

## Undersökning av strålningsegenskaper hos en akustisk dipol

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet Elektroingenjör

Jonas Karlberg  
Simeon Pappinen Hillert

## INNEHÅLLSFÖRTECKNING

---

Sammanfattning .....	3
1 Inledning .....	4
1.1 Bakgrund .....	4
1.2 Syfte .....	5
1.3 Avgränsning .....	5
1.4 Metod .....	5
2 Teori .....	6
2.1 Vågutbredning .....	6
2.2 Akustisk monopol .....	6
2.3 Akustisk dipol .....	7
2.4 EmbracingSound .....	7
2.5 Signalbehandling och DSP .....	8
2.6 Mätteknik .....	9
2.6.1 DFT och FFT .....	9
2.6.2 Mätmetoder .....	9
2.6.3 Fönstring .....	10
2.7 Membran och riktningskaraktistik .....	10
2.7.1 Thiele-Small parametrar .....	12
2.8 Line array .....	12
3 Högtalare: teori, design och tillverkning .....	13
4 Metod .....	15
4.1 Laboration .....	15
4.1.1 Dimensioner och placering .....	16
4.1.2 Utförda testmätningar .....	18
4.1.3 Fönstring av mätdata .....	18
5 Resultat och Analys .....	20
5.1 Uppställning 3 .....	20
5.1.1 Monopol .....	21
5.1.2 Dipol .....	21
5.2 Uppställning 1 .....	22
5.2.1 Monopol .....	23
5.2.2 Dipol .....	23
5.2.3 Allmänna iakttagelser uppställning 1 .....	24

5.3 Uppställning 2 .....	24
5.3.1 Monopol.....	25
5.3.2 Dipol.....	25
5.3.3 Allmänna iakttagelser uppställning 2 .....	25
5.4 Uppställning 4 .....	25
5.4.1 Monopol.....	25
5.4.2 Dipol.....	26
6 Slutsats .....	27
Litteraturförteckning.....	28

Appendix A

Appendix B

## SAMMANFATTNING

---

Rapporten beskriver en undersökning av spridningsmönster hos sex stycken ljudalstrande högtalare och hur mönstret påverkas när uppställningen av högtalarna ändras. Undersökningen innefattar design och tillverkning av prototyperhögtalare, laborationer där mätningar utförs och data samlas in samt diskussion kring resultaten. Spridningsmönstret som studeras är främst hos en akustisk dipol men mätningar utförs även på en akustisk monopol som referens. En del av undersökningens syfte ligger till grund för vidareutveckling av en teknologi utvecklad av företaget EmbracingSound. Mätningarna utförs i en akustikjusterad musikstudio hos EmbracingSound där högtalarna är placerade på en snurrskiva med en mätmikrofon en meter bort. Relevant teori behandlas inledningsvis följt av beskrivning av laborationerna. Mätresultaten presenteras i polärddiagram och är bifogade i *Appendix A*. Diskussion och slutsats avslutar rapporten.

---

# 1 INLEDNING

---

---

## 1.1 BAKGRUND

---

Utvecklingen av hemelektronik har tagits till ett stadie där stora bildskärmar och kraftfulla ljudsystem vars prestanda tidigare bara återfanns i professionella miljöer nu återfinns i vanliga konsumenters vardagsrum. Konsumentens krav på ökad prestanda ställs vid sidan av krav på de estetiska trender som råder. Dagens TV-apparater tillverkas i allt tunnare utförande och på grund av konstruktionens minskade volym hindras konsumentens önskemål om ett inbyggt ljudsystem där en god frekvensåtergivning av ljudbilden ges även i lägre register. Som följd har en marknad för externa ljudsystem vuxit fram där produkterna ska komplementera de interna ljudsystemen som återfinns i dessa tunna bildskärmar. Konsumenter önskar en ljudupplevelse vars prestanda kan matcha deras skärmars bildåtergivning och marknaden erbjuder flertalet alternativ för ändamålet.

Alternativen kan kategoriseras på olika vis och ett av dessa är efter vilken typ av ljudåtergivning produkten realiserar. En typ är den klassiska tvåpunktslösningen, mer känd som *stereo*. Med en förstärkare och två högtalare skapas en ljudspridning vilken upplevs ha bredd och djup. Hur väl och tydligt detta fungerar baseras förutom på högtalarnas prestanda även på placering i rummet gentemot varandra. En annan typ är flerpunktslösning som skapar vad som är mer allmänt känt som *surround*. För surround används en förstärkare som är ansluten till flera högtalare specialiserade för mellan- och övre frekvensregistret samt en kompletterande bashögtalare. Även den här lösningen är i hög utsträckning beroende av en korrekt utplacering i rummet.

Problemen med ovan nämnda ljudlösningar är att en realistisk rumsplacering är att betrakta som icke ideal och medför interferensproblem, i detta fall i form av frekvensutsläckning. Fenomenet uppstår i samband med uppställningen av högtalarna och flerpunktslösningen är än mer känslig jämfört med tvåpunktslösningen även om det i båda fallen påverkar slutresultatet negativt. Med tillräcklig kunskap inom området är det möjligt att utföra en korrekt uppställning vilket leder till att man kan åstadkomma en punkt i rummet där ljudupplevelsen är näst intill optimal. Dessvärre är detta oftast något som den vanliga konsumenten inte tar hänsyn till eller har tillräcklig kunskap om för att prioritera och genomföra i hemmet, vilket leder till att ljudupplevelsen inte motsvarar produktens kapacitet.

Företaget EmbracingSound har utformat en algoritm som gör det möjligt att frångå den klassiska tvåpunktsuppställningen av högtalarna och ändå skapa en ljudupplevelse i stereo. Fördelen för konsumenten är att uppställningen inte är beroende av hur högtalare placeras i rummet och med modifikation är tekniken även applicerbar på surroundsystem. För att skapa djupet motsvarande en flerpunktslösning använder man sig för mellanregister och diskant av en array av högtalare. Arrayen kompletteras med en bashögtalare för att hela frekvensspektrumet ska återges.

Genom att högtalarelementen är placerade tätt intill varandra motverkas interferensproblem men detta på bekostnad av att den önskade ljudbilden endast kan upplevas längs en linje med begränsad bredd i rummet, en så kallad "sweet line". Även i resterande rum undviks interferensproblem men där upplevs en mycket smal stereobild alternativt en monobild. Ett system med smal sweet line är inte lika kommersiellt gångbart som ett system med bred eftersom surroundeffekten avtar snabbt utanför sweet line.

Den här rapporten behandlar en undersökning av en arrays spridningsmönster och hur man kan optimera spridningen genom att ändra högtalarnas placering och membranens vinkel relativt varandra inom ramarna för vad som kan räknas som en array.

---

## 1.2 SYFTE

---

Syftet med projektet är att kartlägga spridningsmönstret hos en array av högtalare i fallet där arrayen uppträder likt en akustisk dipol. Mer specifikt inriktas syftet på hur spridningen påverkas och förändras av att man inför en vinkel mellan de olika högtalarelementen och deras *bafflar* i arrayen. Ordet baffel syftar på ytan runt membranet på en högtalares framsida. Syftet innefattar även att kartlägga ett samband mellan vinkel, spridning och interferensproblem som kan utnyttjas vid konstruktion av arrayen. En kartläggning av spridningsmönstret för monopol och dipol är relevant för EmbracingSound vid vidareutveckling av en högtalararray som kan återge en ljudbild i surround.

Frågeställningen för den här undersökningen eftersöker ett samband mellan  $ka$ -värde och membrans inbördes vinkel i en array vilket kan användas för att optimera samverkan mellan membranerna när de tillsammans skapar monopol och dipol. Termen  $ka$  -värde tas upp och förklaras i avsnitt 2.7 *Membran och riktningskaraktäristik*.

---

## 1.3 AVGRÄNSNING

---

Arbetet fokuserar på ett generellt fall av högtalararray i användning som akustisk dipol. Fallet är väldigt närliggande den utformning som företaget EmbracingSound använder sig av vilket gör att studien är relevant för företagets produktutveckling. Även om arbetet är utformat för att företaget ska kunna dra nytta av resultatet så inkluderas inga företagsspecifika produktparametrar, annat än att just den för företaget mest intressanta uppställning är den som huvudsakligen undersökts. Det framförallt för att ett sådant arbete skulle kunna komma att behandla sekretessbelagda delar av företagets idéer vilket skulle försvåra möjligheten till att presentera resultaten i form av ett examensarbete för Chalmers. Även att en sådan specifik studie baserad på företagets algoritmer skulle vara för omfattande för projektets tidsram är en anledning till att arbeta med den generella dipolsteorin.

Rapporten kommer att behandla grundläggande vågrörelselära och signalbehandling men utesluta mer ingående beskrivning av rumsakustik, högtalarkonstruktion och annan ljudrelaterad teori.

Avgränsning i frekvensspektrum för laboration och observation. Arbetet fokuserar på det hörbara området och ej på basregister. Fokus ligger från 150 Hz till 10 000 Hz.

---

## 1.4 METOD

---

I projektet utförs en större undersökning av laborationstyp. Den är baserad på mätningar av ljudvågor och dess spridning från en eller flera ljudkällor. Datorbaserade mätprogram används i kombination med mätinstrument i form av bland annat högtalare, en mätmikrofon och signalprocessorer. För att mätningarna ska utföras korrekt och för att ha möjlighet att utvinna relevant information från dem krävs så väl kunskap i ämnet som tillgång till, och kunskap om, rätt utrustning. En viktig parameter är att undersökningen kräver högtalare med bestämd storlek på högtalarelement samt att väldigt specifika krav på utformning av högtalarlådorna uppfylls. Exakt de högtalare som önskas finns inte tillgå vilket innebär att sex stycken prototyp högtalare behöver designas och konstrueras för att genomföra mätningar på.

Projektet är tidsmässigt uppdelat i tre faser. Först en förberedelsefas där bland annat prototyp högtalare tillverkas, mätprogram studeras och testmätningar utförs. Sedan fasen där de riktiga mätningarna genomförs och data struktureras upp. Den sista fasen är mer teoribaserad och där behandlas den data som samlats in. Analys och diskussion avslutar denna fas.

---

## 2 TEORI

---

### 2.1 VÅGUTBREDNING

---

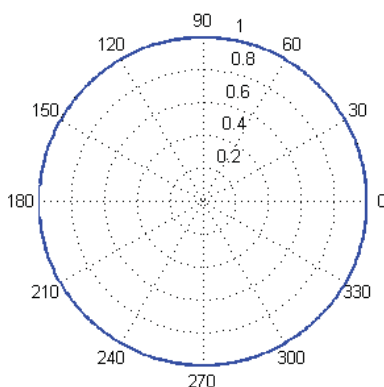
För att ha möjlighet att ta till sig en del av innehållet i rapporten krävs en introduktion till ljudlära och vågutbredning. Definitionen av en ljudvåg är en tryckförändring i ett medium orsakad av ett vibrerande objekt. För spridning av ljudvågor krävs ett material eller ämne med elastiska egenskaper. Ett exempel på ett sådant medium är luft som kan komprimeras eller expandera (Nationalencyklopedin 2014a). Ljudets hastighet i luft betecknas med bokstaven  $c$  och brukar användas som en konstant trots att hastigheten är beroende på luftens temperatur. Det är vanligt förekommande att man räknar med ljudets hastighet som 340 m/s (Borwick 2001). Ljudvågors utbredningsmönster härleds i teorin för våglära som bland annat appliceras på elektromagnetiska fält (Cheng 1989). Tryckförändringarna i luften oscillerar kring ett jämviktsläge, där avståndet från jämvikt till max- eller minpunkt kallas för amplitud vilket brukar anges som  $A$ . Avståndet mellan två toppar benämns med den grekiska bokstaven  $\lambda$  och står för våglängd. Omvänt proportionellt mot våglängd är vågtal som betecknas med  $k$  och har enheten radianer per sekund. När en ljudvåg propagerar genom luft förflyttas inte själva luften utan det är endast energin som förflyttas (Nationalencyklopedin 2014b). När två vågor passerar samma område adderas deras rörelse till varandra dock utan att de enskilda vågorna förändras. Fenomenet kallas för *interferens*, då två eller fler vågrörelser samverkar med varandra. När två vågor med samma frekvens ligger i *fas*, det vill säga vågtopparna sammanfaller med varandra, uppstår konstruktiv interferens vilket innebär att den totala vågen som erhålls ökar i amplitud. Frekvens är antal svängningar per sekund och betecknas med  $f$ . Det motsatta fallet, destruktiv interferens, även kallat fasutsläckning, uppstår när en av vågorna är förskjuten en halv våglängd i förhållande till varandra (Nationalencyklopedin 2014c). I ljudsammanhang är man främst intresserad av frekvenser i intervallet 20-20 000 Hz eftersom det motsvarar området i vilket en människa kan uppfatta ljud. Med begreppet *höga frekvenser* i den här rapporten avses frekvenser över 5 kHz.

---

### 2.2 AKUSTISK MONOPOL

---

Termen *monopol* används i flera olika tekniska sammanhang. En akustisk monopol syftar på vågutbredning från en eller flera källor som sänder samma information. Monopolen definieras som en pulserande sfär där vågorna utbreder sig symmetriskt och lika starkt i alla riktningar vinkelrätt ut från sfärens yta, så kallat rundstrålning (Russel et al. 1999). I *figur 1* ses en ideal monopols utbredningsmönster.



