

# Forelesning nr.1 INF 1411

## Elektroniske systemer

Kursoversikt

Strøm, spenning, ladning og Ohms lov



# Dagens temaer

- Organisering av kurset
- Læringsmål
- Bakgrunn og motivasjon for kurs i analog elektronikk
- Strøm, spenning, motstand og Ohms lov (Kap 2 og 3 fra læreboka)

# Organisering av kurset

- . Forelesningsplanen på kursets hjemmeside
  - .Forelesninger: 1 dobbelttime per uke
  - .Regneøvelser: 1 dobbelttime per uke
  - .Labøvelser: 1 dag per uke i snitt
- . Obligatoriske øvelser
  - .Alle må være bestått for å ta eksamen
  - .Utføres normalt i grupper på to personer
  - .5 øvelser i lab + 1 teorioppgave
- . Endringer kan forkomme
  - .Sjekk forelesningsplanen jevnlig!

## Om pensum

- . Pensum består av fire deler:
  - .Oppgitte kapitler fra læreboka
  - .Forelesninger og forelesningsnotater
  - .Gruppeoppgaver
  - .Labøvelser
- . Alle deler forutsettes kjent på eksamen

***NB: Ikke ta for lett på gruppeøvelsene!***

# Labøvelser

- Viktig del av kurset!
- Forelesningene: Teoretisk grunnlag for labøvelsene
- Labøvelsene
  - . Omsetter teorien til praksis
  - . Utfyllende kunnskaper om bla. variasjon i komponenter
  - . Gir kunnskap om labarbeid generelt og nyttig for senere kurs

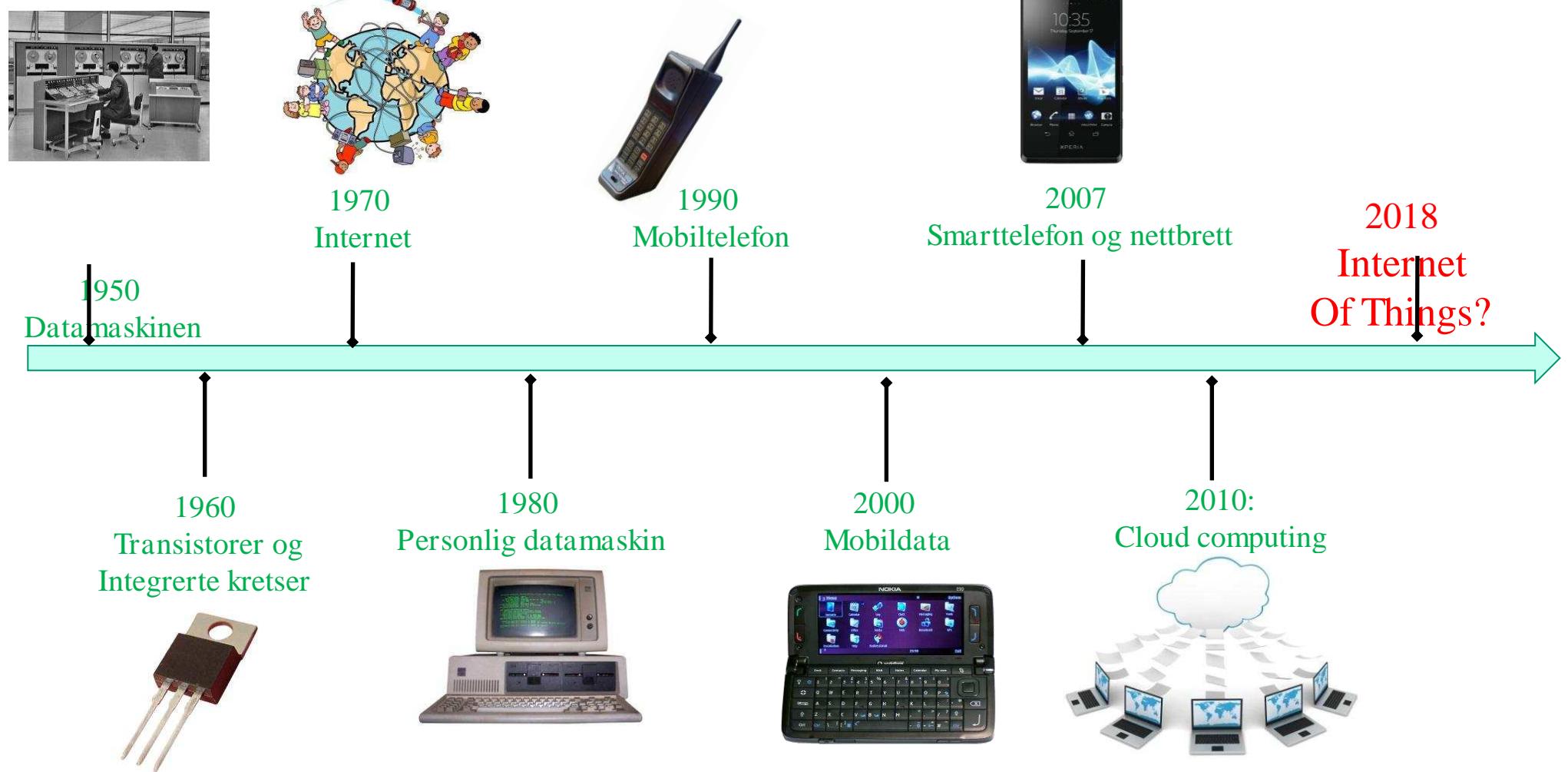


# Læringsmål for kurset

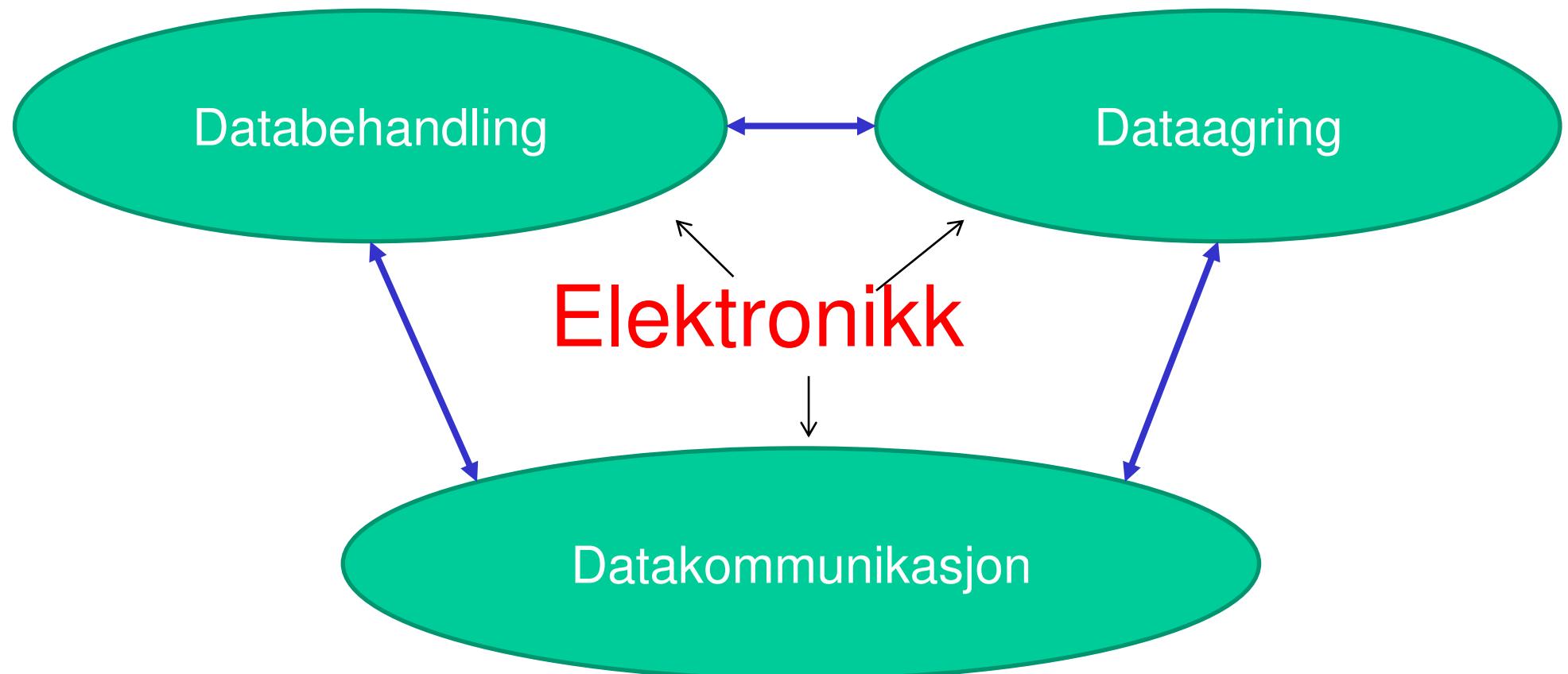


- . Hovedmålet å «*gi innføring i hvordan (enkle) elektroniske systemer fungerer, og hvordan enkeltkomponenter virker og kan settes sammen til større systemer*»
  - . Forstå sammenhengen mellom fysiske enheter som ladning, strøm, spenning, motstand etc og lover/formler
  - . Forstå virkemåten til elektroniske komponenter
  - . Forstå forskjell mellom hva som er teoretisk og praktisk mulig
  - . Regne på kretser og komponentverdier
  - . Måling på og konstruksjon av enkle kretser.

# Bakgrunn



# Tre oppgaver i informatikk

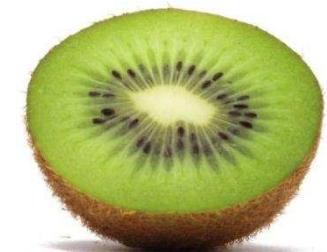


# Moore's law

*Antall transistorer på én integrert krets dobles hvert annet år*

Moore's lov har vist seg å gjelde mer:

- Regnekraft dobles ca hvert annet år (og prisen halveres)
- Datahukommelse dobles ca hvert annet år (og prisen halveres)
- Båndbredde dobles ca hvert annet år (og prisen halveres)



# Bakgrunn

- Elektronikk er overalt:
  - Datamaskiner, husholdningsapparater, biler, båter, medisinsk utstyr, våpen, musikk, foto, film, fly, tog, mobil-telefoner, sparepærer.....
- **Digital** elektronikk: Bruker to diskrete verdier: '0' og '1'
- **Analog** elektronikk: Verdier er kontinuerlige (uendelig mange)
  - Digital elektronikk er en spesiell type analog elektronikk

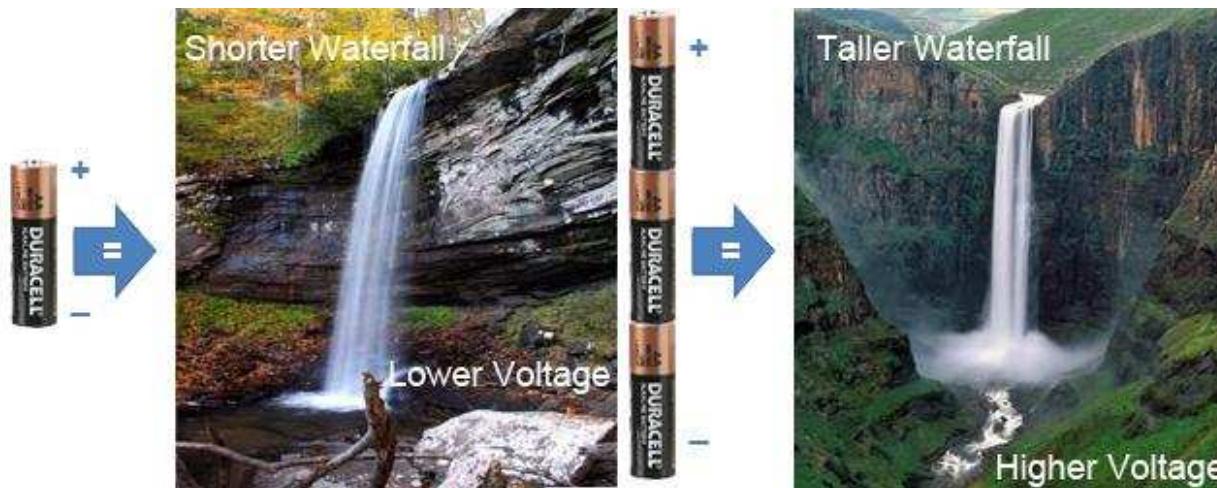


## Bakgrunn (forts)

- Digitale elektroniske systemer kan designes uten spesiell innsikt i analog elektronikk:
  - . Benytter velprøvde og standardiserte byggeblokker
  - . Designer på et høyere abstraksjonsnivå
- MEN
  - . Konstruksjon av digitale byggeblokker skjer på analognivå
  - . Stadig raskere digitale kretser oppfører seg mer og mer som analoge kretser (dvs ikke bare '0' og '1')
  - . Verden er analog (består av uendelig mange verdier), ikke digital

# Strøm og spenning – en analogi

- Strøm og spenning er svært grunnleggende fenomener som kan være litt vanskelige å forstå hva egentlig er
- Sammenligning: Vann som strømmer i en foss



- Spenning: Hastigheten til vannet
- Strøm: Vannmengden

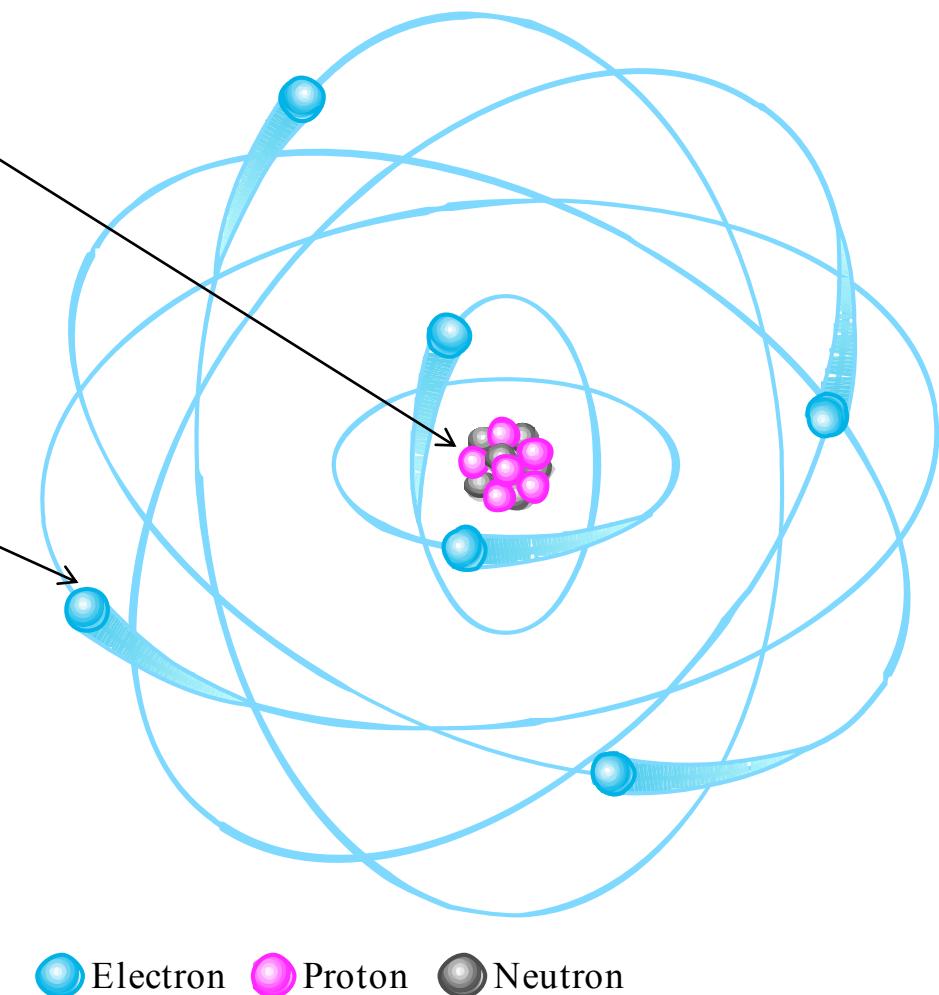
# Motstand– en analogi

- I tillegg er *motstand (resistans)* sentralt.
- Hvis vann renner gjennom et rør vil antall liter og hastigheten bremses:
  - . Et langt rør bremser mer enn et kort rør
  - . Et tynt rør bremser mer enn et tykt rør
- Hvis vi skal ha samme vannmengde gjennom et lang rør som et kort rør (eller et tynt rør som et tykt rør), må vi øke trykket
- Hvis vi skal ha samme trykk i et tynt som et tykt rør, må vi enten senke eller øke vannmengden



# Strøm og spenning: En mer presis forklaring

- Atomkjernen består av *positivt ladede protoner* og *nøytralt ladene nøytroner*
- Rundt atomkjernen svever *negativt ladede elektroner* i faste baner eller skall
- I et nøytralt atom er antall elektroner og protoner likt



## Atomer, valensbånd og ladning (forts)

- Det ytterste skallet kalles for et *valensbånd*
- Elektronene i valensbåndet er med på å bestemme elektriske egenskaper til atomet
- Elektroner i ytre valensbånd har høyere energi og lavere binding til kjernen
- Hvis det er få elektroner i det ytterste båndet kan de lett forlate atomet og bli *frie elektroner*



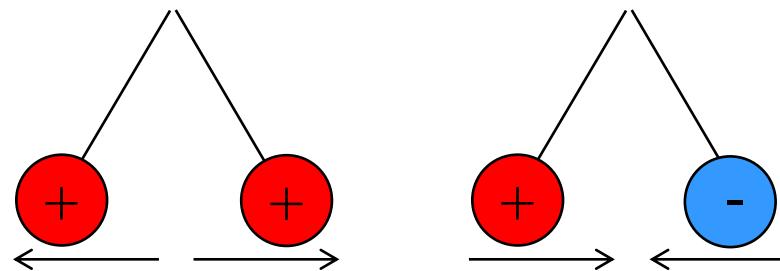
SLIDES  
WALLPAPERS

# Ulike materialers egenskaper

- . Antall elektroner i det ytterste valensbåndet bestemmer et materiales *elektriske* egenskaper:
  - . *Ledere*: Materiale med mange ledige elektronplasser i det ytterste valensbåndet, typisk. Kopper og sølv er eksempler på metaller som leder elektrisk strøm godt
  - . *Halvledere*: Typisk 4 valenselektroner i det ytterste skallet. Silisium og germanium er halvledere som leder strøm og viktige i elektroniske komponenter
  - . *Isolatorer*: Ingen valenselektroner, eller valenselektroner som er sterkt bundet til kjernen. Svært dårligere elektriske ledere

# Elektrisk ladning

- Mellom elektrisk *ladede* partikler er det en kraft som gjør at de enten *tiltrekker* eller *frastøter* hverandre



- Kraften er direkte proporsjonal med ladningen
- Kraften er omvendt proporsjonal med kvadratet av avstanden
- Denne kraften kalles *elektrisk felt*

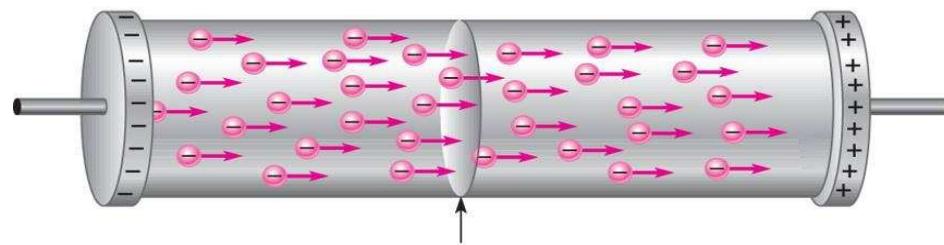
# Elektrisk ladning (forts)

- Elektrisk ladning måles i *coulomb* ( $C$ )
- 1 coulomb tilsvarer ladningen til  $6.25 \times 10^{18}$  elektroner
- Et elektron har en ladning på  $-1.609 \times 10^{-19} C$ , og et proton har en ladning på  $+1.609 \times 10^{-19} C$
- Ladning benevnes enten  $Q$  eller  $q(t)$
- Total ladning er gitt av

$$Q = \frac{\text{antall elektroner}}{6.25 \times 10^{18} \text{ elektroner}/C} = \text{antall elektroner} \times 1.609 \times 10^{-19} C$$

# Elektrisk ladning og strøm

- . En annen grunnleggende enhet er *elektrisk strøm* som måles i *ampere*
- . 1 ampere tilsvarer 1 coulomb som passerer et vilkårlig tverrsnitt i en elektrisk leder i løpet av 1 sekund



- . Elektrisk strøm  $I$  er altså et mål for antall ladninger per tidsintervall

$$I = \frac{Q}{t}$$

# Elektrisk ladning og strøm

- Strøm kan også betraktes som *overføring av ladning*
- Strøm har både en *verdi* og en *retning* (vektor)
- Gitt et referansepunkt måles strøm med hvilken rate ladninger passerer forbi punktet i øyeblikket
- Symbolet for strøm er  $I$  eller  $i(t)$
- Hvis strømmen varierer med tiden er det vanligere å angi sammenhengen mellom strøm og ladning slik:

$$i = \frac{dq}{dt}$$

# Spørsmål

1) Atomnummeret angir

- a. protoner i atomkjernen
- b. nøytronkjerner i atomkjernen
- c. protoner pluss nøytroner i atomkjernen
- d. elektroner i det ytre skallet

2) Valenselektroner er

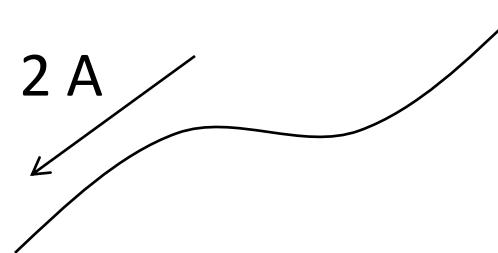
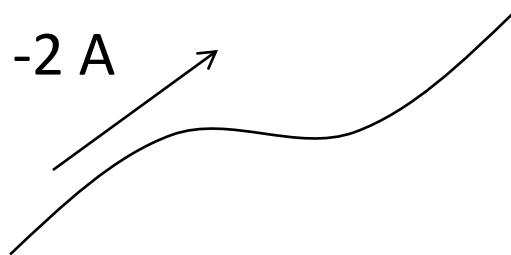
- a. I det ytre skallet
- b. involvert i kjemiske reaksjoner
- c. relativt løst bundet
- d. alle egenskapene over

# Spørsmål

- 3) Partikkelen som er ansvarlig for elektrisk strøm i faste ledende materialer er
- a. protonet
  - b. elektronet
  - c. nøytronet
  - d. alle nevnt over
- 4) Måleenheten for elektrisk ladning er
- a. C
  - b.  $\Omega$
  - c. Q
  - d. W

# Strøm

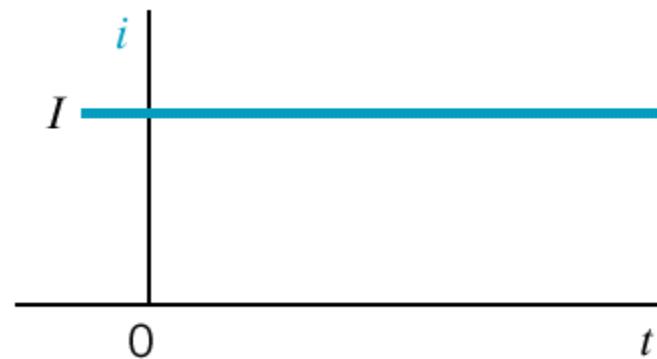
- Strøm har alltid en retning som angis med en pil



- Begge figurer angir samme strømstyrke og retning

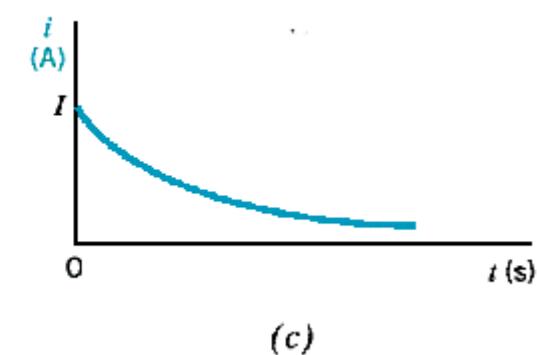
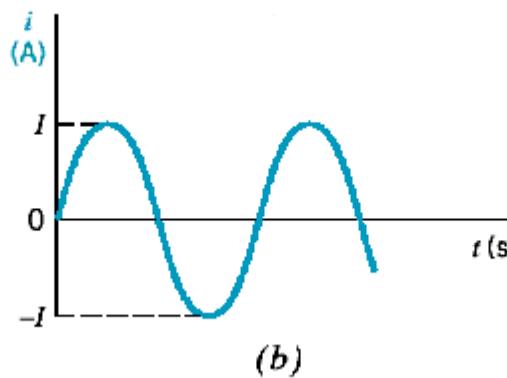
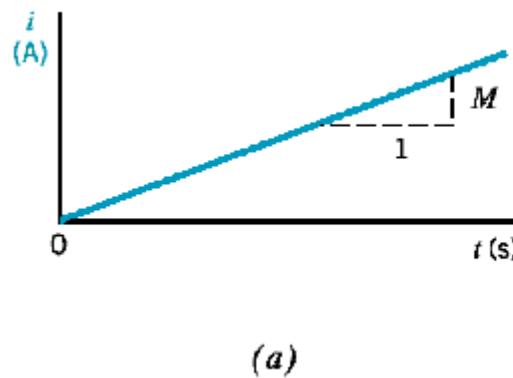
# Ulike typer strøm: Likestrøm (DC)

- En *likestrøm* er en strøm som er konstant over tid
- Betegnes med «I» (stor I)

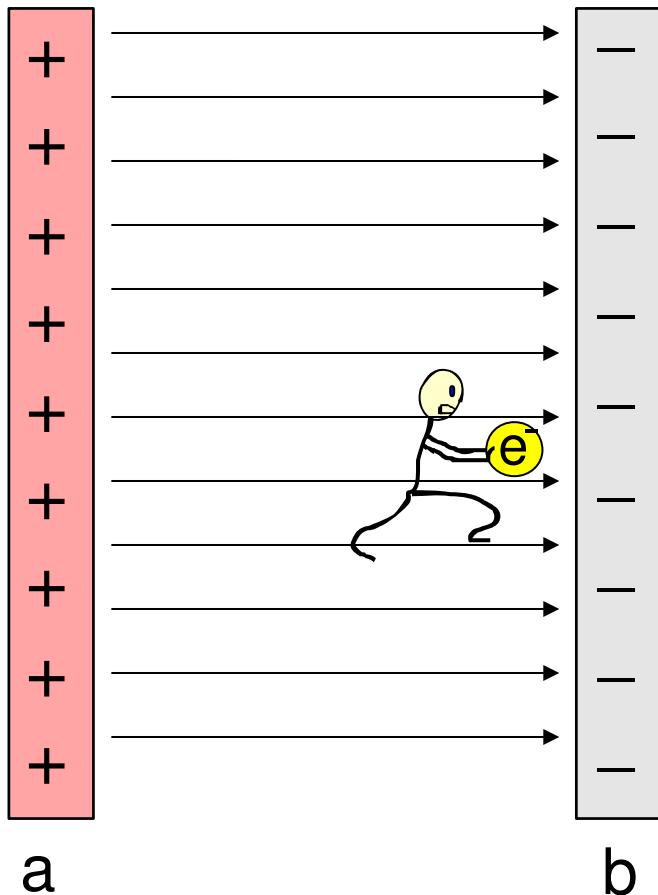


# Ulike typer strøm: Vekselstrøm (AC)

- En *vekselstrøm* varierer med tiden og betegnes med « $i$ » eller « $i(t)$ » (liten  $i$ )
- Variasjonen kan enten være periodisk eller ikke-periodisk



# Spennin



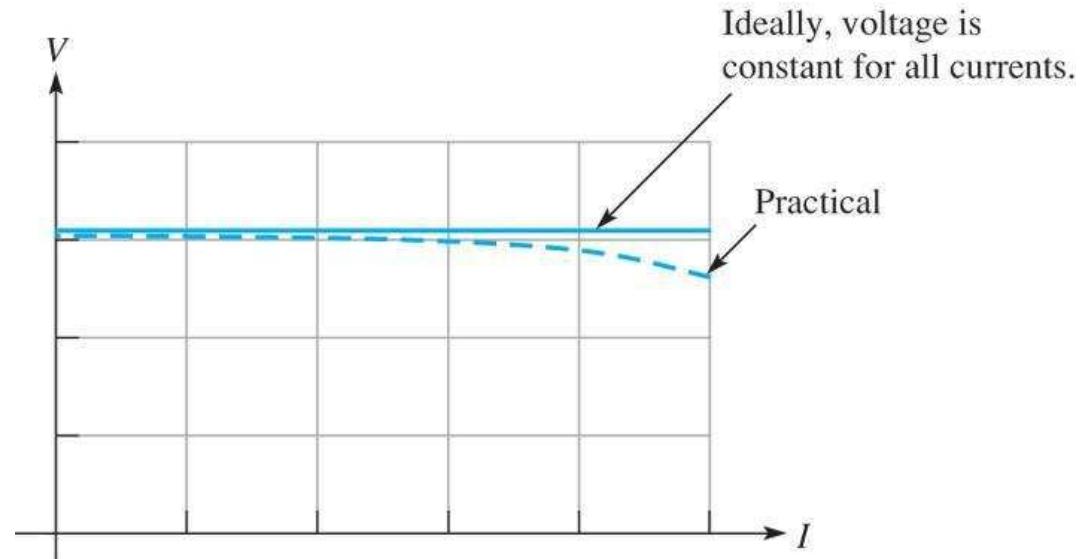
- For at ladninger skal bevege seg mellom  $a$  og  $b$ , må det være en *potensialforskjell* mellom  $a$  og  $b$ .
- Potensialforskjell eller *spenning* er et mål på arbeidet som kreves for å flytte ladinger fra  $a$  til  $b$
- Spennin måles i *volt* som er definert ved
$$V = \frac{\text{energi}}{\text{ladning}} = \frac{W}{Q}$$
- 1 volt er spenningen mellom  $a$  og  $b$  når 1 joule brukes for å flytte en ladning på 1 coulomb fra  $a$  til  $b$

# Spenningskilder

- Spenning kan enten være likespenning (DC), eller vekselspenning (AC)
- Batterier, brenselceller og solcellepaneler er likespenningskilder hvor spenning oppstår ved kjemiske reaksjoner eller konvertering av lys
- Generatorer er eksempel på vekselspenningskilder hvor spenning lages ved konvertering av mekaniske bevegelser som vind, vann eller havbølger

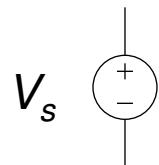
# Spenningskilder (forts)

- Spenningskilder kan enten være *ideelle* eller *ikke-ideelle (praktiske)*
- En ideell kilde leverer konstant spenning uavhengig av strømmen kilden leverer
- I virkeligheten vil spenningen synke når strømmen øker

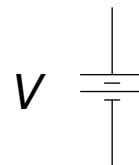


# Spenningskilder (forts)

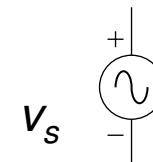
- Symboler for spenningskilder er



Likestrømskilde  
(DC-spenning)



Batteri  
(DC-spenning)

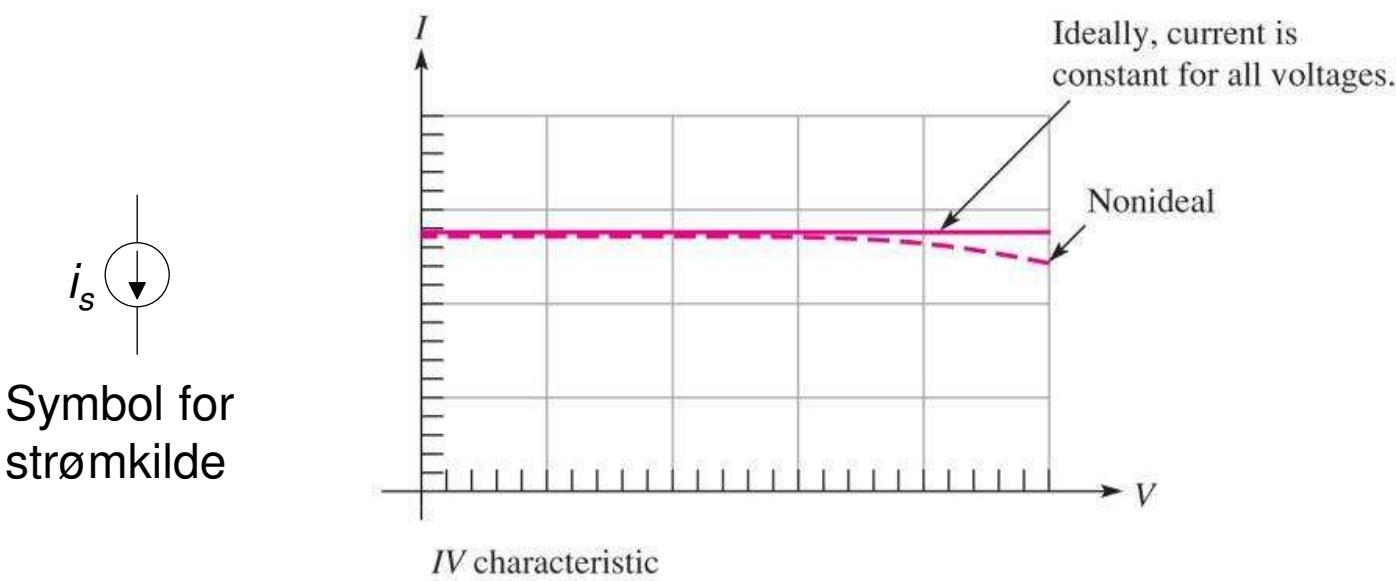


Vekselstrømskilde  
(AC-spenning)

- '+' terminalen er  $V_s$  (eller  $v_s$ ) volt *positiv* i forhold til '-' terminalen.
- Hvis  $V_s$  (eller  $v_s$ ) er  $< 0$ , er '+' terminalen *negativ* i forhold til '-' terminalen

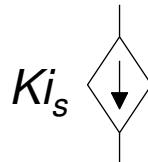
# Strømkilder

- Noen ganger trenger man kilder som kan levere strøm uavhengig av spenningen
- For å levere en konstant strøm må kilden variere spenningen etter behov
- Også strømkilder kan være enten *ideelle* eller *ikke-ideelle*

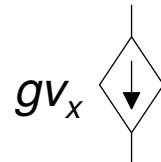


# Oppsummering kilder

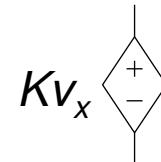
- Kilder kan enten være *ideelle* eller *ikke-ideelle*
- I tillegg kan kilder være *uavhengige* eller *avhengige*
  - . **Uavhengig:** Kilden leverer strøm eller spenning som ikke er avhengig av andre strømmer eller spenninger i en krets
  - . **Avhengig:** Kilden leverer en strøm eller spenning som er proporsjonal med en annen strøm eller spenning i en krets



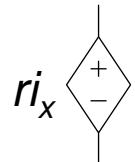
Strømkontrollert  
strømkilde



Spenningskontrollert  
strømkilde



Spenningskontrollert  
spenningskilde



Strømkontrollert  
spenningskilde

# Spørsmål

1) En ideell strømkilde leverer en strøm som er

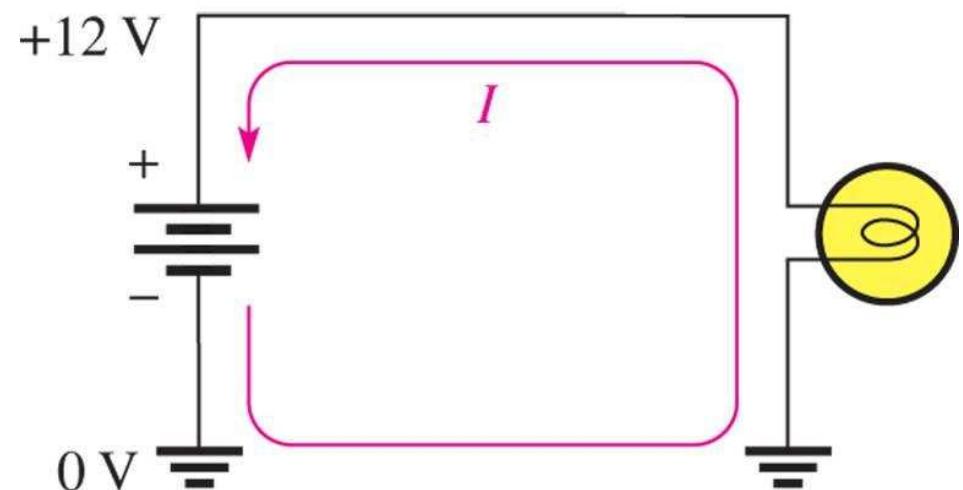
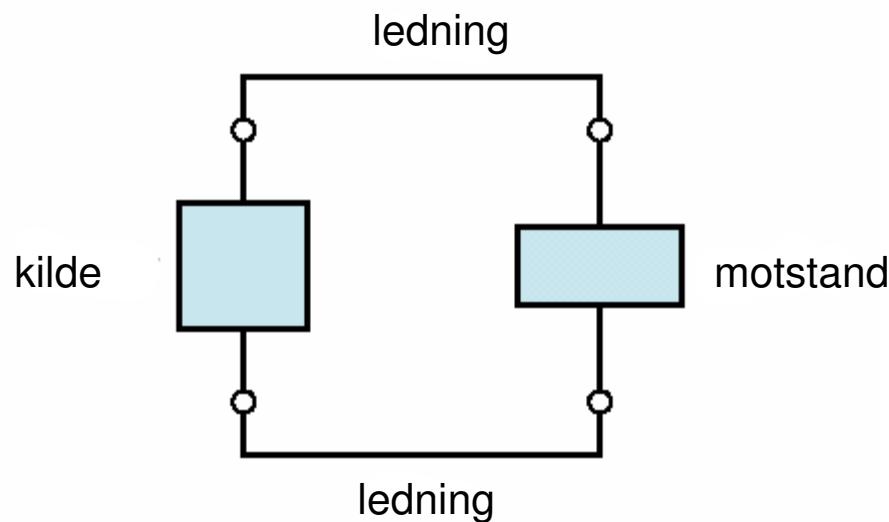
- a. Uavhengig av spenningen over strømkilden
- b. Direkte proporsjonal med spenningen
- c. Omvendt proporsjonal med spenningen
- d. Konstant

2) En uavhengig spenningskilde

- a. Leverer spenning som er uavhengig av strømmen gjennom den
- b. Leverer spenning som er avhengig av strømmen gjennom den
- c. Leverer spenning som uavhengig av andre kilder
- d. Leverer strøm som er avhengig av andre spenningskilder

# Elektrisk krets

En *elektrisk krets* er en sammenkopling av elektriske elementer i en lukket løkke slik at elektriske ladninger eller strøm beveger seg i løkken



# Resistans

- Når en elektrisk strøm går gjennom en leder eller et kretselement vil det alltid være en *resistans*  $R$
- Resistans er et materiales motstand mot elektrisk strøm  
Resistans gjør at endel av energien til elektronene som beveger seg konverteres til lys eller varme
- Ledere vil man at skal ha veldig lav eller ingen resistans for å unngå tap av energi
- Andre ganger ønsker man å ha en bestemt resistans, og da bruker man en *resistor* eller *Ohmsk motstand*

# Resistans (forts)

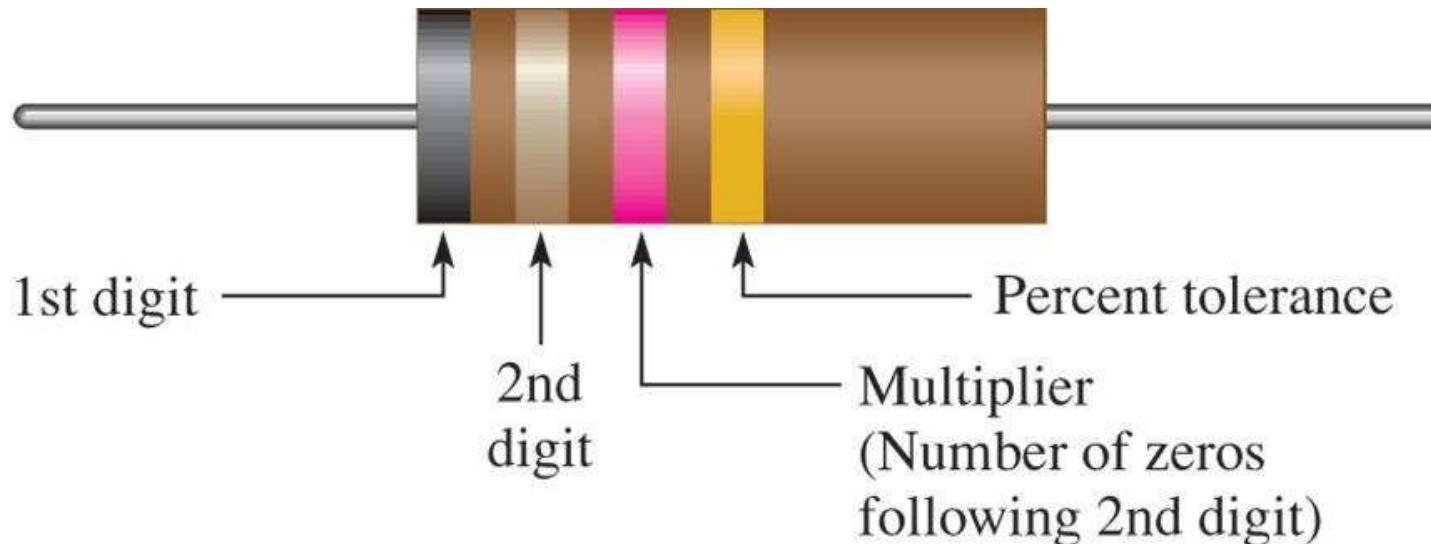
- Resistans måles i enheten Ohm
  - . 1 Ohm er motstanden når det går en strøm på 1 ampere i et materiale med 1 volt spenningsforskjell mellom endepunktene
  - . Det motsatte av resistans (dvs. ledningsevne) kalles *konduktans* og måles i Siemens

$$G = \frac{1}{R}$$

- Resistorer lages i mange ulike varianter, avhengig av bruksområde (strøm, spenning, fysisk størrelse og form, effekt, nøyaktighet)

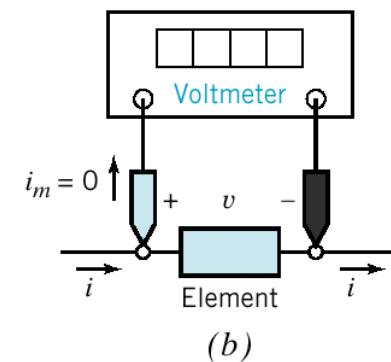
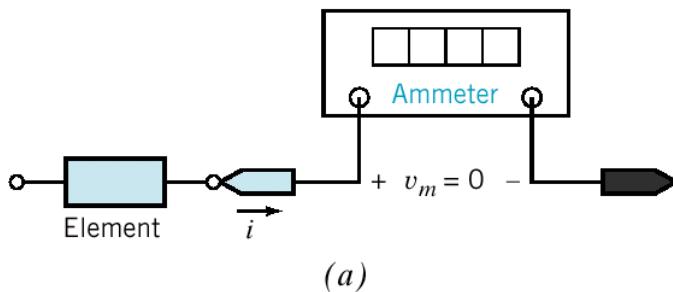
# Resistans (forts)

- Fargekoding brukes for å angi Ohm og toleranse (mer om dette på lab og gruppeundervisning)



# Måling av spenning, strøm og resistans

- Strøm, spenning og motstand kan måles med et *multimeter*
- Multimetre kan også måle effekt, frekvens, osv
- Man måler spenningen **over** og strømmen **gjennom** et element
- Første labøvelse vil dreie seg mye om måling



# Ohms lov

- Ohms lov gir sammenhengen mellom strøm, spenning og resistans (motstand):

$$V = RI$$

- Alternativt kan dette skrives som

$$I = \frac{V}{R}$$

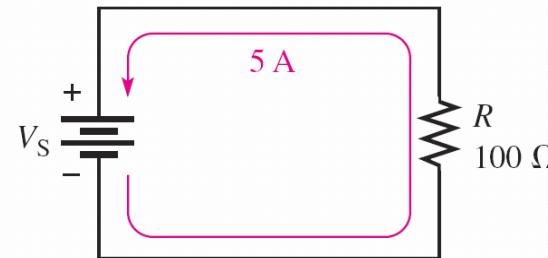
eller

$$R = \frac{V}{I}$$

- Hvis  $V$  øker og  $R$  er konstant, øker  $I$
- Hvis  $V$  er konstant og  $R$  øker, synker  $I$

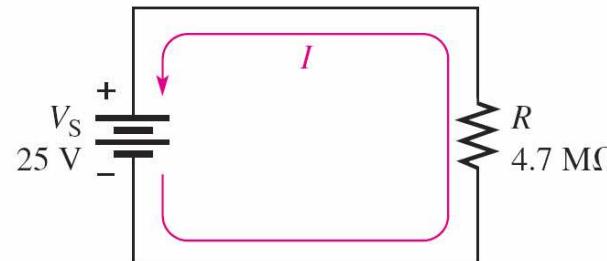
# Bruk av Ohms lov

- Når spenning er ukjent:



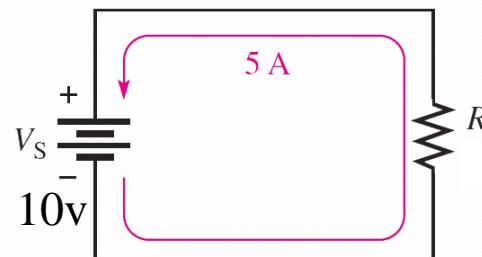
$$V = 100\Omega \cdot 5 \text{ A} = 500\text{v}$$

- Når strømmen er ukjent:



$$I = \frac{25\text{v}}{4.7\text{M}\Omega} = 5.32\mu\text{A}$$

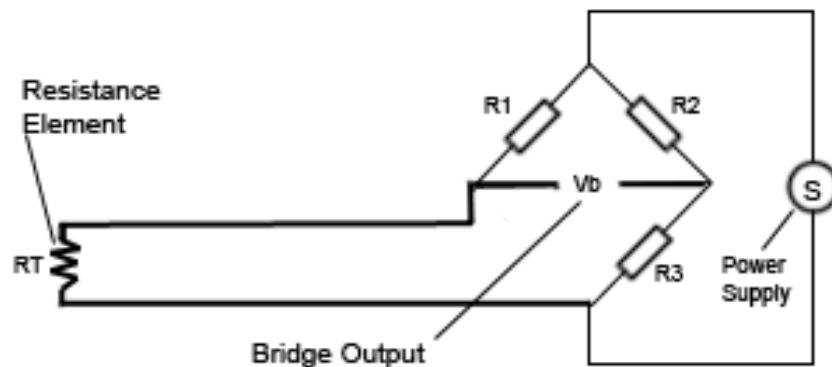
- Når resistansen er ukjent:



$$R = \frac{10\text{v}}{5\text{A}} = 2\Omega$$

# Eksempel: Måling av temperatur

- Variasjon i R kan brukes til å måle temperatur:



- Spenningen  $V_b$  er et mål for temperaturen
- Fordelen med kretsen er at man ikke må måle både strøm og spenning for å bestemme  $R_t$  (dvs temperaturen)
- Kretsen kan også kalibreres (nullstilles)

# Spørsmål

1) Hvis resistansen er  $10\Omega$  og strømmen er  $0.2A$ , hva er spenningen?

- a. 20 volt
- b. 0.2 volt
- c. 2000 millivolt
- d. 2 Siemens

2) Ohms lov gir sammenhengen mellom

- a. Ladning, spenning og tid
- b. Ladning, strøm og tid
- c. Resistans, strøm og ladning
- d. Resistans, strøm og spenning

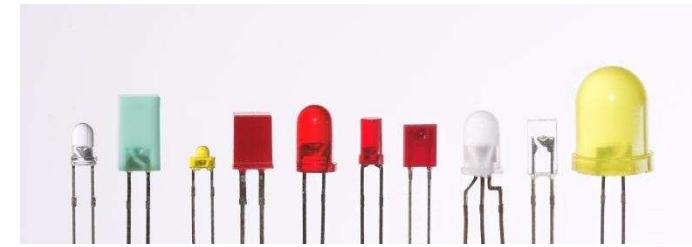
# Spørsmål

3) Resistans er et uttrykk for

- a. Et materiales motstand mot elektrisk spenning
- b. Et materiales motstand mot elektrisk strøm
- c. Et materiales evne til å lede elektrisk strøm
- d. Et materiales evne til å transportere protoner

4) Hvis spenningen skal være konstant når strømmen øker, så må

- a. Konduktansen økes
- b. Resistansen økes
- c. Resistans holdes konstant
- d. Konduktansen holdes konstant



# Forelesning nr.2 INF 1411

## Elektroniske systemer

Effekt, serielle kretser og  
Kirchhoffs spenningslov



# Dagens temaer

- Sammenheng, strøm, spenning, energi og effekt
- Strøm og motstand i serielle kretser
- Spenningskilder i serielle kretser
- Spenningsdelere
- Presentasjon av 1. labøvelse
- Temaene hentes fra Kapittel 3.3-3.7 og 4.1-4.9

# Energi og effekt

- Energi kan defineres som "evnen til å utføre arbeid"
- Energi måles i joule (J) og er uttrykt ved basisenhetene

$$J = \frac{kg \times m^2}{s^2}$$

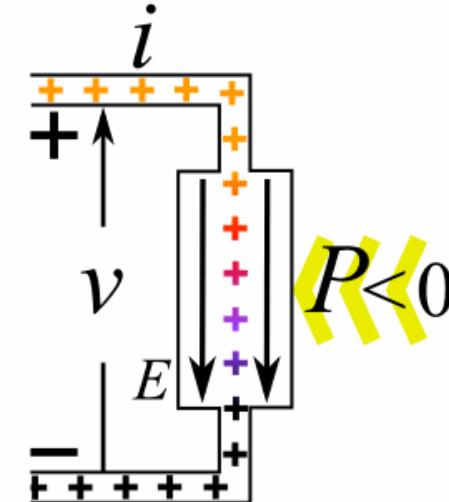
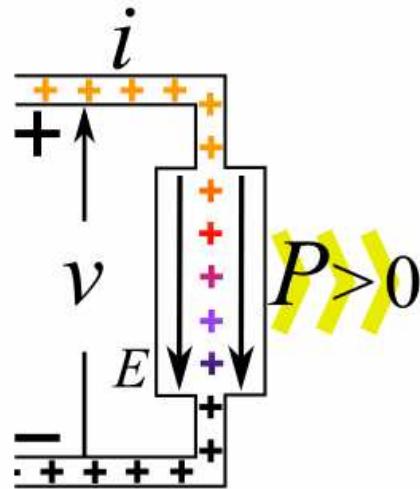
- *Effekt P* måles i watt (W) og defineres som "arbeid per tidsenhet" og uttrykkes ved

$$P = \frac{J}{s}$$



# Effekt, spenning og strøm

- Når en strøm  $i$  går gjennom et element med spenning  $V$  over terminalene, er *effekten* gitt ved  $P=VI$
- Effekt kan både være *positiv* og *negativ*:  
**Positiv:** Elementet *absorberer* effekt  
**Negativ:** Elementet *leverer* effekt

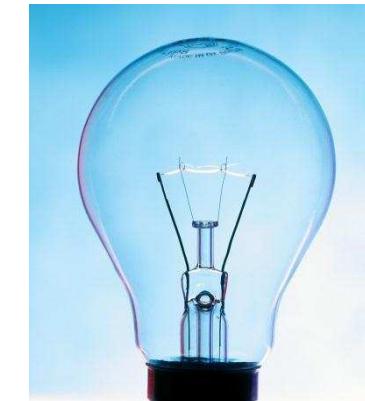


# Energitap i resistorer

- Resistans fører til at en del av energien til elektroner i bevegelse går over i andre former
- Energien blir enten til *varme* eller *lys*:
  - Ønsket: Produksjon av varme eller lys
  - Uønsket: Overføringstap eller varme som må ledes bort
- Effekten er gitt av følgende formel:

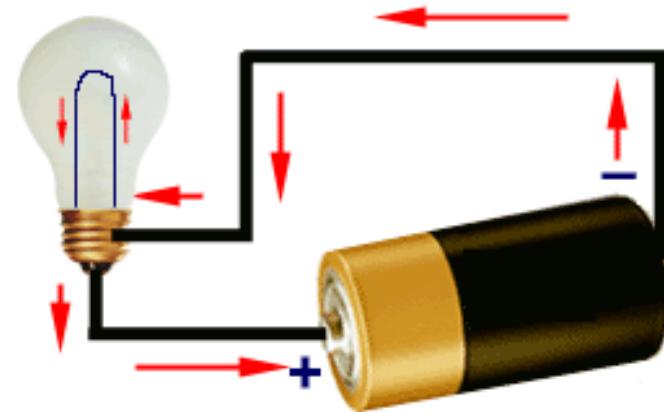
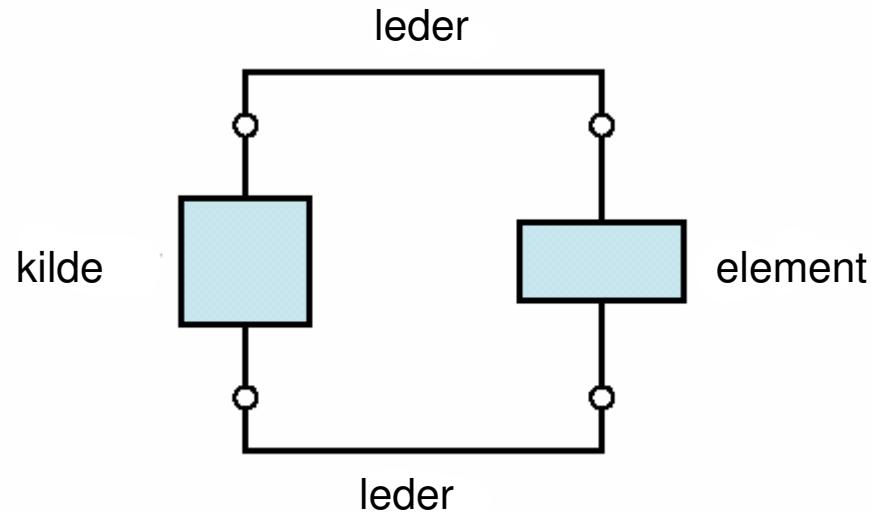


$$P = VI = I^2R = \frac{V^2}{R}$$





# Ta det hele i bruk: Elektriske kretser



- En *elektrisk krets* består av *elementer* og *kilder* som er koblet sammen
- *Elementene* klassifiseres etter hvilke *egenskaper* de har
- Kretsen klassifiseres etter hvilken *topologi* den har

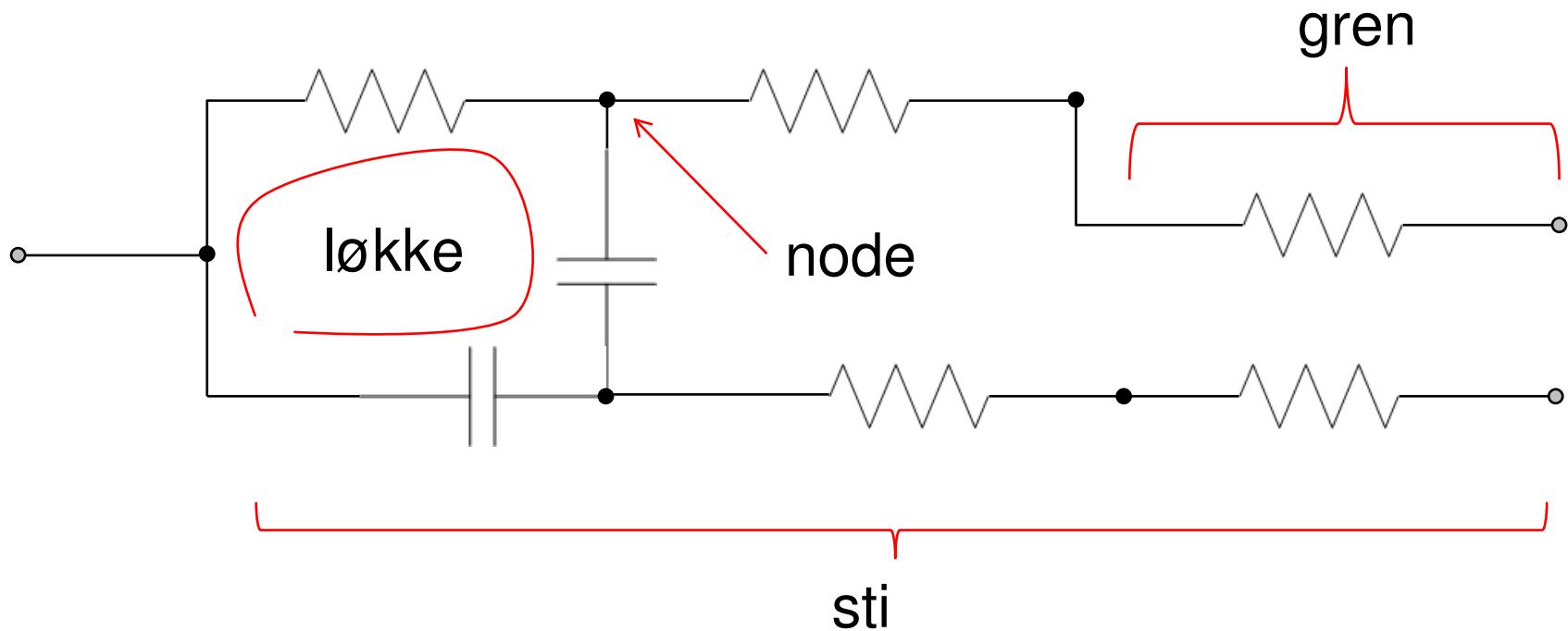
# Kretselementer

- Et kretselement er en *matematisk* modell for en *fysisk* enhet
- Modellen kan være enkel eller komplisert
- Alle elementene klassifiseres ut fra strøm-spennings-forholdet mellom terminalene
- Skiller mellom *aktive* og *passive* elementer
  - Passive elementer *kan ikke* levere effekt  $> 0$  over tid
  - Aktive elementer *kan* levere levere effekt  $> 0$  over tid
- Strøm- og spenningskilder og transistorer er *aktive* elementer
- Resistorer, kondensatorer og spoler er *passive* elementer

# Nettverkstopologier

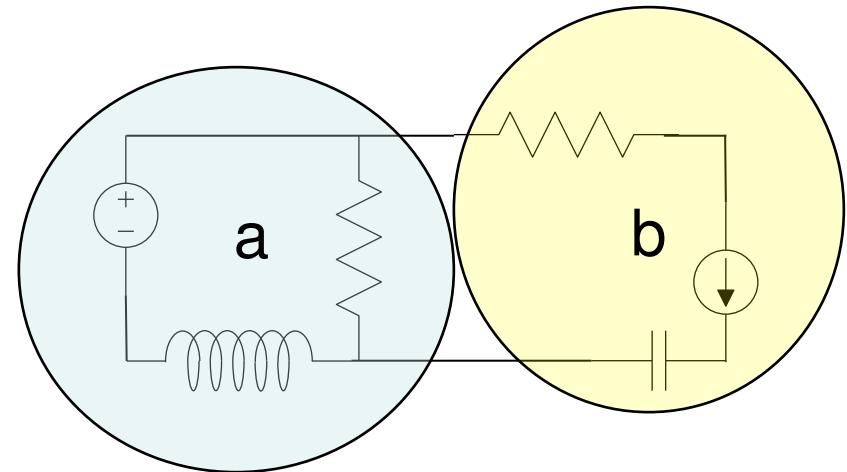
- *Nettverk*: Samling av elementer koblet sammen
- *Node*: Punkt hvor to eller flere elementer er koblet sammen med null motstand
- *Sti*: Vei mellom to noder gjennom et nettverk hvor en node besøkes kun én gang
- *Løkke*: Samme som *lukket sti*: Sti hvor start- og slutt-node er identisk
- *Gren*: Sti som består av ett enkelt element og nodene i hver ende

# Eksempel



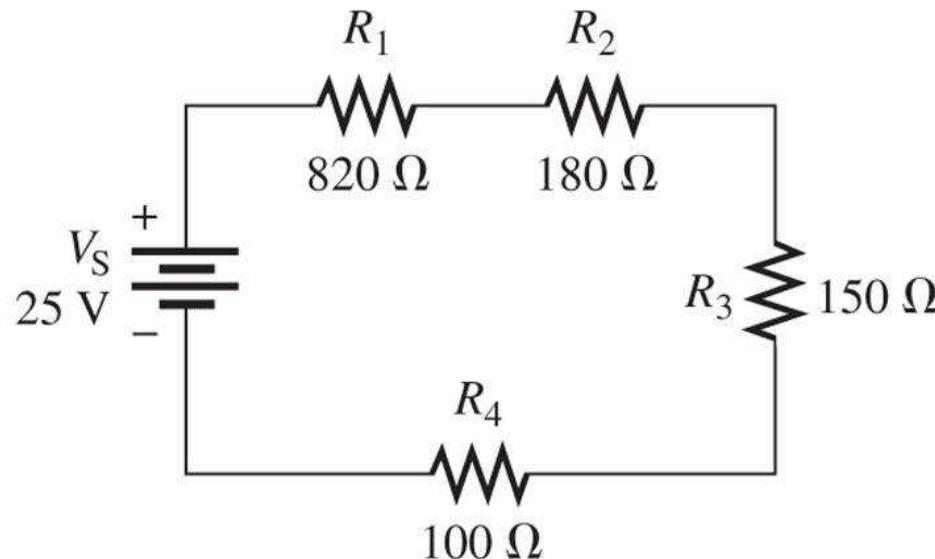
# Spørsmål

- Gitt kretsen over til høyre
  - Hva kan denne kretsen også kalles?
  - Hvor mange noder har den?
  - Hvor mange elementer har den totalt?
  - Hvor mange hhv aktive og passive elementer har den?
  - Hva kalles den delen av kretsen som ligger innenfor sirkelen til venstre (del **a**)?
  - Hva kalles den delen av kretsen som ligger innenfor sirkelen til høyre (del **b**)?
  - Hvor mange løkker har kretsen totalt?
  - Hva kalles tilkoblingspunktene mellom **a** og **b**?



# Bruk av Ohms lov - 1

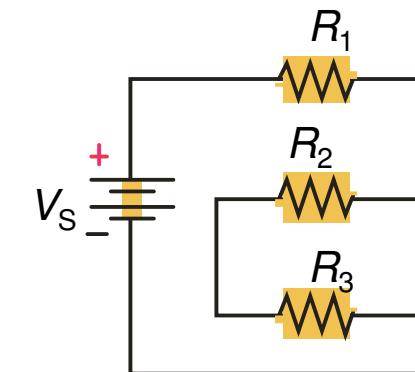
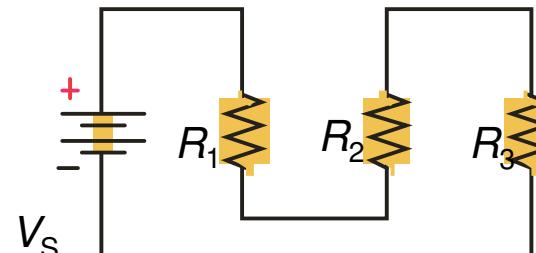
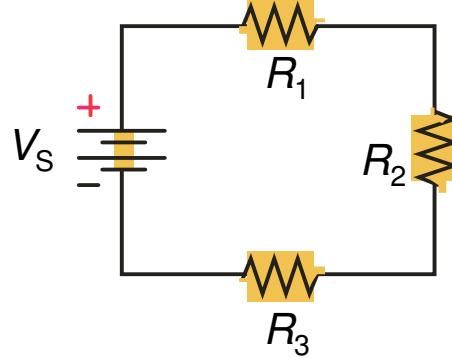
- Ønsker å finne strømmen når resistans og spenning er kjent:



$$I = \frac{V_s}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} = \frac{25v}{820\Omega + 180\Omega + 150\Omega + 100\Omega} = 20mA$$

# Serielle kretser

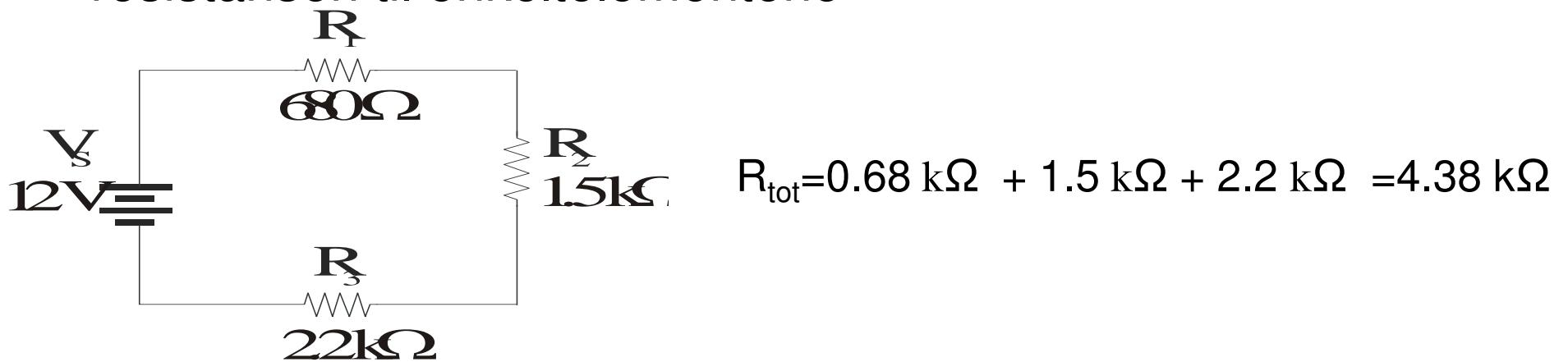
- En seriell krets har minst én kilde og/eller ett element
  - Bare én felles løkke som strømmen går igjennom (*samme* strøm går igjennom alle kilder og elementer)



- Hvor må man koble inn et ampèremeter for å måle strømmen gjennom hver av de tre kretsene?

# Total resistans i serielle kretser

- Den totale resistansen i en seriell krets er lik summen av resistansen til enkeltelementene



- Den totale resistansen for N resistanser i serie er gitt ved

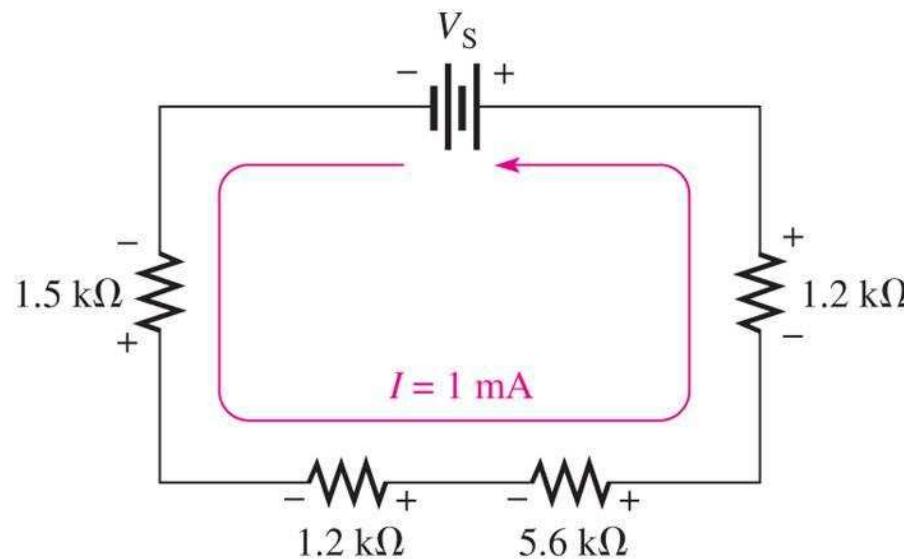
$$R_{tot} = R_1 + R_2 + \dots + R_N$$

# Spørsmål

- Hvor stor indre resistans har en ideell spenningskilde?
- Hvor stor indre resistans har en ideell strømkilde?
- Hvor stor indre resistans har en amperemeter?
- Hva slags energiformer kan energien til elektroner gå over i?
- Kan en seriell krets bestå av både strøm- og spenningskilder?
- Kan en seriell krets bestå av mer enn én løkke?

## Bruk av Ohms lov - 2

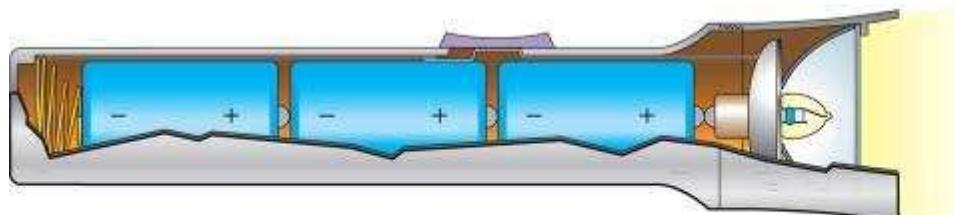
- Ønsker å finne spenningen når resistans og strøm er kjent:



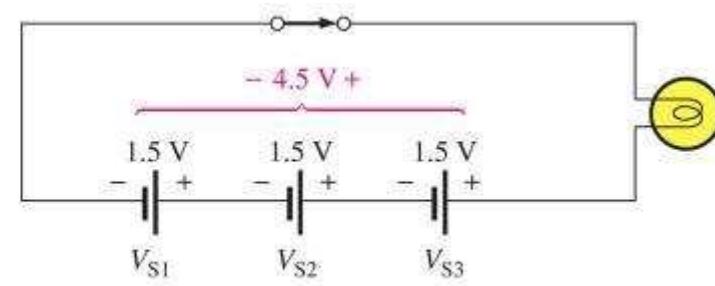
$$V_s = I(R_1 + R_2 + R_3 + R_4) = 1\text{ mA}(1.2\text{ k}\Omega + 5.6\text{ k}\Omega + 1.2\text{ k}\Omega + 1.5\text{ k}\Omega) = 9.5\text{ V}$$

# Kirchhoffs spenningslov (KVL)

- I eksemplene så langt har kretsen bestått av kun én spennningskilde
- Kretser drevet av batterier har ofte flere batterier koblet etterhverandre, f.eks i en lommelykt:



(a) Flashlight with series batteries

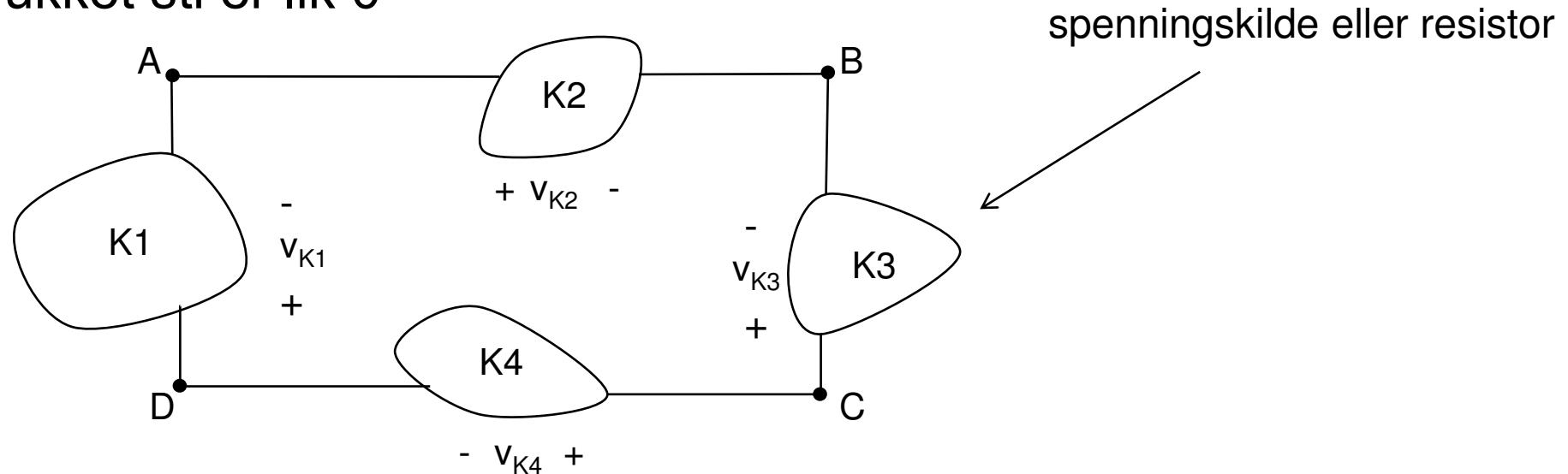


(b) Schematic of flashlight circuit

- I kretser med flere spenningskilder kan man benytte *Kirchhoffs spenningslov* for å finne den totale spenningen

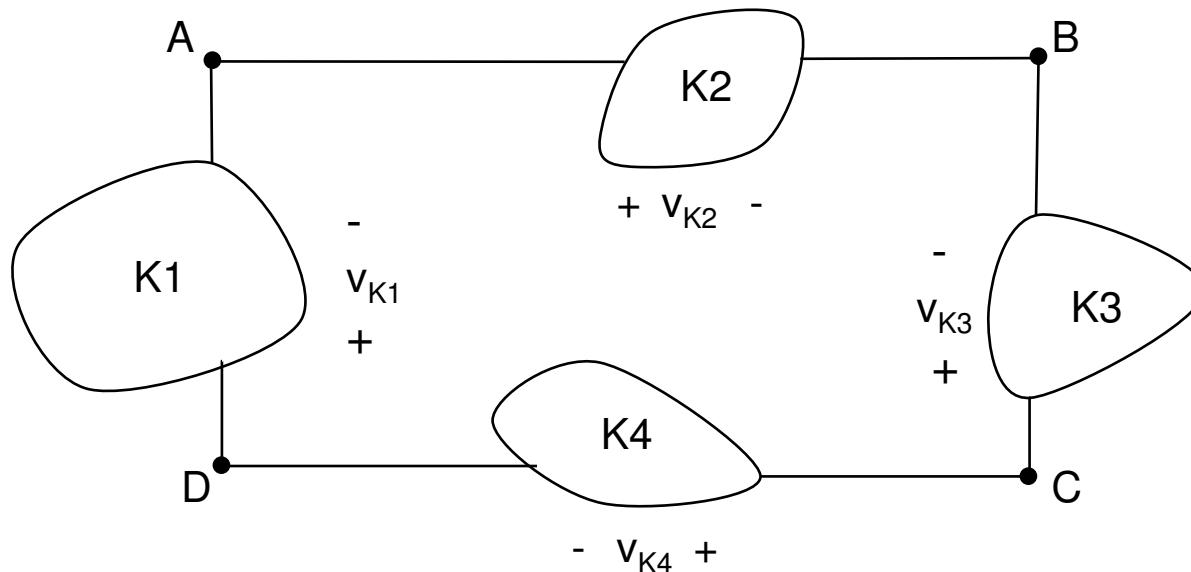
## Kirchhoffs spenningsløv (forts)

- "Den algebraiske summen av spenningene rundt enhver lukket sti er lik 0"



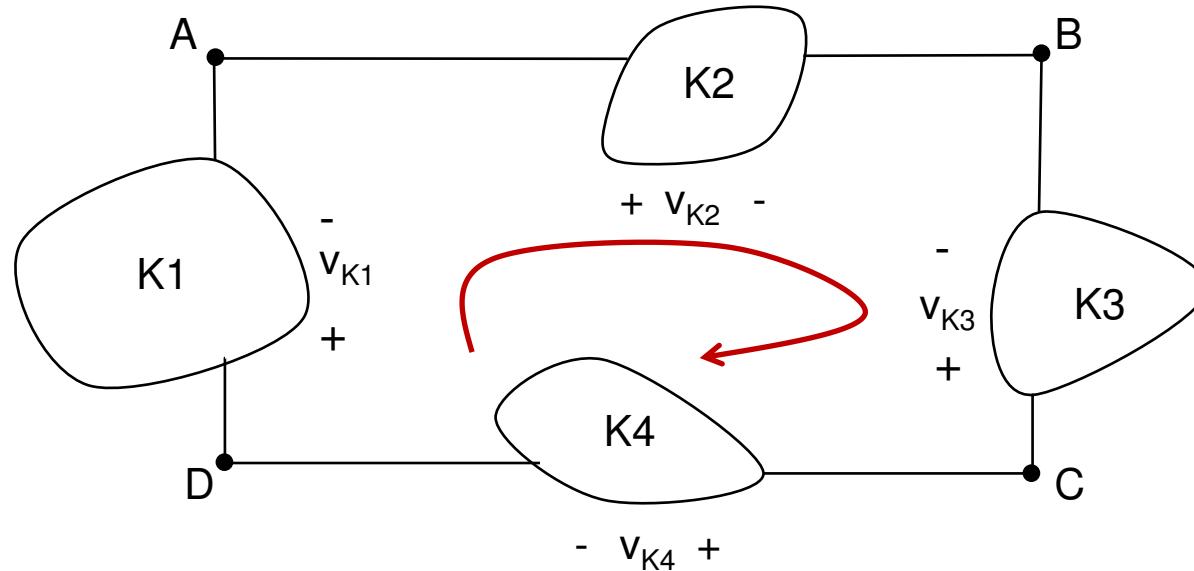
- Energien som kreves for å flytte en ladning mellom to noder er uavhengig av hvilken vei som velges gjennom kretsen

# Kirchhoffs spenningslov (forts)



- Velger en retning (med eller mot klokka) gjennom løkken:
  - Hvis man treffer på «+» på et element først, settes spenningen som positiv
  - Hvis man treffer på «-» på et element først, settes spenningen som negativ

# Kirchhoffs spenningslovs (forts)

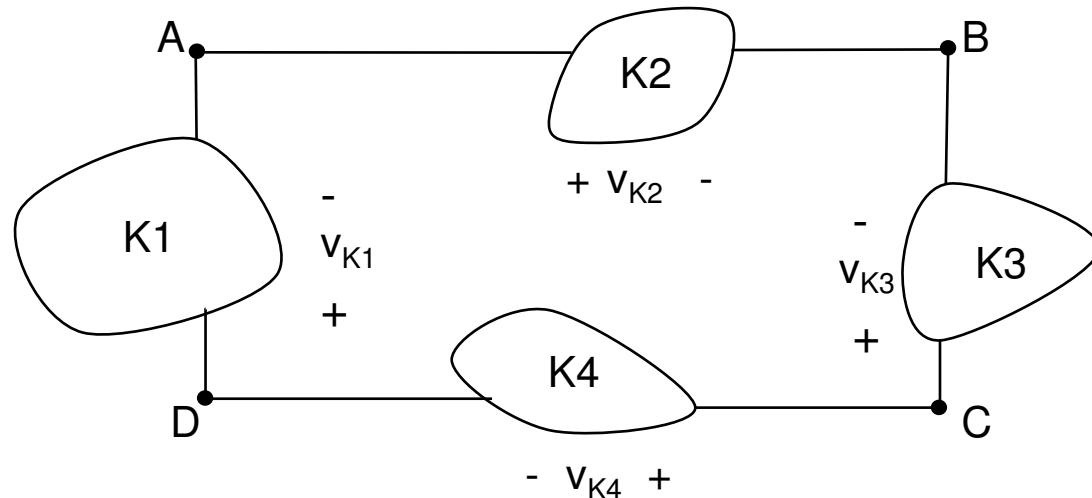


- Starter i node A og går med klokken:

$$v_{K2} + (-v_{K3}) + v_{K4} + v_{K1} = 0 \Rightarrow v_{K3} = v_{K1} + v_{K2} + v_{K4}$$

## Kirchhoffs spenningslov (forts)

- Samme energi kreves for å flytte en ladning fra A → B → C , som fra A → D → C



$$v_{ABC} = v_{K2} - v_{K3} \quad \wedge \quad v_{ADC} = -v_{K1} - v_{K4} \Rightarrow$$

$$v_{ABC} = v_{ADC} \Rightarrow v_{K2} - v_{K3} = -v_{K1} - v_{K4} \Rightarrow$$

$$-v_{K3} + v_{K1} + v_{K2} + v_{K4} = 0$$

# Spørsmål

- Er A positiv eller negativ i forhold til B?

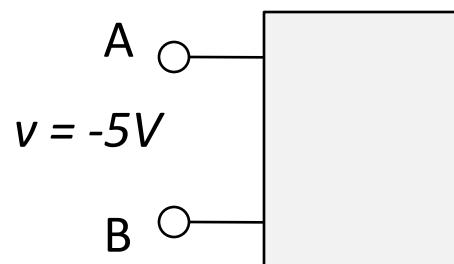


Fig 1)

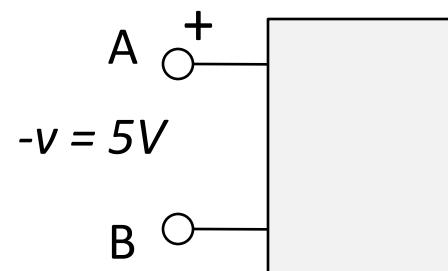


Fig 2)

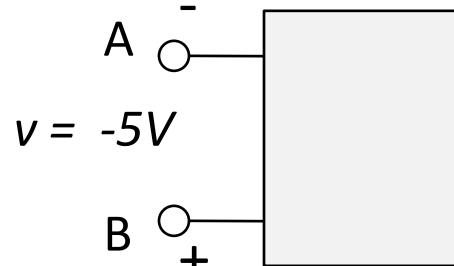


Fig 3)

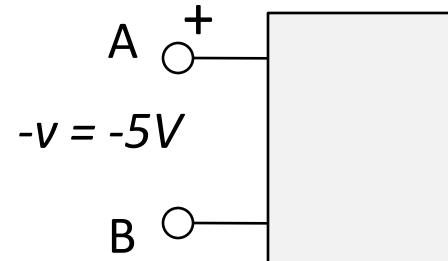
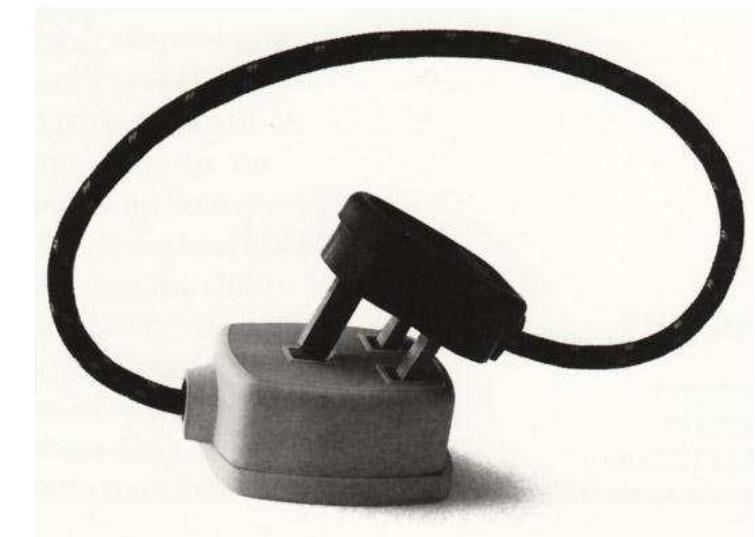
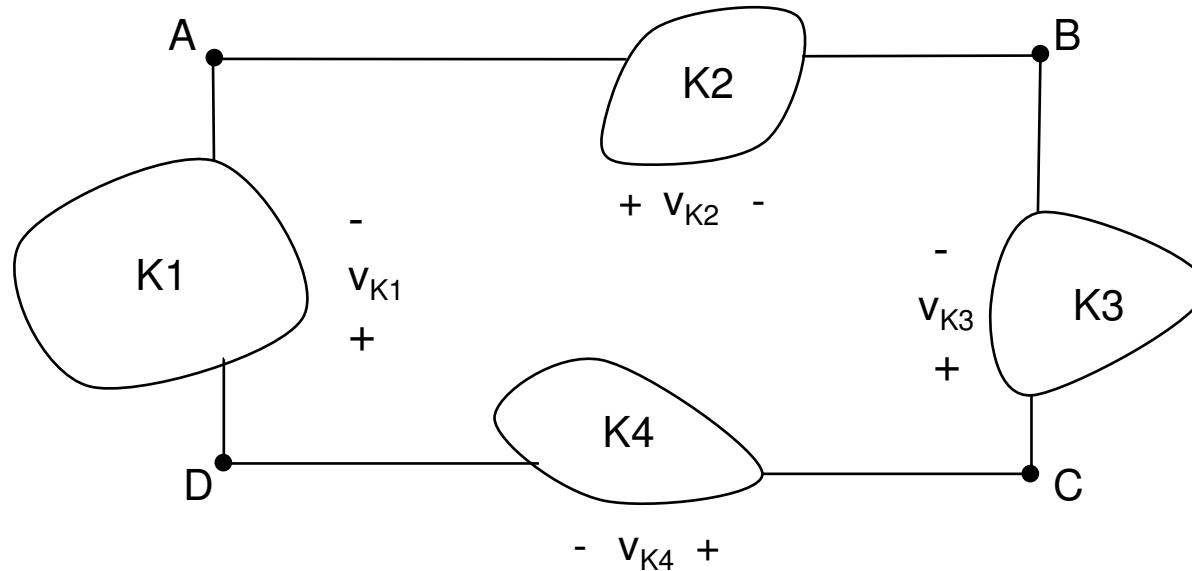


Fig 4)

# Spørsmål

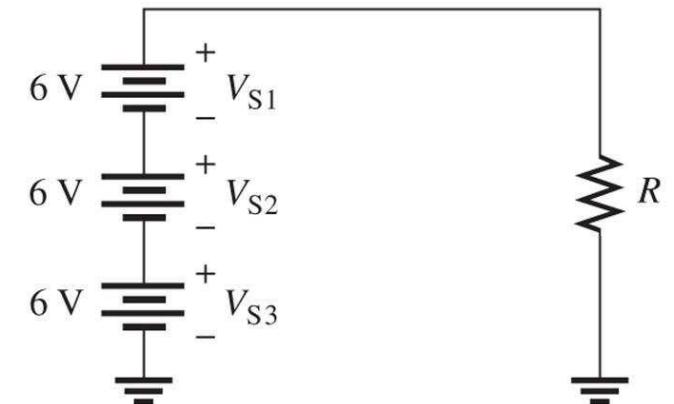
- Finn  $V_{K3}$  når  $V_{K1} = 2v$ ,  $V_{K2} = 5v$  og  $V_{K4} = -4v$



- Hva skjer hvis  $V_{K3} = 12v$ ,  $V_{K1} = 0v$ ,  $V_{K2} = 0v$  og  $V_{K4} = 0v$ ?

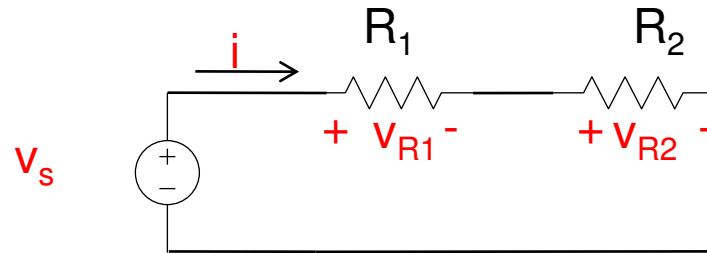
# Spenningsøkning og -deling

- Man kan øke en spenning ved å koble flere spenningskilder i serie
- Noen ganger ønsker man å redusere spenningen med en bestemt faktor
- Dette kan gjøre med en *spenningsdeler*



# Spenningsdeling (forts.)

- Ønsker å finne et uttrykk for spenningene  $V_{R1}$  og  $V_{R2}$  som funksjon av  $V_s$ ,  $R_1$  og  $R_2$



$$V_s = V_{R1} + V_{R2} = iR_1 + iR_2 = i(R_1 + R_2) \Rightarrow$$

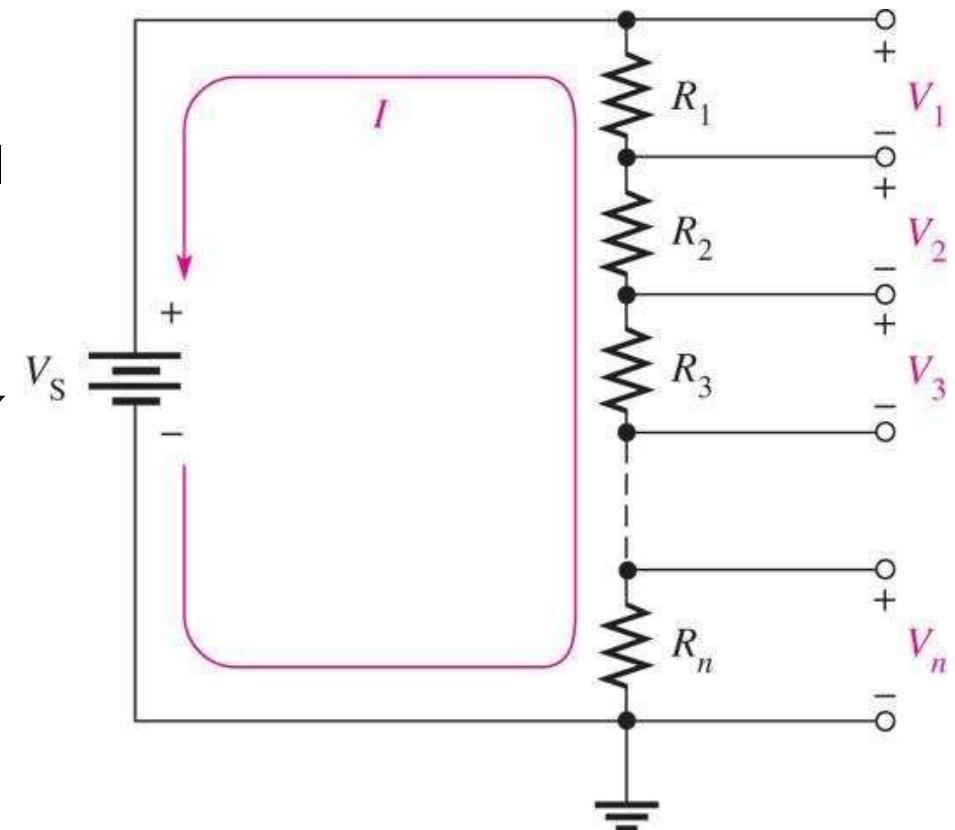
$$i = \frac{V_s}{R_1 + R_2} \Rightarrow V_{R2} = iR_2 = \left( \frac{V_s}{R_1 + R_2} \right) R_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_s$$

$$i = \frac{V_s}{R_1 + R_2} \Rightarrow V_{R1} = iR_1 = \left( \frac{V_s}{R_1 + R_2} \right) R_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_s$$

# Spenningsdeling (fort.)

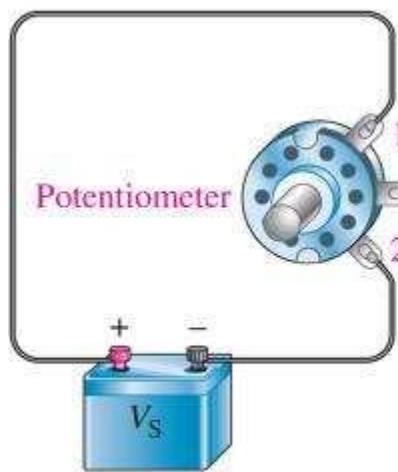
- Generelt:
  - Gitt en krets med n motstander, total resistans  $R_T = R_1 + R_2 + \dots + R_n$  og spenning  $V_s$
  - Da vil spenningen over motstand  $R_x$  være gitt av formelen

$$V_x = \left( \frac{R_x}{R_T} \right) V_s$$

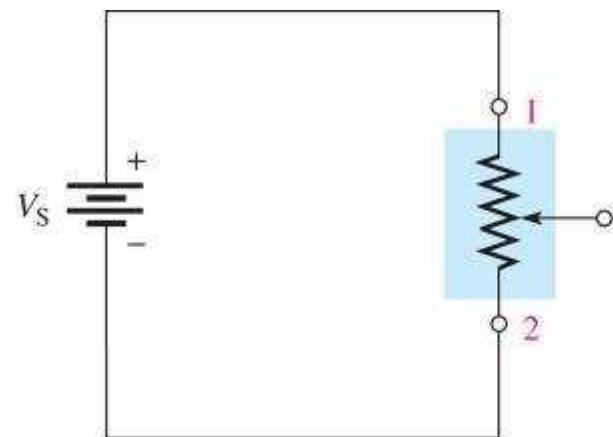


# Variabel spenningsdeling

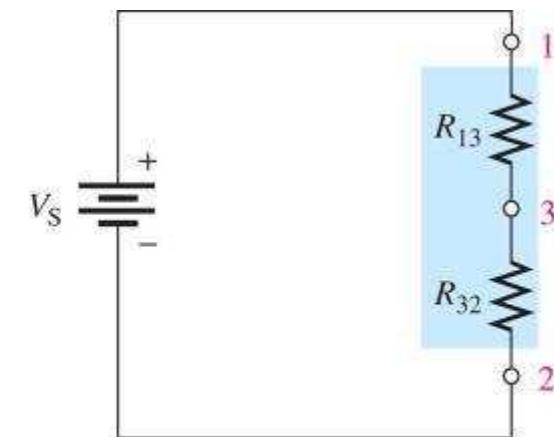
- Et *potentiometer* varierer spenningsdelingen mekanisk:



(a) Pictorial



(b) Schematic

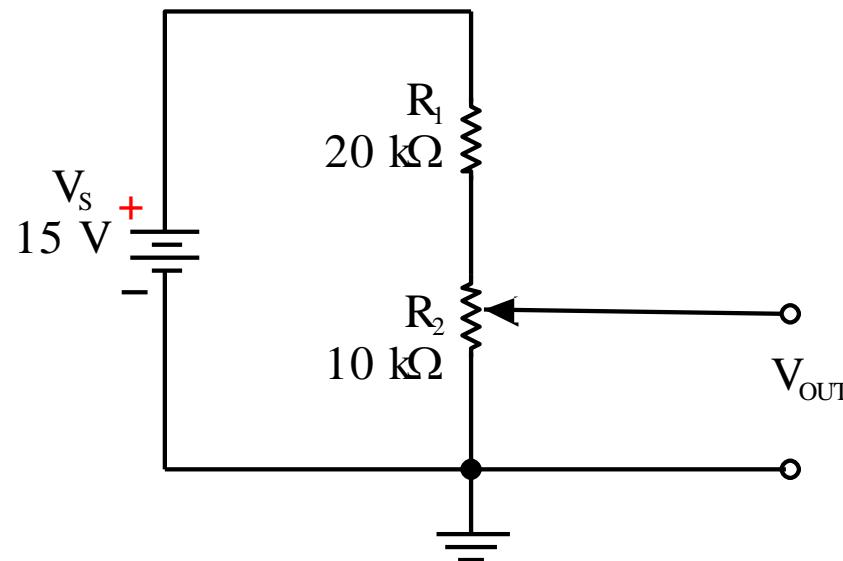


(c) Equivalent schematic

- Sett fra spenningskilden er det *totale* resistansen  $R_T = R_{13} + R_{32}$  konstant, mens *forholdet* mellom  $R_{13}$  og  $R_{32}$  varierer

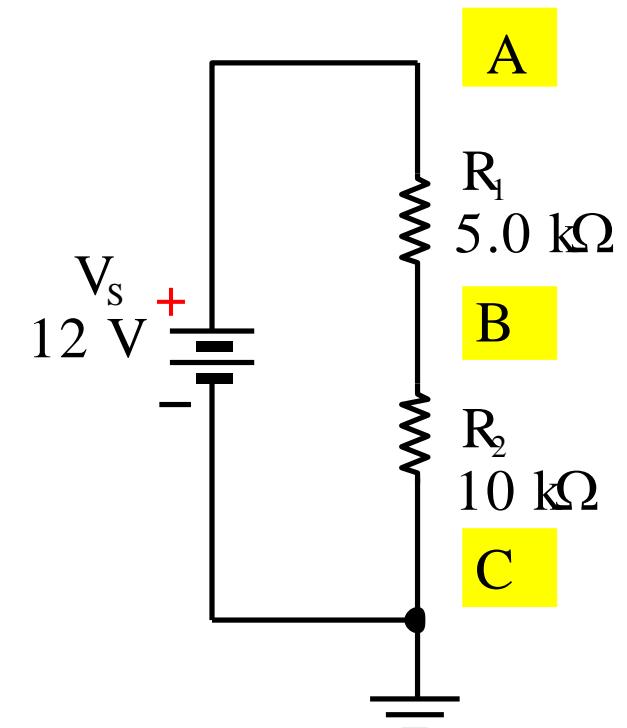
# Spørsmål

- Hva er den minste og største verdien  $V_{out}$  kan ha?
- Hvor mye strøm må batteriet (spenningkilden) kunne levere som et minimum?



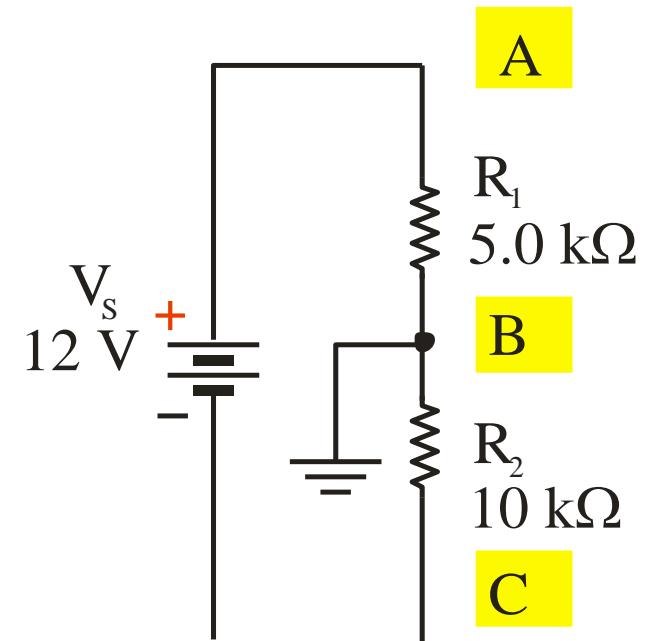
# Måling av spenning

- Måling av spenning er alltid mellom (over) to punkter
- Ofte er det ene punktet (virtuell) jord og spenninger relativt til jord betegnes ved enkel subskript (f.eks  $V_A$ )
- For spenningskilder bruker man vanligvis også enkel subskript
- Mellom to vilkårlige noder brukes dobbel subskript, f.eks  $V_{BC}$
- Den første noden i subskriptet har som regel høyest spenning i forhold til jord
- Hva er spenningene  $V_{AB}$ ,  $V_{BC}$ ,  $V_B$ ,  $V_{BA}$ ?



