



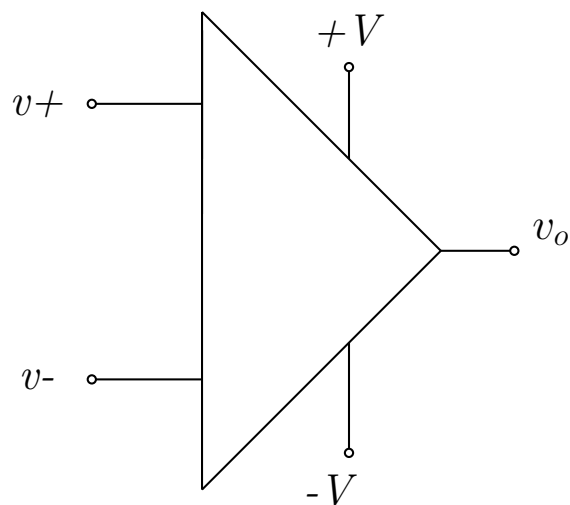
<h1>Operasjonsforsterker</h1>	
Tittel: Operasjonsforsterker	
Forfattere: Andreas Lindeman	
Versjon: 1.2	Dato: 30.09.2025

Innhold

1	Problembeskrivelse	1
2	Prinsipiell løsning	4
2.1	Arkitektur og funksjonell oppdeling	4
2.2	Biasnettverk og strømsetting (R_1, R_2, R_S)	5
3	Realisering og test	5
3.1	Komponent valg	5
3.2	Fosterkningsfaktor for åpen løkke-forsterkning	6
3.2.1	Åpen løkke-forsterkning med $100k\Omega$ last motstand	7
3.2.2	Åpen løkke-forsterkning med 100Ω last motstand	8
3.3	Forsterkningsfaktor med negativ tilbakekobling	9
3.3.1	Negativ tilbakekobling med 100Ω last motstand	10
3.3.2	Negativ tilbakekobling med $100k\Omega$ last motstand	11
3.4	Analyse av resultater	12
3.5	Kresten	13
4	Konklusjon	15

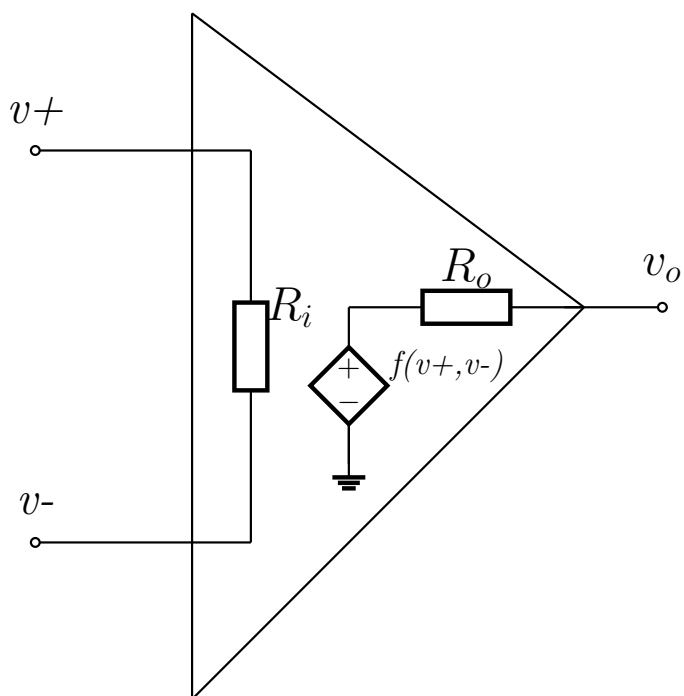
1 Problembeskrivelse

Vi skal prøve og teorisere samt realisere en operasjonsforsterker (opamp). En opamp er en krets med fem tilkoblingspunkter som vist i figuren under.



Figur 1: Oversikt over opamp utganger

Denne opampen kan også modelleres slik som figuren under:



Figur 2: modell av en opamp

Vi studerer her en operasjonsforsterker (*opamp*) som et elektronisk system med fem tilkoblingspunkter, vanligvis illustrert ved et symbol som i Figur 1 og en forenklet modell som i Figur 2. I teksten nedenfor brukes følgende notasjon: inngangsspenningene v_+ og v_- , utgangsspenningen v_o , åpen-løkke-forsterkningen A (dimensjonsløs), inngangsmotstand R_i i ohm, utgangsmotstand R_o i ohm, samt lastmotstand R_L i ohm.

Systemets oppgave

Operasjonsforsterkerens grunnleggende oppgave er å realisere en elektrisk enhet som ved gitte differensielle inngangsspenninger $v_+ - v_-$ leverer en høyforsterket, kontrollert utgangsspenning v_o innenfor forsyningsspennings grenser. For en idealisert modell gjelder

$$v_o = \begin{cases} \min\{V, A(v_+ - v_-)\}, & v_+ - v_- > 0, \\ \max\{-V, A(v_+ - v_-)\}, & v_+ - v_- < 0, \end{cases} \quad (1)$$

der $\pm V$ er metningsnivåene bestemt av forsyningsspenningsene. I denne realiseringen fastsettes forsyningsspenningen til

$$V_{\text{supply}} = \pm 5 \text{ V}.$$

I praksis vil en reell opamp avvike fra (1) ved at R_i og R_o er endelige, at responsen $v_o = f(v_+, v_-)$ ikke er perfekt lineær for alle differensialspenninger, og at forsterkningen A avhenger av frekvens f . Hensikten er å beskrive og måle disse avvikene kvantitativt for å kunne sammenligne med forventet atferd.

