22. Faradays lag

Kunskapsmål för kapitlet:
Kunna beräkna storleken och riktningen för elektriska fält som uppstår då vi har tidsberoende magnetfält

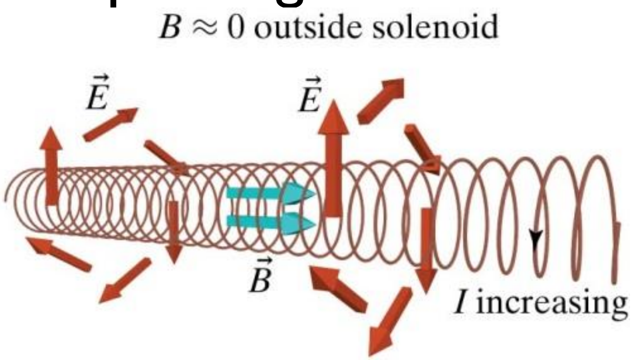
Helsingfors Universitet
Institutionen för fysik
T. Ahlgren

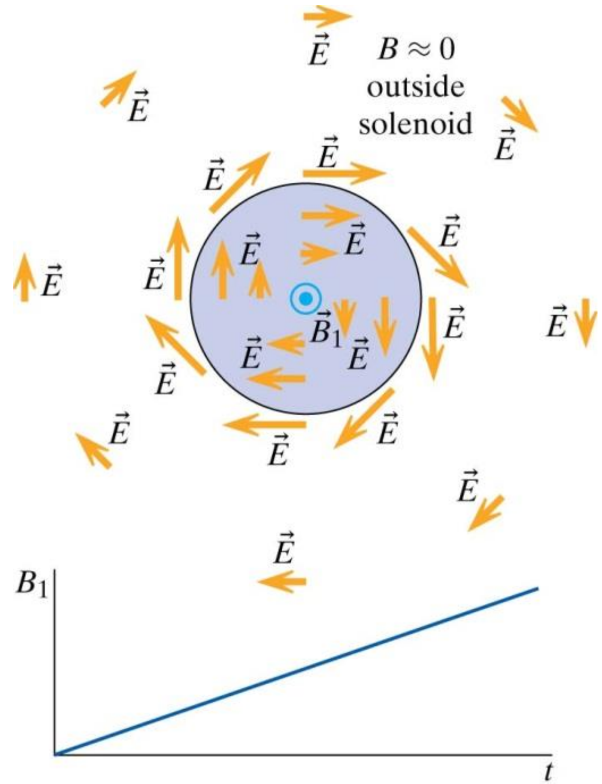
- Tidsberoende Magnetiskt Flöde ger upphov till cirkulärt Elektriskt Fält
- Det finns energi i Magnetfältet

Helsingfors Universitet
Institutionen för fysik
T. Ahlgren

Faradays lag

- Tidsvarierande magnetiska fält *inducerar* elektriska fält, eller elektrisk spänning i en krets





- Om strömmen genom en solenoid ökar, ökar magnetfältet, och detta ger upphov till ett elfält kring solenoiden
- Ett fält som på bilden kunde inte orsakas av stationära laddningar

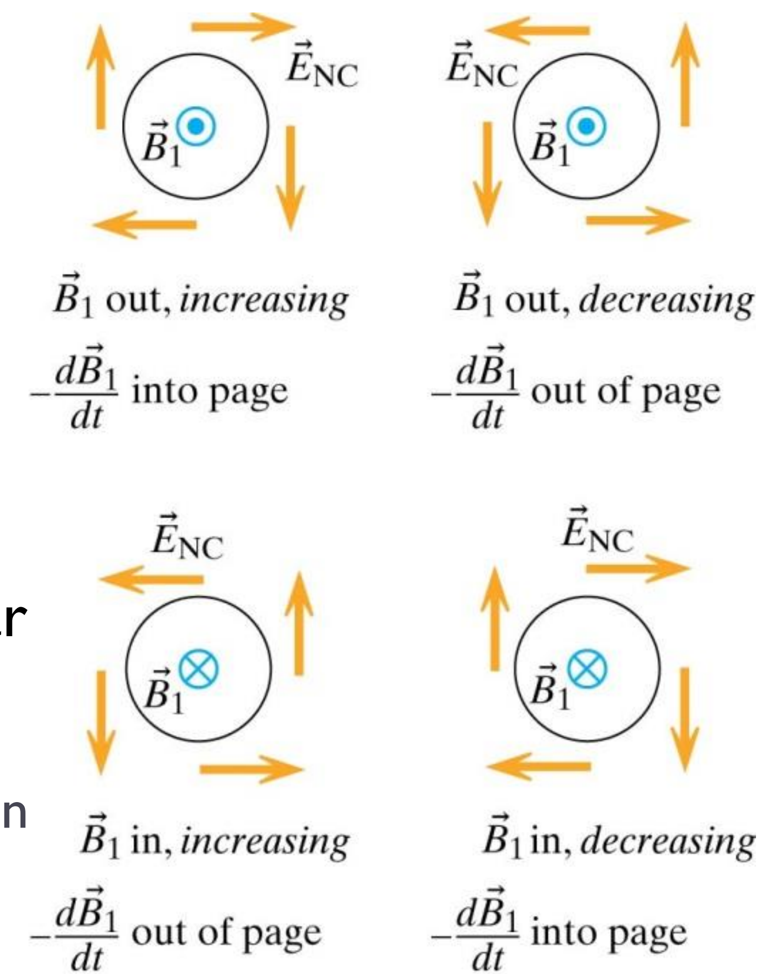
Varför inte?

  - Potentialskillnaden är oberoende av vägen vi väljer – alltså måste potentialskillnaden kring en sluten bana vara noll

Helsingfors Universitet
Institutionen för fysik
T. Ahlgren

Riktningen av $-d\vec{B}/dt$

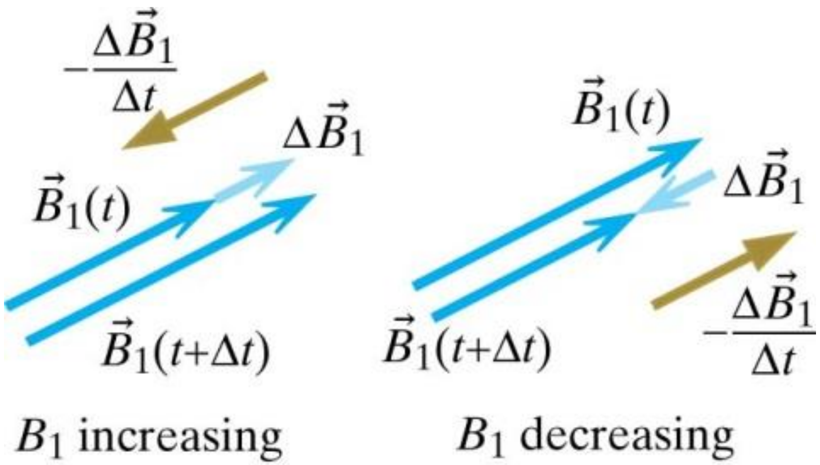
- Det inducerade fältet är proportionellt till $-d\vec{B}/dt$, dvs. *förändringen* i magnetfältet
- För att bestämma riktningen av det inducerade fältet måste vi veta riktningen av $-d\vec{B}/dt$, inte av $\vec{B}$!
- Figuren illustrerar vad som ses experimentellt
- *Högerhandsregeln* gäller: med tummen i riktning av $-d\vec{B}/dt$, visar fingrarna riktningen av det inducerade fältet
  - Märk att tecknet är beroende av vilken hand ni använder!!



Helsingfors Universitet
Institutionen för fysik
T. Ahlgren

Exempel

- Ett magnetfält vid golvet pekar uppåt och ökar. Om ni ser neråt på det mot golvet, åt vilket håll kröker sig det inducerade elfältet (med- eller motsols)?

