

# Forelesning nr.8 analog elektronikk IN 1080 Mekatronikk

Operasjonsforsterkere

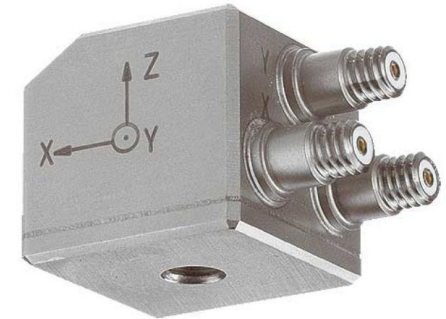
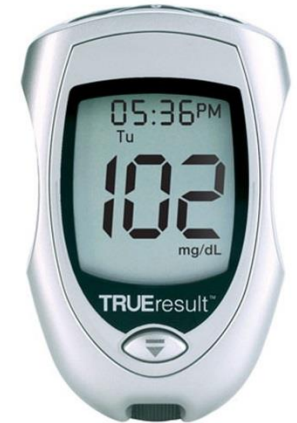


# Dagens temaer

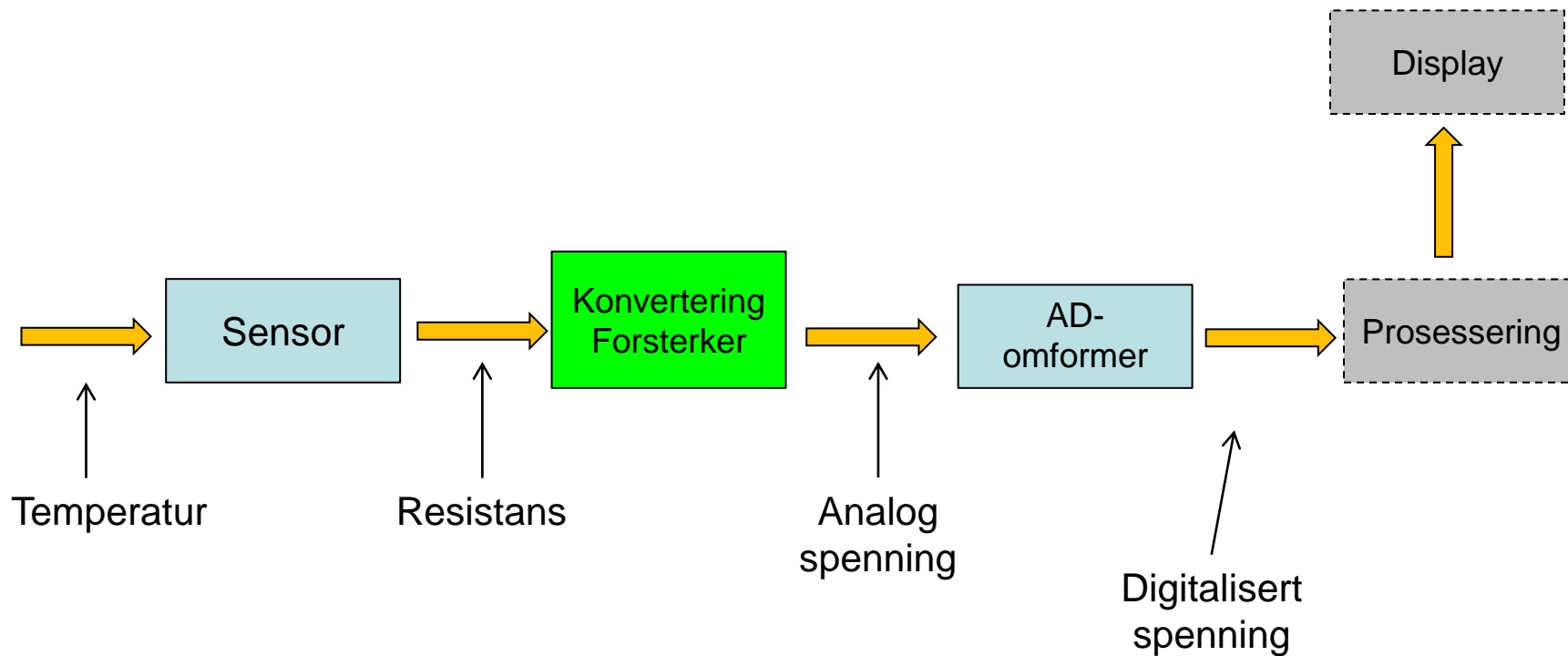
- Måleteknikk
- Ideelle operasjonsforsterkere
- Bruk av opamp'er
- Fysiske vs ideelle opamp'er

# 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

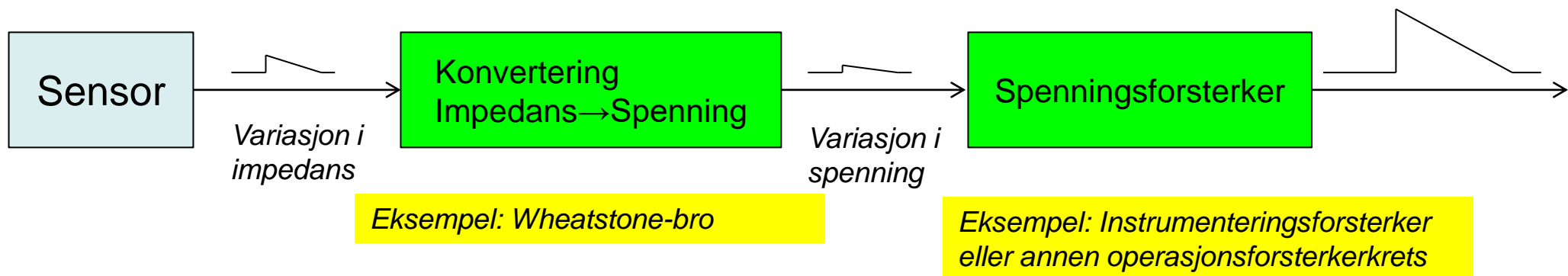


## Måleteknikk (forts)



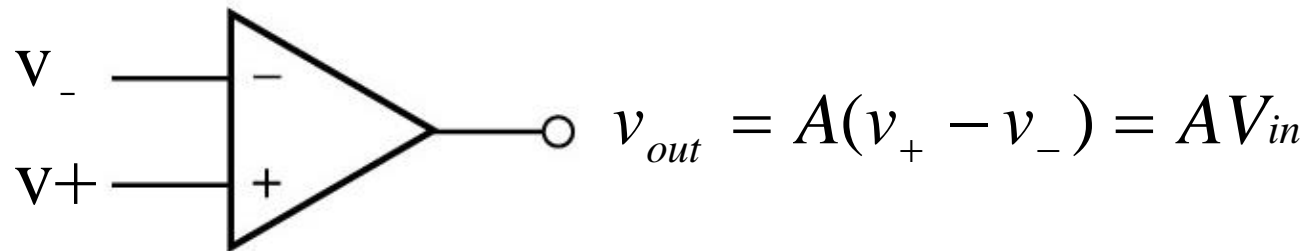
## Måleteknikk (forts)

