

3.1 - OP-förstärkarens funktion, egenskaper och uppbyggnad

3.1.1 - Introduktion

- OP-förstärkaren, även kallad operationsförstärkaren, är en förstärkarkrets med mycket hög spänningsförstärkning, hög inimpedans, låg utimpedans, hög bandbredd.
- OP-förstärkaren används ofta för att förstärka inkommande signaler spännings- och strömnivå. Exempelvis är OP-förstärkaren mycket vanliga inom audioapplikationer, där OP-förstärkaren används som audioförstärkare mellan en mikrofon och en högtalare.
- Det är också vanligt att OP-förstärkaren används som strömförstärkare (buffer), där OP-förstärkarens låga utimpedans medför att den kan fungera som ett externt slutsteg, exempelvis för att kraftigt öka strömmen som flödar till en högtalare, vilket möjliggör hög effektutveckling i högtalaren.
- Med externa resistorer, se figuren till höger, så finns möjlighet att manuellt välja hur hög spänningsförstärkning G som skall användas, alltså hur många gånger större utspänningen U_{UT} skall vara än inspänningen U_{IN} .
- Ett vanligt värde i OP-förstärkarkopplingar är en spänningsförstärkning G på en faktor 20, vilket betyder att utspänningen U_{UT} är 20 gånger större än inspänningen U_{IN} :

$$G = 20 \rightarrow U_{UT} = 20 * U_{IN}$$

- Som exempel, en inspänning U_{IN} på 1 V medför då en utsignal U_{UT} på 20 V:

$$U_{IN} = 1 \text{ V} \rightarrow U_{UT} = 20 * 1 = 20 \text{ V}$$

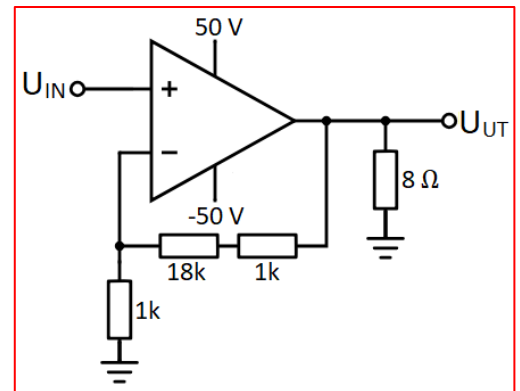
- Resistor R_1 sätts ofta till 1 k Ω , då detta utgör en bra kompromiss mellan energiförluster samt brus; ett högre resistorvärde hade lett till lägre förlusteffekt (eftersom strömmen som flödar genom resistorn hade minskat), men bruset hade ökat:

$$R_1 = 1 \text{ k}\Omega$$

- För en normal spänningsförstärkningsfaktor G på 20 så måste serieresistansen av resistor R_1 och R_2 sätts 20 gånger större än R_1 , alltså 20 k Ω . Därmed bör vi sätta resistor R_2 så nära 19 k Ω som möjligt, eller att vi ersätter R_2 med en två seriekopplade resistorer R_{2A} samt R_{2B} , varav en av dem sätts till 18 k Ω och den andra till 1 k Ω , vilket ger serieresistansen 19 k Ω :

$$R_2 = R_{2A} + R_{2B} = 18\text{k} + 1\text{k} = 19 \text{ k}\Omega$$

- OP-förstärkarens spänningsförstärkningsfaktor betecknas med G , där G står för *Gain* (förstärkning på engelska). I annan litteratur används ibland beteckningen A_U eller A_V , där A betecknar förstärkning och U står för spänning (V står för *voltage*), men denna beteckning används inte i dessa anteckningar.



OP-förstärkare som driver en högtalare på 8 Ω . Inkommande signaler förstärks med en faktor 20 via de externa resistorerna. En insignal på 1 V medför därmed att utsignalen blir 20 V, medan en insignal på 2 V medför en utsignal på 40 V.

OP-förstärkarens matningsspänning i detta fall är ± 50 V, vilket medför att utsignalerna som högst kan uppgå till 50 V och som minst -50 V. Man säger då att utsignalernas topp-till-topp-värde är ± 50 V. I praktiken så kommer dock topp-till-topp-värdet begränsas något, till exempelvis ± 45 V, på grund av spänningsfall över komponenterna inuti.

Av enkelhets skäl så struntar man ofta i att rita ut matningsspänningarna i kretsschemat, då det anses vara självklart att OP-förstärkaren behöver matningsspänning, precis som en TV-apparat behöver strömförsörjning från exempelvis ett vägguttag. Så även om matningsspänningen inte är utritad så behövs den för att OP-förstärkaren skall fungera.

