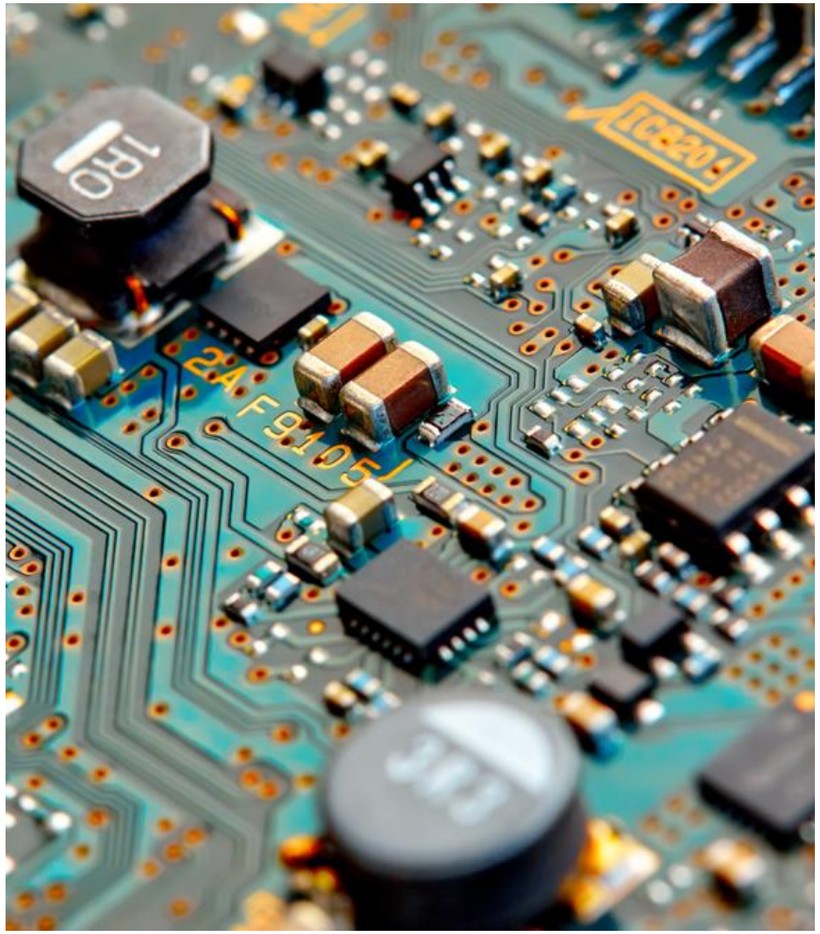
Institutt for informatikk

IN 1080
Mekatronikk

Del 1: Analog elektronikk

Forelesning 7



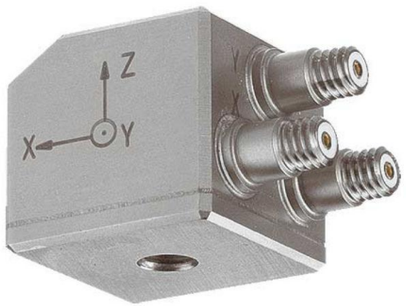
UNIVERSITETET
I OSLO

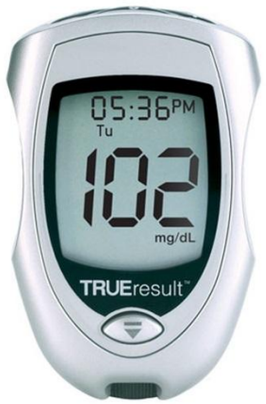
Om dagens forelesning

- Temaer i denne forelesningen er
  - Litt om måleteknikk
  - Operasjonsforsterkere
  - Tilbakekobling
  - Virtuell jord
  - Inverterende og ikke-inverterende spenningsforsterker
  - Spenningsfølger
  - Summasjonsforsterker
  - Komparator
  - Ideelle vs fysiske operasjonsforsterkere

Måleteknikk

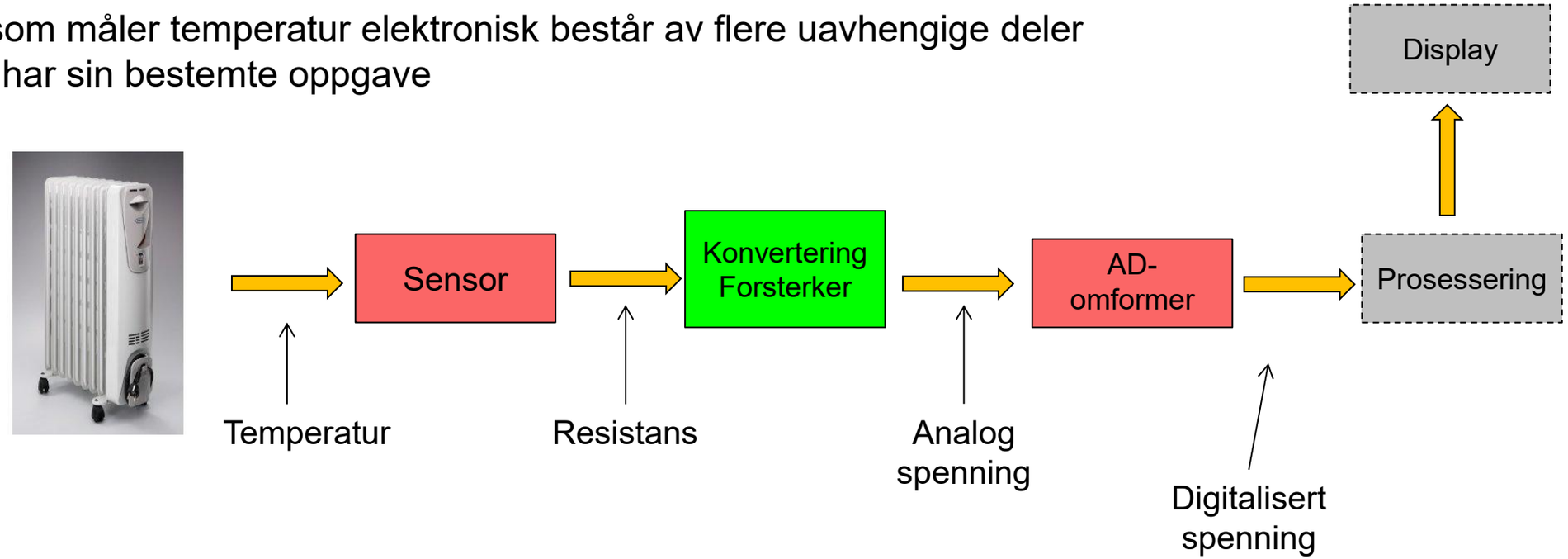
- Ofte trenger vi å måle fysiske parametere, f.eks:
  - Temperatur, trykk og mekanisk strekk (termometer, vekt, væske- og gasstrykk….)
  - Lengde, akselerasjon og hastighet (kollisjonsputer, GPS, smart phones)
  - Miljøanvendelser (Gasskonsentrasjoner, fuktighet)
  - Medisinske anvendelser (blodtrykk, oksygenmetning, blodsukker….)
- I måleteknikk «oversettes» et fysisk fenomen eller størrelse til en elektrisk størrelse som kan måles:
  - Strøm og spenning
  - Impedans (resistans, konduktans og induktans)
- De elektriske størrelsene må kunne måles hurtig og med høy presisjon