FIGUR 1: UTBREDNINGSMÖNSTER FÖR EN TEORETISK MONOPOL

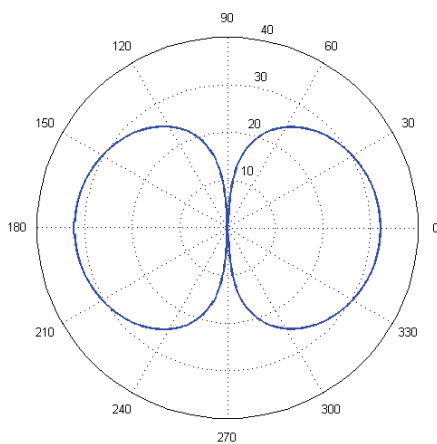
När EmbracingSound utnyttjar teori för monopolen skapas monopolen av flera närliggande högtalarmembran tillsammans istället för endast en spridningspunkt. För att det ska fungera motsvarande en ideal monopolen krävs att avståndet mellan membranerna är väldigt litet, eller vid ett idealt fall obefintligt. I den här rapporten används begreppet akustisk monopolen som benämning av en samling högtalare som står tätt intill varandra samt sänder ut samma ljudinformation med en jämn utbredning i 180 grader.

---

### 2.3 AKUSTISK DIPOL

---

Precis som för monopolen förekommer även termen *dipol* i olika tekniska sammanhang. Som namnet antyder så består en dipol av två poler med motsatt polaritet. Ett exempel på en dipol är en stavmagnet (Cheng 1989). En *akustisk dipol* syftar på två separata monopoler som är placerade tätt intill varandra med ett litet avstånd  $d$ . Vad som definierar ett "litet avstånd" beskrivs mer ingående i avsnitt 2.7 *Membran och riktningskaraktistik*. När de två monopolen sänder ut samma information i motfas betraktas ljudkällan som en akustisk dipol. Utbredningsmönstret för en ideal dipol ses i *figur 2* (Russel et al. 1999).



FIGUR 2: UTBREDNINGSMÖNSTER FÖR EN TEORETISK DIPOL

---

### 2.4 EMBRACINGSOUND

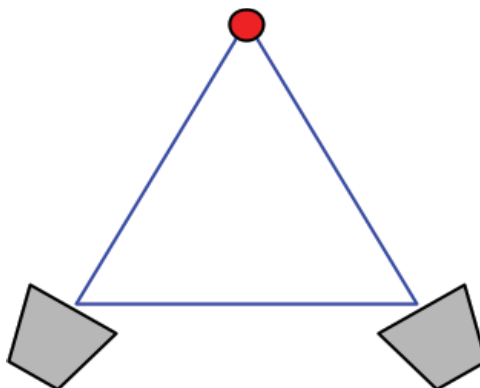
---

EmbracingSound är ett företag som arbetar med teknikutveckling inom audioteknologi. Företaget är baserat i Solna och licensierar sin teknik till flertalet högtalartillverkare runt om i världen. Företagets grundidé består primärt av två högtalare och en signalprocessor för signalbehandling. Som nämnt i inledningen ställs högtalarna för att membranerna ska komma så nära varandra som möjligt. Motiveringen till placeringen är att ett litet avstånd mellan membranerna minimerar effekter av destruktiv interferens i höga frekvenser. Avståndet mellan två membran motsvarar en viss frekvens halva våglängd vilket innebär att ett mindre avstånd ger interferensproblem i högre frekvenser. Ökar man avståndet mellan membranerna uppstår interferensproblemen längre ner i frekvensbandet (Nationalencyklopedin 2014c). Teorin om avståndets påverkan behandlas vidare i avsnitt 2.7 *Membran och riktningskaraktistik*. Genom att kombinera en dipol med rätt mix av monopolen erhålles en korrekt återgivning av det uppspelade materialet. Signalbehandlingen som utförs är utformad från hur människan uppfattar ljud (Gunnarsson 2014a; Gunnarsson 2014b).

I en tvåpunktslösning för uppspelning av ljud bör det råda ett triangulärt förhållande mellan de två högtalarna och lyssnaren, se *figur 3*. Högtalarna skickar ut varsin mono-signal, en vänster- respektive högersignal, och ljudet som träffar lyssnaren sägs då vara återgivet i stereo. Lyssnarens position i triangeln kallas för sweet spot och i denna position går det att urskilja djup och bredd i ett uppspelat ljudmaterial. Den så kallade stereobild



som lyssnaren upplever och skapas i området framför högtalarna är uppbyggd av tid- och amplitudsinformation som lyssnaren tolkar som positionering av ljudkällan (Gunnarsson 2014b).



FIGUR 3: TRIANGULÄRA FÖRHÅLLANDET MELLAN TVÅ HÖGTALARE OCH LYSSNARE

En högtalarkonstruktion där EmbracingSounds teknik är implementerad innefattar två eller flera membran som är monterade i samma högtalarlåda med en vägg mellan höger och vänster membran. Teknologin använder sig av termen *sweet line* som är att jämföra med ovannämnda *sweet spot*. I företagets tekniska dokumentation över teknologin är det angivet att utgångsläget för *sweet line* ska vara  $\pm 30$  grader och att stereobilden är intakt längs med *sweet line* under förutsättning av membranens storlek och den akustiska miljön uppfyller de specificerade kraven. Den grundläggande idén för algoritmen som är implementerad i signalprocessorn finns beskriven i grundaren Fredrik Gunnarssons dokument *Tech summary* samt *Single Bipolar Loudspeaker System for Stereo Reproduction*. När lyssnaren hamnar utanför *sweet line* så uppfattas inte dipolen på rätt sätt vilket medför att stereobilden gradvis försvinner. Istället upplevs ljudbilden som mono. Det att jämföra med en klassiks tvåpunktslösning där lyssnaren upplever en obalans mellan höger och vänster högtalare om denne flyttar sig från *sweet spot* (Gunnarsson 2014a; Gunnarsson 2014b). Undersökningen är av intresse för EmbracingSound eftersom deras teknik utnyttjar teorin för en dipol och monopols utbredningsmönster.

## 2.5 SIGNALBEHANDLING OCH DSP

---

En *DSP*, *Digital signal processor*, är en integrerad krets som är framtagen specifikt för signalbehandling. Kretsarna är utformade för att kunna processera de matematiska operationer som signalbehandlingsalgoritmerna kräver. Signalflödet i en DSP ses i *figur 4*. En analog signal skickas in i systemet och samplas i en analog till digital-omvandlare. Den nu digitala signalen processeras i enlighet med aktuell algoritm för att sedan konverteras tillbaka till en analog signal i en digital till analog-omvandlare. DSP används ofta i ljudsammanhang då möjligheten att processera ljudsignalen i realtid är mycket önskvärd. Digitala filter är vanligt förekommande inom signalbehandling. Lågpassfilter används till exempel för att undvika samplingsfenomen som vikning (Bengtsson 2003). I de fall algoritmen behandlar ett filter är fördelen gentemot att använda ett analogt filter att den processade signalens fas inte förändras (Encyclopedia Britannica Online 2014). I ljudsammanhang används *equalizers* för att ändra karaktären på ljudet. En equalizer består av ett eller flera filter som dämpar eller förstärker valt frekvensintervall. Filtren i en equalizer kan vara digitala eller analoga beroende på applikation.



FIGUR 4: SIGNALFLÖDE FÖR DSP

EmbracingSound använder sig av DSP vid signalbehandlingen i deras teknik. Beroende på applikation ställs olika krav på vilken DSP som ska användas. För laborationerna i rapporten används ett specialbyggt kretskort kallat "Pandora" vilket är baserat på företaget Analog Devices DSP *ADAU1701*. Mjukvaran som används vid programmering av DSP heter "Sigma Studio" vilket är Analog Devices egna program som de utvecklat till sina kunder för användning till deras produkter. Sigma Studio har ett grafiskt gränssnitt där algoritmerna konstrueras genom att lägga till önskvärda funktioner i signalkedjan. Pandorakortet har sex stycken förstärkare varav två är digitala och det ger upphov till en viss tidsskillnad och förstärkning mellan de analoga och digitala förstärkarna. Problemet löses i Sigma Studio och mer om tillvägagångssättet läses i avsnitt 4 *Metod*. Kortet är utformat för utveckling och testning av surroundsystem med sex stycken ljudkällor. Datablad för Pandora är bifogat i *Appendix B*.

## 2.6 MÄTTEKNIK

### 2.6.1 DFT OCH FFT

Mätprogram inom ljud och signalbehandling bygger på Fourieranalys och utnyttjar olika transformeringar för att erhålla relevant information. *DFT*, *Discrete Fourier Transform*, används i de sammanhang man Fouriertransformerar en samplad signal. För att processera en signal i realtid används *FFT*, *Fast Fourier Transform*, som bygger på DFT men har en optimerad algoritm som gör den lämplig i signalbehandlingssammanhang (Bengtsson 2003).

### 2.6.2 MÄTMETODER

Mätningar inom ljud och akustik med inriktning mot högtalare utförs primärt genom tre olika metoder. Grundprincipen för nedan nämnda metoder är att en referenssignal spelas upp i en eller flera högtalare för att upptas av en mätmikrofon. En vanlig metod är *MLS*, *Maximum length sequence*, där ett så kallat *vitt brus* spelas upp. Vitt brus består av alla hörbara frekvenser med samma amplitud. En fördel med MLS är att det möjliggör realtidsmätning då alla frekvenser spelar samtidigt. En nackdel är att man i mätningen inte kan urskilja vilka ljudvågor som når mikrofonen först. Direktljud, ljudet från högtalaren, och rumsreflexer blandas ihop. En annan metod är att man spelar in en impuls och Fouriertransformerar impulssvaret till frekvensdomän. Nackdelen med metoden är svårigheten att erhålla mätdata med tillräckligt god *SNR* eller som inte är distorderad. *SNR* är en förkortning av *Signal to Noise Ratio* och är kvoten mellan signal och brus. *LSS*, *Logarithmic Sine Sweep*, är en metod där ett frekvenssvep från 20 Hz -20 kHz spelas upp över viss tid för att sedan Fouriertransformeras till en impuls. Från den framräknade impulsen kan nu frekvensåtergivningen erhållas och analyseras (Tashev 2009).

När man valt mätmetod behövs följande utrustning för att genomföra mätningar:

- ett mätprogram
- en mätmikrofon
- ett ljudkort
- högtalare

De mätprogram som används i laborationerna är utvecklade av företaget WaveCapture och är uppdelade efter

användningsområde.

- Room-Capture: mätprogram som främst är inriktat mot rumsakustik och intrimning av större ljudanläggningar t.ex. vid installation av ljudanläggning inför en stor konsert.
- FIR-Capture: mätprogram som är inriktat mot att mäta högtalare. Möjlighet att applicera FIR-filer.
- Audio-Capture: mätprogram för högtalare. Mjukvaran har utgått ur WaveCaptures produktutbud.

I laborationerna används Room-Capture för mätningarna, FIR-Capture för export av mätdata och Audio-Capture för framställning av data i diagram.

---

### 2.6.3 FÖNSTRING

---

Vid mätning av en högtalares frekvensåtergivning har rummet stor inverkan på resultatet, därför utförs mätningar med fördel i så kallade eko- eller reflexionsfria rum. Tack vare *fönstring* är det dock möjligt att ta bort rumsreflexer från mätningar utförda i andra icke optimala miljöer och därav erhålla ett resultat som tydligare återspeglar högtalarens strålningsegenskaper. Vid mätningar uppstår *läckage* vilket innebär att impulsen i frekvensspektrat påverkas. Läckage uppstår då samplad data inte är kontinuerlig. Fönstring används för att minimera läckage och därefter transformera fram en frekvenskurva. Fönstringen utförs på samplad data man har att tillgå och det främsta syftet är att göra en diskontinuerlig signal kontinuerlig. Vid denna process blir frekvensupplösningen bättre, men signalamplituden i DFT-spektrat förvrängs. Flertalet olika fönstringsfunktioner används i signalanalyssammanhang. Några vanliga fönster är *Hanningfönstret*, *Hammingfönstret*, *Triangelfönstret* och *Rektangulära fönstret* (Bengtsson 2003).

Att använda två fönster är en metod kallad Multiwindowing som är möjlig i Room-Capture. Metoden används för att utesluta irrelevant data från mätningarna på ett mer effektivt sätt utan att i för hög grad påverka vilka frekvenser som kan återges naturligt. Var gränsen mellan fönstren dras påverkar vilka frekvenser respektive fönster kan återge korrekt.

Det finns olika metoder att representera signalsvep i impulsform vilket är väldigt användbart vid fönstring. En metod är kallad Cepstrum och återfinns i Room-Capture. För att ett Cepstrum skapas först ett signalspektrum. Logaritmen av spektret beräknas och sedan utförs en inverterad fouriertransform. Resultatet är ett Cepstrum (Tashev 2009).

