

Forelesning nr.7 IN 1080

Elektroniske systemer

Spoler og induksjon
Praktiske anvendelser
Nøyaktigere modeller for R, C og L

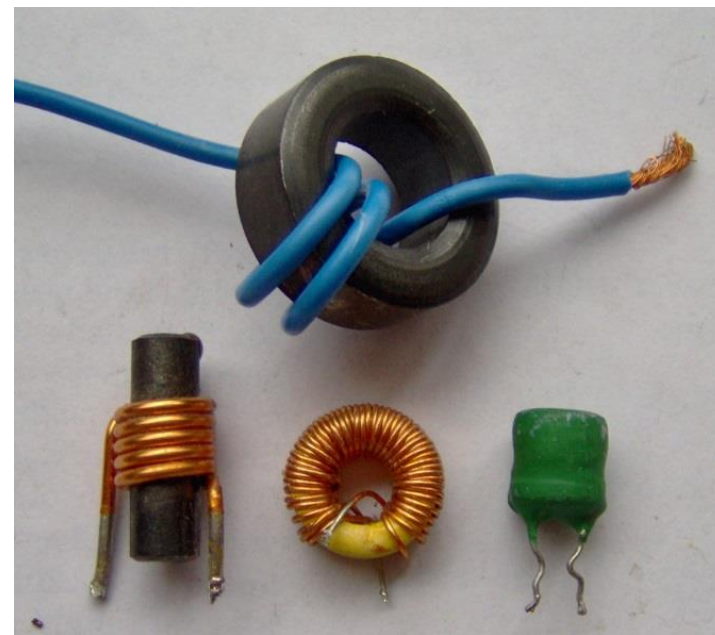
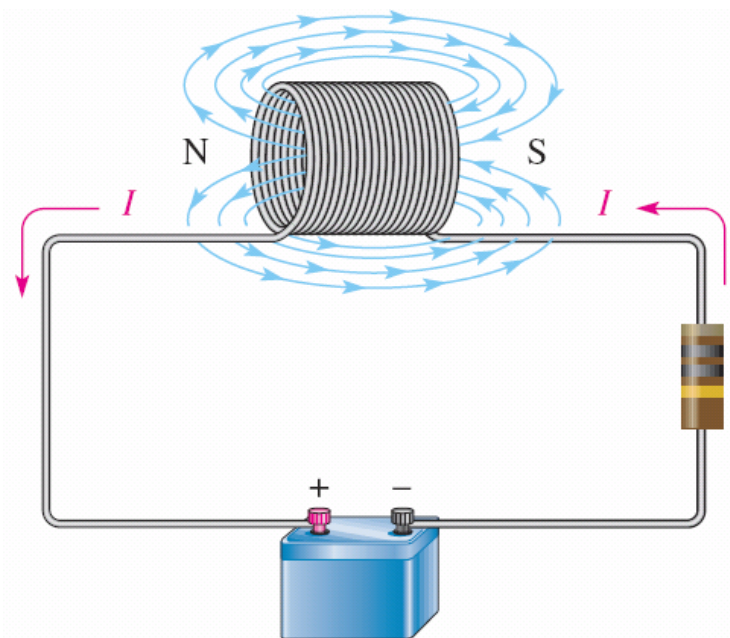


Dagens temaer

- Induksjon og spoler
- RL-kretser og anvendelser
- Fysiske versus ideelle komponenter
- Digitale kretser, busser RL og RC-påvirkning, sammenkobling

Induktorer

- En induktor (spole) består av en isolert elektrisk leder surret rundt en metallkjerne eller et ikke-magnetisk materiale



- Hver vinding rundt kjernen gir en magnetisk feltlinje; jo flere vindinger desto flere feltlinjer og sterkere magnetfelt

Induktorer (forts)

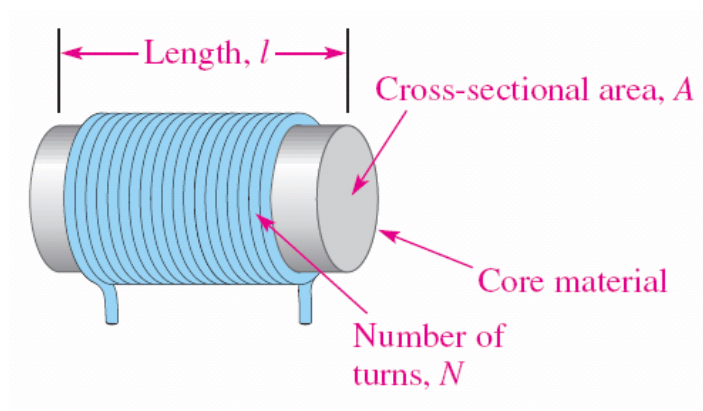
- Magnetfeltet lager (induserer) en elektrisk spenning som motarbeider *endringer* i strømmer gjennom spolen
- Styrken på magnetfeltet er direkte proporsjonal med *endringen* i strømmen gjennom spolen og derfor er også den induserte spenningen proporsjonal med endringen i strømmen

$$v = L \frac{di}{dt}$$

Induktorer (forts)

- L (måles i *Henry*) kalles for *induktans* og uttrykker spolens evne til å indusere spenning når strømmen gjennom spolen endrer seg

$$L = \frac{N^2 \mu A}{l}$$

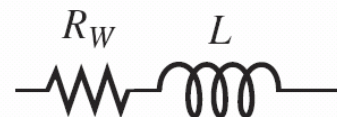
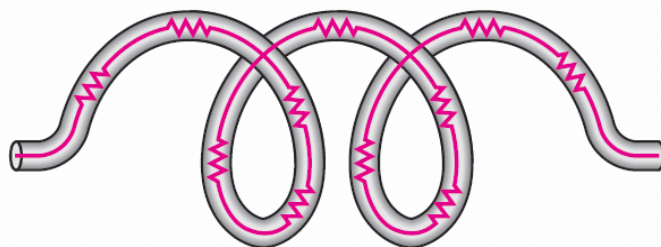


Induktorer (forts)

- Motstanden mot strøm gjennom en spole kalles for *induktiv reaktans* og er gitt av

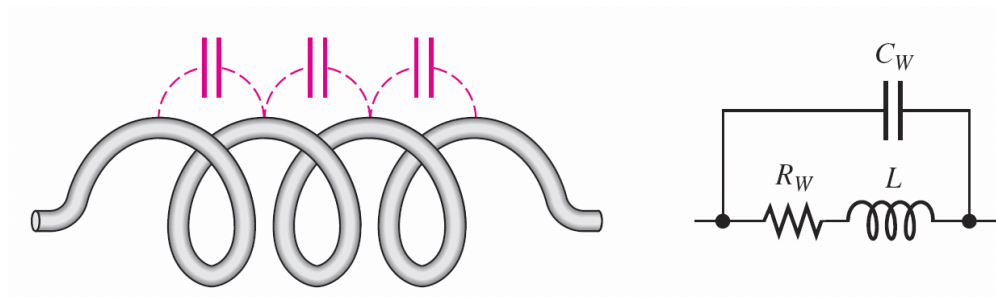
$$X_L = 2\pi fL$$

- Spoler har også en resistans som kalles *viklingsresistans* R_w og som skyldes at lederen har ohmsk motstand



Induktorer (forts)

- Spoler har også parasittkapasitans:

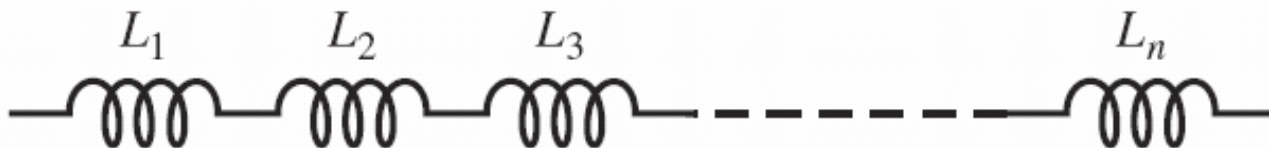


- Pga. fysisk størrelse og parasitteffektene er spoler mindre brukt enn kondensatorer for å lage frekvensavhengig impedans
- Men: Denne modellen endrer seg ikke mye ved høye frekvenser (GHz), i motsetning til kondensatorer og resistorer som endrer oppførsel

