

# **Planering av en aktiv filter- och förstärkarmodul för en referenshögtalare**

Vikström Rune

EXAMENSARBETE	
Arcada	
Utbildningsprogram:	Informations- och medieteknik
Identifikationsnummer:	3329
Författare:	Rune Vikström
Arbetets namn:	Planering av en aktiv filter- och förstärkarmodul för en referenshögtalare
Handledare (Arcada):	Johnny Biström
Uppdragsgivare:	Arcada
<p>Sammandrag:</p> <p>Jag deltar i ett projekt där min del är att planera en aktiv filter- och förstärkarmodul för en referenshögtalare. Mitt arbete bygger vidare på ett högtalarprojekt som gjorts i en kurs i högtalarteknik. De olika arbetsmomenten är bland annat att planera och simulera modulens filter, göra mönsterkortets layout och tillverka en första prototyp av modulen. Uppdragsgivaren är Arcada - Nylands svenska yrkeshögskola.</p> <p>Detta examensarbete består av flera delar. Examensarbetet fungerar som en rapport över de olika arbetsmomenten som arbetet med filter- och förstärkarmodulen för med sig. För att mitt examensarbete ska vara mer allmännyttigt har jag även valt att mer ingående beskriva aktiva analoga filter och filterdesign utgående från hur filter används i referenshögtalare. Jag beskriver även referenshögtalarens funktionsprincip och enligt vilka kriterier man kan bedöma en referenshögtalare. Detta för att man ska få en tydligare bild över vad man vill uppnå med ett liknande projekt. Varje del i examensarbetet fungerar som ett stöd för att öka förståelsen av arbetet med modulen.</p> <p>Arbetet med projektet innehåller liknande arbetsmoment som jag i min utbildning utfört och kommit i kontakt med. Den del av examensarbetet som beskriver referenshögtalare och aktiva analoga filter baserar sig på tumregler och allmänt vedertagen information inom dessa områden. Jag hänvisar i första hand mina påståenden till handböcker skrivna för audioingenjörer och dokument publicerade av företag inom branschen.</p> <p>De olika arbetsmomenten presenteras för att de ska beskriva vad som görs och varför. Onödiga detaljer lämnas bort. Prototypens filterdel testas och bedöms. Jag presenterar även förslag på lösningar på de problem som observeras vid testningen.</p>	
Nyckelord:	Ljudteknik, kretskort, ljudåtergivning, förstärkare, högtalare, elektroniska kretsar, ljudkvalitet
Sidantal:	53
Språk:	Svenska
Datum för godkännande:	

DEGREE THESIS	
Arcada	
Degree Programme:	Information and Media Technology
Identification number:	3329
Author:	Rune Vikström
Title:	Planning of an active filter and amplifier module for a reference monitor
Supervisor (Arcada):	Johnny Biström
Commissioned by:	Arcada
<p>Abstract:</p> <p>I participate in a larger project where my part is to design an active filter and amplifier module for a reference monitor. My work builds on a loudspeaker project that was a part of a course in loudspeaker technology. The different tasks in the project are among other things to design and simulate the filters of the module, to design the circuit board layout and to build the first prototype of the circuit. My work is commissioned by Arcada.</p> <p>The thesis consists of several parts. The thesis stands as a report on all the different stages that are required when working with the project. For the thesis to be of more benefit to the general public it also describes more in detail the use of active analog filters in reference monitors. It also describes the operating principle of the reference monitor and what kind of requirements are set on reference monitors. Every part in this thesis is included to give a better understanding of what one strives for with a project similar to this and why things are done the way they are.</p> <p>The work demanded by the project is similar to what I have done before and been in contact with as a student. The part of the thesis that describes reference monitors and active analog filters is based on generally accepted information and rules of thumb in these fields. My claims are primarily taken from handbooks written for audio engineers and documents published by companies in the field.</p> <p>The different parts of the project are presented so that they describe what have been done and why. Unnecessary details and explanations are left out. The prototype of the module is tested and evaluated. Suggestions for improvements and solutions for the problems encountered when testing are also included.</p>	
Keywords:	Audio technology, printed circuit boards, sound reproduction, amplifiers, loudspeakers, electronic circuitry, sound quality
Number of pages:	53
Language:	Swedish
Date of acceptance:	

# INNEHÅLL

<b>1</b>	<b>INLEDNING .....</b>	<b>8</b>
1.1	Syfte och mål .....	8
1.2	Frågeställningar.....	8
1.3	Metoder och struktur.....	9
1.4	Avgränsning.....	9
<b>2</b>	<b>REFERENSHÖGTALAREN .....</b>	<b>9</b>
2.1	Krav.....	10
2.1.1	Jämn axiell frekvensgång över hela frekvensområdet .....	10
2.1.2	Förmåga att producera höga ljudtryck.....	11
2.1.3	Låg icke-linjär distorsion .....	11
2.1.4	Korrekt transientsvar i tidsdomänen .....	12
2.1.5	Kontrollerad spridning .....	12
2.1.6	Kontrollerad impedans .....	12
2.1.7	Slutsats.....	13
<b>3</b>	<b>FILTER.....</b>	<b>13</b>
3.1	Fördelar med aktiva filter .....	14
3.1.1	Minskad distorsion.....	14
3.1.2	Ekvalisering av basfrekvenserna.....	15
3.1.3	Kompensering för olika känslighet mellan högtalarelementen .....	15
3.1.4	Skydd av förstärkaren .....	15
3.1.5	Fördröjning av signalen .....	15
3.1.6	Komponenter i aktiva filter .....	16
3.1.7	Flexibilitet hos aktiva filter .....	16
3.2	Olika typer av aktiva filter .....	16
3.2.1	Lågpasfilter .....	17
3.2.2	Högpasfilter .....	18
3.2.3	Bandpassfilter.....	18
3.2.4	Bandspärrfilter .....	18
3.2.5	Hyllfilter.....	18
3.3	Användning av filter .....	19
3.3.1	Delningsfilter.....	20
3.3.2	Kompensering för högtalarelement och låda.....	21
3.3.3	Kompensering för lyssningsrum .....	23

<b>3.4 Filterdesign</b>	<b>24</b>
3.4.1 Gradtal	26
3.4.2 Godhetstal	26
3.4.3 Filteregenskaper	28
3.4.4 Sallen-Key-topologin	30
3.4.5 Sallen-Key lågpasfilter	31
3.4.6 Sallen-Key högpasfilter	33
3.4.7 Slutsats	34
<b>4 ARBETET</b>	<b>34</b>
<b>4.1 Filtret</b>	<b>34</b>
4.1.1 Blockschema	34
4.1.2 Simulering	36
<b>4.2 Kretsen i övrigt</b>	<b>38</b>
4.2.1 Input	38
4.2.2 Förstärkare	39
4.2.3 Strömkälla	40
<b>4.3 Mönsterkortslayout</b>	<b>40</b>
4.3.1 Överföring av kopplingschemat till EAGLE	40
4.3.2 Mönsterkortets banor i EAGLE	41
<b>4.4 Prototypen</b>	<b>42</b>
4.4.1 Etsning	43
4.4.2 Montering av komponenter	43
4.4.3 Test av prototypen	43
4.4.4 Förbättringsförslag	45
<b>4.5 Resultatredovisning</b>	<b>46</b>
4.5.1 Modulens prestanda	46
4.5.2 Modulens lämplighet som byggsats	47
<b>5 DISKUSSION</b>	<b>47</b>
<b>Källor</b>	<b>49</b>
<b>Bilagor</b>	<b>54</b>
Bilaga 1 – Diskantelementets frekvenssvar och impedanskurva	
Bilaga 2 – Baslementets frekvenssvar och impedanskurva	
Bilaga 3 – Kopplingschema för INA134	
Bilaga 4 – Kopplingschema för LM4780	

Bilaga 5 – Kopplingsschema för modulen .....	
Bilaga 6 – Modulens mönsterkortslayout.....	

## Figurer

Figur 1. Bodediagram över ett lågpassfilter .....	17
Figur 2. Bodediagram över ett dämpande och förstärkande hyllfilter.....	19
Figur 3. Blockdiagram över en simpel aktiv högtalare där ett hög- och lågpassfilter utgör delningsfiltret. ....	21
Figur 4. Diagram som visar hur man använder ekvalisering för att kompensera för högtalarelementets frekvensgång. ....	22
Figur 5. Diagram som visar hur högtalarens placering inverkar på frekvensgången.....	24
Figur 6. Diagram som visar dämpningen för Butterworthfilter av olika gradtal.....	26
Figur 7. Diagram som visar godhetstalets inverkan på frekvensgången .....	27
Figur 8. Diagram som visar frekvens- och fäsgång för ett Butterworthfilter av första grad .....	29
Figur 9. Sallen-Key-topologin.....	30
Figur 10. Sallen-Key-topologin med förstärkning .....	31
Figur 11. Sallen-Key lågpassfilter .....	31
Figur 12. Formel för brytfrekvens för ett Sallen-Key lågpassfilter.....	32
Figur 13. Formel för godhetstal för ett Sallen-Key lågpassfilter.....	32
Figur 14. Sallen-Key högpassfilter .....	33
Figur 15. Formel för godhetstal för ett Sallen-Key högpassfilter.....	33
Figur 16. Blockschema för kretsen.....	35
Figur 17. Blockschema för kretsen i CrossoverShop .....	37
Figur 18. Frekvensgången för systemet.....	37
Figur 19. Jämförelse av frekvensgången .....	44

# 1 INLEDNING

Detta examensarbete görs på beställning av Arcada – Nylands svenska yrkeshögskola. Projektet som examensarbetet behandlar bygger vidare på är ett högtalarprojekt som gjorts i en kurs i högtalarteknik. Utgångspunkten är en högtalarlåda med passande element och mätningar och simuleringar av dessa. Högtalaren har tidigare fungerat med digitala filter och extern förstärkning. Mitt arbete kommer att innefatta planering och byggande av prototypen av en för högtalaren lämplig aktiv filter- och förstärkarmodul. Modulen ska kunna monteras inuti högtalarlådan.

## 1.1 Syfte och mål

Högtalarens tänkta användningsområde är kritisk lyssning och därför är det viktigt att den ska fylla vissa kriterier på prestanda för att kunna fungera som referenshögtalare. Jag kommer i en teoretisk del av arbetet att ta upp aktiva analoga filter och hur de används i audiosyfte och annan teori som ligger bakom de val jag gör i planeringskedet av projektet. Arbetet kommer att behandla de arbetsmoment som projektet för med sig med målet att stå som exempel för hur liknande professionella produkter kan utvecklas. Arbetet ska också kunna användas som guide för audiointresserade som vill ta sitt intresse ett steg längre från att bara köpa färdiga produkter till att bygga någonting själv.

## 1.2 Frågeställningar

Följande frågor ska jag behandla i arbetet:

- Vilka krav på prestanda ställs på en referenshögtalare?
- Hur används aktiva analoga filter i referenshögtalare?
- Vilka är de olika arbetsmomenten då man designar och bygger en prototyp av en aktiv filter- och förstärkarmodul för en referenshögtalare?
- Lämpar sig filter- och förstärkarmodulen som byggsats?



### **1.3 Metoder och struktur**

I kapitel 2 och 3 presenterar jag de bakgrundskunskaper som varit nödvändiga för att kunna klara av arbetet med projektet. För att kunna beskriva referenshögtalare och aktiva filter kommer jag att i första hand bekanta mig med litteratur i form av handböcker skrivna om ämnet och dokument publicerade av ledande företag inom området. Kapitel 4 är den del av examensarbetet där jag beskriver det konkreta arbetet med prototypen. Den delen fungerar som en dokumentation och utvärdering av arbetet.

### **1.4 Avgränsning**

Examensarbetet handlar om olika filters funktion i audioelektroniken, hur man använder sig av dem och planerar dem. De tumregler och dylikt som jag tar upp kommer inte att kunna ge en fullständig förståelse om aktiva anloga filter, förstärkare och referenshögtalare, men ska vara tillräckliga för att man ska kunna få en ganska god insikt i dessa ämnen. Delen som beskriver arbetet med prototypen kommer inte att nödvändigtvis att ge anvisningar om hur man löder och etsar, utan beskriver projektets olika arbetsmoment. Arbetet är inte heller en fullständig handbok inom området, utan handlar om hur ett konkret problem löses. Eftersom examensarbetet bygger vidare på ett högtalarprojekt kommer jag inte ingående att behandla saker som i huvudsak hör hemma inom området högtalarteknik.

## **2 REFERENSHÖGTALAREN**

Högtalardesign är ett område där slutprodukten, alltså högtalaren, har många olika egenskaper som är mätbara. Ändå är referenshögtalare väldigt omdebatterade eftersom det i slutändan alltid är användaren som ger sin subjektiva bedömning på hur lyckad och användbar en högtalare är. Information från datablad eller egna mätningar kan ändå underlätta bedömningen av högtalare och det finns objektiva standarder att följa. Det ställs höga krav på referenshögtalare som används vid kritisk lyssning eftersom de är viktiga verktyg i arbetet. (Gander 2001 s.471)

## 2.1 Krav

Termen monitor i studio monitor och referensmonitor innebär vanligtvis att högtalaren konstruerats för att återge materialet så ofärgat som möjligt. Det vill säga att frekvens- och fasnången är utan förändringar över hela ljudspektrumet. Målet är att högtalaren inte ska förvränga materialet som spelas upp genom att något frekvensområde framhävs eller döljs. (Wikipedia 2012a)

Mark R. Gander (2001 s. 471-473) skriver i boken *Loudspeaker and Headphone Handbook* att han i sina efterforskningar kunnat urskilja sex huvudsakliga bedömningskriterier för referensmonitorer:

- Jämn axiell frekvensgång över hela frekvensområdet
- Förmåga att producera höga ljudtryck
- Låg icke-linjär distorsion
- Korrekt transientsvar i tidsdomänen
- Kontrollerad spridning
- Kontrollerad impedans

### 2.1.1 Jämn axiell frekvensgång över hela frekvensområdet

Noggrannheten hos ljudtryckets amplitud mot frekvensgången är den huvudsakliga normen enligt vilken man bedömer en referenshögtalare. Man använder enheten decibel och toleransen anges i plus och minus decibel över högtalarens användbara frekvensområde. Exempelvis  $\pm 6$  dB ger en maximal avvikelse på 12 dB från högtalarens högsta till högtalarens lägsta amplitud. För högtalare av hög kvalitet kan  $\pm 3$  dB ses som en norm. Högtalarens verksamhetsområde eller frekvensgång kan beskrivas utgående från de frekvenser där avvikelsen i ljudtryckets amplitud inte längre ryms inom  $\pm 3$  dB området. Frekvensgången inom området 50 Hz och 10 kHz är den viktigaste, för den innefattar det mesta av musikens energi, men det självklara målet är ändå 20 Hz till 20 kHz, vilket är detsamma som människans hörbarhetsområde, men detta är med dagens teknologi endast möjligt i de mest omfattande högtalarsystemen (Wikipedia 2012b).

