

Forelesning nr.11 INF 1411

Elektroniske systemer

Måleteknikk
Operasjonsforsterkere

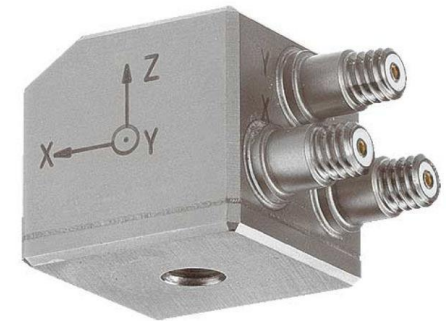
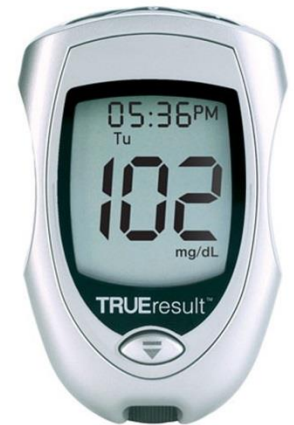


Dagens temaer

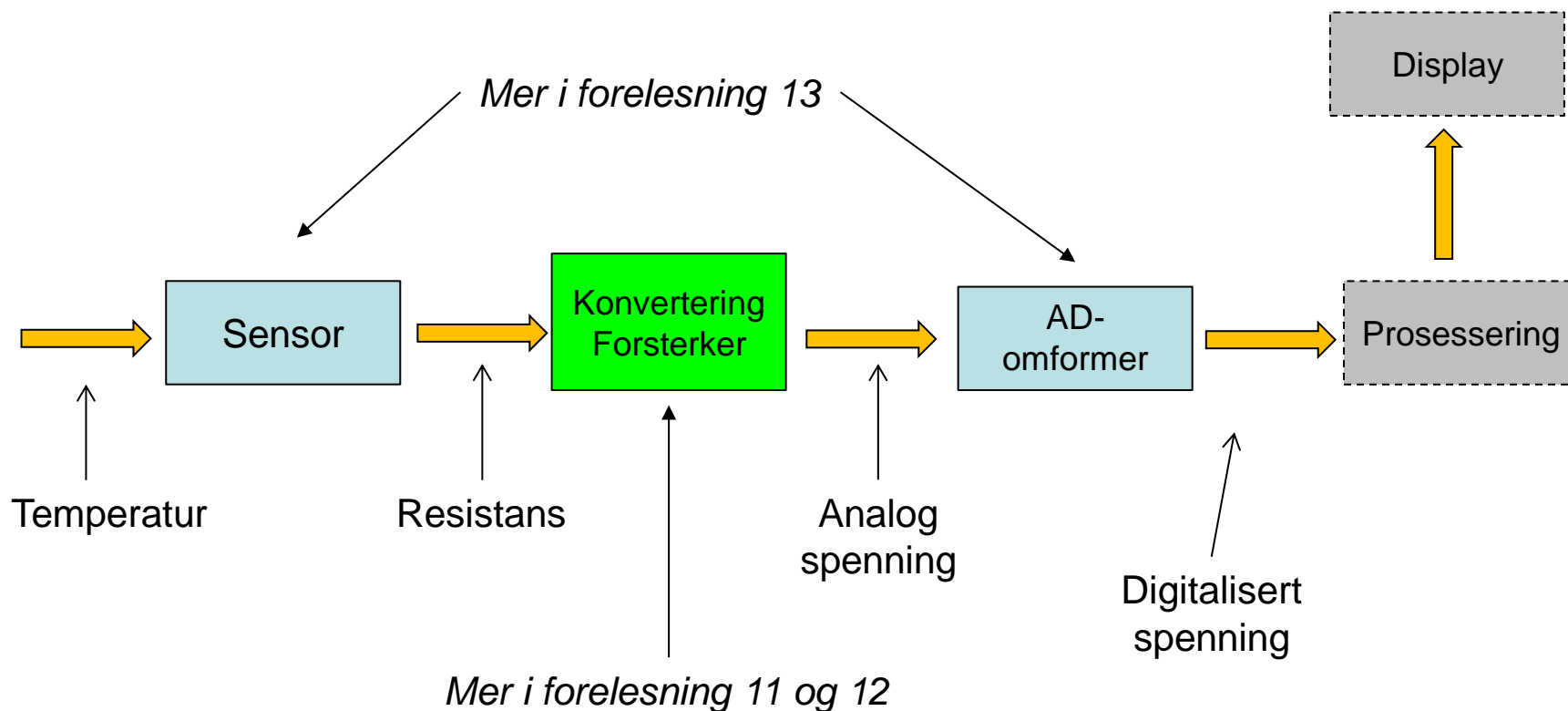
- Måleteknikk
- Wheatstone-bro
- Ideell operasjonsforsterker
- Differensiell forsterker
- Opamp-kretser
- Dagens temaer er hentet fra kapittel 6.5, 17.1-17.6 og 19.1

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

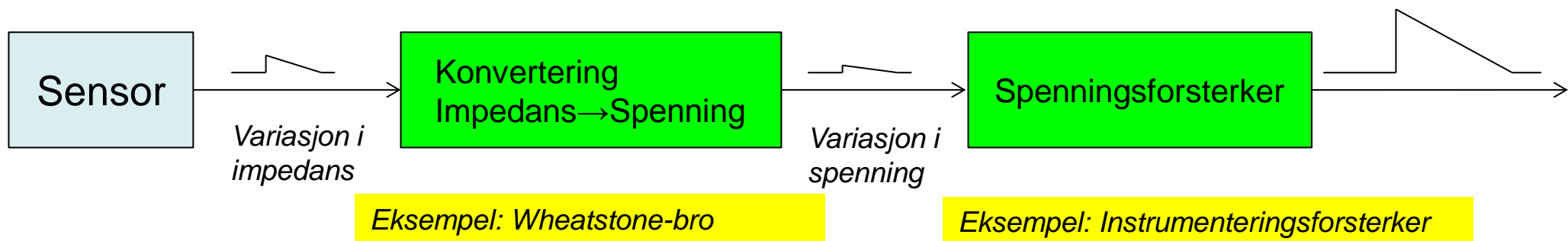


Måleteknikk (eksempel)



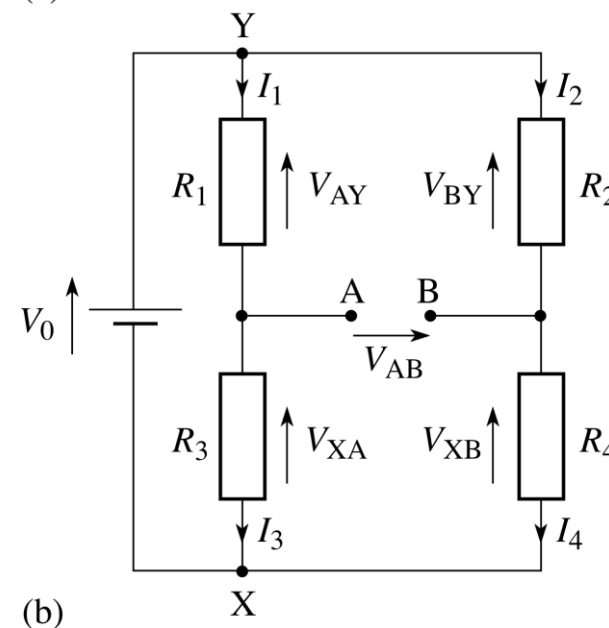
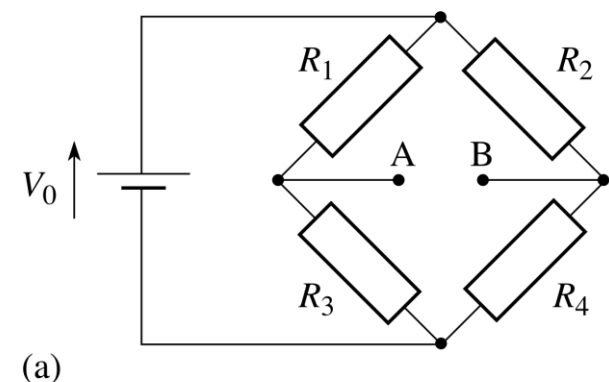
Måleteknikk