Krav og målbare egenskaper

Systemet skal dimensjoneres og testes med følgende målbare størrelser og kriterier:

1. Forsyningsspenningen skal være $\pm 5 \text{ V}$ som angitt.
2. **Åpen-løkke forsterkning ved sinuspåtrykk:** Forsterkning $A(f)$ må måles ved en inngangssinus med frekvens $f = 1 \text{ kHz}$. Her menes den differensielle forsterkningen som relaterer smådifferensialen $v_+ - v_-$ til utgangen v_o i åpen-løkke-konfigurasjon.
3. **Total harmonisk distorsjon (THD):** THD for utgangen når inngangssignalet er en sinusbølge ved $f = 1 \text{ kHz}$. THD uttrykkes i prosent (%).
4. **Lastbetingelser:** Begge størrelser ovenfor skal måles for to ulike lastmotstander

$$R_{L,1} = 100 \text{ k}\Omega,$$

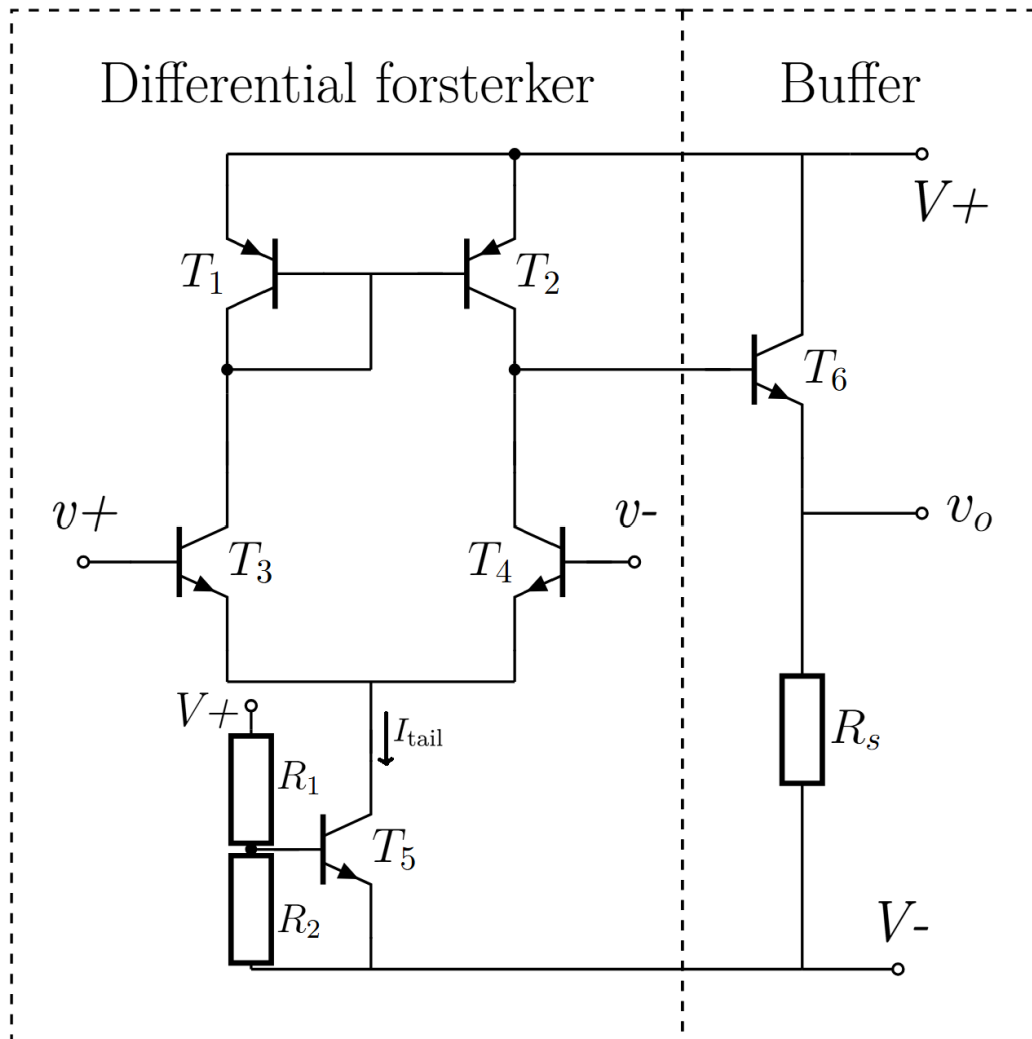
$$R_{L,2} = 100 \Omega,$$

for å dokumentere hvordan lastkretsen påvirker forsterkningen og forvrengningen.

5. **Inverterende forsterkerkobling:** Samme målinger (åpen-løkke-forsterkning og THD ved $f = 1 \text{ kHz}$ og de to lastene) skal også gjennomføres når opampen er koblet som en inverterende forsterker med nominell gevinst 10 (dvs. $v_o = -10 v_{\text{in}}$ under ideelle forhold). Her skal komponentverdier for inngangs- og tilbakekoplingsnettverket angis og begrunnes.

2 Prinsipiell løsning

Vi studerer en operasjonsforsterker (opamp) som et elektronisk system med inngangene v_+ , v_- , forsyningene $\pm V$ og utgangen v_o . I figuren under ser du hvordan en slik operasjonsforsterker kan se ut.