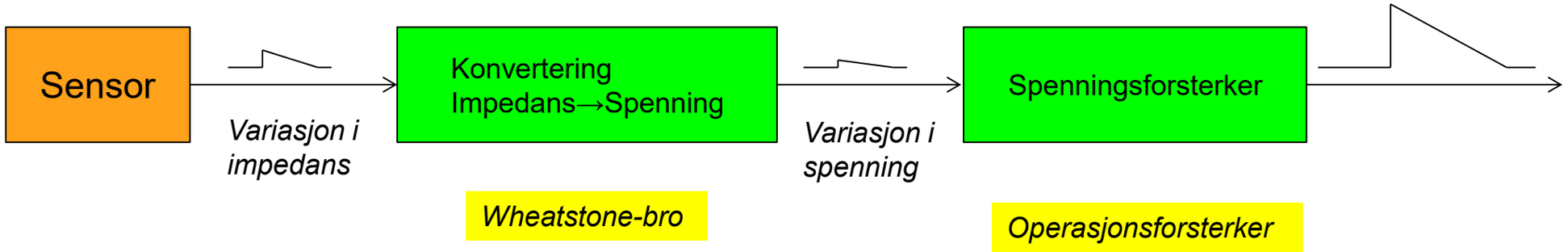
Måleteknikk (forts)

- En krets som måler temperatur elektronisk består av flere uavhengige deler som hver har sin bestemte oppgave



Måleteknikk (forts)

- En sensor måler en (endring i) en fysisk parameter som (endring i) resistans, kapasitans eller induktans
- Impedansen konverteres deretter til en spenning som er proporsjonal med impedansen
- Spenningen må vanligvis forsterkes siden det er små variasjoner i som måles
- Støy og hurtige variasjoner må kunne filtreres bort slik at målingen blir pålitelig

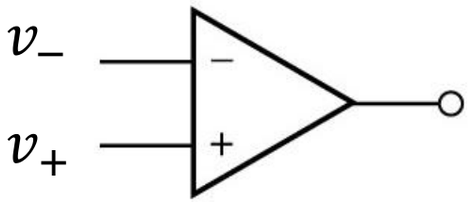


- En **operasjonsforsterker,** også kalt **opamp,** er en mye brukt krets i elektronikk og brukes blant annet til å forsterke spenningsforskjellen mellom to signaler
- Vi finner operasjonsforsterkere i mange typer analog elektronikk i dag
  - Før digitale datamaskiner ble utbredt brukte man operasjonsforsterkere til også å lage spesialiserte analoge datamaskiner før å utføre regneoperasjoner, bla beregning av baner til raketter
- Vi skal se på noen egenskaper ved ideelle (les: perfekte) opamper, og hva som skiller fysiske opamper fra ideelle.

Operasjonsforsterker (opamp)

- En operasjonsforsterker er en *spenningsforsterker* med to innganger og én utgang

$$v_{in} = v_+ - v_-$$



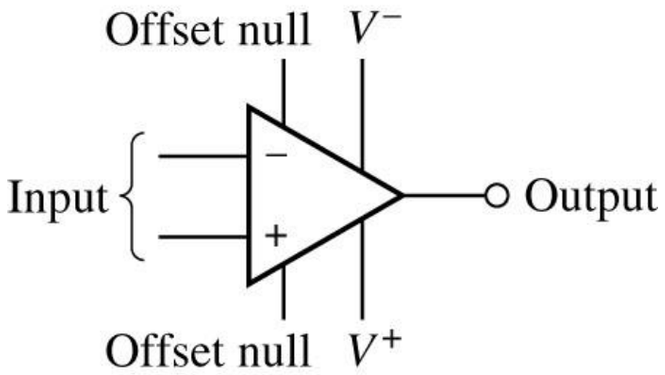
$$v_{out} = A(v_+ - v_-) = Avin$$

- Inngangene kalles hhv *inverterende (-)* og *ikke-inverterende (+)*
  - **NB:** Pass på hvor '+' og '-' er plassert i forhold til hverandre i kretstegningen: noen ganger er '+' terminalen plassert øverst og ikke nederst!
- *A* er forsterkningen eller *Gain*
- Opamp'er kommer som ferdige integrerte kretser
  - Vi trenger ikke forholde oss til hvordan den ser ut innvendig eller bygge dem selv med mindre vi har veldig lyst ☺
- Det finnes dessuten opamp'er som
  - Lager en strøm på utgangen (og ikke en spenning)
  - Forsterker en inngangsstrøm (og ikke en spenning)
- Vi kan også koble sammen opamp'en slik at den bare trenger ett inngangssignal og ikke to

Enkel opamp-modell

- Opamp'er regnes som aktive kretselementer
  - Den trenger en ekstern spenningsforsyning og innganger for *kalibrering*
    - Kalibrering brukes for å rette opp små avvik eller uønskede variasjoner
  - Vanligvis vises ikke terminalene for spenningsforsyning og kalibrering

- Opamp'en kan ses på som en grunnstein eller byggeblokk for å lage mer avanserte kretser, f.eks.
  - Differensielle forsterkere
  - Instrumenteringsforsterkere
  - Spenningsfølger/bufre
  - Summasjonsforsterkere,
  - Inverterende og ikke-inverterende forsterkere
  - Aktive filtre
  - Integrasjons og derivasjonskretser

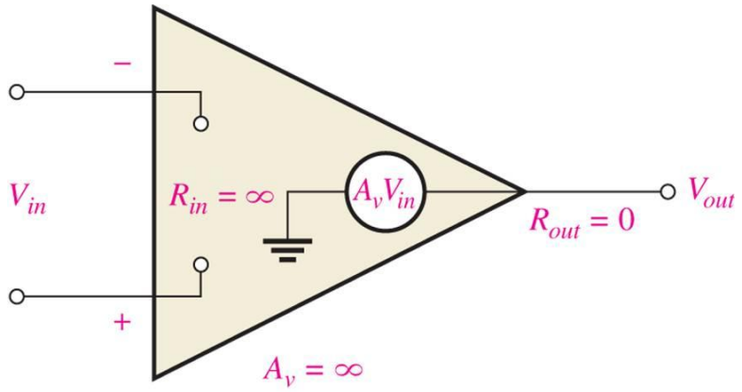


- En opamp brukes nesten aldri helt alene
  - Vi trenger noen ekstra komponenter og/eller flere opamp'er som kobles sammen
    - Kommer tilbake til hvorfor

Ideell opamp (1)

- Vi starter med å beskrive en *ideell (*dvs perfekt) operasjonsforsterker
  - Vi gjør noen antagelser og forenklinger som ikke helt stemmer for virkelige opamp'er

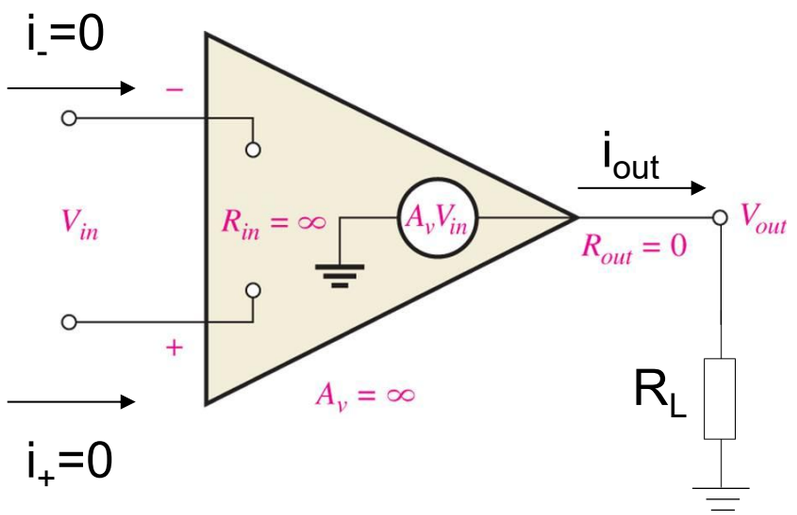
- Den ideelle opamp'en har følgende egenskaper:
  - Inngangsmotstanden $R_i = \infty$
  - Utgangsmotstanden $R_o = 0$
  - Spenningsforsterkningen $A_v = \infty$
  - Båndbredden = ∞,
    - dvs alle frekvenser forsterkes like mye uten forvrenging
  - Common Mode Rejection Ratio = ∞
    - $V_{out}=0$ når $V_+=V_-$ uavhengig av størrelsesordenen til V_+ og V_-
  - Slew Rate = ∞
    - Samme hvor raskt input endrer seg, vil output følge etter like raskt