- 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



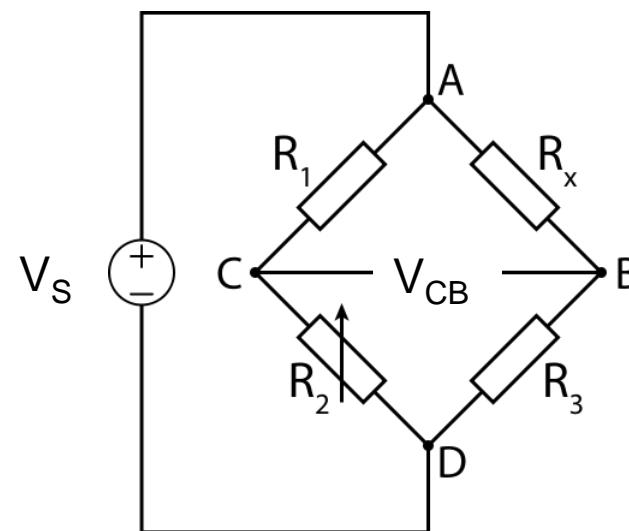
Wheatstone-bro

- En Wheatstone-bro er en seriell-parallell 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

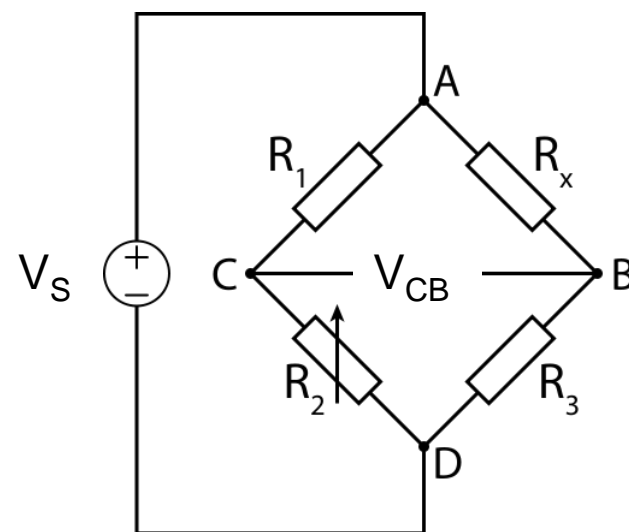
- Hvis spenningen $V_{CB} = 0$ volt er spenningsfallet over V_1 over R_1 og V_x over R_x like store, dvs $V_1 = V_x$
- Tilsvarende er $V_2 = V_3$

- 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 formel for spenningsdeling:

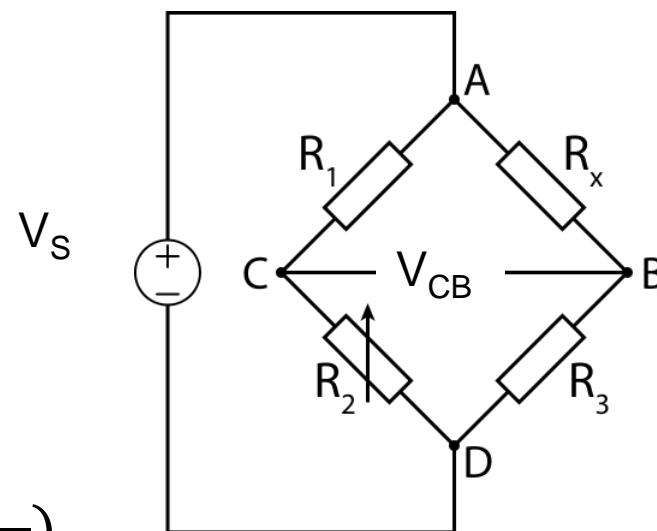
$$V_C = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_S$$

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

- Dette gir at

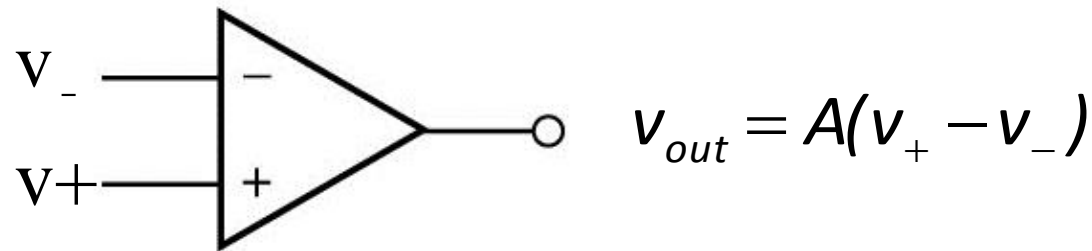
$$V_{CB} = V_C - V_B = V_S \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_x} \right)$$

- Litt grisete 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

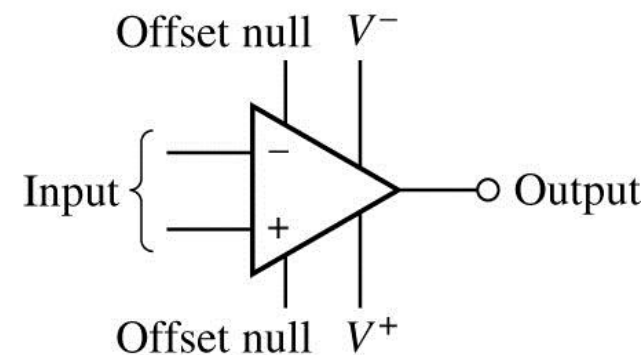
- Forsterkere i måleteknikk er basert på *operasjonsforsterkeren (opamp)*
- En opamp er en spenningsforsterker med to innganger og en utgang



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

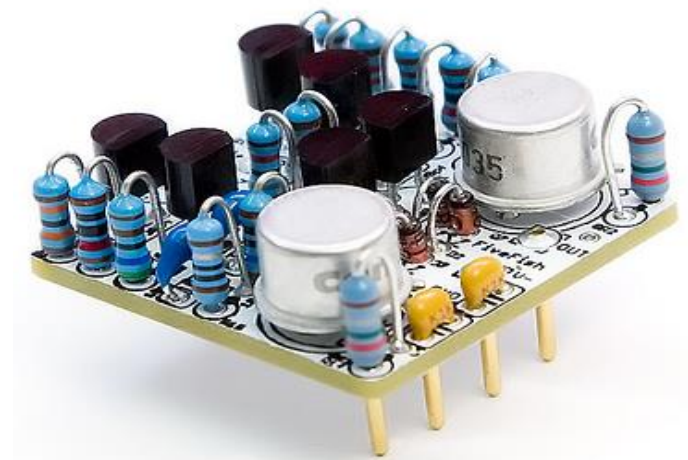
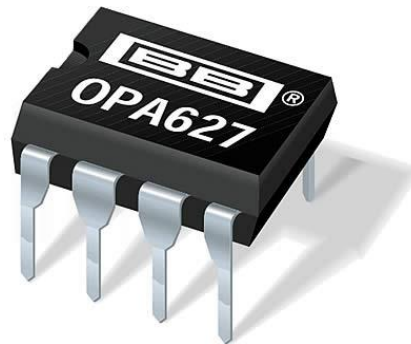
Enkel opamp-modell

