

Forelesning nr.10 IN 1080

Elektroniske systemer

Operasjonsforsterkere

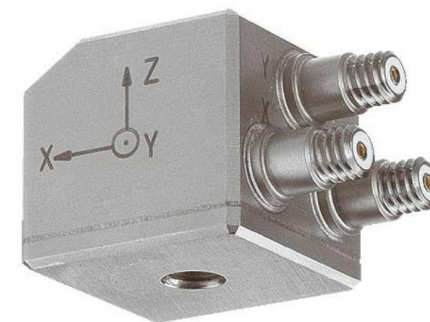


Dagens temaer

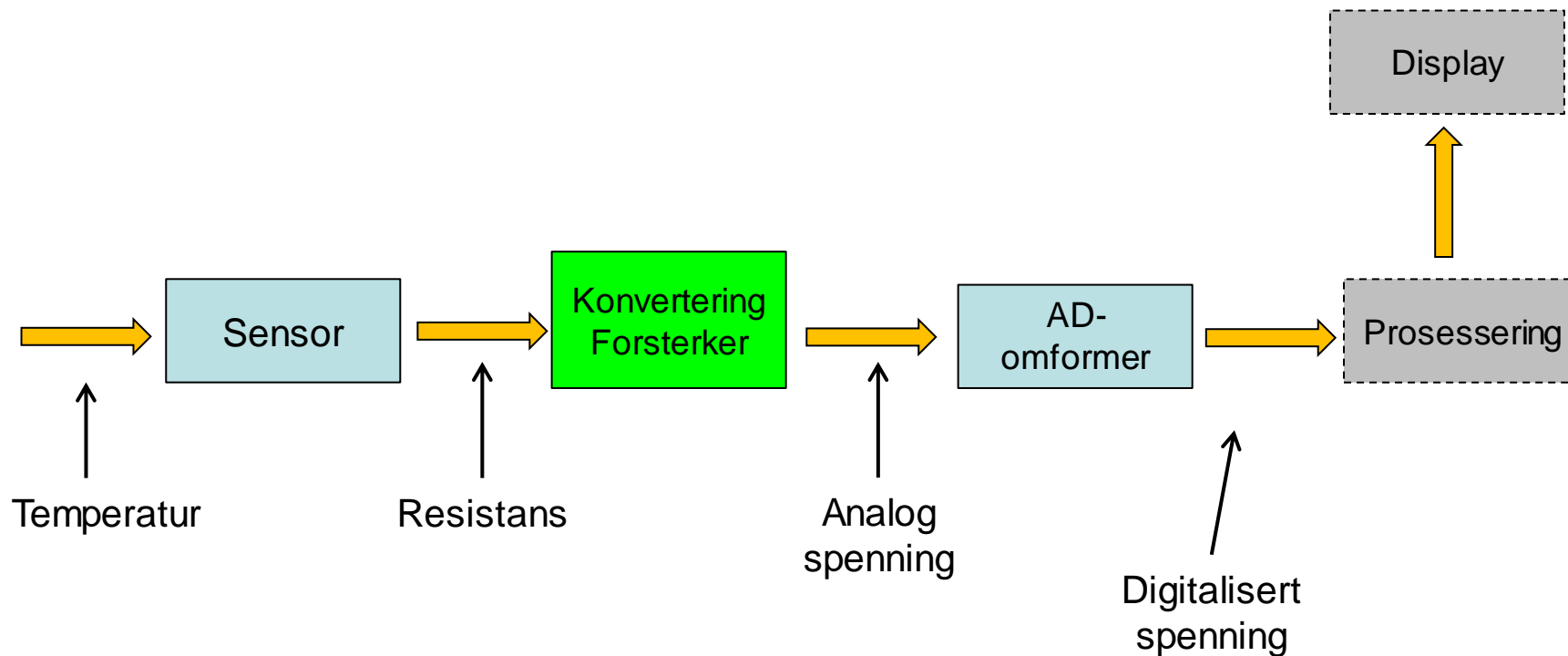
- Måleteknikk
- Wheatstone-bro
- Ideell operasjonsforsterker
- Differensiell forsterker
- Opamp-kretser
- Dagens temaer er hentet fra kapittel 6.5, 17.1-17.6, 18.1-18.6 og 19.1

Måleteknikk

- Ofte trenger man 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....)
- I måleteknikk «oversettes» et fysisk fenomen til en elektrisk størrelse som kan måles:
 - Strøm og spenning
 - Impedans (resistans, konduktans og induktans)
- De elektriske størrelsene må måles hurtig og med høy presisjon

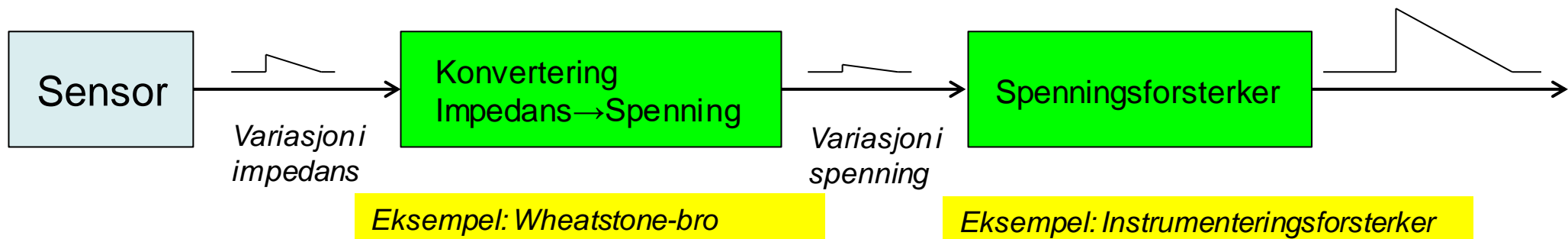


Måleteknikk (eksempel)



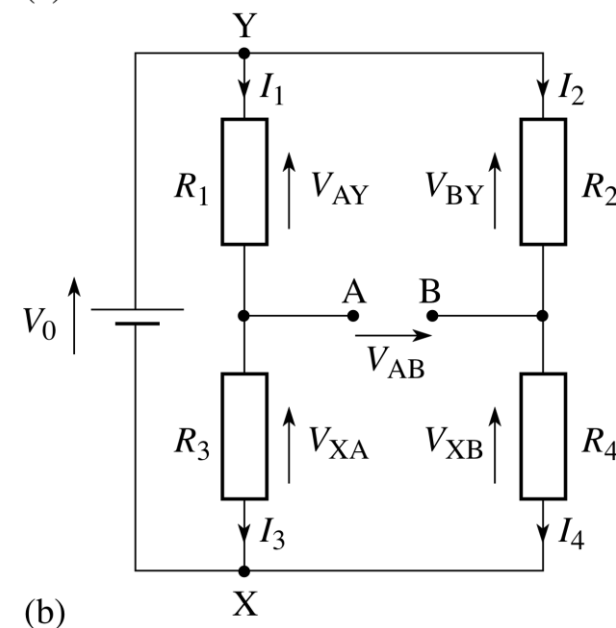
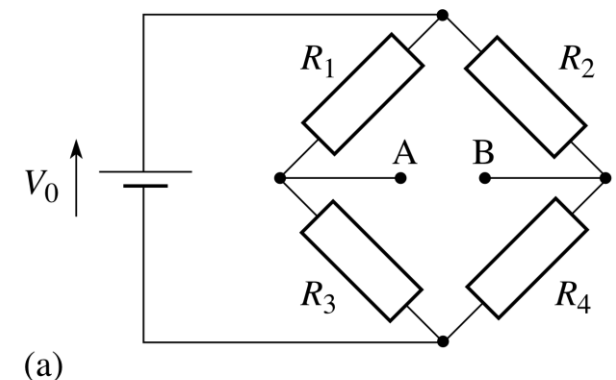
Måleteknikk

- En sensor måler en fysisk parameter og representerer denne som en impedans (resistans, kapasitans eller induktans)
- Impedansen konverteres deretter til en spenning
- Spenningen må forsterkes siden det oftest er små variasjoner i impedans som måles
- Eventuell støy og hurtige variasjoner må som regel filtreres bort



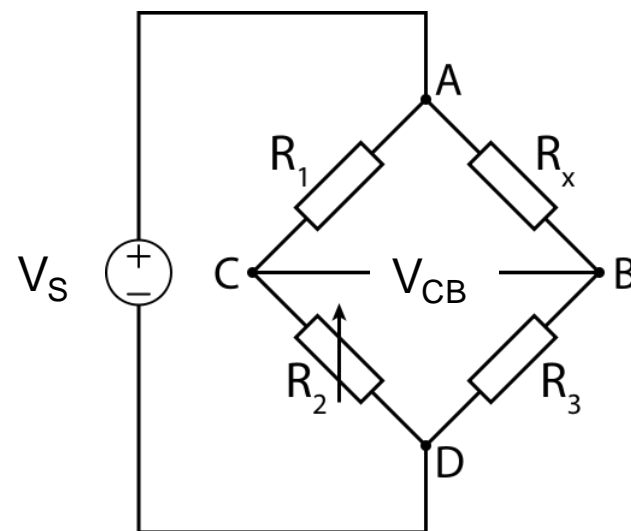
Wheatstone-bro

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



Wheatstone-bro (forts)