- För OP-förstärkaren gäller att spänningsförstärkningsfaktorn G är lika med

$$G = \frac{U_{UT}}{V_+ - V_-}$$

där U_{UT} är utspänningen till t.e.x. en högtalare, V_+ är inspänningen på den icke-inverterade ingången och V_- är inspänningen på den inverterade ingången. Ofta sätts en spänningskälla mellan V_+ och V_- , vilket medför att OP-förstärkarens spänningsförstärkningsfaktor G blir lika med ration mellan in- och utsignalen U_{IN} och U_{UT} :

$$G = \frac{U_{UT}}{U_{IN}}$$

där G alltså är spänningsförstärkningsfaktorn och U_{IN} samt U_{UT} är in- och utsignalen vid ett givet tillfälle.

- Vanligtvis förkortas begreppet spänningsförstärkningsfaktor till endast förstärkningsfaktor för enkelhets skull. För att skilja spännings- och strömförstärkningsfaktor så används därför begreppet strömförstärkningsfaktor för strömförstärkning, medan förstärkningsfaktorn alltså är en förkortning för spänningsförstärkning.
- Särskilt inom digitalteknik är det vanligt att använda en speciell typ av OP-förstärkare som kallas komparator, se figuren till höger, där spänningsnivåerna på ingångarna jämförs. Eftersom så kallad negativ återkoppling inte används, så hamnar då utsignalen U_{UT} antingen mycket nära positiv matningsspänning V_{CC} eller negativ matningsspänning V_{EE} .
- Om inspänningen på komparatorns plusingång V_+ är högre än inspänningen på minusingången V_- , så blir utsignalen U_{UT} "hög", vilket är ungefär lika med den positiva matningsspänningen V_{CC} :

$$V_+ > V_- \rightarrow U_{UT} \approx V_{CC}$$

- Däremot om inspänningen på minusingången V_- överstiger inspänningen på plusingången V_+ så kommer utsignalen U_{UT} blir "låg", vilket innebär att utsignalen U_{UT} hamnar kring negativ matningsspänning V_{EE} :

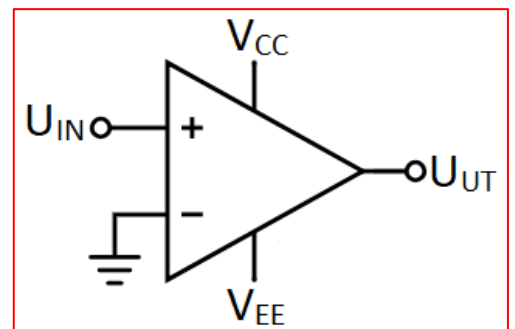
$$V_+ < V_- \rightarrow U_{UT} \approx V_{EE}$$

- I komparatorkopplingar ansluts dock benet för negativ matningsspänning vanligtvis till jord, vilket i praktiken medför att negativ matningsspänning V_{EE} sätts till 0 V:

$$V_{EE} = 0$$

- Om inspänningen på minusingången V_- då överstiger inspänningen på plusingången V_+ så kommer U_{UT} då hamna omkring 0 V i detta fall:

$$V_+ < V_- \rightarrow U_{UT} \approx 0 \text{ V}$$



Komparatorkoppling, där OP-förstärkarens minusingång ansluts till jord. När inspänningen U_{IN} , som ansluts direkt till OP-förstärkarens plusingång, överstiger 0 V så kommer OP-förstärkaren snabbt bli mättad, vilket medför att utsignalen U_{UT} hamnar mycket nära den positiva matningsspänningen V_{CC} .

På samma sätt gäller att om inspänningen U_{IN} understiger 0 V, så kommer utsignalen U_{UT} hamnar mycket nära den negativa matningsspänningen V_{EE} . Vanligtvis så jordas dock benet för negativ matningsspänning i komparatorkopplingar, vilket i praktiken innebär att V_{EE} då sätts till 0 V. Därmed hamnar utsignalen U_{UT} runt 0 V då inspänningen U_{IN} understiger 0 V.

OP-förstärkares egenskaper i idealfallet samt i praktiken:

- Operationsförstärkaren har en del egenskaper som skiljer sig åt något i teorin och i praktiken. Den teoretiska modellen har exakt de egenskaper man önskar av en OP-förstärkare. Man kallar denna modell för den ideala OP-förstärkaren. Den verkliga modellens egenskaper liknar den ideala modellens, men är något sämre, eller snarare mindre perfekt.

En ideal OP-förstärkare innehar följande egenskaper:

1. Oändlig hög intern spänningsförstärkning oavsett frekvens.
2. Ingen distorsion.
3. Oändligt hög inimpedans Z_{IN} , vilket medför att ingångsströmmen är lika med noll.
4. Utimpedansen Z_{UT} är lika med noll, vilket möjliggör att förstärkaren kan driva alla typer av laster effektivt (exempelvis en högtalare på Ω med hög utström, vilket medför hög effekt) utan att utsignalen blir försvagad.
5. Oändligt frekvensomfång (bandbredd).