- 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

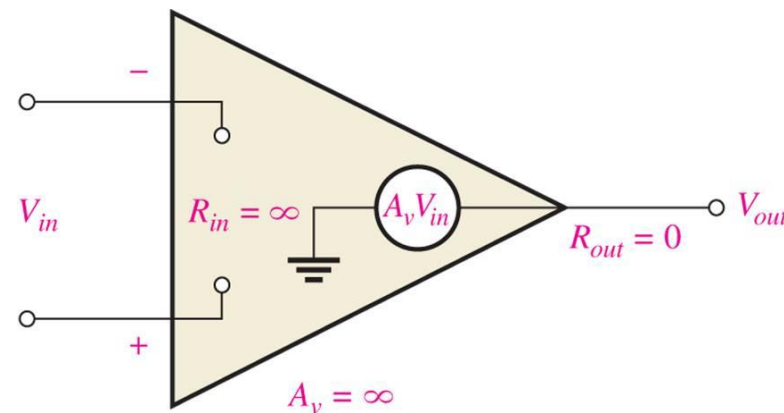
- Opamp'en ble oppfunnet på 1940-tallet og var implementert med radorør
- De første opamp'er ble konstruert med diskrete komponenter, nå er de oftest integrert
- Som annen elektronikk har de
 - Mindre størrelse
 - Lavere effektforbruk
 - Lavere pris
 - Bedre pålitelighet



Karakteristikk til en ideel opamp

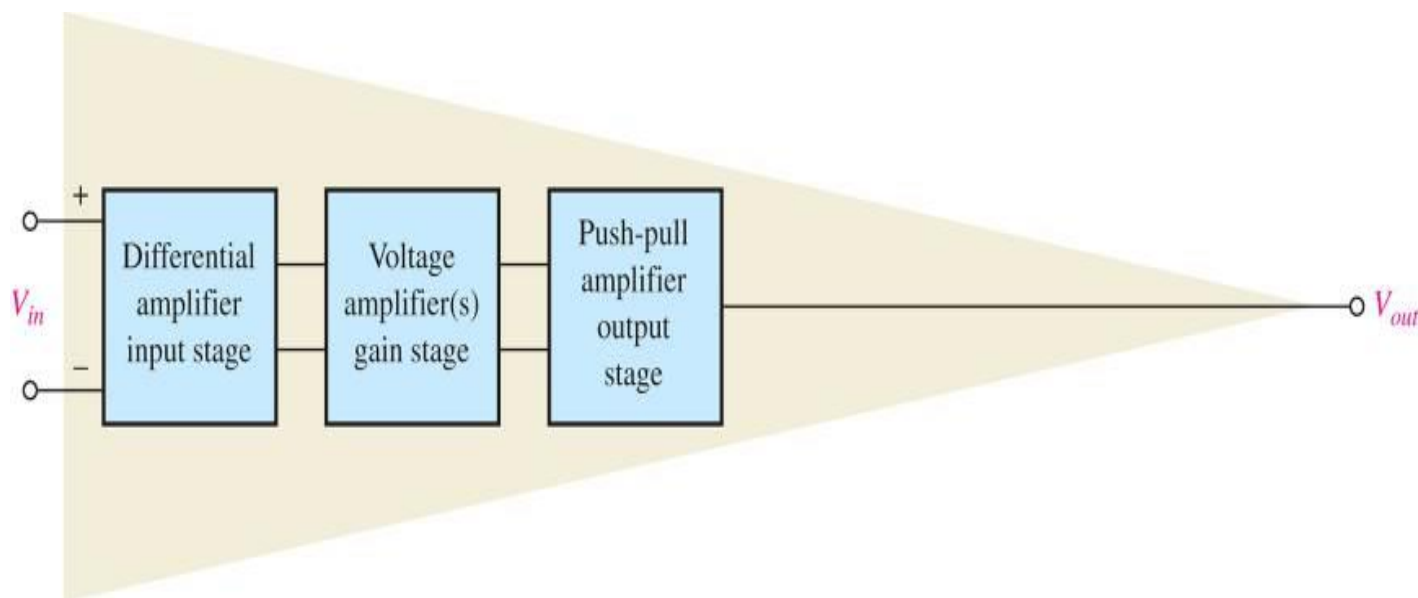
- En *ideell* operasjonsforsterker har følgende egenskaper:

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



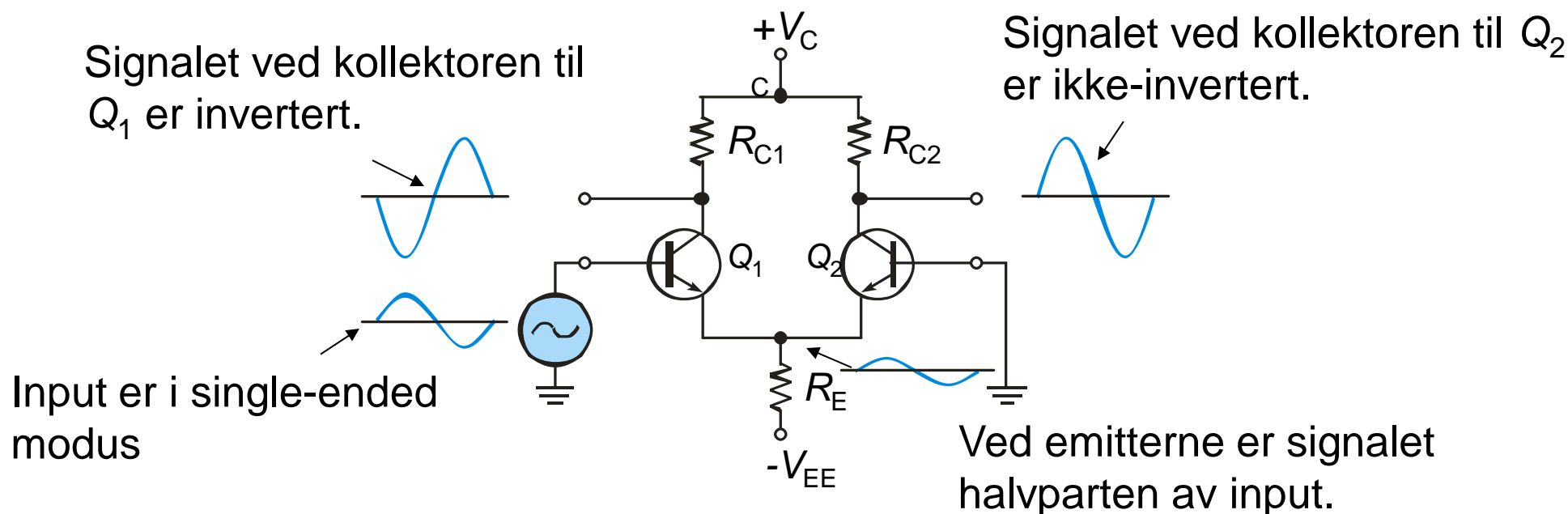
Oppbygging av opamp

- 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-signalet er koblet til jord