---

## 2.7 MEMBRAN OCH RIKTNINGSKARAKTERISTIK

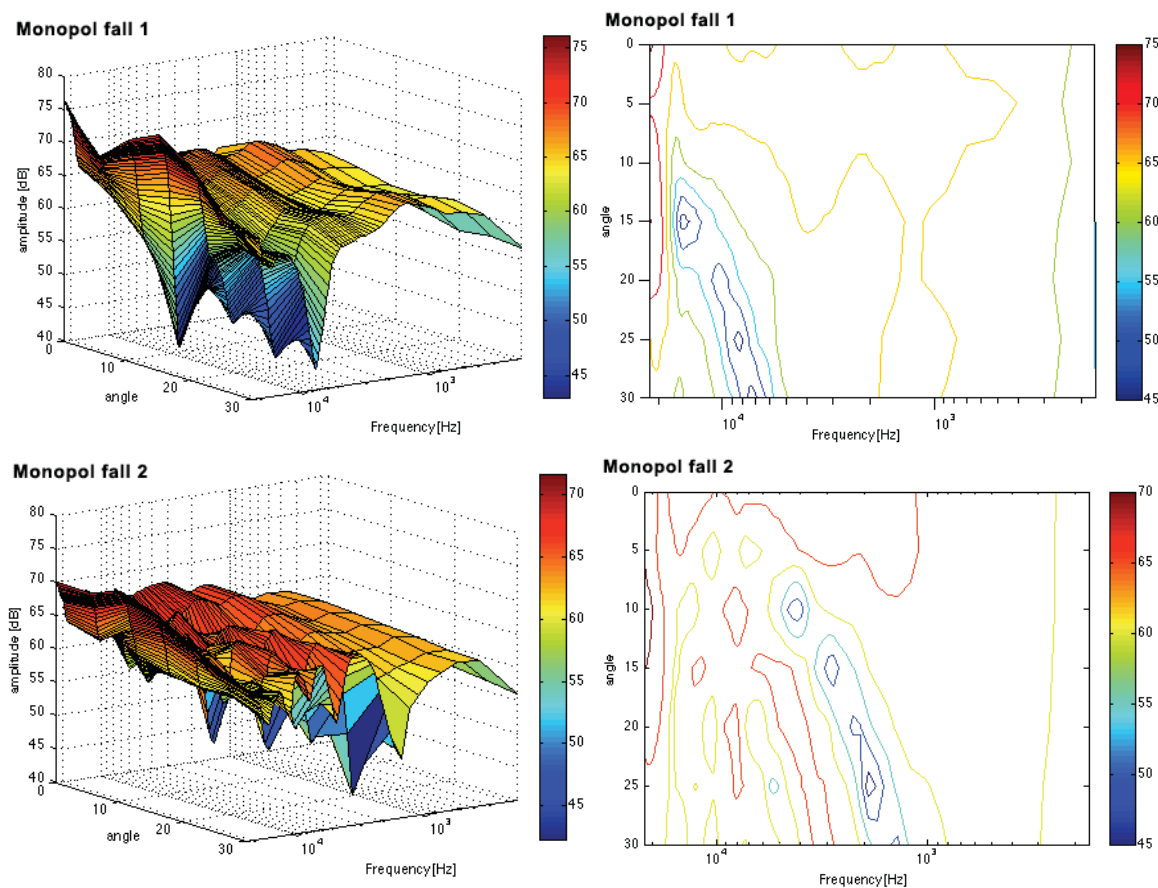
---

För att beräkna spridningsmönstret för ett membran är det relevant att veta vilken frekvens som är intressant samt hur stort membranet är. Vågtalet betecknas  $k$  och beror på våglängd,  $\lambda$ , vilket gör den frekvensberoende  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ . Membranets radie betecknas  $a$  och mäts i meter (m). Produkten av dessa utgör det så kallade  $ka$ -värdet vilket används för att kartlägga direktivitet hos membran. Eftersom  $k$ -värdet är frekvensberoende så är även  $ka$ -värdet det. Definitionen för en akustisk monopol säger att ljudkällor som är mycket mindre än våglängden på ljudet den alstrar, det vill säga  $ka \ll 1$ , agerar som monopoler (Russell et al. 1999).

Vid höga frekvenser eller stora membran är  $ka$ -värdet högt och i samband med detta är även direktiviteten hög. Förhållningsregler för ett membran monterat på en stor baffel är att  $ka \leq 1$  anses ha jämn spridning i alla vinklar framför baffeln. För värden från  $ka = 3$  och uppåt anses spridningen gradvis bli tydligt mer och mer riktad (Eargle 2003). För frekvensen vars  $\lambda = 2a$  kommer varje punkt längs linjen i nittio graders vinkel från membranet drabbas av destruktiv interferens. Det eftersom ett membran alstrar samma ljud över hela konen men avståndet mellan godtycklig punkt på linjen och konens olika alstringspunkter skiljer sig. Som mest skiljer det sig med avståndet  $a$ . Ett membrans ljud kommer således att släckas ut av sig själv i olika

utsträckning vid frekvensen där  $\lambda = 2a$  och högre ojämna multipler av denna frekvens. Maximala avståndsskillnaden mellan de olika punkterna i membranets kon och en godtycklig punkt i rummet är av minst värde mitt framför membranet, vid mätningar kallat noll grader, och ökar sedan linjärt och kulminerar vid sidan av membranet, nittio graders vinkel. Destruktiv interferens återfinns inte bara vid nittio graders vinkel men blir där som tydligast och ofta kraftigast. Detta visar på sambandet mellan direktivitet, frekvens och radien av ett membran (Borwick 2001).

Vid användning av fler än en ljudkälla samtidigt påverkas varje enskild källas spridning av de andra källornas spridning. Vidare är det för detta fall inte heltäckande att enbart utgå från ljudkällornas individuella  $ka$ -värde för att beräkna det sammanlagda spridningsmönstret (Gunnarsson 2014a). Det gäller även i de fall där samtliga ljudkällor är likadana och alstrar samma ljud. Även vid fasta  $ka$ -värden kan den sammanlagda direktiviteten förändras beroende på andra faktorer. Avståndet mellan ljudkällor är generellt en viktig parameter för dessa fall. Vid räkning på akustiska dipoler är detta avstånd en direkt avgörande parameter för ifall ljudkällorna tillsammans kan betraktas som just en dipol. Vid beräkningar betecknas avståndet mellan två källor som alstrar samma ljud fast i motfas mot varandra med  $d$ . Vid räkning där ljudkällorna utgörs av två ideala monopoler i motfas gäller att ifall avståndet  $d$  är tillräckligt litet för att  $kd \ll 1$  ska vara uppfyllt skapar monopolen en akustisk dipol tillsammans (Russel et al. 1999). När de ideala monopolen ersätts av högtalarmembran krävs, utöver att membranerna är identiska, att de är placerade i samma baffel för att de ska samverka och tillsammans agera som en dipol (Gunnarsson 2014a). *Figur 5* visar resultat från mätningar utförda av författarna för att visualisera hur avståndet  $d$  påverkar utbredningsmönstret.



FIGUR 5: TVÅ FALL AV MONOPOLER MED OLIKA AVSTÅND MELLAN MEMBRANEN

Graferna i bilden visar ett exempel med två fall där två stycken membran används för att skapa en akustisk monopol. Membranparen är monterade på en array vilket gör att de i båda fallen är monterade på samma baffel. Vid det första fallet är membranen placerade tätt intill varandra och i det andra fallet markant längre ifrån varandra. Hur de två membranens spridning interfererar i de olika fallen ger en indikation på varför avståndet mellan ljudkällor är relevant när fler än en används. Resultat redovisas för trettio graders vinkel. Noll grader är den axeln som går nittio grader rakt ut från punkten på baffeln som ligger centrerat mitt mellan membranerna. Graferna visar tydligt att när membranerna är placerade längre ifrån varandra påträffas dippar både lägre ner i frekvensspannet och närmare noll grader vilket gör placeringen mindre lämpad för skapande av akustisk monopol och dipol.

---

### 2.7.1 Thiele-Small parametrar

---

Många av membranens egenskaper beräknas med hjälp av så kallade Thiele-Small-parametrar vilka beskriver membranets elektriska egenskaper. Dessa är jämförbara med en elektrisk krets småsignalparametrar och gör det möjligt att applicera en del av teorin för elektronik vid räkning på högtalare och ljudåtergivning. Parametrarna finns specificerade i membranets datablad men kan även tas fram genom mätning av ljudåtergivning. Med hjälp av dessa kan man bland annat bestämma vilken typ av konstruktion av låda som passar ett specifikt membran bäst samt vilken volym lådan behöver ha. En komplett högtalares ljudåtergivning i lägre frekvenser samt dess förmåga att producera ljudnivå kan även det beräknas utifrån Thiele-Small-parametrar (Eargle 2003).

---

## 2.8 LINE ARRAY

---

En *line array* är i praktiken en uppsättning av högtalare som sitter ihop i en rad och tillsammans sprider samma ljudmaterial. Ursprungliga definitionen av en line array är att det är en samling rundspridande element som samlats tätt intill varandra på en rad och sprider ljud i samma fas och styrka (Olson 1947). En högtalararray av den typen är ett antal högtalare som delar samma baffel, vars membran är väldigt närliggande och noggrant dimensionerade för att membranens spridning konstruktivt ska interferera. Även det destruktiva interfererandet, så kallad *kamfiltereffekt*, används för att ge arrayen rätt direktivitet (Meyer Sound Laboratories 2001). Kamfiltereffekt kan beskrivas med två ljudkällor som alstrar samma ljud. Vid en position där avståndet inte är exakt lika långt till de två källorna interfererar de destruktivt på varandras spridning. Vissa frekvenser kommer vara i fas och andra inte vilket gör att olika frekvenser påverkar olika mycket vilket ger en ojämn frekvensåtergivning (Borwick 2001).

### 3 HÖGTALARE: TEORI, DESIGN OCH TILLVERKNING

---

För att undersöka spridningsegenskaper för en array av högtalare och hur dessa egenskaper ändras när de byter position och riktning gentemot varandra i rummet behövs ett antal separata högtalare. Till mätningarna i det här projektet behövs sex stycken högtalare. Från membranets datablad används Thiele-Small-parametrarna  $V_{as}$ ,  $Q_{tc}$  och  $f_s$  för att räkna ut den volym som högtalarlådan behöver ha för att membranet ska agera enligt specifikation. Databladet för membranet är bifogat i *Appendix B*. Programmet WinISD används för att räkna fram det önskade värdet för volymen  $V_c$  med hjälp av ovanstående parametrar. I det här fallet är den rekommenderade volymen två liter.

För att undersöka vilken fysisk uppställning av array som ger bäst utbredningsmönster behöver vinkeln mellan högtalarnas bafflar, vara flexibel. Det utan att avståndet mellan arrayens membran påverkas i allt för stor utsträckning. För att ha möjlighet att placera högtalarna i olika vinklar, i förhållande till varandra, behövs en design av högtalarlåda som tillåter detta och som samtidigt uppfyller elementens volymbehov av luft.

För undersökningen diskuteras tre stycken huvudmodeller av högtalaruppställning fram. De är alla potentiella förslag på lösningar som kan leda till utveckling av arrayens utbredningsmönster. De tre modellerna ska testas i olika konfigurationer och vinklar. Den tänkta appliceringen av slutprodukten är att placeras framför en vägg eller tv-skärm och därifrån sprida ljud i 180 graders vinkel. Utgångspunkten vid designen av testhögtalaren var således att den maximala vinkeln mellan tre högtalare ska vara 90 grader vilket gör att den önskade maximala vinkeln mellan två stycken högtalarelement är 45 grader. För att uppnå detta innebär det att varje högtalarlåda ska ha som mest 67,5 graders vinkel mellan dess front och dess sida.

Tre huvudsakliga parametrar finns att ta hänsyn till när högtalarna designas och en kompromiss görs utifrån dem:

- Avståndet mellan membranerna ska vara så litet som möjligt för att arrayen ska agera likt en akustisk monopoli i så stort frekvensområde som möjligt.
- En mindre vinkel mellan framsida och sida av högtalarlåda skapar fler möjligheter att testa olika uppställningar vid mätningar.
- Det är fördelaktigt för högtalarens ljudegenskaper ifall volymen luft i högtalarlådan är stor. I det här fallet är målet två liter.

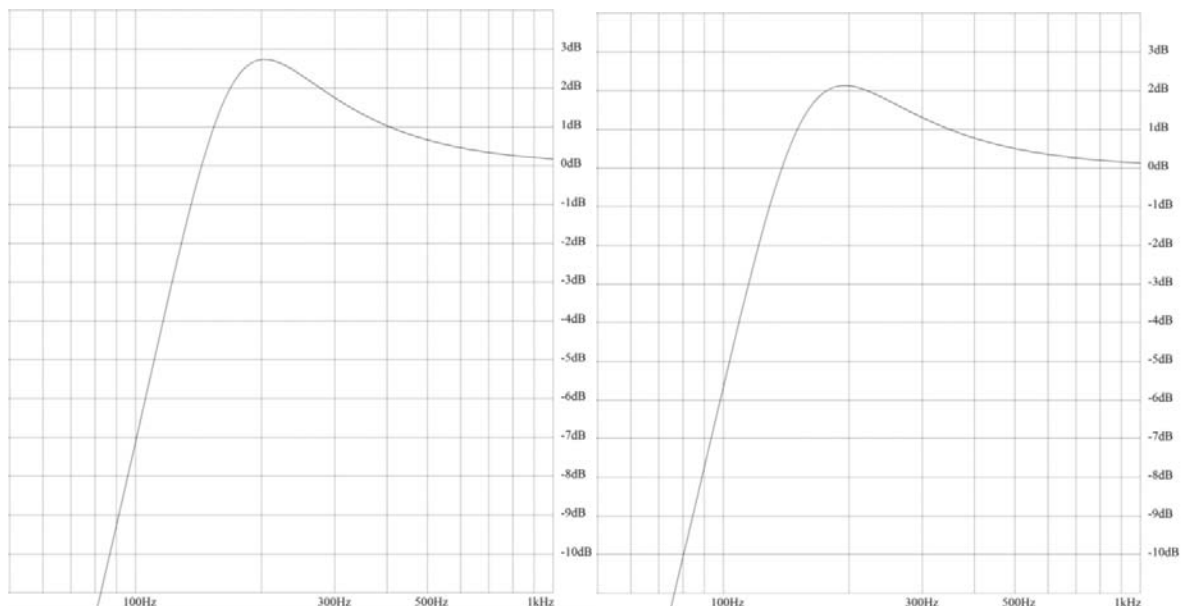
När alla parametrar tagits till akta är kompromissen 72 graders vinkel mellan en högtalarlådas framsida och sida. Det ger möjlighet till 36 graders vinkel mellan två högtalare placerade tätt intill varandra. När lådan konstrueras med önskad form enligt ovan nämnda vinkelmått är högtalarlådans volym cirka 1,2 liter. Ritning för högtalarna är bifogat i *Appendix B*. En bieffekt av kompromissen är att förlusten av volym, jämfört med den önskade volymen, kommer påverka frekvensåtergivningen. Påverkan är en ökning på cirka en decibel vid 180 Hz vilket är den frekvens där det naturliga högpåpassfiltret börjar. Mer information och teori om högpåpassfiltret finns i stycket nedanför. Vid mätningar programmeras Pandorakortet med en equalizer för att kompensera för ökningen (mer information om hur det går till tas upp i avsnitt 4 *Metod*). Anledningen till att en provisorisk lösning med DSP-programmering används är att det vid eventuell konstruktion av en slutgiltig produkt skulle råda andra volymförhållanden för luften. Det grundas i att den slutgiltiga produkten har en bestämd vinkel mellan bafflar samt att flera element delar på samma luftvolym. Modellen som konstrueras i detta projekt kommer således endast att användas för mätningar och anspråkar ej på att vara en färdig lösning. När den slutgiltiga produkten designas är det lättare att optimera förhållandena för att minimera behov av kompensation med DSP-programmering.