En verklig OP-förstärkare innehar följande egenskaper:

1. Hög intern spänningsförstärkning, som dock minskar med ökande frekvens.
 2. Låg distorsion.
 3. Mycket hög inimpedans Z_{IN} , vilket medför att ingångsströmmen nästan är lika med noll.
 4. Låg utimpedans Z_{IN} (upp till ett par Ω), vilket möjliggör att förstärkaren kan driva nästan alla typer av laster effektivt (med hög utström och spänning) utan att utsignalen blir försvagad. Endast mycket lågohmiga laster (på ett fåtal Ω eller mindre) kan bli ett problem, som medför försvagad utsignal samt reducerad ström genom lasten. För att driva en normal högtalare på $8\ \Omega$ så är det därför lämpligast att välja eller konstruera en OP-förstärkare så att dess utimpedans är mindre än en tiondel av högtalarens resistans, alltså högst $0,8\ \Omega$, gärna lägre.
 5. Stort frekvensomfång (hög bandbredd BW).
- Vid analys samt konstruktion av OP-förstärkarkretsar så görs oftast antagandet att OP-förstärkaren har ideella egenskaper, då detta förenklar beräkningarna avsevärt samtidigt som de riktiga egenskaperna ofta är relativt nära de ideella, förutsatt att en relativt bra OP-förstärkare används.

OP-förstärkarens externa uppbyggnad:

- Låt oss för ett ögonblick gå igenom OP-förstärkaren som en black box. Vi ser då att OP-förstärkaren har två ingångar, en plus- och en minusingång.
- Ingångarna kan tänkas ha mycket hög inimpedans Z_{IN} , oftast uppe i hundratals T Ω , vilket leder till att strömmen in på ingångarna är nästintill obefintlig, vilket i sin tur leder till effektförbrukningen minskar.
- Samtidigt är utimpedansen Z_{UT} mycket låg, oftast upp till ett fåtal Ω som mest, vilket gör OP-förstärkaren kapabel till att leverera hög ström till högtalaren i enlighet med Ohms lag (låg utimpedans Z_{UT} medför hög utström).
- Precis som vi behöver ansluta en TV-apparat till ett vägguttag för att den skall fungera så behöver också OP-förstärkaren matningsspänning. I figuren ovan så är matningsspänningen V_{CC}/V_{EE} satt till ± 50 V, vilket medför att utsignalen U_{UT} som högst kan uppgå till 50 V och som minst uppnå spänningen -50 V (i praktiken något lägre på grund av interna begränsningar):

$$-50 \text{ V} \leq U_{UT} \leq 50 \text{ V}$$

- Vi säger då att utsignalens topp-till-topp-värde är ± 50 V. Även om insignalen hade haft tillräckligt hög amplitud (topp-till-topp-värde) så att utsignalens i teorin skulle bli högre än ± 50 V så kommer inte detta ske; Istället blir topparna klippta och ljudsignalens ordinarie vågform, vilket är en sinuskurva, börjar sakta men säkert likna en fyrkantsvåg. Om detta sker så uppstår distorsion, en förvrängning av ljudsignalerna. Vi säger då att OP-förstärkaren blir överstyrd.
- Vanligtvis är det inte önskvärt att förvränga ljudsignalerna. Oftast vill man att utsignalen U_{UT} är en förstärkt kopia av insignalen U_{IN} . Dock finns det tillfällen då distorsion önskas, exempelvis på elgitarrer inom rockmusik samt *heavy metal*.
- En elgitarr utan distorsion låter generellt rent och fint, medan elgitarrer inom rockmusik vanligtvis låter mycket aggressivt, på grund av distorsion. Faktum är att utan distorsion så hade rockmusik förmodligt inte funnits, åtminstone inte i den form som vi har idag.
- OP-förstärkarens så kallade closed-loop-förstärkning G_{CL} i figuren ovan är 20:

$$G_{CL} = 20,$$

- vilket innebär att insignalen U_{IN} är 20 gånger mindre än utsignalen U_{UT} vid ett givet ögonblick, förutsatt att OP-förstärkaren inte är överstyrd, då

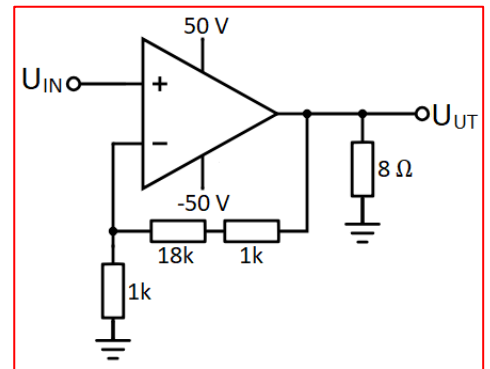
$$G_{CL} = \frac{U_{UT}}{U_{IN}},$$

vilket kan transformeras till

$$U_{IN} = \frac{U_{UT}}{G_{CL}} = \frac{U_{UT}}{20}$$

- Om utsignalens topp-till-topp-värde är ± 50 V så är insignalens topp-till-topp-värde samtidigt $\pm 50 / 20 = \pm 2,5$ V. Därmed så kan insignalens topp-till-topp-värde ligga mellan $\pm 2,5$ V utan att OP-förstärkaren blir överstyrd:

