

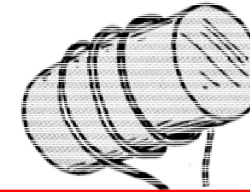
Magnetisme

- **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.

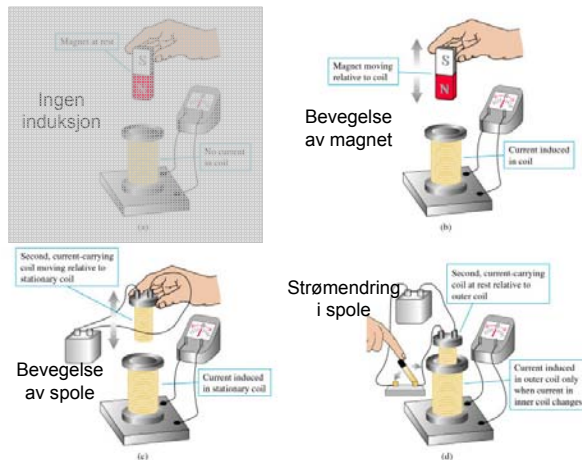


Hvilke er rett, a,b,c eller d?

- 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)

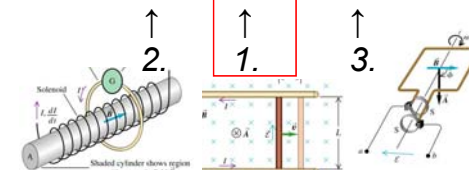
Faradays lov:

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

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

Homogen **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)

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

$$\mathcal{E} = - d\Phi_B/dt = - B \cdot dA(t)/dt \cdot \cos\varphi$$
 - Tidsvariasjon i $B(t)$:

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

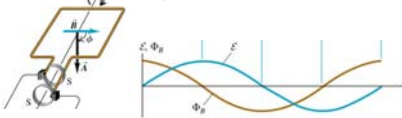
$$\mathcal{E} = - d\Phi_B/dt, \quad \text{der } \Phi_B = \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}$$

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.

Eksempel AC-motor (ikke forelest 2014):
 (eller se Y&F: Ex. 29.5)
 $B = 0,20 \text{ T}$
 $N = 500$
 $A = (0,10 \text{ m})^2 = 0,010 \text{ m}^2$



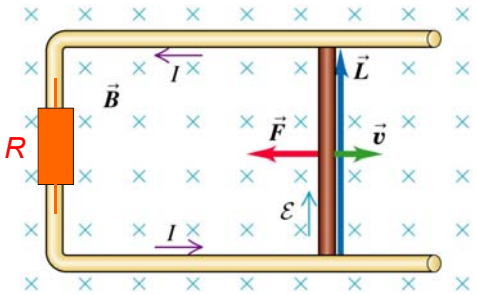
Hva er tilbakeindusert ems ved 1680 RPM?

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

Gir ems'en:
 $\mathcal{E} = N \cdot B \cdot A \cdot \omega \cdot \sin \omega t$
 $= 500 \cdot 0,20 \text{ T} \cdot 0,010 \text{ m}^2 \cdot 176 \text{ s}^{-1} \cdot \sin \omega t$
 $= \underline{176 \text{ V}} \cdot \sin \omega t$

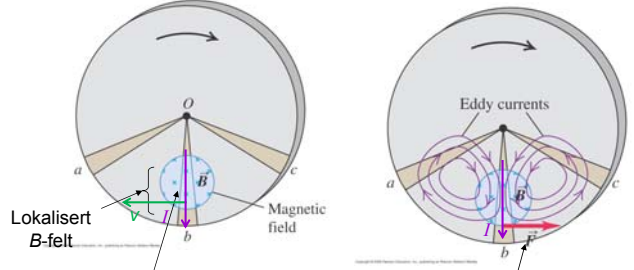
Hvis $V_{\text{inn}} = 200 \text{ V} \cdot \sin \omega t$
 er
 $I(t) = (V_{\text{inn}} - \mathcal{E})/R = \underline{24 \text{ V}} \cdot \sin \omega t / R$

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.