Figur 3: Opamp design delt inn i *differential forsterker* og *buffer*

Denne figuren viser de viktigste komponentene som er omtalt i teksten: transistorer merket T_1 – T_6 , samt bias- og strømsetttere representert ved motstandene R_1 , R_2 og seriemotstanden R_s .

2.1 Arkitektur og funksjonell oppdeling

Som vist i Figur 3 er opampen delt i to hovedblokker:

1. **Differensiell inngangsførsterker.** Realiseres ved et differensialpar (se venstre del av figuren) og en tail-strømkilde. Inngangene v_+ og v_- mates inn på transistorbasene T_3 og T_4 , mens transistorene T_1 og T_2 danner en strømdeler.
2. **Buffer/utgangstrinn.** Realiseres som emitterfølger (høyre del av Figur 3, med transistor T_6 som utgangsfølger). Bufferen leverer lav utgangsmotstand og gjør det mulig å drive både høye og lave lastverdier R_L .

2.2 Biasnettverk og strømsetting (R_1, R_2, R_S)

Detaljene for bias og tail-strøm er vist i Figur 3. Her er de viktigste prinsippene:

- Motstandene R_1 og R_2 danner en spenningsdeler som setter et referansenivå for basis til strømtransistoren (T_5 i figuren), og dermed bestemmer tail-strømmen gjennom differensialparet.
- R_S (seriemotstand ved emitter/utgangsfølger) brukes for å begrense emitterstrøm, bidra til termisk stabilitet og eventuelt forbedre lineæritet ved høyere utgangsstrømmer.
- Tail-strømmen I_{tail} bestemmes av referansespenningen fra R_1/R_2 og emitter-/baseforspenningen til strømtransistoren, slik at forenklet:

$$I_{\text{tail}} \approx \frac{V_{\text{ref}} - V_{BE}}{R_{\text{tail}}}.$$

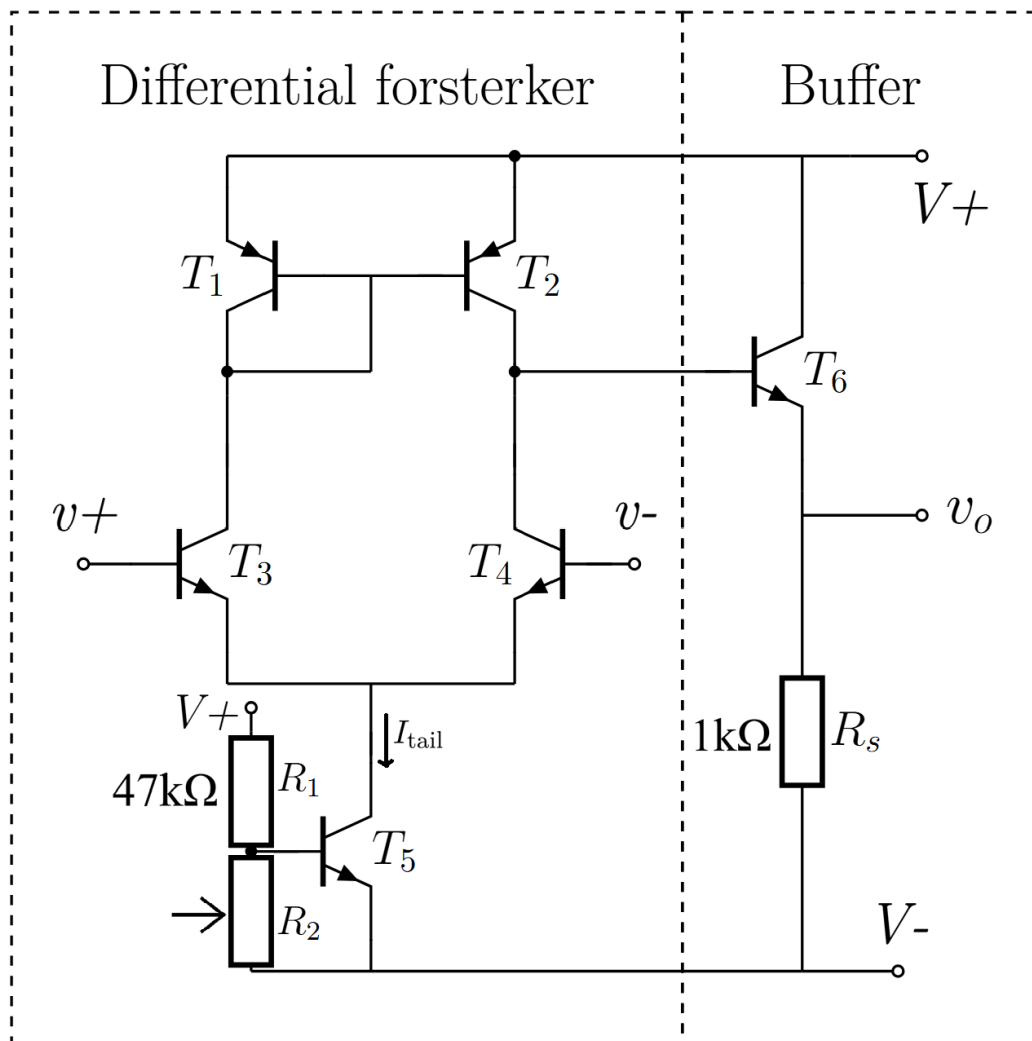
3 Realisering og test

3.1 Komponent valg

For å realisere kretsen må vi først velge riktig komponenter for den ønskede kretsen vist i 3. Vi velger ut ifra de tilgjengelige komponentene PNP transistorer av modell *BC557B* og NPN transistorer av modell *BC547B*.