Till och med när avvikelserna är väldigt små kan det finnas utrymme för olikheter i vissa frekvensområden, vilket kan leda till att två olika referenshögtalare med samma specifikation kan ha olika ljudegenskaper. Detta gör det befogat att ha personliga synpunkter på en högtalares kvalitet. (Gander. 2001 s. 471-472)

### **2.1.2 Förmåga att producera höga ljudtryck**

Referenshögtalare måste kunna alstra sådana ljudtryck som avslöjar brister i inspelningen och åtminstone återge sådana nivåer som råder vid musikframträdanden. Som exempel på nivåer på ljudtryck kan 90 dB räcka för tal, solo eller kammarmusik och för orkestermusik 100 dB. Modern musik som rock pop och elektronisk musik kan komma att kräva ljudtryck på upp mot 120 dB. Höga nivåer som dessa når man genom att använda sig av högtalarelement men hög känslighet och hög effekttålighet. Högtalarelement med hög effekttålighet har dessutom den fördelen att de bättre klarar av de påfrestningar som de kan och kommer att utsättas för i professionella arbetsmiljöer på grund av sin robusthet. (Gander. 2001 s. 472)

### **2.1.3 Låg icke-linjär distorsion**

Vågformen som en högtalare alstrar vid de ljudtrycknivåer som krävs för användningsändamålet måste i högsta möjliga grad vara fri från produkter av harmonisk, icke harmonisk och intermodulationsdistorsion. Typiska dynamiska högtalare är endast linjära, eller nästan linjära under en liten del av konutslaget. Speciellt då man närmar sig högtalarens maximala värden kan konstruktionen som typiskt bygger på en magnet och en talspole fäst vid ett membran orsaka distorsion på grund av högtalarmembranets dämpande upphängning. Beroende på vilken funktionsprincip högtalarelementet bygger på kan särskilda typer av problem med distorsion uppstå. Växelverkan mellan en högtalares olika högtalarelement och passiva delningsfilter kan också orsaka distorsion. Högtalarlådor kan också orsaka distorsion. Vid väldigt höga ljudtryck får också luften i sig icke-linjära egenskaper. (Gander. 2001 s. 472)

#### **2.1.4 Korrekt transientsvar i tidsdomänen**

Transientsvar är hur väl en högtalare förmår att återge korta ljudimpulser. Fasgången vilken är förhållandet i fas mellan in- och utsignalen för vissa frekvenser i en apparat som till exempel ett filter kommer i hög grad att påverka systemets noggrannhet. Transientsvaret är en funktion av både signalens amplitud och fasgång och ojämnheter i frekvens- och fasgången kommer att orsaka problem. Studier visar att tränade lyssnare kan känna igen en tidsförskjutning på 0,5 ms. (Gander. 2001 s. 472-473)

#### **2.1.5 Kontrollerad spridning**

En referenshögtalare bör ha en horisontell och vertikal spridning som är jämn i förhållande till frekvensen. Spridningen påverkas av högtalarmembranets yta och utformning och högre frekvenser sprids sämre än låga frekvenser från samma strålande yta. Ju mindre den strålande ytans diameter är desto större är spridningen av de höga frekvenserna. Spridningen är speciellt viktig vid delningsfrekvenserna där olika högtalarelements spridningsegenskaper måste passa varandra. Man kan mäta en högtalares spridning genom att placera en mätmikrofon vid olika positioner i förhållande till högtalaren och mäta frekvensgången. Horisontellt är vinkeln minst 45–90° som man bör kunna gå från membranaxeln utan att ljudtrycket för en referenshögtalare skall minska med mer än 6 dB. Vertikalt är vinkeln 20–40°. Spridningsegenskaperna är viktiga med tanke på att lyssnaren inte alltid är en person och inte heller alltid kan vara optimalt placerad. Man vill också att spridningen skall följa frekvensen så jämnt som möjligt utanför högtalarens huvudsakliga strålningsområde så att de tidiga reflektionerna via rummets ytor inte ska vara så störande. Strålningen från i första hand diskantelement kan också ytterligare kontrolleras med hjälp av horn eller så kallade waveguides. Ifall ett utrymme är speciellt besvärliga med tanke på ljudåtergivning kan problemen minimeras genom användning av närfältsmonitorer. (Gander. 2001 s. 473)

#### **2.1.6 Kontrollerad impedans**

Impedansen består av resistansen i talspolen och den kapacitiva och induktiva reaktansen. Även högtalarens mekaniska egenskaper och därmed också lådkonstruktionens egenskaper inverkar på impedanskurvan. Impedansen en högtalare utgör för förstärka-

ren är allt annat än jämn i förhållande till frekvensen. En tumregel är att allt som syns i en högtalares impedanskurva syns också i dess frekvensgång. (Gander. 2001 s. 473)

### **2.1.7 Slutsats**

Inspelad musik går genom en mängd elektroniska apparater som förstärkare, högtalare och annan utrustning innan den når våra öron. Att varje sådan apparat på något sätt förvränger och förändrar den ursprungliga signalen är ofrånkomligt. Efter att man gjort sitt bästa för att minska på degraderingen av signalen och använt sig av mätinstrument för att bedöma ifall man lyckats, måste man sist och slutligen ändå alltid lita på sina egna öron för att bedöma ifall ljudkvaliteten är acceptabel. (Everest. 2007)

## **3 FILTER**

Med filter syftar man i högtalarsammanhang oftast både på själva delningsfiltret och ytterligare på ekvalisering. Ekvalisering, engelska equalization, innebär att man på något sätt ändrar på amplituden för vissa frekvenser i en signal. En krets som har sådana egenskaper kallas ekvalisator, engelska, equalizer. Ett exempel på en sådan krets är en tonkontroll hos en ljudanläggning. Delningsfiltrets funktion är att skilja på signaler med olika frekvens. Flervägshögtalare använder sig av någon typ av delningsfilter för att varje högtalarelement ska motta en signal innehållande de frekvenser den blivit konstruerad för att återge bäst. Delningsfilter är i huvudsak endera passiva eller aktiva. Passiva delningsfilter använder sig av passiva komponenter som motstånd, kondensatorer och spolar medan aktiva filter består av motstånd, kondensatorer och någon typ av buffert, som till exempel en operationsförstärkare. Passiva delningsfilter placeras vanligtvis efter förstärkaren i signalkedjan, medan aktiva delningsfilter placeras före. Då man använder aktiva delningsfilter blir man därmed ofta tvungen att använda flera förstärkanaler i systemet. Detta betyder att högtalare med inbyggda aktiva delningsfilter också innehåller förstärkarkretsen och benämningen aktiva högtalare syftar på sådana system. Mitt examensarbete kommer endast att behandla aktiva filter, eftersom projektet som ligger som grund för arbetet också endast innehåller aktiva filter.

### 3.1 Fördelar med aktiva filter

Det finns många fördelar med att använda aktiva delningsfilter utöver att de ofta är både enklare och billigare att designa än passiva. I boken *High Performance Loudspeakers* (1991 s. 245-248) och i kapitlet The amplifier/loudspeaker interface i boken *Loudspeaker and Headphone Handbook* (2001 s. 277-279) listar Martin Colloms flera fördelar.

#### 3.1.1 Minskad distorsion

Aktiva flervägssystem har i studier subjektivt uppfattats som bättre än passiva högtalarsystem med endast en förstärkare per kanal. Att aktiva system upplevs som klarare än passiva tros bero på att varje enskild förstärkare utsätts för en mindre belastning, exempelvis ifall en signal innehåller sådana basfrekvenser som gör att förstärkaren för basfrekvenserna drivs till distorsion så kommer distorsionen inte att märkas i de högre frekvenserna eftersom förstärkningen av dessa frekvenser sker oberoende av basfrekvenserna. Då förstärkaren fungerar över ett smalare frekvensområde är risken mindre att det ska förekomma så kallad intermodulationsdistorsion. (Colloms. 1991 s. 245-246)

Då man använder aktiva delningsfilter kopplas varje förstärkare direkt till en polerna på ett högtalarelement. Varje förstärkare påverkas därmed av ett minimalt antal faktorer och av endast ett högtalarelements elektriska egenskaper. Varje högtalarelement har en resonansfrekvens eller egenfrekvens, engelska fundamental resonance frequency. Det är vid denna frekvensen som högtalarelementet börjar vibrera efter att man till exempel knackar på det med ett finger. Passiva högtalarsystem har flera högtalarelement och därmed också flera komponenter med olika resonansfrekvens i samma krets. (Colloms. 1991 s. 246-247)

Det kan vara svårt att beräkna sambandet mellan olika högtalarelement och därmed blir man tvungen att empiriskt pröva sig fram, vilket både är dyrt och tidskrävande. I ett aktivt högtalarsystem behöver man inte beakta den möjliga inverkan olika högtalarelement har på varandra på samma sätt och därmed har man ett bekymmer mindre att tänka på. (Colloms. 2001 s. 277-278)

### **3.1.2 Ekvallisering av basfrekvenserna**

Ett högtalarsystem behöver ofta någon typ av ekvallisering av basfrekvenserna och detta kan gärna lösas med aktiva filter. Med passiv filtrering blir effektförlusterna onödigt stora, vilket har en ännu större betydelse i de låga frekvenserna. Ifall ekvallisering av basfrekvenserna sker på en lägre signalnivå, innan förstärkaren, kommer den förstärkta signalen inte mer att modifieras innan den når högtalaren utan förstärks som sådan. Ingen del av signalen förstärks då i onödan. Vid passiv ekvallisering förstärks basfrekvenserna för att sedan igen dämpas i ekvalliseringens passiva komponenter och detta medför stora förluster. (Colloms. 1991 s. 246)

### **3.1.3 Kompensering för olika känslighet mellan högtalarelementen**

De högtalarelement man väljer att basera ett högtalarsystem på väljs utgående från många olika faktorer och det är ofrånkomligt att det finns variationer i känslighet hos olika element och slutligen bland de element man kommer att välja. I aktiva högtalarsystem är det enkelt att inkludera en buffert i signalkedjan som kompenserar för olika känslighet mellan högtalarelementen. (Colloms. 1991 s. 246)

### **3.1.4 Skydd av förstärkaren**

Som ett resultat av att varje förstärkare endast driver en högtalare i aktiva flervägs-system kan man i en högre grad anpassa varje förstärkare med målet att skydda både förstärkaren och högtalaren. Genom att till exempel förse kretsen med en säkring kan man försöka förminska skadorna som uppstår vid överbelastning. (Colloms. 1991 s. 246)

### **3.1.5 Fördröjning av signalen**

I ett flervägs-system monteras högtalarna oftast i en låda med raka sidor. Detta medför att de olika högtalarelementens talspoler antagligen inte kommer att befinna sig lika långt från ytan de monteras fast i. På grund av denna förskjutning i högtalarelementens position i det horisontella planet kommer även signalen från de olika högtalarelementen att nå lyssningspunkten vid olika tidpunkter. Genom att använda aktiva delningsfilter

kan signalen som når varje högtalarelement fördröjas elektriskt för att kompensera förskjutningen i läge. Det är främst frekvenserna vid delningsfiltret som är känsliga för denna förskjutning. Man kan även behöva justera fördröjningen beroende på högtalarnas placering i lyssningsrummet samt lyssningspunktens position. (Colloms. 2001 s. 279)

### **3.1.6 Komponenter i aktiva filter**

En klar fördel med aktiva filter framom motsvarande passiva är att man inte behöver använda sig av induktiva komponenter som spolar lindade runt en kärna. Spolar är både dyra och stora till formatet och bidrar ofta till ökad distorsion. Det kan även vara svårt att få tag spolar på ifall man inte har möjlighet att linda sina egna. Aktiva filter som använder komponenter av god kvalitet har låg distorsion och det är ofta lätt att få tag på de motstånd, kondensatorer och operationsförstärkare som ofta behövs för de vanligaste filterfunktionerna. Ifall en viss komponent är svår att hitta eller dyr på grund av att komponentvärdet är ovanligt är detta ett skäl i sig att se sig om efter en annan lösning på problemet. (Colloms. 1991 s. 248)

### **3.1.7 Flexibilitet hos aktiva filter**

En av de absolut största fördelarna med aktiva filter är flexibiliteten de ger. Man kan förhållandevis enkelt designa filter med funktioner som skulle vara näst intill omöjliga, i alla fall opraktiska och dyra, att göra med passiva komponenter. Aktiva filter kan också betydligt enklare göras justerbara eller utbytbara än motsvarande passiva och det är lättare att i ett senare skede av utvecklingsprocessen att göra justeringar i komponentvärden. Det är till exempel möjligt att designa aktiva analoga filter med högre gradtal än vad som annars skulle vara praktiskt, speciellt då det gäller ekvalisering och korrigering av basfrekvenserna. (Colloms. 1991 s. 247)

## **3.2 Olika typer av aktiva filter**

Det finns flera olika sätt man kan dela in elektriska filter på. Redan tidigare har en skillnad mellan aktiva och passiva filter gjorts. Man kan ytterligare välja att göra en indelning utgående från filtertopologi, alltså på vilket sätt olika komponenter är kopplade



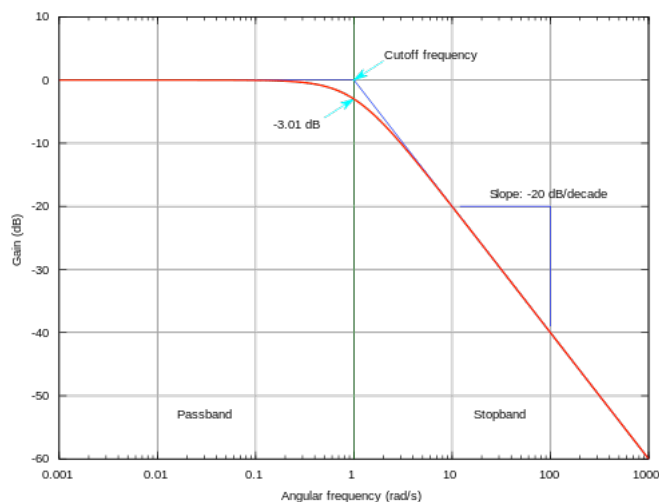
till varandra. Denna indelning gör nödvändigtvis ingen skillnad på hur filtret i praktiken fungerar och används. Ett annat sätt man kan dela in filter på är utgående från filtrets överföringsfunktion, engelska transfer function, alltså den verkan filtret har på signalen. En överföringsfunktion åskådliggörs vanligen i ett bodediagram där den horisontella axeln utgör frekvensen och den vertikala utgör filtrets verkan på signalen, alltså amplituden vid den frekvensen.

De viktigaste typerna i detta sammanhang är:

- Lågpasfilter
- Högpasfilter
- Bandpassfilter
- Bandspärrfilter
- Hyllfilter

### 3.2.1 Lågpasfilter

Ett lågpasfilter, engelska low-pass filter, gör det som namnet beskriver, det låter de frekvenser som är lägre än brytfrekvensen passera oförändrade och dämpar de frekvenser som är högre. Filtrets gradtal inverkar på dämpningen. (Wikipedia 2012c)



Figur 1. Bodediagram över ett lågpasfilter (Källa: Wikipedia 2012c).

### **3.2.2 Högpasfilter**

Ett högpasfilter, engelska high-pass filter, gör även det som namnet beskriver, det låter de frekvenser som är högre än brytfrekvensen passera oförändrade och dämpar de frekvenser som är lägre. Ett bodediagram för högpasfilter ser ut på motsvarande sätt som för lågpasfilter, men kurvan är den omvända. Filtrets gradtal inverkar som bekant på dämpningen, vilken blir högre ju längre från brytpunkten man går. (Wikipedia 2012d)

### **3.2.3 Bandpassfilter**

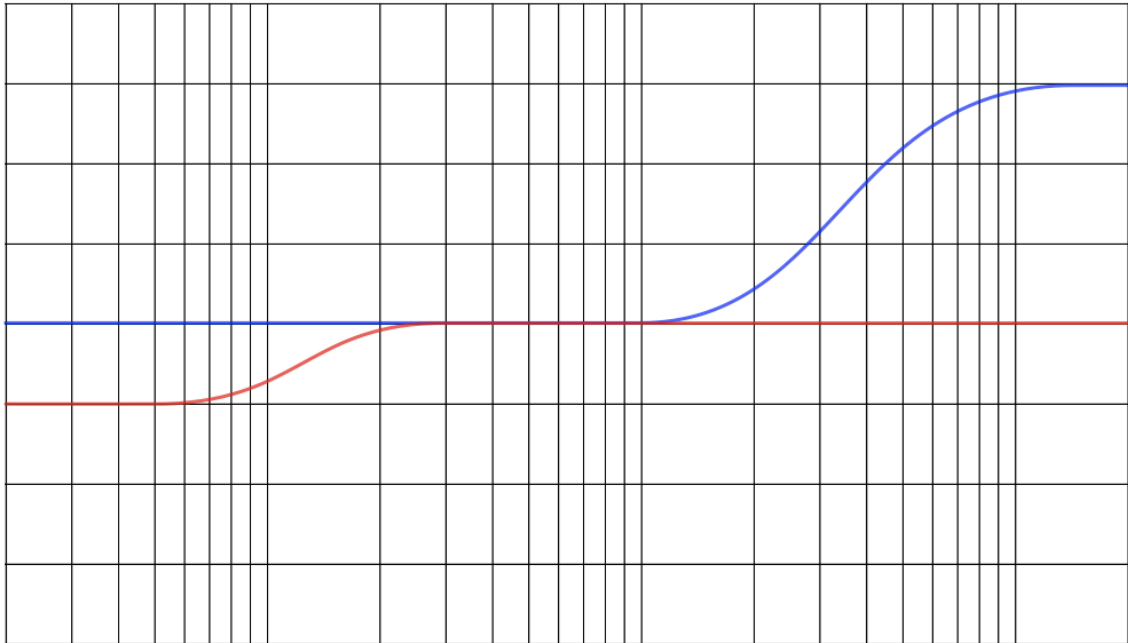
Ett bandpassfilter låter signalen inom ett visst frekvensband passera oförändrat, medan övriga frekvenser dämpas. Bandpassfilter kan bestå av ett lågpasfilter och ett högpasfilter som blivit kaskadkopplade, men de behöver inte nödvändigtvis göra det då det även existerar specifika bandpassfilter. Aktiva filter av typen Sallen-Key kan med fördel kaskadkopplas. Inom audioelektroniken används bandpassfilter bland annat som delningsfilter i flervägshögtalare. (Wikipedia 2012e)

### **3.2.4 Bandspärrfilter**

Bandspärrfilter, engelska band-stop filter eller band-rejection filter, dämpar en viss del av signalen men låter merparten av den vara oförändrad. Bandspärrfilter med väldigt höga Q-värden kallas notchfilter. (Wikipedia 2012f)

### **3.2.5 Hyllfilter**

Hyllfilter, engelska shelving filter, är en filtertyp som man i första hand använder vid ekvalisering. Filtrets funktion är att förstärka eller dämpa signalen jämnt från en viss frekvens vidare. (Wikipedia 2012g)



Figur 2. Bodediagram över ett dämpande och förstärkande hyllfilter (Källa: Wikipedia 2012g).

