



UiO **Institutt for informatikk**  
Det matematisk-naturvitenskapelige fakultet

IN 1080

# Operasjonsforsterekere

Yngve Hafting, 2021



# Hvor står vi og hvor går vi...

## Kort om emnet

- *Grunnleggende analog elektronikk*, sensorer og sensor grensesnitt, aktuatorer. Programmering av mekatroniske systemer.

## Hva lærer du?

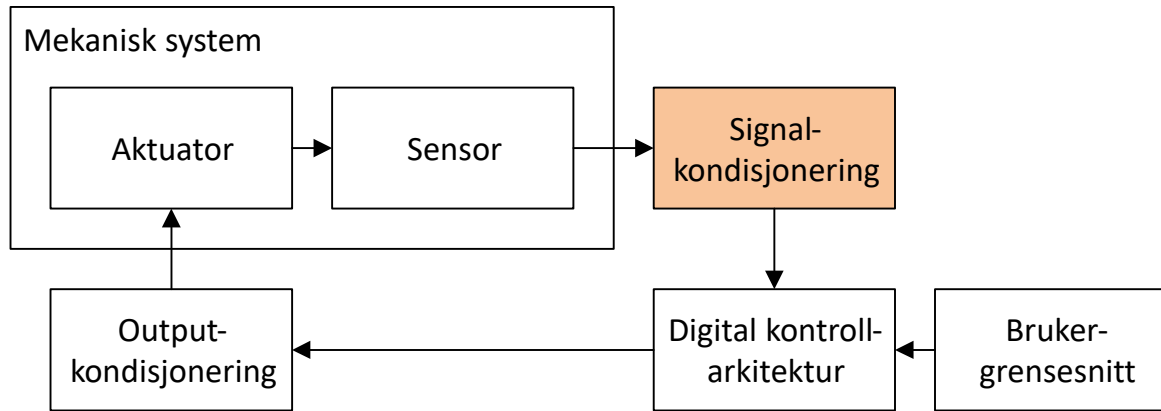
Etter å ha tatt IN1080 kan du:

- *forstå virkemåten til analoge kretser. Aktuelle begreper er: strøm, spenning, motstand, effekt, impedans, likestrøm, vekselstrøm, RCL, MOS, FET, OPamp*
- *bruke klassiske analysemetoder basert på Kirchoff, Thevenin og Nortons teoremer*
- forstå og anvende sensorer, signalkondisjonering og konvertering, samt noen komponent-komponent busser
- bygge og programmere enkle mekatroniske systemer med mikrokontroller, aktuatorer og sensorer
- forstå grunnleggende kontrollteori og virkemåte for PIDkontrollere

## Forelesning

- *Kunne velge sensorsystemer for mekatronikk*
  - Hva er en operasjonsforsterker (opamp)
  - Hva bruker vi operasjonsforsterkere til?
  - Hvordan virker operasjonsforsterkere?
-

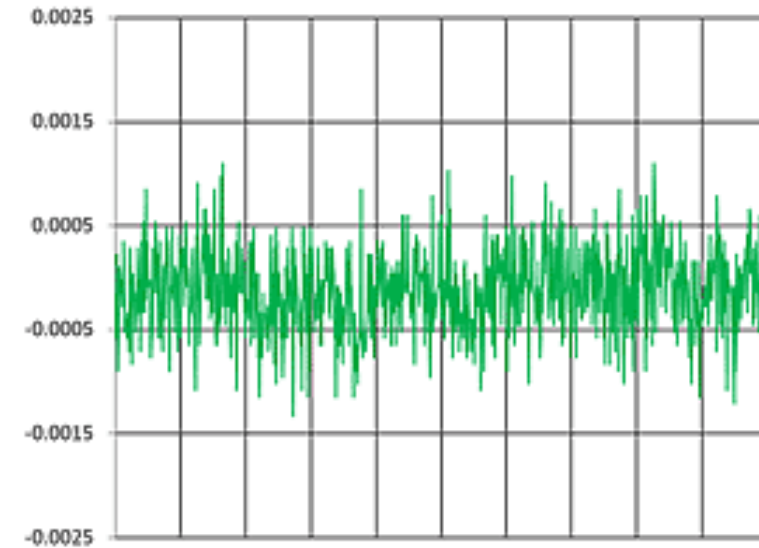
# Systemperspektiv og oversikt



- Signalkondisjonering
  - Analoge signaler
    - Forsterking
    - Prosessering
  - Konvertering til digitale signaler

# Motivasjon

- Den virkelige verden er ikke digital
  - Sensorer gjør fysiske fenomener til analoge elektriske signaler
  - Svake signaler, støy og behov for utregninger:  
=> Vi ønsker å bearbeide signalene digitalt.
- Signalkondisjonering
  - Gjøre om sensordata til en form vi kan bruke
    - Direkte (analogt) eller digitalisere
  - Hvordan / med hvilke verktøy:
    - Filtrering (Lavpass / høypass / båndpass)
      - Passive komponenter, "Opamper" - operasjonsforsterkere
    - Forsterking
      - Transistorer, **Opamper**, Instrumenteringsforsterkere
    - "AD-konvertering" - Omvending fra Analoge til digital signaler
      - AD-konvertere
      - Komparatorer
      - Trigger kretser