For verdien R_s valgte vi $1k\Omega$ dette er for å ikke få for mye strøm over bufferen.

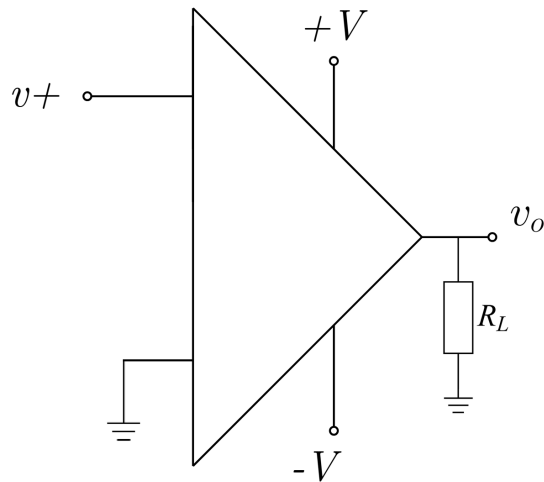
For verdien på R_1 og R_2 må vi velge en verdi som passer for å base transistoren T_5 , her kobler vi opp en stor resistor som R_1 , jeg valgte $47k\Omega$, og et potensiometer for R_2 for å lettere kunne eksprementere oss fram til ønsket verdi.



Figur 4: Krets med spesifiserte verdier

3.2 Fosterkningsfaktor for åpen løkke-forsterkning

Vi har lyst til å måle forsterkning A når kretsen blir påført et signussignal med frekvens $f = 1kHz$. Vi skiller mellom to tilfeller, et hvor lastmotstanden er 100Ω , og et hvor lastmotstanden er $100k\Omega$. Vi kobler opp kretsen som vist i figuren under:

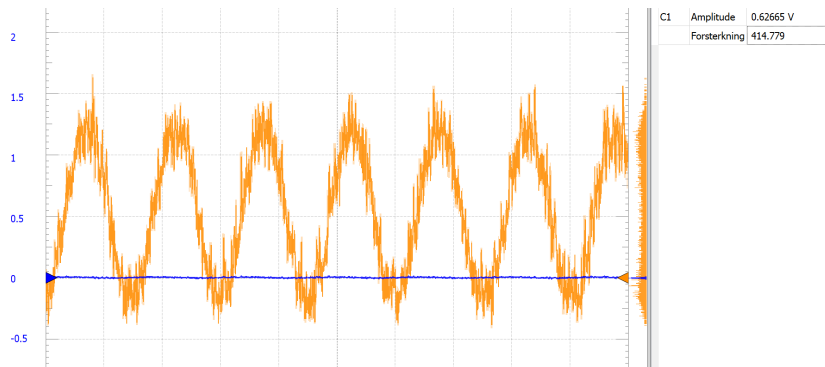


Figur 5: Enter Caption

3.2.1 Åpen løkke-forsterkning med $100k\Omega$ last motstand

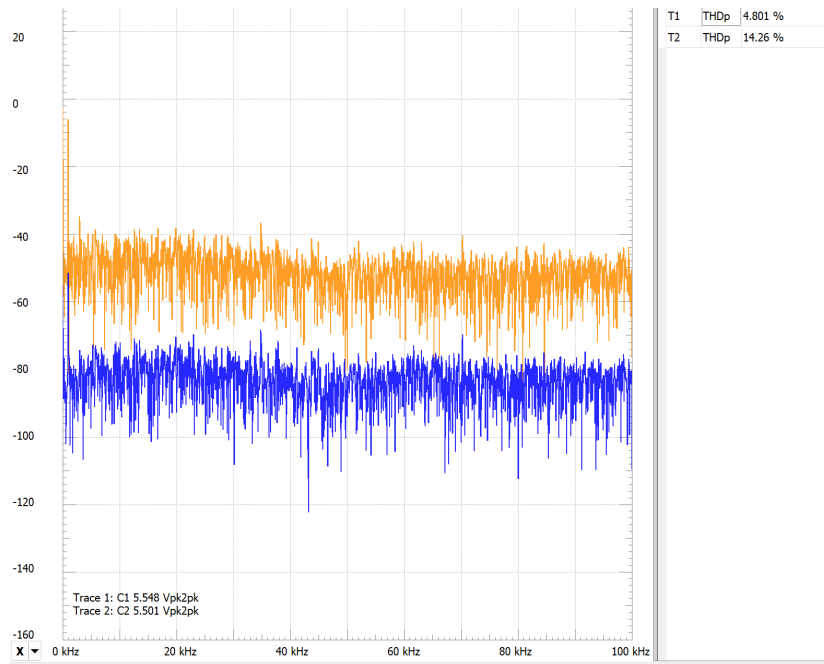
Vi setter først R_L til $100k\Omega$ og analyserer utgangssignalet når kretsen blir påført et inngangssignal på $1kHz$. Ettersom vi forventer stor forsterkning under åpen løkke, setter vi amplituden på inngangssignalet til $1mV$.