En 3D-design görs i programmet SketchUp som sedan skrivs ut som en mall för konstruktion. Delarna beställs och högtalarlådorna sätts ihop på plats. Avvägning av hur mycket dämpningsmaterial som ska

användas görs genom enklare tester med olika mängd material. En enklare mätning utförs som komplement till den subjektiva bedömningen.

De högtalare mätningarna utförs på designas med slutna lådor. Det finns två starka anledningar till valet av modell för det här projektet. Dels är det den modell som bäst motsvarar produkten vilken undersökningen ämnar utveckla och dels är det av stor vikt i undersökningen att membranen separeras från varandra så att all ljudspridning är under kontroll. När ett membran alstrar ljud i framgående riktning alstras ljudet även bakåt, om än fasvänt. Vid mätning och användning av en öppen låddesign riskerar den fasvända signalen att reflekteras och interferera på direktsignalen. Att en låda är sluten betyder att elementet sitter monterat i en lufttät och heltäckande konstruktion innehållande en specifik volym,  $V_c$ , luft. Valet av konstruktion inverkar på elementets och högtalarens ljudalstringsegenskaper på flertalet sätt (Borwick 2001).

De två största nackdelarna med valet att konstruera högtalaren med stängd låda är att det i viss grad begränsar högtalarens maximala ljudstyrka samt inverkar på möjligheten att återge basfrekvenser, gentemot andra konstruktionsmodeller. Behovet att maximera ljudstyrka är irrelevant för detta arbete. När en låda är stängd beter sig högtalaren som en krets med ett inbyggt andra ordningens högpasfilter vilket innebär en basavskärning av magnituden 12dB/oktav (Borwick 2001). Vilken frekvens denna avskärning börjar vid och exakt hur den beter sig bestäms av Thiele-Small-parametrarna och mer specifikt beror det i hög grad på volymen luft i lådan,  $V_c$ . Vanligtvis används datorprogram för att beräkna lämpliga volymer men det går även att teoretiskt räkna på Thiele-Small-parametrarna för att kartlägga beteendet i de lägre frekvenserna (Eargle 2003). För projektet användes programmet WinISD för att beräkna önskad volym och hur eventuell avvikelse från denna påverkar högtalaren. Som *figur 6* visar och som ovan nämnt skapas ett högpasfilter och detta ligger vid 150 Hz. Precis innan filtret startar skapas, på grund av avvikelsen från den rekommenderade volymen, en ökning på cirka 1 dB vid dess start. Ökningen är inom ramen för vad som är möjligt att, utan större komplikation, kompensera för vid programmering av DSP. Med de avgränsningar i frekvensområdet som gäller för laborationen gör ”högpasfiltret” mer nytta än skada för undersökningen (Borwick 2001).



FIGUR 6: GRAFER FRÅN WINISD. TILL VÄNSTER SES HÖGPASSFILTRET VID VOLYMEN 1,2 LITER ATT JÄMFÖRA MED DEN REKOMMENDERADE VOLYMEN 2 LITER, TILL HÖGER



---

## 4 METOD

---

Inför mätningarna på högtalarnas spridningsmönster utförs några inledande mätningar för att fastställa högtalarnas karakteristik. Mätningarna utförs i en akustikjusterad musikstudio på EmbracingSounds kontor. Högtalarna numreras från 1 till 6 och högtalare nummer 1, 2 och 3 används i testen av prototyphögtalarna. Högtalarna mäts en åt gången och kopplas om för att använda samma förstärkare på Pandorakortet. Erhållna mätdata fönstras för att få bort rumsreflexer och störst fokus läggs vid högre frekvenser. De resulterande kurvorna från de tre mätningarna läggs ihop till en medelvärdeskurva som används för att ta fram parametrar till en equalizer. Equalizern ska kompensera för högtalarnas ojämnheter i frekvensåtergivning och i det ideala fallet resultera i en rak frekvensåtergivning. Framtagning av filtrens parametrar utförs i Room-Capture med verktyget *Optimizer* och ett 18 dB Butterworth HP-filtrer med gränshfrekvens 150 Hz används som utgångspunkt. Room-Capture skapar en kurva som visar hur frekvenskurvan ser ut om equaliseringen med förslagna filter appliceras på signalen. Equalizern optimeras i intervallet 150 - 13 500 Hz och noggrannheten som eftersträvas är en resulterande frekvenskurva med differensen  $\pm 3$  dB i förhållande till det ideala fallet. Room-Capture föreslår totalt åtta stycken filter och de finjusteras tills differensen ligger inom de uppsatta gränserna. Filtrens parametrar används för att ställa in en equalizer till Pandorakortet. Equaliseringskurvan blir inte likadan i Sigma Studio som i Room-Capture och vidare justering av filtren krävs. Två equaliseringsinställningar tas fram och mätningar utförs för att ha möjlighet till att jämföra resultaten. Inställningarna som resulterar i rakast frekvensåtergivning väljs. Equalizern läggs in i Pandorakortets algoritm och är aktiverad i samtliga mätningar i undersökningen. Parametrar för filtren ses i *Appendix B*. Separata mätningar utförs på samtliga högtalare och det konstateras att högtalare 2 och 3 har en liten dämpning av utsignalen vid ca 3 kHz. Små variationer av högtalarnas frekvenskurva uppmärksammas. Variationerna i frekvensåtergivningen anses inte påverka laborationsresultaten.

Som nämnt i avsnitt 2.5 *Signalbehandling och DSP* behöver justering av förstärkning och tidsfördröjning ske. Problemen uppstår eftersom två av förstärkarna skiljer sig från de övriga, i det här fallet är förstärkarna digitala. Vidare mätningar utförs för att ställa in förstärkning- och tidskompensering. Högtalare nummer 6 används som referens vid följande mätningar. Avläsning av mätdata visar att förstärkningen är för låg och det kompenseras med en förstärkning på 0,528 gånger. Tidsfördröjningen avläses till 0,156 ms vilket ger en tidsfördröjning vid samplingsfrekvensen 96 kHz på 15 sampels. Sambandet ges av:

$$\text{tidsfördröjning [ms]} \cdot \text{samplingsfrekvens [Hz]} = \text{tidsfördröjning [antal sampels]}.$$

---

### 4.1 LABORATION

---

Vid mätningarna används programmet Room-Capture tillsammans med ett ljudkort, en mätmikrofon, Pandorakortet och de specialbyggda högtalarna. Mätningarna utförs med hjälp av en roterbar pinne med en träskiva vilken högtalarna är placerade ovanpå. Det resulterar i att högtalaruppställningen kan mätas från olika vinklar utan att avståndet mellan mikrofon och centrum på uppställningen ändras. Varje uppställning testas i tio graders intervall med start vid noll grader och slut vid nittio. Noll grader betyder att mikrofonen är riktat rakt framifrån mot högtalaruppställningens centrum och nittio grader betyder att mikrofonen riktas rakt från sidan av uppställningen. För att samla in kontrolldata till de mätningar som är av extra intresse utförs några av mätningarna i intervallet -90 till 90 grader. Vid samtliga modeller av högtalaruppställning är högtalarna uppställda utan mellanrum mellan dess individuella bafflar vilket gör att de tillsammans utgör en gemensam baffel. Ordningen högtalarna sinsemellan är konstant genom hela serien av mätningar. Sett ur mätmikrofonens perspektiv är högtalarna placerade, från vänster till höger, i nummerordningen 1, 2, 4, 5, 3, 6. Ordningen baseras på de mindre ojämnheter i frekvensåtergivning som återfanns i vid testerna utförda i avsnittet innan. Varje uppställning testas både som monopol och dipol. Vid monopolsmätningarna spelar samtliga högtalare samma material i samma ljudstyrka. För dipolens mätningar alstrar de tre högra högtalarna



samma ljud medan de tre vänstra högtalarna alstrar en fasvänd variant av samma ljud. För samtliga bilder över uppställningar gäller att högtalare märkta med ”-” är fasvända. Tillsammans kan mätningarna kartlägga fasutsläckningar och frekvensåtergivning bättre än vid test av endast ena fallet. Som ljudsignal vid mätningarna används Room-Capture metoden kallad LSS vilket finns beskrivet i teoriavsnittet för mätteknik. Vid varje mätning kontrolleras signal till brus-förhållandet för att bekräfta att insamlad mätdata visar korrekt resultat. Upplägget är gemensamt för mätningar utförda för samtliga modeller.

---

#### 4.1.1 DIMENSIONER OCH PLACERING

---

Högtalaruppställningen placeras med uppställningens mitt centrerat i sidled på en träskiva. Träskivan är 0,79 m bred och 0,37 m djup. Vid startuppställning, högtalarna uppställda på rak linje utan vinkel mellan deras bafflar, är det 0,16 m från baffeln till skivans framkant. Det för att uppställningens högtalarmembran ska centreras över den roterande pinnen som skivan är festsatt på. För att minimera reflektionerna från träskivan som högtalarna är uppställda på täcks skivan i fyra lager av akustikfilt. Högtalarna placeras med membranens center 1,66 m över golvet och 0,89 m från taket. Mikrofonen placeras i samma höjd och en meter ifrån center av högtalaruppställningens gemensamma baffel riktad mot högtalaruppställningens center. Rummets dimensioner och mikrofonens exakta placering i rummet redovisas i tabellerna nedan.

Avstånd från	Mikrofonens membran
Center av högtalarbaffel	1,00 m
Golv	1,66 m
Tak	0,83 m
Vägg framför mikrofon	2,80 m
Vägg bakom mikrofon	2,61 m
Vägg vänster om mikrofon	3,06 m
Vägg höger om mikrofon	2,75 m

TABELL 1: MIKROFONENS PLACERING I RUMMET

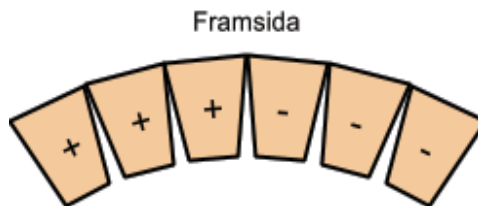
Rummets dimensioner	Dimensioner
Vägg framför mikrofon	4,17 m
Vägg bakom mikrofon	5,52 m
Vägg vänster om mikrofon	4,27 m
Vägg höger om mikrofon	5,80 m

TABELL 2: RUMMETS DIMENSIONER

##### 4.1.1.1 UPPSTÄLLNING 1

---

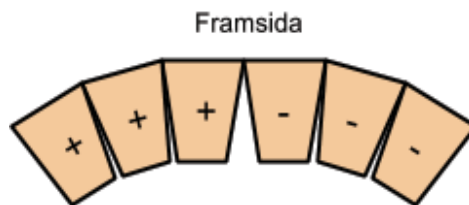
Den första uppställningen av högtalare som testas i undersökningen är en modell där varje vinkel mellan två närliggande högtalare är lika stora. Bild av uppställningen ses i *figur 7*. Det är även huvudmodellen för undersökningen och den viktigaste för möjligheten att se ett samband mellan spridningsmönster, *ka*-värde och vinkel på arrayens baffel. Sju stycken varianter av denna uppställning testas. Den första varianten har noll graders vinkel mellan högtalarnas bafflar. Vidare sker en ökning av vinkeln med fem graders intervall upp tills trettio graders vinkel är uppnått. Vid maximala vinkeln trettio grader mellan varje högtalare uppnås 75 graders vinkel mellan den yttersta högtalarens baffel och det ursprungliga noll grader.



FIGUR 7: UPPSTÄLLNING 1

#### 4.1.1.2 UPPSTÄLLNING 2

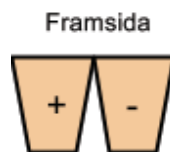
Den andra uppställningen bygger på samma upplägg som den första med skillnaden att de två mittersta högtalarna genom hela mätningsserien stannar på nollgraders vinkel gentemot varandra och utgångsläget. Det är alltså endast de två yttersta högtalarna på varje sida som flyttas för ändring av vinkel. Bild av uppställningen ses i *figur 8*. Dipolen skapas genom fäsvändning på samma vis som vid uppställning 1. Uppställningen testas för tio, tjugo och trettio grader mellan högtalarna. Vid maximala vinkeln trettio grader mellan varje par högtalare uppnås sextio graders vinkel mellan den yttersta högtalarens baffel och de mittersta högtalarna. Vid noll graders vinkel är den här uppställningen identisk med den första.



FIGUR 8: UPPSTÄLLNING 2

#### 4.1.1.3 UPPSTÄLLNING 3

Den tredje uppställningen är en mindre variant av uppställning 1. Bild av uppställningen ses i *figur 9*. För uppställningen används endast två stycken högtalare. Vid mätningar av dipol med den här uppställningen fäsvänds den vänstra av de två högtalarna. Modellen testas med tio graders intervall med start vid noll grader och slut vid trettio grader. Vid maximala vinkeln trettio grader mellan de två högtalarna uppnås femton graders vinkel mellan högtalare och ursprungsläget.