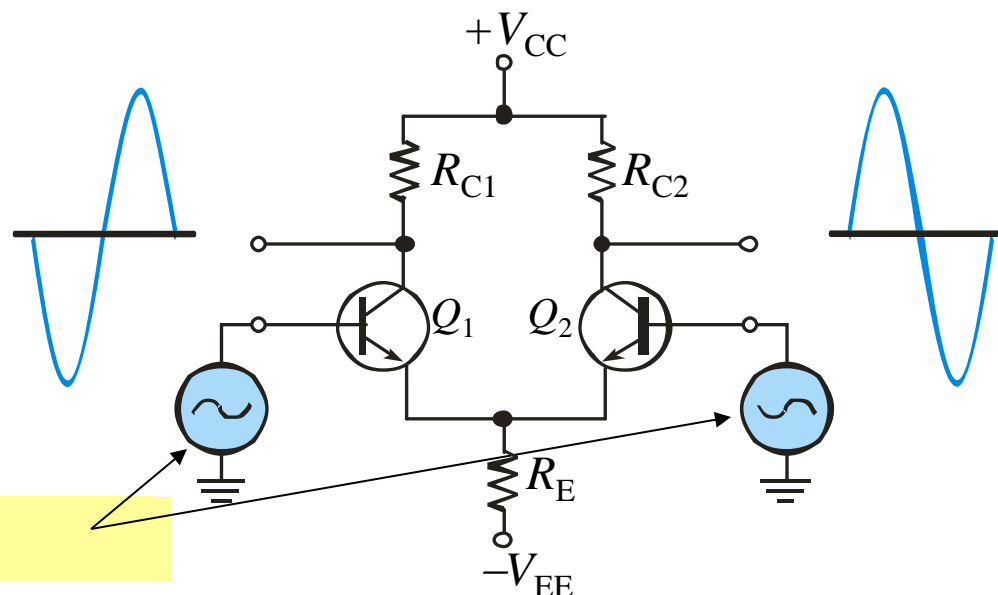


Differensielt forsterkersteg

- «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

Input ute av fase

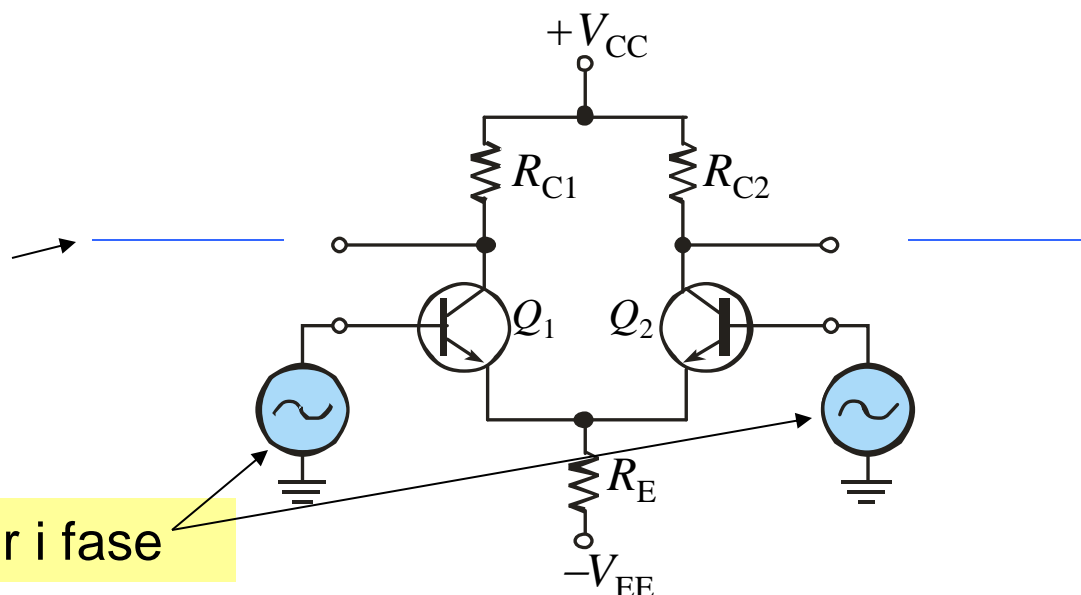


Differensielt forsterkersteg (forts)

- «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

Input er i fase



Eksempel på implementasjon (741-type)