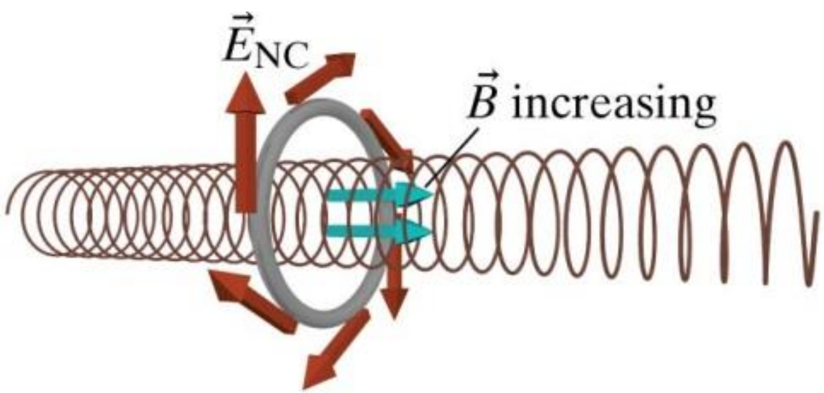


- Svar: Medsols

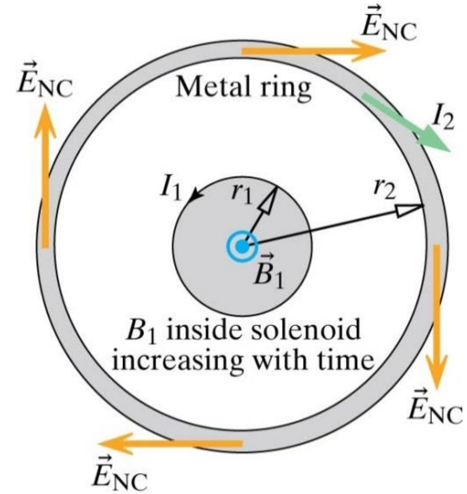
Helsingfors Universitet
Institutionen för fysik
T. Ahlgren

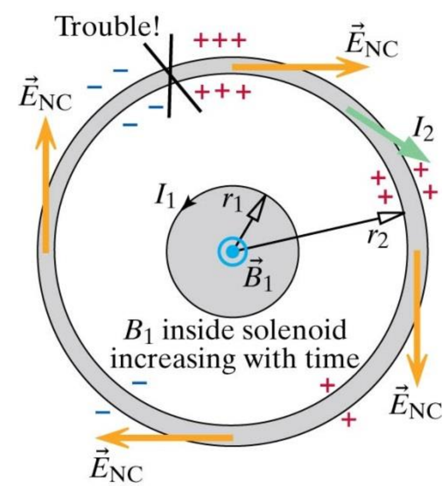
Ström från ett inducerat fält

- Vi placerar en ledande ring kring solenoiden
- Det inducerade fältet driver laddningar i ledningen precis som ett vanligt fält,



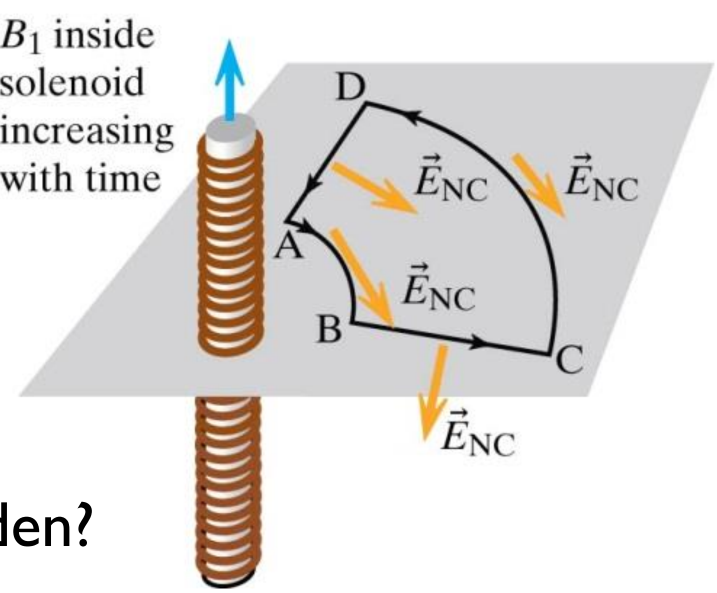
utan potentialskillnaden från ett batteri





Elektromotoriska spänningen (eng. *Emf*)

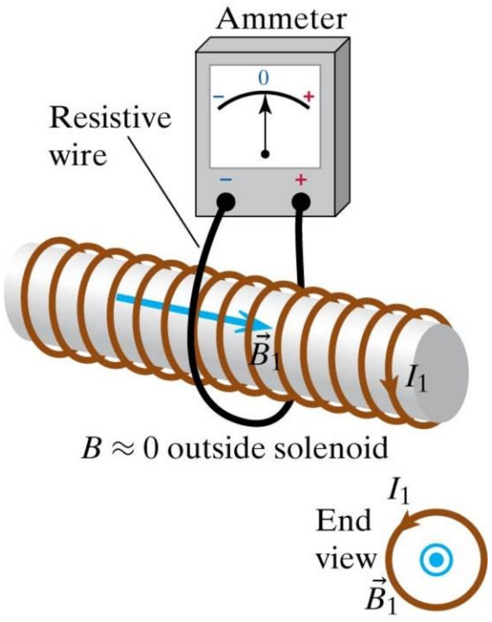
- Spänningen som driver strömmen ges helt enkelt av integralen över det inducerade fältet $ems = \oint \vec{E}_{ind} \cdot d\vec{l} = E_{ind}(2\pi r)$ där *r* är radien av den ledande ringen som vi integrerar längs
- Om vi dubblar ringens radie blir samtidigt fältet hälften mindre, så *ems* hålls konstant
- För kretsen i bilden är $ems = 0$
  - Sträckorna BC och DA ger inget bidrag, AB ger ett positivt bidrag, och CD ett negativt bidrag.



Händer det alls något i kretsen i bilden?

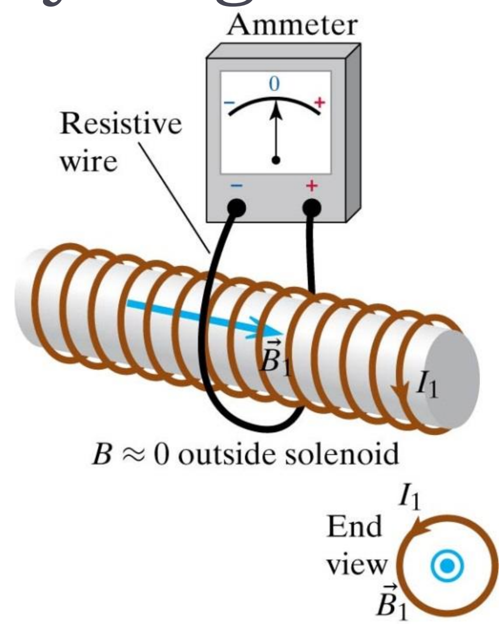
Faradays lag

- Faradays lag ger ett kvantitativt samband mellan förändringen i magnetfältet och magnituden av det inducerade fältet
- Det går lätt att experimentellt bestämma Faradays lag, t.ex. genom att mäta strömmen i en ledning runt ett varierande magnetfält

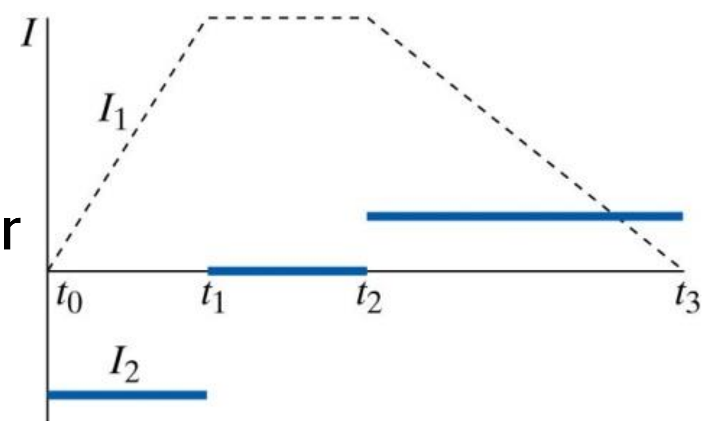


Helsingfors Universitet
Institutionen för fysik
T. Ahlgren

Experimentell bestämning av Faradays lag



1. Öka strömmen i solenoiden, vilket ökar $\vec{B}$
   - Vi kan avläsa en ström i negativ riktning
   - Om $d\vec{B}/dt \neq 0$ är $E_{ind} \neq 0$
2. Håll $\vec{B}$ konstant
   - Ingen ström går i kretsen
   - $\frac{d\vec{B}}{dt} = 0 \Rightarrow E_{ind} = 0$
3. Minska strömmen i kretsen dubbelt långsammare än den tidigare ökninger
   - Vi kan avläsa en ström som är hälften mindre än i punkt 1, i positiv riktning
   - $E_{ind} \propto d\vec{B}/dt$



Magnetiska flödet

- Ett sista experiment med en solenoid som har dubbelt större tvärsnitts area än den tidigare visar att E_{ind} också är proportionellt till solenoidens area

$$|ems| = \left|\frac{d}{dt}(B\pi r^2)\right|$$

- Termen i parentes är *magnetiska flödet*

$$\Phi_{mag} = \int \vec{B} \cdot \hat{n} dA$$

- Magnetiska flödet beräknas på samma sätt som det elektriska flödet i förra kapitlet