Spoler i serie

- Hvis man kobler spoler i serie får man en total induktans som er lik summen av de individuelle induktansene

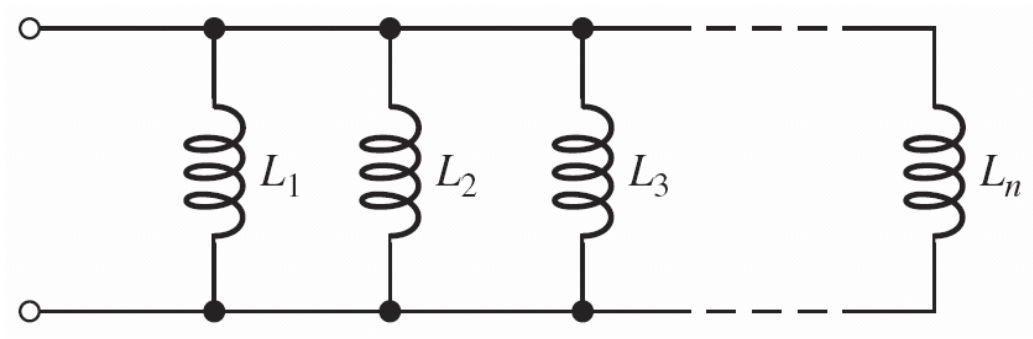
$$L_{tot} = L_1 + L_2 \cdots L_n$$



Spoler i parallell

- Hvis man kobler spoler i parallell får man en total induktans som er mindre enn den minste av de individuelle induktansene

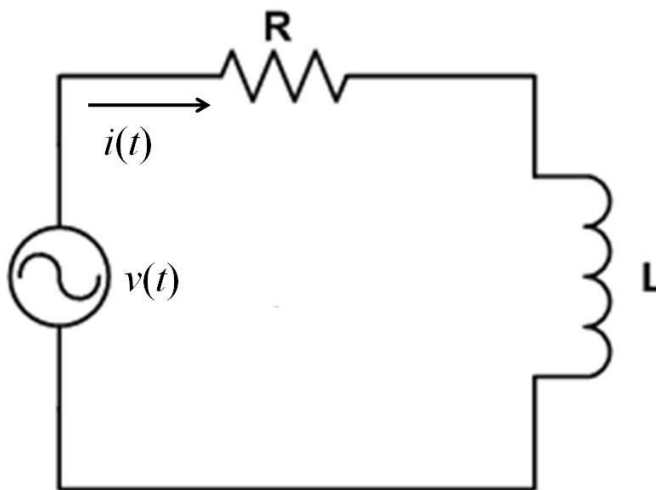
$$\frac{1}{L_{tot}} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} \dots \frac{1}{L_n}$$



Tidskonstant i RL-kretser

- RL-tidskonstanten er forholdet mellom induktansen og resistansen:

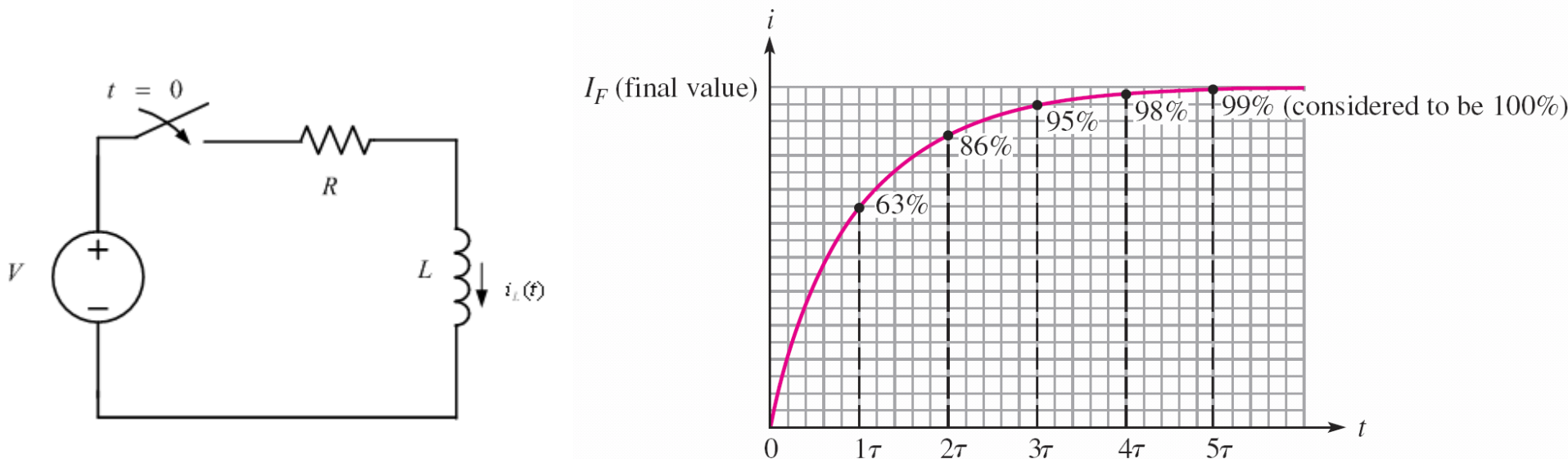
$$\tau = \frac{L}{R}$$



- Tidskonstanten angir hvor fort strømmen kan endre seg i en spole: Jo større induktans, desto lengre tid tar det å endre strømmen
- Tidskonstanten måler det samme som i RC-kretser, men formelen er litt annerledes

Strøm i RL-kretser

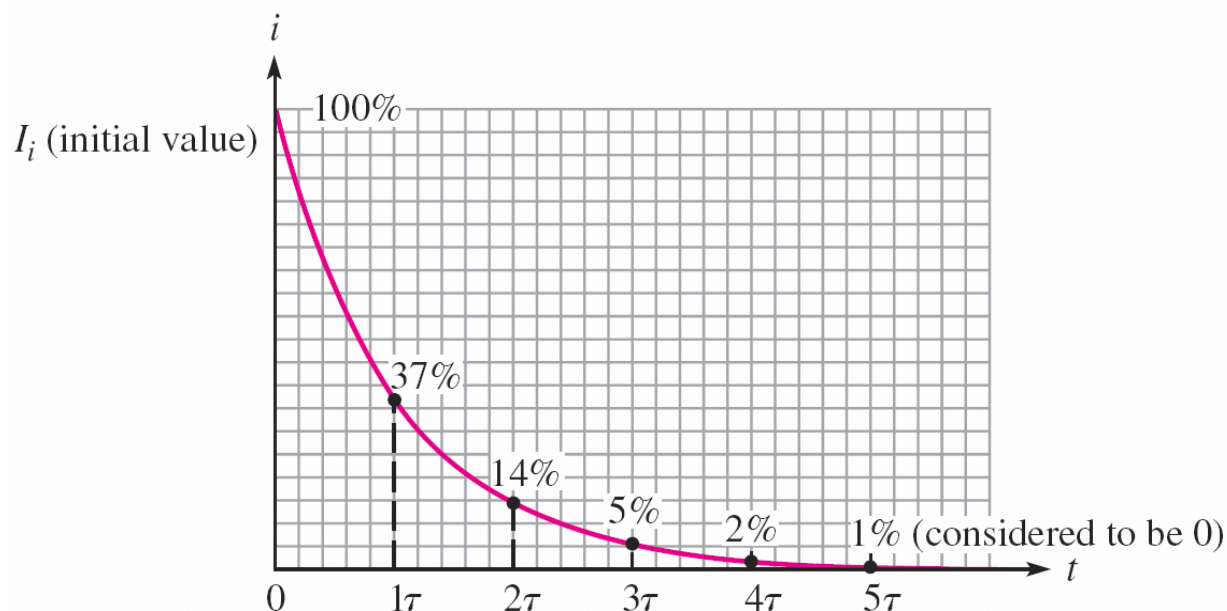
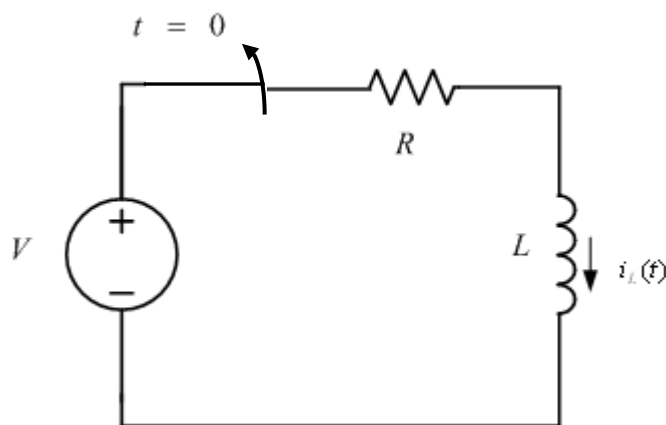
- Hvis en spole kobles *til* en spenningskilde vil strømmen gjennom spolen *øke* eksponensielt:



- Legg merke til likheten med spenningsøkningen over kondensator

Strøm i RL-kretser (forts)

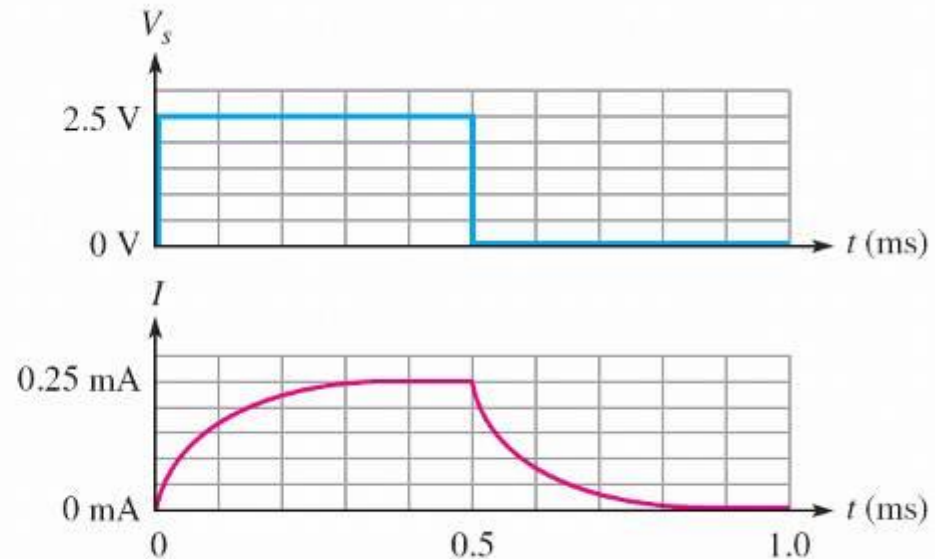
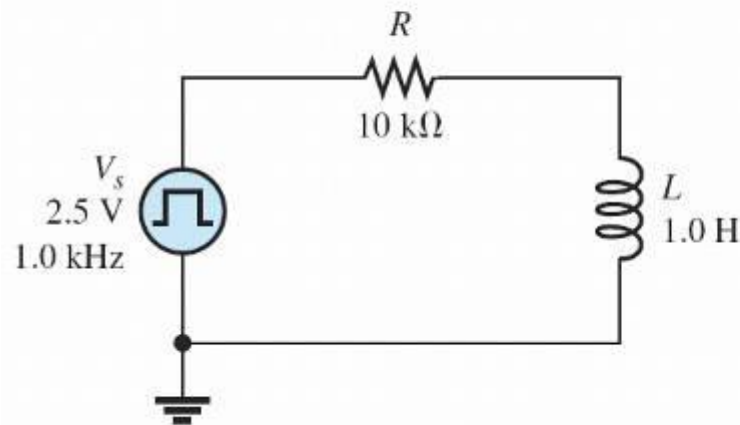
- Hvis en spole kobles *fra* en spenningskilde vil strømmen gjennom spolen *avta* eksponensielt:



- Legg merke til likheten med spenningsfallet over en kondensator

Respons på en firkantpuls

- Hvis spenningskilden til RL-kretsen er en firkantpuls vil, strømmen gjennom spolen vekselvis øke og minke eksponensielt:



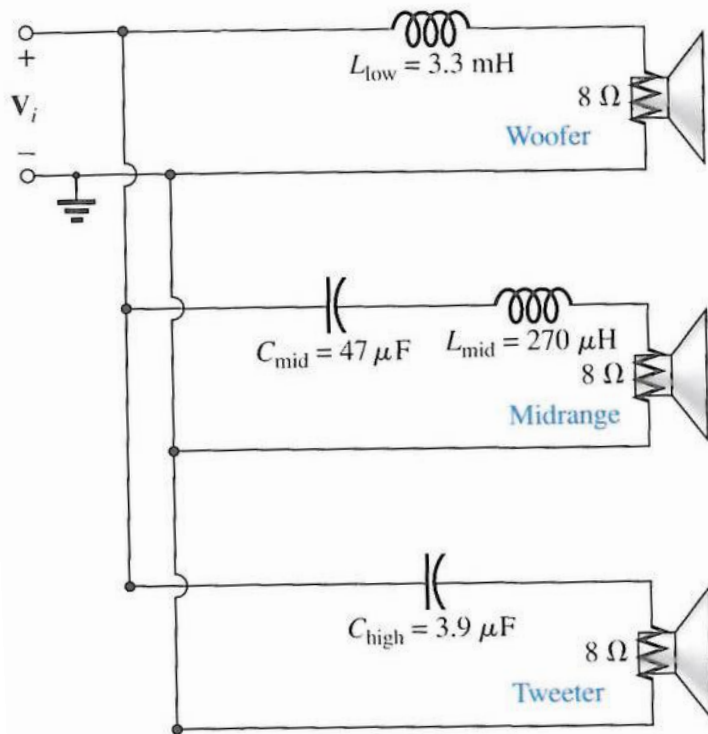
- Viktig å ta hensyn til dette ved design av digitale kretser, fordi det fenomenet gir hastighetsbegrensninger

Anvendelse av spoler

- Spoler brukes mindre enn kondensatorer, men svært nyttige i noen anvendelser:
 - .Fjerning av uønskede høyfrekvenssignaler i lange ledere
 - .Aktive og passive filtre
 - .Frekvenstuning i trådløs kommunikasjon
- Parasitt-induktans må kontrolleres i alle elektroniske systemer fordi den begrenser bla maksimal lengde på ledere

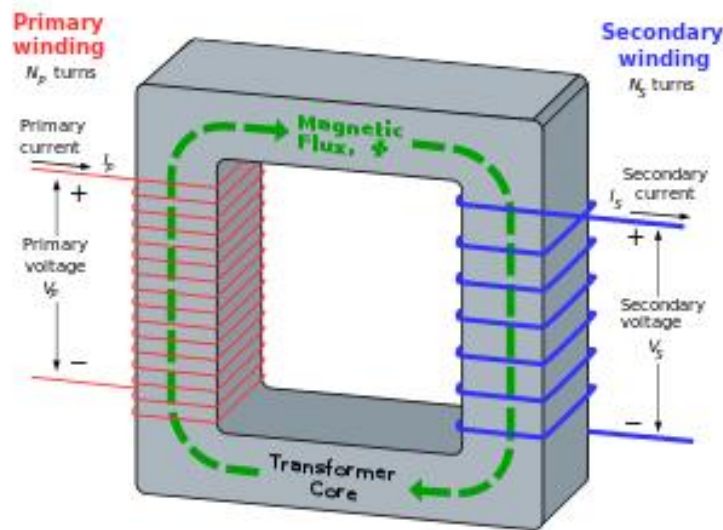
Anvendelse: Delefilter til høyttaler

- Hvert høytalerelement er laget for et bestemt frekvensområde



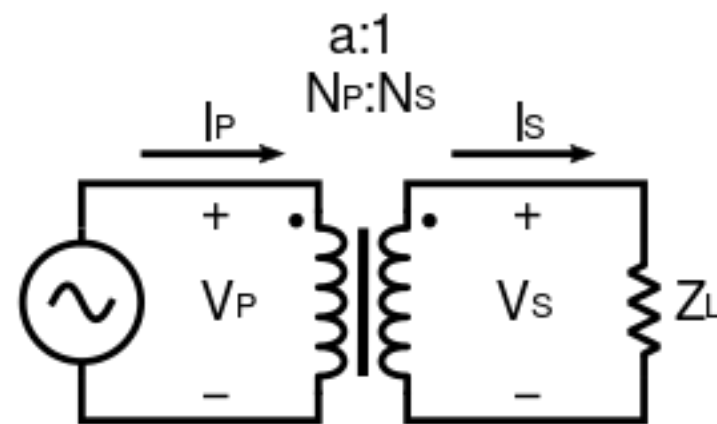
Anvendelse: Transformator

- Transformator brukes for å endre nivået til en ac-spenning (enten opp eller ned)