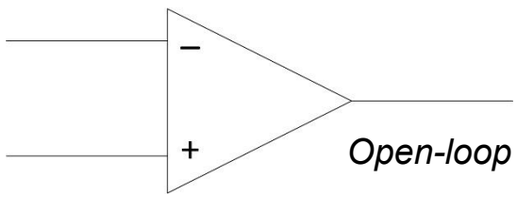
Enkel modell av opamp med resistorer og en avhengig spenningskilde

Ideell opamp (2)

- Fra antagelsene på forrige side kan vi utlede at
  - Inngangsstrømmene $i_+=0$ og $i_-=0$
  - Utgangsspenningen V_{out} varierer ikke med lastmotstanden R_L
  - R_L avhenger av hva vi kobler utgangen av opamp'en til
  - I_{out} bestemmes kun av R_L og V_{out}

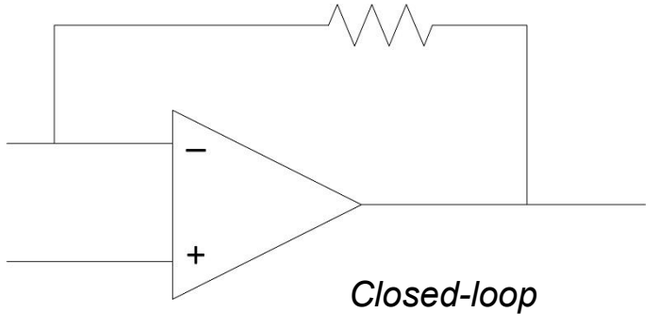


Open-loop og closed-loop konfigurasjon

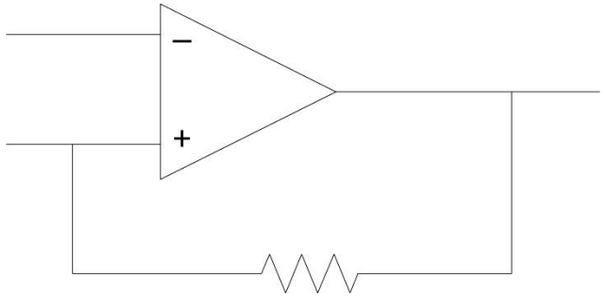


Open-loop

- En opamp kan brukes i to konfigurasjoner: *open-loop* eller *closed-loop*
  - **Closed-loop** betyr at utgangen kobles til en av inngangene (kalt *tilbakekobling* eller *feedback)*
  - **Open-loop** betyr at det ikke er tilbakekobling
- To typer tilbakekobling;
  - **Negativ**: utgangen kobles tilbake til –inngangen
  - **Positiv**: utgangen kobles tilbake til +inngangen
  - Som regel skaleres tilbakekoblingssignalet ned via en spenningsdeler
  - Positiv tilbakekobling og OpenLoop brukes sjelden pga stabilitetsproblemer
- Spenningsforsterkning **uten** tilbakekobling kalles «**open loop gain**» A_{ol}
- Spenningsforsterkning **med** tilbakekobling kalles «**closed loop gain**» A_{cl}
- Negativ tilbakekobling reduserer forsterkningen, dvs $A_{ol} >> A_{cl}$



Closed-loop
Negativ tilbakekobling

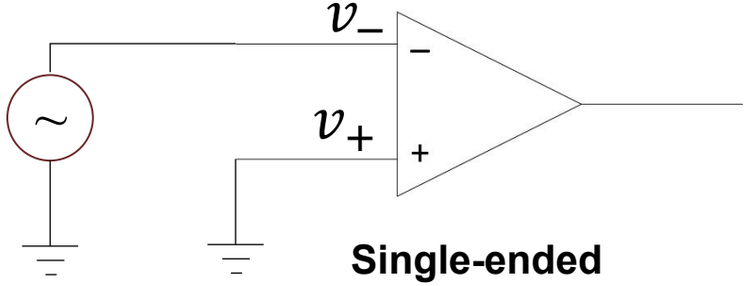


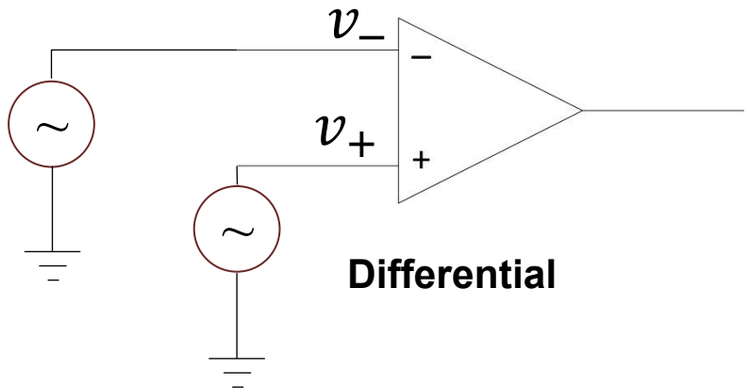
Closed-loop
Positiv tilbakekobling

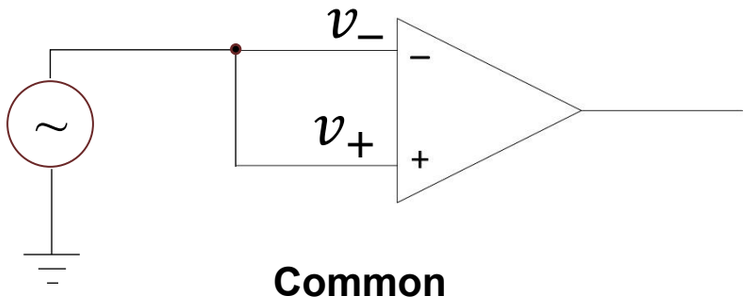
Input-kombinasjoner

- Siden opamp‘en har to innganger, kan man koble input-signal(er) til på ulike måter:
  - **Single-ended mode:** Bare én av inngangene kobles til et innsignal mens den andre kobles til en fast spenning (f.eks. jord)
  - **Differential mode:** Begge inngangene kobles til hvert sitt inngangssignal
  - **Common-mode:** Ett inngangssignal kobles til begge inngangene samtidig

- Alle input-kombinasjonene kan kombineres med Open Loop eller Closed Loop-konfigurasjon
  - Men ikke alle kombinasjoner er like mye brukt eller like nyttige
- Mange opamp’er kommer også med invertert utgang i tillegg til ikke-invertert utgang