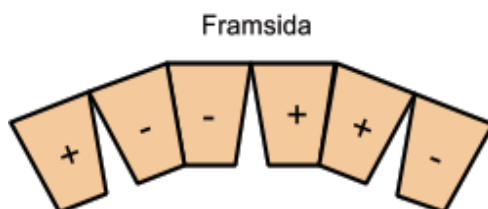


FIGUR 9: UPPSTÄLLNING 3

#### 4.1.1.4 UPPSTÄLLNING 4

Som experiment undersöks även spridningen hos en högtalaruppställning bestående av tre stycken högtalarpar som bildar varsin mindre dipol. Högtalarparen har noll graders vinkel mellan bafflarna inom paren och det är vinkeln mellan paren som ändras mellan mätningssessionerna. Det centerade paret hålls på noll graders vinkel genom hela mätningen. Bild av uppställningen ses i *figur 10*. För den här uppställningen skapas dipolerna genom att konfigurera fäsvändningen så att de fyra mittersta högtalarna bildar en dipol likt de sex högtalarna görs i tidigare nämnda uppställningar. De högtalare som placeras ytterst på vardera sida

fasvänds gentemot sin närmaste högtalare. Sett från vänster ur mikrofonens perspektiv är högtalare nummer 1, 4 och 5 fasvända. Det intressanta med att utföra den här mätningen är att se ifall de fyra mittersta högtalarna kan skapa en tydlig dipol för punkter centrerat framför högtalaruppställningen samtidigt som de två yttersta högtalarna skapar dipoler, om än svagare, som kan upplevas vid punkter liggandes med större vinkel från uppställningens centrum.



FIGUR 10: UPPSTÄLLNING 4

---

#### 4.1.2 UTFÖRDA TESTMÄTNINGAR

---

Vid mätningar registrerar mätprogrammet signaler så lågt som vid 10 Hz. Dessa frekvenser kan inte alstras av högtalarna utan måste härstamma från annan källa såsom vibrationer från vägen utanför. För att säkerställa vilka delar av mätningarnas frekvensspektrum som kan tolkas som pålitliga mätvärden och vilka delar som endast är brus utförs ett subjektivt test av högtalaren. En sinusvåg med frekvensen 100 Hz spelas upp ur högtalarmembranet. Frekvensen sänks succesivt och det konstateras att högtalaren kan producera ljud så lågt som 50 Hz. Det går att säkerställa att resultaten runt 100 Hz är pålitliga. Den frekvensökning som sker under 20 Hz är dock att betrakta som rent brus.

Vid ett tillfälle under mätningar på uppställning 4 upplevs signalen från dipolen subjektivt som distorderad. För att säkerställa att signalkedjan beter sig korrekt testas varje membran för sig samt de olika membranerna tillsammans som monopoler och dipoler i olika konfigurationer. Även kontakter som riskerar att glappa undersöks. Det konstateras att utrustningen är i bra skick och att upplevelsen av distorsion sannolikt berodde på fasutsläckningar vid en viss vinkel.

Rapportens syfte är att ligga till grund för EmbracingSounds utveckling av högtalararrayer. För att anknyta ytterligare till det och för att knyta an det teoretiska till det praktiska utförs utöver de tekniska mätningarna med teoretisk bakgrund även subjektiva lyssningstest där EmbracingSounds algoritmer implementerats i Pandorakortet. Testen utförs på de olika uppställningsmodellerna.

---

#### 4.1.3 FÖNSTRING AV MÄTDATA

---

För att veta vilket material som är relevant att ta med i fönstringen utförs ett antal beräkningar. Ljudets hastighet antas vara 343 m/s vilket är det värde som råder vid tjugo grader Celsius. Det tar 2,915 ms för direktljudet att ta sig från center på baffeln till mikrofonen. Avståndet mellan två stycken närliggande membran vars bafflar har noll graders vinkel mellan varandra är 0,105 m. Det motsvarar fördröjningen 0,306 ms. Avståndet mellan yttersta högtalarmembranets center och center på baffel motsvarar således 0,765 ms fördröjning.

Den första reflektionen som når mikrofonen är den som uppstår mot skivan som högtalarna är placerade på. Fördröjningstiden varierar mellan varje högtalare och högtalaruppställning. Storleksordningen av fördröjningstiden kan dock fastställas. När den roterade plattan är ställd på noll graders vinkel befinner sig det innersta membranet som mest cirka 0,3 m in på skivan. För signalen som går via skivans yttersta punkt tar det ungefär 2,983 ms att färdas till mikrofonen vilket motsvarar 0,068 ms fördröjning gentemot direktsignalen.

När skivan är roterad till nittio graders vinkel är det som mest 0,658 m från skivans spets till membranet längst ifrån mikrofonen. För signalen som går via skivans spets till mikrofonen är sträckan 1,279 m vilket innebär att det tar 3,729 ms för signalen att nå mikrofonen. Det är en fördröjning på 0,049 ms gentemot direktsignalen. Den första reflektionen, förutom skivans, som når mikrofonen är den från taket. Höjden på taket mitt mellan mikrofon och högtalare är 0,87 m relativt mot högtalare och mikrofon. Den signal som färdas från center på baffeln och reflekteras i taket halvvägs till mikrofonen har en färdväg på 2,0068 m. Det motsvarar 5,851 ms och fördröjningen 2,936 ms jämfört med direktsignalen. Presenterad fördröjningsdata är inte heltäckande men räcker för att avläsa vilka impulser som är relevanta att ta med i fönstringen eller inte.

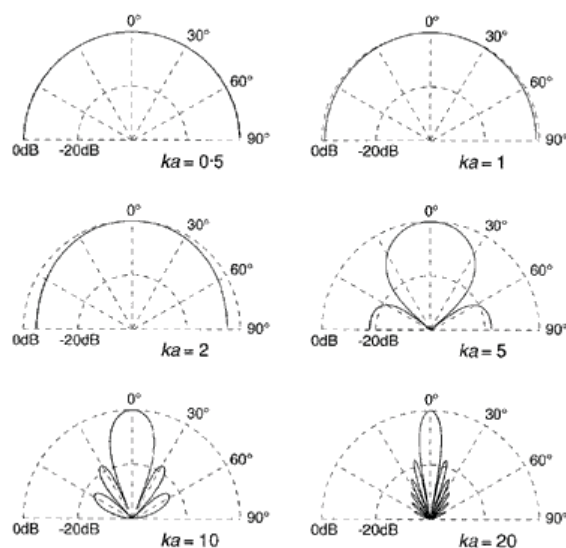
Vid fönstringen ställs Room-Capture in på Hanning-fönster. Metoden som används är Multiwindowing och således används två fönster. I det första mindre fönstret prioriteras det som kan räknas som direktljud från högtalarna. Fönstret startar 0,05 ms innan Cepstrum-impulsens stigning tar fart. För projektet görs en standardlängd på de två fönstren utifrån beräknade fördröjningsvärden. Det första fönstrets längd sätts till 2 ms vilket innebär att direktsignalen från varje element i varje högtalaruppställning når fram inom fönstret och att samtliga stora reflektioner från tak, golv och väggar samt största delen av de mindre reflektionerna utesluts. Längden 2 ms ger överbrygningsfrekvensen 1 kHz mellan de två fönstren. Det andra fönstrets längd sätts till 40 ms vilket gör att frekvenser ner till 50 Hz kan mätas och representeras på ett korrekt vis. Det överensstämmer med rådande avgränsningar i frekvensspektrumet.

Export av mätdata sker som tidigare nämnt i programmet Audio-Capture. För att programmet ska återge insamlad data korrekt i ett polärt diagram krävs att mätningarna är utförda i intervallet -90 till 90 grader. Eftersom merparten av mätningarna i undersökningen sker i intervallet 0 till 90 grader kopieras mätdata och spegelvänds i de fallen för att på så sätt skapa mätdatafiler som är kompatibla med Audio-Capture.

## 5 RESULTAT OCH ANALYS

Polärgrafer med insamlad mätdata är bifogade i *Appendix A*. Som nämnt i föregående avsnitt skapas vissa av mätfilerna baserat på data kopierat från mätningar utförda i 0 till 90 grader. Metoden medför att det är kvadrant två som är relevant för jämförelser. I de fall kvadrant ett innehåller unik data används den endast som kontrolldata vid de mätningar som anses vara av extra intresse. Diagrammen som innehåller sådan kontrolldata är markerade med \*. Vid betraktelse av diagrammen ombeds läsaren vara uppmärksam på amplitudskalan vilken ändras mellan dem. Skalan ställs in automatiskt i Audio-Capture och går inte att ändra av användaren.

I kapitlet används  $\theta$  som benämning för gradtalet mellan högtalare i uppställningarna 1-4. Benämningen  $\alpha$  används för vinkeln som beskriver mätmikrofonens position gentemot relevant högtalaruppställnings baffel. För presentation av  $ka$ -värden används närmast möjliga frekvens som Audio-Capture kan återge vilket medför att en mindre avrundning har skett. Det som eftersträvas, och benämns som ”bra”, är spridning lik de ideala spridningsmönstret för monopol och dipol. För monopol är detta en spridning med jämn amplitud i samtliga vinklar  $\alpha$  och frekvenser  $f$ . För dipol har den ideala spridningen, för samtliga frekvenser  $f$ , en kraftig dipp i amplitud vid  $\alpha = 0$  på grund av skillnaden i fas mellan de två polerna. Kringliggande vinklar påverkas även, i mindre mån, av dippet men för övriga  $\alpha$  har spridningen jämn amplitud. Se avsnitt 2.2 *Akustisk monopol* och 2.3 *Akustisk dipol* för tydliga diagram över ideala spridningsmönster. I resultatet görs även jämförelser gentemot  $ka$ -värdens förväntade spridning. Diagram över förväntat spridningsmönster för ett idealt membrans olika  $ka$ -värden ses i *figur 11*.



FIGUR 11: IDEALT UTBREDNINGSMÖNSTER FÖR OLIKA  $ka$ -VÄRDEN

### 5.1 UPPSTÄLLNING 3

Uppställning 3 studeras först av uppställningarna för att börja med att fastslå hur riktningskaraktäristiken för två högtalare skiljer sig från den förväntade riktningskaraktäristiken hos en (1) högtalare. När en array med sex högtalare i uppställning analyseras i senare avsnitt finns resonemanget i det här avsnittet som grund. Riktningskaraktäristiken i uppställning 3 skapas av två membrans konstruktiva och destruktiva interferens

med varandra. Utfallet varierar beroende av uppställningens vinkel  $\theta$  och insignal. Observera att amplitudskalan i polär diagram för  $\theta = 20^\circ$  i monopolsmätningen skiljer sig från de övriga i uppställning 3. I polär diagram för  $\theta = 10^\circ$  i monopolsmätningen uppstår fenomen som vi väljer att bortse ifrån. Mätningen visar oregelbundenheter som bryter mot de mönster resterande mätningar pekar på. Det beror sannolikt på missvisande mätdata.

---

### 5.1.1 MONOPOL

---

Ett tydligt generellt mönster som graferna visar är att lägre  $ka$ -värde påverkas mindre negativt av användningen av två stycken membran än vad de högre  $ka$ -värdena gör. Spridningsmönstret som  $ka = 0.25$  visar har väntad form liknande idealfallets spridning av en monopol. Vid  $ka = 1$  sker relativt stark fasutsläckning vid  $\alpha = \pm 90^\circ$  vilket inte är typiskt för en ideal  $ka = 1$ -spridning. Utsläckningen sker inte för aktuell frekvens vid bruk av endast ett element av den storleken som används. När två element används finns det fler parametrar att ta i akt. Beräkning av  $\frac{\lambda}{2} = a$ , där  $a$  är beteckningen för avståndet mellan två punkter i membranen, för  $ka = 1$  (1500 kHz) ger att  $a = 0,115 \text{ m}$ . Längden är större än ett enskilt membrans bredd men den är inte större än avståndet mellan de två samverkande membranens ytterpunkter. Till följd är delar av teorin för destruktiv interferens på grund av förhållandet  $\frac{\lambda}{2} = a$  applicerbar vilket i aktuellt fall påverkar återgivningen i sidled,  $\alpha = \pm 90^\circ$ . Avståndet mellan två närliggande membranens ytterpunkter är cirka 18,72 cm. För att utesluta att  $ka = 0.25$ , alltså  $f = 363 \text{ Hz}$ , drabbas av en motsvarande utsläckning utförs beräkningar. De visar att det för att skapa motsvarande utsläckning för denna frekvens skulle krävas att  $a = 0.473 \text{ m}$  vilket inte är fallet i uppställning 3.

#### Fallet $\theta = 0^\circ$ :

Utöver destruktiv interferens vid  $\alpha = \pm 90^\circ$  återfinns även en dipp för  $ka = 3$  och  $ka = 4$  vid  $\alpha = 20^\circ$  och  $\theta = 0^\circ$ . För  $ka = 4$  återfinns även ytterligare en dipp vid  $\alpha = 60^\circ$ . Dipparna kan härledas till motsvarande teori för ett (1) membran vilket förklarats i teoriavsnittet. Vid  $\alpha = 20^\circ$  är skillnaden i avstånd till mikrofonen mellan närmaste och mest avlägsna ljudalstrande punkter i uppställningens array 0.0638 m.  $\frac{\lambda}{2} = 0.0638$  motsvarar frekvensen 2689 Hz. En multipel av detta är 5376 Hz. En svepning över frekvensbandet visar att dippen vid  $\alpha = 20^\circ$  kulminerar vid 5,5 kHz men även ger avtryck vid 5,8 kHz vilket motsvara  $ka = 4$ . På samma vis härleds dippen för  $ka = 4$  vid  $\alpha = 60^\circ$  vilken härstammar från utsläckning vid 1,9 kHz (ungefär  $2 \cdot 1059 \text{ Hz}$ ).

#### Fallet $\theta = 30^\circ$ :

Jämfört med  $\theta = 0^\circ$  visar aktuell uppställning bredare och jämnare spridning av samtliga  $ka$ -värden. Samtliga dippar återfinns vid ungefär samma frekvens men är cirka fem dB mindre än vid  $\theta = 0^\circ$ .

#### Fallet $\theta = 20^\circ$ :

Indikerar på att förändringen mellan  $\theta = 0^\circ$  och  $\theta = 30^\circ$  sker succesivt och att det finns ett samband bakom.