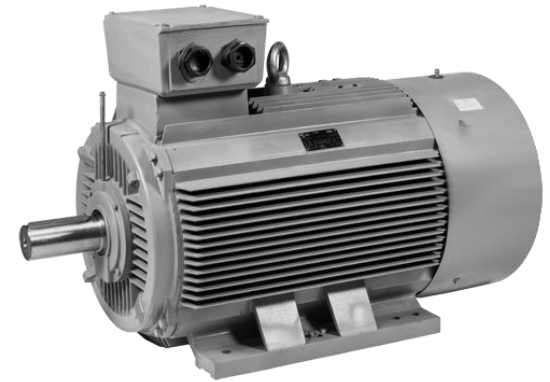
$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{I_s}{I_p} = \frac{N_p}{N_s} = a$$

$a > 1$: transformerer ned
 $a < 1$: transformerer opp



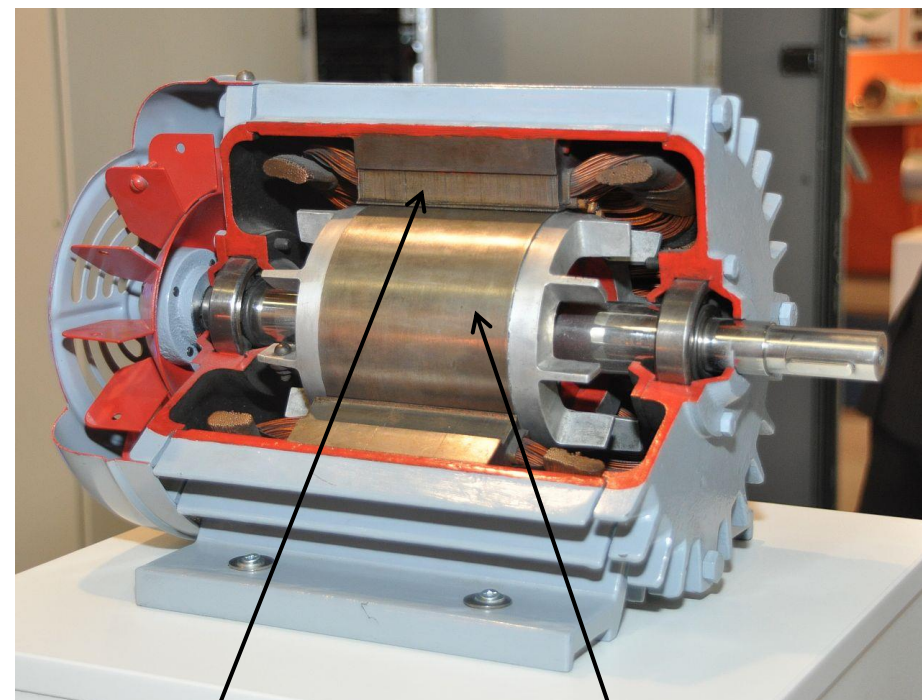
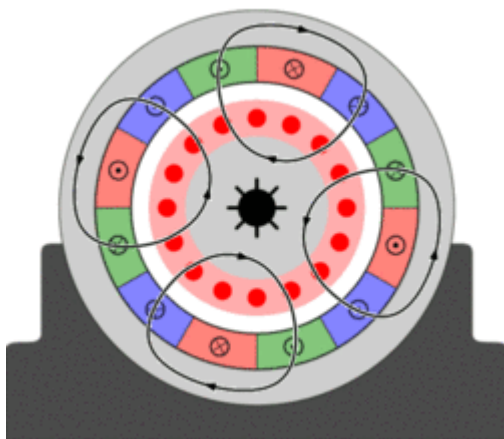
Anvendelse: Elektromotorer

- En elektromotor omdanner elektrisk strøm til mekanisk bevegelse ved induksjon
- Elektromotoren dannet grunnlaget for den industrielle revolusjonen på slutten av 1800-tallet
- Den effekten en motor leverer måles i kW eller hestekrefter (historisk)
 - $1 \text{ Hk} \approx 736 \text{ W}$
- Utviklingen av effektive (mest mulig av strøm omdannes til bevegelse, ikke varme) er en viktig for bla tog, metro og elbiler
- Elektromotorer lages i størrelser fra milliWatt (0.001W) til 100 MegaWatt (100 000 000 W)



Prinsipp for elektromotorer

- I en elektromotor er det magnetfelt som endrer retning som får en aksel til å rotere
- Magnetfeltet lages av elektromagneter (spoler)
- Motoren er bygd opp av to hoveddeler
 - Statoren er fast
 - Rotoren er bevegelig og roterer
- Elektromotorer finnes både dc og ac

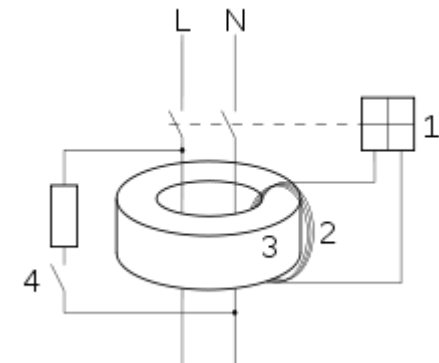
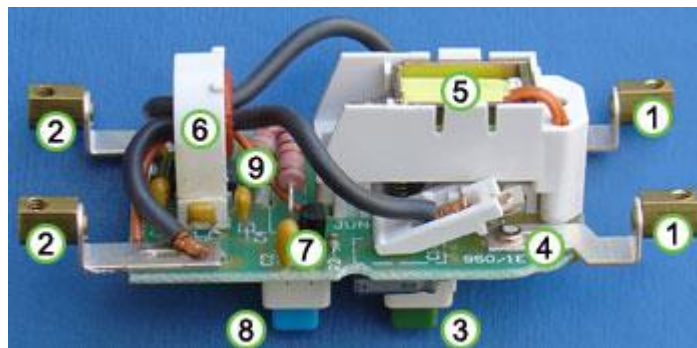


Stator

Rotor

Anvendelse: Jordfeilbryter

- Løser ut en sikring hvis det er jordfeil, dvs hvis én av de to lederne har forbindelse mot jord



