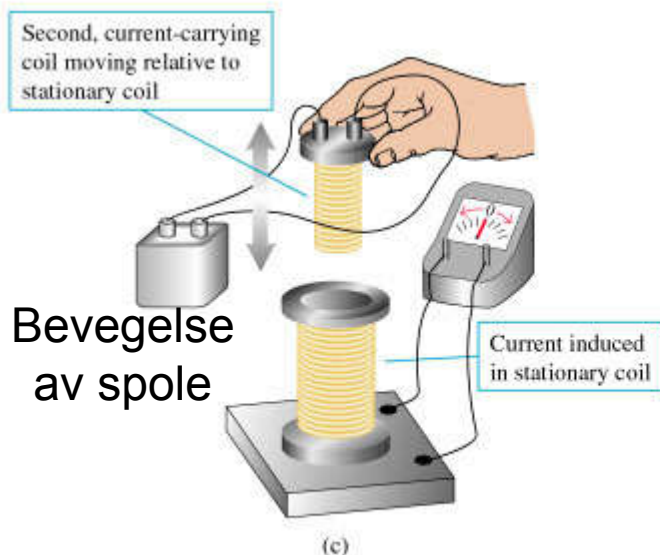
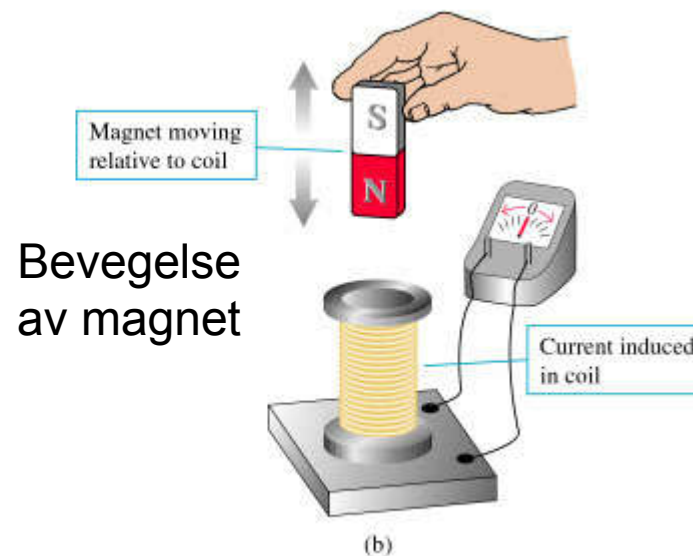
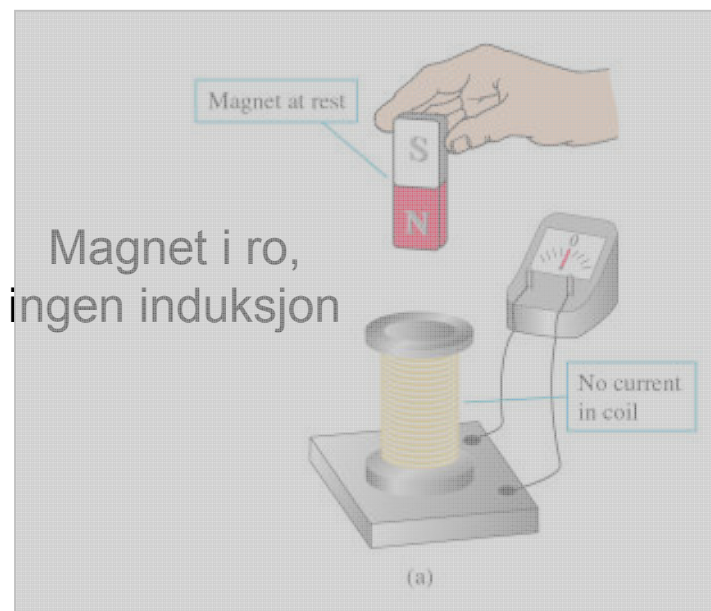


- a) If current is made to flow in the wire, the iron becomes a magnet
- b) If the iron is a magnet, current is made to flow in the wire
- c) Both of the first two statements are true
- d) Both of the first two statements are false

Michael Faraday (eng. 1791-1867) og
Joseph Henry (amer. 1797-1878):

1832: Strøm produseres ved **induksjon**:

Flere muligheter for induksjon:



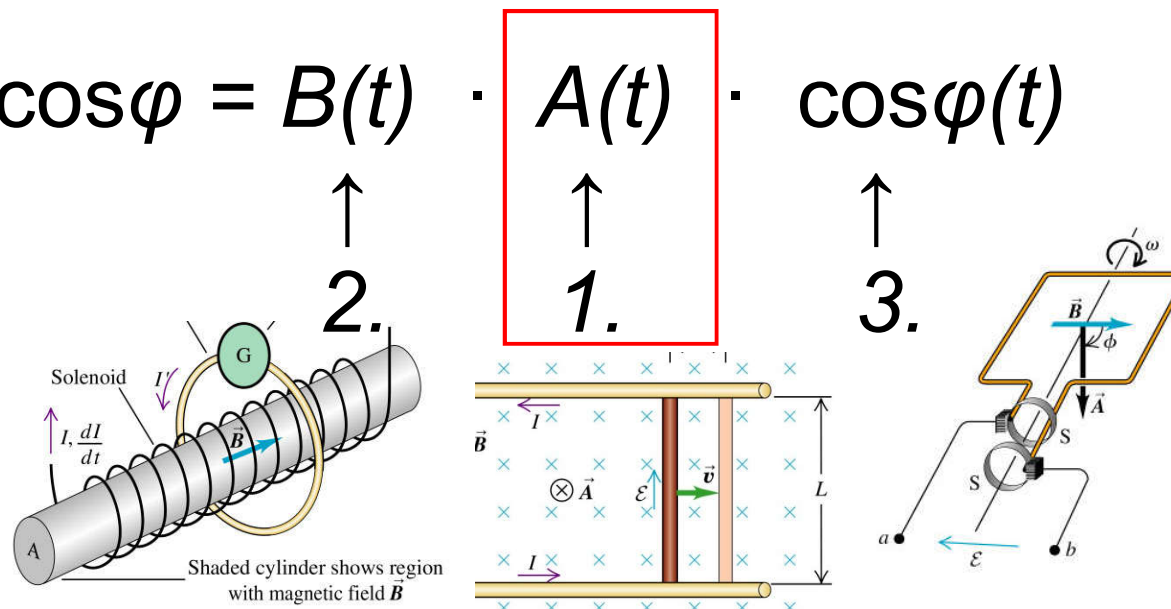
Faradays lov:

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

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

Homogen \mathbf{B} og plan strømsløyfe:

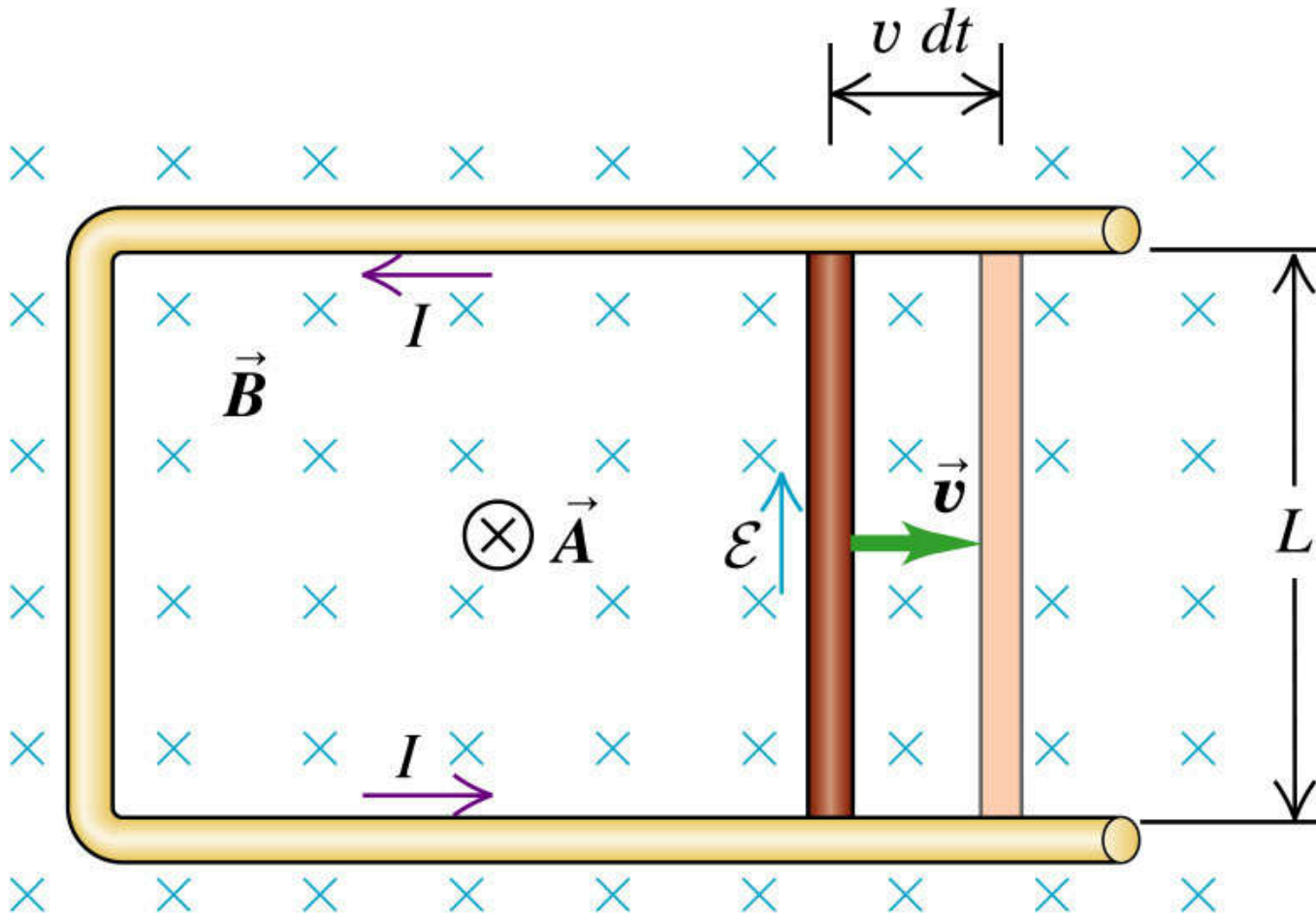
$$\Phi_B = B A \cos\varphi = B(t) \cdot A(t) \cdot \cos\varphi(t)$$