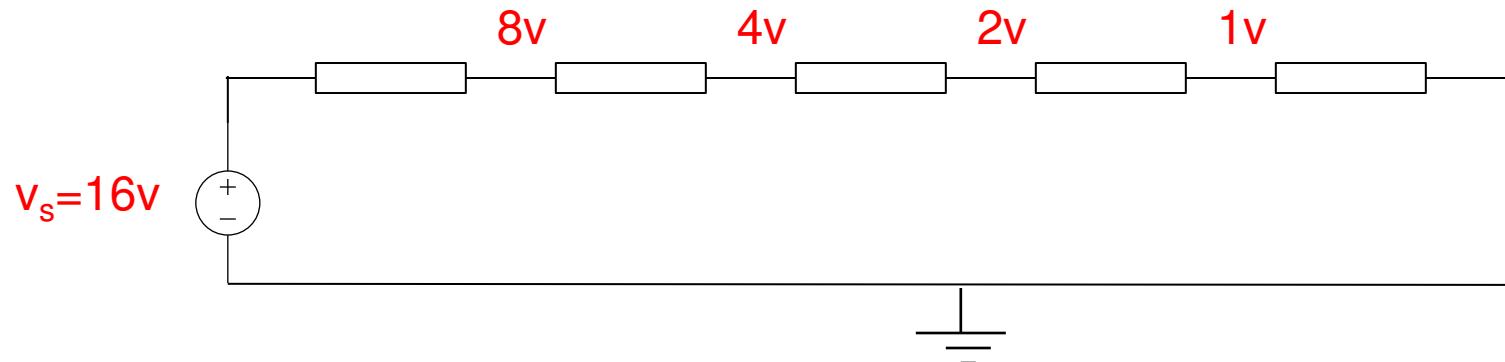
# Måling av spenning (forts)

- Jord er ikke alltid punktet med lavest spenning i en krets
- Gitt kretsen på forrige slide og tenk at jord-punktet flyttes til node B
- Spørsmål: Hva blir nå spenningene  $V_A$  og  $V_C$  etter at jordpunktet er flyttet?



# Nøtt til neste gang

- Lag en krets med resistanser som skalerer ned spenningen på en spenningskilde med 16 volt ned til 8, 4, 2 og 1 volt. Maksimalt strøm skal være 100 mA. Hvor stor må verdien til hver resistans være?



- I hva slags anvendelser kan kretsen brukes?

# 1. Obligatoriske labøvelse

- Formål
  - Bli kjent med lab og Elvis-II
  - Måle på ulike motstander og finne avvik
  - Måle på strøm og spenning
  - Noen teorispørsmål rundt Ohms lov og effektberegning
- Fullstendig oppgavetekst med ligger på kurssiden
- Frist for innlevering er **fredag 6.februar kl 23.59**
- Gruppelærer/labveieleder kan sette annen frist

# Oppsummeringsspørsmål

- Spørsmål fra forelesning 1 og 2

# Spørsmål 1

Atomnummeret angir

- a) Protoner i atomkjernen
- b) Nøytronkjerner i atomkjernen
- c) Protoner pluss nøytroner i atomkjernen
- d) Elektroner i det ytre skallet

## Spørsmål 2

Valenselektroner er

- a) I det ytre skallet
- b) Involvert i kjemiske reaksjoner
- c) Relativt løst bundet
- d) Er forbundet med alle egenskapene over

## Spørsmål 3

Partikkelen som er ansvarlig for elektrisk strøm i faste ledende materialer heter

- a) Protonet
- b) Elektronet
- c) Nøytronet
- d) Alle nevnt over kan lede strøm i faste materialer

## Spørsmål 4

Elektrisk ladning måles i enheten

- a) C
- b)  $\Omega$
- c) Q
- d) W

## Spørsmål 5

En ideell strømkilde leverer en strøm som er

- a) Uavhengig av spenningen over strømkilden
- b) Direkte proporsjonal med spenningen
- c) Omvendt proporsjonal med spenningen
- d) Konstant

## Spørsmål 6

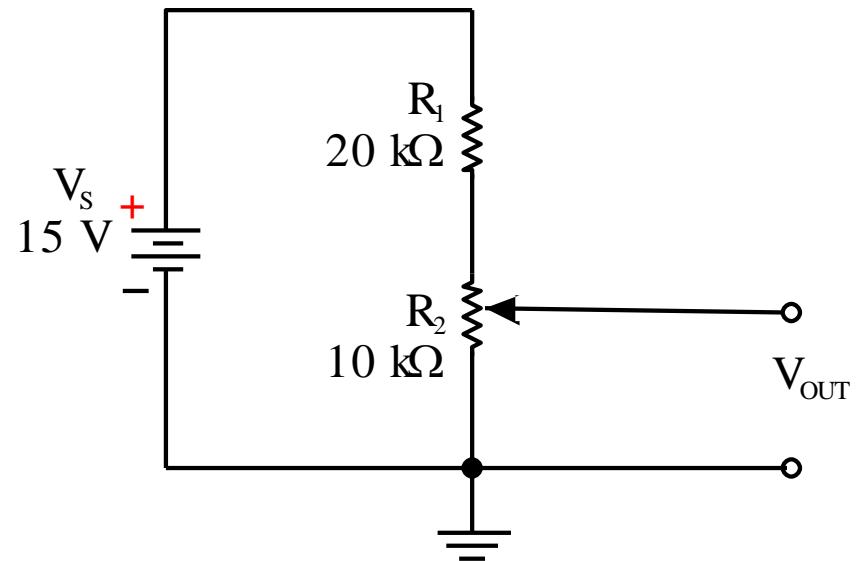
En uavhengig spenningskilde

- a) Leverer en spenning som er uavhengig av strømmen gjennom den
- b) Leverer en spenning som er avhengig av strømmen gjennom den
- c) Leverer en spenning som uavhengig av andre kilder
- d) Leverer en strøm som er avhengig av andre spenningskilder

## Spørsmål 7

Hva er den minste og største verdien  
 $V_{out}$  kan ha?

- a) Minste verdi=0v, største=15v
- b) Minste verdi=5v, største=10v
- c) Minste verdi=0v, største=5v
- d) Minste verdi=5v, største=15v



## Spørsmål 8

Kirchhoffs spenningslov sier at

- a) Den algebraiske summen av strømmene gjennom en løkke er 0
- b) Summen av strømmene gjennom en løkke er 0
- c) Den algebraiske summen av spenningene rundt en lukket sti er 0
- d) Summen av spenningene rundt en løkke er 0

## Spørsmål 9

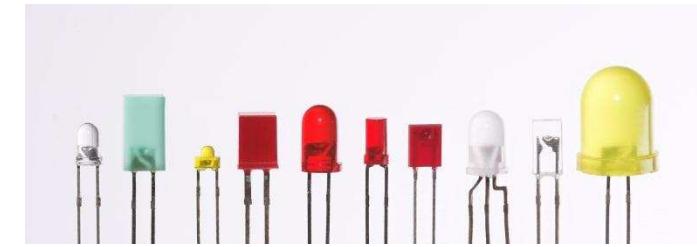
En idell strømkilde har

- a) Uendelig stor indre resistans
- b) Indre resistans som er avhengig av spenningen over kilden
- c) Null indre resistans
- d) Indre resistans som er avhengig av strømmen gjennom den

## Spørsmål 10

Resistans er et uttrykk for

- a) Et materiales motstand mot elektrisk spenning
- b) Et materiales motstand mot elektrisk strøm
- c) Et materiales evne til å lede elektrisk strøm
- d) Et materiales evne til å transportere protoner



# Forelesning nr.3 INF 1411

## Elektroniske systemer

Parallelle og parallel-serielle kretser  
Kirchhoffs strømlov

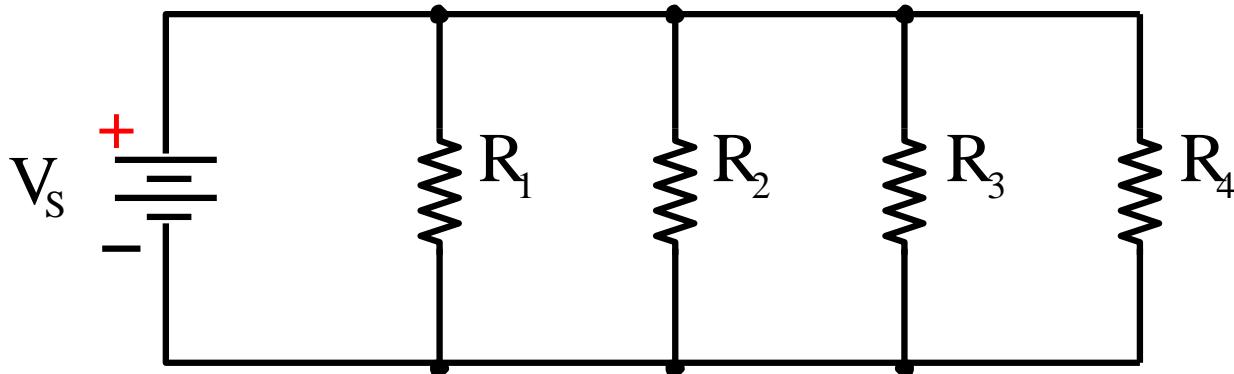


# Dagens temaer

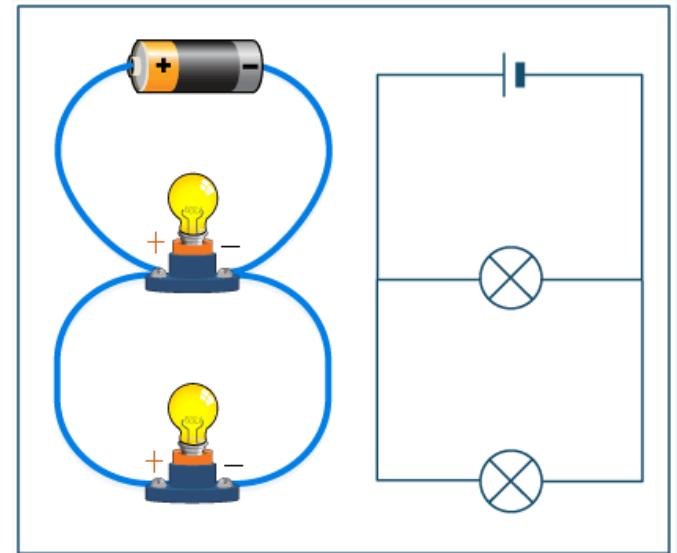
- Parallelle kretser
- Kretser med parallelle og serielle stier
- Effekt i parallelle kretser
- Kirchhoffs strømlov
- Temaene hentes fra Kapittel 5.1-5.7 og 6.1-6.5

# Parallelkrets

- En krets kalles *parallel* hvis den har mer enn én strømvei mellom terminalene på en spenningskilde

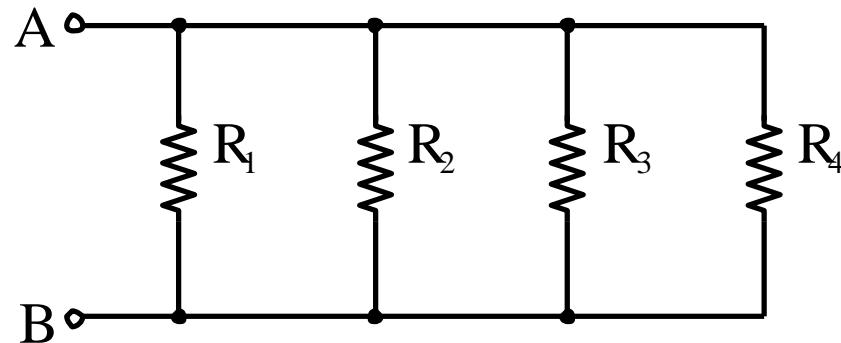


- Alle elementene har samme spenning over seg



# Resistorer i parallel

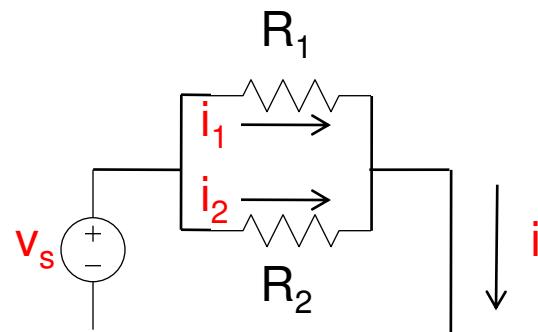
- Resistorer er koblet i *parallel* hvis endepunktene er koblet sammen i det samme nodeparet



- En krets kan også ha resistorer som *lokalt sett* er parallelle (eventuelt serielle)

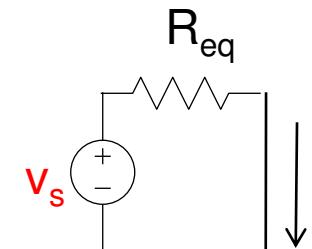
# Ekvivalent parallelmotstand

- Ønsker å finne samlet motstand  $R_{eq}$  uttrykt ved  $R_1$  og  $R_2$
- Hvis  $R_{eq}$  skal være lik  $R_1$  og  $R_2$  i parallel, må spenningen over  $R_{eq}$  være lik spenningen over  $R_1$  og  $R_2$



$$i = i_1 + i_2 \wedge i_1 = \frac{V_s}{R_1} \wedge i_2 = \frac{V_s}{R_2}$$

$$i = \frac{V_s}{R_1} + \frac{V_s}{R_2} = V_s \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$



$$i = \frac{V_s}{R_{eq}} = V_s \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \Rightarrow$$

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \Rightarrow R_{eq} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

# Samlet resistans i en parallelkrets

- Den samlede *resistansen*  $R_T$  i en parallelkrets med  $n$  resistorer er lik summen av den *inverse* av resistansen til hvert enkelt element

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots + \frac{1}{R_n}$$

- *Konuktansen* til en parallelkrets er lik summen av konuktansen til enkeltelementene:

$$G_T = G_1 + G_2 + \cdots + G_n$$

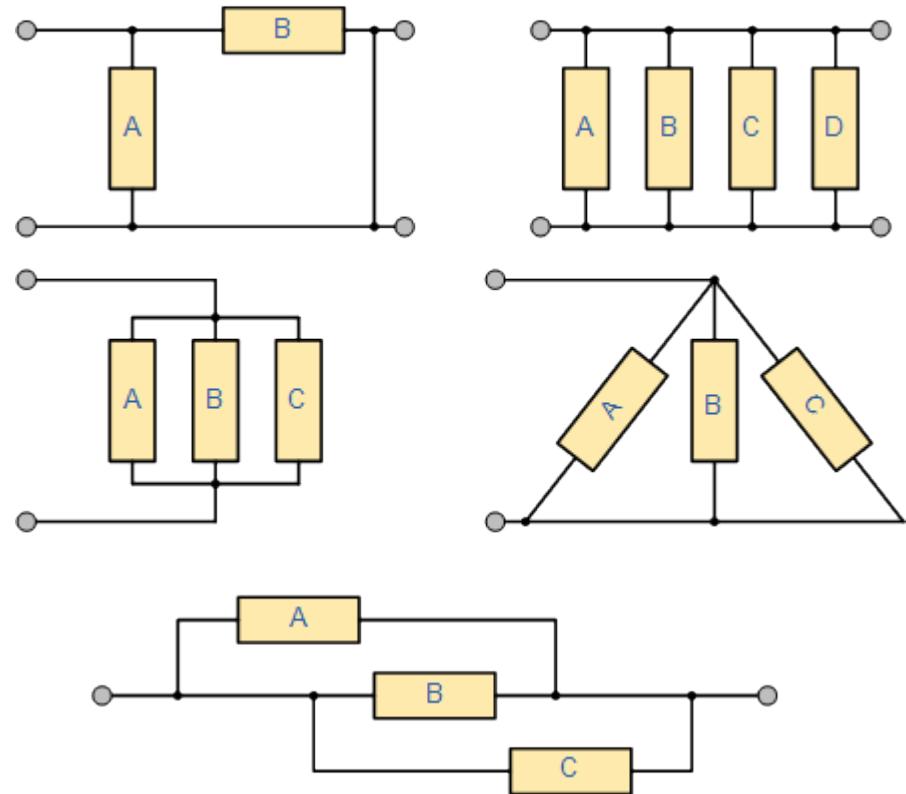
# Samlet resistans i en parallelkrets (forts)

- Hvis alle  $n$  resistorer har samme Ohm-verdi  $R$  blir den totale resistansen i en parallelkobling

$$R_T = \frac{R}{n}$$

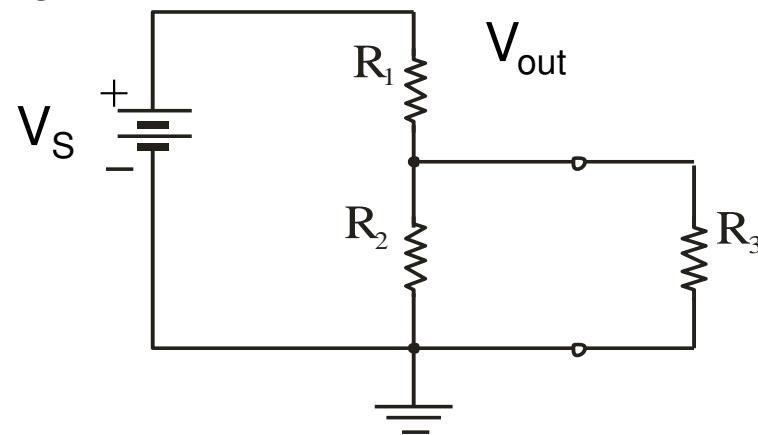
- Notasjonen for resistorer i parallel er

$$R_n \parallel R_m$$



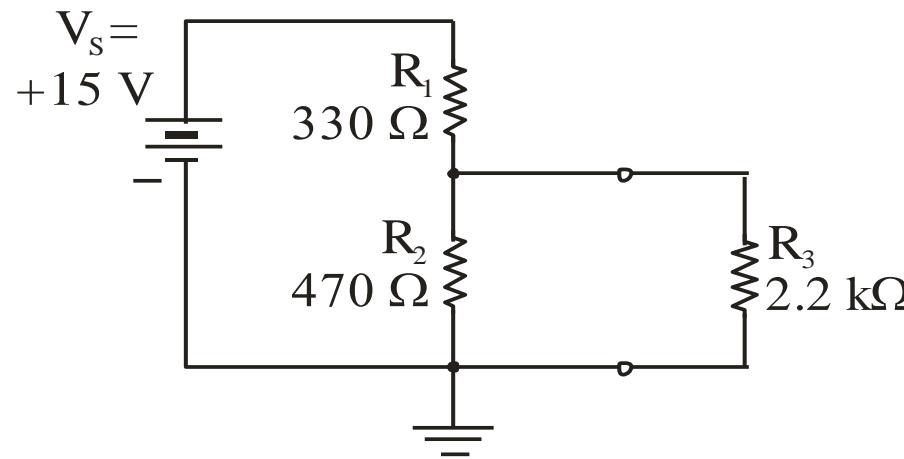
# Spenningsdeler med lastmotstand

- Hvis en spenningsdeler brukes som forsyningsspenning til f.eks en resistor, vil spenningen synke



- Spenningen  $V_{out}$  er nå  $V_{out} = \frac{R_2 || R_3}{R_1 + R_2 || R_3} V_s$
- Siden  $R_2 // R_3 < R_2$ , så synker  $V_{out}$

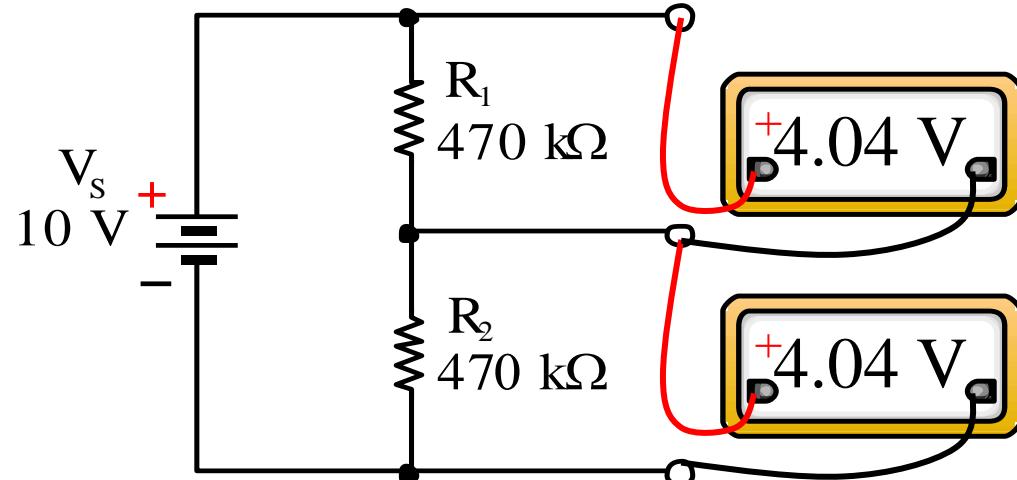
# Eksempel



- **Uten  $R_3$**  er  $V_{out} = V_s \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 15v \frac{470}{330+470} \Omega = 8,81v$
- **Med  $R_3$**  er  $V_{out} = V_s \frac{R_2 || R_3}{R_1 + R_2 || R_3} = 15v \frac{470 || 2200}{330+470 || 2200} \Omega = 15v \frac{387}{330+387} \Omega = 8,10v$

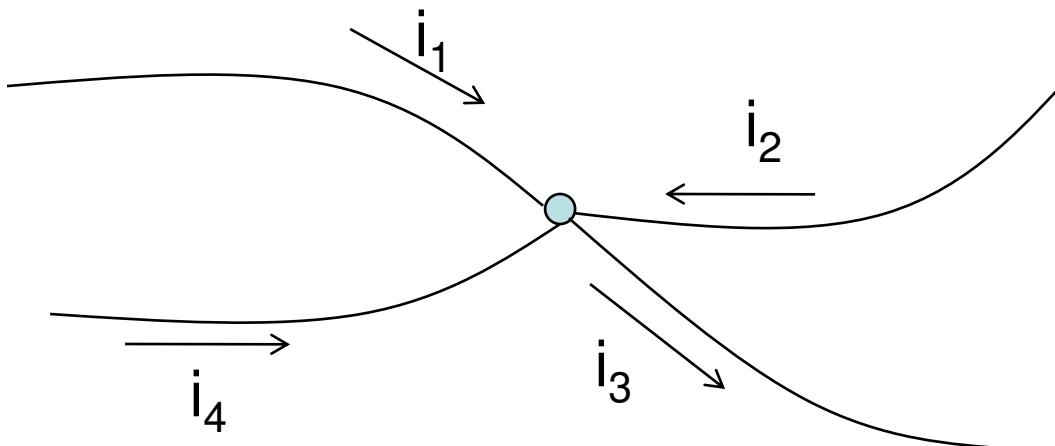
# Påvirkning av spenningsmåling

- Et voltmeter kobles i parallel med elementet som det skal måles spenning over, vil introdusere en parallelmotstand
- Her måles spenningen med **ett** voltmeter enten over  $R_1$  eller over  $R_2$
- Hva skjer hvis det brukes **to** voltmetre samtidig?



# Kirchhoffs strømlov (KCL)

- "Den algebraiske summen av alle strømmene som går inn mot (eller ut av) en node, er lik 0"
  - Strøm kan verken oppstå, lagres eller forsvinne i en node.



$$i_1 + i_2 + (-i_3) + i_4 = 0$$

$$(-i_1) + (-i_2) + i_3 + (-i_4) = 0$$

## Kirchhoffs strømlov (KCL) forts.

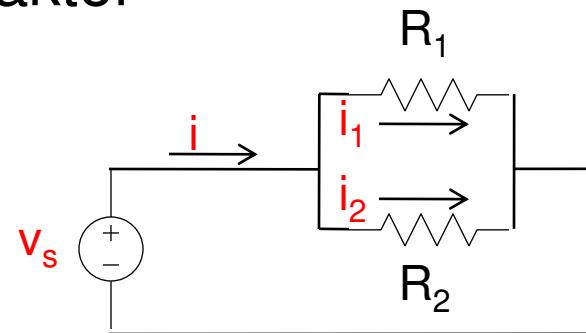
- Det generelle tilfellet er gitt av

$$\sum_{n=1}^N i_n = 0$$

- Forutsetningen er at alle pilene ENTEN peker inn mot noden ELLER ut av noden.
- Hvis noen peker inn og andre ut, velger man retning, og multipliserer strømmene som avviker med -1

# Strømdivisjon

- Ofte ønsker man å kunne skalere (dividere) en strøm med en konstant faktor

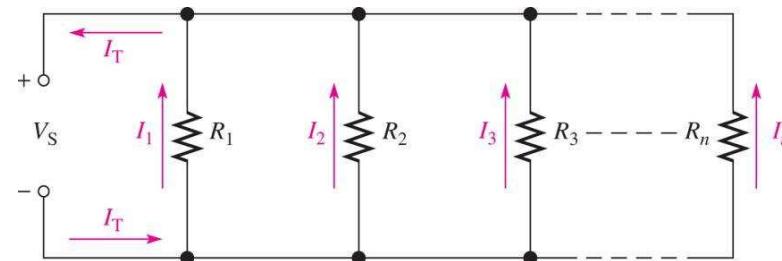


$$i_1 = \frac{V_s}{R_1} = \frac{i(R_1 // R_2)}{R_1} \Rightarrow i_1 = i \frac{R_1 R_2}{R_1(R_1 + R_2)} = i \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$i_2 = \frac{V_s}{R_2} = \frac{i(R_1 // R_2)}{R_2} \Rightarrow i_2 = i \frac{R_1 R_2}{R_2(R_1 + R_2)} = i \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

# Strømdivisjon (forts)

- Uttrykket for strømdivisjon kan generaliseres til å gjelde  $n$  parallelkoblede grener



- Strømmen  $I_x$  gjennom én gren er gitt av

$$V_S = I_x R_x \Rightarrow I_x = \frac{V_S}{R_x}$$

- Samtidig er  $V_S$  gitt av den totale strømmen  $I_T$  ganget med den totale resistansen  $R_T$

$$I_x = \frac{V_S}{R_x} = \frac{I_T R_T}{R_x} = \left( \frac{R_T}{R_x} \right) I_T$$

# Effekt i parallelkretser

- Den totale effekten  $P_T$  for  $n$  resistorer i parallel er gitt av

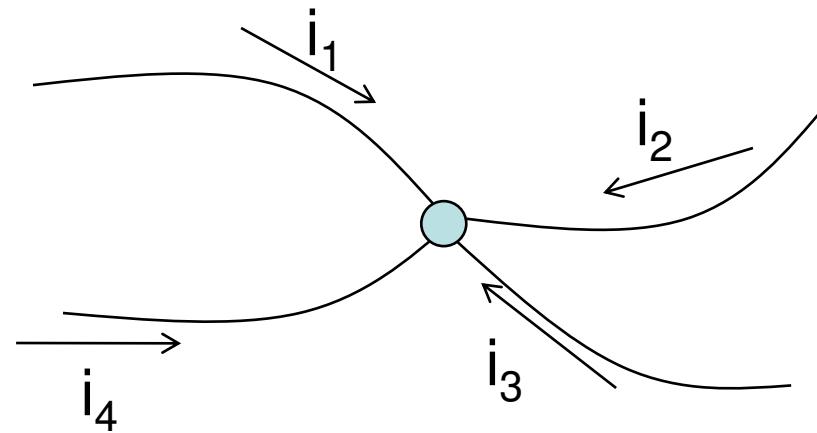
$$P_T = P_1 + P_2 + \cdots + P_n$$

- Uttrykt ved strøm, spenning og resistans kan effekten videre skrives som

$$P_T = V_S I_T = I_T^2 R_T = \frac{V_S^2}{R_T}$$

# Spørsmål

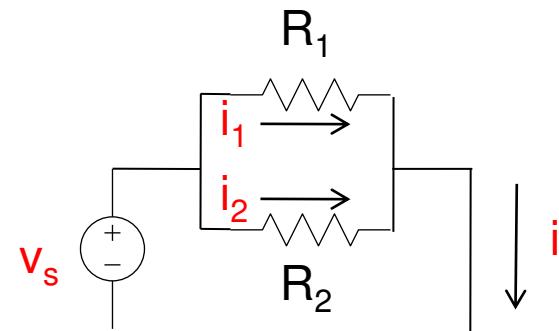
- Finn verdien til  $i_1$  når  $i_2=2A$ ,  $i_3=-3A$  og  $i_4=0,5A$



- Hvis strømretningene som vist på bildet er korrekte, hvilke verdier har da  $i_1$ ,  $i_2$ ,  $i_3$  og  $i_4$ ?

# Spørsmål

- Finn  $V_s$  når  $R_1 = 5 \Omega$ ,  $R_2 = 5 \Omega$  og  $i = 2A$
- Finn  $R_1$  når  $R_2 = 5 \Omega$ ,  $V_s = 5V$  og  $i = 4A$
- Finn  $i_2$  når  $R_1 = 10 \Omega$ ,  $V_s = 4V$  og  $i = 2A$



# Seriell-parallelkretser

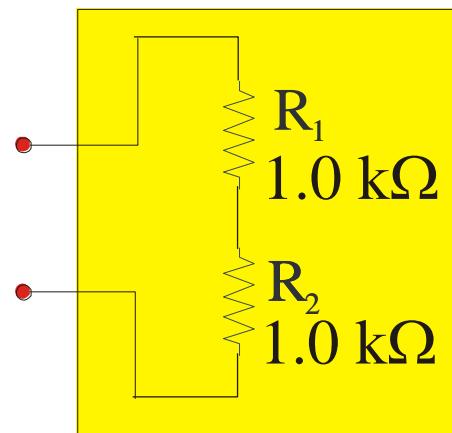
- De fleste kretser er en blanding av serie- og parallel-koblede elementer
- Man ønsker som regel å bruke færrest mulig komponenter
- For å forenkle må man identifisere hvilke elementer som er i serie og i parallel, og benytte formlene for resistorer i hhv serie og parallel

$$R_s = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$

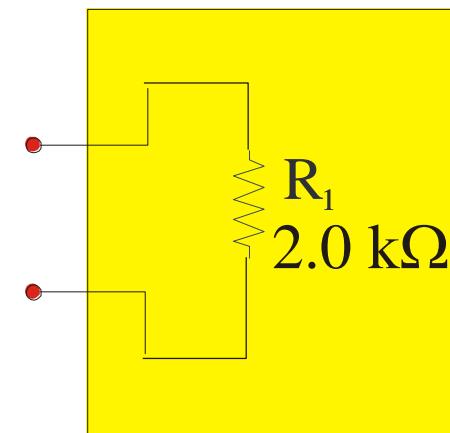
$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

# Seriell-parallelkretser (forts)

- Kretser kalles *ekvivalente* hvis de har de samme elektriske egenskapene mellom et nodepar
- Sett fra «utsiden» har krets A og B de samme elektrisk egenskapene (i dette tilfellet samme resistans)

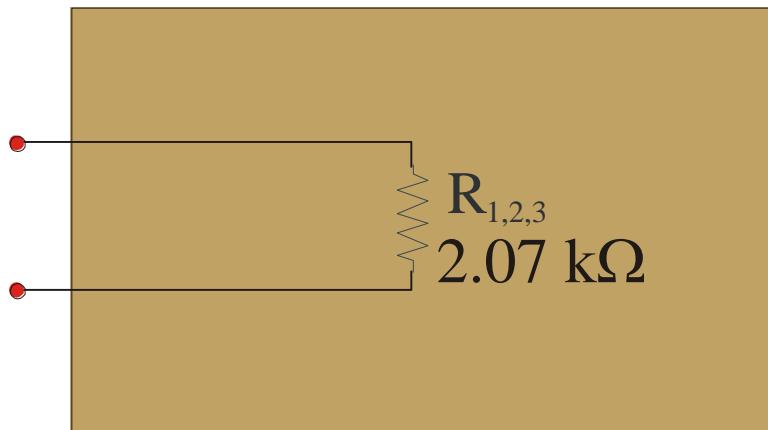
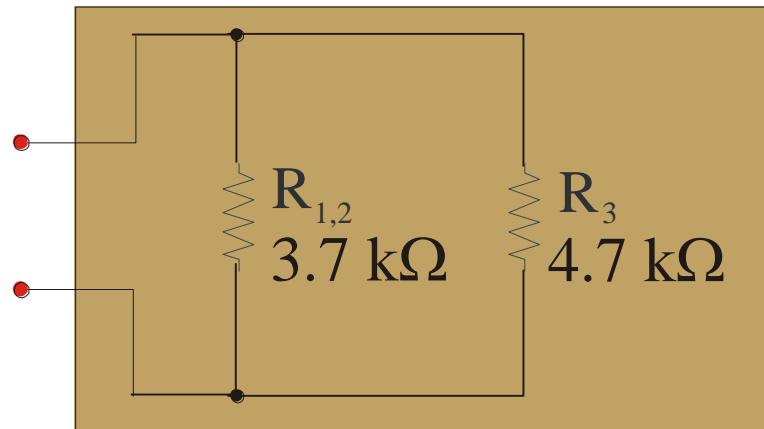
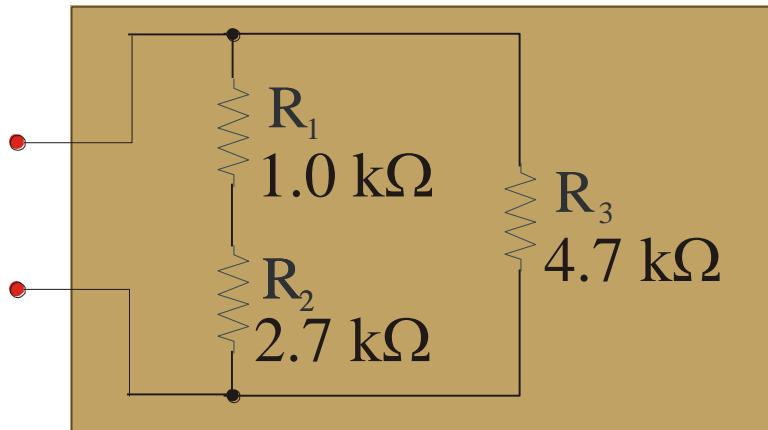


A



B

# Seriell-parallelkretser (forts)



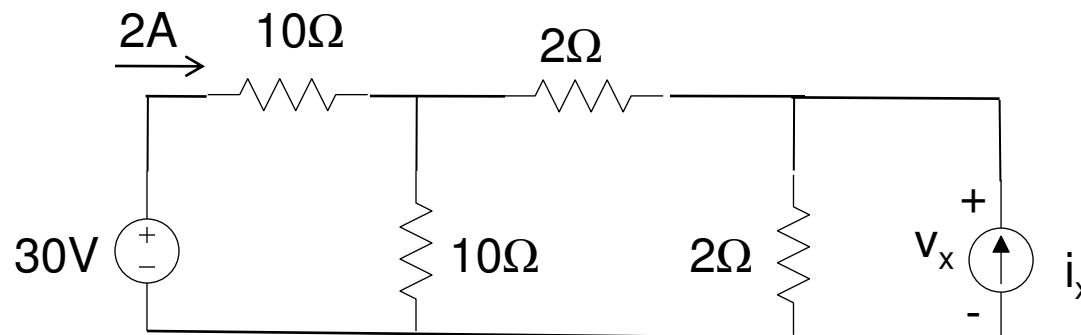
- Målt mellom de røde terminalene er det ikke mulig å avgjøre hva som er forskjellen mellom disse kretsene

# Analyse av seriell-parallelle kretser

- Ved analyse og design må man ofte finne strømmer og spenninger i noder og grener av en krets, og gjennom seriell- og parallelkoblede elementer
- Ukjente strømmer og spenninger kan være avhengige av andre strømmer og spenninger i kretsen
- Ved å bruke KVL, KCL og Ohms lov kan man i mange tilfeller finne de ukjente strømmene og spenningene

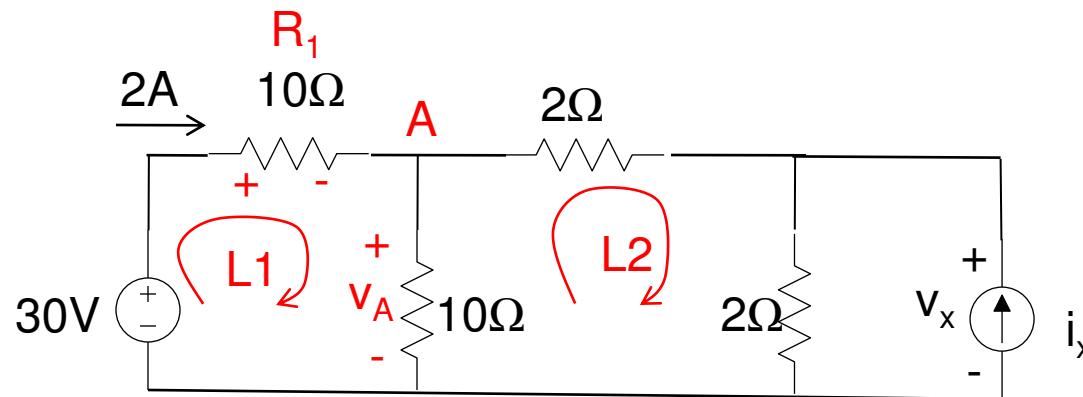
# Eksempel

- Finn spenningen  $v_x$  i kretsen under



- Forberedelse:* Sett navn på "relevante" noder, løkker, strømmer, spenninger og elementer (iterativ prosess)

# Eksempel forts



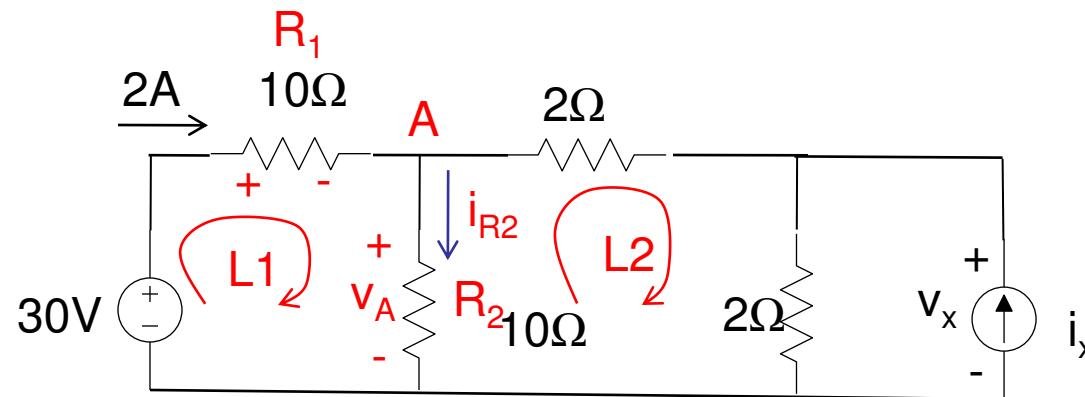
- Steg 1: Finn  $v_A$  ved å bruke KVL på løkke L1:

$$-30v + v_{R1} + v_A = 0 \Rightarrow$$

$$-30v + 10\Omega \times 2A + v_A = 0 \Rightarrow$$

$$v_A = 10v$$

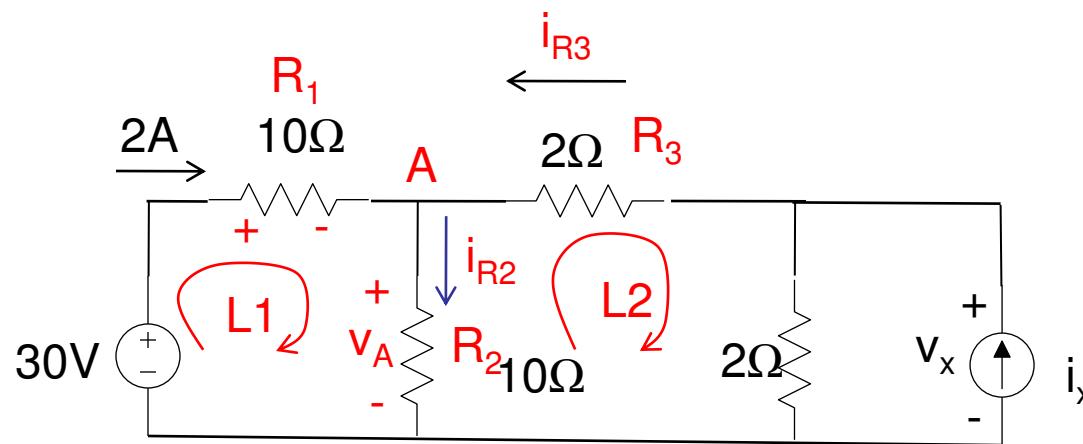
# Eksempel forts



- Steg 3: Finn  $i_{R2}$  ved å bruke Ohms lov:

$$i_{R2} = \frac{10v}{10\Omega} = 1A$$

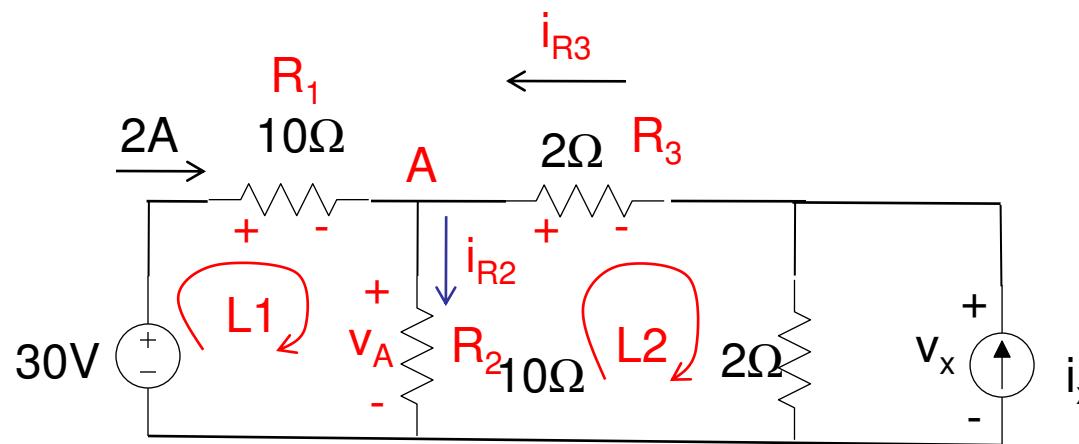
# Eksempel forts



- Steg 4: Bruk KCL mot node A

$$2A + i_{R3} = i_{R2} \Rightarrow i_{R3} = 1A - 2A = -1A$$

# Eksempel forts



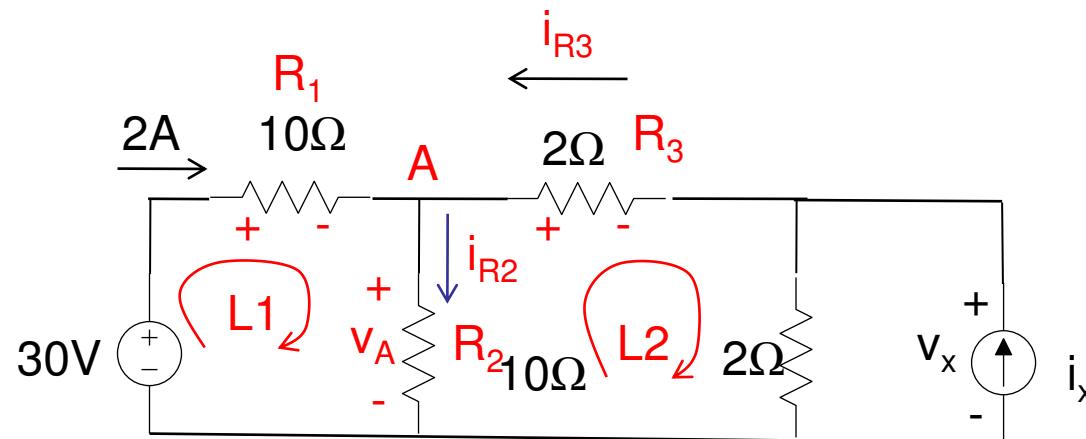
- Steg 5: Bruk KVL på løkke L2

$$-v_A + v_{R3} + v_x = 0$$

- Bruker Ohms lov for å finne  $v_{R3}$  som da gir

$$-10v + 2\Omega \times 1A + v_x = 0 \Rightarrow v_x = 8v$$

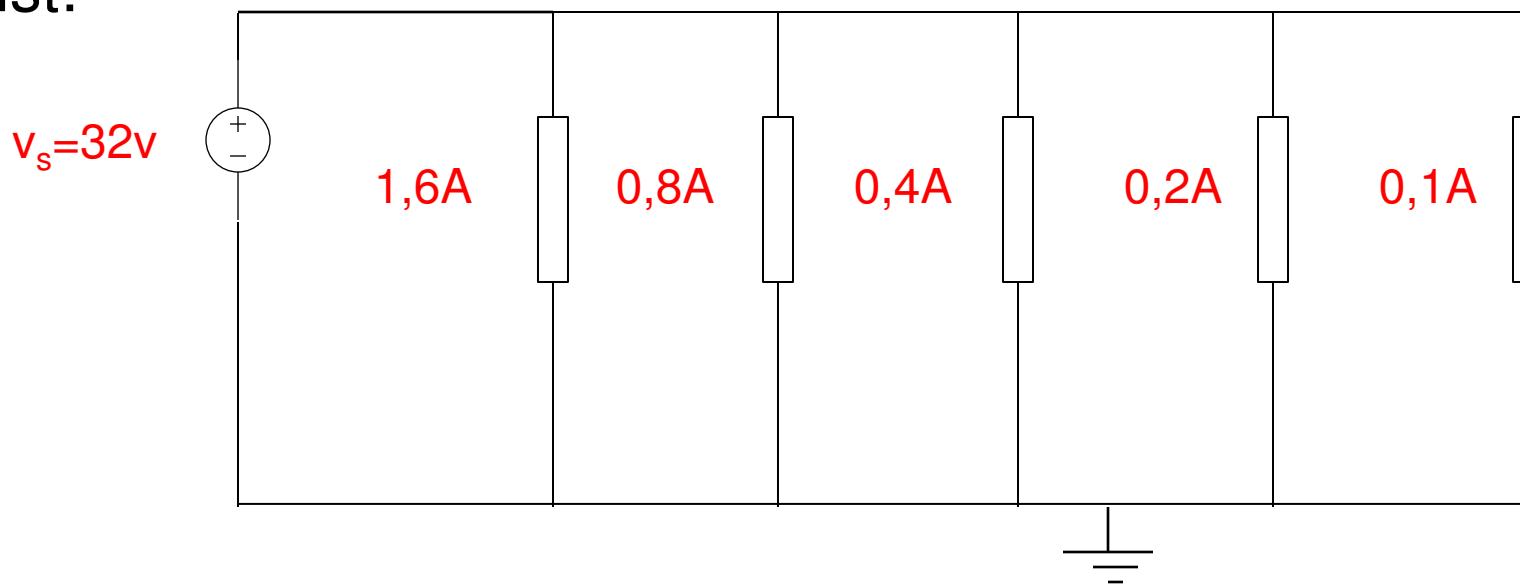
# Eksempel forts



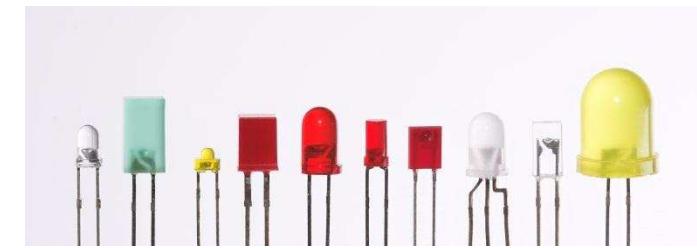
- Vi fant den ukjente spenningen ved bruk av KVL, KCL og Ohms lov
- Det finnes mer systematiske metoder (node og mesh-analyse, superposisjon)
- For større kretser brukes simuleringsverktøy, f.eks LtSPICE

## Nøtt til neste gang

- Gitt en krets som skal brukes til å lage 5 ulike strømmer slik vist:



- Hvis du bare har én motstandsstørrelse tilgjengelig, hvor stor må denne være for at du skal klare deg med så få motstander som mulig?



# Oppsummeringsspørsmål

Spørsmål fra forelesningene 2 og 3



# Spørsmål 1

## Om effekt

- a) Effekt kan være både positiv og negativ
- b) Effekt kan bare være positiv
- c) Effekt kan bare være negativ
- d) Effekt angis uten fortegn

## Spørsmål 2

Energitap pga resistans gjør at energien til elektronene går over til

- a) Varme
- b) Lys
- c) Overføringstap
- d) Alle fenomenene over

## Spørsmål 3

En seriell krets kjennetegnes ved at

- a) Den har kun én kilde
- b) Den har kun ett element
- c) Bare én felles løkke som strømmen går igjennom
- d) Minst en felles løkke som strømmen går igjennom

## Spørsmål 4

Den totale motstanden i en resistiv seriell krets finnes ved å

- a) Multiplisere resistansene til hver enkelt resistor
- b) Addere resistansene til hver enkelt resistor
- c) Addere resistansene til hver enkelt resistor og kilden(e)
- d) Multiplisere resistansene til hver enkelt resistor og spenningskilden

## Spørsmål 5

Ved å koble sammen flere spenningskilder i serie får man

- a) Økt spenning
- b) Økt konduktans
- c) Økt strøm
- d) Redusert resistans

## Spørsmål 6

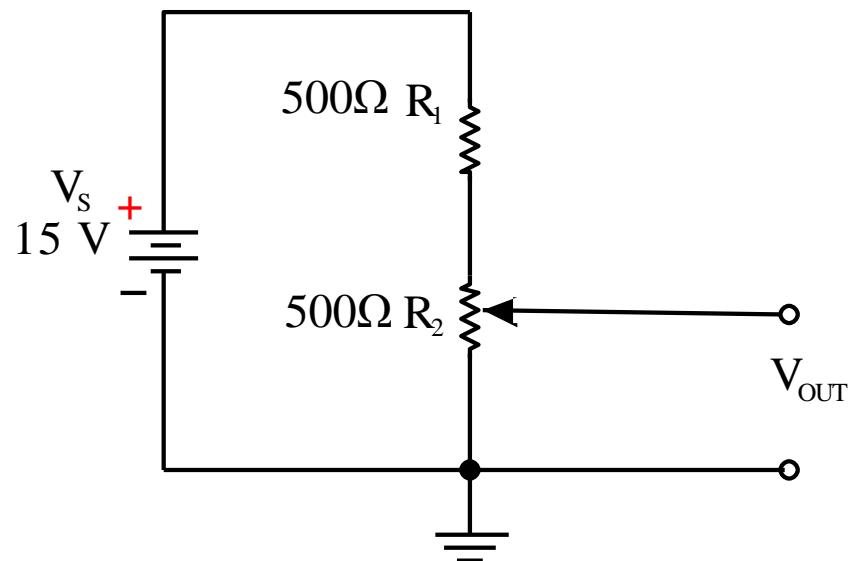
En parallelkrets kjennetegnes ved at

- a) Den har kun en strømkilde
- b) Det finnes kun en strømvei mellom terminalene på spenningskilden
- c) Alle elementene har samme spenning over terminalene
- d) Den har kun én spenningskilde

## Spørsmål 7

Hva er den minste og største verdien  
 $V_{out}$  kan ha?

- a) Minste verdi=0v, største=12.5v
- b) Minste verdi=0v, største=7.5v
- c) Minste verdi=5v, største=7.5v
- d) Minste verdi=2.5v, største=15v



## Spørsmål 8

For parallelkoblede resistanser er

- a) den totale konduktansen lik summen av enkeltkonduktansene
- b) den totale resistansen lik summen av enkeltresistansene
- c) den totale resistansen større enn den minste enkeltresistansen
- d) den totale resistansen større enn den største enkeltesistansen

## Spørsmål 9

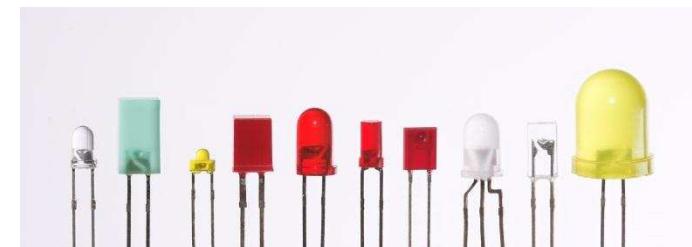
Kirchhoffs strømlov sier at

- a) Summen av strømmene rundt en lukket sti er 0
- b) Den algebraiske summen av strømmene inn mot en node er 0
- c) Den algebraiske summen av spenningene i en node er 0
- d) Summen av resistansene til elementer i en lukket sti er 0

## Spørsmål 10

To kretser er ekvivalente hvis

- a) De inneholder samme antall elementer
- b) Samme antallet strøm- og spenningskilder
- c) Oppbygningen internt i de to kretsene er identiske
- d) De elektriske egenskapene mellom et nodepar er identiske



# Forelesning nr.4 INF 1411

## Elektroniske systemer

Vekselstrøm  
Kondensatorer

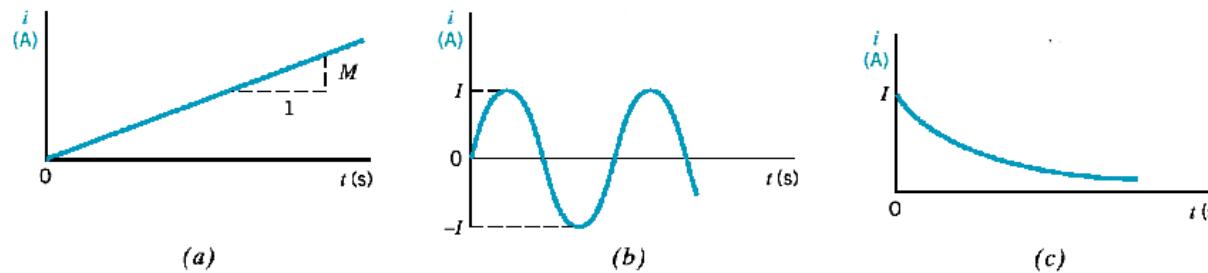


# Dagens temaer

- Sinusformede spenninger og strømmer
- Firkant-, puls- og sagtannsbølger
- Effekt i vekselstrømkretser
- Kondensator
- Presentasjon av labøvelse 2
- Temaene hentes fra Kapittel 8.1-8.5, 8.8 og 9.1-9.4

# Signaler som varierer over

- Et *signal* er strømmer og spenninger som overfører informasjon



- Variasjonen kan være *periodisk* (b), dvs at signalet gjentar seg med faste mellomrom, eller *ikke-periodisk* ((a) og (c))
- Tidsvarierende signaler kalles generelt ac-signaler

# Sinusformede signaler

- Sinusformede strømmer og spenninger svært vanlig
  - Mange naturlige fenomener er sinusformede
  - Sinusformede signaler har egenskaper som kan beskrives presist matematisk
  - Det finnes teknikker for å omforme vilkårlige signaler til sinusformede signaler
- Sinussignaler er sentrale i lyd- og bildebehandling, både digital og analog

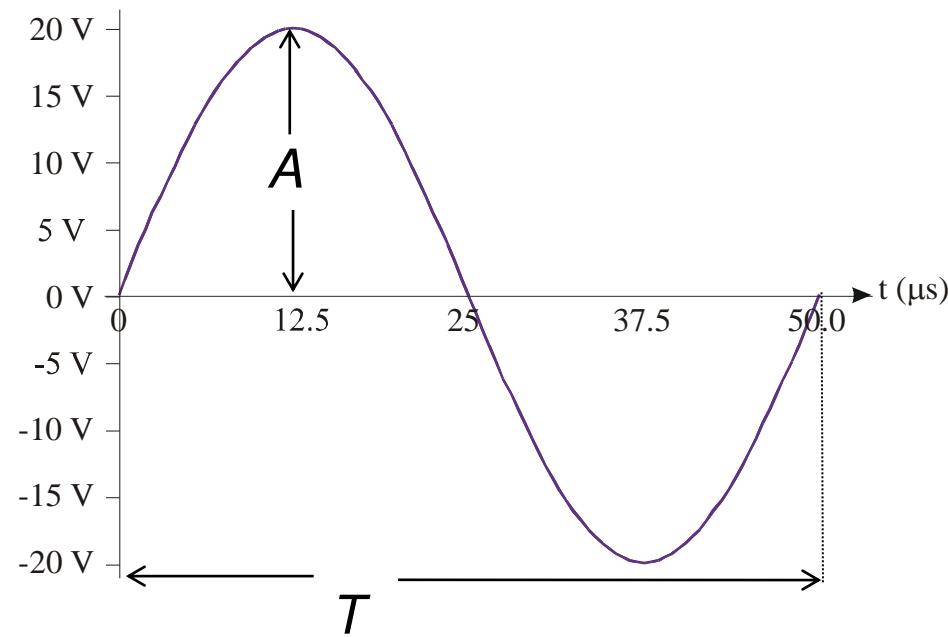


# Egenskaper ved sinussignaler

- En sinuskurve karakteriseres ved *amplitude* og *periode*
- Amplituden  $A$  er den maksimale verdien til signalet, mens perioden  $T$  er tiden det tar før signalformen gjentar seg

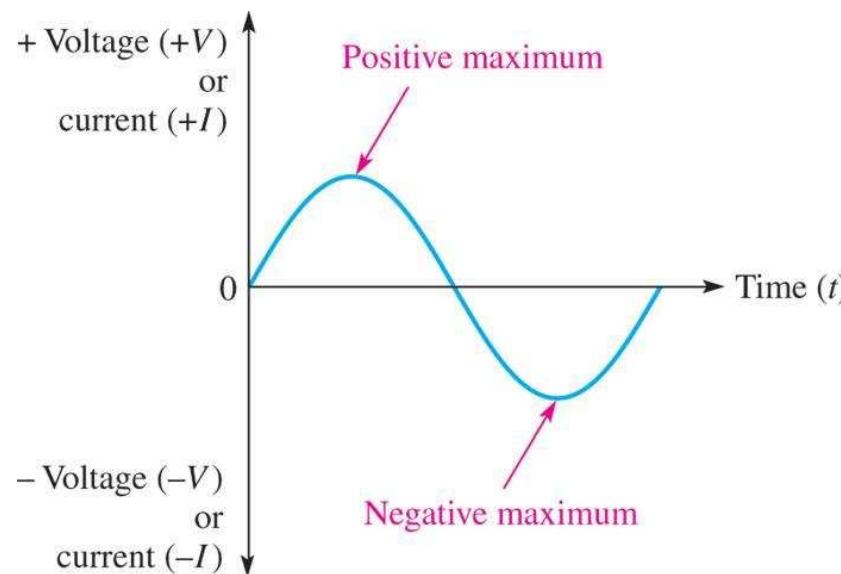
$$A = 20 \text{ volt}$$

$$T = 50 \mu\text{s}$$



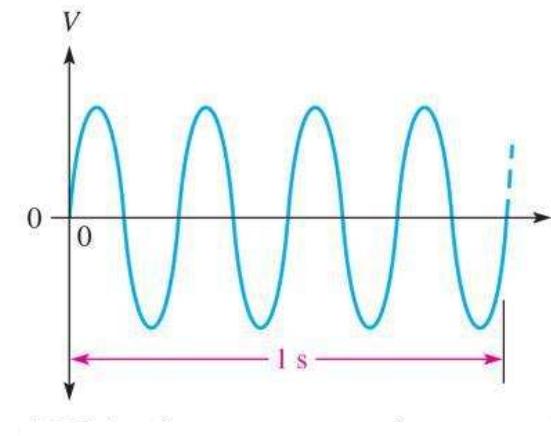
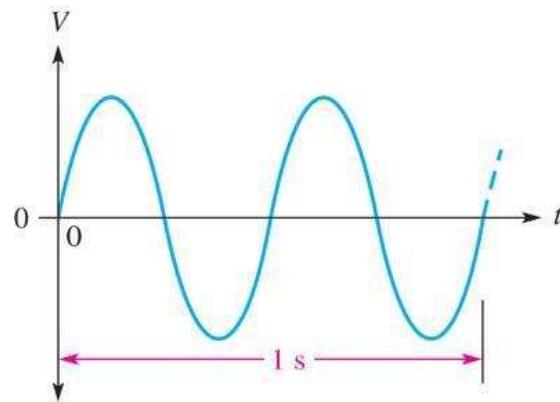
# Mer om amplitude

- Et *balansert* sinussignal er sentrert rundt 0: Maksimal positiv verdi = maksimal negativ verdi (absoluttverdi).
- Amplituden er som regel den positive maksimumsverdien



## Mer om periode og frekvens

- *Perioden* angir tiden det tar før signalformen gjentas, mens *frekvensen* sier hvor mange ganger signalformen gjentar seg per tidsenhet

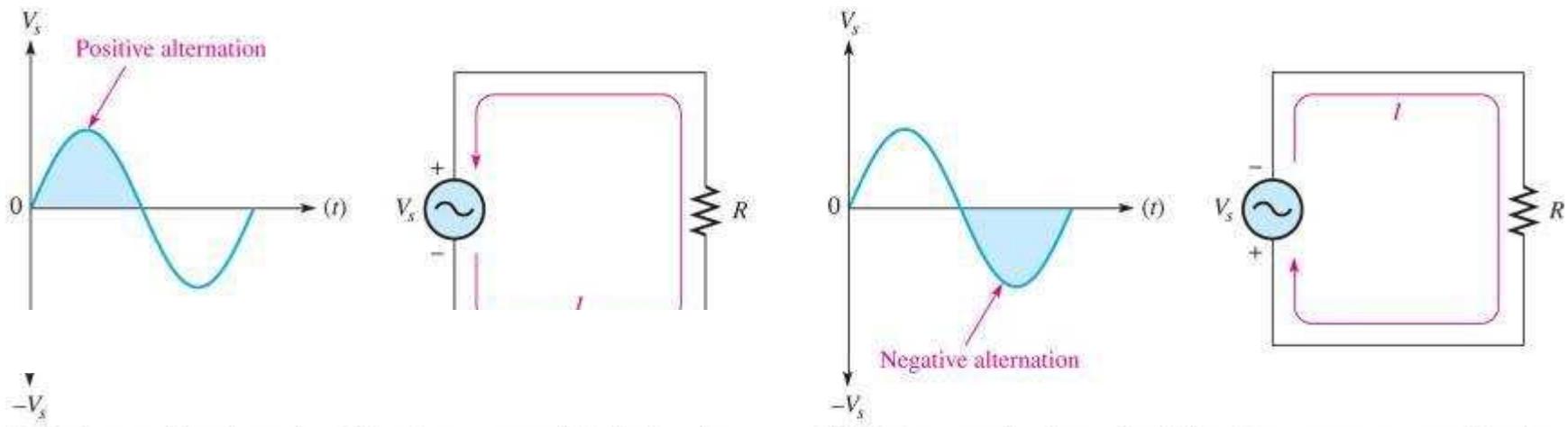


- Perioden  $T$  og frekvensen  $f$  er omvendt proporsjonale:

$$T = \frac{1}{f} \Leftrightarrow f = \frac{1}{T}$$

# Strøm- og spenningsretning

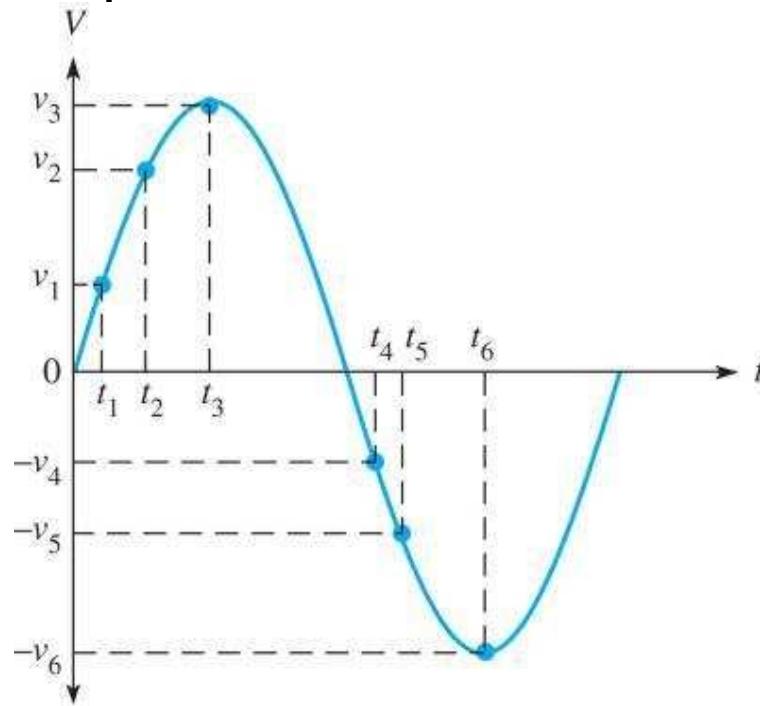
- For et balansert sinussignal endres strømretningen og/eller polariteten til spenningen



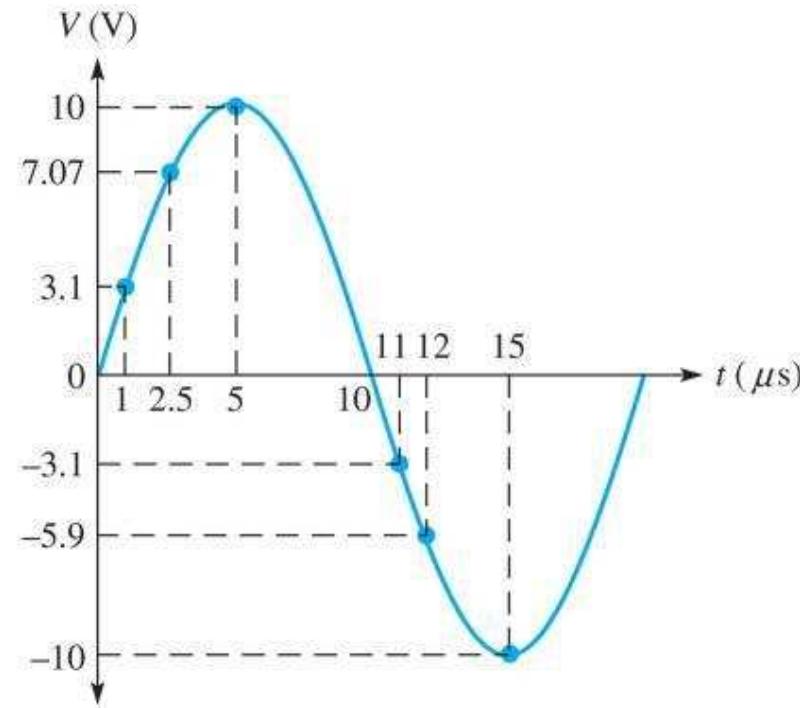
- Signalet er positivt halve perioden og negativ den andre halve perioden

# Øyeblikksverdi

- Øyeblikksverdien måles som verdien på et bestemt tidspunkt



(a)

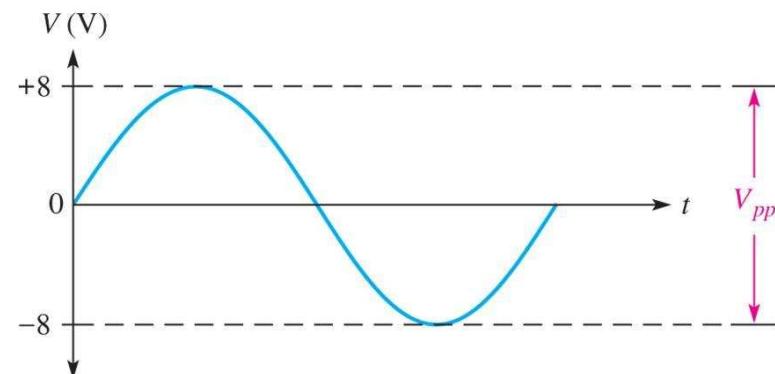
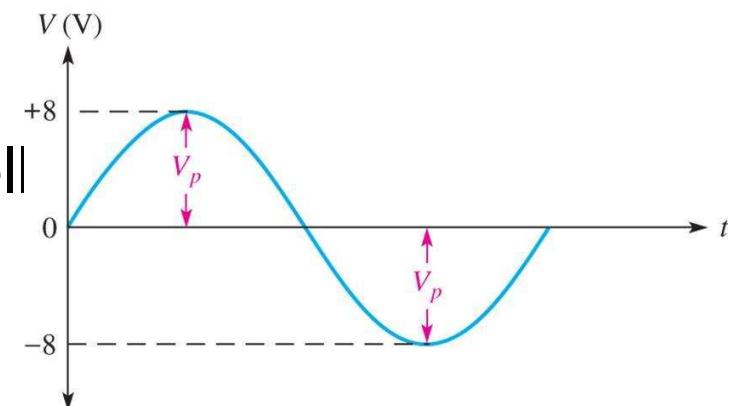


(b)

# Peak-til-peak verdi

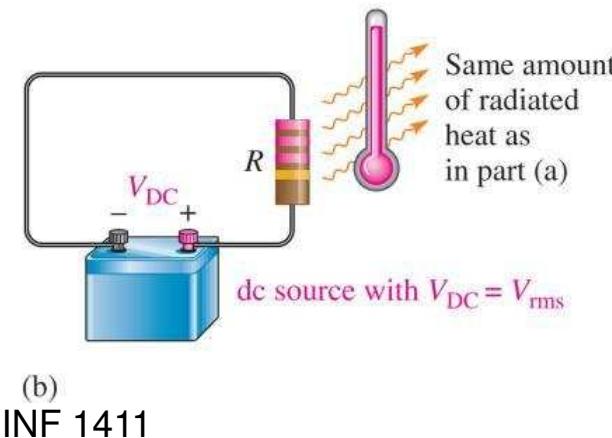
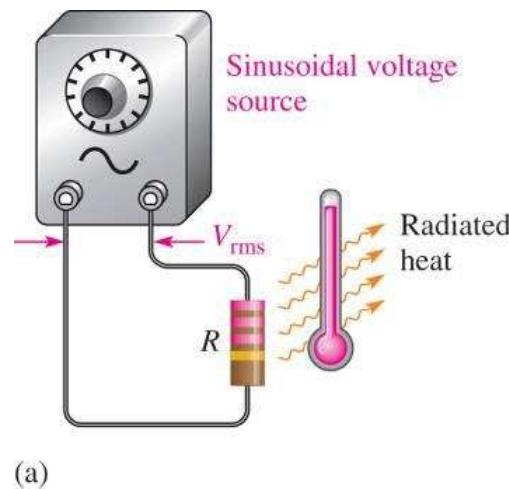
- Amplitude kalles også *magnitude* ell
- *Peak-til-peak* verdi er definert som

$$V_{pp} = 2V_p \wedge I_{pp} = 2I_p$$



# RMS-verdi

- RMS-verdi betyr *Root-Mean-Square* og kalles den *effektive* verdien til sinussignalet
- RMS-verdien til et sinussignal angir hva et tilsvarende dc-signal må være for å produsere samme effekt i en resistor



# RMS-verdi (forts)

- Sammenhengen mellom RMS-verdien og peakverdien er

$$V_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} V_p \approx 0.707 V_p$$

$$I_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} I_p \approx 0.707 I_p$$

- Kjenner RMS-verdien kan man finne peakverdien:

$$V_p = \sqrt{2} V_{rms} \approx 1,414 V_{rms}$$

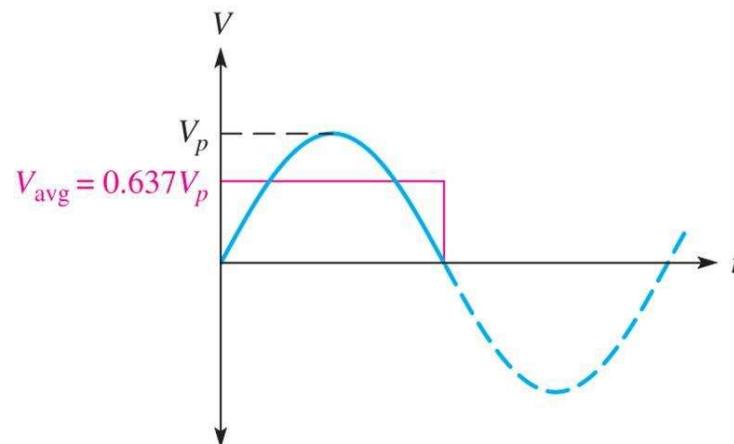
$$I_p = \sqrt{2} I_{rms} \approx 1,414 I_{rms}$$

# Gjennomsnittsverdi

- Gjennomsnittsverdien til et sinussignal måles over en halv periode, siden gjennomsnittverdien over en hel periode er 0
  - . Sammenhengen er gitt av

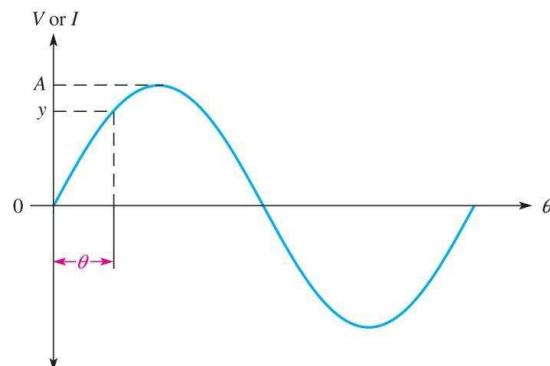
$$V_{avg} = \frac{2}{\pi} V_p \approx 0.637 V_p$$

$$I_{avg} = \frac{2}{\pi} I_p \approx 0.637 I_p$$



# Matematisk representasjon av sinus

- I mange sammenhenger representeres sinussignaler som en funksjon

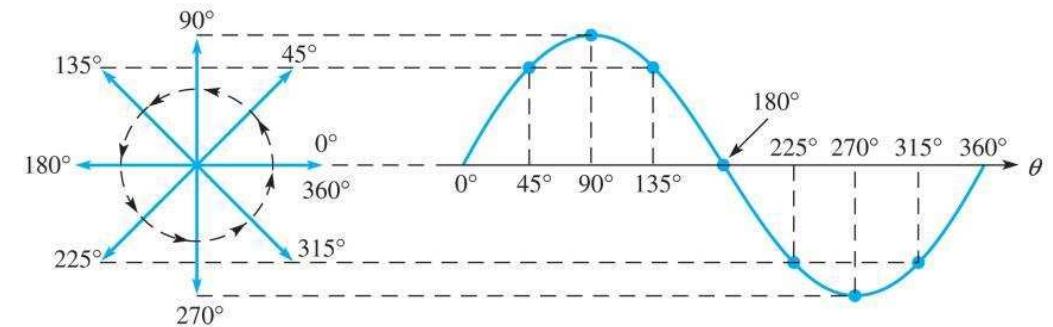
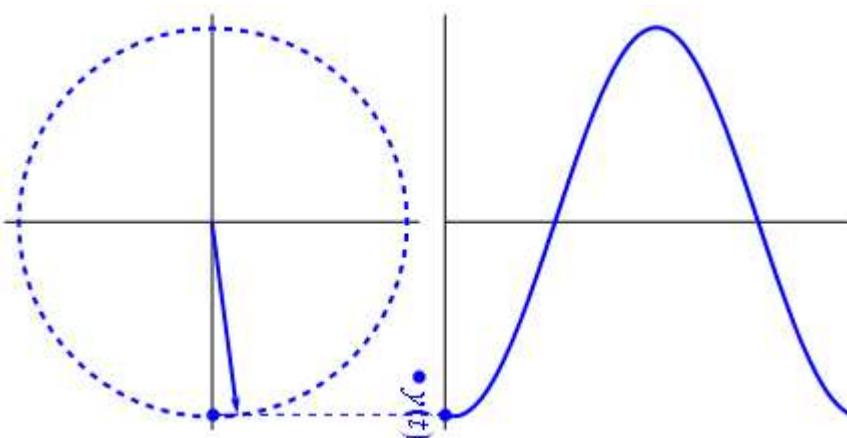


- Matematisk kan sinus skrives som

$$y = A \sin(\theta)$$

# Matematisk representasjon av sinus (forts.)

- $\theta$  brukes for å representer sinuskurven som en *phasor* eller vektor, der man tenker seg en vektor som roterer
- Om spissen på vektoren projiseres horisontalt på en rett linje, får man en sinuskurve



# Matematisk representasjon av sinus (forts)

- Siden signalet gjentar seg for hver  $2\pi=360^\circ$ , kan frekvensen defineres som

$$f = \frac{1}{T} \Rightarrow \omega = \frac{2\pi}{T} \Leftrightarrow \omega = 2\pi f$$

- $\omega$  kalles for radian- eller vinkelfrekvens



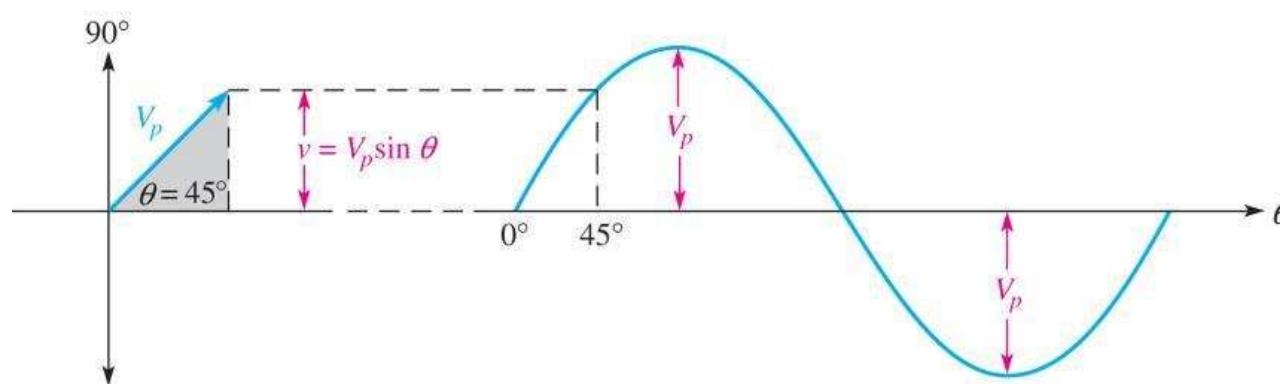
Time (in seconds) = 0.00 s  
Rotation (in radians) = 0.00 rad  
Rotation (in cycles) = 0.00 cycle  
 $\omega = \frac{0.00 \text{ rad}}{0.00 \text{ s}} =$   
 $v = \frac{0.00 \text{ cycle}}{0.00 \text{ s}} =$

# Matematisk representasjon av sinus (forts)

- Hvis lengden på vektoren er  $V_p$ , kan sammenhengen mellom sinussignalet og vektorrepresentasjonen skrives som

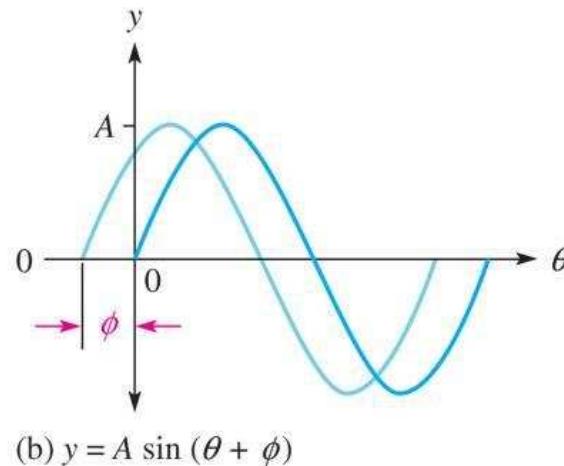
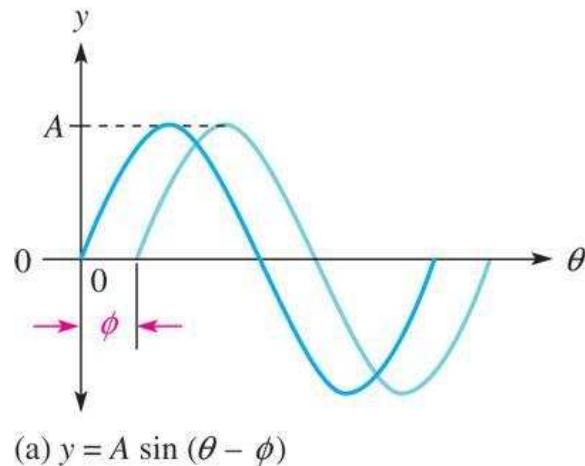
$$v = V_p \sin(\theta)$$

$$i = I_p \sin(\theta)$$



# Fasedreining

- Hvis et sinussignal forskyves i tid (dvs langs den horisontale aksen), oppstår en såkalt *faseforskyving* eller *fasedreining*  $\phi$



$$y = A \sin(\theta \pm \phi)$$

# Analyse av ac-kretser

- Ohms lov og Kirchhoffs strøm- og spenningslover gjelder også for ac-signaler
- Man må konsekvent bruke *enten* peak-, rms- eller gjennomsnittsverdier for *både* strøm og spenning i samme ligning
- For å beregne effekt må man bruke rms-verdiene:

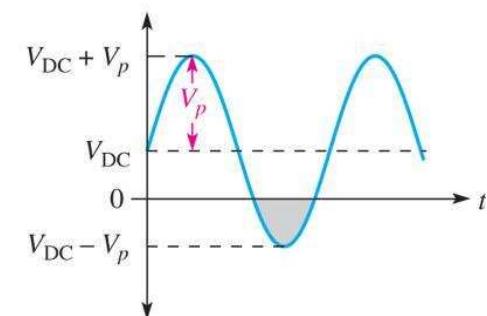
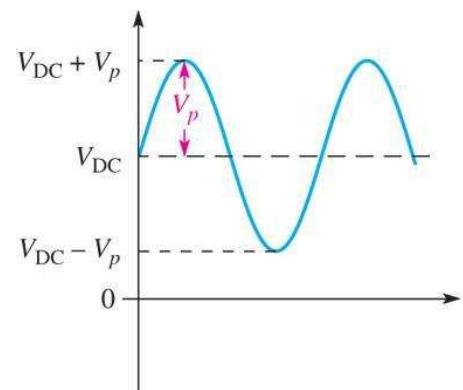
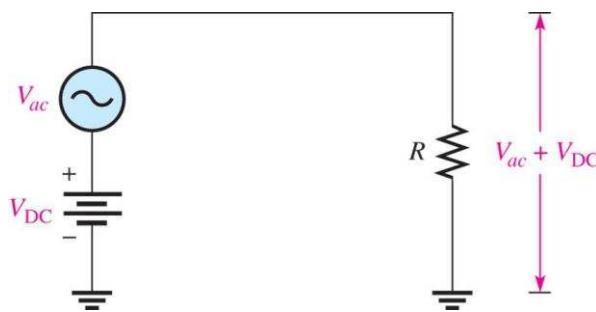
$$P = V_{rms} I_{rms}$$

$$P = \frac{V_{rms}^2}{R}$$

$$P = I_{rms}^2 R$$

# Sinussignaler med dc-offset

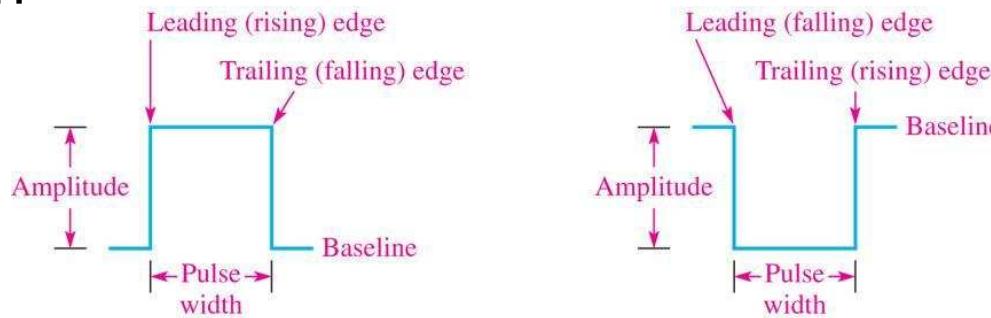
- Hvis sinussignalet har en dc-komponent, forskyves amplituden opp eller ned



- $V_p$  defineres relativt til dc-offset, og ikke fra 0

# Andre bølgeformer

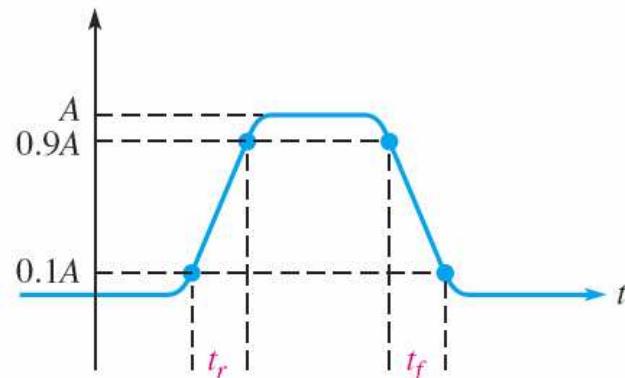
- I digitale systemer brukes *firkant-* eller *pulssignaler*
- Et pulssignal går fra ett nivå til et annet annet og deretter tilbake igjen



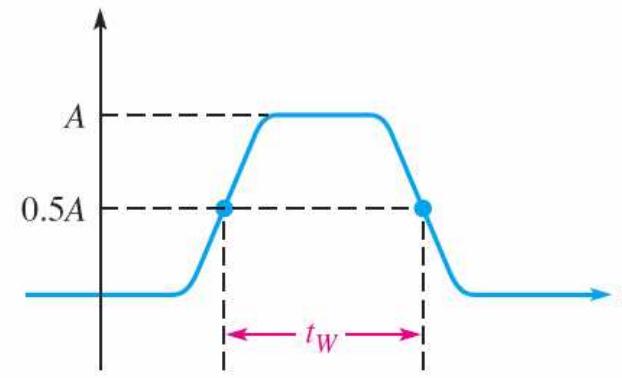
- I tillegg til amplituden karakteriseres pulssignalet av pulsbredden og stigene og fallende flanker («edges»)

## Andre bølgeformer (forts)

- Et ideelt pulssignal har vertikale flanker; i praksis er dette umulig fordi strøm/spenning ikke kan endre verdi momentant
- Fysiske pulssignaler karakteriseres ved tre parametre til:
  - «Rise time»: Tiden det tar fra signalet går fra 10% til 90% av amplituden
  - «Fall time»: Tiden det tar fra signalet går fra 90% til 10% av amplituden
  - Pulsbredden måles mellom de punktene på hhv stigende og fallende flanke som har nådd 50% av amplituden



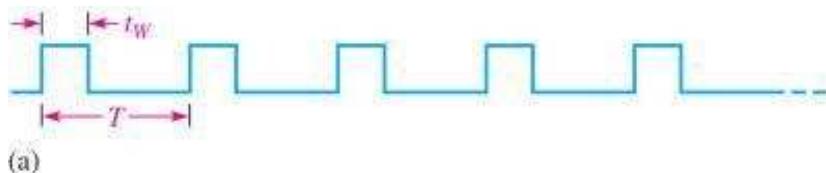
(a) Rise and fall times



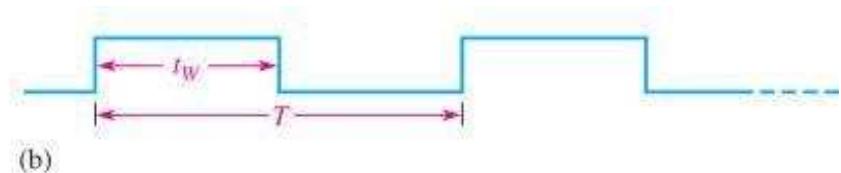
(b) Pulse width

## Andre bølgeformer (forts)

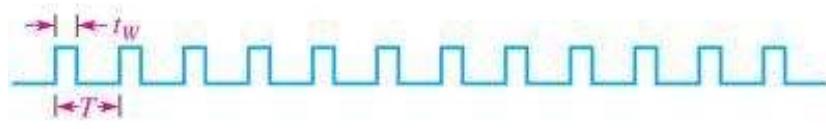
- Periodiske signaler er ikke alltid symmetriske rundt et referansepunkt (gjennomsnittsverdi  $\neq 0$ )



(a)



(b)



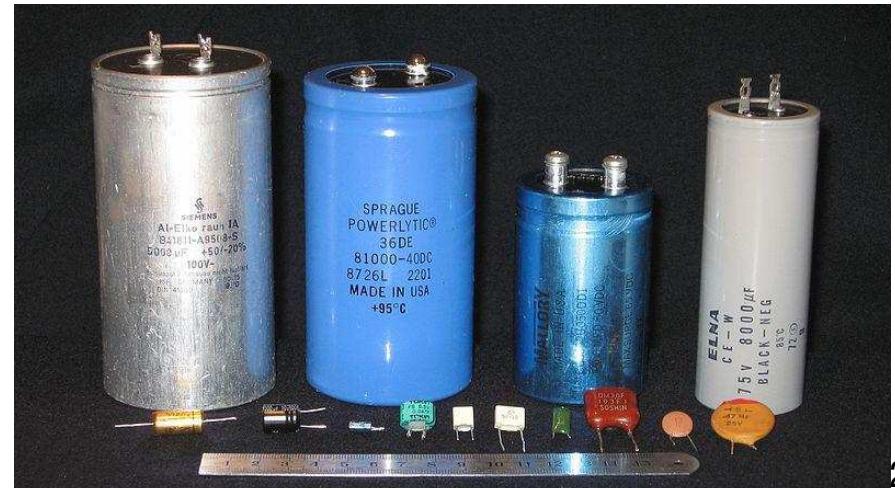
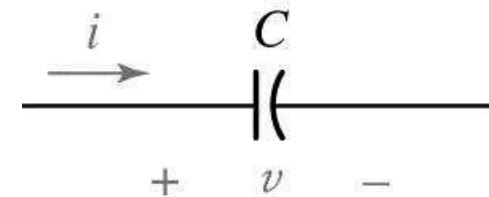
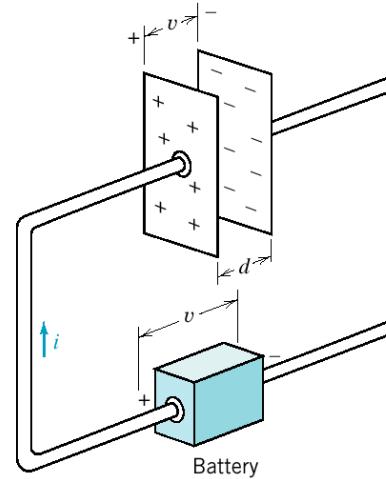
(c)

- Frekvensen defineres tilsvarende som for sinus
- «duty cycle» er forholdet mellom pulsbredden og perioden i %

$$DutyCycle = \left( \frac{t_w}{T} \right) 100\%$$

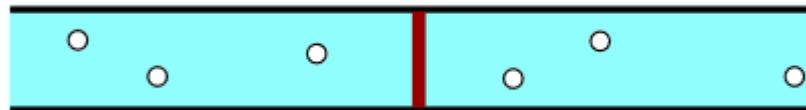
# Kondensatorer

- En *resistor*s motstand varierer ikke med frekvensen til strømmen
- En *kondensator*s motstand variererer med frekvensen
- En kondensator kan lagre elektrisk ladning
- En kondensator består av to plater av ledende materiale med isolasjon i mellom



# Kondensatorer (forts)

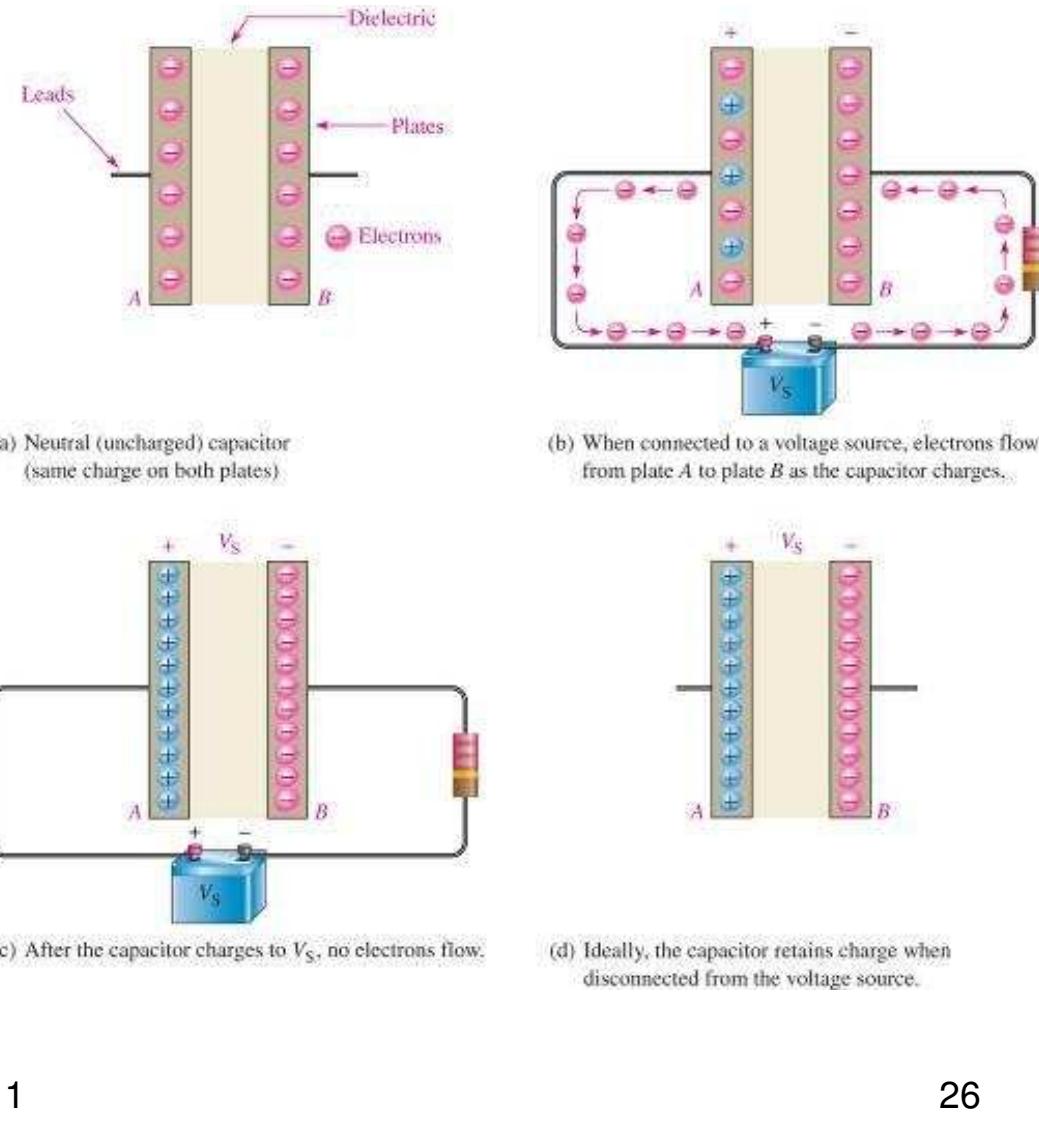
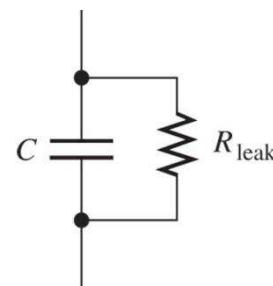
- En kondensator kan sammenlignes med et vannrør med en elastisk membran



- Hvis vannet beveger seg vil membranen bevege seg også, slik det ser ut som det renner vann igjennom røret (vann = elektrisk strøm)
- Hvis vannet endrer retning, vil membranen gå tilbake til sin opprinnelige posisjon og presse vannet tilbake
- Det vil være trykkforskjell på hver side av membranen når vannet beveger seg (trykkforskjell = spenning)
- Uten bevegelse i vannet vil membranen ikke bevege seg (dc-spenning gir ingen strøm igjennom kondensatoren)

# Kondensatorer (forts)

- Hvis platene kobles til en spenning  $V_s$ , oppstår et felt mellom platene
- Feltet gjør at elektroner beveger seg fra den ene platen over til den andre
- Når spenningen mellom platene har nådd  $V_s$  beveger det seg ikke lenger elektroner
- Om kilden fjernes vil en ideell kondensator beholde spenningen til evig tid
- I praksis «lekker» platene og dette modelleres med en resistor i parallel



## Kondensatorer (forts)

- Mengden ladning en kondensator kan holde på heter *kapasitans*  $C$ , måles i *Farad* og er definert ved

$$C = \frac{Q}{V} \Leftrightarrow Q = CV \Leftrightarrow V = \frac{Q}{C}$$

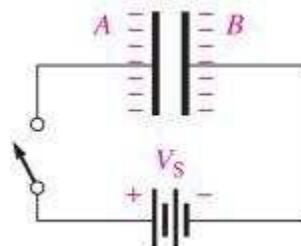
- 1 Farad er kapasitansen som tilsvarer lagring av 1 Coulomb med 1 volt potensialforskjell mellom platene
- Sammenhengen mellom plateareal  $A$ , plateavstand  $d$  og kapasitans er gitt av

$$C = \epsilon \frac{A}{d}$$

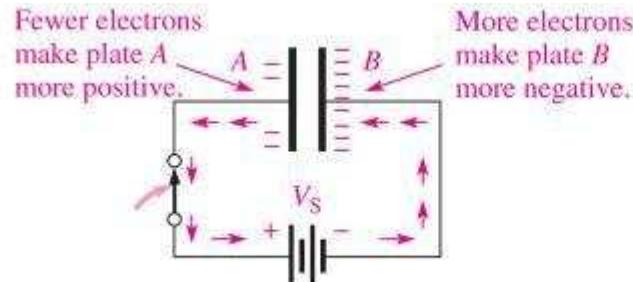
- $\epsilon$  kalles for *permittivitet* og er en egenskap ved materialet mellom platene

# Oppladning og utladning av kondensator

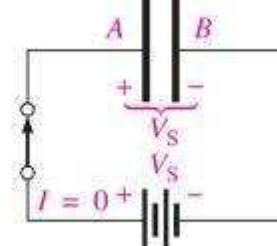
- Ladninger kan bare bevege seg når spenningen over kondensatoren er forskjellig fra spenningskilden
- Når kretsen har nådd stabil dc-spenning, vil kondensatoren blokkere for strøm



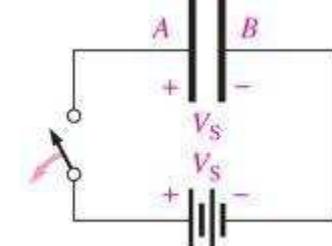
(a) Uncharged



(b) Charging



(c) Fully charged

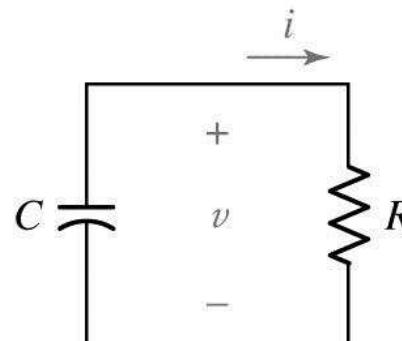


(d) Retains charge

# Tidskonstant

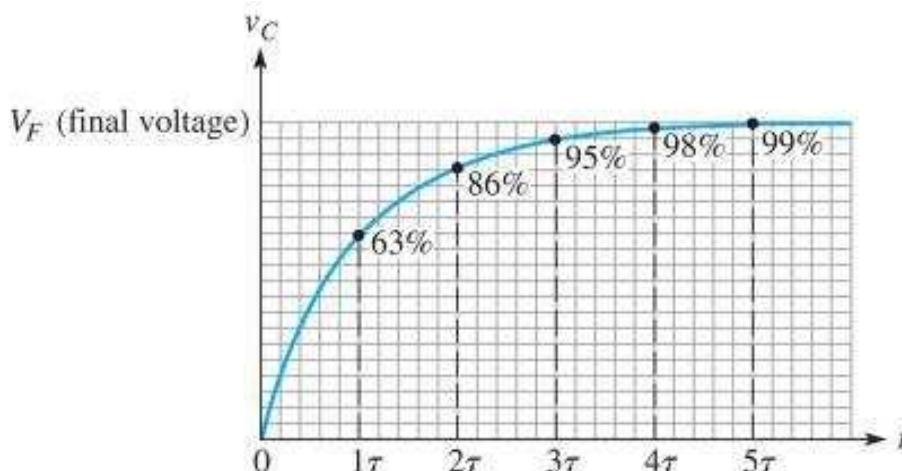
- Viktige egenskaper ved en kondensator er
  - Hvor raskt den lades *opp* når en spenningskilde  $V_s$  kobles *til*
  - Hvor raskt den lades *ut* til 0 når en spenningskilde  $V_s$  kobles *fra*
- Tidskonstanten  $\tau$  sier hvor lang tid det tar å lade opp/ut kondensatoren når den er koblet i serie med en ohmsk motstand.
- $\tau$  måles i sekunder og er definert ved

$$\tau = RC$$

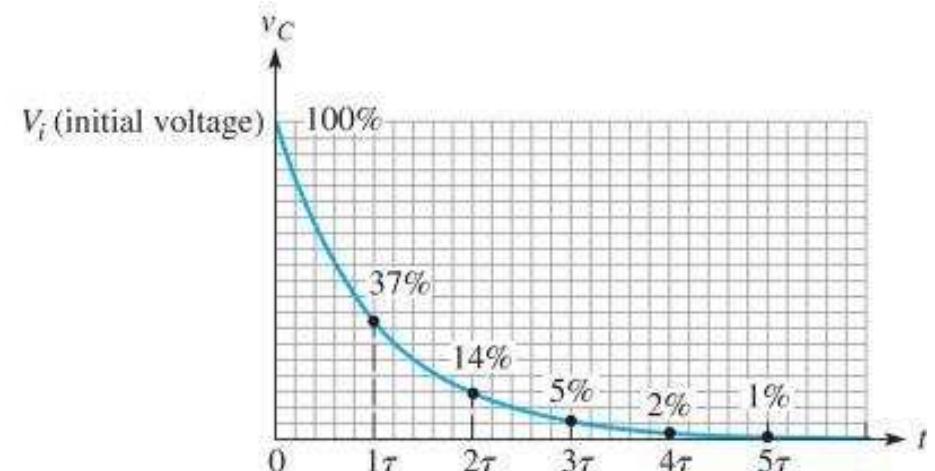


## Tidskonstant (forts)

- Når  $\tau = 1s$  betyr det at
  - .En fullt utladet kondensator har nådd ca 63% av den maksimale spenningen etter at den er koblet til en spenningkilde
  - .En fullt oppladet kondensator har falt til ca 37% av den opprinnelige spenningen etter at kilden er koblet fra
- Opp/utladningskurvene er eksponensielle



(a) Charging curve with percentages of the final voltage



(b) Discharging curve with percentages of the initial voltage

## Tidskonstant (forts)

- De generelle formlene for oppladning og utladning av en kondensator som lades opp/ut via en resistor er gitt av

$$v = V_F + (V_i - V_F) e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$i = I_F + (I_i - I_F) e^{-\frac{t}{\tau}}$$

der  $V_F$  og  $I_F$  er slutt-verdiene, og  $V_i$  og  $I_i$  er startverdiene

- Hvis man lader *opp* fra  $V_i = 0$ , blir formelen

$$v = V_F (1 - e^{-\frac{t}{RC}})$$

- Hvis man lader *ut* til  $V_F = 0$  blir formelen

$$v = V_i e^{-\frac{t}{RC}}$$

# Kapasitiv reaktans

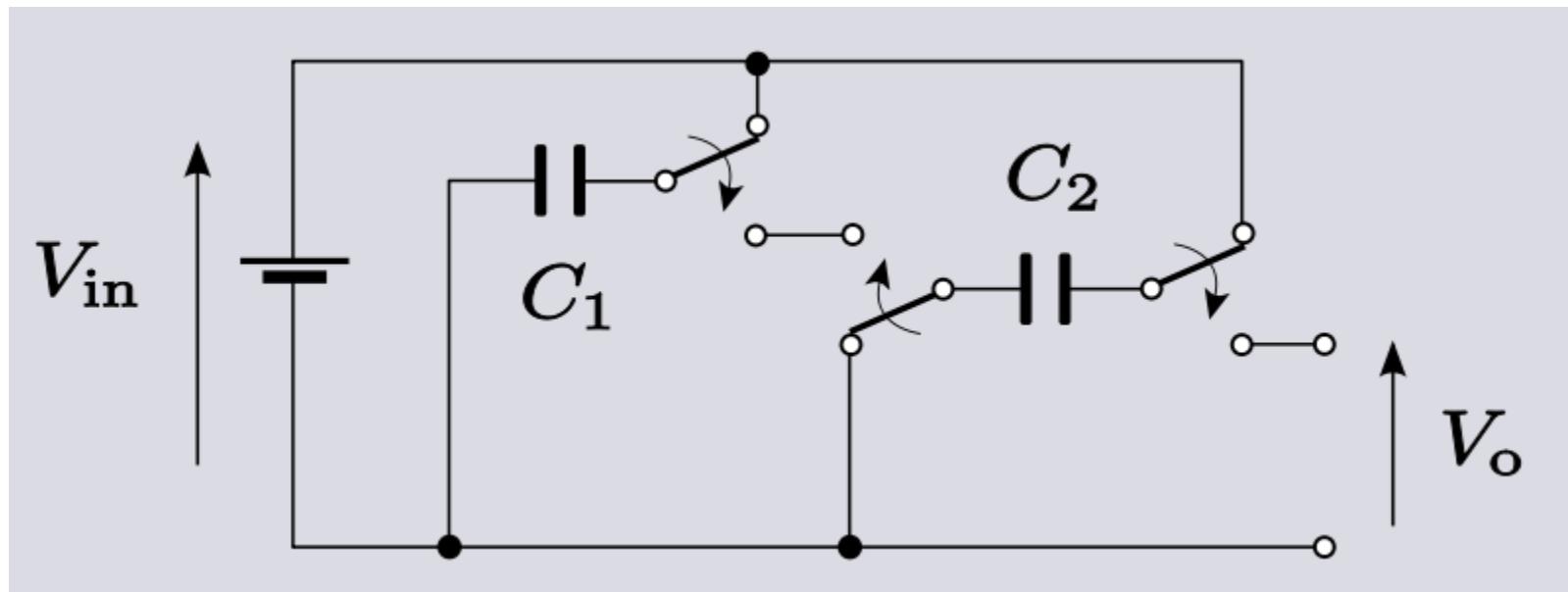
- En kondensator har en motstand mot elektrisk strøm som er avhengig av frekvensen til signalet
- Denne motstanden kalles *kapasitiv reaktans*  $X_c$  og er definert ved

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C}$$

- Jo større frekvens, desto mindre kapasitiv reaktans
- Jo større kapasitans, desto mindre kapasitiv reaktans

# Nøtt til neste gang

- Hva gjør denne kretsen? (dvs hva er sammenhengen mellom  $V_{in}$  og  $V_o$  når bryterene åpnes og lukkes?) Anta ideelle kondensatorer



## 2. obligatoriske labøvelse

- Formål
  - Bli kjent med RC-kretser
  - Måle på ulike egenskaper ved RC-kretser
  - Teoretiske beregninger på RC-kretser
  - Teorigrunnlaget dekkes av forelesning 4 og 5 og læreboka
- Temaer
  - Måling på sinussignaler og pulssignaler med oscilloskop
  - Måling og beregning av oppladning av RC-kretser for pulssignaler
  - Måling på RC-forsinkelseskrets for sinussignaler
  - Måling og beregning av kapasitiv reaktans og fasedreining
- Frist for innlevering er **fredag 27.februar kl 23.59**

# Oppsummeringsspørsmål

- Spørsmål fra forelesningene 3 og 4

# Spørsmål 1

En krets kalles for parallelkrets hvis

- a) Det er samme strøm gjennom alle elementene
- b) Alle elementene har samme spenning over seg
- c) Den har mer enn én strømvei
- d) Den har ingen strømkilder

## Spørsmål 2

I en parallelkrets er

- a) Totalkonduktansen lik summen av konduktansen til enkeltelementene
- b) Totalresistansen lik summen av resistansen til enkeltelementene
- c) Totalkonduktansen lik produktet av konduktansen til enkeltelementene
- d) Den inverse av totalresistansen lik summen av de inverse enkeltresistansene

## Spørsmål 3

Gitt en spenningdeler som består av to ulike motstander i serie. Da er

- a) Spenningsfallet størst over den minste motstanden
- b) Spenningsfallet størst over den største motstanden
- c) Strømmen størst gjennom den minste motstanden
- d) Strømmen størst gjennom den største motstanden

## Spørsmål 4

To krester er elektrisk ekvivalente hvis

- a) Det går samme strøm gjennom terminalene
- b) Det er samme spenning over terminalene
- c) De elektriske egenskapene internt i de to kretsene er identiske
- d) De elektriske egenskapene mellom et nodepar er identiske

## Spørsmål 5

Ved å koble sammen batterier i parallel får man

- a) Mindre spenning
- b) Mindre konduktans
- c) Økt strøm
- d) Høyere resistans

## Spørsmål 6

For et vilkårlig ac-signal gjelder følgende:

- a) Snittverdien over en hel periode er 0
- b) Signalet gjentar seg etter perioden T
- c) Har en bestemt frekvens  $f=1/T$
- d) Varierer over tid

## Spørsmål 7

Et balansert sinussignal er

- a) Alltid positivt
- b) Har fast frekvens
- c) Er sentrert rundt 0
- d) Absoluttverdien til den positive og negative peakverdien er like

## Spørsmål 8

Hvilken påstand er feil?