Helsingfors Universitet
Institutionen för fysik
T. Ahlgren

Faradays lag

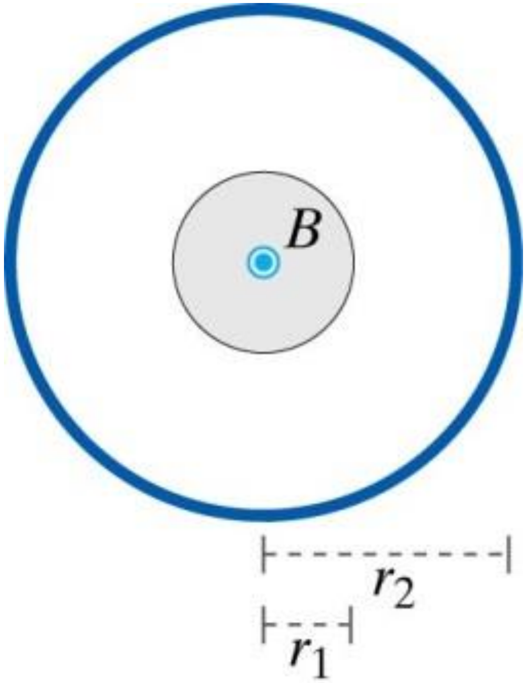
- Vi kan nu skriva Faradays lag

$$\oint \vec{E}_{ind} \cdot d\vec{l} = \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt}\int \vec{B} \cdot \hat{n} dA$$

- Magnetiska flödet i ekvationen beräknas över en yta som begränsas av den slutna integrationskurvan över vilken vi beräknar *ems*
- Faradays lag är en empirisk lag, den kan inte härledas från tidigare lagar vi har lärt oss

Exempel

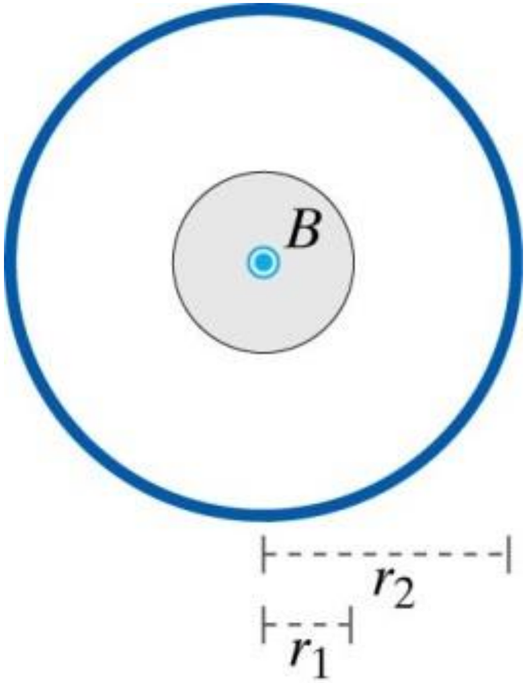
- Ett område med radien r_1 har ett jämnt magnetfält $\vec{B}$ ut ur pappret, som minskar med en takt av $|dB/dt|$. Det omringas av en ledande ring med radien $r_2 > r_1$ och resistansen R (se bilden)
  - Åt vilket håll flödar strömmen I i ringen?
  - Hur stor är strömmen I?
  - Hur ser elfältet ut och hur starkt är det vid den ledande ringen?



$$|ems| = \oint \vec{E}_{ind} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt}\int \vec{B} \cdot \hat{n}\, dA$$

- Åt vilket håll flödar strömmen I i ringen?

- Eftersom $\vec{B}$ minskar är $\Delta\vec{B}$ riktat in i pappret, och $-d\vec{B}/dt$ är riktat ut ur pappret. Strömmen flödar då motsols



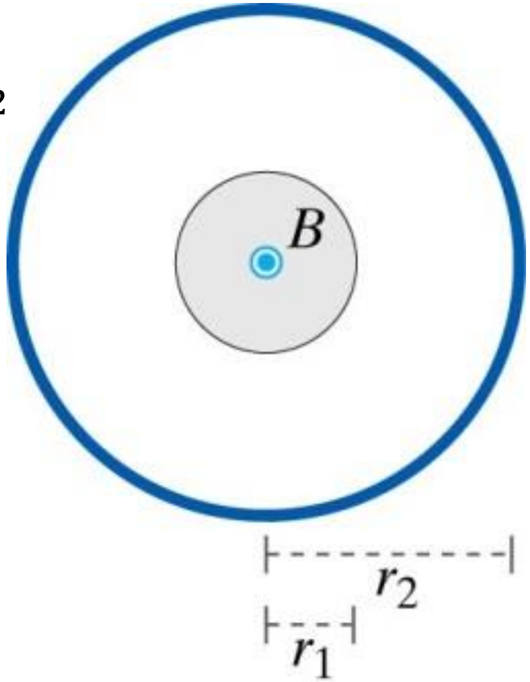
$$|ems| = \oint \vec{E}_{ind} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt}\int \vec{B} \cdot \hat{n}\, dA$$

Helsingfors Universitet
Institutionen för fysik
T. Ahlgren

- Hur stor är strömmen I?

- Vi känner till resistansen, så för att få strömmen räknar vi först *ems* med hjälp av Faradays lag:

$$|ems| = \left|\frac{d\Phi}{dt}\right| = \left|\frac{d(BA_1\cos 0)}{dt}\right| = \left|\frac{dB}{dt}\right| A_1 = \left|\frac{dB}{dt}\right| \pi r_1^2$$



- Med Ohms lag får vi sedan I

$$IR = \left|\frac{dB}{dt}\right| \pi r_1^2$$

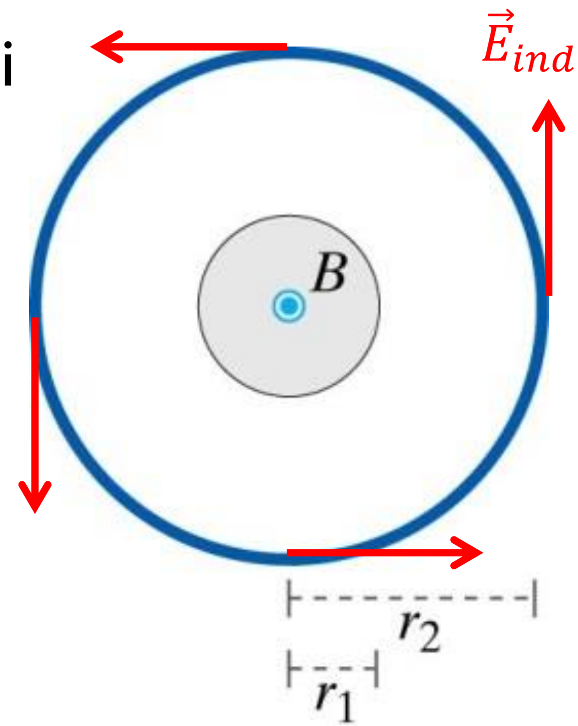
$$I = \left|\frac{dB}{dt}\right| \frac{\pi r_1^2}{R}$$

där R är resistansen i ringen

$$|\text{ems}| = \oint \vec{E}_{ind} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt}\int \vec{B} \cdot \hat{n}\, dA$$

- Hur ser elfältet ut och hur starkt är det vid den ledande ringen?

- Elfältet tangerar överallt ringen i riktning motsols, och har konstant styrka på avståndet r_2
- Från *ems* som vi beräknade tidigare har vi



$$\oint \vec{E}_{ind} \cdot d\vec{l} = ems$$

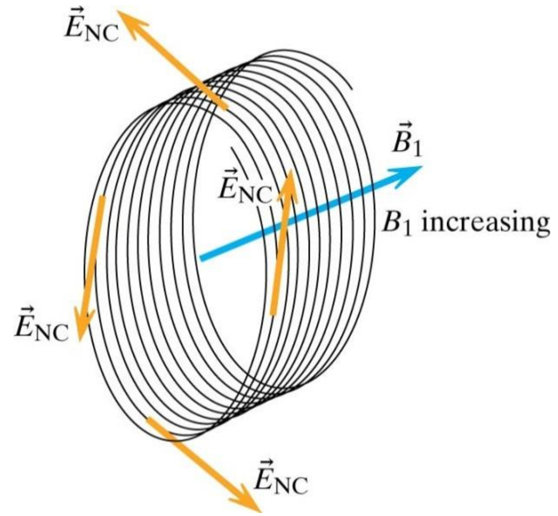
$$E_{ind}(2\pi r_2) = \left|\frac{dB}{dt}\right| \pi r_1^2$$

$$E_{ind} = \frac{1}{2}\left|\frac{dB}{dt}\right| \frac{r_1^2}{r_2}$$

Faradays lag för en spole

- Om man lägger en spole med *N* varv kring ett varierande magnetfält, kommer den inducerade spänningen att vara *N* gånger spänningen i ett varv av ledningen

$$ems = -N\frac{d\Phi_{mag}}{dt}$$



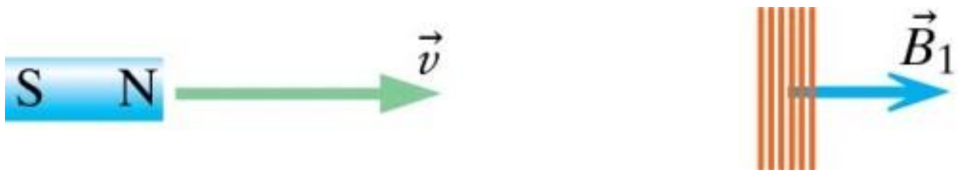
- Märk dock att detta kommer att ge samma *ström* som med ett varv, eftersom vi har *N* gånger spänningen men också *N* gånger resistansen!