Bevis av Faradays lov:

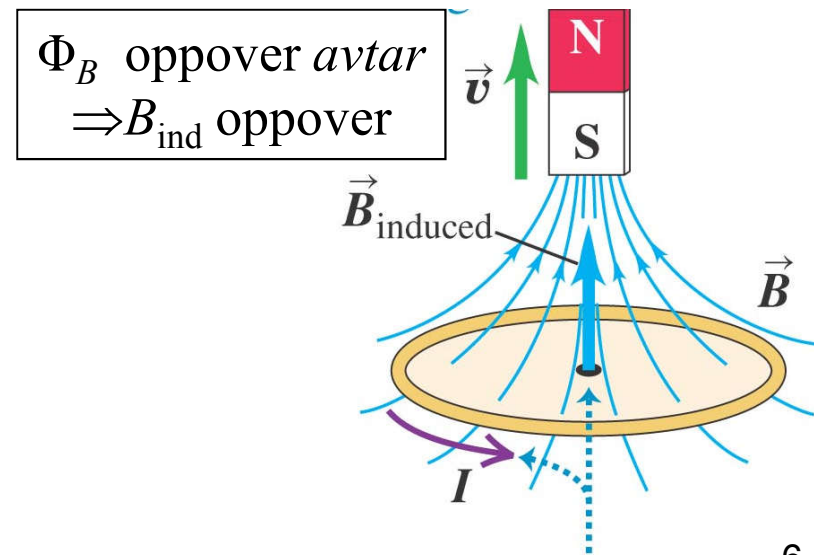
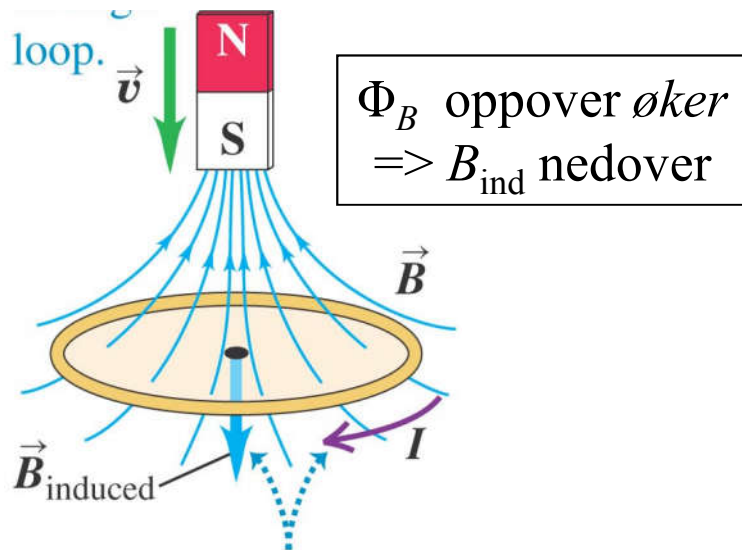
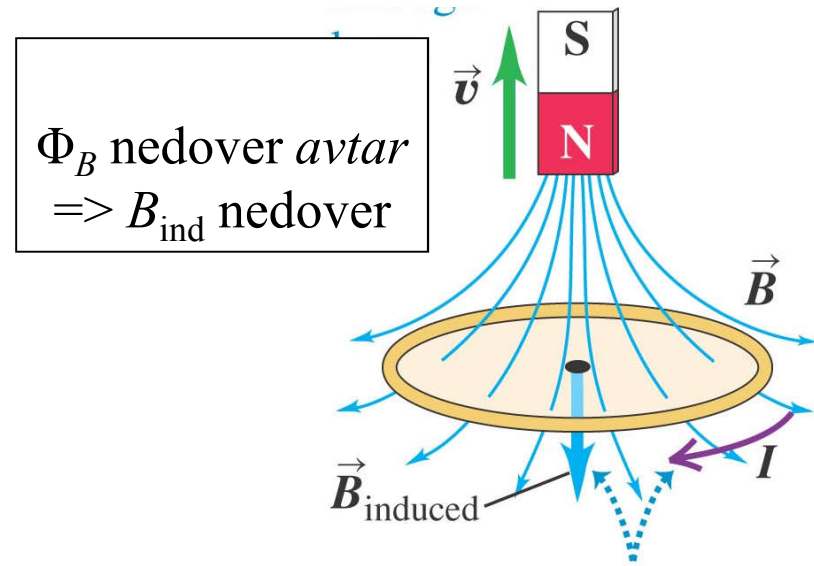
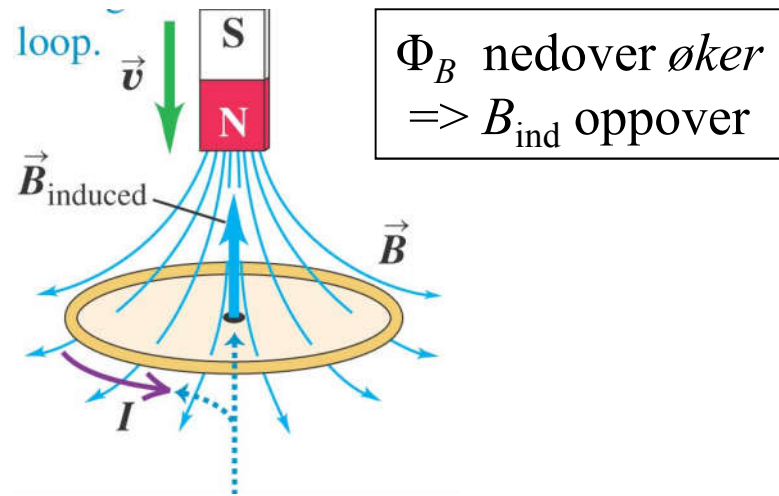
1. Endring $A(t)$:

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



(Fig 29.11)
5

Induksjon: Lenz' lov



Le Chateliers prinsipp:

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

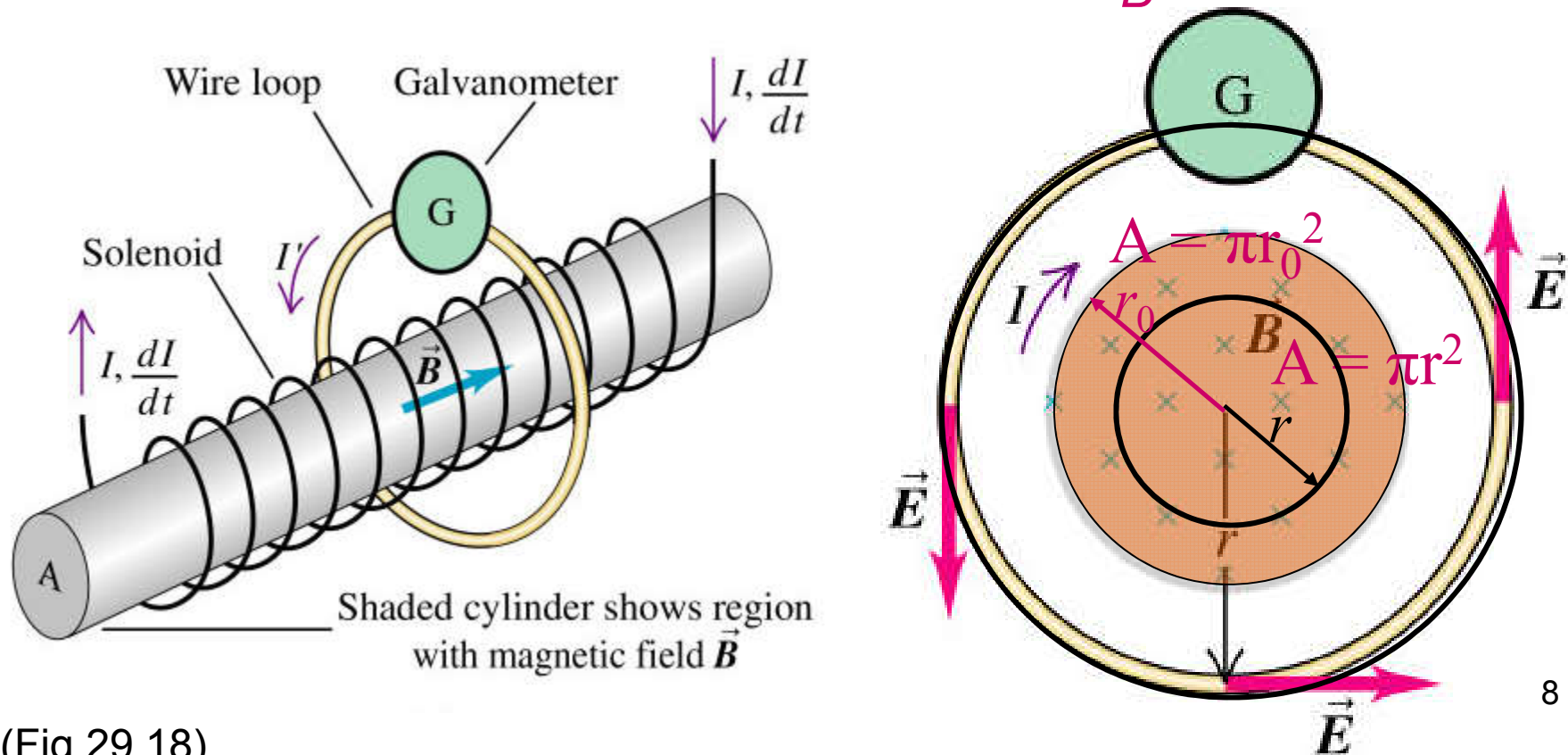
(naturen er konservativ)