Vi legger inn formelen for forsterkning, samt måler inngangs- og utgangs signalet. Under ser du et utklipp fra målingen.



Figur 6: Forsterkning målt uten tilbakekobling og $100k\Omega$ lastmotstand

Vi ser her at vi får en forsterkning på rundt $400A$. Signalet er for såvidt ganske støyete, noe vi kan forvente med så høy forsterkning. Vi kan måle støynivået ved å bruke THD. Analog Discovery 2 som er verktøyet brukt til disse målingene har innebygd THD kalkulasjon, vi bruker THDp for å få verdiene våre i prosent. Alle THD-målingene vi gjør tar vi fra 0 til $100kHz$. I figuren under ser du et skjerm utklipp av målingene.

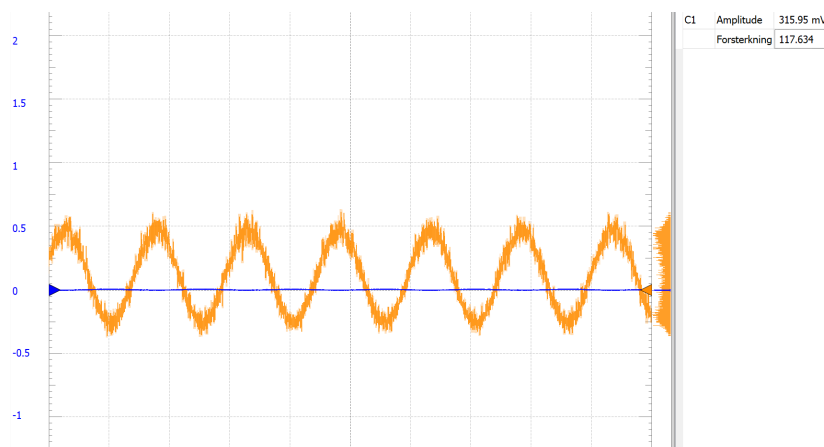


Figur 7: THD målt uten tilbakekobling og $100k\Omega$ last motstand

Vi ender opp med en THD_p på 4.8%, vi ser også at inngangssignalet vårt har en THD_p på 14.6%, dette kommer mest sannsynlig av støy på måleinstrumentet ettersom amplitude på $1mV$ er lav.

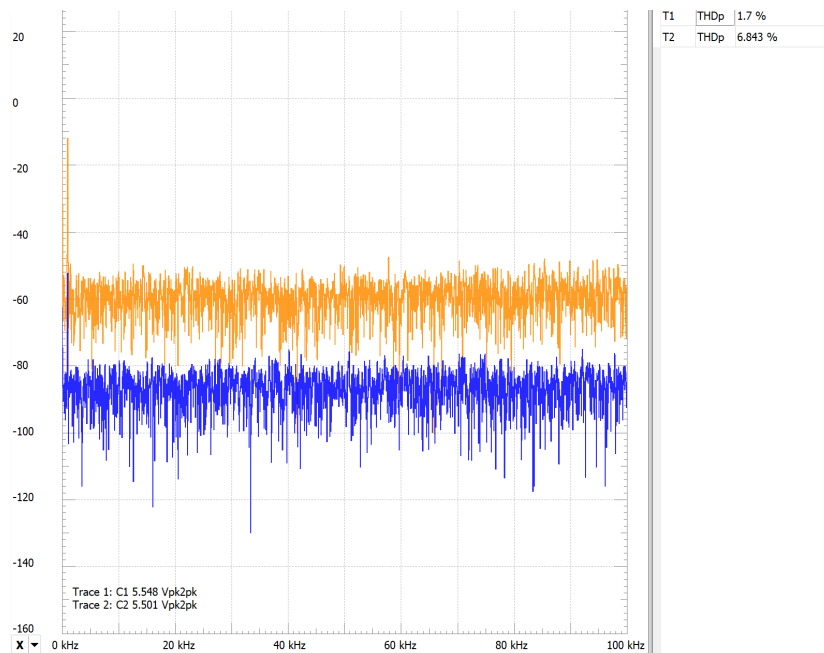
3.2.2 Åpen løkke-forsterkning med 100Ω last motstand

Når vi reduserer inngangsmotstanden til 100Ω kan vi forvente en mye lavere forsterkning ettersom mer av spenningen legger seg over utgangsmotstanden enn R_L . Vi setter inngangssignalet til $3mV$ og måler igjen kretsen, utklipp fra målingen finner du i figuren under.



Figur 8: Forksterkning målt uten tilbakekobling og 100Ω last motstand

Når lastmotstanden er på 100Ω får vi en A faktor på rundt 100. Noe som er betydelig mindre enn forsterkningen med høyere last, som forventet. Vi kan igjen måle THD-faktoren, målingene ser du i figuren under.