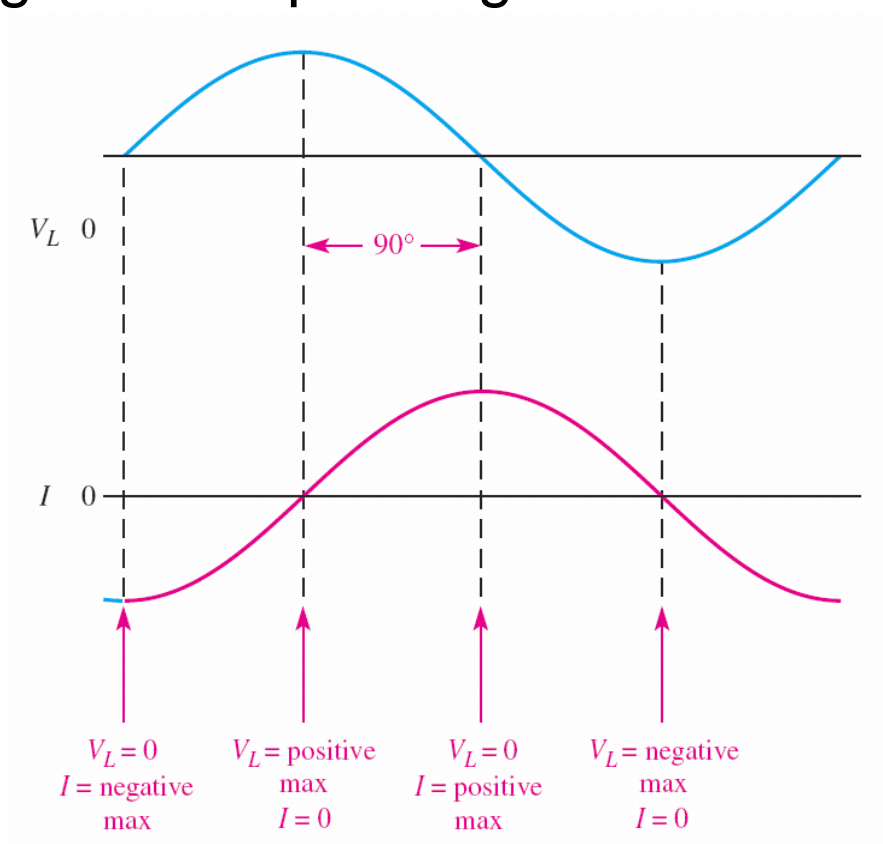
Anvendelse: Trådløs ladning

- Induksjon kan også benyttes for å lade trådløst elektriske apparater uten å koble til ledninger direkte:



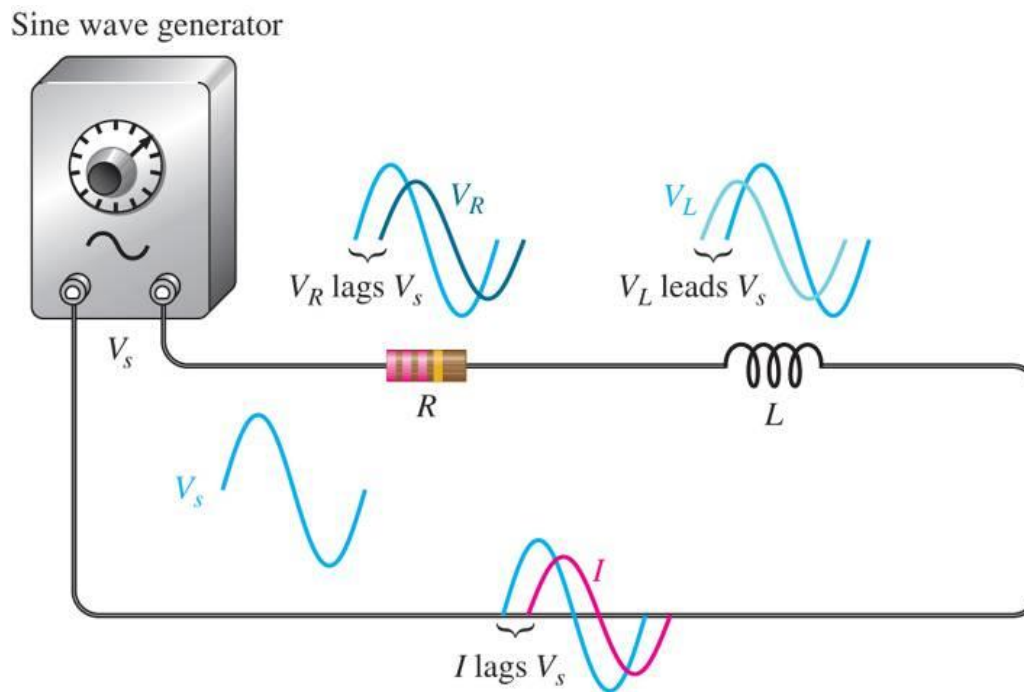
Faseforskyvning mellom I og V

- I en spole er strøm og spenning faseforskjøvet 90° slik at strømmen ligger *etter* spenningen:



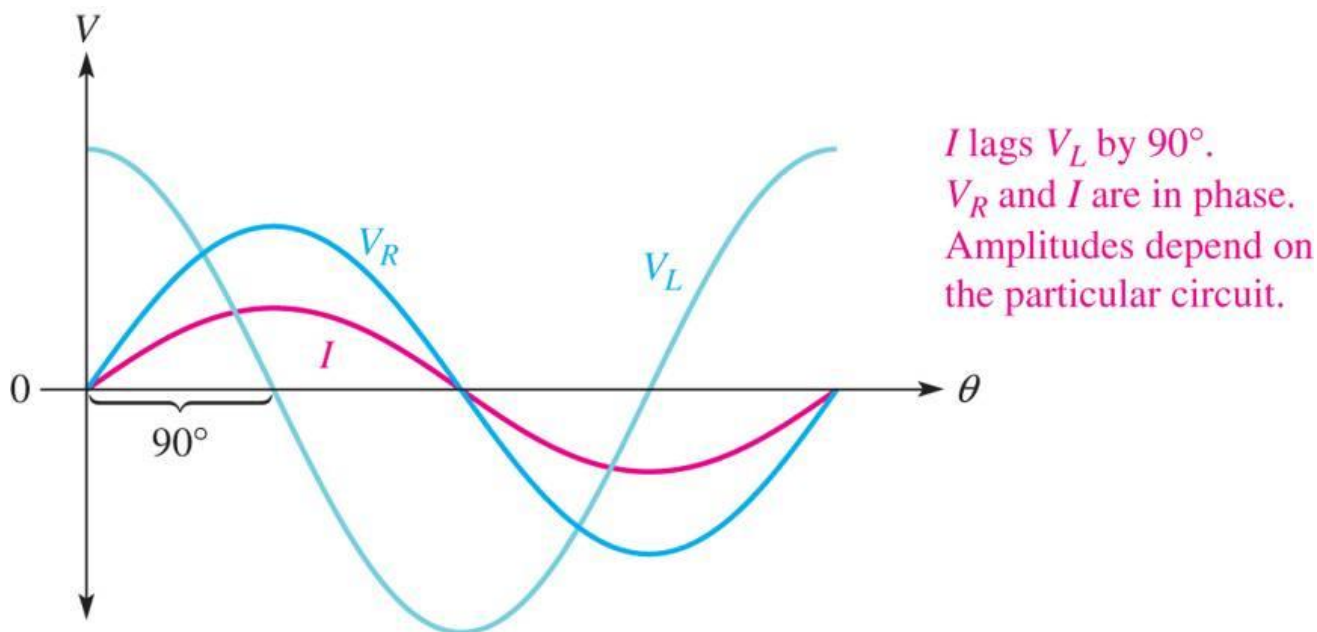
Sinusrespons i en RL-krets

- I en RL-krets med sinusformet spenning vil spenningene ha følgende faseforskyvninger:



Fasedreining mellom strøm og spenning

- Følgende grafer oppsummerer faseforskyvningene mellom spenningen over spolen, resistoren og strømmen i en seriekoblet RL-krets