Faradays lov:

2. Endring $B(t)$:

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

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

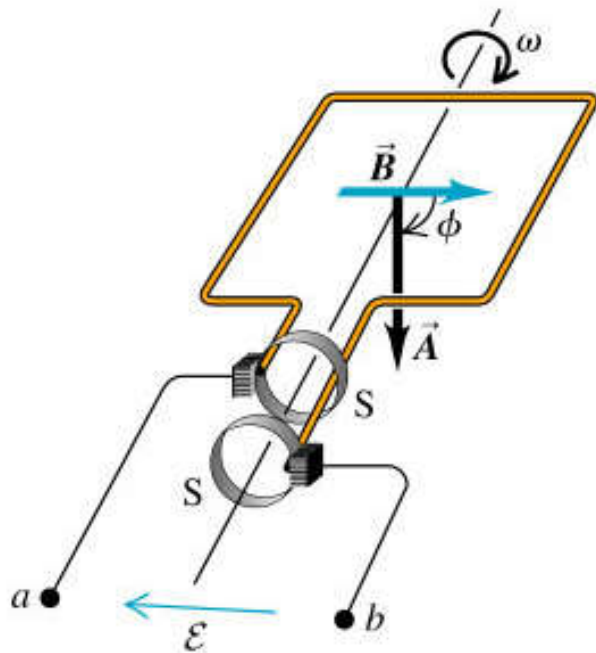


(Fig 29.18)

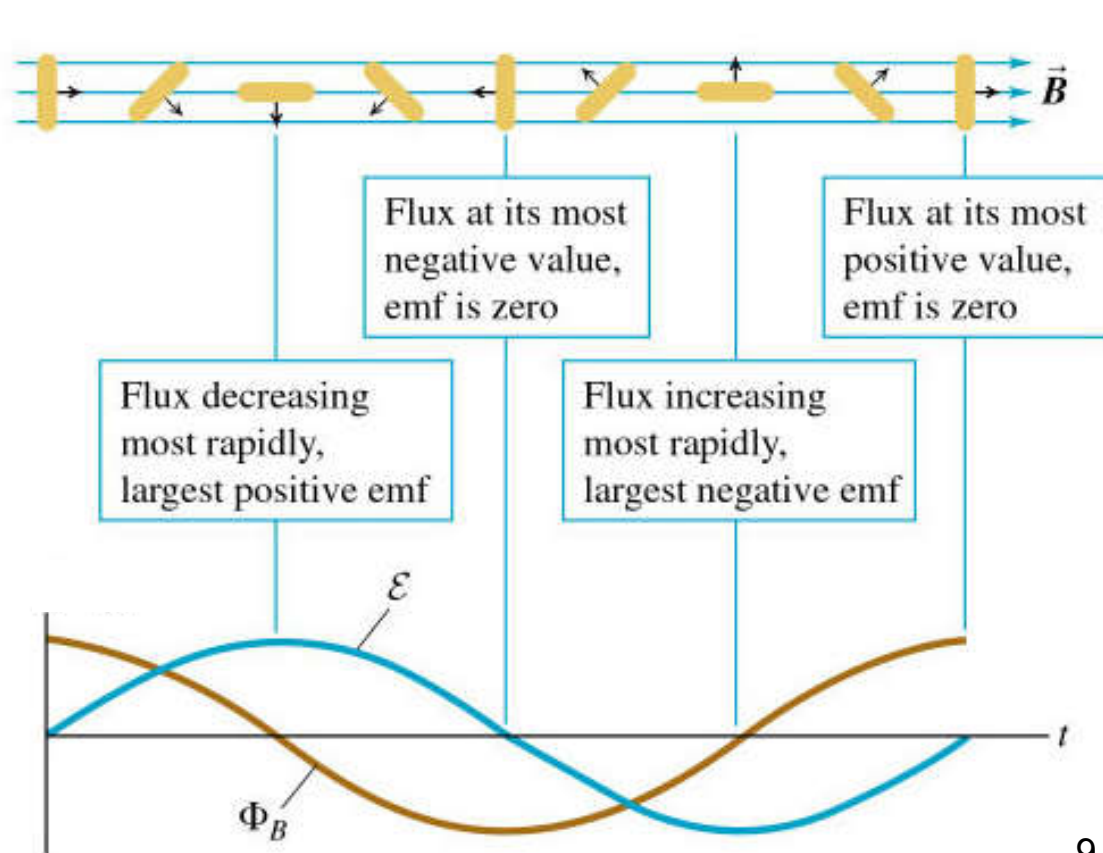
Faradays lov:

3. Endring $\varphi(t)$:

$$\mathcal{E} = - d\Phi_B/dt = - B \cdot A \cdot d(\cos \varphi) /dt$$



(Fig 29.8)

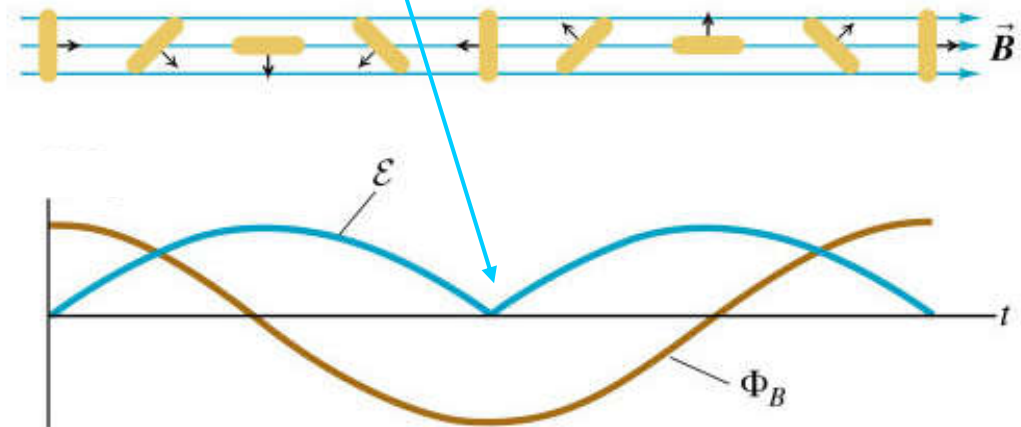
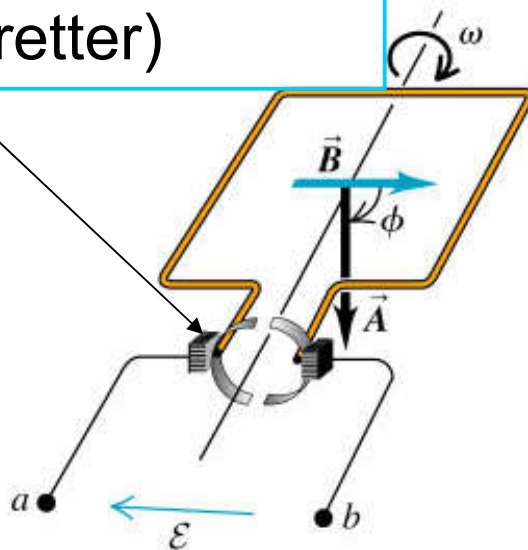


Faradays lov:

3. Endring $\varphi(t)$:

$$\mathcal{E} = - d\Phi_B/dt = - B \cdot A \cdot d(\cos \varphi) /dt$$

Med kommutator
(likeretter)



(Fig 29.10)

Kap. 29: Oppsummering: Elektromagnetisk induksjon

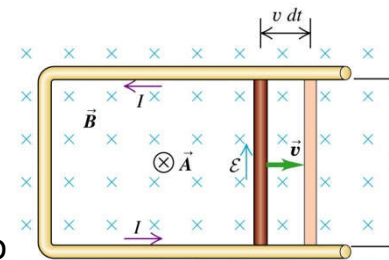
- Faradays lov for homogent \mathbf{B} -felt og plan strømsløyfe:

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

- Tre ulike tilfeller:

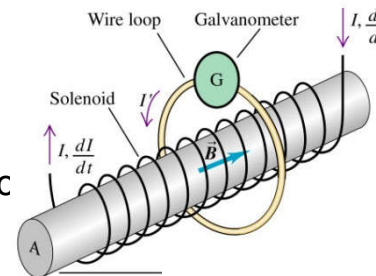
- 1) Bevegelsesindusert, endring i $A(t)$:

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



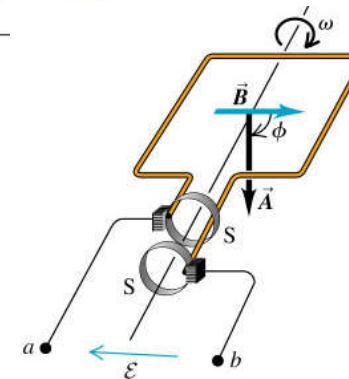
- 2) Tidsvariasjon i $B(t)$:

$$\mathcal{E} = - d\Phi_B/dt = - dB(t)/dt \cdot A \cdot \cos 0^\circ$$



- 3) Rotasjon, endring i $\varphi(t)$:

$$\mathcal{E} = - d\Phi_B/dt = - B \cdot A \cdot d(\cos \varphi) / dt$$



Kap. 29: Oppsummering: Elektromagnetisk induksjon

- Faradays lov:

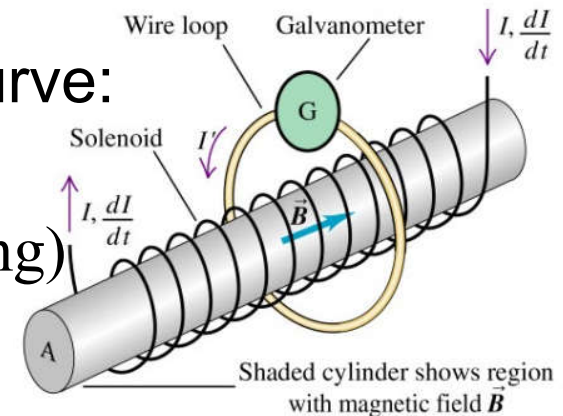
$$\mathcal{E} = - d \Phi_B / dt , \quad \text{der } \Phi_B = \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}.$$

Dvs: endring i magnetisk fluks Φ_B induserer ems.