En kondensator

- a) Kan ikke lagre elektrisk ladning
- b) Har motstand mot elektrisk strøm som er avhengig av frekvensen
- c) Jo større frekvens desto større motstand
- d) Jo større frekvens desto større kapasitiv reaktans

## Spørsmål 9

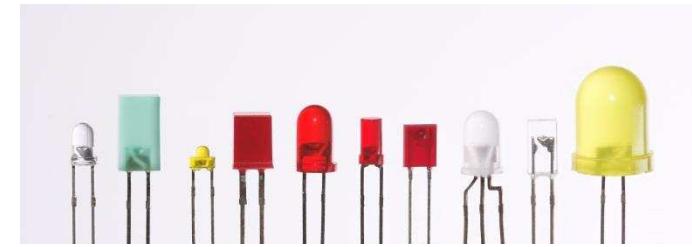
Hvis kapasitansen øker vil

- a) Reaktansen bli mindre
- b) Resistansen bli mindre
- c) Frekvensen øke
- d) Perioden bli mindre

## Spørsmål 10

Tidskonstanten til en RC-krets sier noe om

- a) Hvor lang tid det tar før den blokkerer en dc-spenning
- b) Ved hvilken frekvens den begynner å lede en ac-strøm
- c) Ved hvilken frekvens den begynner å sperre en ac-strøm
- d) Hvor lang tid det tar å lade kondensatoren opp eller ut



# Forelesning nr.5 INF 1411

## Elektroniske systemer

RC-kretser

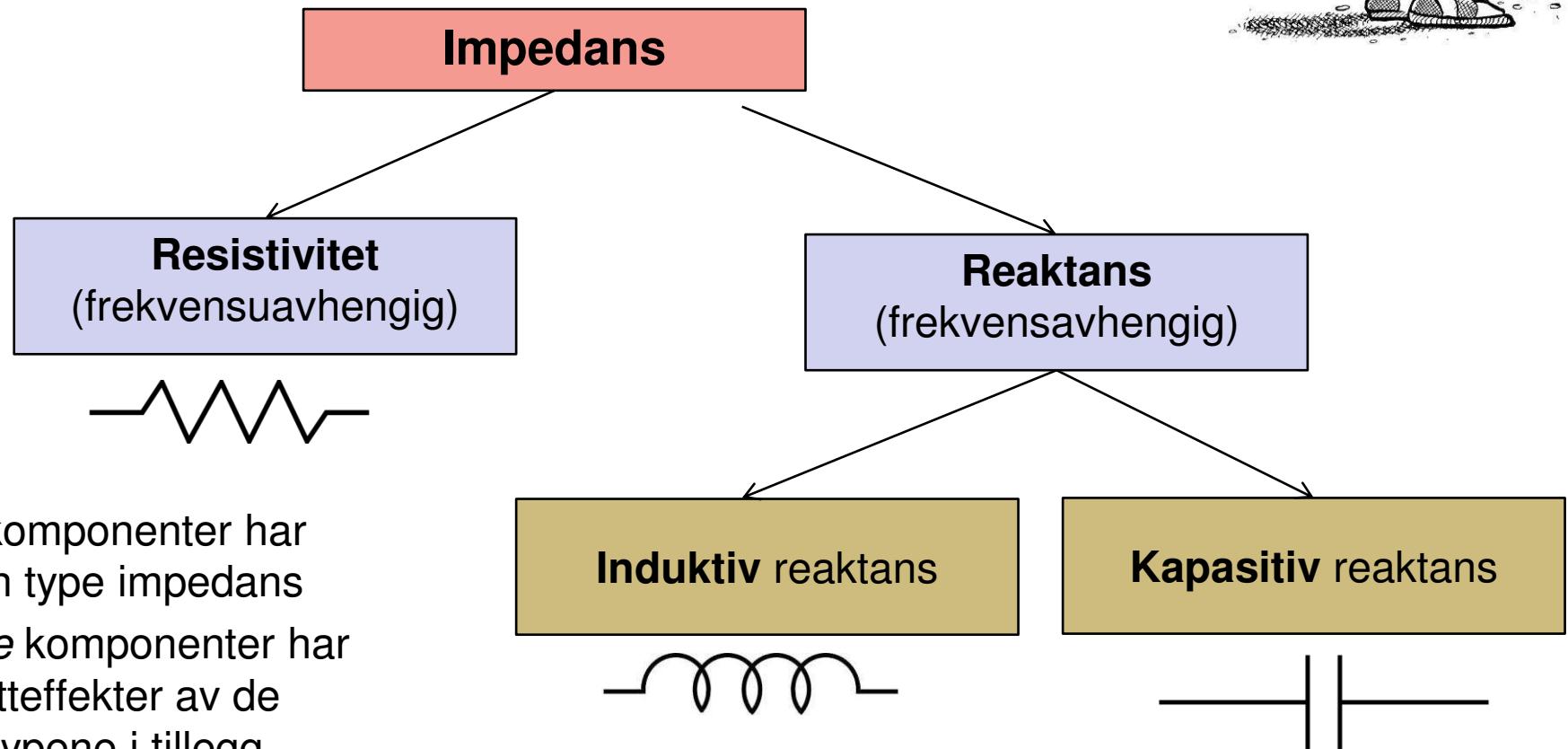


# Dagens temaer

- Ulike typer impedans og konduktans
- Kondensatorer i serie og parallel
- Bruk av kondensator
- RC-kretser
  - Impedans og fasevinkler
  - Serielle RC-kretser
  - Parallelle RC-kretser
- Temaene hentes fra kapittel 9.5-9.7, 10.1-10.3

# Impedans

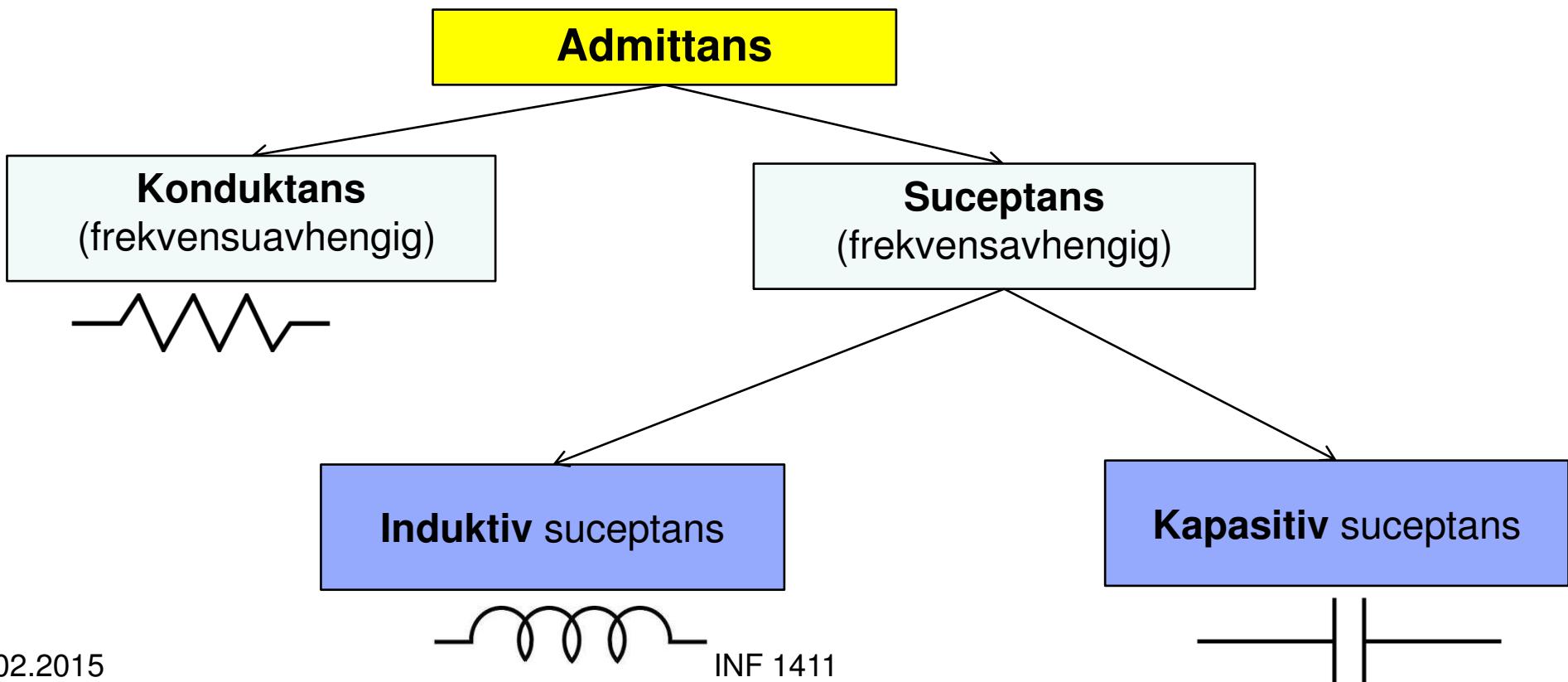
- Forholdet mellom spenning og strøm ( $V/I$ ) er *impedans*



- Idelle* komponenter har bare én type impedans
- Fysiske* komponenter har parastitteffekter av de andre typene i tillegg

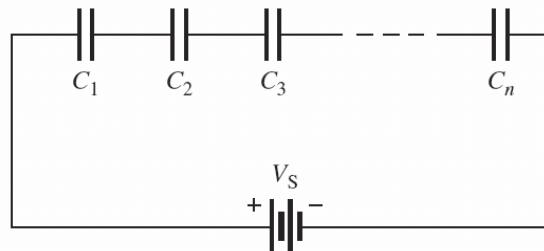
# Admittans

- Forholdet mellom strøm og spenning ( $I/V$ ) heter *admittans*, og er det inverse av impedans.



## Kapasitans for seriekoblede kondensatorer

$$V=Q/C$$



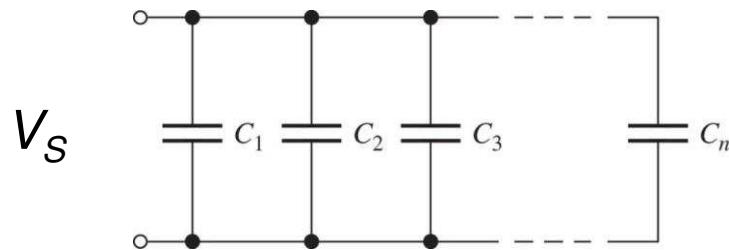
$$I = \frac{Q}{t}$$

- Hver kondensator lagrer samme ladning fordi strømmen mellom hvert element er den samme, dvs  $Q_{Tot} = Q_{C1} = Q_{C2} = \dots = Q_{Cn}$
- KVL gir at  $V_s = V_{C1} + V_{C2} + \dots + V_{Cn}$
- Dermed blir

$$\frac{Q}{C_{Tot}} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \dots + \frac{Q}{C_n} \Rightarrow \frac{1}{C_{Tot}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} \Rightarrow C_{Tot} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}}$$

- Uttrykket tilsvarer resistorer i *parallel*

## Kapasitans for parallelkoblede kondensatorer



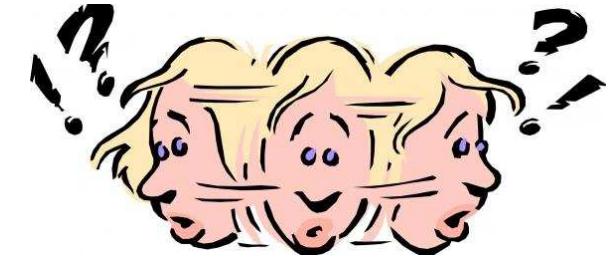
- Den totale ladningen er lik summen av ladningene over hver kondensator:  $Q_{Tot} = Q_{C1} + Q_{C2} + \dots + Q_{Cn}$
- Siden  $Q=CV$ , blir  $C_{Tot}V_S = C_1V_S + C_2V_S + \dots + C_nV_S \Rightarrow C_{Tot} = C_1 + C_2 + \dots + C_n$
- Uttrykket tilsvarer resistorer i serie

# Kapasitiv reaktans

- En kondensator har frekvensavhengig impedans mot strøm
- Impedansen heter *kapasitiv reaktans*  $X_c$  og er definert ved

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C}$$

- Jo *større frekvens*, desto *mindre* reaktans
- Jo *større kapasitans*, desto *mindre* reaktans
- 
- **NB:** I en ohmsk motstand er R et mål for resistivitet. Kapasitansen C angir derimot *ikke* kapasitiv reaktans



# Kapasitiv reaktans seriell krets

- Den totale *kapasitansen* er mindre enn den minste enkeltkapasitansen for kondensatorer i serie
- Den totale *kapasitive reaktansen* til seriekoblede kondensatorer er større enn reaktansen til en enkeltkondensator i kretsen
- Den totale kapasitive reaktansen er summen av de individuelle reaktansene:  $X_{c(tot)} = X_{c1} + X_{c2} + \dots + X_{cn}$
- Den totale *kapasitive reaktansen* er dermed tilsvarende som for den totale resistansen av seriekoblede ohmske motstander



# Kapasitiv reaktans parallelkrets

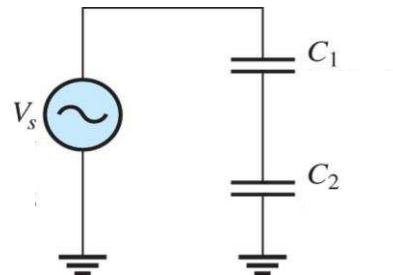
- Total kapasitans er større enn den største enkeltkapasitansen
- Den totale kapasitive reaktansen til parallelkoblede kondensatorer er mindre enn reaktansen til en enkeltkondensator i kretsen
- Det kan vises at den totale kapasitive reaktansen er lik

$$X_{c(tot)} = \frac{1}{\frac{1}{X_{c1}} + \frac{1}{X_{c2}} + \dots + \frac{1}{X_{Cn}}}$$

- Den totale *kapasitive reaktansen* er tilsvarende som for den totale resistansen av parallelkoblede resistorer

# Kapasitiv spenningsdeler

- En *kapasitiv* spenningsdeler er en spenningsdeler konstruert med kondensatorer istedenfor ohmske motstander:

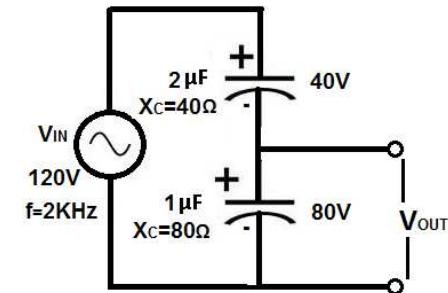
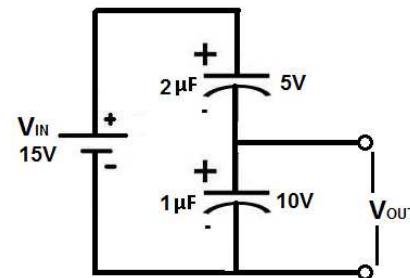
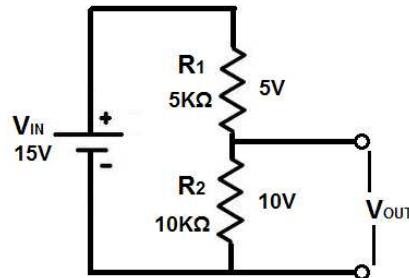


- Ved å bruke KVL kan man vise at spenningsdelingen er gitt av

$$V_x = \frac{X_{Cx}}{X_{C(tot)}} V_s$$

# Kapasitiv vs resistiv spenningdeler

- Ideelt sett oppfører begge seg likt for dc og ac-spenninger

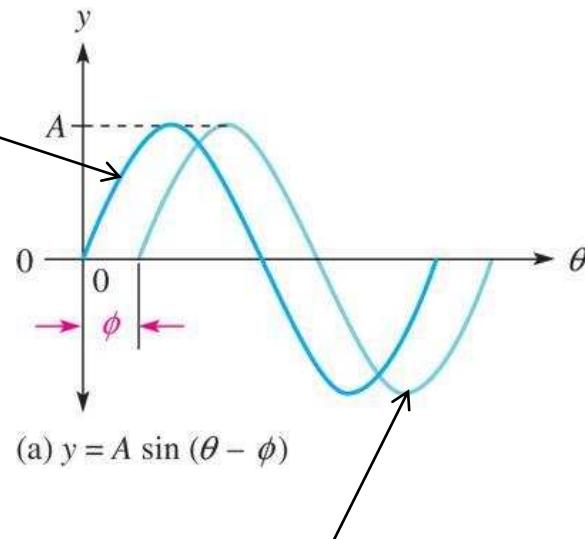


- Trekker strøm for både av og dc
- Samme strøm uavhengig av frekvens
- Samme lastmotstand for kilden for alle frekvenser
- Trekker ikke strøm for dc
- Trekker strøm for ac
- Strømmen er proporsjonal med frekvensen
- Høy lastmotstand for kilden ved lave frekvenser

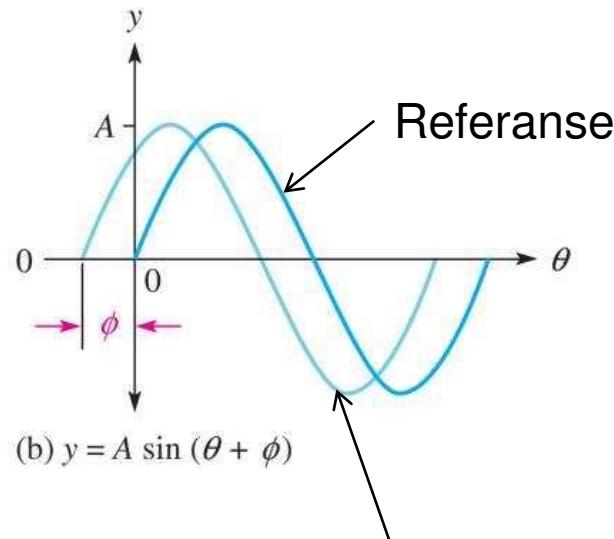
# Fasedreining

- Hvis et sinussignal forskyves i tid oppstår en *faseforskyvning* eller *fasedreining*  $\phi$

Referanse



Kurven er forskjøvet til høyre,  $\phi$  er *negativ* og *forsinket* (eng: "lags") i forhold til referansen

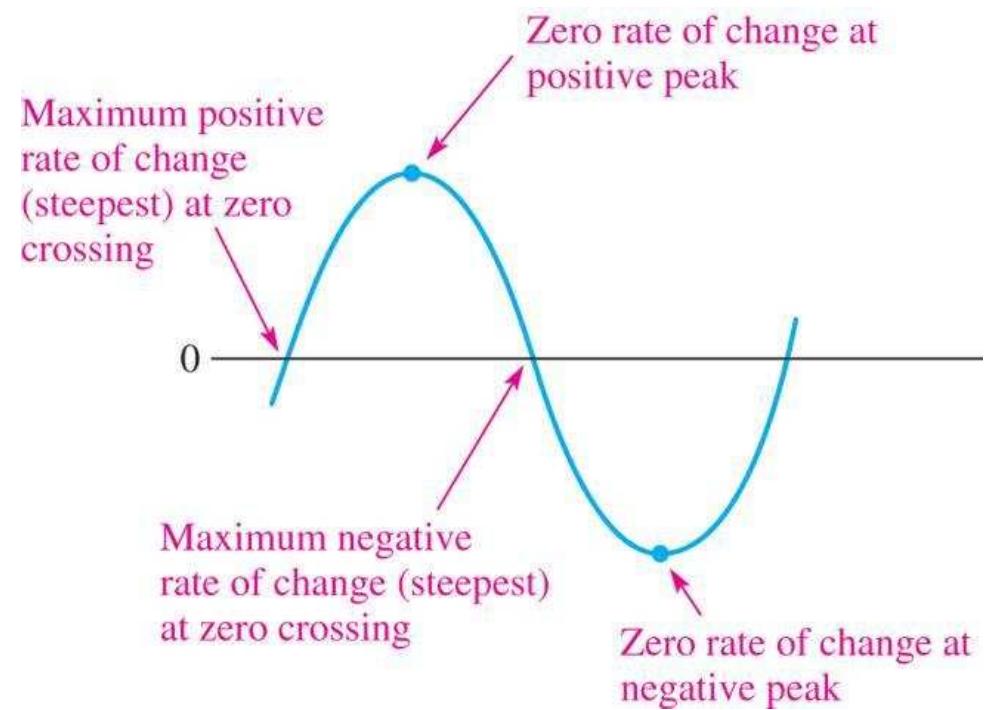


Kurven er forskjøvet til venstre,  $\phi$  er positiv og *leder* (eng: "leads") i forhold til referansen

# Faseforhold mellom strøm og spenning

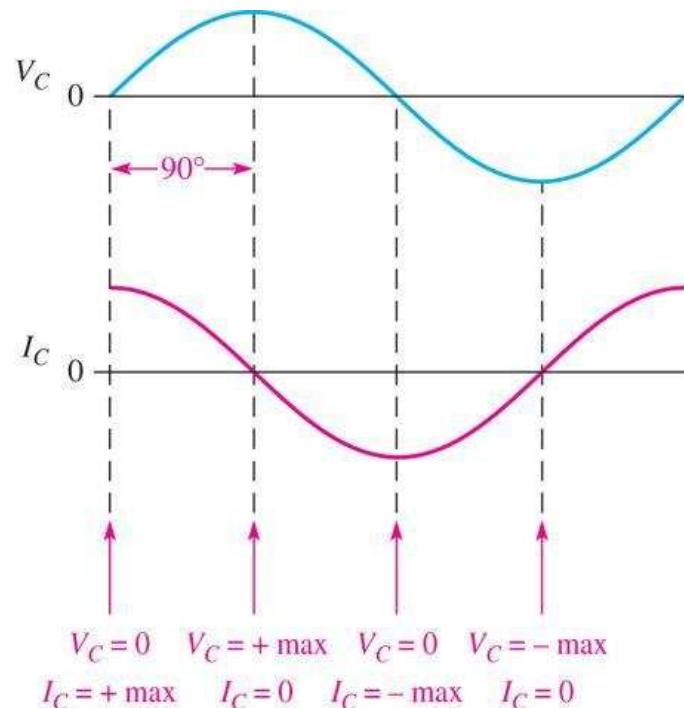
- For en resistor er *strømmen gjennom og spenningen over i fase*, dvs  $\varphi=0$
- For en kondensator er det fasedreining mellom strøm og spenning
- Fasedreningen kan forstås ved å se på når *endringen* i en sinus-kurve er størst og minst

$$i = C \frac{dv}{dt}$$



## Faseforhold mellom strøm og spenning (forts)

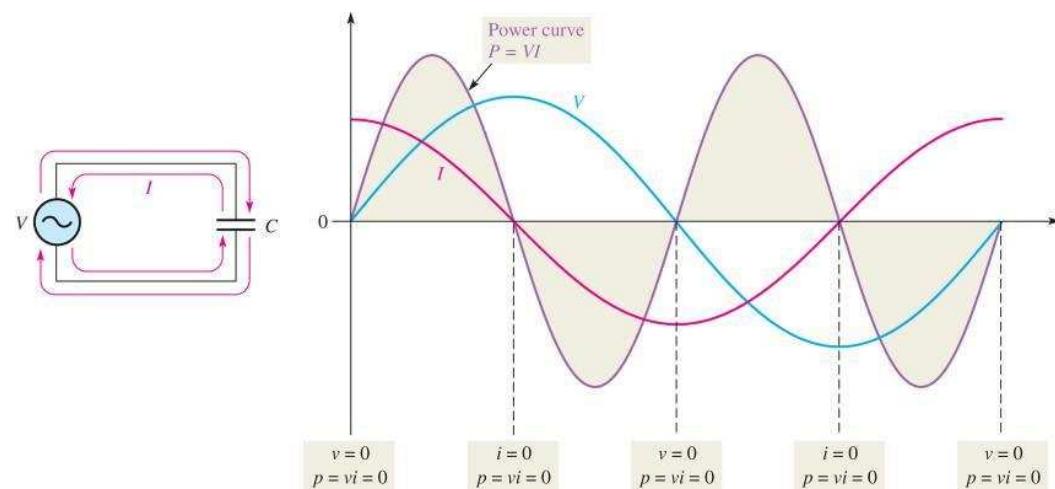
- Strømmen gjennom en kondensator er størst når *endringen i spenningen over den* er størst, og minst når *endringen i spenningen* er minst
  - Når spenningen er på det største (minste) er *endringen* lik 0, dvs strømmen lik 0
  - Når spenningen er 0, er *endringen* størst, dvs strømmen er størst
  - Strømmen er derfor faseforskøvet med +90 grader i forhold til spenningen



$$i = C \frac{dv}{dt}$$

# Effekt i kondensatorer

- En ideel kondensator vil ikke forbruke energi, men kun lagre og deretter avgje energi
- Effekten som lagres når strøm og spenning har samme polaritet vil avgis når strøm og spenning har motsatt polaritet



# Effekt i kondensatorer (forts)

- Tre typer effekt i kondensatorer:
  - **Umiddebar** («instantaneous») effekt ( $P$ ): Produktet av strøm og spenning på et bestemt tidspunkt
  - **Ekte** («true») effekt ( $P_{\text{True}}$ ): Forholdet mellom lagret og avgitt effekt.  
For en idell kondensator er denne 0, for en ikke-ideel er den positiv
  - **Reaktiv** effekt ( $P_r$ ): Raten som en kondensator lager eller avgir effekt med, beregnet utfra rms-verdiene for strøm og spenning:

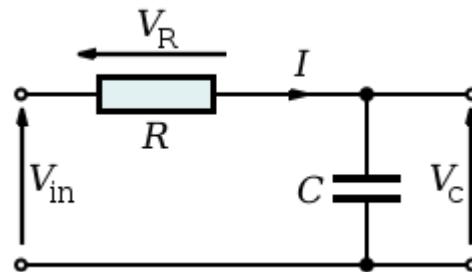
$$P_r = V_{rms} I_{rms}$$

$$P_r = \frac{V_{rms}^2}{X_C}$$

$$P_r = I_{rms}^2 X_C$$

# RC-kretser

- RC-kretser består av resistorer og kondensatorer



- RC-kretser er enten serielle eller parallele, dvs en resistor og en kondensator i serie eller i parallel
- Større og mer kompliserte kretser kan deles opp i mindre serielle og/eller parallele kretser og analyseres separat
- Lettest å analysere oppførselen for sinussignaler, men bl.a i digitale kretser er oppførselen for pulssignaler viktigere

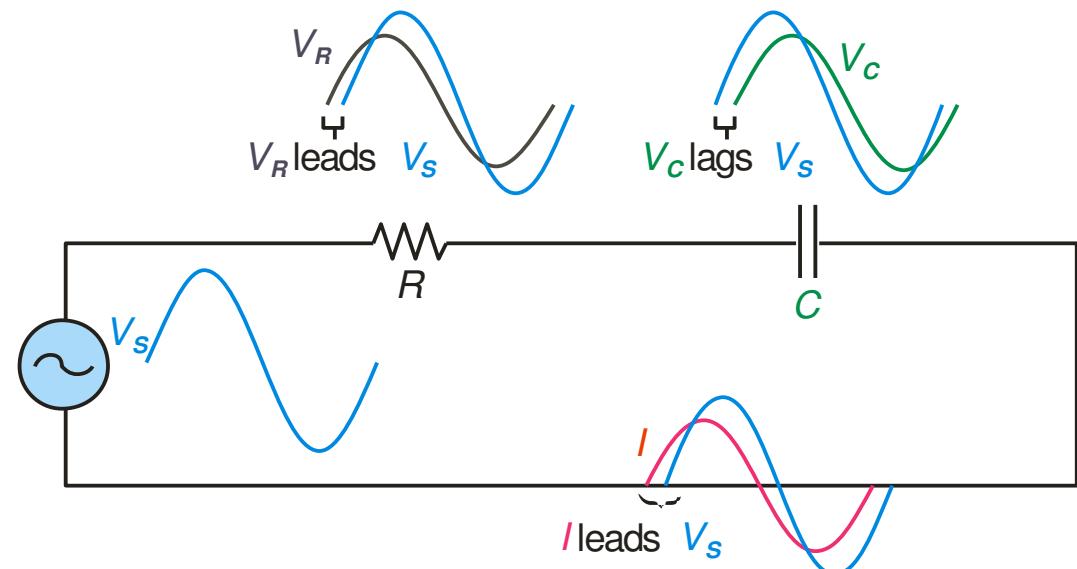
# Serielle RC-kretser



- I en ren resistiv krets er strøm og spenning i fase, dvs  $\varphi=0$
- I en seriell RC-krets vil det være faseforskyvning mellom
  - Spenningen over hvert element i forhold til de andre elementene
  - Spenningene over elementene i forhold til strømmen
- Strømmen gjennom alle elementene vil være i fase
- Avhengig av forholdet mellom *resistansen* og den *kapasitive reaktansen*, vil faseforskyvningen ligge mellom  $0^\circ$  og  $90^\circ$

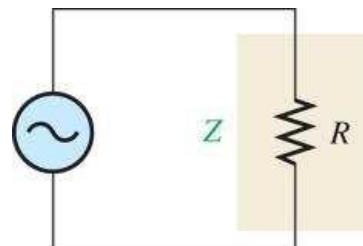
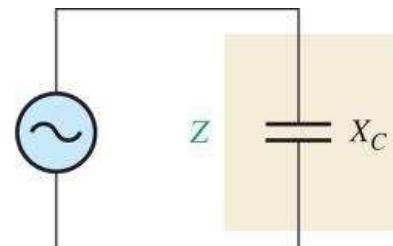
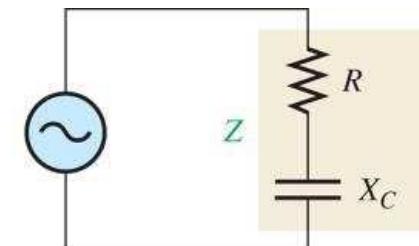
# Serielle RC-kretser (forts)

- En seriell RC-krets består av minst én resistor og minst én kondensator
- Spenningen  $V_R$  over motstanden  $R$  er i fase med strømmen  $I$ , og leder over  $V_s$ , dvs  $\varphi > 0$
- $V_R$  og  $V_C$  har  $90^\circ$  fasedreining
- For å finne fasedreiningen mellom  $V_s$  og  $V_C$  eller mellom  $V_s$  og  $I$  må man beregne den totale impedansen i kretsen



# Total impedans i seriell RC-krets

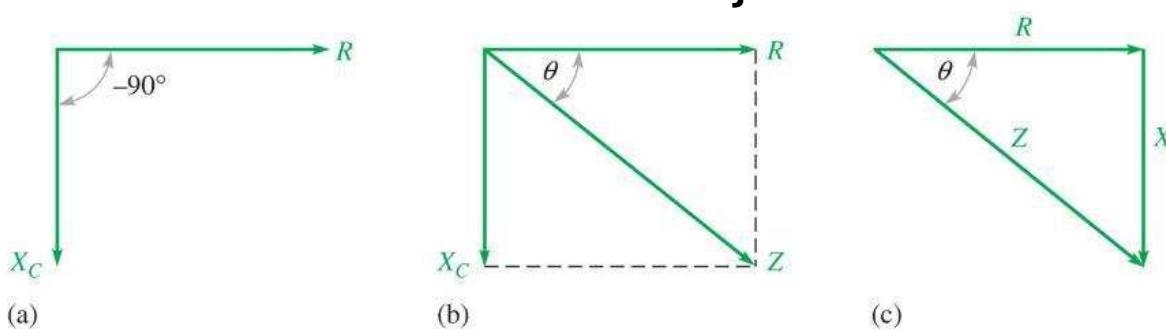
- Impedansen  $Z$  er den samlede motstanden mot vekselstrøm i en krets
- Impedansen har en frekvensuavhengig *resistiv* del  $R$  og en frekvensavhengig *reaktiv* del  $X_C$

(a)  $Z = R$ (b)  $Z = X_C$ (c)  $Z$  includes both  $R$  and  $X_C$ 

- Den resistive og reaktive delen har en fasedreining på  $-90^\circ$  i forhold til hverandre

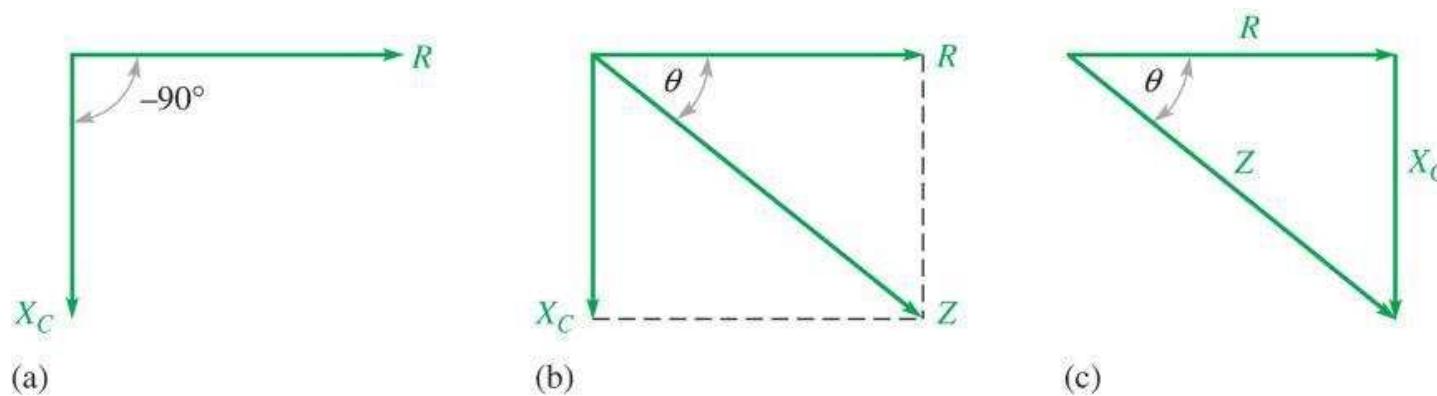
# Total impedans i seriell RC-krets (forts)

- Den totale impedansen er gitt av  $Z=R+X_C$ , merk fete bokstaver:  $R$  og  $X_C$  er vektorer («phasors»).
- $Z$  finner man ved vektorsummasjon



- Siden  $Z$  er en vektor har den både en fasevinkel  $\theta$  og en magnitude
- $Z$  har fortsatt Ohm ( $\Omega$ ) som enhet

# Total impedans i seriell RC-krets (forts)



- Magnituden er lengden til  $Z$  og finnes ved Pythagoras:
$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$$
- Fasen  $\theta$  finnes ved å beregne inverse tangens til vinkelen

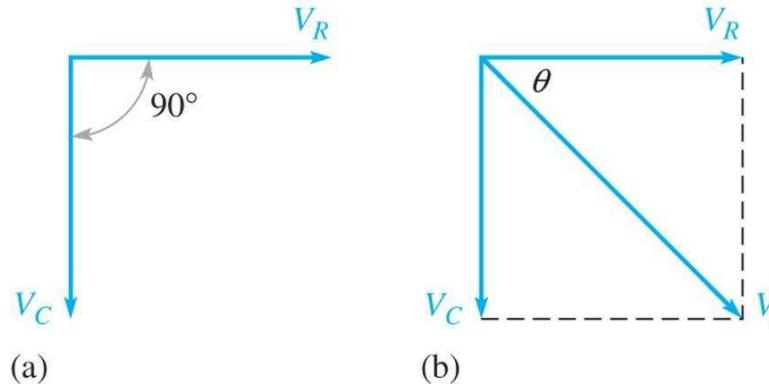
$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{X_C}{R}\right)$$

# Serielle kretser og Ohms lov, KVL og KCL

- Når strøm, spenning og impedans er på vektorform, vil fortsatt Ohms lov, KVL og KCL gjelde
- Når man beregner faktiske ampere-, volt- og Ohmverdier samt fasedreining gjelder disse kun for en bestemt frekvens
- Andre frekvenser gir andre  $Z$ -,  $I$ - og  $V$ -verdier og fasedreining  $\varphi$

# Faseforskjell strøm - spenning

- I en seriell RC-krets er strømmen gjennom resistoren og kondensatoren den samme
- For å finne sammenhengen mellom  $V_s$ ,  $V_R$  og  $V_C$  bruker man KVL og vektoraddisjon (samme som for å finne  $Z$ )

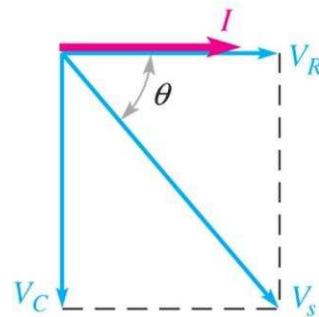


$$V_s = \sqrt{V_R^2 + V_C^2}$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{V_C}{V_R}\right)$$

# Faseforskjell strøm - spenning (forts)

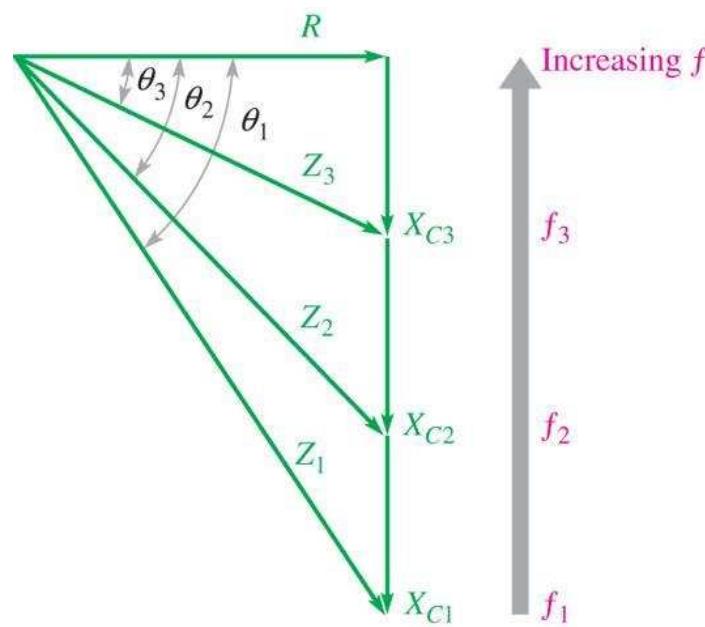
- Siden strømmen  $I$  og resistorspenning  $V_R$  er i fase, er fasedreningen mellom  $I$  og  $V_s$  lik den mellom  $V_R$  og  $V_s$  eller  $X_C$  og  $R$



$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{X_C}{R}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{V_C}{V_R}\right)$$

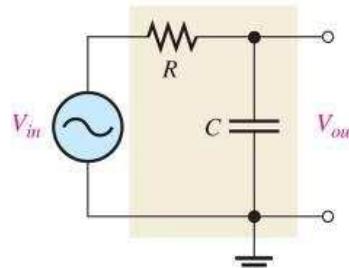
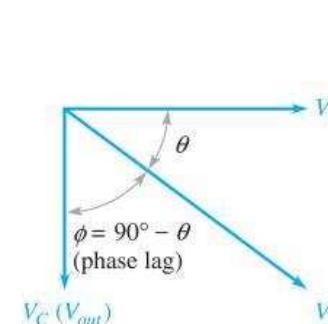
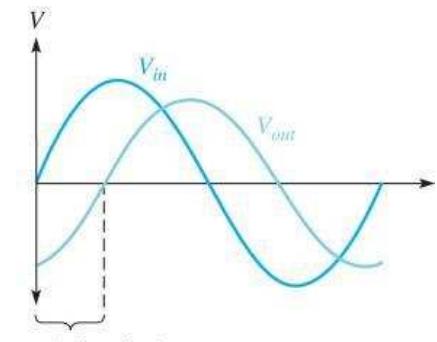
# Impedans, fasedreining og frekvens

- Diagrammet under oppsummerer sammenhengen mellom impedans, frekvens og fasedreining



# RC lead/lag kretser

- RC «lead»- og RC «lag»-kretser er faseskiftkretser
- I en RC «lag»-krets er utspenningen  $V_{out}$  forskjøvet  $\varphi$  grader i forhold til  $V_{in}$

(a) A basic  $RC$  lag circuit(b) Phasor voltage diagram showing the phase lag between  $V_{in}$  and  $V_{out}$ 

(c) Input and output voltage waveforms

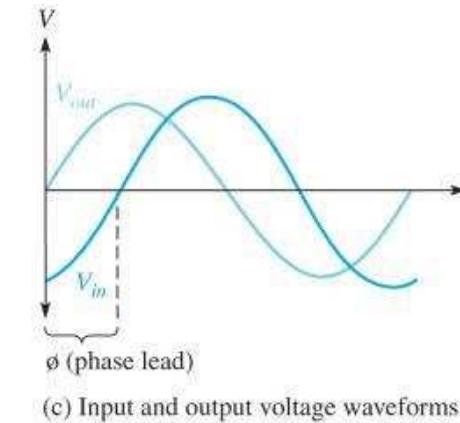
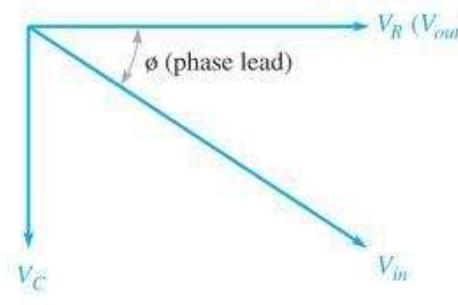
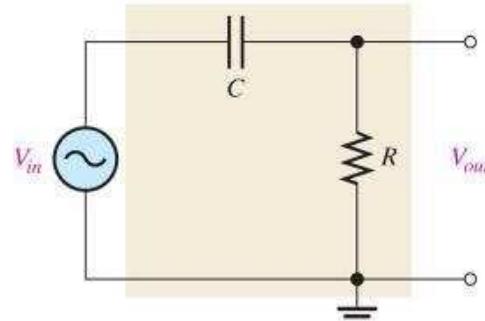
- $V_{out}$  er lik  $V_c$ ,  $V_{in}$  lik  $V_s$  og  $\varphi = 90^\circ - \theta$
- Kretsen kan også ses på som en spenningsdeler hvor

$$\varphi = 90^\circ - \tan^{-1}\left(\frac{X_C}{R}\right)$$

$$V_{out} = \left( \frac{X_C}{\sqrt{R^2 + X_C^2}} \right) V_{in}$$

# RC lead/lag kretser (forts)

- Ved å bytte om R og C får man en RC-«lead»-krets



- Utspenningen tas over resistoren og  $\varphi$  og  $V_{out}$  er her gitt av  $R$  og  $X_C$

$$\varphi = \tan^{-1} \left( \frac{X_C}{R} \right)$$

$$V_{out} = \left( \frac{R}{\sqrt{R^2 + X_C^2}} \right) V_{in}$$

# Oppsummeringsspørsmål

- Spørsmål fra forelesningene 4 og 5

# Spørsmål 1

For et periodisk ac-signal gjelder følgende:

- a) Snittverdien over en halv periode er forskjellig fra 0
- b) Snittverdien er alltid 0
- c) Bølgeformen gjentar seg etter tiden T
- d) Har ikke en dc-komponent

## Spørsmål 2

Et balansert sinussignal er

- a) Alltid positivt
- b) Har fast frekvens
- c) Er sentrert rundt 0
- d) Absoluttverdien til den positive og negative amplituden er like

## Spørsmål 3

En kondensator

- a) Kan lagre elektrisk strøm
- b) Har motstand mot elektrisk strøm som er avhengig av frekvensen
- c) Jo større frekvens desto større motstand
- d) Jo større frekvens desto større kapasitiv reaktans

## Spørsmål 4

Tidskonstanten til en kondensator sier noe om

- a) Hvor lang tid det tar før den blokkerer for en dc-spenning
- b) Ved hvilken frekvens den begynner å lede en ac-strøm
- c) Ved hvilken frekvens den begynner å sperre en ac-strøm
- d) Hvor lang tid det tar å lade den opp/ut

## Spørsmål 5

Hvis kapasitansen minker vil

- a) Reaktansen bli større
- b) Resistansen bli mindre
- c) Frekvensen øke
- d) Perioden bli mindre

## Spørsmål 6

Strømmen gjennom en kondensator er

- a) Størst når spenningen er størst
- b) Størst når spenningen er minst
- c) Endringen i spenningen er størst
- d) Endringen i spenningen er minst

## Spørsmål 7

Faseforskyvningen mellom strøm og spenning i en resistor er

- a) -90 grader
- b) 90 grader
- c) 180 grader
- d) 0 grader

## Spørsmål 8

Faseforskyvningen mellom strøm og spenning i en kondensator er

- a) -90 grader
- b) 90 grader
- c) 180 grader
- d) 0 grader

## Spørsmål 9

Susceptans er et uttrykk for

- a) Impedans i en kondensator
- b) Frekvensavhengig admittans
- c) Frekvensuavhengig admittans
- d) Ledningsevne i en resistor

## Spørsmål 10

Hvis frekvensen nærmer seg uendelig, hva skjer med den totale impedansen i en RC-krets?

- a) Den blir lik 0
- b) Den blir uendelig stor
- c) Den blir rent resistiv
- d) Den blir rent kapasitiv

## Spørsmål

- Hvilke to deler består impedansen i en seriell RC-krets av?
- Hva er enheten for impedans?
- Hva skjer med den kapasitive reaktansen når frekvensen øker?
- Hva skjer med fasedreiningen mellom strømmen gjennom og spenning over en kondensator når frekvensen øker?
- Hvis frekvensen nærmer seg uendelig, hva skjer med den totale impedansen i en RC-krets?
- Hva er en "lead"-krets?
- Hva er en "lag"-krets?

# Spørsmål

- Hvilket egenskap uttrykker kapasitans?
- Hva er kapasitiv reaktans?
- Hva er impedans?
- Hvilke tre typer impedans finnes det?
- Hva er admittans?

## Spørsmål (forts)

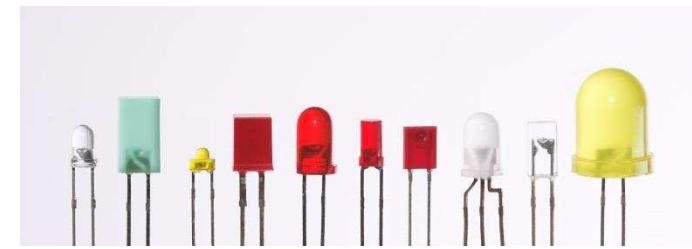
- Den totale kapasitansen for to seriekoblede kondensatorer er
  - a) Mindre enn den minste enkeltkapasitansen
  - b) Større enn den minste enkeltkapasitansen
- Den totale reaktansen for to parallelkkoblede kondensatorer er
  - a) Mindre enn reaktansen til den minste enkeltreaktansen
  - b) Større enn reaktansen til den minste enkeltreaktansen

# Spørsmål

- Hva er uttrykket for sammenhengen mellom strøm og spenning gjennom en kondensator uttrykt ved
  - Strøm, spenning og kapasitans
  - Spenning, kapasitans og ladning
- Hva vil faseforskyvning (fasedreining) si?
- Hvor stor er faseforskyvningen mellom strøm og spenning i en resistor?
- Hvor stor er faseforskyvningen mellom strøm og spenning i en kondensator?
- Hvor stor er spenningen over en kondensator når strømmen er på sitt største (eller minste)?

## Spørsmål (forts)

- Hvor stor er strømmen gjennom en kondensator når spenningen er på sitt største (eller minste)?
- Hvor stor er fasedreiningen mellom strømmen gjennom kondensatoren og resistoren i en seriell RC-krets?
- Hvor stor er fasedreiningen mellom spenningen over kondensatoren og resistoren i en seriell RC-krets?
- Hva er sammenhengen mellom strømmen og spenningen i en rent resistiv krets?



# Forelesning nr.6 INF 1411

## Elektroniske systemer

Anvendelser av RC-krester  
Spoler og RL-kretser

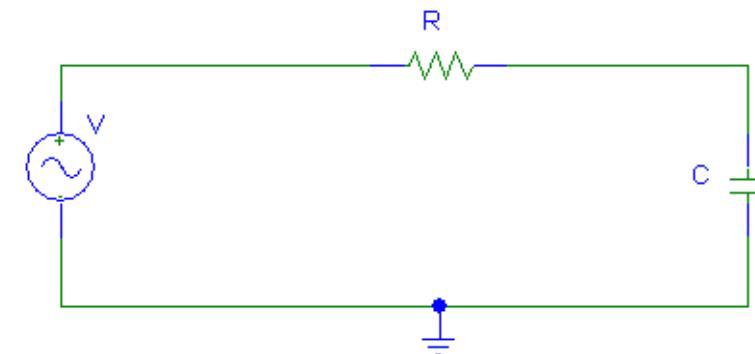


# Dagens temaer

- Regneeksempel på RC-krets
- Bruk av RC-kretser
- Sinusrespons til RL-kretser
  - Impedans og fasevinkel til serielle RL-kretser
  - Analyse av serielle RL-kretser
  - Praktiske anvendelser av spoler
- Temaene hentes fra Kapittel 10.8, 11.1-11.6, 12.1-12.6

# Eksempler

1. Finn den kapasitive reaktansen til en kondensator med  $C_1 = 2,65\mu F$  og for  $f_1=60Hz$  og deretter for  $f_2=60kHz$
2. Hvor mange Farad må en kondensator  $C_2$  være på hvis den for frekvensen  $f_2=60kHz$  skal ha samme reaktans som  $C_1$  ved  $f_1=60Hz$ ?
3. Hva er forskjellen i arealet til platene i  $C_1$  sammenlignet med  $C_2$ ?
4. Hvor stor er forskjellen i utstrekning hvis vi tenker oss kvadratiske kondensatorer?
5. Hvis  $C_1$  og  $C_2$  har samme areal, hvor stor må forskjellen i avstanden mellom platene være?
6. Gitt den serielle RC-kretsen til høyre
  1. Finn den totale impedansen når  $R=47\Omega$ ,  $V=10volt$ ,  $C=10\mu F$  og  $f=2kHz$
  2. Finn fasedreningen mellom kilden  $V$  og spenningen  $V_R$  over  $R$
  3. Finn fasedreningen mellom kilden  $V$  og spenningen  $V_C$  over  $C$
  4. Finn fasedreningen mellom  $I$  og  $V_R$ , mellom  $I$  og  $V_c$  og mellom  $I$  og  $V$



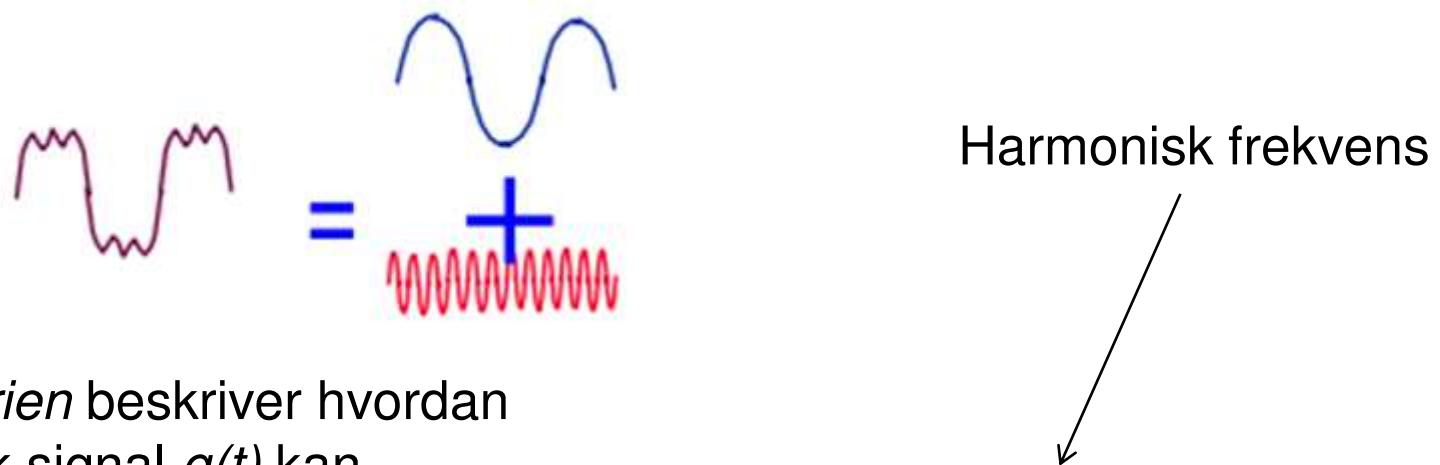
# RC-anvendelser

- RC-kretser finner man i mange både analoge og digitale systemer, bla i trådløse nett
- Parasitteffekter i ledere beskrives bla med RC-ledd
- Skal se på to eksempler:
  - Filtre
  - AC-koblinger



# Generelle ac-signaler og sinussignaler

- Ethvert signal kan skrives som en sum av sinussignaler



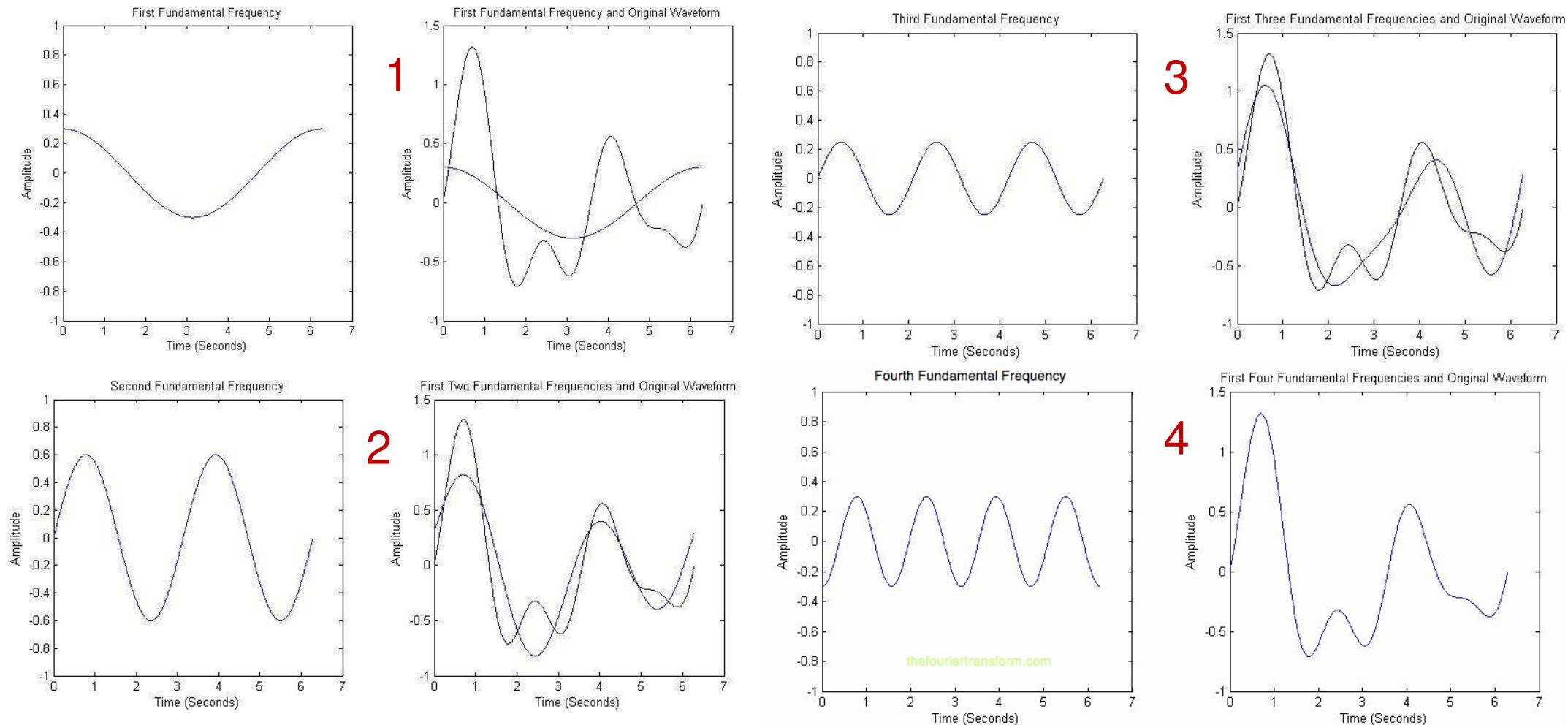
- Fourier-serien* beskriver hvordan et periodisk signal  $g(t)$  kan skrives som en sum av sinus- og cosinus-funksjoner
- Fouriertransform* benyttes hvis  $g(t)$  ikke er et periodisk signal

$$g(t) = a_0 + \sum_{m=1}^{\infty} a_m \cos\left(\frac{2\pi mt}{T}\right) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin\left(\frac{2\pi nt}{T}\right)$$

$$= \sum_{m=0}^{\infty} a_m \cos\left(\frac{2\pi mt}{T}\right) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin\left(\frac{2\pi nt}{T}\right)$$

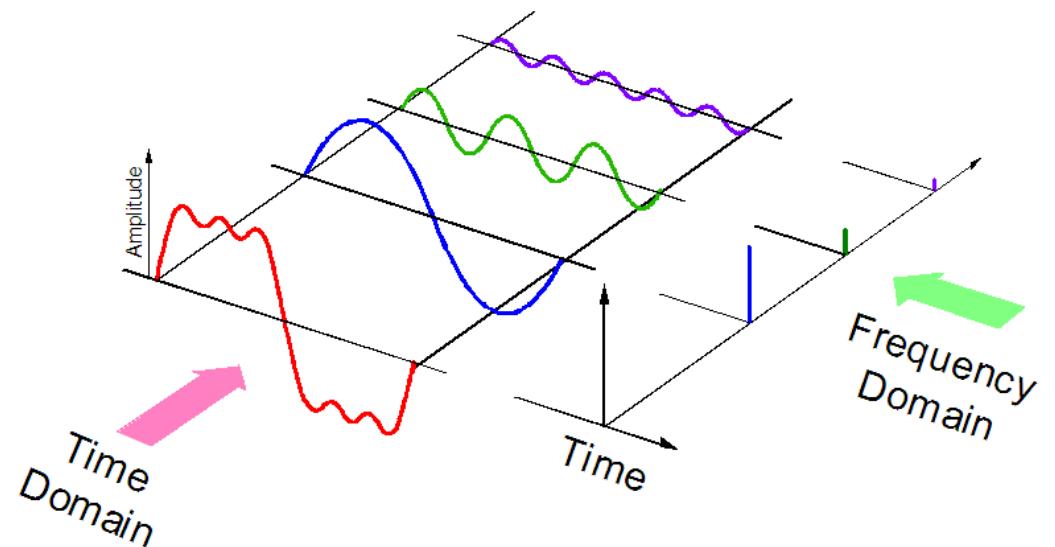
# Generelle ac-signaler og sinussignaler

- Eksempel: Signal som sum av de 4 grunnfrekvensene harmoniske



# Frekvens vs tid

- AC-signaler har tre «dimensjoner»:
  - Amplitude
  - Tid
  - Frekvens

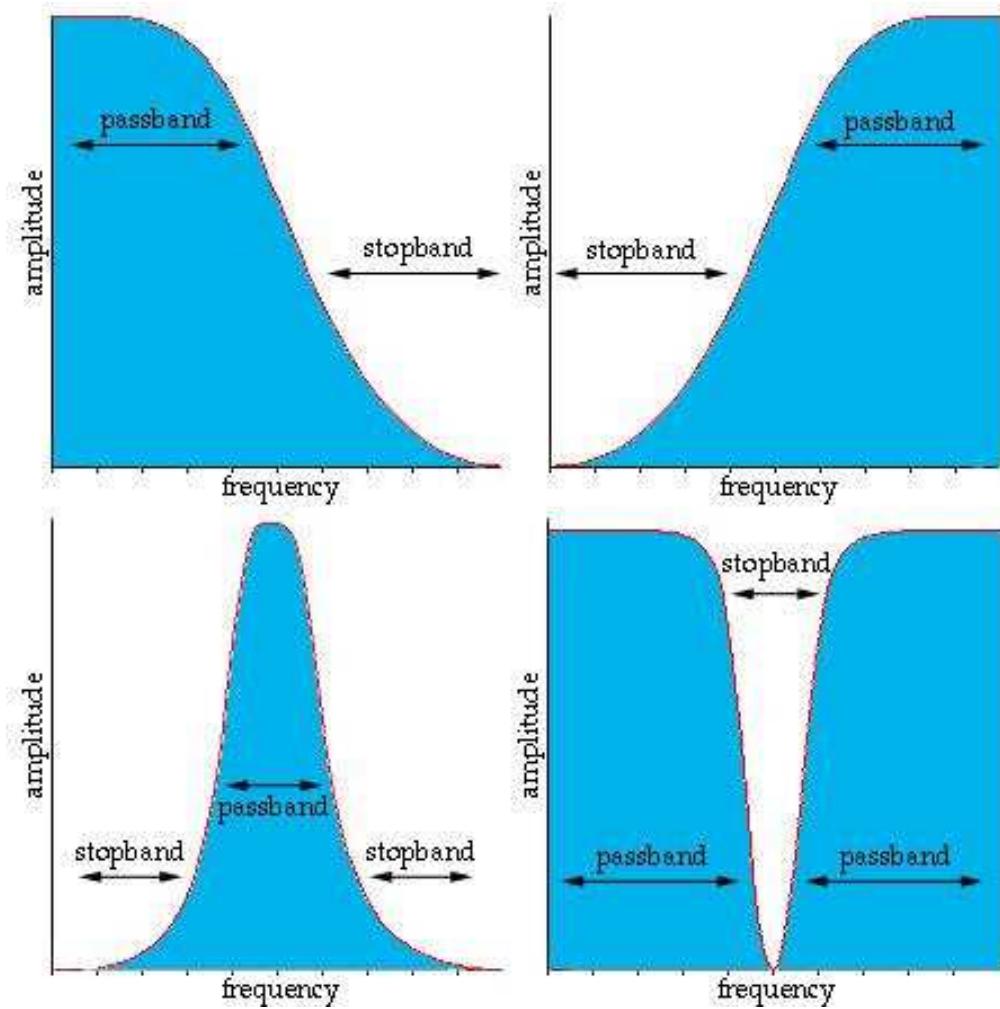
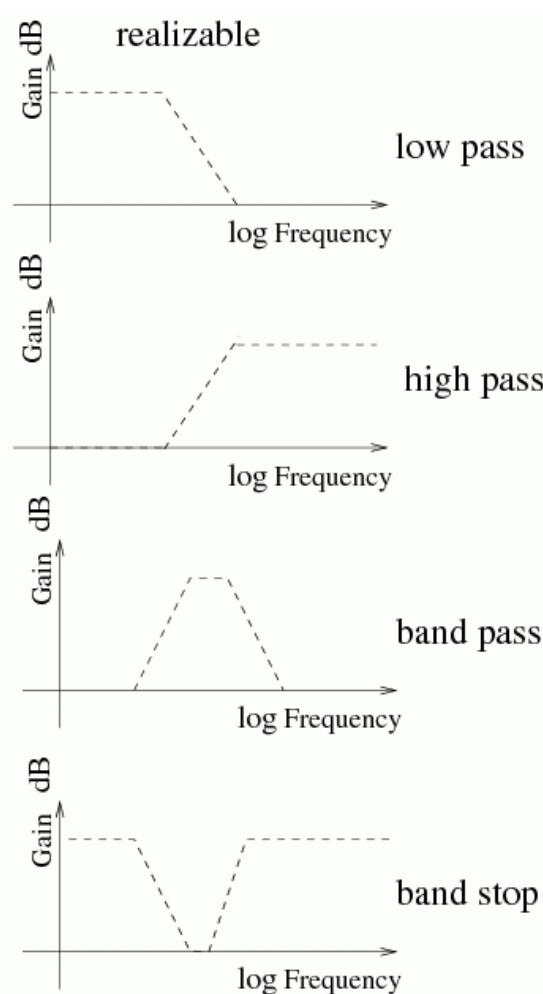
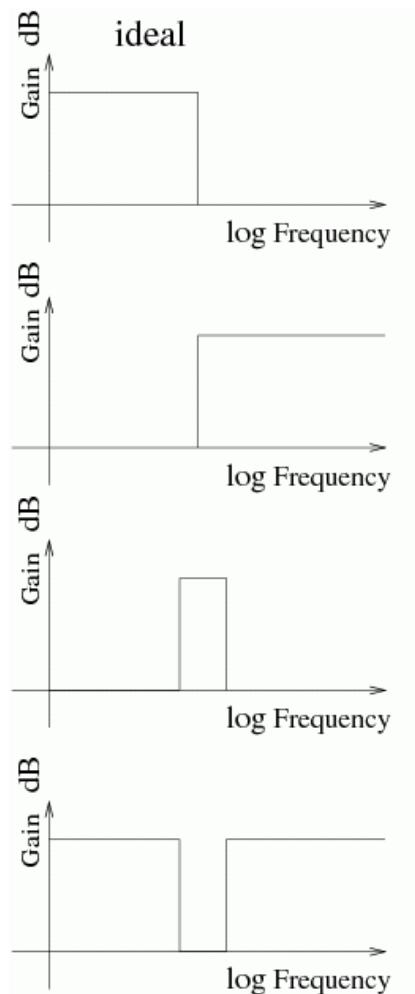


# Filtre

- Filtre fjerner signaler med bestemt frekvenser:
  - *Høypassfiltre* stopper lave frekvenser og slipper gjennom høye
  - *Lavpassfiltre* slipper gjennom lave frekvenser og stopper høye
  - *Båndpassfiltre* slipper igjennom frekvenser i et bestemt område og stopper frekvenser utenfor dette området
  - *Båndstoppfiltre* stopper frekvenser innenfor et bestemt område og slipper gjennom frekvenser utenfor dette området

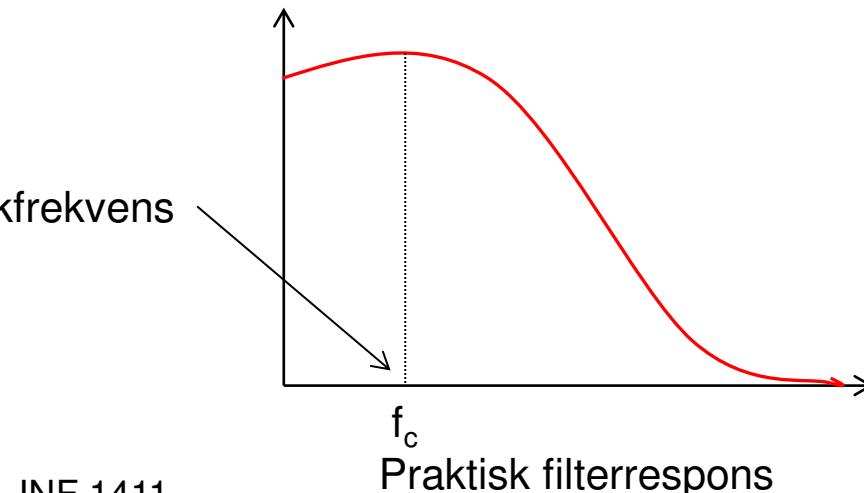
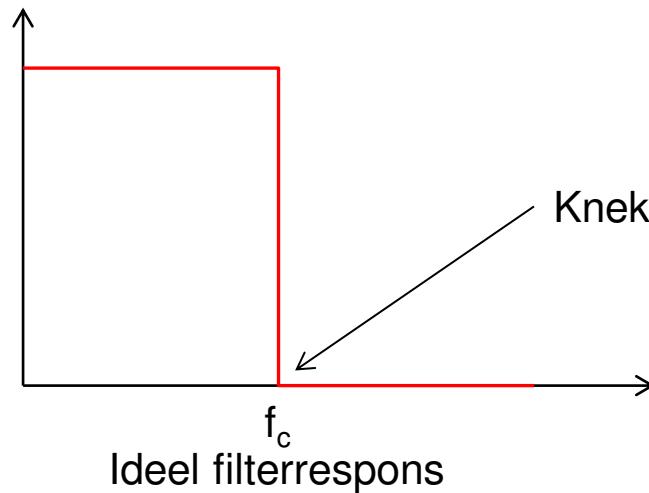


# Filterkarakteristikker



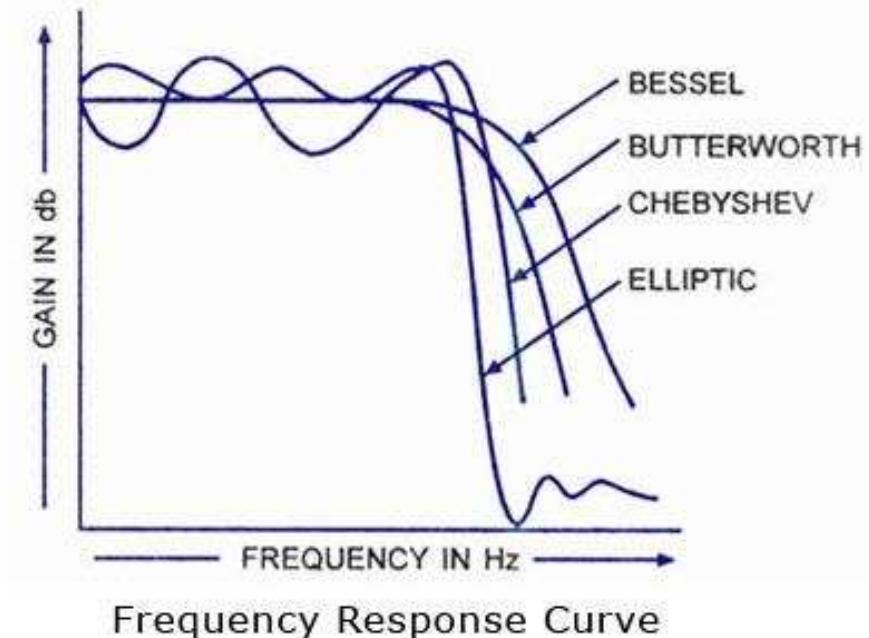
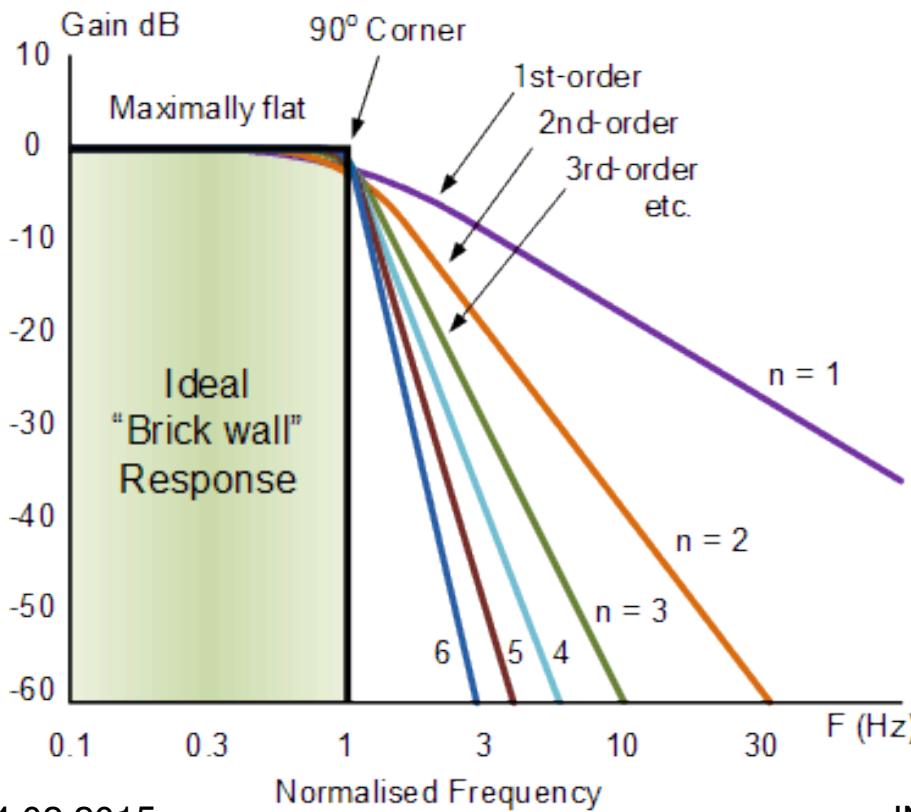
# Knekkfrekvens

- Knekkfrekvensen («cutoff») er frekvensen hvor filteret begynner å slippe igjennom eller stoppe signaler
- Ideelle filtre slipper gjennom signaler i passområdet *uten demping*, og *stopper fullstendig* signaler utenfor
- I praksis dempes signaler i passområdet, og stoppes ikke helt i stoppområdet



# Ulike filtre og filterkarakteristikker

- Filtre finnes i mange typer med ulike navn
  - Filterets orden angir hvor raskt filteret demper

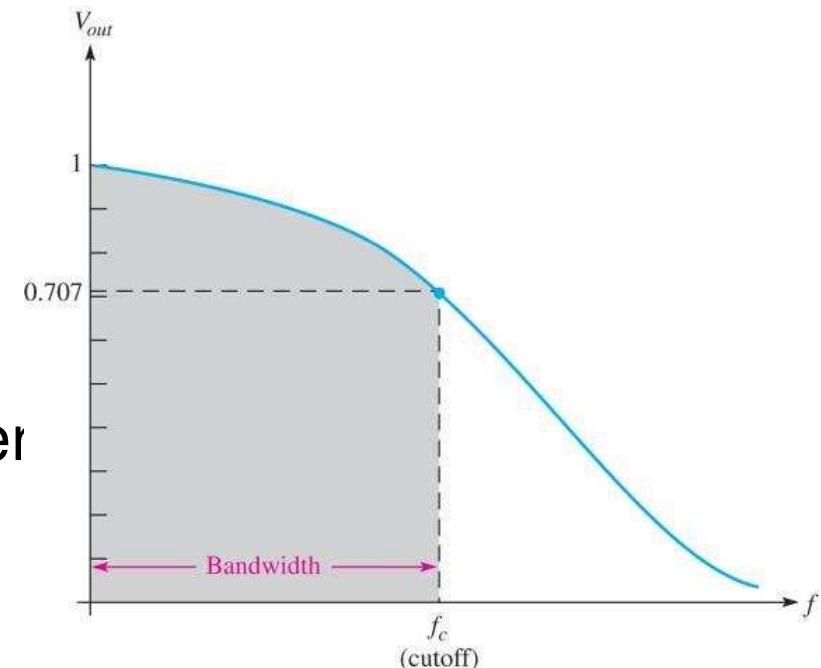


# Knekkfrekvens og båndbredde

- Knekkfrekvensen til et RC-filter er den frekvensen hvor resistiv og kapasitiv reaktans er like store:

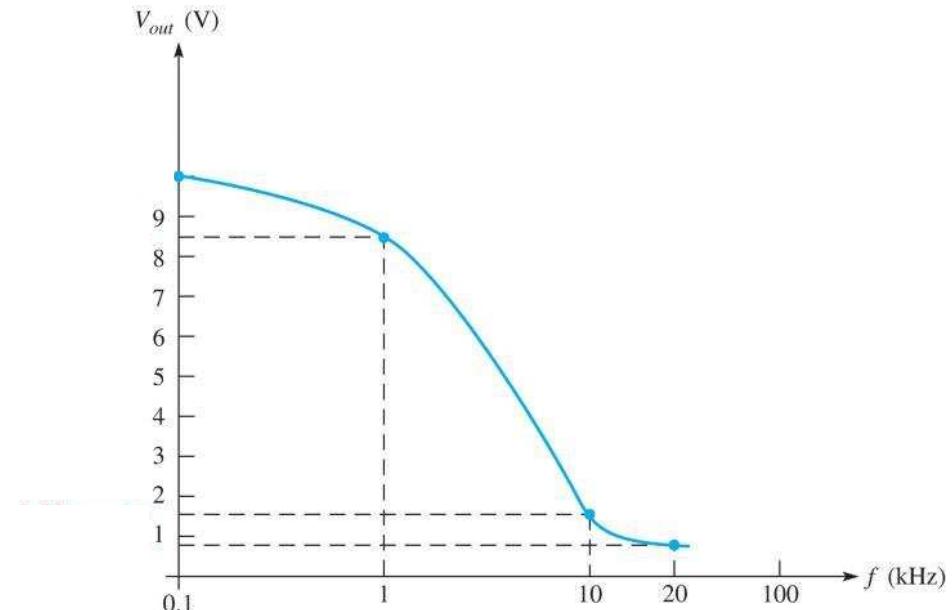
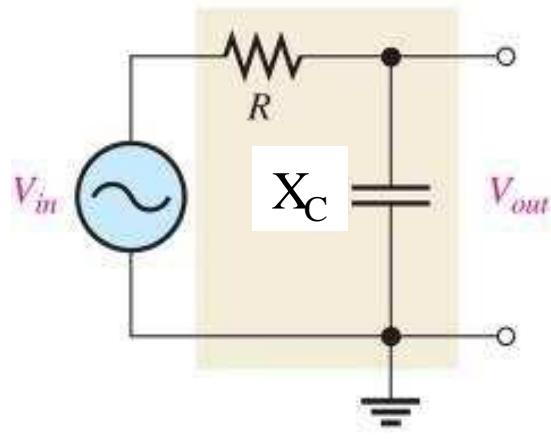
$$R = \frac{1}{2\pi f_c C} \Leftrightarrow f_c = \frac{1}{2\pi R C}$$

- Ved knekkfrekvensen er dempningen  $3dB$  og  $V_{out} = \frac{V_{in}}{\sqrt{2}}$
- Båndbredden er området av frekvenser igjennom filteret



# Lavpassfilter med RC-ledd

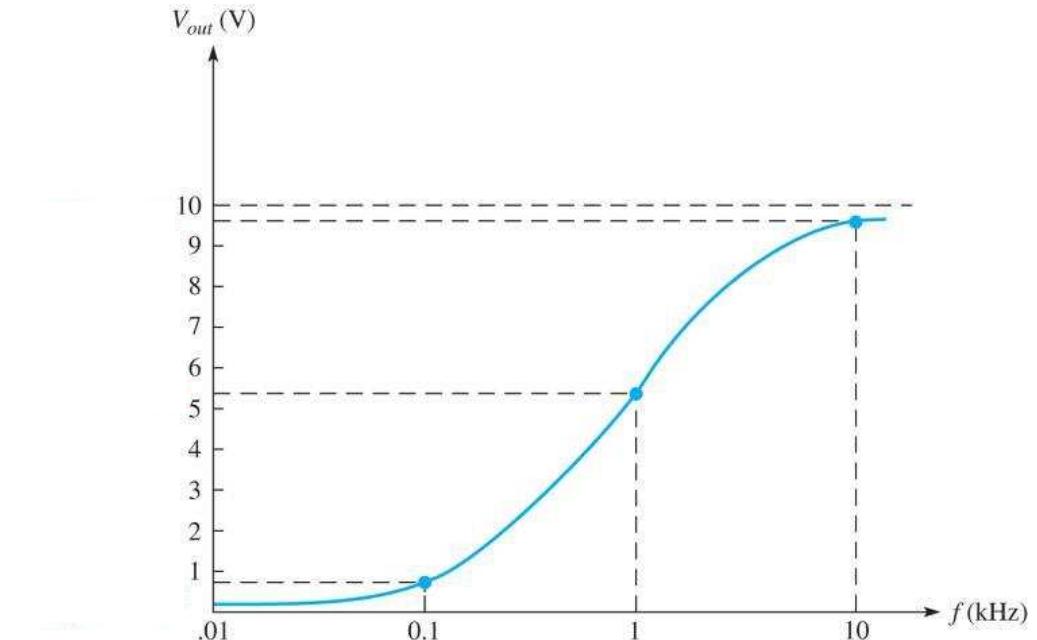
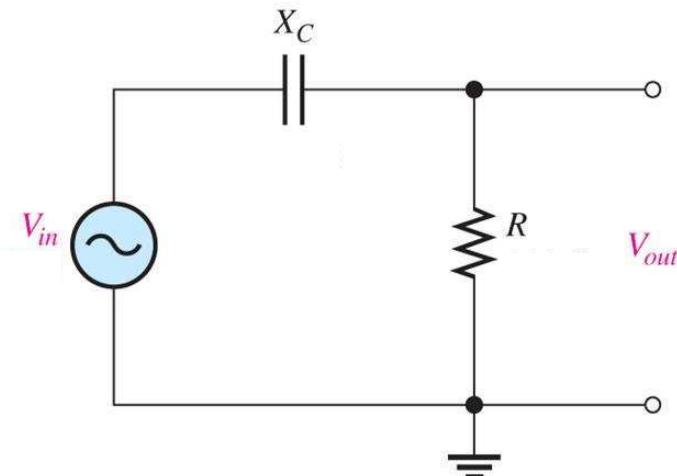
- RC «lag»-kretsen kan også benyttes som et lavpassfilter



Merk den logaritmiske skalaen på den horisontale aksen

# Høypasspassfilter med RC-ledd

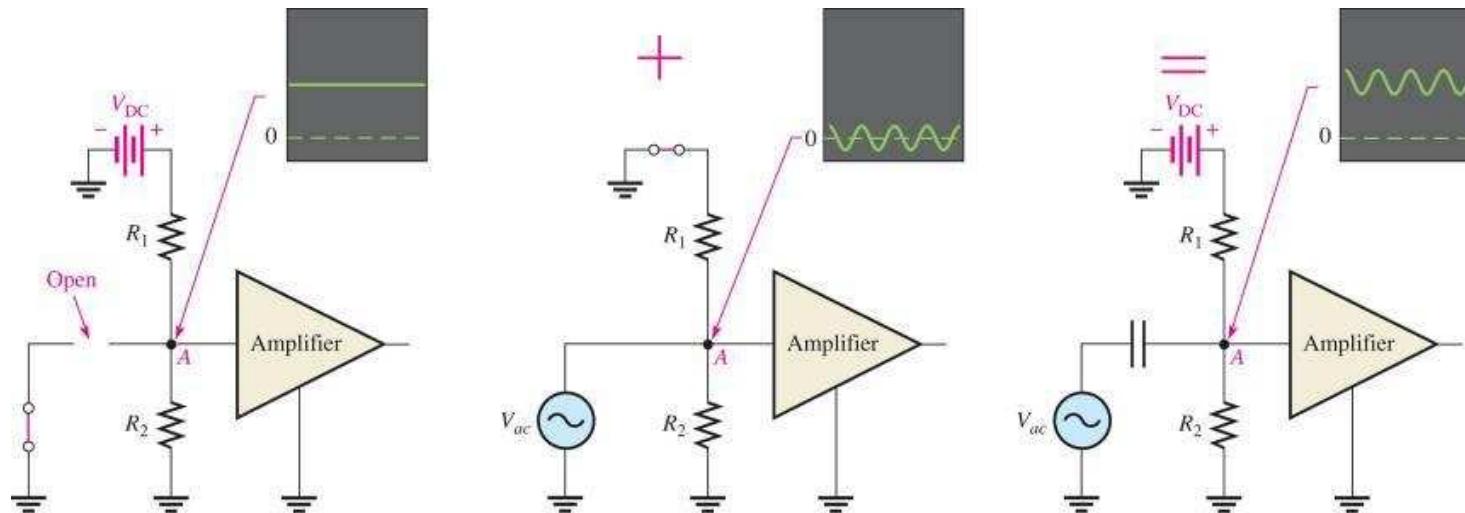
- RC «lead»-kretsen kan også benyttes som et høypassfilter



Merk den logaritmiske skalaen på den horisontale aksen

# AC-kopling med DC-bias

- I noen kretser må man isolere et AC (input)signal fra resten av kretsen, og samtidig legge til et DC-offset

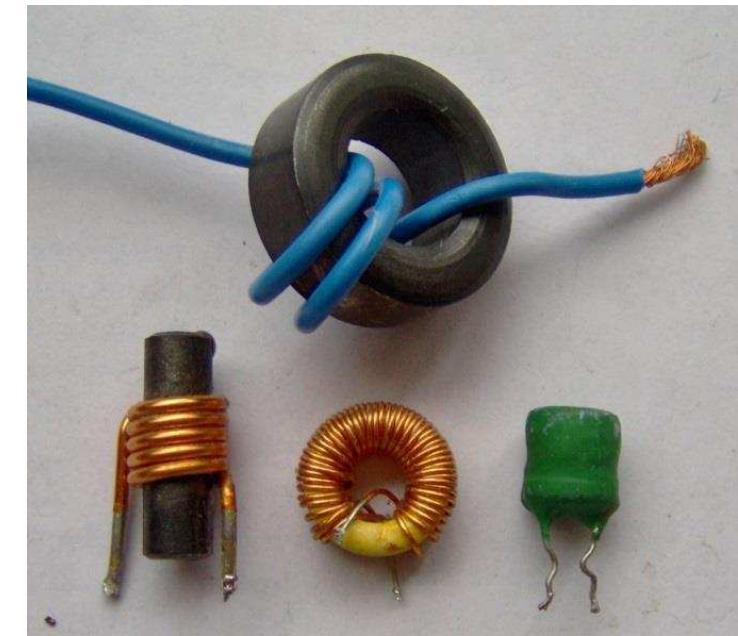
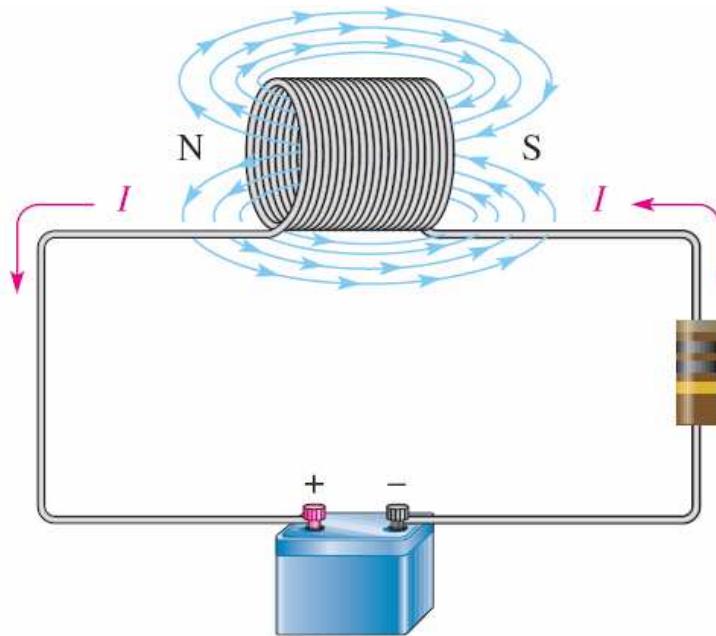


# Spørsmål

- Hva er faseforskyvning?
- Hvilke to deler består impedansen til en RC-krets av?
- Hva er faseforskyvningen mellom spenningen over og strømmen gjennom en kondensator?
- Hvor stor er faseforskyvingen mellom kondensatorspenningen og kildespenningen i en RC-krets?
- Hva er uttrykket for reaktansen til en ideel kondensator?
- Hva er uttrykket for reaktansen til en praktisk kondensator?
- Hva er båndbredden til et filter?
- Hva er knekksfrekvensen til et filter?