Frekvensavhengig impedans i spoler

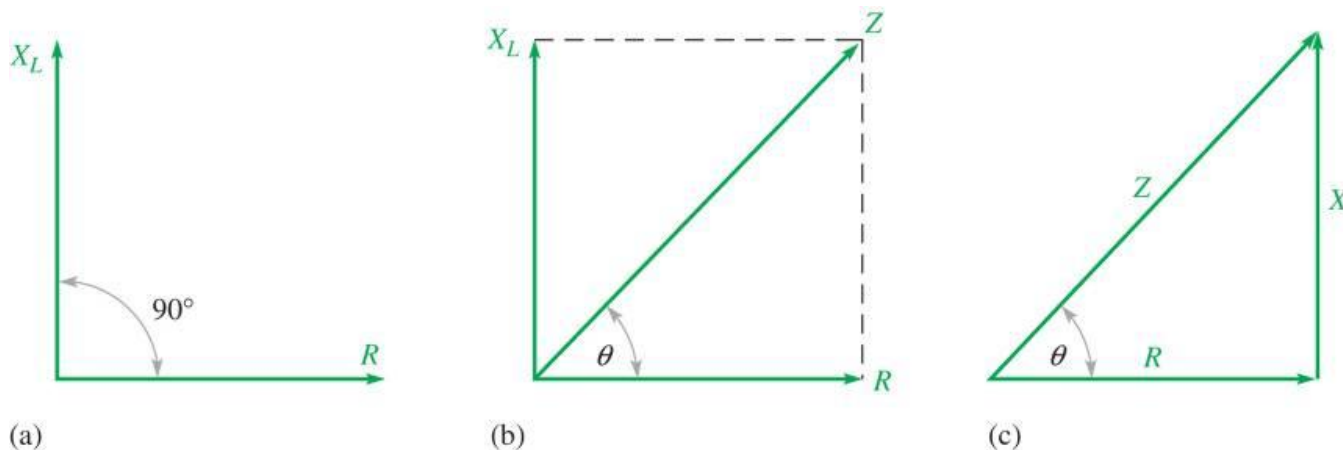
- På samme måte som for RC-kretser har impedansen i en RL-krets en *resistiv* og en *reaktiv* del
- Reaktansen i spoler kalles *induktiv reaktans* og er gitt av formelen $X_L = 2\pi fL$
- Reaktansen til spoler i serie er gitt av $X_{L(tot)} = X_{L1} + X_{L2} + \dots + X_{Ln}$
- Reaktansen til spoler i parallell er gitt av
$$X_{L(tot)} = \frac{1}{\frac{1}{X_{L1}} + \frac{1}{X_{L2}} + \dots + \frac{1}{X_{Ln}}}$$
- Sammenheng strøm, spenning og impedans $V = IX_L$

Impedans og fasevinkel i seriell RL-krets

- På samme måte som for RC-kretser, uttrykkes impedansen i en RL-krets med vektorer («phasors»)
- Impedansen i en RL-krets er et mål for den totale motstanden mot en sinusformet strøm og måles i Ohm
- Fasevinkelen angir forskyningen mellom strømmen og forsyningsspenningen

Impedans og fasevinkel i seriell RL-krets (forts)

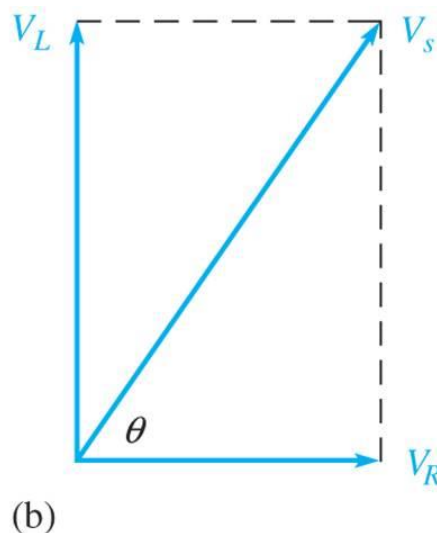
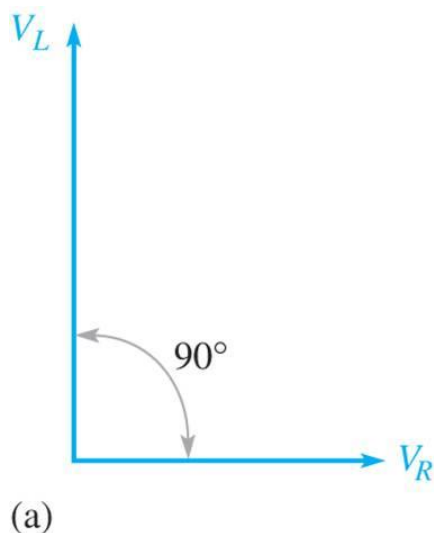
- Den totale impedansen består av en resistiv og en induktiv reaktiv del som er 90 grader i forhold til hverandre



- Den totale impedansen er gitt av $Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$

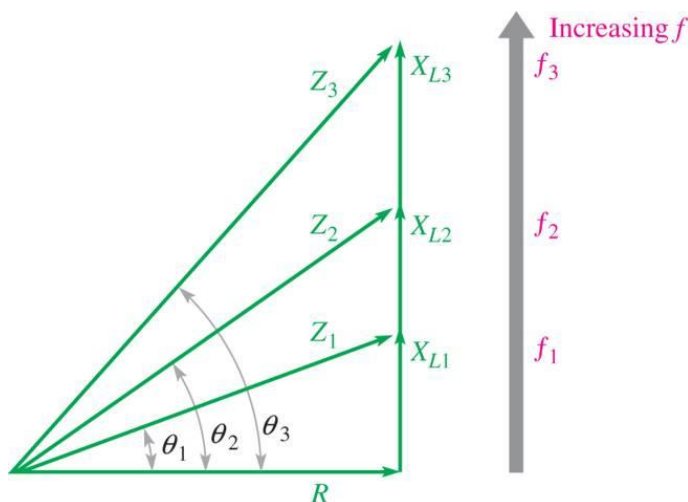
Fasedreining mellom strøm og spenning (forts)

- For å finne sammenhengen mellom spenningene kan man benytte KCL



$$V_s = \sqrt{V_R^2 + V_L^2}$$
$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{V_L}{V_R}\right)$$

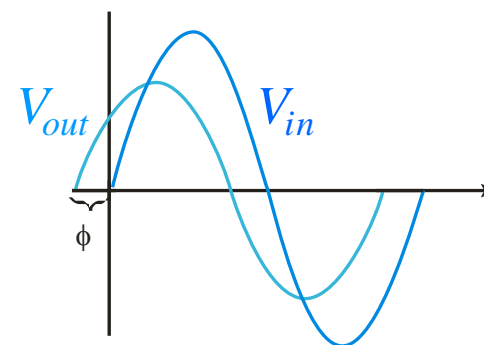
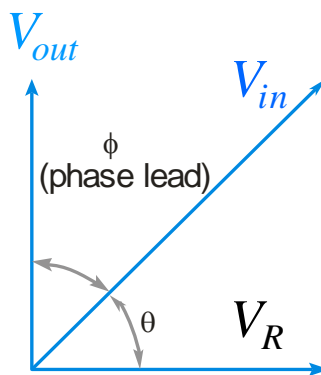
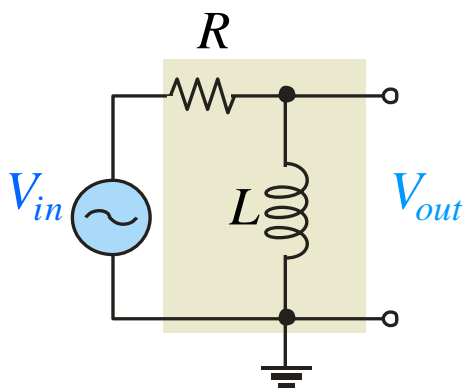
Sammenheng mellom impedans, fasedreining og frekvens



- Den induktive reaktansen *øker* med økende frekvens, mens fasevinkelen nærmer seg 90°

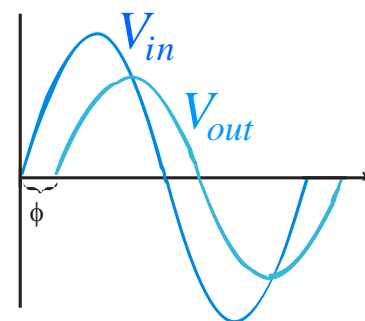
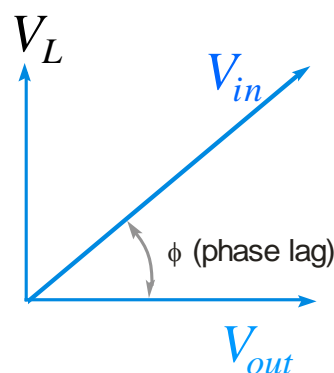
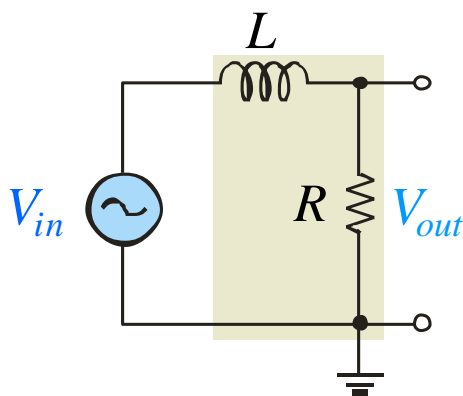
RL lead-krets