Generelt, induksjon av \mathbf{E} -felt i lukket kurve:

$$\int \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = \mathcal{E} = - d \Phi_B / dt$$

\mathbf{E} -felt induseres også i tomrom (uten ledning)



- Lenz' lov: Indusert strøm motsetter seg fluksendringen.

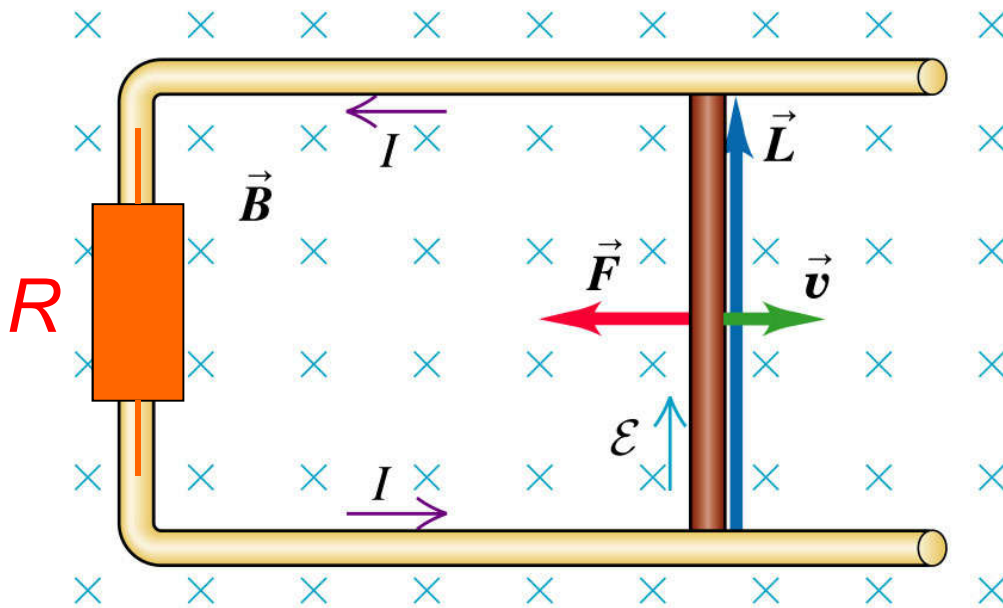
Faradays lov:

1. Endring $A(t)$:

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

Arbeid å flytte tverrstaven

Mekanisk arbeid = elektrisk dissipert energi i R



$$I = \mathcal{E} / R = B l v / R$$

$$F = I l B = B^2 l^2 v / R$$

Effekt:

$$P = Fv = B^2 l^2 v^2 / R$$

Kap 29: Elektromagnetisk induksjon

- Faradays lov og Lenz' lov (29.1-5) $B(t) \rightarrow E(t)$
- Virvelstrømmer (29.6)
- Forskyvningsstrøm (29.7) $E(t) \rightarrow B(t)$
- Superledende materiale
- Maxwells likninger (enda en gang)
 - en generell oppsummering med «elmags sirkelen».

Virvelstrømmer (Y&F 29.6, ikke pensum)

Anvendelser:

- Metalldetektor:

- Minesøking
- Sikkerhetskontroll flyplasser
- Søke etter vannrør
- Deteksjon foran lyskryss
- Søppelsortering (glass/metall)

- Bremses i tog/trikk/buss/sirkelsag

(virvelstrøm gir varme,
evt. induksjonsbrems gir el.energi)

- Wattmålere (husholdning)

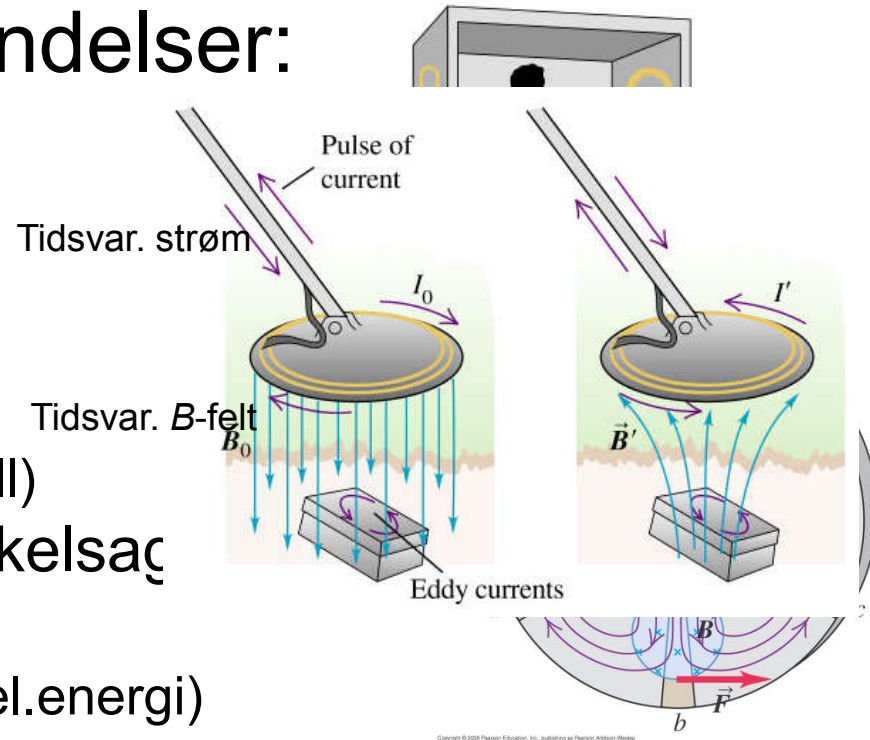
- Fartsmålere bil (tidl., nå: digitalt og GPS).

- Induksjonskomfyrer

(høyfrekvent strøm og ferromagn.materiale =>

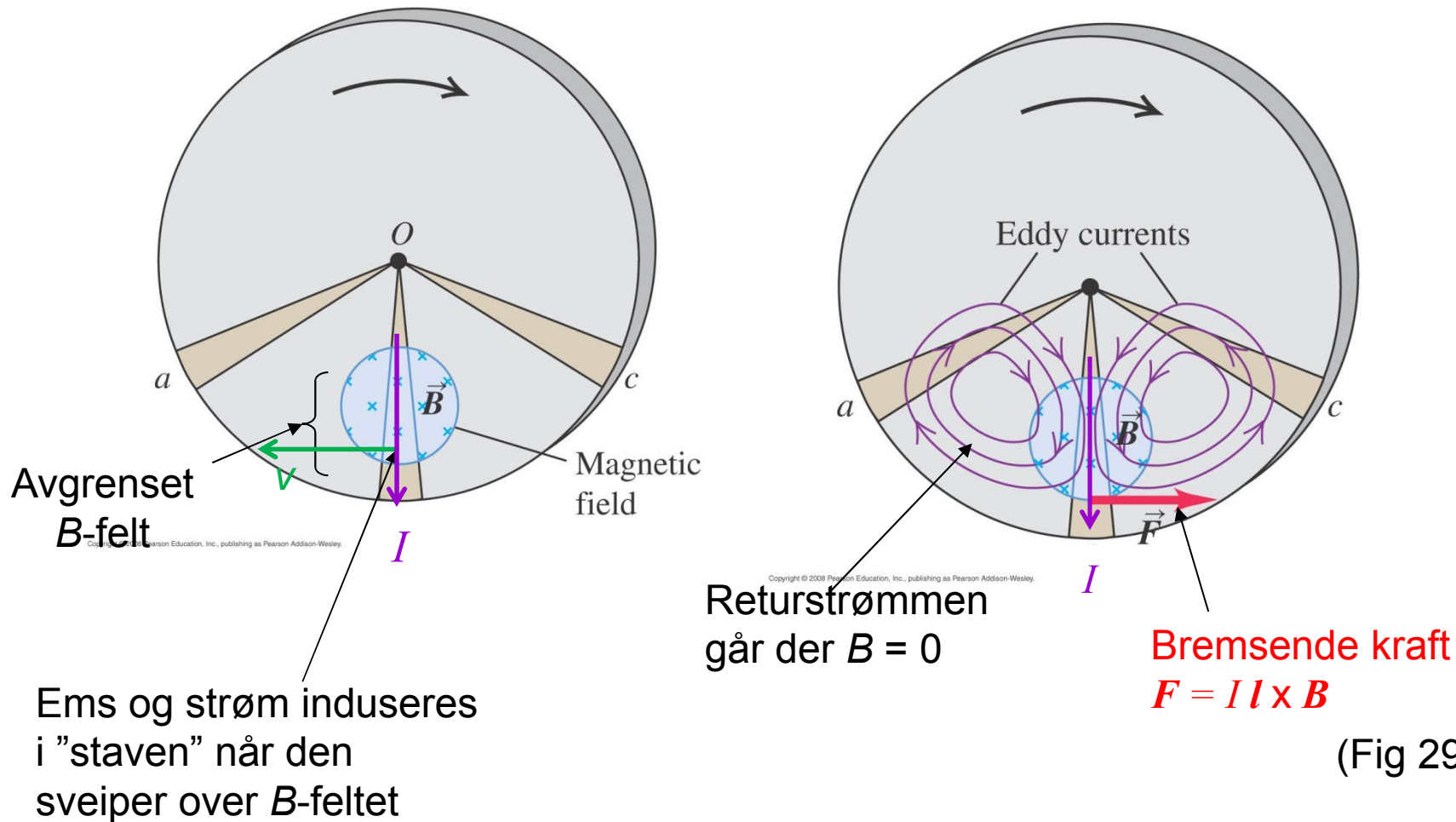
stor B , samt liten inntrengningsdybde og stor resistans)

- Induksjonssveising.

