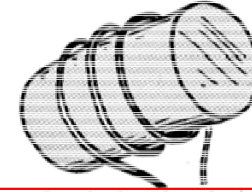


Magnetisme

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

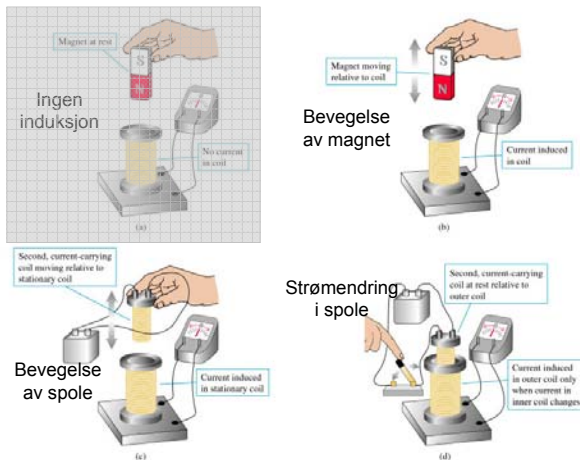


Hvilke er rett, a,b,c eller d?

- 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)

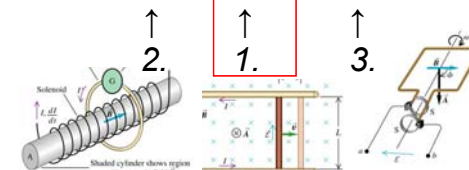
Faradays lov:

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

eller industert \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)

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

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

(Fig 29.17)

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)

Eksempel AC-motor:

(eller se Y&F: Ex. 29.5)

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

Hva er tilbakeindusert ems ved 1680 RPM?

$f = 1680 \text{ RPM} = 1680 (\text{min})^{-1}$
 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
 $I(t) = (V_{\text{inn}} - \mathcal{E})/R = \underline{24 \text{ V}} \cdot \sin \omega t / R$

Faradays lov: 1. Endring $A(t)$:

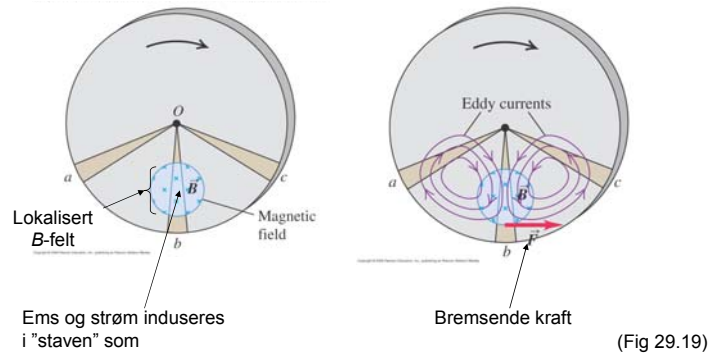
$$\mathcal{E} = -d\Phi_B/dt = -B \cdot dA(t)/dt \cdot \cos 0^\circ$$

Arbeid å flytte tverrstaven
 Mekanisk arbeid = elektrisk dissipert energi i R

(Fig 29.12)

Virvelstrømmer (Y&F 29.6, ikke pensum).

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

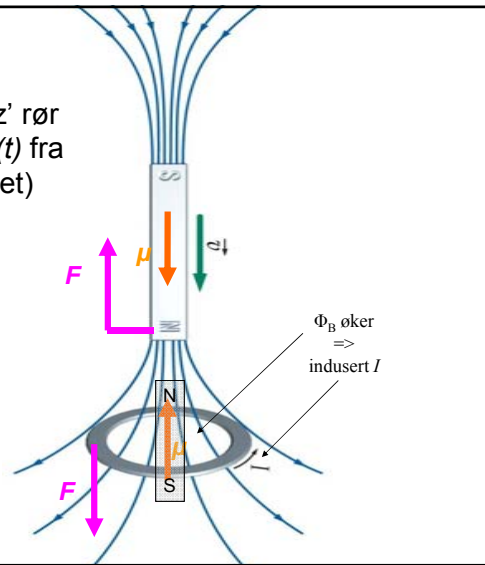


"Eddy current pendulum"