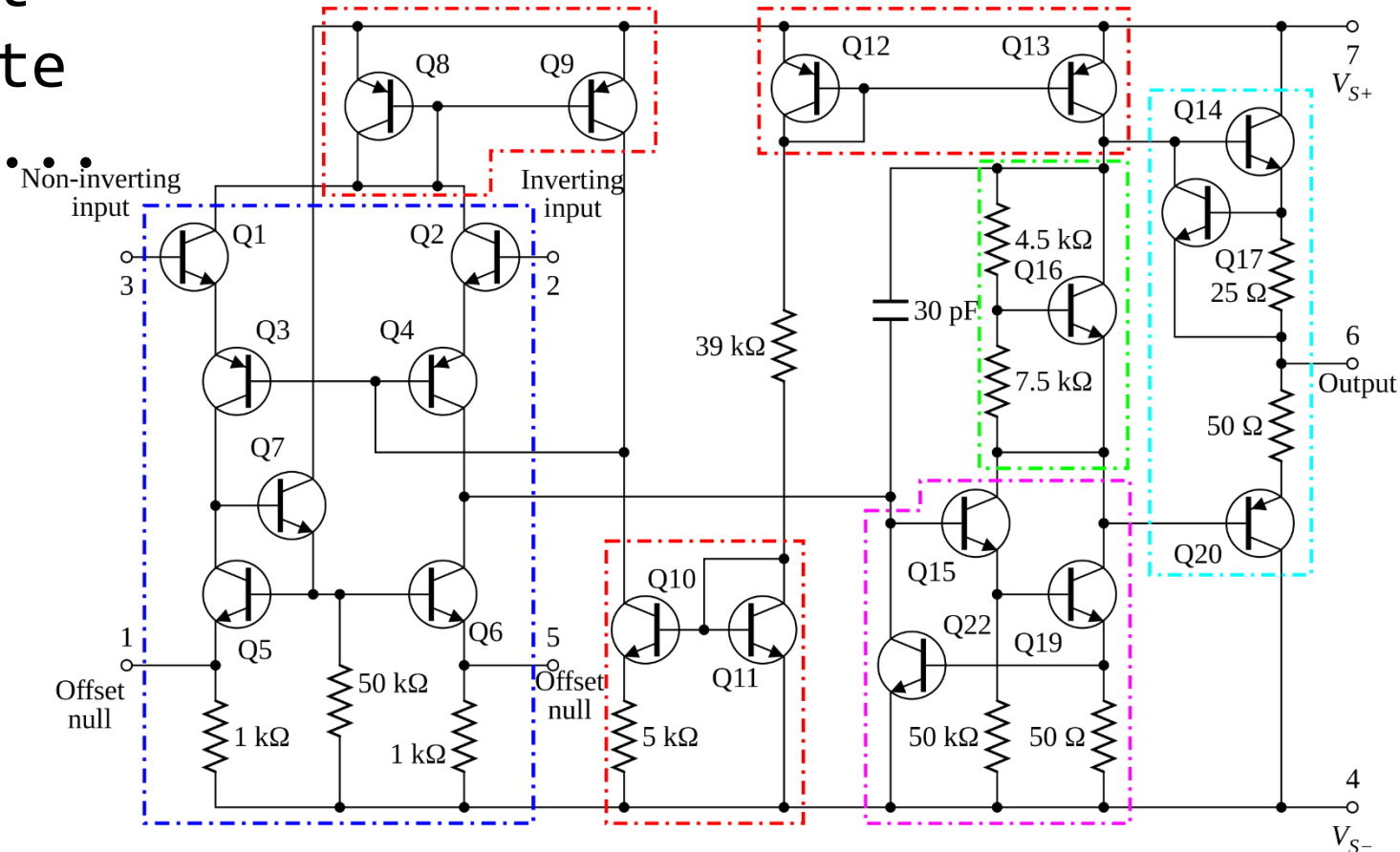


Opamper kan inngå i alt fra filtrering til forsterkning og konvertering av analoge signaler.

De er derfor en viktige byggeblokker, og vi skal se litt på egenskaper og hvordan vi bruker dem

# Hva er en operasjonsforsterker?

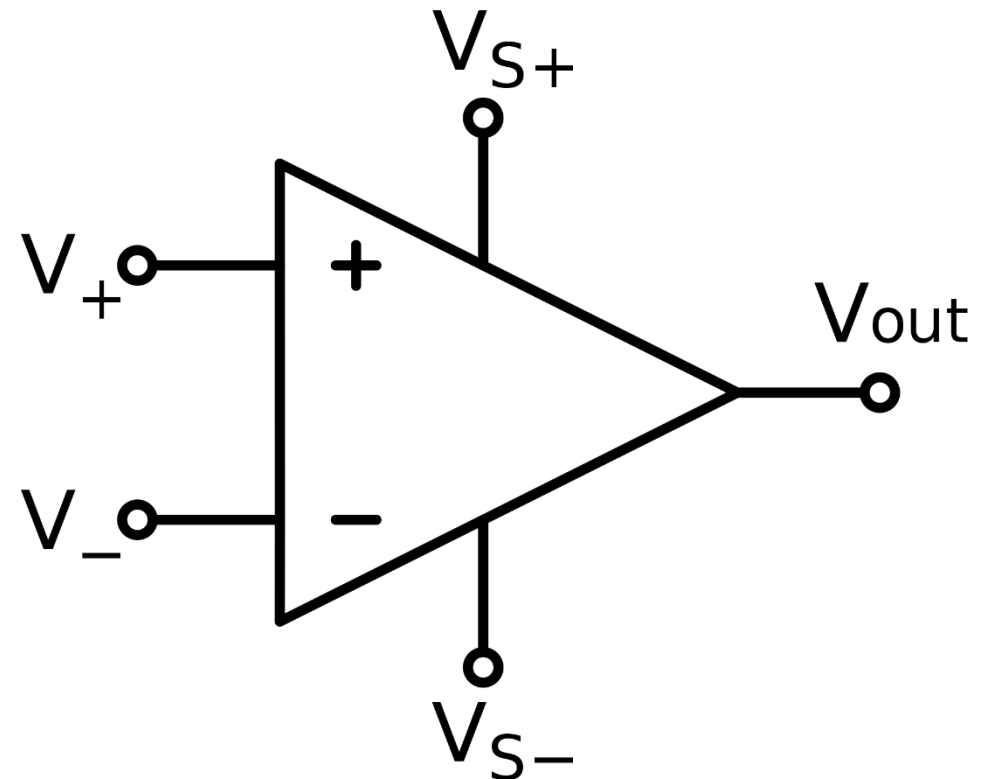
- En forsterkerkrets laget for å brukes til bestemte matematiske operasjoner...
  - Noen karakteristiske egenskaper..
  - Mange bruksområder...
  - Eksempel:
- Skal vi analysere dette fra grunnen av?