Differensiell forsterker

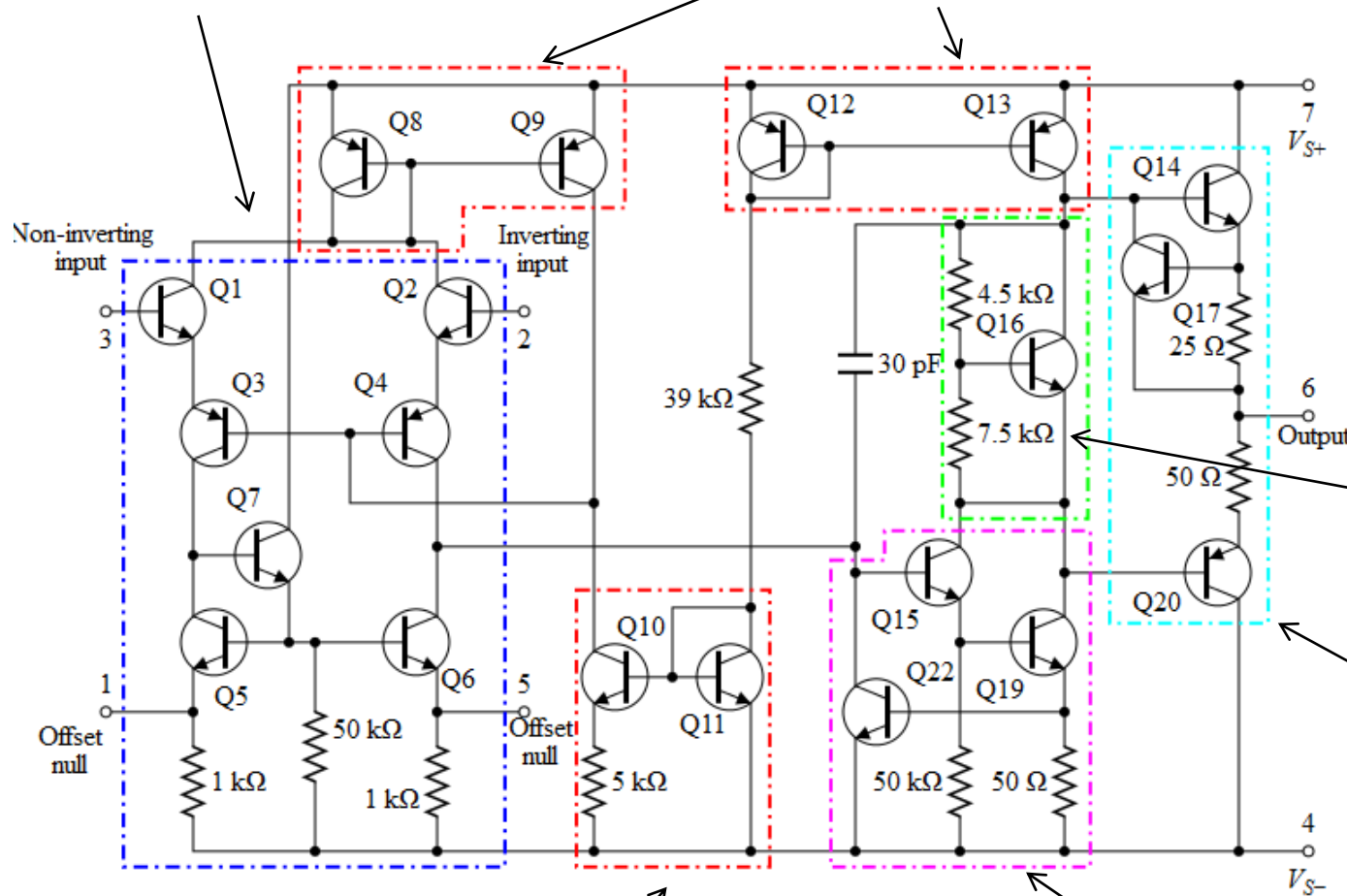
Strømspeil

Nei, dere får ikke spørsmål om denne på eksamen 😊

Spenningsnivå-skifter

Utgangssteg

Klasse A gain steg

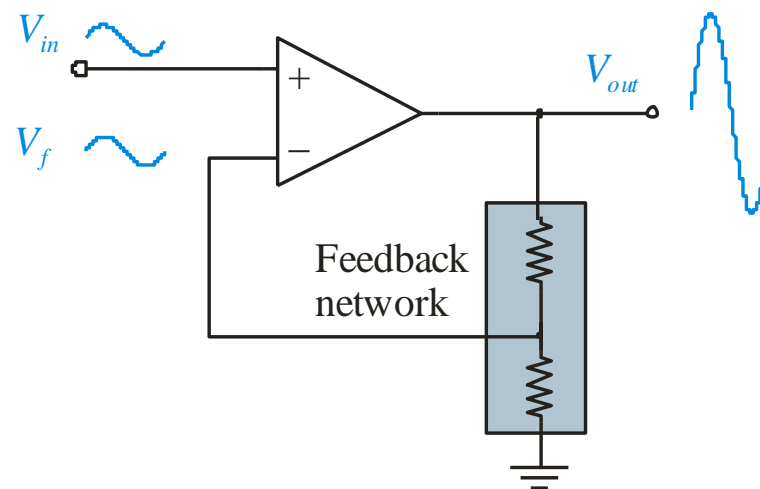


Strømspeil

INF 1411

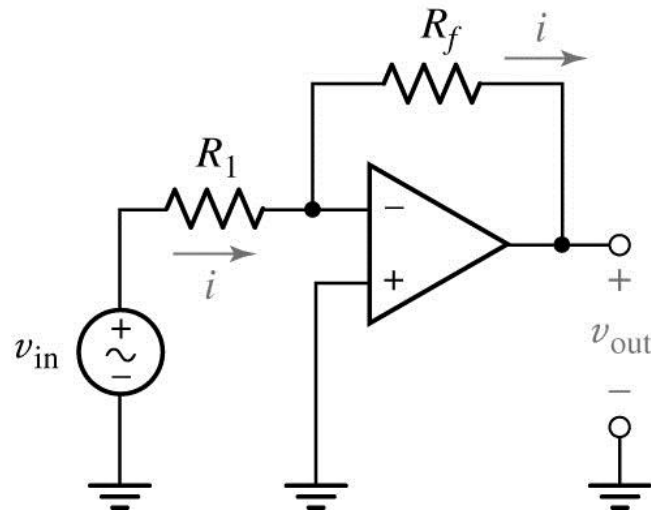
Negativ tilbakkekobling

- Tilbakkekobling brukes i bla kontrollsystemer og forsterkere for å bedre linearitet og stabilitet
- På en opamp fører negativ tilbakkekobling 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)

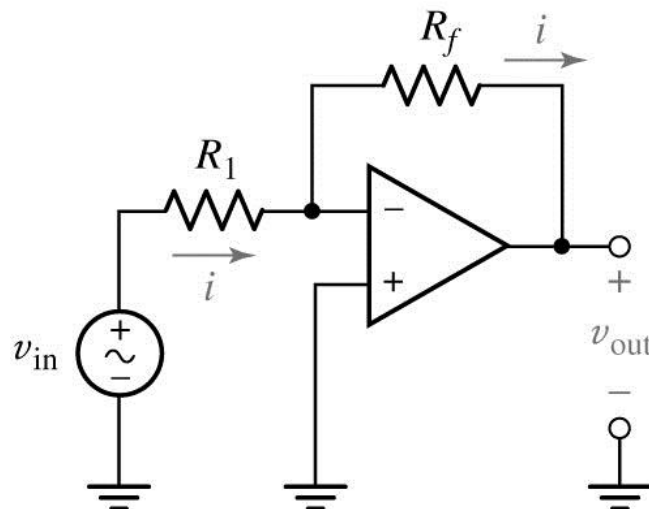


Opamp med negativ feedback

- 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:

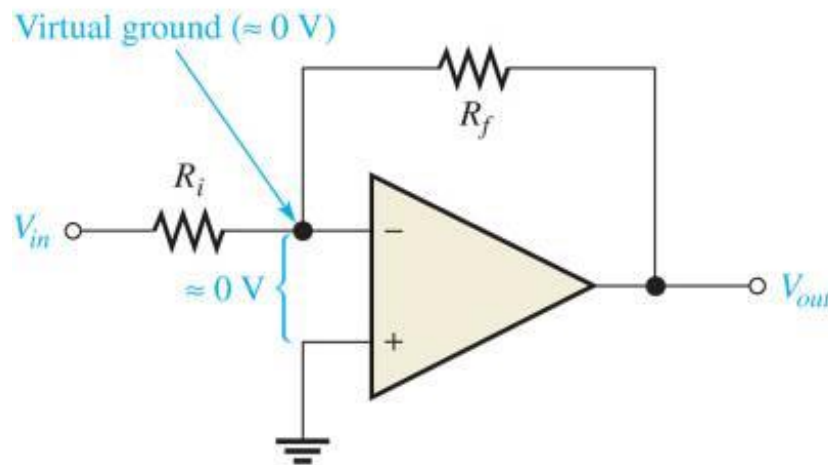
$$-v_{in} + R_1 i + R_f i + v_{out} = 0 \quad \Leftrightarrow \quad v_{out} = v_{in} - (R_1 + R_f) i$$

Inverterende forsterker (forts.)