$$-2,5 \text{ V} \leq U_{IN} \leq 2,5 \text{ V}$$

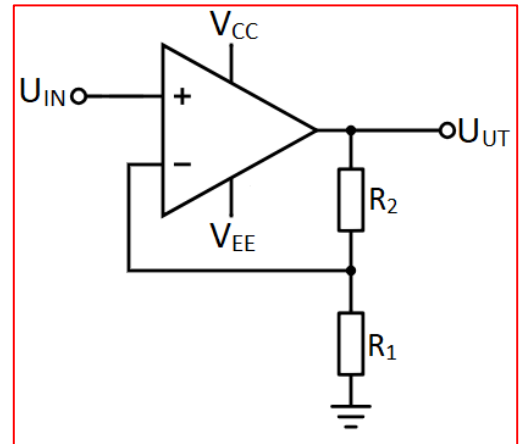


Icke-inverterande OP-förstärkarkoppling, som används för att utsignalen skall bli en förstärkt kopia av insignalen. Men om utsignalens topp-till-topp-värde försöker överstiga matningsspänningens topp-till-topp-värde (± 50 V), så kommer utsignalens toppar att bli klippta, vilket leder till distorsion.

- Anta att insignalens topp-till-topp-värde fördubblas till ± 5 V. Eftersom OP-förstärkaren har en closed-loop-förstärkning G_{CL} på 20 så borde utsignalens topp-till-topp-värde uppgå till ± 100 V. Dock är detta inte fallet, därför att matningsspänningen V_{CC}/V_{EE} begränsar U_{UT} till ett topp-till-topp-värde på ± 50 V (i praktiken något lägre).
- Istället så kommer utsignalen U_{UT} få formen av en fyrkantsvåg och kommer innehålla mycket distorsion. Detta är ungefär vad som händer inuti så kallade distpedaler, vilket är effektpedaler som används för att ge hög distorsion på signalerna ut elgitarrer.
- Som nämndes tidigare så leder det externa resistornätet till att förstärkarkopplingens effektiva förstärkning, som kallas closed-loop-förstärkning och betecknas G_{CL} , blir lika med 20. Utsignalen blir alltså en kopia av insignalen, vars topp-till-topp-värde är 20 gånger högre än insignalen (förutsatt att OP-förstärkaren inte blir överstyrd), så om insignalens topp-till-topp-värde är ± 1 V så blir utsignalens topp-till-topp-värde ± 20 V.
- Samtidigt så har en normal OP-förstärkare en intern spänningsförstärkningsfaktor, som kallas open-loop-förstärkning G_{OL} , mellan 100 000 upp till 1 000 000, ibland ännu mera! Med så hög spänningsförstärkningsfaktor så kommer OP-förstärkaren direkt bli överstyrd av mycket små signaler. I vissa fall är detta önskvärt, såsom i komparatorkopplingar eller Schmitt-triggerkretsar, men vanligtvis är det inte önskvärt att överstyra OP-förstärkaren.
- OP-förstärkarens interna spänningsförstärkning, som alltså kallas open-loop-förstärkning och betecknas G_{OL} , är också mycket olinjär och varierar starkt med förändrad temperatur.
- Tänk hur det hade låtit om någon sjöng genom en mikrofon på en konsert och ljudnivån varierade kraftigt på grund av den ojämna spänningsförstärkningen, för att inte nämna den enorma distorsion som hade uppstått på utsignalen på grund av den mycket kraftigt överstyrda OP-förstärkaren!
- Dessa två anledningar leder till att utsignalen hade blivit mycket överstyrd, ojämn och innehållit extremt mycket distorsion om vi hade låtit spänningsförstärkningsfaktorn vara så hög.
- Det är av denna anledning som det externa resistornätet, som medför att en bråkdel av utsignalen U_{UT} matas tillbaka till OP-förstärkarens minusingång via en teknik som kallas negativ återkoppling, används för att sänka den effektiva förstärkningsfaktorn från OP-förstärkarens mycket höga open-loop-förstärkning G_{OL} till den mycket lägre closed-loop-förstärkningen.
- Förutsatt att OP-förstärkaren inte blir överstyrd så kommer då spänningsförstärkningen bli mycket jämn/linjär och utsignalen kommer ha låg distorsion. Dessutom ökar OP-förstärkarens bandbredd (OP-förstärkaren fungerar som en förstärkare högre upp i frekvenser) samtidigt som inimpedansen Z_{IN} ökar och utimpedansen Z_{UT} minskar.
- Därmed så möjliggör det externa resistornätet att OP-förstärkaren får mycket goda egenskaper genom att mata en del av utsignalen tillbaka till OP-förstärkarens minusingång, en teknik som kallas negativ återkoppling. Vi skall nu diskutera denna teknik.

