

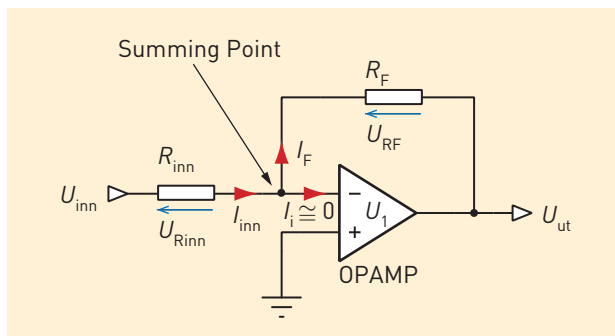
# Operasjonsforsterkeren

Operasjonsforsterkeren	24 s	Mars 2021
Utført av		
Dato		
Godkjent av		

## Kort repetisjon av operasjonsforsterkeren

Operasjonsforsterkeren er en *lineær* forsterker med to innganger og en utgang. Den har høy inngangsimpedans, høy spenningsforsterkning og lav utgangsimpedans.

Figuren viser «opampen» i *inverterende kopling*:



Operasjonsforsterkeren i INVERTERENDE kopling

Impedansen mellom de to inngangen er meget høy, slik at det ikke går nevneverdig strøm mellom dem.

Når det ikke går strøm, blir det heller ikke spenningsfall.

I inverterende kopling ligger derfor potensialet på den inverterende inngangen (*Summing Point*) på tilnærmet null volt (*virtual ground*) når den ikke-inverterende inngangen er jordet.

Hvis  $U_{inn}$  er positiv vil det gå en strøm mot den inverterende inngangen,  $I_{inn}$ .

Siden det ikke går nevneverdig strøm inn i den inverterende inngangen, vil  $I_{inn}$  være lik  $I_F$ , men  $I_F$  går ut fra Summing Point.

Utgangsspenningen  $U_{ut}$  vil være  $R_F \cdot I_F$ . Spenningsfallet  $U_{RF}$  over  $R_F$  vil være rettet fra utgangen mot «virtual ground», motsatt rettet av  $U_{Rinn}$ . Minustegnet på høyre side av likhetstegnet viser dette.



- ☐ Ting du skal utføre vil være merket med en firkant.
- ☒ Lag en hake i firkanten etter hvert som du går fram, så har du oversikt over hvor langt du er kommet.

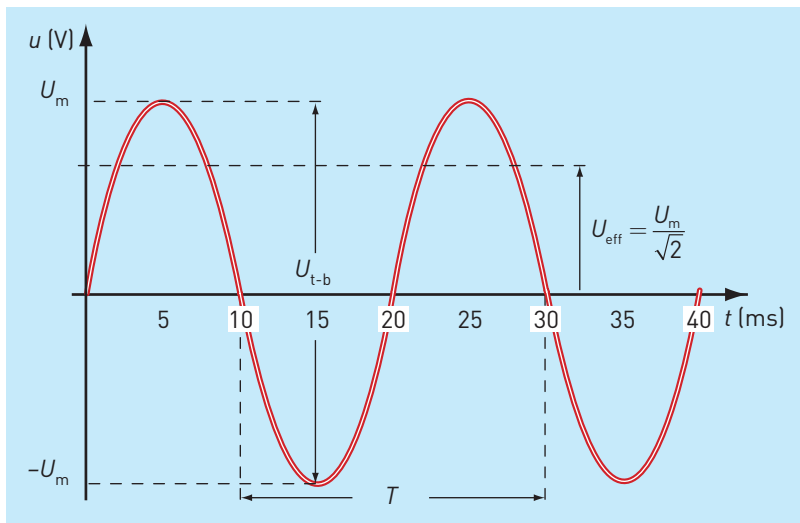


Du kan fylle ut direkte i PDF-dokumentet der du ser gule felt.



$$\begin{aligned} I_{inn} + I_F &= 0 \\ U_{Rinn} &= -U_{RF} \\ F_u = \frac{U_{ut}}{U_{inn}} &= -\frac{I_F \cdot R_F}{I_{inn} \cdot R_{inn}} = -\frac{R_F}{R_{inn}} \\ U_{ut} &= -\frac{R_F}{R_{inn}} \cdot U_{inn} \end{aligned}$$

## Definisjoner



$$T = \frac{1}{f} \text{ eller } f = \frac{1}{T}$$

$t$  = tid

$f$  = frekvens

$T$  = periodetid

$u$  = øyeblikksverdi

$U_m$  = positiv maksimalverdi  
amplitudeverdi referert til 0 V

$-U_m$  = negativ maksimalverdi  
amplitudeverdi referert til 0 V

$U_{eff}$  = effektivverdi

$$= \frac{U_m}{\sqrt{2}}$$

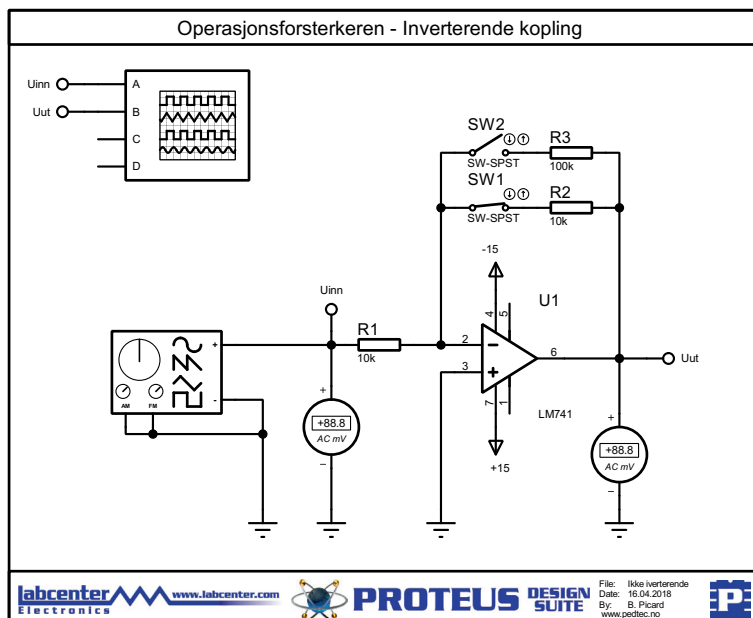
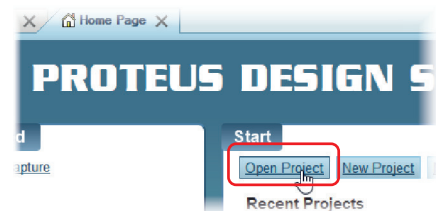
$$U_{t-b} = 2 \cdot U_m$$

## Åpne prosjekt

- ☐ Start Proteus.
- ☐ Klikk på Open Project.

## Inverterende kopling

- ☐ Åpne Inverterende.



Skjemaet over viser en *Inverterende forsterker*.

I tilbakekopplingsgrenene er det to resistorer som hver er seriekoplet med en bryter.



Signalgeneratoren er satt til 100 mV<sub>t-b</sub> og 400 Hz.

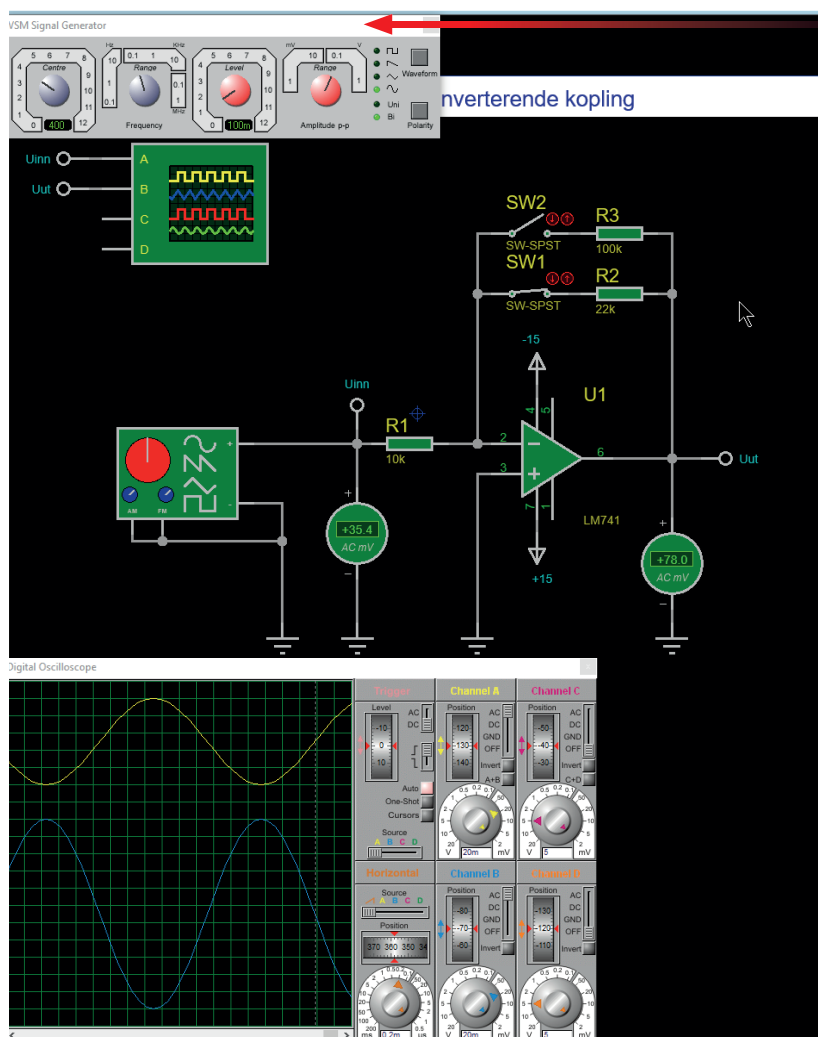
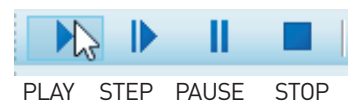
## Beregninger

- ☐ Beregn spenninger (effektivverdi) og forsterkning og før inn i tabellen under.