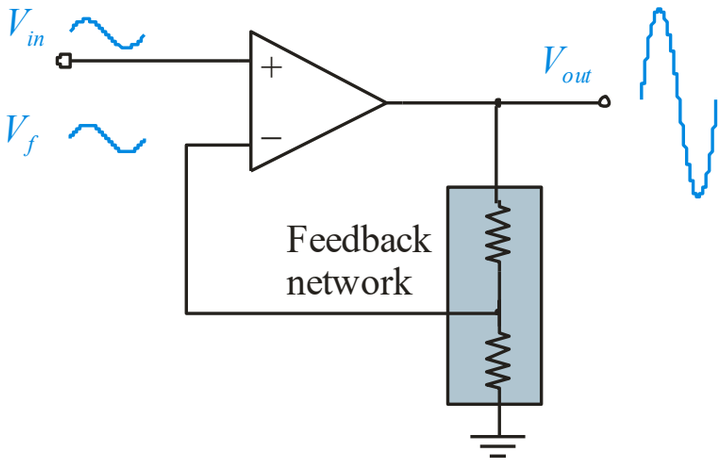






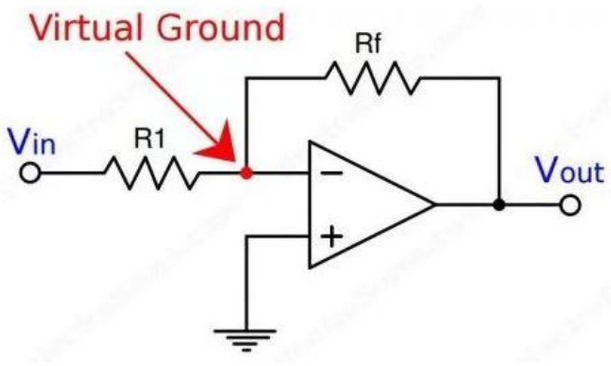
Negativ tilbakekobling

- Uten tilbakekobling (open-loop) vil selv små variasjoner på inngangen gi store variasjoner på utgangen fordi forsterkningen A_{ol} er svært høy
- Hvis den inverterende inngangen kobles til utgangen, 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
  - Som regel betyr dette at utgangen enten blir maksimalt positiv eller maksimalt negativ (bestemt av forsyningsspenningen til opamp'en)
  - Men: positiv tilbakekobling utnyttes noen ganger til å lage bla oscillatorer, en krets som genererer ac-signaler med fast frekvens



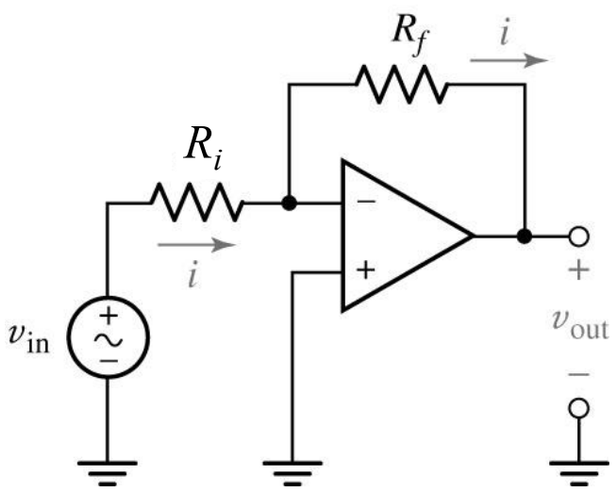
Virtuell jord

- For å analysere noen 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 grenen som er koblet til virtuell jord
  - Input-impedansen = ∞ ⟺ $I_{in} = 0$
  - Strømmen som går til/fra inngangen går i sin helhet ut/inn til utgangen gjennom tilbakekoblingsgrenen
- Siden spenningsforsterkningen er gitt av $A = \frac{V_{out}}{V_{in}} \approx \infty$ og V_{out} ikke kan være større enn forsyningsspenningen, må $V_{in} = V_+ - V_-$ være veldig nær 0 for at *A* skal være veldig stor



Inverterende forsterker

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



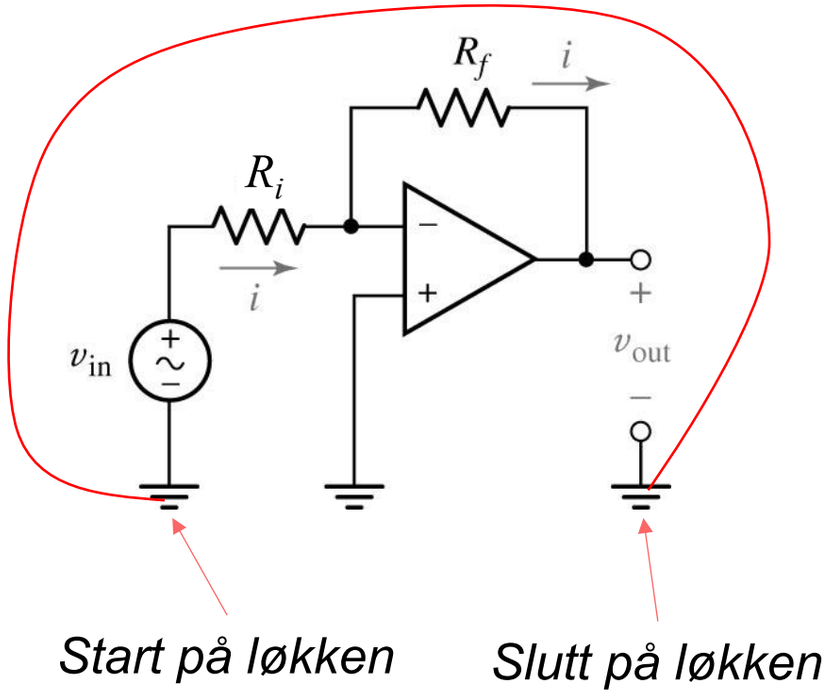
- Vi skal nå utlede sammenhengen mellom inngangen og utgangen

Inverterende forsterker (forts.)

- Mer presist ønsker vi å finne v_{out} som funksjon bare av v_{in} i tillegg til R_i og R_f, men ikke som funksjon av strømmen *i*
- Vi begynner med å definere en løkke som starter og slutter i jord og setter opp Kirchhoffs spenningslov (KVL) for spenningene rundt denne løkken.

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

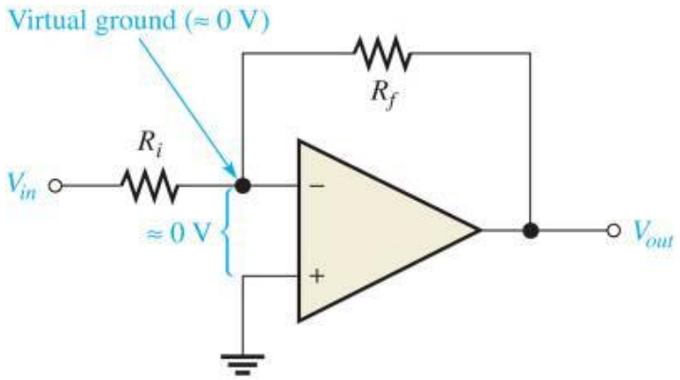
- For å eliminere strømmen *i*, trenger vi en ligning til, og det er her begrepet 'virtuell jord' vil hjelpe oss

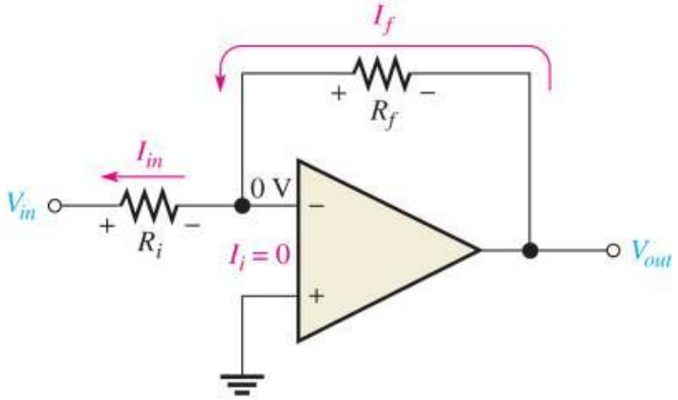


Inverterende forsterker (forts.)