- I en RL lead-krets er det en positiv faseforskyvning mellom utgang- og inngangsspenningen, dvs at utgangen leder over inngangen



RL lag-krets

- I en RL lag-krets er det en negativ faseforskyvning mellom utgang- og inngangsspenningen, dvs at utgangen henger etter inngangen

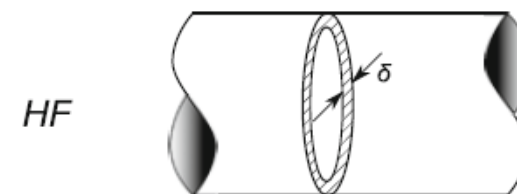
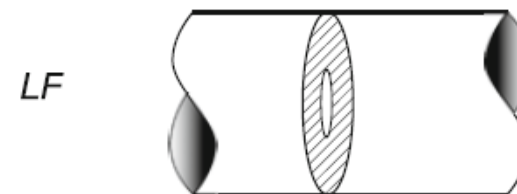
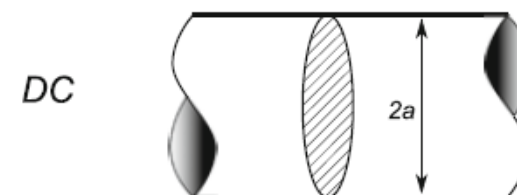
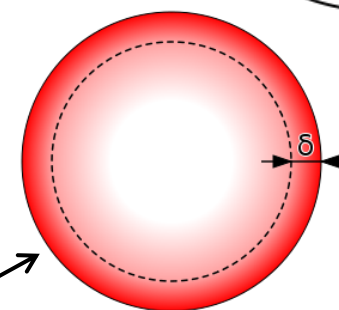
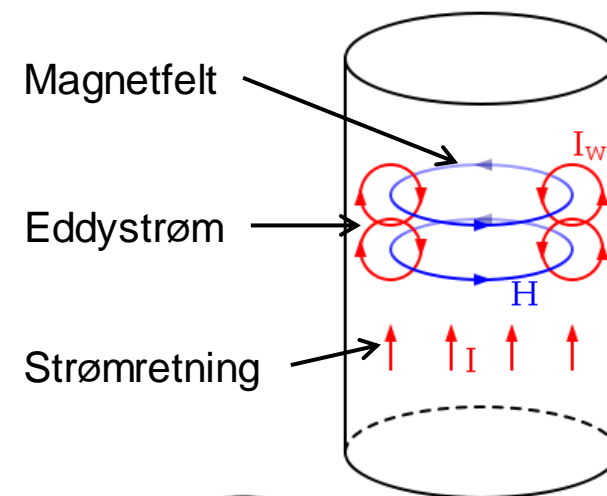


Resistorer, kondensatorer, spoler og ledere ved høye frekvenser

- Har antatt hittil at ledere null resistans, og at resistans er konstant og frekvensuavhengig
- Virkelighetens verden er mer kompleks:
 - Resistansen i ledere er frekvensavhengig
 - Kondensatorer blir til spoler ved høye frekvenser
 - Spoler blir til kondensatorer ved høye frekvenser
 - Resistorer blir til kondensatorer ved middels høye frekvenser og spoler ved veldig høye frekvenser
- **Konklusjon:** En krets må designes for et bestemt frekvensområde og vil ikke nødvendigvis fungere utenfor dette!

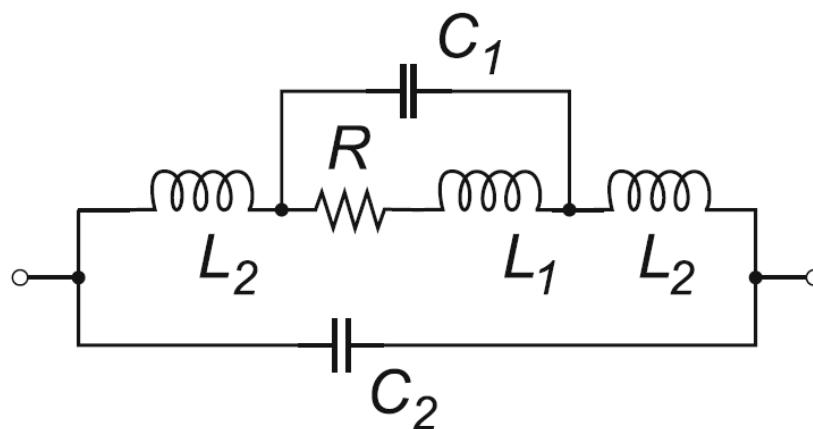
Nøyaktigere modell av ledere

- Ideell karakteristikk: Ledere har verken kapasitans eller induktans, men noe resistans
- Fysisk leder: Nærhet til andre ledere og hvordan den er plassert kan lage parasittkapasitans og -induktans
- Eddystrømmer går på tvers av magnetfeltet ved ac
- Skin-effekten skyldes Eddystrømmer og gjør at det effektive tverrsnittet minker med frekvensen (strømmen går bare langs ytterkanten av lederen) og resistansen øker derfor med økende frekvens
- Signaler med ulike frekvenser vil møte ulik resistans gjennom samme leder



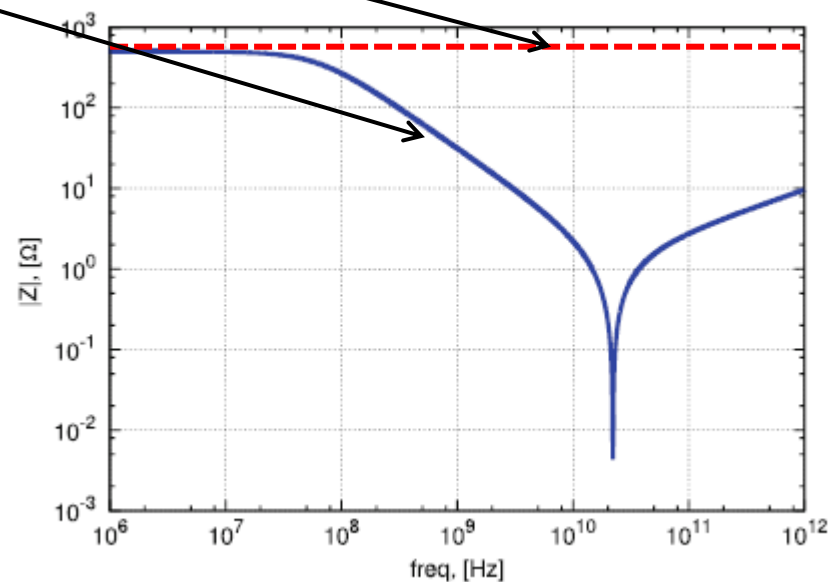
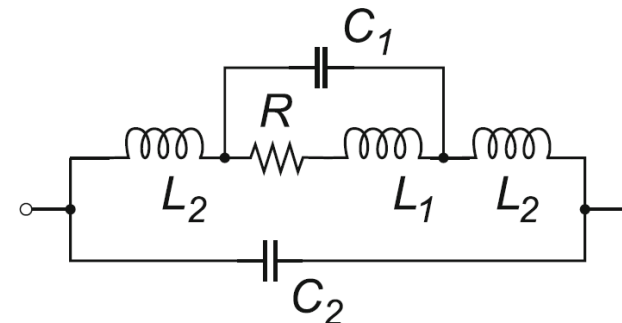
Nøyaktigere modell av resistor (1)

- Ideell karakteristikk: Impedans er uavhengig av frekvens
- I praksis blir resistorer kompliserte kretser når frekvensen blir høy (GHz)
- Årsak: Resistorer bygges med flere ulike materialer med ulike egenskaper for å gi ideell resistans innenfor et bestemt frekvensområde
- Utenfor dette området er karakteristikken langt fra ideell



