

Forelesning nr.8 IN 1080

Operasjonsforsterkere

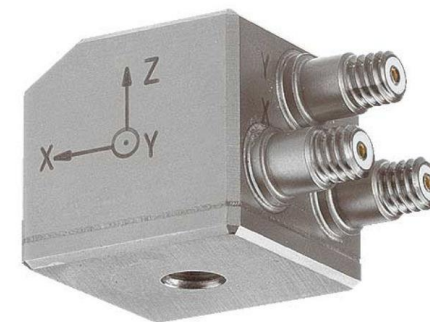


Dagens temaer

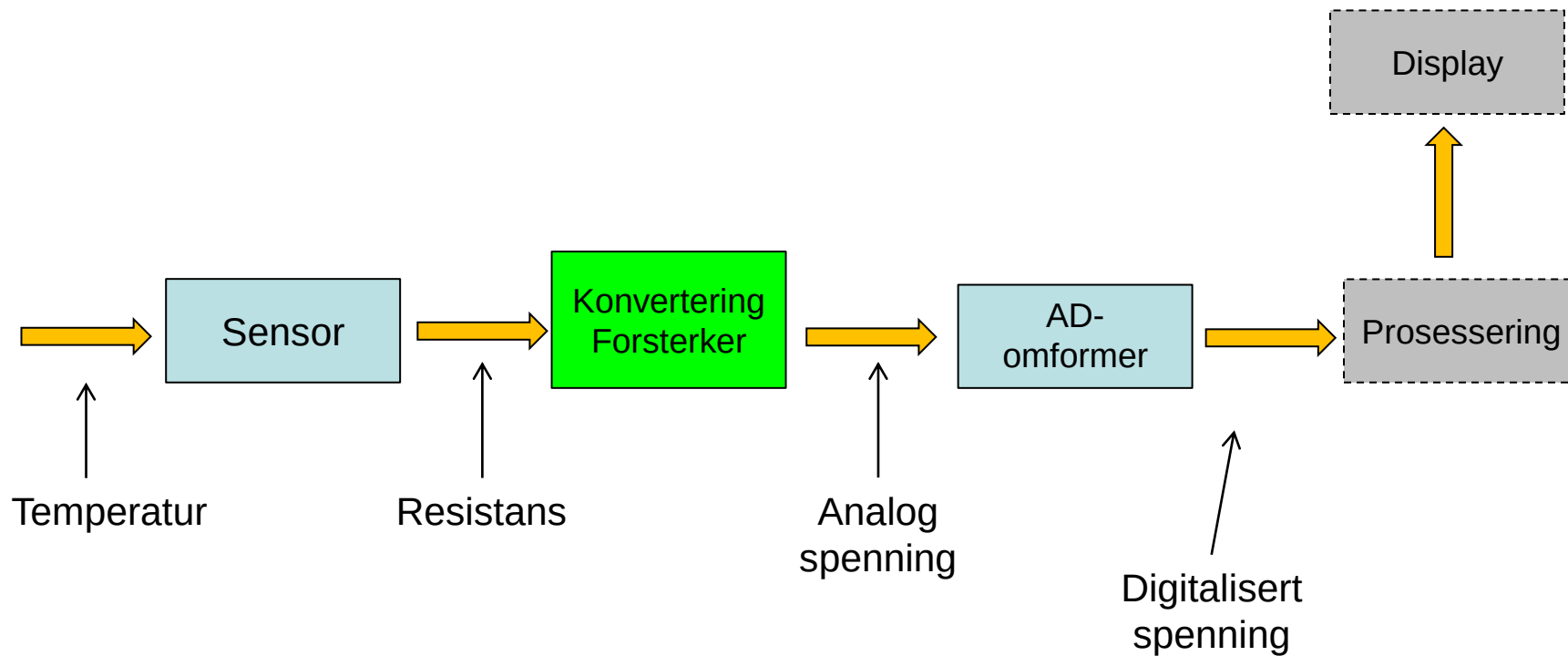
- Måleteknikk
- Ideelle operasjonsforsterkere
- Bruk av opamp'er
- Fysiske vs ideelle opamp'er

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

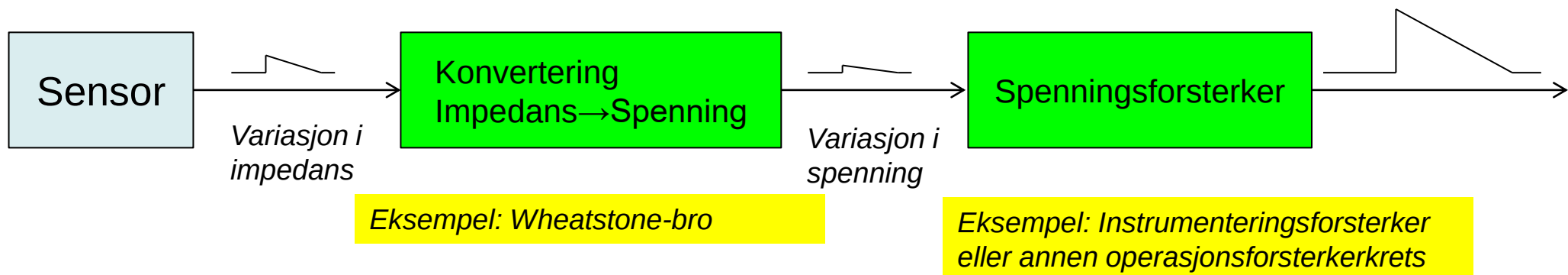


Måleteknikk (forts)



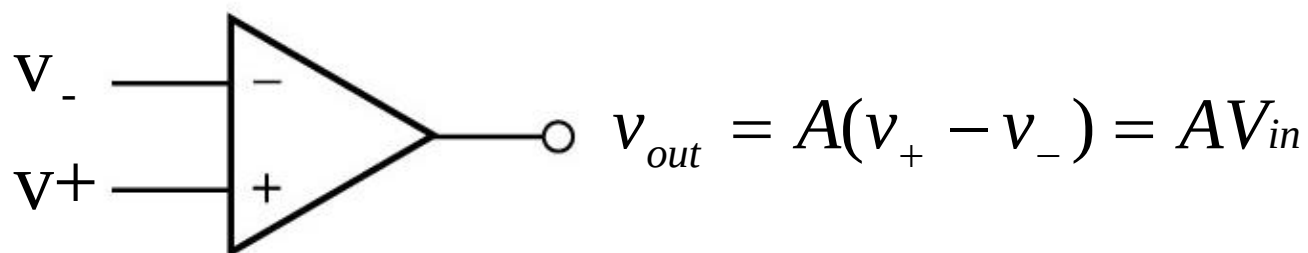
Måleteknikk (forts)

- En sensor måler en (endring i) en fysisk parameter som (endring i) resistans, kapasitans eller induktans
- Impedansen konverteres deretter til en spenning
- Spenningen må vanligvis forsterkes siden det er små variasjoner i som måles
- Støy og hurtige variasjoner må som regel filtreres bort



Spenningsforsterker: Opamp

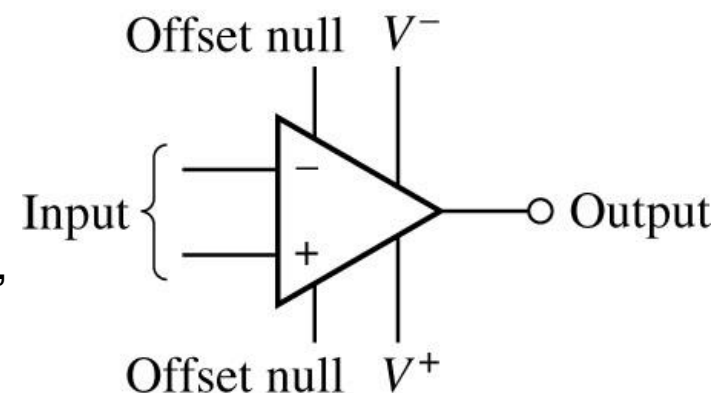
- Operasjonsforsterkeren (opamp) er mye brukt i elektronikk
- En opamp er en spenningsforsterker med to innganger og én utgang