- 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

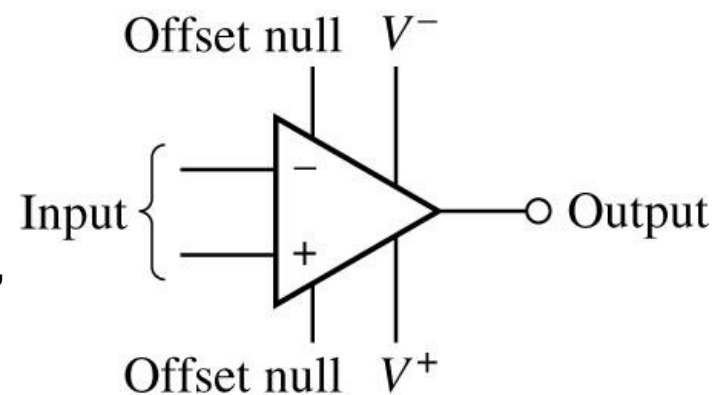
- Operasjonsforsterkeren (opamp) er mye brukt i elektronikk
- En opamp er en spenningsforsterker med to innganger og én utgang



- 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

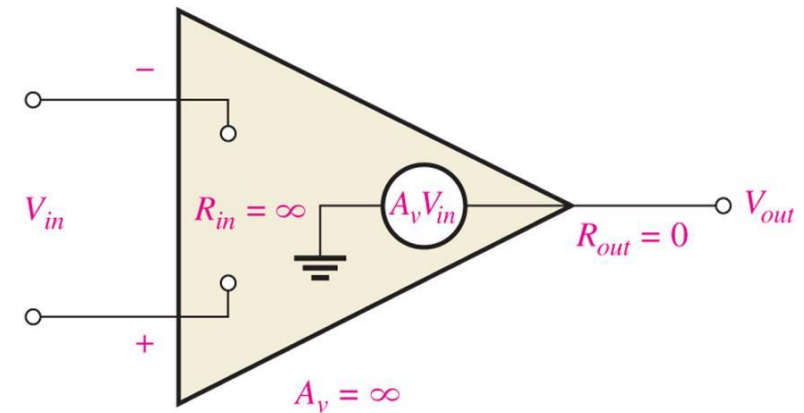
## Enkel opamp-modell

- 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)

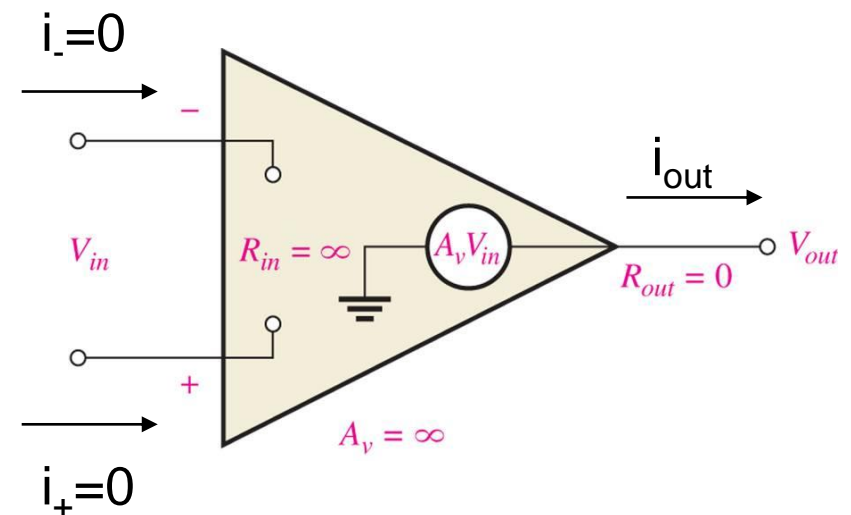
- En *ideell* operasjonsforsterker har følgende egenskaper:
  - Inngangsmotstanden  $R_i = \infty$
  - Utgangsmotstanden  $R_o = 0$
  - Spenningsforsterkningen  $A_v = \infty$
  - Båndbredden =  $\infty$ , dvs alle frekvenser forsterkes like mye uten forvrenging
  - $V_{out} = 0$  når  $V_+ = V_-$  uavhengig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





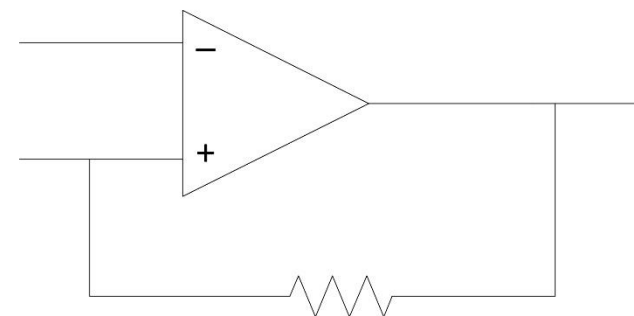
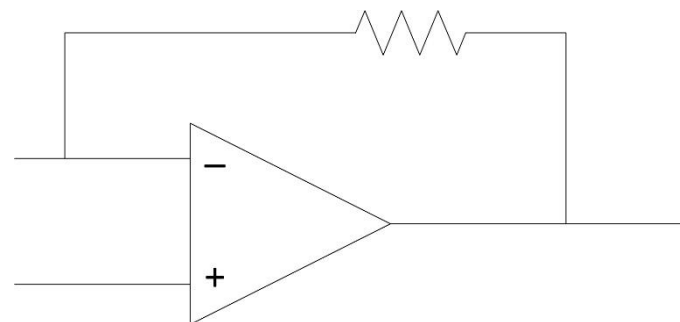
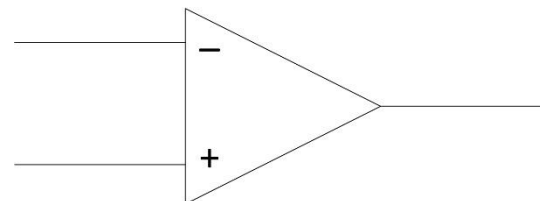
## Ideell opamp (2)