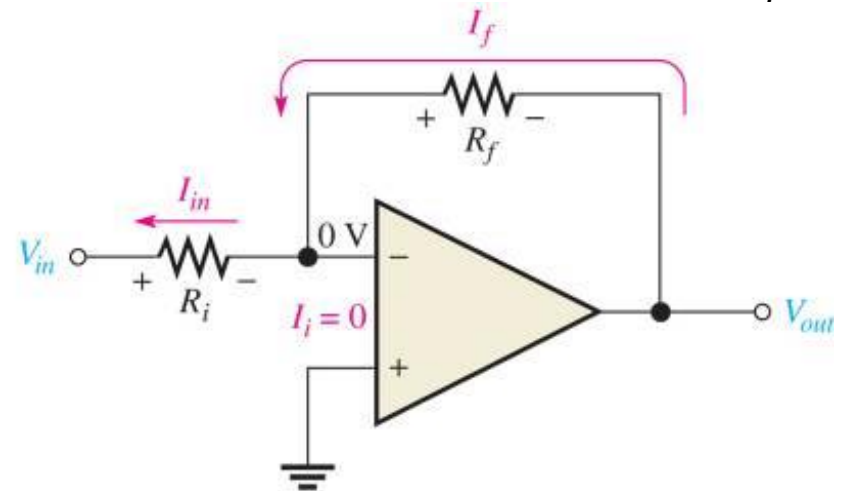
- Ved å anta at begge terminalene har samme spenning (virtuell jord) får vi at

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

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



(a) Virtual ground



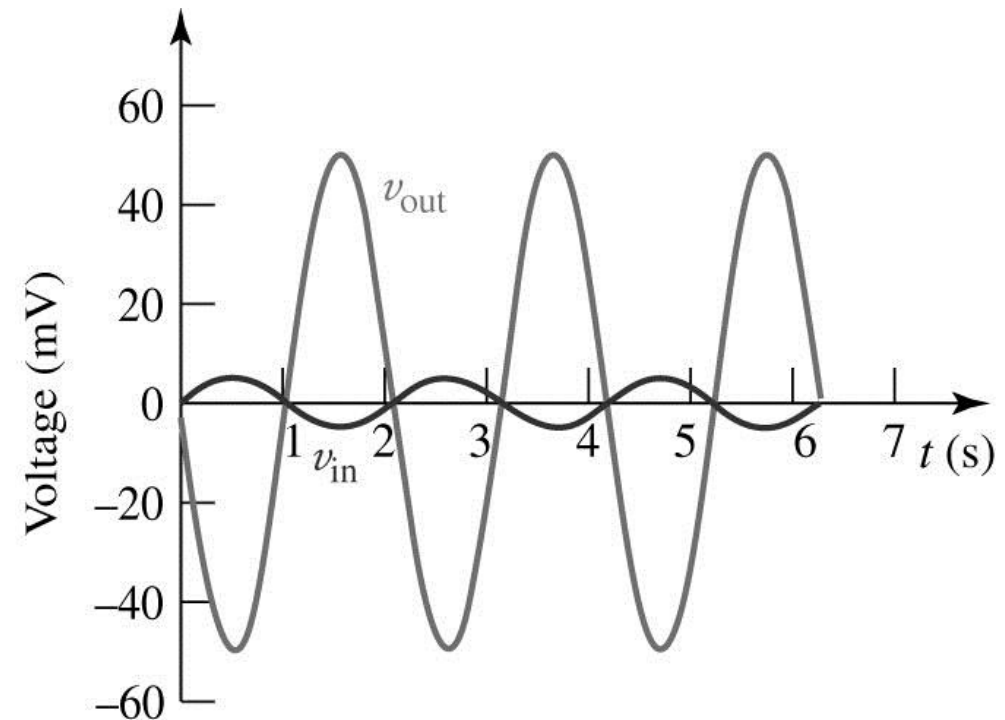
(b) $I_{in} = I_f$ and current at the inverting input, $I_i = 0$

Inverterende forsterker (forts.)

- A er gitt av forholdet mellom R_f og R_1 :

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

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

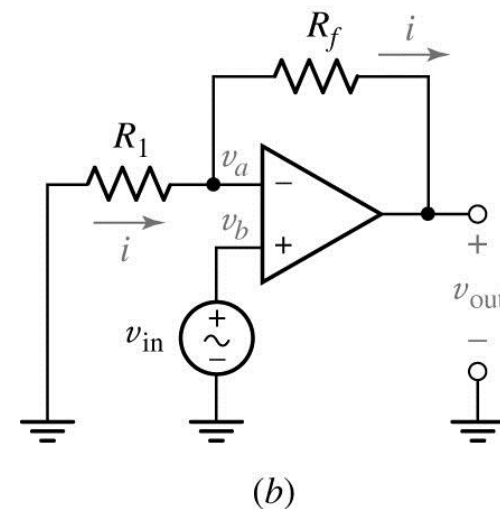
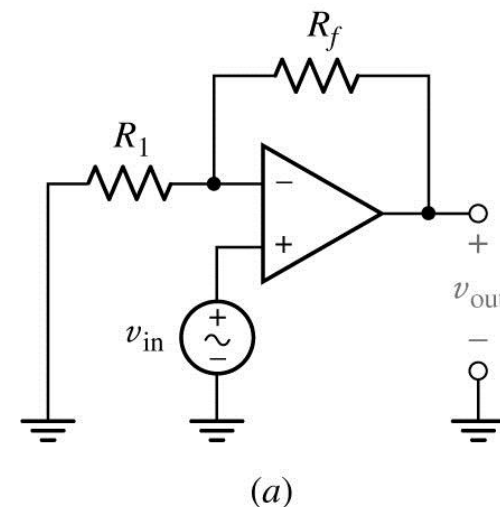


Ikke-inverterende forsterker

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

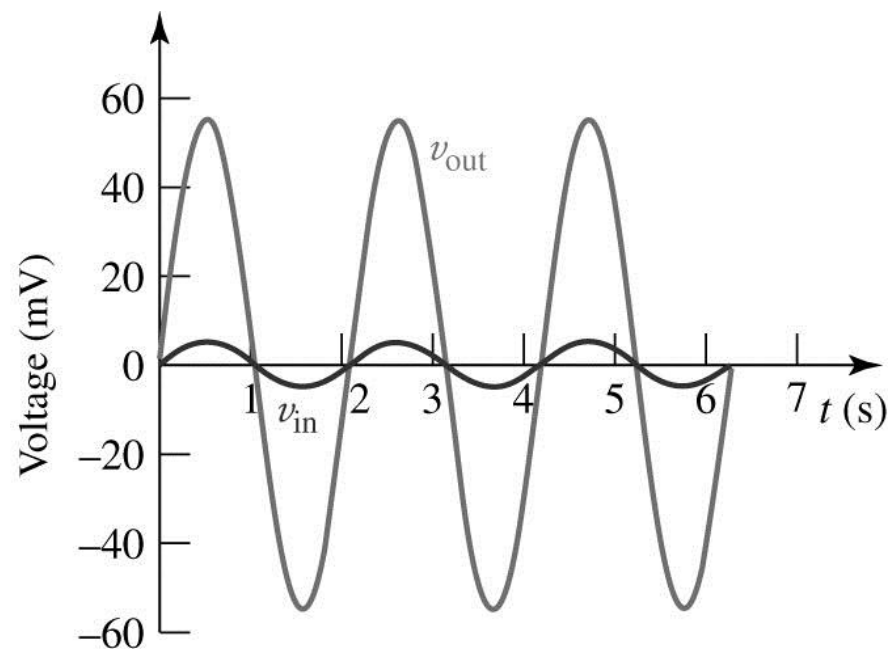
$$\frac{v_a}{R_1} + \frac{v_a - v_{out}}{R_f} = 0 \quad \wedge \quad v_b = v_{in} \quad \wedge$$

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



Ikke-inverterende forsterker (forts)