[https://en.wikipedia.org/wiki/Operational\\_amplifier](https://en.wikipedia.org/wiki/Operational_amplifier)

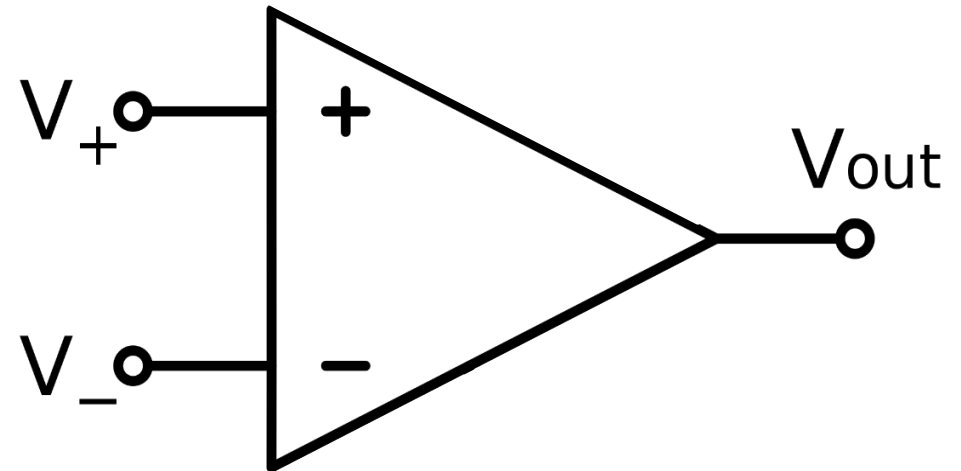
## Hva er en operasjonsforsterker (opamp)?

- Symbol:
- To modeller:
  - Ideell opamp
  - Reell opamp
- Brukes til
  - Forsterkerkretser
  - Aktive filtre
  - Komparatorer og triggerkretser
  - Analoge regnefunksjoner
- Finnes omtrent over alt der analoge signaler benyttes...



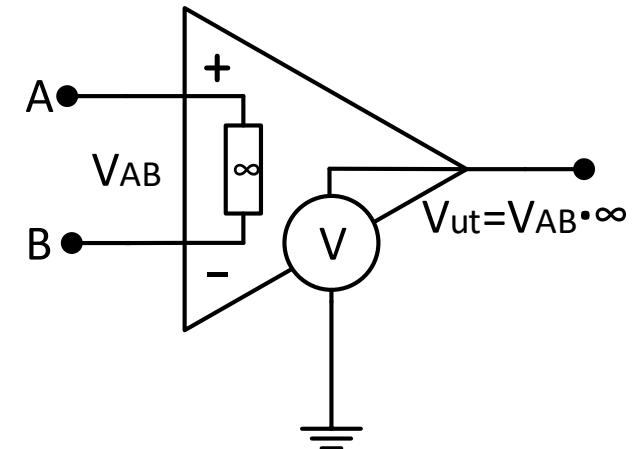
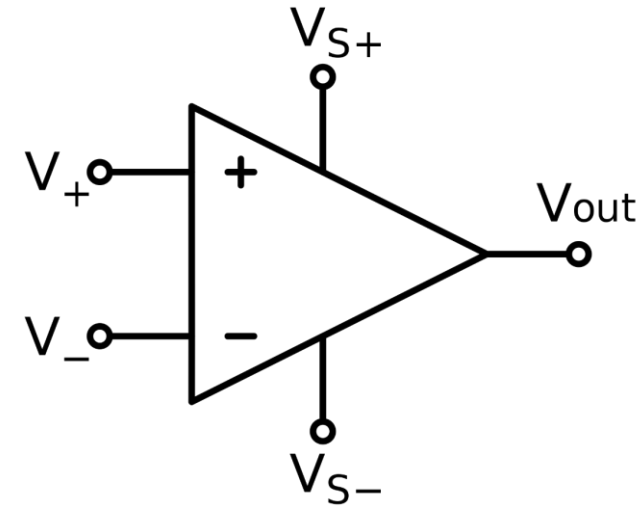
## Opamp oppkobling...

- $V_{S+}$  : kobles til VDD  
(gjerne skjult i kretsskjema)
- $V_{S-}$  : kobles typisk til GND  
eller den laveste spenningen i bruk.  
(gjerne skjult i kretsskjema)
- $V_+$  og  $V_-$  : signalinnganger
- $V_{out}$ : utgang
  - Utgangen forsterkes forskjellen mellom  $V_+$  og  $V_-$ ...
- Mer kommer, men først...