- 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  $A_{ol} \gg A_{cl}$

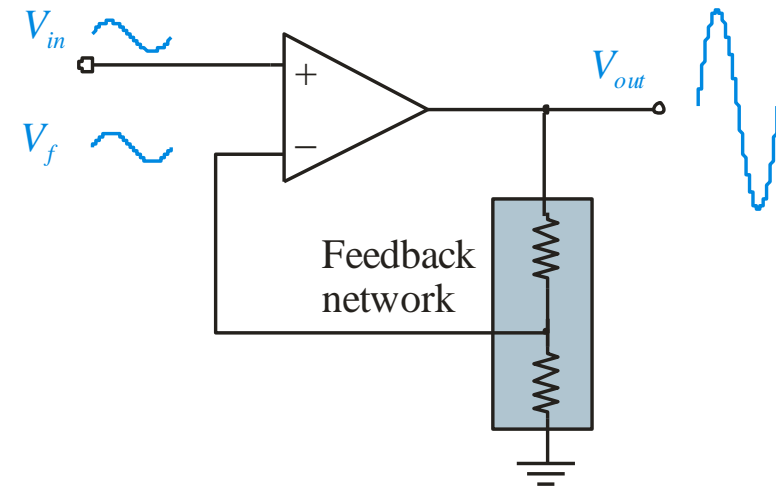


# Input-kombinasjoner

- 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.

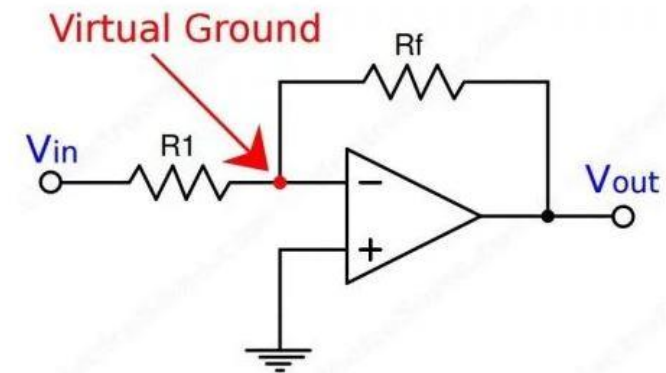
# Negativ tilbakekobling

- Uten tilbakekobling (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
- Negativ tilbakekobling fører til at de to input-signalene er i fase, og kun forskjellen i amplitude mellom dem forsterkes
- Positiv tilbakekobling benyttes sjelden fordi små avvik i forsterkeren kan gjøre kretsen ustabil og ikke-lineær
  - Men positiv tilbakekobling kan benyttes i bla oscillatorer for å lage ac-signaler med fast frekvens



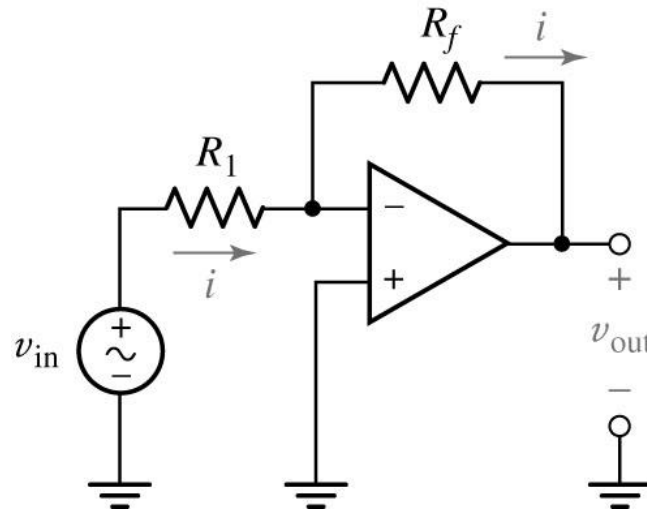
## Virtuell jord

- 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

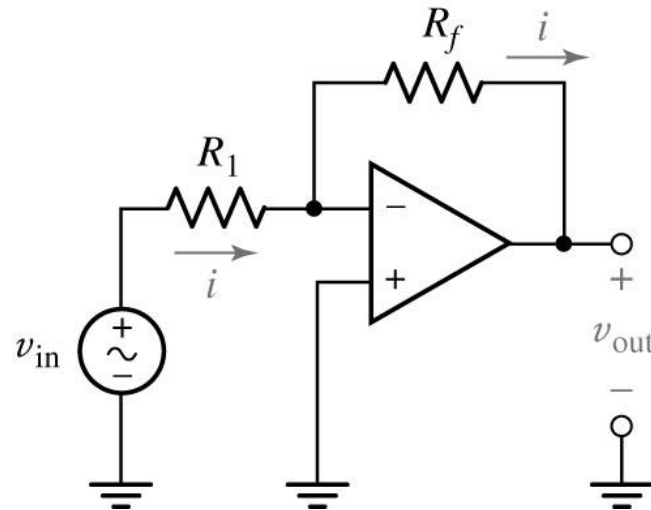


# Opamp med negativ feedback

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



## Inverterende forsterker (forts.)



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

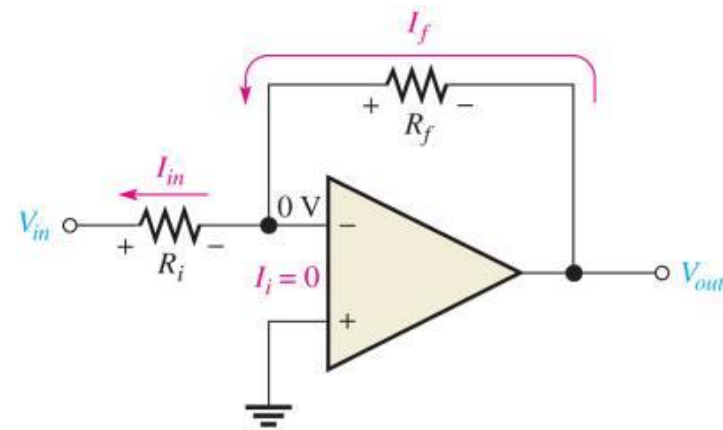
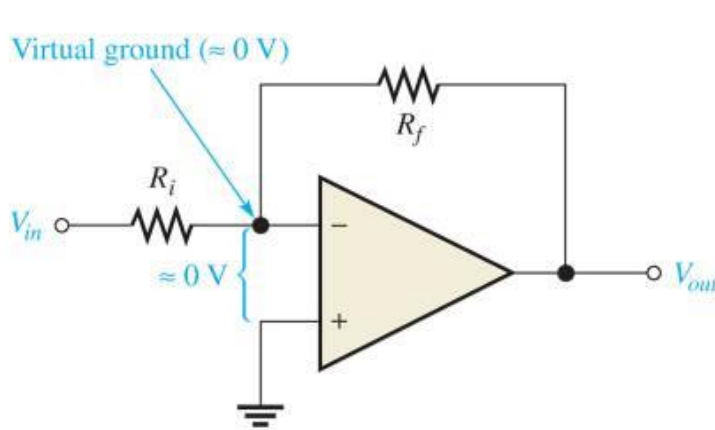
$$-v_{in} + R_1 i + R_f i + v_{out} = 0 \quad \Leftrightarrow \quad v_{out} = v_{in} - (R_1 + R_f) i$$