Helsingfors Universitet
Institutionen för fysik
T. Ahlgren

Spolar och magneter i rörelse

- Andra sätt att få ett varierande magnetfält
  - Sätta en spole med konstant ström i rörelse i förhållande till andra spolen

  - Sätta en magnet i rörelse i förhållande till spolen



  - Rotera en magnet (eller spole) i förhållande till andra spolen

Helsingfors Universitet
Institutionen för fysik
T. Ahlgren

Exempel

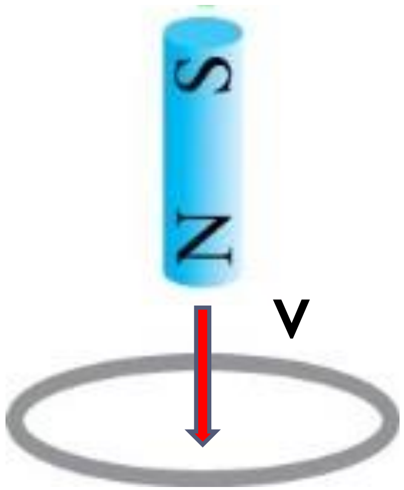
- Om vi håller en stavmagnet över en ledande ring som på bilden, och lyfter den uppåt, i vilken riktning kommer strömmen att gå?

- Svar: medsols

Helsingfors Universitet
Institutionen för fysik
T. Ahlgren

Exempel

- Vi fäller en stavmagnet genom en ledande ring, vad händer, känner magneten en extra kraft förutom gravitationskraften?



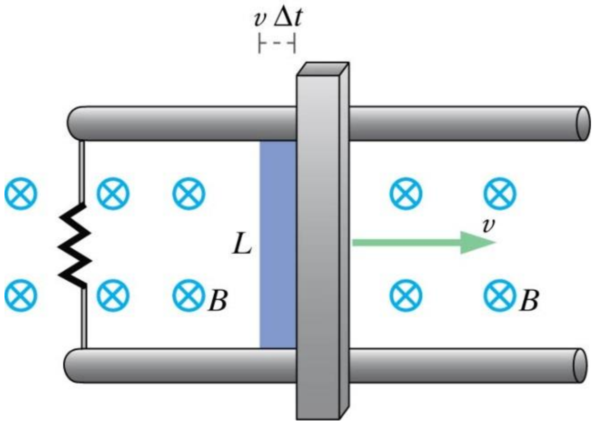
Helsingfors Universitet
Institutionen för fysik
T. Ahlgren

En inducerad ström från en inducerad ström från en inducerad ström…

- En varierande ström i en spole orsakar ett varierande magnetfält, som inducerar en ström i en annan spole
- Om den inducerade strömmen varierar, (dvs. om $d^2B_1/dt^2 \neq 0$) orsakar den ett varierande magnetfält i andra spolen, som inducerar en ström i första spolen
- Denna ström, om den är varierande, inducerar igen en ström i andra spolen
- Osv…
  - Denna effekt är oftast så liten att den kan försummas, och vi kommer för det mesta inte att ta den med i beaktande i våra räkningar

Varierande magnetiskt flöde

- Vi har sett att *ems* ges av varierande flöde Φ_{mag}
- Ett varierande magnetfält ger ett varierande flöde genom en yta, men flödet kan varieras också genom att variera ytans area i ett konstant fält



- Detta är bekant från tidigare (kap. 21), och beskrivs av samma Faradays lag
  - Eftersom $$\Delta\Phi_{mag} = B_{\perp}\Delta A = B(Lv\Delta t)$$

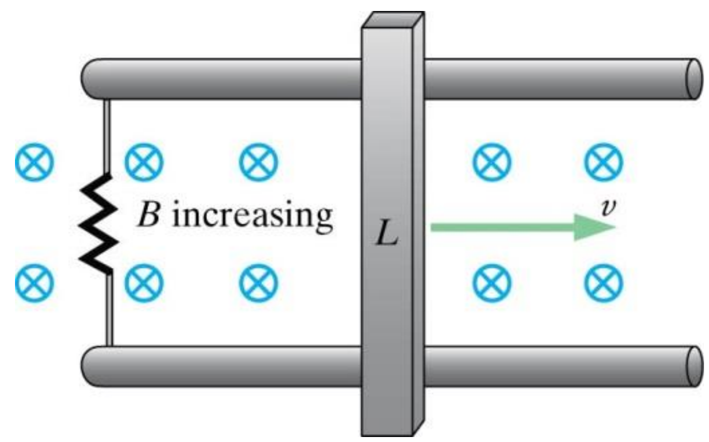
  har vi att $$ems = vBL = \left|\frac{d\Phi_{mag}}{dt}\right|$$

Helsingfors Universitet
Institutionen för fysik
T. Ahlgren

Flödets tidsderivata

- Båda tidigare nämnda effekter kan vara närvarande i samma situation, om man t.ex. tänker sej föregående situation med en stav i rörelse, och samtidigt varierar magnetfältet.

$$\frac{d\Phi_{mag}}{dt} = \frac{d}{dt}(B_\perp A)$$
$$= \frac{dB_\perp}{dt}A + B_\perp \frac{dA}{dt}$$
$$= \frac{dB_\perp}{dt}A + B_\perp L v$$



Enheter

- Magnetiska flödet $\Phi_{mag} = \int \vec{B} \cdot \hat{n} dA$ har enheten

Wb (weber). $1\ Wb = 1\ T\ m^2 = 1\ \frac{J}{A} = 1\ V\ s = 1 \frac{kg\ m^2}{s^2\ A}$ (T = tesla, V = volt, J = joule, A = ampere)

- Proportionalitetskonstanten μ_0 kallas permeabilitet (i vakuum), och kan härledas från definitionen av ampere
  - En ampere är den ström som, då den passerar genom två oändligt långa, raka ledare som ligger en meter ifrån varandra i vakuum, ger upphov till en kraft på $2\ \cdot 10^{-7}\ N/m$ mellan ledningarna
  - Kraften mellan två ledningar ges av $F = \frac{\mu_0 I_1 I_2 L}{2\pi a}$ där a är avståndet mellan ledningarna, och L är längden

$$2 \cdot 10^{-7} N = \frac{\mu_0 \times 1A \times 1A \times 1m}{2\pi \times 1m}$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} H m^{-1}$$

där $H = \frac{Wb}{A} = N\ m/A^2 = J/A^2$ är enheten henry för induktans

Helsingfors Universitet
Institutionen för fysik
T. Ahlgren

Maxwells ekvationer

- Gauss lag för elektricitet: $$\oint \vec{E} \cdot \hat{n}\, dA = \frac{\sum q_{inne}}{\varepsilon_0}$$
- Gauss lag för magnetism: $$\oint \vec{B} \cdot \hat{n}\, dA = 0$$
- Faradays lag: $$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt}\int \vec{B} \cdot \hat{n} dA$$
- Amperes lag (ofullständig): $$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \sum I_{innuti}$$

Helsingfors Universitet
Institutionen för fysik
T. Ahlgren

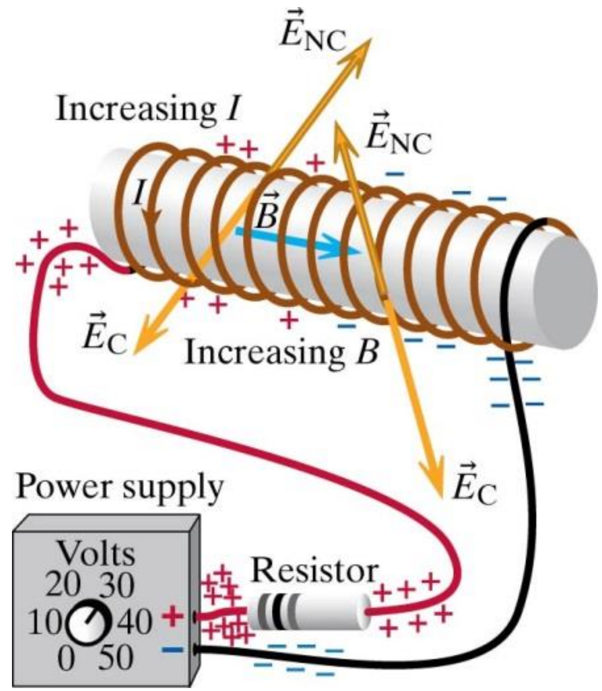
Självinduktans

- En solenoid med varierande ström kommer att ge upphov till en inducerad spänning i sej själv
  - Betrakta kretsen på bilden
  - Då strömmen i kretsen ökar, ökar magnetfältet och det magnetiska flödet genom solenoiden. Detta betyder att en själv-inducerad spänning uppstår i kretsen:

$$ems = \left|\frac{d\Phi_{mag}}{dt}\right|$$

$B = \mu_0 NI/d$ i en solenoid med längden *d*

(vi räknade detta tidigare med Amperes lag)



Vad blir *ems* som funktion av strömmen *I* i kretsen?