- Inngangene kalles hhv *inverterende* (-) og *ikke-inverterende* (+)
- A er forsterkningen eller *Gain*
- Opamp'er er ferdig designet – vi trenger ikke forholde oss til hvordan den ser ut innvendig

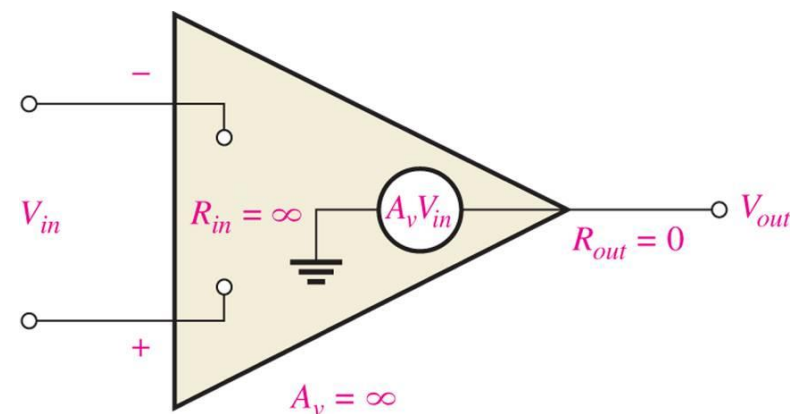
Enkel opamp-modell

- Opamp'en er en aktiv enhet som trenger ekstern spenningsforsyning og *kalibrering*
- Kalibrering brukes for å rette opp små avvik eller variasjoner som en enkelt opamp kan ha
- Vanligvis vises ikke terminalene for spenningsforsyning og kalibrering
- Opamp'en kan brukes til å lage mange andre typer kretser, bla differensielle forsterkere, instrumenteringsforsterkere, spenningsfølgere/bufre, summasjonsforsterkere, inverterende/ikke-inverterende forsterkere, aktive filtre, integrasjons/derivasjonskretser etc etc



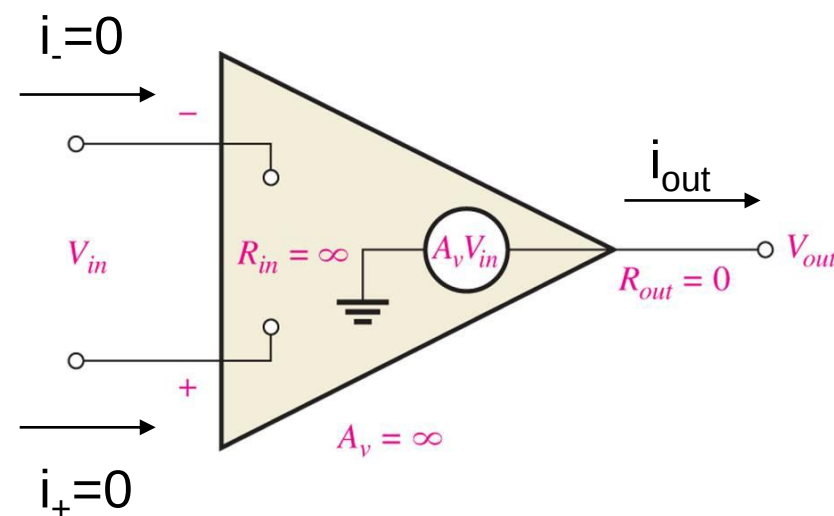
Ideell opamp (1)

- En *ideell* operasjonsforsterker har følgende egenskaper:
 - Inngangsmotstanden $R_i = \infty$
 - Utgangsmotstanden $R_o = 0$
 - Spenningsforsterkningen $A_v = \infty$
 - Båndbredden = ∞ , dvs alle frekvenser forsterkes like mye uten forvrenging
 - $V_{out}=0$ når $V_+=V_-$ uavhengig av størrelsesordenen til V_- (uendelig høy Common Mode Rejection Ratio)
 - Samme hvor raskt input endrer seg, vil output følge etter (uendelig høy slew rate)



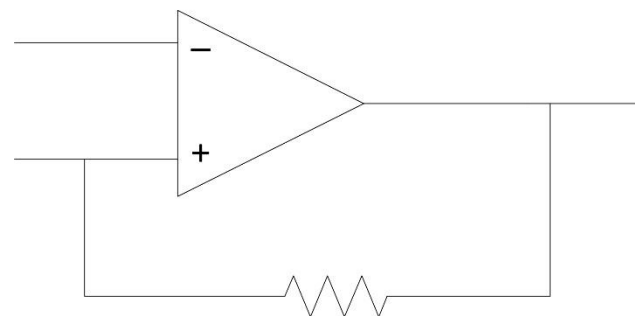
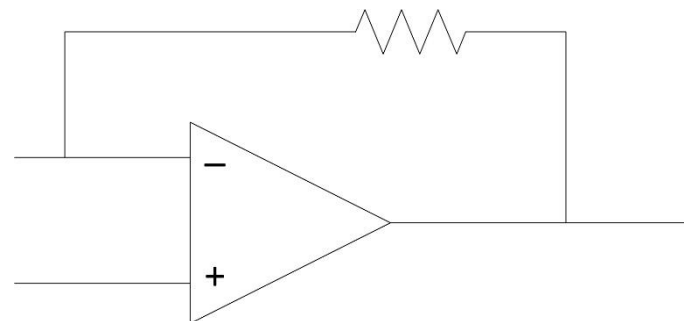
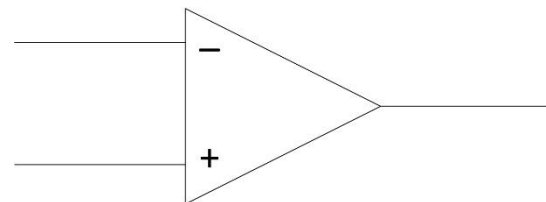
Ideell opamp (2)

- Av dette kan vi utlede at
 - Inngangsstrømmene $i_+ = 0$ og $i_- = 0$
 - Utgangsspenningen V_{out} varierer ikke med lastmotstanden R_L
 - I_{out} bestemmes kun av R_L og V_{out}



Open-loop og closed-loop konfigurasjon

- En opamp kan brukes i *open-loop* eller i *closed-loop*
 - **Closed-loop** betyr at utgangen forbindes med en av inngangene via en *tilbakekobling* (*feedback*)
 - **Open-loop** betyr at opamp'en ikke har tilbakekobling
- To typer tilbakekobling;
 - **Negativ**: utgangen kobles tilbake til –inngangen
 - **Positiv**: utgangen kobles tilbake til +inngangen
- Ofte skaleres tilbakekoblingssignalet ned via en spenningsdeler
- Spenningsforsterkningen uten tilbakekobling kalles «open loop gain» A_{ol}
- Spenningsforsterkningen med tilbakekobling kalles «closed loop gain» A_{cl}
- Negativ tilbakekobling reduserer forsterkningen, dvs $A_{ol} \gg A_{cl}$

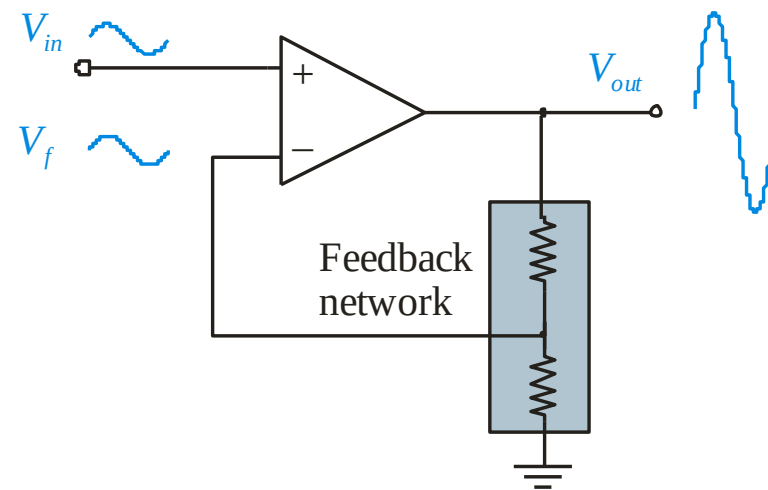


Input-kombinasjoner

- Siden opamp'en har to innganger, kan man koble input-signal(er) til på ulike måter:
 - 1) **Single-ended mode:** Bare én av inngangene kobles til et innsignal mens den andre kobles til en fast spenning (f.eks. jord)
 - 2) **Differential mode:** Begge inngangene kobles til hvert sitt inngangssignal
 - 3) **Common-mode:** Ett inngangssignal kobles til begge inngangene samtidig
- Alle input-kombinasjonene kan kombineres med OL og CL-konfigurasjon
 - Men ikke alle kombinasjoner er like mye brukt.