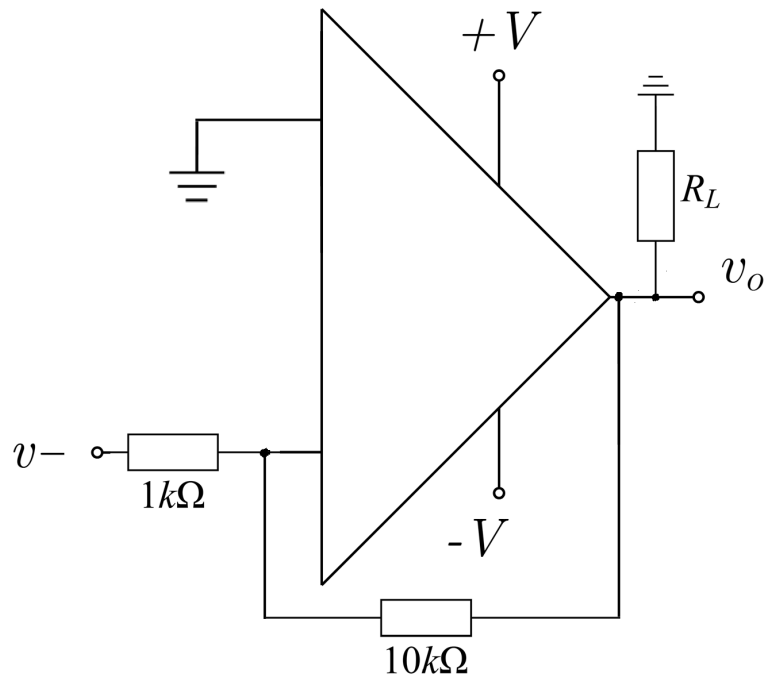


Figur 9: THD målt uten tilbakekobling og 100Ω last motstand

Vi får en THD verdi på 1.7% på utgangssignalet, og igjen ser vi at inngangssignalet har en høyere THD verdi på 6.8%. Dette kommer igjen mest sannsynlig fra støynivået i måleverktøyet ettersom vi opererer med små frekvenser.

3.3 Forsterkningsfaktor med negativ tilbakekobling

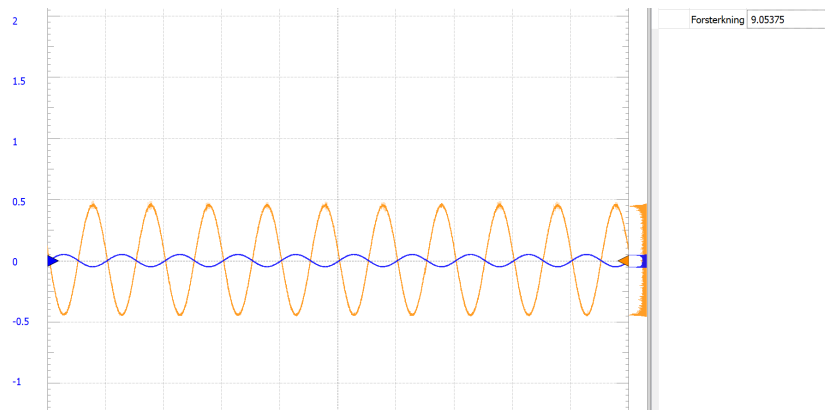
For å bedre styre A verdien til opampen kan vi sette opp en krets med negativ tilbakekobling. Vi setter opp en krets hvor ønsket A verdi er 10 som vist i figuren under.



Figur 10: Krets med tilbakekobling for 10A

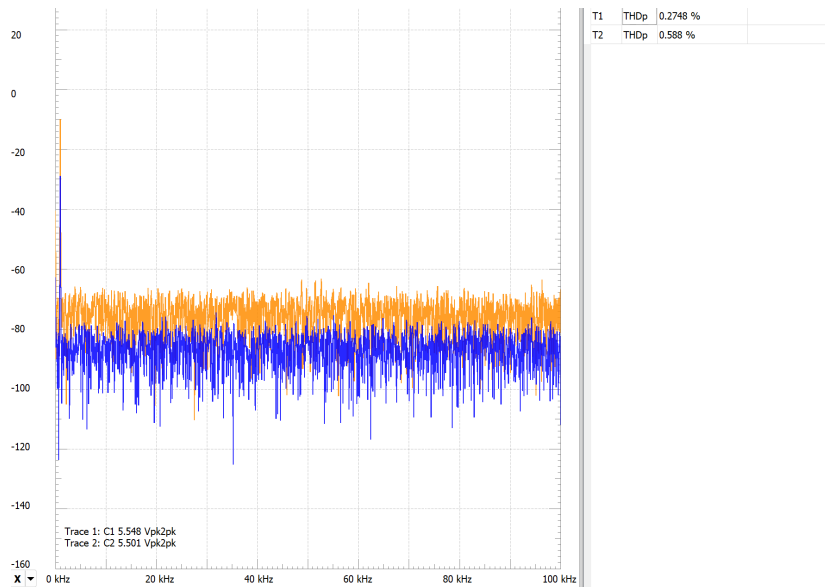
3.3.1 Negativ tilbakekobling med 100Ω last motstand

Vi beholder den gamle lastmotstanden og tester systemet. Ettersom vi nå har negativ tilbakekobling kan vi sette opp amplituden på inngangssignalet. I figuren under ser du måling fra kretsen med et inngangssignal på 50mV.



Figur 11: Forsterkning målt med tilbakekobling og 100Ω last motstand

Vi oppnår en forsterkning på litt over 9A. Vi måler så THD verdien, du kan se utklipp av dette i figuren under.