Introduktion till negativ återkoppling:

- I förstärkarkretsar brukar en bråkdel av utsignalen U_{UT} matas tillbaka till OP-förstärkarens minusingång, såsom i figuren till höger. Vi säger då att återkoppling används i förstärkarkretsen, specifikt negativ återkoppling, då den återkopplade signalen matas till OP-förstärkarens minusingång.
- Negativ återkoppling är en teknik som är mycket vanligt förekommande inom reglerteknik för att skapa välfungerande och stabilt regelsystem. Förstärkarkopplingen till höger är ett exempel på ett sådant regelsystem.
- OP-förstärkaren i sig är konstruerad med icke-linjära komponenter, såsom transistorer, vilket innebär att dess egenskaper är mycket olinjära och varierar stort beroende på omgivande temperatur, eventuell lastresistans R_L och så vidare.
- Via negativ återkoppling, så linjäriseras OP-förstärkaren så att dess prestanda blir mycket stabilare. Överlag så medför negativ återkoppling ett flertal fördelar, men även två nackdelar. Den mest märkbara är att OP-förstärkarens effektiva förstärkningsfaktor G minskar kraftigt, från exempelvis en faktor 100 000 ned till en faktor 20.
- Negativ återkoppling används i princip alla förstärkarkretsar, på grund utav följande anledningar:
 - Negativ återkoppling minskar distorsion. Utan negativ återkoppling så hade OP-förstärkarens effektiva förstärkningsfaktor G varit mycket hög, men hade snabbt blivit överstyrd / mättad, exempelvis på grund av att differentialsförstärkningen (spänningsförstärkningen av differentialsignaler, exempelvis ljud, i första steget inuti OP-förstärkaren) minskar om insignalen har hög amplitud, alltså stora toppar och dalar. Överstyrning kommer diskuteras mer längre fram i kapitlet.
 - Negativ återkoppling eliminerar olinjariteter och distorsion som uppstår i det sista förstärkarsteget inuti OP-förstärkaren (slutsteget), som uppstår trots all ansträngning som görs för att eliminera detta. Detta beror på att de så kallade NPN- och PNP-transistorernas kollektorströmmar varierar väldigt mycket varje halvperiod, det vill säga varje gång en av transistorerna leder och den andre än strypt. Detta medför att transistorernas transkonduktans och därmed förstärkningsfaktor varierar.
 - Förstärkarsteget blir mindre påverkat av lastens (högtalarens) resistans, temperaturförändringar samt åldrande av utrustningen. Detta medför att steget fungerar ungefär samma trots väldigt varierande lastresistanser.
 - Förstärkarstegets blir mindre känsligt för höga frekvenser, vilket medför att bandbredden höjs. Detta medför att förstärkaren fungerar högre upp i frekvenser än vad som annars är möjligt.
 - OP-förstärkarens inimpedans Z_{IN} ökar och utimpedansen Z_{UT} minskar.
- De enda två nackdelarna med negativ återkoppling är att förstärkningsfaktorn blir lägre samt att förstärkarsteget kan bli instabilt vid mycket höga frekvenser, men detta är inga stora förluster i jämförelse med alla fördelar som man får.
- Som nämndes tidigare så blir OP-förstärkarens effektiva förstärkning G lägre, men även mycket stabilare. Förstärkningen kan man lätt dimensionera med externa resistorer, samtidigt som instabiliteten vid högre frekvenser kan elimineras med en kondensator placerad mellan det första och andra steget inuti OP-förstärkaren (mellan differentialsförstärkaren och spänningsförstärkaren).
- Det är bättre med ett förstärkarsteg med lägre spänningsförstärkning, men mycket jämnare och stabilare egenskaper. Dock är det positivt att OP-förstärkarens interna spänningsförstärkning är så hög som möjligt; ju högre intern spänningsförstärkning, desto effektivare reduceras distorsion samt olinjariteter och desto mer ökar bandbredden. Se avsnitt 3.4 – Negativ återkoppling i OP-förstärkarkretsar för mer detaljer om återkoppling.

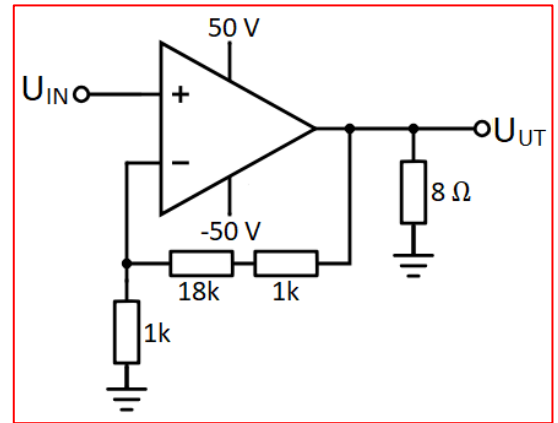


Genom så kallad negativ återkoppling via det externa resistornätet så matas en del av utsignalen U_{UT} tillbaka till OP-förstärkarens minusingångar.