## 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:  $v_{out} = -\frac{R_f}{R_i} v_{in}$



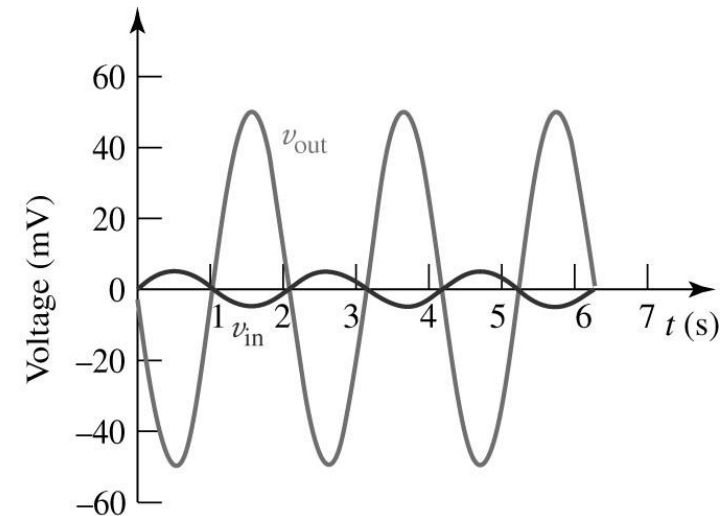


## Inverterende forsterker (forts.)

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



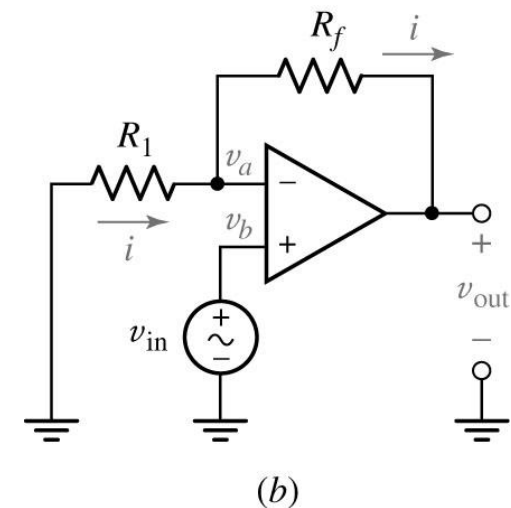
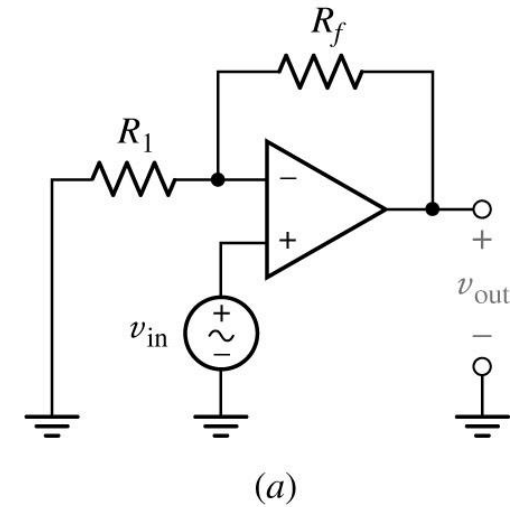
## Ikke-inverterende forsterker

- 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  $v_{in}$ :

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

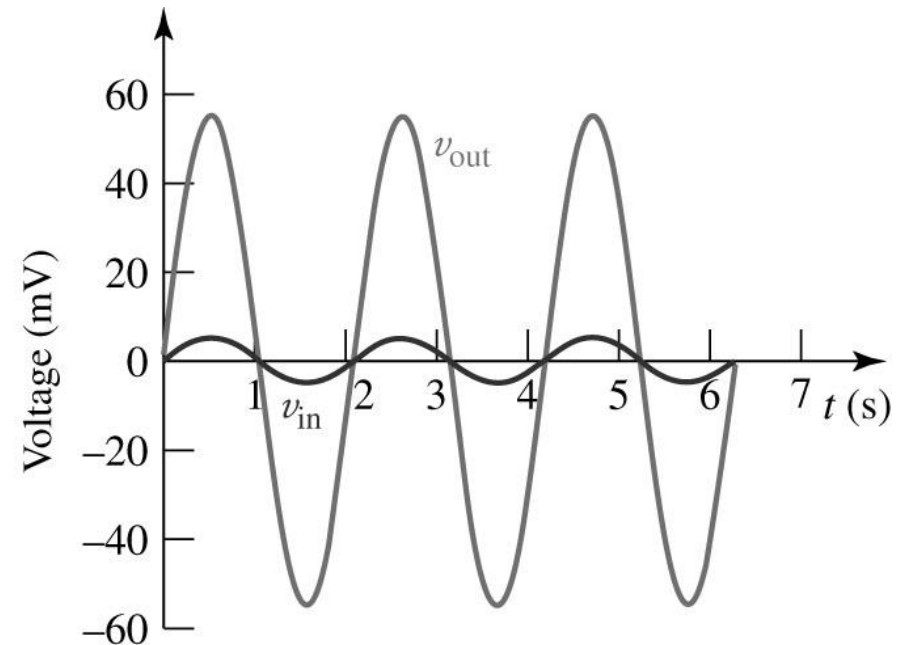
$$v_a = v_{in} \quad \Rightarrow \quad v_{out} = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right)v_{in}$$