### 3.3 Användning av filter

Detta examensarbete i audioelektronik behandlar användningen av aktiva analoga filter inom området högtalarteknik. Projektet som arbetet är en del av kan anses vara ett typexempel på ett modernt högtalarprojekt och därmed ska det även behandla de aspekter av filter-design man kan stöta på i vilket annat liknande projekt som helst.

Projektet innehåller flera aktiva filter med i princip tre skilda huvudsakliga funktioner:

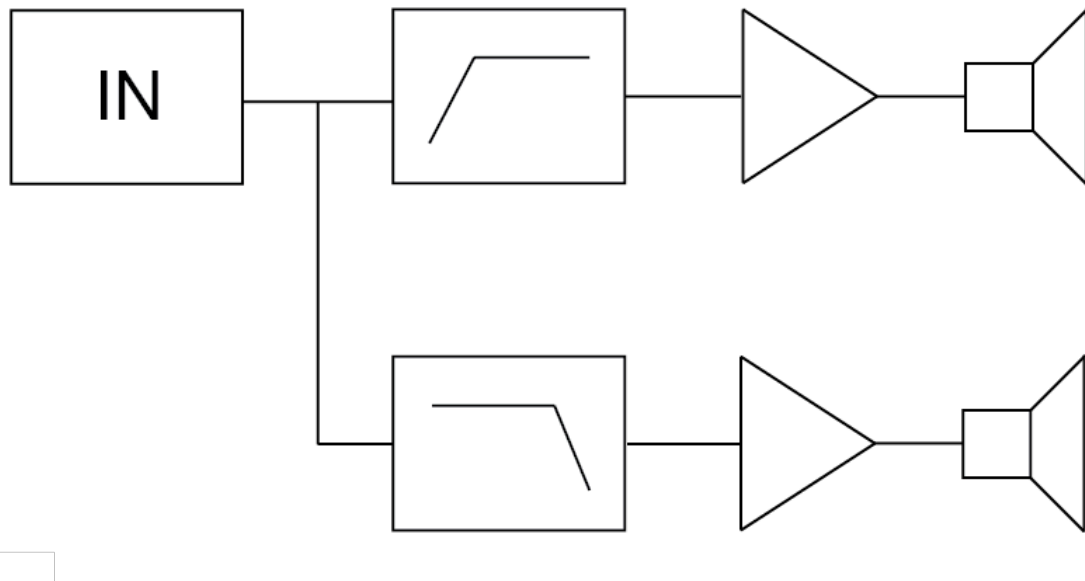
- Delningsfilter
- Filter som kompenserar för högtalarelementen och högtalarlådan
- Filter som kompenserar för lyssningsrummet

Utöver dessa tre funktioner kan ett filter även ha andra uppgifter, som tidigare nämnts skyddar till exempel skyddar ett högpassfilter högtalarelementet från skadliga låga frekvenser.

### 3.3.1 Delningsfilter

Ett av kraven på en referenshögtalare är en jämn frekvensgång över hela frekvensområdet och det lyckas man med i praktiken endast genom att använda sig av flervägshögtalare. En högtalares olika högtalarelement väljs utgående från många olika faktorer. Då man planerar ett högtalarsystem väljer man högtalarelement inte bara med tanke på att varje enskilt högtalarelement ska vara lämpligt för målet man vill nå, utan de ska även fungera bra tillsammans. Detta är speciellt viktigt just vid delningsfrekvensen. Ifall en högtalares högtalarelement har väldigt olika spridningsegenskaper vid delningsfrekvensen kan detta inverka störande på frekvensgången, detta är dock inte ett problem som nödvändigtvis kan lösas med filtrering.

Olika högtalarelement är vanligtvis framtagna speciellt med tanke på att kunna återge en signal med information inom ett visst frekvensband och man vill därmed också att högtalarelementet så långt det är möjligt inte ska motta någon annan signal förutom denna. Att ett högtalarelement inte är tänkt för vissa frekvensband betyder i praktiken att högtalarelementet inom dessa frekvensband är svårt att kontrollera och att det har en ojämn frekvensgång eller andra störande kvaliteter så som till exempel oönskade spridningsegenskaper. Målet är att man ska kunna dra nytta av varje högtalarelements goda sidor i ett fungerande högtalarsystem. Detta medför i sin tur att signalen måste modifieras och fördelas mellan de olika högtalarelementen. Det förverkligar man i delningsfiltret. Ett aktivt analogt delningsfilter behöver inte nödvändigtvis bestå av ett enda filter, utan i praktiken kan det med fördel bestå av en uppsättning hög- och lågpasfilter. Tanken är att man filtrerar bort de frekvenser man inte vill att ska nå högtalarelementet. I sin kanske enklaste och mest lättförstådda form består ett delningsfilter därmed av ett högpassfilter och ett lågpasfilter med samma insignal och med samma brytfrekvens. Ett blockdiagram över en sådan krets finns i figur 3.



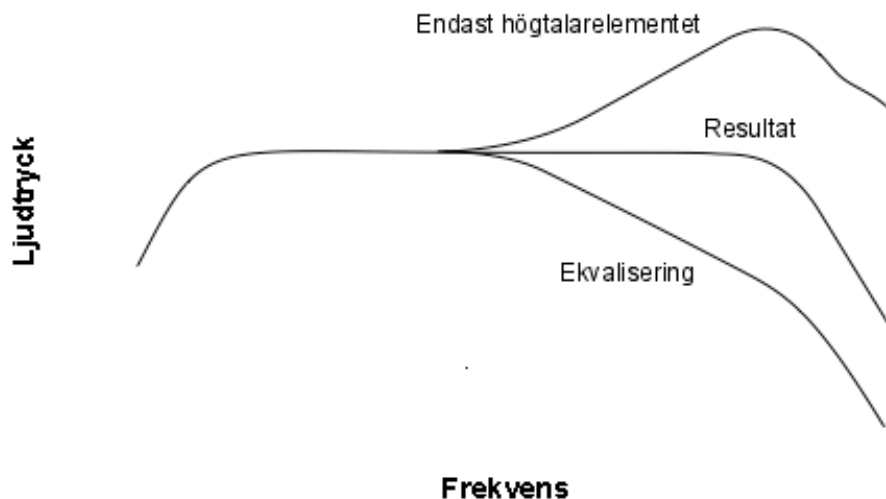
Figur 3. Blockdiagram över en simpel aktiv högtalare där ett hög- och lågpasfilter utgör delningsfiltret.

Hög- och lågpasfilter som man i praktiken använder sig av är vanligtvis av andra eller fjärde grad, det vill säga de har en dämpning på 12 dB/oktav eller 24 dB/oktav. Denna dämpning är inte tillräcklig för att man inte ska behöva beakta de olika högtalarelementens egenskaper utanför passbandet, de kan i hög grad inverka på högtalarsystemets totala frekvensgång och egenskaper. Det är betydligt mindre risk för oönskade störningar om man väljer högtalarelement utan stora oregelbundenheter i frekvensgången även utanför det tänkta passbandet. Det är skäl att tidigt i planeringsskedet noga fundera igenom valet av högtalarelement och delningsfiltrets brytfrekvens. (Fincham 2001 s. 231)

### 3.3.2 Kompensering för högtalarelement och låda

Ett av kraven på en referenshögtalare är en jämn frekvensgång. Frekvensgången för varje enskilt högtalarelement behöver däremot nödvändigtvis inte vara jämt för att systemets totala frekvensgång skall vara det, utan man kan genom ekvalisering kompensera för de ojämnheter som ofta finns. Kompensering är dock egentligen endast ett alternativ ifall ojämnheterna kan ses som relativt jämna trender i frekvensgången, allt för branta och stora variationer råar man i regel inte på utan att övriga problem uppstår. Eftersom aktiva filter erbjuder möjligheten att inte bara dämpa utan även förstärka signalen kan

man åstadkomma mångsidigare kompenseringar än med passiva filter. (Colloms. 1991 s. 228-229)



Figur 4. Diagram som visar hur man använder ekvalisering för att kompensera för högtalarelementets frekvensgång.

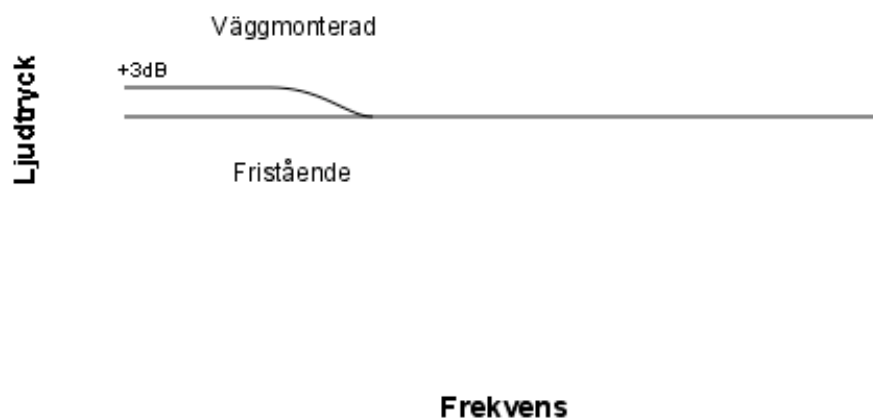
Grundprincipen är att man genom filtrering dämpar eller förstärker vissa av signalens frekvensområden så att slutresultatet i samverkan med högtalarelementets frekvensgång blir det man önskar. De störningar i frekvensgången som uppstår på grund av diffraktion mot högtalarlådans kanter och överlag den verkan högtalarlådan har på frekvensgången är ofta olika vid olika lyssningspunkter. Ifall man gör kompenseringar för dessa oregelbundenheter bör de göras på ett genomsnitt av avvikelserna uppmätta vid olika vinklar till membranaxeln, för annars är det möjligt att en förbättring vid en position leder till en försämring vid en annan. (Fincham. 2001 s. 251)

De olika högtalarelementen i en högtalare är vanligtvis av olika känslighet och det medför att man någonstans i kretsen kommer att bli tvungen att kompensera för detta. Det är också möjligt att det kan uppstå oönskade förluster i någon del av den aktiva filtreringen och den kan man kompensera för genom att till exempel justera förstärkningen av en operationsförstärkare i ett av filtren i delningsfiltret. Möjligheter till mindre justeringar av denna typ kan det vara bra att ta med i kretsen för att gardera sig även fast de inte nödvändigtvis verkar behövas i planeringsskedet. (Colloms. 1991 s. 252-253)

Även bland högtalarelement av god kvalitet kan känsligheten bland olika exemplar av samma modell variera med flera decibel och därför är det viktigt att också i efterhand kunna ha möjligheten att matcha högtalarelementen om det skulle behövas (Colloms 1991 s. 212-213).

### **3.3.3 Kompensering för lyssningsrum**

Det finns i regel två olika sätt som ett rum inverkar på högtalaren och sättet den utstrålar energi ut i rummet, det ena är genom direkt verkan och det andra genom indirekt verkan. Rummets direkta verkan på högtalaren uppstår då rummet på grund av sin utformning och förhållande till högtalarelementen tar sig som en extra belastning på högtalarelementens membran. Exempelvis har en fritt hängande högtalare i ett ekofritt rum en lättare uppgift med att transportera luften då högtalarmembranet hos högtalaren vibrerar gentemot en högtalare som monterats infälld i väggen. För den infällda högtalaren fungerar väggen som en spärr för den utstrålande tryckvågen, detta gäller speciellt vid låga frekvenser. Tryckvågen riktas därmed framåt i stället för att sprida sig runt hela högtalaren. Ljudtrycket blir följaktligen högre mätt vid samma position för de frekvenser som påverkas av detta fenomen än om högtalaren skulle hänga fritt. Eftersom fenomenet gör att arbetsförhållandet för högtalaren förändras i och med att motståndet för membranet hos den väggmonterade högtalaren ökar säger man att det är frågan om en direkt verkan. Denna typ av verkan som rummet har på högtalaren kan ses som en av högtalarens egenskaper och därför är det möjligt att kompensera för dessa genom filtrering. Man kan till exempel genom att använda ett hyllfilter försöka dämpa och den förstärkning av de låga frekvenserna som uppstår vid väggmontering och därmed återigen normalisera frekvensgången.



Figur 5. Diagram som visar hur högtalarens placering inverkar på frekvensgången.

Vid indirekt verkan pratar man om det sätt som rummets reflektioner påverkar ljudåtergivningen vid lyssningspunkten. I alla lyssningsrum förutom de ekofria mottar man vid lyssningspunkten en blandning av det direkta ljudet från högtalaren och ljud som via någon omväg tagit sig dit, till exempel via en reflektion från golvet. Vid så gott som varje punkt i rummet kommer man att motta en unik blandning av det direkta och det reflekterade ljudet därför är det inte lämpligt att försöka sig på att åtgärda de störningar som reflektionerna kanske orsakar genom att ekvalisera signalen till högtalaren eftersom ett förbättrat läge i en punkt högst antagligen förvärrar situationen i en annan. (Newell 2001 s. 377)

### 3.4 Filterdesign

Då man planerar de filter som ska ingå i en filter- och förstärkarmodul eller i vilket högtalarsystem som helst utgår man alltid från de högtalarelement man valt. I det projekt som behandlas i detta examensarbete är en del av utgångspunkten att ett par högtalarelement har blivit valda på grund av deras egenskaper och tillgänglighet. Utgående från mätningar av högtalarelementen har man planerat och simulerat en högtalarlåda och därefter byggt en prototyp av lådan. Filtrets uppgift är att åstadkomma ett sådant slutresultat att man kan anse att högtalaren är tillräckligt bra för att duga som refe-



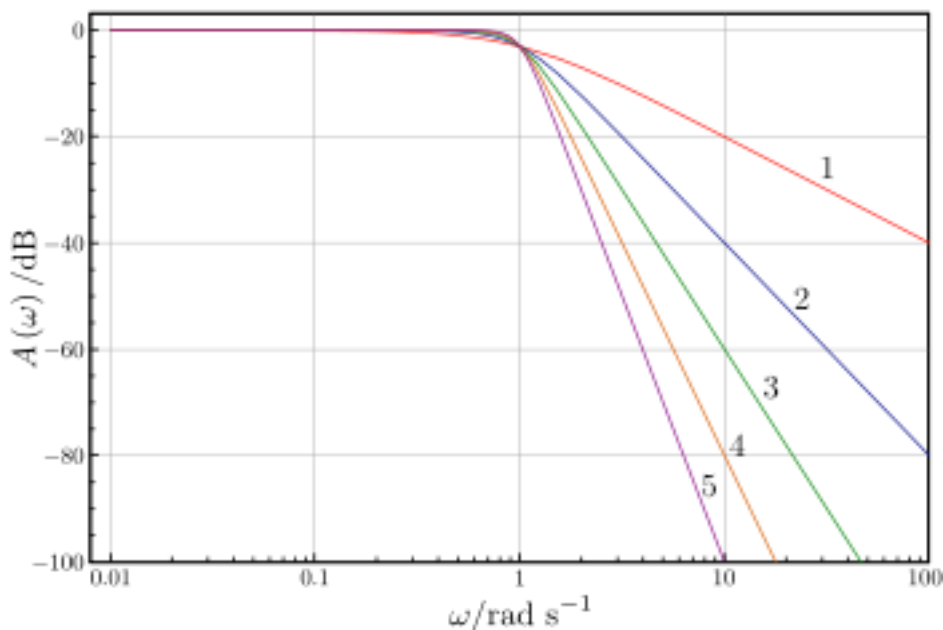
renshögtalare. Jag har alltså sedan första stund jag varit delaktig i projektet haft tillgång till mätningar och simuleringar av högtalarelement och högtalarlåda och även en fysisk prototyp av lådan till referenshögtalaren med tänkta högtalarelement monterade. Dessutom har funktionerna för högtalarprojektets filterdel varit väldigt långt planerade tack vare att man med hjälp av ett digitalt högtalarhanteringssystem kunnat testa hur högtalarprototypen fungerar med olika filter.