Generatorinnstillinger: $U_{t-b} = 100 \text{ mV}$ , $f = 400 \text{ Hz}$				
SW1	SW2	$U_{\text{inn}}$ Beregnet	$F_U$ Beregnet	$U_{\text{ut}}$ Beregnet
Lukket	Åpen			
Åpen	Lukket			

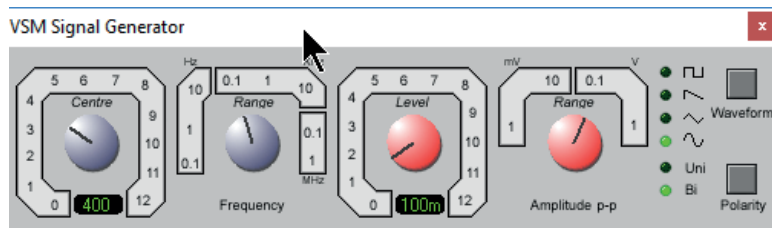
## Målinger

- ☐ Start simulering ved å klikke på Play nede til venstre eller trykk på funksjonstasten på F2 på tastaturet.
- ☐ Plasser generator og skop slik at du får god oversikt over knapper og skjerm.

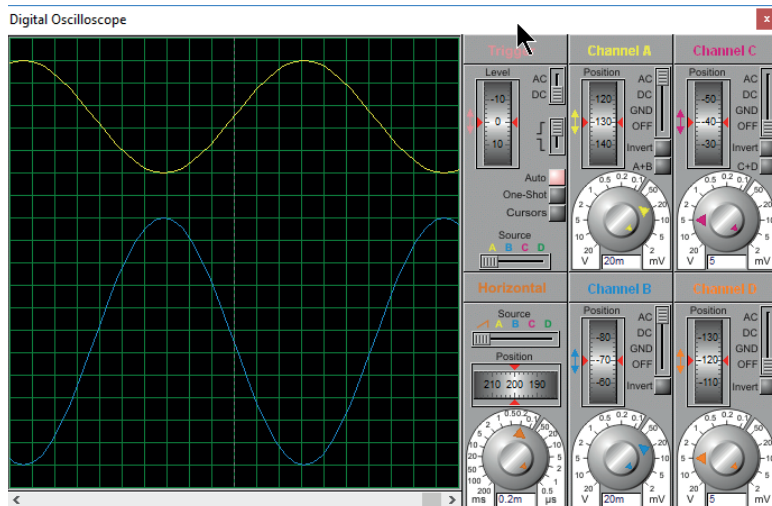


Klikk i overkant av instrumentet og hold museknappen inne mens du skyver instrumentet på plass. Se generator i bildet.

## Innstilling på generator



## Innstilling på oscilloskop



- ☐ Mål spenninger (effektivverdi) og forsterkning og før inn i tabellen under.

SW1	SW2	$U_{inn}$ Målt	$F_U$ Målt (*1)	$U_{ut}$ Målt
Lukket	Åpen			
Åpen	Lukket			

(\*1)  
Beregnet ut fra  
målt  $U_{inn}$  og  $U_{ut}$

- ☐ Kommenter eventuelle avvik mellom beregnede og målte verdier.




---

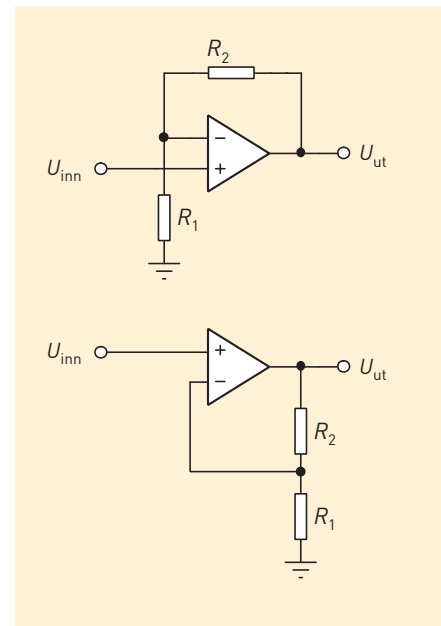
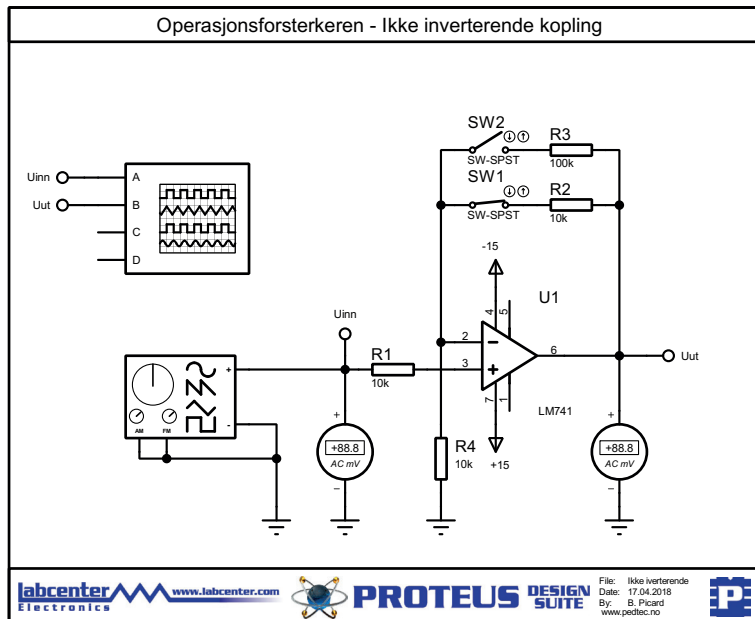


---



## Ikke-inverterende forsterker

☐ Åpne Ikkeinverterende.



To forskjellige tegnemåter

Skjemaet over viser en *Ikke-inverterende forsterker*.

I tilbakekoplingsgrenene er det to resistorer som hver er seriekopleet med en bryter.

Signalgeneratoren er satt til 100 mV<sub>t-b</sub> og 400 Hz.


## Beregninger

☐ Beregn spenninger (effektivverdi) og forsterkning og før inn i tabellen under.

Generatorinnstillinger: $U_{t-b} = 100 \text{ mV}$ , $f = 400 \text{ Hz}$				
SW1	SW2	$U_{inn}$ Beregnet	$F_U$ Beregnet	$U_{ut}$ Beregnet
Lukket	Åpen			
Åpen	Lukket			

$$F_U = \frac{U_{ut}}{U_{inn}} \quad F_U = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

## Målinger

☐ Start simulering ved å klikke på Play nede til venstre eller trykk på funksjonstasten på  på tastaturet.

☐ Plasser generator og skop slik at du får god oversikt over knapper og skjerm.

## Innstilling på generator og oscilloskop

☐ Samme innstillinger som tidligere.



☐ Mål spenninger og forsterkning og før inn i tabellen under.

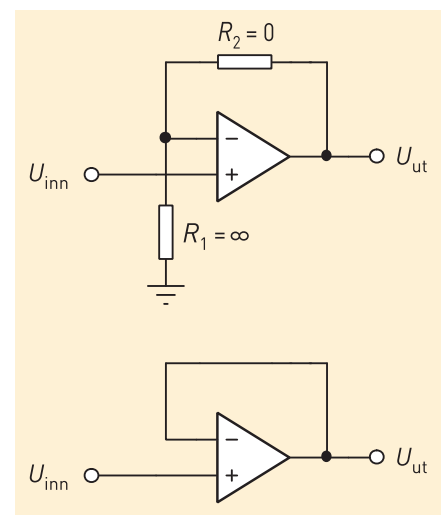
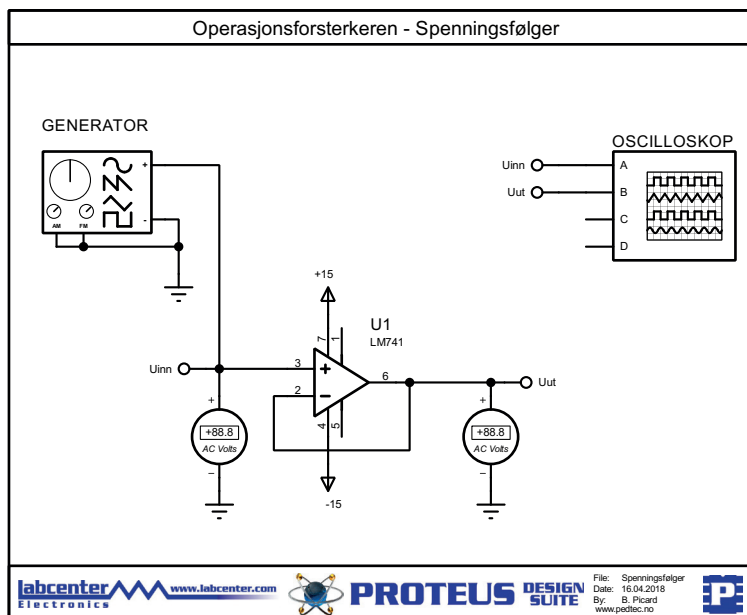
SW1	SW2	$U_{inn}$ Målt	$F_u$ Målt (*1)	$U_{ut}$ Målt	(*1) Beregnet ut fra målt $U_{inn}$ og $U_{ut}$
Lukket	Åpen				
Åpen	Lukket				

☐ Kommenter eventuelle avvik mellom beregnede og målte verdier.