Helsingfors Universitet
Institutionen för fysik
T. Ahlgren

$$ems = \left|\frac{d\Phi_{mag}}{dt}\right| = \frac{d}{dt}\left[\frac{\mu_0 NI}{d}\pi R^2\right] = \frac{\mu_0 N}{d}\pi R^2 \frac{dI}{dt}$$

- För en solenoid med *N* varv och längden *d* får vi

$$ems = -N\left[\frac{\mu_0 N}{d}\pi R^2 \frac{dI}{dt}\right] = -\frac{\mu_0 N^2}{d}\pi R^2 \frac{dI}{dt} = -L\frac{dI}{dt}$$

- Proportionalitetskonstanten L, som bara beror av solenoidens form (längd, diameter och antal varv), kallas för ***självinduktans***

$$L = \frac{\mu_0 N^2}{d}\pi R^2$$

- Självinduktansens enhet är ”*henry*” *H* (= *V s/A*)
- Den inducerade spänningen motsätter sej förändringen i strömmen
- Effekten är som att lägga ett batteri ”fel väg” i kretsen
- En komponent med induktans i en krets kallas för en **induktor** eller **spole**

Helsingfors Universitet
Institutionen för fysik
T. Ahlgren

Exempel

- En spole har 100 varv, är 5 mm lång och har tvärsnittsarean $8 \times 10^{-4}\mathrm{m}^2$.
- a) Hur stor är självinduktansen?
- b) Beräkna den inducerade spänningen i en krets med denna spole, då strömmen i kretsen ökar från 0 till 10 A på 5 μs.

$$L = \frac{\mu_0 N^2}{d} A \approx \frac{4\pi 10^{-7} 100^2 \cdot 8 \times 10^{-4}}{5 \times 10^{-3}} \approx 2\, mH$$

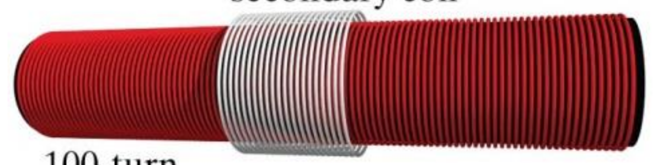
$$ems = -L\frac{dI}{dt} \approx -2 \times 10^{-3}\, H \frac{10\, A}{5 \times 10^{-6}\, s} \approx -4000\, V$$

Helsingfors Universitet
Institutionen för fysik
T. Ahlgren

- Säg att vi har en primär spole med $N_1 = 100$ varv och längden $d = 0.1\ m$, och en sekundär spole virad kring den med $N_2 = 20$ varv, som på bilden.

- Vi kopplar primärspolen till en växelström med spänningen $\Delta V_{max} \cos \omega t$
- Magnetiska fältet i primärspolen är $B = \mu_0 N_1 I / d$
- Om tvärsnittsarean är A, har vi för ett varv av sekundärspolen: $ems = A dB/dt$

- Totala spänningen i sekundärspolen ges då av:



$$ems_2 = N_2 A \frac{dB}{dt} = N_2 A \frac{d}{dt}(\mu_0 N_1 I/d) = N_2 A(\mu_0 N_1/d)\frac{dI}{dt}$$

- Spänningen i primärspolen är (från tidigare):

$$ems_1 = L\frac{dI}{dt} = A\frac{\mu_0 (N_1)^2}{d}\frac{dI}{dt}$$

- Jämför vi dessa ser vi att

$$ems_2 = \frac{N_2}{N_1} ems_1 = 0.2\, ems_1$$

- Spänningen har alltså sjunkit till en femtedel

Helsingfors Universitet
Institutionen för fysik
T. Ahlgren

Energin lagrad i en spole

- Då en ström börjar gå genom en spole, induceras en motspänning i kretsen
- Denna inducerade spänning gör att effekten som behövs för att öka strömmen genom spolen är:

$$P = \frac{dW}{dt} = I\Delta V = I \cdot (ems) = LI\frac{dI}{dt}$$

- Den totala energin W som behövs för att strömmen genom en spole skall öka från noll till *I*, får vi genom att integrera (vi har bytt integrationsvariabel till I'):

$$W_{tot} = \int_0^I LI'dI' = L\left[\frac{I^2}{2}\right]_0^I = \frac{1}{2}LI^2$$

Helsingfors Universitet
Institutionen för fysik
T. Ahlgren

- Denna energi är *lagrad* i magnetfältet inne i spolen.
  - Detta är alltså inte samma sak som i ett motstånd *R*: där förbrukas energi

- Trots att vi beräknade detta för en spole, är det ett helt allmänt resultat.

- Tidigare har vi lärt oss att energidensiteten i en kondensator är $½\varepsilon_0 E^2$

- Vi kan nu uttrycka den totala elektriska och magnetiska *energidensiteten*:

$$\frac{energi}{volym} = \frac{1}{2}\varepsilon_0 E^2 + \frac{1}{2}\frac{1}{\mu_0}B^2$$

eftersom $B = \mu_0 NI/d$ och $L = \mu_0 N^2 A/d$

Helsingfors Universitet
Institutionen för fysik
T. Ahlgren

LC oscillations:
https://www.youtube.com/watch?v=2_y_3_3V-so

Var kan spolar (induktorer) vara användbara?

Helsingfors Universitet
Institutionen för fysik
T. Ahlgren

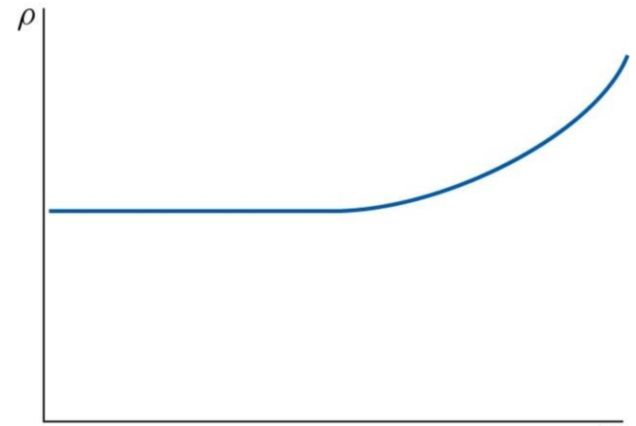
Transformator

- För att överföra elektrisk energi över stora avstånd krävs spänningar på tusentals volt, men i hemmet vill vi ha en spänning på ett par hundra volt.
- En kombination av två spolar kan användas för att öka eller sänka växelspänning.
- Dessa kan vara innanför varandra, eller virade kring en gemensam kärna av paramagnetisk metall, där det magnetiska flödet förstärks och går runt kärnan.
- Ena spolen utgör primärkretsen, och andra sekundärkretsen

Helsingfors Universitet
Institutionen för fysik
T. Ahlgren

Supraledare

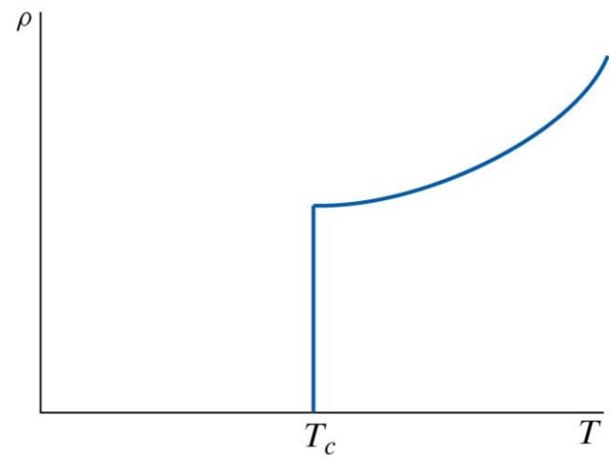
- Då man sänker temperaturen i en vanlig metall sjunker resistiviteten, men den förblir $\neq 0$ även vid absoluta nollpunkten



Vanlig ledare

- En del material förlorar helt resistiviteten vid låga temperaturer
  - Detta betyder att elektriska strömmar i dessa material inte upplever någon som helst resistans
  - M.a.o. blir elektronmobiliteten oändlig, så ett elektriskt fält inne i supraledaren skulle ge upphov till oändligt stor ström!