Ett oombärligt verktyg då man designar filter för högtalare är någon typ av programvara som möjliggör simuleringar av både högtalaren och filtret. Medietekniklabbet i Arcada har även kunnat erbjuda dessa verktyg i form av en arbetsstation med programvaran LEAP installerad. LEAP innehåller applikationerna EnclosureShop och CrossoverShop. EnclosureShop används för att modellera högtalarelement och högtalarlådor och CrossoverShop används då man designar filter utgående från uppmätta frekvenssvar. EnclosureShop har jag personligen inte behövt använda i detta projekt eftersom det inte har behövts för mitt arbete, men CrossoverShop har varit ett centralt verktyg.

Utgående från mätningarna som görs på högtalarelementen väljer man en lämplig brytfrekvens för delningsfiltret. Brytfrekvensen ska väljas så att båda högtalarelementen även utanför passbandet har en någorlunda jämn frekvensgång i åtminstone en men gärna två oktaver. Ofta kan man bli tvungen att normalisera frekvensgången genom ytterligare filtrering för att åstadkomma detta. Högtalarelement som lämpar sig för återgivning av basfrekvenser har då man går upp i frekvensbandet snävare spridningsegenskaper än för de lägre frekvenserna och man måste därför välja delningsfrekvensen så att den matchar spridningsegenskaperna för bas- och diskantelementen. Väljer man en för låg delningsfrekvens kan man överbelasta diskantelementet. Simuleringar bör göras för positioner vid olika vinkel till membranaxeln. Efter att delningsfiltret är klart kan man inkludera övriga önskade filterfunktioner som till exempel filter för kompensering för högtalarens placering och filter med uppgift att skydda högtalarelementen. (Fincham 2001 s. 248-250)

### 3.4.1 Gradtal

Med graden, engelska order, på ett filter syftar man rent praktiskt på hur mycket filtret dämpar signalen i stopbandet. Ett aktivt analogt filter av första grad dämpar signalen med 6 dB per oktav från brytfrekvensen och för varje inkrementering av gradtalet ökar dämpningen ytterligare med 6 dB per oktav.



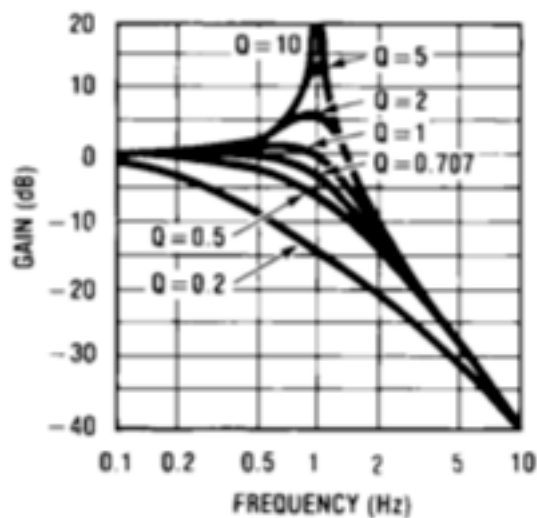
Figur 6. Diagram som visar dämpningen för Butterworthfilter av olika gradtal (Källa: Wikipedia 2012h).

Genom att kaskadkoppla flera aktiva analoga filter åstadkommer man en ökning av det totala gradtalet. Om man till exempel kaskadkopplar två identiska lågpassfilter av typen Sallen-Key, vilka har gradtalet två och alltså en dämpning på 12 dB/oktav, får man ett filter av fjärde grad med en dämpning på 24 dB/oktav. Ett filter av högre grad kräver därmed flera komponenter och filtret blir mera invecklat och svårare att designa, fördelen är ju dock helt klart den ökade dämpningen.

### 3.4.2 Godhetstal

Godhetstalet, engelska quality factor eller q factor, är en parameter som beskriver hur dämpat, eller snarare, underdämpat ett system är. Inom fysiken pratar man om att godhetstalet är kvoten mellan resonansfrekvens och bandbredd och man kan säga att godhetstalet är omvänt proportionellt till dämpningsfaktorn eller dämpningskonstanten för

ett system. Detta betyder att ju högre godhetstal vi har desto mindre dämpningsfaktor har vi. För till exempel ett aktivt analogt högpasfilter av andra grad har godhetstalet en inverkan på hur filtret fungerar i frekvensområdet omkring brytfrekvensen. Nämnade filter har i både pass- och stopbandet ett asymptotiskt beteende, men runt brytfrekvensen ser funktionen annorlunda ut. Godhetstalet har i detta fall direkt att göra med hur skarp kurvan i övergången mellan de två linjerna är. Om man väljer ett för högt godhetstal tenderar filtret att ringa vid frekvenserna runt brytfrekvensen på grund av att frekvensgångens kurva får en topp där. Ju högre godhetstalet är desto instabilare blir kretsen. Om godhetstalet överstiger 0,5 pratar man om att systemet är underdämpat, och om det är mindre än 0,5 är det överdämpat. Om godhetstalet är lika med 0,5 kallas ett system kritiskt dämpat. Godhetstalet saknar enhet. Eftersom begreppet godhetstal kan användas för att beskriva ett liknande fenomen inom många olika områden är det inte alltid lätt att beskriva på ett mer exakt sätt hur man kan använda det. Till exempel är definitionen för godhetstalet för både låg- och högpasfilter en annan än den som här beskrivs (Kugelstadt. 2002 s. 9).



Figur 7. Diagram som visar godhetstalets inverkan på frekvensgången (Källa: Lacanette 2010 s.7).

På liknande sätt som kaskadkoppling inverkar på det totala gradtalet påverkas också det totala godhetstalet då man kaskadkopplar två eller flera filter. Till exempel kan man säga att det resulterande godhetstalet för två identiska seriekopplade aktiva lågpasfilter av andra grad med godhetstalet  $1/\sqrt{2}$  blir lika med produkten av dessa godhetstal, vilken är  $(1/\sqrt{2})^2 = 0,5$  i detta fall. Brytfrekvensen för ett filter med godhetstalet  $Q = 1/\sqrt{2}$  är

den frekvens där amplituden är 3 dB lägre än passbandet enligt formeln  $Amplituden = 20\log_{10}Q$ . Brytfrekvensen kommer att vara den samma även för det kaskadkopplade filtret som för de enskilda filtren och ett godhetstal på 0,5 medför att den totala dämpningen vid brytfrekvensen blir -6 dB. (Lindqvist. 2012)

### 3.4.3 Filteregenskaper

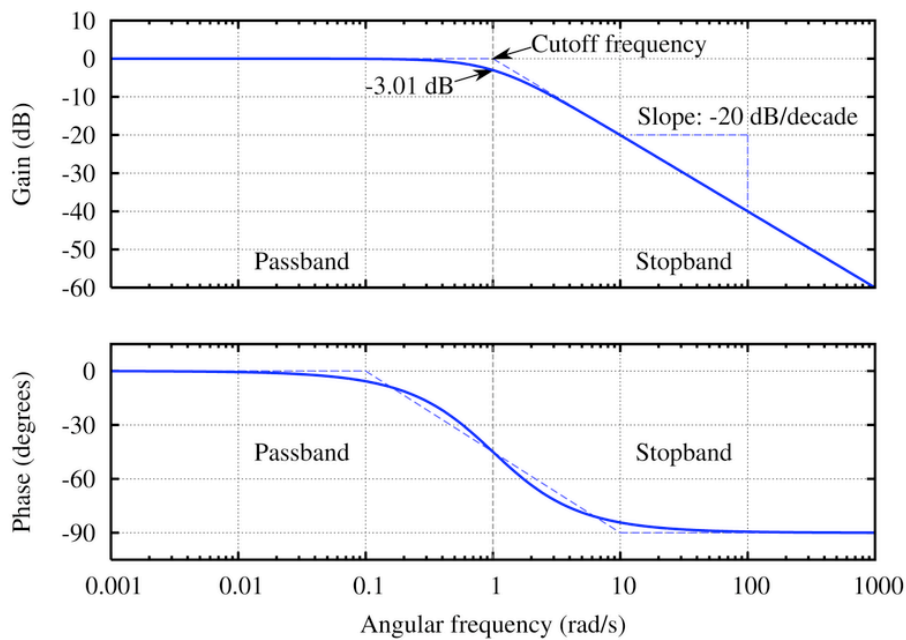
Ett idealt låg- eller högpasfilter låter frekvenserna i passbandet passera oförändrade samtidigt som det eliminerar frekvenserna i stopbandet. Tyvärr existerar det inga ideala filter, utan vi tvingas kompromissa vad gäller filtrens egenskaper. Olika komponentvärden i en krets av en viss topologi ger upphov till olika resultat vilka syns tydligt i frekvens- och fasnången.

Det finns tre klassiska standardiserade filtertyper vilka härstammar från matematiken: (Karki. 2000 s.3)

- Butterworth
- Bessel
- Tjebysjev

Dessa filter har en alla karakteristiska egenskaper vilka är användbara för signalbehandling. Ett filter av typen Butterworth saknar fluktuation i frekvensgången i passbandet, så kallad rippel, vilket i princip är ett krav på vissa tillämpningar inom audioelektroniken. Filtret har ett godhetstal på  $1/\sqrt{2}$  alltså ungefär 0,707 vilket betyder att det är aningen underdämpat. Butterworthfilter har alltid godhetstalet  $1/\sqrt{2}$  oberoende av vad gradtalet är. Detta betyder att för att till exempel få ett Butterworthfilter av fjärde grad behöver man kaskadkoppla två filter av andra grad vilka har sådana godhetstal att produkten är  $1/\sqrt{2}$  för det totala systemet. Detta kan betyda att inget enskilt filter i ett kaskadkopplat Butterworthfilter nödvändigtvis behöver ha godhetstalet  $1/\sqrt{2}$  så länge som det resulterande systemet har det. Det finns tabeller för vilka de enskilda filtrens godhetstal bör vara i kaskadkopplade filter för att man som slutresultat ska få någon av dessa klassiska typer, men en tumregel man kan använda sig av är att de filter med är att man placerar de filter med högre godhetstal tidigare i signalkedjan än de med lägre god-

hetstal. En annan viktig egenskap för Butterworthfilter är deras fasnång (Karki. 2000 s. 8).



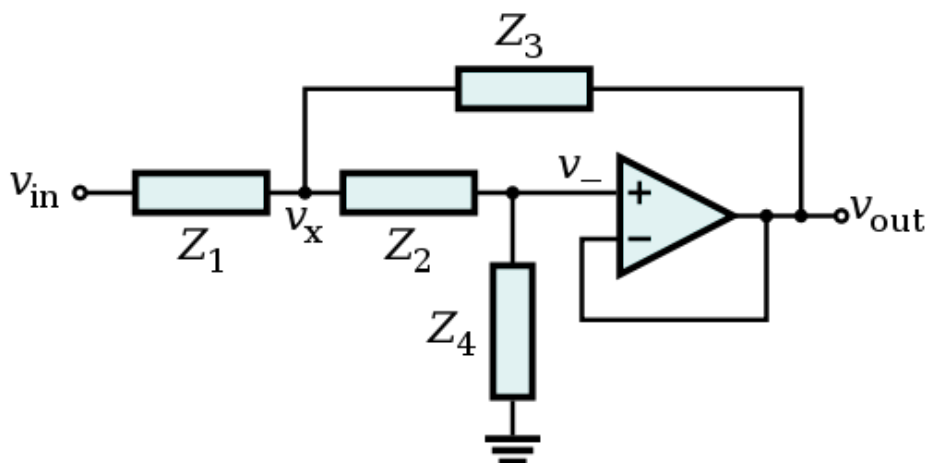
Figur 8. Diagram som visar frekvens- och fasnång för ett Butterworthfilter av första grad (Källa: Wikipedia 2012i).

Man kan i figur 8 se i bodediagrammet för fasnången att ett Butterworthfilter av första grad har fasskift på  $45^\circ$  vid delningsfrekvensen, vilket betyder att det även förekommer hörbart fasskift i passbandet i området närmast brytfrekvensen. Butterworthfiltrets fasskift vid brytfrekvensen för ett filter av andra grad kommer att vara det dubbla jämfört med motsvarande filter av första grad, alltså  $90^\circ$ . Vid ytterligare kaskadkoppling kommer också varje filters fasskift att ha en inverkan på det totala systemets fasskift.

Besselfiltrets group delay, det vill säga fördröjningen av olika sinusformade signaler av olika frekvens, är det jämnaste av alla dessa tre filtertyper. Ett Besselfilter är dock inte lika underdämpat som till exempel ett Butterworthfilter. Tjebysjevfilter har ett högt godhetstal och är därmed väldigt underdämpat, men har även rippel i pass- eller stopbandet beroende på hurdana Tjebysjevfilter det är frågan om och de passar därmed mindre bra i till exempel delningsfilter. Jag behandlar inte dessa två filtertyper mera ingående eftersom de inte har varit speciellt viktiga för mitt projekt. Butterworthfilter fungerar mycket bra för audiobruk och anses vara den bästa kompromissen. (Karki. 2000 s. 3)

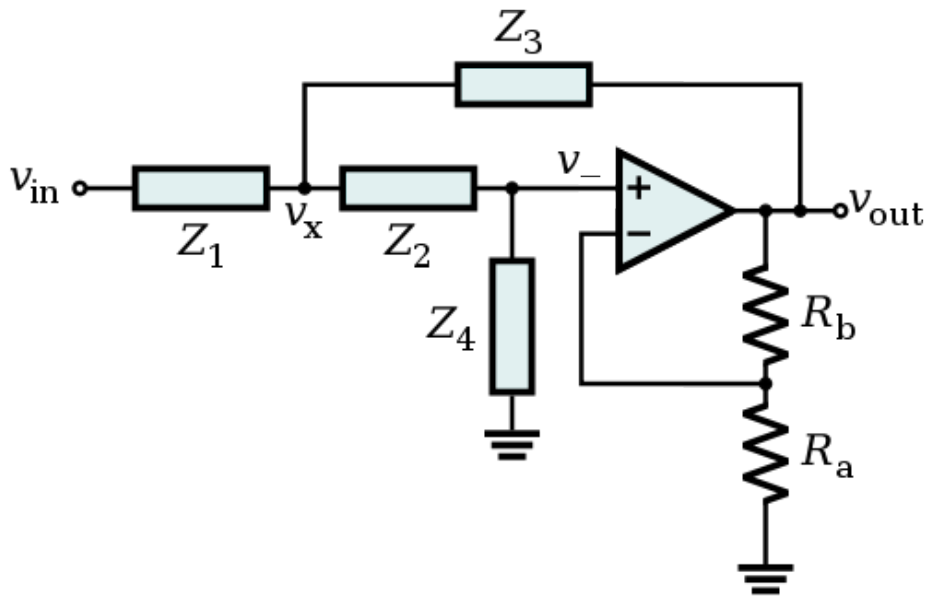
### 3.4.4 Sallen-Key-topologin

Sallen-Key-topologin introducerades av R. P. Sallen and E. L. Key vid Massachusetts Institute of Technology – Lincoln Laboratory år 1955 och används ännu idag flitigt inom signalbehandling. Några av orsakerna till topologin är så populär är att den är enkel att förstå sig på, enkel att designa och lämpar sig väl för kaskadkoppling. Topologin är inte heller speciellt beroende av prestandan hos filtrets buffert.