## Spenningsfølger

☐ Åpne spenningsfølger.



$$F_u = \frac{U_{ut}}{U_{inn}}$$

$$F_u = 1 + \frac{R_2}{R_1} = 1 + \frac{0}{\infty} = 1$$

## Beregninger

☐ Beregn spenningen (effektivverdien)  $U_{inn}$ .

$U_{inn}$  beregnet =

☐ Beregn spenningen (effektivverdien)  $U_{ut}$ .

$U_{ut}$  beregnet =



På inngangen er en signalgenerator innstilt på 10 V<sub>t-b</sub> og 1 kHz.  
AC-voltmetre er innkoplet på inn- og utgang.  
Et oscilloskop er tilkopleet både inn- og utgang på kretsen.

- ☐ Beregn periodetiden  $T$

$T_{\text{beregnet}} =$

---

- ☐ Beregn spenningsforsterkningen  $F_U$

$F_{U \text{ beregnet}} =$

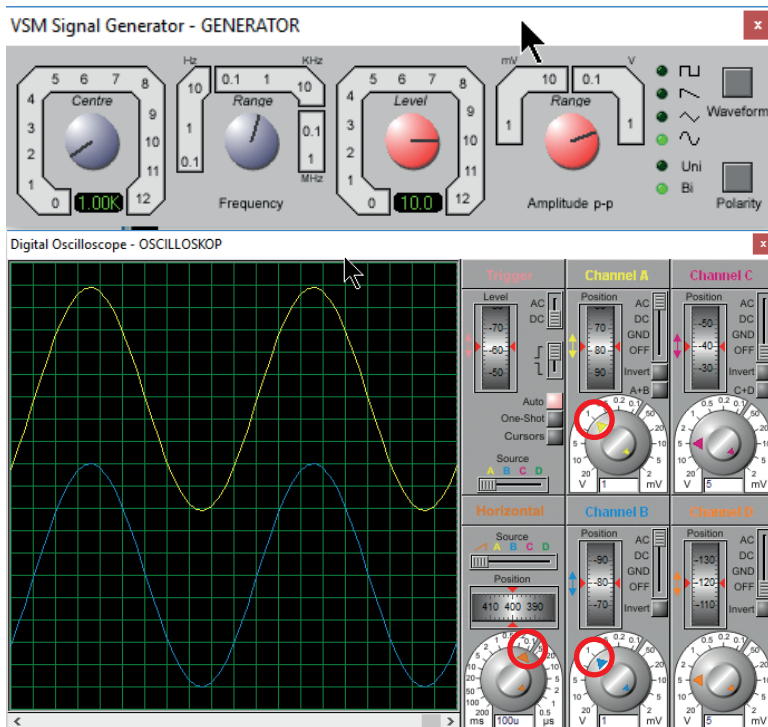
---

- ☐ Start simulering ved å klikke på Play nede til venstre eller trykk på funksjonstasten på **F2** på tastaturet.



- ☐ Plasser generator og skop slik at du får god oversikt over knapper og skjerm.

### Innstilling på generator og oscilloskop



Klikk i overkant av instrumentet og hold museknappen inne mens du skyver instrumentet på plass. Se oscilloskopet i bildet.

### Målinger

- ☐ Les av instrumentene:

$U_{\text{inn målt}} =$

---

$U_{\text{ut målt}} =$

---

$F_{U \text{ avlest}} =$

---

✎ Periodetiden  $T_{\text{målt}} =$

---

☐ Kommentér eventuelle avvik mellom beregnede og målte

✎

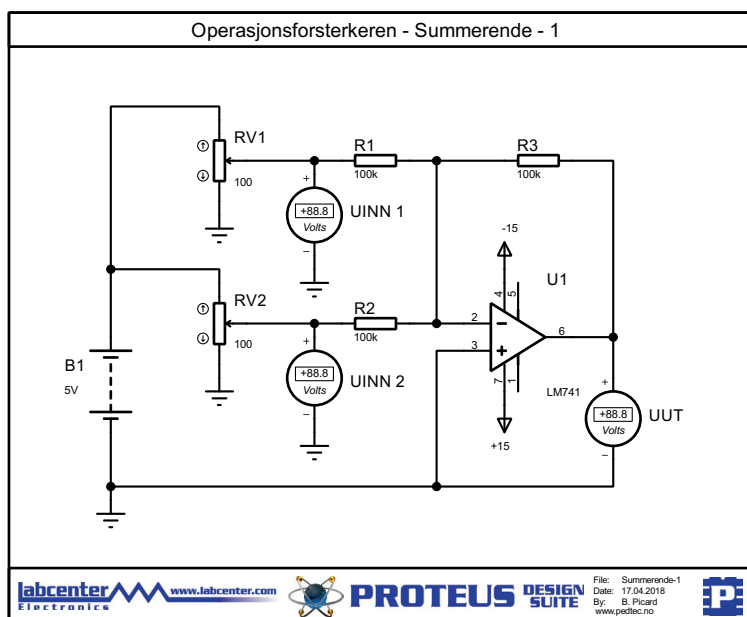
---



---

## Summerende forsterker

☐ Åpne summerende-1.



Figuren viser en summerende forsterker med to innganger. Batterispenningen  $B1 = 5\text{ V}$ . Potensiometrene RV1 og RV2 skal stå i midtstilling (50 %).

☐ Beregn spenningene på potensiometrenes midtuttak.

✎ UINN1 =

---

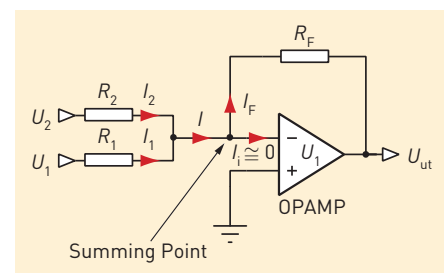
✎ UINN2 =

---

☐ Skriv formelen for spenningen på operasjonsforsterkerens utgang.

✎  $U_{\text{ut}} =$

---



Potensialet i Summing Point = 0.

$$I_1 = \frac{U_1}{R_1}$$

$$I_2 = \frac{U_2}{R_2}$$

$$I_F = \frac{U_{\text{ut}}}{R_F}$$

$$I = I_F$$


$$U_{\text{ut}} = -\left(\frac{R_F}{R_1} \cdot U_1 + \frac{R_F}{R_2} \cdot U_2\right)$$

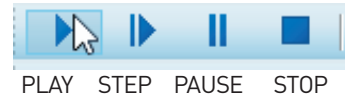


- ☐ Beregn spenningen på operasjonsforsterkerens utgang.

  $U_{ut} =$

---

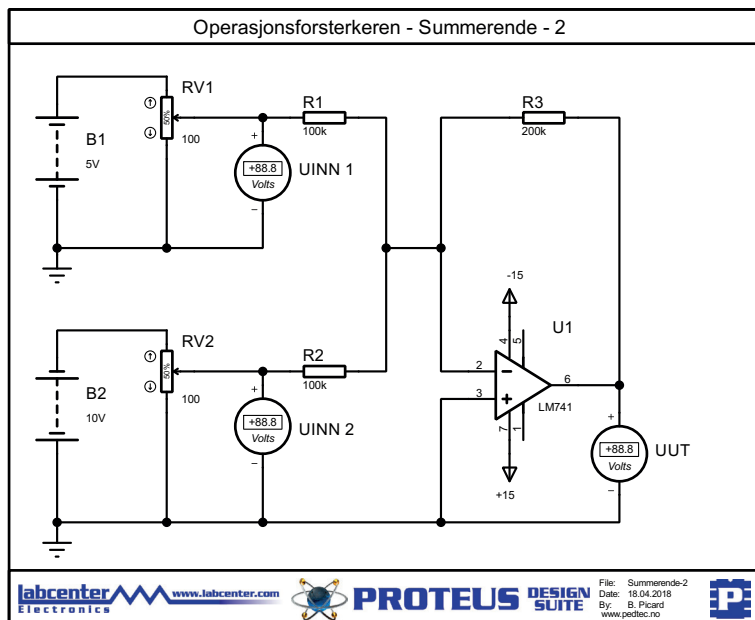
- ☐ Start simulering ved å klikke på Play nede til venstre eller trykk på funksjonstasten på  på tastaturet.