---

### 5.1.2 DIPOL

---

Gemensamt för dipolmätningarnas samtliga värden av  $\theta$  i uppställning 3 är att graferna visar en dipoldipp vid  $\alpha = 0^\circ$  vilket är önskvärt i aktuellt fall. Mätningarna visar även att låga frekvensers amplitud påverkas i

större utsträckning av destruktiv interferens än höga frekvensers amplitud i uppställning 3. Vi ser att  $ka = 0.25$  tappar markant mer amplitud än övriga belysta  $ka$ -värden. De högsta  $ka$ -värdena i mätningen drabbas istället av smalare utsläckningar i högre utsträckning.

#### Fallet $\theta = 0^\circ$ :

Graferna visar, utöver önskad utsläckning vid  $\alpha = 0^\circ$ , utsläckning för  $ka = 4$  vid  $\alpha = 40^\circ$  och utsläckning för  $ka = 3$  vid  $\alpha = 50^\circ$ . Hela det uppmätta frekvensspektrumet studeras mellan  $\alpha = 0^\circ$  och  $\alpha = 90^\circ$ . Fördjupningen visar åtta stycken tydliga dippar vid olika gradtal och frekvenser.

Vid svep från låga till höga frekvenser syns att dippen vid  $\alpha = 0^\circ$ , som karakteriserar en dipol, tonas ner någonstans mellan  $f = 7 \text{ kHz}$  och  $f = 8 \text{ kHz}$ . Vid  $f = 8 \text{ kHz}$  är det endast cirka 4 dB skillnad mellan dippen vid  $\alpha = 0^\circ$  och toppen vid  $\alpha = 10^\circ$ . Över  $f = 8 \text{ kHz}$  försvinner dippen vid  $\alpha = 0^\circ$ .

#### Fallet $\theta = 30^\circ$ :

Fallet studeras lika noggrant som fallet  $\theta = 0^\circ$ . Samma dippar återfinns som för  $\theta = 0^\circ$ . Dipparna är i flera fall nästa obefintliga och i samtliga fall mindre. Dipparna har även förskjutits en aning i frekvensspektrumet gentemot mätningen vid  $\theta = 0^\circ$ . Det sker på grund av att avståndsförhållandet mellan de olika membranerna förändras, dock i liten mån, när  $\theta$  ändras och högtalarna vinklas från varandra. Dipolens spridningslobber påminner i övrigt mycket om spridningen för  $\theta = 0^\circ$ .

#### Fallet $\theta = 20^\circ$ :

Motsvarande studier av diagrammen för  $\theta = 20^\circ$  utförs. Graferna tyder på att utvecklingen mot fallet  $\theta = 30^\circ$  sker succesivt. Dippar och toppar är mindre än vid  $\theta = 0^\circ$  men fortfarande en aning större än vid  $\theta = 30^\circ$ . Frekvenserna där dipparnas och topparnas centrum återfinns är närmare resultaten från  $\theta = 30^\circ$  än de från  $\theta = 0^\circ$ . Resultaten antyder att frekvenserna rör sig succesivt för varje ökning av  $\theta$ .

---

## 5.2 UPPSTÄLLNING 1

---

Diagrammen för uppställning 1 vid  $\theta = 0^\circ$  visar tydligt att de aktuella  $ka$ -värdefrekvensernas spridning från den sex högtalare långa arrayen inte motsvarar spridningen hos motsvarande  $ka$ -värde för en enskild högtalare. Vid monopol och rak array är spridningen påtagligt mer riktad samt ojämnare vid jämförelse mellan olika  $\alpha$  än motsvarande jämförelse för spridningen ur ett enskilt membran som agerar likt en ideal monopol. De olika membranens spridning påverkar varandras och den destruktiva interferensen gör att frekvenser blir mer riktade än de förväntas vara. Även jämfört med uppställning 3 är skillnaden stor både för dipol och monopol. Graferna tyder starkt på att EmbracingSounds problem med smal sweet line beror på den stora mängden samverkande högtalare och att de interfererar destruktivt på varandra.

När data för uppställning 1 studeras framkommer tendenser till att olika  $ka$ -värden påverkas olika av förändring av  $\theta$ . Det framkommer även att  $ka = 0.25$ , det lägsta  $ka$ -värdet påverkas i väldigt liten grad av ändringen av  $\theta$ . Både för dipols- och monopolsmätningarna visar  $ka = 0.25$  stabil och bra spridning. Det som påverkas mest för  $ka = 0.25$  är djupet och bredden för dipolsdippen vid  $\alpha = 0^\circ$ . I samtliga fall är det dock en tydlig och jämn dipp.

Vid frekvenssvep över monopolens mätdata syns vid  $\theta = 0^\circ$  att monopolsspridningen fungerar bra upp till cirka  $f = 520 \text{ Hz}$ . Vid högre värde försämras spridningen och över  $f = 2 \text{ kHz}$  är spridningen inte alls vad som eftersträvas i en monopol. Motsvarande frekvenssvep för  $\theta = 20^\circ$  visar på bra monopolsspridning upp

till  $f = 1,3 \text{ kHz}$ . Över det är spridningen bra upp till  $f = 2,5 \text{ kHz}$ . Över det framkommer ett mer kantigt mönster, men som ändå påminner om rundspridning, ända upp till  $f = 6,8 \text{ kHz}$  där toppar och dippar blir mer markanta. Med det som grund jämförs  $ka = 1$ ,  $ka = 2$  och  $ka = 5$  vid  $\theta = 20^\circ$ . Fallet visar för  $ka = 1$  ett spridningsmönster som liknar vad som förväntas hos  $ka = 1$ -mönster för ett idealt membran. Även  $ka = 2$  visar tendenser som liknar önskade värden. Vid  $ka = 5$  upptäcks stora fasutsläckningar och inte något tydligt monopolsmönster på spridningen. Vid jämförelser inses att  $ka = 5$  har jämnare spridning vid  $\theta = 10^\circ$ . Det leder till hypotesen att olika  $ka$ -värden reagerar olika beroende på vinkling av högtalarna, olika  $\theta$ , och en undersökning med fokus på jämförelse mellan  $ka = 1$ ,  $ka = 3$  och  $ka = 5$  görs för både monopol och dipol. Undersökningen sammanfattas nedan.

---

## 5.2.1 MONOPOL

---

### Fallet $ka = 1$ :

För  $ka = 1$  visar sig mönstret att monopolspridningen blir jämnare ju högre värde vinkeln  $\theta$  har. En jämnare spridning sker dock på bekostnad av amplitud vid  $\alpha = 0^\circ$ .  $\theta = 15^\circ$  och  $\theta = 20^\circ$  fungerar bäst för  $ka = 1$ .  $\theta = 20^\circ$  ger en lite bredare och mjukare form på spridningsmönstret än vinkeln  $\theta = 15^\circ$  men är samtidigt lite plattare och lägre amplitud vid  $\alpha = 0^\circ$ . Anmärkningsvärt är dock att  $ka = 1$  är ungefär 10 dB svagare än  $ka = 0.25$  vid samma vinkel  $\alpha$ .

### Fallet $ka = 3$ :

Vid  $ka = 3$  är spridningsmönstrets succesiva utveckling inte lika tydlig. För  $\theta = 0^\circ$  återfinns en väldigt ojämn spridning och för närliggande grader ändras spridningsmönstret ganska radikalt vilket antyder på stor inverkan av destruktiva och konstruktiva interferenser. Vid  $\theta = 15^\circ$  återfinns den bästa spridningen i det här fallet. Det finns en tydlig halvcirkelform som grund även om mönstret är kantigt på grund av många små toppar och dippar. När  $\theta$  höjs ytterligare växer återigen topparna och dipparna och mönstret blir mindre och mindre likt en monopol.

### Fallet $ka = 5$ :

$ka = 5$  visar stora förändringar mellan  $\theta$ :s olika värden. Vid  $\theta = 0^\circ$  är spridningsmönstret väldigt kantigt och inte alls runt och jämn. Vid  $\theta = 5^\circ$  påträffas däremot ett väldigt jämt mönster, dock med en dipp vid  $\alpha = 0^\circ$  vilket är samma ställe som en karaktäristisk dipols dipp brukar visa sig. Den bästa återgivningen sker vid  $\theta = 10^\circ$  där en dipp vid  $\alpha = 40^\circ$  är det som hindrar spridningsmönstret från att återge en mycket bra monopols spridning. För  $\theta$ -värden högre än  $10^\circ$  följer  $ka = 5$  utvecklingen hos  $ka = 1$  ganska jämnt fast med påtagligt kantigare former med stora toppar och dippar. Återgivningen är som sämst vid  $\theta = 20^\circ$  där de största dipparna är nästan 20 dB stora.

---

## 5.2.2 DIPOL

---

För dipolen gäller generellt att amplitudskillnaden mellan  $ka = 0.25$  och de övriga högre  $ka$ -värden som undersökts är mindre.

### Fallet $ka = 1$ :

För  $ka = 1$  är dipolen, det vill säga dippen vid  $\alpha = 0^\circ$  som skiljer de två loberna, tydlig genomgående för samtliga värden på  $\theta$ . Vid  $\theta = 0^\circ$  är dock spridningen ganska ojämn med betydligt högre amplitud i centrala



riktningar än åt sidorna. Vid  $\theta = 5^\circ$  är spridningen något jämnare men fortfarande finns en kraftig dipp vid  $\alpha = 70^\circ$ . Det går att urskilja ett relativt tydligt utvecklingsmönster att varje gradökning av  $\theta$  leder till en jämnare spridning över  $\alpha$ :s olika värden och en tydligare dipp vid  $\alpha = 0^\circ$ . Den bäst återgivna spridningen av en dipol erhålls vid  $\theta = 30^\circ$ . Ifall en markant dipolsdipp vid  $\alpha = 0^\circ$  prioriteras högst är även  $\theta = 20^\circ$  ett intressant alternativ.

### Fallet $ka = 3$ :

Kurvorna för  $ka = 3$  skiljer sig markant från kurvorna för  $ka = 1$ . Medan diagrammet för  $ka = 1$  visar jämna runda former är de flesta  $\theta$  av  $ka = 3$  påtagligt kantiga av toppar och dippar. Vid låga  $\theta$  påträffas några större dippar som negativt påverkar formandet av en jämn dipol. Även i fallet  $ka = 3$  förbättras formen när värdet på  $\theta$  höjs och vid  $\theta = 15^\circ$  har ett bra mönster tagit form även om dippen vid  $\alpha = 0^\circ$  är en aning bred. Den bäst formade  $\alpha = 0^\circ$ -dippen återfås vid  $\theta = 20^\circ$  men där börjar en dipp vid  $\alpha = 40^\circ$  att ta form. Vid höga värden på  $\theta$  är dippen vid  $\alpha = 40^\circ$  än mer påtaglig.

### Fallet $ka = 5$ :

Resultatet för  $ka = 5$  visar relativt kantiga kurvor.  $\theta = 0^\circ$  har relativt smal spridning och  $\theta = 5^\circ$  saknar dipolsdippen vid  $\alpha = 0^\circ$ . Resultatet är bra redan vid  $\theta = 10^\circ$  och den bästa återgivningen av dipolen sker vid  $\theta = 15^\circ$ . Det kan poängteras att inte heller vid  $\theta = 15^\circ$  är resultatet precis vad som önskas men tendenser pekar åt rätt håll. Vid högre värden av  $\theta$  blir dipparna för starka och dipolsmönstret otydligt.

---

## 5.2.3 ALLMÄNNA IAKTTAGELSER UPPSTÄLLNING 1

---

För dipolen tyder resultaten på att höga  $ka$ -värden är känsligare för interferens från närliggande membran i den undersökta uppställningen än vad låga  $ka$ -värden är. Resultatet antyder även att den bästa återgivningen sker vid lägre vinkel  $\theta$  för högre  $ka$ -värden än för låga. När vinkel  $\theta$  ökas formar sig dipolsmönstret succesivt. Efter att det bästa möjliga dipolsmönstret uppnås försämras mönstret åter för varje ökning av  $\theta$ . För  $ka = 3$  och  $ka = 5$  syns ett sådant mönster men för  $ka = 1$  och  $ka = 0.25$  ryms inte försämringarna inom intervallet som undersökningen omfattar.

Resultaten för monopolen visar att för frekvenser motsvarande  $ka = 1$  och lägre frekvenser går det att uppnå en bra monopolspridning genom justering av  $\theta$ . Den destruktiva interferensen minimeras genom att rikta membranerna olika och istället uppnås en jämnare spridning. Resultatet för den här mätningen antyder att den bäst återgivna monopolspridningen sker vid ett lägre värde på  $\theta$  än för den bäst återgivna dipolspridningen.

---

## 5.3 UPPSTÄLLNING 2

---

Det centrala i den här undersökningen är att kartlägga hur spridningen kan breddas vid höga  $ka$ -värden för att bättre uppfylla spridningsegenskaperna för monopol och dipol. För EmbracingSounds teknik är dock även skapandet av bra återgiven monopol och dipol för betraktare  $-15^\circ < \alpha < 15^\circ$  en intressant aspekt. Anledningen att uppställning 2 undersöks är intresset för idén att utgå från den klassiska modellen för skapandet av dipol med de två centrerade membranerna skapandes en platt baffel utan vinkel mellan. Vinkeln  $\theta$  påverkar endast de två yttersta högtalare på vardera sida vilket hypotetiskt skulle kunna leda till att spridningen för den centrerade lyssningspositionen hålls mer intakt samtidigt som spridningen mot höga värden på  $\alpha$  förbättras när  $\theta$  ökar. Jämförelser görs med resultat från uppställning 1. Eftersom uppställning 2 har det centrerade paret högtalare fast stående utan påverkan av  $\theta$  kan uppställningens totala spridning inte

jämföras direkt med uppställning 1 vid samma  $\theta$ . Vid jämförelser överblickas både uppställning 1 vid samma  $\theta$  och vid närliggande lägre  $\theta$  och en approximation utförs.