Figur 9. Sallen-Key-topologin (Källa: Wikipedia 2012i).

Beroende på vilka komponenter man väljer för  $Z_1 - Z_4$  i figur 9 kan man skräddarsy Sallen-Key-filtrets godhetstal och brytfrekvens och välja ifall filtret ska vara av typen låg- eller högpas. Komponenterna  $Z_1 - Z_4$  bestämmer tillsammans godhetstalet och brytfrekvensen och tyvärr är det därför inte möjligt att ändra värdet på ena parametern genom att justera värdet på endast en komponent, utan man blir tvungen att ändra på flera för att kunna finjustera filtret. (Zumbahlen. 2002 s. 67-68)

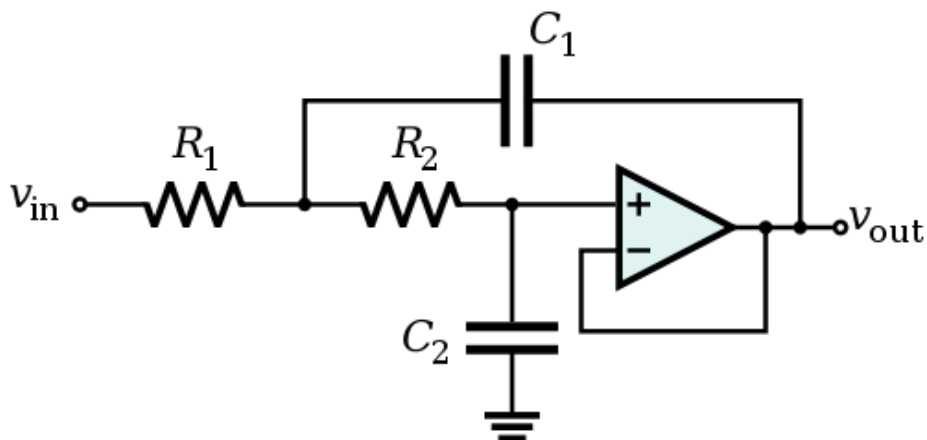


Figur 10. Sallen-Key-topologin med förstärkning (Källa: Wikipedia 2012i).

Motstånderna  $R_a$  och  $R_b$  i filtret i figur 10 bestämmer kretsens förstärkning  $G = 1 + \frac{R_b}{R_a}$  där  $G$  är förstärkningen. Motstånderna  $R_a$  och  $R_b$  påverkar förutom förstärkningen även kretsens godhetstal och därmed är det inte heller möjligt att justera filtrets förstärkning utan att också påverka filtrets funktion i övrigt (Lacanette. 2010 s. 17).

### 3.4.5 Sallen-Key lågpasfilter

Genom att i kretsen i figur 9 sätta  $Z_1$  och  $Z_2$  som motstånd och  $Z_3$  och  $Z_4$  som kondensatorer får man ett Sallen-Key lågpasfilter utan förstärkning.



Figur 11. Sallen-Key lågpasfilter (Källa: Wikipedia 2012i).

Vanligtvis har man klart för sig vilka värden för brytfrekvens och godhetstal man vill ha då man börjar designa ett filter. Formlerna för brytfrekvens  $f_0$  och godhetstal  $Q$  finns i figur 12 och 13.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1R_2C_1C_2}}$$

Figur 12. Formel för brytfrekvens för ett Sallen-Key lågpasfilter (Källa: Wikipedia 2012i).

$$Q = \frac{\sqrt{R_1R_2C_1C_2}}{C_2(R_1 + R_2)}$$

Figur 13. Formel för godhetstal för ett Sallen-Key lågpasfilter (Källa: Wikipedia 2012i).

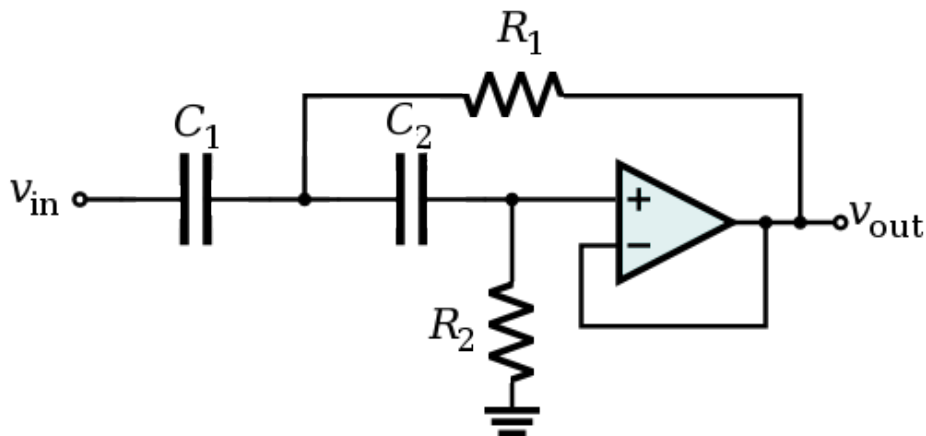
För att få reda på vilka komponentvärden man skall använda för att man ska få en filterfunktion som motsvarar förväntningarna behöver man ofta göra en del antaganden eftersom båda formelerna innehåller fyra obekanta variabler. Ofta väljer man samma värde för både  $R_1$  och  $R_2$  och då kan man från formeln för godhetstalet få ut förhållandet  $C_1/C_2 = 4Q^2$  mellan kondensatorerna. Eftersom man vet värdet på  $Q$  vet man då också förhållandet mellan  $C_1$  och  $C_2$ . Genom att ange  $C_1$  som en konstant multiplicerad med  $C_2$  kan man lösa formeln för brytfrekvens med avseende på  $C_2$  förutsatt att man också valt komponentvärden för  $R_1$  och  $R_2$ . Därefter är det möjligt att också räkna ut  $C_1$  och därmed vet man alla komponentvärden för kretsen. (Karki. 2000 s.19)

Då man väljer komponentvärden för kretsen kan det vara bra att tänka på att motstånd och kondensatorer är motsatt proportionella till varandra. Det är med andra ord möjligt att skala om filtret för att anpassa för väldigt stora eller små värden genom att öka motståndens komponentvärden för att därmed kunna minska kondensatorernas komponentvärden och så vidare. Överlag ska man undvika att använda allt för extrema komponentvärden, som en tumregel bör man inte använda kondensatorer som är mindre än 10 pF. Väldigt stora kondensatorer brukar även fysiskt bli väldigt stora och dessutom dyra. Gällande motstånd är det bra om man kan hålla sig inom området några hundra ohm till några tusen ohm. (Karki. 2000 s.17)



### 3.4.6 Sallen-Key högpasfilter

För att åstadkomma ett Sallen-Key högpasfilter ersätter vi helt enkelt Sallen-Key lågpasfiltrets motstånd med kondensatorer och kondensatorer med motstånd. (Zumbahlen. 2002 s. 68)



Figur 14. Sallen-Key högpasfilter (Källa: Wikipedia 2012i).

Formeln för brytfrekvens  $f_0$  är för högpasfilter den samma som den är för lågpasfilter, men gällande godhetstalet  $Q$  ser den lite annorlunda ut:

$$Q = \frac{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}{R_1 (C_1 + C_2)}$$

Figur 15. Formel för godhetstal för ett Sallen-Key högpasfilter (Källa: Wikipedia 2012i).

Genom att denna gång ge  $C_1$  och  $C_2$  samma värde kan man få ut ett förhållande för motstånden genom formeln  $R_2/R_1 = 4Q^2$  förutsatt att vi vet  $Q$ . Genom att använda en liknande analogi som för lågpasfiltret kan vi i detta fall få reda på motståndens komponentvärden förutsatt att vi valt kondensatorernas värden genom att ange  $R_1$  som en konstant multiplicerad med  $R_2$  och därefter lösa formeln för brytfrekvens med avseende på  $R_2$ . (Karki. 2002 s. 9)

### **3.4.7 Slutsats**

Då man använder Sallen-Key-topologin för att designa filter har man användning av att känna till hur topologin fungerar i praktiken även fast själva designen görs med en speciell programvara för ändamålet. Genom att man kan göra uträkningar för hög- och lågpasfilter kan man även kontrollera ifall resultaten från simuleringen verkar rimliga. Optimeringar av kretsen är också endast ett alternativ först då känner till topologin väl.

## **4 ARBETET**

Hittills har jag i mitt examensarbete presenterat teori om referenshögtalare och de krav de bör uppfylla samt olika användningsområden för filter inom audiotekniken och även grundläggande kunskap om filterdesign. Denna information har varit nödvändig att ackumulera för att jag i arbetet med projektet ska få en bättre förståelse för vad arbetet handlar om och kunna göra val grundade på vedertagen fakta. Nu följer den del av mitt examensarbete som handlar om de olika arbetsmomenten jag varit delaktig i i planeringen och utvecklandet av en första prototyp för en aktiv filter och förstärkar-modul för referenshögtalare.

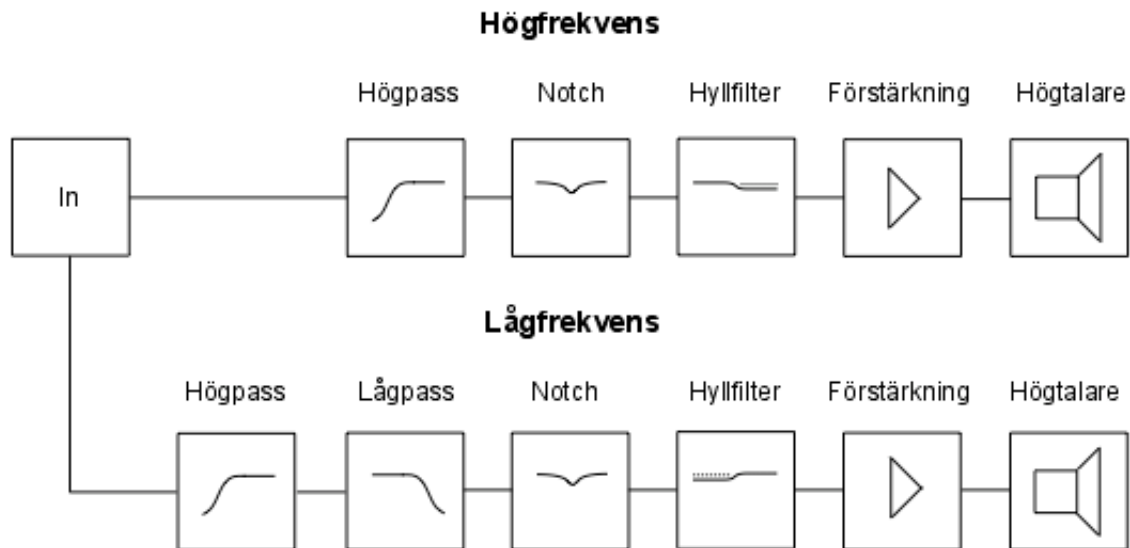
### **4.1 Filtret**

Utgångspunkten för projektet som mitt arbetet är en del av är som tidigare nämnts en ganska långt planerad filter- och förstärkarmodul. Modulen är ämnad för en referenshögtalare som ska kunna fungera som en så kallad närfältsmonitor. Min del i arbetet är vad filterdelen beträffar att utgående från ett blockschema och vissa riktlinjer för filtrets funktion planera och simulera filtret och göra ett kopplingschema för kretsen, rita ut mönsterkortslayouten samt att göra en första prototyp av kretsen. För att först kunna åskådliggöra filtrets och hela kretsens olika delar ritas man vanligen upp ett blockschema över kretsen för att därefter vidare specificera de olika delarna.

#### **4.1.1 Blockschema**

Den elektriska kretsen är planerad för två högtalarelement från den danska tillverkaren Scan-Speak. Högtalarelementen ifråga är diskantelementet Scan-Speak D2606/922000

och baselementet Scan-Speak 15W/4434G00. Högtalarelementens frekvenssvar så som de ser ut i tillverkarens datablad finns bifogade i bilaga 1 och 2. De analoga filter som är planerade för projektet är till för att referenshögtalaren ska kunna fylla de kriterier som ställs på högtalare som används vid kritisk lyssning.



Figur 16. Blockschema för kretsen.

Kretsens filter består i detta fall av olika filter med tre huvudsakliga uppgifter:

- Delningsfilter
- Filter som kompenserar för högtalarelementen och högtalarlådan
- Filter som kompenserar för lyssningsrummet

Högpasfiltret i signalkedjan till diskantelementet som man ser i figur 16 utgör kretsens delningsfilter tillsammans med lågpasfiltret som finns i signalkedjan till baselementet. Dessa filter har båda två samma brytfrekvens, den frekvens som ansetts vara lämplig som brytfrekvens är i detta fall 2,9 kHz.

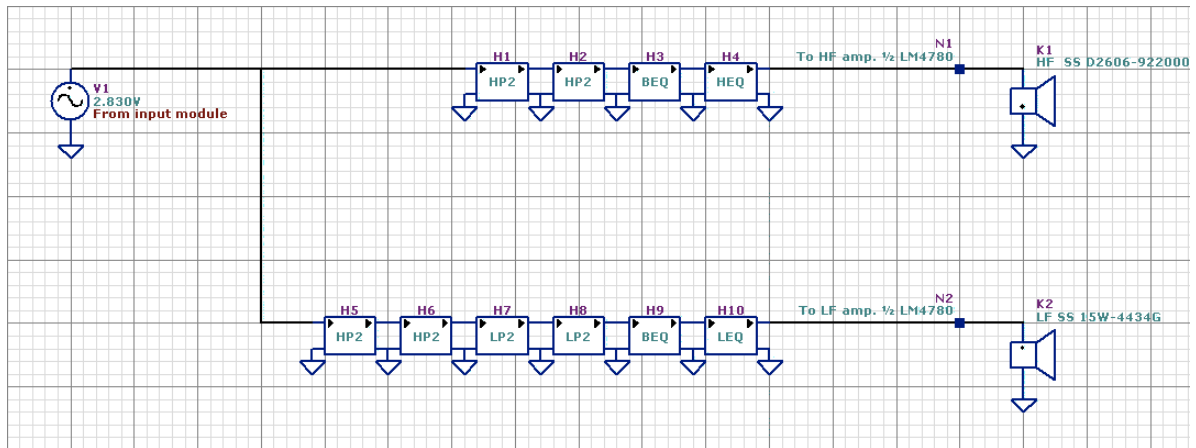
Högpassfiltret som finns i signalkedjan för baselementet är till för att skydda baselementet mot allt för låga frekvenser (Duncan. 2009 s. 257-258). Genom att välja ett relativt högt godhetstal för detta filter är tanken att man ska kunna kompensera för högtalarelementets avtagande frekvensgång i frekvenserna närmast brytfrekvensen.

De båda notchfiltren i kretsen är även de till för att jämja frekvensgången hos de båda högtalarelementen. Notchfiltren är dämpande. Eftersom diskantelementet utgående från databladet väntas vara mer lättdrivet i området nära delningsfrekvensen, se bilaga 1, har det notchfilter som finns i signalkedjan för diskantelementet ett lågt godhetstal och en mittfrekvens som ligger nära delningsfrekvensen. Filtret dämpar därmed signalens amplitud i det området och resultatet bör bli en jämnare frekvensgång. Lådans storlek och utformning ger upphov till en topp i frekvensgången för baselementet runt 750 Hz och uppåt. Notchfiltret i baselementets signalkedja är till för att dämpa signalen där toppen ligger och därmed jämna ut frekvensgången. Notchfiltrets mittfrekvens kommer att ligga något över toppens början vid 950 Hz.