- ☐ Kontrollér beregningene dine. Stemmer de? Kommentér eventuelle avvik mellom beregnede og målte verdier.



- ☐ Åpne summerende-2.



Figuren viser en summerende forsterker med to innganger. Batterispenningene  $B1 = 5\text{ V}$ ,  $B2 = 10\text{ V}$ . Potensiometrene RV1 og RV2 skal stå i midtstilling (50 %).

- ☐ Beregn spenningene på potensiometrenes midtuttak.

  $U_{INN1} =$

---


  $U_{INN2} =$

---

- ☐ Beregn spenningen på operasjonsforsterkerens utgang.

  $U_{ut} =$

---

- ☐ Start simulering ved å klikke på Play nede til venstre eller trykk på funksjonstasten på  på tastaturet.

- ☐ Kontrollér beregningene dine. Stemmer de? Kommentér eventuelle avvik mellom beregnede og målte verdier.



- ☐ Justér RV1 slik at skyveren står på topp (klikk på pil opp). RV2 skal stå i midtstilling.

- ☐ Les av spenningene på inngangene.

  $URV1 =$

---

  $URV2 =$

---

- ☐ Beregn spenningen på operasjonsforsterkerens utgang.

  $U_{ut} =$

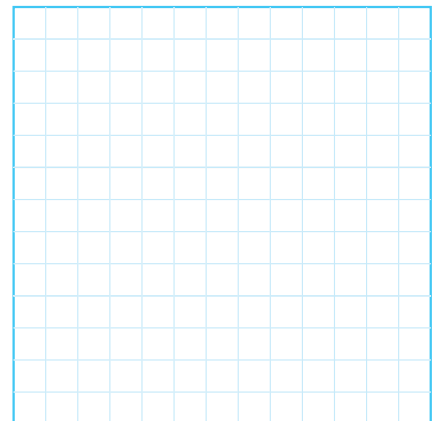
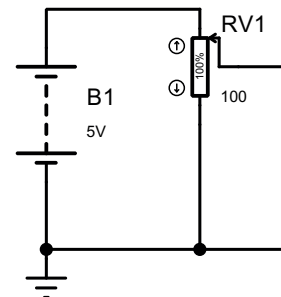
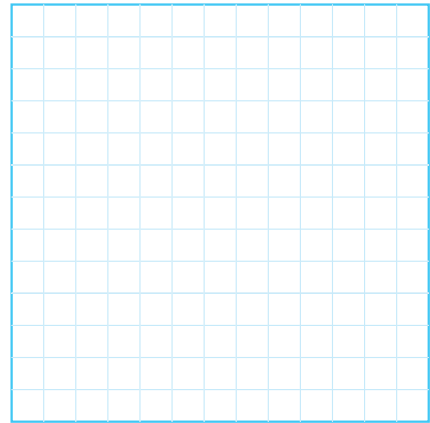
---

- ☐ Les av spenningene på utgangen.

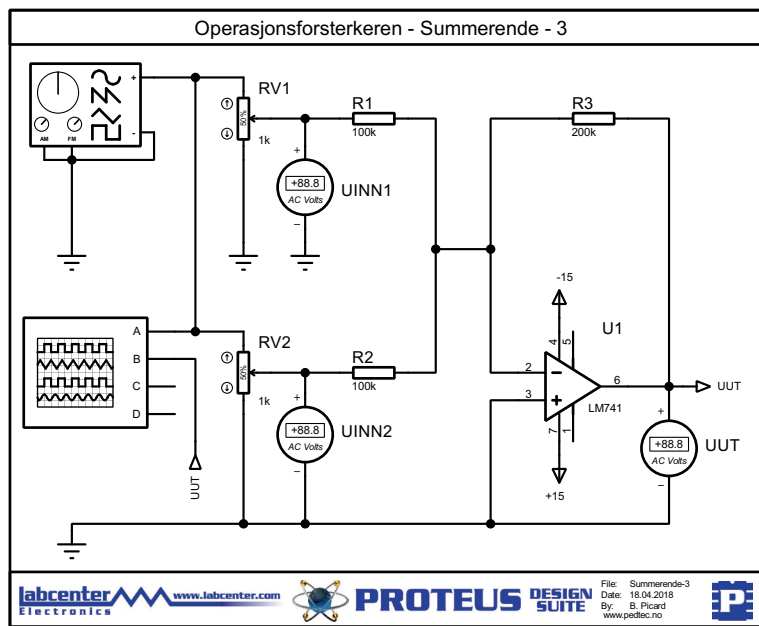
  $U_{INN1} =$

---

- ☐ Kommentér eventuelle avvik mellom beregnede og målte verdier.



☐ Åpne summerende-3.



Figuren viser en ny variant av summerende forsterker, denne gangen med vekselspenning inn på inngangspotensiometrene.

DC-voltmetrene er byttet ut med AC-voltmetre.  
Disse måler effektivverdien av en sinusspenning.

Signalgeneratorens innstillinger er:

$$u_{t-b} = 1.4 \text{ V}$$

$$f = 1.0 \text{ kHz}$$

☐ Hva blir generatorspenningens amplitudeverdi?

$$\hat{u} =$$

☐ Hva blir generatorspenningens effektivverdi?

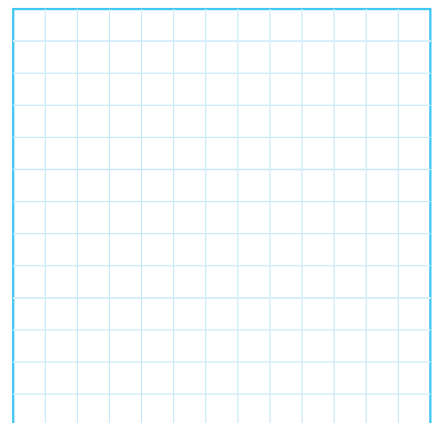
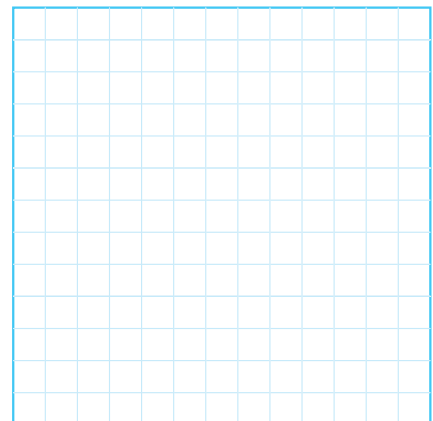
$$U =$$

Potensiometrene skal stå i midtstilling.

☐ Regn ut spenningen (effektivverdi) på voltmetrene?

$$U_{INN1} =$$

$$U_{INN2} =$$



- ☐ Beregn spenningen på operasjonsforsterkerens utgang.

$U_{UT} =$

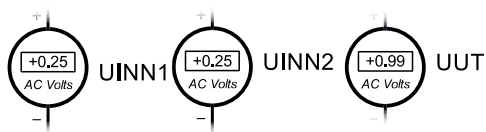
---

- ☐ Beregn spenningen på operasjonsforsterkerens utgang når skyveren på begge potmetrene er justert helt opp?

$U_{UT} =$

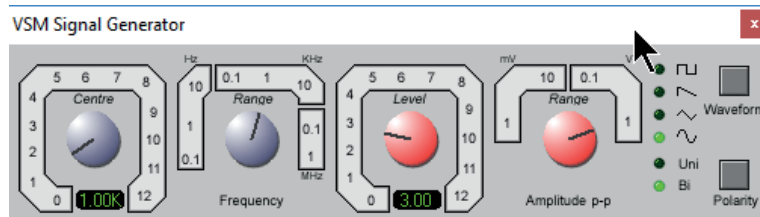
---

- ☐ Start animasjonen. Kontrollér alle svarene dine. Kommentér eventuelle avvik mellom målte og beregnede verdier.

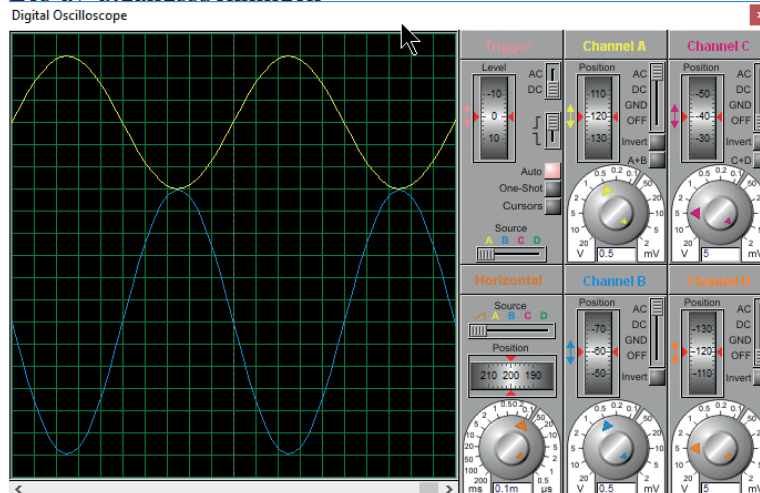


---

- ☐ Endre signalgeneratorens  $u_{t-b}$  til 3.0 V.