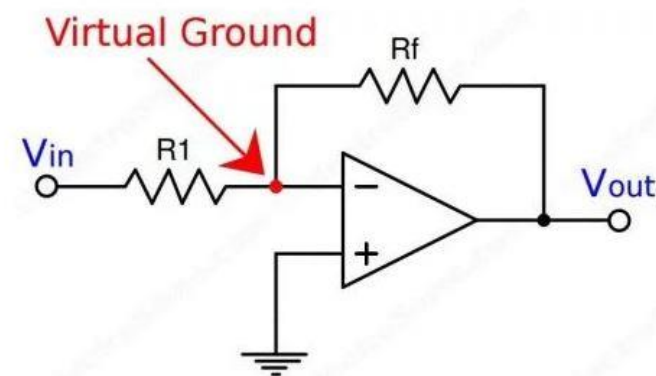
Negativ tilbakerekobling

- Uten tilbakerekobling (open-loop) vil små variasjoner på inngangen gi store variasjoner på utgangen fordi A_{ol} er svært høy
- Når utgangen kobles på den inverterende inngangen, blir utgangen trukket fra inngangssignalet (180° fasedreining)
- Negativ tilbakerekobling fører til at de to input-signalene er i fase, og kun forskjellen i amplitude mellom dem forsterkes
- Positiv tilbakerekobling benyttes sjelden fordi små avvik i forsterkeren kan gjøre kretsen ustabil og ikke-lineær
 - Men positiv tilbakerekobling kan benyttes i bla oscillatorer for å lage ac-signaler med fast frekvens



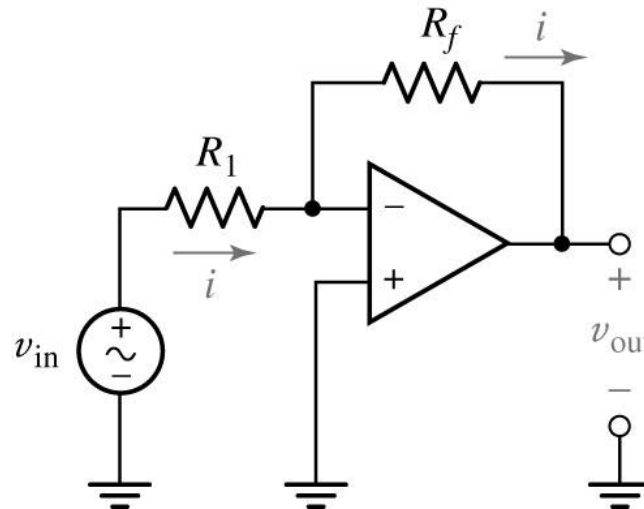
Virtuell jord

- For å analysere opamp-kretser med tilbakekobling er begrepet «virtuell jord» nyttig
- Hvis en node ligger på nesten samme spenning som jord (dvs 0 volt) UTEN å være koblet til jord, kan vi se på dette som «virtuell» jord
- NB: Det går INGEN strøm inn/ut av virtuell jord
 - Input-impedansen = $\infty \Leftrightarrow I_{in} = 0$
- Siden spenningsforsterkningen er gitt av $A = \frac{V_{out}}{V_{in}} \approx \infty$ og V_{out} ikke kan være uendelig, må $V_+ - V_-$ være veldig nær 0

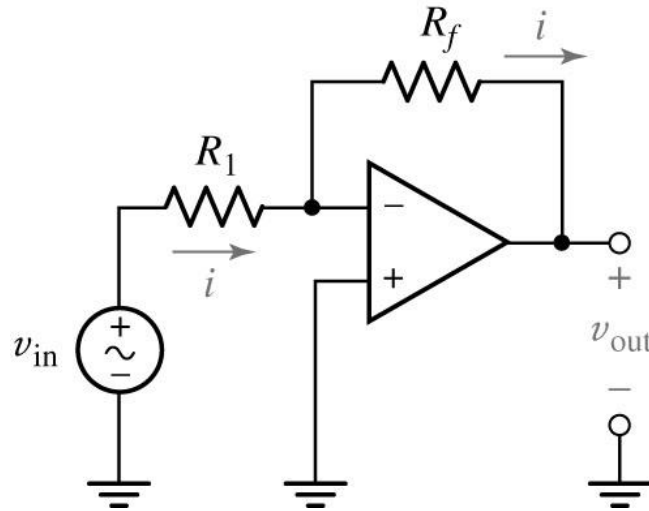


Opamp med negativ feedback

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



Inverterende forsterker (forts.)



- Ønsker å finne v_{out} som funksjon av v_{in}
- Kirchhoffs spenningslov (KVL) gir at

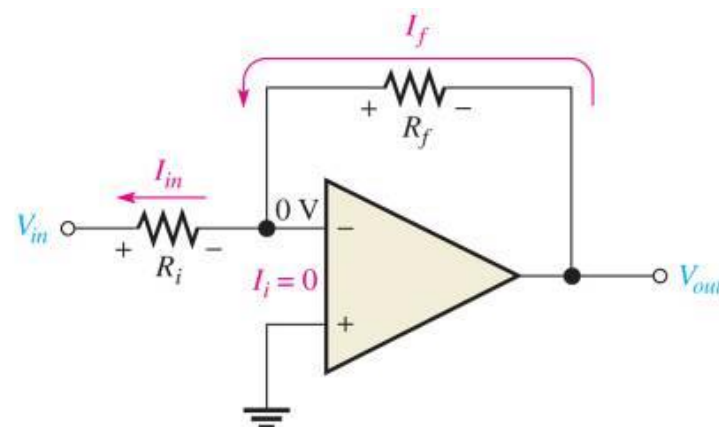
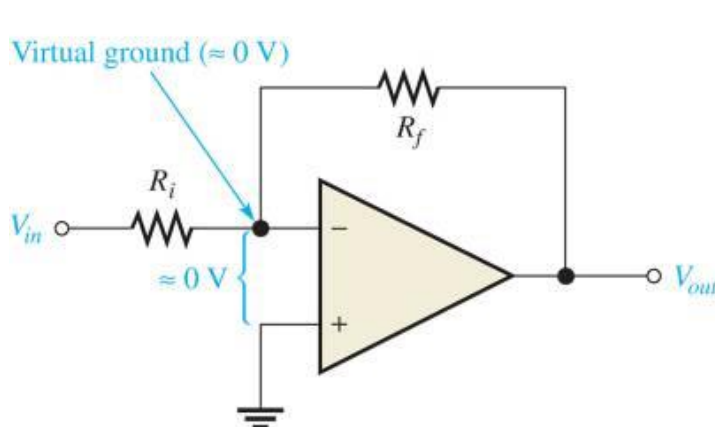
$$-v_{in} + R_1 i + R_f i + v_{out} = 0 \quad \Leftrightarrow \quad v_{out} = v_{in} - (R_1 + R_f) i$$

Inverterende forsterker (forts.)

- Ved å anta at V_- ligger på virtuell jord (V_+ er koblet til jord) får vi

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

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

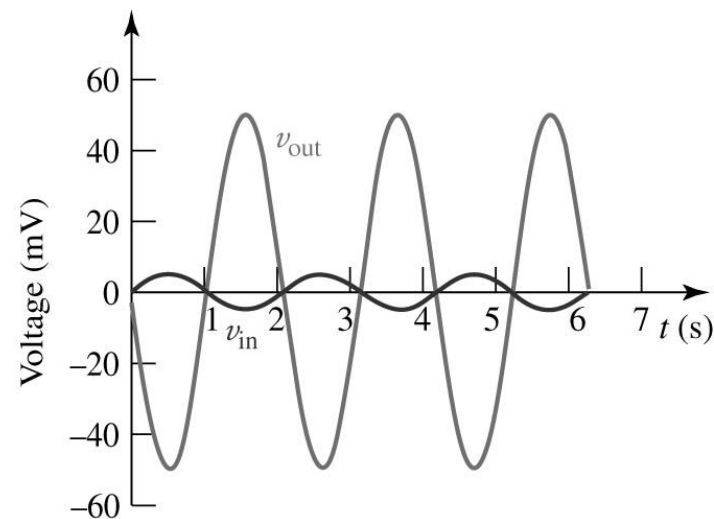


Inverterende forsterker (forts.)