- Wheatstone-broen består av én ukjent og tre kjente motstander
- En av de kjente motstandene kan være regulerbar
- 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

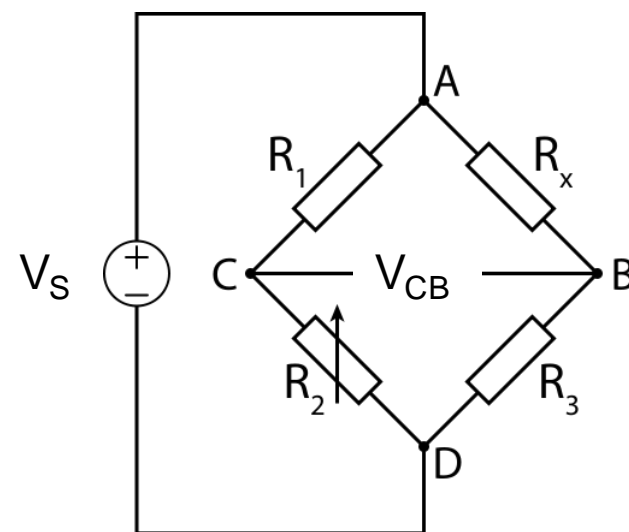
- Hvis spenningen $V_{CB} = 0$ volt, er spenningsfallet V_1 over R_1 og V_x over R_x like store, dvs $V_1 = V_x$
- Som en konsekvens må da $V_2 = V_3$

- 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) slik at $V_{CB} = 0$ volt, kan R_x utledes *kun* fra de andre motstandsverdiene



Ubalansert Wheatstone-bro

- Hvis R_x 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:

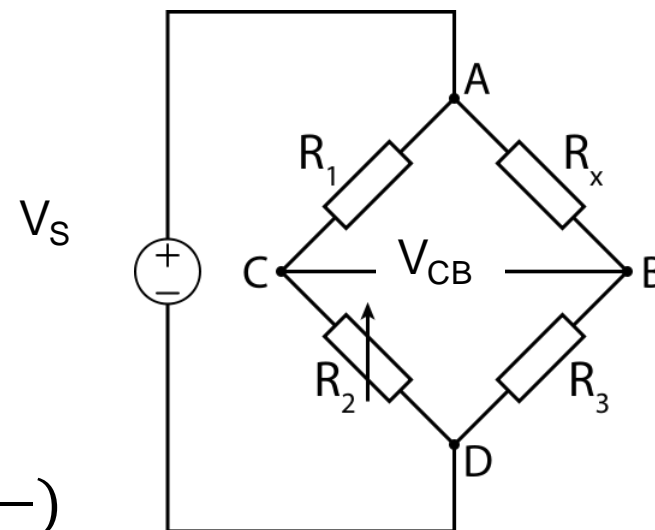
$$V_C = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_S$$

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

- Dette gir

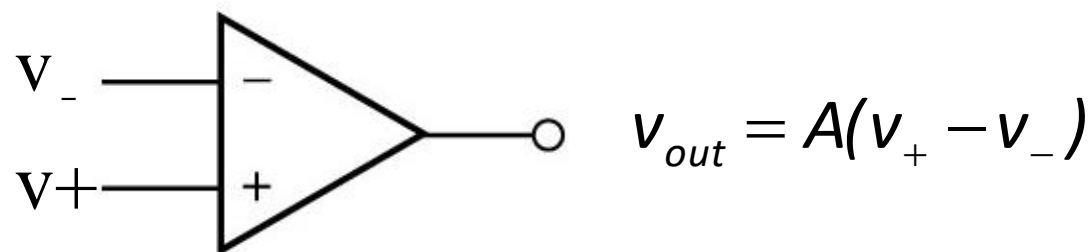
$$V_{CB} = V_C - V_B = V_S \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_x} \right)$$

- Hvis R_1 , R_2 , R_3 og V_S er kjent og V_{CB} kan måles, kan vi beregne R_x



Spenningsforsterker: Opamp

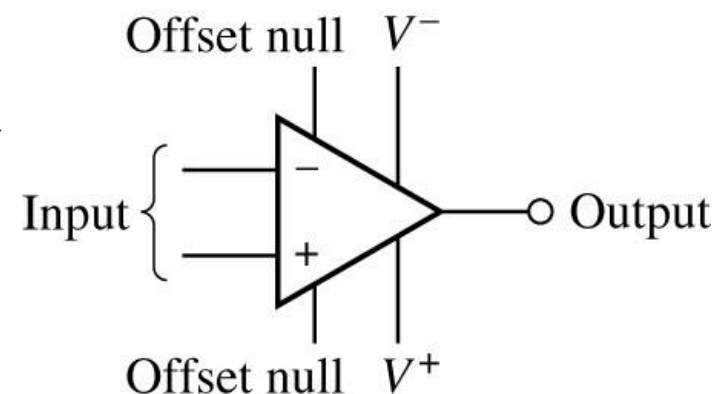
- Forsterkere i måleteknikk bruker en forsterker som kalles for *operasjonsforsterker* (*opamp*)
- En opamp er en spenningsforsterker med to innganger og én utgang



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

Enkel opamp-modell

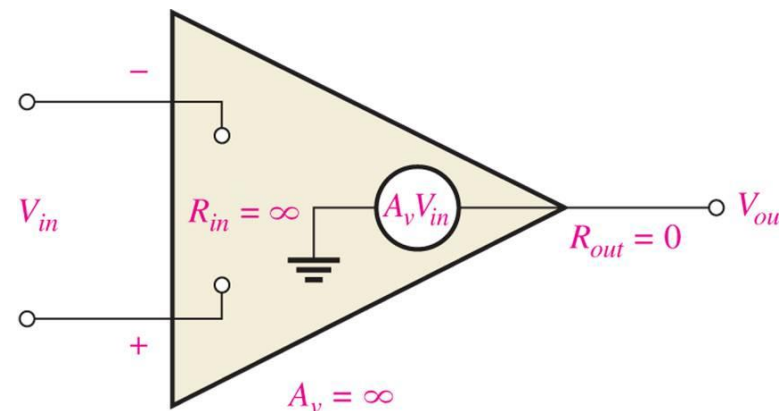
- Opamp'en er en aktiv enhet som trenger ekstern strømforsyning og kalibrering
- Kalibrering brukes for å rette opp små avvik og variasjoner
- Med opamp'er lager man andre typer forsterkere, bla *differensielle forsterkere* og *instrumenteringsforsterkere*



Karakteristikk til en ideel opamp

- En *ideell* operasjonsforsterker har følgende egenskaper:

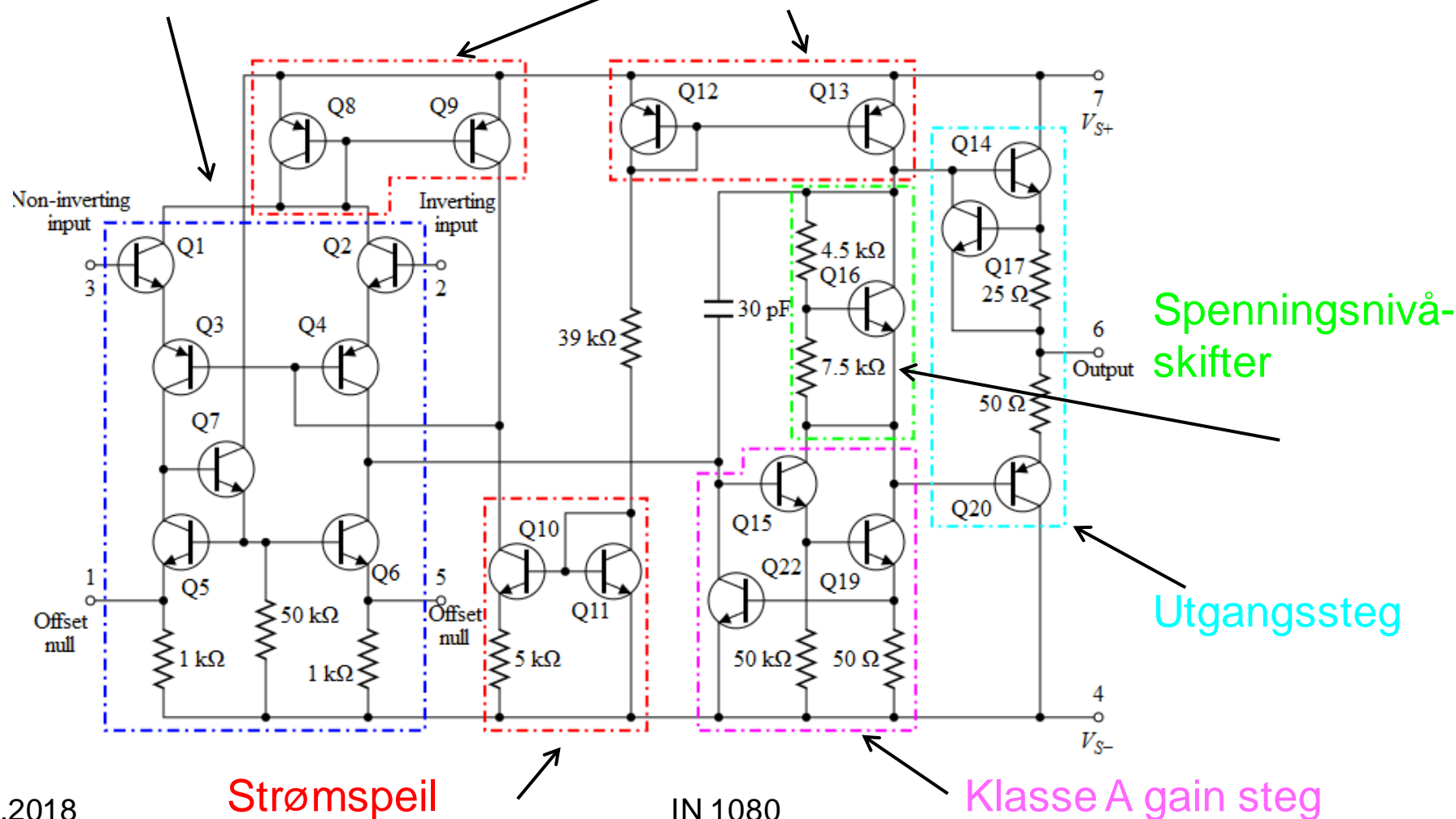
- Inngangsmotstanden $R_i = \infty$
- Utgangsmotstanden $R_o = 0$
- Spenningsforsterkningen $A_v = \infty$
- Båndbredden = ∞
- $V_{out} = 0$ når $V_+ = V_-$ uavhengig av størrelsesordenen til V_-



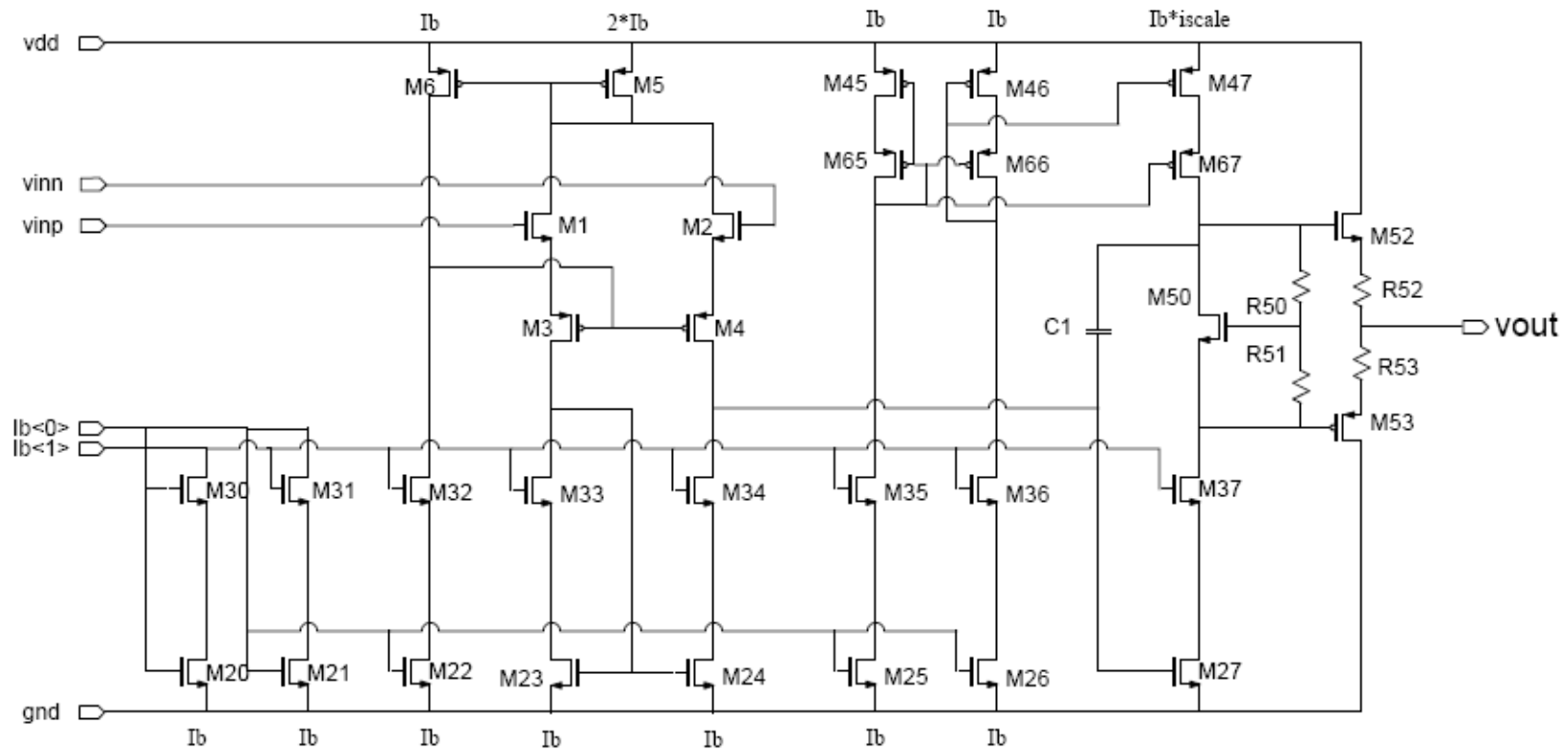
Eksempel på implementasjon (741-type, BJT)

Differensiell forsterker

Strømspeil

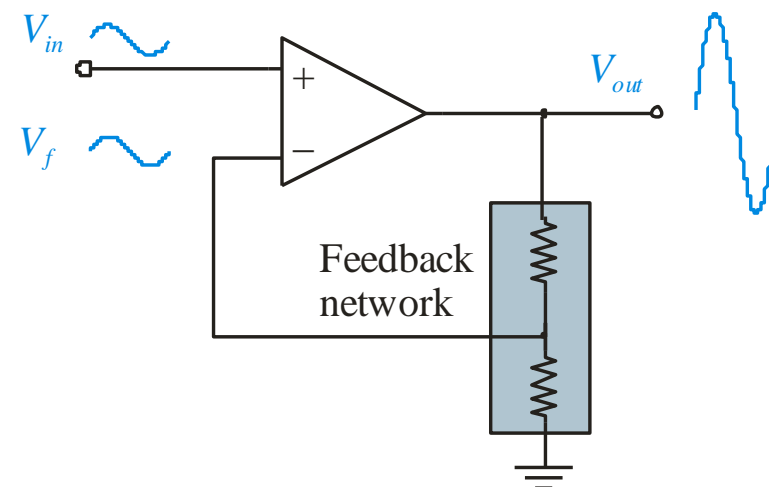


A CMOS IMPLEMENTATION OF THE uA741 OP AMP



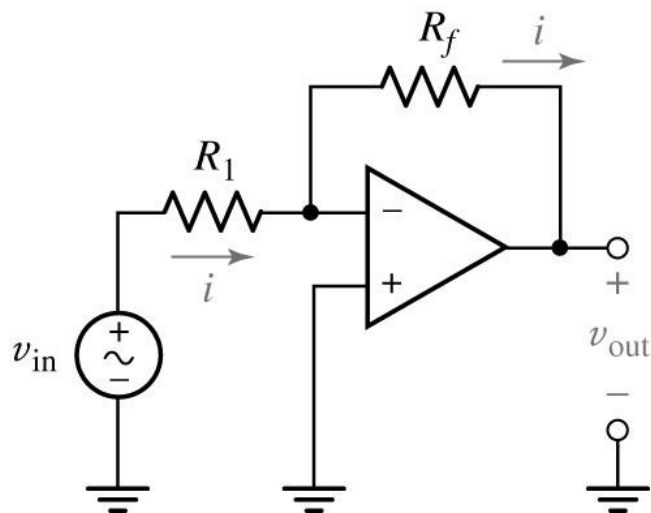
Negativ tilbakkekobling

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

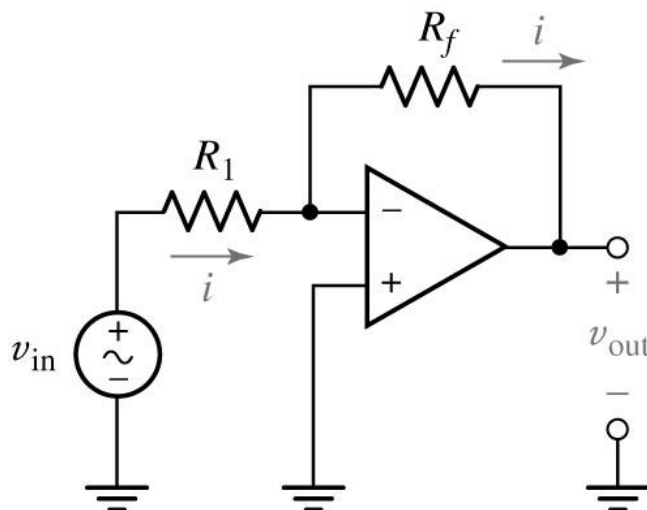


Opamp med negativ feedback

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



Inverterende forsterker (forts.)