- Ved å anta at v_- ligger på virtuell jord (fordi v_+ er koblet til jord), får vi at $-v_{in} + R_i i = 0 \Rightarrow i = \frac{v_{in}}{R_i}$

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

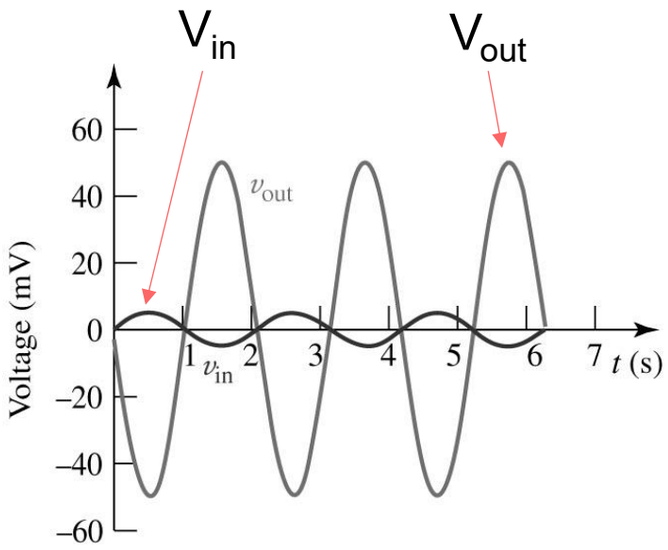




Inverterende forsterker (forts.)

- Forsterkningen A er nå bestemt av forholdet mellom R_f og R_i: $A = -\frac{R_f}{R_i}$
  - Merk: UTEN tilbakekobling er fortsatt A ≈ ∞; det er altså tilbakekoblingen som begrenser forsterkningen

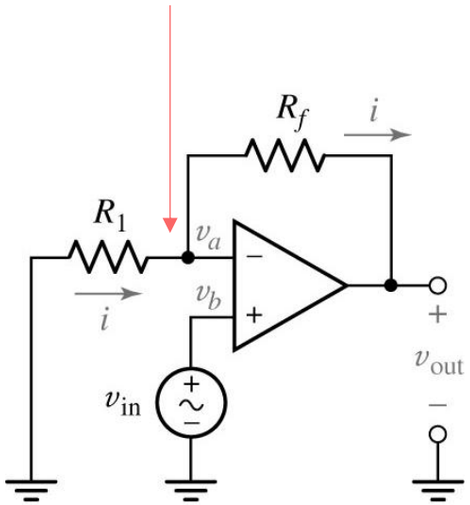
- Ser på et eksempel hvor v_{in}=*5sin(3t)mV*, R_i=*4.7kΩ* og R_f=*47k Ω*
- Dette gir v_{out}= - *50sin(3t)mV*
- Utgangen v_{out} er invertert (dvs fasedreid 180° grader eller π radianer) i forhold til inngangssignalet v_{in}



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 Kirchhoffs strømlov (KCL) for å finne v_{out} som funksjon av v_{in}:

Setter opp KCL for denne noden



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

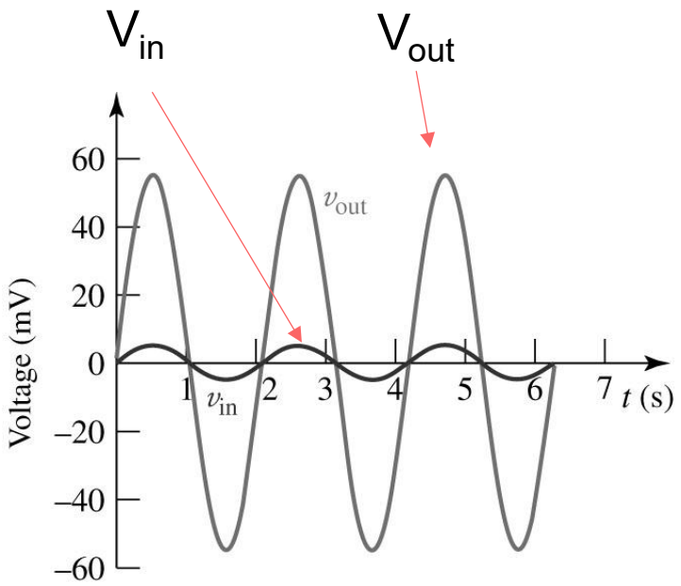
$$v_a = v_{in} \quad \Rightarrow \quad v_{out} = (1 + \frac{R_f}{R_1})v_{in}$$

$$A = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$

Ikke-inverterende forsterker(forts)

- Ser på oppførselen med $v_{in}=5sin(3t)mV$, $R_1=4.7k\Omega$, $R_f=47k\ \Omega$
- Dette gir $v_{out}= - 55sin(3t)mV$

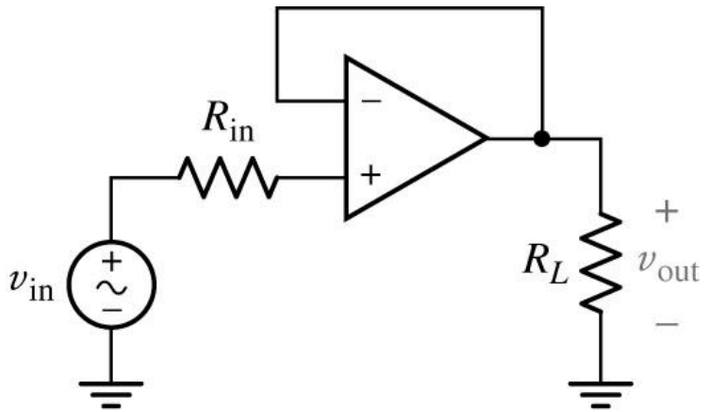
- Den inverterende forsterkeren har $|A| > 0$, mens den ikke-inverterende har $|A| \geq 1$
- Den ikke-inverterende forsterkeren har ingen fasedreining mellom inngangen og utgangrn



Spenningsfølger

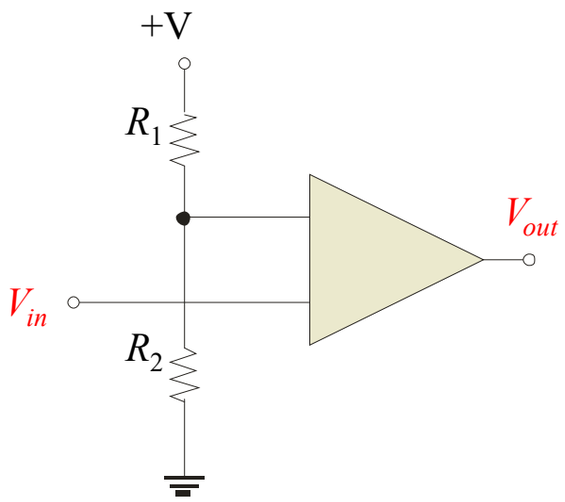
- En spenningsfølger, også kalt buffer, forsterker ikke et inngangssignal, men brukes for å «kopiere» et signal, slik at det ikke påvirker eller påvirkes av et annet signal
  - Impedansen på utgangen påvirkes ikke av impedansen på inngangen
  - Opamp'en kan levere mye strøm som inngangen ikke kan levere