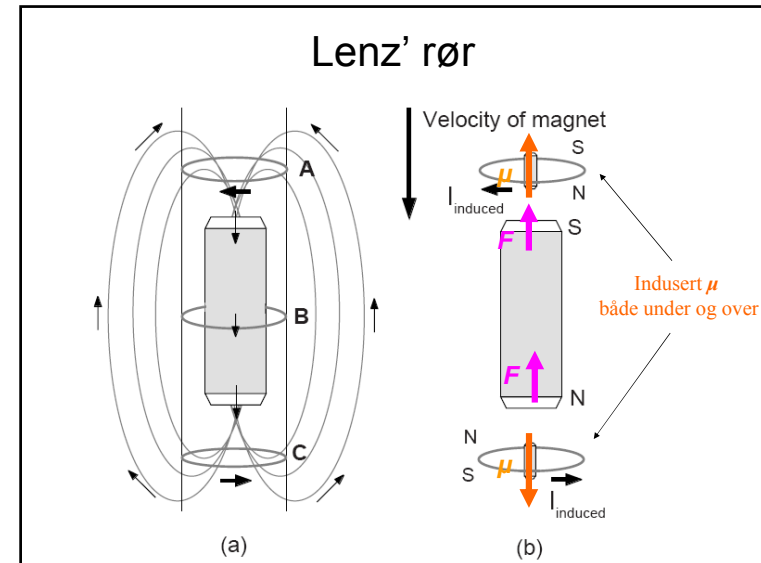
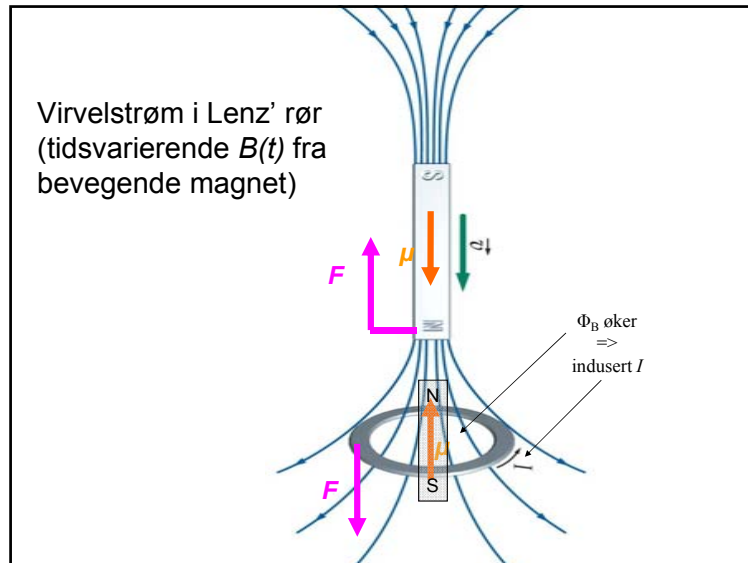
Lokalisert B -felt
 Magnetic field
 Ems og strøm induseres i "staven" som sveiper over B -feltet
 Eddy currents
 Bremsende kraft

(Fig 29.19)

"Eddy current pendulum"

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





Virvelstrømmer. Anvendelser:

- **Metalldetektor:**
 - Minesøking
 - Sikkerhetskontroll flyplasser
 - Søke etter vannrør
 - Deteksjon foran lyskryss
 - Søpelsortering (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**
(høyfrekvent strøm og ferromagn.materiale => stor B , samt liten inntrengningsdybde og stor resistans)
- **Induksjonssveising.**

Problem med Amperes lov?