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

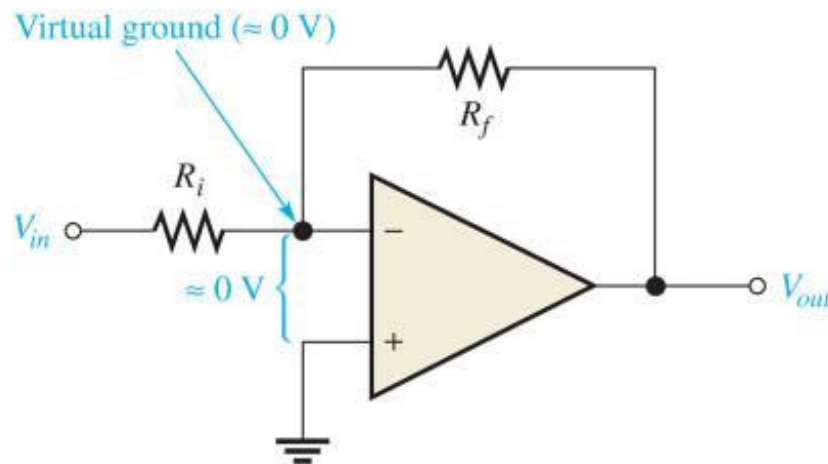
$$-v_{in} + R_1 i + R_f i + v_{out} = 0 \quad \Leftrightarrow \quad v_{out} = v_{in} - (R_1 + R_f) i$$

Inverterende forsterker (forts.)

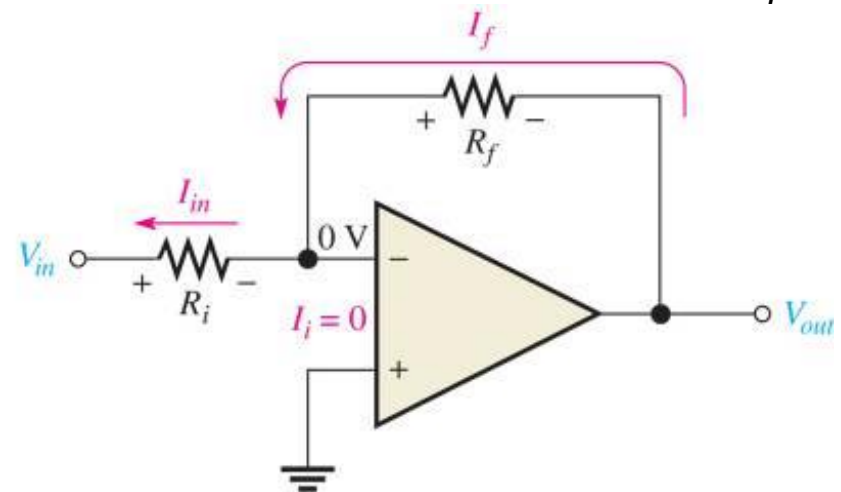
- Ved å anta at begge terminalene har samme spenning (virtuell jord) får vi at

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

- 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 :

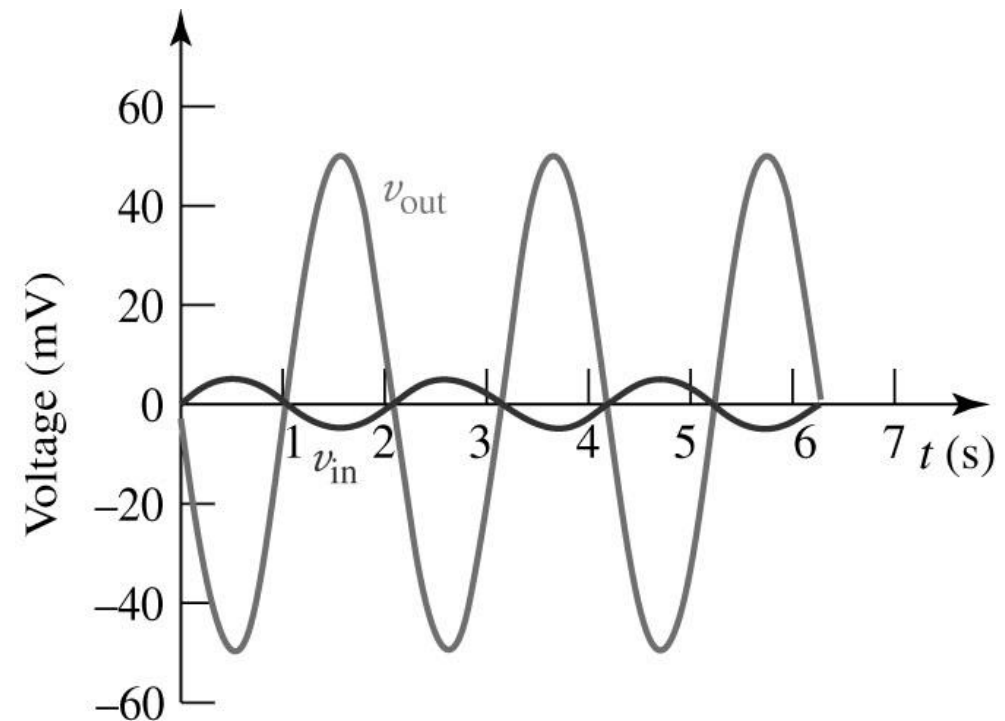
$$A = -\frac{R_f}{R_1}$$

- 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 $v_{out} = -50\sin(3t)\text{mV}$

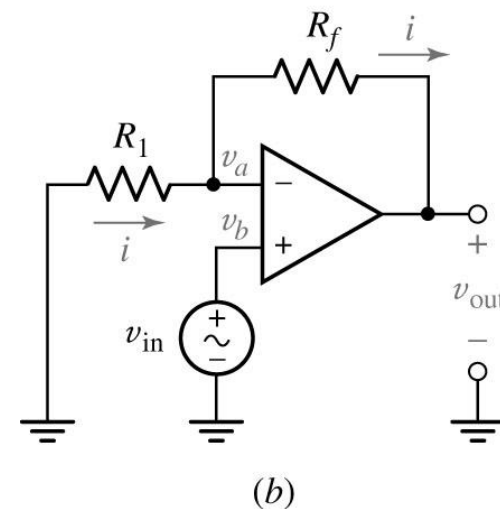
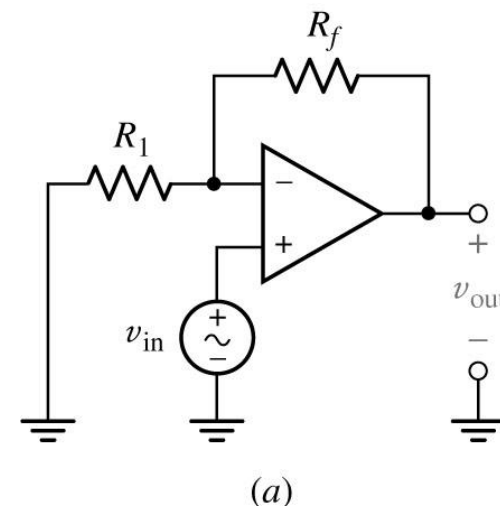