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

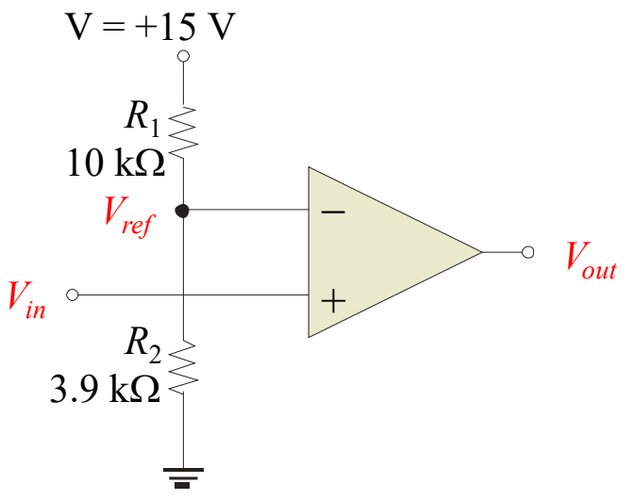


Komparatorer

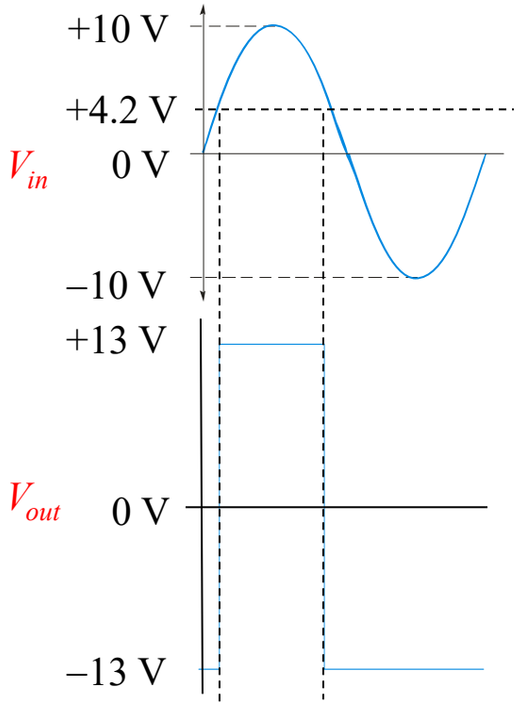
- En komparator sammenligner spenningsnivåene til to input-signaler
- Komparatoren bruker ikke tilbakekobling
  - Vi vil at liten spenningsforskjell mellom V_+ og V_ skal gi stort utslag i V_{out}
- Utgangen har enten maksimal eller minimal spenning (dvs metning), avhengig av hvilket inngangssignal som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



Komparatorer (eksempel)



- Største og minste V_{out} = ±13v, mens V_{in} = 10sin(t)
- Når $V_{in} > V_{ref}$ er V_{out} = 13v
- Når $V_{in} < V_{ref}$ er V_{out} = -13v
- Må først bestemme V_{ref}, altså spenningen vi skal sammenligne inngangssignalet med

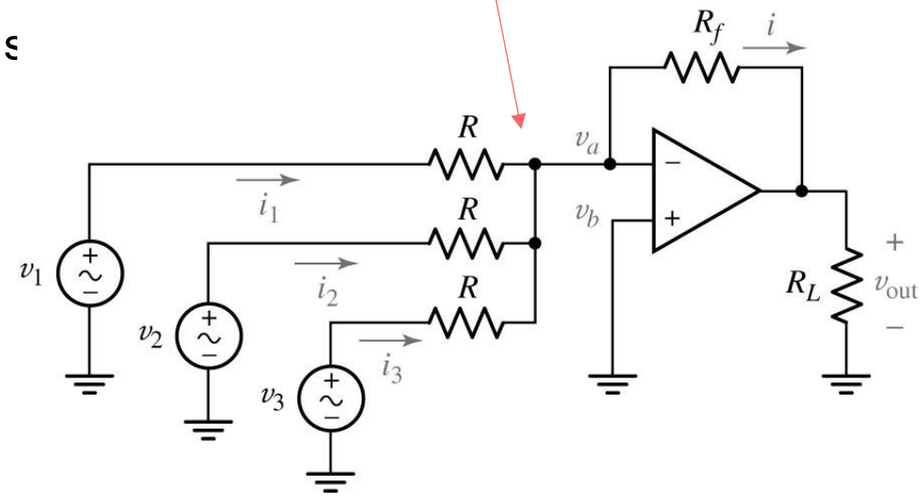


Summasjonsforsterker

Setter opp Kirchhoffs strømlov (KCL) for denne noden

- En operasjonsforsterker kan brukes til å addere spenninger og eventuelt skalere summen samtidig
- Spenningene legges sammen ved å først konvertere dem til strømmer og s summere strømmene ved sammenkobling (jf. KCL)
- Output-spenningen er gitt av

$$\frac{v_a - v_{out}}{R_f} + \frac{v_a - v_1}{R} + \frac{v_a - v_2}{R} + \frac{v_a - v_3}{R} = 0 \Rightarrow v_{out} = -\frac{R_f}{R}(v_1 + v_2 + v_3)$$

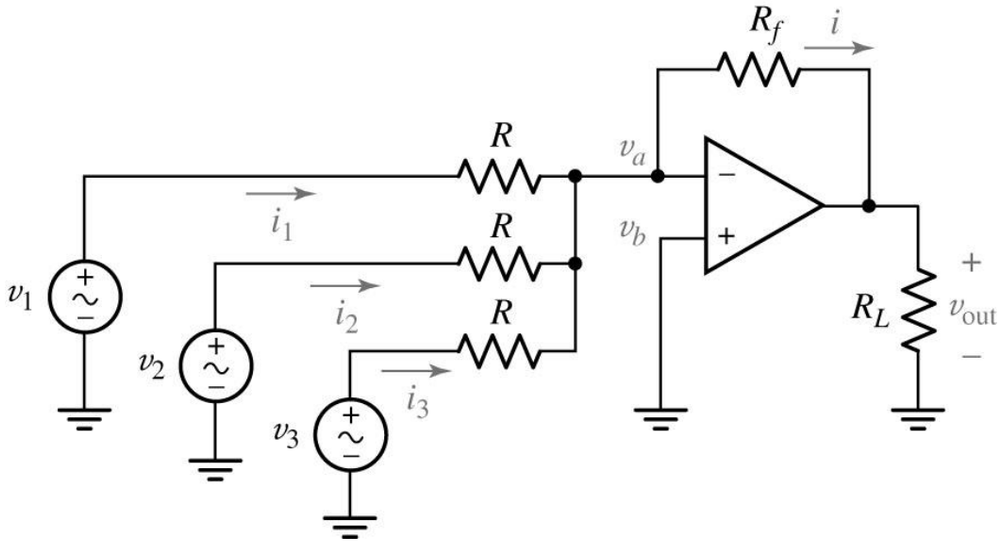


Gjennomsnittsberegning

- Ved å velge R slik at $R=n*R_f$ vil summasjonskretsen beregne gjennomsnittet av input-spenningene