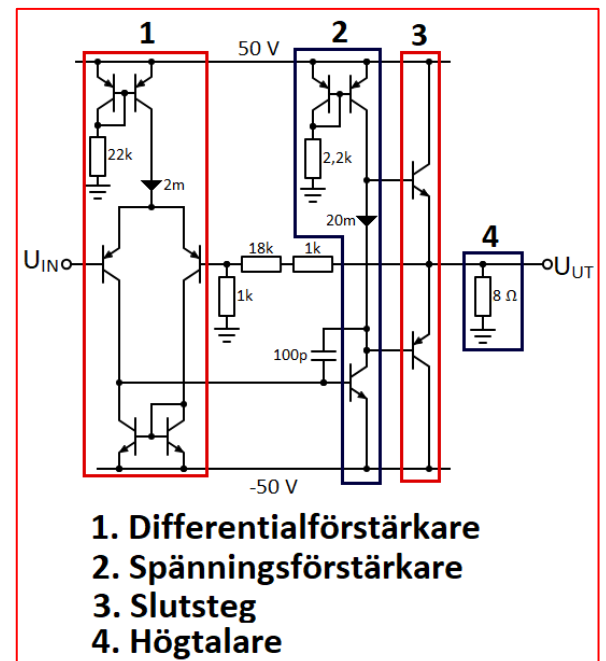
Negativ återkoppling är en teknik som sänker OP-förstärkarens spänningsförstärkning kraftigt, men i övrigt leder till mycket goda egenskaper, såsom jämn förstärkning med låg distorsion på utsignalerna.

OP-förstärkarens interna uppbyggnad:

- OP-förstärkare består främst eller enbart av transistorer, resistorer och kondensatorer som bildar en krets med väldigt önskvärda egenskaper.
 - Inuti en OP-förstärkare finns tre olika typer av förstärkare, se figuren nedan till höger:
- Differentialförstärkaren** används för att kancellera icke önskvärda signaler såsom brus, samtidigt som den förstärker spänningsnivån på önskvärda signaler, såsom ljud.
- I praktiken sker detta genom att differentialförstärkaren förstärker spänningsskillnaden mellan differentialförstärkarens plus- och minusgång.
 - När så kallade differentialsignaler uppträder på ingångarna, alltså signaler som är olika sett till amplitud och/eller fas., så uppstår en spänningsskillnad mellan plus- och minusgången, vilket medför spänningsförstärkning. Därmed kan spänningsnivån på exempelvis ljudsignaler förstärkas.
 - När så kallade Common Mode-signaler uppträder på ingångarna, alltså signaler som är identiska sett till amplitud och/eller fas., så blir spänningsskillnaden mellan plus- och minusgången noll, vilket medför att dessa signaler kancelleras.
 - Därmed kan eventuellt brus kancelleras effektivt, då en stor del av detta består av Common Mode-brus, alltså brus som uppträder som identiska signaler på de två ingångarna.
 - Genom att direkt kancellera brus så riskerar vi inte att brus kommer in i förstärkaren och förstärks av efterföljande steg (spänningsförstärkaren och slutsteget). Detta hade varit mycket negativt, då utsignalen hade innehållit höga mängder brus.
 - Vi hade enkelt kunnat modifiera differentialförstärkaren ovan så att den kancellerar Common Mode-signaler såsom brus mycket effektivare, samtidigt som differentialsignaler såsom ljud förstärks kraftigare.
 - I nästa figur visas en OP-förstärkare, där en så kallad kaskadkopplad strömspegel med emitterresistorer används i differentialförstärkaren, vilket leder till att brus dämpas effektivare (ca 10 000 effektivare).



Extern krets på den enkla OP-förstärkaren nedan, som driver en högtalare på 8 Ω . OP-förstärkarens spänningsförstärkningsfaktor sätts till 20 via de externa resistorerna.



Intern krets på en enkel OP-förstärkare, som driver en högtalare på 8 Ω . Differentialförstärkarens kancellerar Common Mode-signaler såsom brus samt förstärker spänningen på differentialsignaler, såsom ljud. Genom att vi direkt kancellerar eventuellt brus, så minskar risken att vi får in brus i förstärkaren, som annars kommer förstärkas av efterföljande förstärkarsteg.

Spänningsförstärkare förstärker ytterligare spänningen på de signaler som passerade differentialförstärkaren. Slutsteget förstärker utströmmen till högtalaren.

Notera att de externa resistorerna som också kan ses i figuren till vänster är placerade i mitten av figuren och är kopplade till den högra ingången på differentialförstärkaren, vilket är OP-förstärkarens minusgång.