## Ideell opamp, egenskaper

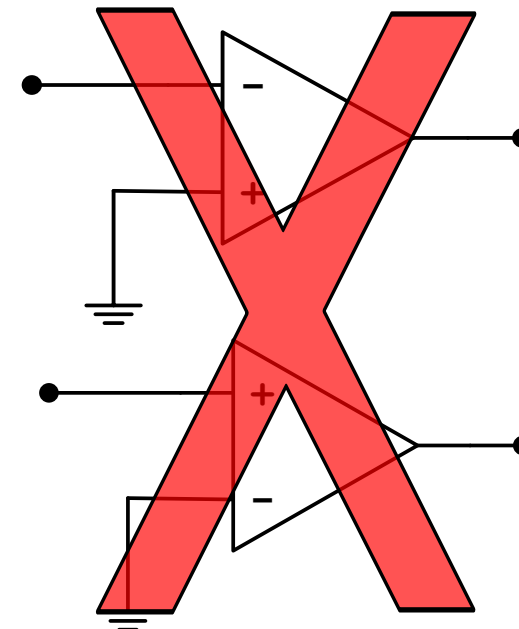
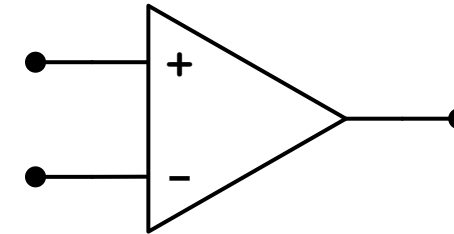
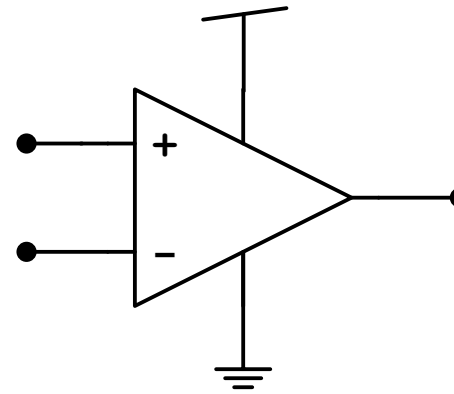
- Utgang ( $V_{out}$ )
  - Forsterker forskjellen mellom  $V_+$  og  $V_-$  uendelig
  - $V_{out} = (V_+ - V_-) \cdot \infty$
  - Utgangsimpedansen er  $\emptyset$ 
    - Ideell spenningskilde
- Innganger ( $V_+$  og  $V_-$ )
  - Uendelig inngangsimpedans
    - Går ikke strøm inn i opampen
- Ingen opamper helt ideelle...
  - Nært nok i mange sammenhenger
  - Utgangsspenning begrenses av spenningskilden





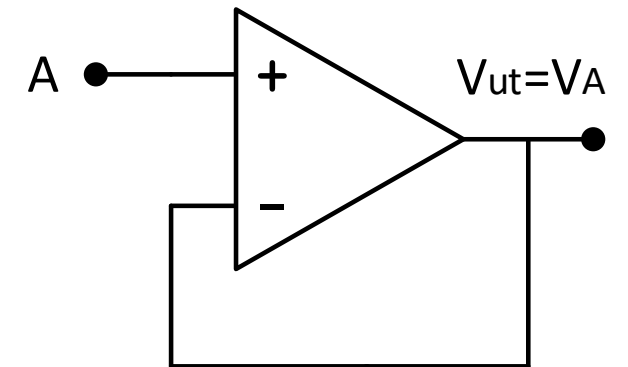
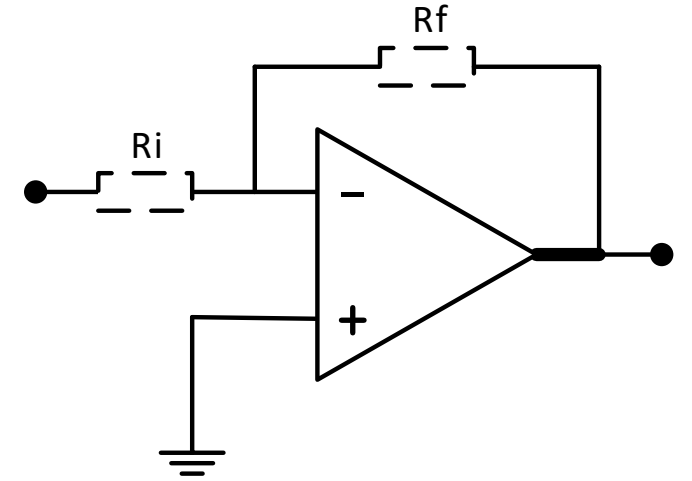
## Åpen sløyfe (Open loop)

- Gir digital output
  - enten «høy» "1" eller «lav» "0"
  - Lite brukt konfigurasjon
- Differensiell forsterker : Komparator
  - Sammenligner analoge signaler
- Inverterende forsterker
  - Brukes i praksis ikke open loop
- ikke-inverterende forsterker
  - Brukes i praksis ikke open loop