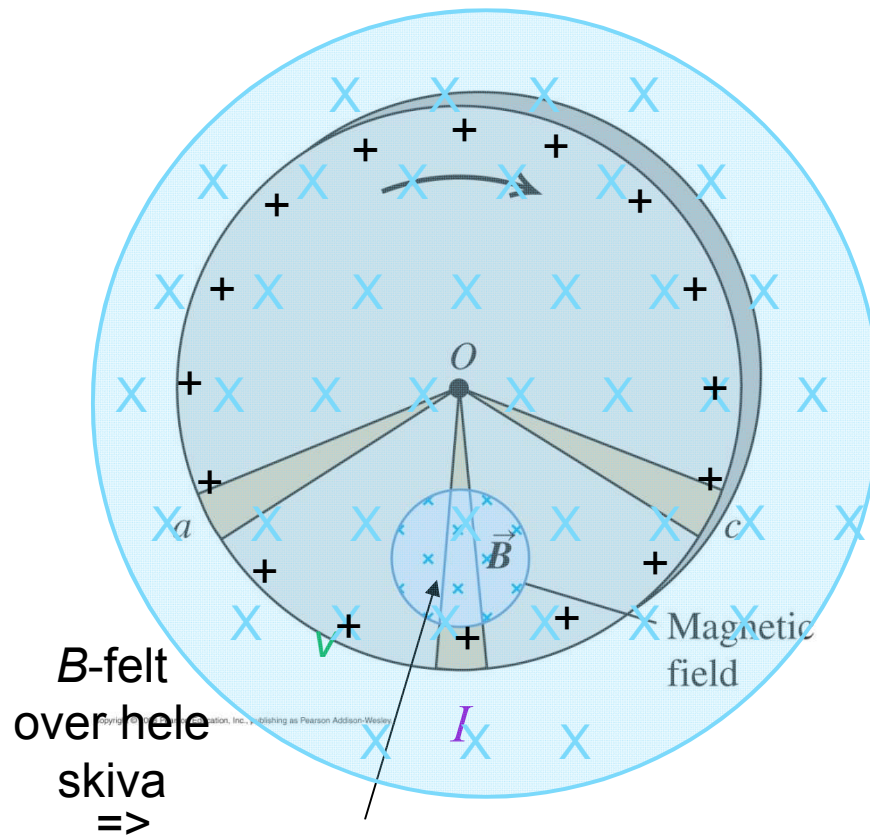


Virvelstrømmer

Eks: B -felt over en del av arealet i roterende metallskive.



Eks: B -felt over hele arealet i roterende metallskive.



Opphoping av positive ladninger ved periferien.

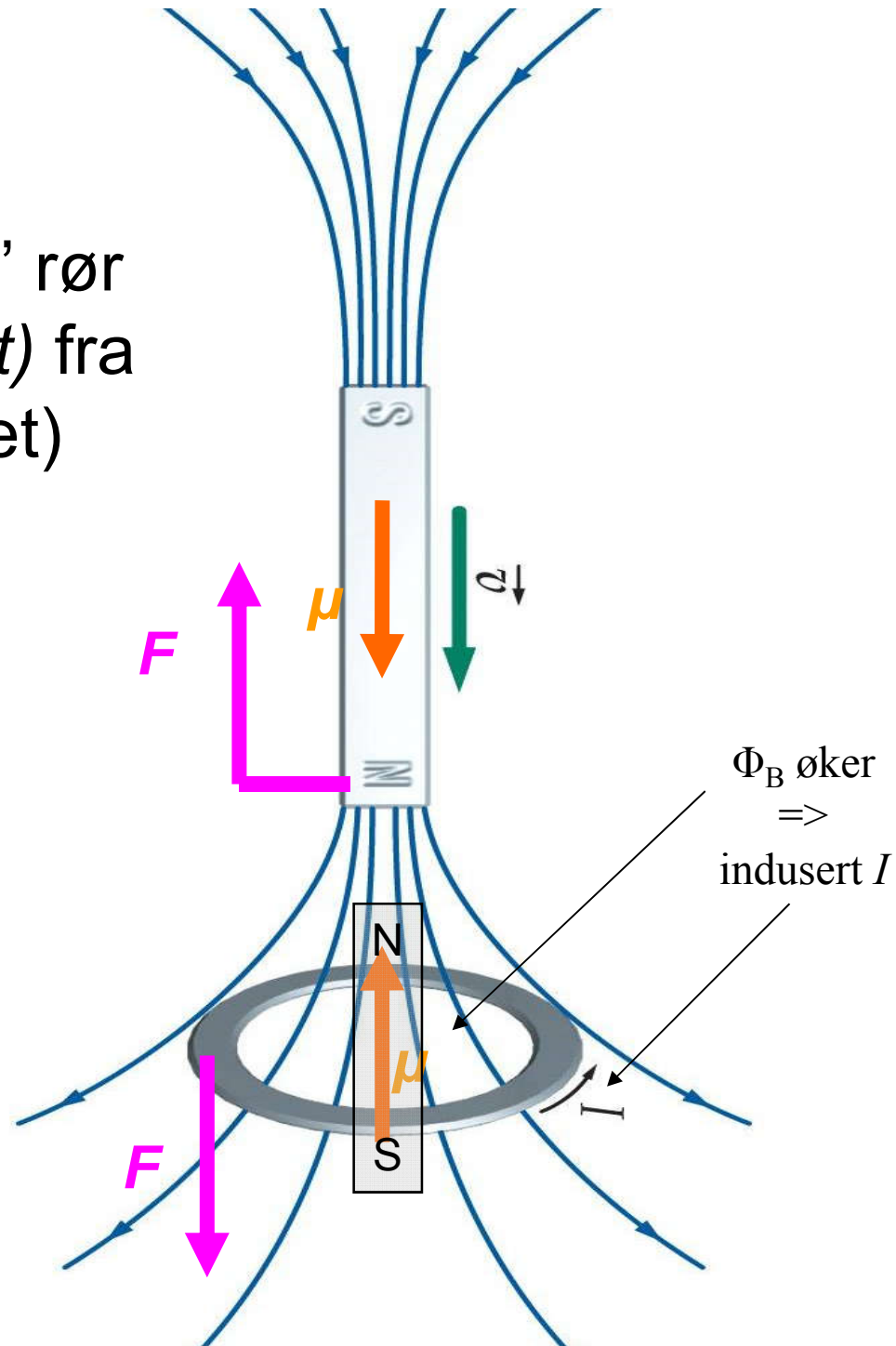
Ingen bremsende kraft.

”Eddy current pendulum”

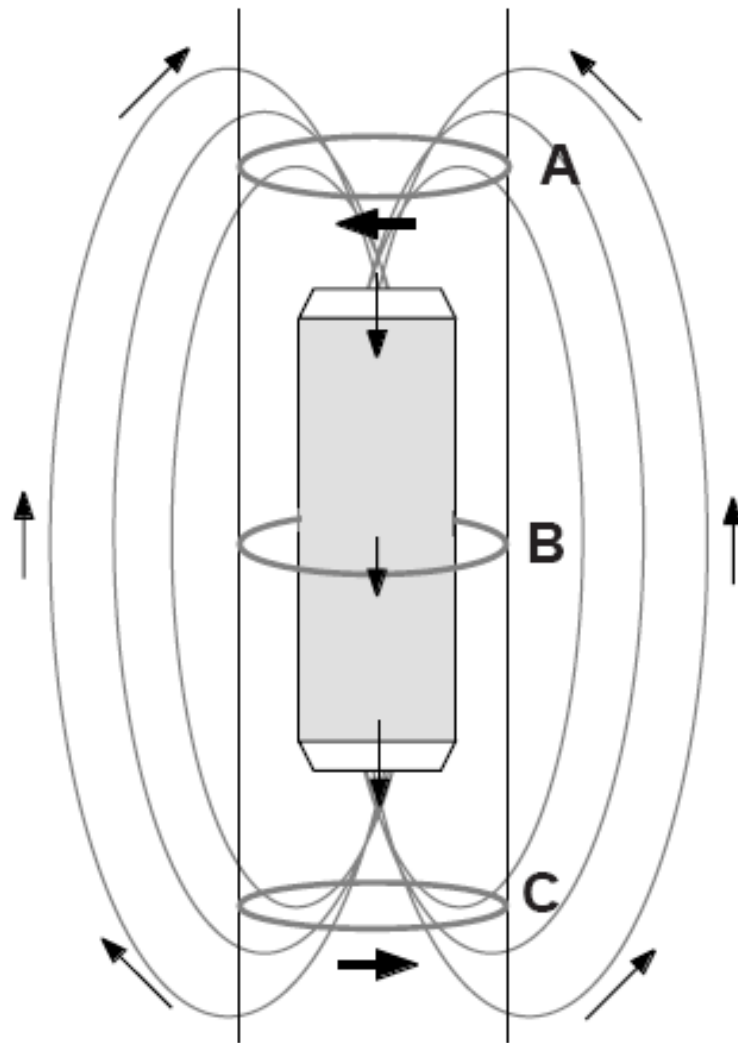
Video på nettside <http://demoroom.physics.ncsu.edu/html/demos/163.html>