# Induktører

- En induktor (spole) består av en isolert elektrisk ledersurret rundt en metallkjern eller et ikke-magnetisk materiale



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

# Induktører (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
- Den induserte spenningen er proporsjonal med *endringen* i strømmen

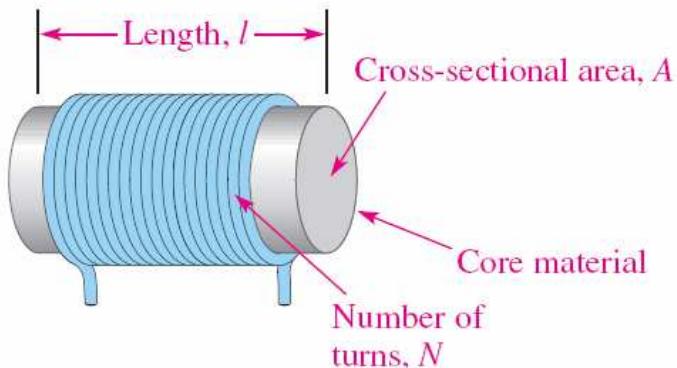
$$v = L \frac{di}{dt}$$

- Ved likespenning vil en spole ha null induktiv impedans, mens den øker med økende frekvens

# Induktører (forts)

- L (måles i *Henry*) kalles for *induktans* og uttrykker spolens evne til å indusere spenning strømmen gjennom spolen endrer seg
- Merk likheten mellom L og C, og forskjellen til R

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

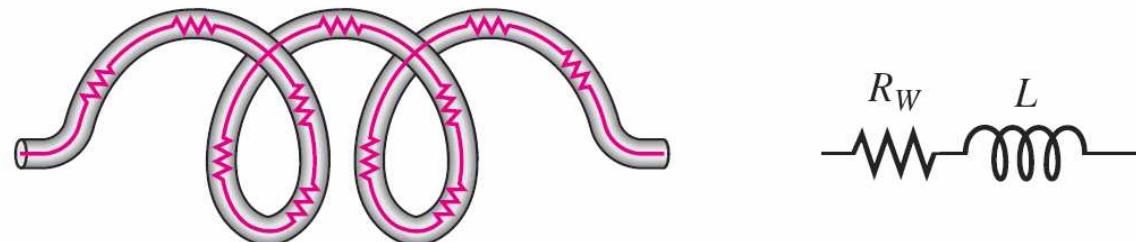


## Induktører (forts)

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

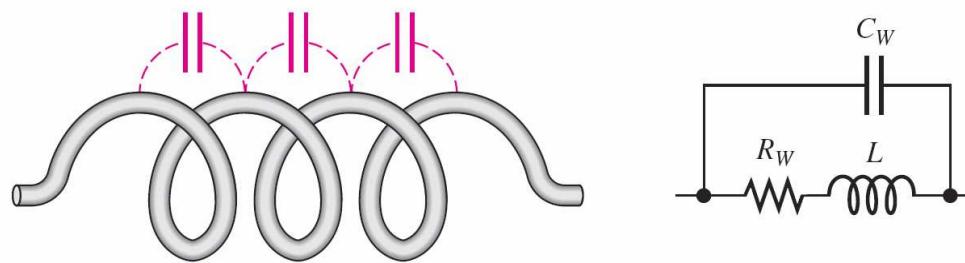
$$X_L = 2\pi f L$$

- Spoler har i tillegg resistans som kalles viklingsresistans  $R_w$  og skyldes at lederen har ohmsk motstand



# Induktører (forts)

- Spoler har i tillegg parasittkapasitans

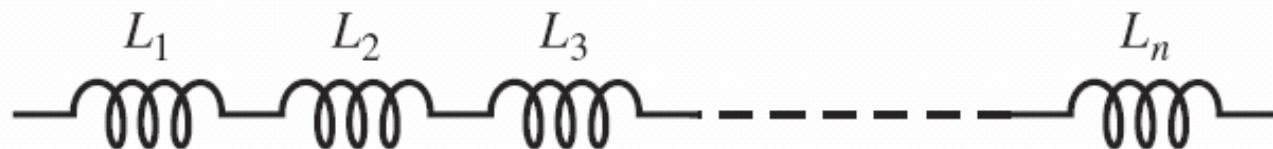


- Grunnet parasittkapasitans og -resistans, og fysisk størrelse, er spoler mindre brukt enn kondensatorer

# Spoler i serie

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

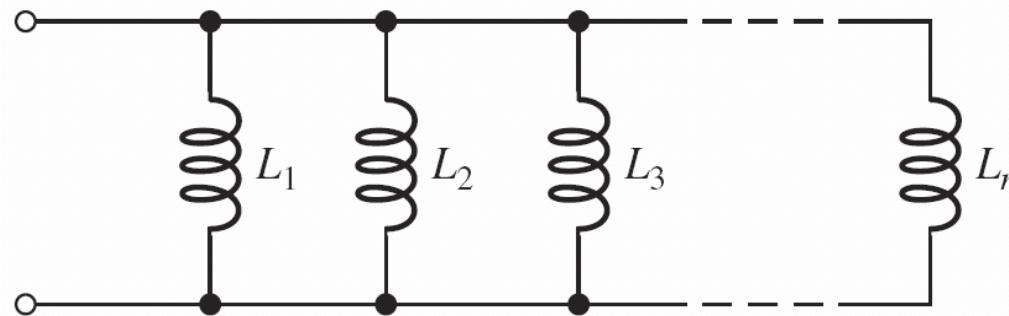
$$L_T = L_1 + L_2 + \cdots + L_n$$



# Spoler i parallel

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

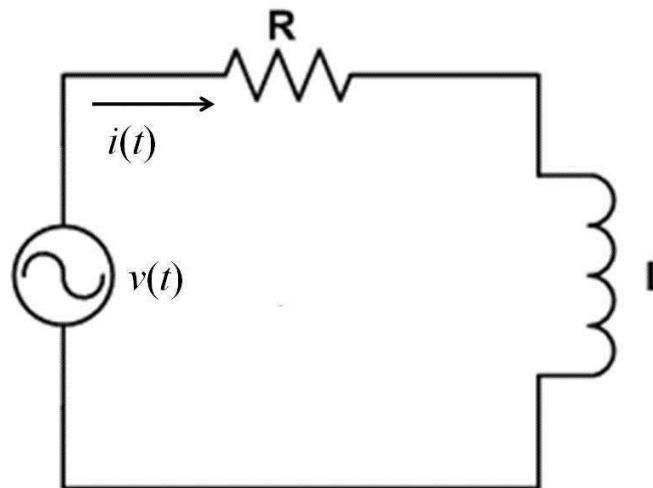
$$\frac{1}{L_T} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \dots + \frac{1}{L_n}$$



# Tidskonstant i RL-kretser

- RL-tidskonstanten er forholdet mellom induktansen og resistansen, dvs

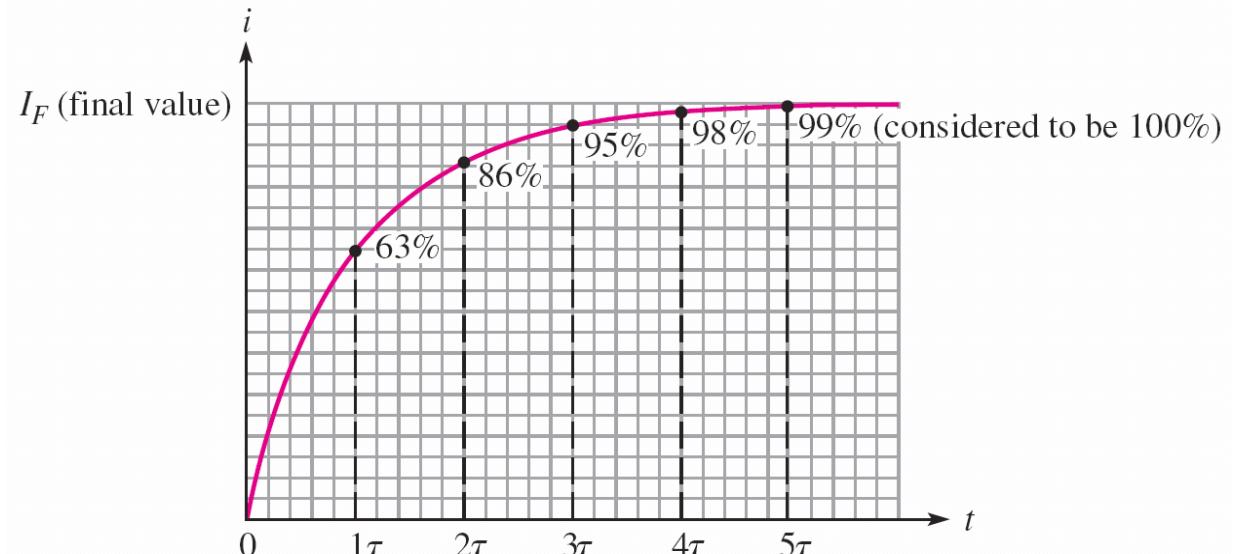
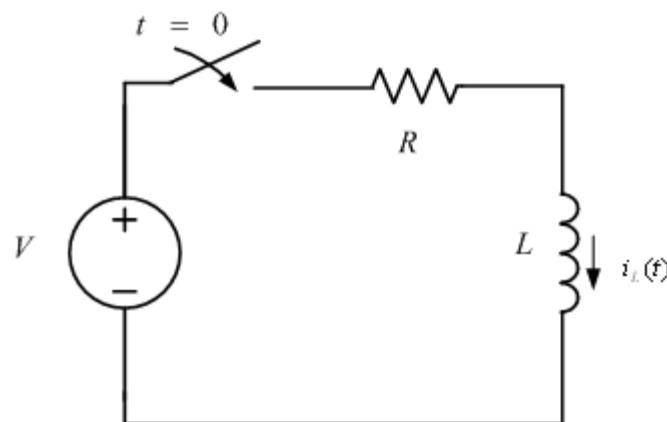
$$\tau = \frac{L}{R}$$



- Tidskonstanten angir hvor fort strømmen kan endre seg i en spole: Jo større induktans, desto lengre tid tar det å endre strømmen

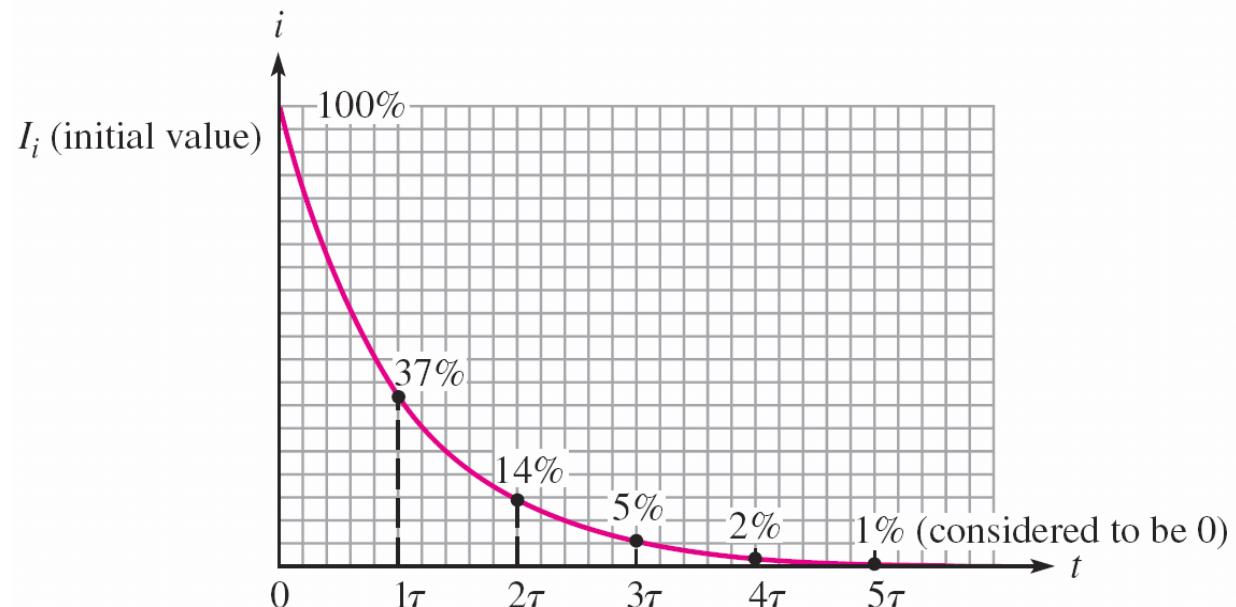
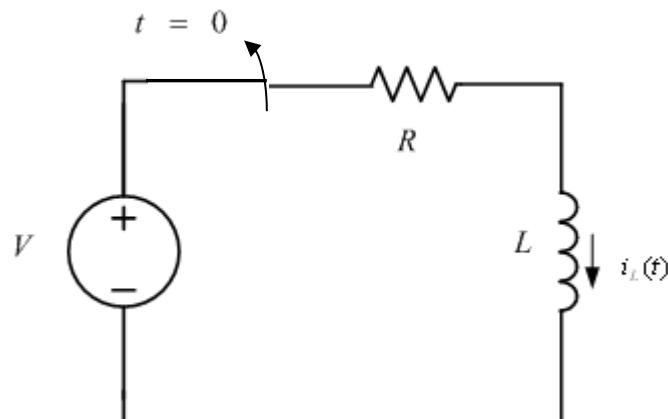
# Strøm i RL-kretser

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



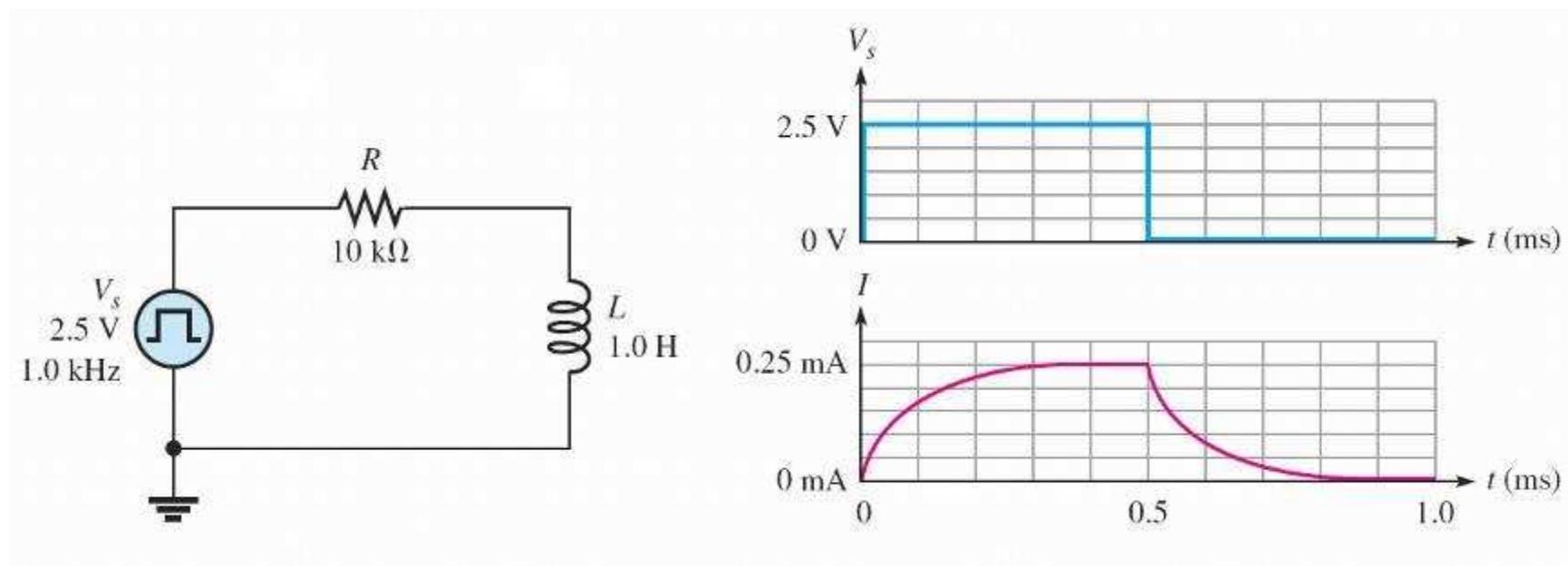
## Strøm i RL-kretser (forts)

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



# Respons på en firkantpuls

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

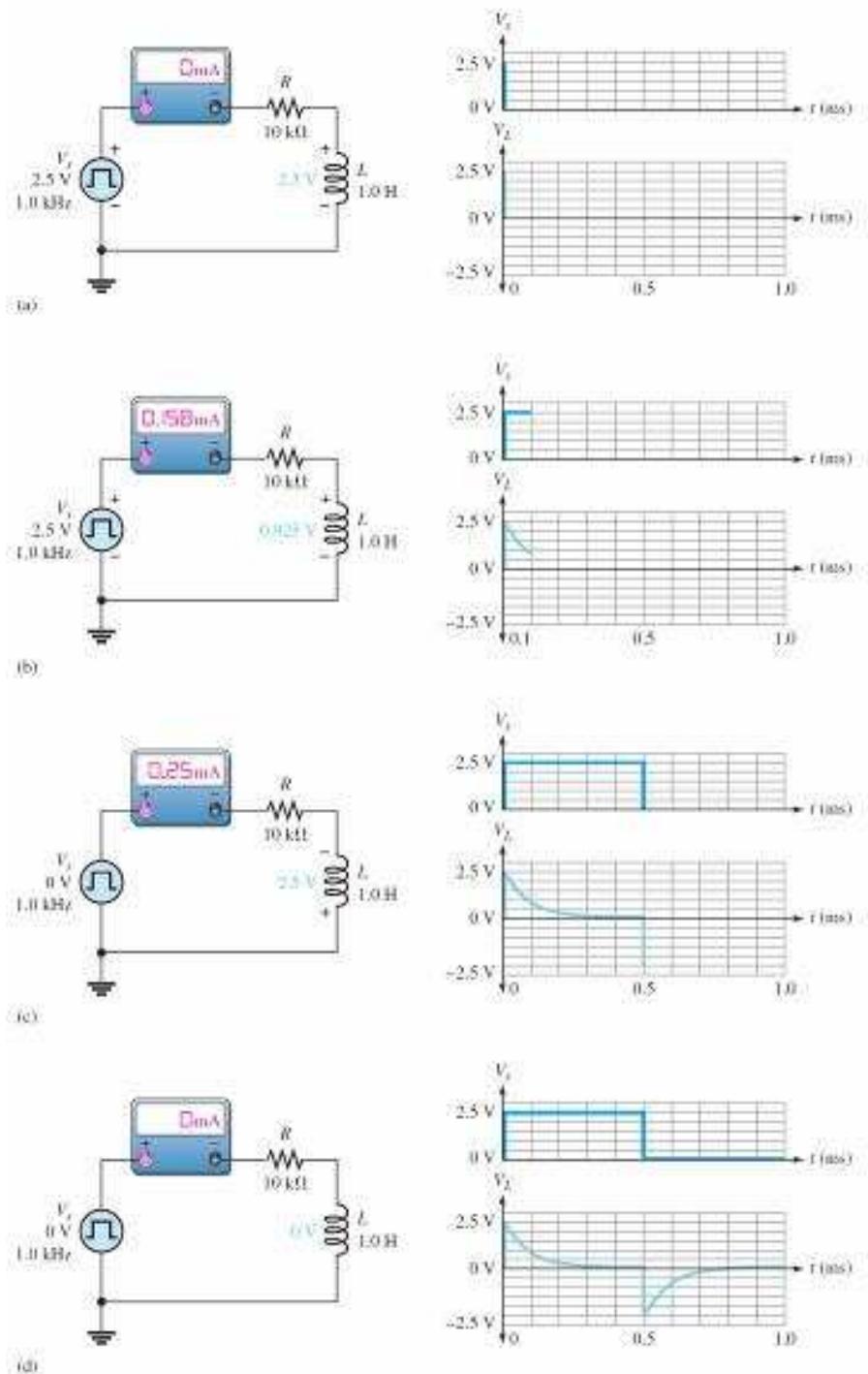


# Spørsmål

- Har en spole større eller mindre motstand mot elektrisk strøm når frekvensen øker
- Hva kalles reaktansen i en spole?
- Hvilken polaritet i forhold til strømmen har spenningen som induseres av magntfeltet i en spole?
- Hva er en parasitteffekt?
- Hvilke to typer parasitteffekter har man i en spole?
- Hvorfor er spoler mindre brukt enn kondensatorer?
- Hva er uttrykket for induktansen til spoler i serie?
- Hva er uttrykket for induktansen til spoler i parallel?

# Spenninger i RL-kretser

- Spenningene i en seriell RL-krets er ikke proporsjonale med strømmen pga indusert spenning
- Figuren viser forløpet til spenningen over en spole når kilden er en firkantpuls



## Tidsforløpet til V og I i en RL-krets

- På samme måte som for en kondensator er strømmene og spenningene i en spole en eksponensielle:

$$v = V_F + (V_i - V_F) e^{-\frac{R}{L}t}$$

$$i = I_F + (I_i - I_F) e^{-\frac{R}{L}t}$$

der indeksen  $i$  angir startverdi og  $F$  angir sluttverdi

# Bruk av spoler i AC-kretser

- . På samme måte som for RC-kretser har impedansen i en RL-krets en *resistiv* og en *reakтив* del
- . Reaktansen kalles induktiv og er gitt av formelen

$$X_L = 2\pi fL$$

- . Ohms lov gjelder også i kretser med spoler, slik at reaktansen til spoler i serie er gitt av

$$X_{L(tot)} = X_{L1} + X_{L2} + \dots + X_{Ln}$$

# Bruk av spoler i AC-kretser (forts)

- Reaktansen til parallelkoblede spoler er gitt av

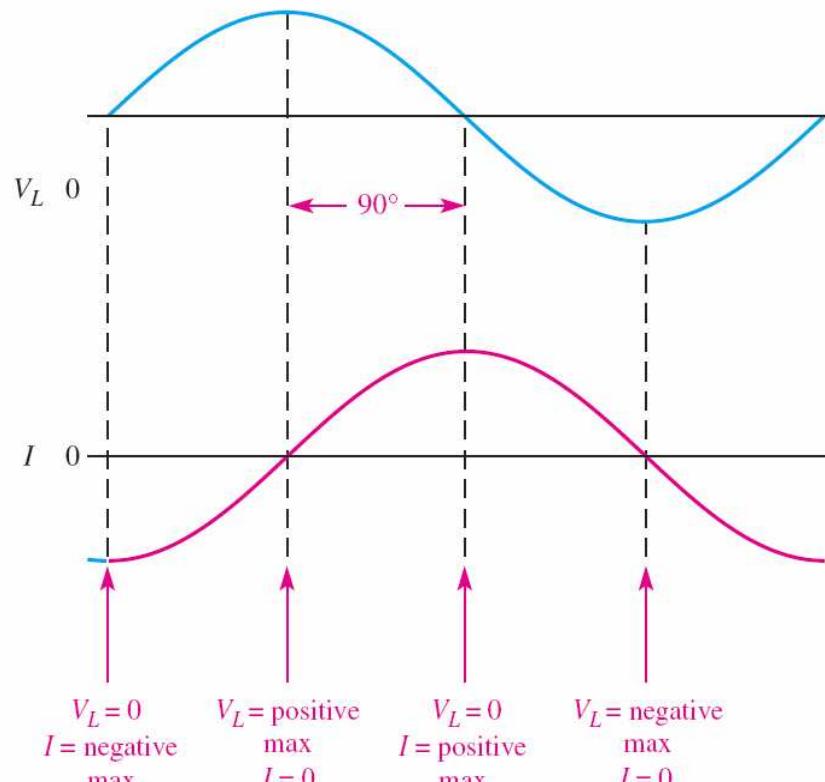
$$X_{L(tot)} = \frac{1}{\frac{1}{X_{L1}} + \frac{1}{X_{L2}} + \cdots + \frac{1}{X_{Ln}}}$$

- Sammenhengen mellom induktiv reaktans, strøm og spenning i en spole er gitt av

$$V = IX_L$$

# Faseforskyvning mellom I og V

- I en spole er strøm og spenning faseforskjøvet  $90^0$  slik at strømmen ligger *etter* spenningen:



# Anvendelse av spoler

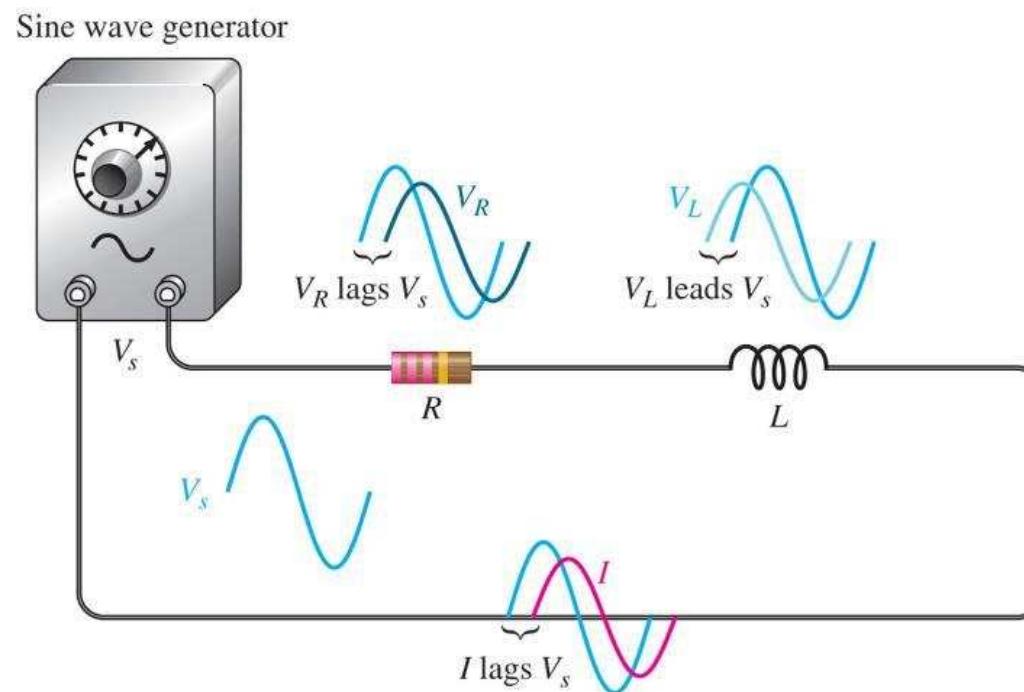
- . Spoler brukes mindre enn kondensatorer, men svært nyttige i noen anvendelser:
  - .Fjerning av uønskede høyfrekvenssignaler i lange ledere
  - .Aktive og passive filtre
  - .Frekvenstuning i trådløs kommunikasjon (oscillatører og syntesisere)
- . Teori rundt spoler og induksjon er viktige i design av trådløs kommunikasjon
- . Induktiv reaktans må kontrolleres i alle elektroniske systemer
  - . Setter begrensinger på bla max lengde på ledere (labøvelse 4)

# Spørsmål

- Har seriekoblede spoler større eller mindre induktans enn induktansen til den største spolen?
- Har parallelkoblede spoler større eller mindre induktiv reaktans enn den minste spolen?
- Har identiske seriekoblede spoler større eller mindre kapasitiv reaktans enn en enkelt spole?
- Er strømmen faseforskjøvet  $+90^\circ$  eller  $-90^\circ$  i forhold til spenningen over en spole?
- Når er spenningsfallet over en spole størst (når strømmen er sinusformet)?

# Sinusrespons i en RL-krets

- I en RL-krets hvor spenningskilden er et sinussignal vil spenningene ha følgende relative faser

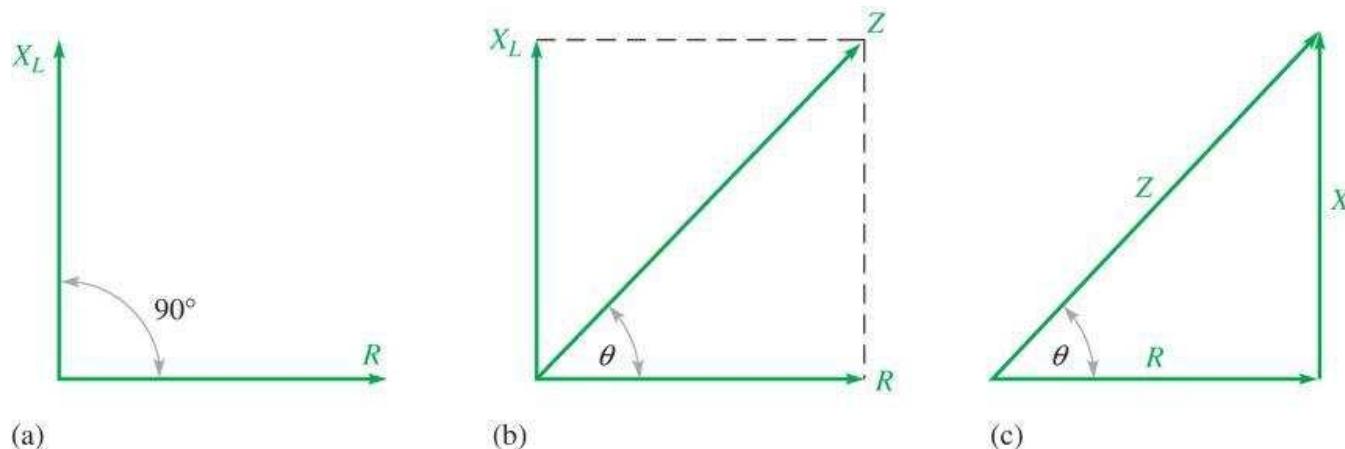


## Impedans og fasevinkel i seriell RL-krets

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

# Impedans og fasenvinkel i seriell RL-krets (forts)

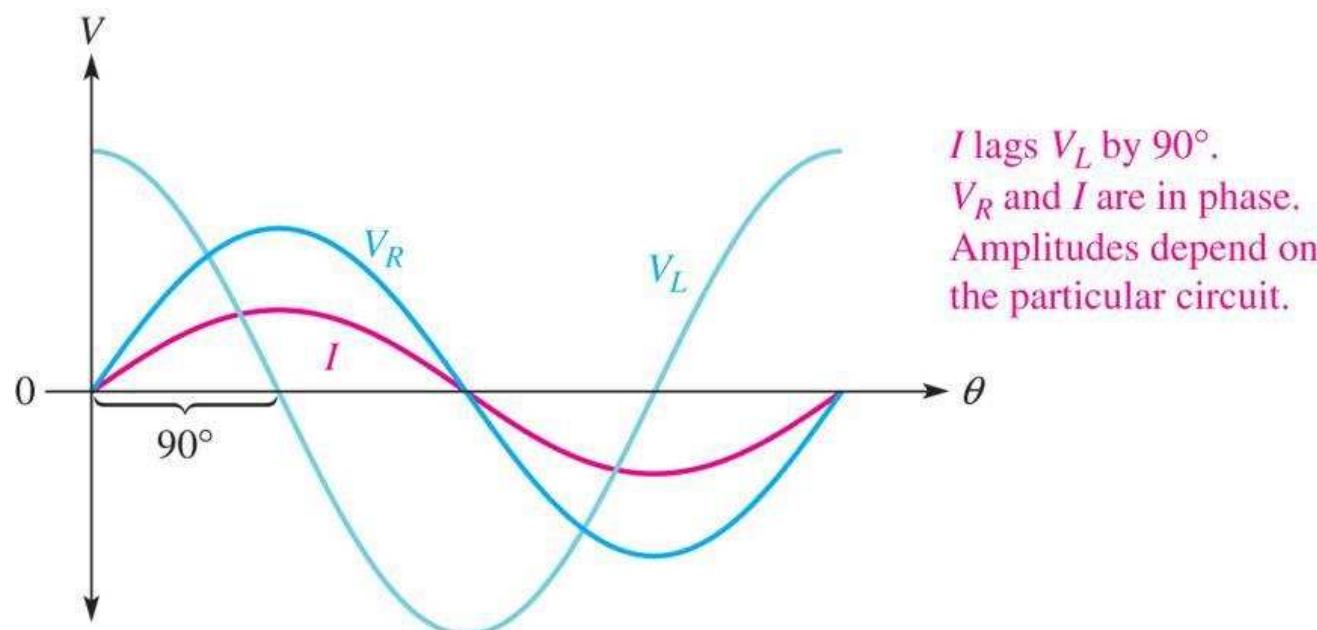
- Den totale impedansen består en en resistiv og en induktiv reaktiv del som er 90 grader i forhold til hverandre



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

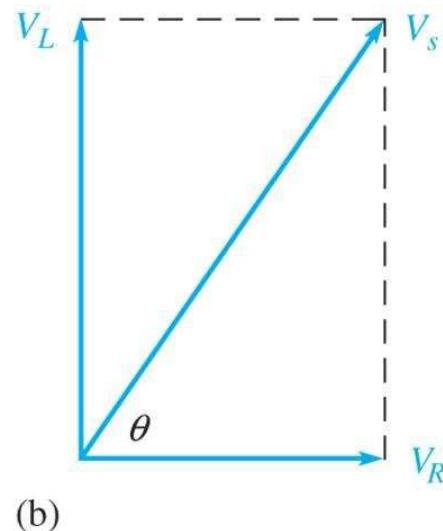
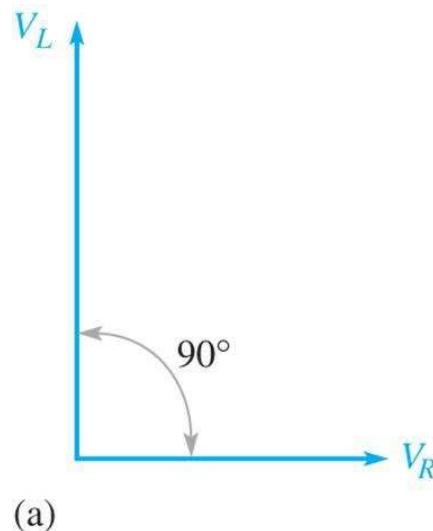
# Fasedreining mellom strøm og spenning

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



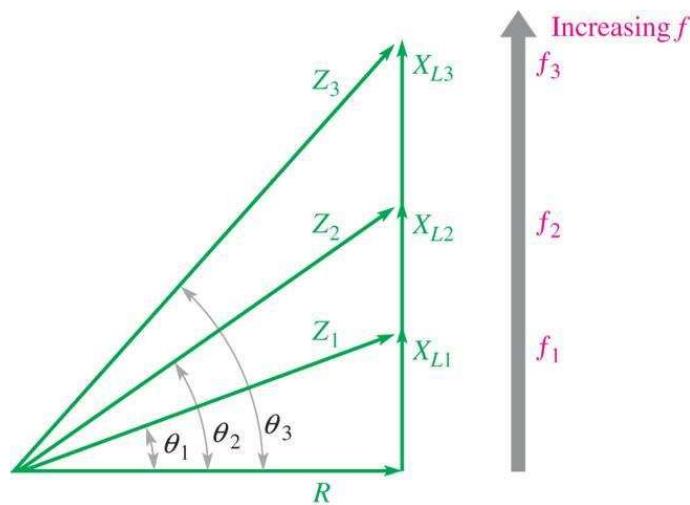
# Fasedreining mellom strøm og spenning (forts)

- 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



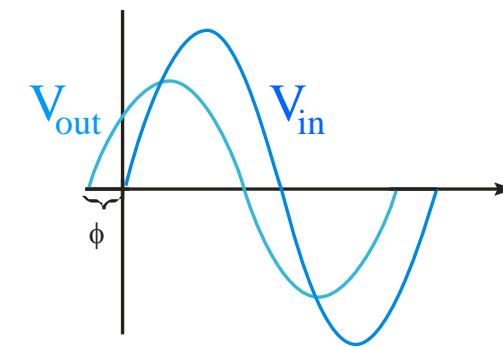
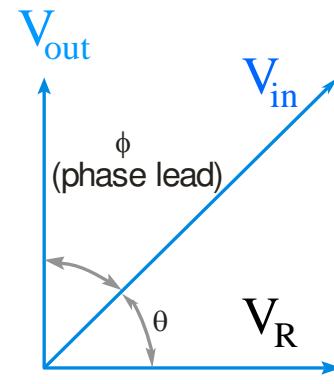
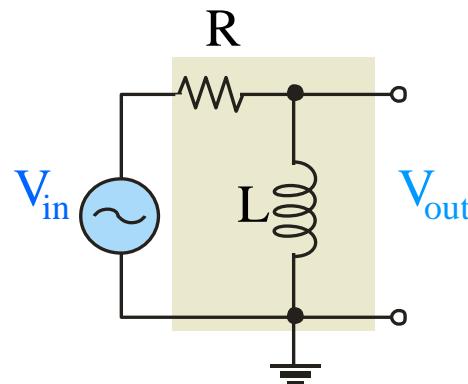
- Den induktive reaktansen øker med økende frekvens, mens fasevinkelen nærmer seg  $90^\circ$

## Spørsmål

- Finnes det RL-kretser hvor fasevinkelen mellom strøm og forsyningsspenning er  $\theta=90^\circ$ ?
- Hva er den maksimale fasevinkelen mellom strøm og spenning i en krets med bare en praktisk (fysisk) spole?
- Er det mulig å ha en seriell krets med en spole og en resistor hvor impedansen er rent resistiv? Hva er forutsetningen?
- Hvis resistiviteten og den induktive kapasitansen er like store, hvor mange grader etter forsyningsspenningen vil strømmen gjennom kilden ligge?

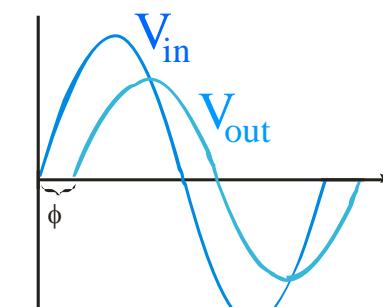
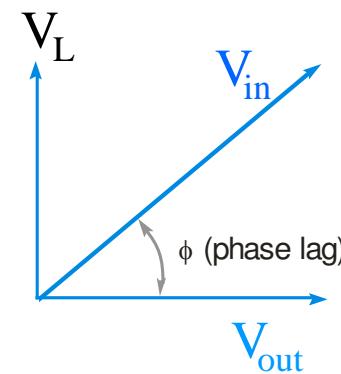
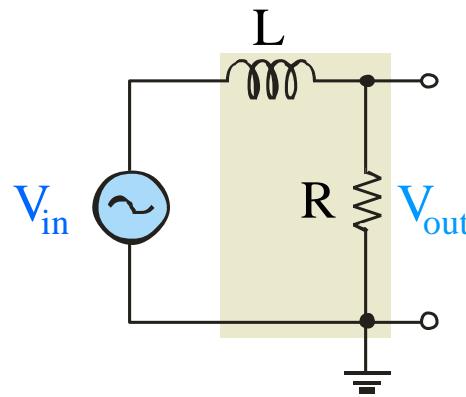
# RL lead-krets

- Tilsvarende som for RC-kretser kan man lage serielle RL kretser med en resistor og en spole, og hvor man tar ut spenningen enten over spolen eller resistoren
- I en RL lead-krets er det en positiv faseforskyvning mellom utgangs- og inngangsspenningen, dvs at utgangen leder over inngangen



# RL lag-krets

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



## 3. obligatoriske labøvelse

- Formål
  - Lære litt om bruk av LTSpice (simuleringsverktøy for kretser)
  - Forstå frekvensrespons og Bodeplott
  - Lære om 1.ordens filtre med R, C og L
  - Forstå hvordan parasitteffekter påvirker design
- Innhold
  - Simulere 1.ordens filtre (høypass og lavpass RL- og RC-filtre)
  - Simulere virkningen av lengde på tilkoblinger til en chip
  - Beregne hvilke begrensninger parasitteffekter kan sette
- Innlevering senest fredag **13.mars kl 23.59**

# Oppsummeringsspørsmål

- Spørsmål fra forelesningene 5 og 6

# Spørsmål 1

## Admittans

- a) Frekvensavhengig ledningsevne
- b) Frekvensuavhengig ledningsevne
- c) Ledningsevne i en kondensator
- d) Ledningsenvne i en induktor

## Spørsmål 2

Strømmen gjennom en kondensator er minst når

- a) Spenningen over den er 0
- b) Spenningen over den er på sitt maksimale eller minimale
- c) Spenningen er forskjøvet 45 grader i forhold til spenningskilden
- d) Spenningen er forskjøvet -45 grader i forhold til spenningskilden

## Spørsmål 3

Tidskonstanten  $\tau = RC$  i en RC-krets sier

- a) Hvor lang tid det tar å lade opp kondensatoren fra 0V til maksimal spenning
- b) Hvor lang tid det tar å lade ut kondensatoren fra maksimal spenning til 0V
- c) Hvor lang tid det tar før spenningen over kondensatoren øker fra 0V til ca 37% av maksimal spenning
- d) Hvor lang tid det før spenningen over kondensatoren øker fra 0V til ca 63% av maksimal spenning

## Spørsmål 4

En spole har parasitteffekter som kan modelleres med

- a) En resistor i serie
- b) En kondensator i parallel
- c) En kondensator i serie med spolen og deretter en resistor i parallel med spolen og kondensatoren
- d) En resistor i serie med spolen og deretter en kondensator i parallel med spolen og resistoren

## Spørsmål 5

Hvis frekvensen nærmer seg uendelig, hva skjer med den totale impedansen i en RC-krets?

- a) Den blir lik 0
- b) Den blir uendelig stor
- c) Den blir rent resistiv
- d) Den blir rent kapasitiv

## Spørsmål 6

Knekkfrekvensen til et filter sier noe om

- a) Hvor filteret begynner å forsterke
- b) Hvor filteret begynner å dempe
- c) Forskjell i dempning mellom ideelt og praktisk filter for en bestemt frekvens
- d) Senterfrekvensen til passbåndet

## Spørsmål 7

En ac-kobling kan brukes til å

- a) Skalere opp en ac-spenning
- b) Skalere ned en ac-spenning
- c) Legge til et dc-offset
- d) Fjerne en dc-komponent

## Spørsmål 8

Ved en likespenning vil en ideel spole ha

- a) Ingen motstand mot strøm
- b) Uendelig stor motstand mot strøm
- c) Litt motstand som skyldes parasittresistans
- d) Motstand som er proposjonal med induktansen

## Spørsmål 9

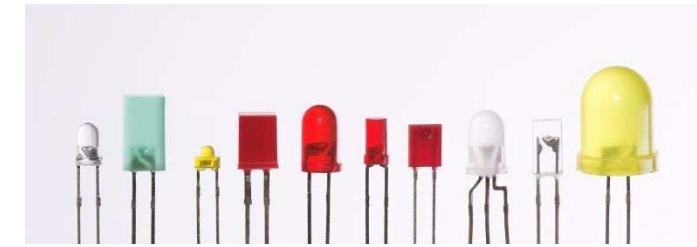
Spenningen (ved sinus) over en spole  
faller raskest når

- a) Strømmen er på sitt maksimale
- b) Strømmen er på sitt maksimale
- c) Strømmen er på sitt maksimale eller  
sitt minimale
- d) Strømmen er 0

## Spørsmål 10

Hvis frekvensen nærmer seg uendelig, hva skjer med den totale impedansen i en RL-krets?

- a) Den blir lik 0
- b) Den blir uendelig stor
- c) Den blir rent resistiv
- d) Den blir rent Induktiv



# Forelesning nr.7 INF 1411

## Elektroniske systemer

Tidsrespons til reaktive kretser  
Integrasjon og derivasjon med RC-krester



# Dagens temaer

- Tidsrespons til reaktive kretser
- RC-integrator/differensiator-respons til pulser og firkantbølger
- Dagens temaer er hentet fra kapittel 15.1-15.5, 15.8

# Ulike typer respons

- For reaktive kretser (kretser med resistorer spoler og/eller kondensatorer) skiller man på hvordan kretsene oppfører seg for ulike input-signaler.
- **Utsignalet** kalles for *respons* og **innsignalet** for *stimuli*



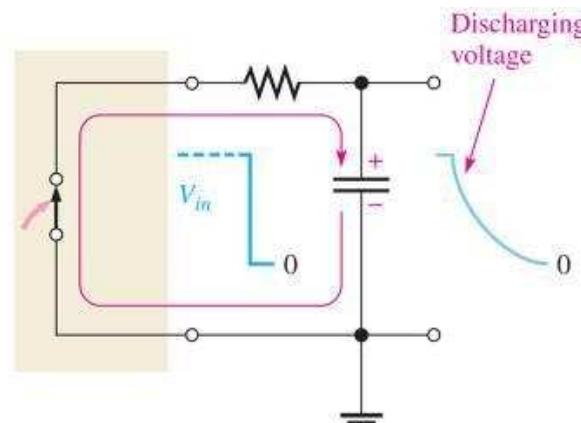
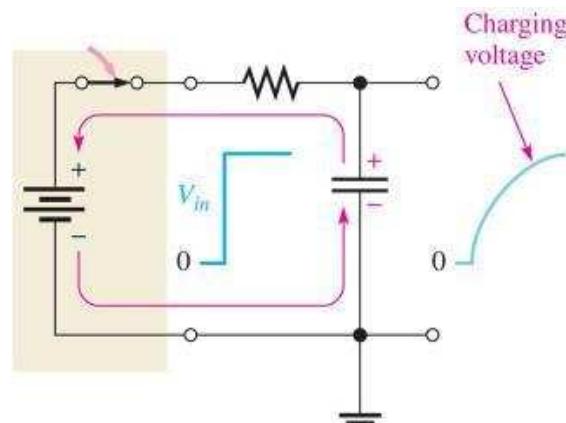
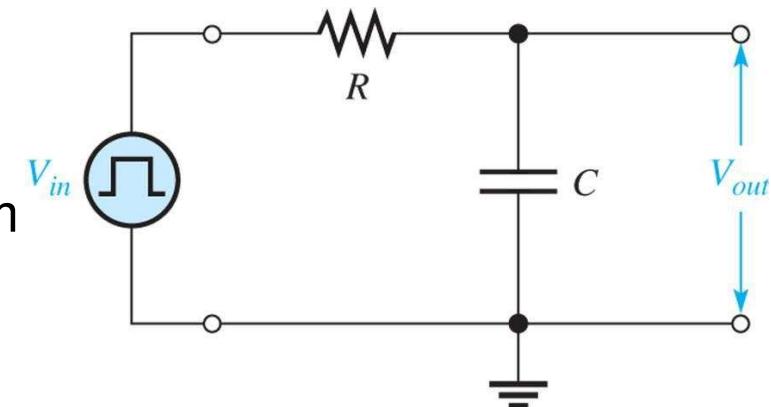
- Hvis innsignalet er sinussignaler snakker man om sinusrespons
- Hvis innsignalet er et digitalt signal snakker man om pulsrespons

# Integrasjon og derivasjon

- RC- og RL-kretser kan brukes til analog integrasjon og derivasjon i *tidsdomenet*
- I *frekvensdomenet* kan de brukes som høypass- og lavpassfiltre
- RL og RC-kretser kan også brukes som *forsinkelseskretser* i tidsdomenet

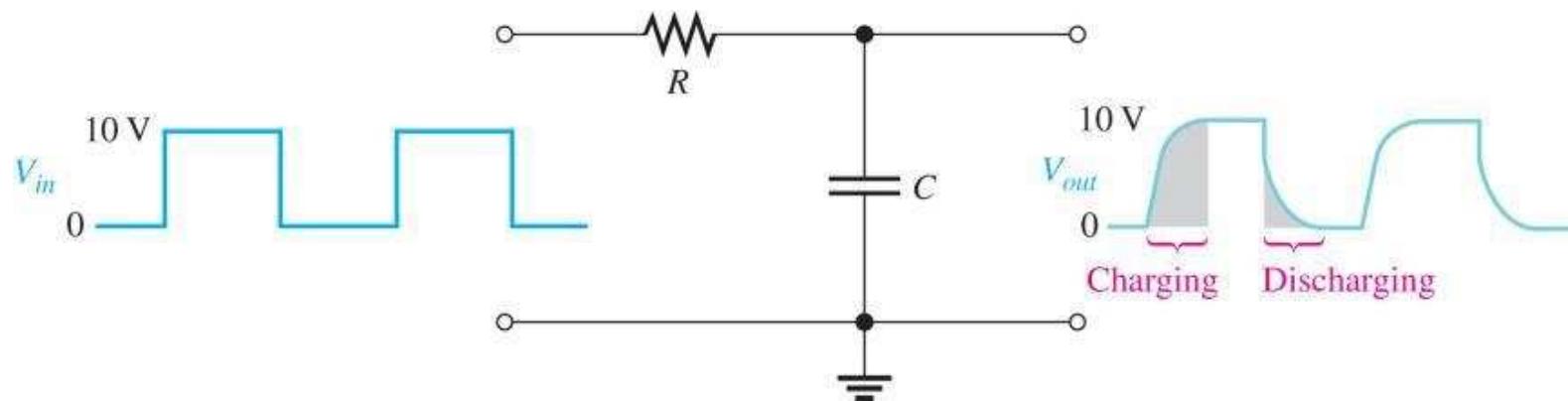
# Oppladning og utladning i RC-krets

- Med pulsgenerator som spenningskilde til en RC-krets vil kondensatoren lades opp og ut som om den kobles til/fra et batteri og lades ut/opp gjennom en resistor



# RC-integrator

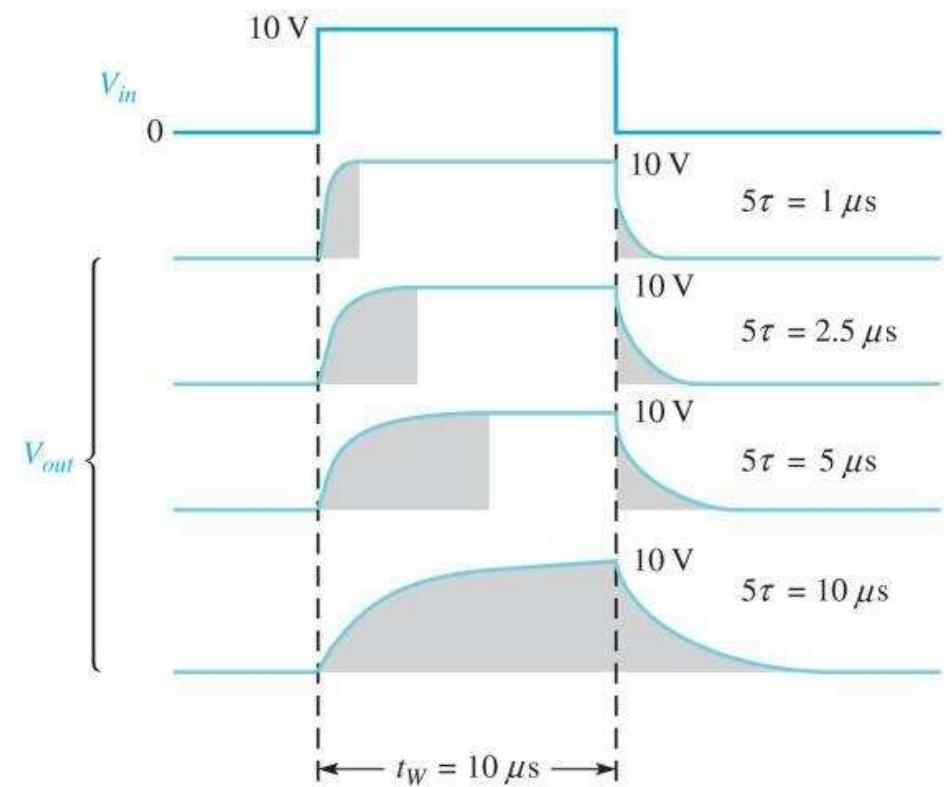
- I en RC-*integrator* brukes spenningen over kondensatoren som utgangsspenning



- Etter  $\tau = RC = 5$  har kretsen (nesten) enten nådd 10v eller 0v, avhengig av utgangspunktet. Denne tiden kalles også for *transienttiden*

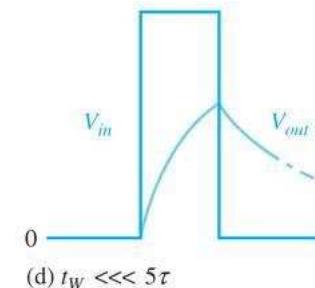
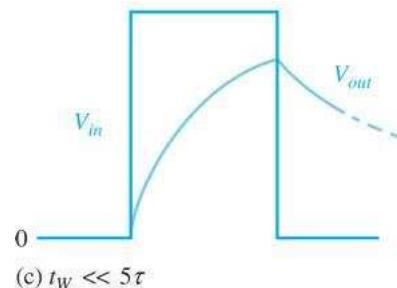
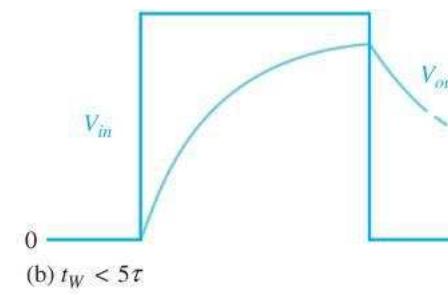
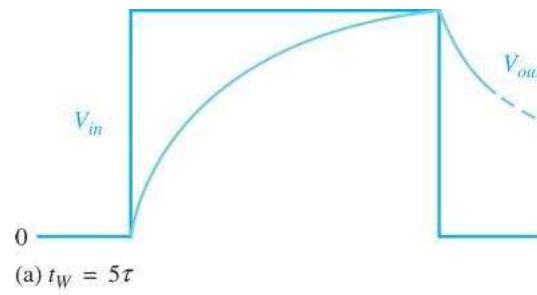
# Sammenheng mellom pulsbredde og $\tau$

- Hvis pulsbredden  $t_w$  er større enn  $\tau = 5$  vil kondensatoren ikke få lades opp/ut fullstendig
- Større verdier av  $\tau$  med samme pulsbredde vil føre til kortere eller lengre oppladnings- og utladningstider



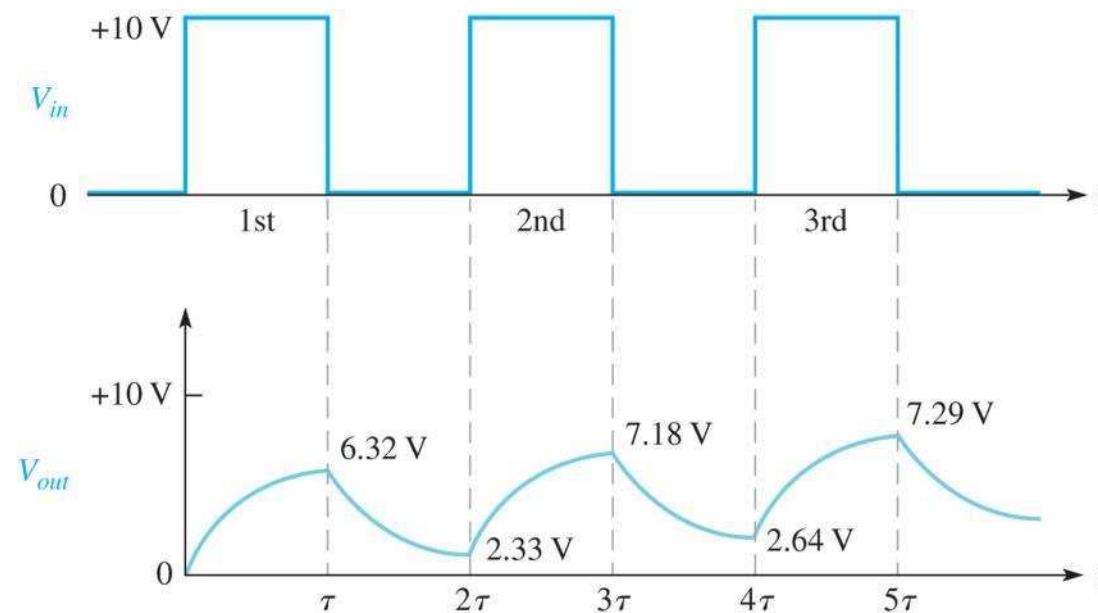
# Sammenheng mellom pulsbredde og $\tau$

- Ved pulsbredder  $t_w < \tau = 5$  vil kondensatoren ikke lades helt opp eller ut til maksimal/minimal-verdi



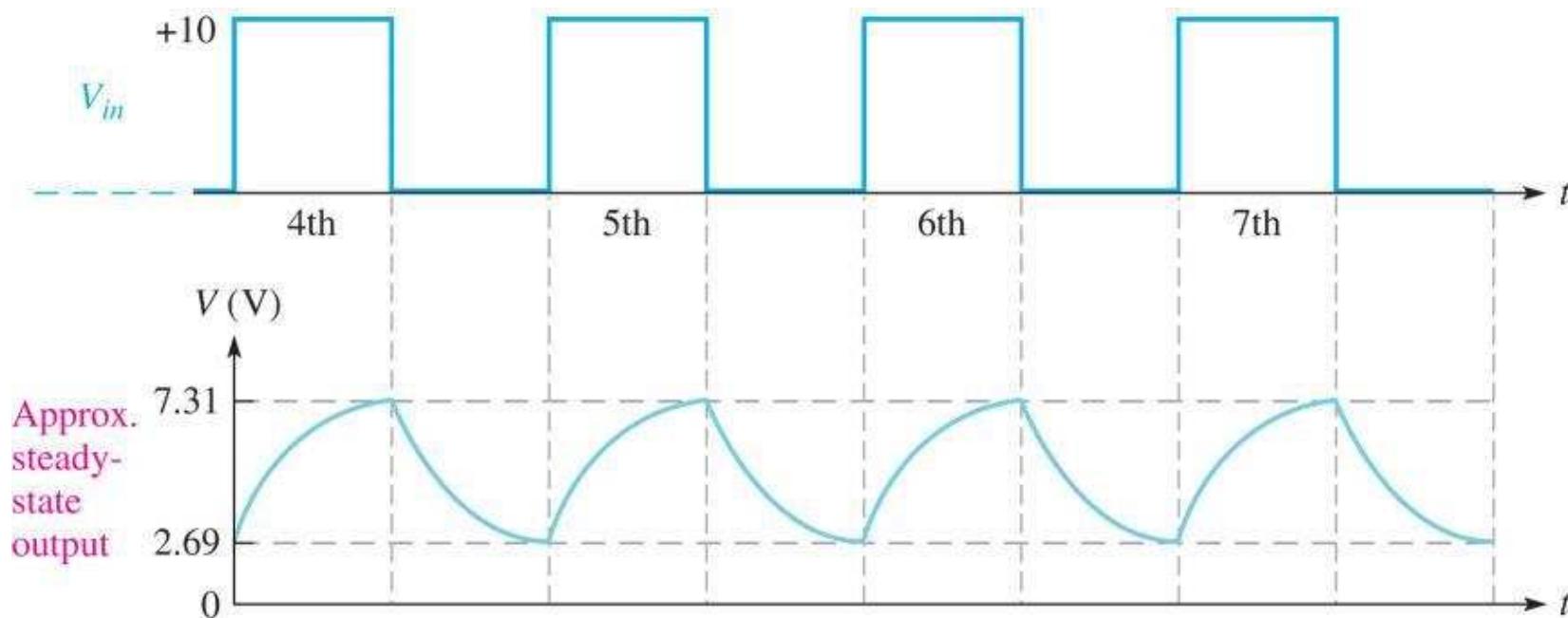
# Respons på repeterende pulser

- Ved kortere pulsbredder  $t_w < \tau = 5$  og input med repeterende pulser:
  - Kondensatoren trenger tid på å nå et nivå som er den *gjennomsnittlige* spenningen



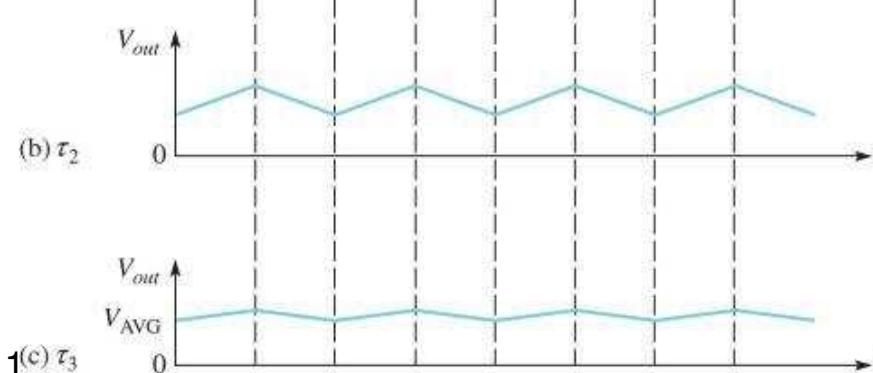
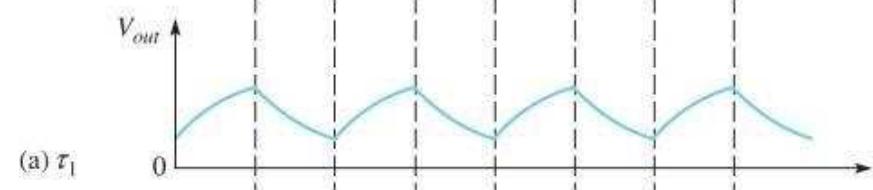
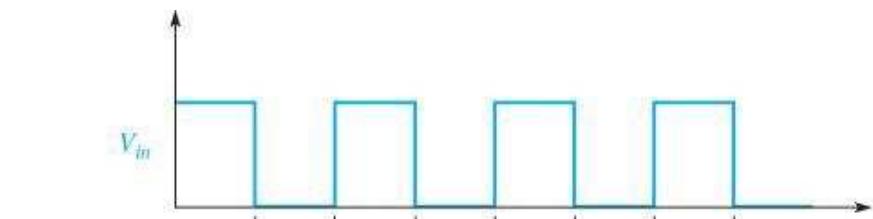
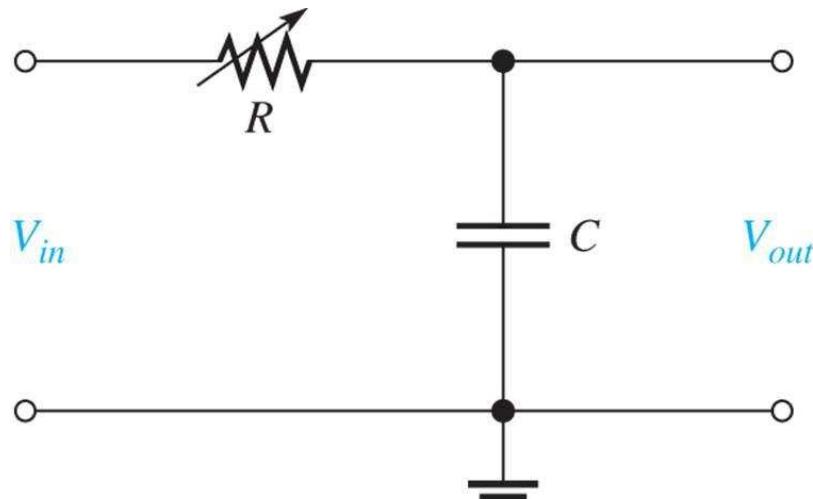
# Respons på repeterende pulser (forts)

- Deretter vil min- og maksverdi ha nådd et stabilt (*steady-state*) nivå



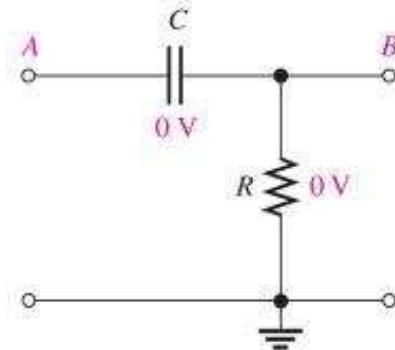
# Økning i tidskonstanten

- Ved å sette inn en variabel resistor kan man endre integrasjonskonstanten

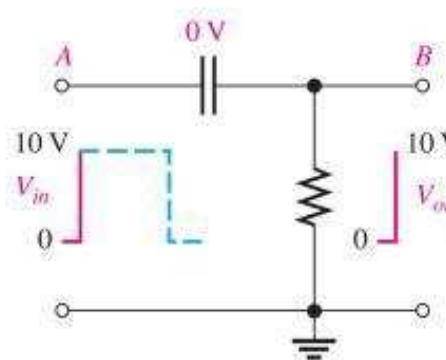


# RC-differensiatorens pulsrespons

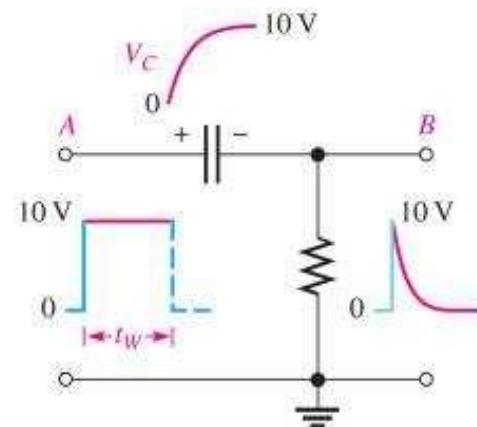
- I en *RC-differensiator* brukes spenningen over resistoren som utgangsspenning



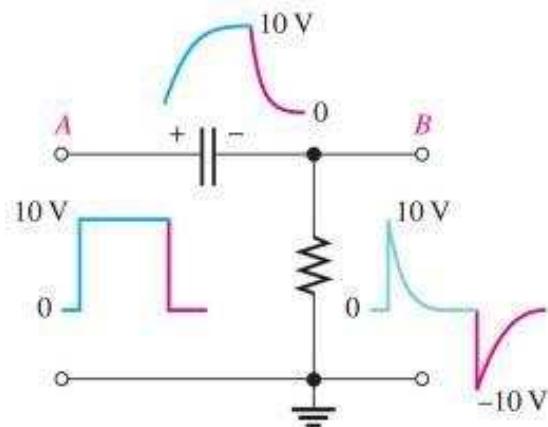
(a) Before pulse is applied



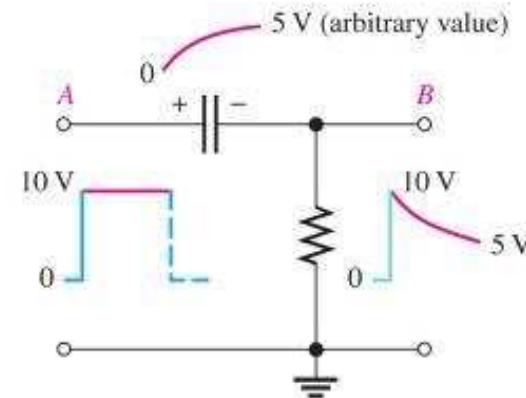
(b) At rising edge of input pulse



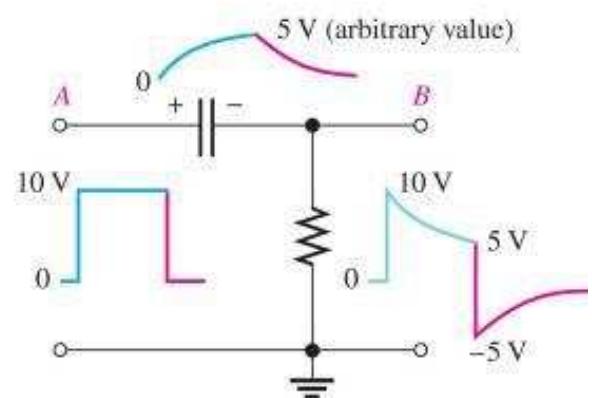
(c) During level part of pulse when t\_W ≥ 5τ



(d) At falling edge of pulse when t\_W ≥ 5τ



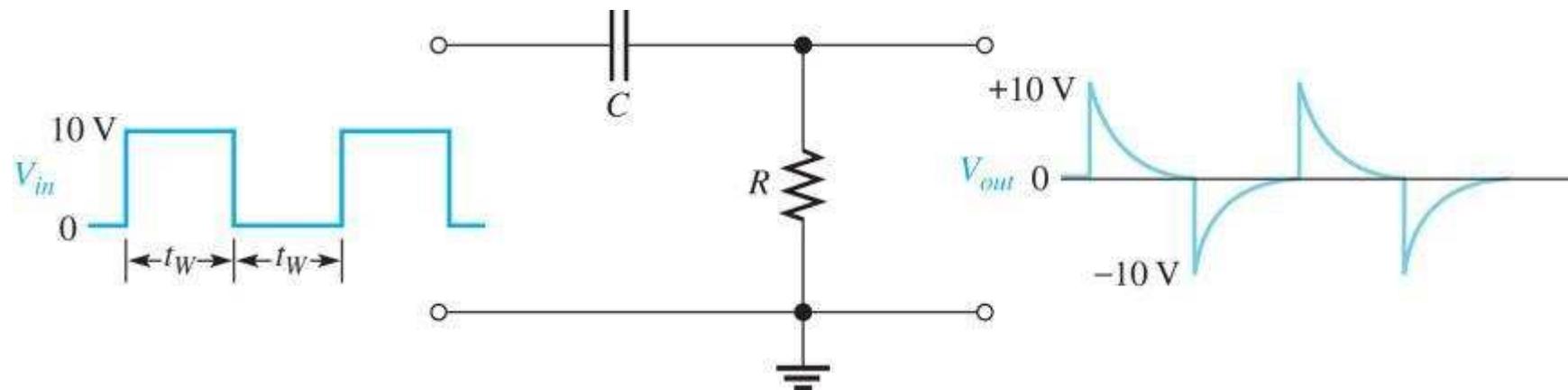
(e) During level part of pulse when t\_W &lt; 5τ



(f) At falling edge of pulse when t\_W &lt; 5τ

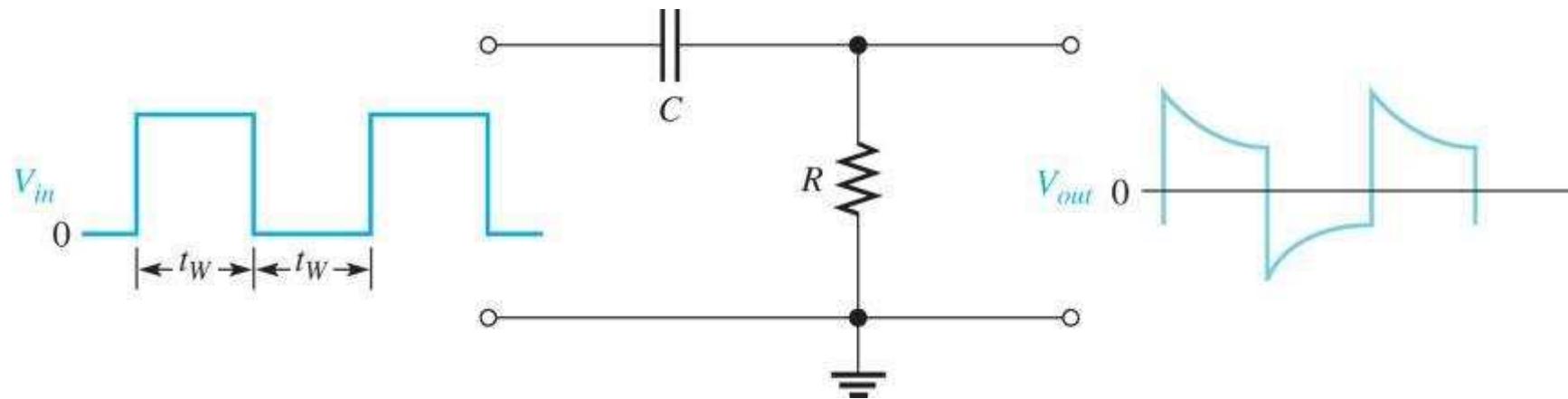
## RC-differensiator respons på repeterende pulser

- Samme forløpet skjer som for integratorer: Det tar en viss tid før steady-state oppnås, avhengig av tidskonstanten



- Hvis  $t_W \geq 5\tau$  vil kondensatoren rekke å lades helt opp/ut for hver hele periode

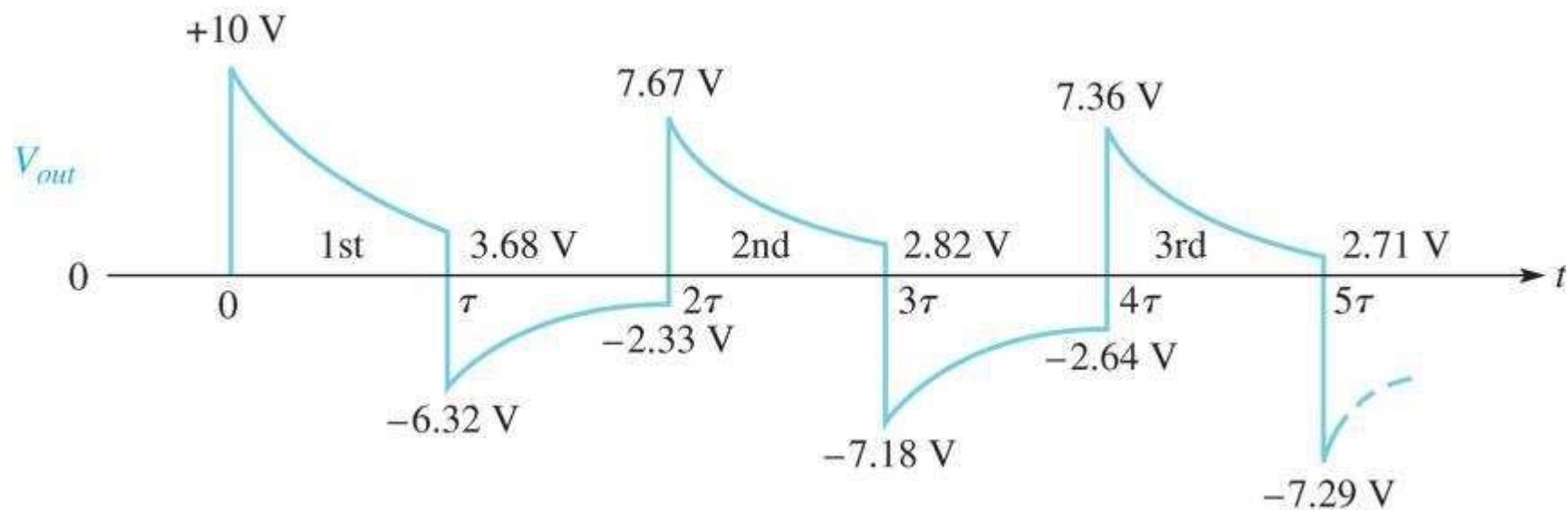
## RC-differensiator respons på repeterende pulser



- Hvis  $t_W < 5\tau$  vil kondensatoren ikke rekke å lades helt opp/ut for hver hele periode

# RC-differensiator respons på pulstog (forts)

- Til slutt vil det hele konvergere mot den gjennomsnittsverdi på 0V



# Oppsummeringsspørsmål

- Spørsmål fra forelesningene 6 og 7

# Spørsmål 1

Ordenen til et filter sier noe om

- a) Hvor filteret begynner å forsterke
- b) Hvor filteret effektivt filteret demper i knekkområdet (roll-off)
- c) Forskjell i demping mellom ideelt og praktisk filter for en bestemt frekvens
- d) Senterfrekvensen til passbåndet

## Spørsmål 2

En ac-kobling kan brukes til å

- a) Skalere opp en ac-spenning
- b) Skalere ned en ac-spenning
- c) Legge til et dc-offset
- d) Slippe igjennom en ac-komponent

## Spørsmål 3

Ved en likespenning vil en fysisk spole ha

- a) Ingen motstand mot strøm
- b) Uendelig stor motstand mot strøm
- c) Litt motstand som skyldes parasittresistans
- d) Motstand som er proposjonal med induktansen

## Spørsmål 4

En spole har parasitteffekter som kan modelleres med

- a) En resistor i parallel
- b) En kondensator i serie
- c) En kondensator i serie med spolen og deretter en resistor i parallel med spolen og kondensatoren
- d) En resistor i serie med spolen og deretter en kondensator i parallel med spolen og resistoren

## Spørsmål 5

Hvis frekvensen nærmer seg uendelig,  
hva skjer med den totale impedansen i  
en RL-krets?

- a) Den blir lik 0
- b) Den blir uendelig stor
- c) Den blir rent kapasitiv
- d) Den blir rent induktiv

## Spørsmål 6

En kondensator i en RC-krets regnes for å være tilnærmet helt oppladet eller helt utladet etter

- a)  $RC=1$
- b)  $RC=2$
- c)  $RC=5$
- d)  $RC=10$

## Spørsmål 7

Transienttiden er definert som

- a)  $RC=1$
- b)  $RC=2$
- c)  $RC=5$
- d)  $RC=10$

## Spørsmål 8

Hvis pulsbredden er kortere enn tidskonstanten i en integrator vil

- a) Kondensatoren aldri lades opp
- b) Kondensatoren aldri lades ut
- c) Kondensatoren fungere som en bryter
- d) Aldri lades helt opp eller helt ut

## Spørsmål 9

Hvis pulsbredden er lengre enn tidskonstanten i en integrator vil

- a) Kondensatoren bare lades opp
- b) Kondensatoren bare lades ut
- c) Kondensatoren fungere som en differensiator
- d) Kondensatoren lades helt opp og helt ut

## Spørsmål 10

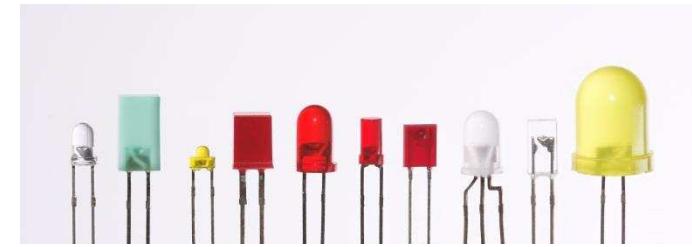
Hvis frekvensen til inputsignalet til en differensiator nærmer seg uendelig, vil

- a) amplituden til utsignalet nærme seg 0
- b) amplituden til utsignalet bli like stor som innsignalets
- c) det ikke være noen sammenheng mellom amplituden til innsignalet og utsignalet
- d) impedansen til kretsen bli rent induktiv

## Spørsmål 11

Bruk av klikker til å svare på spørsmål  
funger

- a) Elendig
- b) Dårlig
- c) Verken bra eller dårlig
- d) Godt
- e) Veldig bra



# Forelesning nr.8 INF 1411 Elektroniske systemer

Dioder

Praktiske anvendelser



# Dagens temaer

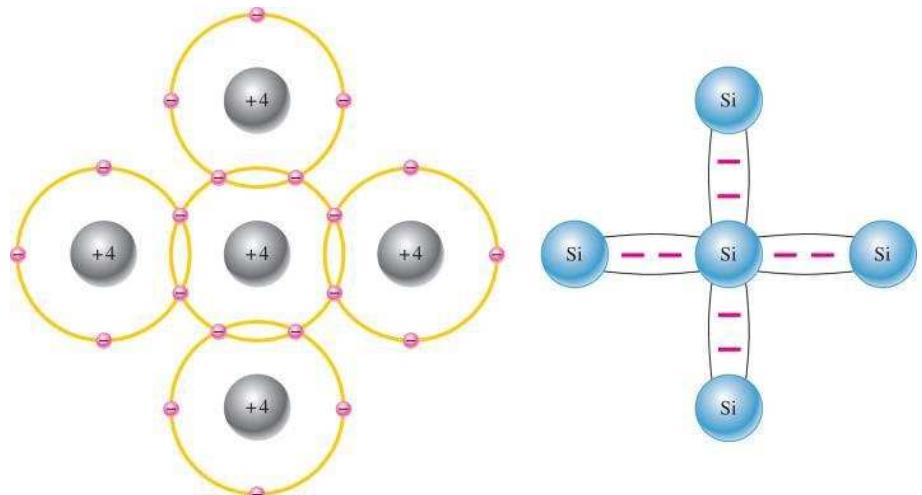
- Dioder
  - Halvlederfysikk
  - Ulike typer halvledere og ladningsbærere
- Diodekarakteristikker
- Likerettere og strømforsyninger
- Spesialdioder
- Dagens temaer er hentet fra kapittel 15.1-15.6

# Halvledere

- Halvledere er ledere som under visse betingelser leder strøm, og under andre ikke
- Noen halvledere kan man styre oppførselen til med en strøm eller spenning, mens for andre ikke er styrbare
- For å forklare virkemåten, må man forstå begreper som
  - Ladingsbærere
  - Energibånd og valens
  - Majoritets- og minoritetsbærere

# Halvlederes oppbygging

- Halvledere er krystallinske materialer som karakteriseres ved spesielle energibånd for elektronene
- Krystaller består av grunnstoff hvor atomene knytter seg til hverandre og danner faste strukturer
- Silisium danner krystallstruktur med fem atomer, hvor hvert atom deler ett valenselektron med nabootomene

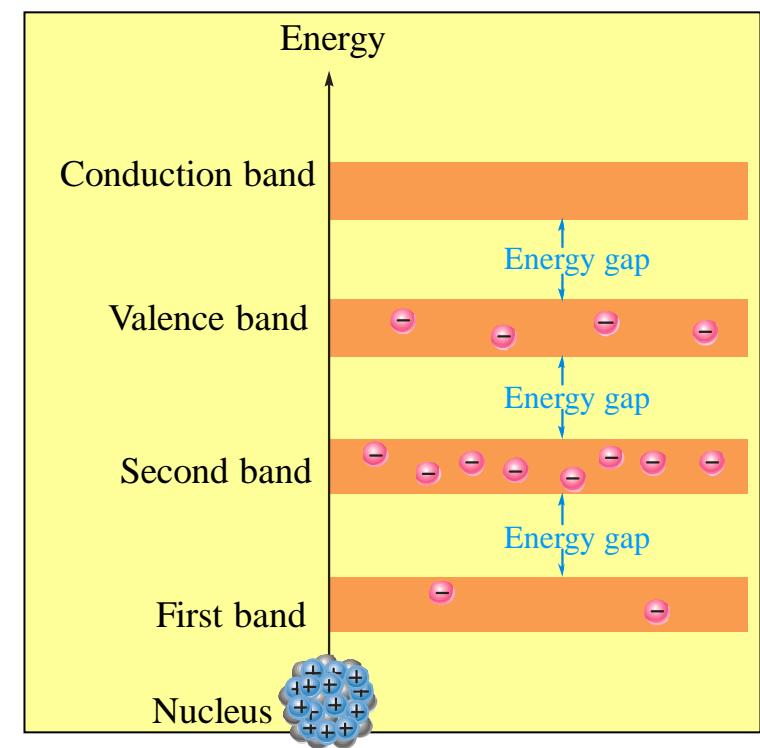


(a) The center silicon atom shares an electron with each of the four surrounding silicon atoms, creating a covalent bond with each. The surrounding atoms are in turn bonded to other atoms, and so on.

(b) Bonding diagram. The red negative signs represent the shared valence electrons.

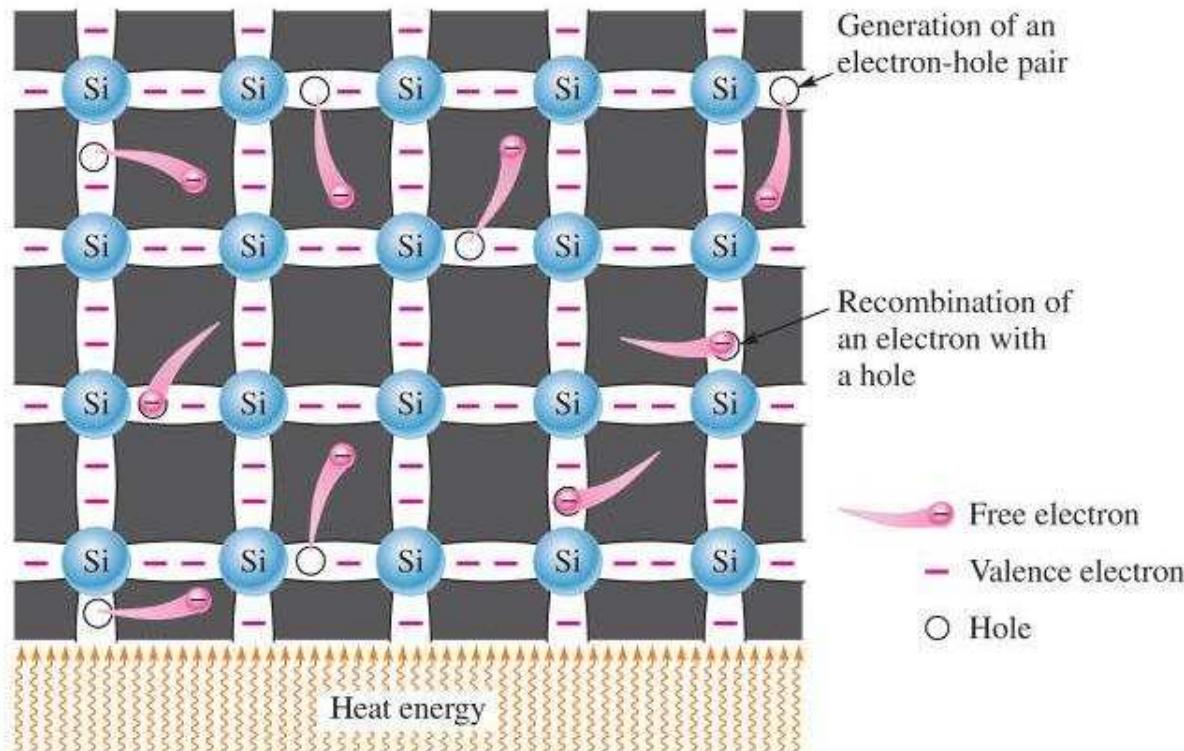
# Halvlederes oppbygging (forts)

- Elektronene i de ytterste banene har større energi enn de i indre baner, og kan lettere forlate atomet
- Hvis et elektron i et krystall forlater krystallet, oppstår en ledig plass som kalles for et *hull*
- Hullet kan senere fylles av et nytt elektron



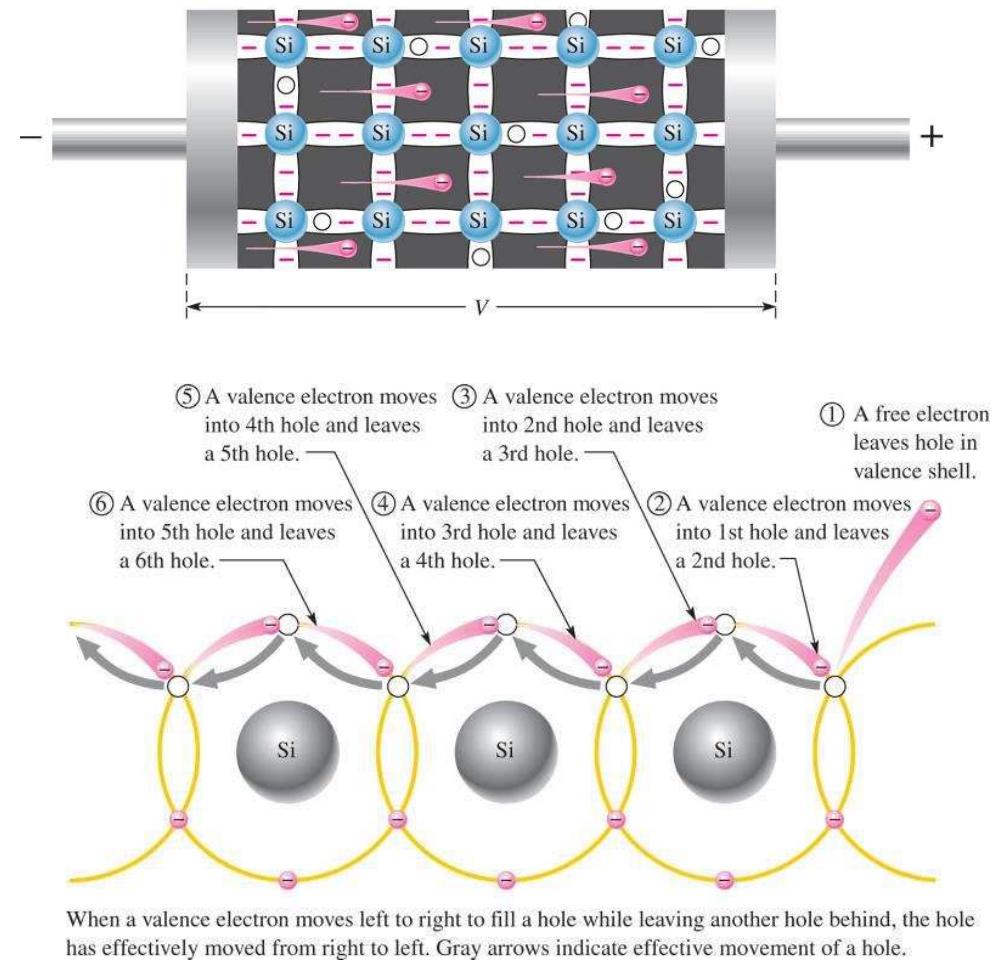
# Halvlederes oppbygning (forts)

- For å forlate valensbåndet kreves energi, mens det frigjøres energi hvis et elektron fanges inn av et ledig hull



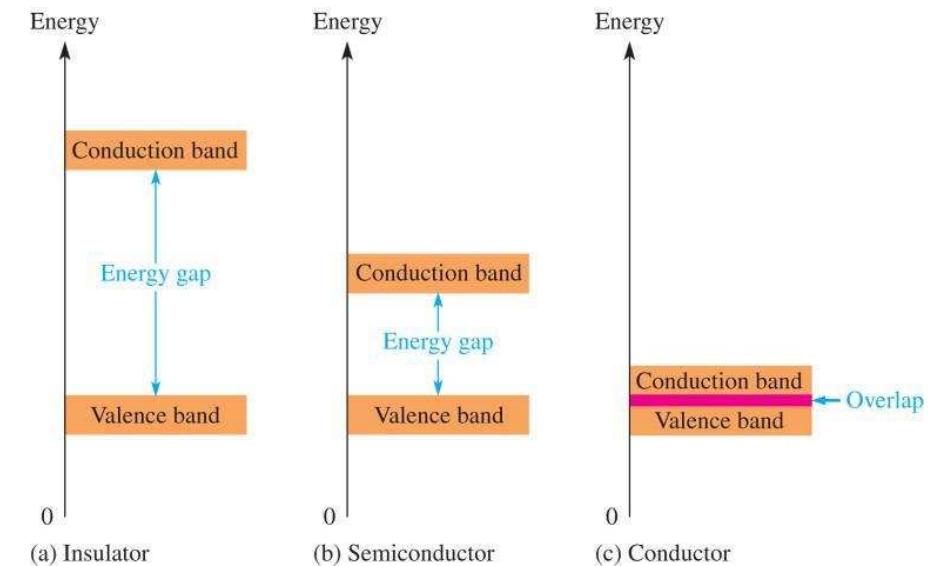
# Elektronstrøm og hullstrøm

- Hvis man setter på en spenning over et stykke silisium vil elektronene bevege seg mot den positive polen og danner en *elektronstrøm*
- Hvis elektronene beveger seg mot høyre, vil hullene bevege seg mot venstre, og dette kalles for en *hullstrøm*



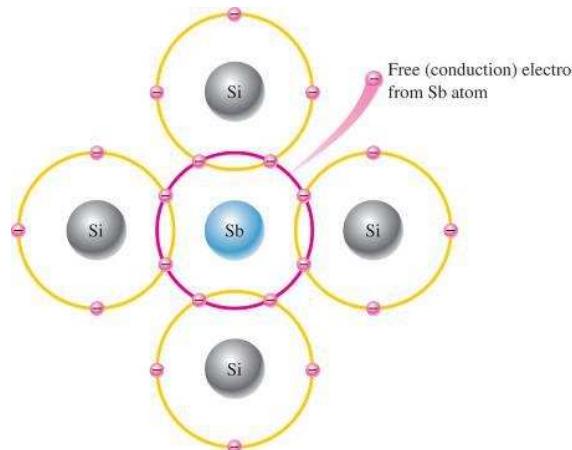
## N- og P-type halvledere

- Ren silisium leder strøm dårlig på grunn av få frie elektroner
- Ved å tilsette urenheter (*doping*) bedres ledningsevnen betraktelig ved at det blir flere frie elektroner eller hull
- Doping kan enten være av *n-type* eller *p-type*, avhengig av om man øker antall frie elektroner eller hull

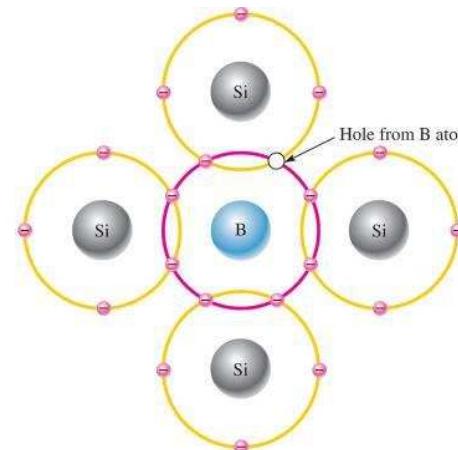


## N- og P-type halvledere (forts)

- Hvis det er mange flere frie elektroner enn hull, kalles *elektronene* for *majoritetsbærere* i N-type halvleder, og *hullene* er *minoritetsbærere*
- I P-type halvleder er det langt flere hull enn elektroner, og *hullene* er da *majoritetsbærere*, mens elektronene er *minoritetsbærere*



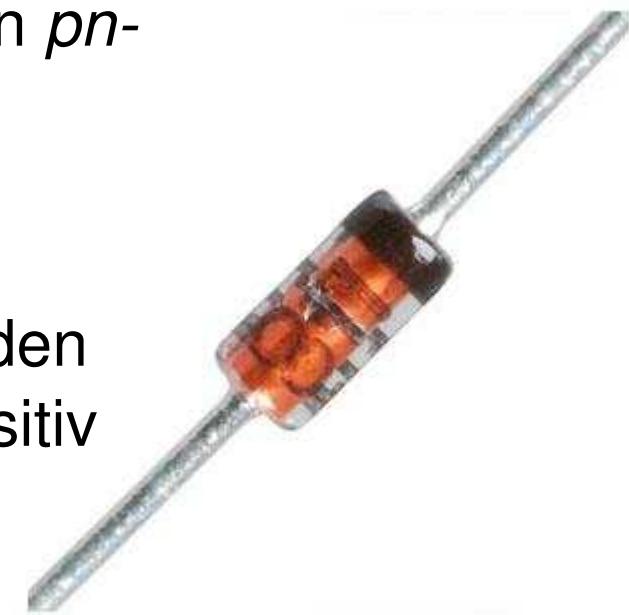
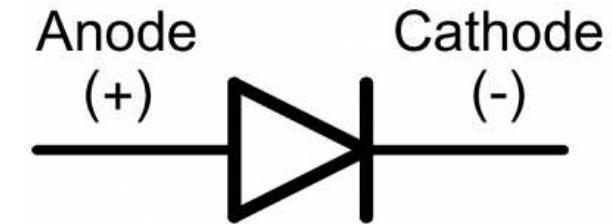
(a) Pentavalent impurity atom in a silicon crystal. An antimony (Sb) impurity atom is shown in the center. The extra electron from the Sb atom becomes a free electron.



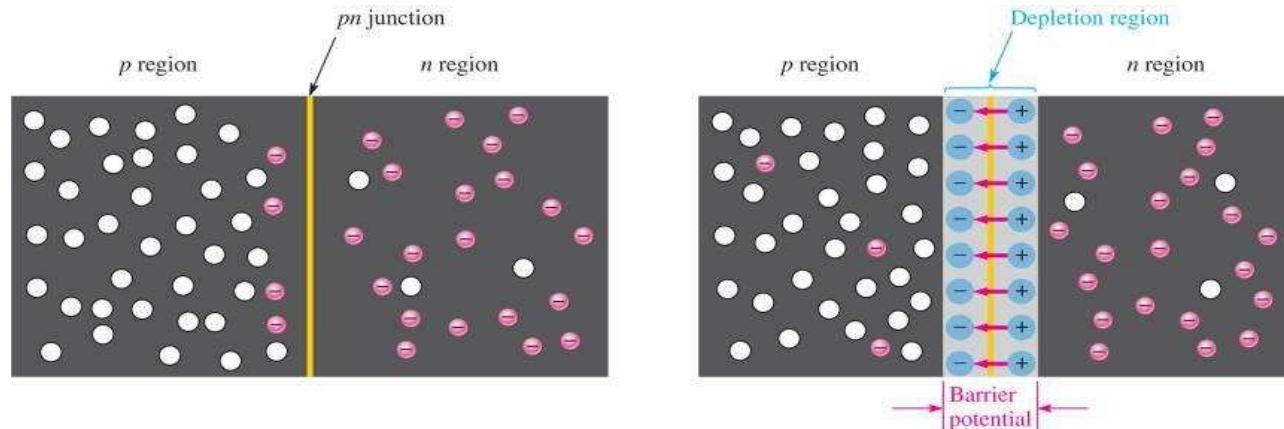
(b) Trivalent impurity atom in a silicon crystal. A boron (B) impurity atom is shown in the center.