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



- En inverterende forsterker har $A>0$, mens en ikke-
inverterende har $A\geq 1$

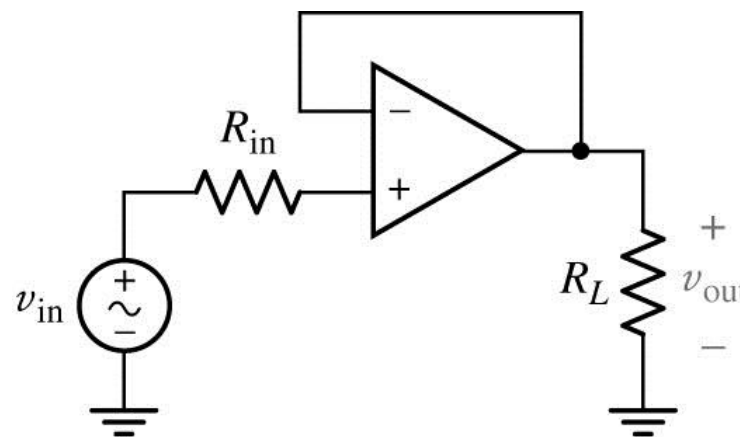
Spenningsfølger

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

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

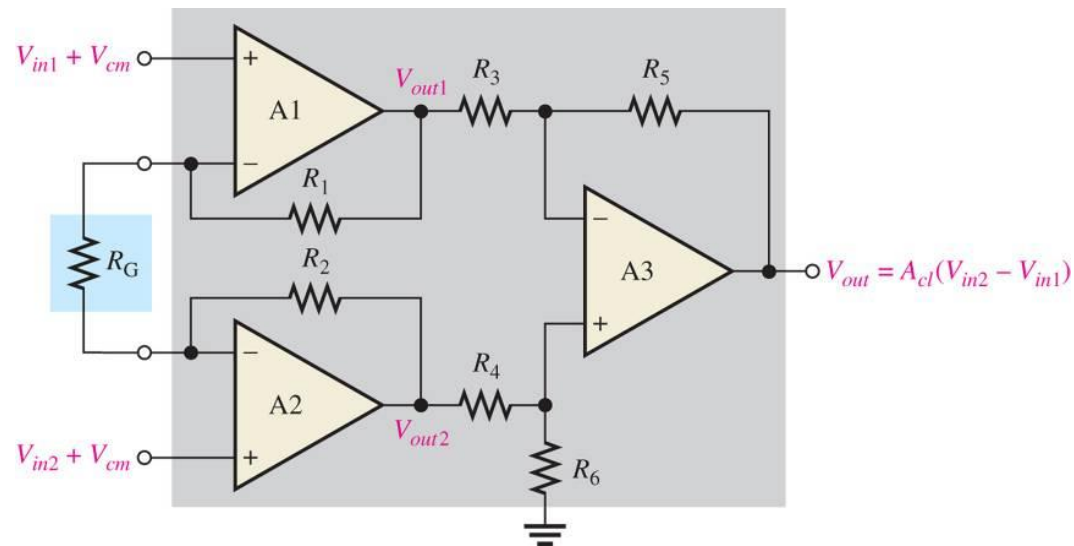
$$A = \frac{V_{out}}{V_{in}} = 1$$

- Spenningsfølger brukes bla for å elektrisk isolere input fra output



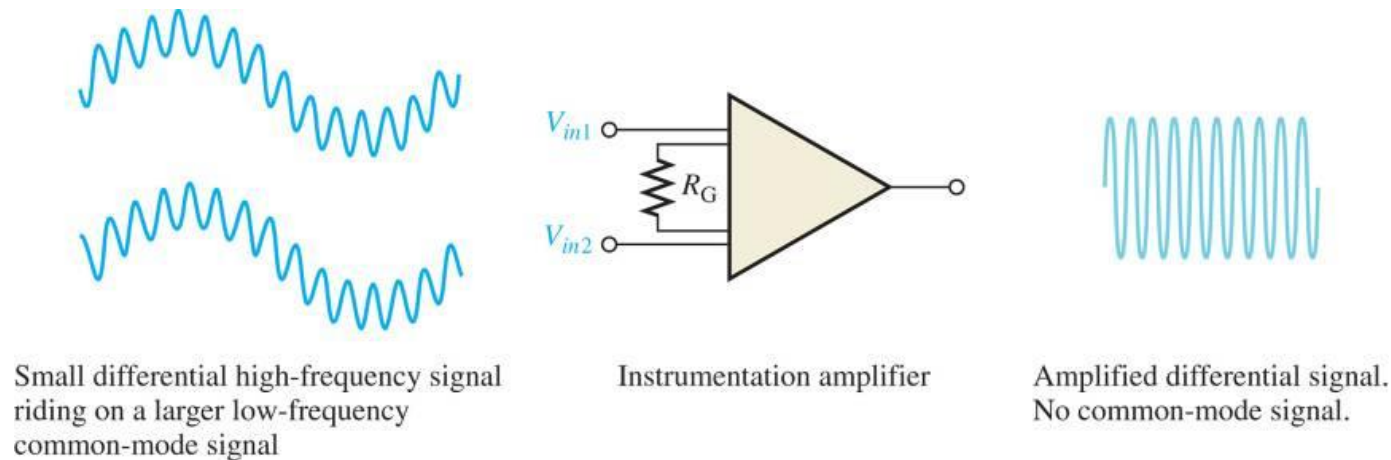
Instrumenteringsforsterker

- 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

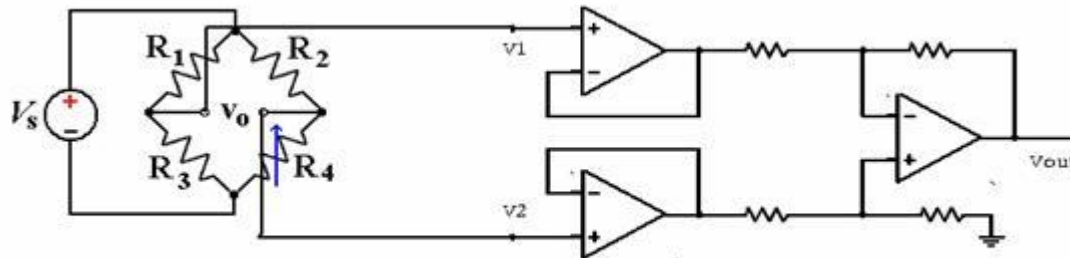


Instrumenteringsforsterker (forts)

- Forsterkning av common/differential mode signaler

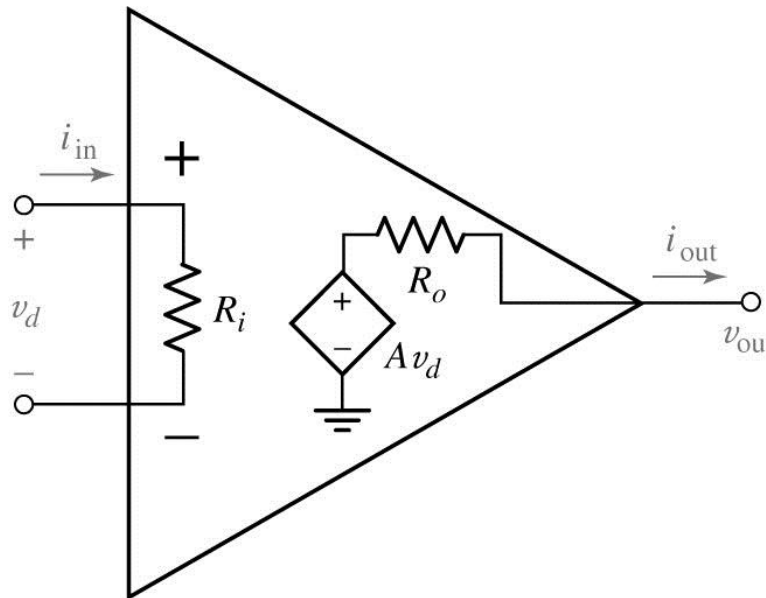


- Instrumenteringsforsterker med Wheatstonebro



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 output-spenningen 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 spennings*forskjellen* 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