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

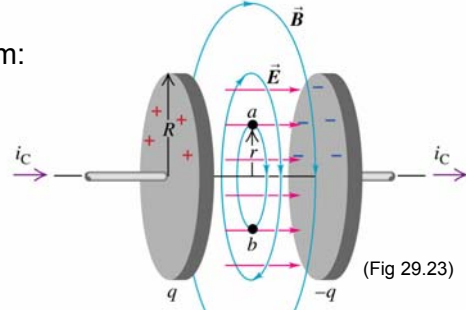
= strøm gjennom enhver valgt flate omsluttet av integrasjonsvegen

Plan flate **A**: strøm i_C gjennom flata
Kurvete flate **B**: ingen strøm gjennom flata!

(Fig 29.22)

Løsning: "Forskyvningsstrøm"

Forskyvningsstrøm:
 $I_d = d\Phi/dt$, 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.

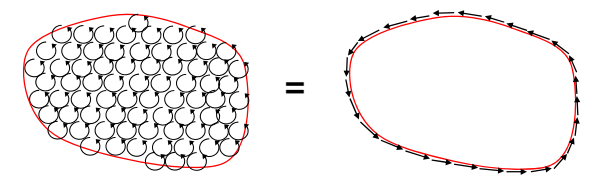
Modifikasjon av Amperes lov:
 $\int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = \mu_0 (I + I_d)$ $\int \mathbf{H} \cdot d\mathbf{s} = I + I_d$

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

Maxwells likninger i [Notat 4](#)

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

Stokes teorem for curl:



$$\iint_S \nabla \times \mathbf{H} \cdot d\mathbf{A} = \oint_{\Gamma} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{s}$$

Σ curl på flate = sirkulasjon på omhyllingskurve

$$\Rightarrow \nabla \times \mathbf{H} = \frac{\oint_{\Gamma} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{s}}{dA}$$

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)

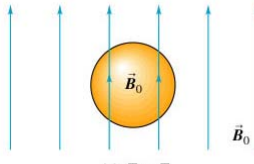
Metaller	T_c (K)	Kritiske temperaturer for superledere	
Al	1.18		
In	3.41		
Sn	3.72		
Ta	4.47		
V	5.40		
Pb	7.20		
Nb	9.25		
Hg	4.12		
Ga	1.07		
<i>Legeringer og sammensetninger</i>		<i>Oksider</i>	
Pb-In	7	BaPb _{0.75} Ba _{0.25} O ₃	13
Pb-Bi	8.3	La _{1.85} Ba _{0.15} CuO ₄	36
Nb-Ti	9.5	Bi ₂ Sr ₂ CaCu ₂ O ₈	84
Nb-Zr	10.7	Tl ₂ Ba ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀	125
Nb-N	16.0	<i>Fullerener</i>	
V ₃ Ge	15.3	K ₃ C ₆₀	18
V ₃ Si	16.3	Rb ₃ C ₆₀	28
Nb ₃ Sn	18.0	Cs ₂ RbC ₆₀	33
Nb ₃ Ge	23.2		

(Flytende N₂ har temp 77 K.)

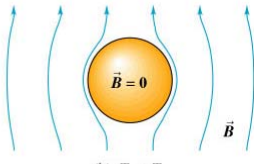
(Tab. 21.4 i Lillestøl, Hunderi, Lien)

Superledere

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



(a) $T > T_c$
Ikke superledende



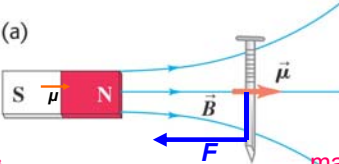
(b) $T < T_c$
Superledende

dvs. superledere er perfekt diamagnetisk: (Fig 29.25)

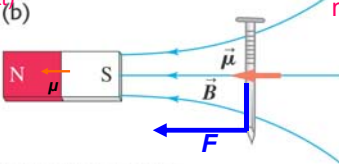
$\chi_m = -1$ $\mu_r = 0$

ved rimelig svake magnetfelt.
(Meissnereffekt)