- Forsterkningen $A_{cl(i)}$ er gitt av forholdet mellom R_f og R_i :

$$A_{cl(i)} = -\frac{R_f}{R_i}$$

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



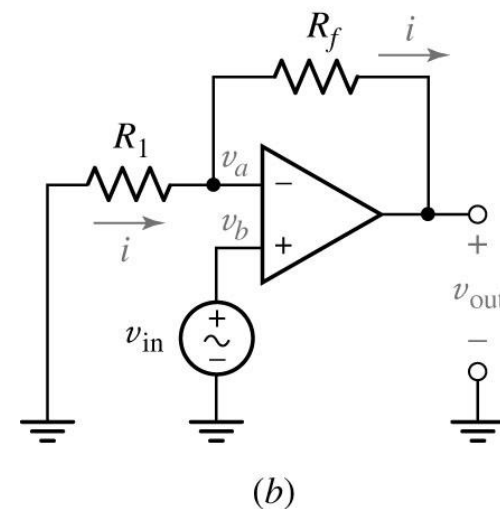
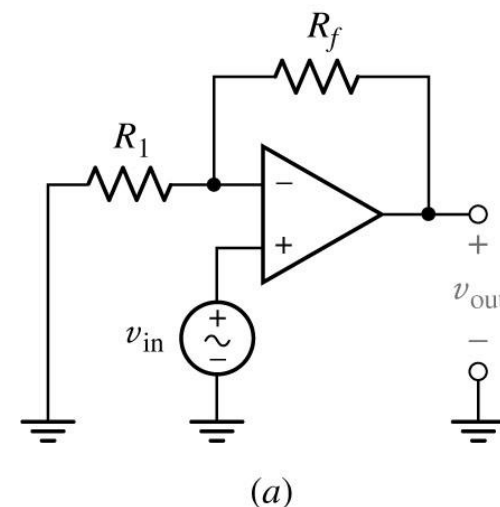
Ikke-inverterende forsterker

- Hvis man *ikke* ønsker invertert utgang, brukes en ikke-inverterende forsterker
- Vi kan nå ikke anta at V_{in} er koblet til virtuell jord, men antar fortsatt at $V_- \approx V_+$
- Bruker KCL for å finne v_{out} som funksjon av v_{in} :

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

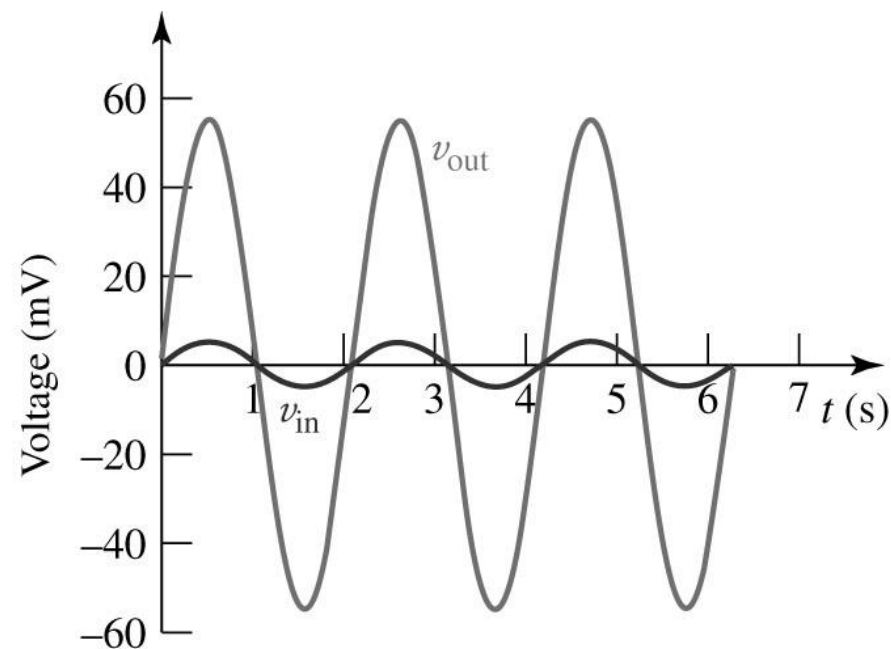
$$v_a = v_{in} \quad \Rightarrow \quad v_{out} = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right)v_{in}$$

$$A_{cl(ni)} = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$



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 $A\geq 1$



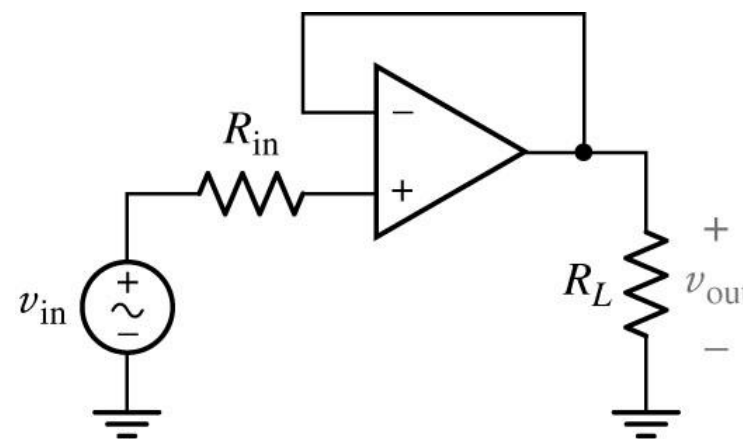
Spenningsfølger

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

$$V_{out} = A_{ol}(V_{in} - V_{out}) \Rightarrow \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{A_{ol}}{A_{ol} + 1} \approx 1$$

når A_{ol} er veldig stor

- Spenningsfølgere brukes bla for å isolere inngangen og utgangen fra hverandre elektrisk slik at de ikke påvirker hverandre

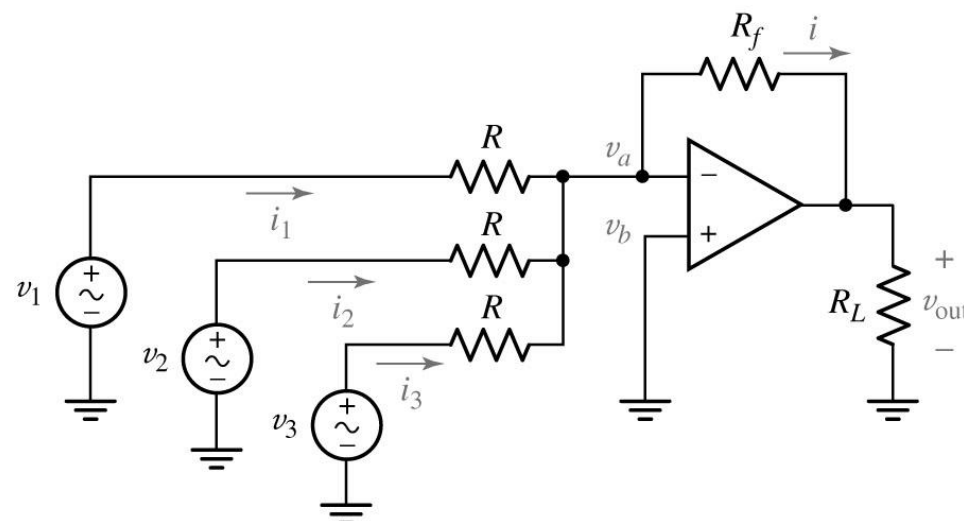


Summasjonsforsterker

- En operasjonsforsterker kan brukes til å legge sammen spenninger og eventuelt skalere dem
- Spenningene legges sammen ved å omdanne dem til strømmer som summeres vha KCL
- Output-spenningen er gitt av