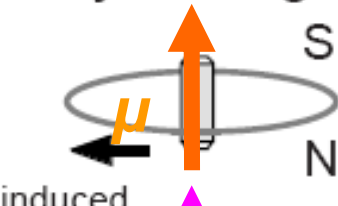
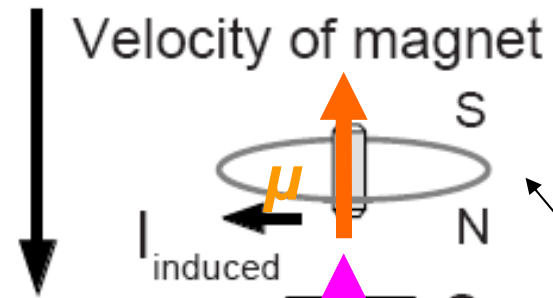
Virvelstrøm i Lenz' rør
(tidsvarierende $B(t)$ fra
bevegende magnet)



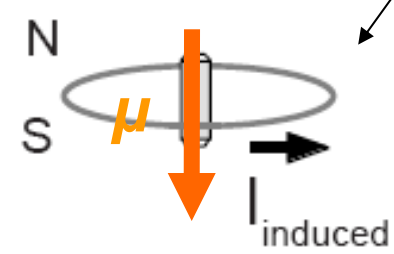
Lenz' rør



(a)



Indusert μ
både under og over



(b)

Kap 29: Elektromagnetisk induksjon

- Faradays lov og Lenz' lov (29.1-5) $B(t) \rightarrow E(t)$
- Virvelstrømmer (29.6)
- Forskyvningsstrøm (29.7) $E(t) \rightarrow B(t)$
- Superledende materiale
- Maxwells likninger (enda en gang)
 - en generell oppsummering med «elmags sirkelen».

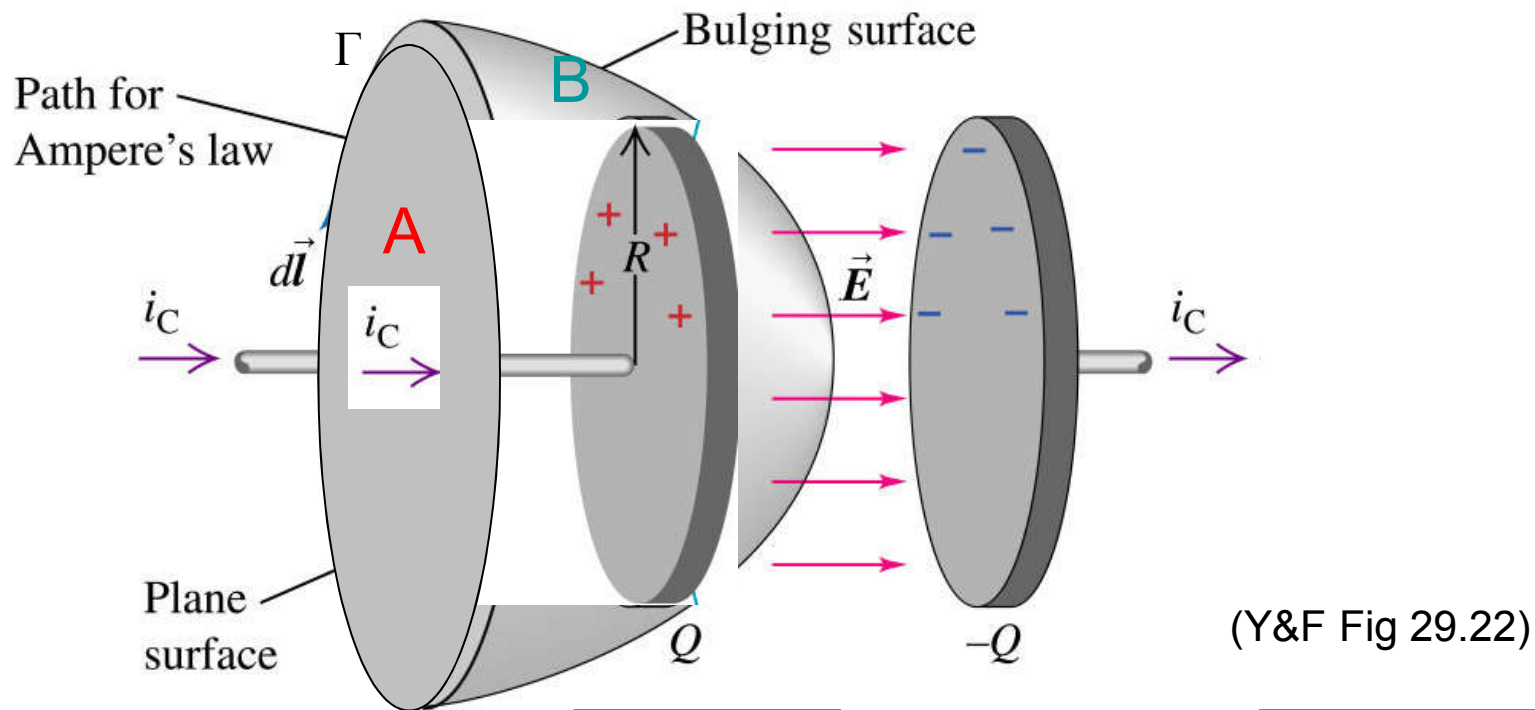
Problem med Amperes lov?

$$\int_{\Gamma} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{s} = i_{\text{encl}}$$

= strøm gjennom enhver valgt flate omhyllet av integrasjonsvegen Γ

Plan flate A med omhyllingskurve= Γ : strøm i_C gjennom flata

Kurvet flate B med omhyllingskurve= Γ : ingen strøm gjennom flata!

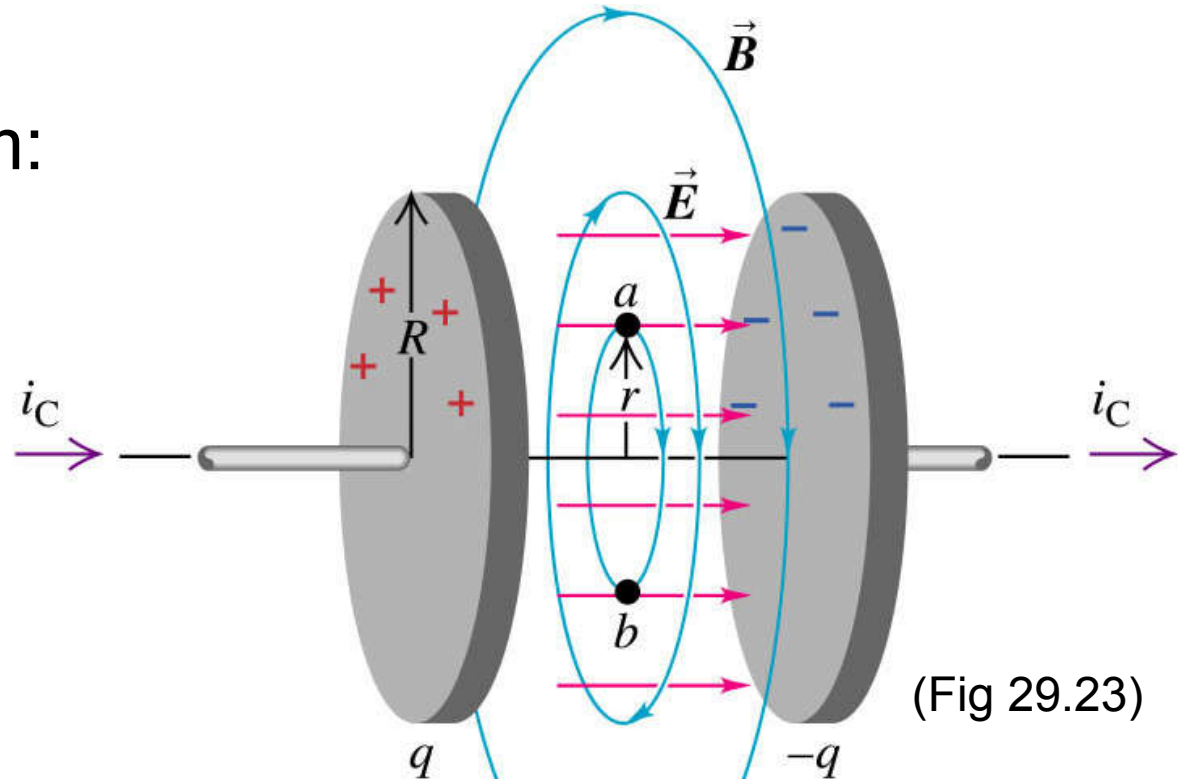


Løsning: "Forskyvningsstrøm" ²²

Forskyvningsstrøm:

$$I_d = d\Phi/dt, \quad \text{der}$$

$$\Phi = \int \mathbf{D} \cdot d\mathbf{A}$$



Strømmen I_C som lader kondensatoren fortsetter mellom platene som forskyvningsstrøm I_d som gir B -felt mellom platene.