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



(a)



(b)

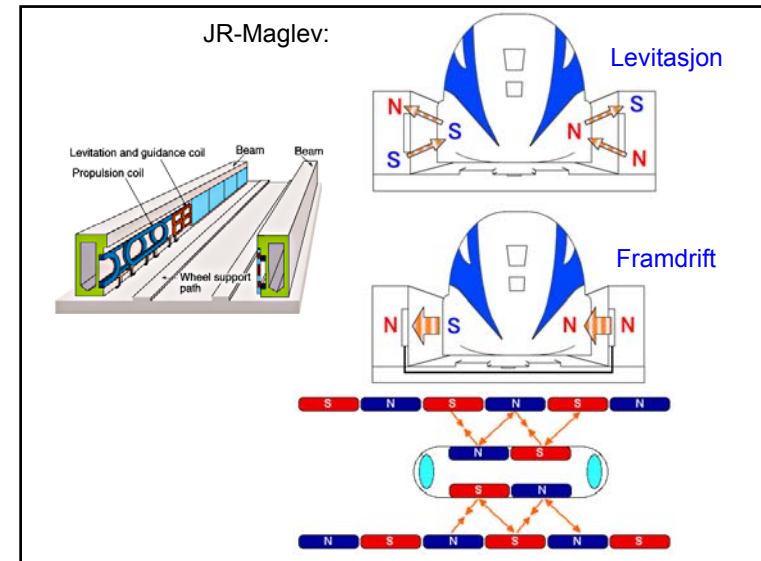
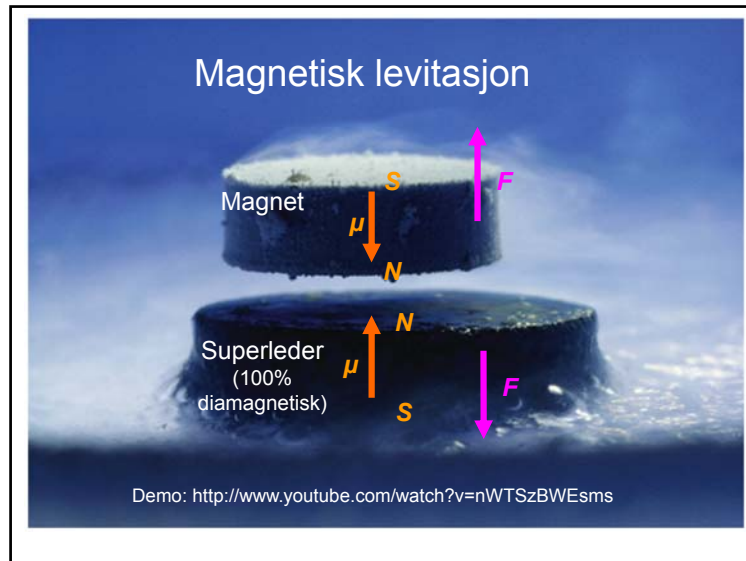
Diamagnetisk materiale **frastøtes** både S-pol og N-pol: Det indueres μ i motsatt retning.

Gjelder også paramagnetisk materiale (men mye svakere effekt)

(Fig 27.38)

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=jvqOTJOJSoU>



Nytte av superledere:

- Produksjon av sterke B-felt (> 1 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).

Kap. 29: Oppsummering: Elektromagnetisk induksjon

- Faradays lov for homogent 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 $\varphi(t)$:

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

The text includes three diagrams illustrating induced EMF: a rod moving in a magnetic field, a solenoid with a changing current, and a rotating coil in a magnetic field.

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 inducerer 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}	$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$
$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = I + \frac{\partial \Phi}{\partial t}$	Amperes lov	$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$
$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{\partial \Phi_B}{\partial t}$	Faradays lov	$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$

Elmagsirkelen