2. **Spänningsförstärkaren** förstärker ytterligare spänningen på de signaler som passerade första steget (differentialförstärkaren). Därmed så förstärks inkommande signalers spänningsnivå i de två första förstärkarstegen.
 - Om en mycket bra differentialförstärkare används så kommer nästan enbart differentialsignaler, såsom ljud, nå spänningsförstärkarens ingång och därefter förstärkas. Eventuellt brus som passerar differentialförstärkaren kommer förstärkas av spänningsförstärkaren, vilket kan medföra en hög brusnivå på utsignalen som når högtalaren.
 - Spänningsförstärkarens förstärkningsfaktor G kan enkelt ökas via några modifikationer, såsom i figuren på nästa sida, där vi använder en så kallad teleskopiskt kaskadkopplad spänningsförstärkare, vilket betyder att det finns två kaskadkopplingar i steget, en i strömspegeln samt en vid ingången (transistorn på ingången samt transistorn ovanför utgör en kaskadkoppling).
 - Kaskadkopplingen ökar kraftigt spänningsförstärkarens utimpedans Z_{UT} , vilket kraftigt ökar spänningsförstärkarens förstärkningsfaktor, i detta fall ca 15 gånger, men hade kunnat bli tio gånger mer utan emitterresistorn längst ned i spänningsförstärkaren (se $10\ \Omega$:s resistorn), som dock används för temperaturstabilitet.
3. **Slutsteget** förstärker indirekt signalernas strömnivå genom att minska förstärkarstegets utimpedans Z_{UT} , vilket är essentiellt för att kunna leverera hög effekt till en lågohmig last, såsom en högtalare. I enlighet med Ohms lag så medför minskad utimpedans Z_{UT} ökad utström I_{UT} , då

$$I_{UT} = \frac{U_{UT}}{Z_{UT}},$$

där U_{UT} är förstärkarens utspänning, som faller över lasten.

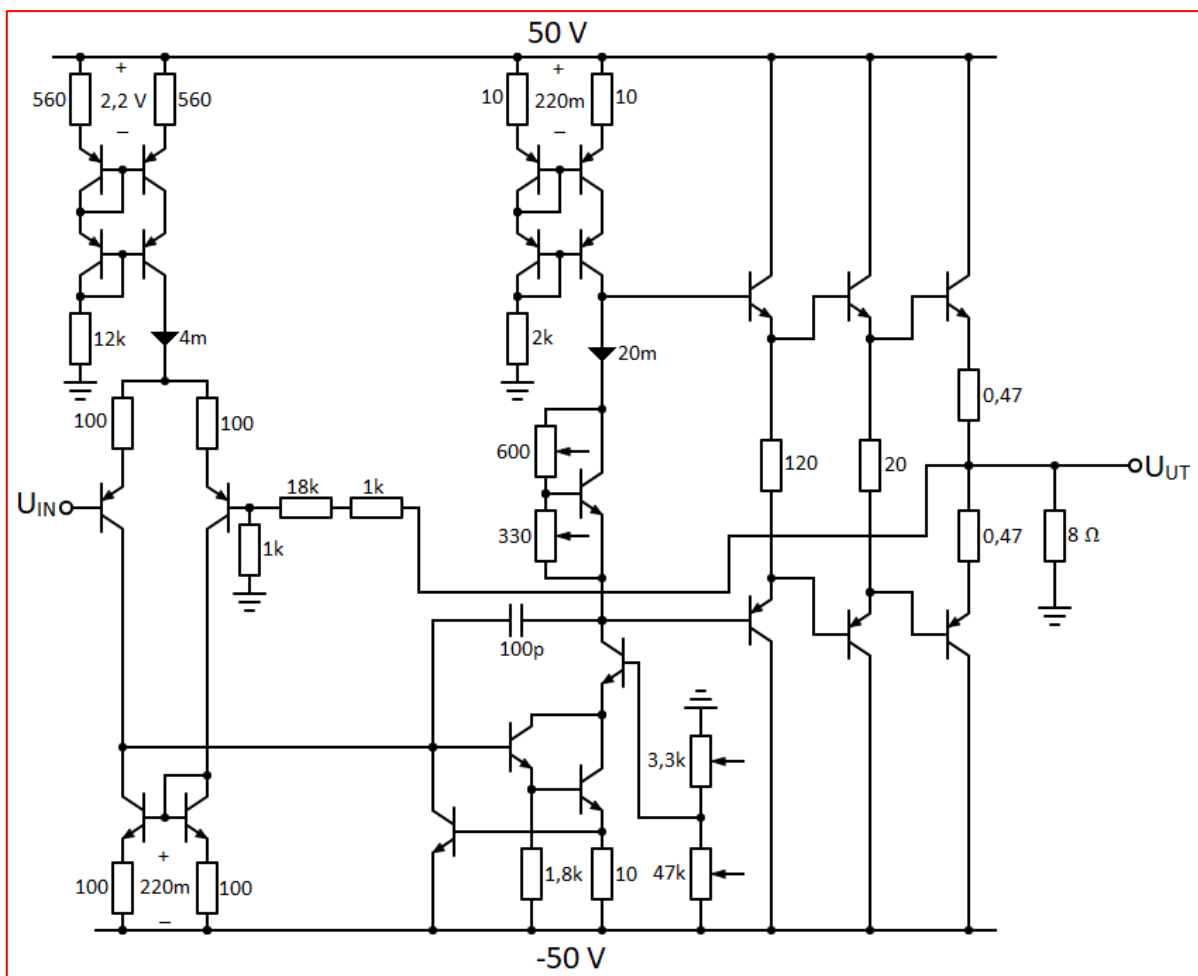
- Därmed ser vi att minskad utimpedans Z_{UT} medför ökad utström I_{UT} . Detta är mycket viktigt för att erhålla effektiv effektförstärkning, då en given effekt P i enlighet med effektlagen är en produkt av en given spänning U samt en given ström I :
- $$P = U * I$$
- För att erhålla hög effektutveckling P genom en given last, såsom en högtalare, så måste insignalernas effekt förstärkas, vilket innebär både spännings- och strömförstärkning. Dock kan vi inte göra detta samtidigt. De två föregående stegen förstärkte insignalernas spänningsnivå och första steget kancerade också brus.
 - Genom att inkommande signalers spänning- och strömnivå förstärks så möjliggörs hög effektutveckling genom en last, vilket exempelvis möjliggör hög ljudförstärkning.
 - Slutsteget ovan är dock relativt klen; strömförstärkningsfaktorn h_{FE} är relativt låg (oftast mellan 50–100, ibland upp till 250). För att öka den totala strömförstärkningsfaktorn $h_{FE,TOT}$ så brukar tre slutsteg sammankopplas till ett så kallat trippel-slutsteg, såsom i figuren nedan.
 - De tre delarna av ett trippel-slutsteg kallas för drivare, drivare samt slutsteg och medför mycket högre strömförstärkning $h_{FE,TOT}$ (vanligtvis mellan $50^3 = 125\ 000$ upp till $100^3 = 1\ 000\ 000$), då