Ampere-Maxwells lov:

$$\int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = \mu_0 (I + I_d)$$

$$\int \mathbf{H} \cdot d\mathbf{s} = I + I_d$$

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

Superledere (Y&F 29.8, ikke pensum)

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

	Resistivitet:
Isolatorer:	$\rho \approx 10^{14} \Omega\text{m}$
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 $T_C = 4,1 \text{ K}$
(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 $T_C \approx 100 \text{ K}$.
(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 ₃ Ge	15.3
V ₃ Si	16.3
Nb ₃ Sn	18.0
Nb ₃ Ge	23.2

Kritiske temperaturer for superledere

(Flytende N₂ har temp 77 K.)

Oksider

BaPb _{0.75} B _{0.25} O ₃	13
La _{1.85} Ba _{0.15} CuO ₄	36
Bi ₂ Sr ₂ CaCu ₂ O ₈	84
Tl ₂ Ba ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀	125

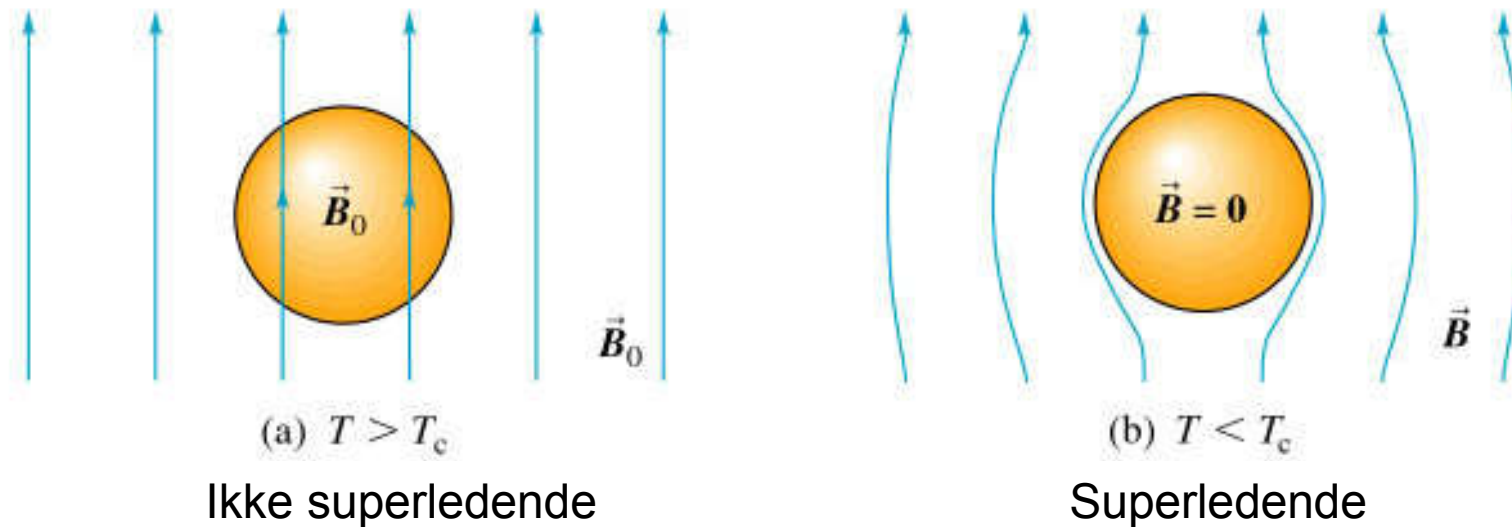
Fullerener

K ₃ C ₆₀	18
Rb ₃ C ₆₀	28
Cs ₂ RbC ₆₀	33

(Tab. 21.4 i Lillestøl, Hunderi, Li²⁵en)

Superledere

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



dvs. superledere er perfekt diamagnetisk:

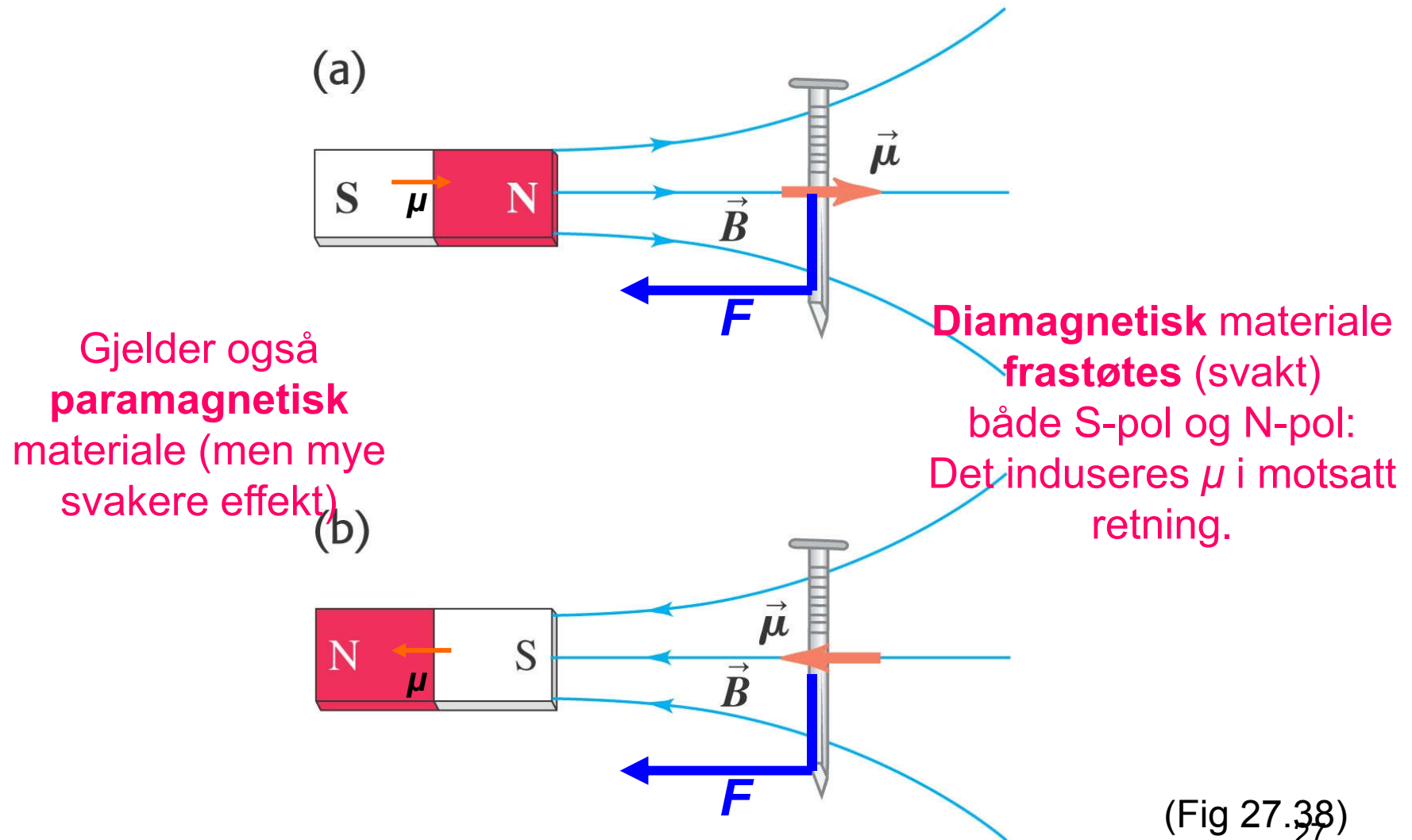
(Fig 29.26)

$$\chi_m = -1 \quad \mu_r = 0$$

ved rimelig svake magnetfelt.

(Meissnereffekt)

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

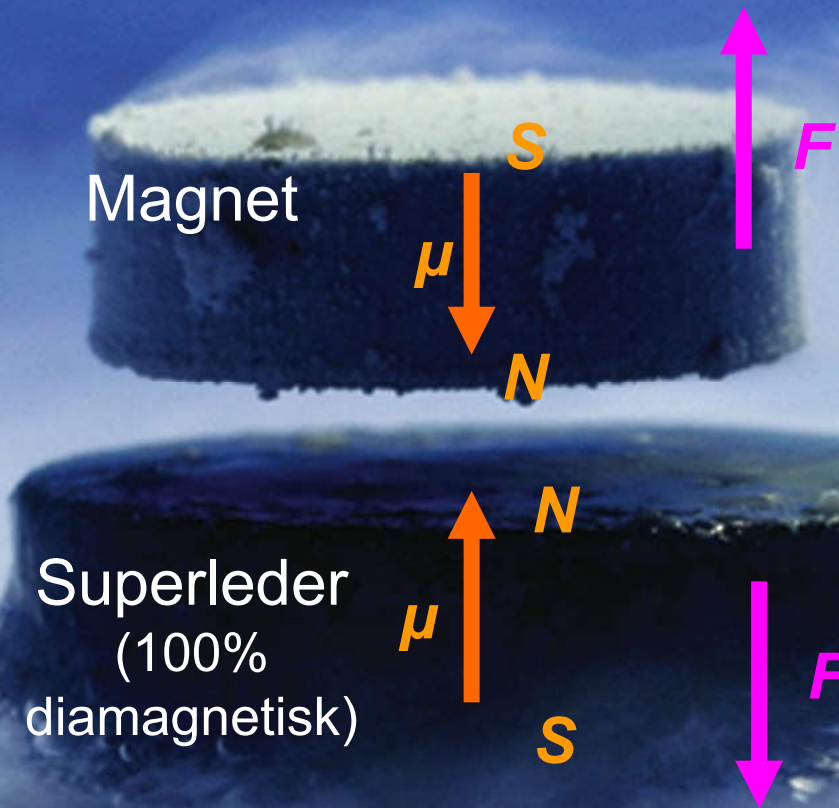


Materiale		Magnet
ferromagnetisk	$\mu_r \gg 1$	tiltrekkes sterkt
paramagnetisk	$\mu_r \approx 1^+$	tiltrekkes svakt
diamagnetisk	$\mu_r \approx 1^-$	frastøtes svakt
superleder	$\mu_r \approx 0$	frastøtes sterkt