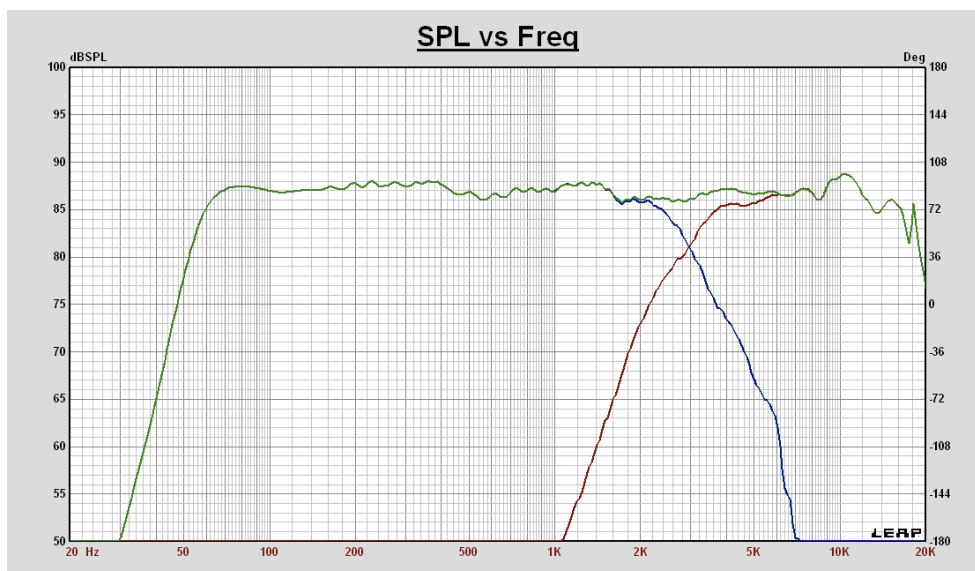
Hyllfiltret som finns i signalkedjan för baselementet är till för att dämpa signalen ifall referenshögtalaren placeras mot en vägg eller annan reflekterande yta. De frekvensområden som förstärks i sådana fall är de låga frekvenserna, och endast dessa ska påverkas av filtret. Filtret bör därmed vara ställbart. Tanken med hyllfiltret som finns i signalkedjan för diskantelementet är att man ska kunna dämpa de höga frekvenserna, eftersom dessa kan vara tröttande för användaren att lyssna på i längden och de kan även subjektivt upplevas som skärande eller irriterande.

#### **4.1.2 Simulering**

Designen av kretsens filter görs med programvaran LEAP CrossoverShop av LinearX. Programvaran möjliggör att man utgående från uppmätta data från högtalarelementen kan simulera filterkretsens verkan på systemet som helhet. Uppmätta data fanns till hands redan i det skede jag gick med i projektet. Nästa skede i filterdesignen är att även lägga till alla enskilda filterblock som finns i blockschemat i CrossoverShop och ytterligare specificera och optimera de enskilda filtren. För varje filterblock väljer man vilken typ av filter det är frågan om och vilka parametrar filtret ska ha.



Figur 17. Blockschema för kretsen i CrossoverShop.



Figur 18. Frekvensgången för systemet.

Systemet ger efter att funktionen för varje filter i blockschemat i figur 17 är specificerad upphov till den simulerade frekvensgången i figur 18. Den gröna linjen visar frekvensgången för båda högtalarenementen och man kan se att inom området 60 Hz–10 kHz hålls frekvensgången gott och väl innanför  $\pm 3$  dB. Delningsfiltret utgörs av två identiska högpasfilter och två identiska lågpasfilter och man får då ett delningsfilter med en dämpning på 24 dB/oktav. De filter som används i delningsfiltret är av typen Butterworth och eftersom man kaskadkopplar två identiska Butterworthfilter i signalkedjan för varje högtalarelement resulterar detta i att godhetstal blir 0,5 för det totala

filtret. Eftersom varje Butterworthfilter ger -3 dB vid brytfrekvensen 2,9 kHz ger både hög- och lågpassfiltret -6 dB vid brytfrekvensen. Eftersom -6 dB betyder att amplituden är halverad blir den resulterande amplituden 0 dB vid delningsfrekvensen. Denna typ av delningsfilter finns även ursprungligen beskriven av Siegfried H. Linkwitz (1976).

Då man är nöjd med filtrens egenskaper och frekvensgångens utseende realiseras alla filterblocken. Det betyder att man ersätter varje filterblock i signalkedjan med en modell av filterblocket bestående av simuleringar av riktiga komponenter. Resultatet är då ett kopplingsschema för alla filter i systemet. Man bör vid realiseringen av varje enskilt filterblock kontrollera vilken verkan realiseringen har på frekvensgången, eftersom de komponentvärden man väljer väljs ur E6-serien blir det realiserade resultatet inte identiskt men de orealiserade. Orsaken till att komponenterna väljs ur E6-serien är att man ska kunna säkerställa sig om att det med lätthet ska gå att få tag på alla komponenter kretsen använder från flera olika återförsäljare. Man bör även granska att komponentvärdena hålls inom rimliga gränser (Wikipedia 2012j).

## **4.2 Kretsen i övrigt**

Förutom kretsens filter finns det en hel del som modulen bör innehålla. Det första man kommer att tänka på när det gäller aktiva högtalare är att högtalaren har en inbyggd förstärkare. Eftersom referenshögtalaren ska kunna användas i sammanhang där den tekniska standarden är att kablar för signal ska vara balanserade ska modulen också innehålla elektronik och kontaktmöjligheter som tillåter detta. Som alltid då det gäller audioelektronik är strömförsörjningen ett viktigt område.

### **4.2.1 Input**

En balanserad signal kan inte direkt anslutas till ett obalanserat system utan att fördelarna med att överhuvudtaget balansera signalen går till spillo. Signalen måste därmed konverteras till en obalanserad signal innan den når de övriga delarna av kretsen. Det finns färdiga integrerade kretsar från flera olika tillverkare som sköter konverteringen

från balanserad signal till obalanserad och tvärtom. (Colloms. 2001 s.287, Duncan. 2009 s.253)

INA134 från tillverkaren Burr-Brown är en sådan krets som är lämplig för detta projekt, den är dessutom funktionsmässigt identisk med SSM2143 från Analog Devices vilket betyder att man kan planera kretsen för den ena och sen använda vilkendera utan att man behöver ändra mönsterkortets layout. I databladet för INA134 finns ett exempel på ett kopplingsschema för den integrerade kretsen och det kopplingsschemat går även att tillämpa i detta projekt. Kopplingsschemat för INA134 finns i bilaga 3.

#### **4.2.2 Förstärkare**

Förstärkningen som ska ske efter filtreringen kommer att skötas av färdiga integrerade förstärkarkretsar designade för audiobruk. Jag har sen tidigare personlig erfarenhet av ett förstärkarbygge som baserar sig på förstärkarkretsen LM3886. Från början var det från beställarens sida tänkt att även detta projekt skulle använda förstärkarkretsen LM3886. Eftersom LM3886 endast erbjuder förstärkning av en kanal skulle det i sådana fall behövas två förstärkarkretsar per högtalare då varje högtalare har två högtalarelement. Detta kan leda till att det blir problematiskt att designa mönsterkorts-layouten då båda förstärkarkretsarna enskilt behöver strömförsörjning. Ett alternativ till att använda två identiska kretsar är att se sig om efter en krets som färdigt erbjuder två kanaler. LM4780 från tillverkaren Texas Instruments (ursprungligen National Semiconductor) fyller dessa krav då den i princip består av två LM3886 inpackade i en och samma krets. Det som är utmanande med LM4780 är att den fysiskt är ganska liten och har därmed smalare komponentben än en LM3886 och är därför mera problematiskt att montera. LM4780 kan dessutom ha en sämre värmeledningsförmåga då den värmeledande ytan är mindre. Det som talar till kretsens fördel är att den kräver ett färre antal anslutningar för strömförsörjningen och att den är nyare och modernare än en LM3886. Utgångspunkten för förstärkarkretsens kopplingsschema är det kopplingsschema som databladet erbjuder för referensändamål. Kretsen finns i bilaga 4. Både LM3886 och LM4780 erbjuder en fungerande lösning med ett minimalt antal externa komponenter vilket är tacksamt ur planeringssynvinkel. Båda förstärkarkretsarna är vanliga i både olika kommersiella förstärkare samt i hobbyprojekt och de flesta varianter man stöter på

baserar sig på de kopplingsscheman som finns i kretsarnas datablad. Oberoende vilken av dessa två förstärkarkretsar man väljer så är slutresultatet, om produkten fungerar så som databladet beskriver, en förstärkare med sådana egenskaper som gott och väl fyller de krav man kan ställa på en förstärkare ämnad för vårt ändamål. Fördelarna med LM4780 gör den ändå så pass intressant att den väljs för detta projekt.

### **4.2.3 Strömkälla**

Förstärkarkretsen LM4780 fungerar enligt databladet vid spänningar från  $\pm 10$  V ända till  $\pm 42$  V. I Arcada finns det toroidtransformatorer tillgängliga för projektet. Transformatorn från tillverkaren Trafox, modell TF90, levererar 2x24 V växelström med effekten 90 VA vilket borde vara tillräckligt för att kunna försörja både förstärkaren och övrig elektronik. Transformatorn kopplas till en diodbrygga för att likriktas och glättas, det vill säga polerna med likström kopplas till jord via stora kondensatorer med avseende att jämna ut eventuell rippel i likströmmen (Wikipedia 2012k). Därefter kopplas förstärkarkretsens plus- och minuspoler direkt till den likriktade strömkällan. Övrig analog elektronik förutom förstärkaren behöver  $\pm 15$  V för att fungera och därmed blir man tvungen att använda sig av spänningsregulatorer. Spänningsregulatorerna 7815 och 7915 levererar  $\pm 15$  V med ett minimalt antal externa komponenter och kan även anses vara lämpliga för detta ändamål. (Hood. 2009 s. 153-154)

## **4.3 Mönsterkortslayout**

Utvecklaren CadSoft erbjuder produkten EAGLE Layout Editor som är en programvara för att planera kretsars mönsterkortslayout. Utgående från kopplingsschemat till en krets kan man placera ut kretsens komponenter och därefter rita ut mönsterkortets banor. Detta arbetsmoment är för min del den mest tidskrävande delen med projektet. Jag har i en kurs i audioelektronik och även i ett par egna projekt använt EAGLE för att planera egna mönsterkort så gränssnittet är dock bekant sen tidigare.

### **4.3.1 Överföring av kopplingsschemat till EAGLE**

Det första steget mot en färdig mönsterkortslayout i EAGLE är att återigen rita kretsens kopplingsschema. Skillnaden jämfört med kopplingsschemat i CrossoverShop är att nu



ritas varje del av kretsen ut, vilken nu förutom själva filterdelen även består av inputkretsen, förstärkarkretsen och strömkällan. Kopplingsschemat ska även innehålla de brytare och övriga komponenter som behövs för de justerbara hyllfiltren.

Det är skäl att tänka över vilka fabrikat och modeller av de olika komponenterna man hade tänkt använda i kretsen. Olika varianter av samma typ av komponent med samma värde har olika fysiska dimensioner, vilket har en inverkan på hur man senare kan dra de olika banorna. Glättningskondensatorerna tar upp en väldigt stor yta av kretskortet och man bör se över att de kondensatorer man väljer även finns tillgängliga att köpa och att de fysiskt sett inte är för stora.

Det är inte säkert att alla komponenter kretsen innehåller finns med i det komponentbibliotek som EAGLE erbjuder. En del komponenter kan gå att ersätta med en annan komponent med motsvarande fotavtryck. Det är även möjligt att importera nya komponenter till EAGLE från till exempel en tillverkares hemsida. I mitt fall var jag tvungen att leta reda på en fil innehållande fotavtrycket till förstärkarchipet LM4780 då det saknades i biblioteket (diyAudio. 2006). Filen finns att tillgå på ett internetforum för audiointresserade och efter en jämförelse med databladet kan man konstatera att filen är korrekt och duger för ändamålet.

Då man vet hur kopplingsschemat ska se ut borde det inte vara några problem med att även rita ut det i EAGLE, förutsatt att alla komponenter finns tillgängliga. Kretskortet ska endast ha hålmonterade komponenter för att underlätta konstruktionen och det behöver man beakta i detta skede. Det färdigritade kopplingsschemat finns i bilaga 5.

#### **4.3.2 Mönsterkortets banor i EAGLE**

Det första man utgår från då man ska börja placera ut komponenterna på ett mönsterkort är vilken storlek kretskortet ska ha och var man ungefärligen vill ha kretsens olika delar. En grov skiss på komponentplaceringen gjordes på ett papper redan i projektets början. Eftersom kretskortet ska placeras inuti högtalaren är kretskortets dimensioner begränsade av högtalarlådans storlek. Ytan på högtalarlådans inre bakvägg där kretskortet ska monteras är ungefär 250 mm gånger 140 mm.

Mönsterkortet ska vara dubbelsidigt. Förstärkarkretsen och strömkällan ska på kretskortet hållas avskilt från övriga delar av kretsen, främst kretsens balanserade ingång för att minimera risken för störningar. Förstärkarkretsen ska ganska långt se ut som exempelkretsen i tillverkarens datablad eftersom den uppenbarligen fungerar. Det är viktigt att även reservera utrymme för montering av en kylfläns på förstärkarkretsen. De delar av kretsen som drivs av den lägre spänningen  $\pm 15$  V ska ha ett jordplan för att minska på störningar. (Self. 2009 s. 385-403)

En av tankarna med projektet är att det ska vara enkelt att montera komponenterna på kretskortet. Förutom att en allt för kompakt design har en större benägenhet att plocka upp störningar blir det dessutom svårare att löda fast komponenterna. Ifall förstärkarmodulen blir lyckad var ett förslag att referenshögtalaren skulle kunna fungera som byggsats och då behöver kretskortet vara så enkelt som möjligt att tillverka. Den grundtanken, att layouten ska vara så lättförståelig och okomplicerad som möjligt, finns med hela tiden som layouten för mönsterkortet designas.

Innan man placerar ut en endaste krets eller ritat ut en enda bana i EAGLE är man tvungen att göra vissa inställningar bland annat för vilken sida av kortet man jobbar på, hur täta mellanrum mellan komponenterna man kan ha och hur tjocka banorna ska vara. Tjockleken på banorna och valet av vilken sida av kortet man ritat ut banorna på varierar vartefter det behövs. I detta fall då projektet är ganska omfattande placeras ett par komponenter ut åt gången och sen ritas banorna ut för dessa komponenter. Det färdigt utritade layouten för mönsterkortet kan ses i bilaga 6.

## 4.4 Prototypen

Design av analoga kretsar kan vara krävande och fordra en viss erfarenhet av designern, därför är det viktigt att alltid göra en prototyp av kretsen för att kontrollera att den fungerar som den ska (Carter 2002). Prototypen görs innehållande filterdelen och förstärkardelen, men den balanserade ingången lämnas tills vidare bort för att förenkla testning av prototypen.

#### **4.4.1 Etsning**

Banorna till mönsterkortets bägge sidor skrivs ut var för sig på transparent film för att möjliggöra framkallningen av mönsterkortet. Det dubbelsidiga kortet vilket har en ljuskänslig yta placeras med en film per sida i en apparat för att belysas med ultraviolett ljus. Därefter framkallas kortet. Då kortet är färdigt framkallat och har tydligt synliga banor från den ljuskänsliga ytan kan det etsas.