---

### 5.3.1 MONOPOL

---

Generellt visar resultaten för uppställning 2 jämn och relativt homogen spridning som i många avseende liknar motsvarande vinklar  $\theta$  i uppställning 1. Skillnaden är främst att spridningens amplitud i  $\alpha = 0^\circ$  och närliggande vinklar är ett par dB starkare i uppställning 2. För  $\theta = 10^\circ$  påverkar amplitudökningen ett relativt smalt intervall av  $\alpha$  och för  $\theta = 30^\circ$  påverkar den ett bredare intervall.

Utöver avvikelserna för  $\alpha = 0^\circ$  uppmärksammas ett par skillnader i dippar och toppar mellan de två uppställningarna. För  $\theta = 20^\circ$  är spridningen generellt bättre än vid motsvarande vinkel i uppställning 1 med undantaget att  $ka = 4$  har en kraftig dipp vid  $\alpha = 0^\circ$ , vilket är ett viktigt område för monopolen. Vid  $\theta = 30^\circ$  skapas mindre toppar och dippar vid  $\alpha = 40^\circ$ .

---

### 5.3.2 DIPOL

---

För  $ka = 0.25$  och  $ka = 1$  skapas dipoler motsvarande de som skapas i uppställning 1. Utöver en dipp vid  $\alpha = 80^\circ$  för  $ka = 1$  följer mönstret vad som önskas och förväntas. Mer anmärkningsvärt är resultatet för högre  $ka$ -värden. Vid  $ka = 3$  är topparna och dipparna relativt starka och skillnaderna mellan olika värden av  $\theta$  är påtagliga. För  $\theta = 10^\circ$  återfinns fyra dippar varav två agerar destruktivt på dipolens form. Vid  $\theta = 20^\circ$  är dippen som återfinns vid  $\alpha = 0^\circ$  endast 2 dB stark vilket inte skapar en tydlig dipol. Vid  $\theta = 30^\circ$  återfinns till antalet få men så pass starka dippar och toppar att mönstret som omger dippen vid  $\alpha = 0^\circ$  inte är att betrakta som jämna lobar vilket önskas för en dipol. Kurvan för  $ka = 4$  beter sig på motsvarande vis med stora variationer mellan olika  $\theta$  samt kraftiga dippar och toppar. Sammanfattningsvis visar sig uppställning 2 ha potential för låga  $ka$ -värden men visar sig också vara väldigt svårhanterlig och känslig för förändringar i de högre registerna.

---

### 5.3.3 ALLMÄNNA IAKTTAGELSER UPPSTÄLLNING 2

---

För monopolen motsvarar resultatet vad som förväntats och önskats. Mätningarna på dipolen visar dock att det positiva i monopolen har skett på bekostnad av dipolens spridning vilket vid EmbracingSounds användning inte är att prioritera.

---

## 5.4 UPPSTÄLLNING 4

---

Följande uppställning undersöks för att den subjektivt gav intressant utfall i test med EmbracingSounds algoritm. Studier av resultaten kan användas för att förstå och bekräfta teori men bidrar ej till bestämmandet av sambandet mellan  $ka$ -värden och dipolsspridning. Uppställningen testas för monopol och dipol.

---

### 5.4.1 MONOPOL

---

Monopolsspridning fungerar bra och liknar spridningen för uppställning 1. Dock uppnås inte lika breda totalvinklar mellan innersta och yttersta högtalare vilket resulterar i en smalare maximal utbredning än vad uppställning 1 har. Monopolsspridningen förbättras för varje ökning av  $\theta$  och jämnast är den vid  $\theta = 30^\circ$  där  $ka = 1$  uppnår en väldigt jämn spridning. Både  $ka = 3$  och  $ka = 4$  är relativt jämna bortsett från små toppar och dippar på ungefär 5 dB.  $ka = 0,25$  har jämn spridning för varje  $\theta$ .

---

#### 5.4.2 DIPOL

---

En tydlig skillnad mellan första och andra kvadrantens syns i resultatet och andra kvadrantens data anses mest pålitlig.  $\theta = 0^\circ$  ger ingen jämn spridning. Det är väntat eftersom uppställningen är konstruerad för att endast fungera med högre värden på  $\theta$ . Uppställningen fungerar bäst för stora vinklar vilket i detta fall är  $\theta = 30^\circ$ . Anmärkningsvärt är att uppställningen fungerar mycket dåligt för låga frekvenser vilket stämmer bra överens med den teoretiska bakgrunden. De mindre riktade frekvenserna släcks ut av närliggande signaler i motfas. De mer riktade frekvenserna påverkas mindre av närliggande källor.

## 6 SLUTSATS

---

Resultaten visar att olika vinklar och olika uppställningar passar olika  $ka$ -värden. När sex stycken högtalare förs samman på det sätt som utförts i undersökningen sker både destruktiv och konstruktiv interferens. Undersökningen visar att både för spridning av monopol och dipol kan stora förbättringar ske genom att  $\theta$  justeras. Avvägningen hur man väljer  $\theta$  bör bero på ändamål och prioritering ur så väl spridningsönskan som vilket frekvensintervall eller  $ka$ -värdesintervall som är viktigast i sammanhanget.

Ett fenomen som syns i resultatets diagram är att frekvensen där en dipp återfinns vid kan variera beroende på  $\theta$ . Variationen sker på grund av att avståndet mellan membranen förändras, om än relativt lite, vid justering av  $\theta$  trots att målet vid konstruktion av högtalarna var att minimera skillnaden så mycket som möjligt. Det skulle vara möjligt att minimera avståndsskillnaderna ytterligare men det hade då inte varit möjligt att behålla den gemensamma baffeln helt intakt vilket är av högre prioriteringsordning. Medvetenheten om fenomenet hjälper vid tolkning av resultatet.

I skedet av dataanalys var möjligheten till jämförelse mellan samma typ av data från olika modeller påtagligt värdefull. Frekvenskurvor från enklare system och uppställningar utgjorde utgångspunkt vid analys av mer komplexa uppställningar. I skedet insågs även att för att underlätta förståelsen skulle framförallt en ytterligare mätning ha utförts. En mätning på endast en högtalare över intervallet  $-90^\circ < \alpha < 90^\circ$  hade tillfört möjligheten att jämföra just det aktuella membranets spridning istället för en teoretisk ljudkällas förväntade spridning vid de olika  $ka$ -värdena. Det hade gett ytterligare indikation på hur mycket verkligheten skiljer sig från teorin.

I resultatdelen visas tendenser till samband mellan  $\theta$  och spridning av en monopol eller dipol. Intressant är till exempel hur olika  $ka$ -värden reagerar vid uppställning 1 där tendenser av ett utvecklingsmönster syns tydligt. För att säkerställa eller dementera ett sådant mönster vore det intressant att utföra ytterligare mätningar i detalj specifikt inriktade just på de områden där tendenserna av mönstren anas. Intressant vore även att jämföra samma mätningar av samma  $ka$ -värden men skapade av membran av andra storlekar för att se ifall det är ytterligare en faktor som spelar stor roll.

En av de lösningar som finns och används för att undvika färfel mellan två högtalare är att tidskompensera varje högtalare individuellt i den betydelsen att högtalarna trimmas in vid varje uppställning så att ljudalstringen från center på varje membran samtidigt når fram till en viss lyssningsposition. För den här undersökningen har vi valt att inte tidskompensera högtalarna gentemot varandra utifrån uppställning. En viktig anledning är att sådana justeringar är relevanta när man testar lösningar vid en viss position vilket ger resultat för ett mer specifikt tillfälle. Den här undersökningen ämnar att mer neutralt kartlägga spridningsmönstret hos en akustisk dipol från en högtalararray vilket sedan kan ligga till grund för ett beslut ifall tidskompensering eller annan typ av justering är bäst lämpad för ett specifikt problem. Sådan tidskompensering kan dock vara ett intressant ämne att fördjupa sig mer i som ett sidospår efter denna rapport.

## LITTERATURFÖRTECKNING

---

- Bengtsson, L., 2003. *Elektriska mätsystem och mätmetoder*. 2:3 red. Göteborg: Studentlitteratur.
- Borwick, J., 2001. *Loudspeaker and Headphone Handbook*. 3rd ed. Oxford: Focal Press.
- Cheng, D., 1989. *Field and Wave Electromagnetics*. 2nd ed. s.l.:Addison-Wesley Publishing company.
- Eargle, J., 2003. *Loudspeaker Handbook*. 2nd red. New York: Springer Science + Business Media, LLC.
- Encyclopædia Britannica Online, 2014. *Integrated circuit*. [Online]  
Available at: <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/289645/integrated-circuit>  
[Använd 10 05 2014].
- Gunnarsson, F., 2014a. *Single Bipolar Loudspeaker System for Stereo Reproduction*, s.l.: EmbracingSound AB.
- Gunnarsson, F., 2014b. *Tech Summary*, s.l.: EmbracingSound AB.
- Meyer Sound Laboratories Inc., 2002. *Line Arrays: Theory, Fact and Myth*, Berkeley: u.n.
- Nationalencyklopedin, 2014a. *Ljud*. [Online]  
Available at: <http://www.ne.se/lang/ljud/243395>  
[Använd 09 05 2014].
- Nationalencyklopedin, 2014b. *Vågrörelse*. [Online]  
Available at: [http://www.ne.se/lang/vågrörelse](http://www.ne.se/lang/vagrörelse)  
[Använd 09 05 2014].
- Nationalencyklopedin, 2014c. *Interferens*. [Online]  
Available at: <http://www.ne.se/lang/interferens/212363>  
[Använd 09 05 2014].
- Olson, H., 1947. *Acoustical engineering*. Toronto: D. Van Nostrand Company.
- Russel D, T. J. P. B. Y., 1999. *Acoustic monopoles, dipoles and quadrupoles: An experiment revisited*, Flint: American Journal of Physics.
- Tashev, I., 2009. *Sound Capture and Processing*. u.o.:John Wiley Sons.

---

# APPENDIX A

---

## INNEHÅLLSFÖRTECKNING

---

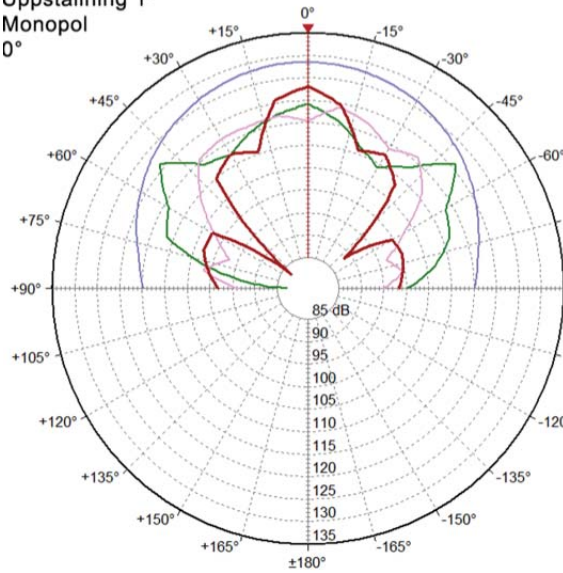
---

Mätresultat.....	ii
Uppställning 1: Monopol.....	ii
Uppställning 1: Dipol.....	iv
Uppställning 2: Monopol.....	vi
Uppställning 2: Dipol.....	vii
Uppställning 3: Monopol.....	viii
Uppställning 3: Dipol.....	ix
Uppställning 4: Monopol.....	x
Uppställning 4: Dipol.....	xi