- ☐ Les av utgangsspenningen



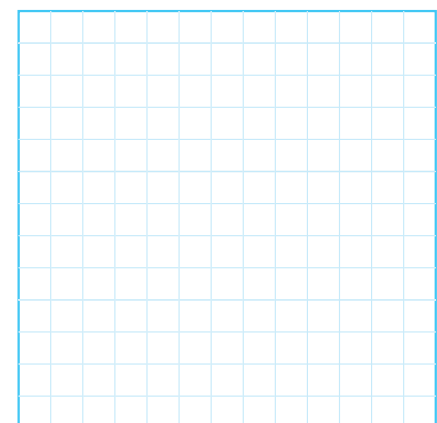
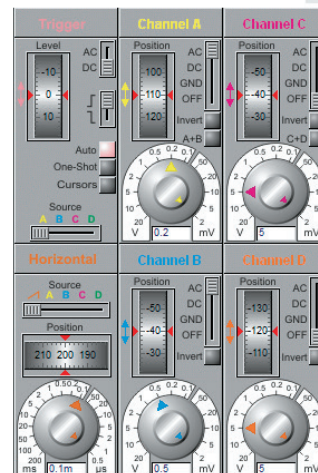
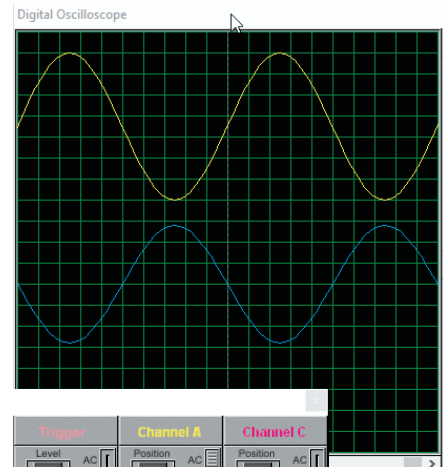
$U_{UT} =$

---

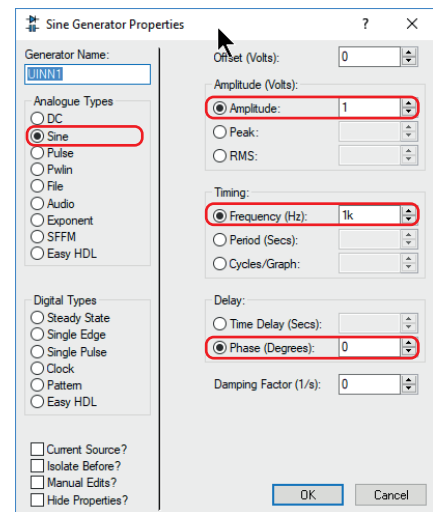
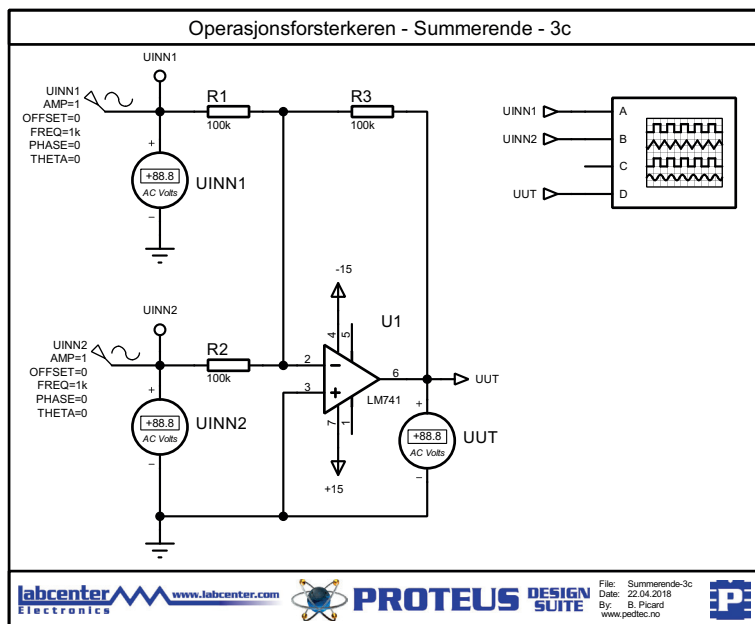
- ☐ Kontrollér ved beregning.

$U_{UT} =$

---



□ Åpne summerende-3c.



Begge generatorene har samme innstilling

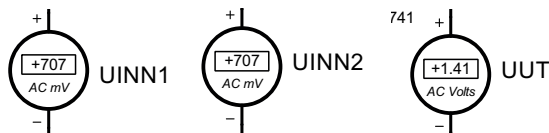
Amplitudeverdien  $u$  er satt til 1 V, frekvensen  $f = 1$  kHz.

□ Beregn følgende effektivverdier:

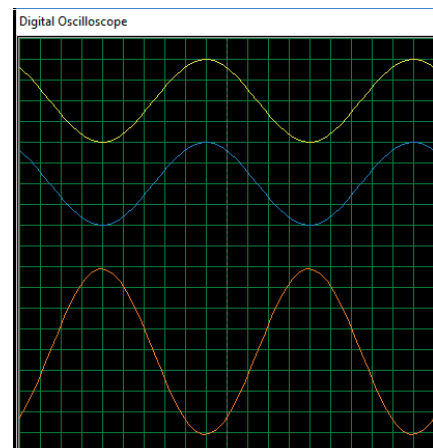
$U_{INN1} = U_{INN2} =$

$U_{UT} =$

□ Start simulering og kontrollér de beregnede verdiene. Legg merke til kurvene på oscilloskopet.

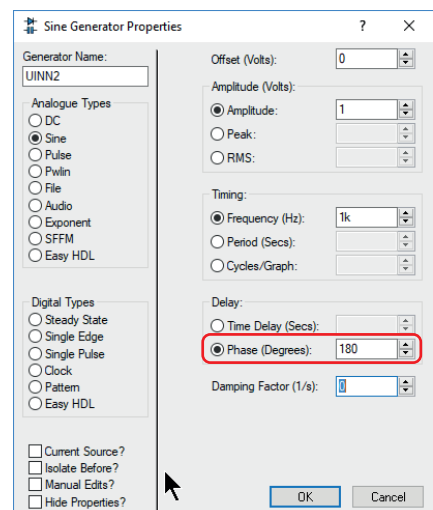


Kommentér eventuelle avvik:

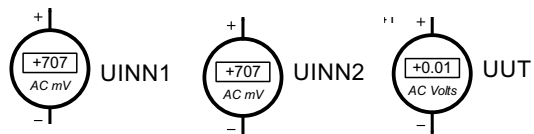


□ Stopp simulering, dobbeltklikk på generator UINN2 og editér som vist.

□ Start simulering, les av instrumentene og sjekk kurvene på oscilloskopet



☐ Kommenter måleresultater og kurver.



summerende-3d




---



---



---

I eksemplet over blir signalet UINN2 fasevendt  $180^\circ$  (invertert). Voltmeteret UINN2 viser det samme som før, men voltmeteret på utgangen og oscilloskopet viser endring.

☐ Hva er endret?

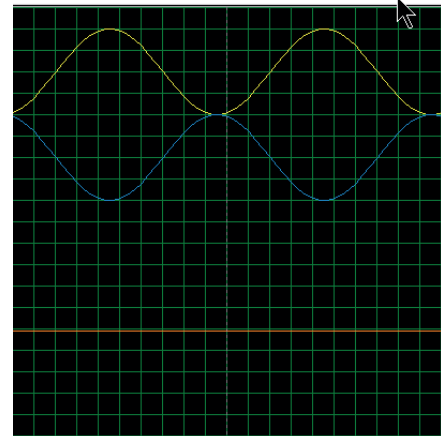



---



---

Digital Oscilloscope



## Støyreduksjon

Vi har sett at om vi summerer to signaler som er fasevendt (mot-satt rettet) blir resultatet null på utgangen.

Dette prinsippet brukes i hodetelefoner med støyreduksjon.

En mikrofon fanger opp omgivelsesstøy.

Signalet fra mikrofonen inverteres og summeres med lydkilden.