## Negativ tilbakekobling 1/3

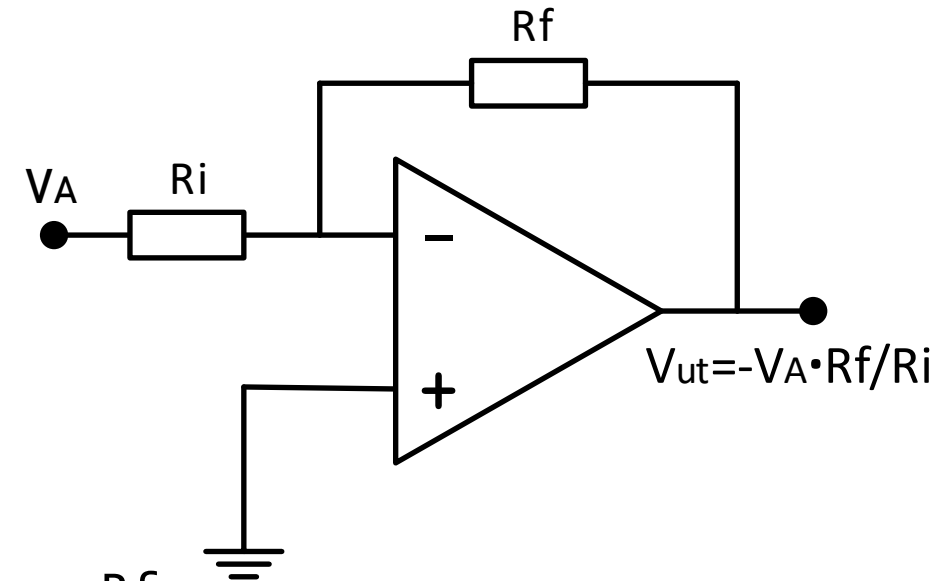
- Generelt: Med negativ tilbakekobling vil utgangen sørge for at vi får samme spenning på + og - inngangene
- Spenningsfølger (Unity gain buffer)
  - $V_{ut}$  stiger til  $V_{ut} = V_A$ .
  - Synker  $V_A$  vil  $V_{ut}$  synke tilsvarende
  - (Praktisk opamp: gain  $\sim 10.000 \Rightarrow OK$ )
  - Høy ( $\sim \infty$ ) inngangsimpedans og lav utgangsimpedans  $\Rightarrow$ 
    - Svakt inngangssignal = OK
    - Kan gi spenning til en last



## Negativ tilbakekobling 2/3

- Inverterende forsterker

- $\emptyset$  inngangsstrøm:  $I_{Ri} = I_{Rf} (= I)$
- Negativ tilbakekobling:  $V_- = \emptyset$  «*Virtuell jord*»
- $\Rightarrow V_{ut} = I \cdot R_f$ ,  $V_A = -I \cdot R_i$
- $\Rightarrow I = -V_A / R_i$
- $\Rightarrow \underline{V_{ut} = -V_A \cdot R_f / R_i}$
- Vi kan designe forsterkning ved å tilpasse  $R_i$  og  $R_f$ 
  - Enkel regning
  - Inngangsimpedans  $R_i \neq \infty \Rightarrow$  Ikke egnet i alle sammenhenger
- NB:  $V_S-$  må kobles til lavere potensiale enn GND
  - ellers vil kretsen alltid gi  $\emptyset V$ .



## Negativ tilbakekobling 3/3.

- «Ikke-inverterende» forsterker

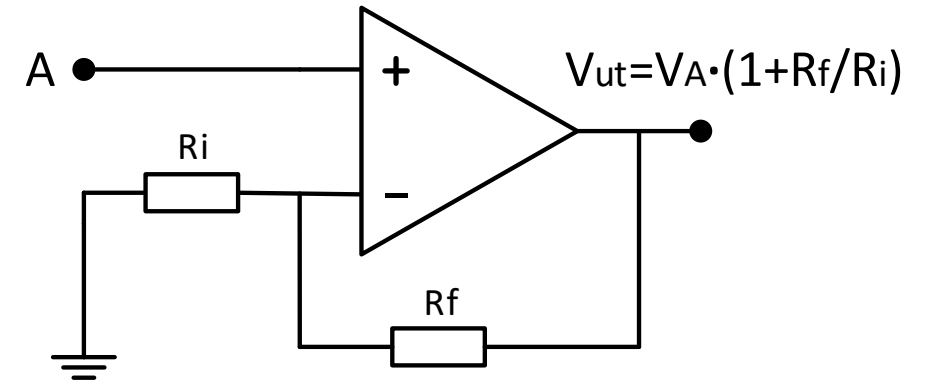
- Samme motstandsnettverk som inv. men bytte jord og inngangssignal

- Negativ tilbakekobling:  $V_- = V_A$
- $\emptyset$  inngangsstrøm:  $I_{Ri} = I_{Rf} (= I)$
- $V_A = I \cdot R_i \Rightarrow I = V_A / R_i$
- $V_{ut} = I \cdot R_f + I \cdot R_i = I(R_f + R_i)$
- $\Rightarrow V_{ut} = (V_A / R_i) \cdot (R_f + R_i) = \underline{V_A \cdot (R_f / R_i + 1)}$
- Dersom  $R_f \gg R_i \Rightarrow V_{ut} = V_A \cdot R_f / R_i$

- Høy inngangsimpedans, Lav utgangsimpedans

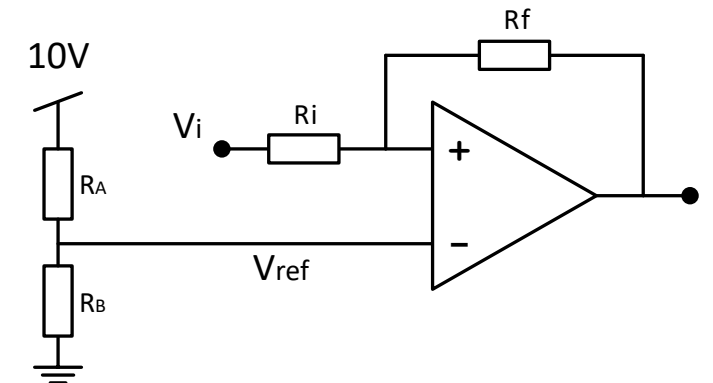
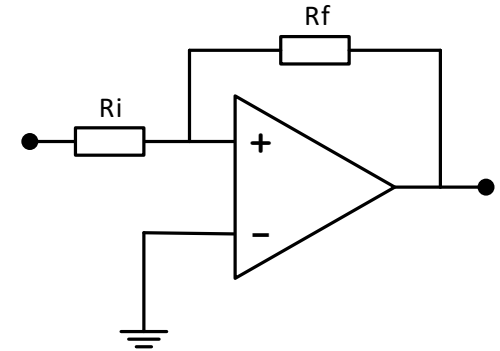
- Positiv forsterkning

- Fungerer fint med GND som laveste potensiale.