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

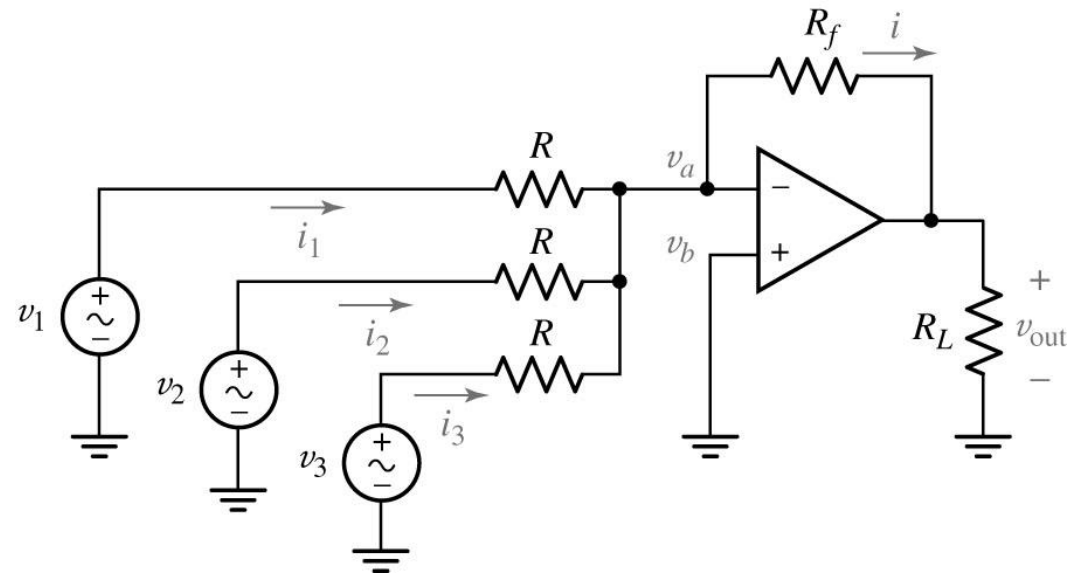
$$V_{out} = -\frac{R_f}{R}(V_1 + V_2 + V_3)$$



Gjennomsnittsberegning

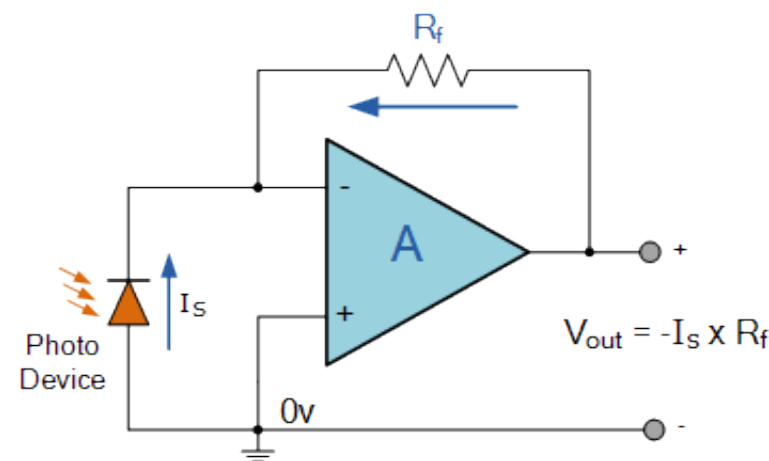
- Ved å velge R slik at $R = n \cdot R_f$ vil summeringskretsen beregne gjennomsnittsspenningen av alle input-spenningene

$$V_{out} = -\frac{R_f}{R}(V_1 + V_2 + V_3) \Rightarrow$$
$$V_{out} = -\frac{n}{R} = \frac{1}{n}(V_1 + V_2 + V_3)$$



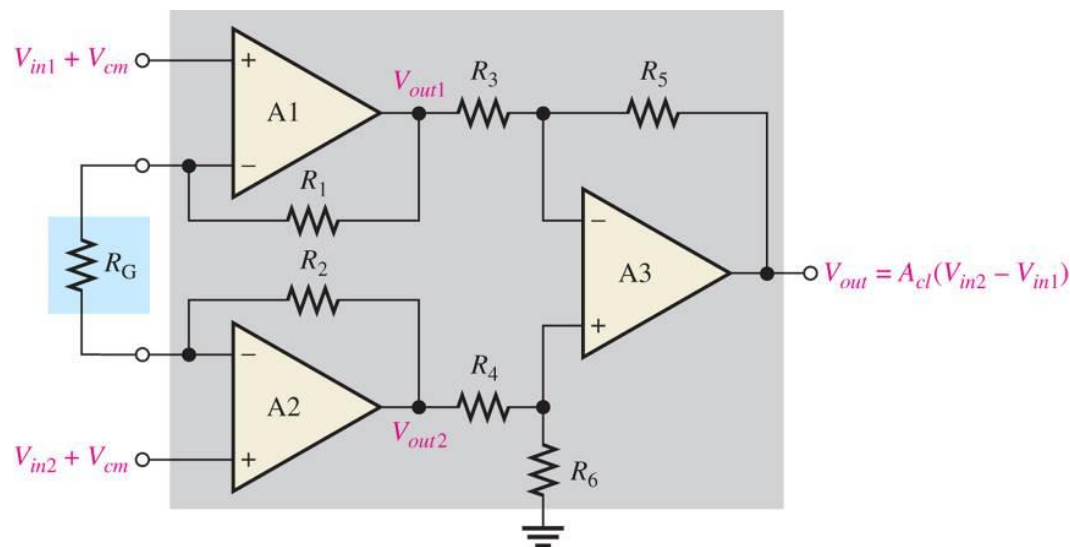
Transresistansforsterker

- En *transresistansforsterker* forsterker en strøm på inngangen og gir en spenning ut
- Eksempel på bruk kan være en fotodiode som gir en strøm proporsjonal med lyset som faller på den
- Spenningen på utgangen er gitt av $V_{out} = -I_s R_f$ der $I_{in} = I_s$
- Hvis inngangen er en spenning og utgangen er en strøm kalles forsterkeren *transkonduktansforsterker*



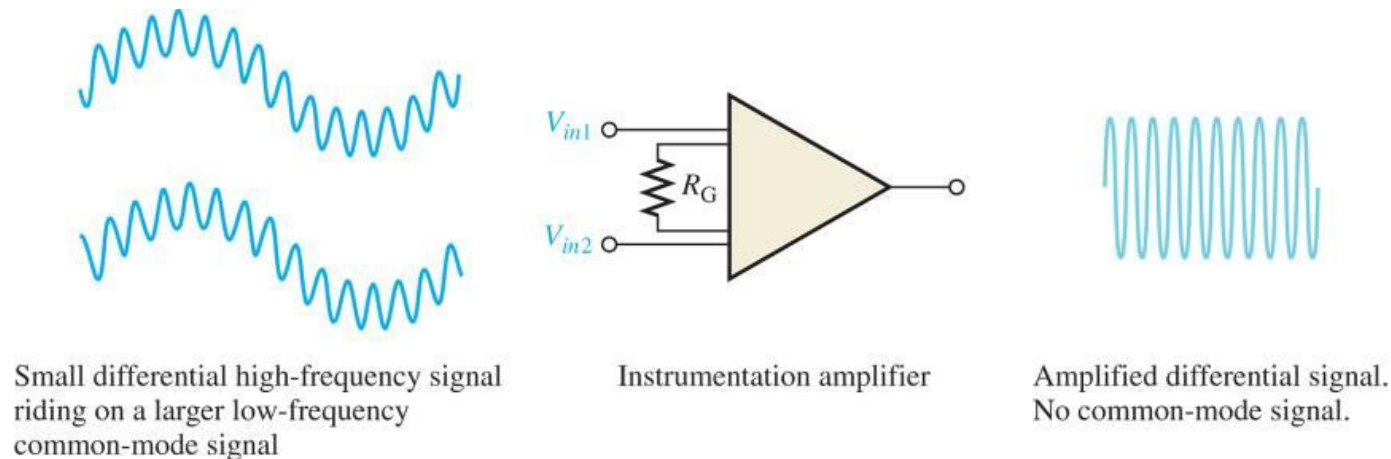
Instrumenteringsforsterker

- Brukes for å forsterke *forskjellen* mellom to inngangssignaler, dvs uavhengig av common-mode nivå (felles signal)
- Har høy inngangsimpedans (påvirker ikke kildene) og lav utgangsimpedans
- Brukes i kretser hvor det skal måles i omgivelser med mye støy
- Motstanden R_G regulerer forsterkningen