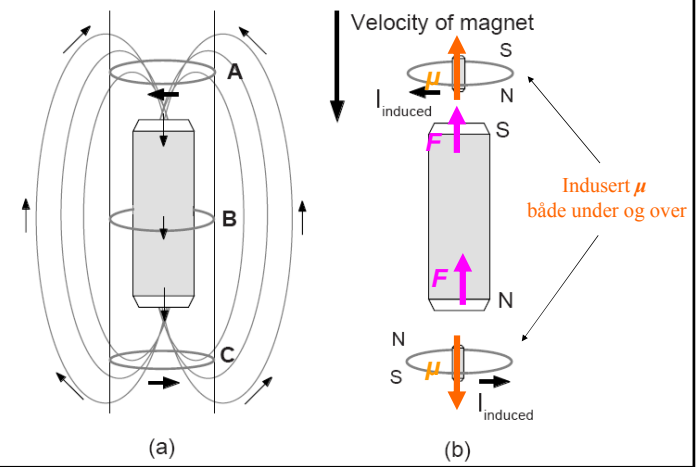
Video på nettside <http://demoroom.physics.ncsu.edu/html/demos/163.html>



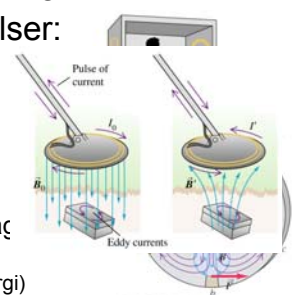
Virvelstrøm i Lenz' rør
(tidsvarierende $B(t)$ fra bevegende magnet)



Lenz' rør



Virvelstrømmer. Anvendelser:



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

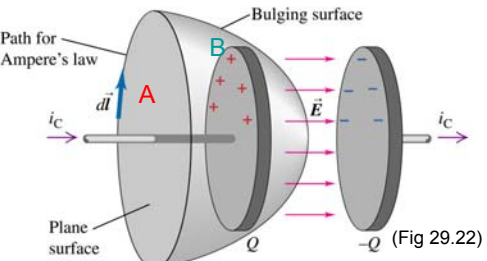
Problem med Amperes lov?

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

= strøm gjennom enhver valgt flate omsluttet av integrasjonsvegen

Plan flate **A**: strøm i_C gjennom flata

Kurvet flate **B**: ingen strøm gjennom flata!

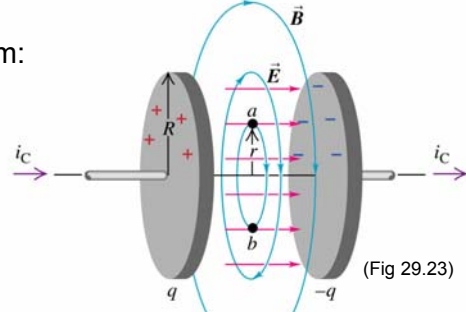


(Fig 29.22)

Løsning: "Forskyvningsstrøm"

Forskyvningsstrøm:

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

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


(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:

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

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

Maxwells likninger i [Notat 4](#)

Integralform		Differensialform
$\oint \vec{D} \cdot d\vec{A} = Q$	Gauss' lov \mathbf{D}	$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho$
$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$	Gauss' lov \mathbf{B}	$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$
$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = I + \frac{\partial \Phi}{\partial t}$	Amperes lov	$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$
$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0$	Faradays lov <small>statikk dynamikk</small>	$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$

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
<i>Legeringer og sammensetninger</i>	
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

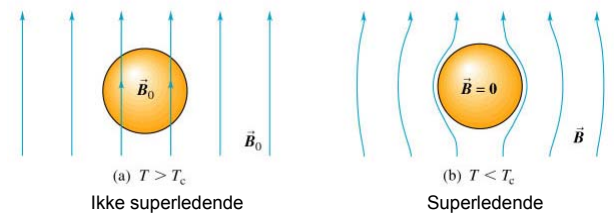
(Flytende N_2 har temp 77 K.)

<i>Oksider</i>	
$\text{BaPb}_{0.75}\text{B}_{0.25}\text{O}_3$	13
$\text{La}_{1.85}\text{Ba}_{0.15}\text{CuO}_4$	36
$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$	84
$\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$	125
<i>Fullerener</i>	
K_3C_{60}	18
Rb_3C_{60}	28
$\text{Cs}_2\text{RbC}_{60}$	33

(Tab. 21.4 i Lillestøl, Hunderi, Lien)

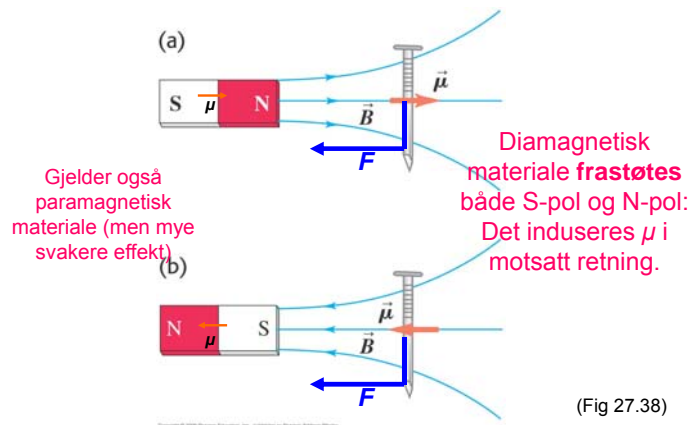
Superledere

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



dvs. superledere er perfekt diamagnetisk: (Fig 29.25)
 $\chi_m = -1$ $\mu_r = 0$
 ved rimelig svake magnetfelt.
 (Meissnereffekt)