## Positiv tilbakekobling 1/2

- Ikke inverterende forsterker:
  - => Jo høyere input, dess høyere output som gir..
    - Høyere input igjen...
    - => Selvforsterkende, driver inngangssignalet.
    - Går fort i metning og forblir der
  - Kan brukes til å danne minnelementer/triggerkretser
- Schmitt trigger:



## Eks Schmitt trigger (1 av 2)

Vi har en schmitt trigger satt opp som vist på figuren. Maksimalt strømtrekk for inngangen er  $\pm 1\text{mA}$ . Alle spenninger forutsettes at kan varieres mellom  $0$  og  $10\text{V}$ . Vi ønsker at triggeren skal trigge på  $2,2\text{V}$  (opp) og  $1,8\text{V}$  (ned)

a) Hva er minsteverdi for  $R_i$  og  $R_f$  (tilsammen)?

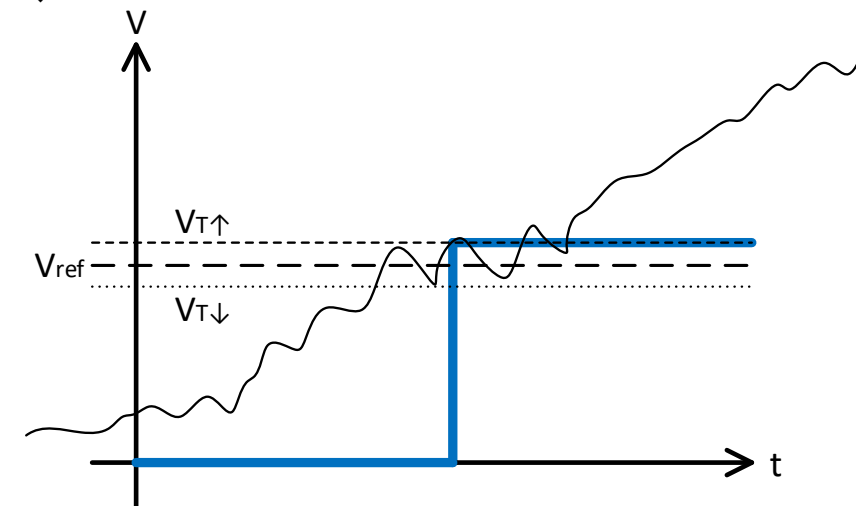
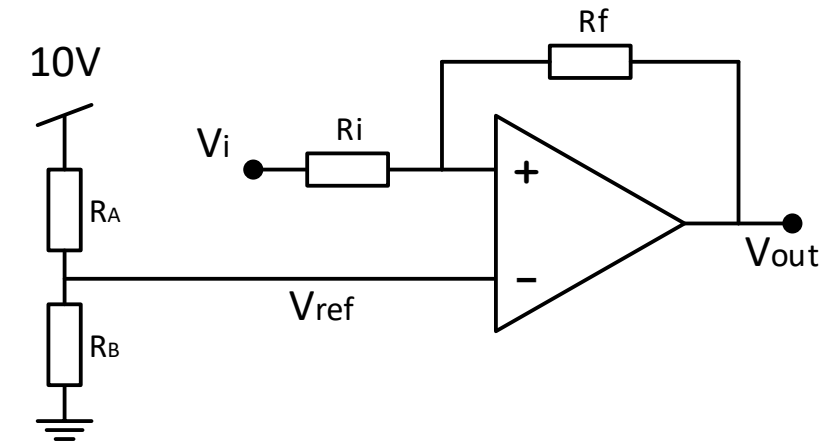
$$U=RI \Rightarrow R = U/I$$

$$V_{out} = 10\text{V} \text{ og } V_{inn} = 0 \text{ V gir } I(R_i+R_f) = 10\text{V}.$$

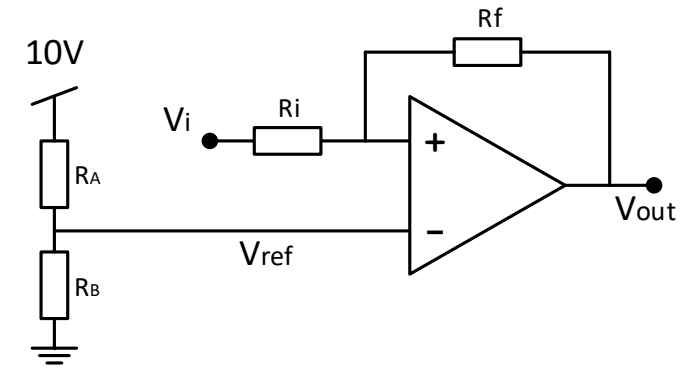
$$I_{max} = \pm 1\text{mA}$$

$$\Rightarrow (R_i+R_f) = 10\text{V}/1\text{mA} = 10\text{k}\Omega$$

Svar:  $R_i$  og  $R_f$  må tilsammen være minst  $10\text{k}\Omega$



## Eks Schmitt trigger (2 av 2)



b) Hva er minste verdi for  $R_i$  og  $R_f$  og hvilken verdi må  $V_{ref}$  ha?