# Dioder

- En diode leder strøm i én retning, men ikke i den andre
- En diode består av en p-type og n-type halvleder som er festet til hverandre; i snittflaten oppstår det en *pn-overgang*
- Siden det ene området har overskudd av frie elektroner og det andre av hull, vil elektroner i overgangsområdet vandre over til den andre siden
- Dette gjør at n-siden får et lite overskudd av positiv ladning, mens p-siden får overskudd av negativ ladning
- Driften av elektroner stanser opp når p-siden får for mange elektroner



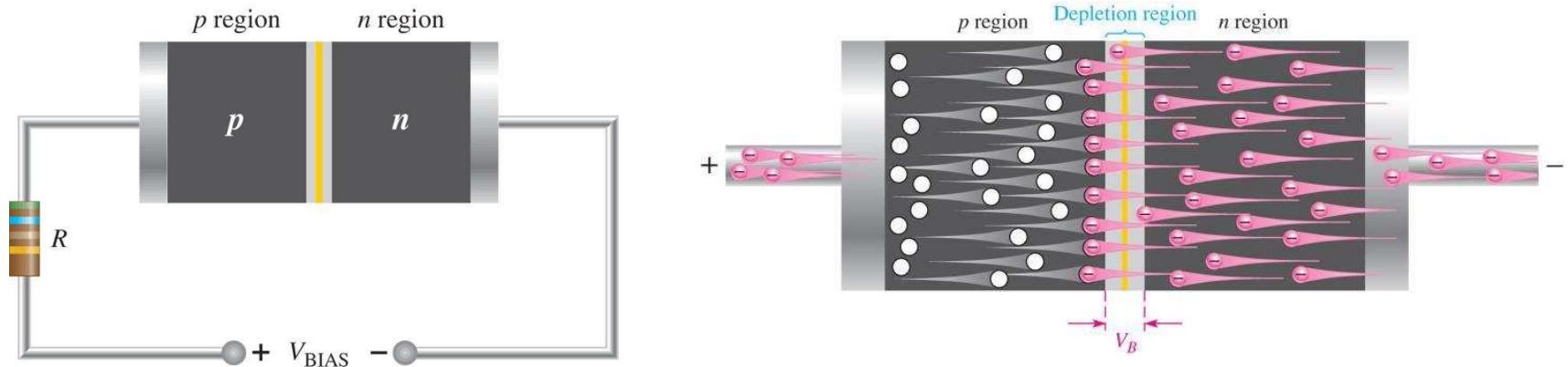
# Dioder (forts)



- Området hvor det er opphopning av elektroner-hull kalles for et *deplesjonsområde* (tømt for frie elektroner)
- Deplesjonsområdet har en spenningsforskjell (potensialbarriere) på ca 0.7 volt (avhengig av dopingmaterialet)
- [Animasjon](#) deplesjonsområdet

# Biasing av dioder

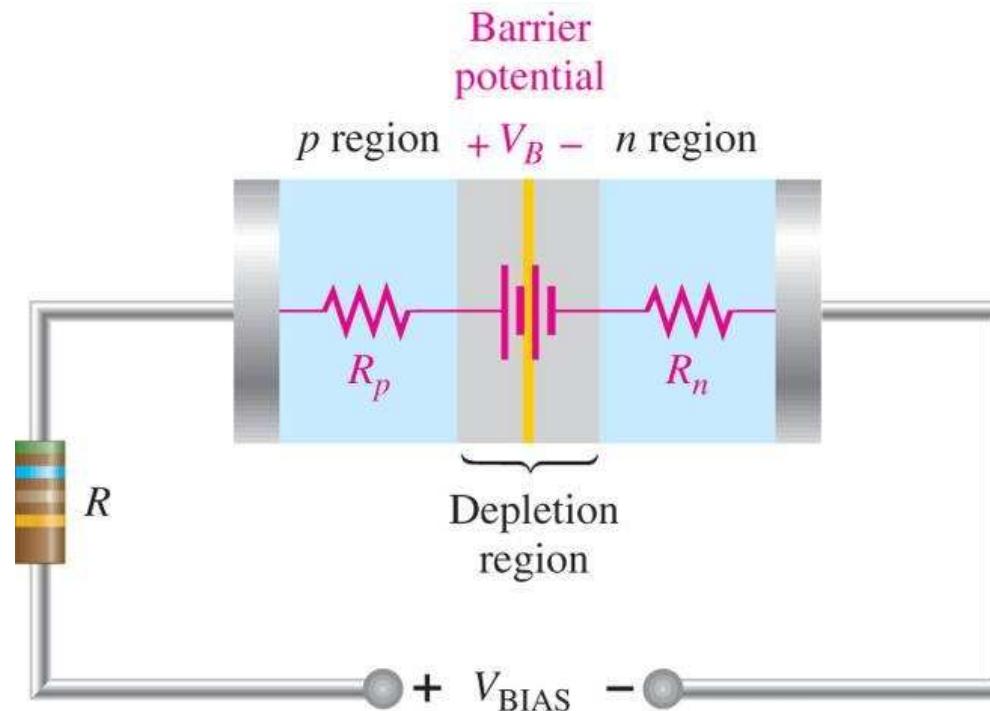
- Avhengig av polariteten til  $p$ -regionen i forhold til  $n$ -regionen vil dioden enten lede eller sperre for strøm



- Hvis  $p$  er mer positiv enn  $n$ -regionen (forover-modus), vil dioden lede strøm forutsatt at  $V_{bias}$  er større enn potensialbarrieren

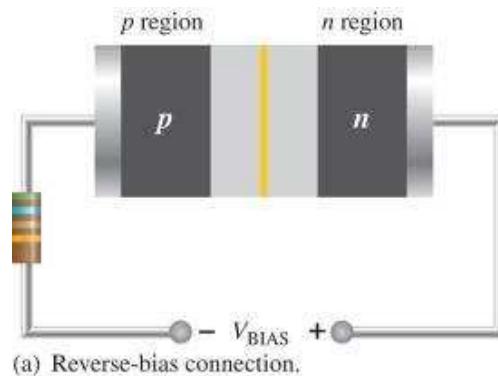
## Biasing av dioder (forts)

- Når dioden opererer i forover-modus, kan den modelleres som to motstander i serie med et batteri

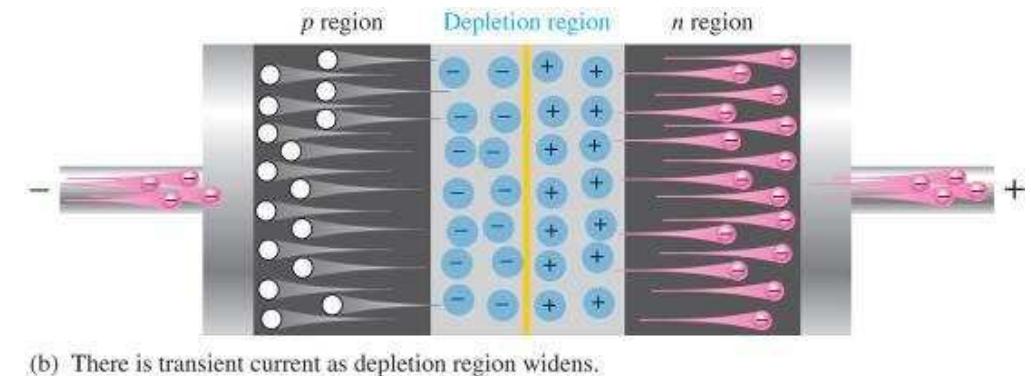


# Diode i revers-modus (sperre)

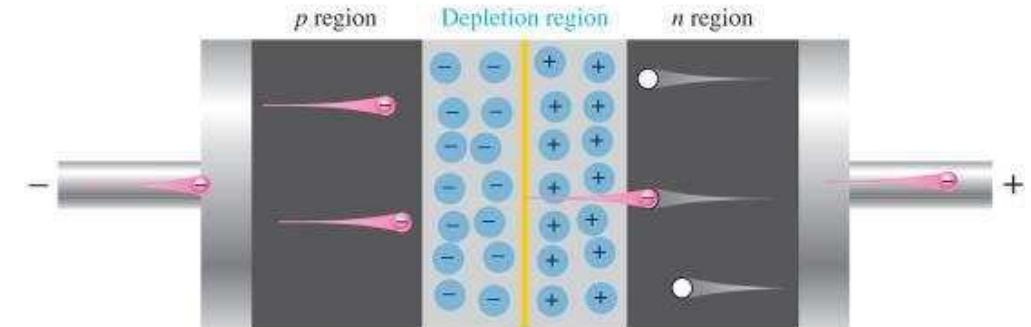
- Hvis p-regionen er mer negativ enn n-regionen, vil dioden være sperret (reverse bias)



(a) Reverse-bias connection.



(b) There is transient current as depletion region widens.



(c) Majority current ceases when barrier potential equals bias voltage. There is an extremely small reverse current due to minority carriers.

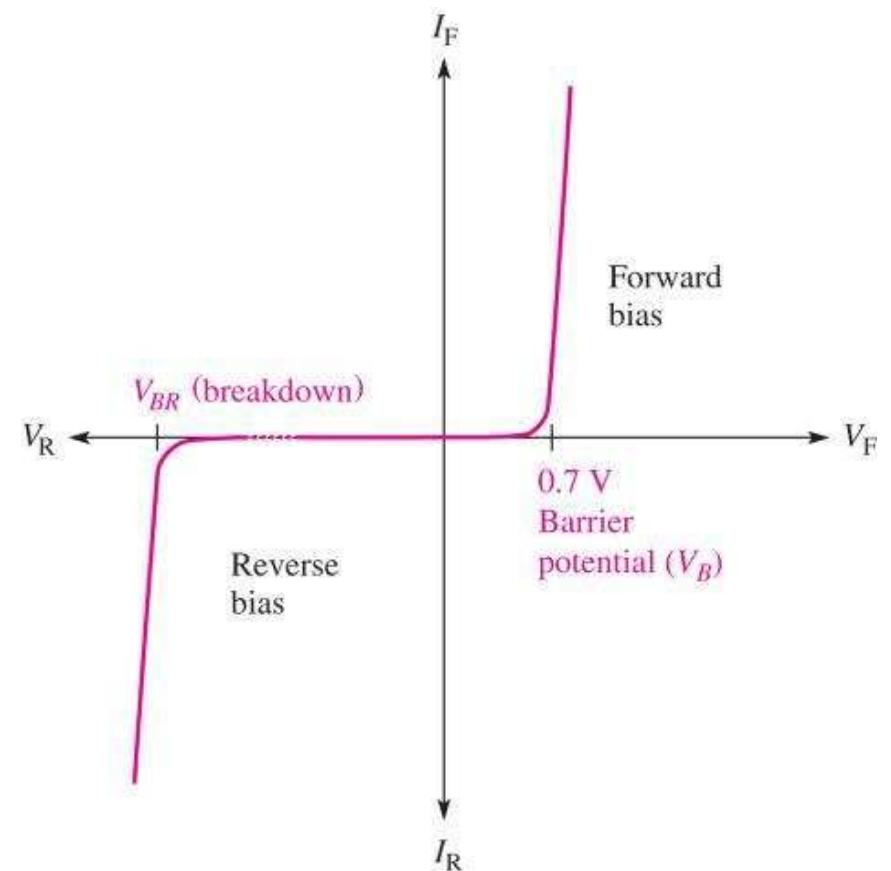
# Sammenbrudd



- Hvis dioden opererer i revers (sperre)-modus og spenningen øker til et visst nivå, vil noen elektroner i p-regionen få nok energi til å bryte deplesjons-barrieren
- Dette kan forårsake kollisjoner med andre elektroner i valensbånd, disse slås løs og kolliderer med andre elektroner
- Til slutt bryter strukturen sammen i en snøskred-effekt, og dioden leder strøm
- Vanlige dioder blir permanent ødelagt av dette, mens andre dioder (Zener-dioder) tåler å bryte sammen og sperrer når spenningen blir lavere enn breakdown-spenningen

# Diodekarakteristikker

- Diodekarakteristikken beskriver strømmen gjennom dioden som funksjon av spenningen over den
- I forover-retningen går det nesten ikke strøm hvis spenningen er lavere enn  $V_B$
- I bakover-retningen går det ikke strøm før  $V_{BR}$  nås
- $V_{BR}$  er typisk mye større enn  $V_B$



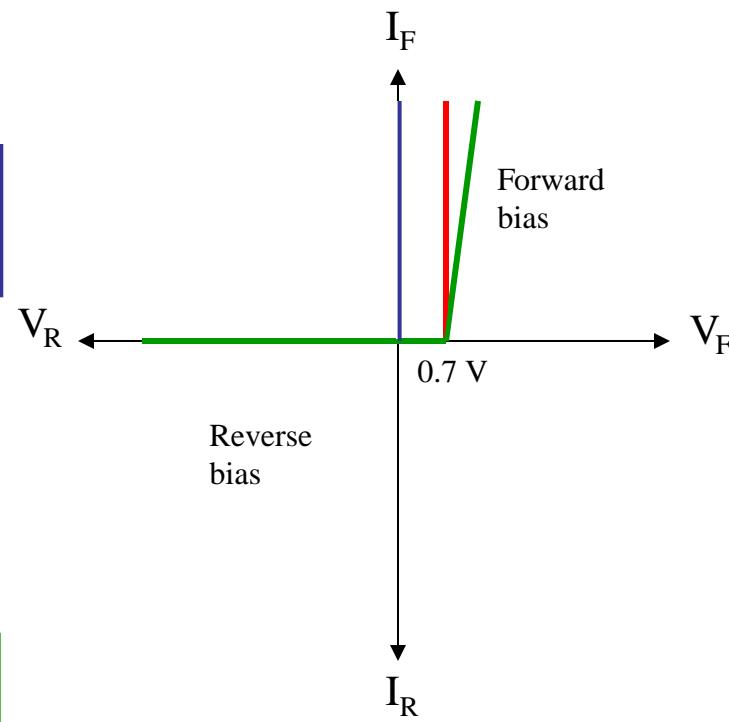
# Diodemodell

- En diode kan modelleres på flere måter, avhengig av hvor nøyaktig man trenger den

Den ideelle modellen bruker en bryter

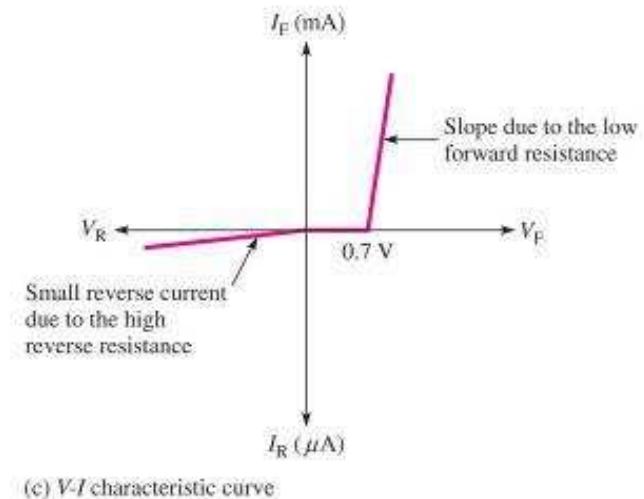
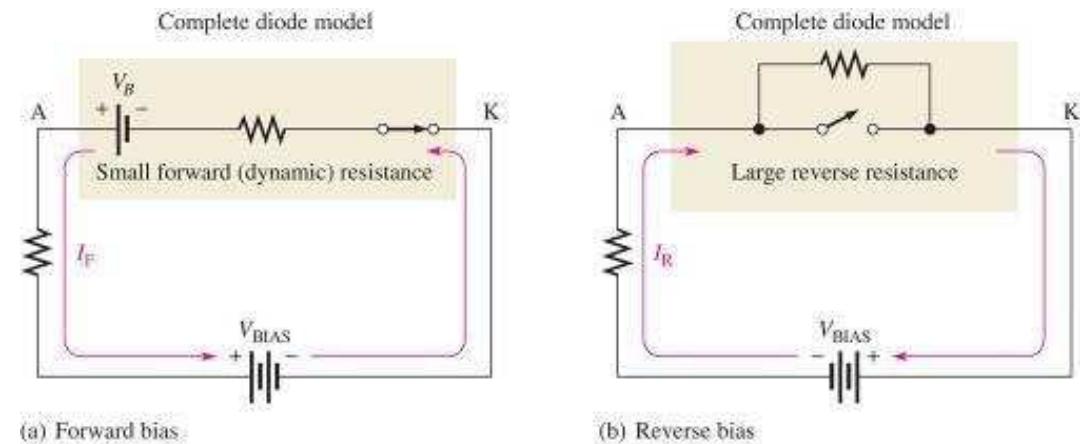
En mer realistisk modell inkluderer forover-barrieren.

En mer komplett modell inkluderer motstand i forover-retningen



# Diodemodell (fortsatt)

- I noen tilfeller må man også modellere strømmen som går når dioden er i sperre-modus

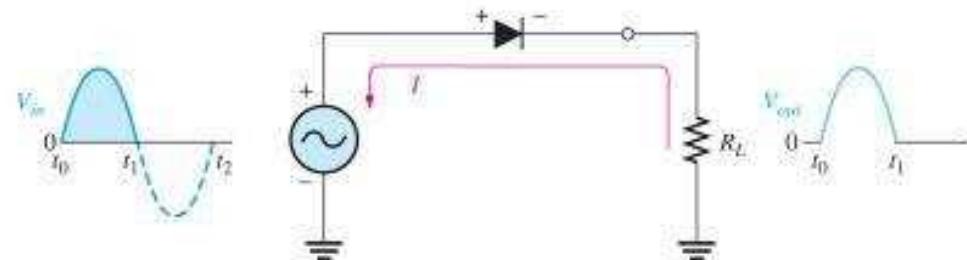


# Bruk av dioder: Likerettere

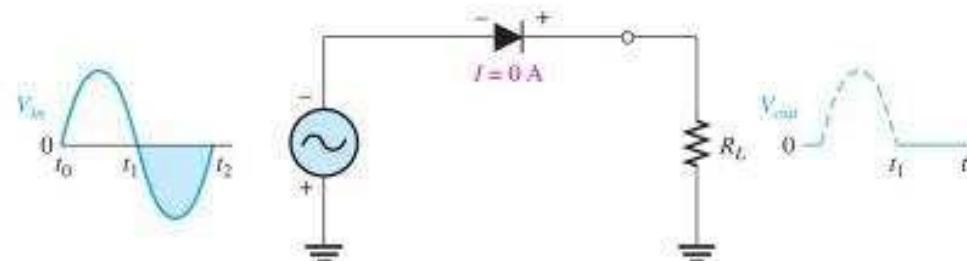
- Ofte trenger man å konvertere en vekselspenning/strøm til en likespenning/strøm, f.eks i strømforsyninger
- Dioder er essensielle i alle former for likerettere
- Den enkleste formen for likeretter er en *halvbølge*-likeretter



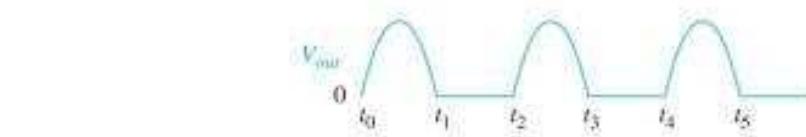
(a) Half-wave rectifier circuit



(b) Operation during positive alternation of the input voltage



(c) Operation during negative alternation of the input voltage

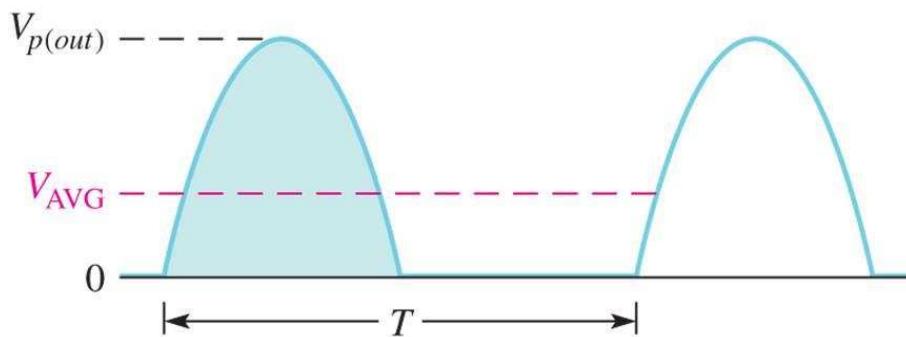


(d) Half-wave output voltage for three input cycles

# Halvbølgelikeretter

- Den gjennomsnittlige utspenningen fra en halvbølgelikeretter er

$$V_{AVG} = \frac{V_{P(OUT)}}{\pi}$$

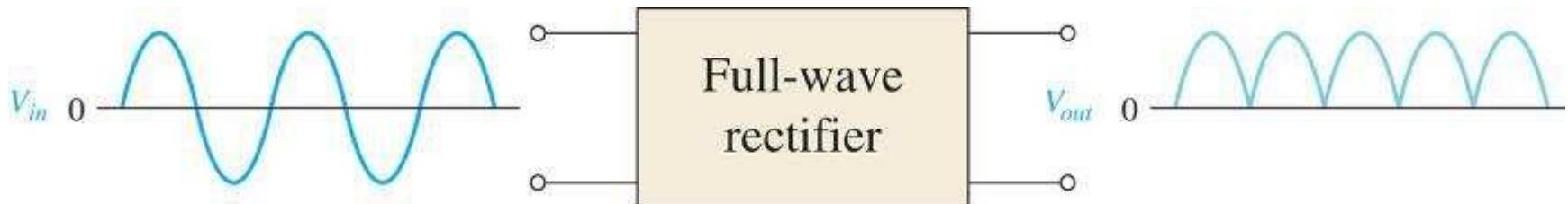


- Den maksimale utspenningen er gitt av  $V_{AVG} = \frac{V_{P(IN)} - 0,7v}{\pi}$
- Tar man hensyn til spenningsfallet over dioden blir utspenningen  $V_{p(out)} = V_{P(IN)} - 0,7v$

# Fullbølgelikeretter

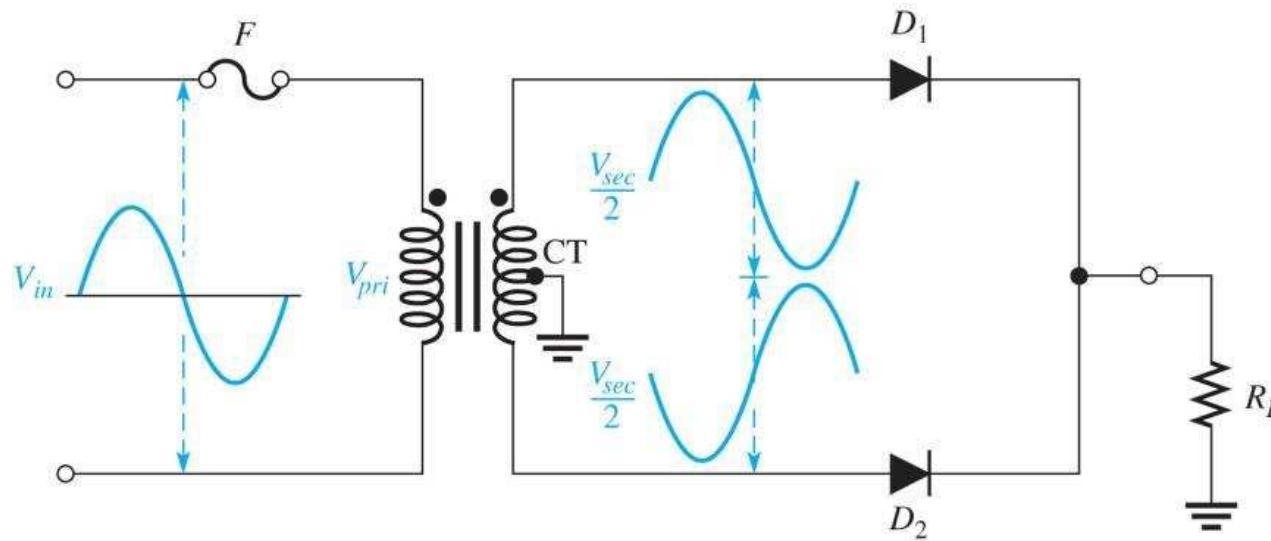
- Halvbølgelikeretteren er lite anvendelig siden den fjerner halve signalperioden
- Fullbølgelikeretteren «snur» den negative halvperioden og gjør den positiv, og den gjennomsnittlige utspenningen er det dobbelte av halvbølgelikeretterens

$$V_{AVG} = \frac{2V_{P(OUT)}}{\pi}$$



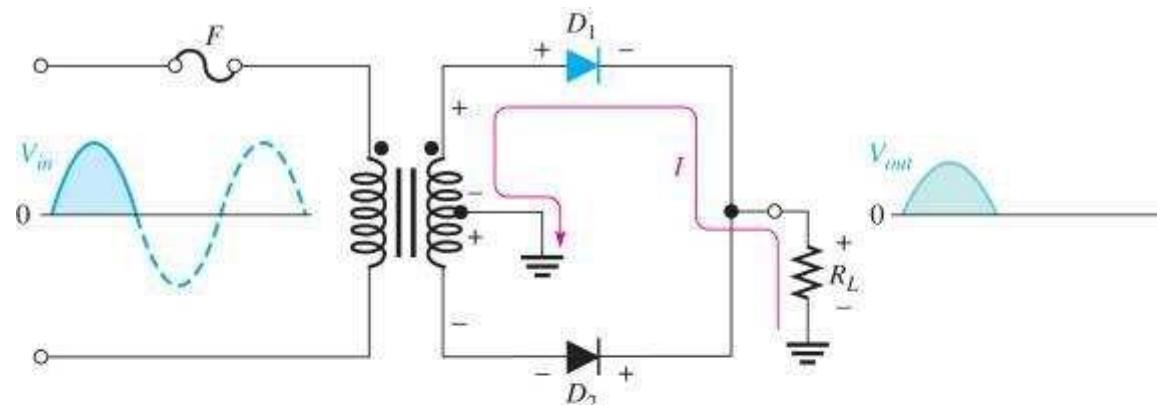
## Fullbølgelikeretter (forts)

- Fullbølgelikeretter konstrueres enkelt hvis man har en transformator som gir to utganger som er forskjøvet 180 grader i forhold til hverandre

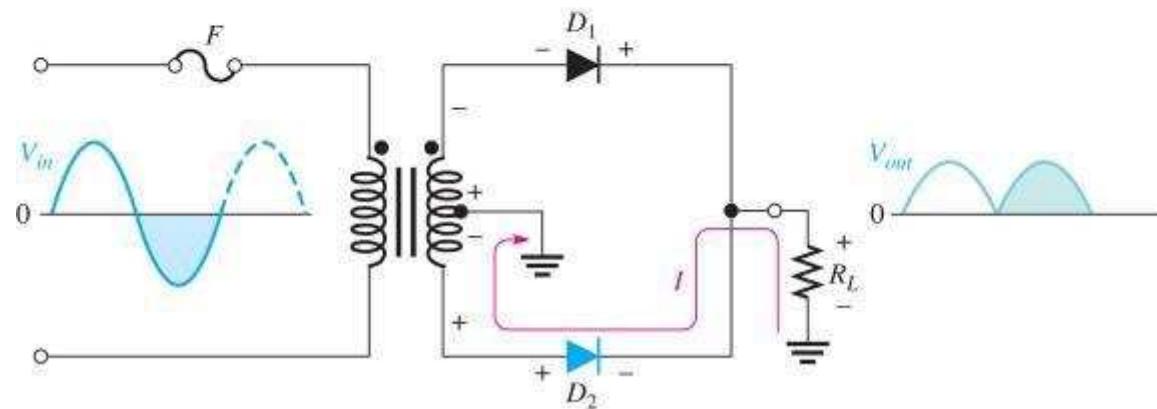


# Fullbølgelikeretter (forts)

- I den ene halvperioden leder den ene dioden mens den andre er sperret, og når polariteten snur sperrer den første mens den andre leder



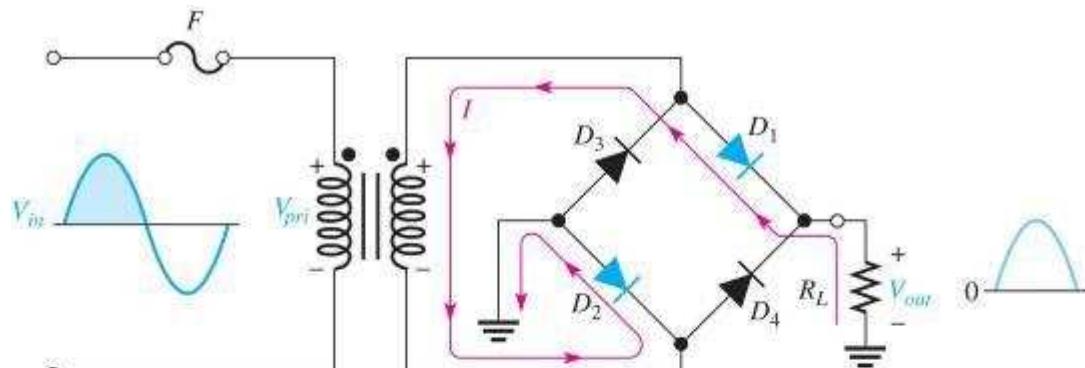
(a) During positive half-cycles,  $D_1$  is forward-biased and  $D_2$  is reverse-biased.



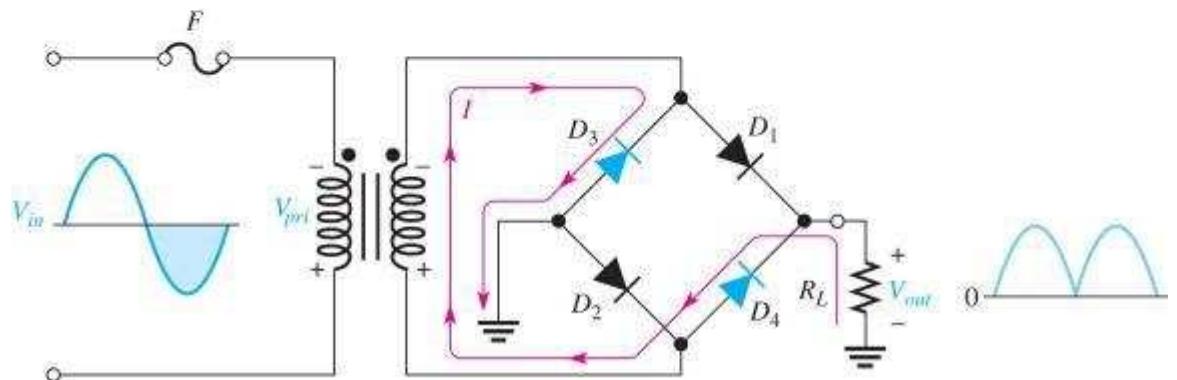
(b) During negative half-cycles,  $D_2$  is forward-biased and  $D_1$  is reverse-biased.

## Brolikeretter (forts)

- Hvis det ikke er praktisk å hente ut separate halvbølger med motsatt polaritet fra en strømforsyning, kan man bruke en *brolikeretter*



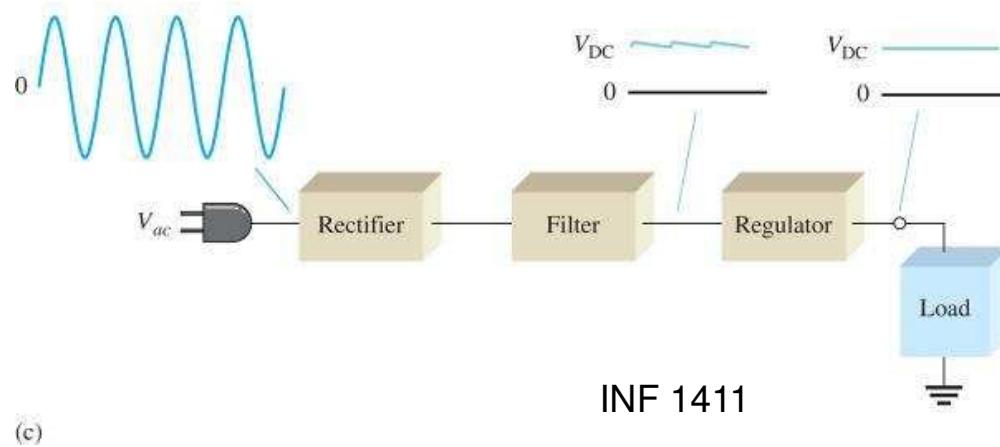
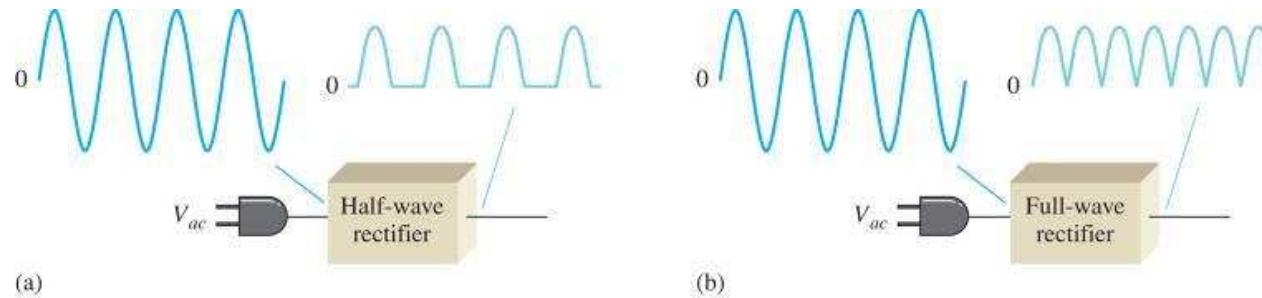
(a) During positive half-cycle of the input,  $D_1$  and  $D_2$  are forward-biased and conduct current.  $D_3$  and  $D_4$  are reverse-biased.



(b) During negative half-cycle of the input,  $D_3$  and  $D_4$  are forward-biased and conduct current.  $D_1$  and  $D_2$  are reverse-biased.

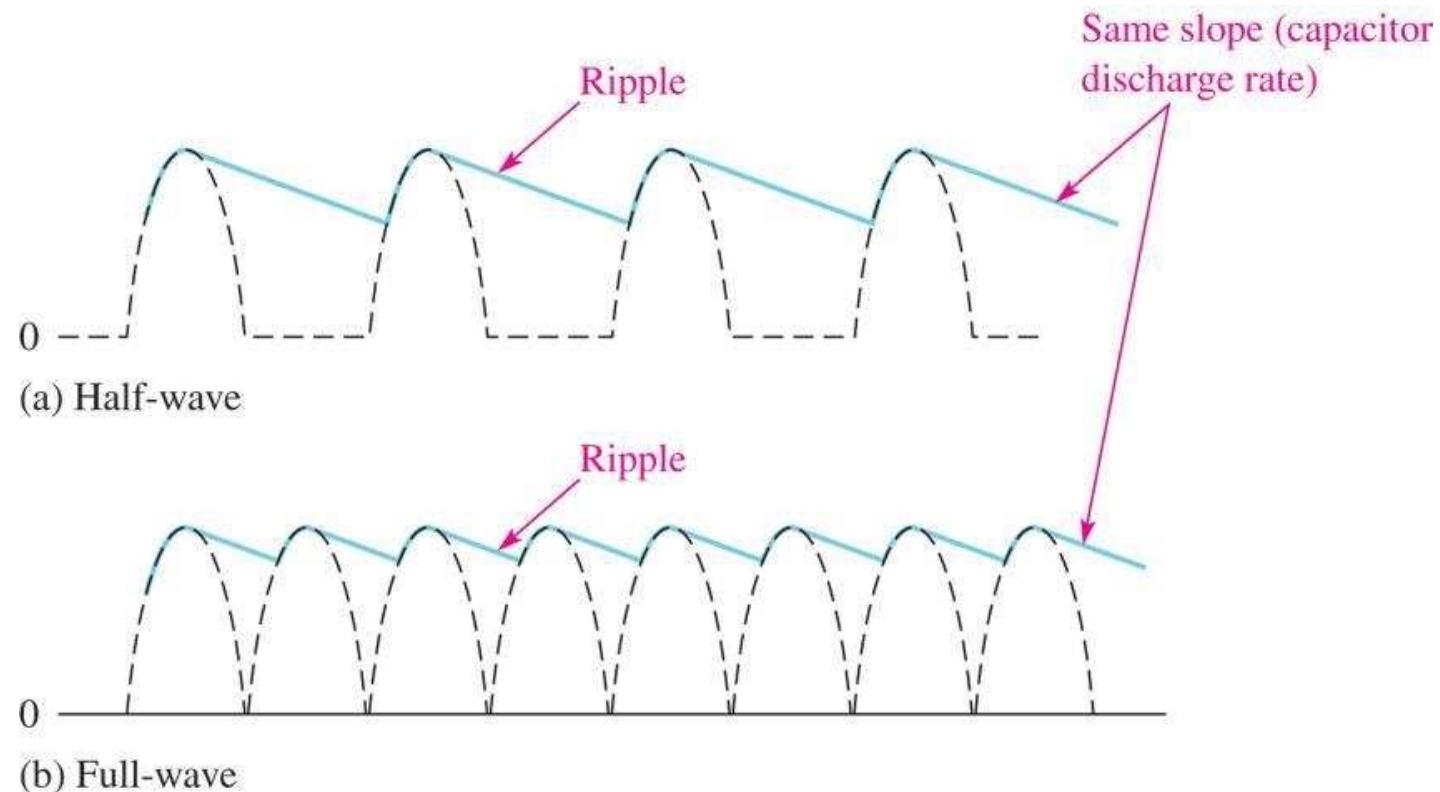
# Strømforsyninger

- Selv om en fullbølgelikeretter er mer effektiv enn halvbølgelikeretter, kan den ikke brukes som DC-forsyningsspenning
- Ved å koble til et filter på utgangen av fullbølgelikeretteren får man en spenning med mindre variasjon



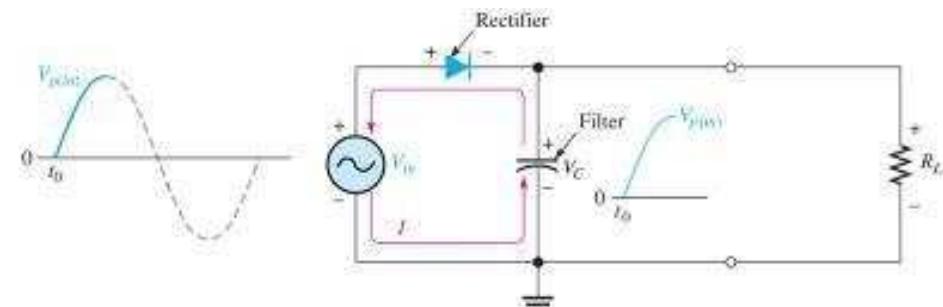
# Strømforsyninger (fortsatt)

- Fullbølgelikerettere er bedre å bruke fordi det er mindre spenningsvariasjon som skal glattes ut

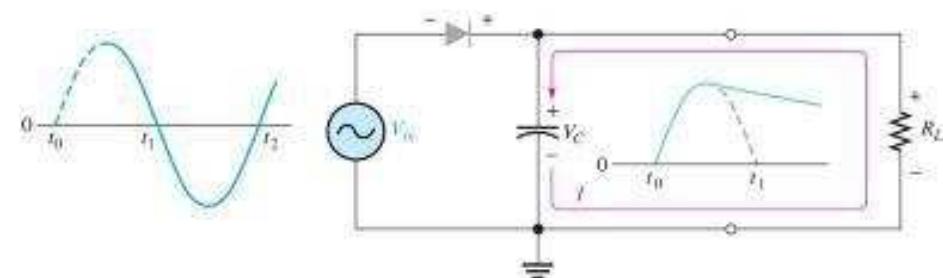


# Strømforsyninger (fortsatt)

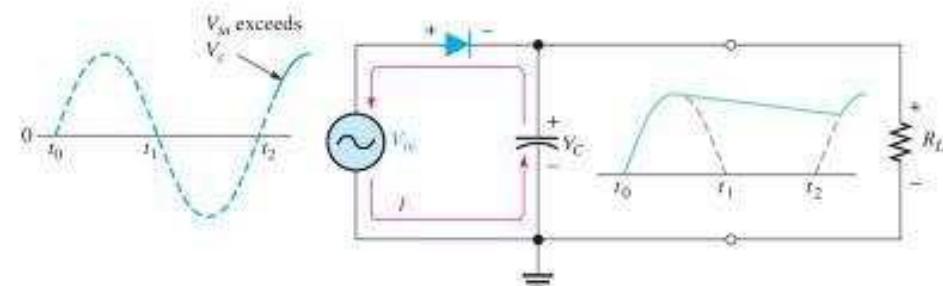
- Ved å koble inn en kondensator kan man glatte ut variasjonen i utgangssignalet
- I tillegg kan man sette inn regulatorer som kompenserer for temperatur, last og variasjon i input spenning



(a) Initial charging of capacitor (diode is forward-biased) happens only once when power is turned on.



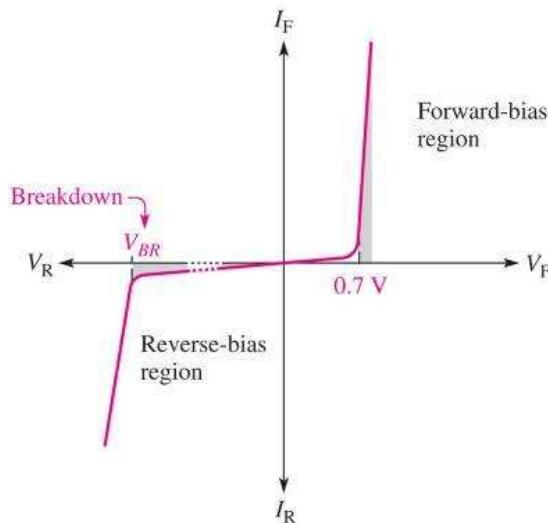
(b) The capacitor discharges through  $R_L$  after peak of positive alternation when the diode is reverse-biased. This discharging occurs during the portion of the input voltage indicated by the solid dark blue curve.



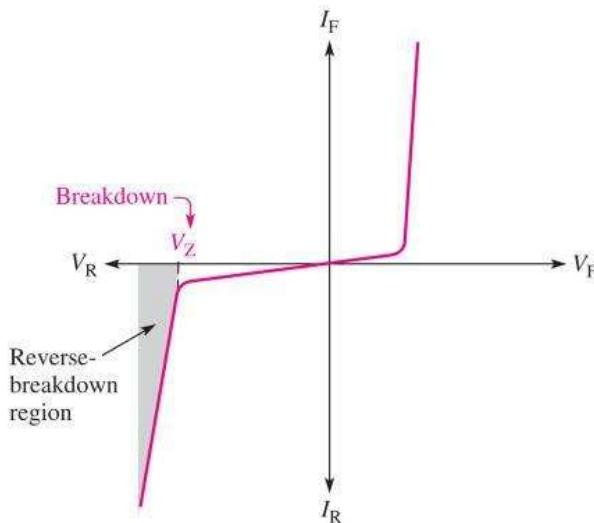
(c) The capacitor charges back to peak of input when the diode becomes forward-biased. This charging occurs during the portion of the input voltage indicated by the solid dark blue curve.

# Spesialdioder

- En Zener-diode tåler høy revers-spenningen uten å ødelegges og er konstruert for å jobbe i break-down



(a) The normal operating regions for a rectifier diode are shown as shaded areas.



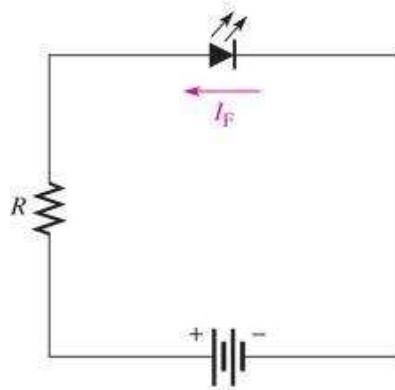
(b) The normal operating region for a zener diode is shaded.



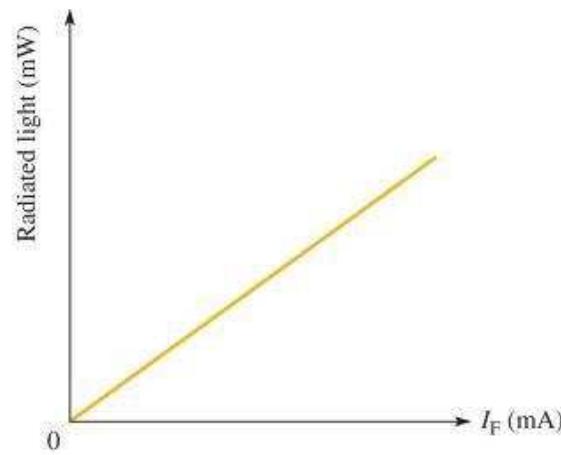
- Zener-dioden brukes ofte for å lage en spenningsreferanse

# Spesialdioder (forts)

- En LED (lysdiode) gir fra seg synlig lys når den opererer i foroverretningen
- Avhengig av halvledermaterialet og doping kan man produsere lysdioder i mange ulike farger



(a) Forward-biased operation



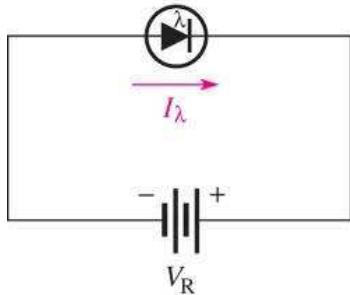
(b) Typical light output versus forward current



(c) Typical LEDs

# Fotodioder

- En fotodiode opererer i revers-modus og vil lede en strøm som er proporsjonal med lyset som treffer den: Lyset tilfører energi som øker reversstrømmen



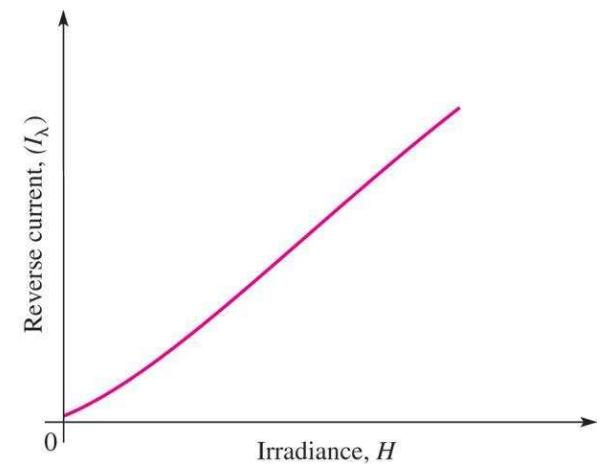
(a) Reverse-bias operation



(b) Typical devices

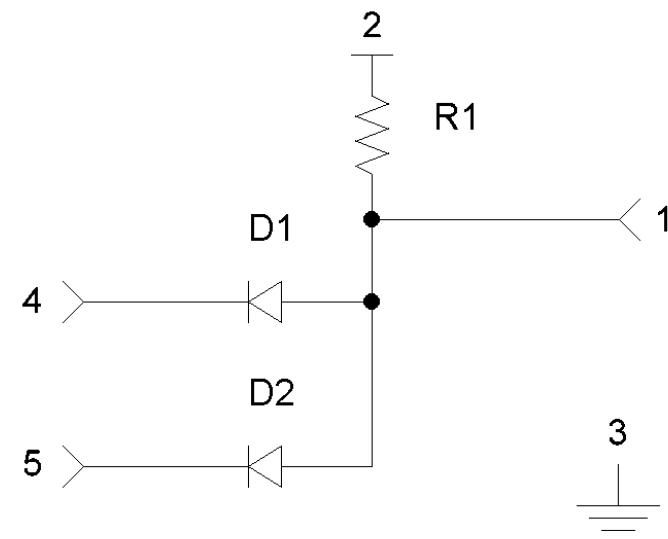
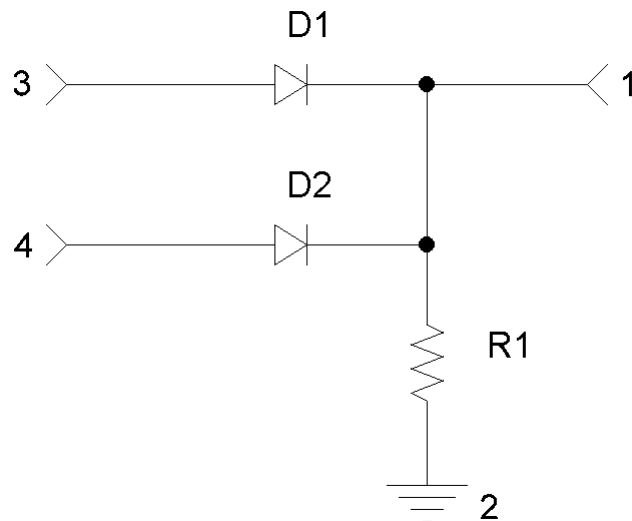


(c) Alternate symbol



# Nøtt til neste gang

Hvilke Boolske funksjoner utfører de to kretsene?



# Spørsmål

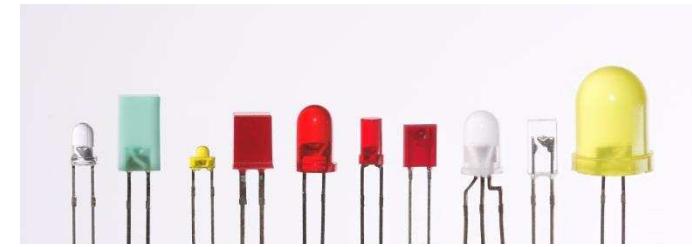
- Hva kjenner egne til en leder, isolator og halvleder?
- Hva er et krystall?
- Hvilke to typer ladningbærere finnes det i halvledere?
- Hva er hhv majoritetsbærer og minoritetsbærer?
- Hva er p-type halvleder, og hva er n-type halvleder?
- Hva er et deplesjonsområde?
- Hva er en potensialbarriere?
- Hva er en diode?
- Hva er den viktigste egenskapen til diode?

# Spørsmål

- Når leder en diode strøm, og når sperrer den?
- Hva skjer når en diode er i breakdown?
- Hva er årsaken til potensialbarrieren?
- Hvilke 4 ulike diodemodeller kan man ha?
- Går det strøm i foroverretningen når spenningen over dioden er mindre enn  $V_b$ ?
- Går det strøm i bakoverretningen når spenningen er negativ (men større enn breakdown-spenningen)?

# Spørsmål

- Hva er en halvbølgelikeretter?
- Hva er rippelspanning?
- Hva er en helbølgelikeretter?
- Er en helbølgelikeretter god nok som et DC power-supply?
- Hva er en Zener-diode?
- Hva er det normale operasjonsområdet til en Zener-diode?
- Hva er en lysdiode?
- Hva er en fotodiode?
- Lyser en fotodiode?



# Oppsummeringsspørsmål



# Spørsmål 1

En halvleder

- a) Leder strøm bedre enn en leder
- b) Kan lede strøm i begge retninger
- c) Leder strøm bedre enn en isolator
- d) Kan ikke styres med strøm eller spenning

## Spørsmål 2

En majoritetsbærer vil si at

- a) Elektroner er hovedladningsbærere
- b) Hull er hovedladningsbærere
- c) Det enten er overvekt av hull eller elektroner som ladningsbærere
- d) Det ikke er frie elektroner tilgjengelig

## Spørsmål 3

I deplesjonsområdet er det

- a) Overskudd på majoritetsbærere
- b) Overskudd på minoritetsbærere
- c) Overskudd av elektroner
- d) En potensialforskjell mellom p- og n-områdene

## Spørsmål 4

Potensialbarrieren i en halvleder oppstår fordi

- a) Elektroner driver over mot det p-dopede området
- b) Hull driver over mot det n-dopede området
- c) Elektroner driver over mot det n-dopede området
- d) Hull driver over mot det p-dopede området

## Spørsmål 5

I en diode er

- a) Strømmen i revers-retningen lik 0
- b) Deplesjonsområdet bredere under «reverse bias» enn under «forward bias»
- c) Potensialbarrieren alltid 0.7v
- d) Det en lineær sammenheng mellom strøm og spenning i foroverretningen

## Spørsmål 6

En likeretter

- a) Endrer polariteten til en spenning
- b) Endrer retningen til strøm
- c) Slipper igjennom bare likespenninger
- d) Slipper bare igjennom strøm i en retning og sperrer i den motsatte retningen

## Spørsmål 7

Zenerdioder

- a) Kan ikke brukes i spenningsreferanser
- b) Tåler høyere reversspenning enn vanlige dioder
- c) Ødelegges hvis den opererer i foroverretningen
- d) Kan ikke brukes i «breakdown»-området

## Spørsmål 8

Doping

- a) Vil si å tilføre frie elektroner
- b) Vil si å fjerne frie elektroner
- c) Vil si å tilføre urenheter for å øke ledningsevnen
- d) Kan bare tilføres til silisium
- e) Er ikke å anbefale

## Spørsmål 9

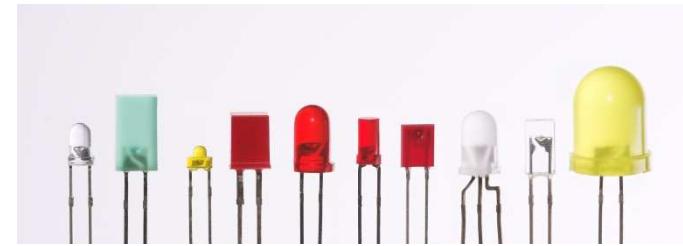
En diode

- a) Leder strøm i foroverretningen og sperrer i returretningen
- b) Sperrer strøm i foroverretningen og leder strøm i returretningen
- c) Leder strøm i foroverretningen hvis spenningen over dioden er lavere enn potensialbarrieren
- d) Sperrer i foroverretningen hvis spenningen over dioder er høyere enn potensialbarrieren

## Spørsmål 10

Rippespenning

- a) Er avviket fra en ren DC-spenning
- b) Skyldes at barrierespenningen er større en 0v
- c) Øker ved bruk av glatte-kondensatorer
- d) Finnes bare i fullbølge-likerettere



# Forelesning nr.9 INF 1411

## Elektroniske systemer

Transistorer



# Dagens temaer

- Historisk overblikk
- Bipolare transisitorer (BJT)
- Transistorforsterkere
- Presentasjon 4. obligatoriske labøvelse
- Dagens temaer er hentet fra kapittel 16.1-16.4

# Introduksjon

- Transistoren er den viktigste typen halvleder
- En transistor er en strøm- eller spenningsstyrt strømkilde
- I analog elektronikk brukes transistorer til bla forsterkere og filtre
- I digital elektronikk brukes transistorer for å lage logiske porter (AND, OR og NOT) og hukommelse (RAM/ROM)
- Med transistorer kan man lage andre typer kretselementer
  - Dioder
  - Kondensatorer
  - Resistorer

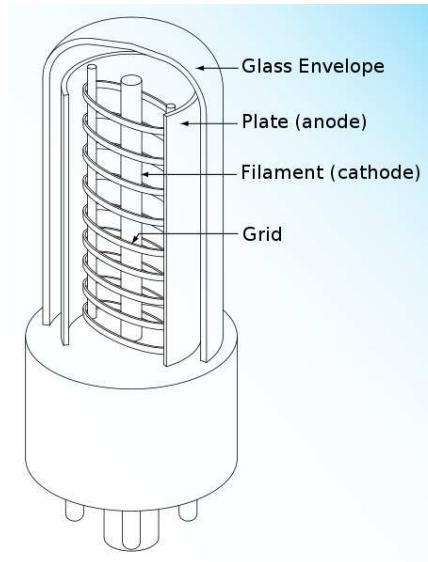
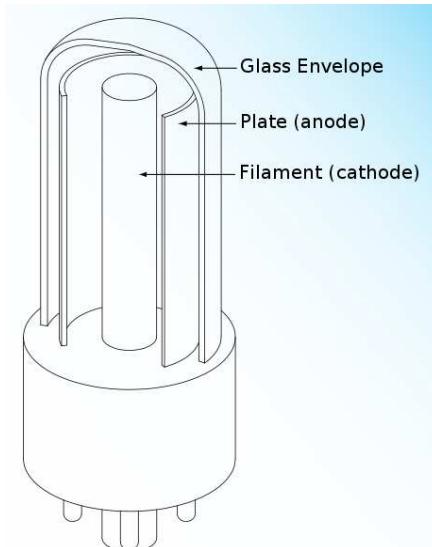
# Vakuumrør

- Forløperen til transistoren er vakuumrøret, også kalt radiorør
- Radiorøret ble oppfunnet tidlig på 1900-tallet og gjorde radiosendinger og – mottak over større avstander mulig fordi man kunne forsterke radiosignalene
- Radiorøret kan enten brukes som en forsterker eller diode og baserer seg på elektroner som beveger seg i et vakuum



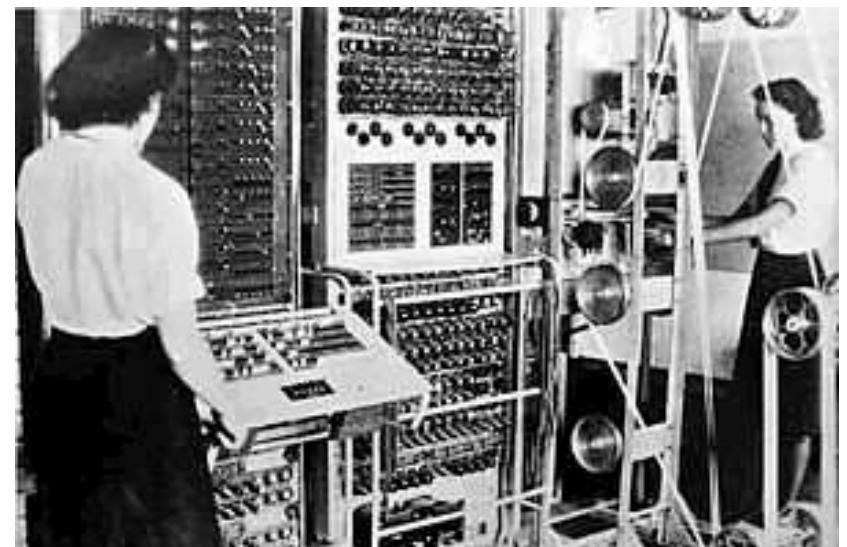
# Vakuumrør (forts)

- Radiorøret består av tre deler: *Anode*, *katode* og *gitter*
- Hvis *katoden* varmes opp vil elektroner frigjøres og bevege seg over til *anoden* hvis katoden er mer negativ enn anoden. Det vil da gå en strøm fra anoden til katoden
- *Gitteret* kan brukes til å styre mengden elektroner fra katoden til anoden



## Vakuumrør (forts)

- Radiorøret var enerådende i analog elektronikk og i de første datamaskinene frem til 50-tallet
- Den første moderne datamaskinen (von Neumann-arkitektur) var Colossus M1 som bestod av rundt 1500 rør
- Colossus ble brukt til kryptoanalyse av britene i 2. verdenskrig
- Strømforbruket var på 15kW



## Vakuumrør (forts)

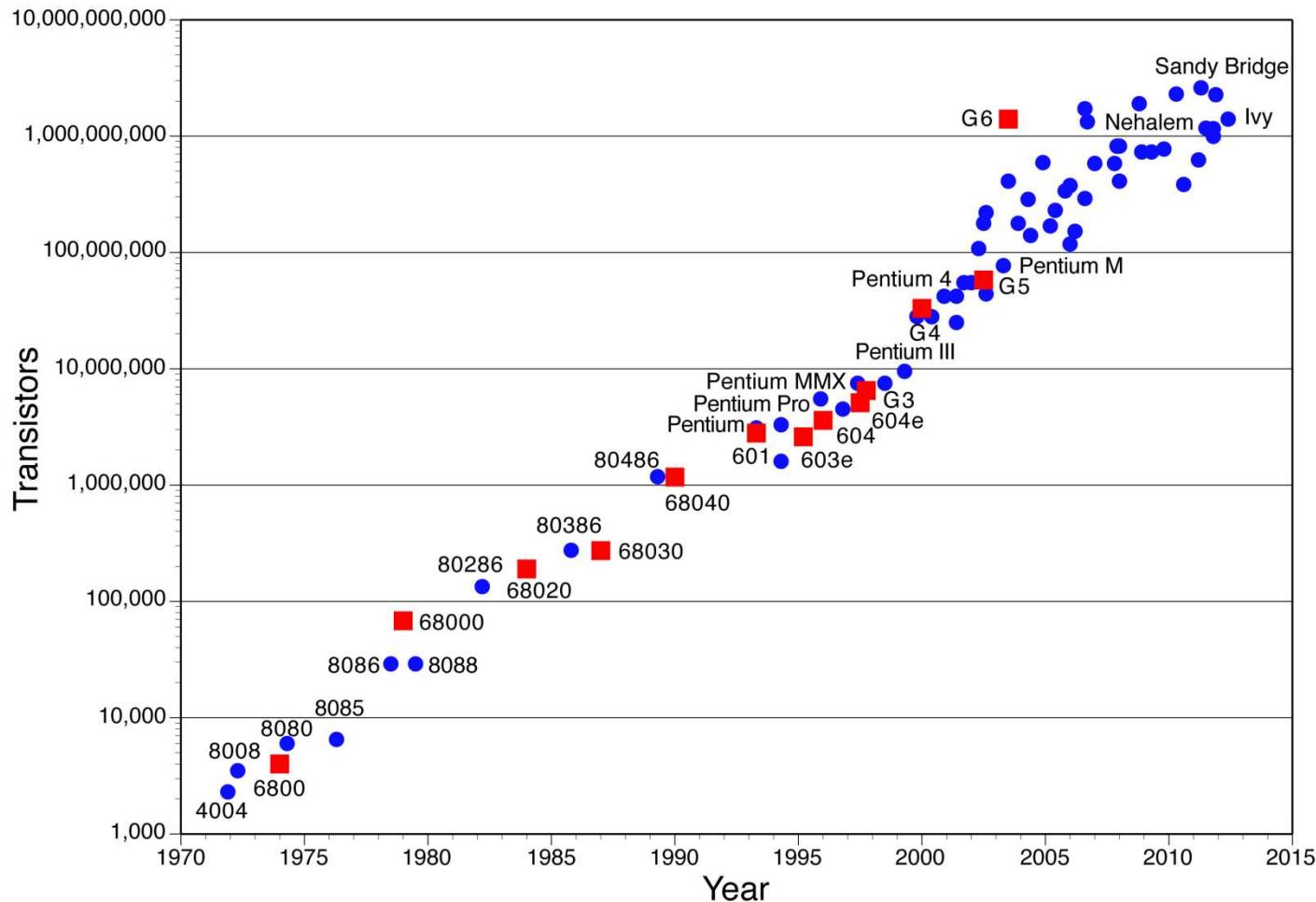
- Radiorøret brukes fortsatt i noen anvendelser, bla i høy-kvalitets audioforsterkere og radiosendere med høy effekt
- Radiorør har en rekke ulemper
  - Stor fysisk størrelse
  - Stort effektforbruk som forsvinner i varme (40-70%)
  - Upålitelig (vakuum ødelegges)
  - Degradring over tid (soting etc)
  - Treg oppstart (oppvarming av katode)
  - Generelt langsomme (som brytere)
  - Trenger relativt høy spenning på anoden (fra 22v og oppover til 130v)

# Transistoren

- Transistoren avløste radiorøret som den mest brukte halvleder på slutten av 50-tallet
- Transistorens halvlederegenskaper baserer seg på elektriske egenskaper i fysiske overganger mellom ulike materialer, f.eks silisium, germanium eller silisiumkarbid mot bor, arsen eller silisium
- Transistorer blir stadig mindre
  - Flere transistorer får plass på samme chip (et par milliarder!)
  - Effektforbruket synker
  - Hastigheten øker (tiden det tar å slå av/på strømmen)

# Transistoren – Moores lov

- Moores lov fra 1956:  
Antall transistorer på  
en integrert krets vil  
dobles hvert annet år
- Regnekraft og  
tilgjengelig  
hukommelsedobles  
ca hver 18.måned
- Begge deler er  
eksponentiell vekst



# Transistoren – Moores lov i praksis

- Bærbar fra 1982 med 4MHz CPU vs iPhone5 2012 med 412 MHz CPU 1.3 GHz dual core
  - 100 ganger tyngre
  - 500 ganger større volum
  - 10 ganger dyrere (justert)
  - 1/325 av klokkefrekvensen



# Moores lov - fremtiden

## 1 The accelerating pace of change ...



## 2 ... and exponential growth in computing power ...

Computer technology, shown here climbing dramatically by powers of 10, is now progressing more each hour than it did in its entire first 90 years

### COMPUTER RANKINGS

By calculations per second per \$1,000



**Analytical engine**  
Never fully built, Charles Babbage's invention was designed to solve computational and logical problems



### Colossus

The electronic computer, with 1,500 vacuum tubes, helped the British crack German codes during WW II



### UNIVAC I

The first commercially marketed computer, used to tabulate the U.S. Census, occupied 943 cu. ft.



### Apple II

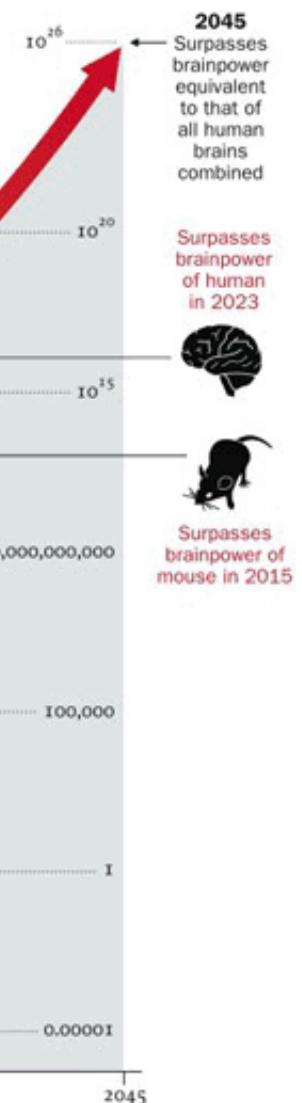
At a price of \$1,298, the compact machine was one of the first massively popular personal computers



### Power Mac G4

The first personal computer to deliver more than 1 billion floating-point operations per second

## 3 ... will lead to the Singularity



# Transistoren (forts)

- Sammenlignet med radiorøret har transistoren en lang rekke fordeler:
  - Liten størrelse og minimal vekt
  - Enkel og fullautomatisert produksjonsprosess
  - Lav arbeidsspenning (3.3 v eller lavere)
  - Ingen oppvarmingstid
  - Lavt effektforbruk og lite varmetap
  - Høy pålitelighet og fysisk robust
  - Lang levetid
  - Tåler mekanisk sjokk og vibrasjon

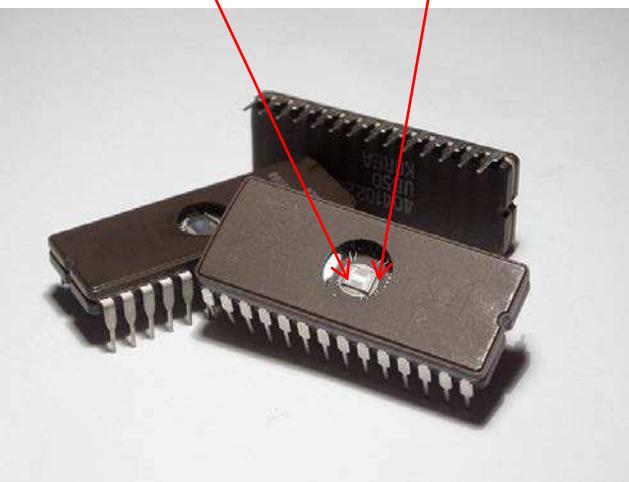
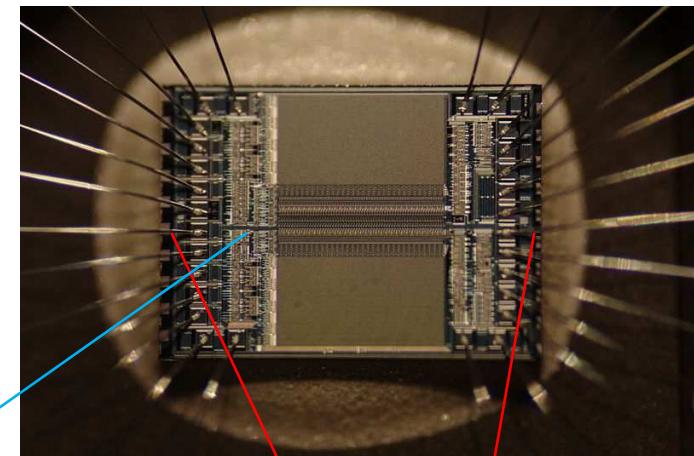
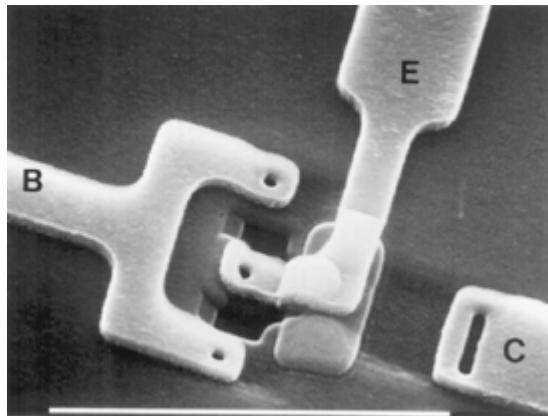
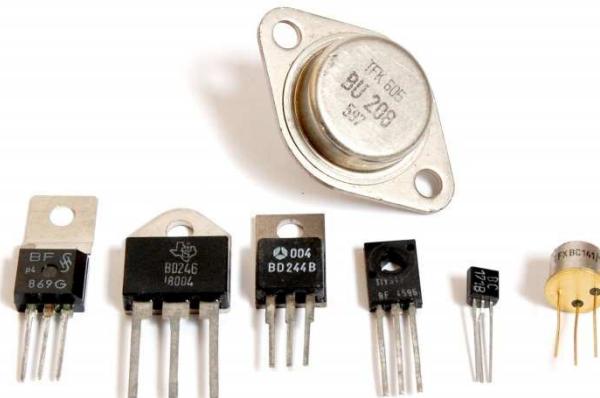


# Transistoren (forts)

- Transistoren har også noen ulemper sammenlignet med radiorør
  - Kan operere på maks 1000 volt
  - Vanskelig å lage transistorer for både høy frekvens og høy effekt samtidig (f.eks ved kringkasting)
  - Transistorer er mer følsomme for kraftig stråling og elektriske utladninger i omgivelsene
  - Ikke mulig å bytte ut enkelt-transistorer hvis de feiler; Hele kretsen må kastes

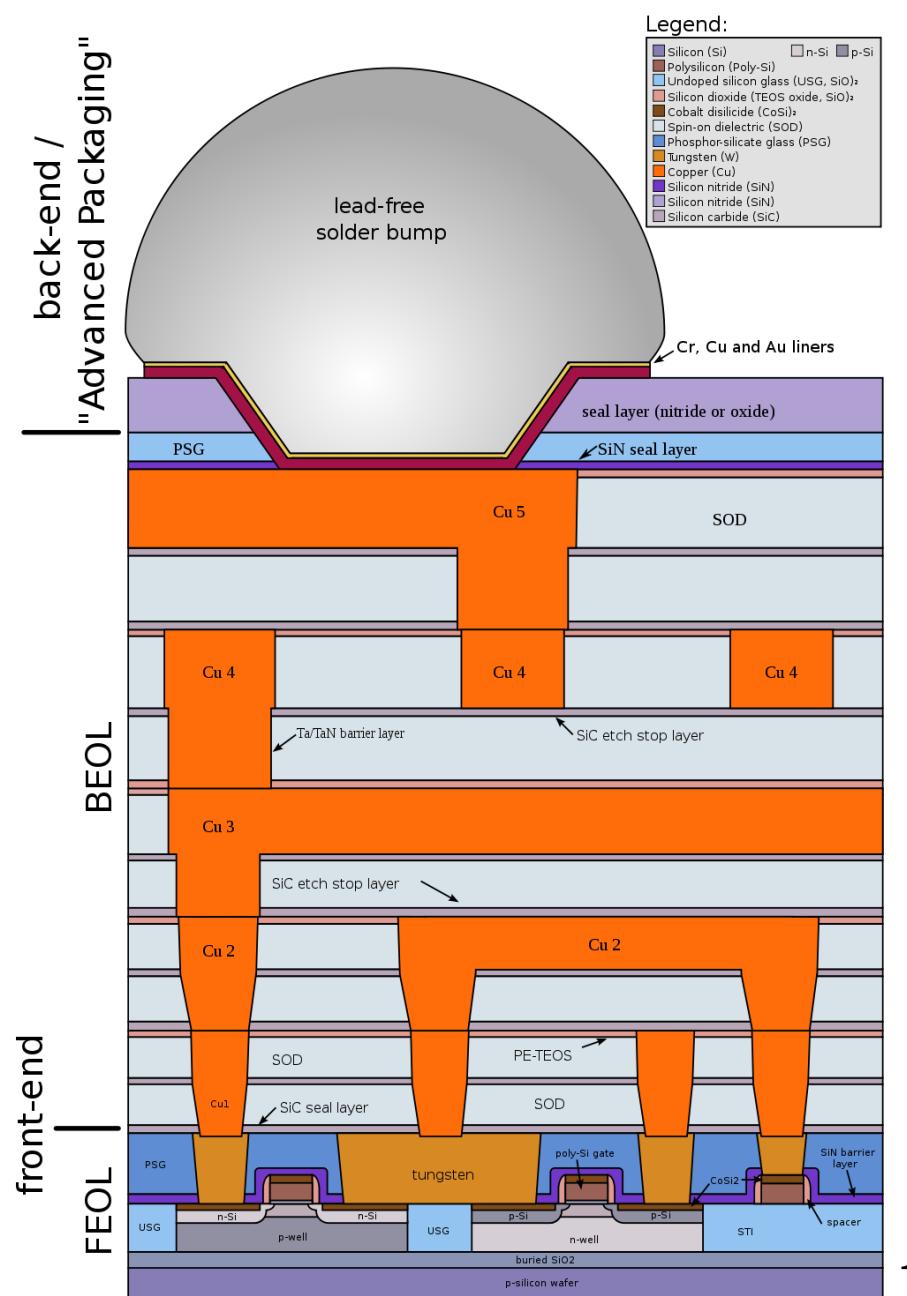
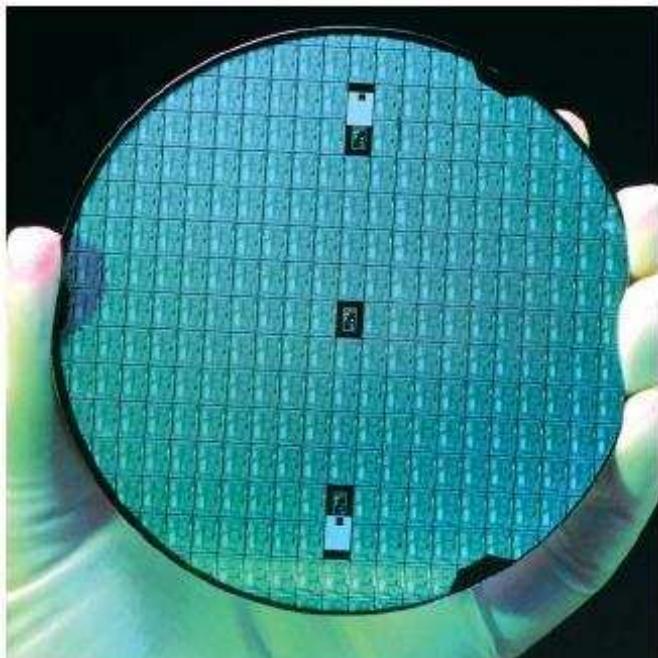
# Produksjon av transistorer

- Transistorer lages enten som diskrete komponenter eller integrerte kretser



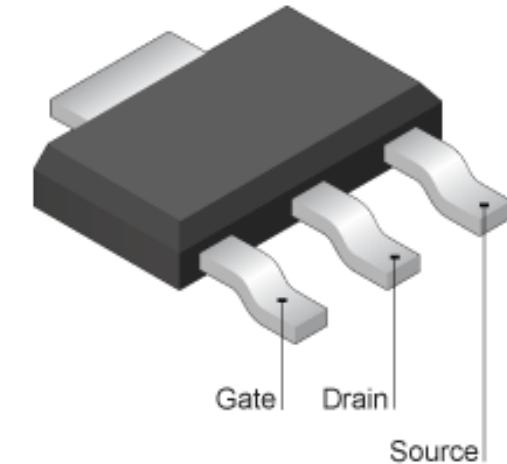
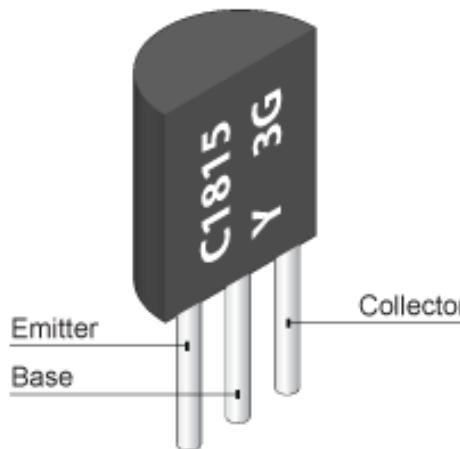
# Produksjon av transistorer

- Transistorer på integrerte kretser består av mange lag
- En «wafer» består av mange integrerte kretser



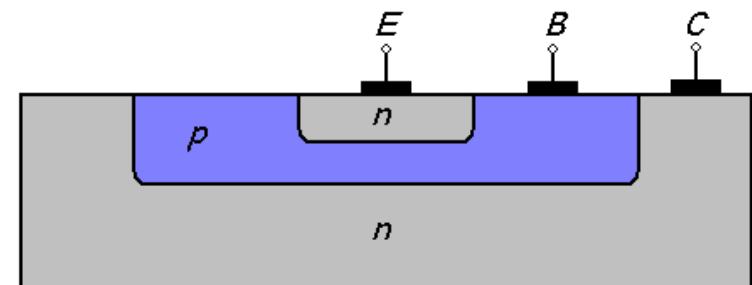
# Transistorens to hovedanvendelser

- Transistoren brukes stort sett som enten forsterker eller elektrisk styrt bryter
- Transistorer lages i mange ulike teknologier og hver type har sine anvendelsesområder
- **Bipolare** (BJT) brukes hovedsaklig til forsterkere i analoge kretser, mens **felteffekttransistorer** (FET) brukes som brytere i logiske porter i digitale kretser



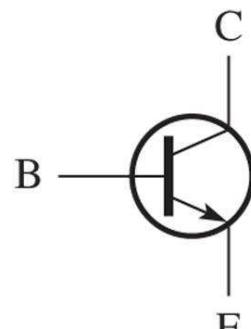
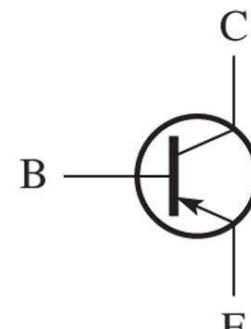
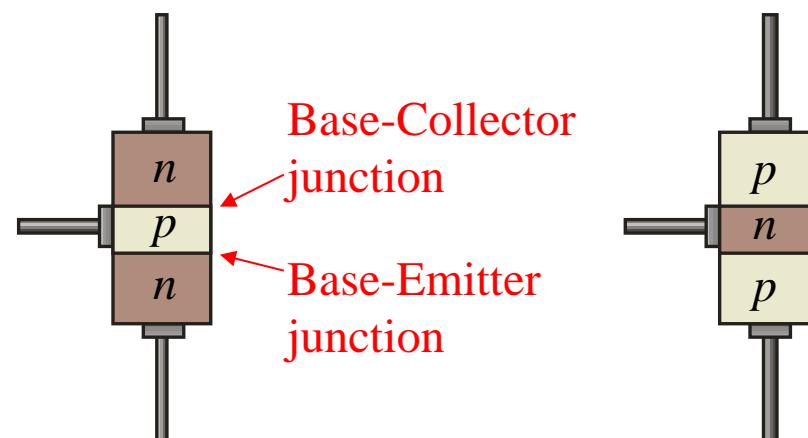
# Bipolare transistorer (BJT)

- Bipolare transistorer (BJT) kan tenkes på som strøm-kontrollerte strømkilder
- Bipolare transistorer finnes både som diskrete transistorer og på integrerte kretser
- En BJT består av tre terminaler: *Base*, *emitter* og *kollektor*
- En BJT er enten av typen *pnp* eller *npn*
- En BJT er to dioder med koblet sammen, med enten felles p- eller n-region



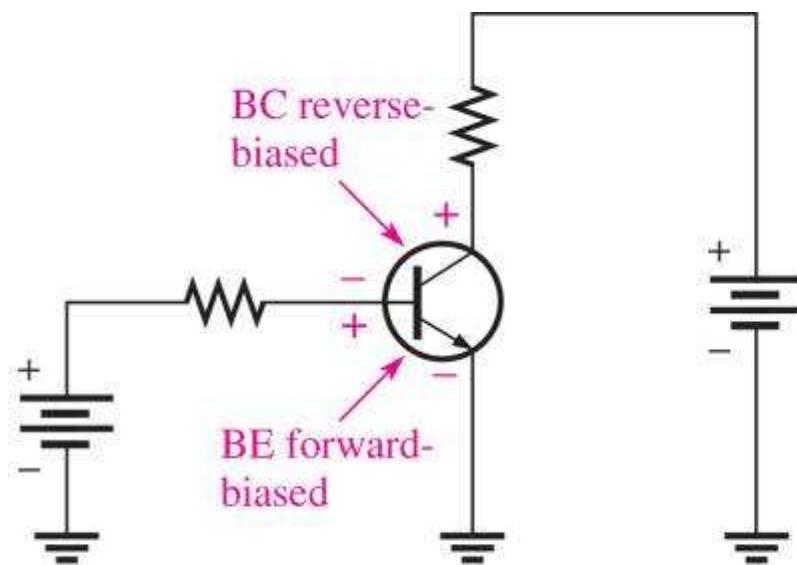
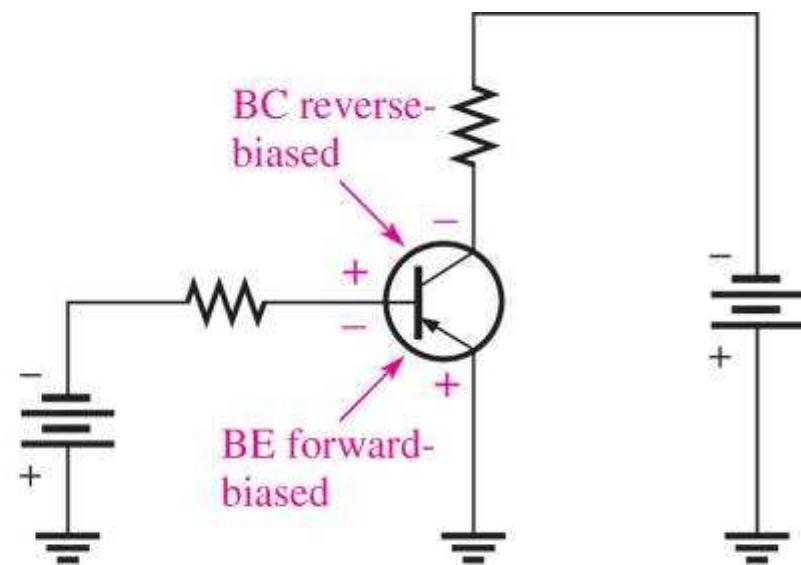
# Bipolare transistorer (forts)

- BJT har to pn-overganger, og baseregionen er lett dopet, mens emitter- og kollektor-regionen er tungt dopet. Baseregionen er mye tynnere enn de andre

(a) *npn*(b) *pnp*

# Operasjonspunkt i bipolare transistorer

- Under normal drift er base-kollektor (BC) overgangen reverse-biased, mens base-emitter (BE) er forward-biased både for PNP og NPN-type transistorer

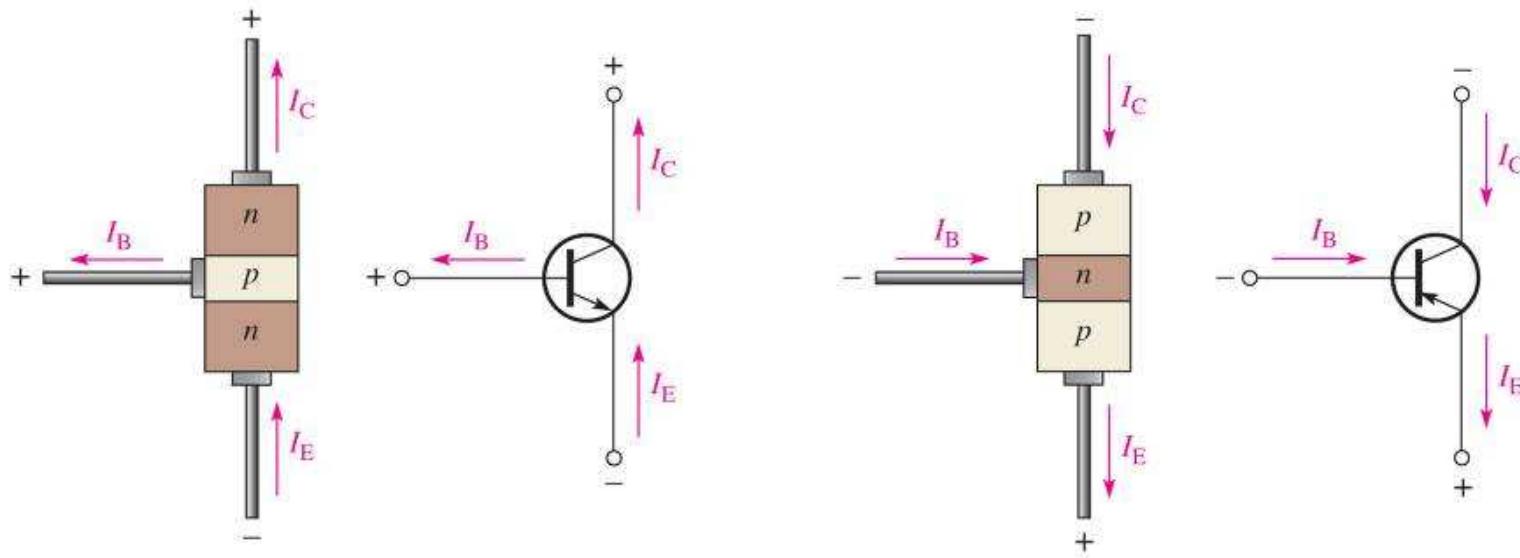
(a) *npn*(b) *pnp*

# Strømmer i bipolare transistorer

- KCL gjelder som vanlig
  - Strømmene er gitt ved følgende likninger

$$I_E = I_C + I_B \quad I_C = \alpha_{DC} I_E \quad I_C = \beta_{DC} I_B$$

- $\alpha_{DC} = I_C/I_E$  og  $\alpha_{ac} = \Delta I_C / \Delta I_E$
- $\beta_{DC} = I_C/I_B$  og  $\beta_{ac} = \Delta I_C / \Delta I_B$
- Typiske verdier for  $\alpha$  er 0.950-0.995, mens  $\beta$  er 20-300



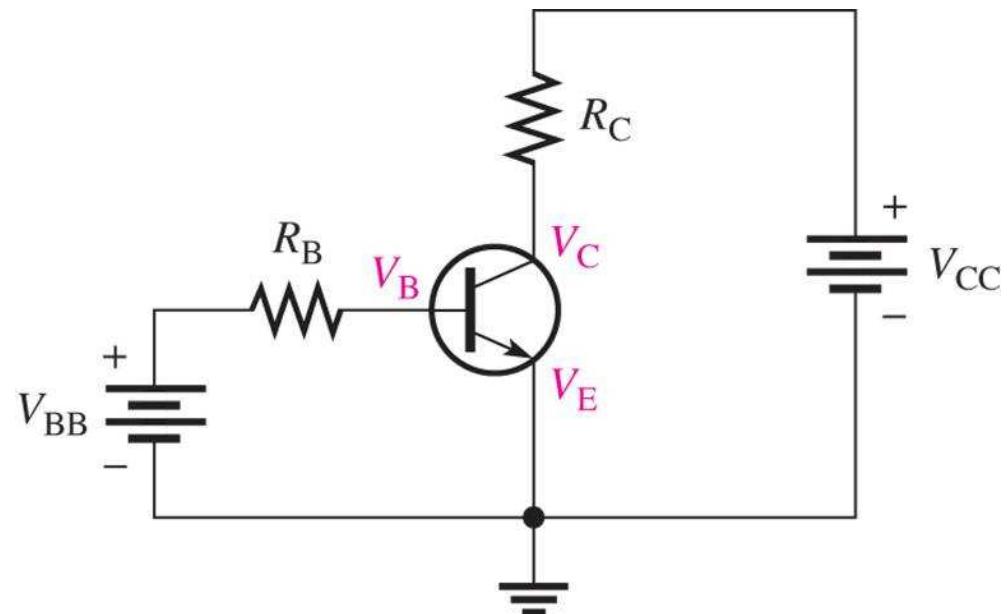
# Spenninger i bipolare transistorer

- For en BJT som er i korrekt operasjonsområde, er spenningene gitt av (KVL gjelder)

$$V_c = V_{cc} - I_c R_c$$

$$V_B = V_E + V_{BE}$$

- $R_B$  og  $R_C$  reduserer  $I_B$  og  $I_C$  slik at transistoren ikke ødelegges



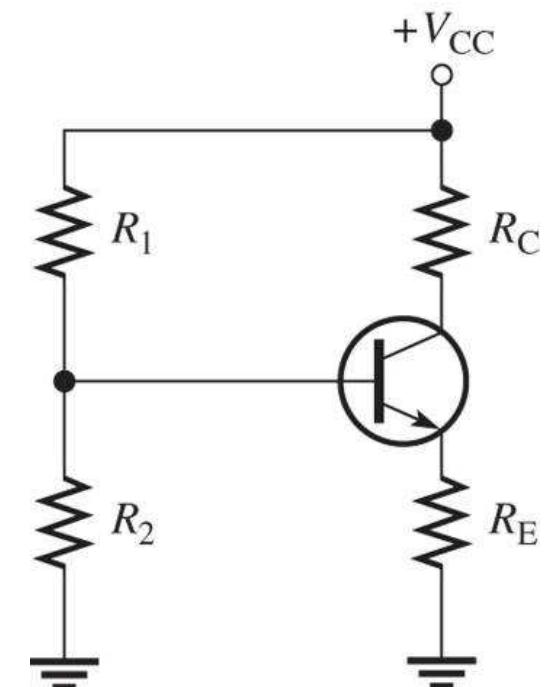
# Spenninger i bipolare transistorer (forts)

- For at en transistor skal fungere som en strømforsterker, må  $V_B$ ,  $V_C$  og  $V_E$  ligge i korrekt område
- Vanligst med spenningsdeler-nettverk med mostander og en felles forsyningsspenning

$$R_{IN} \cong \beta_{DC} R_E$$

$$V_B \cong \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) V_{CC}$$

$$V_E = V_B - 0.7v$$



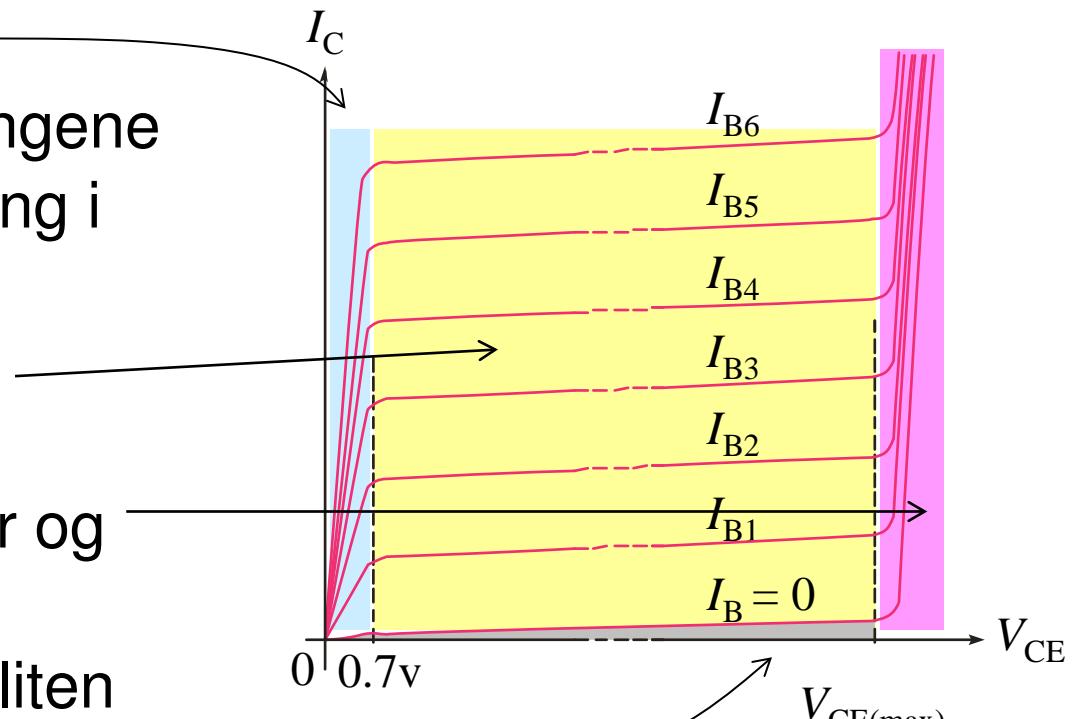
# Transistor-karakteristikker

- Når man skal bruke en transistor, må man sørge for at den opererer i det korrekte området
- Hva som er korrekt område avhenger av anvendelsen, f.eks analogforsterker eller digital bryter
- En transistor opererer normalt i ett av tre områder:
  - Avstengt («Cut-off»)
  - Lineært («Linear»)
  - Metning («Saturation»)
- I tillegg kan den være i *breakdown*, men kan da bli ødelagt av for høy strøm

# Sammenheng strøm-spenning

- Operasjonsområde og strømforsterkning er bestemt av  $I_C$  som funksjon  $V_{CE}$  og  $I_B$

- Metning:** Begge pn-overgangene er forward-biased; liten økning i  $V_{CE}$  gir stor økning i  $I_C$
- Lineært:**  $I_C$  er nesten ikke avhengig av  $V_{CE}$ , kun av  $I_B$
- Breakdown:**  $I_C$  er svært stor og ikke lenger avhengig av  $I_B$
- Avstengt:**  $I_B=0$  og  $I_C$  veldig liten

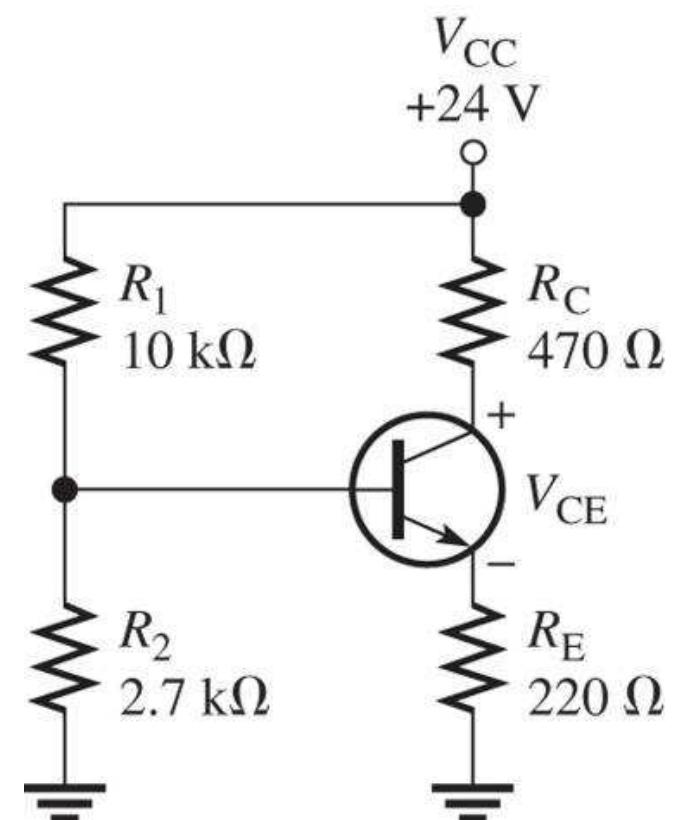


# Forsterkere

- Forsterkere klassifiseres i ulike klasser, avhengig av effektbehov, forsterkning, forvrengning osv:
  - **Klasse A:** 100% av input-signalen benyttes, dvs at transistoren leder i det lineære området gjennom hele syklusen til input ( $360^\circ$ )
  - **Klasse B:** 50% av input-signalen benyttes, dvs at transistoren leder i det lineære området gjennom halve syklusen til input ( $180^\circ$ ), og er i cut-off (ingen strøm) den resterende tiden
  - **Klasse AB:** To overlappende klasse B, dvs at hver klasse B leder mer enn 50% av tiden
  - **Klasse C:** Mindre enn 50% av inputsignalen benyttes
  - **Klasse D:** Mer enn 90% av signalet brukes i høyeffekt-applikasjoner

# BJT klasse A-forsterker i dc-modus

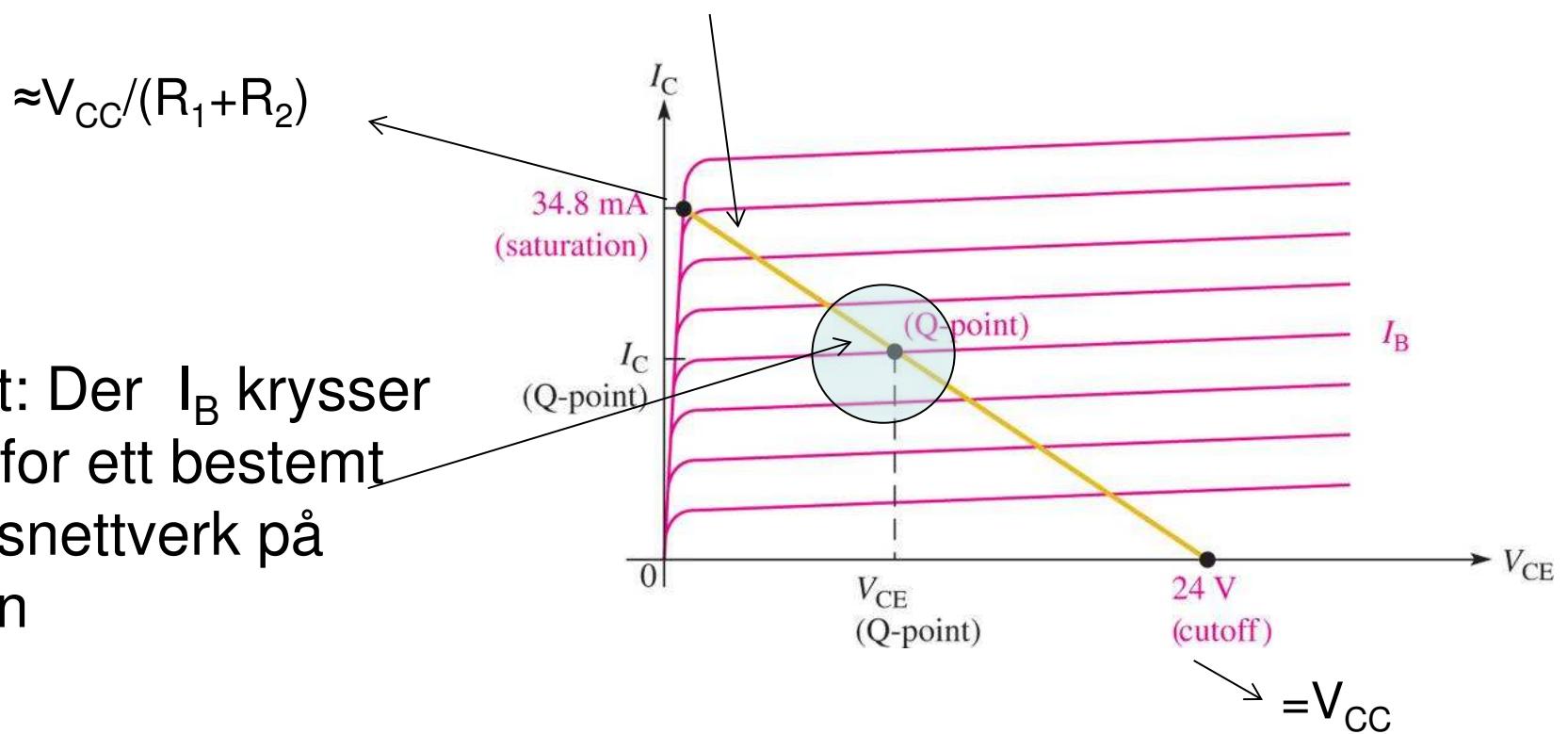
- En klasse A forsterker lager en kopi av et svakt ac-input signal, men med større amplitude opptil 1W effekt
- Fremgangsmåte for design:
  - Først bestemmes maksimalt tillatt strøm  $I_C$
  - Deretter beregnes  $R_1$  og  $R_2$  for å lage  $I_B$
  - Til slutt bestemmes minimal og maksimal  $V_{CE}$