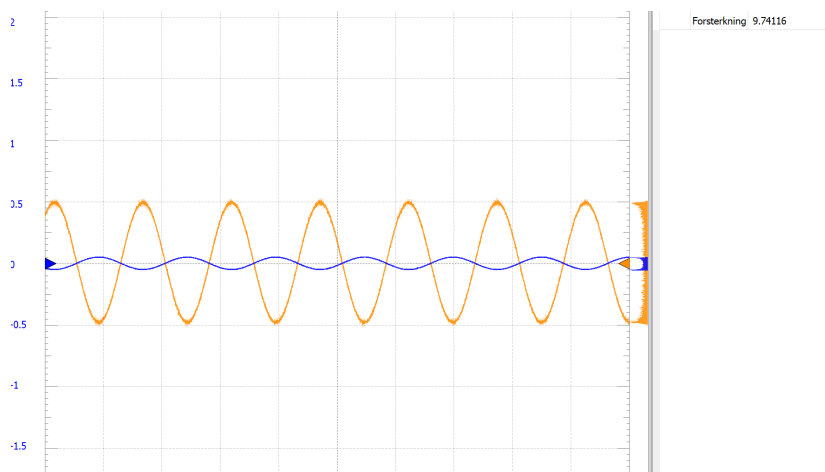


Figur 12: THD målig av negativ tilbakekobling med 100Ω last motstand

Vi får en THD verdi på utgangssignalet på rundt 0.27%, og på inngangssignalet på 0.59%. Igjen er THD verdien for utgangssignalet lavere enn inngangssignalet. Dette er mest sannsynlig grunnet støy i målesystemer og små forskjeller i opampen.

3.3.2 Negativ tilbakekobling med $100k\Omega$ last motstand

Vi kan så bytte til en krets med $100k\Omega$ last motstand og måle oppførselen da. I figuren under ser du et utklipp av denne målingen.

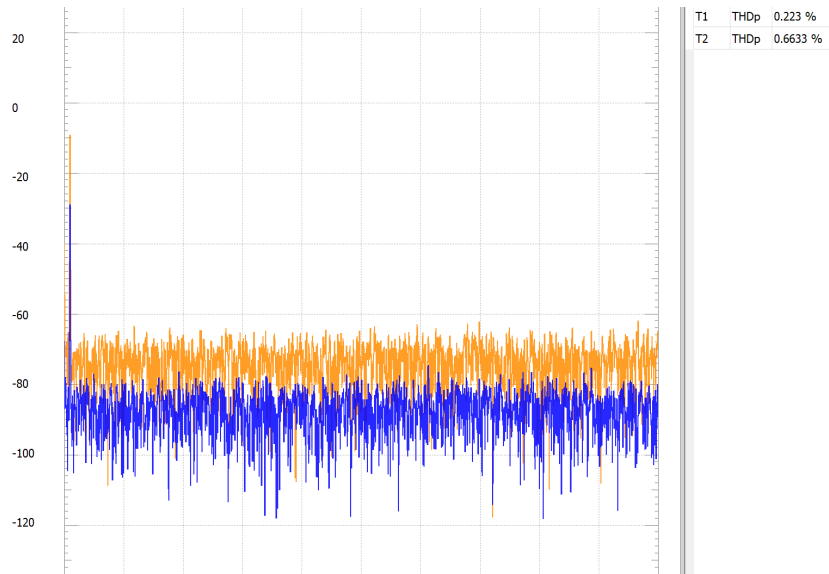


Figur 13: Forsterkning målt med tilbakekobling og $100k\Omega$ last motstand

Vi får selv med høy R_L en forsterkning på 9.7 når vi forventer en forsterkning på 10. Forskjellen

mellom teoretisk og praktisk kan komme av mange grunner. Mange av komponentene er ikke helt nøyaktig. Ved å endre $10k\Omega$ og $1k\Omega$ resistorene til andre ekvivalente ble forsterkningen på det høyeste $10.7A$, noe som viser til hvor stor forskjell det kan være på komponenter av samme modell og type.

Vi kan også måle THD-verdien på den nåværende kretsen. Utklipp av dette ser du i figuren under.



Figur 14: THD målt med tilbakekobling og $100k\Omega$ last motstand

Vi får en THD på utgangssignalet på 0.22% og på inngangssignalet på 0.66%. Disse verdiene er veldig like som for 100Ω last motstand. Vi har en lavere utgangs THD verdi noe som kan, men ingen endring som er stor nok for å ta en beslutning.