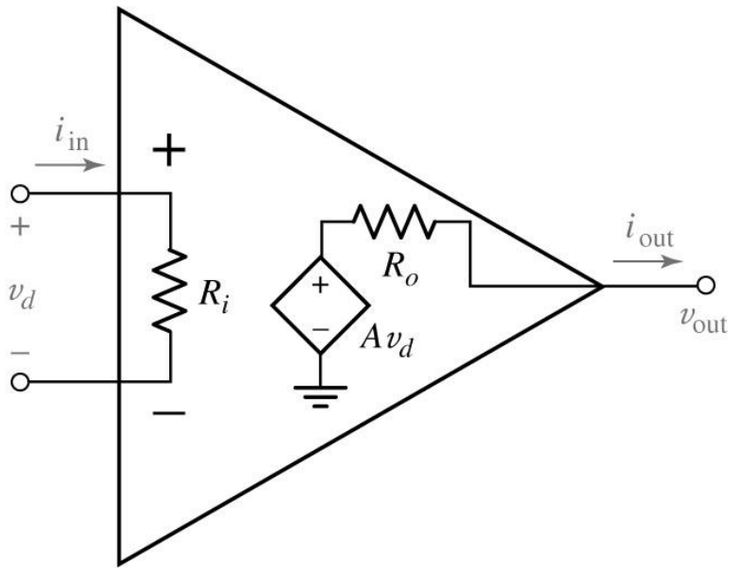
$$v_{out} = -\frac{R_f}{R}(v_1 + v_2 + v_3) \Rightarrow$$

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



Fysiske opamp'er

- Så langt har vi gjort noen antagelser og forenklinger om hvordan en ideell opamp oppfører seg
- Vi skal nå se hvordan en fysisk opamp oppfører seg sammenlignet med den ideelle
- Tar utgangspunkt i en enkel modell for hvordan en opamp er konstruert innvendig
  - Denne er tegnet med litt andre symboler enn den vi så på tidligere, men er i prinsippet den samme modellen
  - $V_d = V_{in}$



Fysiske opamp'er (forts)

- De tre viktigste egenskapene som kjennetegner en opamp er
  - Inngangsresistansen R_i
  - Utgangsresistansen R_o
  - Forsterkningen A
- For en fysisk opamp er R_i typisk MΩ eller større
- Utgangsmotstanden R_o er noen få Ohm
- Forsterkningen (open-loop) er vanligvis fra 10^5 og større
  - Opamp'er laget for spesielle bruksområder kan ha helt andre verdier

Ideell opamp	Fysisk opamp
$R_i=\infty$	R_i~ MOhm
$R_o=0$	R_o < 2-3 Ohm
$A=\infty$	$A\sim10^5$

Fysiske opamp'er: Metning (saturation)

- Metning betyr at økning av inngangsspenningen ikke lenger gir økning i utgangsspenningen
- Utgangsspenningen fra en opamp kan ikke overstige forsyningsspenningen
  - Vi kan ikke forsterke store spenningsforskjeller mellom v_+ og v_-
- Transistorene som driver utgangen i opamp'en har et fast spenningsfall som gjør at maksimal utgangsspenning er lavere enn maksimal forsyningsspenning

Fysiske opamp'er: Metning (forts.)

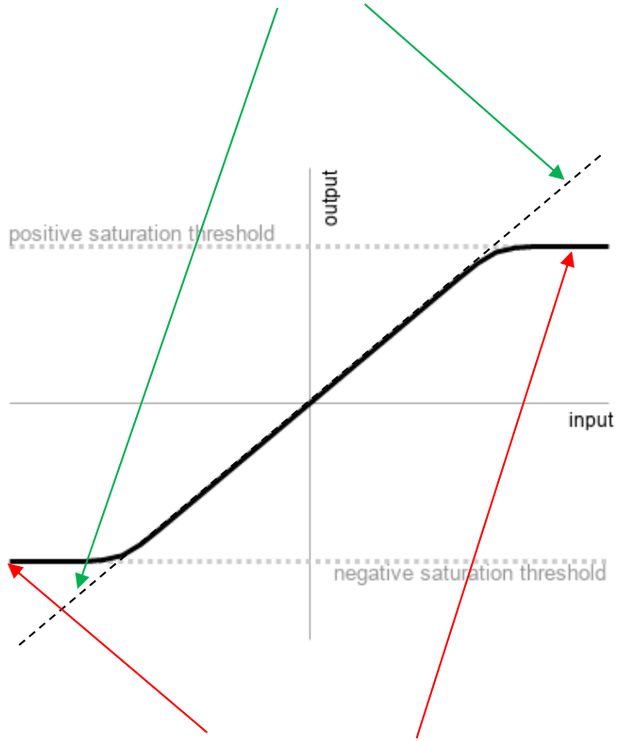
- Når opamp'en er i metning, opererer den utenfor det lineære området.
  - Ikke-lineær betyr at utgangen **ikke** er en lineær funksjon av inngangen
- Overgangen fra lineært område til metning er ikke nødvendigvis symmetrisk:

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

- Den positive og negative metningsspenningen er heller ikke alltid like:

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

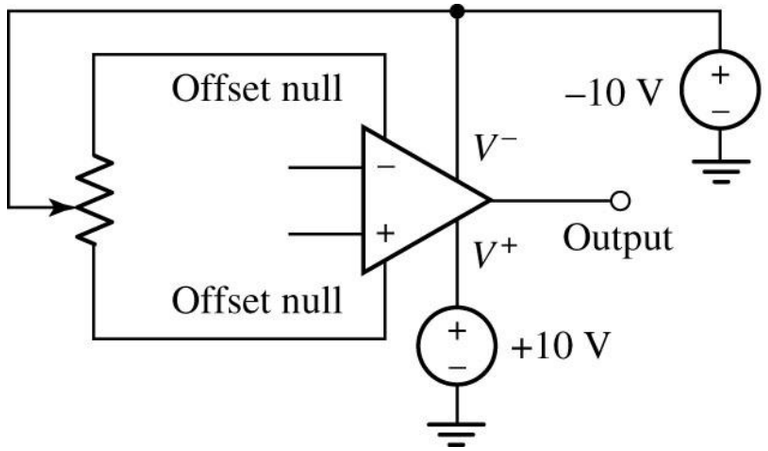
Lineært: Utgangen burde ha fortsatt å øke langs den stiplede linjen



Metning: Utgangen flater ut og øker ikke lenger selv om inngangen stiger

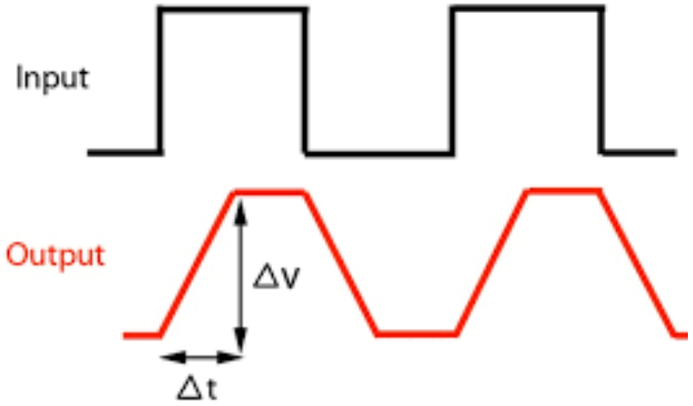
Fysiske opamp'er: Input offset-spenning

- Hvis inngangsterminalene er koblet sammen på en ideell opamp, vil $V_d = V_+ - V_- = 0$ og dermed skal $v_{out} = 0$
- I praksis blir derimot $v_{out} \neq 0$ selv om $v_d = 0$
  - Denne effekten kalles for input offsetspenning
- Fysiske opamp'er er utstyrt med to ekstra tilkoblinger slik at offsetspenningen kan justeres til 0