Ikke-inverterende forsterker

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

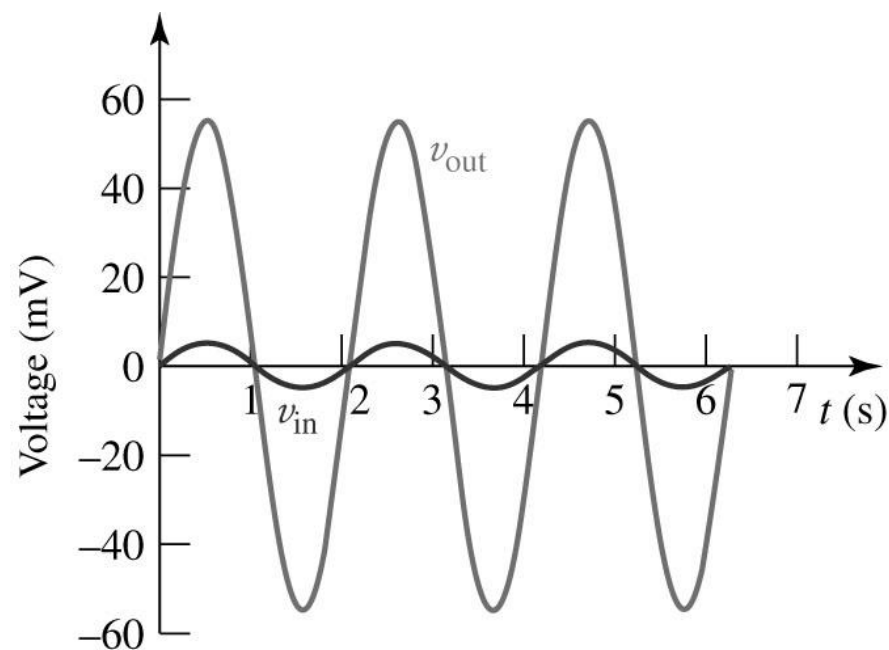
$$\frac{v_a}{R_1} + \frac{v_a - v_{out}}{R_f} = 0 \quad \wedge \quad v_b = v_{in} \quad \wedge$$

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



Ikke-inverterende forsterker (forts)

- Ser på oppførselen med
 $v_{in}=5\sin(3t)\text{mV}$, $R_1=4.7\text{k}\Omega$,
 $R_f=47\text{k}\Omega$
- 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 $A \geq 1$



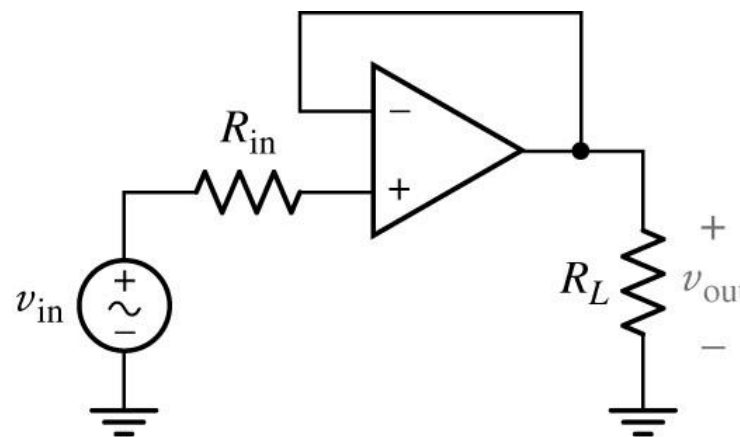
Spenningsfølger

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

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

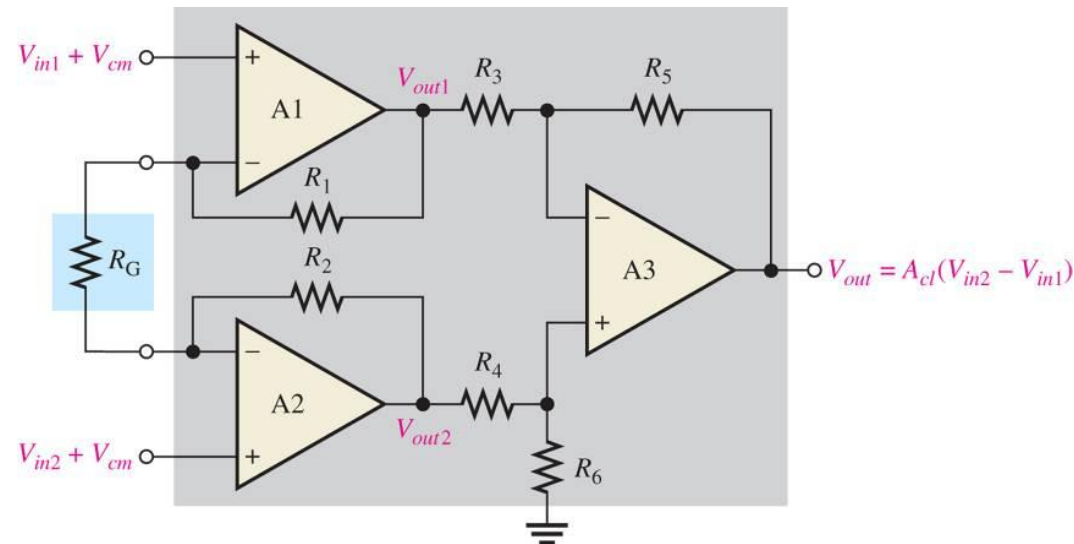
$$A = \frac{V_{out}}{V_{in}} = 1$$

- Spenningsfølgere brukes bla for å elektrisk isolere input fra output



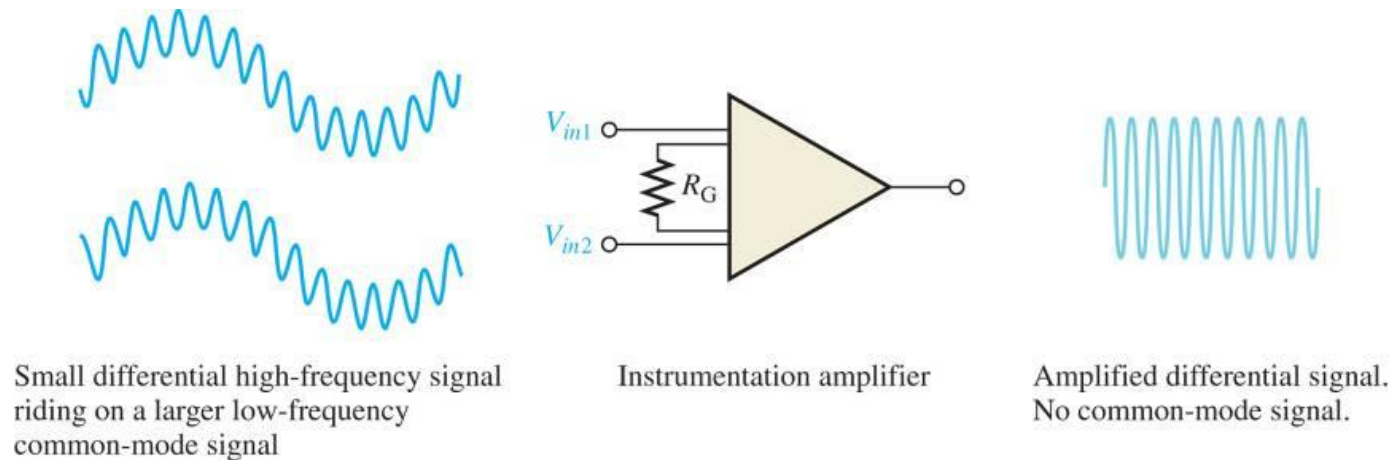
Instrumenteringsforsterker

- 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 omgivelser med mye støy
- Motstanden R_G regulerer forsterkningen

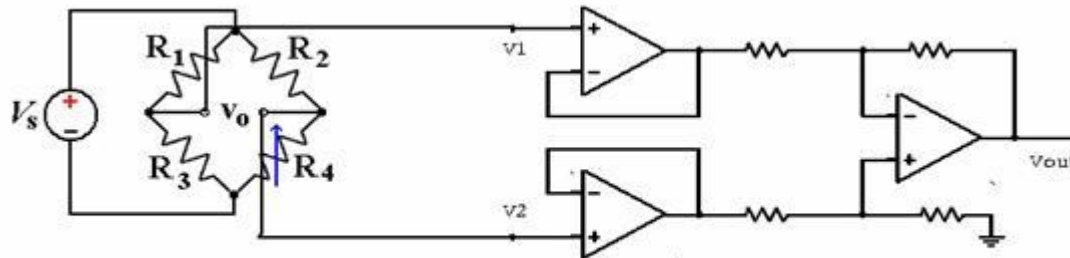


Instrumenteringsforsterker (forts)