- To triggertilstander:

A.  $V_i = 1,8V$ ,  $V_{out} = 10V$ ,

B.  $V_i = 2,2V$ ,  $V_{out} = 0V$ ,

- $V_i$  har:

- $R_i + R_f = 10k\Omega$ ,  $V_{ref} = V_i + R_i \cdot I_1$ ,  $V_{ref} = V_{out} - R_f \cdot I_2$

- Setter opp for begge triggertilstandene:

1:  $V_{ref} = 1,8V + I_1 \cdot R_i$

2:  $V_{ref} = 2,2V + I_2 \cdot R_i$

3:  $V_{ref} = 10V - I_1 \cdot R_f$

4:  $V_{ref} = 0V - I_2 \cdot R_f$

5:  $R_i + R_f = 10k\Omega$

(5 ligninger, 5 ukjente  $\Rightarrow$  OK)

6: (1,2)  $\Rightarrow 1,8V + I_1 \cdot R_i = 2,2V + I_2 \cdot R_i$

$\Rightarrow R_i(I_1 - I_2) = 0,4V$

$\Rightarrow R_i = 0,4V / (I_1 - I_2)$

7: (3,4)  $\Rightarrow 10V - I_1 \cdot R_f = -I_2 \cdot R_f$

$\Rightarrow 10V = R_f(I_1 - I_2)$

$\Rightarrow R_f = 10V / (I_1 - I_2)$

8: (5,6,7)  $\Rightarrow 10k\Omega = (0,4V + 10V) / (I_1 - I_2)$

$\Rightarrow I_1 - I_2 = 10,4V / 10k\Omega = 1,04mA$

9: (6,8)  $\Rightarrow R_i = 0,4V / 1,04mA = 0,38k\Omega$

10: (7,8)  $\Rightarrow R_f = 10V / 1,04mA = 9,6k\Omega$

11: (1,3)  $\Rightarrow 1,8V + I_1 \cdot R_i = 10V - I_1 \cdot R_f$

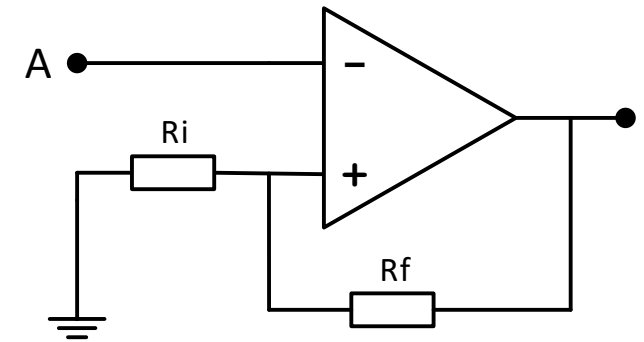
12: (5,11)  $\Rightarrow I_1(R_i + R_f) = 10V - 1,8V$

$\Rightarrow I_1 = 8,2V / 10k\Omega = 0,82mA$

13: (1,9,11)  $\Rightarrow V_{ref} = 1,8V + 0,82mA \cdot 0,38k\Omega = 2,1V$

## Positiv tilbakekobling 2/2

- 
- Inverterende forsterker:
  - Hvis  $V_A$  forsterkes  $-\infty$  så vil  $V_+$  bli lavere enn  $V_A \Rightarrow$
  - $V_{ut}$  skifter til  $+\infty \Rightarrow V_+$  høyere enn  $V_A \Rightarrow$  osv
  - Vi får oscillering pga tidsforsinkelser i kretsen.
    - Skyldes kapasitive egenskaper -
      - (hvor mange elektroner som må flyttes på før tilstander endres)
  - *Kan brukes til å lage svingekretser*





# Differens (Subtraksjons)krets

## • Differens (Subtraksjon)

-  $V_- = V_+ = \text{«Vinn»}$  som igjen spenningsdeler  $V_2$

1.  $\Rightarrow V_{\text{inn}} = V_2 * R_f / (R_i + R_f)$

2.  $I_i = I_f = \text{«I»}$ ,  $I = (V_{\text{inn}} - V_1) / R_i$

3.  $V_{\text{ut}} = V_1 + I * (R_i + R_f)$

(3 ukjente:  $V_{\text{inn}}$ ,  $I$  ( $I_1$ ),  $V_{\text{ut}}$ , 3 ligninger = OK)

A. (2,3)  $\Rightarrow V_{\text{ut}} = V_1 + (R_i + R_f)(V_{\text{inn}} - V_1) / R_i$

B. (1,A)  $\Rightarrow V_{\text{ut}} = V_1 + ((R_i + R_f) / R_i)(V_2 * R_f / (R_i + R_f) - V_1)$

C. Forenkle B  $\Rightarrow V_{\text{ut}} = V_2(R_f / R_i) + V_1(1 - (R_i + R_f) / R_i)$

D. Forenkle C  $\Rightarrow V_{\text{ut}} = V_2(R_f / R_i) - V_1(R_f / R_i)$

$V_{\text{ut}} = (V_2 - V_1) * R_f / R_i$

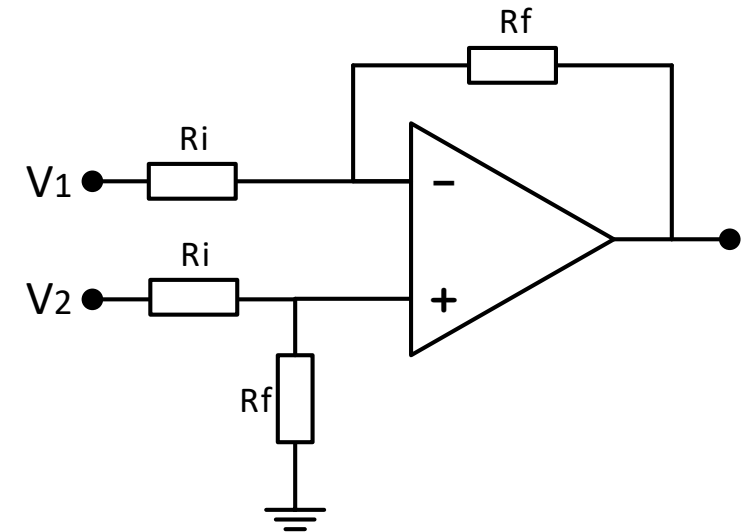
Setter vi  $R_f = R_i$ , så blir  $V_{\text{ut}} = V_2 - V_1$