$$h_{FE,TOT} = h_{FE1} * h_{FE2} * h_{FE3},$$

där h_{FE1} , h_{FE2} samt h_{FE3} är fördrivarens, drivarens samt slutstegets respektive strömförstärkningsfaktor.

- Vi kommer också se senare att slutsteget i den enkla OP-förstärkaren ovan, vilket är ett så kallat klass-B slutsteg, har relativt låga effektförluster, men ljudet blir försämrat på grund av så kallad övergångsdistorsion.

- När ljudsignaler passerar slutsteget så svänger dessa mellan ett topp-till-topp-värde, exempelvis $\pm 20\text{ V}$ (eftersom dessa är växelströmmar). När dessa signaler passerar nollstrecket så leder inte ett klass-B slutsteg någon ström överhuvudtaget, vilket leder till att ingen ström når högtalaren.
 - Detta är effektivt för att minska effektförluster, då vi inte slösar effekt när vi inte har någon insignal på förstärkaren, men när vi väl har en insignal så kommer denna bli avbruten i många korta men frekventa intervall, vilket leder till försämrat ljud.
 - Vi kommer se senare hur vi kan modifiera klass-B slutsteget till ett så kallat klass-AB slutsteg, se slutsteget i figuren till höger, för att åstadkomma en kompromiss mellan låg förlusteffekt samt bra ljud, genom att se till att slutsteget alltid leder, samtidigt som vi försöker minska förlusteffekterna som uppstår.
4. **Högtalaren** är den komponent som vi vill driva genom att förstärka inkommande ljudsignalers spänning- och strömnivå. Vanligtvis har en högtalare en resistans på $8\ \Omega$, men även $2\ \Omega$ samt $4\ \Omega$ förekommer. Därmed så ritas högtalare vanligtvis upp som resistorer i kretsscheman.



Förbättrad variant av OP-förstärkaren på föregående sida. I detta fall har differentialförstärkaren effektivare brusdämpning, spänningsförstärkaren har mycket högre spänningsförstärkning (samt högre inimpedans Z_{IN}) och slutsteget har mycket högre strömförstärkning. Dessutom så har problemet med övergångsdistorsion i slutsteget kraftigt reducerats.

Notera att slutsteget nu består av tre delar, som kallas fördrivare, drivare samt slutsteg, sett från vänster till höger. Därmed så kallas detta slutsteg ett klass-AB trippel slutsteg. Emitterresistorer används i de tre förstärkarstegen för att åstadkomma temperaturstabilitet, vilket leder till jämn förstärkning samt lägre distorsion i hela OP-förstärkaren.