# BJT klasse A-forsterker dc-modus (forts)

- Linjen som angir hvordan  $V_{BE}$  og  $I_C$  varierer for de gitte motstandsverdiene kalles for *dc-lastlinje*

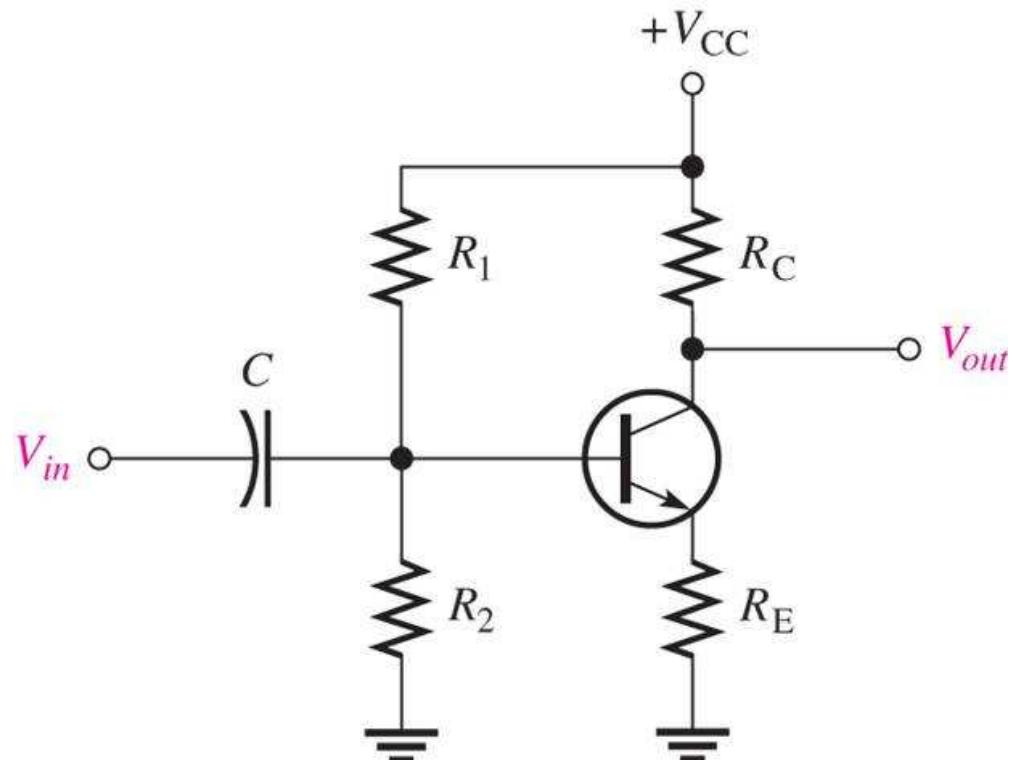
- Q-punktet: Der  $I_B$  krysser lastlinjen for ett bestemt motstandsnettverk på inngangen



# Strømforsterkning med ac-input

- Deretter kobles et ac-signal til baseinngangen via en koblingskondensator slik at dc-operasjonsområdet ikke påvirkes
- Strømforsterkningen i denne kretsen er gitt av

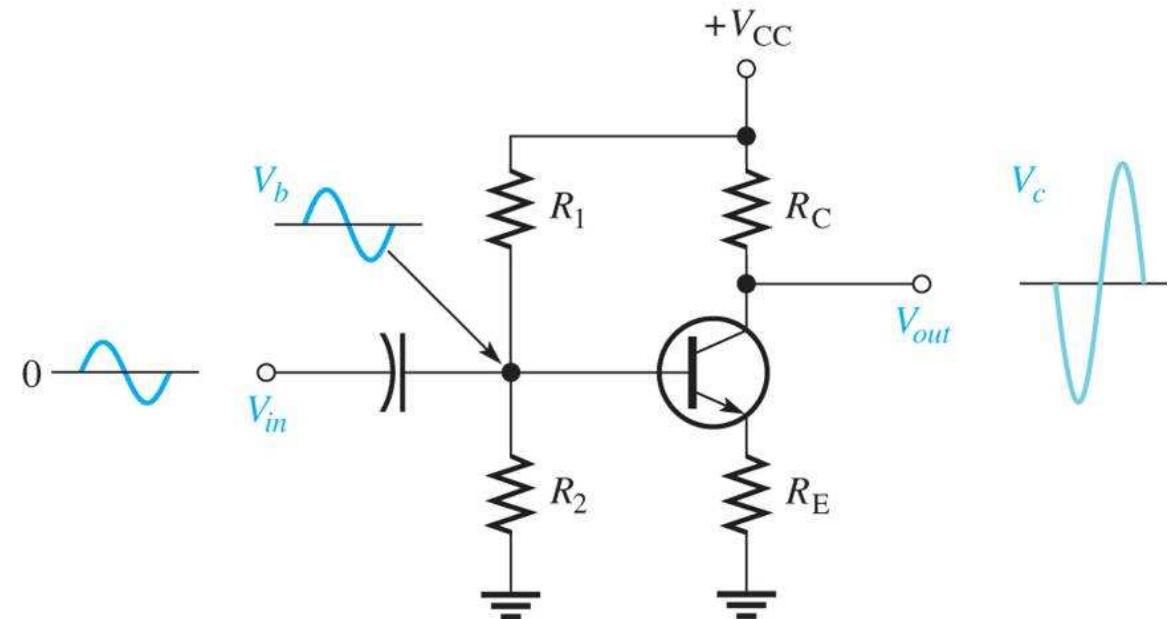
$$\beta_{ac} = \frac{I_c}{I_b} \approx \beta_{DC}$$



# Spenningsforsterkning med ac-input

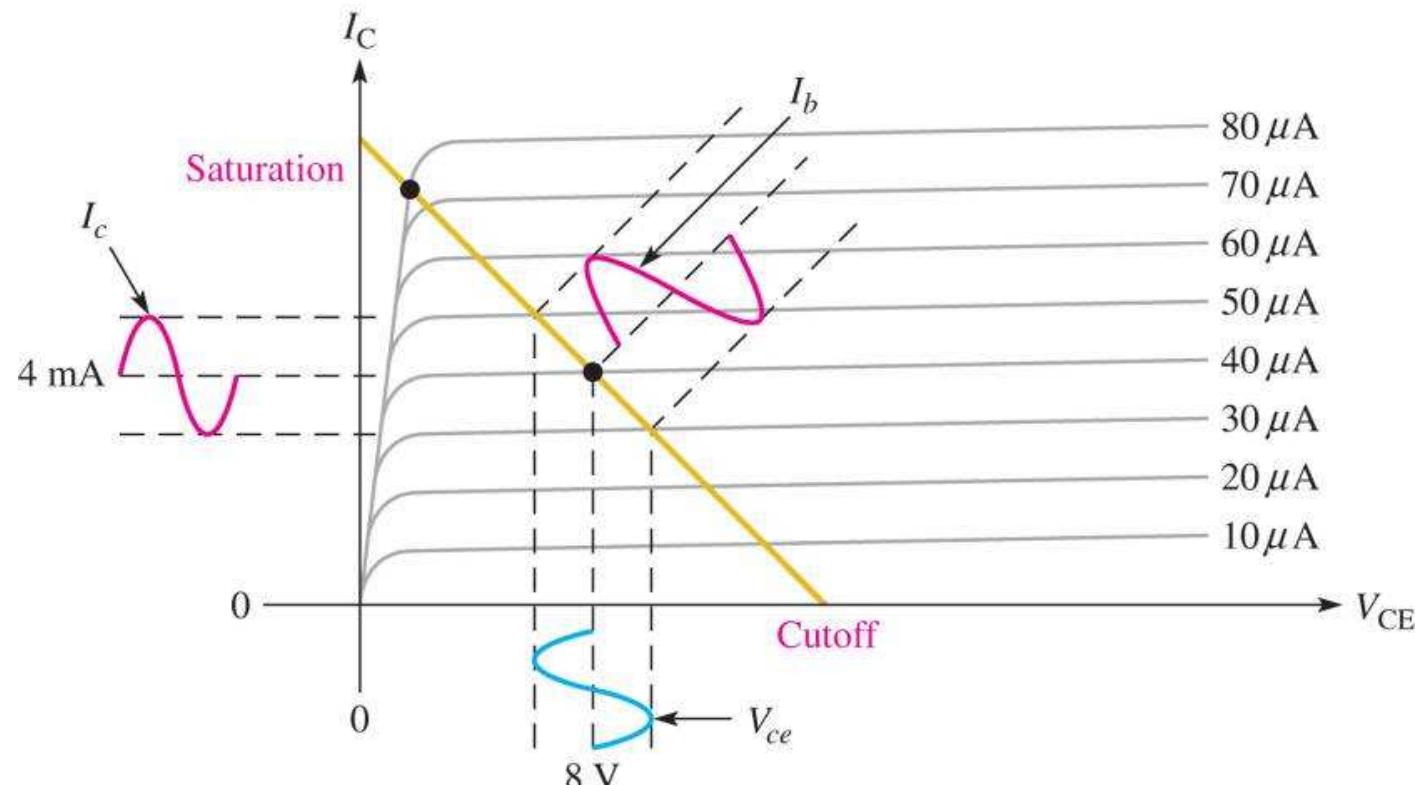
- Når base-emitter overgangen er forward-biased, er  $V_b$  tilnærmet lik  $V_e$ .
- Dermed er spenningsforsterkningen  $A_v$  gitt av

$$A_v \approx \frac{V_c}{V_e} = \frac{I_c R_c}{I_e R_e} \approx \frac{R_c}{R_e}$$



# Oppførsel langs lastlinjen

- Man ønsker lineær sammenheng mellom inngang og utgang
- For en bestemt krets og min-max område for inputsignalet kan man plotte  $I_b$ ,  $I_c$  og  $V_{ce}$  langs lastlinjen og sjekker for linearitet

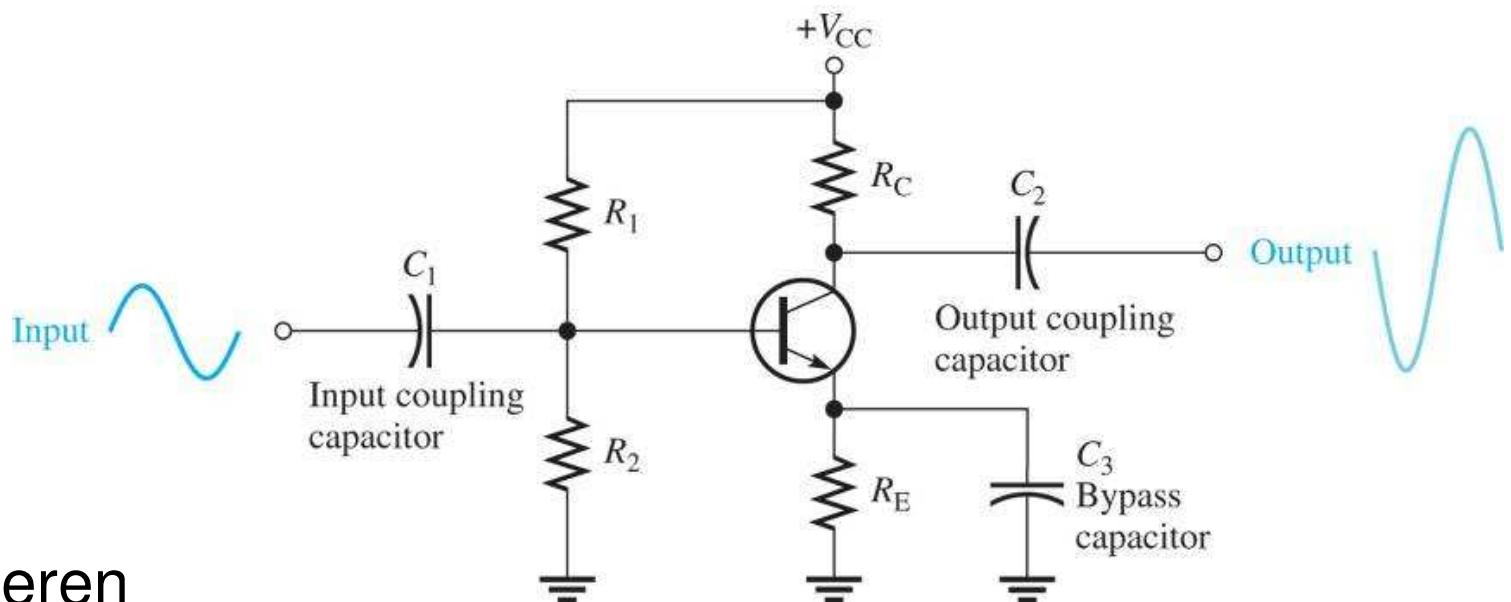


# Felles emitter-forsterker

- En felles-emitter forsterker (CE) isolerer forsterkeren både fra input og output DC-last vha kondensatorer
- I tillegg gjør en *bypass*-kondensator at spennings-forsterkningen øker

$$A_v = \frac{R_c}{r_e}$$

$r_e$  er den indre motstanden gjennom emitteren

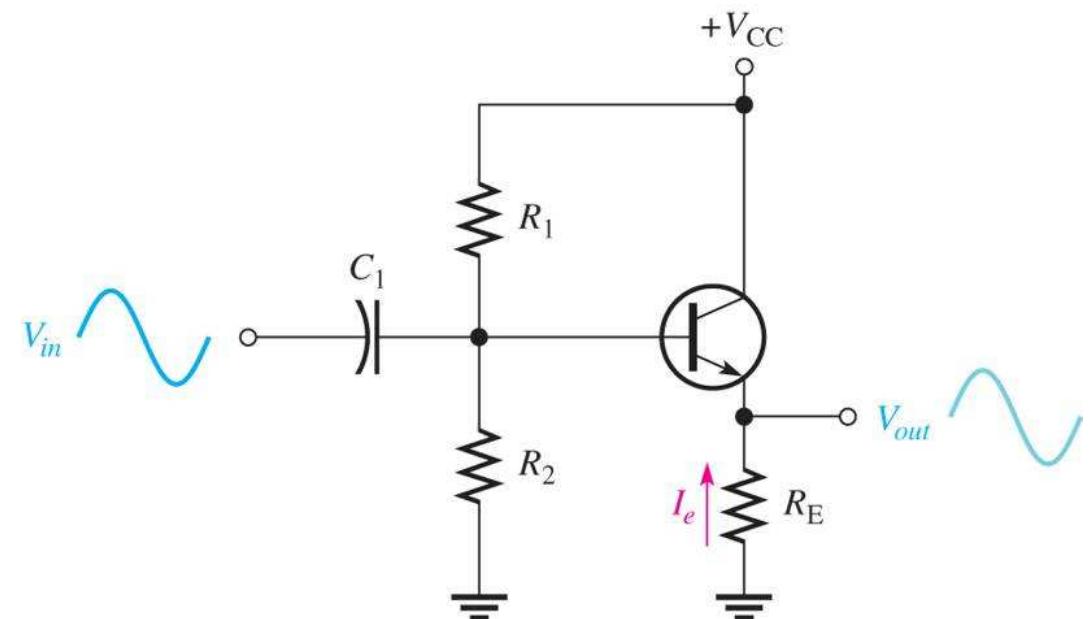


# Felles kollektor-forsterker

- En annen type forsterker er felles-kollektor (CC) eller emitter-følger forsterker hvor  $V_{out}$  tas fra emitter og ikke kollektor
- Felles-kollektorförsterkeren har en spenningsförstärkning på ca 1, mens strömförstärkningen är större än 1

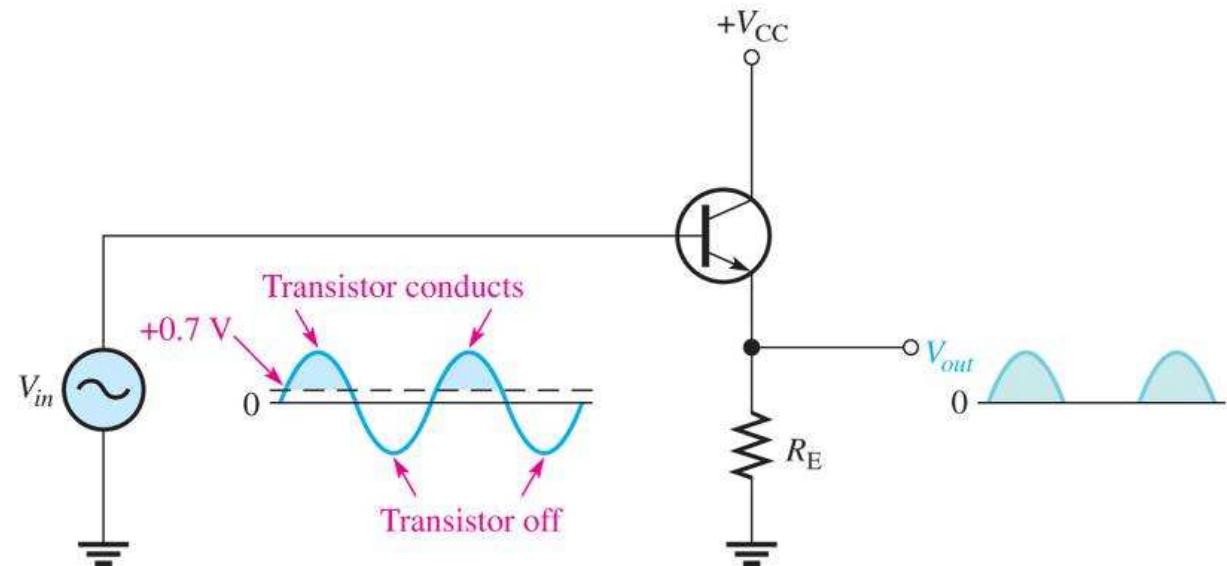
$$A_v = \frac{R_E}{r_e + R_C} \quad A_i = \frac{I_e}{I_s}$$

$$I_s = \frac{V_s}{R_{in(tot)}}$$



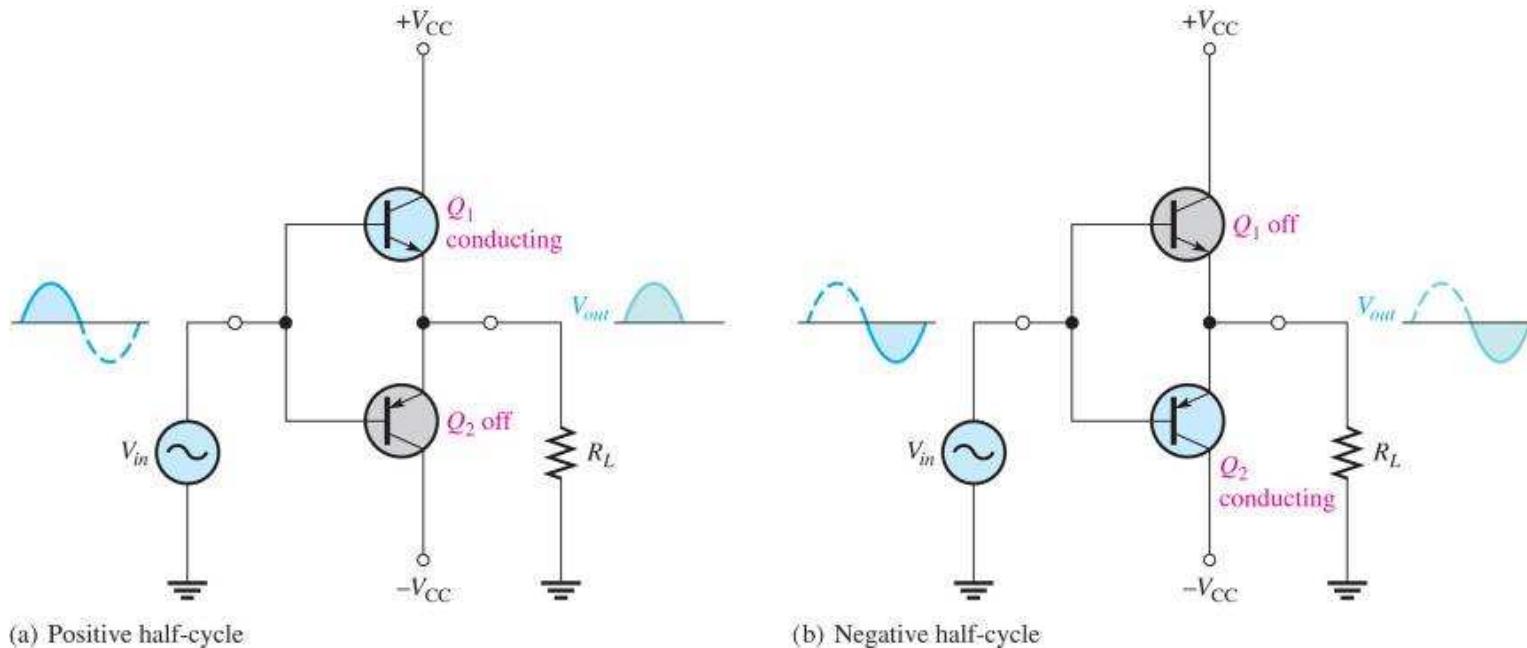
# BJT klasse B-forsterker

- En enkel klasse B forsterker bruker bare halve inputsignalet, dvs 180 grader
- Klasse B-forsterkere gir mer output-effekt enn en klasse A
- Nesten halvparten av tiden er transistoren i cutoff og resten av tiden leder den



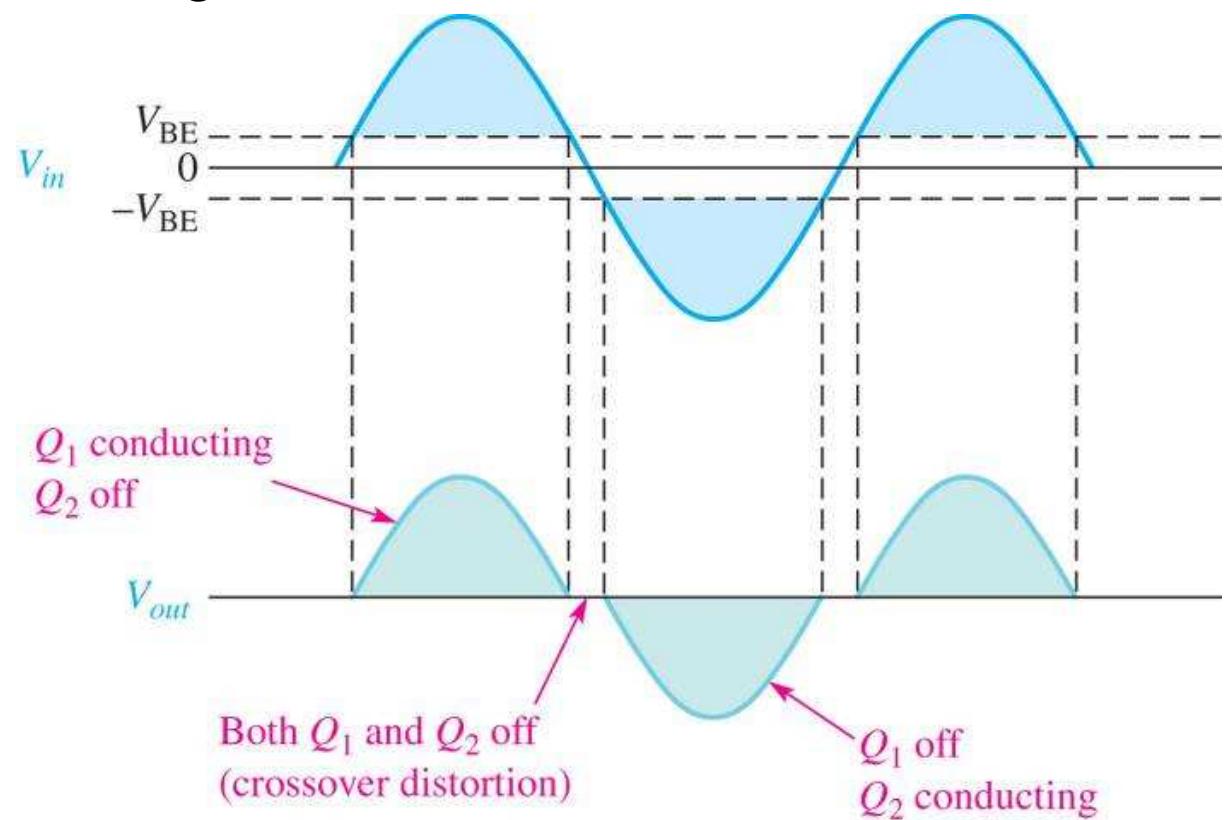
# Push-pull

- For å gjøre en klasse B-forsterker mer anvendelig, lager man et komplementært trinn med én npn- og én pnp-transistor
- I den ene halvperioden leder den ene transistorer, mens den andre leder i motsatt halvperiode



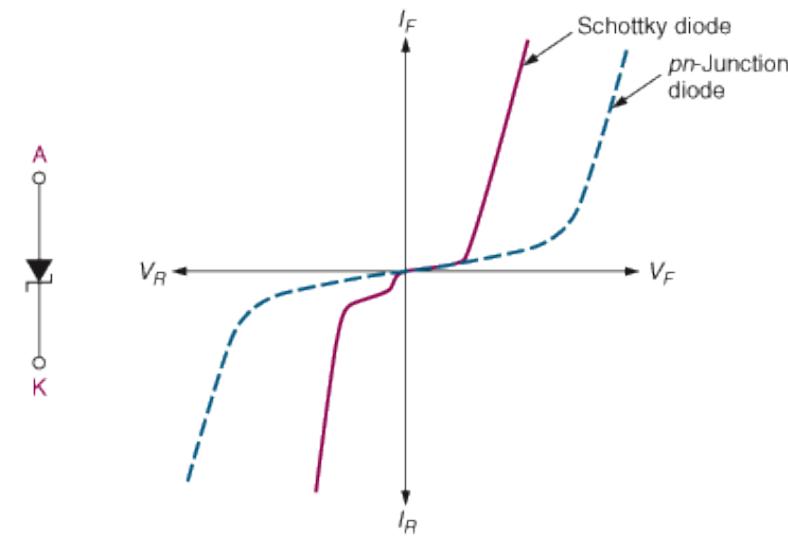
# Push-pull (forts)

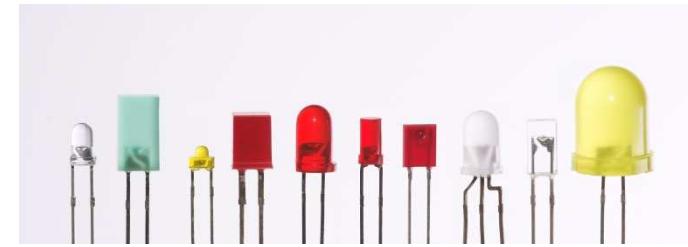
- Pga forward bias-spenningene er det områder hvor begge transistorene er i cutoff, og dette kalles crossover-forvrengning



# Presentasjon labøvelse 4

- Oppgaven handler om ulike typer dioder og anvendelser:
  - Oppsett og måling på LED (lysdioder) og V-I karakteristikk
  - Måle på Zenerdioder og bestemme Zener-spenningen
  - Lage en halvbølgelikeretter med kondensator og Schottky-diode
  - Lage en spenningsregulator med Schottky-diode, kondensator og BJT-transistor
- NB: Det er **VIKTIG** at dere har lest stoffet om dioder, likerettere og spenningsregulatorer FØR dere begynner på labøvelsen!





# Oppsummeringsspørsmål

## Kapittel 16



# Spørsmål

- Hvilke to typer bipolare transistorer finnes det, og hva er forskjellen?
- Hva heter de tre terminalene på en bipolar transistor?
- For at det skal gå en kollektorstrøm, hvordan må base-emitter og base-kollektor være biased?
- Hvor stort er spenningsfallet mellom base og emitter?
- Hva er sammenhengen mellom
  - Base-, emitter- og kollektorstrømmene?
  - Base- og kollektorstrømmene?
  - Kollektor- og emitterstrømmene?
- Hvilke fire operasjonsområder kan en BJT være i?

# Spørsmål

- Hva er forskjellen mellom en klasse A og klasse B forsterker?
- Hva er en DC lastlinje?
- Hva er Q-punktet?
- Hva er ytterpunktene på lastlinjen?
- Hvorfor kobler man input til en ac-forsterker via en kondensator?
- Hva er strømforstrekningen og spenningsforsterkningen for klasse-A forsterkeren basert på en BJT?

# Spørsmål

- Hva er et radiorør?
- Hva er en transistor?
- Hvilke fordeler har radiorør (sammenlignet med transistorer)?
- Hvilke fordeler har transistoren (sammenlignet med radiorør)?
- Nevn 3 ulemper med radiorør
- Nevn 3 ulemper med transistorer
- Hva er de to hovedanvendelsene til transistorer?
- Hvilken hovedfunksjon har en BJT?
- Hvilken hovedfunksjon har en FET?

# Spørsmål 1

En transistor er

- a) En passiv komponent
- b) En spenningsstyrt kondensator
- c) En styrt strømkilde
- d) Ingen av delene

## Spørsmål 2

Hvilken komponent kan man IKKE lage av en transistor?

- a) Dioder
- b) Kondensatorer
- c) Resistorer
- d) Induktorer

## Spørsmål 3

En bipolar transistor (BJT) brukes  
valigvis som en

- a) Spenningsstyrt spenningskilde
- b) Spenningsstyrt strømkilde
- c) Strømstyrt spenningskilde
- d) Strømstyrt strømkilde

## Spørsmål 4

Under normal drift må en BJT ha følgende:

- a) Både base-emitter og base-kollektor overgangene være forward biased
- b) Både base-emitter og base-kollektor overgangene være reversed biased
- c) Base-emitter må være forward biased mens base-kollektor må være reversed biased
- d) Base-emitter må være reversed biased mens base-kollektor må være forward biased

## Spørsmål 5

Parameteren  $\beta$  er et mål på

- a) Forholdet mellom emitter- og kollektorstrøm
- b) Forholdet mellom emitter og basestrøm
- c) Forholdet mellom kollektor- og basestrøm
- d) Forholdet mellom base- og emitterstrøm

## Spørsmål 6

Sammenhengen mellom base-, emitter- og kollektorstrøm er

- a)  $I_E = I_C + I_B$
- b)  $I_E = I_C - I_B$
- c)  $I_C = I_E + I_B$
- d)  $I_B = I_C + I_E$

## Spørsmål 7

Sammenhengen mellom base-, emitter- og kollektorstrøm er

a)  $I_E = \alpha_{DC} I_E + \beta_{DC} I_B$

b)  $I_E = \alpha_{DC} I_E + \frac{I_C}{\beta_{DC}}$

c)  $I_E = \alpha_{DC} I_E - \beta_{DC} I_B$

d)  $I_E = I_C + \beta_{DC} I_B$

## Spørsmål 8

I en BJT som er i **metning** er

- a) Begge pn-overgangene er forward-biased
- b)  $I_C$  er nesten ikke avhengig av  $V_{CE}$ , men kun av  $I_B$
- c)  $I_C$  er svært stor og ikke lenger avhengig av  $I_B$
- d)  $I_B=0$  og  $I_C$  veldig liten

## Spørsmål 9

I en BJT som er **avstengt** er

- a) Begge pn-overgangene er forward-biased
- b)  $I_C$  er nesten ikke avhengig av  $V_{CE}$ , men kun av  $I_B$
- c)  $I_C$  er svært stor og ikke lenger avhengig av  $I_B$
- d)  $I_B=0$  og  $I_C$  veldig liten

## Spørsmål 10

I en BJT som er i det **lineære** området er

- a) Begge pn-overgangene er forward-biased
- b)  $I_C$  er nesten ikke avhengig av  $V_{CE}$ , men kun av  $I_B$
- c)  $I_C$  er svært stor og ikke lenger avhengig av  $I_B$
- d)  $I_B=0$  og  $I_C$  veldig liten

## Spørsmål 11

I en BJT som er i **breakdown** er

- a) Begge pn-overgangene er forward-biased
- b)  $I_C$  er nesten ikke avhengig av  $V_{CE}$ , men kun av  $I_B$
- c)  $I_C$  er svært stor og ikke lenger avhengig av  $I_B$
- d)  $I_B=0$  og  $I_C$  veldig liten

## Spørsmål 12

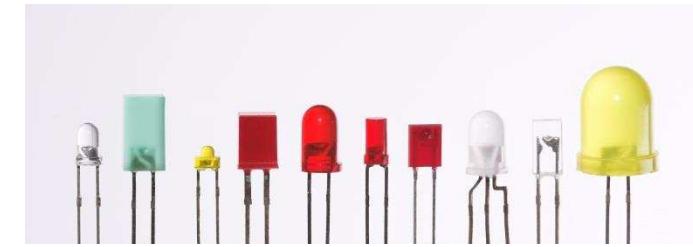
DC lastlinjen for en transistor med et bestemt bias-nettverk angir

- a) Sammenhengen mellom  $V_{BE}$  og  $I_C$  varierer for de gitte motstandsverdiene
- b) Sammenhengen mellom  $V_C$  og  $V_B$  for de gitte motstandsverdiene
- c) Sammenhengen mellom  $I_C$ ,  $I_B$  og  $I_E$  for de gitte motstandsverdiene
- d) Sammenhengen mellom  $V_{BE}$  og  $I_E$  for de gitte motstandsverdiene

## Spørsmål 13

I en klasse B-forsterker opererer transistoren

- a) I metning 50% av tiden og cutoff resten
- b) I det lineære området 50% av tiden og breakdown resten
- c) I det lineære området 50% av tiden og cutoff resten
- d) I metning 50% av tiden og det lineære resten



# Forelesning nr.10 INF 1411

## Elektroniske systemer

Felteffekt-transistorer



# Dagens temaer

- Bipolare transistorer som brytere
- Felteffekttransistorer (FET)
- FET-baserte forsterkere
- Dagens temaer er hentet fra kapittel 16.4-16.7

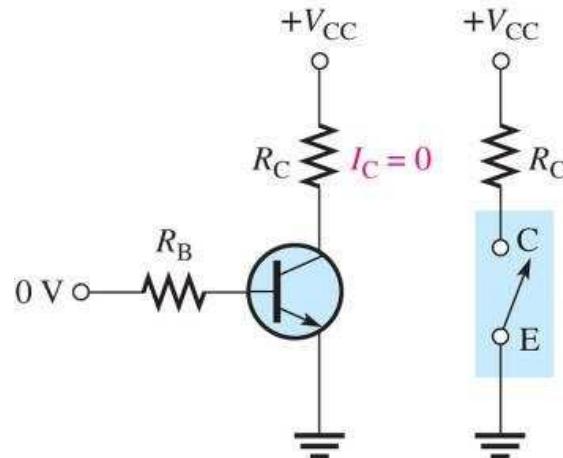
## BJT som bryter

- Når en BJT brukes som forsterker opererer den i det lineære området
- Hvis man lar en BJT enten være i cutoff eller i metning, kan den brukes som en strøm(spenning)-styrt bryter
- Strøm- eller spenningsstyrte brytere brukes i digitale kretser, bla for å lage AND-, OR- og NOT-porter
- Selv om en BJT kan brukes som elektronisk bryter, er den ikke god egnet for bruk på integrerte kretser pga relativt høyt strømforbruk

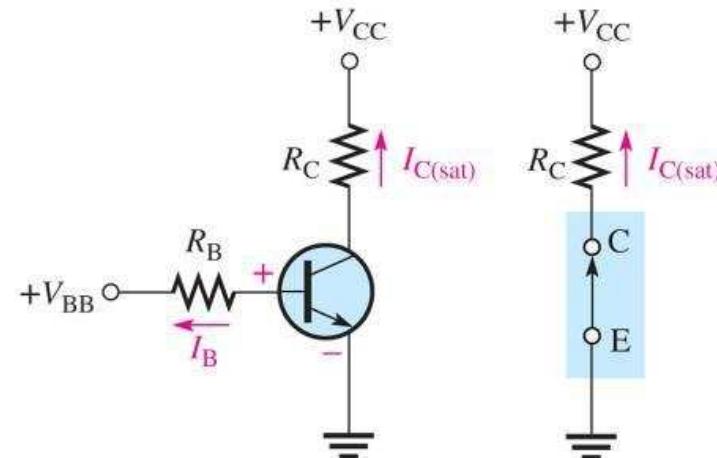
# BJT som bryter

- Når base-emitter ikke er forward-biased ( $V_B=0$ ), er transistoren i cutoff, dvs at  $V_{CE} \approx V_{CC}$
- Når base-emitter er forward-biased, vil det gå en maksimal kollektorstrøm gitt av

$$I_{C(SAT)} \approx \frac{V_{CC}}{R_C}$$



(a) Cutoff — open switch

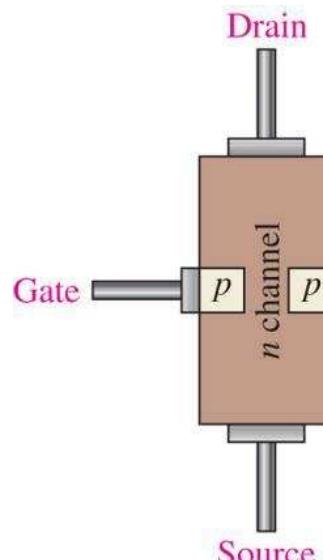
(b) Saturation — closed switch  
INF 1411

# Felteffekttransistorer (FET)

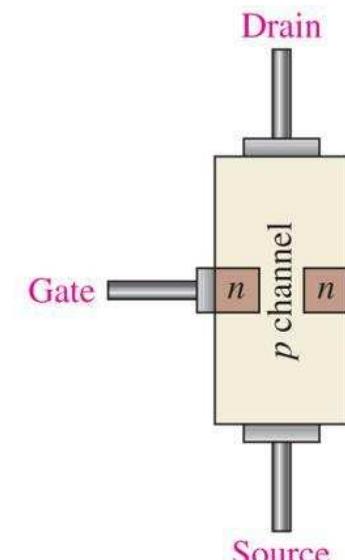
- En FET er en spenningsstyrt strømbryter
- De tre terminalene heter hhv Drain (tilsv. Collector), Gate (tilsv. Base) og Source (tilsv. Emitter)
- Av FET finnes to hovedgrupper:
  - Junction FET (JFET)
  - Metal-Oxide Semiconductor FET (MOSFET)
- MOSFET-varianter er de vanligste transistorene i digitale integrerte kretser

# JFET

- JFET har en ledende kanal med source og drain-tilkobling i hver ende av kanalen
- Strømmen i kanalen kontrolleres av spenningen på gaten
- Som for en BJT finnes to typer JFET, kalt hhv n-type eller p-type, avhengig av hva som er majoritetsbærer i kanalen
- Gatespenningen regulererer motstanden i kanalen under gaten



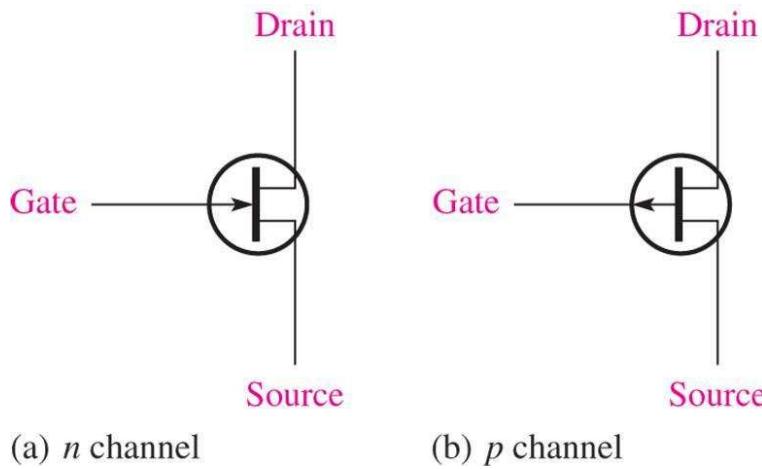
(a) n channel



(b) p channel

## JFET (forts)

- Avhengig av om kanalen er p- eller n-type, er symbolene



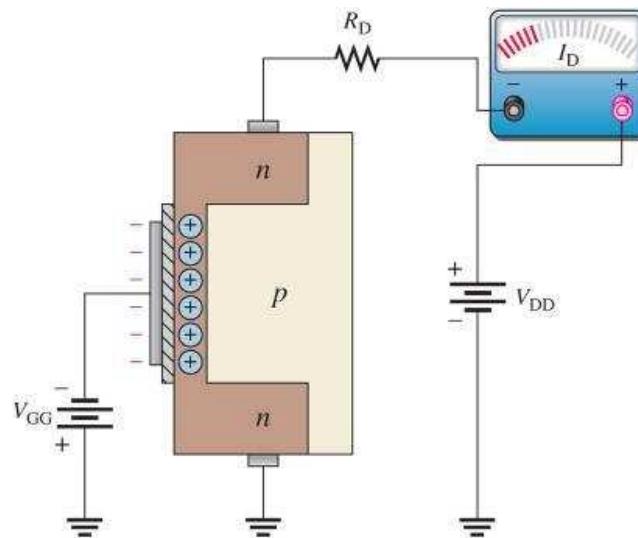
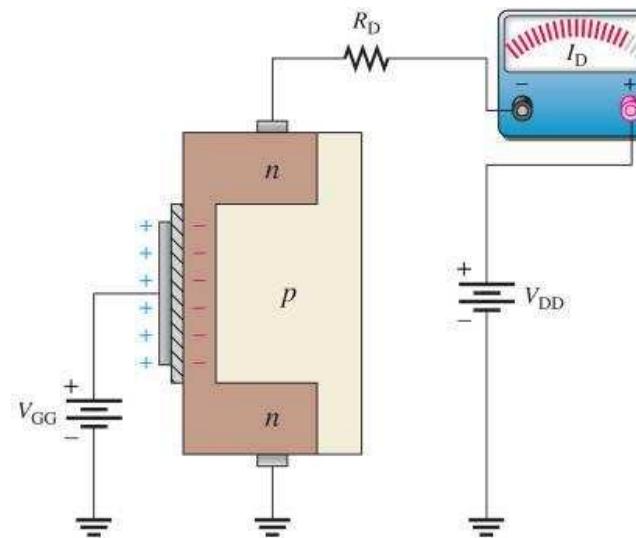
- For *n*-type må gate-spenningen være høyere enn source-spenningen for at JFET skal lede, mens gate-spenningen må være lavere enn drain-spenningen for at en *p*-type skal lede

# MOSFET

- En MOSFET har ingen pn-overganger som JFET, BJT og dioder
- Gaten på en MOSFET er elektrisk isolert fra drain-source vha et tynt lag med silisiumdioksyd
- MOSFET kommer i to hovedkategorier
  - Depletion-mode
  - Enhancement-mode
- MOSFET er den aller vanligste transistorer i digitale kretser; den kan også brukes som spenningskontrollert motstand eller som kondensator, i f.eks hukommelsesceller (RAM)

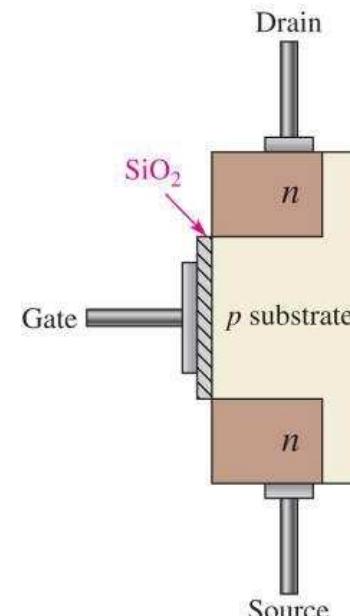
# Depletion(D)-MOSFET

- En D-MOSFET har en fysisk kanal under gaten
- Avhengig av gate-spenningen vil majoritetsbærerne enten blokkeres (depletion mode) eller kunne passere regionen (enhancement mode) under gaten

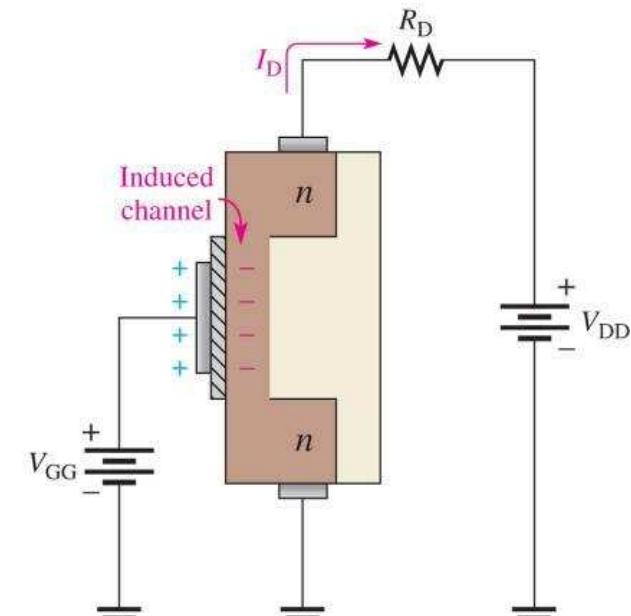
(a) Depletion mode;  $V_{GS}$  negative and less than  $V_{GS(off)}$ (b) Enhancement mode;  $V_{GS}$  positive

# Enhancement(E) MOSFET

- En E-MOSFET har ingen fysisk kanal med majoritetsbærere under gaten
- Avhengig av gate-spenningen vil det dannes en n-kanal gjennom p-substratet
- Gate-spenningen må over et visst nivå i forhold til source-spenningen for at det skal kunne dannes en kanal

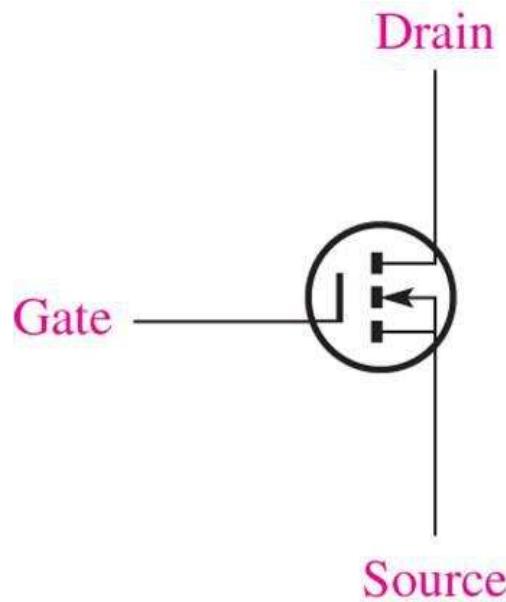
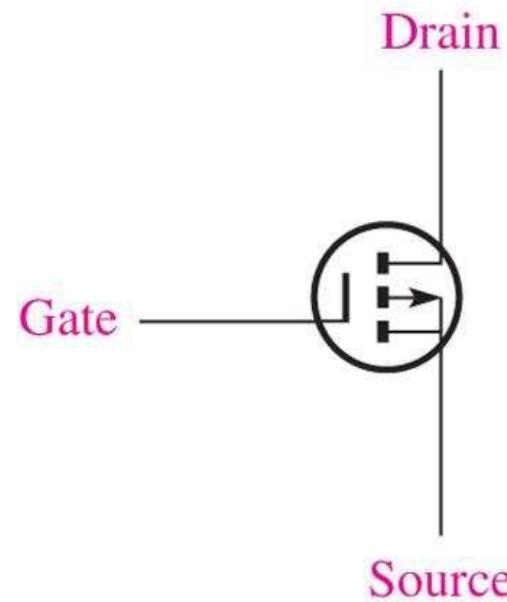


(a) Basic construction

(b) Induced channel ( $V_{GS} > V_{GS(\text{th})}$ )

# Enhancement(E) MOSFET (forts)

- En av de største fordelene med E-MOSFET er at det går svært lite strøm når den er i cutoff og at det går nesten ingen strøm gjennom gaten uansett operasjonsområde ( $\sim pA$ )

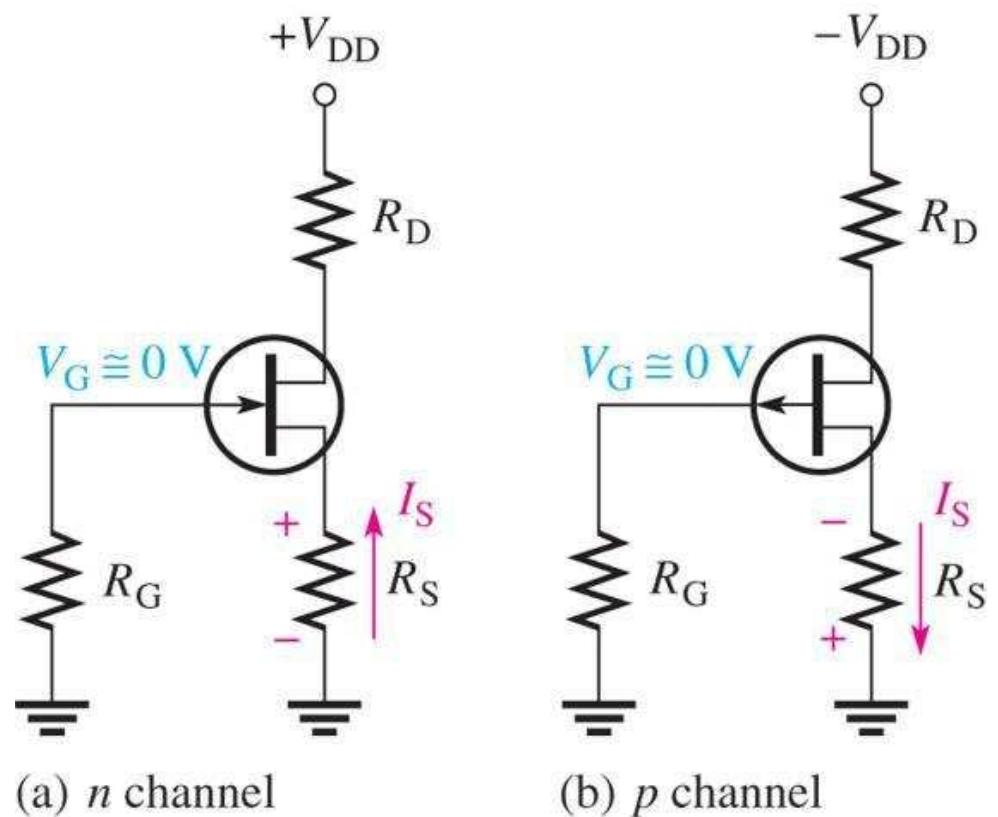
(a) *n* channel(b) *p* channel

# Spørsmål

- Hva er forskjellen mellom en JFET og en BJT?
- Hva er forskjellen mellom en D-MOSFET og en E-MOSFET
- I hvilke to modi opererer en BJT når den brukes som en bryter?
- Hva er hovedanvendelsesområdet til en MOSFET?
- Hvilke andre kretselementer kan en E-MOSFET brukes til?
- Hvor mye strøm går inn gjennom gaten på en E-MOSFET?

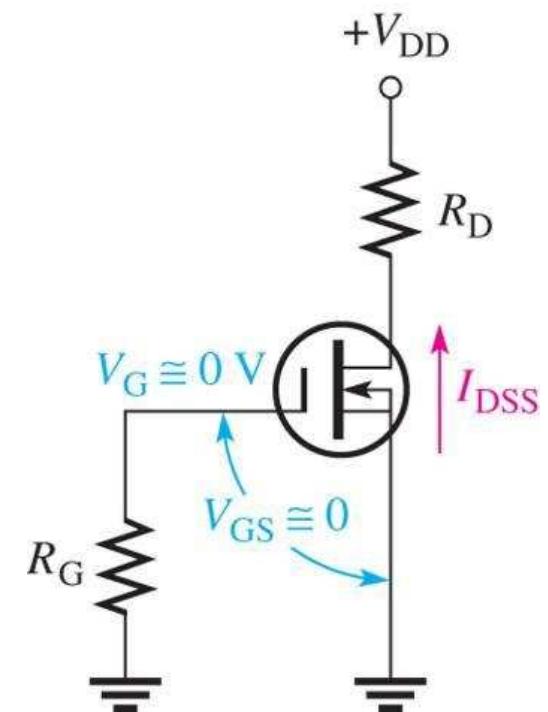
# JFET biasing

- En JFET kan enklast gis bias via en liten motstand  $R_S$  i serie med source og en stor motstand  $R_G$  fra gate til jord
- Spenningsfallet over source-motstanden gjør at gatesource overgangen er reverse-biased



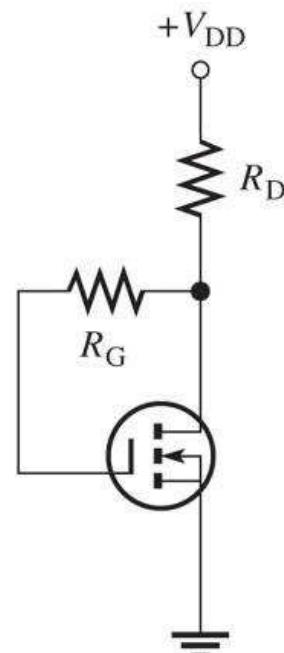
# D-MOSFET biasing

- En D-MOSFET kan fungere både i depletion og enhanced mode, dvs at gate-source kan være både forover og reversbiased
- Enkleste bias-metode kalles zero-bias:  
Source kobles direkte til jord, mens gate kobles til jord via en stor motstand

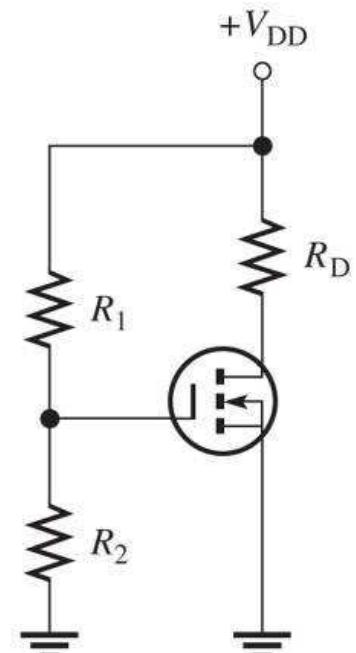


# E-MOSFET biasing

- En E-MOSFET må ha  $V_{GS}$  større enn en terskelspenning  $V_{GS(th)}$
- E-MOSFET kan forsynes med bias på samme måte som en BJT, dvs via en spennings-deler, eller via drain feedback



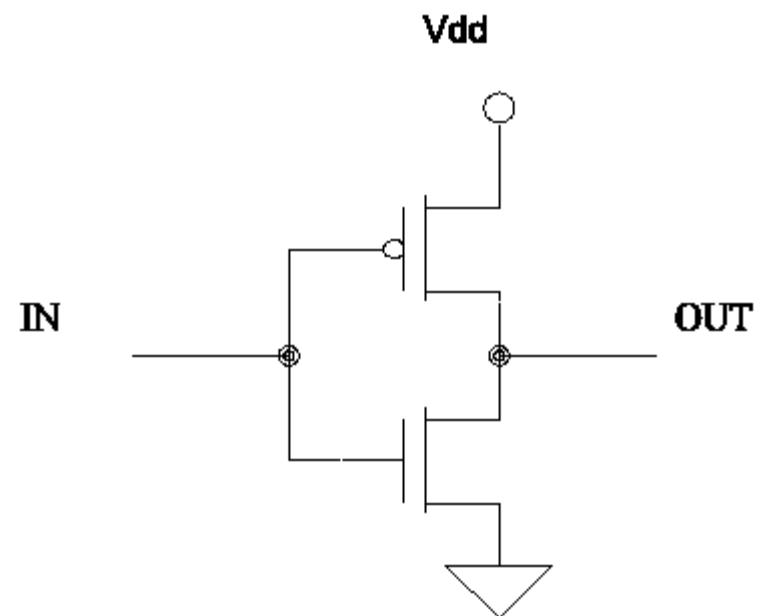
(a) Drain-feedback bias



(b) Voltage-divider bias

# CMOS

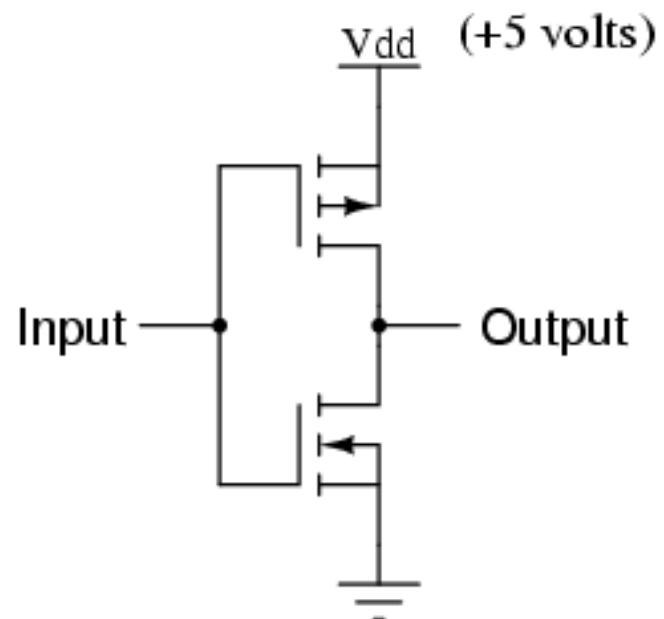
- CMOS er en spesiell type MOSFET hvor man produserer både p- og n-kanaltype på samme krets
- CMOS er svært utbredt i digitale kretser bla fordi man får høy transistortetthet kombinert med lavt effektforbruk, og fordi man kan lage noe nær ideelle svitsjer



# Digitale porter: inverter

*Inverter circuit using IGFETs*

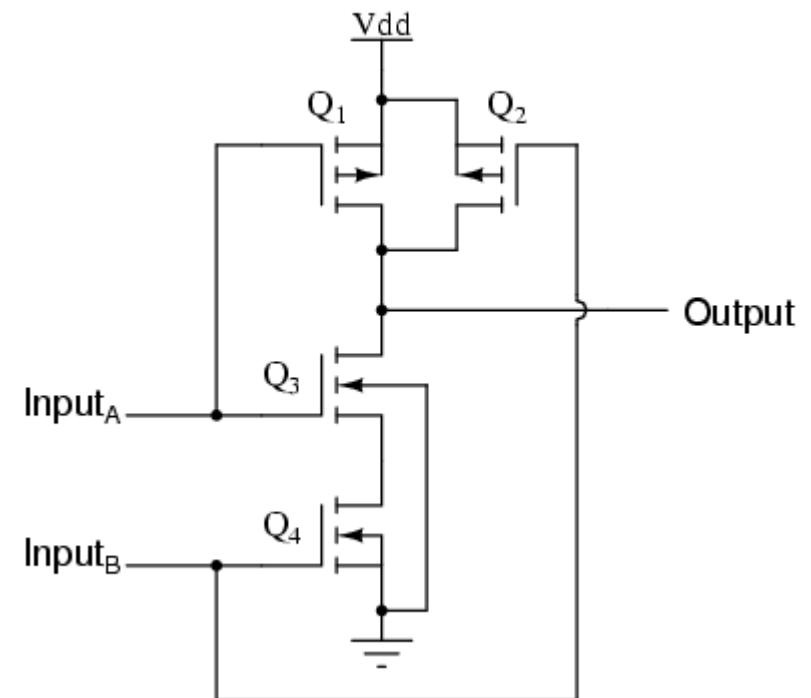
- En inverter tar som input et signal som enten er lavt (0v) eller høyt (5v) og produserer et utsignal som er det invertere av innsignalet



# Digitale porter: NAND-port

- En NAND-port utfører en logisk NAND-operasjon mellom to binære inputsignal (dvs signal som har kun to diskrete signalknivåer)

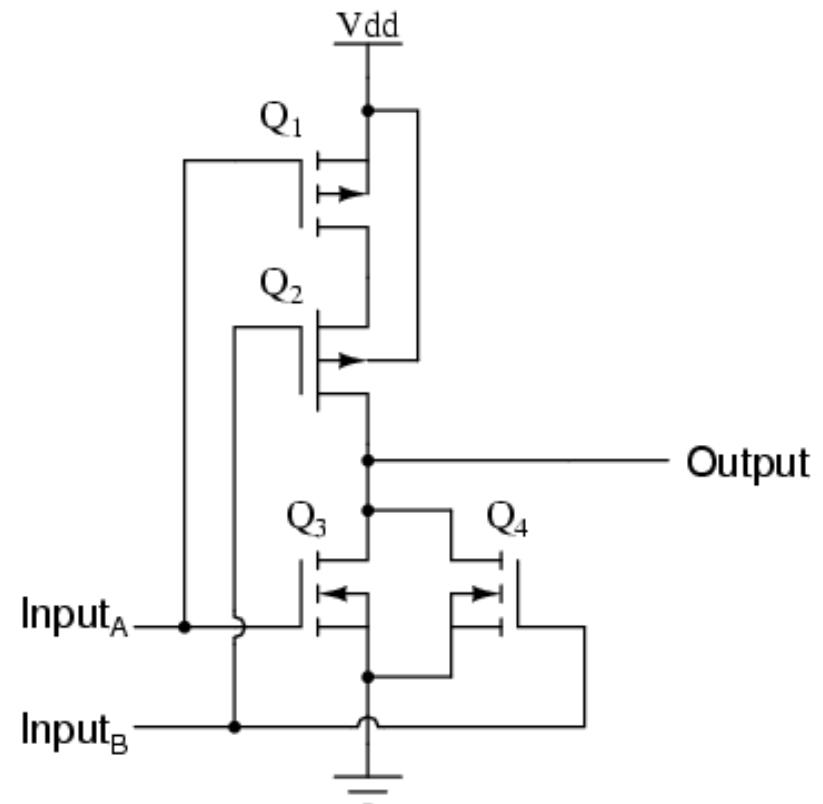
*CMOS NAND gate*



# Digitale porter: NOR-port

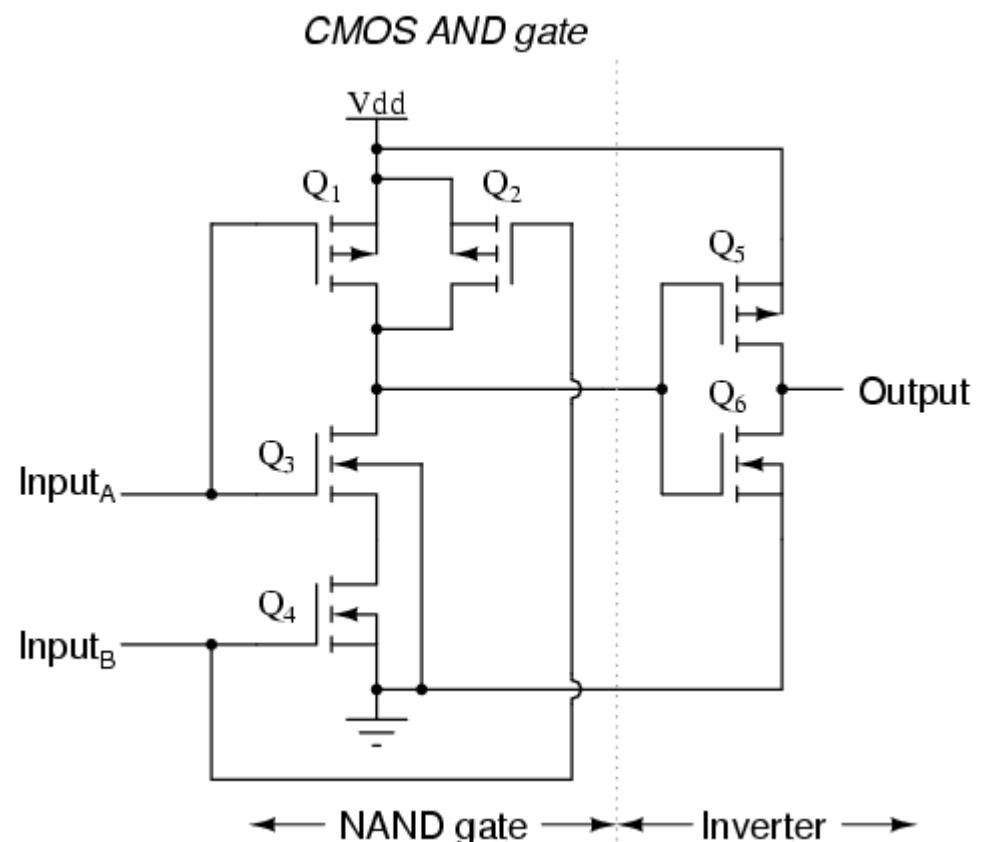
- En NOR-port utfører en logisk NOR-operasjon mellom to binære inputsignal (dvs signal som har kun to diskrete signalnivåer)

*CMOS NOR gate*



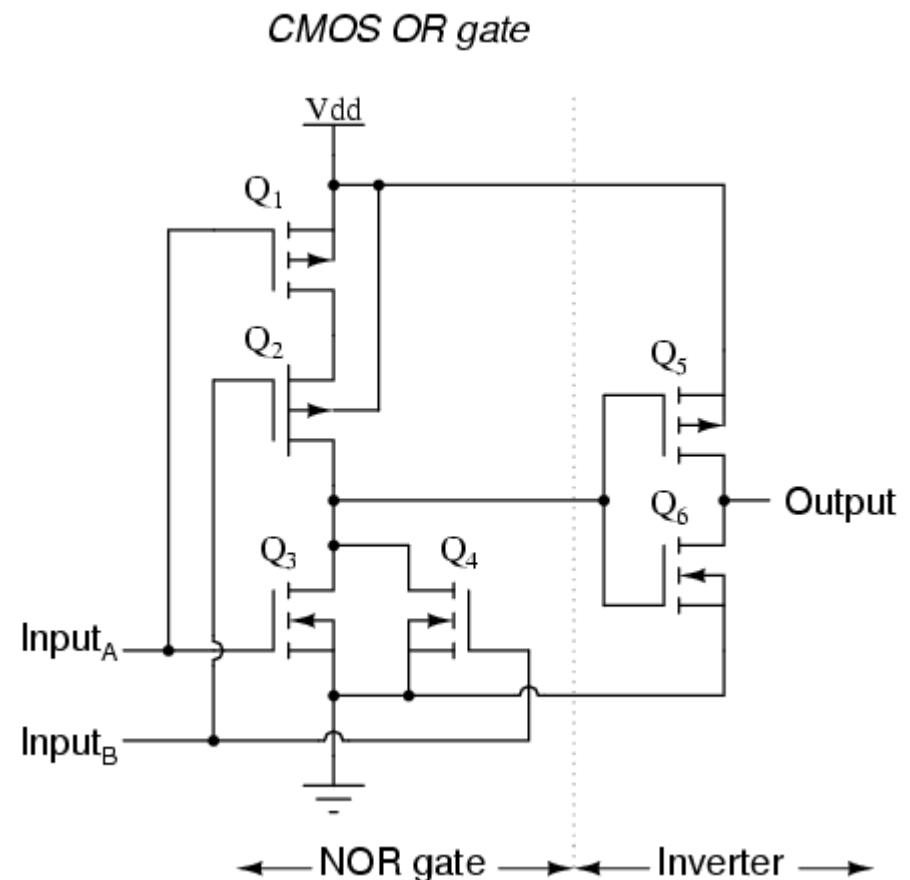
# Digitale porter: AND-port

- En AND-port konstrueres vha en NAND-port og en inverter



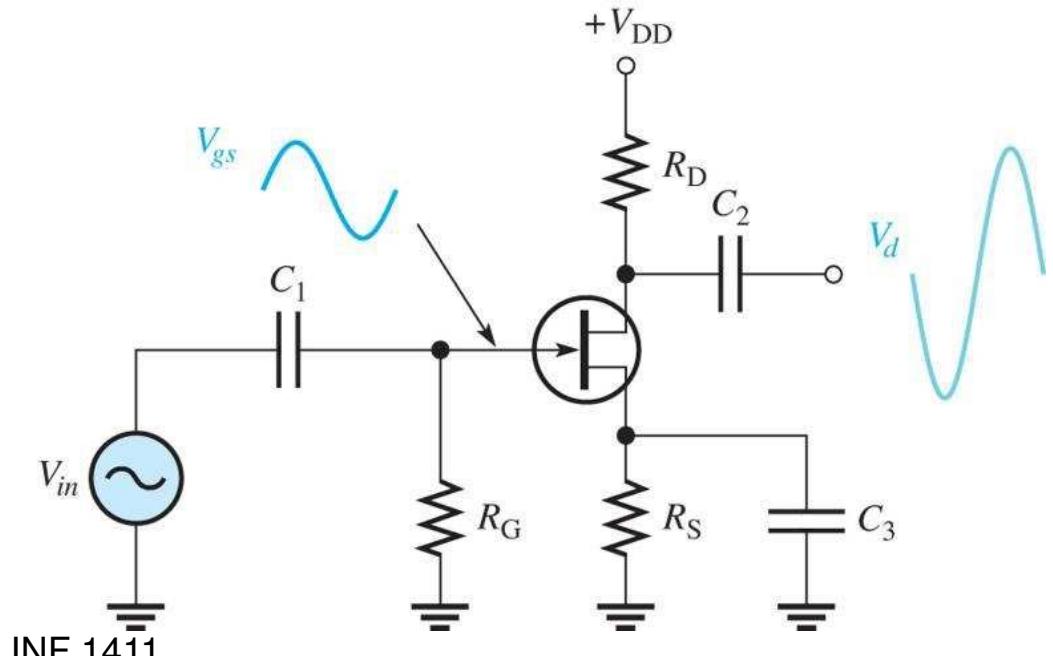
# Digitale porter: OR-port

- En OR-port konstrueres vha en NOR-port og en inverter



# JFET-basert common-source forsterker

- FET-baserte forsterkere er spenningsstyrte og har verken så stor forsterkning eller er så lineære som BJT-forsterkere
- Den største fordelen med FET-forsterkere er høy inngangsimpedans
- Input-resistansen er avhenger av bias-motstanden(e)
- $R_G$  er høyere enn for BJT-forsterkere siden det nesten ikke går strøm inn gjennom gaten



# Transkonduktans

- En viktig parameter for en FET er *transkonduktans*

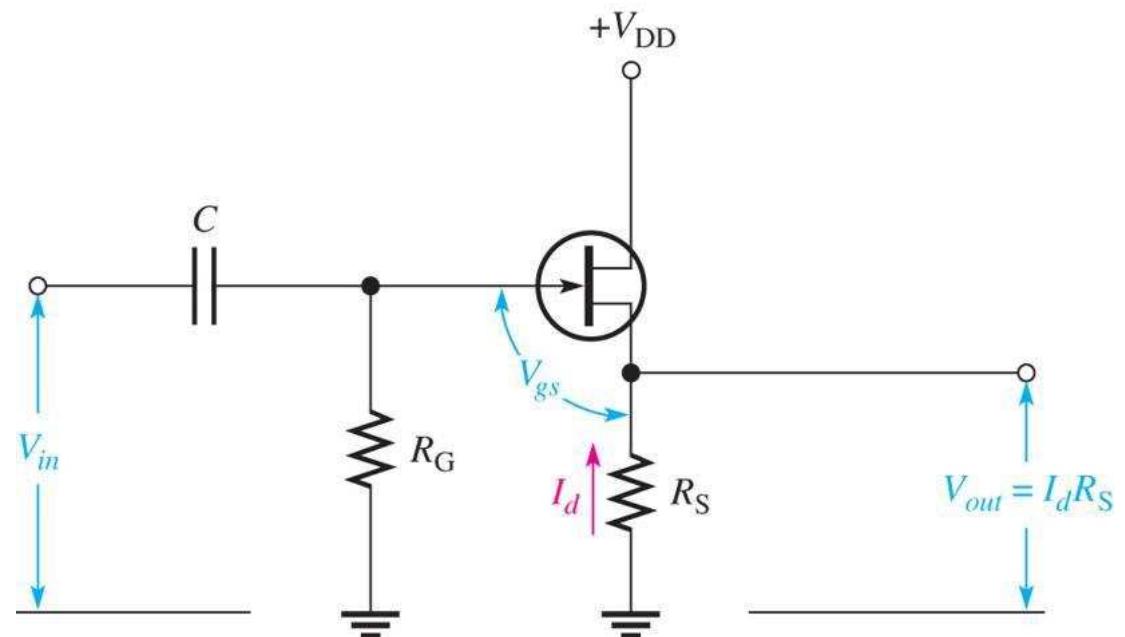
$$g_m = \frac{I_d}{V_{gs}}$$

- Forstavelsen «trans» betegner at man ikke måler ledningsevne på samme sted i kretsen (siden gaten er isolert fra source-drain)
- For en common-source forsterker er drain-strømmen multiplisert med drain-motstanden lik output-spenningen:

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{I_d R_d}{V_{gs}} = g_m R_d$$

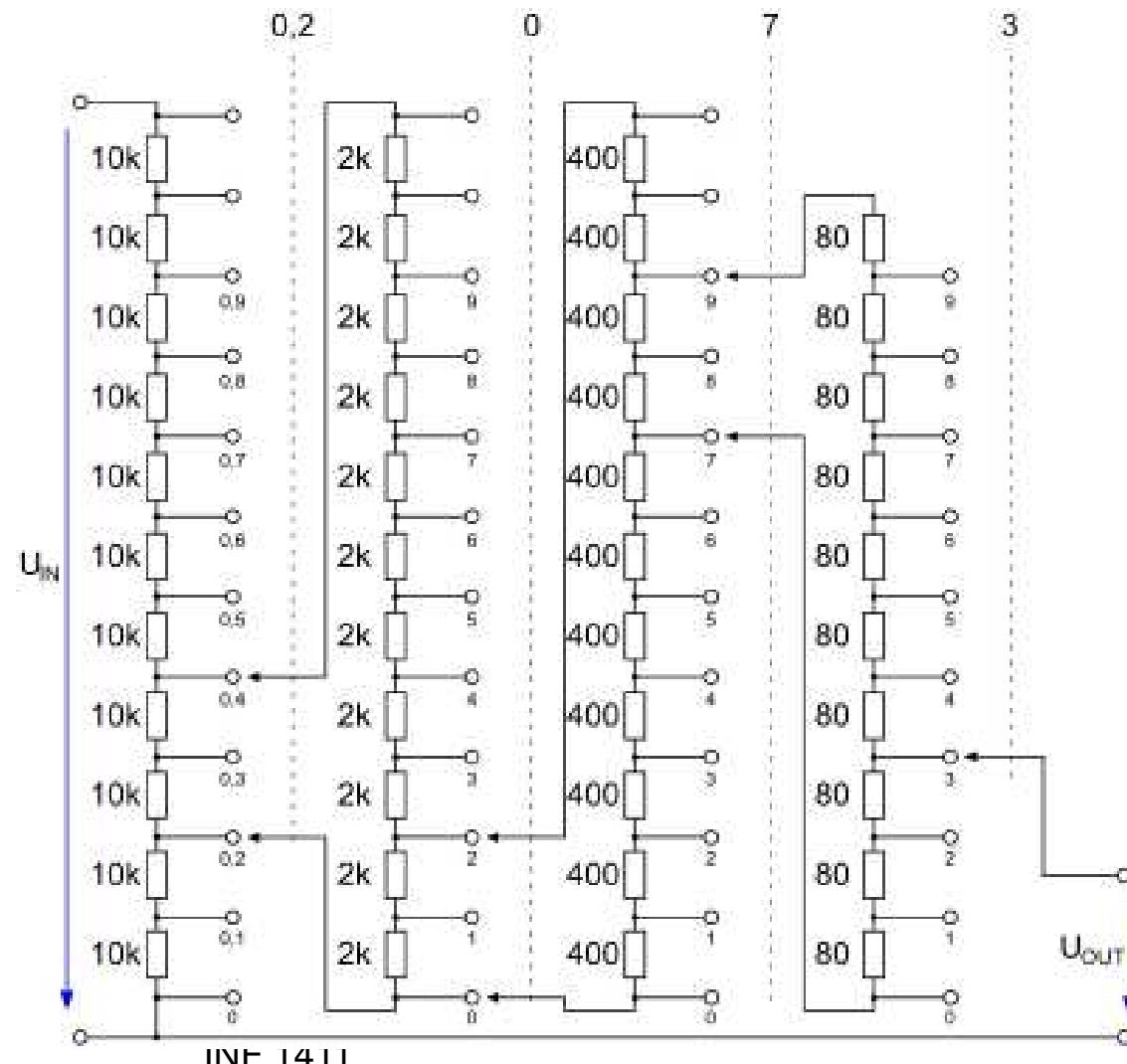
# Common-drain forsterker

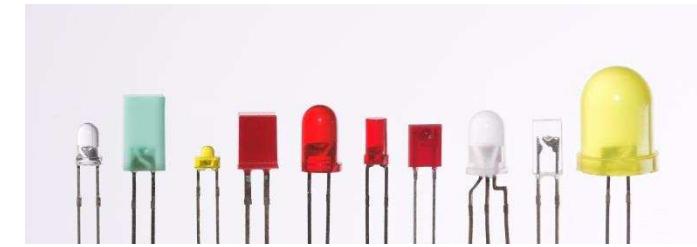
- Hvis man ikke trenger høy spenningsforsterkning men høy input-motstand, kan man bruke en common-drain forsterker



# Nøtt til neste gang

- Hvordan fungerer denne kretsen?
- Hva gjør kan den brukes til?
- Hva er begrensningen?





# Forelesning nr.10 INF 1411

## Oppsummeringsspørsmål

Transistorer



# Spørsmål 1

En transistor

- a) Kan brukes som en avhengig spenningskilde
- b) Kan ikke brukes som en avhengig strømkilde
- c) Tåler ikke strømmer over 1mA
- d) Må ha en fast forspenning

## Spørsmål 2

Gateoksydets hovedfunksjon er

- a) Å lede strøm
- b) Å redusere motstand
- c) Å isolere
- d) Å øke forsterkningen

## Spørsmål 3

En koblingskondensator brukes for å

- a) Øke strømforsterkningen
- b) Øke spenningsforsterkningen
- c) Fjerne DC-komponenter
- d) Fjerne AC-komponenter

## Spørsmål 4

En bypasskondensator brukes for å

- a) Øke strømforsterkningen
- b) Øke spenningsforsterkningen
- c) Redusere inngangsimpedansen
- d) Øke inngangsimpedansen

## Spørsmål 5

En felles kollektor-forsterker

- a) Har en spenningsforsterking større enn 1
- b) Har inngangsimpedans som er lineær i forhold til frekvensen
- c) Har strømforsterkning lik spenningsforsterkningen
- d) Har en strømforsterkning som er proporsjonal med emittermotstanden  $R_E$

## Spørsmål 6

«Crossover» forvrengning i en push-pull fortserker skyldes

- a) Ikke-lineær sammenheng mellom  $I_B$  og  $V_{CE}$
- b) At begge transistorene er i cut-off
- c) At begge transistorene er i metning
- d) At begge transistorene er i det lineære området

## Spørsmål 7

En felteffekttransistor (FET) er en

- a) Strømstyrt strømkilde
- b) Strømstyrt spenningeskilde
- c) Spenningsstyrt strømkilde
- d) Spenningsstyrt strømkilde

## Spørsmål 8

I en E-MOSFET

- a) Er det en fysisk kanal undet gaten
- b) Øker konduktanen mellom drain og source når gatespenningen synker ned mot source-spenningen
- c) Går det ingen strøm gjennom gaten når transistoren er i cut-off
- d) Går det ingen strøm mellom drain og source når transistoren er i cut-off

## Spørsmål 9

En D-MOSFET

- a) Kan ikke brukes som en spenningsdeler
- b) Kan brukes som en strømkilde
- c) Trenger ikke koblingskondensator på  
inngangen
- d) Har  $0\Omega$  inngangsimpedans

## Spørsmål 10

En CMOS-transistor

- a) Har lav motstand på gaten
- b) Trekker mer strøm enn en BJT
- c) Finnes ikke i komplementære utgaver
- d) Har lavt effektforbruk

## Spørsmål 11

For å lage en NAND-port trenger man

- a) 2 CMOS transistorer
- b) 3 CMOS transistorer
- c) 4 CMOS transistorer
- d) 5 CMOS transistorer

## Spørsmål 12

I en CMOS-basert NAND-port er

- a) Både P- og N-transistorene i cut-off
- b) Både P- og N-transistorene i metning
- c) Både P- og N-transistorene i det lineære området
- d) P-transistorene i cut-off når N-transistorene er i metning

## Spørsmål 13

JFET-baserte forsterkere

- a) Har lavere inngangskapasitans enn BJT-forsterkere
- b) Har større lineært område enn BJT-forsterkere
- c) Har høyere inngangsadmittans enn BJT-forsterkere
- d) Har høyere inngangsimpedans enn BJT-forsterkere

## Spørsmål 14

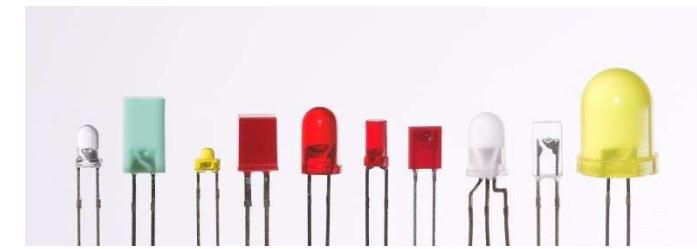
Transkonduktansen i en FET er et mål på

- a) Forholdet drain-strømmen og gate-source spenningen
- b) Forholdet mellom drain-strømmen og drain-source spenningen
- c) Forholdet mellom inngangsimpedans og utgangsimpedans
- d) Forholdet mellom inngangsadmittans og utgangsadmittans

## Spørsmål 15

En ideel bryter har

- a) Lav høy motstand for lede strøm godt
- b) Høy konduktans for å trekke lite strøm
- c) Så kort svitsjetid som mulig
- d) Høy kapasitans



# Forelesning nr.11 INF 1411

## Elektroniske systemer

Måleteknikk  
Operasjonsforsterkere

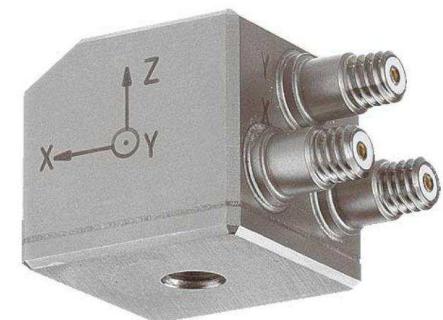
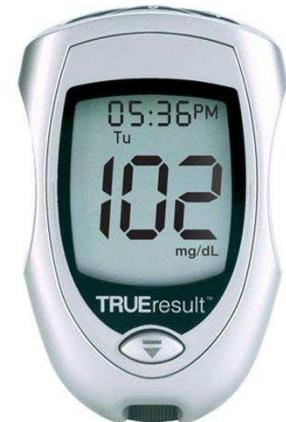


# Dagens temaer

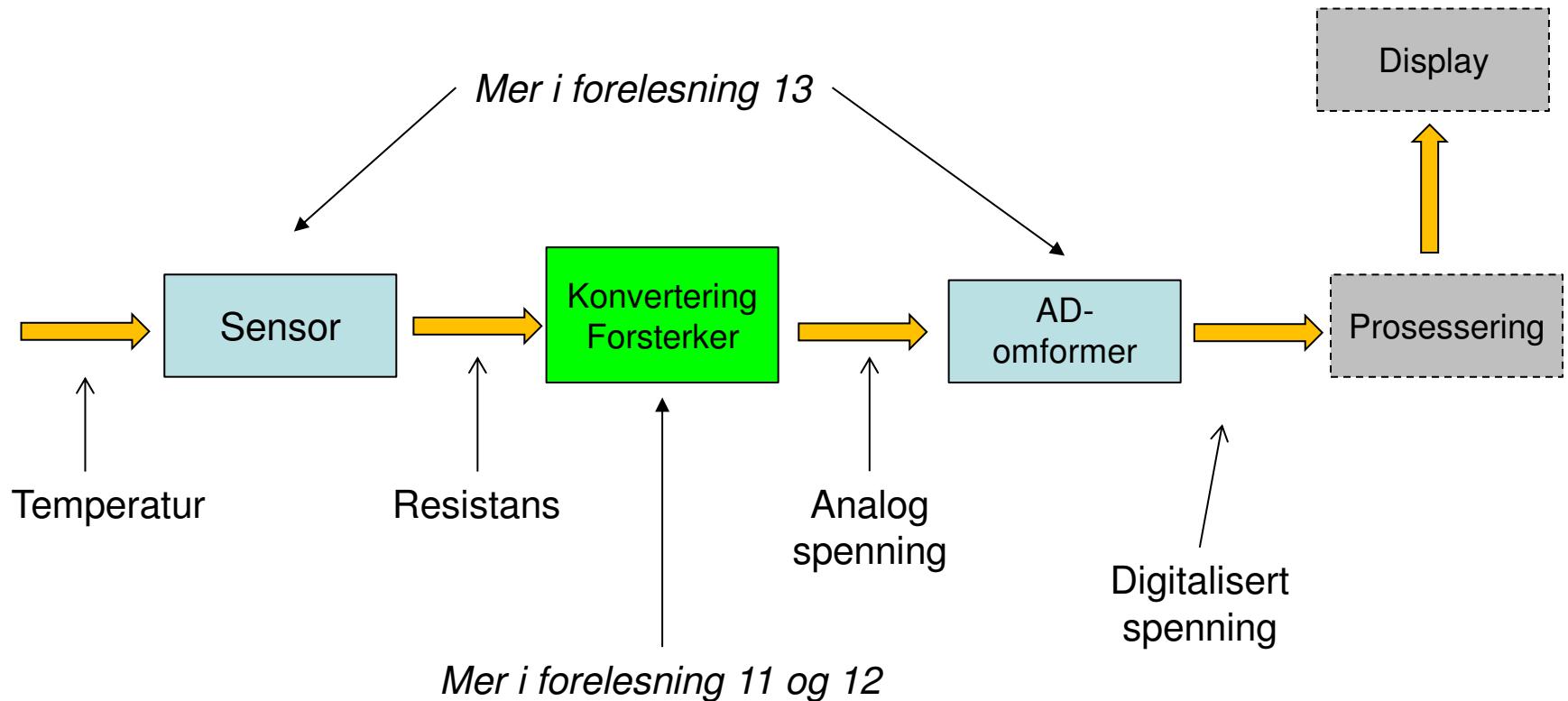
- Måleteknikk
- Wheatstone-bro
- Ideell operasjonsforsterker
- Differensiell forsterker
- Opamp-kretser
- Dagens temaer er hentet fra kapittel 6.5, 17.1-17.6 og 19.1

# Måleteknikk

- Ofte trenger man overvåke og måle fysiske parametere, f.eks:
  - Temperatur, trykk og strekk (termometer, vekt, væske- og gasstrykk....)
  - Lengde, akselerasjon og hastighet (kollisjonsputer, GPS, smart phones)
  - Miljøanvendelser (Gasskonsentrasjoner, fuktighet)
  - Medisinske anvendelser (blodtrykk, oksygenmetning, blodsukker....)
- Måleteknikk består bla i å omdanne et fysisk fenomen til en elektrisk størrelse som kan måles:
  - Strøm og spenning
  - Impedans (resistans, konduktans og induktans)
- Man må kunne måle de elektriske størrelsene med høy presisjon og raskt

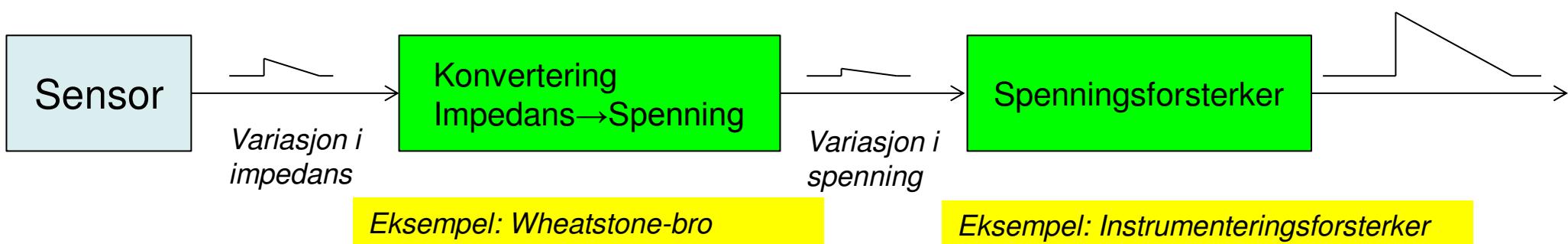


# Måleteknikk (eksempel)



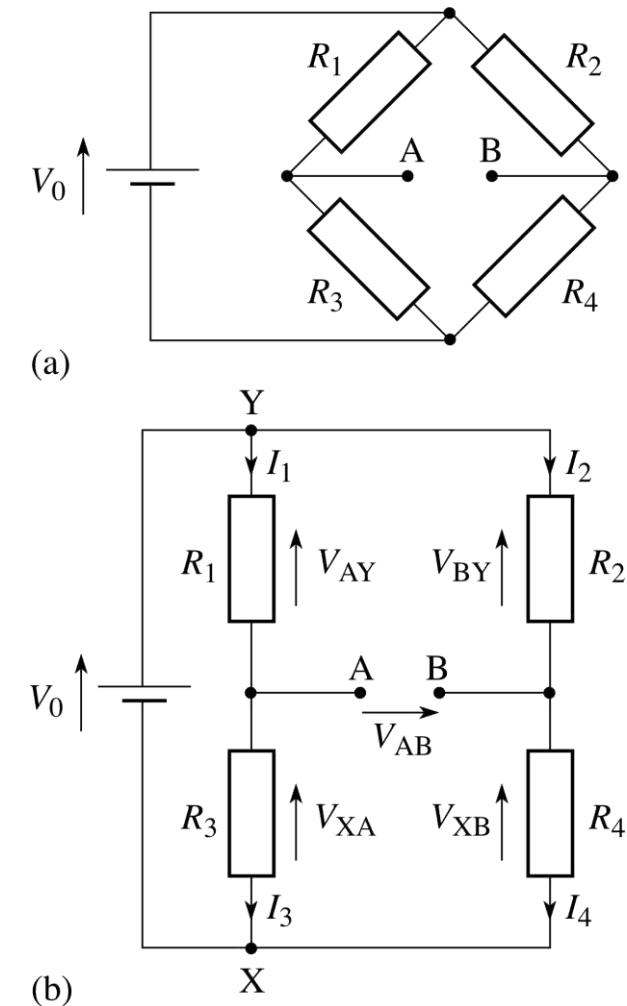
# Måleteknikk

- Sensoren mÅler en fysisk parameter og representerer denne som en varierende impedans (resistans, kapasitans eller induktans)
- Impedansen konverteres deretter til en spenning
- Spenningen mÅ forsterkes siden det oftest er små variasjoner i impedans som mÅles



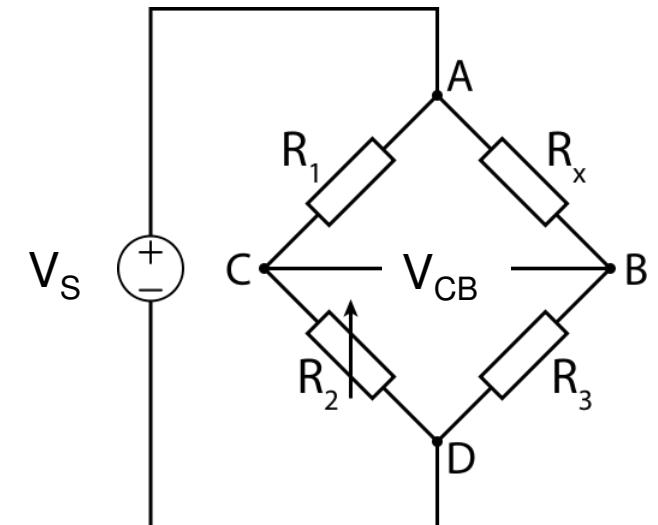
# Wheatstone-bro

- En Wheatstone-bro er en seriell-parallel krets som består av fire ohmske motstander
- Kretsen brukes til å måle med høy presisjon en ukjent resistans eller kapasitans
- En Maxwell-bro kan brukes til å måle en ukjent induktans
- Felles for bro-kretser er at en ukjent impedans avleses som en spenning med høy presisjon
- Uten en bro-krets må man måle både strøm og spenning med høy presisjon for å måle impedans



## Wheatstone-bro (forts)

- Wheatstone-broen består av en ukjent motstand og tre kjente motstander
- En av de kjente motstandene kan være regulerbar
- Broen kan enten være *balansert* eller *ubalansert*
- Hvis spenningen  $V_{CB} = 0$  volt er broen balansert, hvis  $V_{CB} \neq 0$  volt er broen ubalansert
- Analyserer sammenhengene mellom  $V_S$ ,  $V_{CB}$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  og  $R_x$  for de to tilfellene

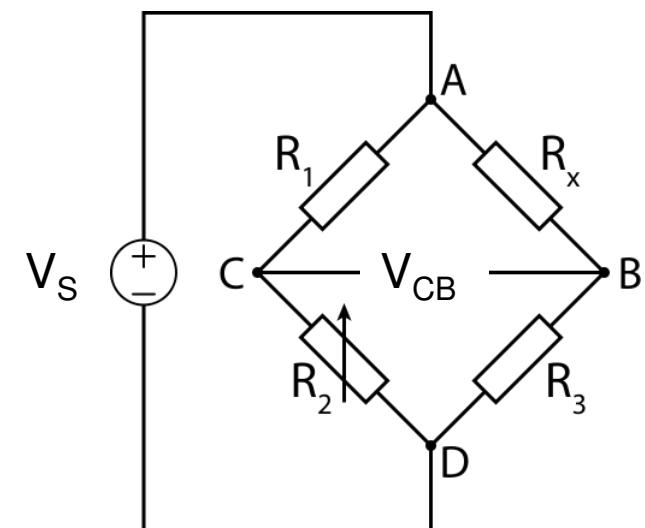


# Balansert Wheatstone-bro

- Hvis spenningen  $V_{CB} = 0$  volt er spenningsfallet over  $V_1$  over  $R_1$  og  $V_x$  over  $R_x$  like store, dvs  $V_1 = V_x$
- Tilsvarende er  $V_2 = V_3$
- Da må også  $\frac{V_1}{V_2} = \frac{V_x}{V_3}$
- Bruker Ohms lov og får

$$\frac{I_1 R_1}{I_2 R_2} = \frac{I_x R_x}{I_3 R_3} \Rightarrow \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_x}{R_3} \Rightarrow R_x = \frac{R_1 R_3}{R_2}$$

- Ved å variere  $R_2$  (og lese av verdien) til  $V_{CB} = 0$  volt, kan  $R_x$  utledes *kun* fra de andre motstandsverdiene



# Ubalansert Wheatstone-bro

- Hvis  $R_x$  nå er en resistor som f.eks varierer med temperatur, vil ikke nødvendigvis  $V_{BC} = 0$  volt
- Antar D er virtuell jord og bruker formler for spenningsdeling:

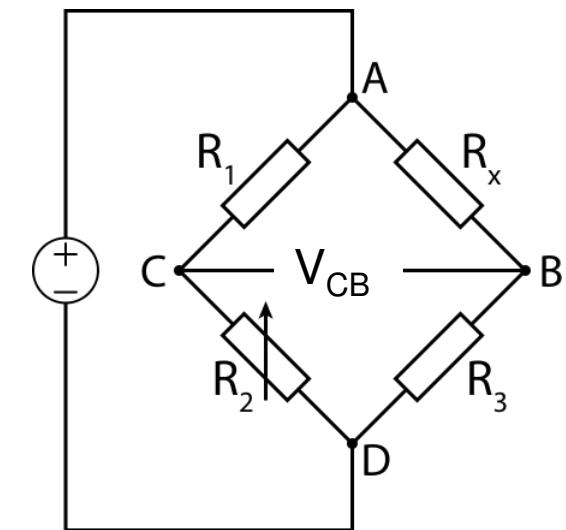
$$V_C = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_S$$

$$V_B = \frac{R_3}{R_x + R_3} V_S$$

- Dette gir at

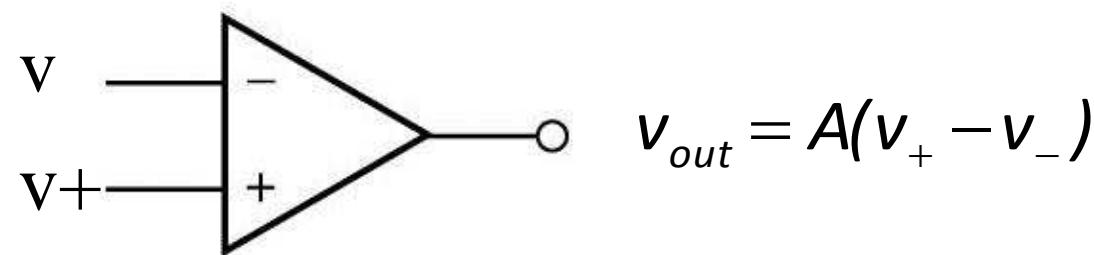
$$V_{CB} = V_C - V_B = V_S \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_x} \right)$$

- Litt grise uttrykk, men så lenge vi kjenner  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  og  $V_S$  og kan måle  $V_{CB}$ , kan vi beregne  $R_x$



# Spenningsforsterker: Opamp

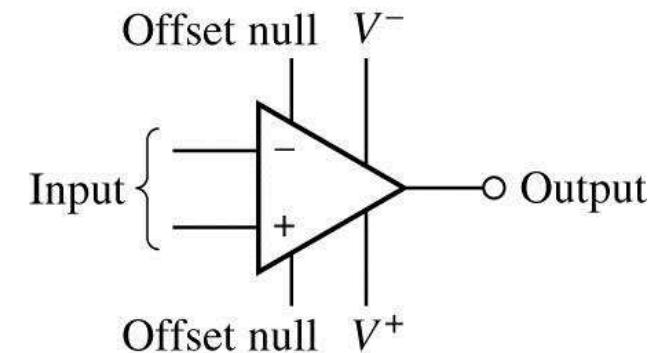
- Forsterkere i måleteknikk er basert på *operasjonsforsterkeren (opamp)*
- En opamp er en spenningsforsterker med to innganger og en utgang



- Inngangene kalles hhv *inverterende* (-) og *ikke-inverterende* (+)
- $A$  er forsterkningen eller *Gain*