- Forsterkning av common/differential mode signaler

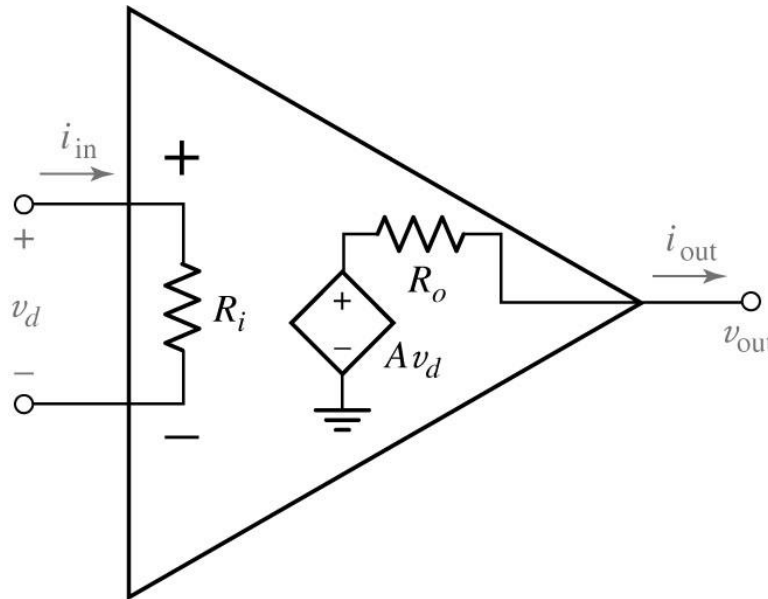


- Instrumenteringsforsterker med Wheatstonebro



Fysiske opamp'er

- Med utgangspunkt i den enkle og ideelle opamp-modellen kan vi finne ut hvordan en fysisk opamp oppfører seg



Praktiske opamp'er (forts)

- Tre viktige parametrene som klassifiserer en opamp er:
 - 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) er vanligvis fra 10^5 og større
- Spesialiserte opamp'er kan ha helt andre verdier

| Ideell opamp | Fysisk opamp |
|----------------|-------------------------|
| $R_i = \infty$ | $R_i \sim M\Omega$ |
| $R_o = 0$ | $R_o < 2-3 \text{ Ohm}$ |
| $A = \infty$ | $A \sim 10^5$ |

Praktiske opamp'er (forts)

- Fra den enkle modellen kan man utlede de to ideelle opampreglene:
 - 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} er begrenset oppad til forsyningsspenningen

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

Metning (saturation)

- . Metning betyr at økning av inngangsspenningen ikke lenger gir økning i utgangsspenningen
- . Utgangsspenningen fra en opamp kan ikke overstige forsyningsspenningen (forsterkningen er begrenset i praksis)
- . I tillegg har transistorene som driver utgangen i opamp'en et fast 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

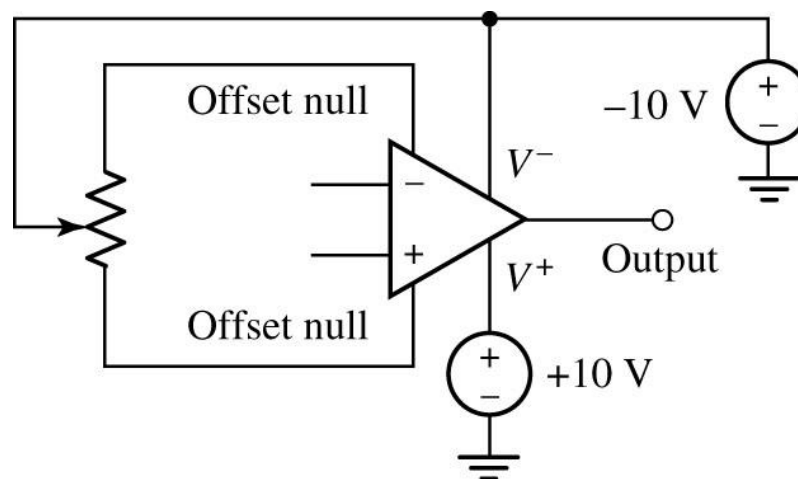
$$\left| V_{lin_{sat-}} \right| \neq \left| V_{lin_{sat+}} \right|$$

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

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

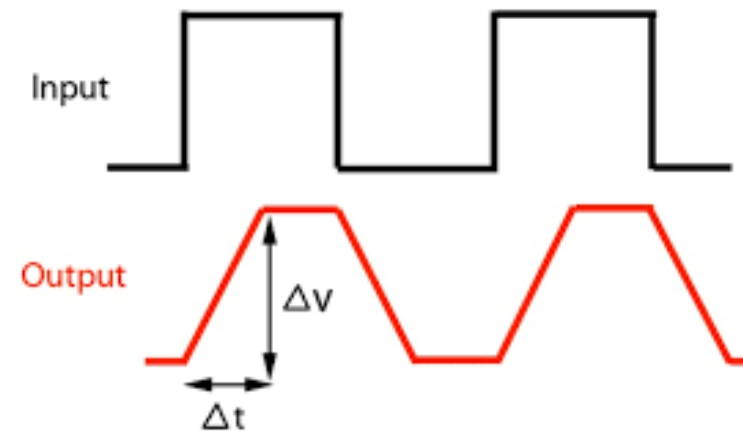
Input offset-spenning

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



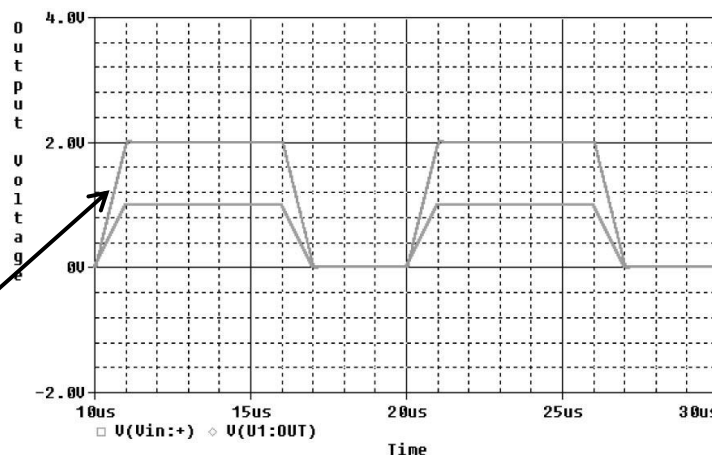
Slew rate

- 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 bestemmer opamp'ens båndbredde, dvs anvendelige frekvensområde



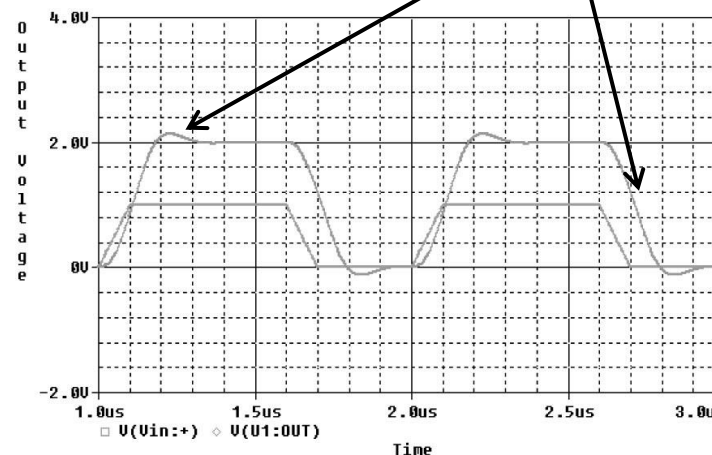
Slew rate (forts)

Utgangssignalet har samme form som inngangssignalet



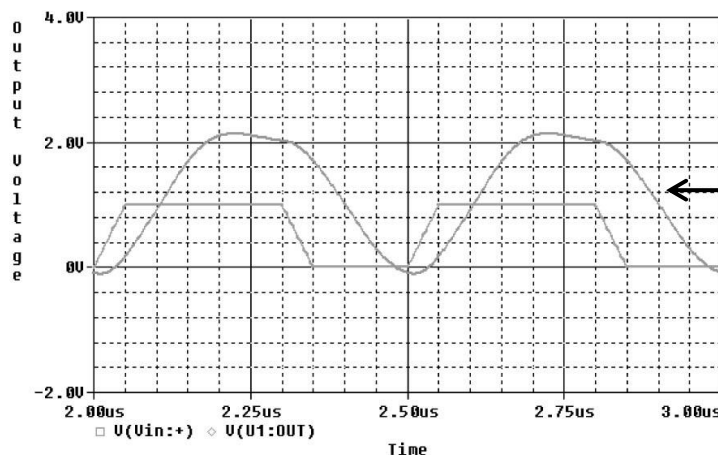
(a)

Formen til utgangssignalet begynner å avvike fra inngangssignalet



(b)