3.4 Analyse av resultater

Tabell 1: Oppsummering av målinger av forsterkning og THD

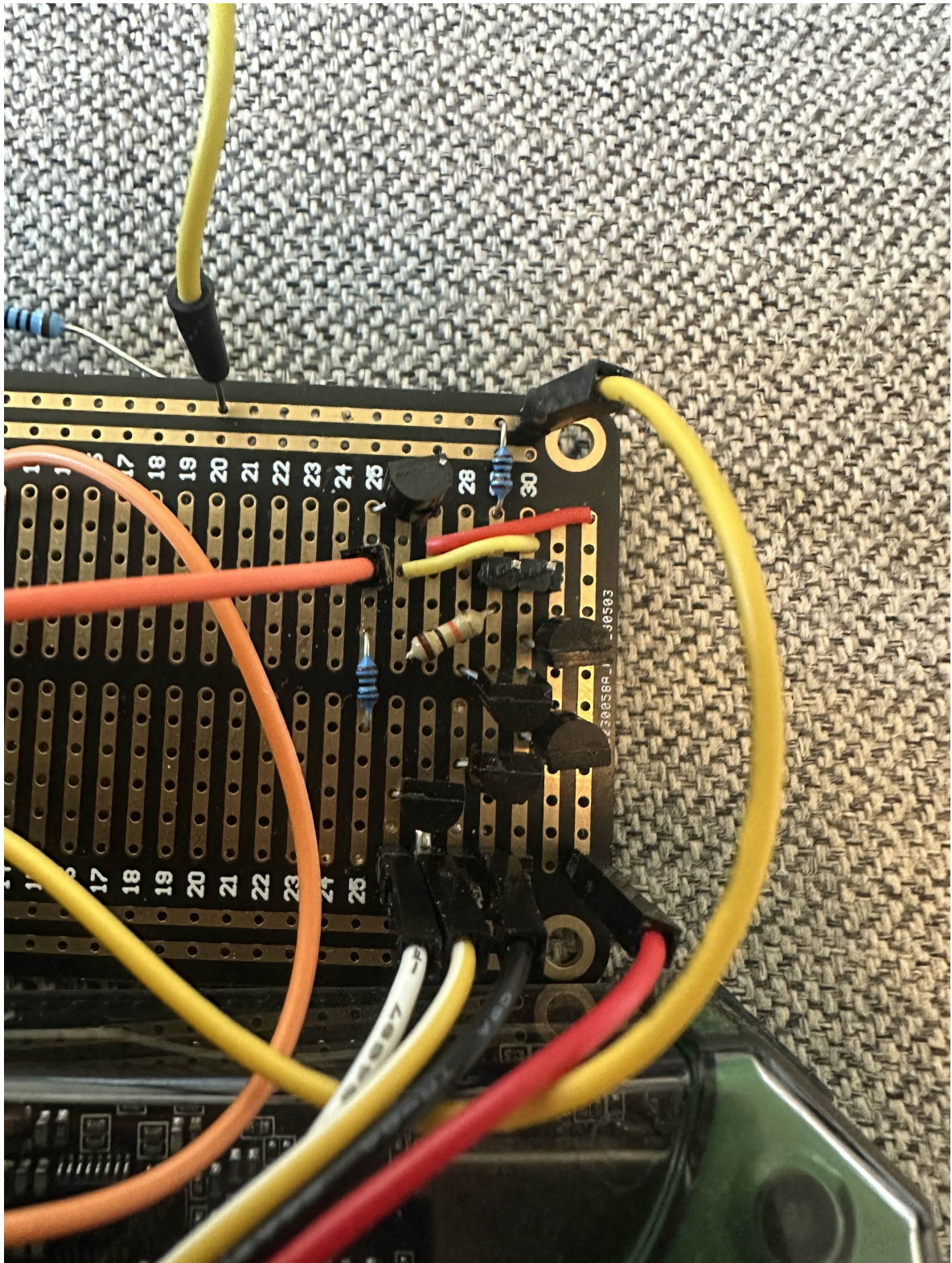
Kobling	Lastmotstand R_L	Inngangssignal	Målt forsterkning A	THD _{in}	THD _{ut}
Åpen løkke	$100k\Omega$	1 mV	≈ 400	14.6%	4.8%
Åpen løkke	100Ω	3 mV	≈ 100	6.8%	1.7%
Tilbakekobling	100Ω	50 mV	9.2	0.59%	0.27%
Tilbakekobling	$100k\Omega$	50 mV	9.7	0.66%	0.22%

Resultatene i Tabell 1 viser tydelig hvordan lastmotstanden og tilbakekoblingen påvirker både forsterkning og harmonisk forvrengning (THD). Når kretsen kjøres uten tilbakekobling og med høy lastmotstand ($100k\Omega$), oppnås en svært høy forsterkning ($A \approx 400$), men dette medfører også et høyt støynivå og en betydelig THD-verdi. Ved lavere lastmotstand (100Ω) synker forsterkningen markant til rundt $A \approx 100$, men THD reduseres samtidig.

Når negativ tilbakekobling introduseres, stabiliseres forsterkningen rundt den ønskede verdien på $A = 10$, uavhengig av lastmotstanden. Samtidig reduseres THD betraktelig. Dette indikerer at tilbakekoblingen både bidrar til å linearisere forsterkeren og undertrykke støy. Forskjellen mellom teoretisk og praktisk forsterkning (forventet 10, målt 9.2–9.7) kan forklares med toleranser i komponentverdier samt variasjoner i transistorparametere. Resultatene samsvarer derfor godt med forventet teori.

3.5 Kresten

Under ser du et bilde av kretsen realisert i virkeligheten.



Figur 15: Enter Caption

I kretsen i bildet over er $10k\Omega$ resistoren som dannet den negative tilbakekoblingen klippet av. Dette ble gjort for å gjøre noen spesifikke målinger på åpen løkke-forsterknings kretsen. I tillegg ble R_1 og R_2 spenningsdelingen byttet ut med en konstant spenningskilde fra Analog Discovery 2, for å øke stabilitet og reproduserbarhet under målingene.

4 Konklusjon

Målingene viser at kretsen oppfører seg i tråd med teorien. Uten tilbakekobling oppnås svært høy forsterkning, men på bekostning av stabilitet og med høy THD. Med negativ tilbakekobling stabiliseres forsterkningen til nær den ønskede verdien ($A \approx 10$), samtidig som THD reduseres betraktelig. Lastmotstanden har liten innvirkning når tilbakekoblingen er aktiv, noe som bekrefter tilbakekoblingens rolle i å øke robustheten og redusere følsomheten for komponentvariasjoner. Dermed oppfyller kretsen de ønskede egenskapene for en lineær og stabil forsterker.