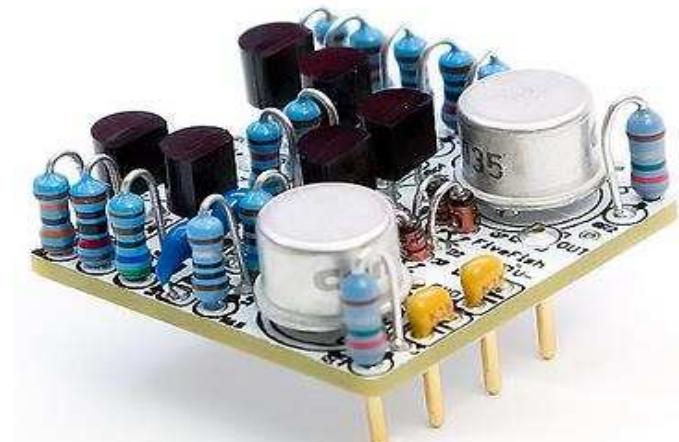
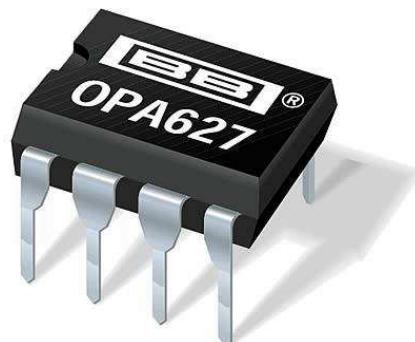
# Enkel opamp-modell

- Siden opamp er en aktiv enhet, trengs ekstern strømforsyning og kalibrering
- Kalibreringsspenningene brukes for å rette opp små avvik og variasjoner
- Med opamp'er lager man andre forsterkere bla *differensielle forsterkere* og *instrumenteringsforsterkere*



# Historikk

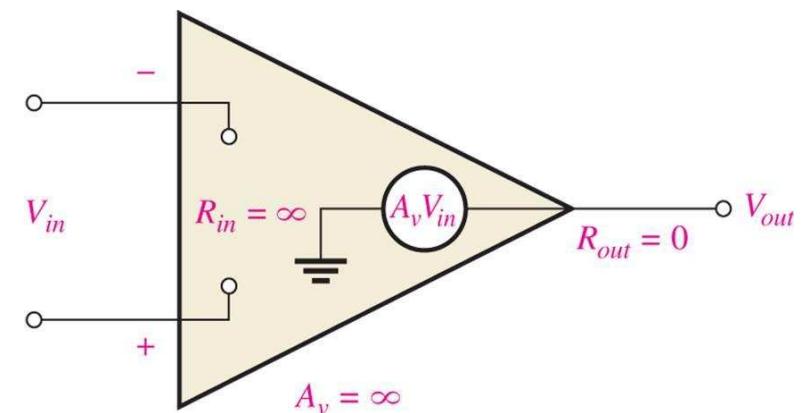
- Opamp'en ble oppfunnet på 1940-tallet og var implementert med radiorør
- De første opamp'er ble konstruert med diskrete komponenter, nå er de oftest integrert
- Som annen elektronikk har de
  - Mindre størrelse
  - Lavere effektforbruk
  - Lavere pris
  - Bedre pålitelighet



# Karakteristikker til en ideel opamp

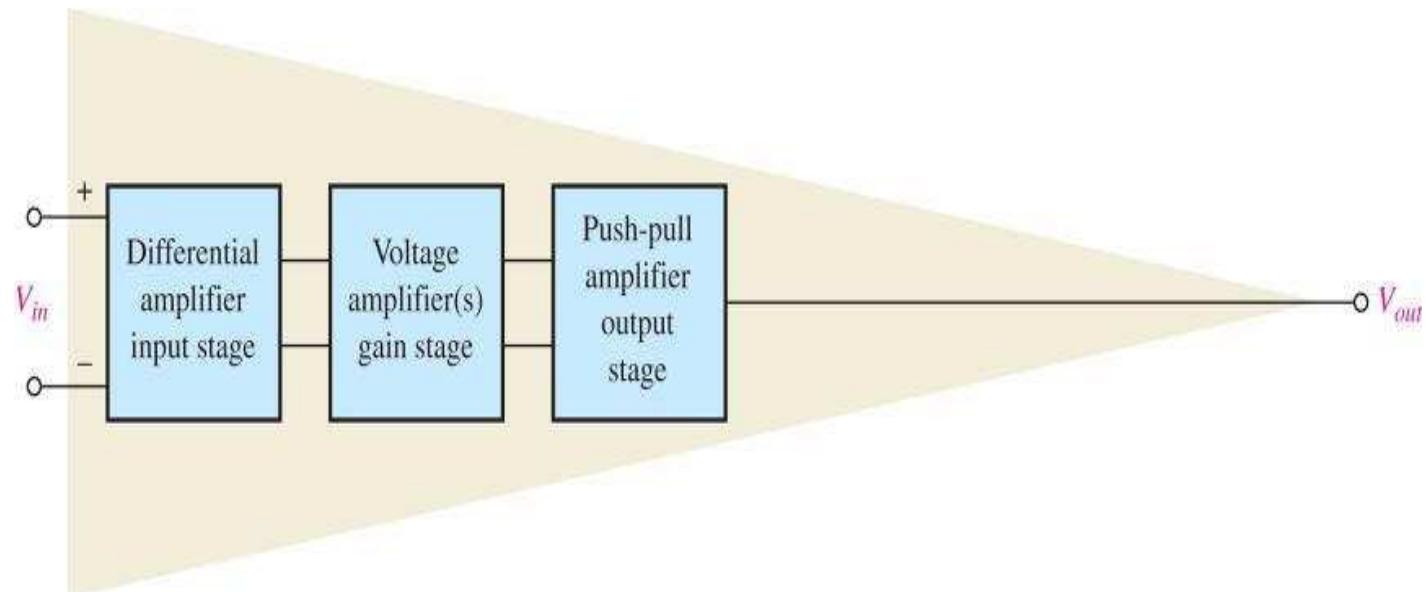
- En *ideell* operasjonsforsterker har følgende egenskaper:

- Inngangsmotstanden  $R_i = \infty$
- Utgangsmotstanden  $R_o = 0$
- Spenningsforsterkningen  $A_v = \infty$
- Båndbredden =  $\infty$
- $V_{out} = 0$  når  $V_+ = V_-$  uavhengig av størrelsesordenen til  $V_-$



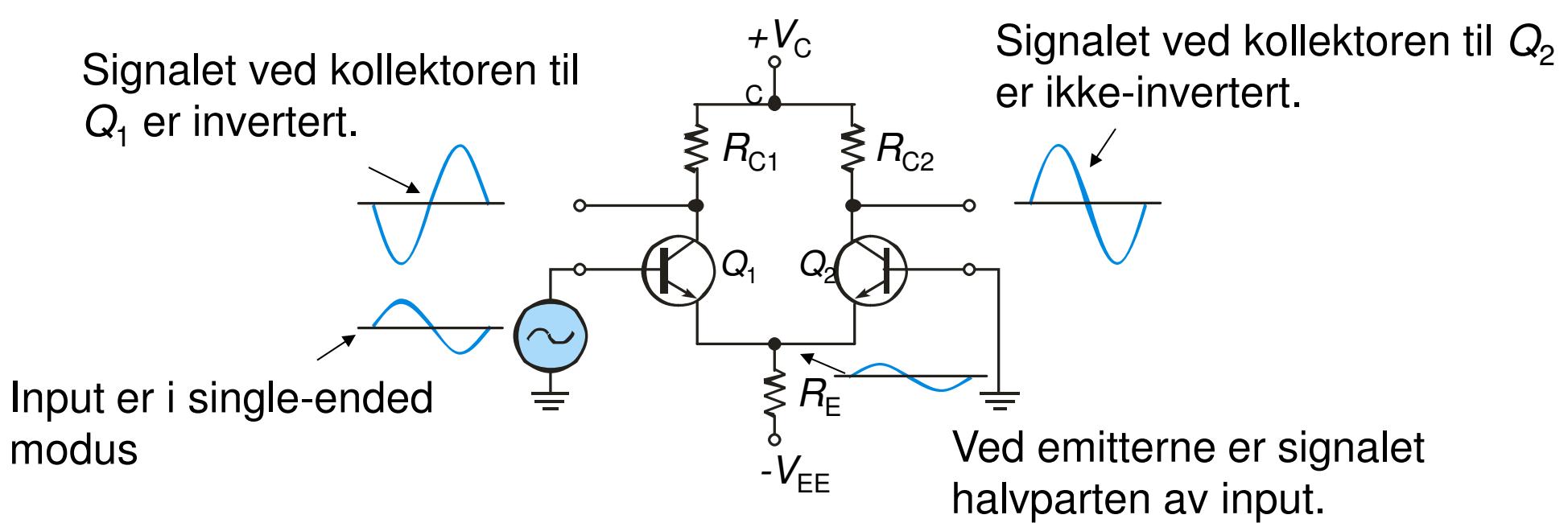
# Oppbygging av opamp

- Opamp'er bygges både med BJT og FET
- De har et differensiell forsterkersteg (diffamp) først, etterfulgt av en spenningsforsterker (klasse A) og tilslutt en push-pull forsterker (klasse B)



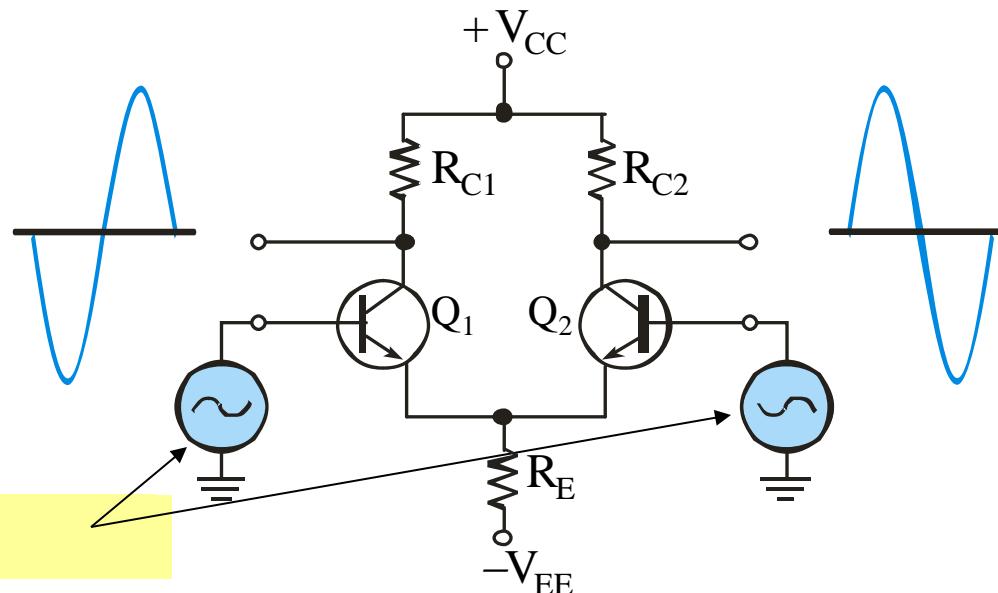
# Differensielt forsterkersteg

- «Single-ended mode: Det ene input-signalen er koblet til jord



# Differensielt forsterkersteg

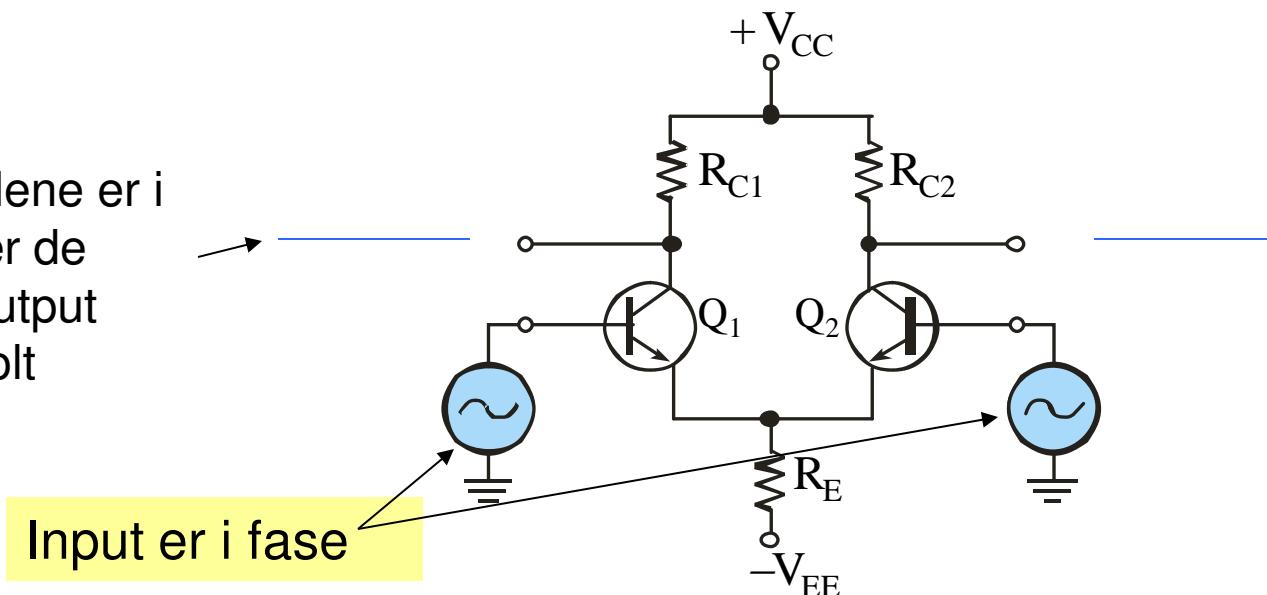
- «Differential mode» : De to inngangene er koblet til to uavhengige kilder som er ute av fase
- Hver av output-signalene er større enn input-signalene



# Differensielt forsterkersteg (forts)

- «Common Mode»: Når begge input er koblet sammen, eller de er i fase og har samme amplitude

Når input-signalene er i fase, kansellerer de hverandre og output ligger rundt 0 volt



# Eksempel på implementasjon (741-type)

Differensiell forsterker

Strømspeil

Nei, dere får ikke  
spørsmål om  
denne på eksamen ☺

Non-inverting  
input

Inverting  
input

3

2

1

5

Offset  
null

4

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

16

17

18

19

20

21

22

23

24

25

26

27

28

29

30

31

32

33

34

35

36

37

38

39

40

41

42

43

44

45

46

47

48

49

50

51

52

53

54

55

56

57

58

59

60

61

62

63

64

65

66

67

68

69

70

71

72

73

74

75

76

77

78

79

80

81

82

83

84

85

86

87

88

89

90

91

92

93

94

95

96

97

98

99

100

101

102

103

104

105

106

107

108

109

110

111

112

113

114

115

116

117

118

119

120

121

122

123

124

125

126

127

128

129

130

131

132

133

134

135

136

137

138

139

140

141

142

143

144

145

146

147

148

149

150

151

152

153

154

155

156

157

158

159

160

161

162

163

164

165

166

167

168

169

170

171

172

173

174

175

176

177

178

179

180

181

182

183

184

185

186

187

188

189

190

191

192

193

194

195

196

197

198

199

200

201

202

203

204

205

206

207

208

209

210

211

212

213

214

215

216

217

218

219

220

221

222

223

224

225

226

227

228

229

230

231

232

233

234

235

236

237

238

239

240

241

242

243

244

245

246

247

248

249

250

251

252

253

254

255

256

257

258

259

260

261

262

263

264

265

266

267

268

269

270

271

272

273

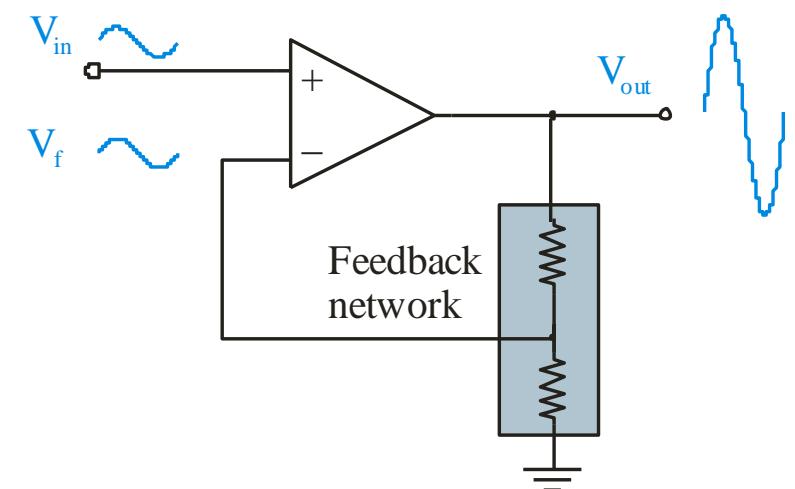
274

275

276

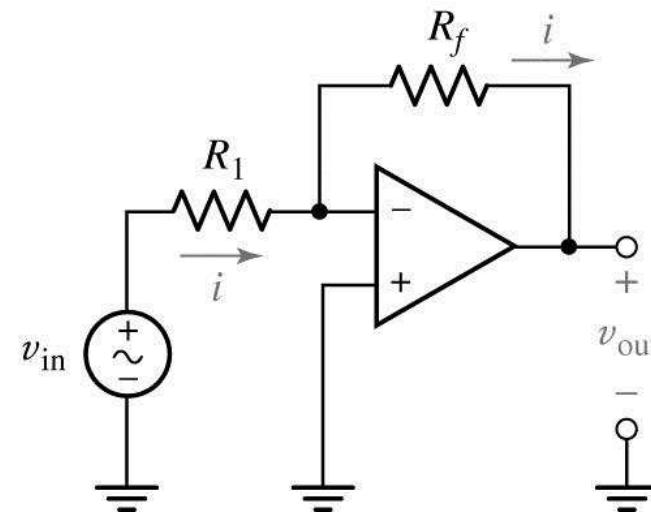
# Negativ tilbakekobling

- Tilbakekobling brukes i bla kontrollsystemer og forsterkere for å bedre linearitet og stabilitet
- På en opamp fører negativ tilbakekobling til at de to input-signalene alltid er i fase, men forskjellen i amplitude mellom dem forsterkes
- Hvis ett input-signal kobles til jord og det andre til en ekstern kilde, ville små variasjoner føre til et stort output-signal (metning)

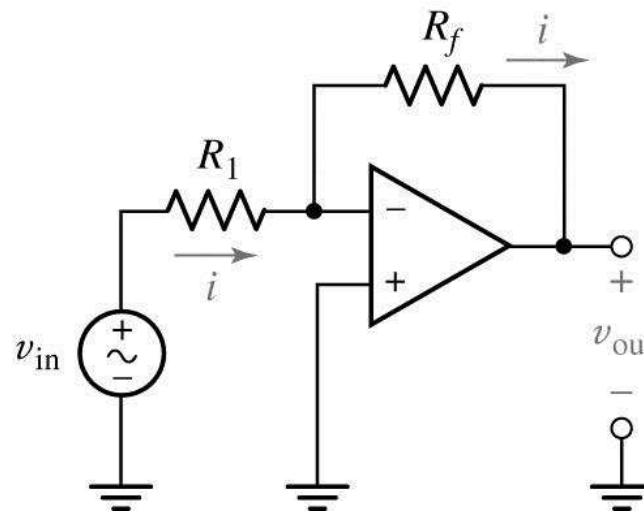


# Opamp med negativ feedback

- En *inverterende* forsterker bruker *negativ tilbakekobling*:



## Inverterende forsterker (forts.)



- Ønsker å finne utgangssignalet  $v_{out}$  som funksjon av  $v_{in}$
- Setter opp KVL for kretsen:

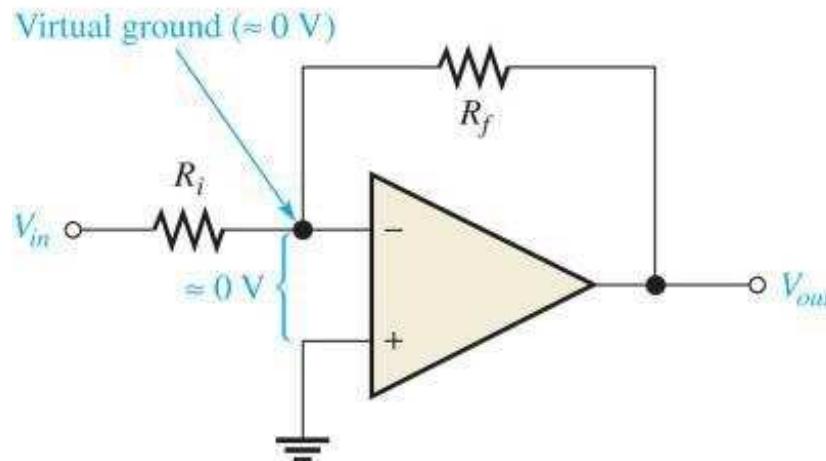
$$v_{in} + R_1 i + R_f i + v_{out} = 0 \Leftrightarrow v_{out} = v_{in} - (R_1 + R_f) i$$

## Inverterende forsterker (forts.)

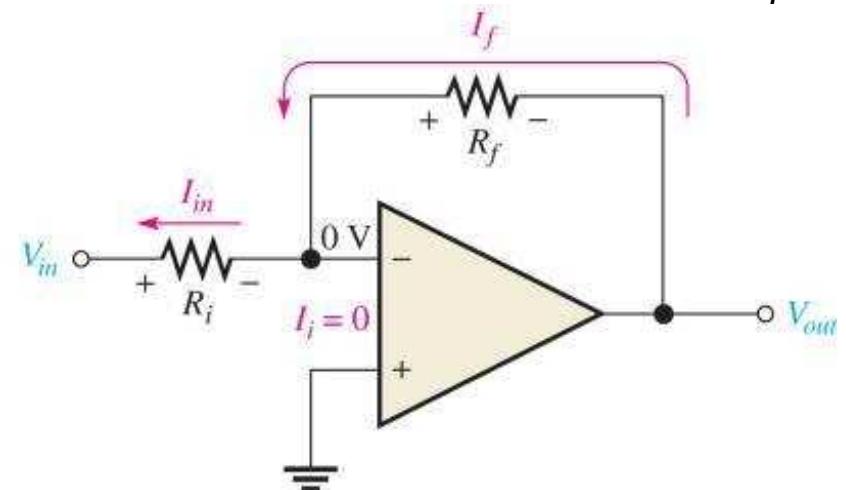
- Ved å anta at begge terminalene har samme spenning (virtuell jord) får vi at

$$-v_{in} + R_1 i = 0 \Rightarrow i = \frac{v_{in}}{R_1}$$

- Har nå to ligninger med to ukjente og dette gir:  $v_{out} = -\frac{R_f}{R_1} v_{in}$



(a) Virtual ground

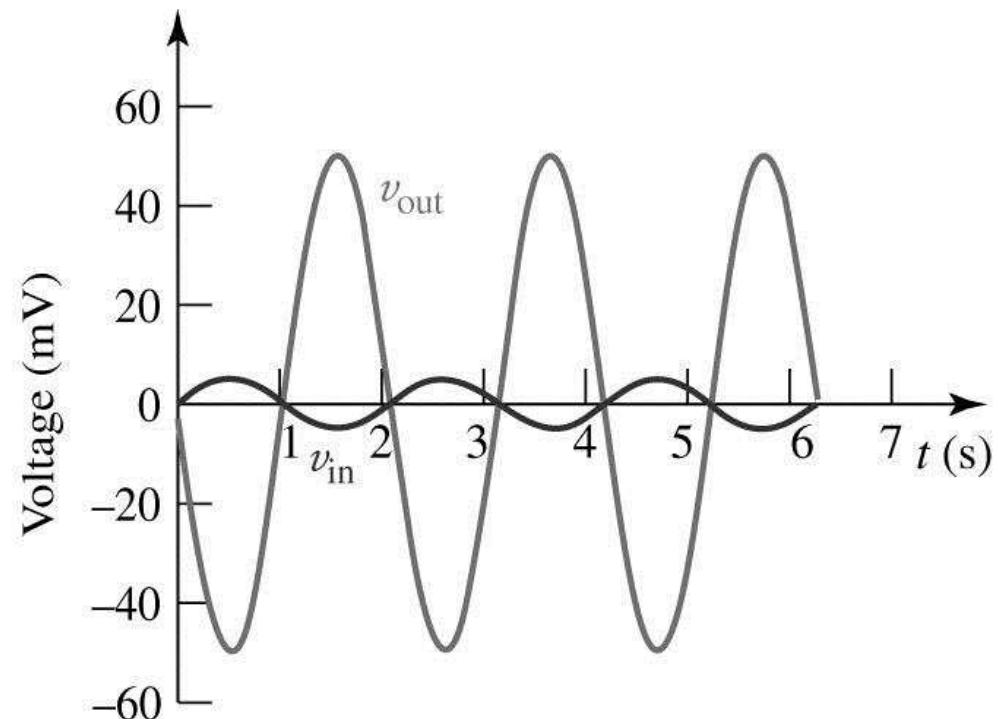
(b)  $I_{in} = I_f$  and current at the inverting input,  $I_i = 0$

## Inverterende forsterker (forts.)

- A er gitt av forholdet mellom  $R_f$  og  $R_1$ :

$$A = -\frac{R_f}{R_1}$$

- Ser på oppførselen med  
 $v_{in}=5\sin(3t)mV$ ,  $R_1=4.7k\Omega$ ,  
 $R_f=47k\Omega$
- Dette gir  $v_{out}=-50\sin(3t)mV$

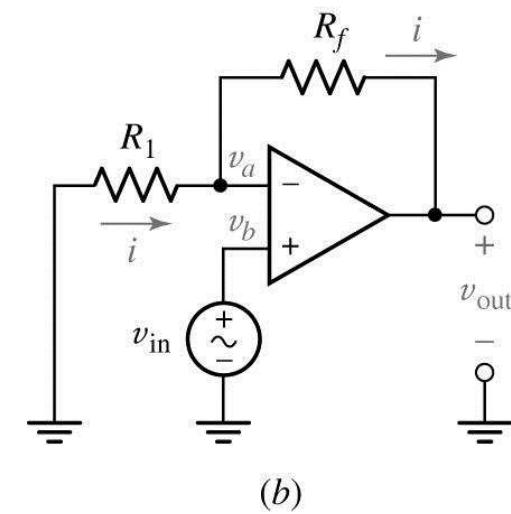
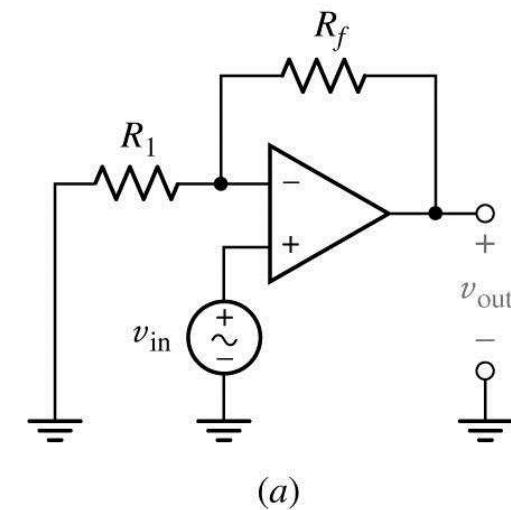


# Ikke-inverterende forsterker

- Hvis man *ikke* ønsker invertert utgang, brukes en ikke-inverterende forsterker
- Bruker KCL for å finne  $v_{out}$  som funksjon av  $v_{in}$ :

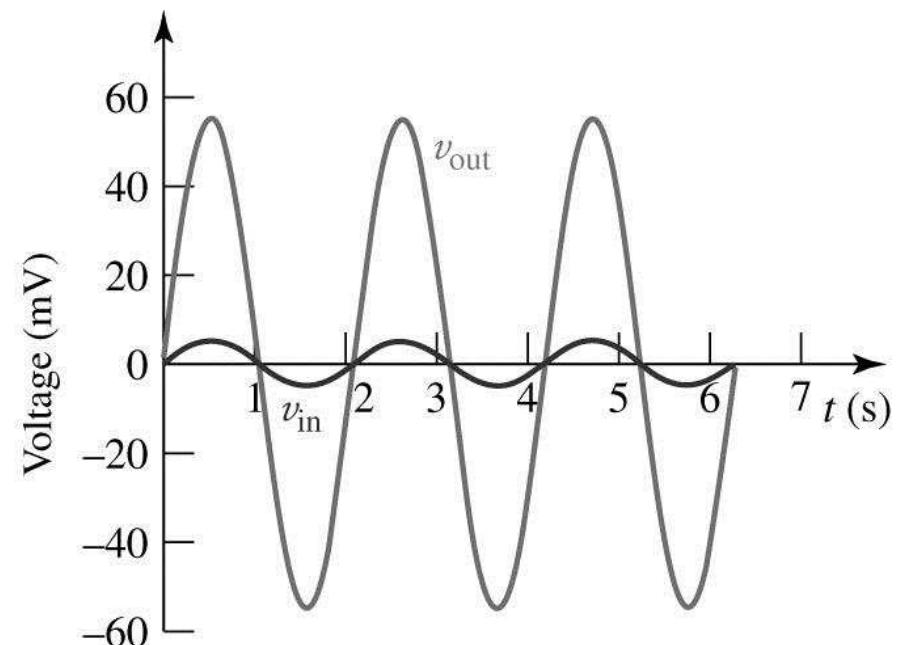
$$\frac{v_a}{R_1} + \frac{v_a - v_{out}}{R_f} = 0 \quad \wedge \quad v_b = v_{in} \quad \wedge$$

$$v_a = v_{in} \quad \Rightarrow \quad v_{out} = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) v_{in}$$



## Ikke-inverterende forsterker (forts)

- Ser på oppførselen med  
 $v_{in}=5\sin(3t)mV$ ,  $R_1=4.7k\Omega$ ,  
 $R_f=47k\Omega$
- Dette gir  $v_{out}=-55\sin(3t)mV$
- Merk forskjellen i A mellom inverterende og ikke-inverterende forsterker.
- En inverterende forsterker har  $A>0$ , mens en ikke-inverterende har  $A\geq 1$



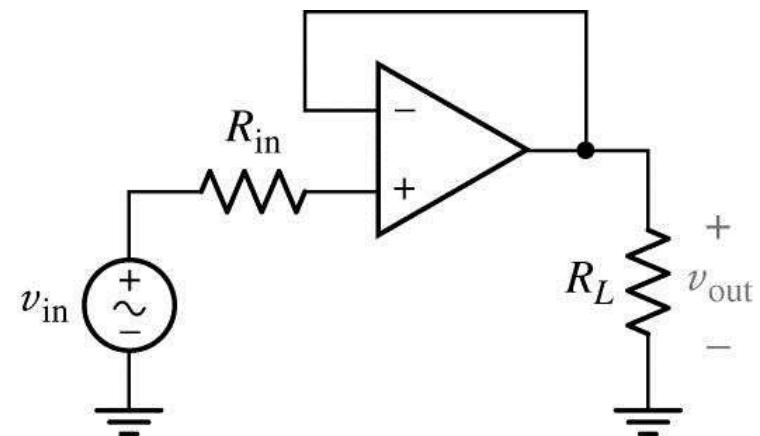
# Spenningsfølger

- En annen mye brukte konfigurasjon er *spenningsfølgeren (buffer)*

$$-V_{in} + V_{out} = 0 \Leftrightarrow V_{out} = V_{in}$$

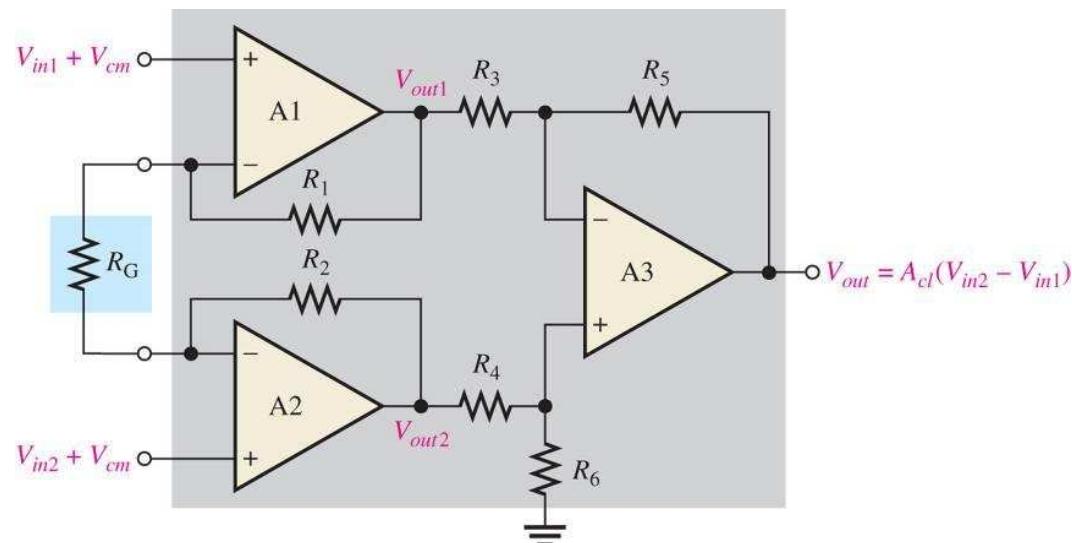
$$A = \frac{V_{out}}{V_{in}} = 1$$

- Spenningsfølger brukes bla for å elektrisk isolere input fra output



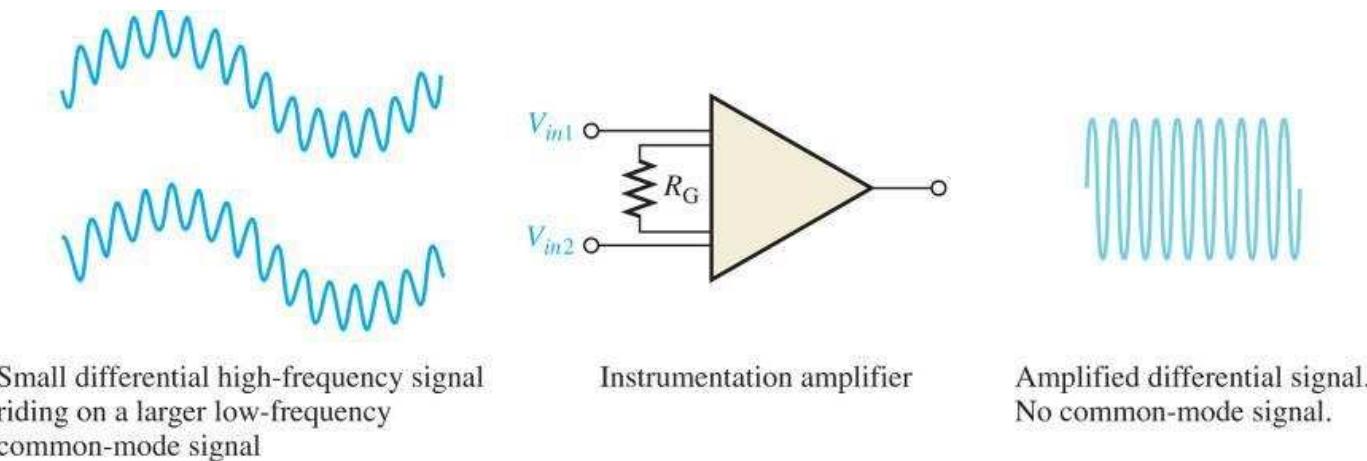
# Instrumenteringsforsterker

- Brukes for å forsterke forskjellen mellom to inngangssignaler, uavhengig av common-mode nivå (felles signal)
- Har høy inngangsimpedans (påvirker ikke kildene) og lav utgangsimpedans
- Brukes mye i kretser hvor det skal måles i støyete omgivelser
- En ekstern motstand  $R_G$  regulerer forsterkningen

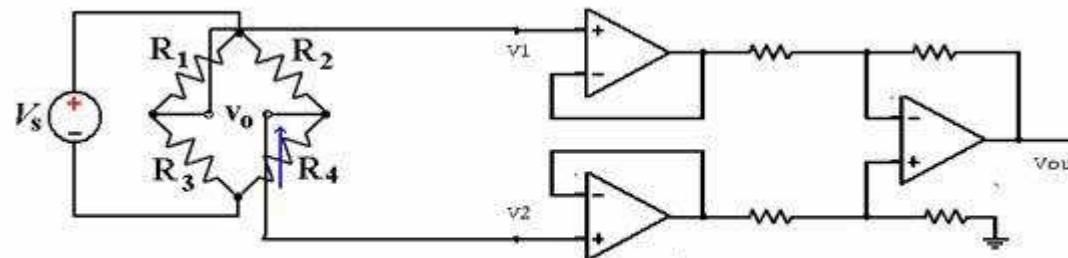


# Instrumenteringsforsterker (forts)

- Forsterkning av common/differential mode signaler

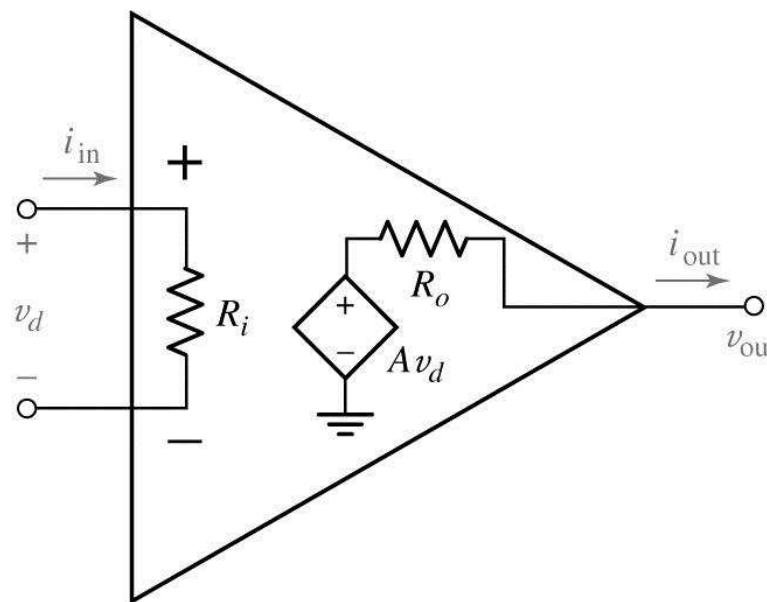


- Instrumenteringsforsterker med Wheatstonebro



# Praktiske opamp'er

- Ved å ta utgangspunkt i den enkle opamp-modellen kan man sette opp hvordan en fysisk opamp avviker fra en ideel



## Praktiske opamp'er (forts)

- Denne modellene har tre parametre som klassifiserer opampen:
  - Inngangsresistansen  $R_i$
  - Utgangsresistansen  $R_o$
  - Forsterkningen  $A$
- For en fysisk opamp er  $R_i$  typisk  $M\Omega$  eller større
- Utgangsmotstanden  $R_o$  er noen få Ohm
- Forsterkningen (open-loop, dvs opamp'en alene) er vanligvis fra  $10^5$  og større
- Spesialiserte opamp'er kan ha helt andre verdier

## Praktiske opamp'er (forts)

- Fra den enkle modellen kan man utlede de to ideelle opampreglene (repetisjon):
  - Det er ingen spenningsforskjell mellom inngangsterminalene
  - Det går ingen strøm inn i inngangsterminalene
- Utgangsspenningen er gitt av

$$v_{out} = Av_d \Rightarrow v_d = \frac{v_{out}}{A}$$

- Hvis  $A$  er svært stor, vil derfor  $v_d$  bli svært liten, siden  $v_{out}$  ikke kan være høyere enn spenningsforsyningen

## Praktiske opamp'er (forts)

- Hvis utgangsmotstanden  $R_o$  er større enn 0, vil outputspenningen  $v_{out}$  synke når utgangsstrømmen  $i_{out}$  øker
- En ideell opamp bør derfor ha  $R_o = 0$
- I praktiske kretser er det viktig at utgangsmotstanden i forhold til lastmotstanden er så liten som mulig slik at det ikke blir spenningsfall som i sin tur er for mye avhengig av utgangsstrømmen

# Common-mode rejection

- Utgangsspenningen er proporsjonalt avhengig av spenningsforskjellen mellom inngangsterminalene
- I en ideell opamp'en vil en felles spenningskomponent ikke påvirke utgangssignalet:
- I en fysisk opamp vil en felles spenningskomponent påvirke utgangssignalet
- Common-mode forsterkning (gain) er definert som

$$A_{CM} = \left| \frac{v_{oCM}}{v_{CM}} \right|$$

der  $v_{oCM}$  er utgangsspenningen når inngangen er  $v_1=v_2=v_{CM}$

# Common-mode rejection

- . Common-mode rejection ratio CMRR er definert som forholdet mellom gain i *differensiell* og *common* modi

$$CMRR \equiv \left| \frac{A}{A_{CM}} \right|$$

- . CMRR oppgis ofte på decibelskala (logaritmisk)

$$CMRR_{(dB)} \equiv 20 \log_{10} \left| \frac{A}{A_{CM}} \right| dB$$

- . I decibel vil en dobling av CMRR innebære en økning på 6

# Metning (saturation)

- . Metning er et ikke-lineært fenomen som opptrer når økning av inngangsspenningen ikke lenger gir økning i utgangsspenningen
- . Utgangsspenningen fra en opamp kan aldri overstige forsynings-spenningen (forsterkningen er derfor i praksis begrenset)
- . Transistorene som driver utgangen i opamp'en har konstant spenningsfall som gjør at maks utgangsspenning ligger under maks forsyningsspenning

# Metning (forts.)

- . Når opamp'en er i metning, opererer den utenfor det lineære området.
- . Overgangen fra lineært område til metning er ikke nødvendigvis symmetrisk, dvs

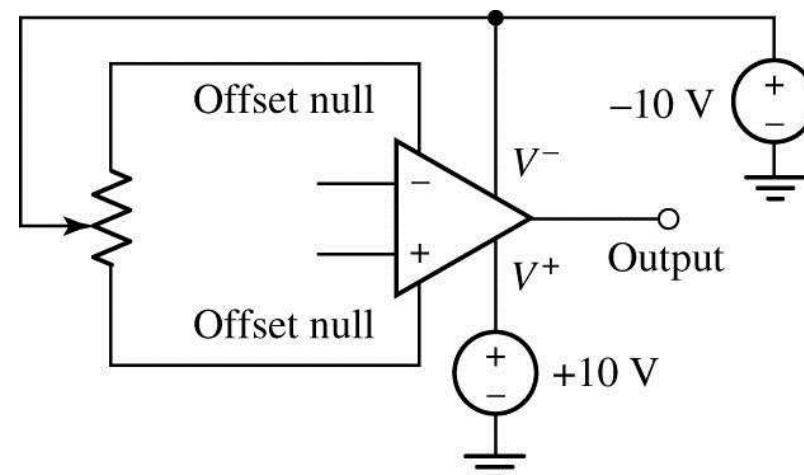
$$\left|V_{lin_{sat-}}\right| \neq \left|V_{lin_{sat+}}\right|$$

- . Den positive og negative metningsspenningen er heller ikke alltid like, dvs

$$\left|V_{max_{sat-}}\right| \neq \left|V_{max_{sat+}}\right|$$

# Input offset-spenning

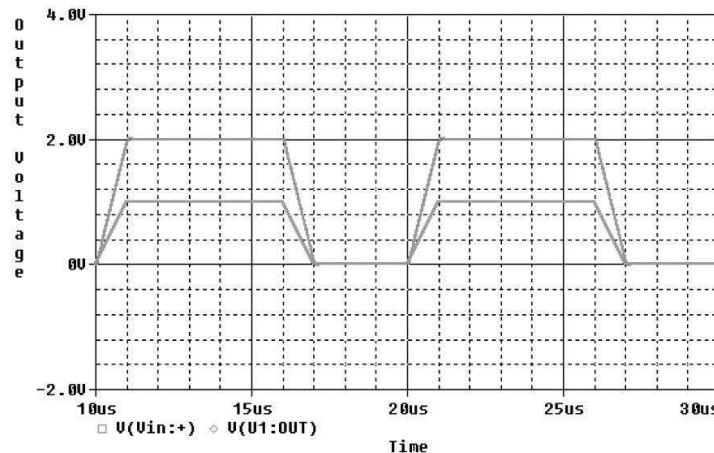
- Hvis inngangsterminalene er koblet sammen vil  $v_d=0$ , og dermed  $v_{out}=0$ , hvis opamp'en er ideell
- I praksis vil imidlertid  $v_{out} \neq 0$  når  $v_d=0$
- Denne effekten kalles for input offset spenning
- Opamp'er er utstyrt med to ekstra terminaler slik at offset spenningen kan justeres til 0



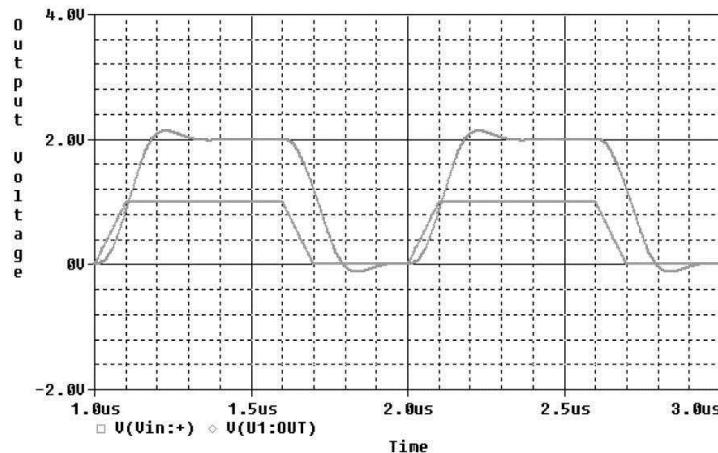
# Slew rate

- . Slew rate er et mål på hvor *raskt* utgangssignalet klarer å endre seg når inngangssignalet endrer seg
- . Slew rate måles i volt per sekund på utgangen
- . Ulike opamp'er har ulike slew rates
- . Opamp'er som har høy maksimal output-spennin vil typisk ha lav slew-rate
- . Slew rate vil bestemme hva som er opamp'ens båndbredde, dvs anvendelige frekvensområde

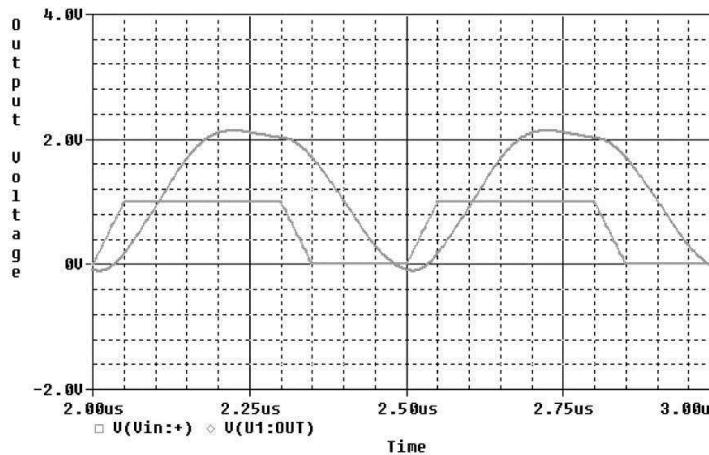
# Slew rate (forts)

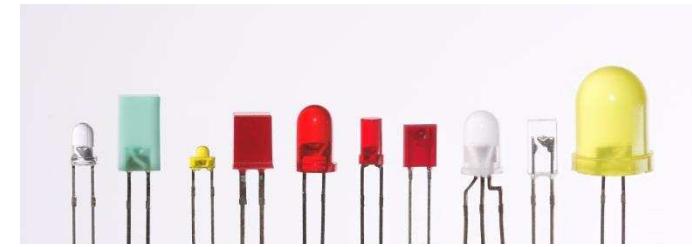


(a)



(b)

(c)  
INV 1411



# Oppsummeringsspørsmål

Kapittel 18



## Spørsmål 1

Hvilken egenskap stemmer for en ideell operasjonsforsterker?

- a) Inputmotstanden  $R_i=0$
- b) Outputmotstanden  $R_o=\infty$
- c) Spenningsforsterkningen  $A_v = 1$
- d) Båndbredden =  $\infty$

## Spørsmål 2

Utgangsspenningen  $V_o$  på en ideell operasjonsforsterker når  $V_+ = V_-$  er

- a)  $V_+ A_v$
- b)  $V_- A_v$
- c) 0
- d)  $\infty$

## Spørsmål 3

Utgangsspenningen  $V_o$  på en ideell operasjonsforsterker  
er gitt av

- a)  $V_+ A_v$
- b)  $V_- A_v$
- c)  $A_v(V_+ - V_-)$
- d)  $A_v(V_- - V_+)$

## Spørsmål 4

Forsterkningen A kan ikke være uendelig fordi

- a) Inngangsmotstanden er ikke uendelig
- b) Utgangsmotstanden er ikke lik 0
- c) Forsterkningen vil være begrenset av  
forsyningsspenningen
- d) Transistorene ikke er lineære

## Spørsmål 5

Et strømspeil kan brukes til å

- a) Kopiere en strøm
- b) Doble en strøm
- c) Halvere en strøm
- d) Lage en skalert kopi av en strøm

## Spørsmål 6

En ikke-inverterende opamp-basert forsterker

- a) Har en forsterkning som er begrenset av utgangsmotstanden
- b) Har en forsterkning som er begrenset av inngangsmotstanden
- c) Har en forsterkning som bestemmes av forholdet mellom eksterne motstander
- d) Har alltid spenningsforsterkning lik 1

## Spørsmål 7

En inverterende opamp-basert forsterker

- a) Kan ikke forsterke DC-signaler
- b) Kan bare forsterke den positive halvdelen av inputsignalet
- c) Har en forsterking A som alltid er større enn 0
- d) Har en forsterking A som alltid er større eller lik 1

## Spørsmål 8

En spenningsfølger

- a) Har en direkte signalvei mellom input og output
- b) Har en spenningsforsterkning lik 1
- c) Har en strømforsterkning lik 1
- d) Har en transkonduktans lik 1

## Spørsmål 9

En praktisk opamp har

- a) Endelig inngangsresistans
- b) Uendelig utgangsresistans
- c) CMRR=1
- d) CMRR=  $\infty$

## Spørsmål 10

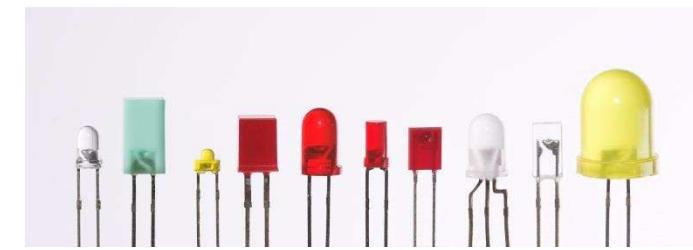
En praktisk opamp har

- a) Har en maksimal utgangsspenning som ligger under maks forsyningsspenning
- b) Har en maksimal utgangsstrøm som er begrenset av slew rate
- c) Har en maksimal slew rate som er begrenset av inngangsinduktansen
- d) Har en maksimal slew rate som er proporsjonal med inngangsresistansen

## Spørsmål 11

En opamp som er i det lineære området

- a) Har transistorer som opererer i metning
- b) Vil ha en lineær sammenheng mellom inngangs- og utgangsspenningen
- c) Vil ha en slew rate lik 0
- d) Vil ha CMRR=1

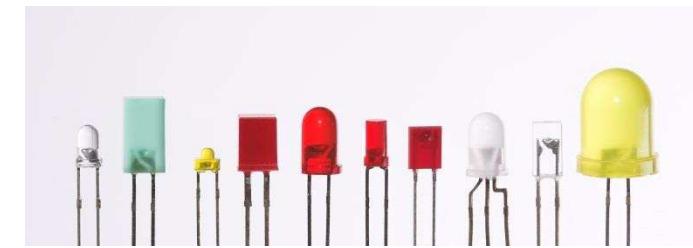


## Spørsmål 12

En opamp som er metning

- a) Vil ikke ha en lineær sammenheng mellom input og output-spenningen
- b) Vil ha en lineær spenningsforsterkning
- c) Vil ha en lineært strømforsterkning
- d) Vil ha konstant CMRR





# Forelesning nr.12 INF 1411

## Elektroniske systemer

Opamp-kretser  
Oscillatører og aktive filtre

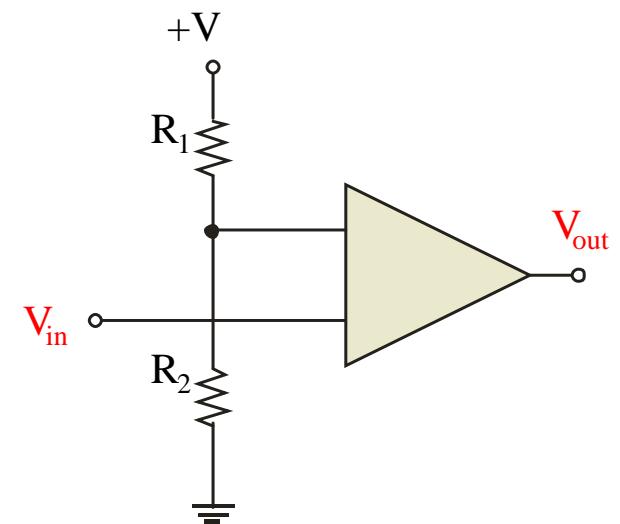


# Dagens temaer

- Komparatorer, addisjon- og subtraksjonskretser
- Integrasjon og derivasjon med opamp-kretser
- Oscillator
- Aktive filtre
- Spenningsregulator
- Dagens temaer er hentet fra kapittel 18.1-18.6

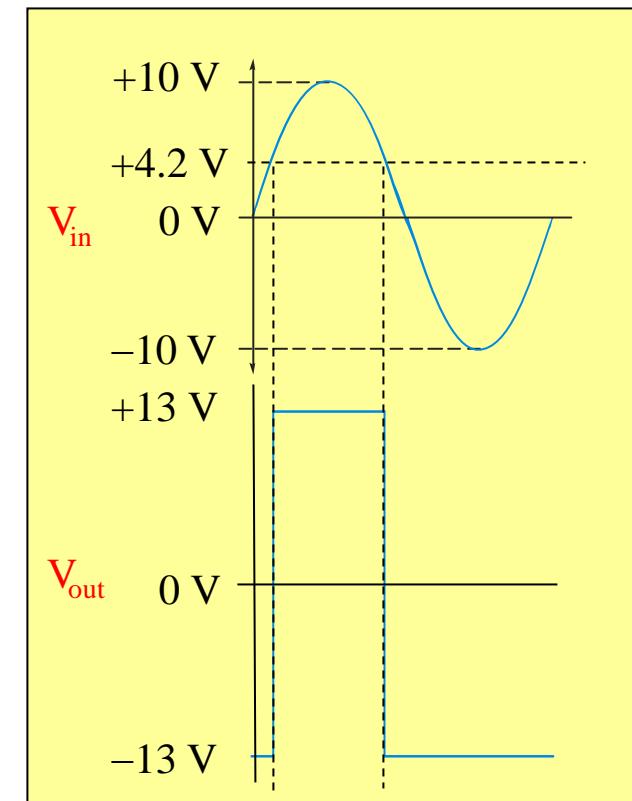
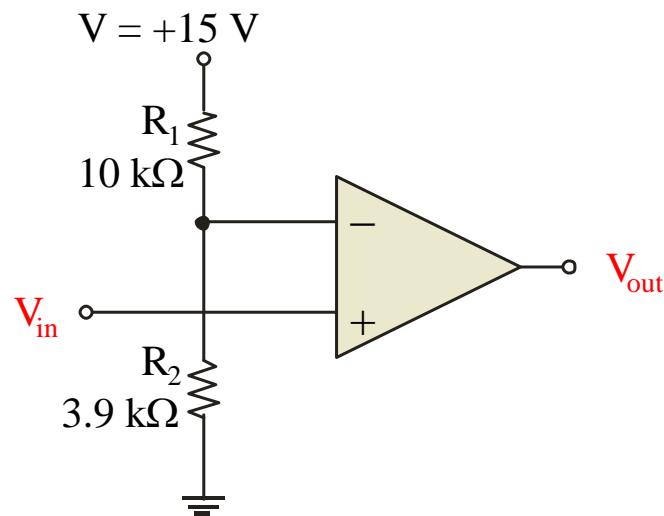
# Komparatorer

- Komparatorer sammenligner to inputsignaler og har et outputsignal som er i metning (dvs. enten max eller min)
- Siden man ønsker max/min-type oppførsel bruker man ikke feedback
- Vanlige opamp'er kan brukes som komparator, men vanligere er det å bruke spesialiserte opamp'er som er raskere



# Komparatorer (forts)

- Eksempel på komparator; maks output-spennin er 13V, og  $V_{ref}=4.2V$



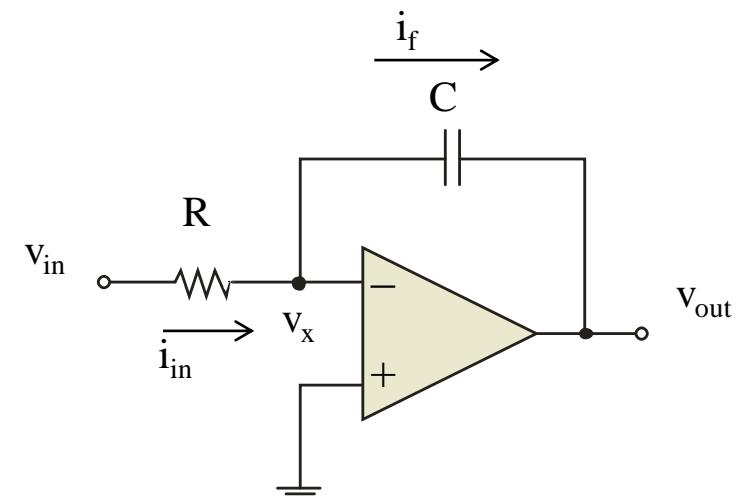
# Integrator med opamp

- En integrator produserer et output-signal som er den *integrerte* av et input-signal, dvs. *summen* av input-signalet over tid

$$V_c = \frac{Q}{C} \wedge V_C = V_x - V_{out} = -V_{out}$$

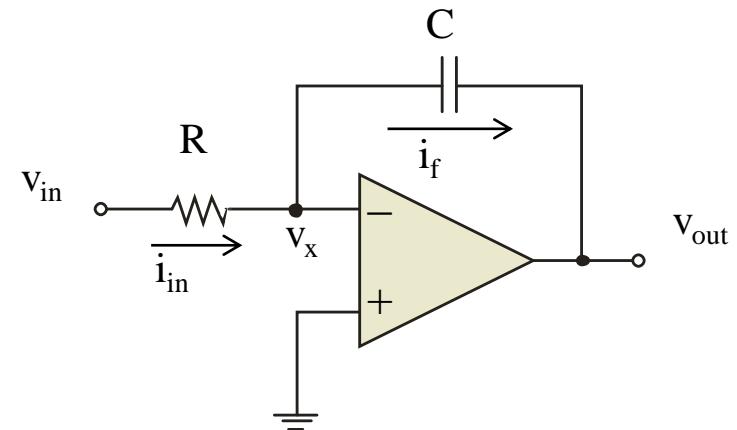
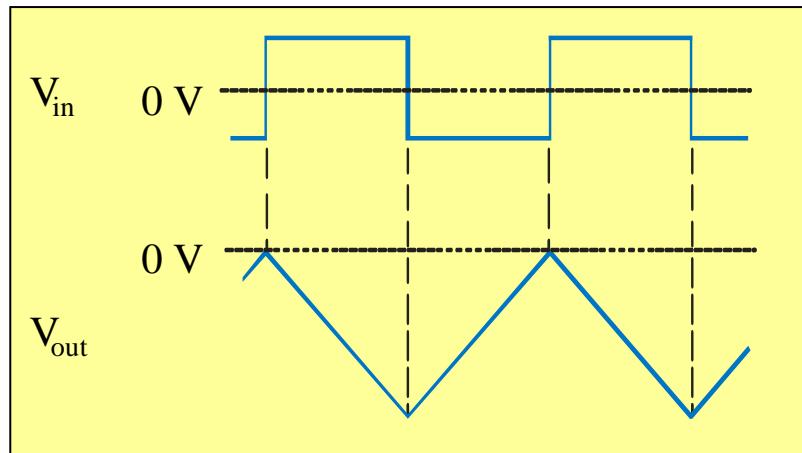
$$-\frac{dv_{out}}{dt} = \frac{1}{C} \frac{dQ}{dt} = \frac{1}{C} i_f$$

$$i_{in} = \frac{v_{in}}{R} \wedge i_f = -C \frac{dv_{out}}{dt} \Rightarrow v_{out} = -\frac{1}{RC} \int_0^t v_{in} dt$$



# Integrator med opamp (forts)

- Siden integratoren er en inverterende forsterker vil output være negativ (forutsatt positiv og negativ forsyningspenning)
- Hvis input er en firkantbølge sentrert rundt 0V vil output være en negativ trekantbølge (forutsatt at man ikke går i metning)



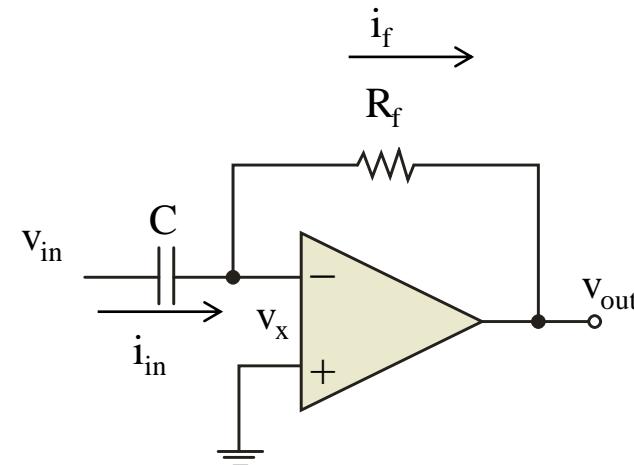
# Differensiator med opamp

- En differensiator lager et output-signal som er proporsjonalt med den *deriverte* av inputsignalet, dvs *endringen i* inputsignalet over tid

$$i_{in} = i_f \wedge i_f = -\frac{v_{out}}{R_f}$$

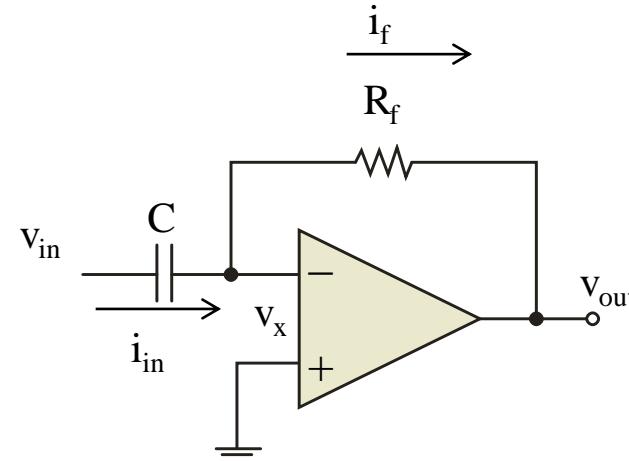
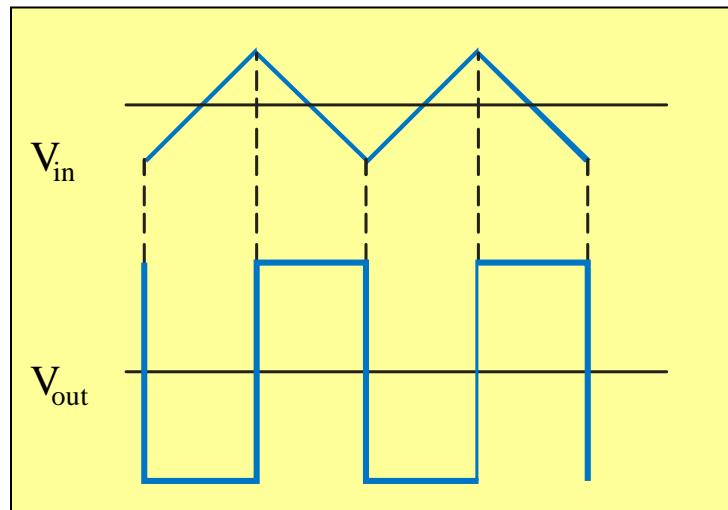
$$Q = Cv_{in} \Rightarrow \frac{dQ}{dt} = i_{in} = C \frac{dv_{in}}{dt}$$

$$\Rightarrow v_{out} = -R_f C \frac{dv_{in}}{dt}$$



# Differensiator med opamp (forts)

- Hvis input er et trekant-signal vil output være et negativt firkantsignal når inputsignalet stiger, og positivt når input signalet faller (inverterende)

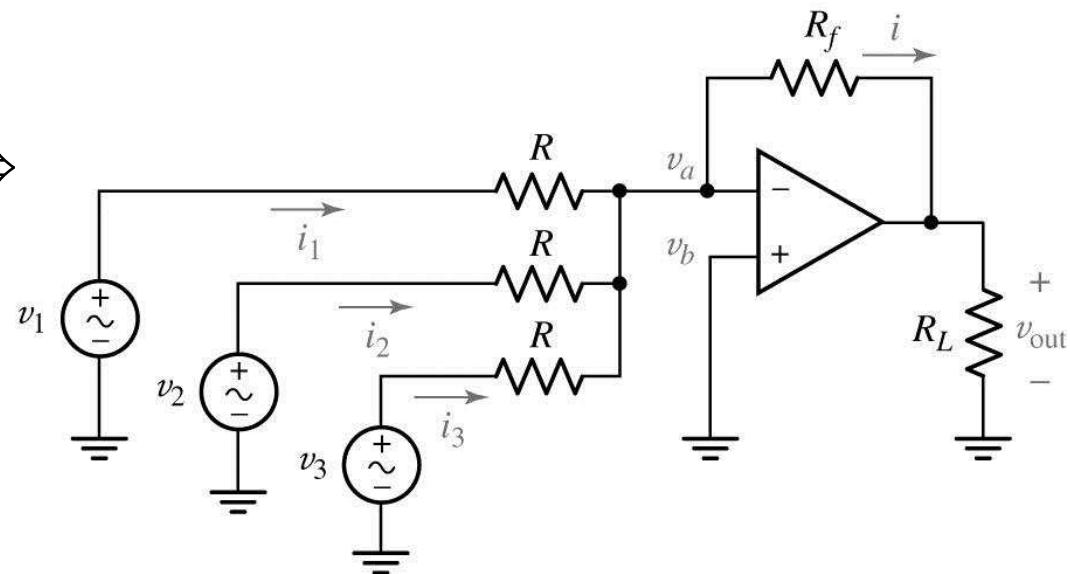


# Summasjonsforsterker

- En operasjonsforsterker kan brukes til å summere spenninger og eventuelt skalere dem
- Output-spenningen er gitt av

$$\frac{V_a - V_{out}}{R_f} + \frac{V_a - V_1}{R} + \frac{V_a - V_2}{R} + \frac{V_a - V_3}{R} = 0 \Rightarrow$$

$$V_{out} = -\frac{R_f}{R}(V_1 + V_2 + V_3)$$

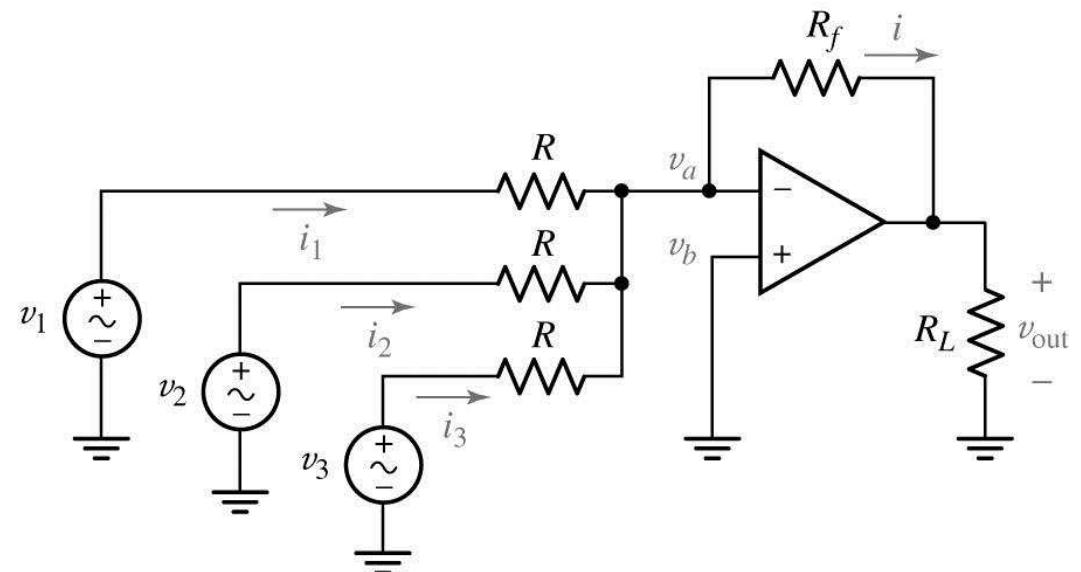


# Gjennomsnittsberegning

- Ønsker å beregne gjennomsnittsspenningen av inputsignalene, må  $R_f = \frac{R}{n}$

$$v_{out} = -\frac{R_f}{R}(v_1 + v_2 + v_3) \Rightarrow$$

$$v_{out} = -\frac{R}{n} = \frac{1}{n}(v_1 + v_2 + v_3)$$

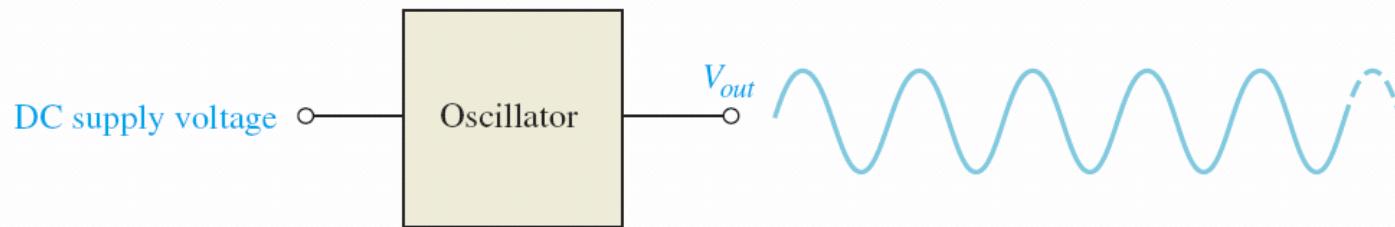


# Spørsmål

- Hva beregner en differensiator?
- Hva beregner en integrator?
- Hvilken funksjon har en komparator?
- Bruker man feedback i en komparator?
- Hvordan ser utgangssignalet fra en komparator ut?
- Kan man bruke en opamp som en komparator?
- Hva er en summasjonsforsterker?
- Hvordan kan man bruke en summasjonsfortserker til å beregne gjennomsnittsverdien av inputspenningene?

# Oscillatører

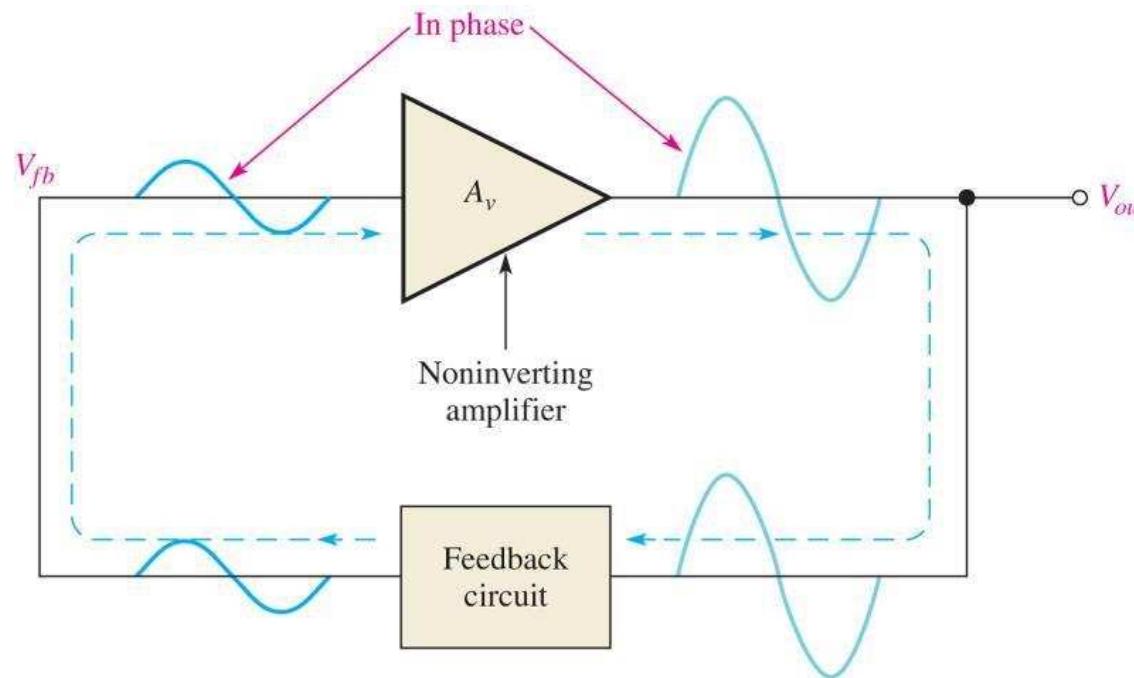
- Oscillatører produserer et repeterende ac-signal basert på et likespennings input-signal



- Oscillatører brukes i bla mobiltelefoner, radioutstyr og PC'er
- Oscillatører inneholder forsterkere og positiv tilbakekobling som gir både faseskift og dempning
- Oscillatører må gi en stabil og konfigurerbar utfrekvens

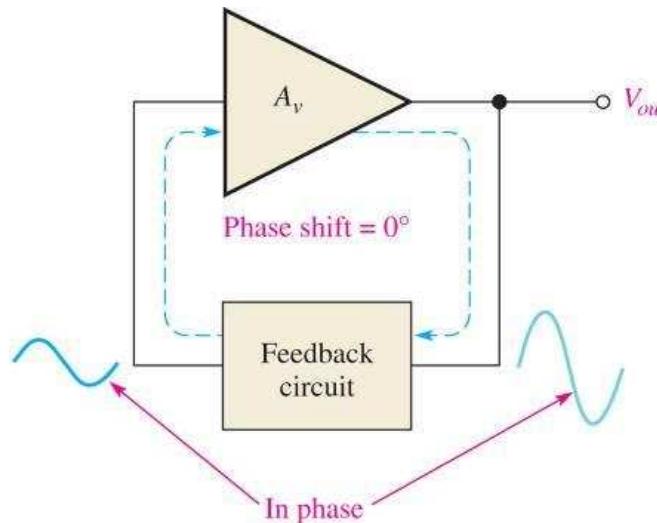
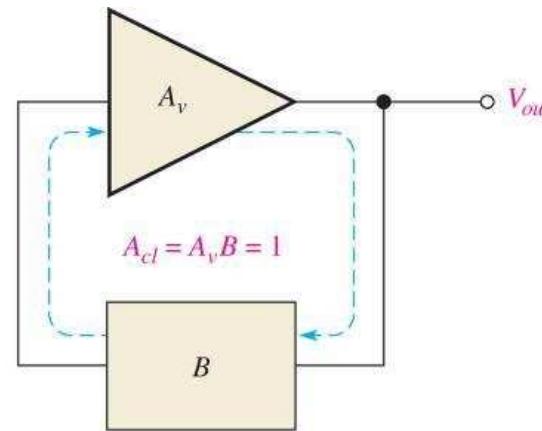
# Positiv feedback

- Positiv feedback skjer når en del av outputsignalet føres tilbake som inputsignal *uten* faseskift



# Positiv feedback (forts)

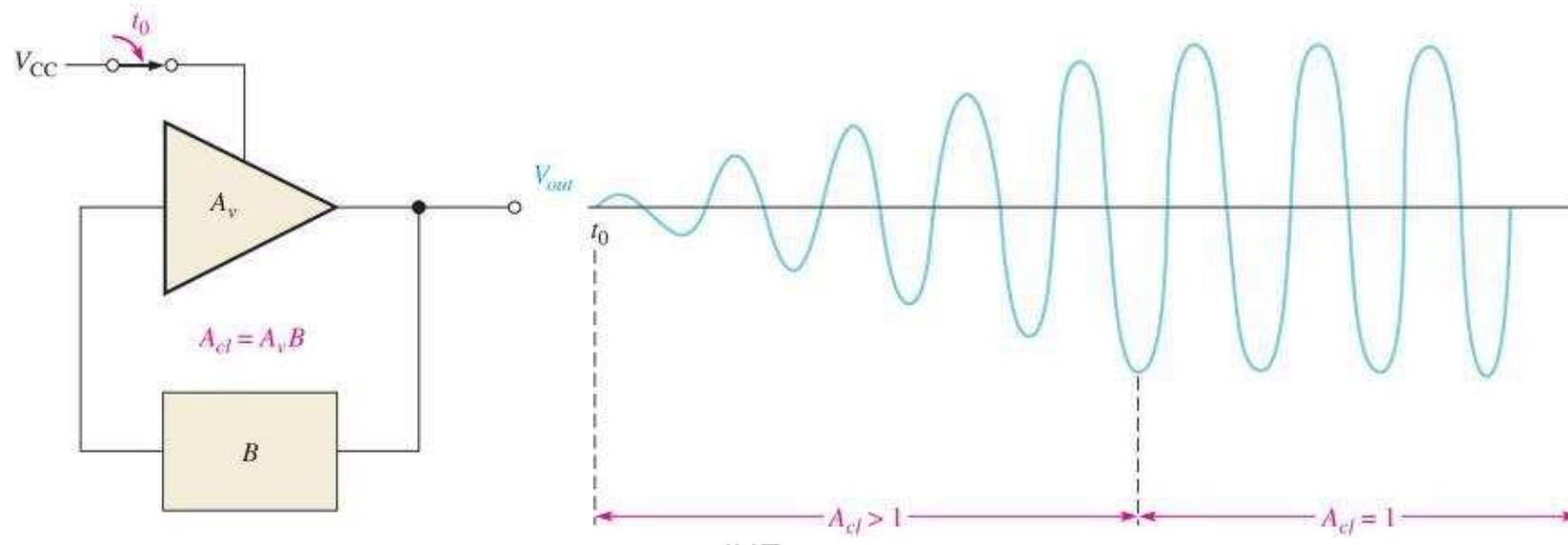
- To betingelser må være tilstede for oscillasjon:
  - Faseskift =0 grader rundt feedback-løkken
  - Spenningsforsterkning  $A_{cl} = 1$  rundt feedback-løkken
- Spenningsforsterkningen  $A_{cl}$  er gitt av  $A_{cl} = A_v B$

(a) The phase shift around the loop is  $0^\circ$ .

(b) The closed loop gain is 1.

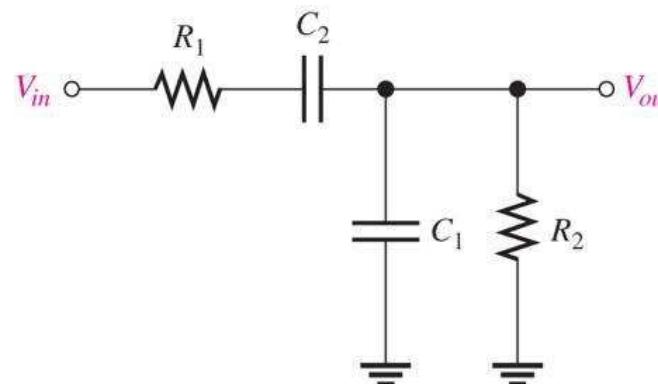
# Oppstart-betingelser

- Oscillatører basert på en dc-spenning trenger ikke input-signal for å oscillere
- Men for å starte oscillasjon må forsterkningen rundt den lukkede feedback-løkken være  $>1$  helt til amplituden har nådd det ønskede nivået

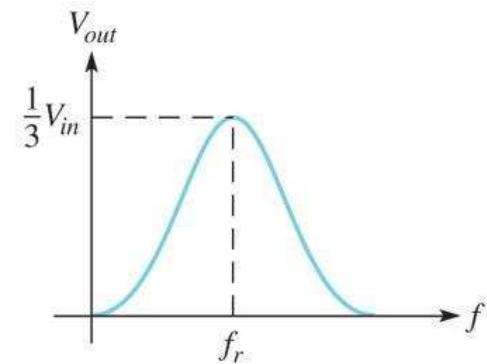


# Wien-brigde oscillator

- En Wien-brigde oscillator genererer sinus over et bredt frekvensområde med lav forvrengning
- Oscillatoren består av en «lead-lag» tilbakekobling og en opamp
- En lead-lag krets fungerer som et *høypassfilter* etterfulgt av et *lavpassfilter*
- Dette gir et *båndpassfilter* med amplitude  $1/3$  av  $V_{in}$  for resonans (oscillasjons)-frekvensen  $f_r$  når  $R_1=R_2$  og  $X_{C1}=X_{C2}$



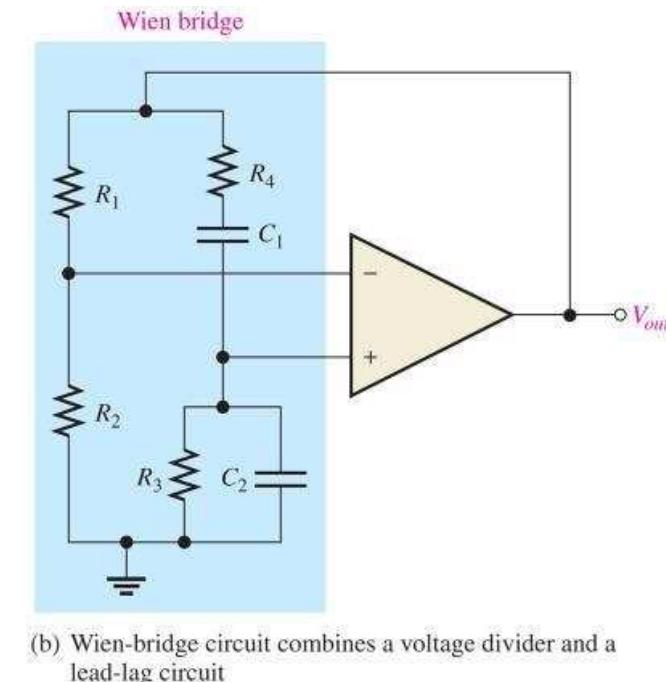
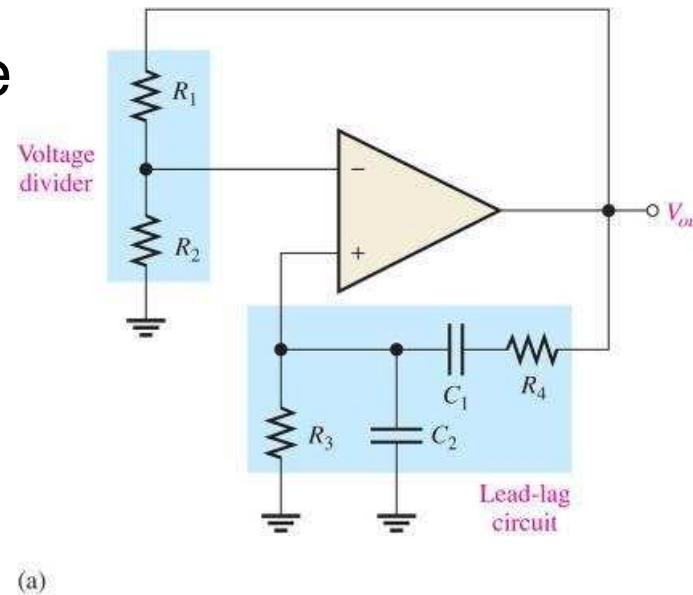
(a) Circuit



(b) Response curve

# Wien-brigde oscillator (forts)

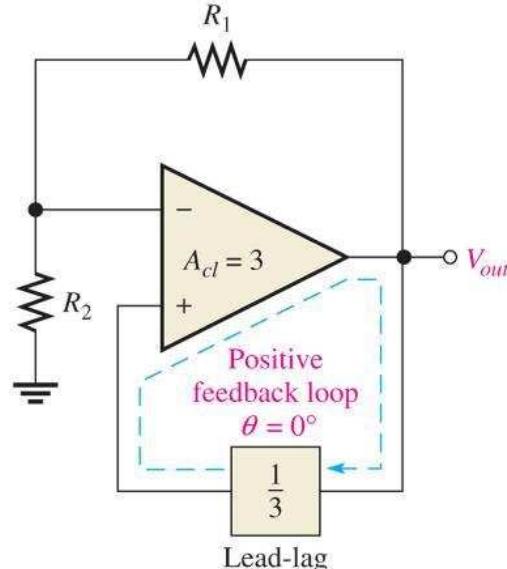
- Oscillasjonsfrekvensen  $f_r$  er  $f_r = \frac{1}{2\pi RC}$
- Kun ved oscillasjonsfrekvensen er fasedreiningen mellom  $V_{in}$  og  $V_{out}$  0 grader
- «Lead-lag»-kretsen brukes i den positive feedback-sløyfen, og en spenningsdeler gir negativ tilbake-kobling



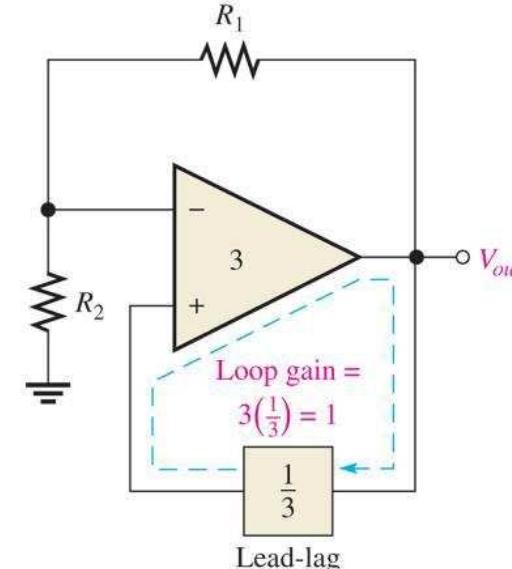
# Wien-bridge oscillator (forts)

- Wien-bridge oscillatoren kan ses på som en ikke-inverterende forsterker hvor tilbakekoblingen kommer via lead-lag kretsen
- Siden lead-lag kretsen har et max gain på  $B=1/3$ , må opamp'en gi en forsterkning på  $A_v=3$  for at  $A_{cl} = A_v B = 1$

$$R_1 = 2R_2 \Rightarrow A_v = 3$$



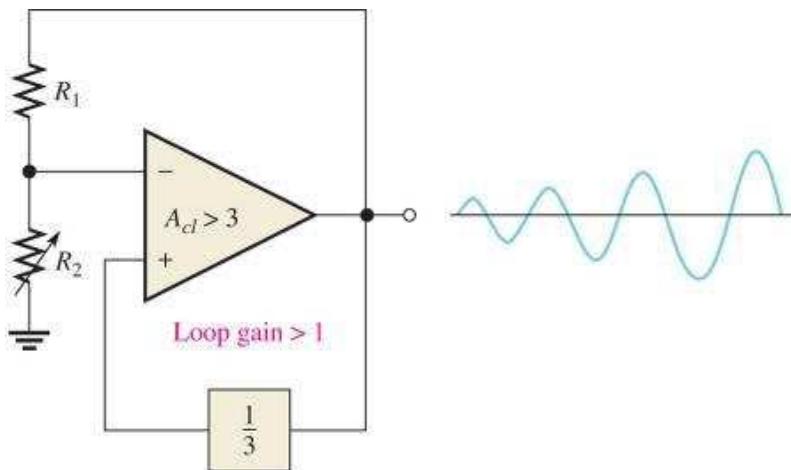
(a) The phase shift around the loop is  $0^\circ$ .



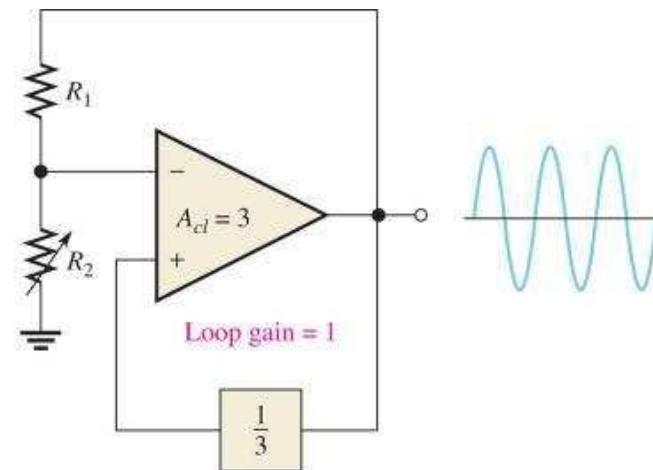
(b) The voltage gain around the loop is 1.

# Wien-brigde oscillator (forts)

- For å starte oscillasjonen må  $A_{cl} > 3$  til å begynne med
- Dette kan gjøres ved at  $R_2$ -motstanden varierer med max amplitude på output. Større  $R_2$  gir større  $V_-$ , som igjen gir mer forsterkning



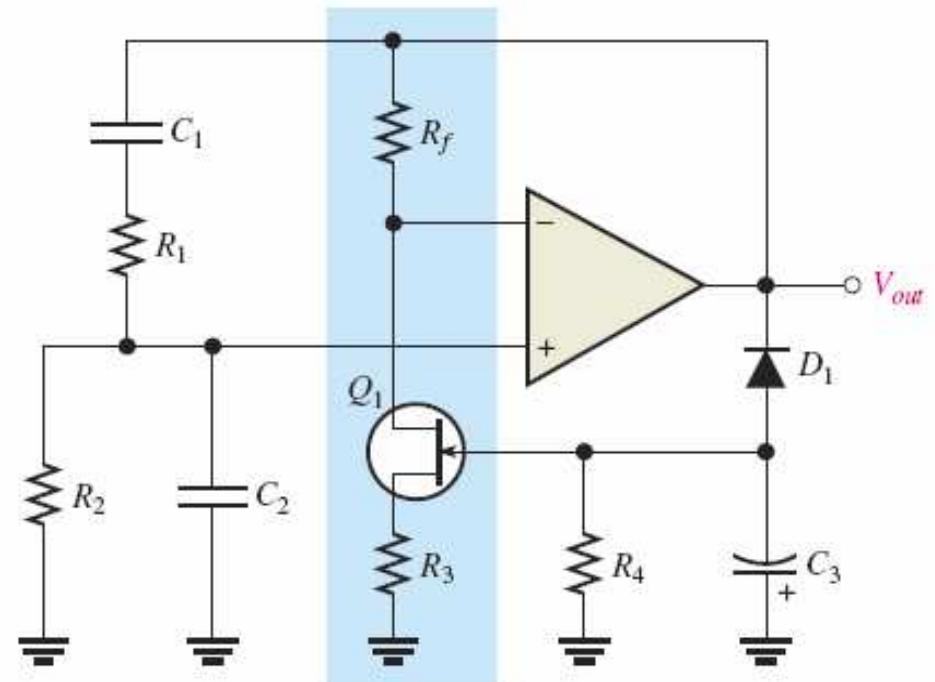
(a) Initially, loop gain greater than 1 causes output to build up.



(b) Loop gain of 1 causes a sustained constant output.

# Wien-brigde oscillator (forts)

- Variabel motstand kan implementeres med en JFET, hvor gatespenningen reguleres av  $V_{out}$
- Når amplituden på utgangen stiger vil JFET'en begynne å lede og forsterkningen vil synke
- Komponentverdiene må avpasses nøye slik at  $A_{cl}=1$
- Avvik i komponentverdiene kan føre til at enten oscillasjonene blir for store (metning) eller ingen oscillasjon



# Spørsmål

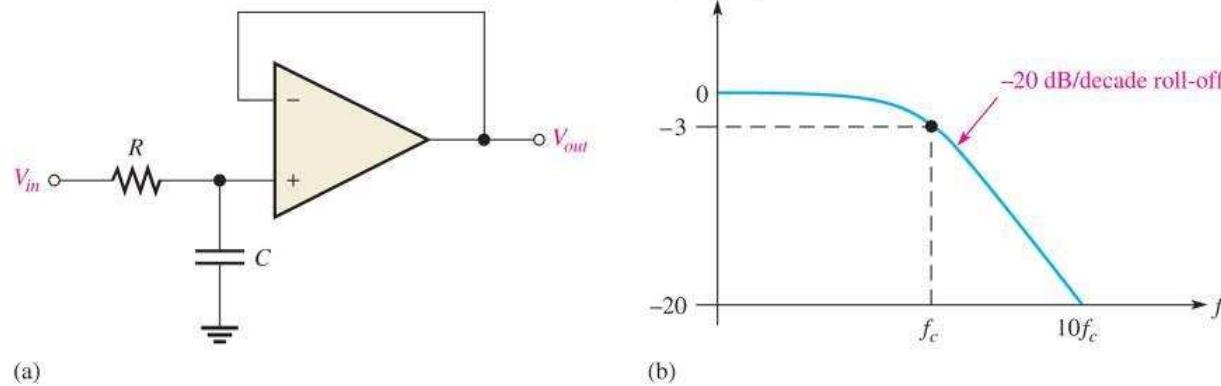
- Hva er en oscillator?
- Hvor stort er closed-loop gain i en oscillator ved oppstart?
- Hvor stort er closed-loop gain i en oscillator ved ønsket oscillasjon?
- Hva bestemmer oscillasjonsfrekvensen?
- Hvor stor er fasedreiningen ved oscillasjonsfrekvensen?