  → inga elfält kan förekomma i en supraledare



Supraledare

Helsingfors Universitet
Institutionen för fysik
T. Ahlgren

Hög-temperaturs supraledare

- Första supraledaren upptäcktes redan 1911
  - Kvicksilver med $T_c = 4.2\ K$
- Efter det upptäcktes fler supraledare, men alla krävde mycket låga temperaturer
- Nyligen har material hittats som är supraledande redan vid temperaturer över 77 K
  - Detta är temperaturen för flytande kväve, så det är relativt lätt och billigt att kyla ner materialet till denna temperatur
- Teorin för lågtemperatur supraledare är relativt väl utvecklad, men man vet inte riktigt vad som orsakar supraledning i högtemperaturs supraledare
  - Hittills har 5 nobelpris utdelats för upptäckter gällande supraledning; det lär bli fler. ☺

Helsingfors Universitet
Institutionen för fysik
T. Ahlgren

https://en.wikipedia.org/wiki/High-temperature_superconductivity

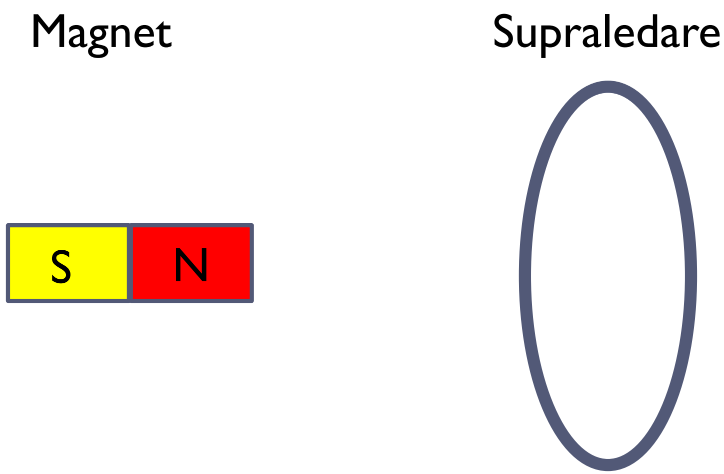
The superconductor with the highest transition temperature at ambient pressure is the cuprate of mercury, barium, and calcium, at around 133 K.

There are other superconductors with higher recorded transition temperatures - for example lanthanum superhydride at 250 K, but these only occur at very high pressures.

The origin of high-temperature superconductivity is still not clear, but it seems that instead of *electron-phonon* attraction mechanisms, as in conventional superconductivity, one is dealing with genuine *electronic* mechanisms (e.g. by antiferromagnetic correlations), and instead of conventional, purely s-wave pairing, more exotic pairing symmetries are thought to be involved (*d*-wave in the case of the cuprates; primarily extended *s*-wave, but occasionally *d*-wave, in the case of the iron-based superconductors). In 2014, evidence showing that fractional particles can happen in quasi two-dimensional magnetic materials, was found by EPFL scientists lending support for Anderson's theory of high-temperature superconductivity.

Magnetisk flöde genom en supraledare

Först vid RT



$$IR = emf = -\frac{d\Phi_{mag}}{dt}$$

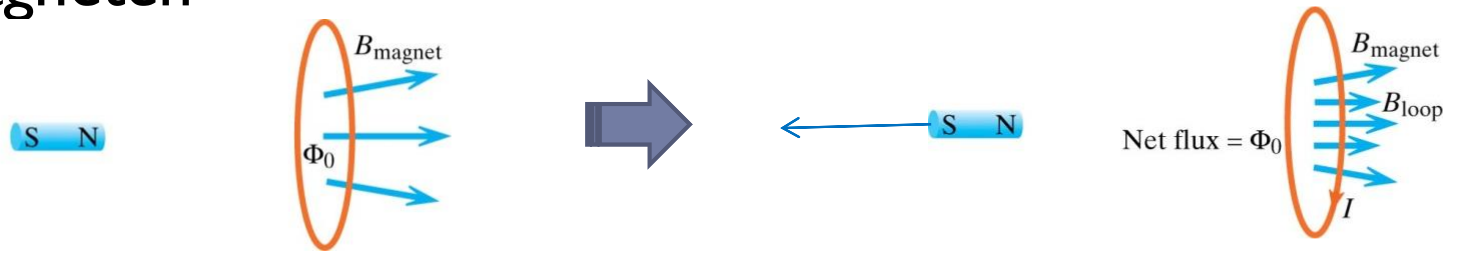
Sedan kyls ringen till temperatur där den är supraledande

Sedan tas dras magneten långt bort till vänster.
Vad händer med supraledaren och magnetiska flödet genom den?

Helsingfors Universitet
Institutionen för fysik
T. Ahlgren

Magnetisk flöde genom en supraledare

- En supraledande ring med ett magnetiskt flöde genom det kommer att bibehålla samma flöde även om man flyttar på magneten

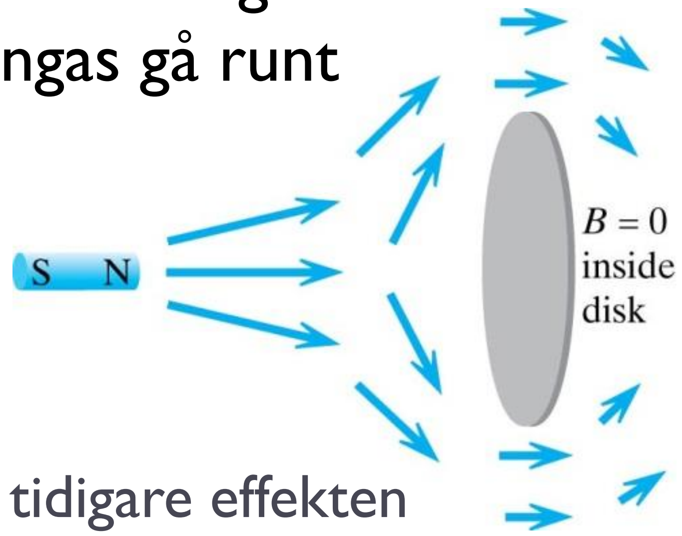


  - Ett föränderligt magnetiskt flöde genom ringen skulle normalt ge upphov till ett inducerat fält i ringen
  - Ett sådant fält skulle orsaka en oändlig ström i en supraledare
  - Detta är inte möjligt, så istället kommer en ändlig ström att gå i supraledaren vilket precis motverkar förändringen i magnetiskt flöde
  - Detta sker utan ett elfält i materialet!

Helsingfors Universitet
Institutionen för fysik
T. Ahlgren

Meissner effekten

- En annan egenskap hos supraledare ser man om man lägger en supraledande skiva i ett magnetfält
- Det supraledande materialet kommer att tränga ut magnetiska fältet, så att fältlinjerna tvingas gå runt materialet
  - Detta orsakas av stömmar på ytan av materialet som precis motverkar det yttre fältet



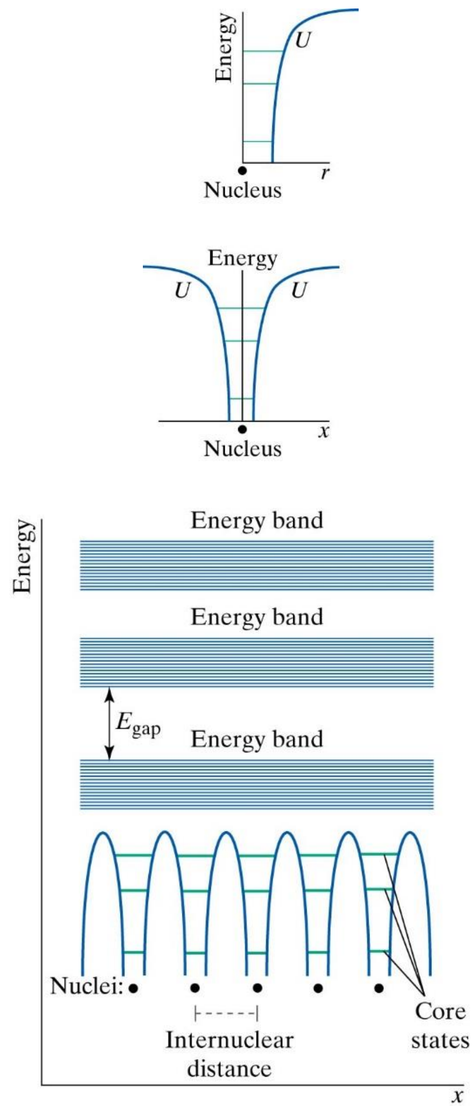
  - Detta skall dock inte förväxlas med den tidigare effekten – denna effekt är också helt kvantmekanisk men kan inte förklaras enbart av materialets perfekta konduktivitet
  - Meissner effekten bryter ned vid starka magnetiska fält

Halvledare (Inte till tenten)