NB: Ulik tidsskala på de horisontale aksene

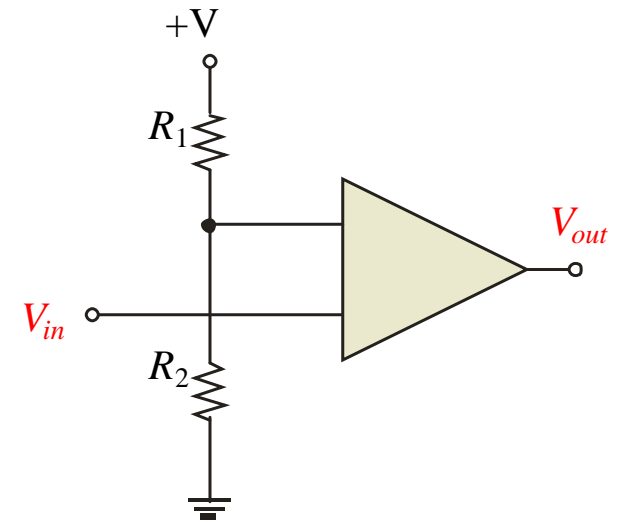


Utgangssignalet er sterkt forvrengt

(c)

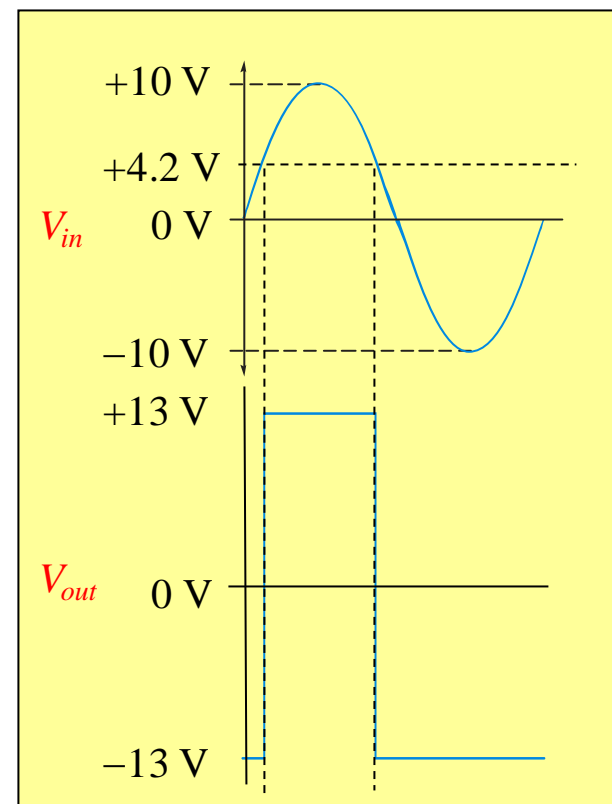
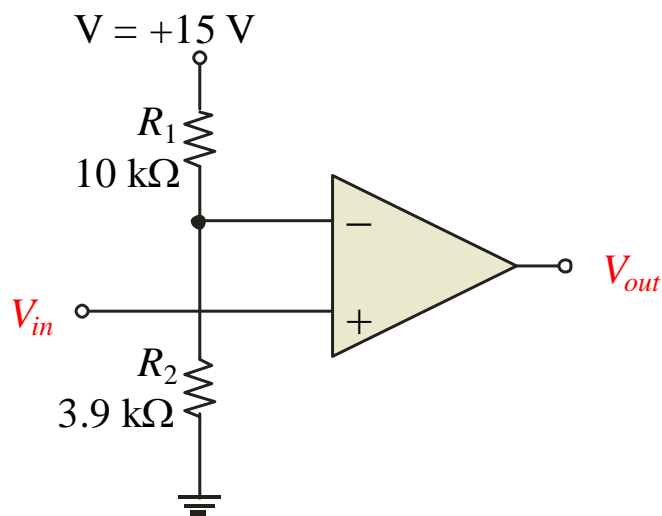
Komparatorer

- En komparator sammenligner spenningsnivåene til to input-signaler
- Utgangen har enten maksimal eller minimal spenning (dvs metning), avhengig av hvilket inngangssignal som er størst
- Siden man ønsker max/min-type oppførsel bruker man ikke feedback
- Vanlige opamp'er kan brukes som komparator, men vanligere å bruke spesialiserte opamp'er som er raskere



Komparatorer (forts)

- Eksempel på komparator; maks output-spenning er 13v, og $V_{\text{ref}}=4.2\text{v}$

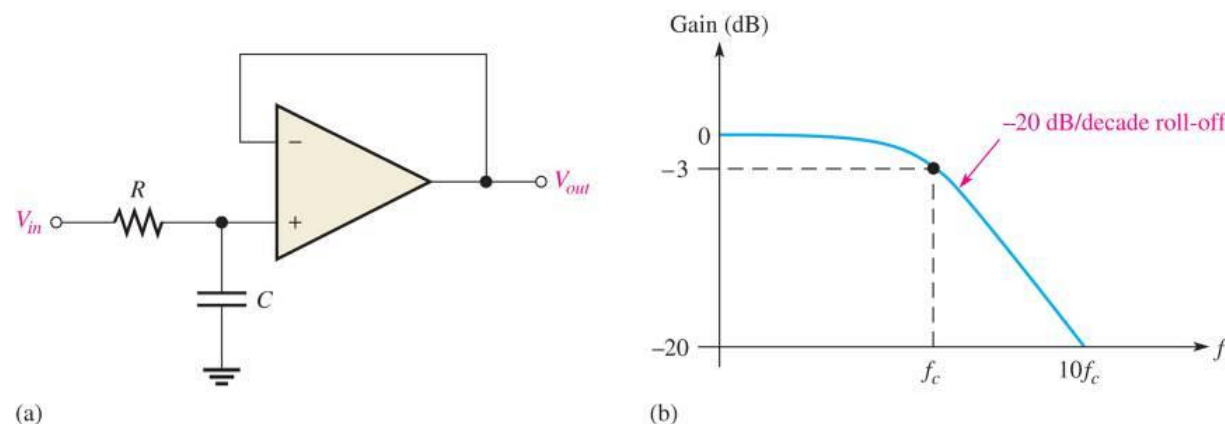


Aktive filtre

- Et passivt filter består kun av passive komponenter (resistorer, kondensatorer og/eller spoler)
- Et passivt filter kan ha maksimalt gain $A=1$
- Den største ulempen med passive filtre er at de vil ha stor dempning også i passområdet hvis man skal ha bratt «roll-off»
- Aktive filtre består av passive filtre pluss forsterkere
- Forsterkning gjør at man kan både få $A=1$ i passområdet, og bratt roll-off
- Et filters *orden* 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

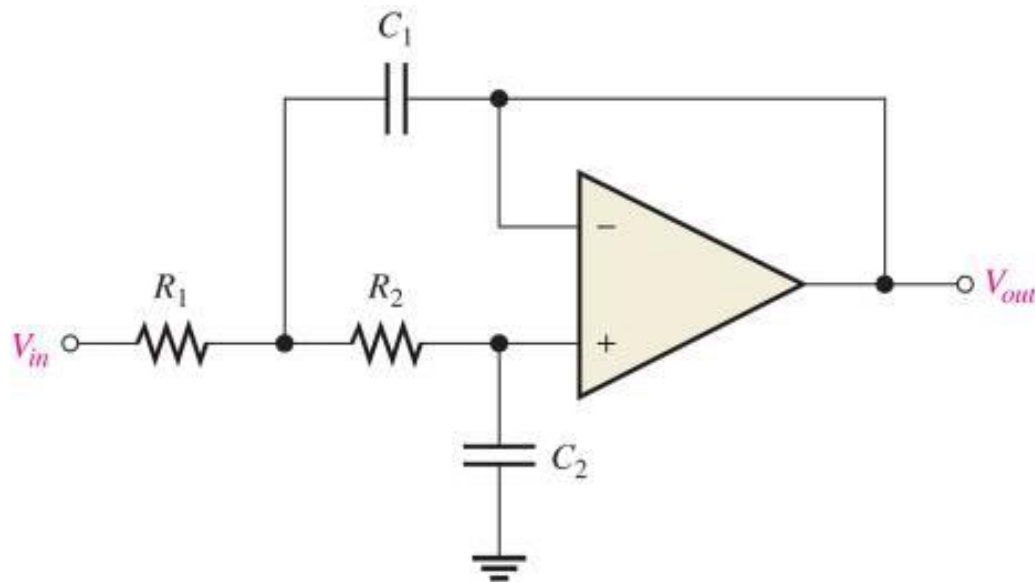


- Et 1.ordens lavpassfilter har en roll-off på -20dB per dekad, dvs forsterkningen faller med en faktor 10 for $10 \cdot f_c$
- Forholdet mellom V_{out} og V_{in} er gitt av