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



## 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  $A \geq 1$



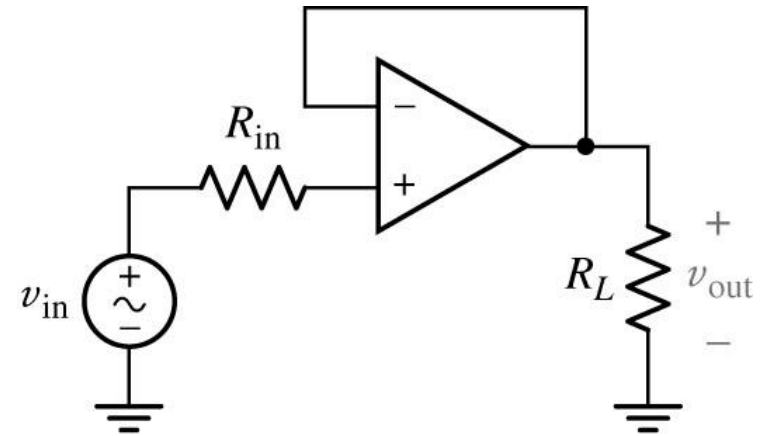
# Spenningsfølger

- 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

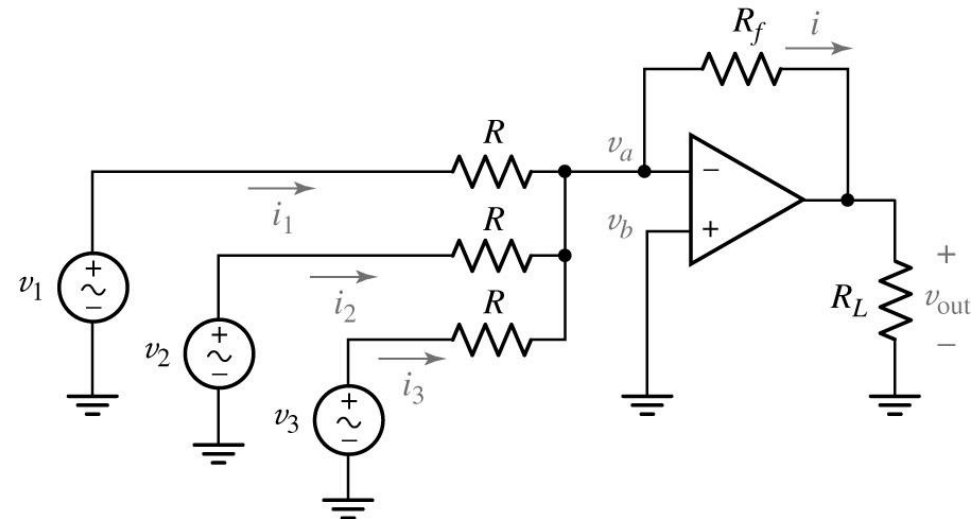


# Summasjonsforsterker

- 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

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

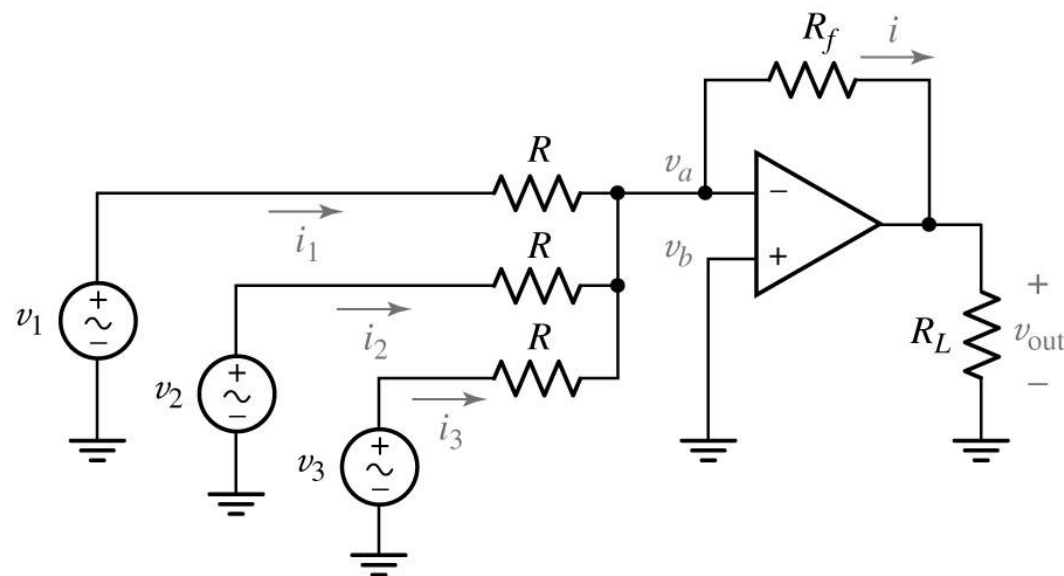
$$V_{out} = -\frac{R_f}{R}(V_1 + V_2 + V_3)$$



# Gjennomsnittsberegning

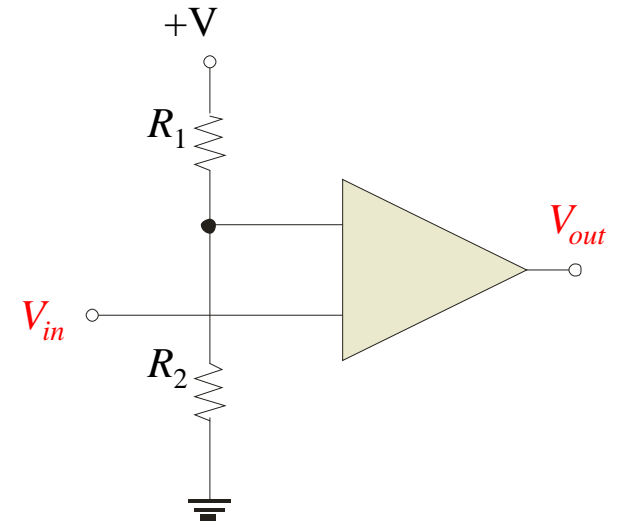
- Ved å velge  $R$  slik at  $R=n \cdot R_f$  vil summeringskretsen beregne gjennomsnittsspenningen av alle input-spenningene