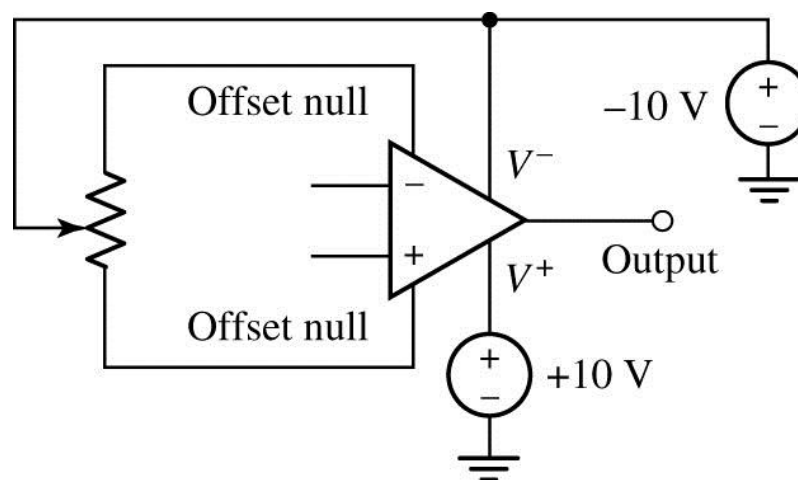
$$\left| V_{lin_{sat-}} \right| \neq \left| V_{lin_{sat+}} \right|$$

- 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

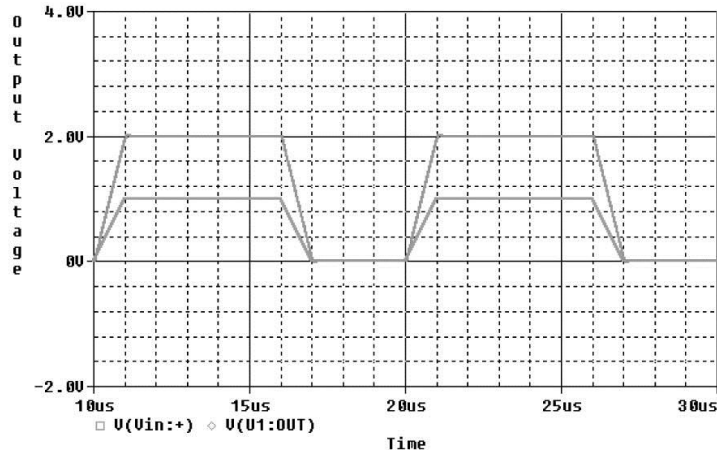
- Hvis inngangsterminalene er koblet sammen vil $v_d=0$, og dermed $v_{out}=0$, hvis opamp'en er ideell
- I praksis vil imidlertid $v_{out} \neq 0$ når $v_d=0$
- Denne effekten kalles for input offset spenning
- Opamp'er er utstyrt med to ekstra terminaler slik at offset spenningen kan justeres til 0



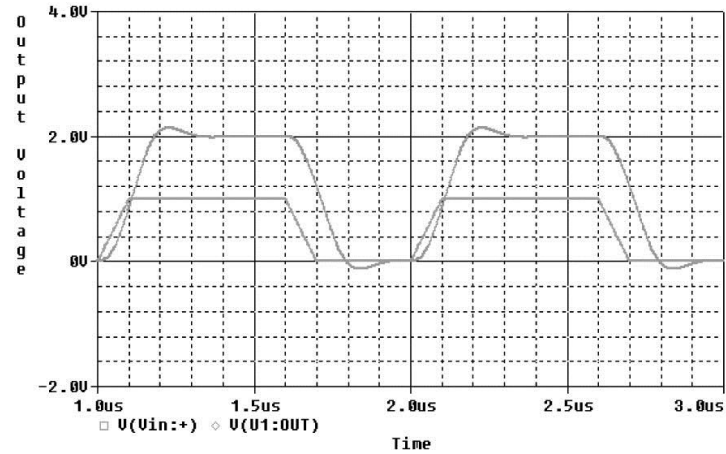
Slew rate

- . 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-spenning vil typisk ha lav slew-rate
- . Slew rate vil bestemme hva som er opamp'ens båndbredde, dvs anvendelige frekvensområde

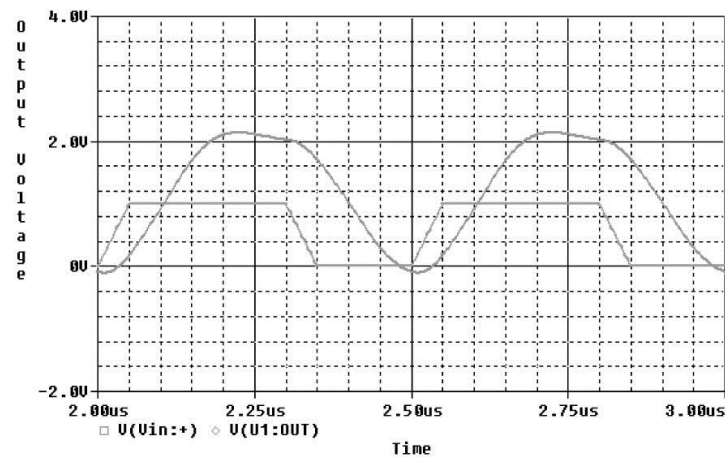
Slew rate (forts)



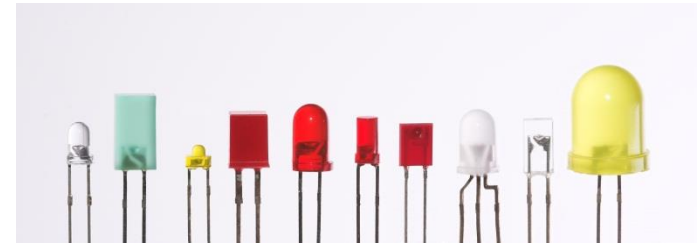
(a)



(b)



(c)



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) ∞

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 input-signalet
- 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

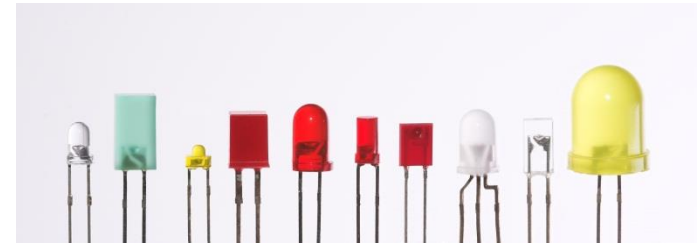
En praktisk opamp har

- 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