Fysiske opamp’er: Slew rate

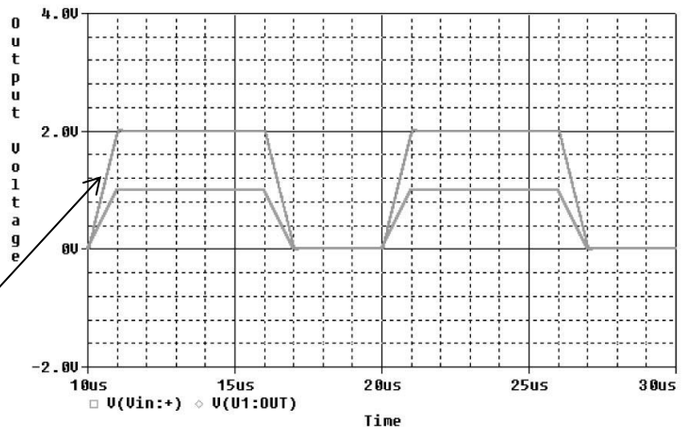
- Slew rate er et mål på hvor *raskt* utgangssignalet klarer å endre seg i takt med inngangssignalet
- Slew rate måles i volt per sekund på utgangen
  - Altså hvor mange volt utgangen kan endre seg i løpet av 1 sekund
- Ulike opamp’er har ulike slew rates
- Opamp’er som har høy maksimal output-spenning vil typisk ha lav slew-rate
- Slew-rate bestemmer opamp’ens båndbredde, dvs anvendelige frekvensområde



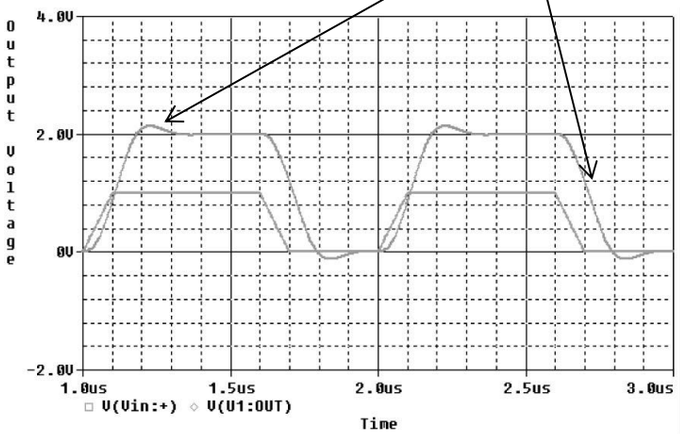
Fysiske opamp'er: Slew rate (forts)

Formen til utgangssignalet begynner å avvike fra inngangssignalet

Utgangssignalet har samme form som inngangs-signalet

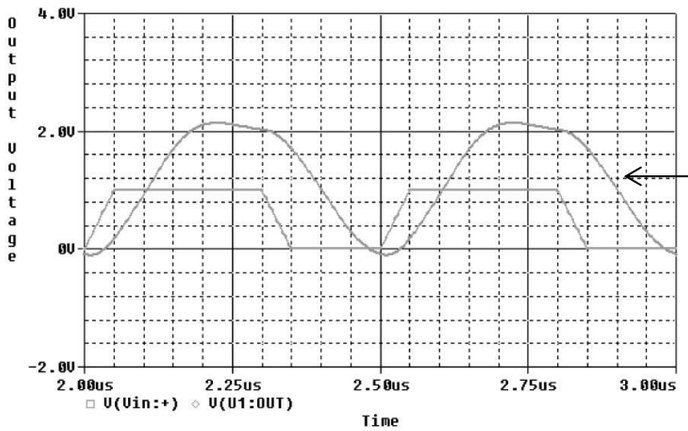


(a)

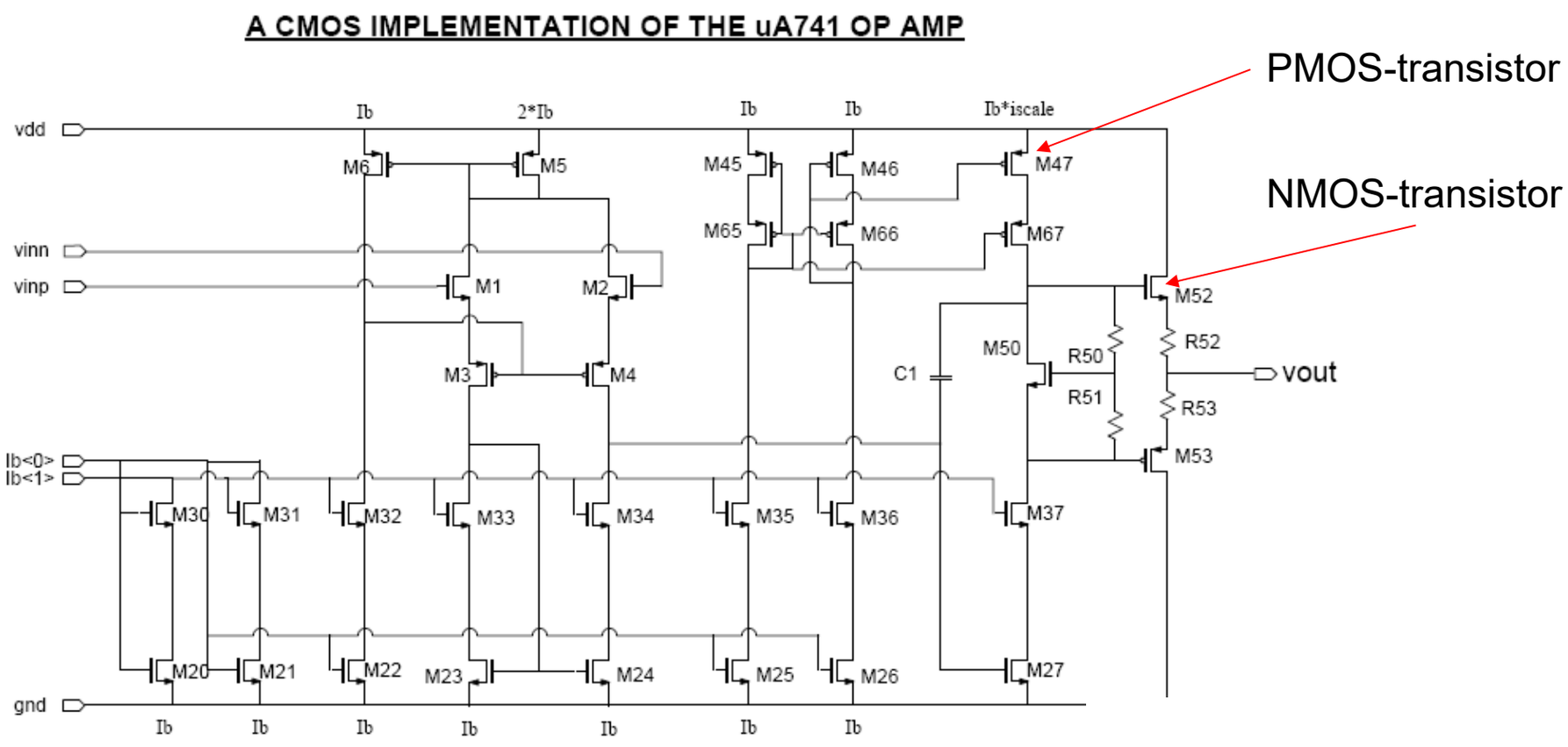


(b)

NB: Ulik tidsskala på de horisontale aksene



(c)

Utgangssignalet er sterkt forvrengt

Eksempel på implementasjon (741-type, CMOS)