#### **4.4.2 Montering av komponenter**

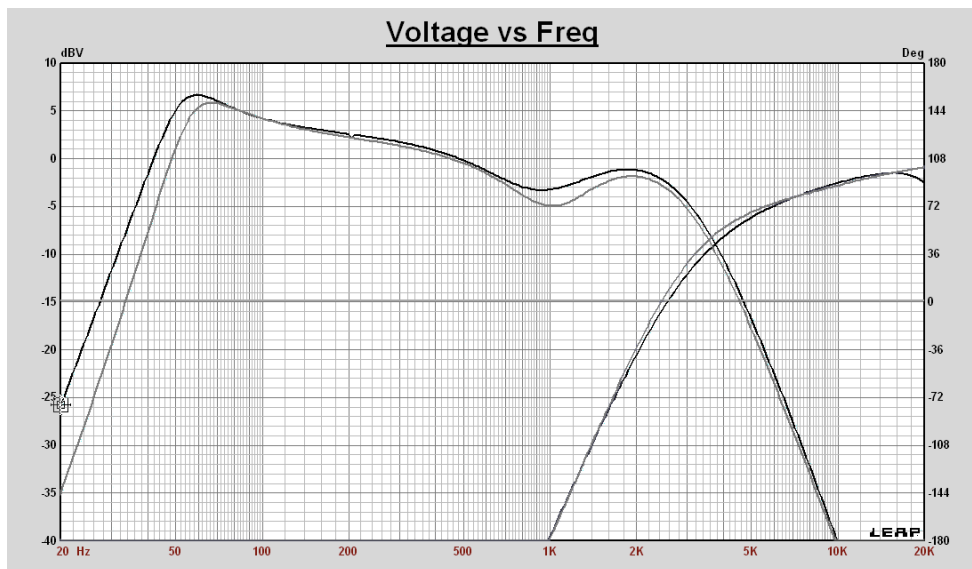
Det första skedet i monteringsfasen är att borra alla hål för de hålmonterade komponenterna. Jag valde att sätta alla motstånd på plats och löda fast dessa först eftersom de inte är speciellt värmekänsliga och endast tar upp lite utrymme per komponent efter att man trimmat bort de utstående komponentbenen. Som motstånd används vanliga kolfilmsmotstånd och kondensatorerna är polyesterkondensatorer. Båda har valts för att testa hur kretsen presterar utan att man ska behöva använda överdrivet dyra eller sofistikerade komponenter. De mest skrymmande och mest känsliga komponenterna valde jag att montera till sist. Jag noterade att det var svårt att löda fast förstärkarkretsen LM4780 eftersom mellanrummet mellan komponentbenen var väldigt snävt tilltaget och flera komponentben värmdes därför upp samtidigt de gånger man var tvungen att löda på komponentsidan, det var till och med svårt att överhuvudtaget nå den rad med ben som befinner sig lägre in mot kretsen.

#### **4.4.3 Test av prototypen**

Kretsen kopplas direkt till en likströms spänningskälla och därmed är likriktarbryggan och glättningskondensatorerna inte nödvändiga. Som last för förstärkaren används ett effektmotstånd vid den första testningen. Då spänningskällan slås på ser man att strömbegränsningen når sitt maximala värde, det betyder att någonting inte står rätt till. Efter en stunds arbete konstateras att problemet troligtvis ligger i förstärkardelen av kretsen och möjligtvis i själva förstärkarkretsen LM4780. Eftersom layouten ser korrekt ut och dessutom är tagen från exempelkretsen i databladet som bevisligen fungerar och alla banor leder som de ska, verkar det troligaste alternativet vara att den integrerade kretsen har blivit skadad och slutat fungera.

Den viktigaste delen att utföra själva testningen på är filterdelen eftersom det är den delen som huvudparten av arbetet kretsar kring, därför beslutar jag att tillsvidare koppla bort förstärkardelen helt och hållet. Det främsta målet med testningen är att kunna jämföra den fysiska prototypen med det simulerade filtret och förstärkaren inverkar inte på något avgörande sätt på den jämförelsen, den bidrar endast med en ökad amplitud hos utsignalen.

En signalgenerator kopplas till filterdelens ingång och de båda utgångarna kopplas till ett oscilloskop för att man ska kunna se att filtret överhuvudtaget passerar en signal. Därefter kopplas filtermodulen till analyseringsutrustning från Audio Precision. Med programvaran LEAP är det möjligt att analysera frekvensgången efter ett sinussvep och man kan då jämföra den fysiska filtermodulen med den simulerade.



Figur 19. Jämförelse av frekvensgången.

Efter att amplituden justerats för att matcha varandra någorlunda kan man tydligare se resultatet av svepet. I figur 19 representerar de grå linjerna den simulerade frekvensgången och de svarta linjerna resultatet från den fysiska filtermodulen. Det första man ser är att kurvorna följer varandra rätt så bra vilket är väldigt lovande. Högpasfiltret för bashögtalaren ser ut att ha en något för låg brytfrekvens och det dämpande notchfiltret vid 950 Hz kunde möjligtvis vara mer dämpat, men det förekommer

inga oväntade oregelbundenheter. Kanalen till diskantelementet ser även den bra ut. Amplituden vid utgången av filtret är dock lägre än beräknat och det har inte hittats någon synlig eller tydlig orsak till detta.

#### 4.4.4 Förbättringsförslag

Målet med detta delkapitel är inte att presentera praktiska tips på hur man felsöker en elektrisk krets, det har jag inte heller utbildning i. Målet är snarare att försöka demonstrera hur man undviker problem i nästa iteration av prototypen. Därför går jag inte desto djupare in i felsökningen än att jag ger förslag på olika förbättringsåtgärder.

Det upptäcktes två huvudsakliga problem med den första prototypen som sådan vid den inledande testningen:

- Förstärkarkretsen fungerar inte
- Lägre amplitud än väntat i filterdelen

Problemet med förstärkarkretsen har antagligen sitt ursprung i det exemplar av den integrerade förstärkarkretsen LM4780 som används i detta projekt, eftersom inga egentliga modifieringar gjorts från kopplingsschemat i tillverkarens datablad och kretsen såg ut som den skulle. Orsaker till att den integrerade kretsen är sönder kan bero på att den överhettats vid monteringen. Vid lödningen riktas en hel del värme på både mönsterkortets kopparbanor och komponentbenen och värme kan skada bådadera. Det är inte enkelt eller alltid ens möjligt att byta ut en LM4780 då den har 27 komponentben vilka sitter nära varandra. Värmningarna som krävs för att få bort samtliga lödfogar skulle antagligen försätta mönsterkortet i ett sådant skick att det inte skulle gå att återanvända.

Filterdelen har en lägre utsignal än väntat. Ingen kortslutning eller liknande tydligt fel kan observeras och under testtillfället var det inte möjligt att säga var i signalkedjan det förekom en dämpning av signalen.

Innan fortsatt testning av modulen är möjlig är man tvungen att på något sätt åtgärda dessa två problem. Lösningarna till båda problemen innebär att en ny prototyp borde

tillverkas. Exempelvis genom att montera en operationsförstärkare åt gången och göra en ny mätning av filtret efter varje förändring kan man ha bättre kontroll över hur de olika delarna presterar. Man borde också se över hur lödningen av förstärkarkretsen LM4780 kunde löpa smidigare. Mera rum runtom LM4780 kunde underlätta monteringen, till exempel att montera närliggande komponenter först i efterhand skulle kunna vara en lösning. Ett alternativ ifall man inte lyckas med att få LM4780 att fungera är att rita om kretsen till att innehålla två LM3886 istället, men det bör ses som en sista utväg. I första hand borde ytterligare försiktighetsåtgärder företas. LM3886 har den fördelen att mellanrummet mellan komponentbenen är bredare vilket ganska långt minimerar problematiken med LM4780 som upptäckts i och med detta projekt.

## **4.5 Resultatredovisning**

Alla de olika arbetsmoment som arbetet med filter- och förstärkarmodulen har fört med sig har inte producerat resultat som varit direkt mätbara. Deras kvalitet och framgång måste därmed bedömas enligt andra grunder. Till exempel som svar på frågan hur väl modulen lämpar sig som byggsats kan endast jag ge mina subjektiva synpunkter på utgående från de upplevelser jag har från tillverkningen av en första prototyp för kretsen.

### **4.5.1 Modulens prestanda**

De olika filterblocken såg bra ut vid simuleringen i CrossoverShop. En jämn frekvensgång kan ses som ett krav en referenshögtalare åtminstone bör kunna prestera och det verkar kretsen klara av. Högsta prioritet vid design av filtret har också varit en jämn frekvensgång och detta kan ske på bekostnad av vilket transientsvar kretsen presterar. Transientsvaret har dock inte analyserats. Det fysiska filtret motsvarande över förväntan det simulerade, endast några olikheter mellan de två förekom, men dessa är korrigerbara ifall de anses vara oönskade.

Referenshögtalarens förmåga att producera en höga ljudtryck är inte lika viktig då det är frågan om närfältsmonitorer och avstånden till högtalarna är korta. De båda högtalarelementen är känsliga och då förstärkaren kan leverera upp emot 60 W per kanal väntas uteffekten bli tillräcklig.

De problem med prototypen som observerades vid testningen resulterade i att inga akustiska mätningar ännu har kunnat göras. Problemen måste åtgärdas i en kommande prototyp innan kretsen kan anses vara helt klar.

#### **4.5.2 Modulens lämplighet som byggsats**

Tillverkningen av en första prototyp kan ses som ett test i hur lämpad kretsen är som byggsats. Mönsterkortet upplevdes som tydligt uppbyggt och över lag enkelt att arbeta med då komponenterna skulle monteras, i alla fall fram till dess att LM4780 skulle lödas fast. Själva mönsterkortet kommer ifall modulen ska att användas i någon större utsträckning att beställas av en underleverantör. Detta eliminerar den kanske känsligaste delen i tillverkningen av en modul, nämligen etsningen av själva mönsterkortet. Jag ser ingen orsak till varför inte modulen skulle kunna fungera väl som en byggsats, förutsatt att man kommer att kunna verifiera att kretsen är i skick.

## **5 DISKUSSION**

Målet med arbetet var dels att komma framåt i arbetet med ett högtalarprojekt och dels att kunna förstå och förklara användningen av aktiva analoga filter i samma projekt. Jag märkte i början av arbetet med filterdelen att det skulle vara möjligt att klara av att utföra arbetet och tillverka en prototyp av kretsen ganska snabbt och behändigt utan att det egentligen skulle fordras speciellt mycket kunskap om aktiva analoga filter. Funktionen för filterdelen var väl specificerad från beställaren redan då jag anslöt mig till projektet. Med lite kunskaper i hur man använder CrossoverShop och EAGLE skulle det ha varit möjligt att utgående från specifikationen göra klart kretsen relativt snabbt och utan att jag skulle lära mig speciellt mycket.

Jag valde en annan väg än den snabbaste och resultatet finns samlat i kapitel 2 och 3. Det verkade lämpligt att mera noggrant studera användningen av och funktionen för olika typer av filter då jag samtidigt fick en tydlig avgränsning i och med att det jag skriver om bör ha att göra med projektet jag jobbar på. Det hade annars varit svårt att hitta en tydlig inramning till ett arbete om aktiva analoga filter då området är väldigt brett. Jag

är nöjd med hur projektet knyter an till teoridelen och även hur teoridelen fungerar självständigt med tanke på liknande projekt.

Arbetet med projektet har varit väldigt givande och min arbetsinsats har varit ganska omfattande. Jag har aldrig tidigare satt mig in så här djupt i ett elektronikprojekt tidigare. Det är klart att det skulle ha varit roligt ifall prototypen skulle ha gått att använda som sådan för testning och akustiska mätningar, men jag är ändå nöjd med hur filtret presterar. Ambitionen med projektet är att högtalaren ska komma att prestera så pass goda resultat att den kan jämföra sig med bättre kommersiella referenshögtalare av närfältstyp. Efter simuleringarna i EnclosureShop kan man konstatera att detta borde vara möjligt. Resultatet från mätningarna av den fysiska filterdelen motsvarar väl förväntningarna och då man lyckas lösa problemen som observerades vid testningen har man en högtalare av väldigt hög klass.

Slutligen vill jag tacka min lärare Claus Lindqvist som fungerat som expertrådgivare för arbetet.



## KÄLLOR

### Böcker

Colloms, Martin. 1991. *High Performance Loudspeakers*, 4 uppl. Pentech Press, London. 407 s. ISBN 0-7273-0807-6

Colloms, Martin. 2001. The amplifier/Loudspeaker interface. I: J. Borwick, red. *Loudspeaker and Headphone Handbook*, Focal Press, s. 277-287. ISBN 0240515781

Duncan, Ben. 2009. Interfacing and Processing. I: D. Self, R. Brice, B. Duncan, J. Hood, I. Sinclair, A. Singmin, D. Davis, E. Patronis, J. Watkinson, red. *Audio Engineering*, Elsevier Inc, s. 253-258. ISBN 987-1-85617-526-5

Everest, F. Alton. 2007. *Critical Listening Skills for Audio Professionals*, Thomson Course Technology, Boston. 208 s. ISBN 1-59863-023-7

Fincham, Laurie. 2001. Multiple-driver loudspeaker systems. I: J. Borwick, red. *Loudspeaker and Headphone Handbook*, Focal Press, s. 231-252. ISBN 0240515781

Gander, Mark R. 2001. Loudspeakers for studio monitoring and musical instruments. I: J. Borwick, red. *Loudspeaker and Headphone Handbook*, Focal Press, s. 471-473. ISBN 0240515781

Hood, John Linsley. 2009. Power Supply Design. I: D. Self, R. Brice, B. Duncan, J. Hood, I. Sinclair, A. Singmin, D. Davis, E. Patronis, J. Watkinson, red. *Audio Engineering*, Elsevier Inc, s. 153-154. ISBN 987-1-85617-526-5

Newell, Philip. 2001. The room environment: problems and solutions. I: J. Borwick, red. *Loudspeaker and Headphone Handbook*, Focal Press, s. 377. ISBN 0240515781

Self, Douglas. 2009. Noise and Grounding. I: D. Self, R. Brice, B. Duncan, J. Hood, I. Sinclair, A. Singmin, D. Davis, E. Patronis, J. Watkinson, red. *Audio Engineering*, Elsevier Inc, s. 385-403. ISBN 987-1-85617-526-5

Zumbahlen, Hank. 2002. Analog filters. I: W. Jung red. *Op Amp Applications*, Analog devices, s. 67-68. ISBN 0-916550-26-5

### **Muntliga källor**

Lindqvist, Claus. 2012. *Frågor om kaskadkoppling* [muntl.]. 14.11.2012

### **Dokument**

Carter, Bruce. 2002. Circuit Board Layout Techniques. I: R. Mancini, red. *Opamps for everyone*, Texas Instruments Incorporated (slo006b 17.1.2)

Karki, James. 2002. *Analysis of the Sallen-Key Architecture*, Texas Instruments Incorporated, Dallas. 14 s. (SLOA024B)

Karki, Jim. 2000. *Active Low-Pass Filter Design*, Texas Instruments Incorporated, Dallas. 23 s. (sloa049A)

Kugelstadt, Thomas. 2002. Active Filter Design Techniques. I: R. Mancini, red. *Opamps for everyone*, Texas Instruments Incorporated (slo006b)

Lacanette, Kerry. 2010. *A Basic Introduction to Filters – Active, Passive and Switched-Capacitor*, National Semiconductor (AN-779)

## **Datablad**

*TWEETER D2606/922000*, Scan-Speak. Tillgänglig:

<http://www.scan-speak.dk/datasheet/pdf/d2606-922000.pdf>

2 s. Hämtad 13.11.2012

*MIDWOOFER 15W/4434G00*, Scan-Speak. Tillgänglig:

<http://www.scan-speak.dk/datasheet/pdf/15w-4434g00.pdf>

2 s. Hämtad 13.11.2012

*INA134 AUDIO DIFFERENTIAL LINE RECIEVERS*, Burr-Brown Corporation.

Tillgänglig: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina134.pdf>

9 s. Hämtad 13.11.2012

*LM4780 Overture*, Texas Instruments Incorporated. Tillgänglig:

<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm4780.pdf>

24 s. Hämtad 13.11.2012

## **Tidsskrifter**

Linkwitz, Siegfried H. 1976, Active Crossover Networks for Noncoincident Drivers, *Journal of the Audio Engineering Society*, årg. 24, nr 1, s. 2-8.