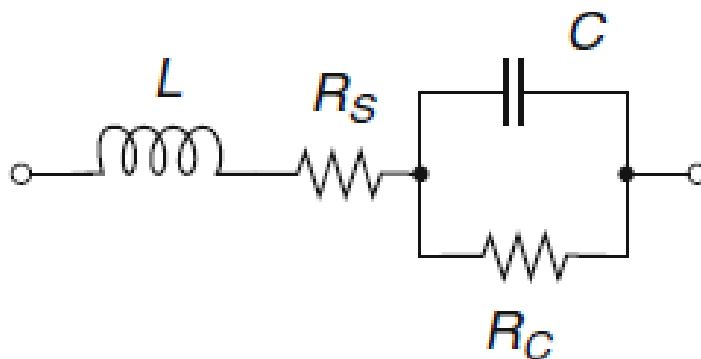
Nøyaktigere modell av resistor (2)

- Ideell karakteristikk
- Fysisk karakteristikk
 - 0 til 20 MHz: Ideell
 - 100MHz til 10GHz: Kapasitansen dominerer
 - 10-30 GHz: Brått fall i Z (resonans)
 - Fra 30 GHz : Induktans dominerer



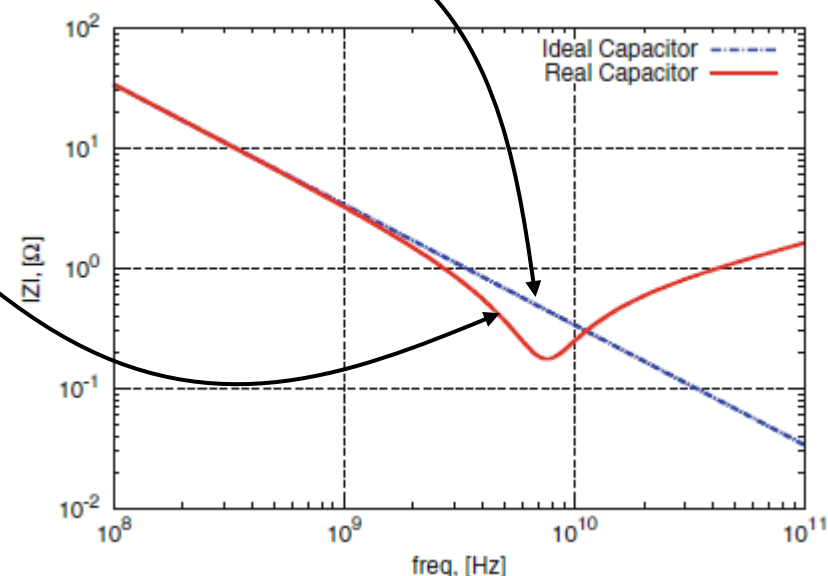
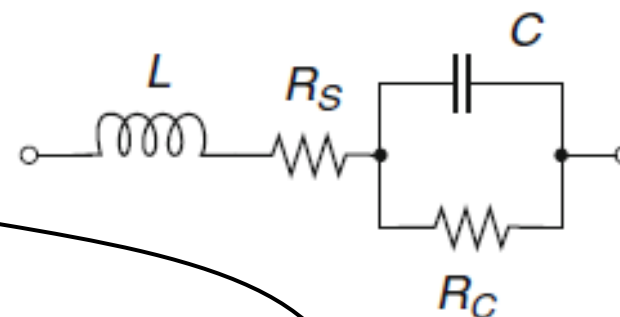
Nøyaktigere modell av kondensator (1)

- Ideell karakteristikk: Impedansen faller proporsjonalt med frekvensen
- I praksis blir også kondensatoren en komplisert krets etter hvert som frekvensen øker



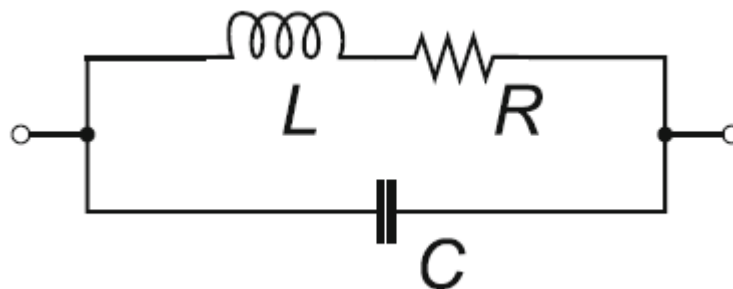
Nøyaktigere modell av kondensator (2)

- Ideell karakteristikk
- Fysisk karakteristikk
 - Under 1 GHz: Nær ideell kondensator
 - 1 til 10 GHz: Fall i impedansen (resonans)
 - Over 10 GHz: Induktiv impedans dominerer og kondensatoren oppfører seg mer som en spole



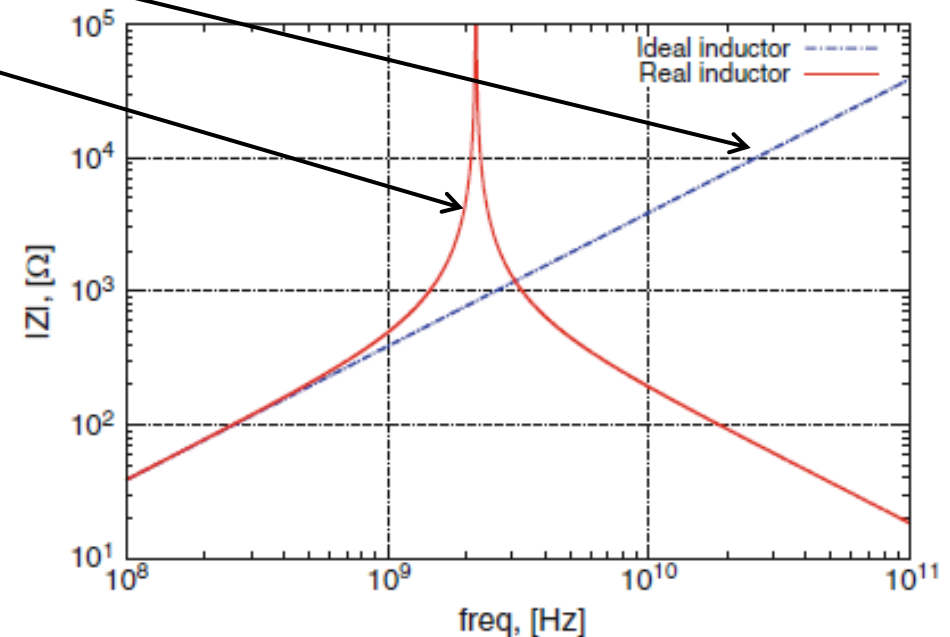
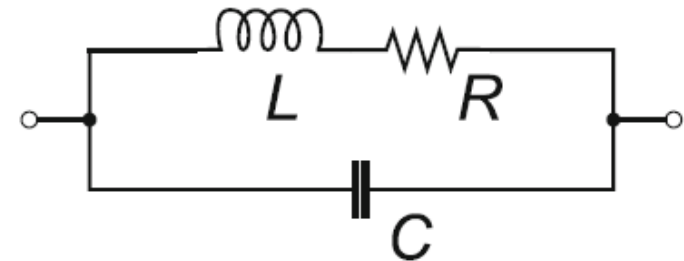
Nøyaktigere modell av induktor (1)

- Ideell karakteristikk: Lineær sammenheng mellom impedans og frekvens
- I praksis en mer komplisert modell, men allikevel enklere enn for resistorer og kondensatorer



Nøyaktigere modell av induktor (2)

- Ideell karakteristikk:
- Fysisk karakteristikk
 - Under 1GHz: Følger ideell induktor
 - 1-10 GHz: Sterkt økning i impedansen (resonans)
 - Over 10 GHz: Parasittkapasitansen dominerer fullstendig og spolen oppfører seg som en kondensator



Nøtt til neste gang

Hva er dette?



Oppsummeringsspørsmål

- Spørsmål fra forelesningene 6 og 7