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



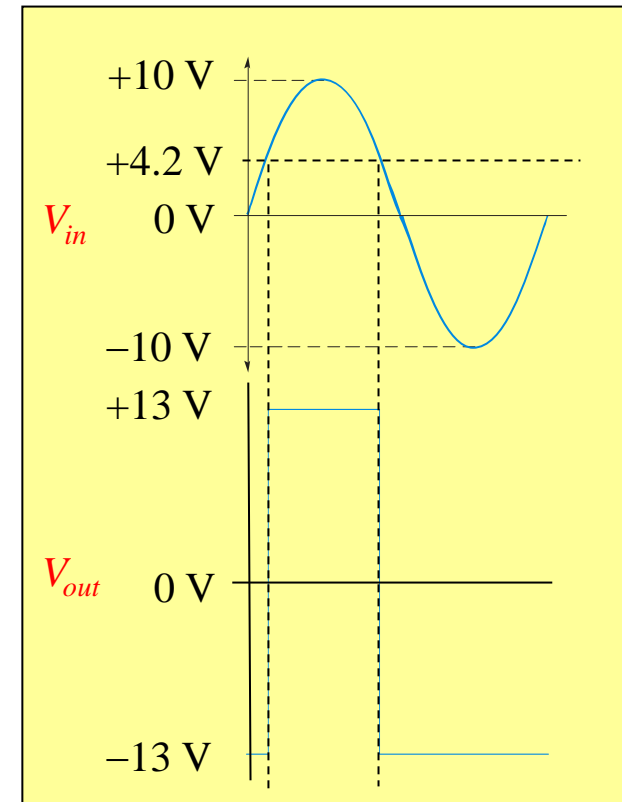
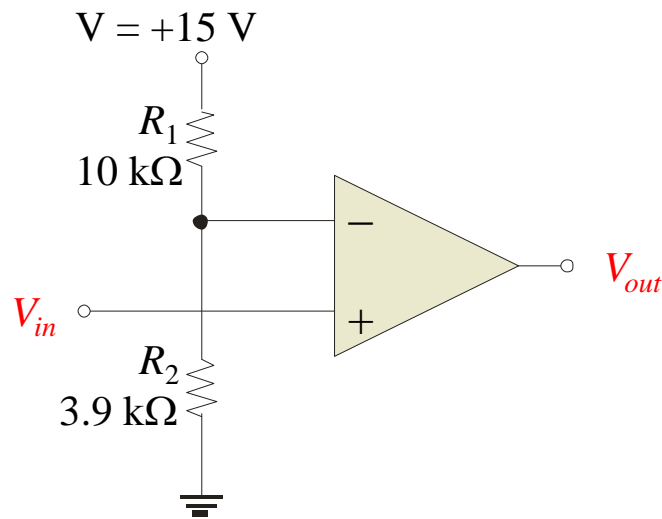
# Komparatorer

- 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)

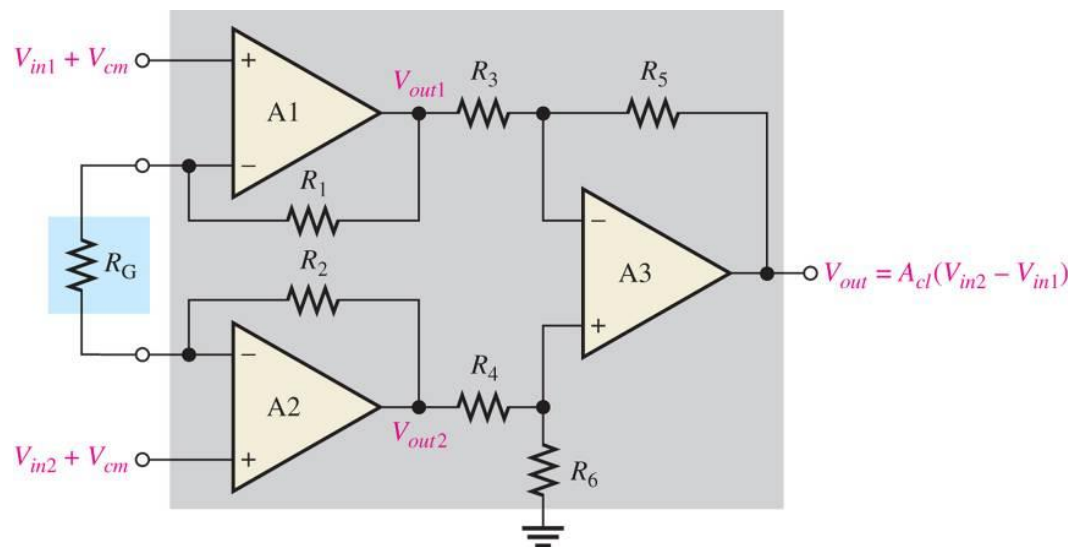
- Eksempel på komparator; maks output-spenning er 13v, og  $V_{\text{ref}} = 4.2\text{v}$





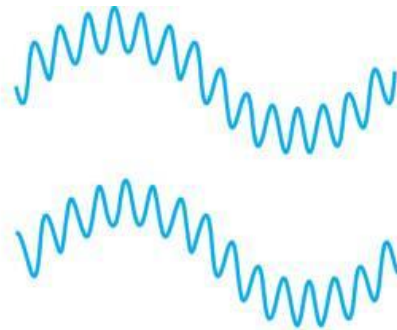
# Instrumenteringsforsterker

- 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

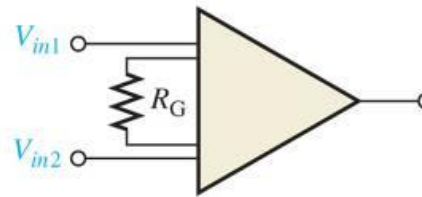


## Instrumenteringsforsterker (forts)

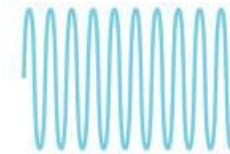
- Forsterkning av commom/differential mode signaler



Small differential high-frequency signal riding on a larger low-frequency common-mode signal