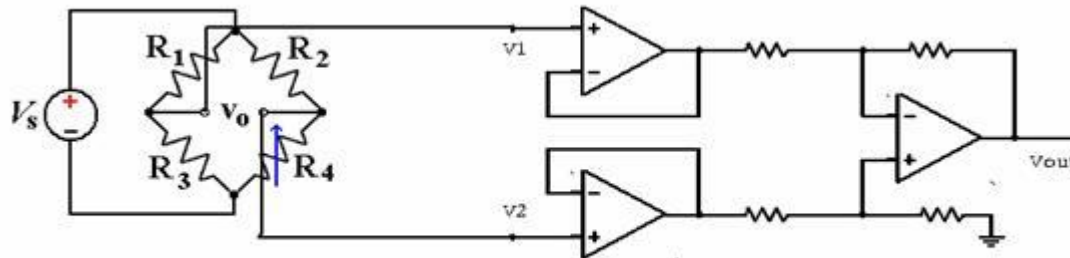


Instrumenteringsforsterker (forts)

- Forsterkning av common/differential mode signaler

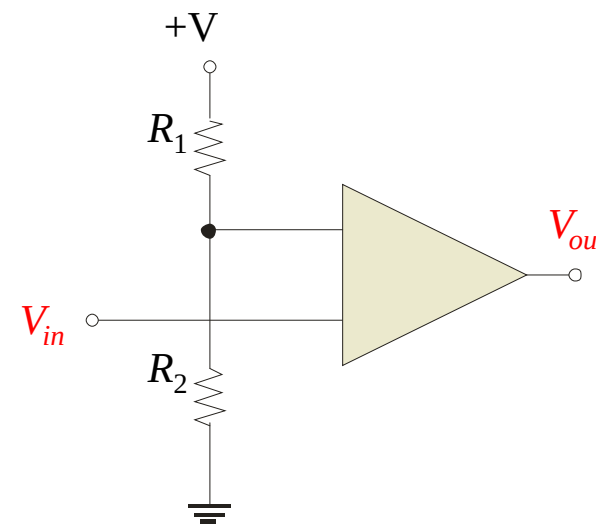


- Instrumenteringsforsterker med Wheatstonebro



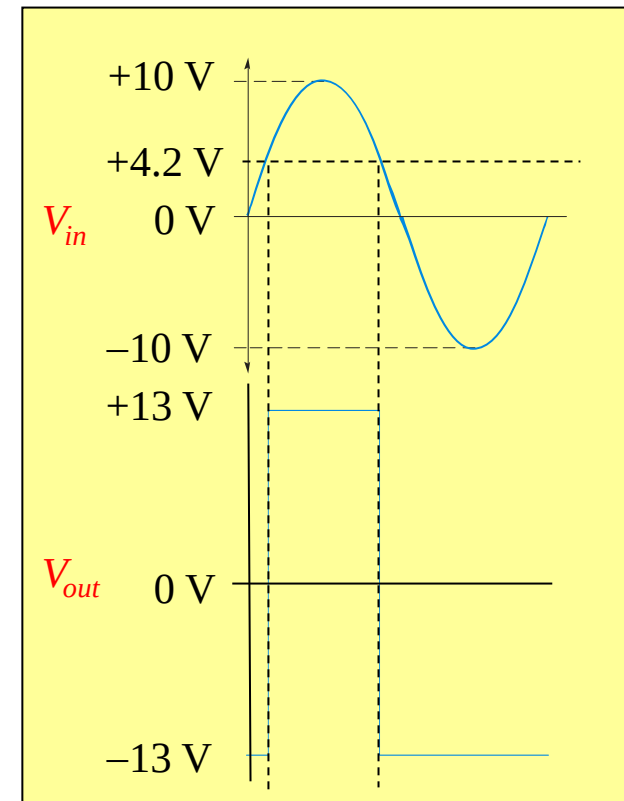
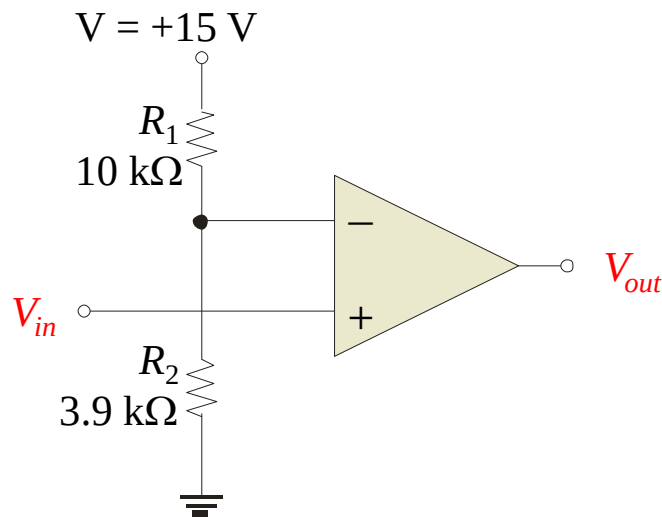
Komparatorer

- En komparator sammenligner spenningsnivåene til to input-signaler
- Komparatoren bruker ikke tilbakekobling
 - Vi vil at liten spenningsforskjell mellom V_+ og V_- skal gi stort utslag i V_{out}
- Utgangen har enten maksimal eller minimal spenning (dvs metning) avhengig av hvilket inngangssignal som er størst
- 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 $V_{\text{ref}} = 4.2\text{v}$



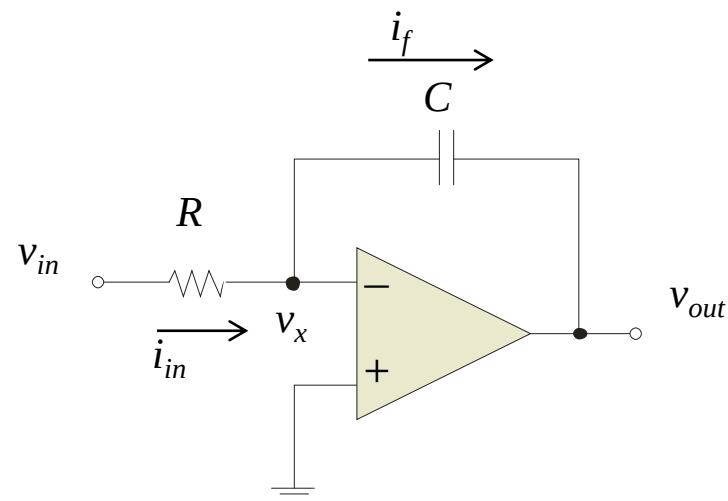
Integrator med opamp

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

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

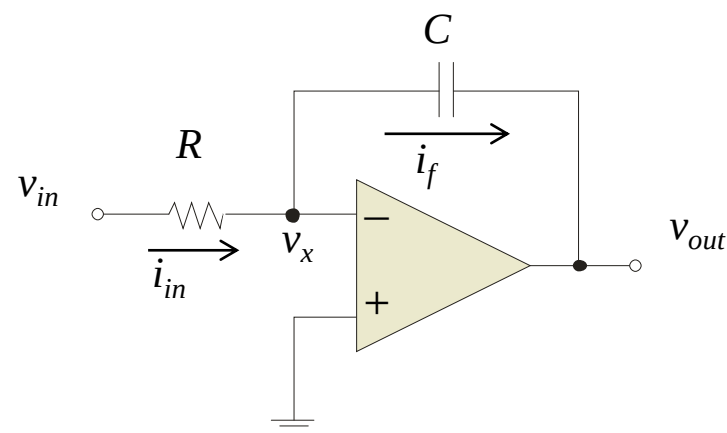
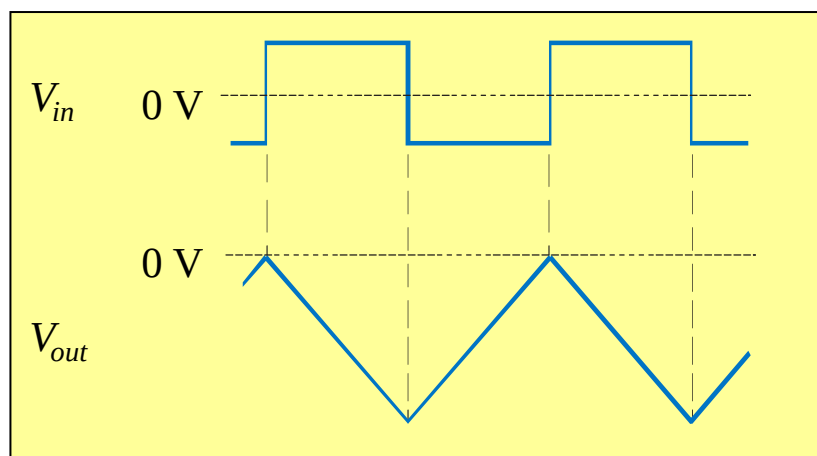
$$-\frac{dv_{out}}{dt} = \frac{1}{C} \frac{dQ}{dt} = \frac{1}{C} i_f$$