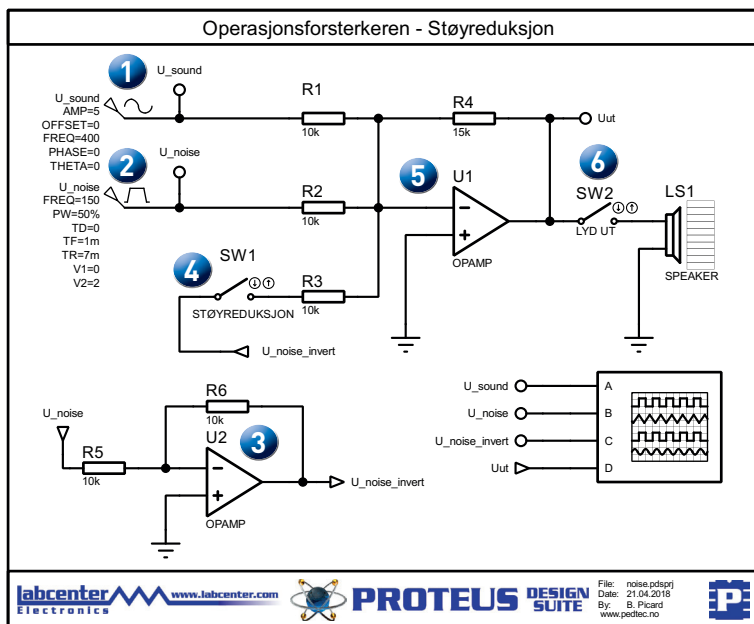
Resultatet høres ut som en «ren» lydkilde, men er i virkeligheten sammensatt av tre signaler:

- Den originale lyden
- Omgivelsesstøyen
- Den inverterte omgivelsesstøyen

Eksemplet som følger viser et eksempel på denne metoden å redusere støy.



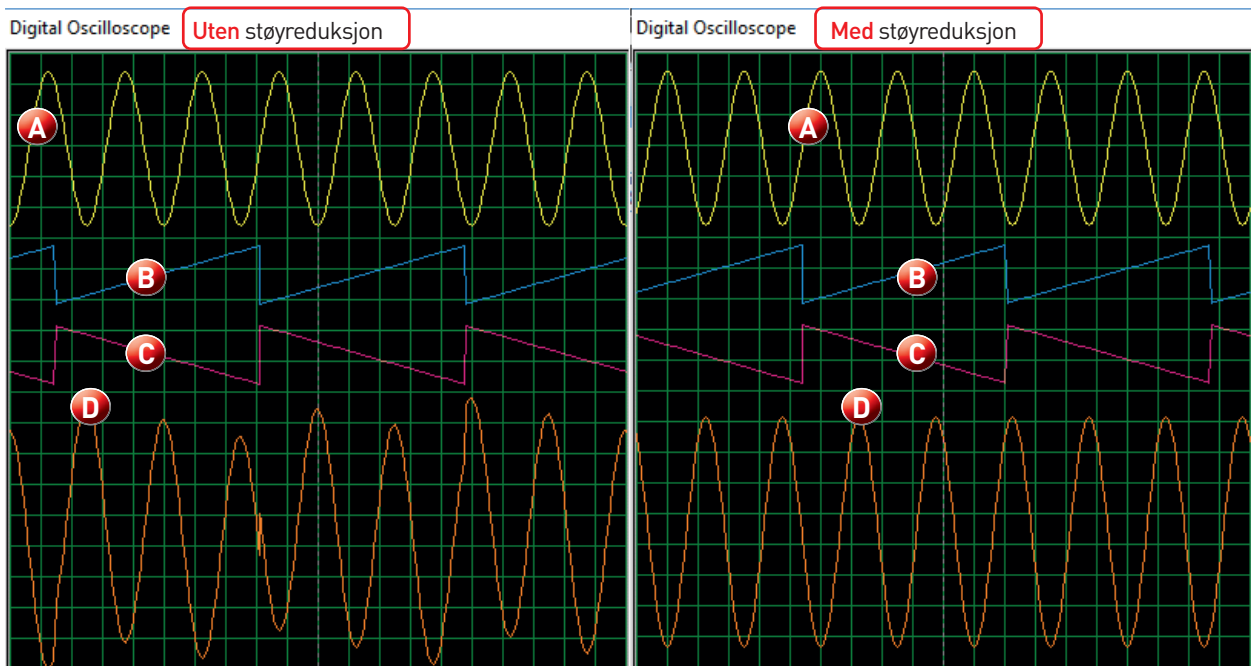
☐ Åpne noise.



1. Audiosignal inn (sinus)
2. Støysignal
3. Inverterer støysignal
4. SW1 kopler inn invertert støysignal
5. Summerende forsterker
6. SW2 kopler til høyttaler  
(Har du lydkort kan du høre signalene, forvrengt når SW1 er åpen og støyredusert med SW1 lukket)

☐ Start simulering.

☐ SW1 og SW2 skal være åpne (venstre skopbilde).



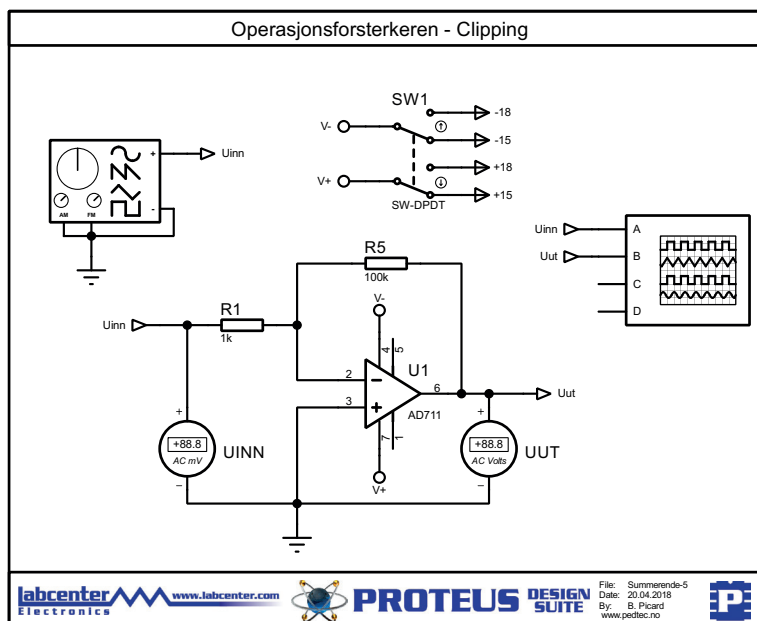
☐ Lukk SW1 for å kople inn støyreduksjon (høyre skopbilde).

☐ Legg inn SW2 for å høre lyd (krever lydkort).

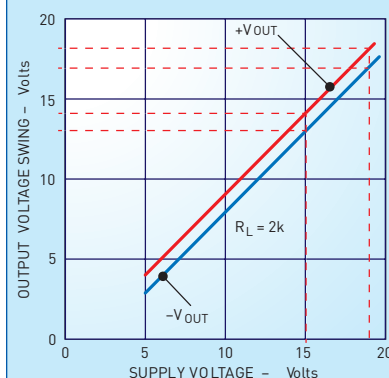
- A** Lydsignal
- B** Støysignal
- C** Invertert støysignal
- D** Utsignal

## Clipping

- ☐ Åpne fila clipping og start animasjonen.



Figuren viser maksimalt spennings-sving for forskjellige forsyningsspenninger.



Ved 15 V forsyningsspenning kan spenningsvinget ligge på ca. 13–14 V DC eller amplitudeverdi på et sinussignal.

Det betyr maksimalt  $28 V_{t-b}$ .

- ☐ Plasser generator og skop slik at du får god oversikt over knapper og skjerm.

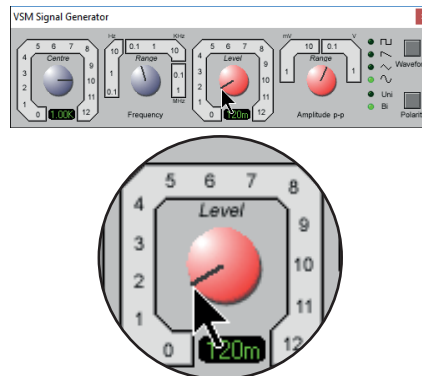
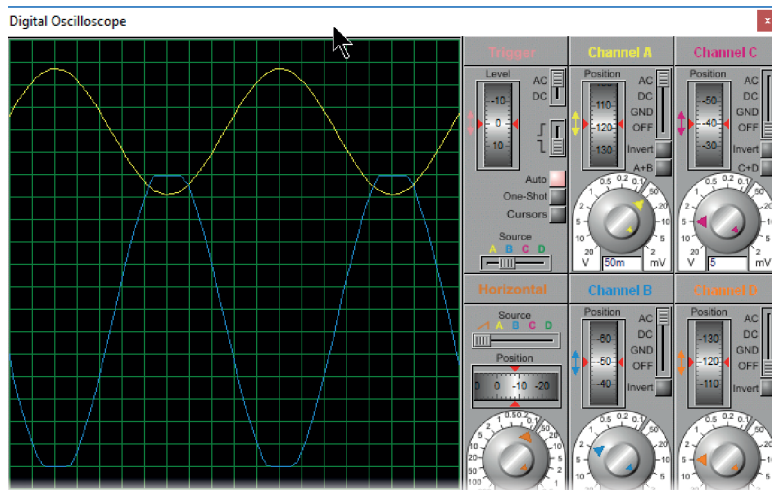
- ☐ Beregn kretsens forsterkning.

$$F_u =$$

- ☐ Beregn maksimal spenning (effektivverdi) på utsignalet  $U_{ut}$ .

$$U_{ut} =$$

- ☐ Justér Level-knappen på generatoren til topp og bunn på utsignalet på oscilloskopet så vidt «flater ut».