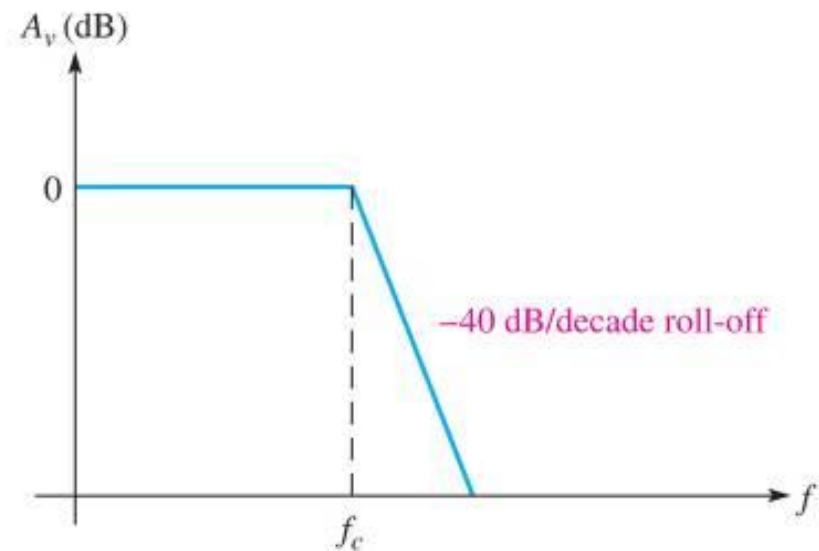
$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{X_C}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}$$

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



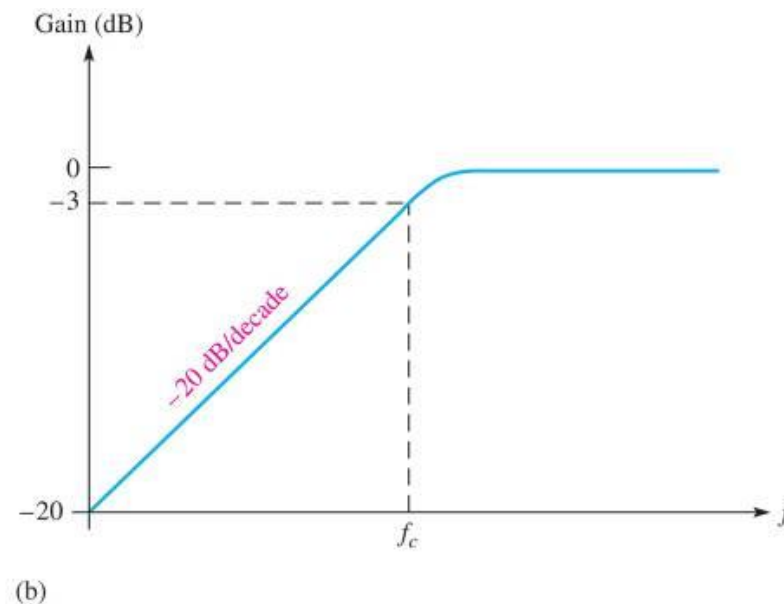
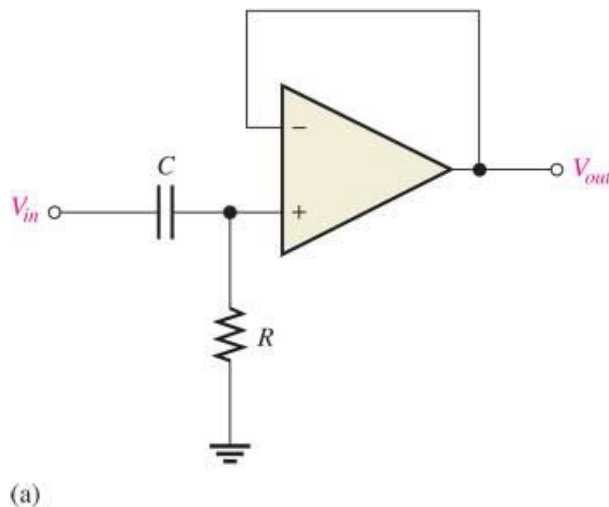
(a)



(b)

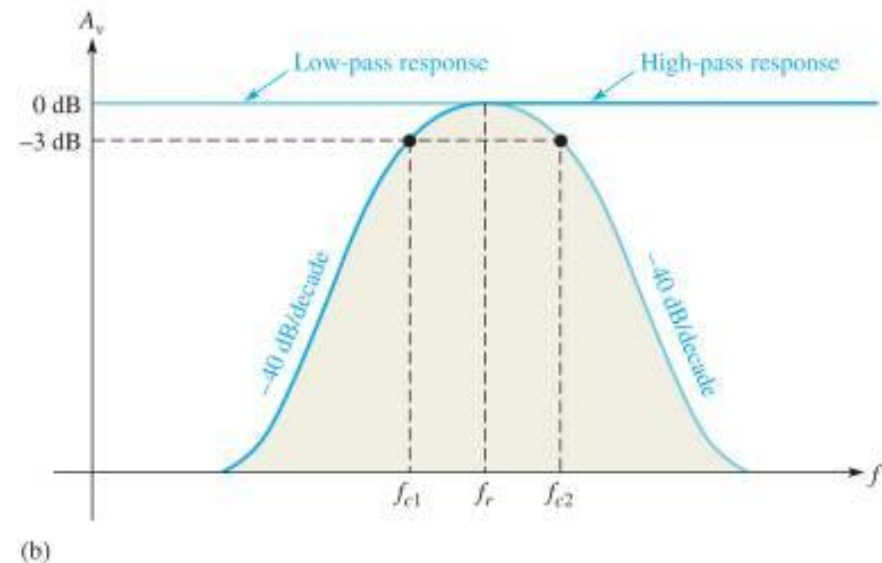
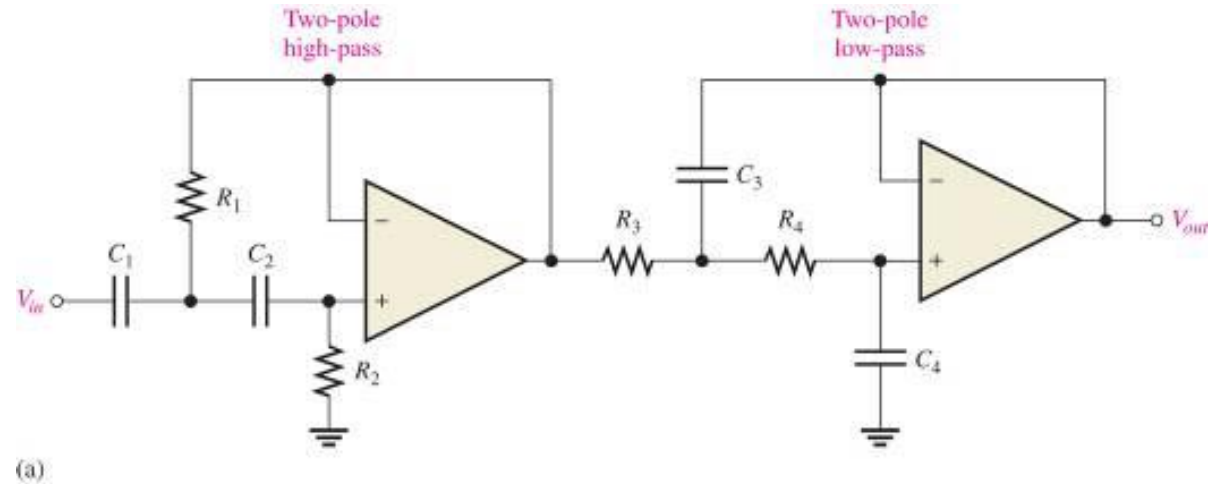
Aktivt 1.ordens høypassfilter

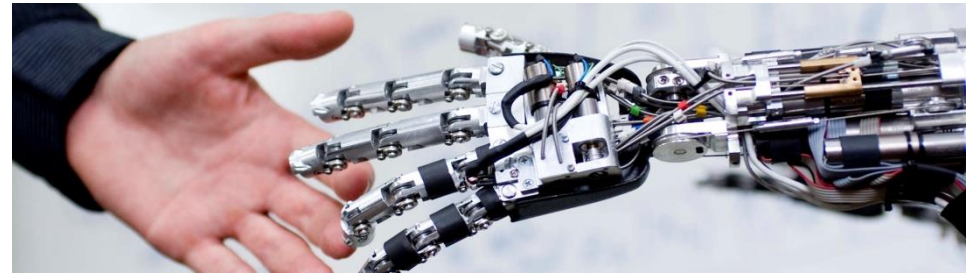
- Et 1.ordens høypassfilter kan lages ved å koble et passivt høypass-filter til den ikke-inverterende inngangen på opampen
- Siden opampen er koblet som en spenningsfølger, vil $A=1$ i passområdet



Aktivt båndpassfilter

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





Forelesning nr.10 INF 1411

Oppsummeringsspørsmål