- En annan klass av material med speciella ledningsegenskaper är *halvledare*
  - Icke ledande vid 0 K, mätbar ledningsförmåga vid högre temperaturer
- Ledningsförmågan hos halvledare kan finjusteras genom tillägg av orenheter (*eng.* ”dopants”)
  - Orenheterna påverkar antalet fria laddningsbärare i materialet
- Exempel på halvledare är kisel (Si), germanium (Ge)

Energiband

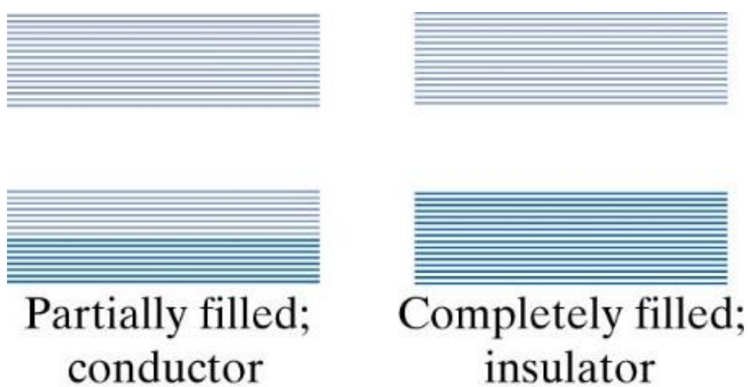
- För att förstå hur halvledare fungerar bekantar vi oss först med konceptet av *energiband*
- Vi minns att elektroner som är bundna i atomer har vissa tillåtna energinivåer
  - Energin är ”kvantiserad”
- I en kristall finns ett stort antal atomer i en periodisk konfiguration
  - Detta leder till att de högre energinivåerna grupperas till *band*
  - Mellan banden finns *bandgap*
- Elektronerna i banden är inte bundna till en viss atom, utan är relativt fria att röra sej i materialet



Helsingfors Universitet
Institutionen för fysik
T. Ahlgren

Bandens occupering

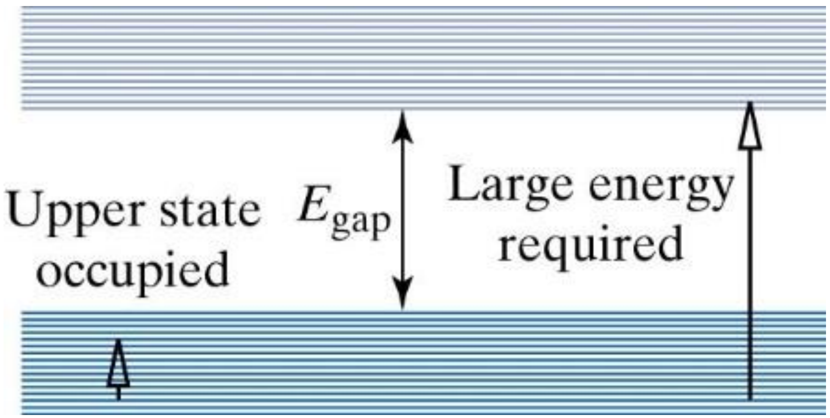
- Det speciella med elektroner är att inga två elektroner kan befinna sej i samma tillstånd
- Detta leder till att de inte alla ligger i lägsta nivån i ett band, utan banden är fyllda till en viss nivå
  - Hur banden är fyllda bestämmer ledningsförmågan hos materialet



Helsingfors Universitet
Institutionen för fysik
T. Ahlgren

Excitering av en elektron

- För att höja en elektrons energi måste den flyttas till ett nytt tillstånd bland de som är *tillåtna*
- Ifall ett band är helt fullt, måste en elektron då tillföras tillräkligt med energi för att flyttas till ovanliggande band
  - Minimum energi tillägg motsvarar bandgapets bredd

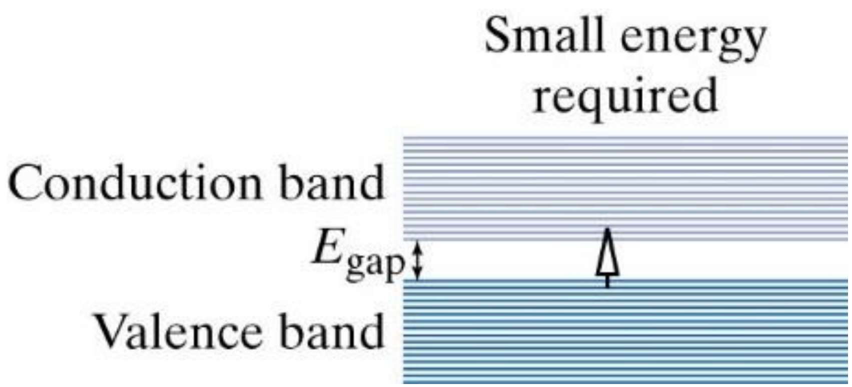


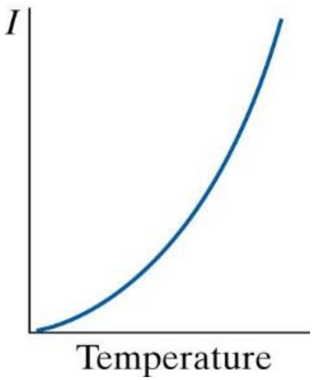
- För att ett material skall vara ledande måste det gå att flytta elektroner till högre energinivåer
  - En elektron i "vila" måste ges en viss "hastighet"

Helsingfors Universitet
Institutionen för fysik
T. Ahlgren

Bandgapet i halvledare

- Det lägsta ofyllda bandet brukar kallas *ledningsbandet*
- Det översta fyllda bandet kallas *valensbandet*
- I halvledare är bandgapet mellan valensbandet och ledningsbandet mycket litet
  - Det går då att flytta en elektron till ledningsbandet med en relativt liten tillförsel av energi
  - Vid tillräkligt hög temperatur och litet bandgap räcker det med värmeenergin

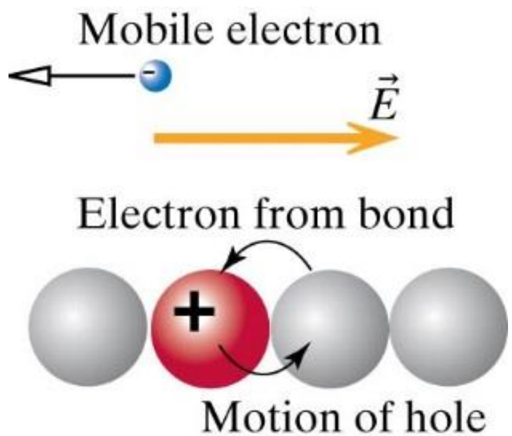


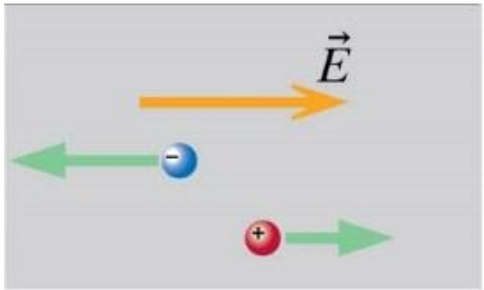


Helsingfors Universitet
Institutionen för fysik
T. Ahlgren

Laddningsbärarna

- Då man flyttar en elektron till en högre energinivå, blir det kvar ett ”hål”
- Hålen är positivt laddade, och kan röra sej
  - De är alltså också laddningsbärare!



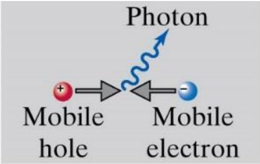


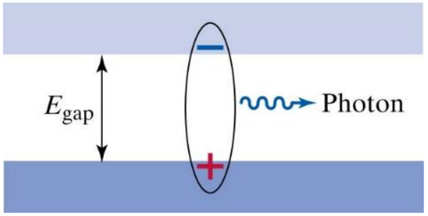
- Hålen rör sej i riktning av elektriska fältet, medan elektronerna rör sej åt motsatta håll

Helsingfors Universitet
Institutionen för fysik
T. Ahlgren

Elektron-hål par

- Elektron-hål par kan också uppstå från annat än värmeenergi
- T.ex. kan en foton kan tillföra energi till en elektron
  - Detta är principen bakom solceller
- En energetisk laddad partikel kan också tillföra energi till en elektron
  - Detta används för partikel detektorer
- Elektron-hål par kan också rekombinera
  - Detta ger upphov till en foton
  - Principen bakom ljusdioder (LED)