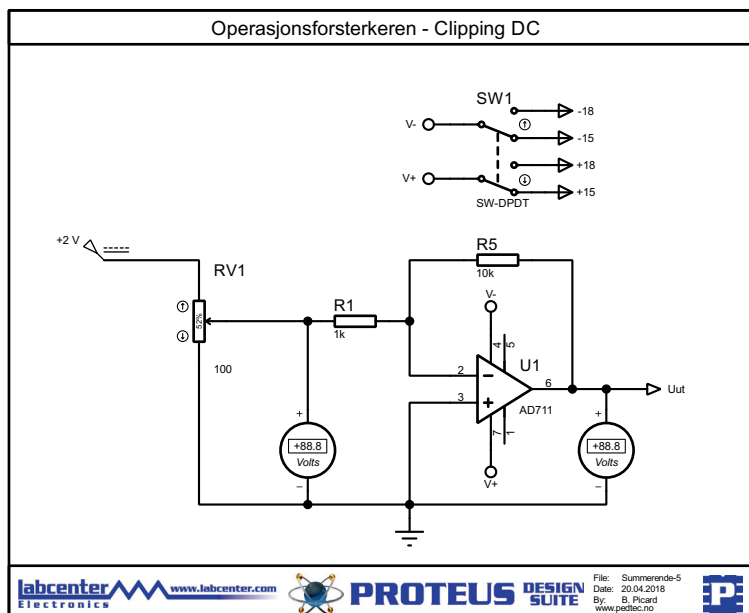
- ☐ Les av på voltmeteret på utgangen.
- ☐ Stemmer det med dine beregninger?



- ☐ Klikk på SW1 slik at forsyningsspenningen blir  $\pm 18$  V og følg med på oscilloskopet.
- ☐ Hva skjer?



- ☐ Åpne fila clipping\_DC og start animasjonen.

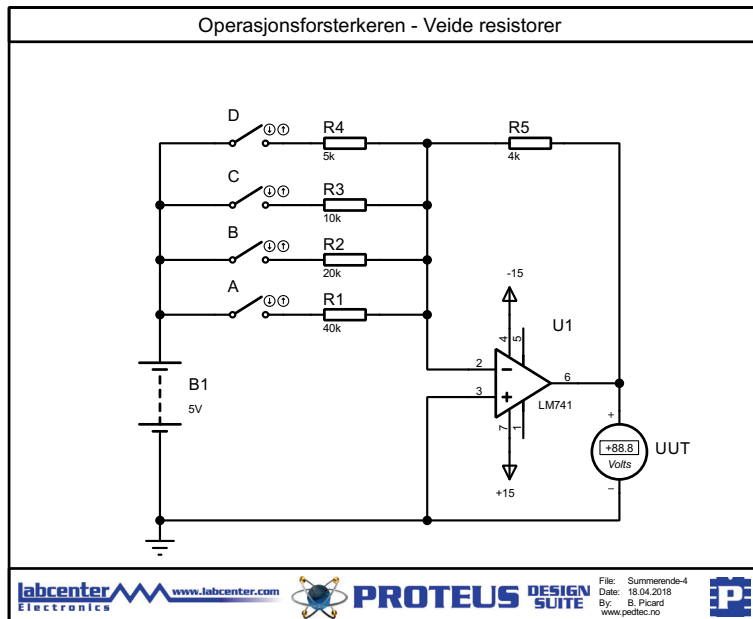


- ☐ Justér potmeteret trinnvis oppover til spenningen på voltmeteret på utgangen ikke lenger øker.
- ☐ Endre forsyningsspenningen til  $\pm 18$  V og følg med voltmeteret på utgangen.
- ☐ Forklar hva som skjer.



## Summerende forsterker med veide innganger

□ Åpne fila summerende-4 og start animasjonen.



- Kople inn bryterne A–D etter tabellen til høyre.
- Notér spenningen på voltmeteret UUT i samme tabell for hver innstilling av bryterne A–D.
- Kan du ut fra måleresultatene bestemme hvilken vekt (i det binære tallsystemet) de ulike inngangene har?

✎ Inngang A =

---

✎ Inngang B =

---

✎ Inngang C =

---

✎ Inngang D =

---

Binært inn				Analog ut
D	C	B	A	UUT (V)
0	0	0	1	
0	0	1	0	
0	1	0	0	
1	0	0	0	

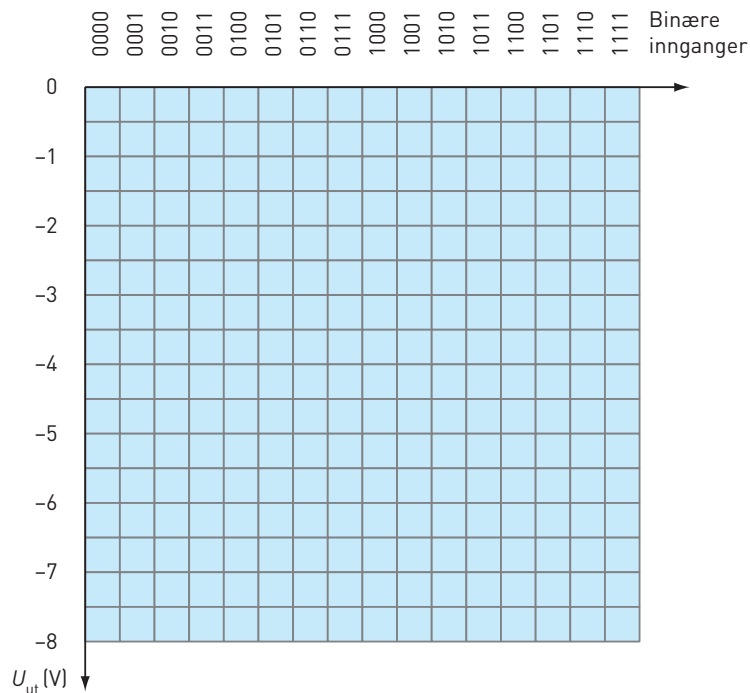


- ☐ Kombiner inngangene som vist i tabellen til høyre og notér utgangsspenningen UUT for hver kombinasjon.

Vi har i denne øvelsen brukt en summerende forsterker som omformer. Hva kalles denne omformeren?

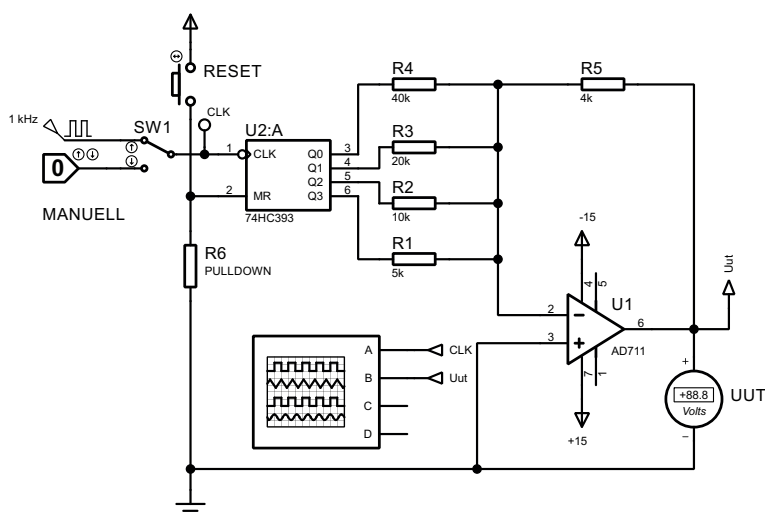


- ☐ Skissér utspenningen UUT som funksjon av inngangssignalene i figuren under.

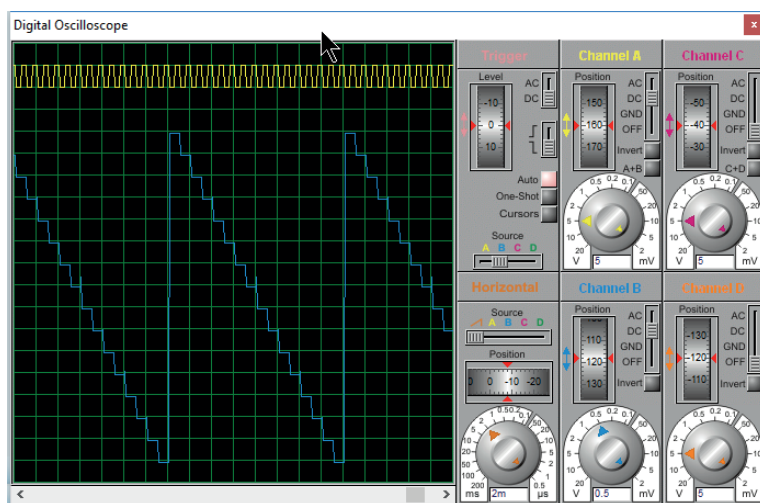


Binært inn					Analog ut
DEC.	D	C	B	A	UUT (V)
0	0	0	0	0	
1	0	0	0	1	
2	0	0	1	0	
3	0	0	1	1	
4	0	1	0	0	
5	0	1	0	1	
6	0	1	1	0	
7	0	1	1	1	
8	1	0	0	0	
9	1	0	0	1	
10	1	0	1	0	
11	1	0	1	1	
12	1	1	0	0	
13	1	1	0	1	
14	1	1	1	0	
15	1	1	1	1	

På figuren under ser du at bryterarrangementet fra forrige bilde er byttet ut med en 4-bits binærteller. Telleren kan kjøres manuelt eller fra en klokkegenerator, og den kan resettes.