Demo av vann som diamagnetisk materiale:

<http://www.youtube.com/watch?v=jyqOTJOJSoU>

Magnetisk levitasjon

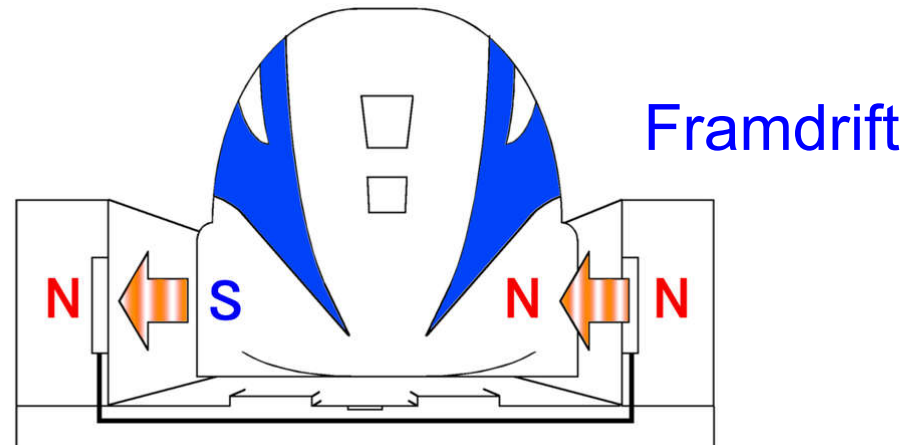
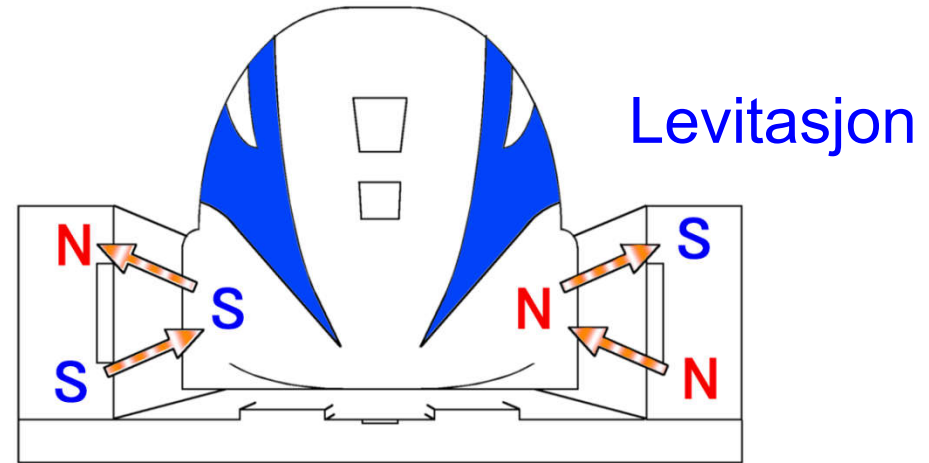
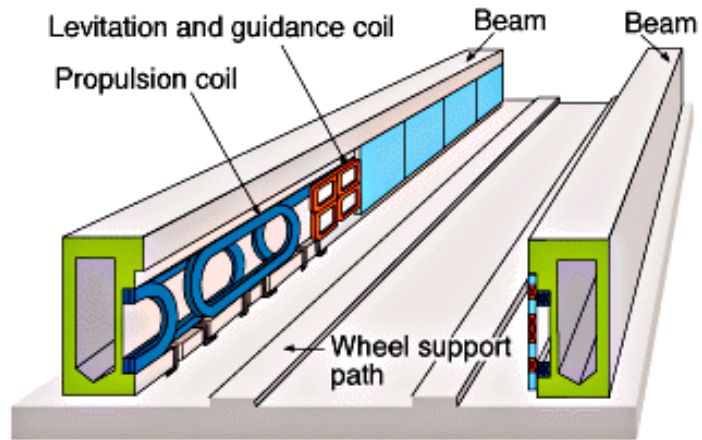


Demo: <http://www.youtube.com/watch?v=nWTSzBWEsms>

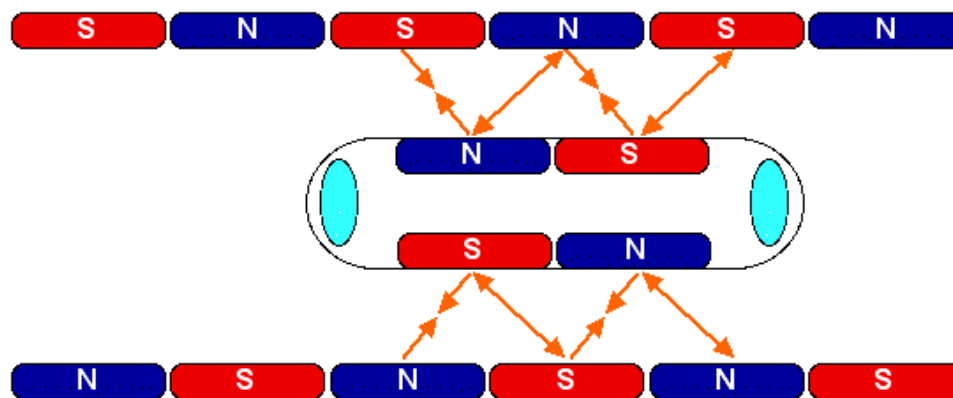
Nytte av superledere:

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

JR-Maglev:



Maglev-leiketøystog:
Se: [Simuleringside](#)



Kap. 29: Oppsummering: Elektromagnetisk induksjon

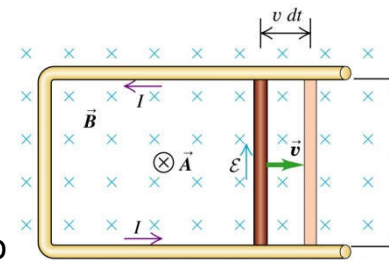
- Faradays lov for homogent \mathbf{B} -felt og plan strømsløyfe:

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

- Tre ulike tilfeller:

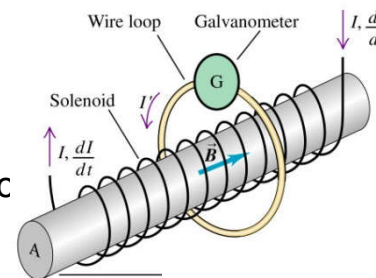
- 1) Bevegelsesindusert, endring i $A(t)$:

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



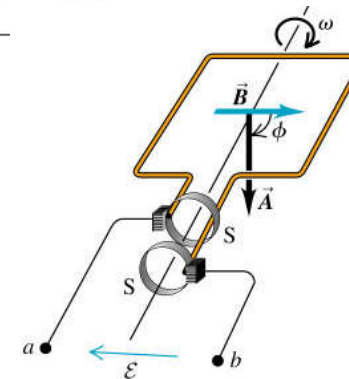
- 2) Tidsvariasjon i $B(t)$:

$$\mathcal{E} = - d\Phi_B/dt = - dB(t)/dt \cdot A \cdot \cos 0^\circ$$



- 3) Rotasjon, endring i $\varphi(t)$:

$$\mathcal{E} = - d\Phi_B/dt = - B \cdot A \cdot d(\cos \varphi) / dt$$



Kap. 29: Oppsummering: Elektromagnetisk induksjon

- Faradays lov:

$$\mathcal{E} = - d\Phi_B/dt, \quad \text{der } \Phi_B = \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}.$$

Dvs: endring i magnetisk fluks Φ_B induserer ems.

Generelt, induksjon av \mathbf{E} -felt i lukket kurve:

$$\int \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = \mathcal{E} = - d\Phi_B/dt$$

- Lenz' lov: Indusert strøm motsetter seg fluksendringen.
- Virvelstrømmer.
- Forskyvningsstrøm: $I_d = d\Phi/dt$, der $\Phi = \int \mathbf{D} \cdot d\mathbf{A}$.

Ampere-Maxwells lov:

$$\int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = \mu_0 (I + I_d)$$

$$\int \mathbf{H} \cdot d\mathbf{s} = I + I_d$$

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

Maxwells likninger i [Notat 4](#)

Integralform

$$\oint \vec{D} \cdot d\vec{A} = Q \quad \boxed{\text{Gauss' lov } \mathbf{D}}$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0 \quad \boxed{\text{Gauss' lov } \mathbf{B}}$$

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{\ell} = I + \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad \boxed{\text{Amperes lov}}$$

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{\ell} = -\frac{\partial \Phi_B}{\partial t} \quad \boxed{\text{Faradays lov}}$$

Differensialform

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t},$$

Elmagsirkelen

og Maxwelllikningene

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{\ell} = -\frac{\partial \Phi_B}{\partial t} \quad (4) \text{ (Faraday)}$$

- $\partial/\partial t$

q
(Coulomb)
(Gauss)

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q}{\epsilon_0} \quad (1)$$

$$\Phi_B = \iint \mathbf{B} \, d\mathbf{A}$$

E

$$B = \mu H$$

$$D = \epsilon E$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (2)$$

$$\Phi = \iint \mathbf{D} \, d\mathbf{A}$$

H

(Bio-Savart)

(Ampere)

I

$\partial/\partial t$

(utvida Ampere)

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{\ell} = I + \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (3)$$