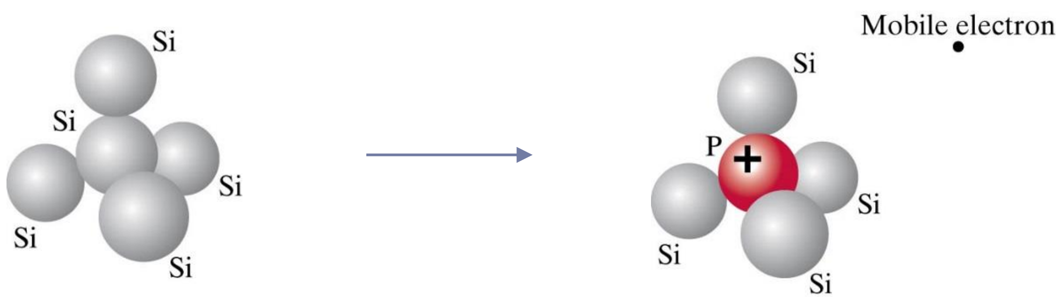




Helsingfors Universitet
Institutionen för fysik
T. Ahlgren

Dopade halvledare

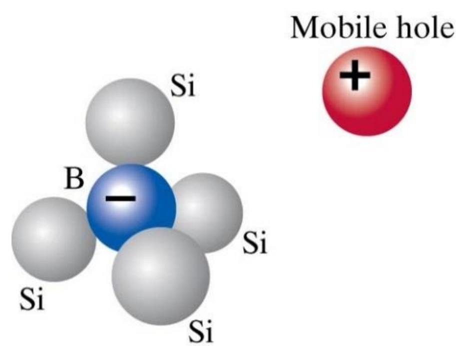
- Genom att lägga till orenheter i en halvledare kan man lägga till eller ta bort laddningsbärare
- Si har fyra elektroner i sitt yttersta skal, och bildar därför bindningar till fyra andra atomer
- Fosfor (P) har fem yttre elektroner, så sätter man en P atom i Si gittret får den fyra grannar, och en elektron blir över
  - Denna elektron är inte starkt bunden till P atomen, utan utgör en fri laddningsbärare



- Denna typ av dopad halvledare kallas **n-typ**
  - "n" står för negativ – de flesta laddningsbärare i n-typs halvledare är negativt laddade elektroner

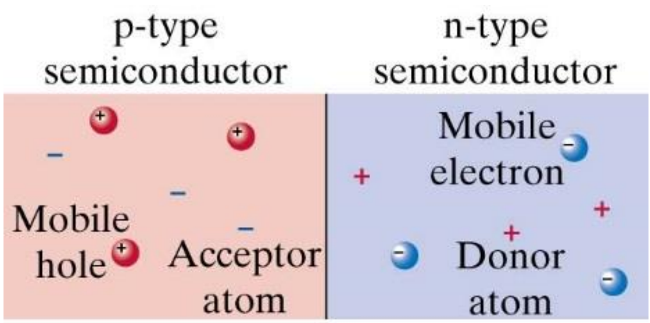
Dopade halvledare

- En bor (B) atom har tre yttre elektroner
- Om man dopar Si med B, blir det en elektron för lite, dvs. det uppstår ett ”hål”
  - Hålet kan röra sej, eftersom närliggande elektroner kan fylla det, och i sin tur lämna ett hål
- Denna typ av dopad halvledare kallas **p-typ**
  - ”p” för positiv, eftersom de flesta laddningsbärarna är positivt laddade hål

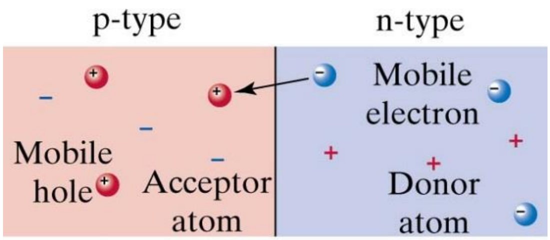


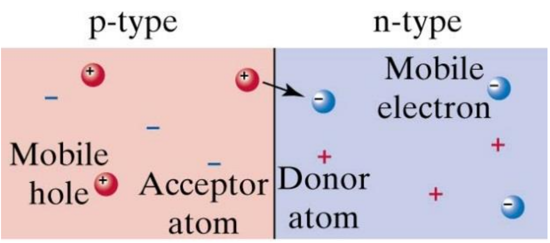
Halvledare i kontakt

- Då man lägger en halvledare av n-typ och en av p-typ i kontakt med varandra, uppstår en s.k. pn-övergång



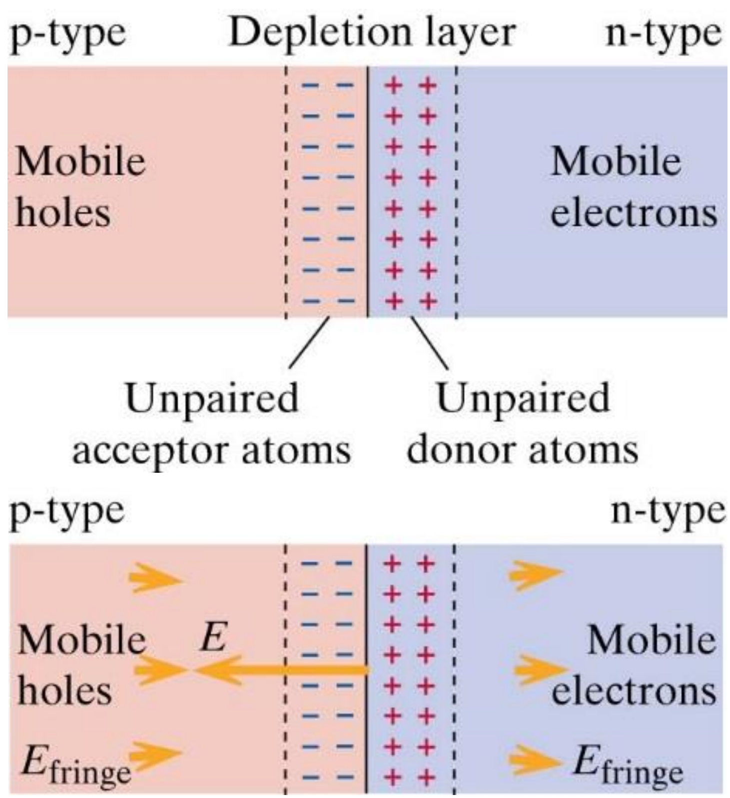
- De fria laddningarna kommer att röra sej till motsatta sida, där de lätt rekombinerar





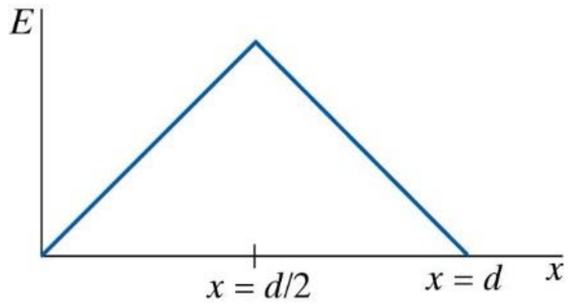
Helsingfors Universitet
Institutionen för fysik
T. Ahlgren

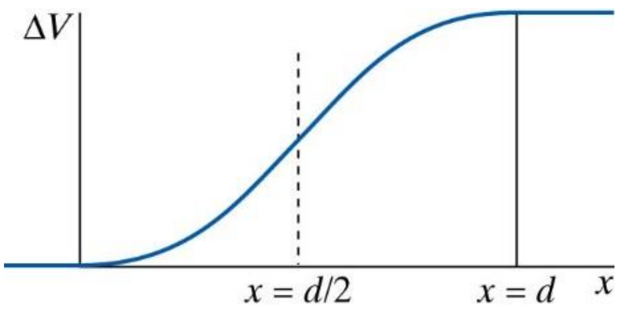
- Slutresultatet är att ett elektriskt fält uppstår
  - Kom ihåg att materialen ursprungligen var laddningsneutrala



Diod

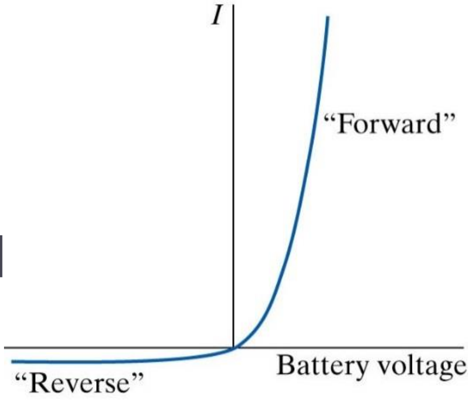
- Elfältet leder till en potential skillnad mellan delarna av övergången





- Det blir lätt för en ström att gå åt ena hållet, men svårt åt andra hållet
- En sådan apparat kallas *diod*
  - I *ledriktningen* kan strömmen passera
  - I *spärriktningen* går inte ström (i en ideal diod

i verkligheten passerar en liten ström)



Helsingfors Universitet
Institutionen för fysik
T. Ahlgren

Kunskapsmål för kapitlet:
Kunna beräkna storleken och riktningen för elektriska fält som uppstår då vi har tidsberoende magnetfält

Helsingfors Universitet
Institutionen för fysik
T. Ahlgren