Betraktninger

1: Negativ tilbakekobling  $\Rightarrow \dots$

2: Motstandsnettverk også for + inngang

3: Merk at  $R_{i1} = R_{i2}$  og  $R_{f1} = R_{f2}$



## Summekretser

- Inverterende Summekrets

- Vinn er (virtuell) jord

- $I_f = I_1 + I_2$

- $I_1 = 0 - V_1 / R_i$

- $I_2 = 0 - V_2 / R_i$

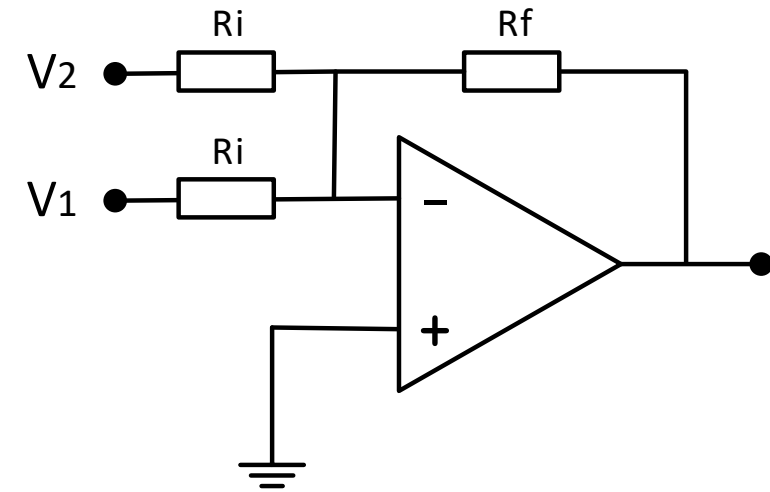
- $V_{ut} = I_f * R_f$

(Fire ligninger, 4 ukjente => OK)

Setter alle inn i 4...

$$V_{ut} = R_f(-V_1/R_i - V_2/R_i)$$

$$\underline{\underline{V_{ut} = -(V_1 + V_2)(R_f/R_i)}}$$



Merk: Setter vi  $R_f = R_i$  så blir

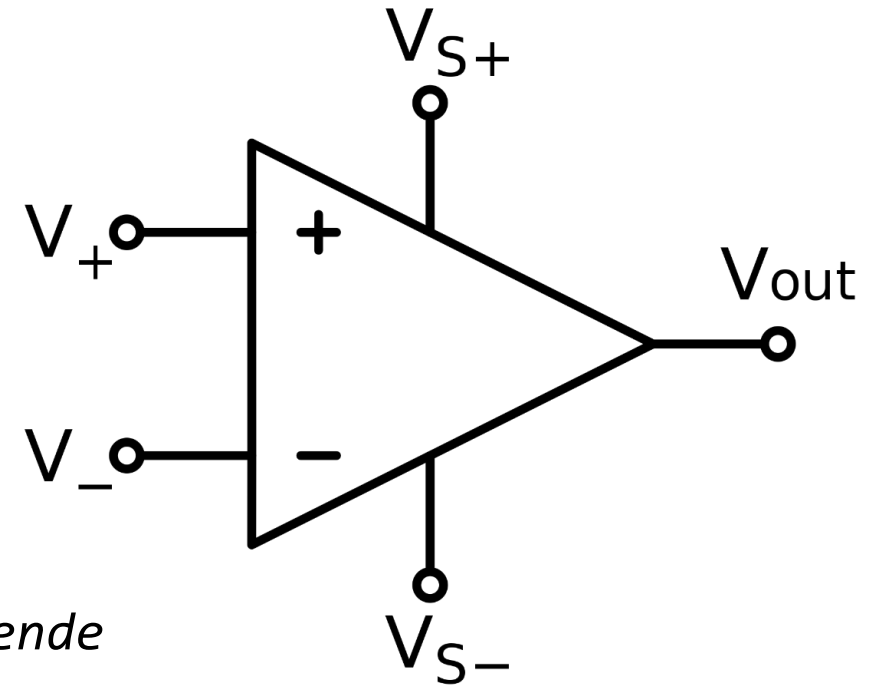
$$V_{ut} = -(V_1 + V_2)$$

# Integrerende og differensierende tilbakekobling

- Ikke pensum

## Oppsummering opamp

- Uendelig inngangsimpedans
  - 0 strøm inn inngangene
- Uendelig forsterkning
  - Men ikke større sving enn  $V_{S-}$  til  $V_{S+}$
- Negativ tilbakekobling
  - => Gir  $V_+ = V_-$  (til metning)
  - Kan brukes både inverterende og ikke-inverterende
  - Brukes i forsterkerkretser
    - Forsterkning beregnes med strømbetraktninger
    - Summasjon og subtraksjonskretser
- Positiv tilbakekobling
  - Brukes i trigger og oscillatorer
    - Ellers vil du sikkert ha negativ tilbakekobling...



## Videre om opamper

- Vi kommer tilbake til bruken når vi snakker om sensorer og avlesing av disse.
- **Lesestoff:**
  - COK (Læreboka: Carryer, Ohline, Kenny: Introduction to mechatronic design) kapittel 11.
- **Oppgaver:**
  - **11.3**, 11.4, 11.7, 11.8 (kun første setning), **11.10**. Ekstra: 11.1, 11.2, 11.6, 11.11