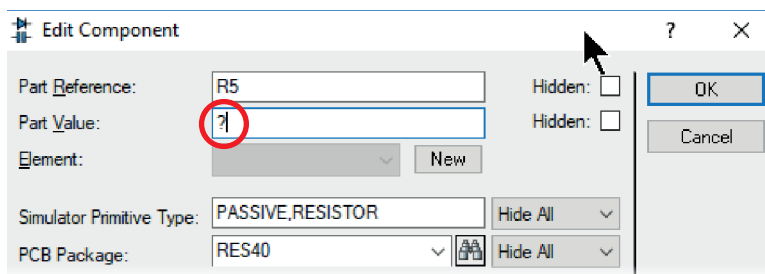
- ☐ Åpne summerende-5
- ☐ Start simulering.
- ☐ Plasser skop slik at du får god oversikt over knapper og skjerm.
- ☐ Sett venderen SW1 slik at du kan klokke generatoren manuelt.
- ☐ Start simulering, reset telleren og klokke telleren U2:A fra  $0_2-1111_2$  og sjekk at du får de samme spenningene ut nå som i forrige øving.
- ☐ Sett venderen SW1 slik at du har 1 kHz klokkepulser.
- ☐ Stemmer skopbildet med det du skisserte?



- ☐ Stopp animasjonen.
- ☐ Beregn verdien på R5 for at det binære tallet 0011 skal gi 3 V på utgangen av opampen, altså hvert trinn gir 1.0 V.

R5 =

- ☐ Dobbeltklikk på R5 og gi den den verdien du har beregnet.



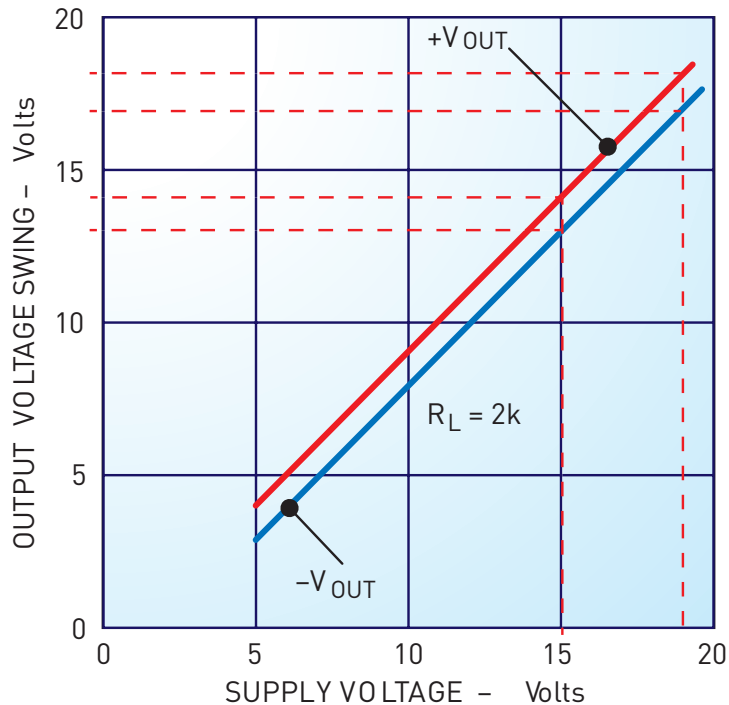
☐ summerende-6

- ☐ Lukk boksen og start simulering.
- ☐ Sett venderen SW1 til manuell klokke og start animasjonen.



☐ Klokk fra 0 til  $1111_2$  og før verdien på voltmeteret i tabellen til høyre.

☐ Studer opampens utgangskarakteristikken nedenfor og forklar hvorfor du ikke får «full spenning» på utgangen.



DEC.	Binært inn				Analog ut
	D	C	B	A	UUT (V)
0	0	0	0	0	
1	0	0	0	1	
2	0	0	1	0	
3	0	0	1	1	
4	0	1	0	0	
5	0	1	0	1	
6	0	1	1	0	
7	0	1	1	1	
8	1	0	0	0	
9	1	0	0	1	
10	1	0	1	0	
11	1	0	1	1	
12	1	1	0	0	
13	1	1	0	1	
14	1	1	1	0	
15	1	1	1	1	



☐ Stopp animasjonen og dobbeltklikk på «power-pinnen» +15V og endre til +18V.

☐ Endre også «power-pinnen» -15V til -18V.

☐ Start animasjonen og klokk fra 0 til  $1111_2$  og observer verdier på voltmeteret.

☐ Stemmer de nå?

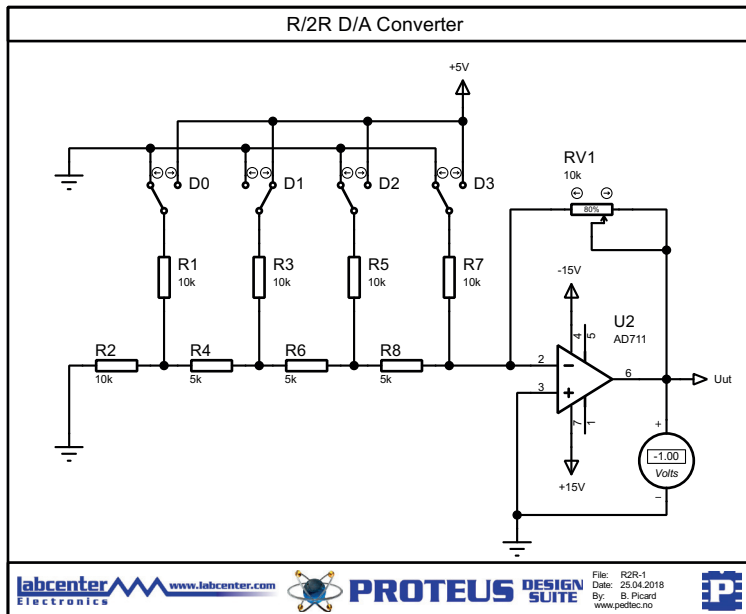
☐ summerende-7

Forklar.

## Summerende forsterker med R/2R-nettverk

### The R/2R Ladder D/A Converter

En annen metode av D/A-konvertering ser du på figuren under.



□ R2R-1

Her unngår vi problematikken med mange resistorverdier med lav toleranse.

R/2R-nettverket bruker bare to resistorverdier.

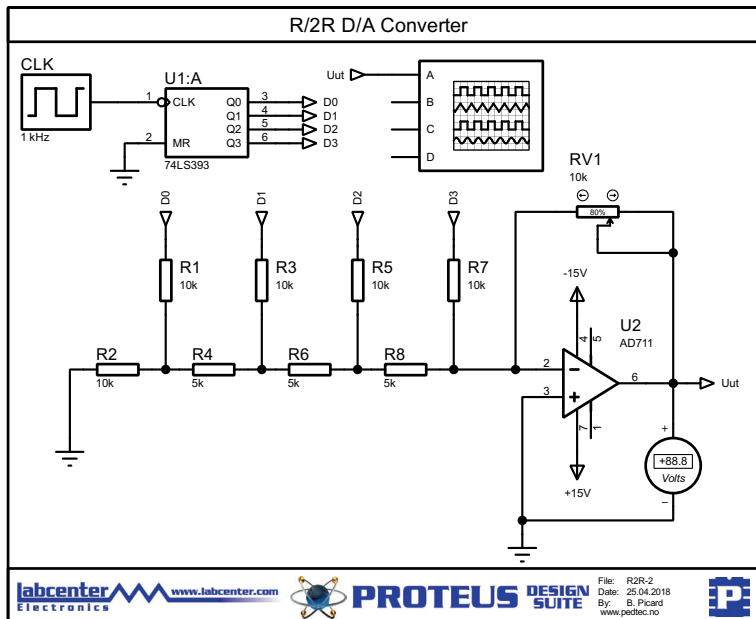
Slike nettverk får vi i integrerte pakker, noe som også gjør konstruksjonen enkel.

Resistorene R1, R3, R5 og R7 er koplet til et bryterarrangement som kan legge disse resistorene til høyt eller lavt nivå (0 V og +5V).

RV1 er justert slik at hvert trinn gir 0,5 V, altså 7,5 V for 1111<sub>2</sub>.



Kopler vi inngangene D0-D3 til en 4-bits teller og kopler et oscilloskop på utgangen vil vi se at vi får det samme mønsteret som da vi målte på D/A-konverteren med veide resistorer.



□ R2R-2