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



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)



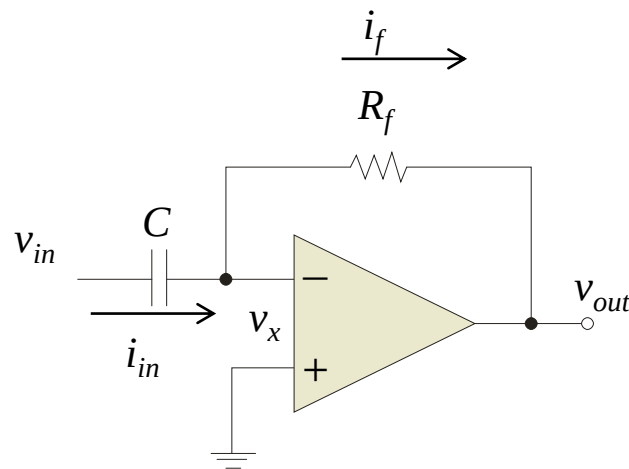
Differensiator med opamp

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

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

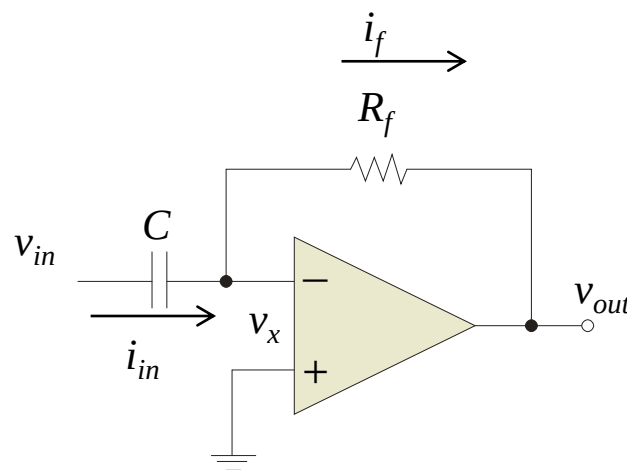
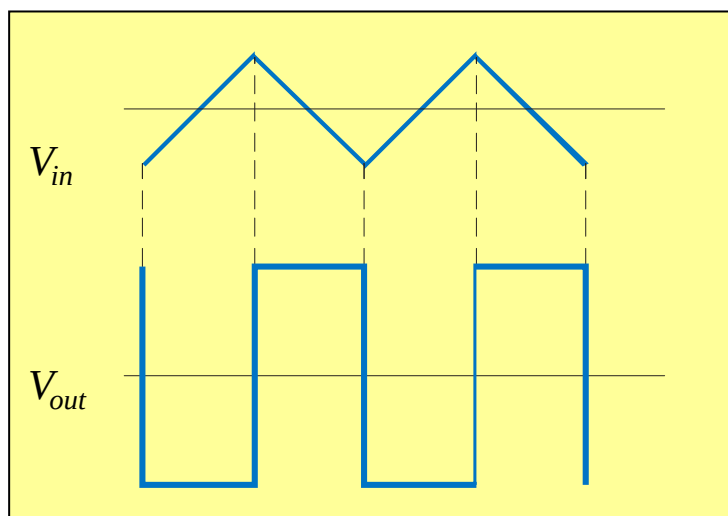
$$Q = C v_{in} \Rightarrow \frac{dQ}{dt} = C \frac{dv_{in}}{dt} = i_{in}$$

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



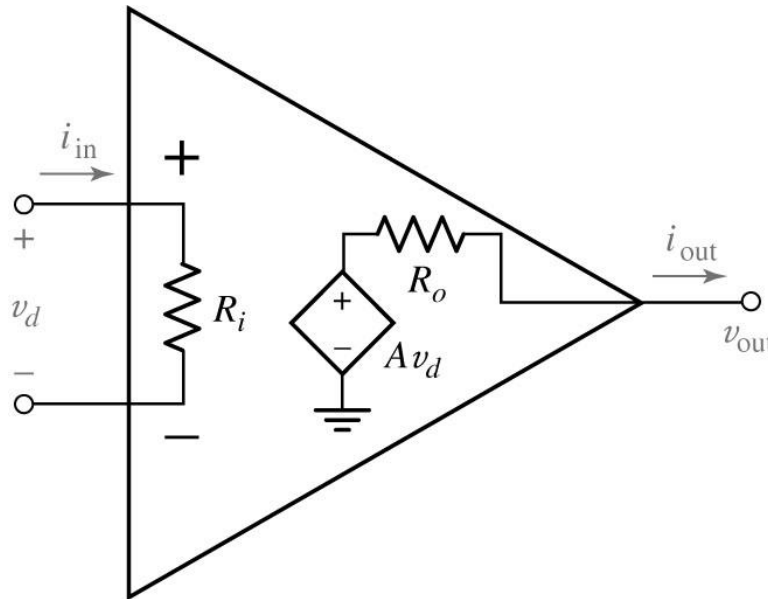
Differensiator med opamp (forts)