# Aktive filtere

- Et passivt filter består kun av passive komponenter (R, C og L)
- Et passivt filter kan ha maksimalt gain  $A=1$
- Den største ulempen med passive filtere er at de vil ha stor dempning også i passområdet hvis man skal ha bratt «roll-off»
- Aktive filtere består av passive filtere pluss forsterkere
- Forsterkning gjør at man kan både få  $A=1$  i passområdet, og bratt roll-off
- Et filters *orden* (eller antall *poler*) sier noe hvor bratt roll-off er

# Aktivt 1.ordens lavpassfilter

- Et aktivt lavpassfilter kan lages ved å koble et passivt lavpass-filter til den ikke-inverterende inngangen på en opamp

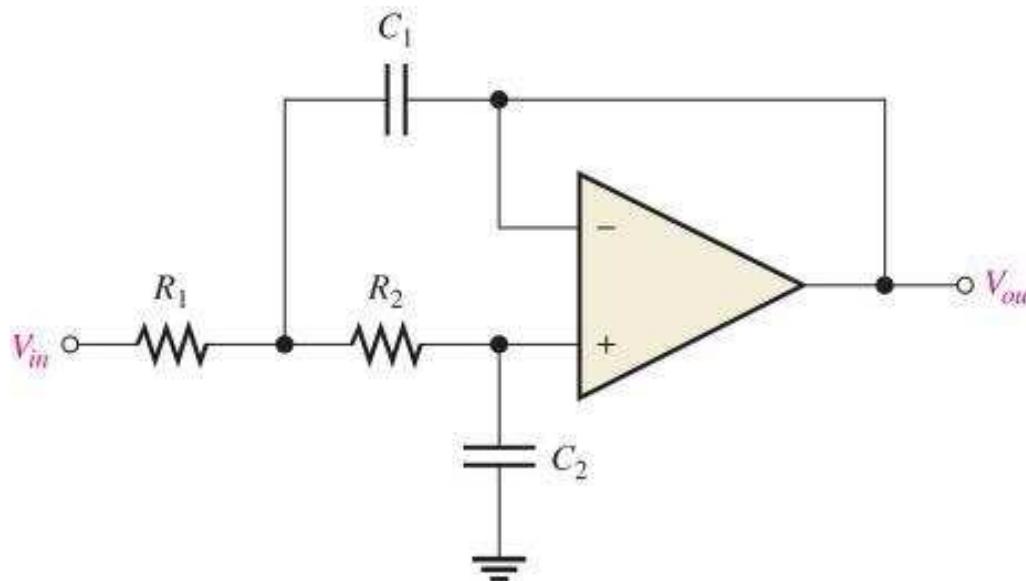


- Et 1.ordens lavpassfilter har en roll-off på -20dB per dekade, dvs forsterkningen faller med en faktor 10 for  $10^*f_c$
- Forholdet mellom  $V_{out}$  og  $V_{in}$  er gitt av

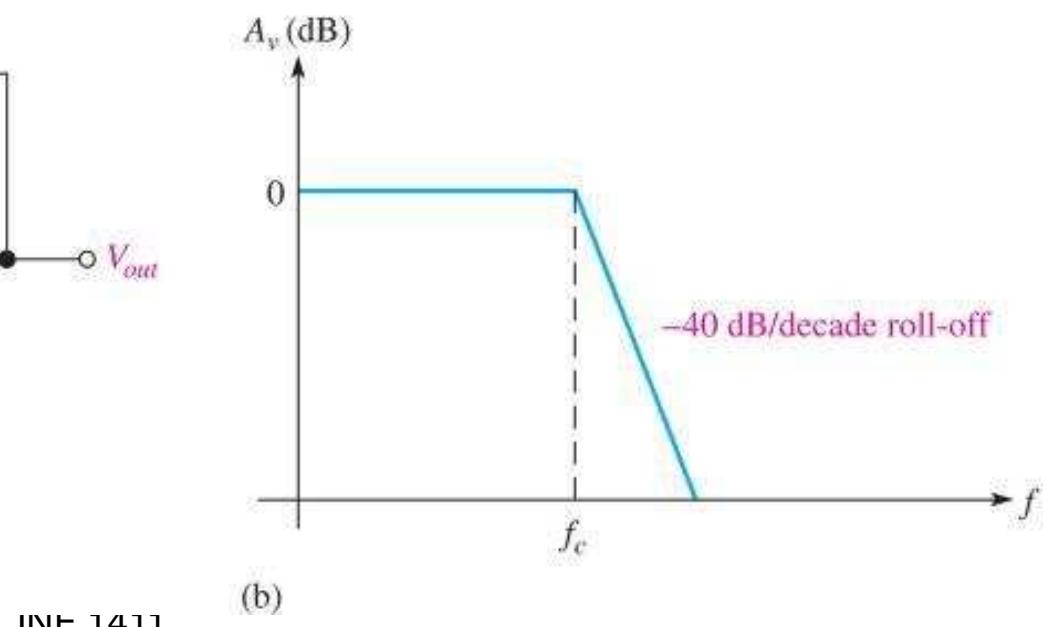
$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{X_C}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}$$

# Aktivt 2.ordens lavpassfilter

- Høyereordens filtre lages ved å koble sammen flere 1.ordens filtre
- For hver orden øker roll-off med -20dB: et 2.ordens filter har roll-off på -40dB/dekade



(a)  
14.04.2015

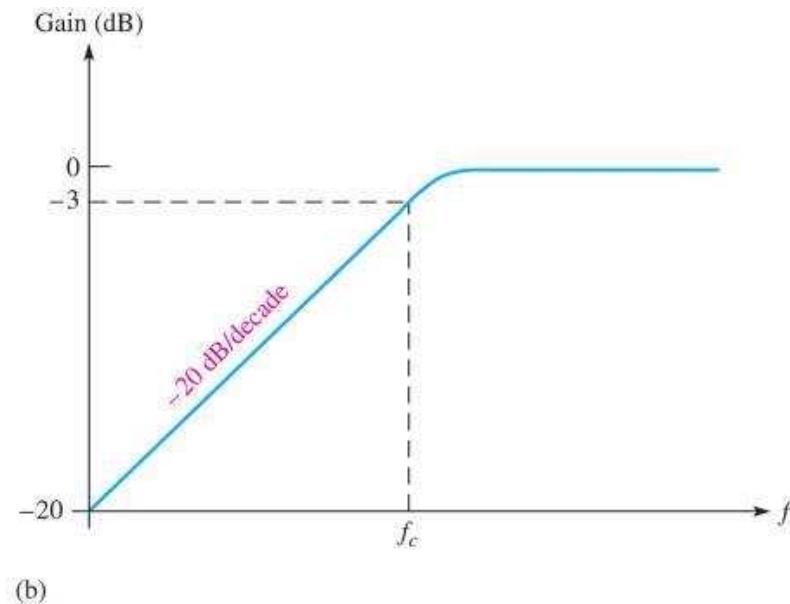
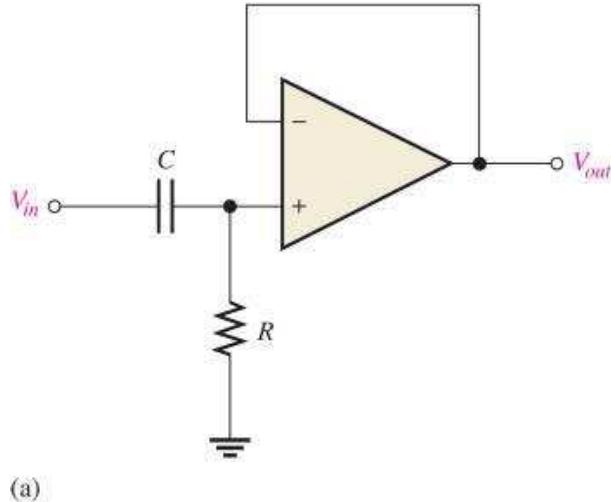


INF 1411

24

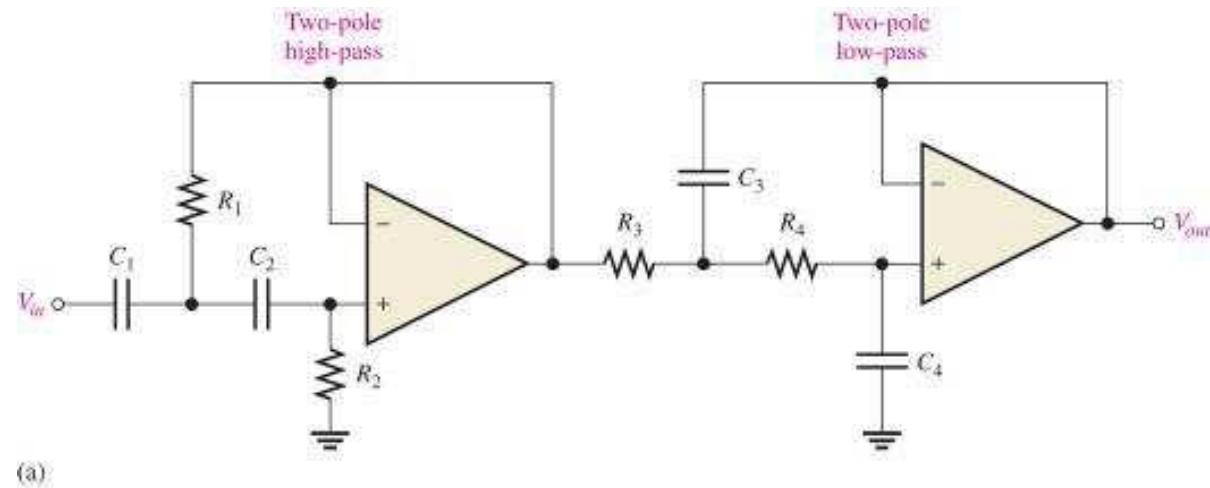
# Aktivt 1.ordens høypassfilter

- Et 1.ordens høypassfilter kan lages ved å koble et passivt høypass-filter til den ikke-inverterende inngangen på opampen
- Siden opampen er koblet som en spenningsfølger, vil  $A=1$  i passområdet

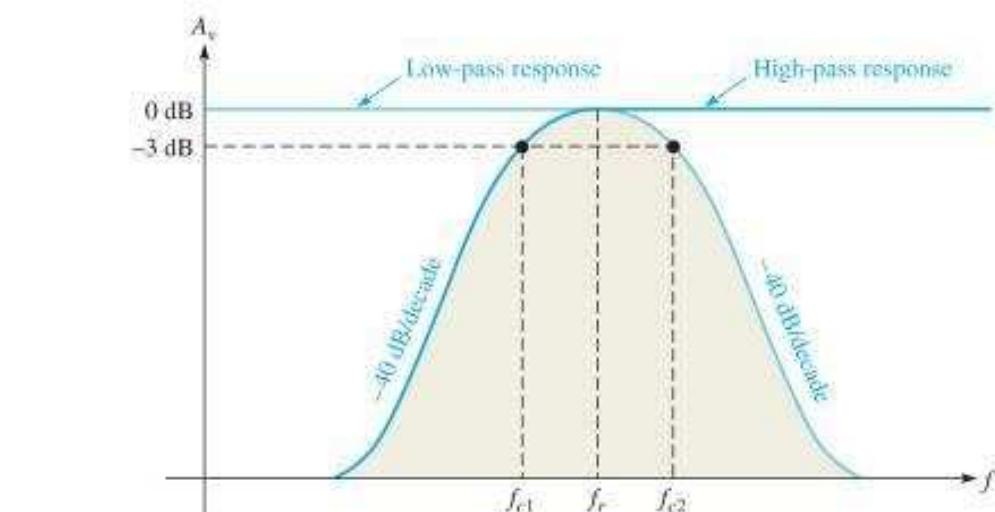


# Aktivt båndpassfilter

- Ved å kaskadekoble et høypass- og lavpassfilter, og avstemme knekkfrekvensene, kan man lage et aktivt båndpassfilter



(a)



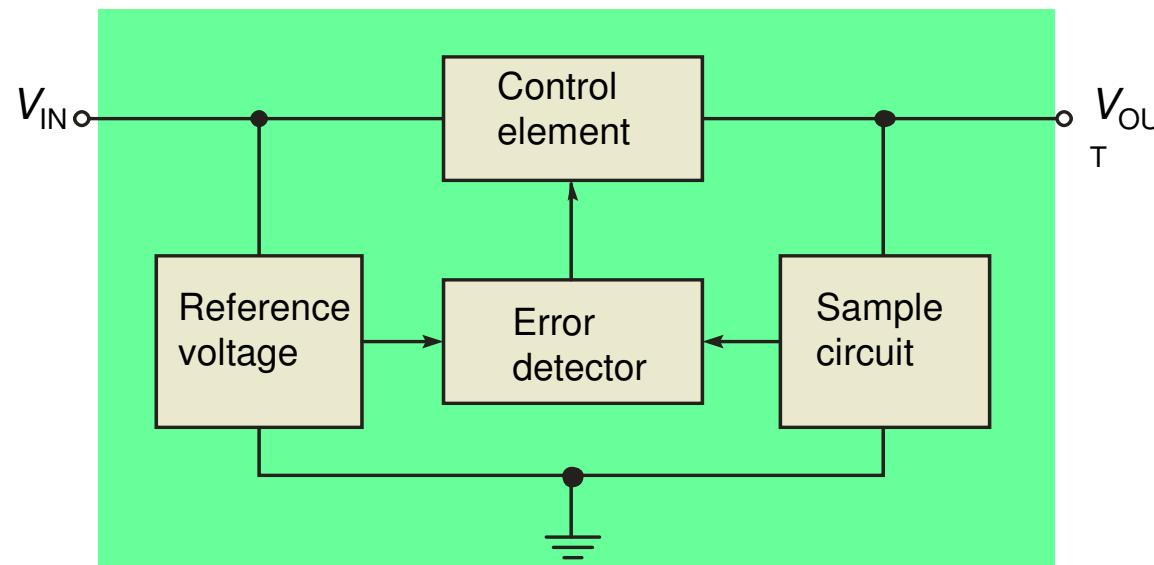
(b)

# Spørsmål

- Hva er et passivt filter?
- Hva er et aktivt filter?
- Hva er roll-off?
- Hva sier et filters orden noe om?
- Hvor stor roll-off har et 1.ordens filter? Et 2.ordens filter?
- Hva er maksimal gain i passområdet for et passivt filter? I et aktivt filter?

# Spenningsregulatorer

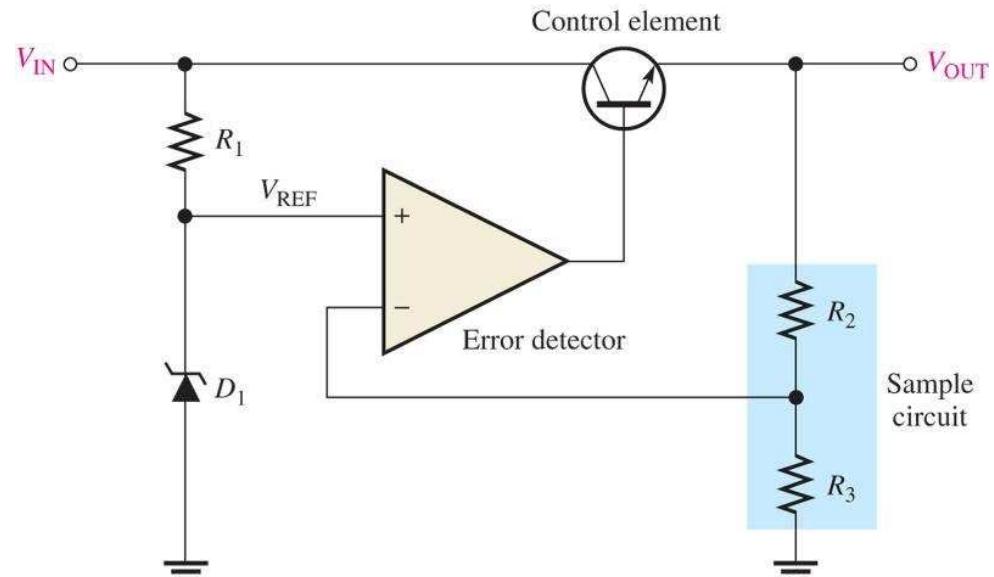
- En spenningsregulator lager en presis og stabil spenning på bakgrunn av en ustabil/varierende innspenning («line»), eller for varierende laststrømmer («load»)
- Spenningsregulatorer brukes blant annet i powersupply og batteridreven elektronikk



# Spenningsregulatorer (forts)

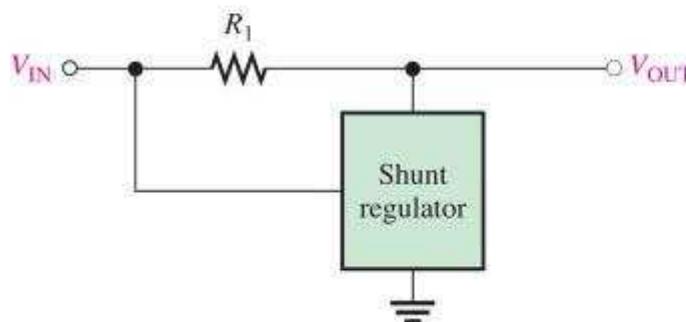
- Serieregulatoren bruker en komparator for å sammenligne output-spenningen med en referansespenning
- Serietransistoren dropper mer eller mindre spenning slik at outputspenningen holdes konstant
- Spenningen på den inverterende inngangen holdes lik  $V_{ref}$  pga tilbakekoblingen

$$V_{out} = \left(1 + \frac{R_2}{R_3}\right) V_{ref}$$

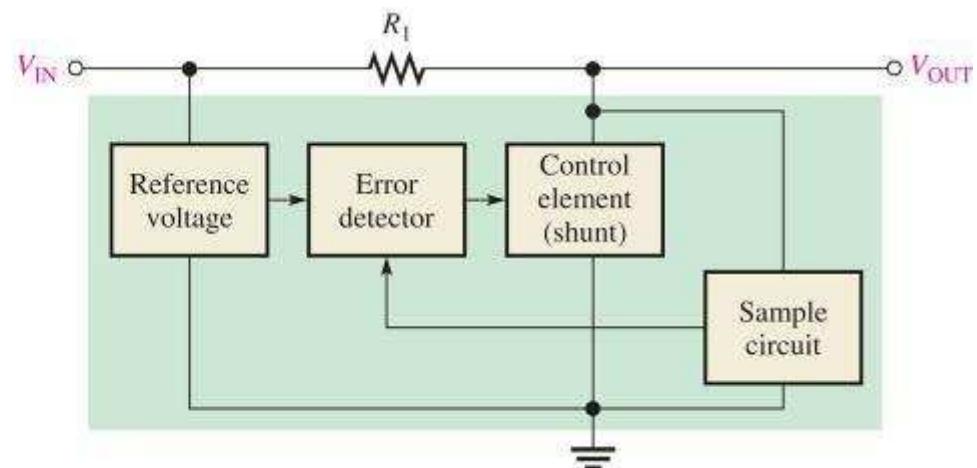


# Spenningsregulatorer (forts)

- Shuntregulatorer holder spenningsfallet over en lastmotstand konstant ved kontrollere spenningsfallet over en motstand som står i serie med lasten



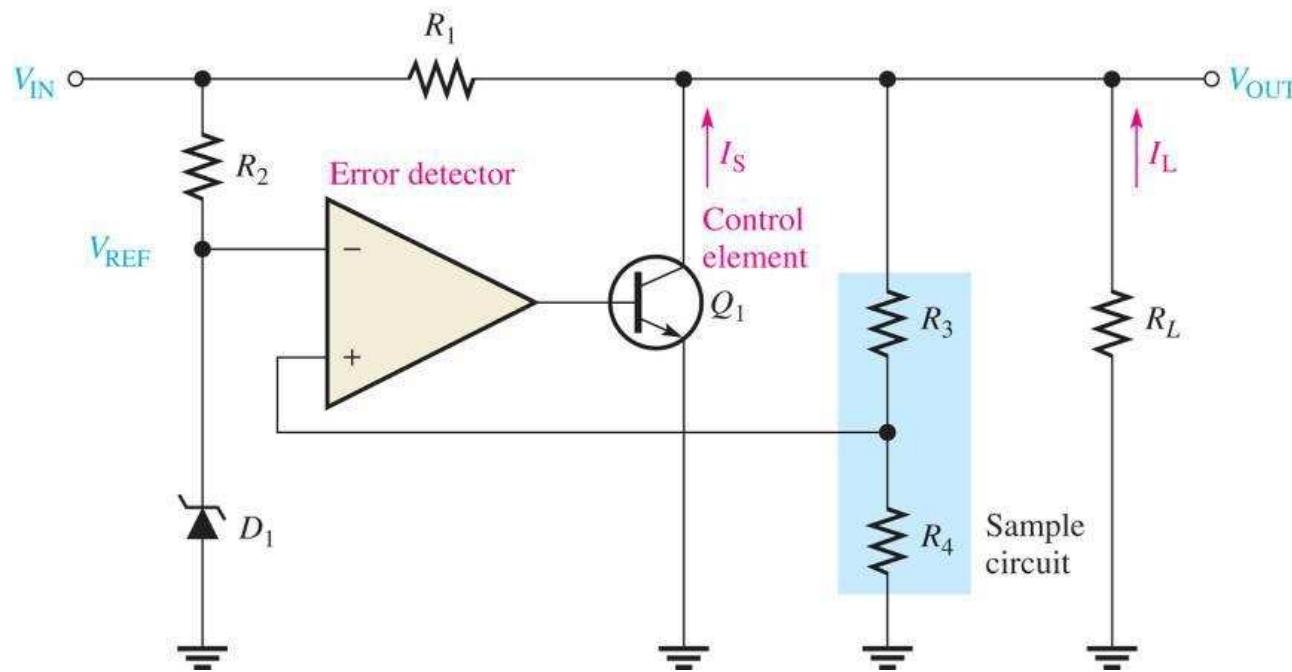
(a) Schematic representation



(b) Block diagram

# Spenningsregulatorer (forts)

- Hensikten med shuntregulatoren er at spenningen skal være mest mulig stabil selv om lastmotstanden eller inputspenningen varierer



# Spørsmål

- Hva er en spenningsregulator?
- Hvilke fire deler består en spenningsregulator av?
- Hva er kontrolldelens oppgave?
- Hva er sample-delens oppgave
- Hva er refereansedelens oppgave?
- Hva er feildetektorens oppgave?
- Hva er en linjeregulators funksjon?
- Hva er en lastregulators funksjon?

## 5. Obligatoriske labøvelse

- Tema: Transistorkarakteristikker, forsterker med BJT og opamp-forsterkere
- Formål: Bli bedre kjent med sammenhengen mellom strøm, spenning, forsterkning og motstandsverdier i BJT og ulike transistorer
- Man må ha lest teorien rundt BJT og operasjonsforsterkere på forhånd
- Svært relevante oppgaver med tanke på eksamen
- Innleveringsfrist 27.april

# Oppsummeringsspørsmål

- Kapittel 19.1-19.6

## Spørsmål 1

Utgangen på en komparator opererer stort sett i?

- a) Det lineære området
- b) Metning
- c) Breakdown
- d) Cutoff

## Spørsmål 2

Hvilket utsagn er FEIL?

En opamp-basert integrator

- a) Gir et output-signal som er summen av input-signalet over tid
- b) Gir et output-signal som er den akkumulerte av input-signalet over tid
- c) Gir et output-signal som er den integrerte av input-signalet over tid
- d) Gir et output signal som er den inverterte av input-signalet

## Spørsmål 3

En opamp-basert derivator beregner

- a) Summen av input-signalen over tid
- b) Den akkumulerte verdien av input-signalen over tid
- c) Endringen i input-signalen over tid
- d) Den integrerte av input-signalen over tid

## Spørsmål 4

En oscillator

- a) Skifter dc-verdien til et input signal
- b) Adderer to ac-signaler
- c) Produserer et ac-signal med en bestemt frekvens
- d) Produserer et ac-signal med fast dc-offset og konfigurerbar amplitude

## Spørsmål 5

Positiv feedback vil si at

- a) En del av input-signalet fasedreies 180 grader og adderes til outputsignalet
- b) En del av output-signalet fasedreies 180 grader og adderes til input-signalet
- c) En del av output-signalet fasedreies 90 grader og adderes til input-signalet
- d) En del output-signalet adderes til input-signalet uten fasedreining

## Spørsmål 6

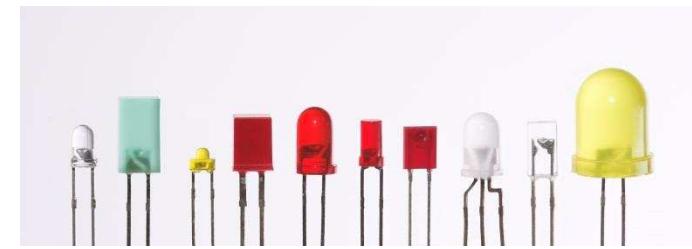
Ett av kriteriene for at oscillasjon skal finne sted er at

- a) Spenningsforsterkningen rundt den lukkede feedback-løkken er 1
- b) Spenningsforsterkningen rundt den lukkede feedback-løkken er ekte større enn 1
- c) Spenningsforsterkningen rundt den lukkede feedback-løkken er mindre enn 1
- d) Faseskiftet rundt feedback-løkken er 180 grader

## Spørsmål 7

Et aktivt filter

- a) Har mindre dempning i passområdet enn et passivt filter
- b) Har slakere roll-off enn et passivt filter
- c) Kan ikke ha gain (A) større enn 1
- d) Har mindre dempning i passområdet enn et passivt filter for samme roll-off



# Forelesning nr.13 INF 1411 Elektroniske systemer

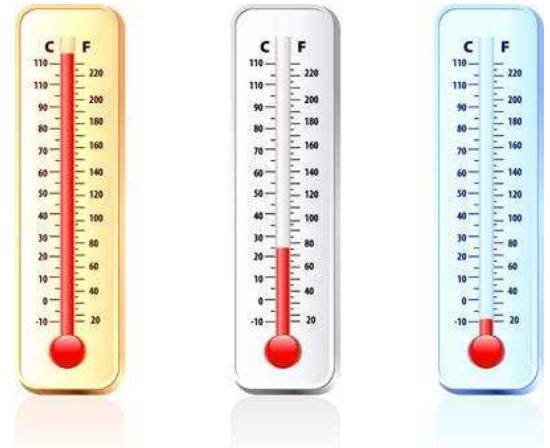
Sensorer  
AD og DA-konvertering



# Dagens temaer

- Sensorer for måling av
  - Temperatur
  - Strekk, press, trykk og væskestrømmer
  - Hastighet og akselerasjon
- Digital-til Analog konvertering (DAC)
- Analog-til-Digital konvertering (ADC)
- Dagens temaer er hentet fra kapittel 19.1-19.5 +  
ekstrastoff dekket kun av forelesning

# Temperaturmåling



- Måling av temperaturer er avgjørende på ulike områder, bla i industrielle prosesser, helse, varme og energi
- Konvensjonell temperaturmåling er basert på varmeutvidelseskoeffisienter til ulike materialer som kvikksølv og etanol, og avlesningen var med det blotte øye
- Moderne temperaturmålere er transducere: Temperaturavlesningen konverteres til en spenning eller strøm som er proporsjonal med temperaturen

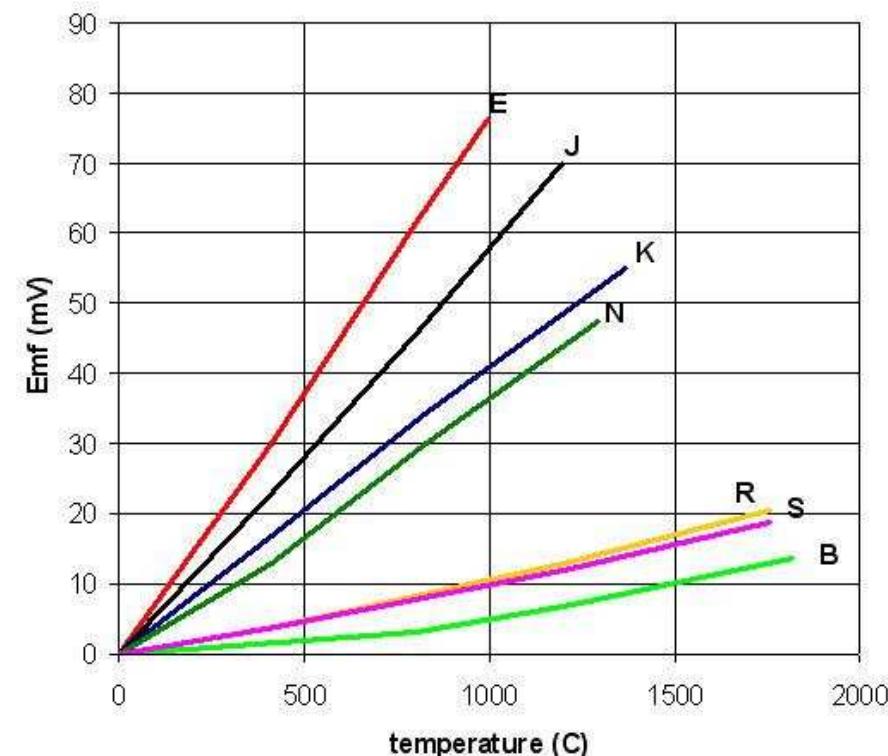
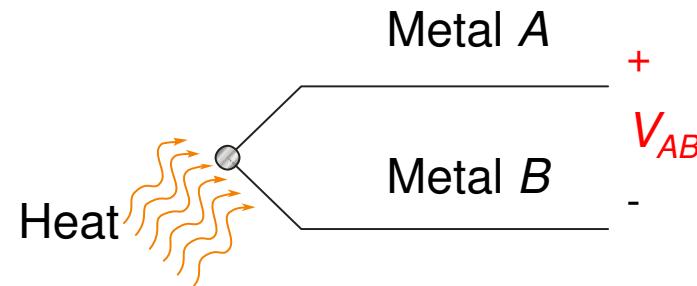
# Temperaturmåling (forts)

- Det benyttes i dag hovedsaklig tre typer transducere:
  - Termokoblinger
  - Temperaturavhengig resistans
  - Termistorer
- Alle er har begrensinger i temperatur-område, presisjon, linearitet og dynamikk
- Begrensningene trekker som regel i motsatt retning, dvs at om man velger høy presisjon har man lite temperaturområde
- Ikke-linearitet kan relativt enkelt kompenseres



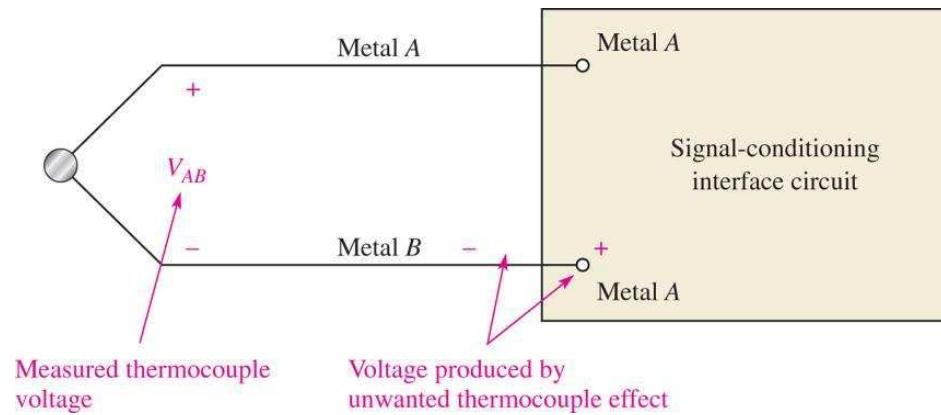
# Termokoblinger

- Termokoblinger er basert på *Seebeck-spenningen*
- Hvis to ulike metaller eller legeringer forbindes, oppstår det et elektrisk felt i overgangen (størrelsesorden mV)
- Størrelsen på feltet øker tilnærmet lineært med temperaturen
- Termokoblinger kan måle fra -250 til 2000° C, men for en gitt metallkombinasjon er måleområdet mindre



# Termokoblinger (forts)

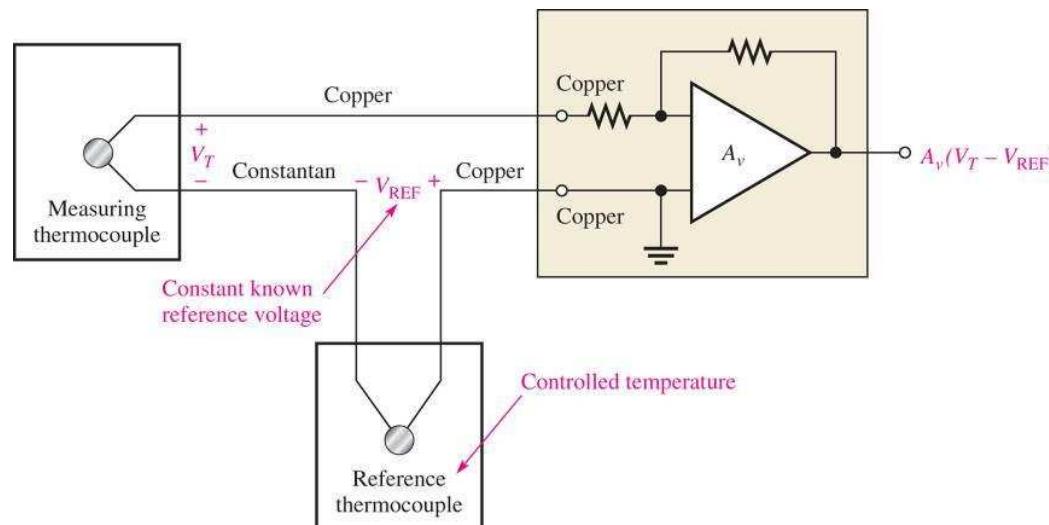
- Enhver metall-metall overgang vil produsere et elektrisk felt, derfor vil tilkoblingen til en termokobling introdusere en ekstra termokobling



- Det er viktig at man kompenserer for parasitt-spenningene som introduseres

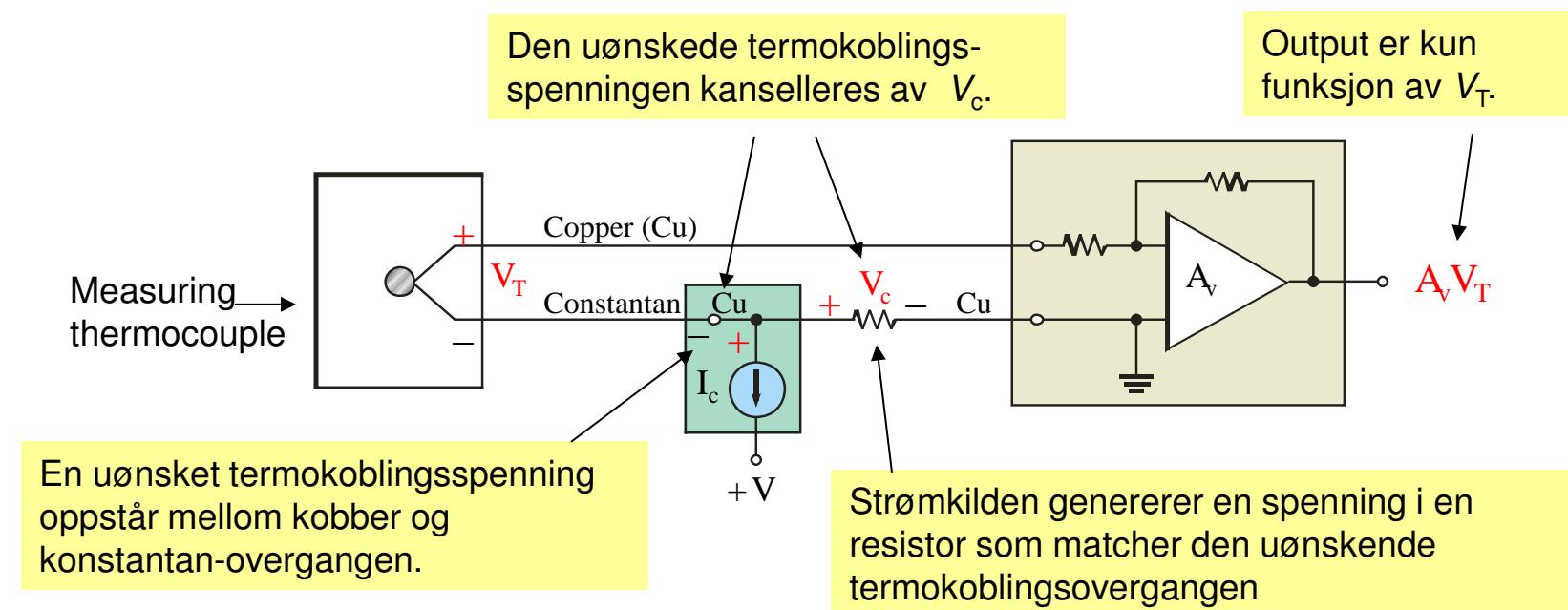
# Termokoblinger (forts)

- En teknikk går på å ha en referansetemperatur (f.eks isvann med 0 grader) med en ekstra termokobling
- Referansen gjør at man introduserer en ny termokobling med kjent temperatur og kjent Seebeck-spenning, og denne kan trekkes fra den målte spenningen i den ønskede måleproben



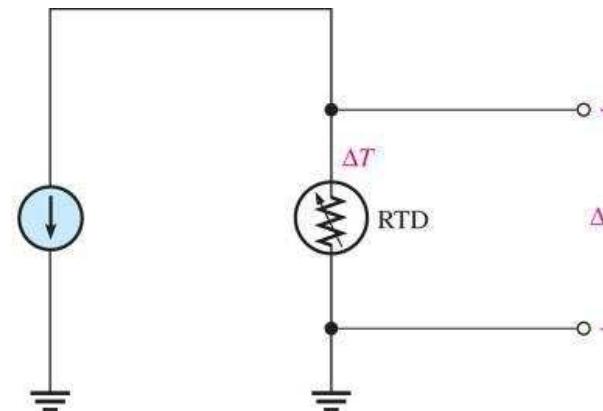
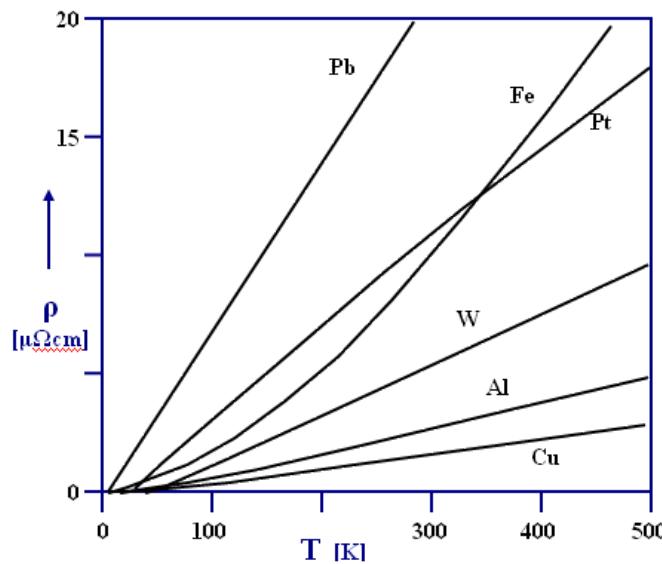
# Termokoblinger (forts)

- Det er ikke praktisk å ha ismaskin for å lage referanse temperatur
- Bedre å bruke temperaturavhengig strømkilde for å kompensere for en ekstra Seebeck-spenning

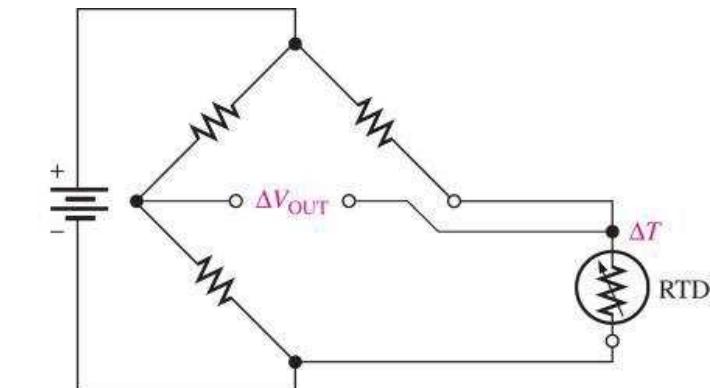


# Resistansedektorer

- En type temperaturmåler bruker temperatur-avhengig resistans (RTD)
- RTD'er har problem med parasitteffekter, fordi tilkoblingslederne også tilfører temperaturavhengig resistans
- Temperatur måles enten ved å måle spenningsfallet over en motstand med konstant strøm, eller endringen i resistans i en brokobling (Wheatstonebro)



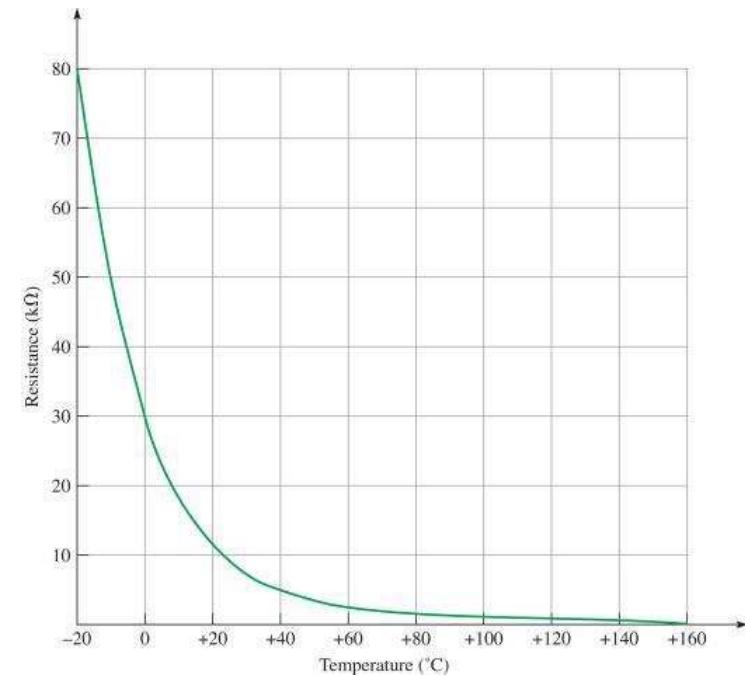
(a) A change in temperature,  $\Delta T$ , produces a change in voltage,  $\Delta V$ , across the RTD proportional to the change in RTD resistance when the current is constant.



(b) A change in temperature,  $\Delta T$ , produces a change in bridge output voltage,  $\Delta V_{\text{OUT}}$ , proportional to the change in RTD resistance.

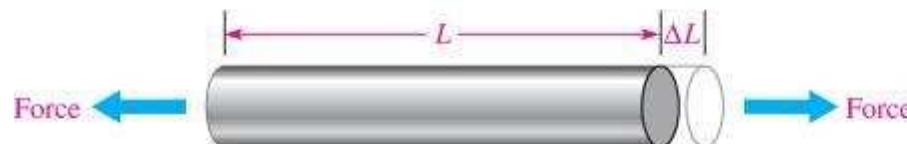
# Termistorer

- Termistorer er en type halvleder hvor resistansen synker med økende temperatur
- Termistorer har logaritmisk (ikke-lineær) karakteristikk
- Termistorer har smal båndbredde, men er raske, presise og billige
- Brukes bla integrert på CPU'er for å styre viftehastighet
- Termistorer kan også brukes i brokoblinger

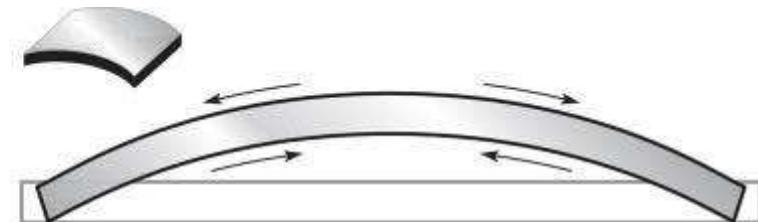


# Måling av strekk, trykk og væskestøm

- Strekk eller bøyning kan måles med en motstandstråd som ender motstand ved mekanisk påvirkning (piezoresistivitet)



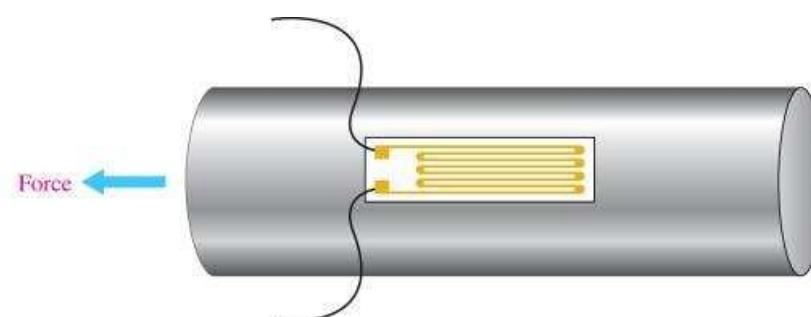
(a) Strain occurs as length changes from  $L$  to  $L + \Delta L$  when force is applied.



(b) Strain occurs when the flat plate is bent, causing the upper surface to expand and the lower surface to contract.



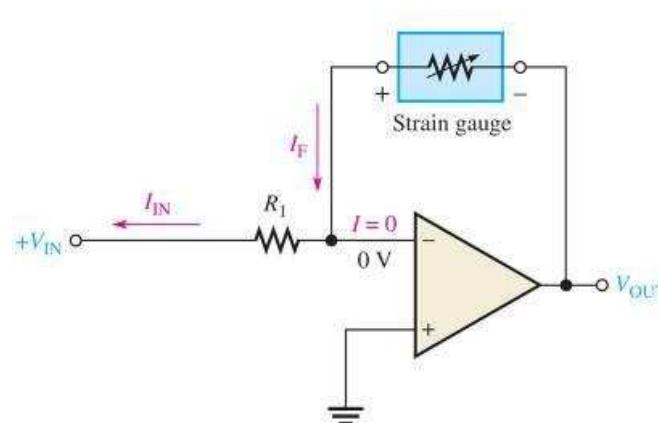
(a) Typical strain gauge configuration.



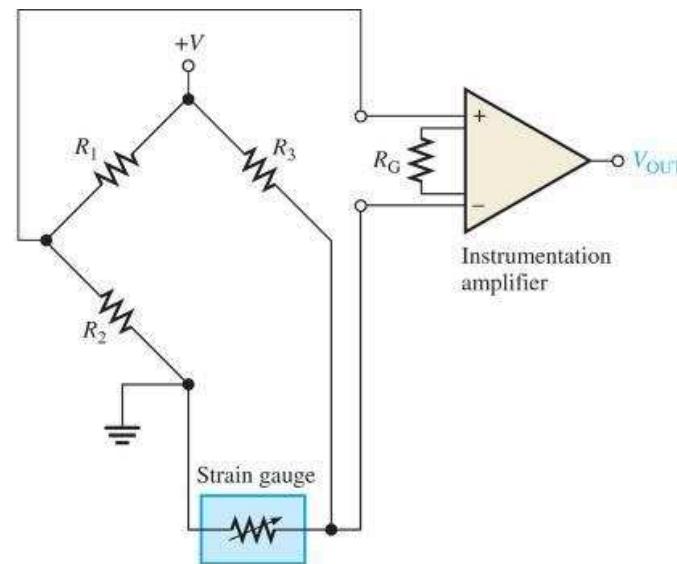
(b) The strain gauge is bonded to the surface to be measured along the line of force. When the surface lengthens, the strain gauge stretches.

# Måling av strekk, trykk og væskestørøm

- Samme oppsett som for temperaturmåling brukes for trykk og strekkmåling
- Trykk og strekk er enklere å måle fordi det ikke er nødvendig å kompensere i like stor grad



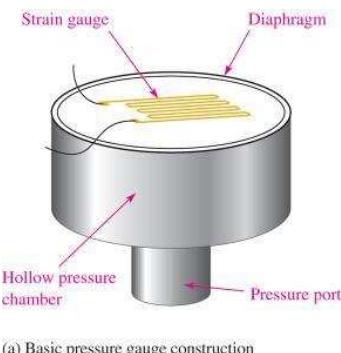
(a) Constant-current circuit



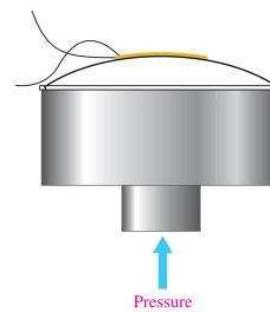
(b) Three-wire bridge circuit

# Måling av strekk, trykk og væskestørøm

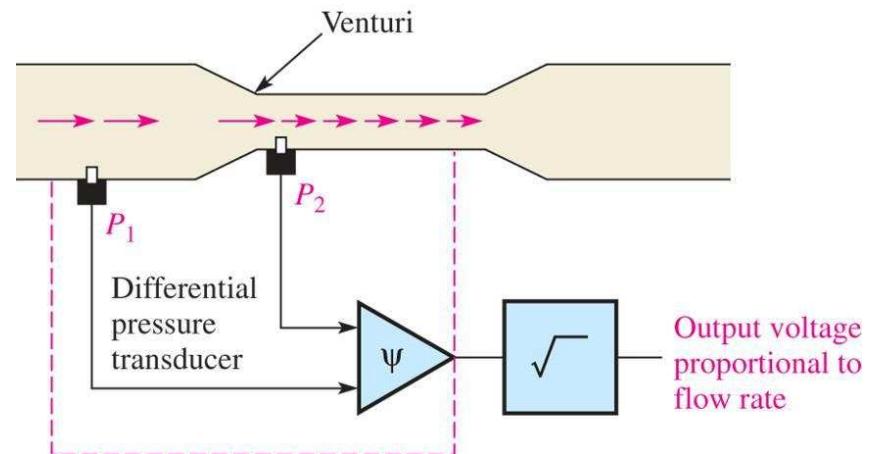
- Trykk kan måles ved å feste en strekksensor på en fleksibel membran
- Væskestørøm kan måles ved å beregne trykkforskjellen mellom to punkter med ulik diameter



(b) With no net pressure on diaphragm, strain gauge resistance is at its nominal value (side view).



(c) Net pressure forces diaphragm to expand, causing elongation of the strain gauge and thus an increase in its resistance.



# Måling av akselerasjon



- Akselerasjonsmåling brukes i en lang rekke anvendelser:
  - Tekniske anvendelser, bla kollisjonsputer, vibrasjonsmålinger, seismisk aktivitet, hastighet, posisjonering osv
  - Industrielle anvendelser, bla overvåkning av vibrasjoner og rotasjonshastighet, måling av G-krefter i luft- og romfart
  - Biologiske anvendelser: Sporing av dyr, energiforbruk
  - Medisinske anvendelser: Hjertekompresjon, skrittellere
  - Forbrukerelektronikk, bla roteringsfunksjon smart phones og kameraer, spillkonsoller, bildestabilisator i kamera, fallbeskyttelse i harddisker

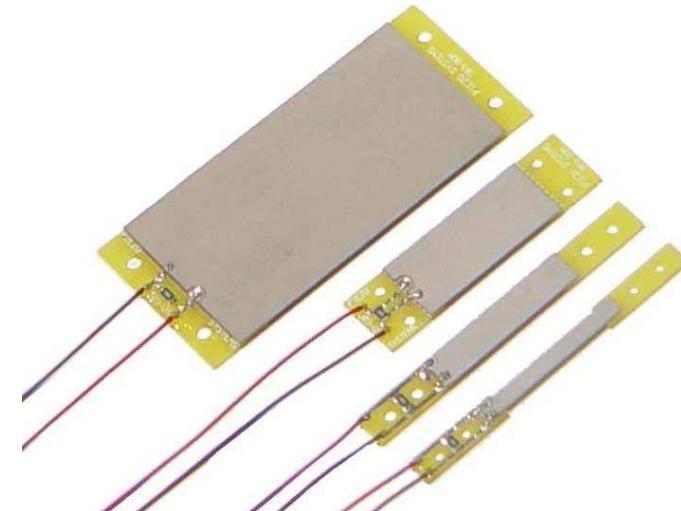
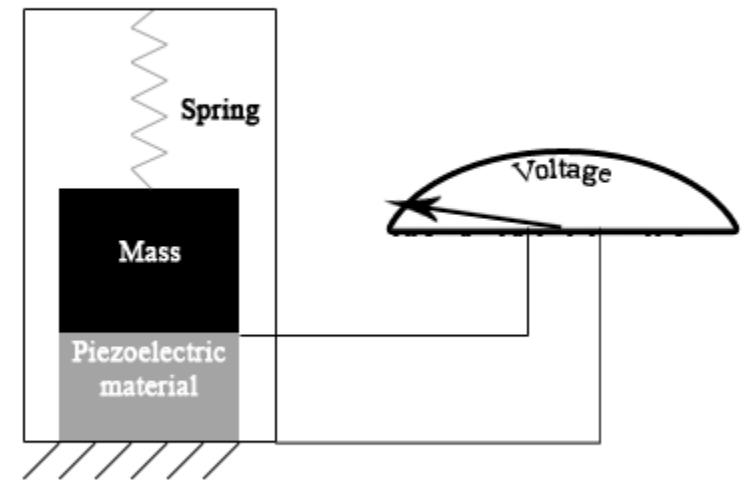


# Akselerasjonsmålere

- Tre vanlige sensor typer for akselerasjon er basert på
  - Piezo-elektrisitet
  - Piezo-resistivitet
  - Variabel kapasitans, resistans eller induktans
- Finnes i tillegg en rekke andre varianter basert på disse
- Felles for alle er at en endring i hastighet fører til endring i kapasitans/resistans/induktans eller spenning

# Piezoelektrisitet

- Piezoelektrisitet oppstår når ladning akkumuleres i visse typer faste stoffer pga mekanisk påvirkning
- Effekten er reversibel
  - Når den mekaniske påvirkningen fjernes endres det elektriske feltet tilbake til det opprinnelige
- Motsatt effekt kan brukes til å lage ultralyd og elektromotorer
  - Ved å sette spenning på et materiale skapes bevegelse



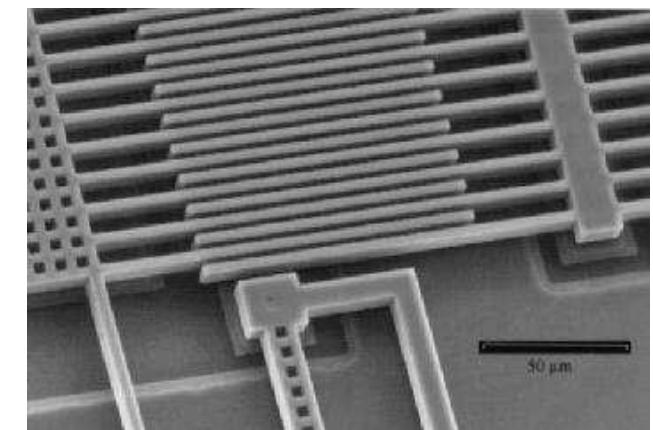
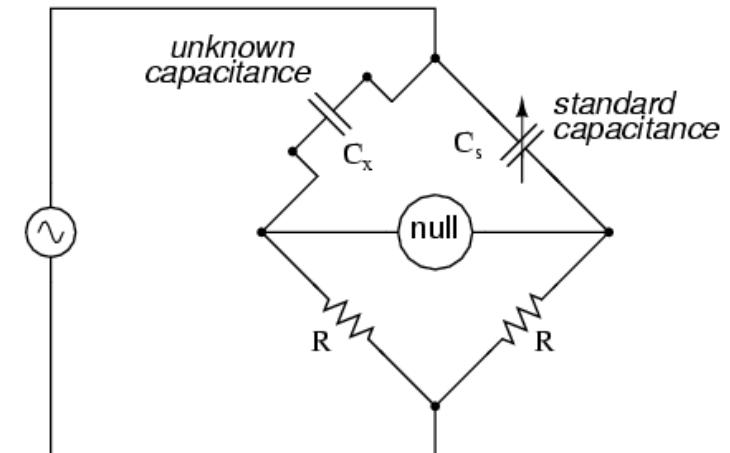
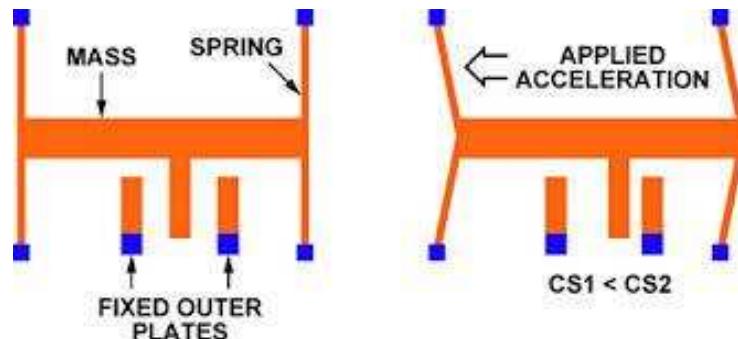
# Piezoresistivitet

- Samme effekt som piezoelektrisitet, men her endres resistansen som følge av mekanisk påvirkning
- Imidlertid er det ingen reversibel effekt (ikke mulig å endre resistans for å generere mekanisk bevegelse)



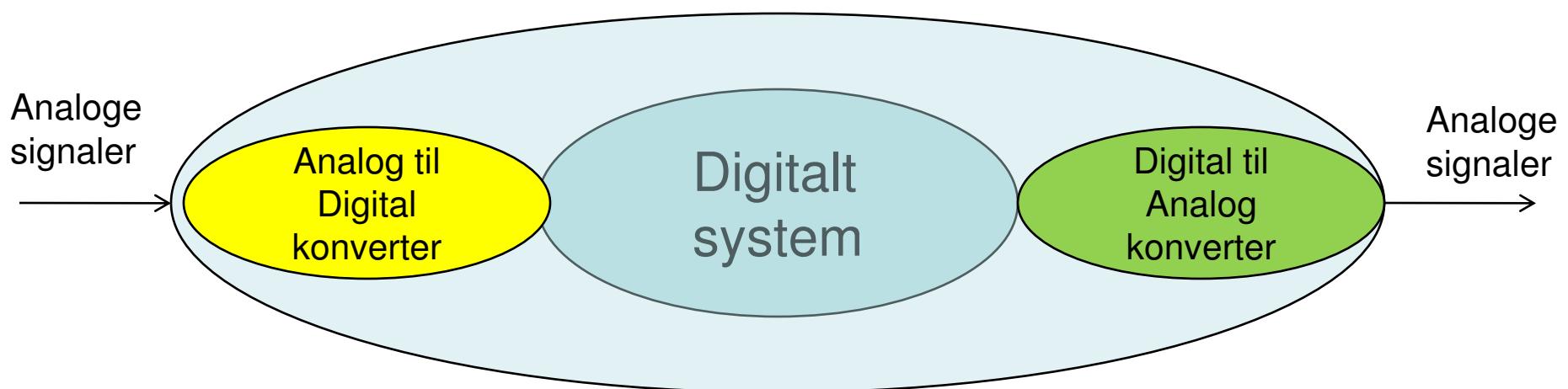
# Variabel kapasitans

- Ved å la en plate på kondensatoren være fast og den andre bevegelig, vil kapasitansen endres ved endring i bevegelse
- Endringen i konduktans kan måles med en Wheatstonebro



# AD og DA-konvertering

- Verden er stort sett analog, dvs alt er kontinuerlige verdier
- Kjernen i beregningssystemer er som regel digital



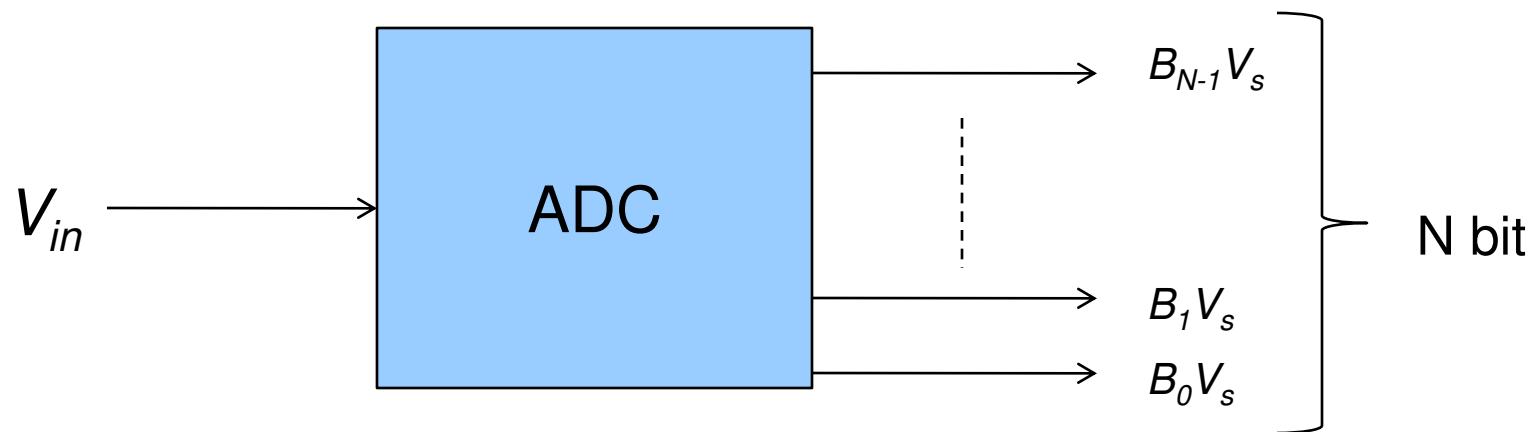
## AD og DA-konvertering (forts)

- For å kunne kommunisere med omverdenen trengs kretser for
  - Konvertering av analoge signaler til digitale signaler (ADC)
  - Konvertering av digitale signaler til analoge signaler (DAC)
- Det finnes en rekke ulike strategier for ADC og DAC med forskjellig
  - hastighet
  - nøyaktighet
  - effektforbruk,
  - pris
- Kravet til oppløsning er som regel gitt av det digitale systemet

# Analog-til-digital konvertering

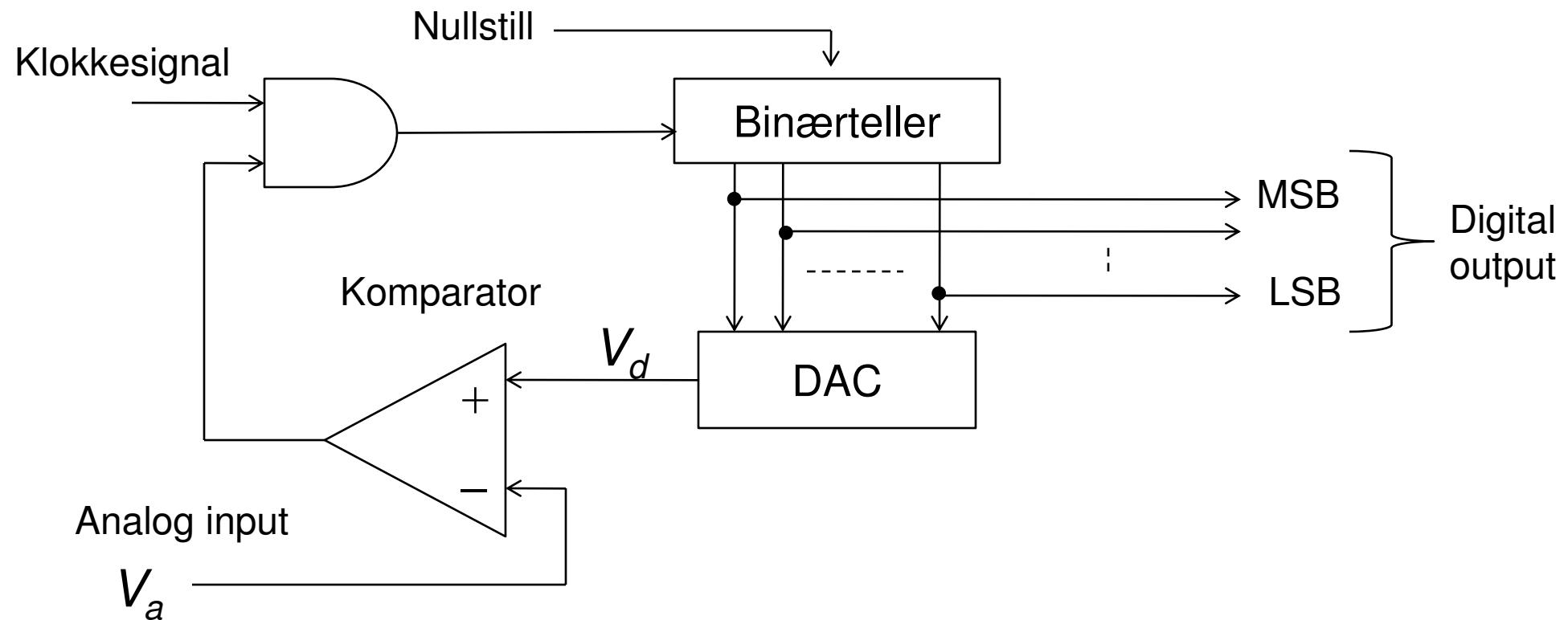
- En PC har flere enheter knyttet til seg som kan ses på som AD-konvertere:
  - Tastatur
  - Mus
  - Mikrofon
- Alle har til oppgave å omforme ytre analoge signaler til digital representasjon i datamaskinen
- Den vanligste ADC'en konverterer en analog spenning til et bitmønster, dvs én signallinje inn (analog) og N signallinjer ut (en linje for hvert bit)

# Analog-til-digital konvertering (forts)

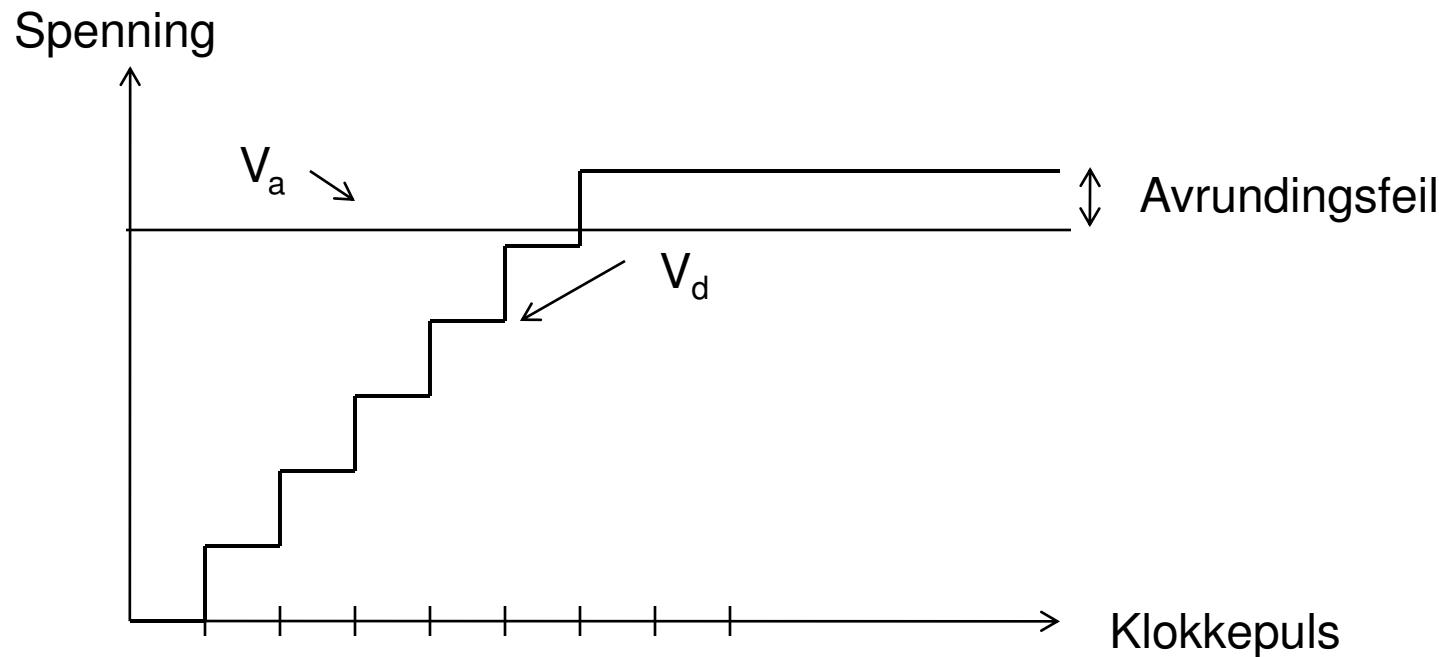


- $V_s$  er den spenningen som brukes for å angi logisk '1', mens  $B_i$  enten er '0' eller '1', så  $V_sB_i$  er derfor enten 0 volt eller  $V_s$  volt

# ADC med teller



# ADC med teller (forts)

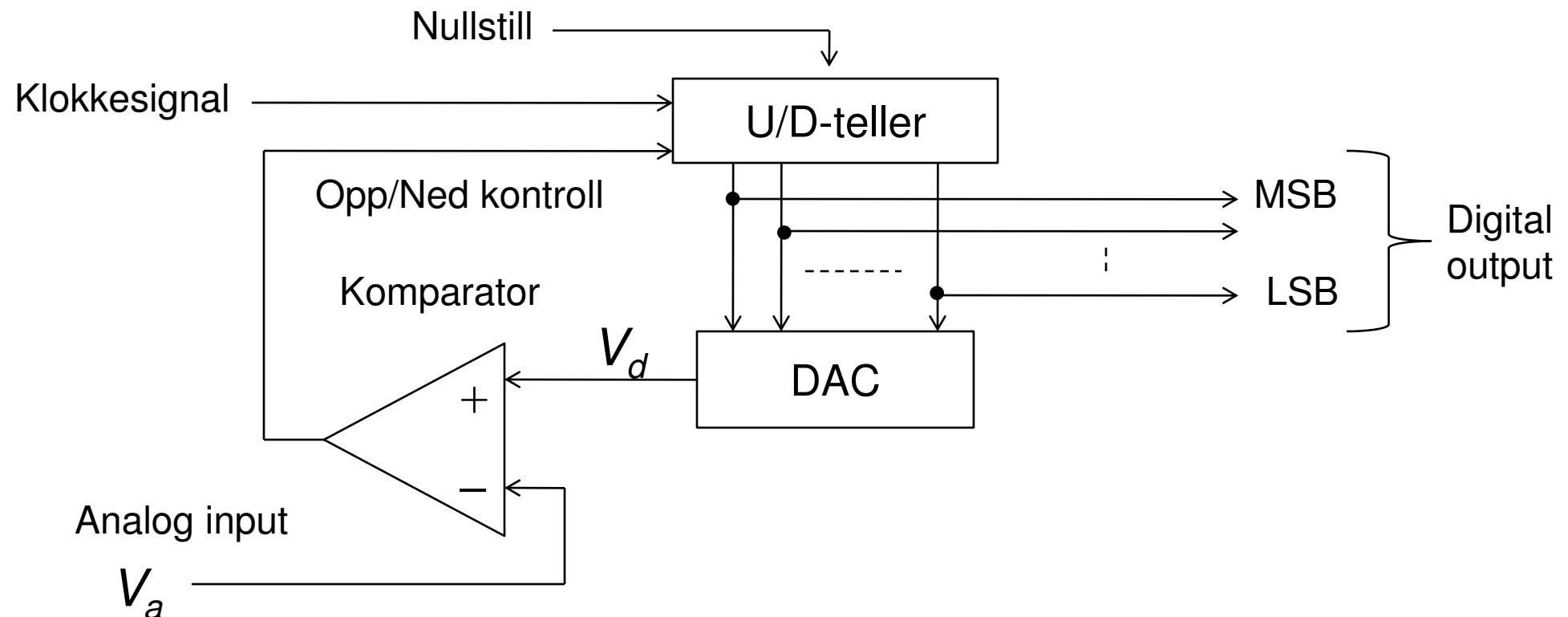


- Så lenge  $V_a$  er mindre enn  $V_d$ , vil telleren fortsette å telle
- Avrundingsfeilen skyldes at den digitale telleren har endelig oppløsning

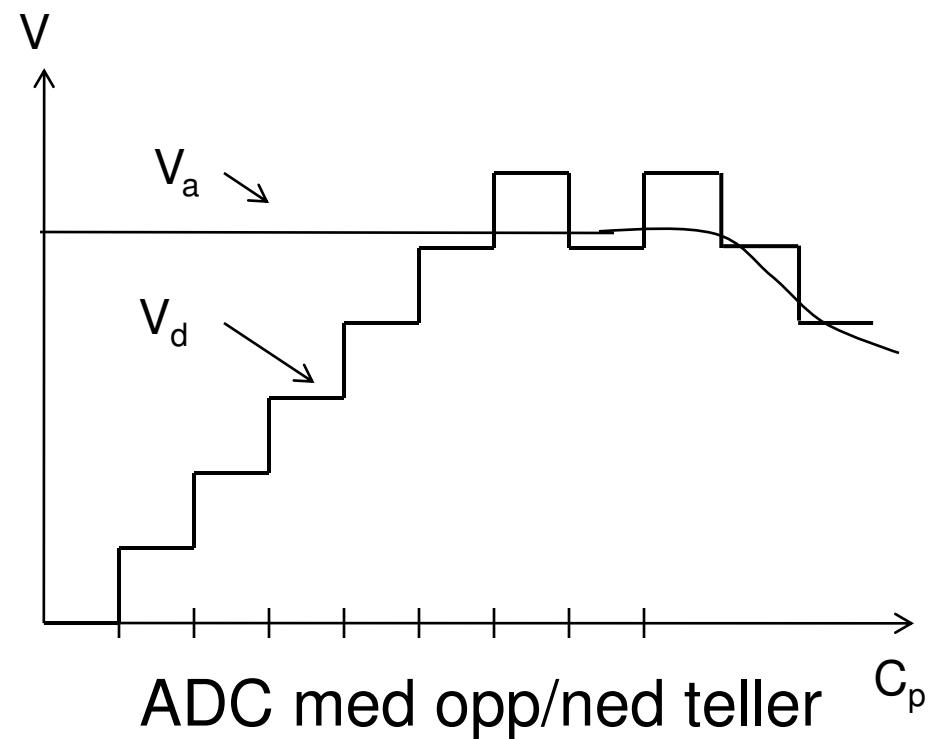
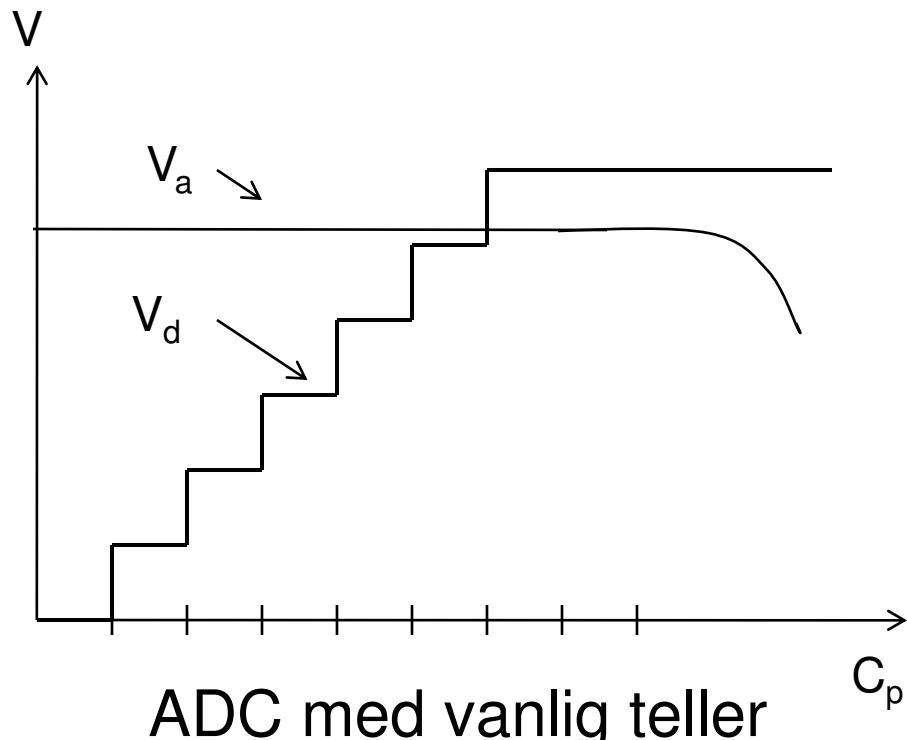
# ADC med teller (forts)

- Avrundingsfeilen kan gjøres vilkårlig liten ved å øke antall bit i telleren og det digitale signalet
- Jo flere bit, desto langsommere blir ADC'en
  - For å konvertere  $V_a$ , trengs  $V_d/V_a$  antall klokkesykler
- Største ulempen med denne ADC'en er at den ikke klarer å følge det analoge signalet hvis det varierer over tid, med mindre man nullstiller telleren og starter på nytt
- Hvis man erstatter den binære telleren med en opp-ned teller kan man følge tidsvarierende signaler bedre

# ADC med opp/ned teller



# ADC med opp/ned teller



- I motsetning til ADC med vanlig teller, vil det minst signifikante bitet endre verdi rundt  $V_a$  selv når  $V_a$  ikke endrer seg

# ADC med suksessiv tilnærming

- Tellende ADC'er trenger i verste fall  $2^N$  intervaller for å telle opp til riktig spenning
- Istedentfor en teller kan man bruke en programmerbar enhet som gjør et binærsøk etter riktig verdi, og den trenger maks  $N$  intervaller for å finne spenningen
- Enheten starter med å sette '1' i MSB og de andre bit'ene til '0'.
  - Hvis  $V_d$  fortsatt er lavere enn  $V_a$ , settes det nest mest signifikante bit'et til 1.
  - Hvis  $V_d$  er høyere enn  $V_a$ , settes det mest signifikante bitet til 0 og de resterende til 1
- Prosessen over gjentas helt til det er det minst signifikante bitet som må endres.

# ADC med parallel komparator

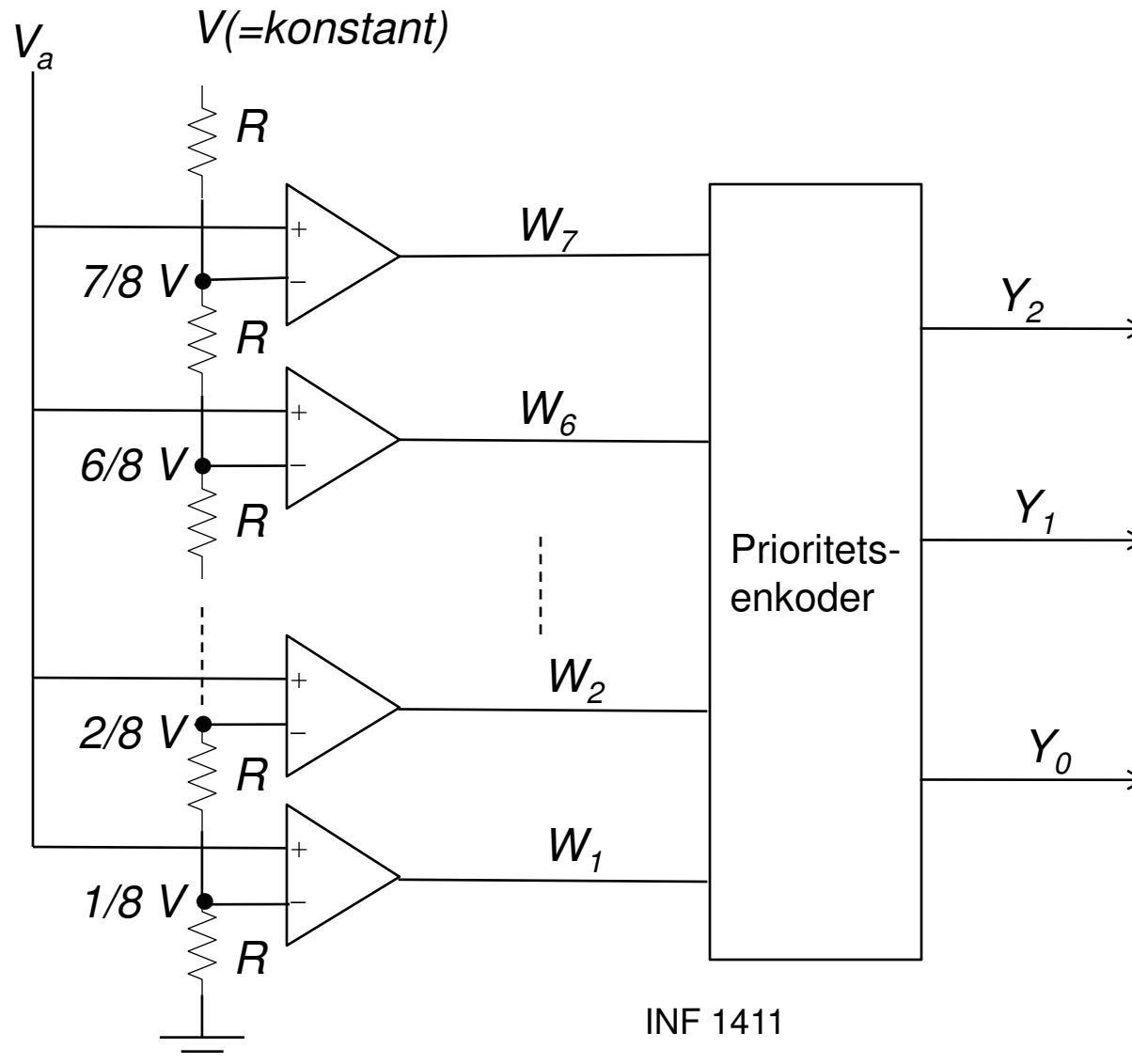
- Det tre foregående ADC'ene baserer seg på suksessiv tilnærming og er relativt langsomme
- En raskere måte er å gjøre sammenligning i parallel uten bruk av klokkesignaler
- Hastigheten til en ADC med parallelkomparator er begrenset av tidsforsinkelsen gjennom opamp'er og digital logikk
- Ulempen er at det kreves ekstra hardware:
  - N-1 komparator for N bit
  - N motstander for N bit
- Hvis hastighet er det viktigste vil man velge denne typen ADC
- Ingen problemer med tidsvarierende input-spenninger

## ADC med parallel komparator (forts)

- For å forstå denne typen ADC, trenger man å skjønne hva en prioritetsenkoder gjør
- En prioritetsenkoder er digital krets som har M input-linjer og N outputlinjer, og hvor  $2^N \geq M$
- Verdien på de N output-linjene angir det mest signifikante bitet i M som har en '1'

$w_7$	$w_6$	$w_5$	$w_4$	$w_3$	$w_2$	$w_1$	$y_1$	$y_2$	$y_3$
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
0	0	0	0	0	1	1	0	1	0
0	0	0	0	1	1	1	0	1	1
0	0	0	1	1	1	1	1	0	0
0	0	1	1	1	1	1	1	0	1
0	1	1	1	1	1	1	1	1	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

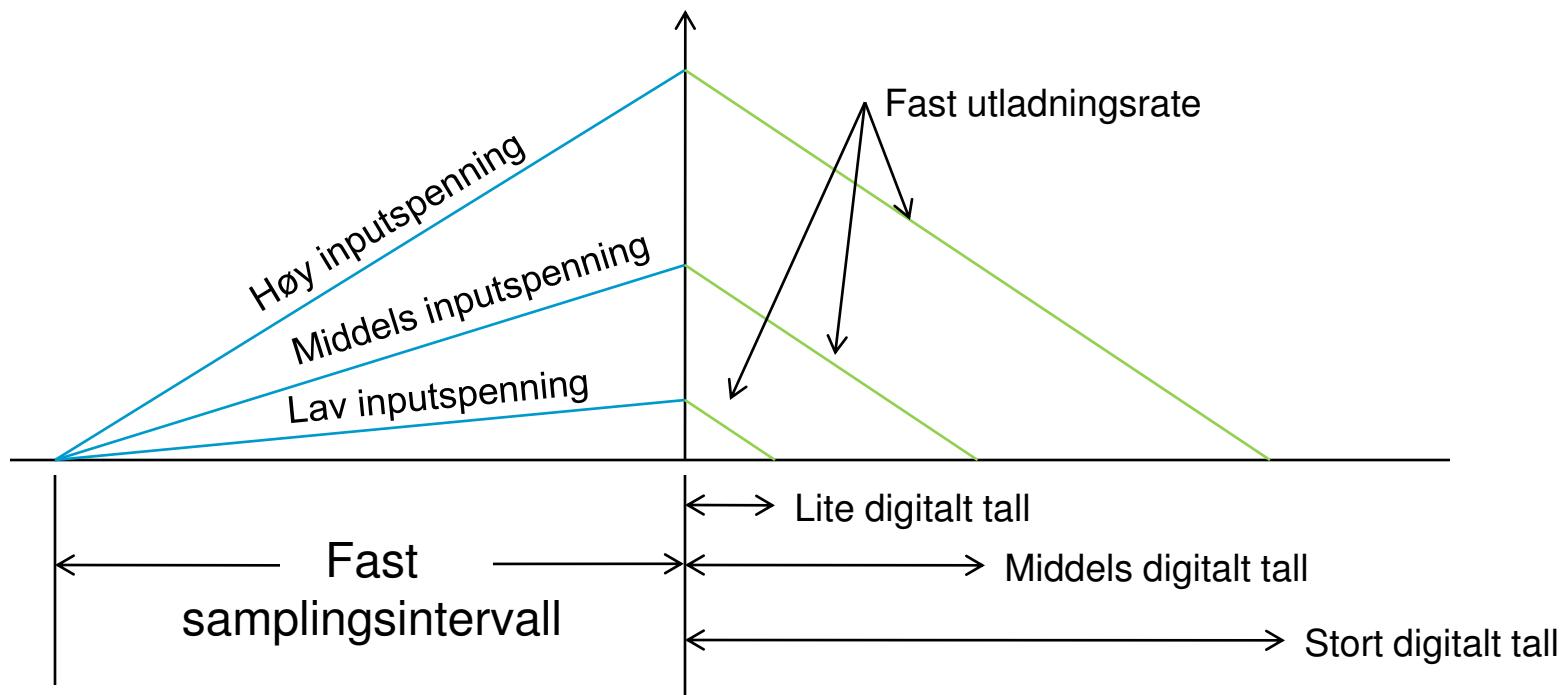
# ADC med parallel komparator (forts)



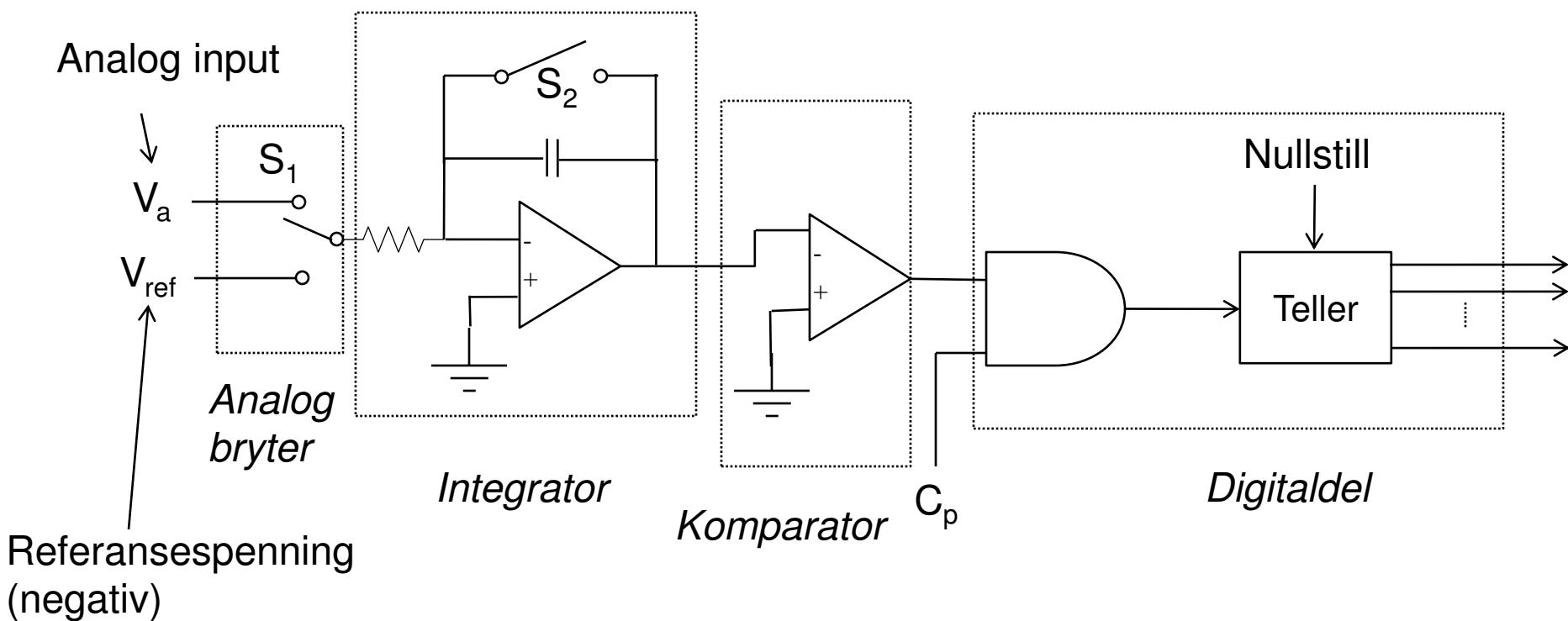
# Dual-slope ADC

- Dette er en mye brukt ADC som er basert på integrasjon
- Kresten bruker få komponenter og kan lages med så høy oppløsning som ønskelig
- Området det skal måles i kan også settes ved en referanse-spenning  $V_{ref}$ , og man får samme oppløsning uavhengig av hva  $V_{ref}$  er.
- En av fordelene ved kretsen er at den kan gjøres immun mot støy i input-signalet, f.eks fra lysnettet (50 Hz)

# Dual-slope ADC (forts)



# Dual-slope ADC (forts)



## Dual-slope ADC (forts)

- Telleren nullstilles og kondensatoren lades først ut ( $S_1$  er åpen og  $S_2$  lukkes)
- Kondensatoren i integratoren lades opp over et fast tidsintervall (kalt samplingsintervallet) av input-spenningen ved at  $S_1$  kobles til  $V_a$  og  $S_2$  åpnes. Telleren teller ikke
- Jo høyere input-spenning, desto høyere spenning lades kondensatoren opp til i løpet av samplingsintervallet
- Ved enden av samplingsintervallet kobles så  $S_1$  til  $V_{ref}$  og kondensatoren lades ut, samtidig som telleren starter
- Når spenningen har ladet seg ut til  $V_{ref}$ , stopper telleren, og man har da et mål for  $V_a$  relativt til  $V_{ref}$

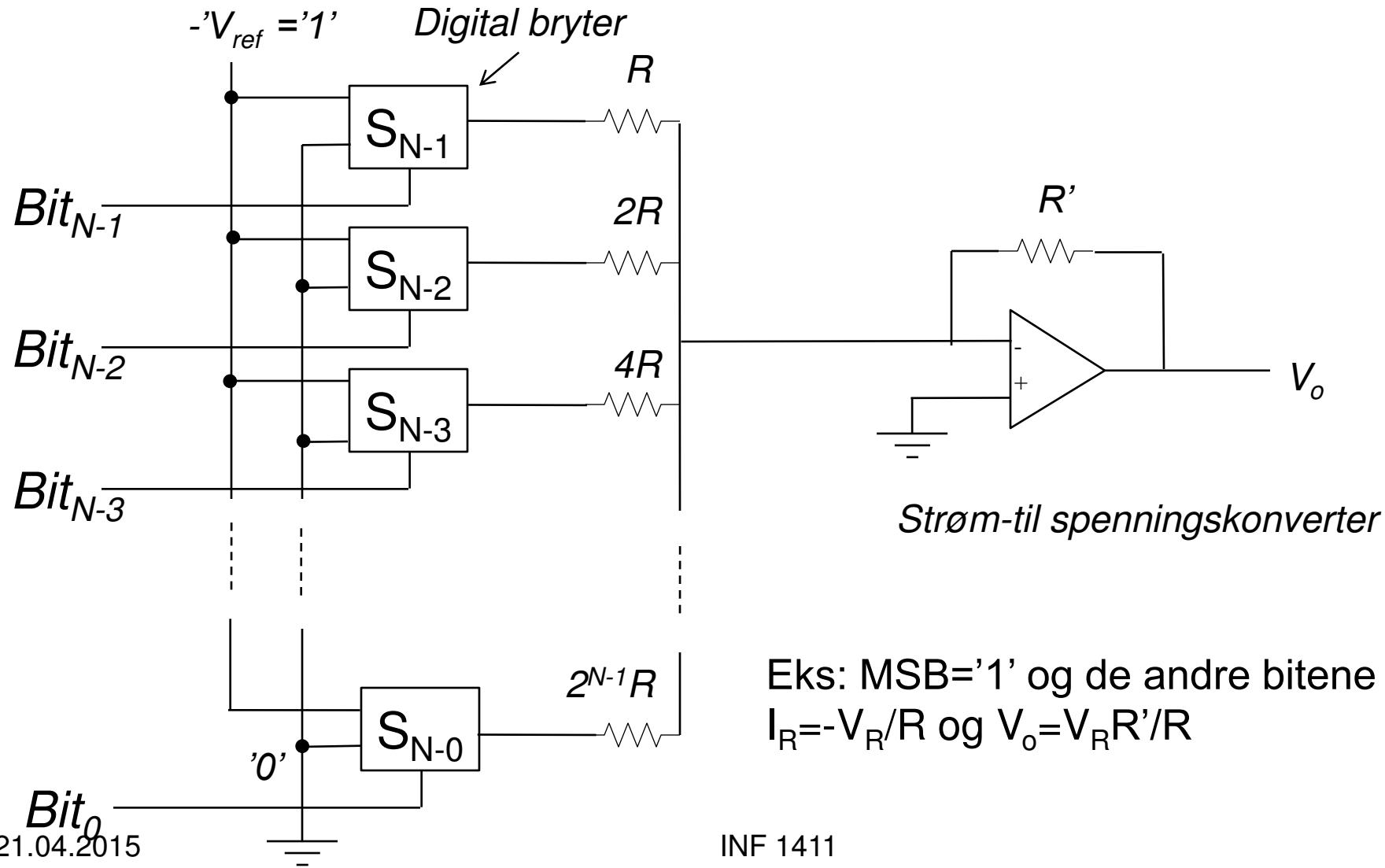
# Digital-til-analog konvertere (DAC)

- Ofte trenger man en analog representasjon av digitale verdier, f.eks høytalere som er koblet til en PC eller en MP3-spiller
- ADC'er er ofte enklere å lage, og har heller ikke de samme utfordringene med oppløsning og hastighet
- ADC'er er nesten utelukkende basert på opamp'er og motstandsnettverk, eventuelt transistorer
- Sammenhengen mellom den digitale og analoge representasjonen er gitt av

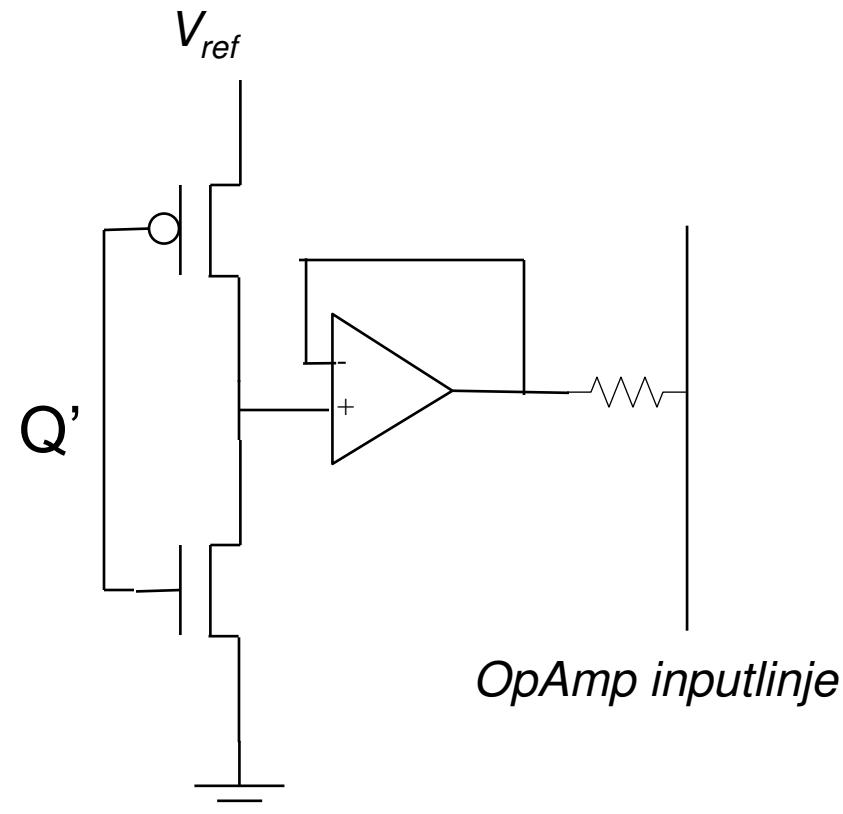
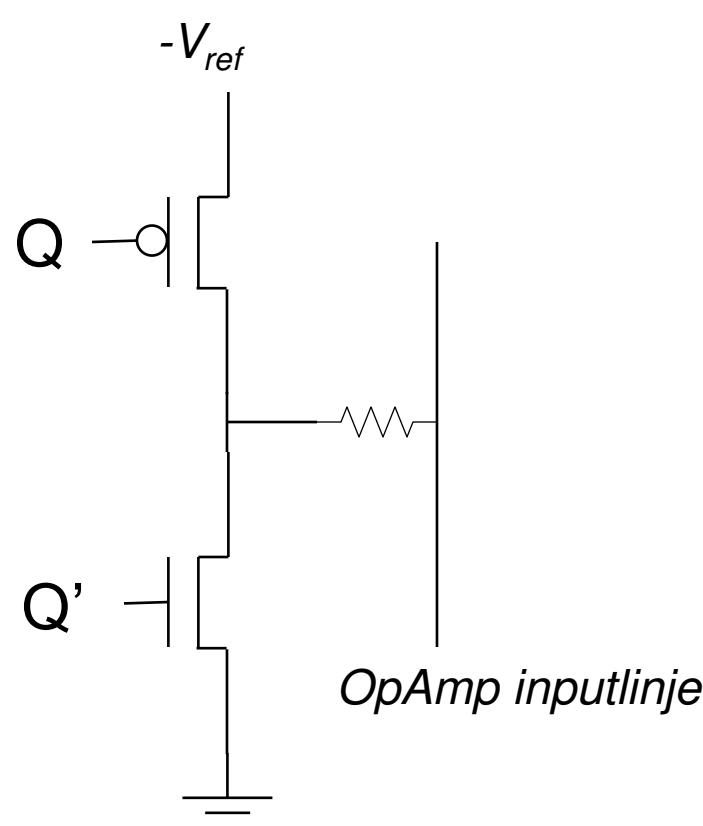
$$V_o = (2^{N-1}a_{n-1} + 2^{N-2}a_{N-2} + \dots + 2^2a_2 + 2^1a_1 + a_0)V$$

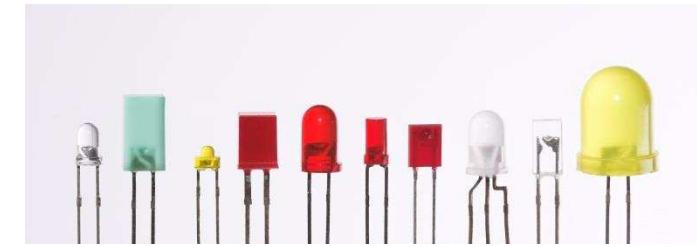
der  $V_o$  er den analoge verdien,  $V$  er en proporsjonalitetsfaktor og  $a_n$  bit nummer  $n$  i det digitale tallet som skal konverteres

# DAC med binærvektet motsandsnettverk



# Implementasjon av digitale brytere





# Oppsummeringsspørsmål

Kapittel 19.1-19.5



# Spørsmål 1

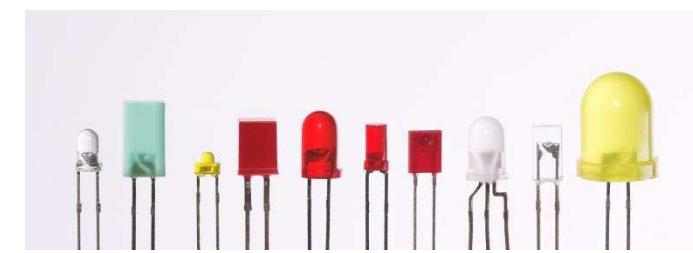
AD-konvertering vil si

- a) Å konvertere et dc-signal til et ac-signal
- b) Å konvertere et ac-signal til et dc-signal'
- c) Å konvertere et digitalt signal til et analogt signal
- d) Å konvertere et analogt signal til et digitalt signal

## Spørsmål 2

Presisjonen til et digitalt signal

- a) Er bestemt av spenningene som benyttes for å kode '0' og '1'
- b) Er bestemt av antall bit i det digitale ordet
- c) Er avhengig av samlingshastigheten
- d) Er avhengig av klokkefrekvensen til det digitale systemet

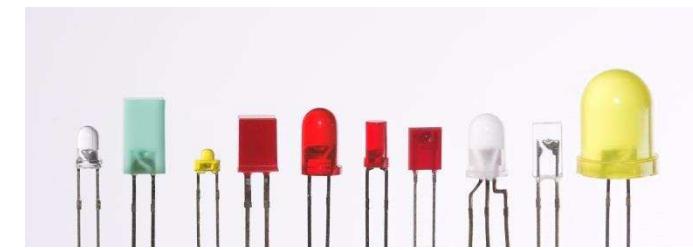


## Spørsmål 3

En ADC med suksessiv tilnærming

- a) Er raskere enn en parallel-ADC
- b) Bruker en spenningsfølger for å sammenligne spenninger
- c) Trenger i verste fall  $2^N$  klokkesykler for et N-bits digitalt ord som representerer en analog spenning
- d) Trenger ikke en DAC for å kontrollere tellingen



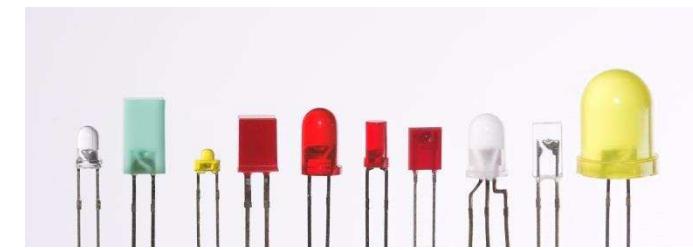


## Spørsmål 4

En ADC med parallelkomparator

- a) Trenger ikke et klokkesignal
- b) Er langsommere enn en ADC med suksessiv tilnærming
- c) Trenger mindre hardware enn en ADC med opp/ned-teller
- d) Håndterer ikke spenninger som varierer over tid



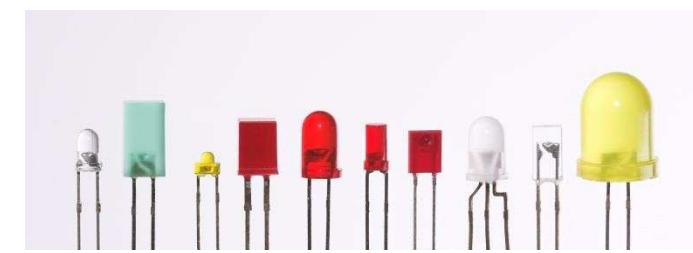


## Spørsmål 5

En dual-slope ADC

- a) Baserer seg på derivasjon
- b) Har samme oppløsning uavhengig av nivået på referanse-spenningen
- c) Er følsom for støy (fra f.eks lysnettet)
- d) Har lavere oppløsning enn teller-basert ADC





## Spørsmål 6

En DAC

- a) Gir bedre presisjon på på analog-siden enn på digitalsiden
- b) Det er vanskeligere å lage en DAC med høy oppløsning enn en ADC
- c) En DAC trenger alltid et klokkesignal
- d) Gir aldri bedre oppløsning på det analoge signalet enn på det digitale signalet