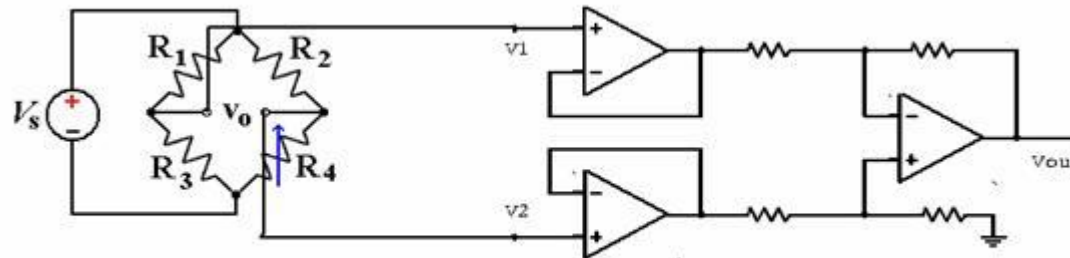


Instrumentation amplifier



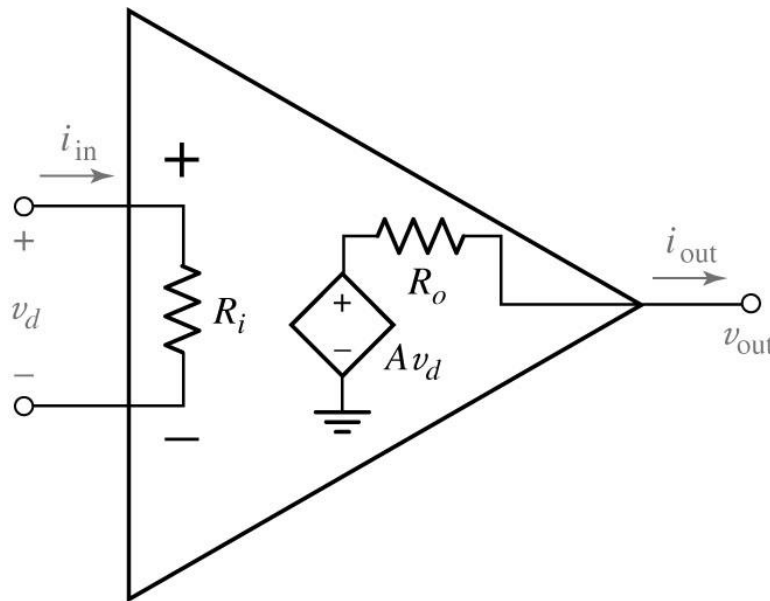
Amplified differential signal.  
No common-mode signal.

- Instrumenteringsforsterker med Wheatstonebro



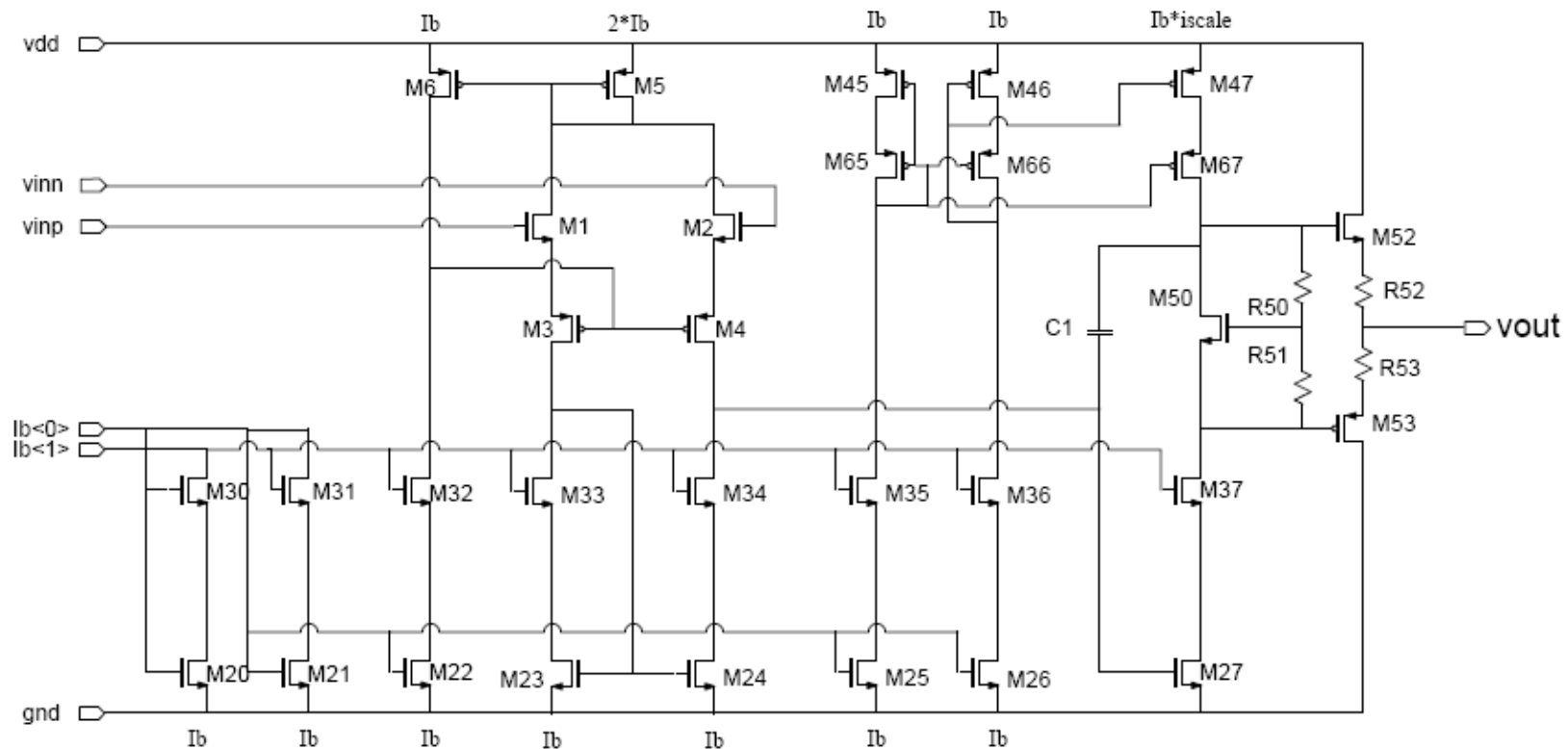
## Fysiske opamp'er

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



# Eksempel på implementasjon (741-type, CMOS)

**A CMOS IMPLEMENTATION OF THE  $\mu$ A741 OP AMP**



## Fysiske 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
$R_i = \infty$	$R_i \sim M\text{Ohm}$
$R_o = 0$	$R_o < 2-3 \text{ Ohm}$
$A = \infty$	$A \sim 10^5$

## Fysiske 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

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

- Hvis  $A$  er svært stor, vil derfor  $v_d$  bli svært liten, siden  $v_{out}$  er begrenset oppad til forsyningsspenningen