## **Hemsidor**

diyAudio – LM3886 and LM4780 Eagle outlines. Senast modifierad: 4.11.2006

Tillgänglig: <http://www.diyaudio.com/forums/chip-amps/89489-lm3886-lm4780-eagle-outlines.html>

Hämtad: 13.11.2012

Wikipedia(a) – Studio monitor. Senast modifierad: 3.11.2012

Tillgänglig: [http://en.wikipedia.org/wiki/Studio\\_monitor](http://en.wikipedia.org/wiki/Studio_monitor)

Hämtad: 13.11.2012

Wikipedia(b) – Hearing (sense). Senast modifierad: 9.11.2012

Tillgänglig: [http://en.wikipedia.org/wiki/Hearing\\_\(sense\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Hearing_(sense))

Hämtad: 13.11.2012

Wikipedia(c) – Low-pass filter. Senast modifierad: 13.10.2012

Tillgänglig: [http://en.wikipedia.org/wiki/Low-pass\\_filter](http://en.wikipedia.org/wiki/Low-pass_filter)

Hämtad: 13.11.2012

Wikipedia(d) – High-pass filter. Senast modifierad: 2.10.2012

Tillgänglig: [http://en.wikipedia.org/wiki/High-pass\\_filter](http://en.wikipedia.org/wiki/High-pass_filter)

Hämtad: 13.11.2012

Wikipedia(e) – Band-pass filter. Senast modifierad: 16.10.2012

Tillgänglig: [http://en.wikipedia.org/wiki/Band-pass\\_filter](http://en.wikipedia.org/wiki/Band-pass_filter)

Hämtad: 13.11.2012

Wikipedia(f) – Band-stop filter. Senast modifierad: 26.9.2012

Tillgänglig: [http://en.wikipedia.org/wiki/Band-stop\\_filter](http://en.wikipedia.org/wiki/Band-stop_filter)

Hämtad: 13.11.2012

Wikipedia(g) – Equalization. Senast modifierad: 9.5.2012

Tillgänglig: <http://en.wikipedia.org/wiki/Equalization>

Hämtad: 13.11.2012

Wikipedia(h) – Butterworth filter. Senast modifierad: 22.10.2012

Tillgänglig: [http://en.wikipedia.org/wiki/Butterworth\\_filter](http://en.wikipedia.org/wiki/Butterworth_filter)

Hämtad: 13.11.2012

Wikipedia(i) – Sallen-Key topology. Senast modifierad: 12.11.2012

Tillgänglig: [http://en.wikipedia.org/wiki/Sallen-Key\\_topology](http://en.wikipedia.org/wiki/Sallen-Key_topology)

Hämtad: 13.11.2012

Wikipedia(j) – Types of capacitor. Senast modifierad: 12.11.2012

Tillgänglig: [http://en.wikipedia.org/wiki/Types\\_of\\_capacitor](http://en.wikipedia.org/wiki/Types_of_capacitor)

Hämtad: 13.11.2012

Wikipedia(k) – Rectifier. Senast modifierad: 7.11.2012

Tillgänglig: <http://en.wikipedia.org/wiki/Rectifier>

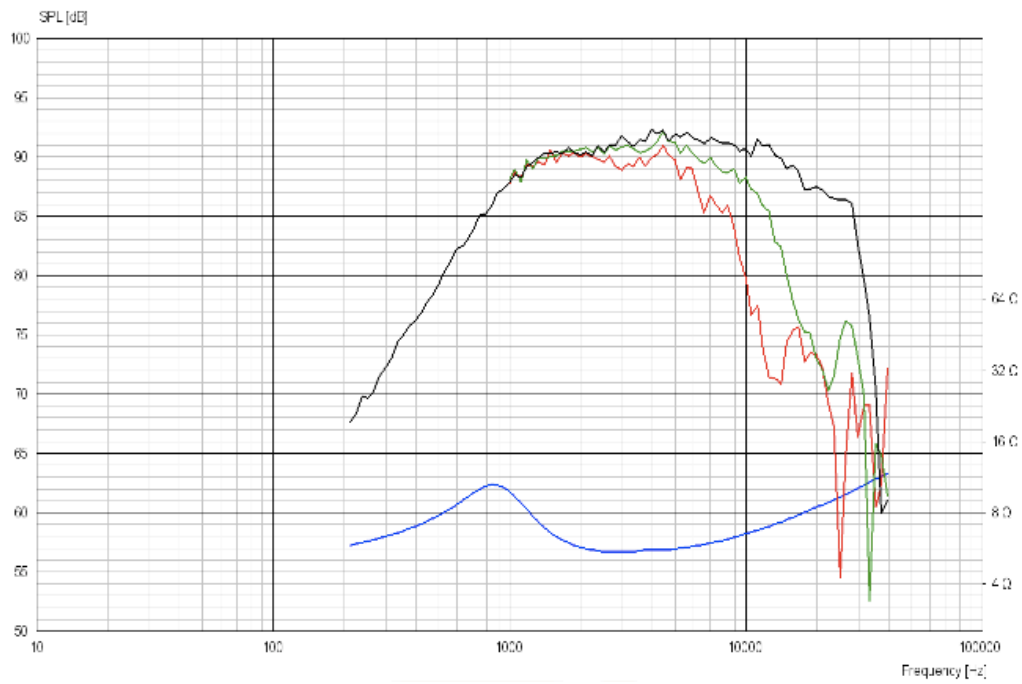
Hämtad: 13.11.2012

# BILAGOR

## Bilaga 1 – Diskantelementets frekvenssvar och impedanskurva

### TWEETER

### D2606/922000

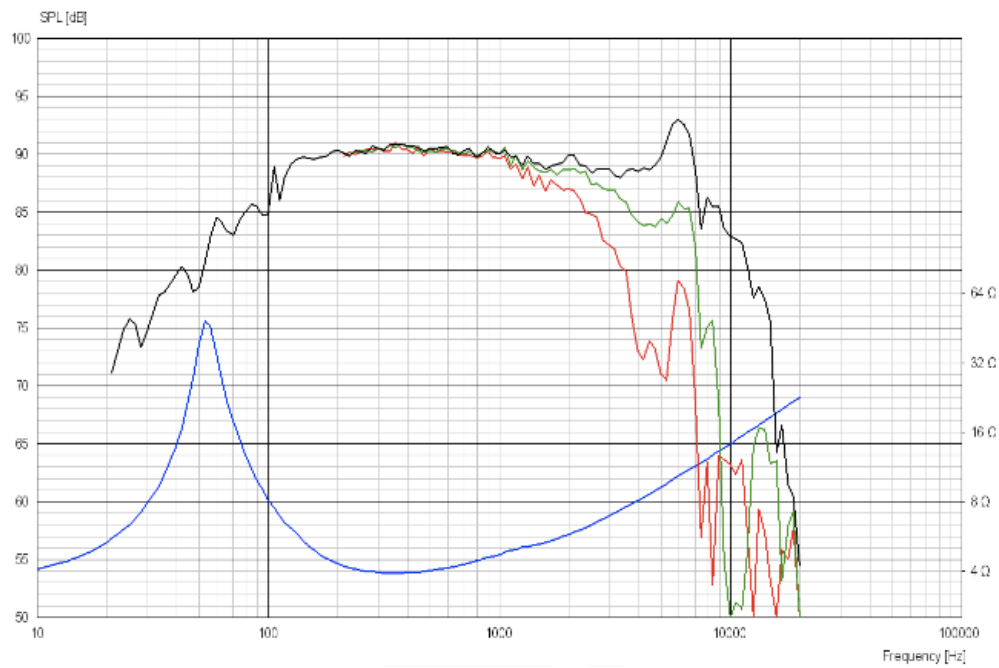


(TWEETER D2606/922000)

## Bilaga 2 – Baslementets frekvenssvar och impedanskurva

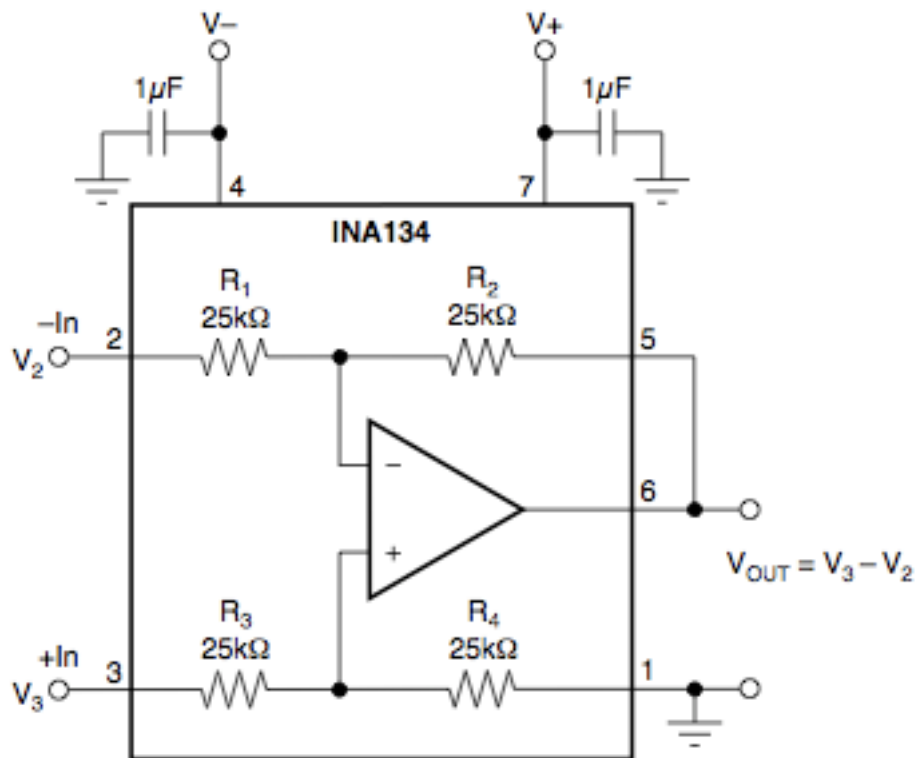
### MIDWOOFER

### 15W/4434G00



(MIDWOOFER 15W/4434G00)

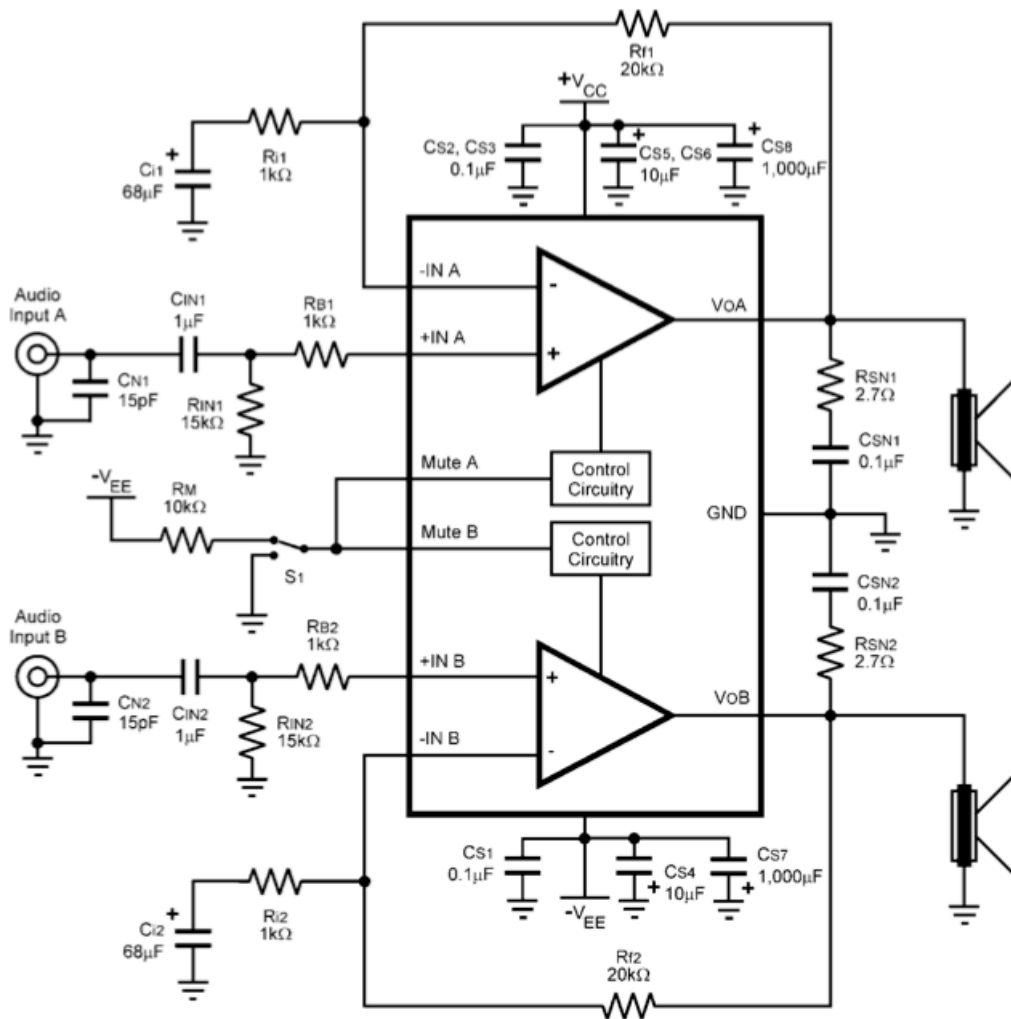
### Bilaga 3 – Kopplingschema för INA134



(INA134 AUDIO DIFFERENTIAL LINE RECIEVERS)

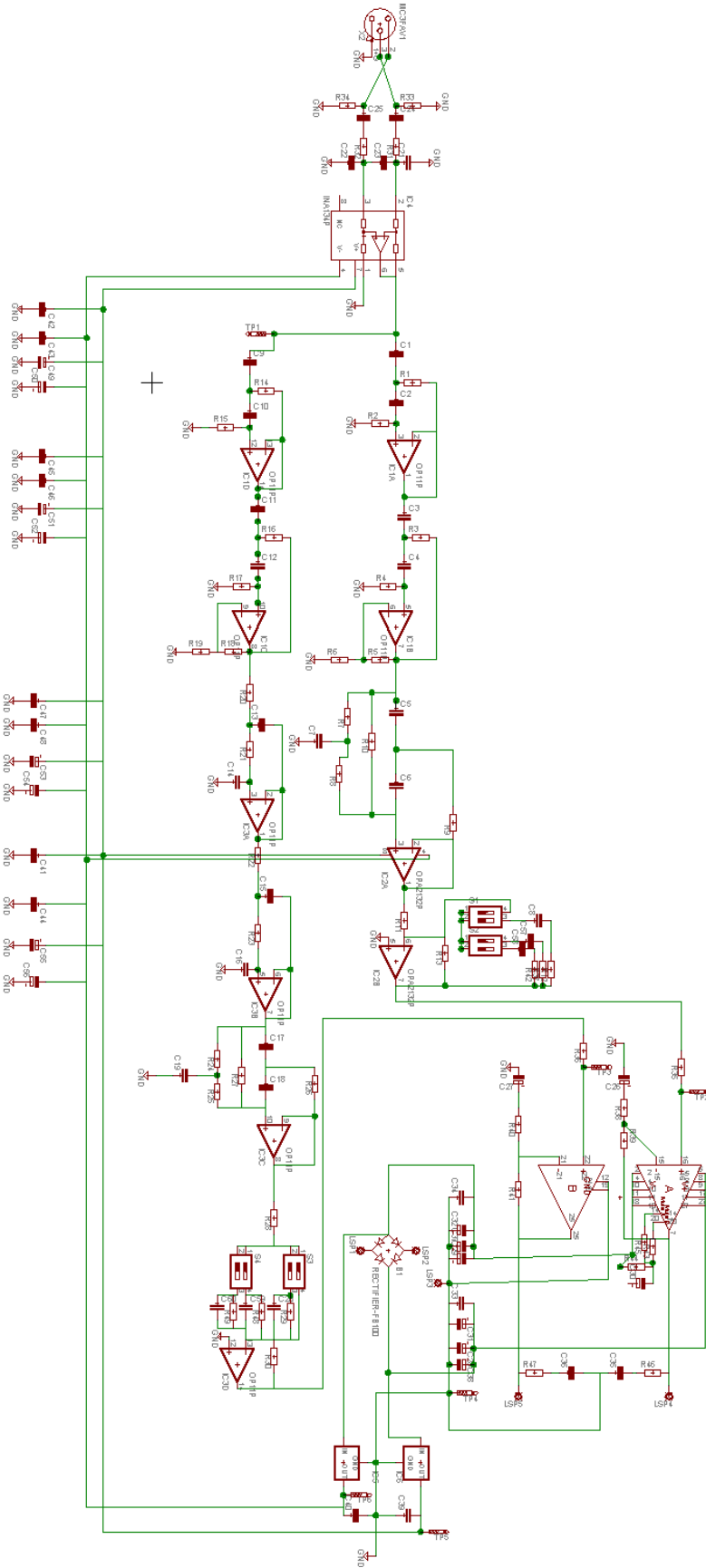


## Bilaga 4 – Kopplingschema för LM4780



(LM4780 Overture)

# Bilaga 5 – Kopplingschema för modulen



# Bilaga 6 – Modulens mönsterkortslayout