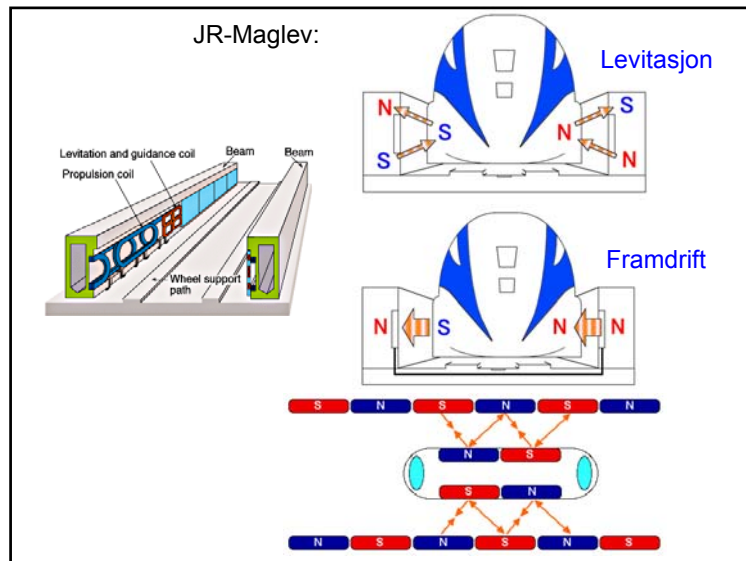
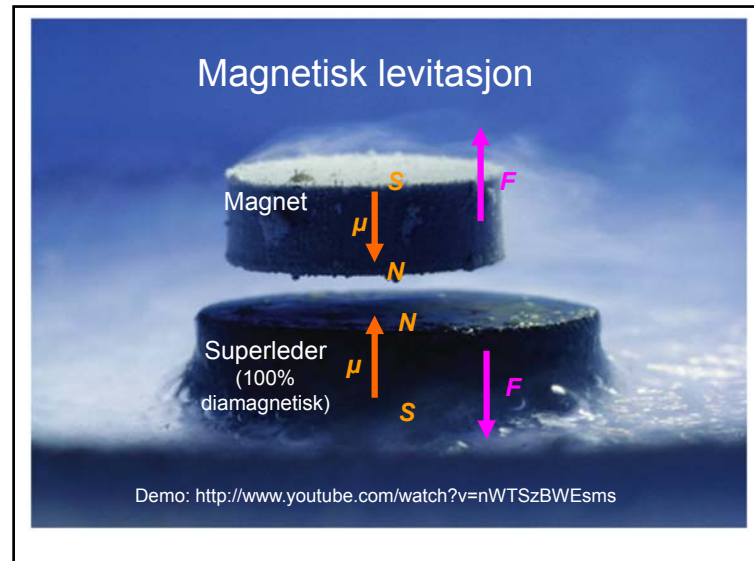
Jern tiltrekkes både S-pol og N-pol (i inhomogent felt).



Materiale	Magnet
ferromagnetisk	tiltrekkes sterkt
paramagnetisk	tiltrekkes svakt
diamagnetisk	frastøtes svakt
superleder	frastøtes sterkt

Demo av vann som diamagnetisk materiale:

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



Nytte av superledere:

- Produksjon av sterke B-felt ($> 1 \text{ T}$):
 - 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

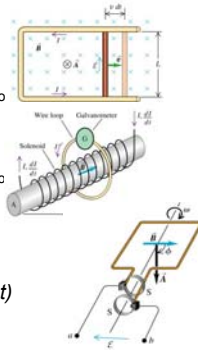
- Faradays lov for homogent \mathbf{B} -felt og plan strømsløyfe:
 $\mathcal{E} = -d\Phi_B/dt = -d/dt \{B(t) \cdot A(t) \cdot \cos\varphi(t)\}$

- 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:
 $\mathcal{E} = -d\Phi_B/dt$, 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 $\Phi = \int \mathbf{D} \cdot d\mathbf{A}$.
Modifikasjon av Amperes 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 fire likninger

Integralform

Differensialform

$$\oint \vec{D} \cdot d\vec{A} = Q$$

Gauss' lov \mathbf{D}

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

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

Gauss' lov \mathbf{B}

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

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

Amperes lov

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

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{\ell} = -\frac{\partial \Phi_B}{\partial t}$$

Faradays lov

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

Elmagsirkelen