## Fysiske 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

## Fysiske opamp'er: Metning (saturation)

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



## Fysiske opamp'ere: 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

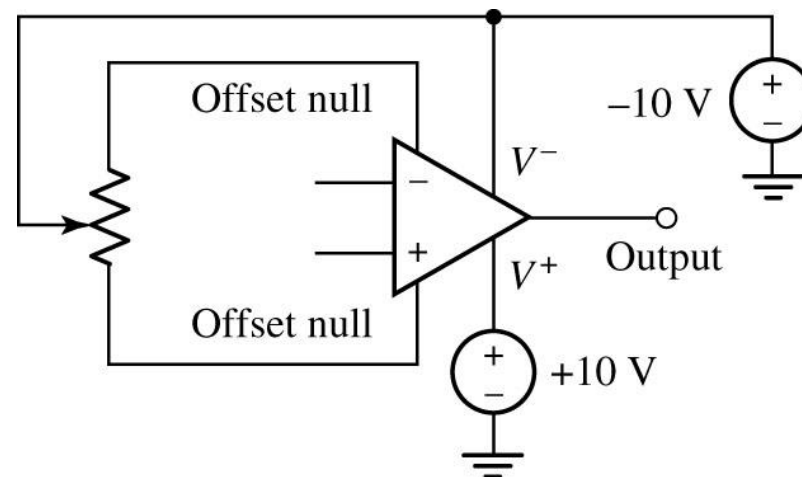
$$\left| V_{lin_{sat-}} \right| \neq \left| V_{lin_{sat+}} \right|$$

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

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

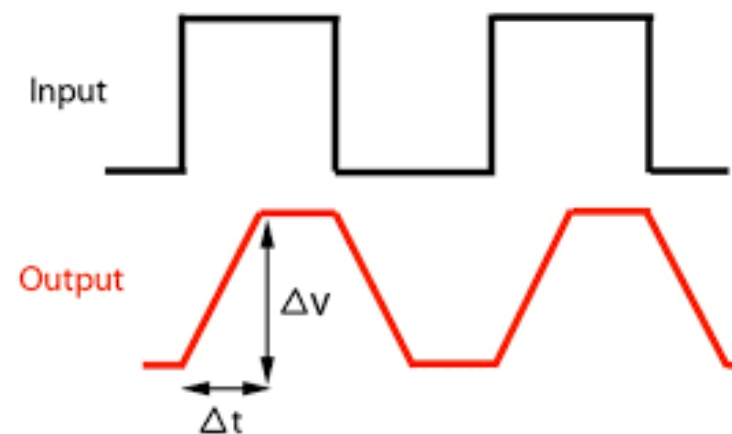
## Fysiske opamp'er: Input offset-spenning

- 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 offset-spenning
- Fysiske opamp'er er utstyrt med to ekstra tilkoblinger slik at offset-spenningen kan justeres til 0



## Fysiske opamp'er: Slew rate

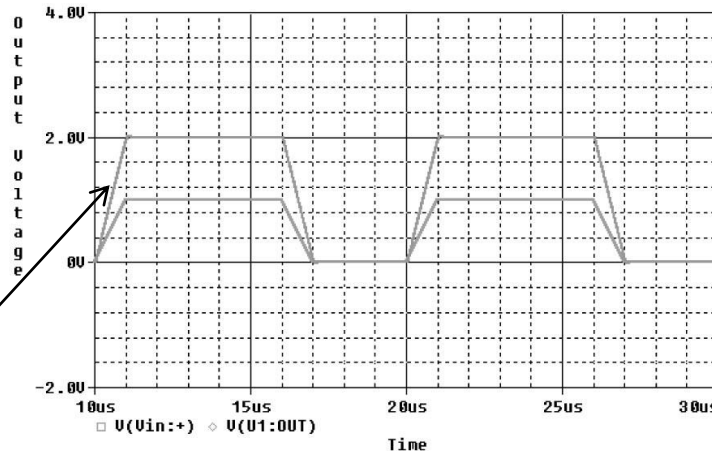
- Slew rate er et mål på hvor *raskt* utgangssignalet klarer å endre seg når inngangssignalet endrer seg
- Slew rate måles i volt per sekund på utgangen
- Ulike opamp'er har ulike slew rates
- Opamp'er som har høy maksimal output-spenning vil typisk ha lav slew-rate
- Slew-rate bestemmer opamp'ens båndbredde,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



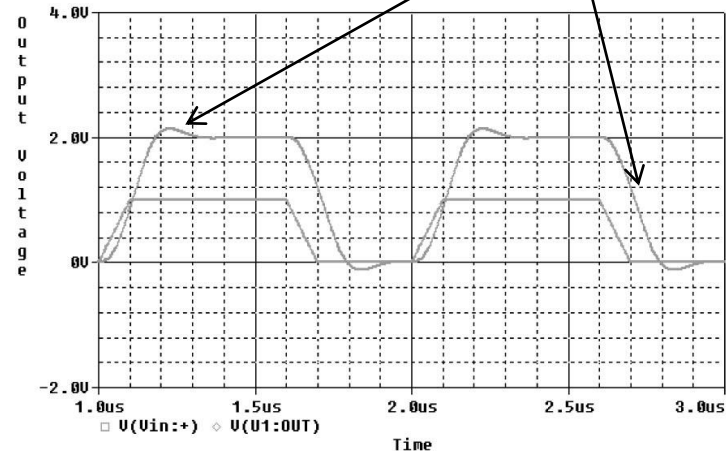
# Fysiske opamp'er: Slew rate (forts)

Formen til utgangssignalet begynner å avvike fra inngangssignalet

Utgangssignalet har samme form som inngangssignalet

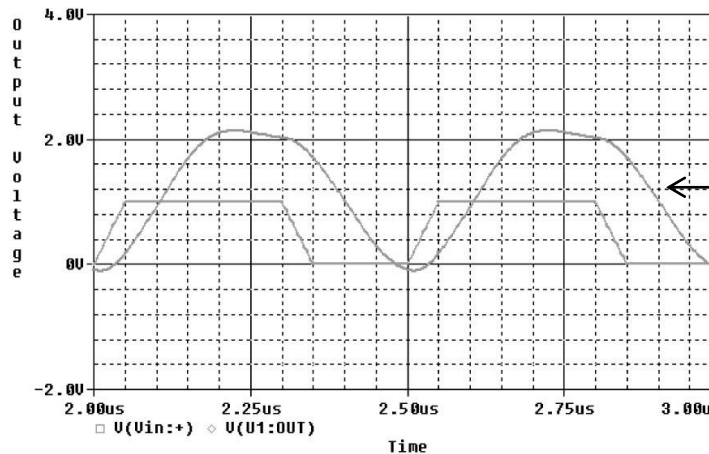


(a)



(b)

NB: Ulik tidsskala på de horisontale aksene



Utgangssignalet er sterkt forvrengt

(c)