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



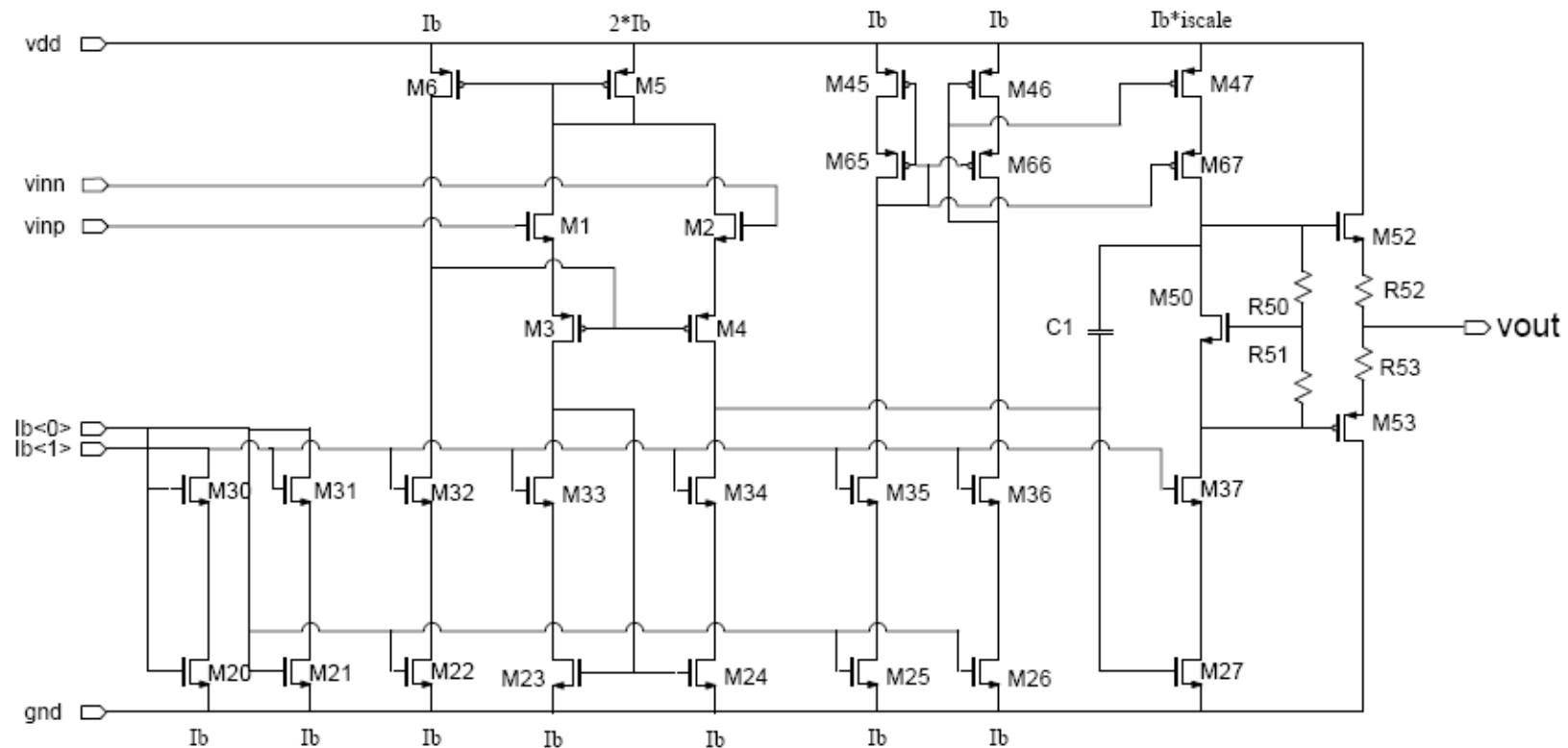
Fysiske opamp'er

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



Eksempel på implementasjon (741-type, CMOS)

A CMOS IMPLEMENTATION OF THE μ A741 OP AMP



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 $R_o = 0$
- Det viktig at utgangsmotstanden i forhold til lastmotstanden er så liten som mulig slik at det ikke blir spenningsfall som avhenger av utgangsstrømmen

Metning (saturation)

- . Metning betyr at økning av inngangsspenningen ikke lenger gir økning i utgangsspenningen
- . Utgangsspenningen fra en opamp kan ikke overstige forsyningspenningen (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

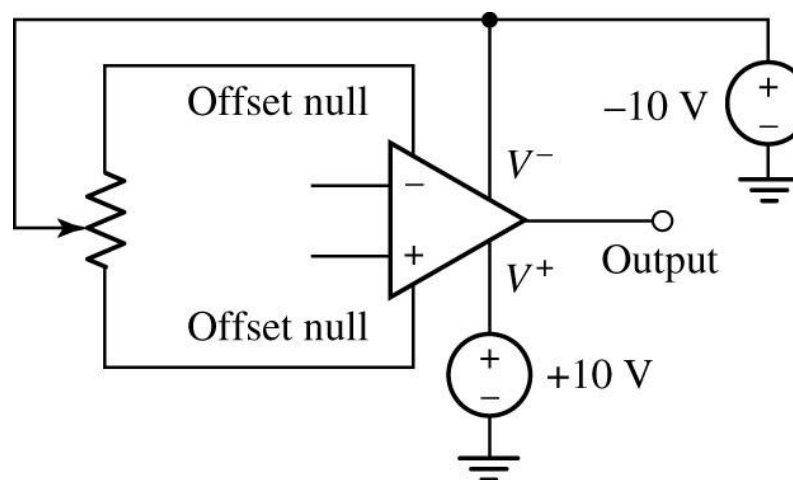
$$\left| V_{lin_{sat-}} \right| \neq \left| V_{lin_{sat+}} \right|$$

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

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

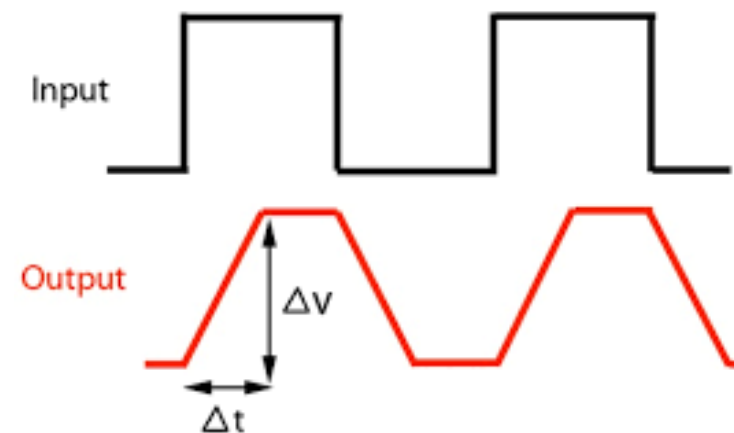
Input offset-spennning

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



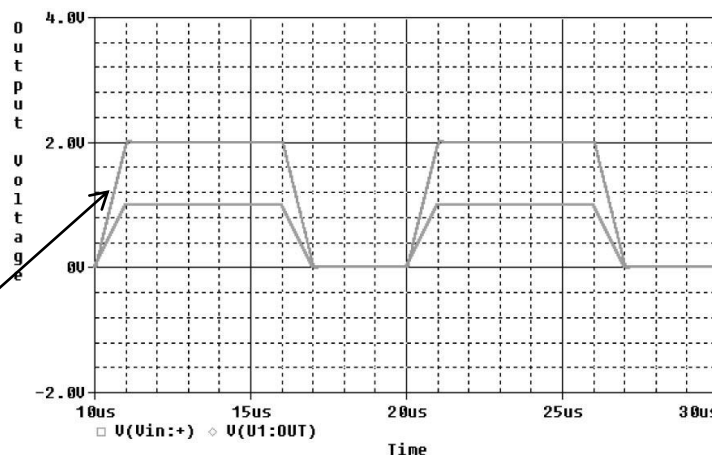
Slew rate

- 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



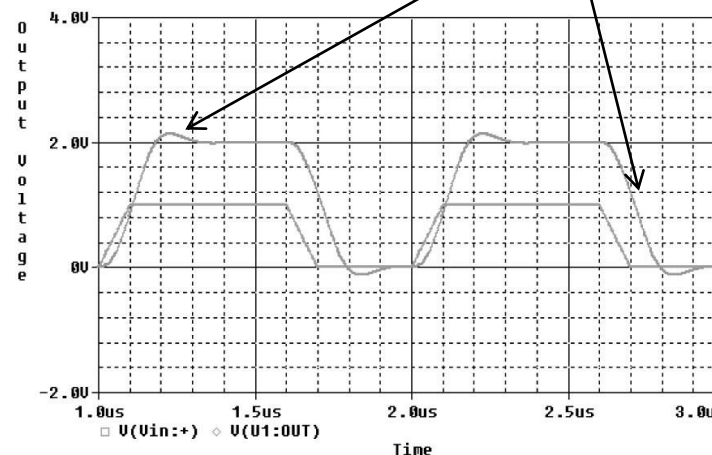
Slew rate (forts)

Utgangssignalet har samme form som inngangssignalet



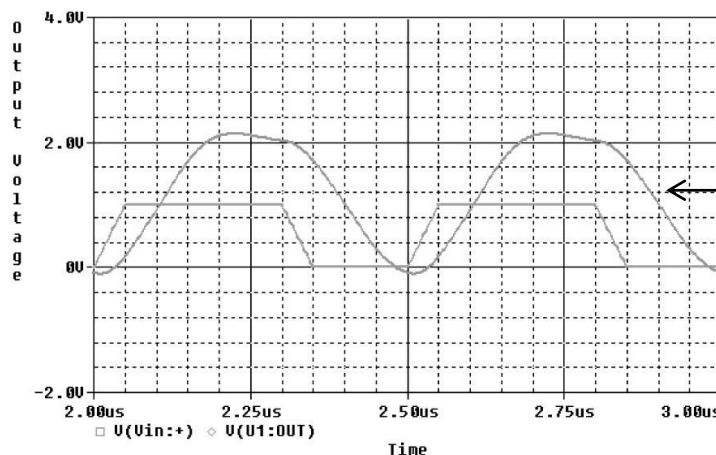
(a)

Formen til utgangssignalet begynner å avvike fra inngangssignalet



(b)

NB: Ulik tidsskala på de horisontale aksene



Utgangssignalet er sterkt forvrengt

(c)