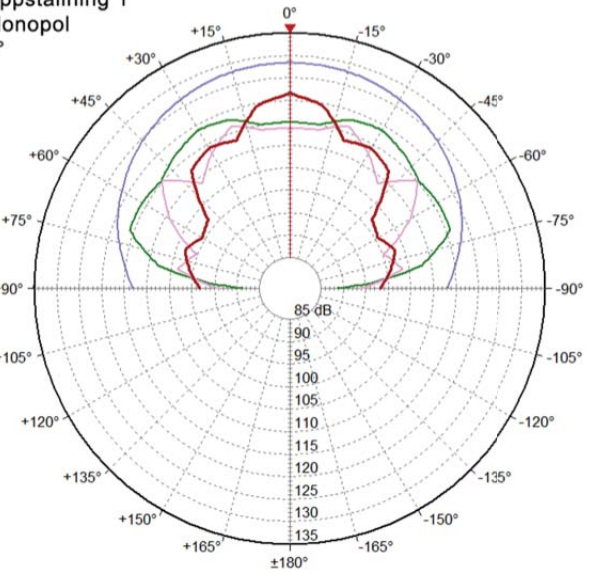
# MÄTRESULTAT

## UPPSTÄLLNING 1: MONOPOL

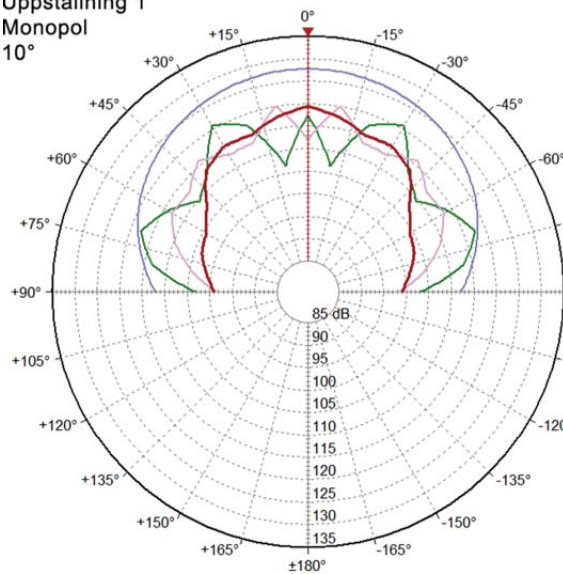
Uppställning 1\*  
Monopol  
0°



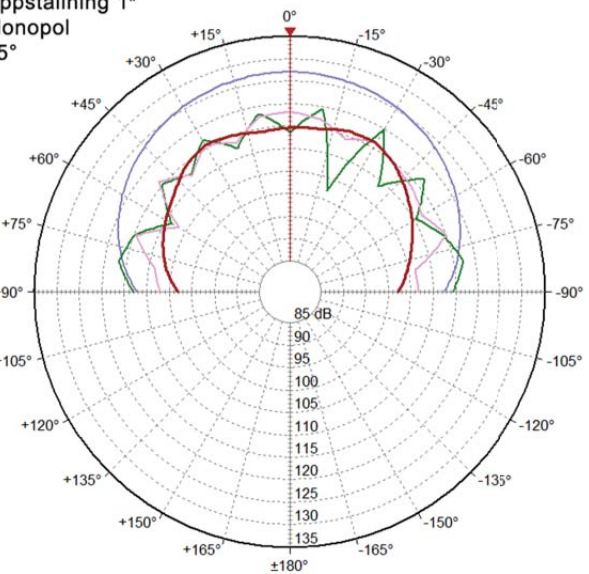
Uppställning 1  
Monopol  
5°



Uppställning 1  
Monopol  
10°

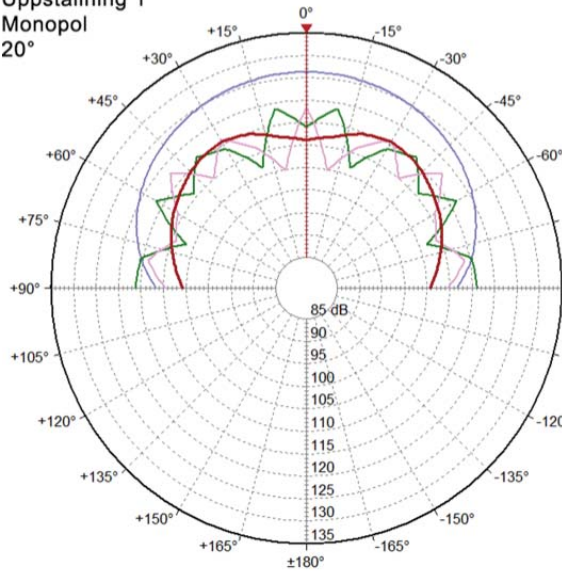


Uppställning 1\*  
Monopol  
15°

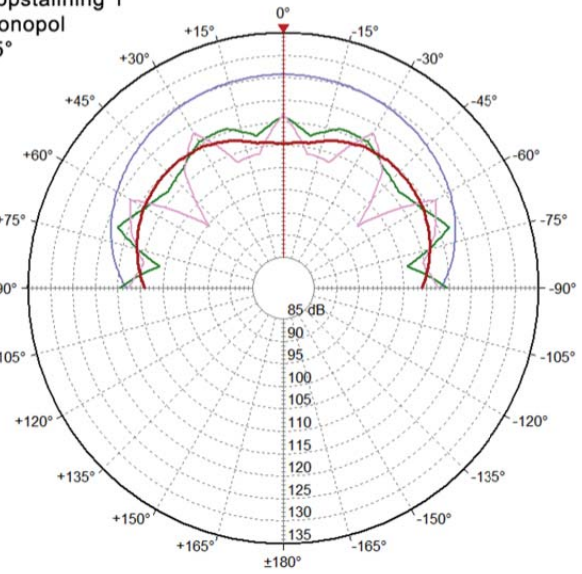




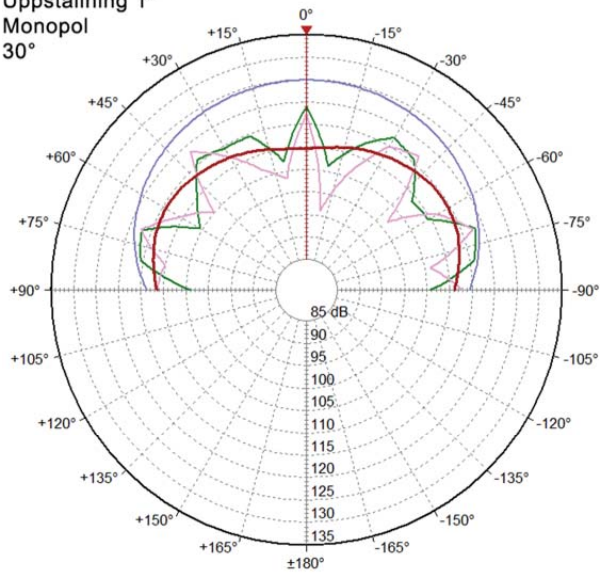
Uppställning 1  
Monopol  
20°



Uppställning 1  
Monopol  
25°



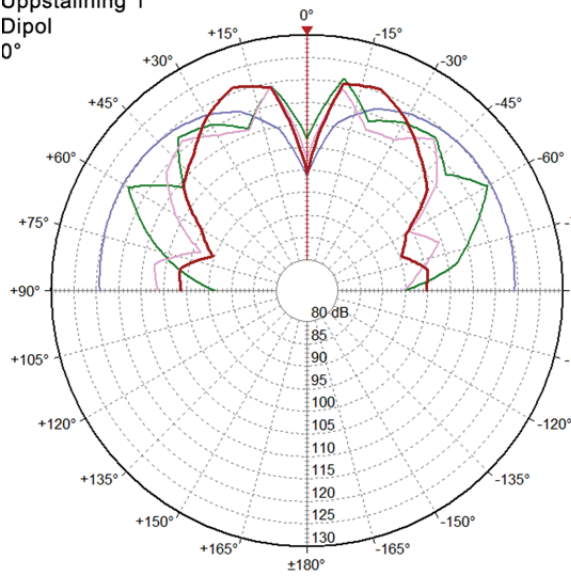
Uppställning 1\*  
Monopol  
30°



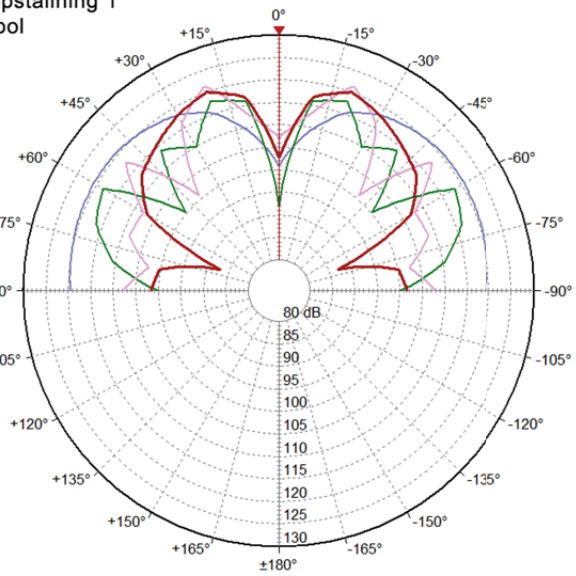


# UPPSTÄLLNING 1: DIPOL

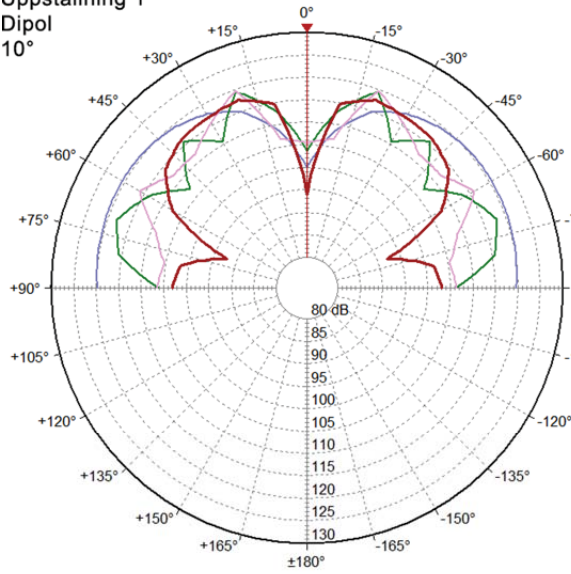
Uppställning 1\*  
Dipol  
0°



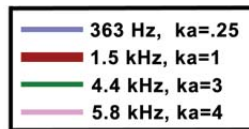
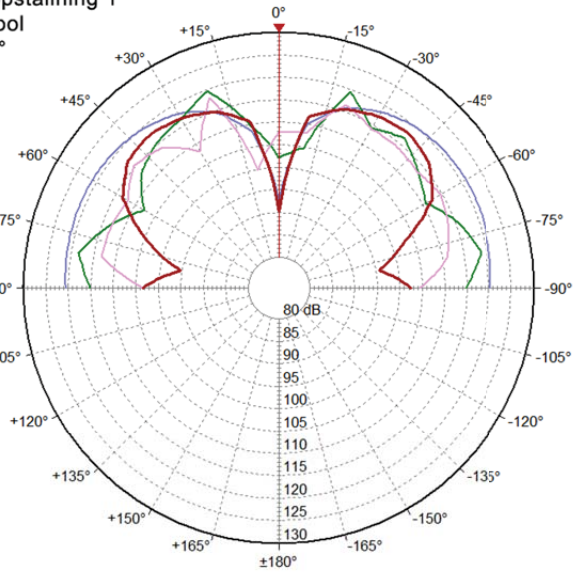
Uppställning 1  
Dipol  
5°



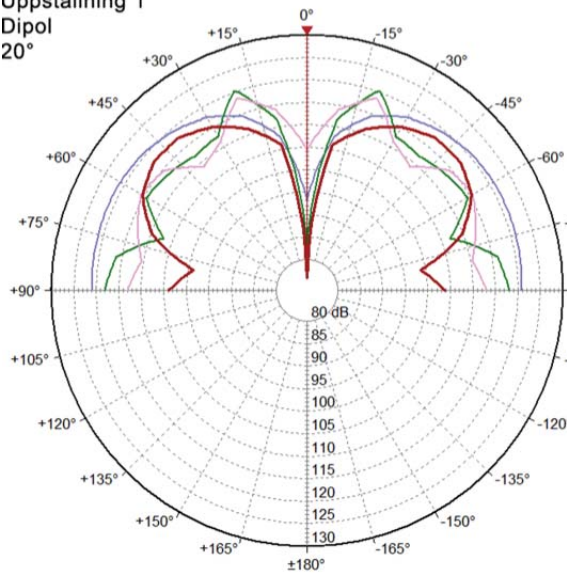
Uppställning 1  
Dipol  
10°



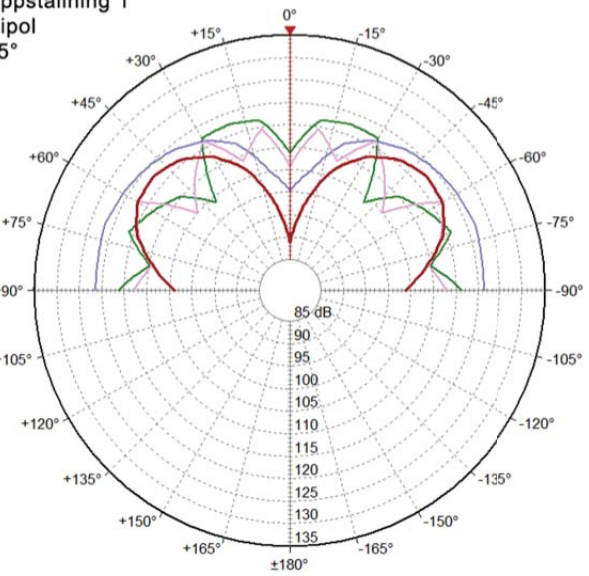
Uppställning 1\*  
Dipol  
15°



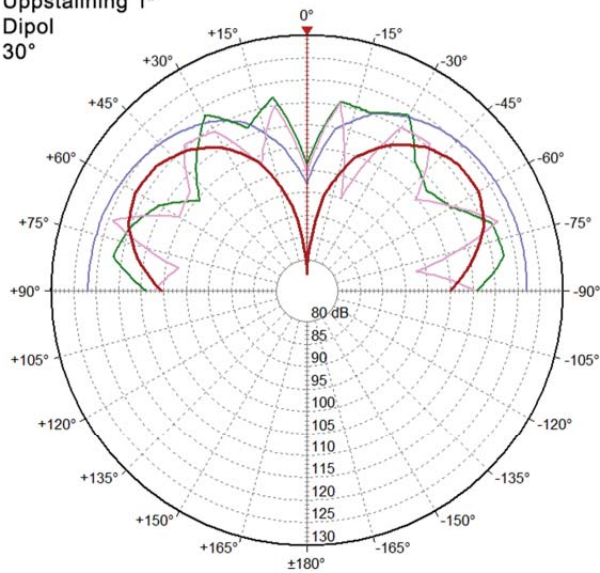
Uppställning 1  
Dipol  
20°



Uppställning 1  
Dipol  
25°

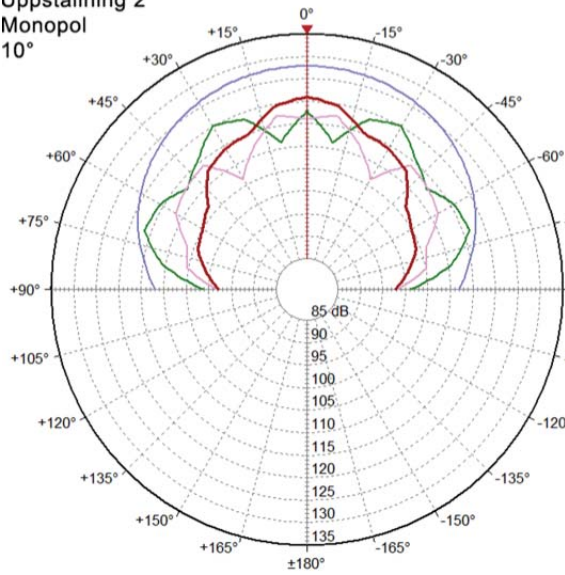


Uppställning 1\*  
Dipol  
30°

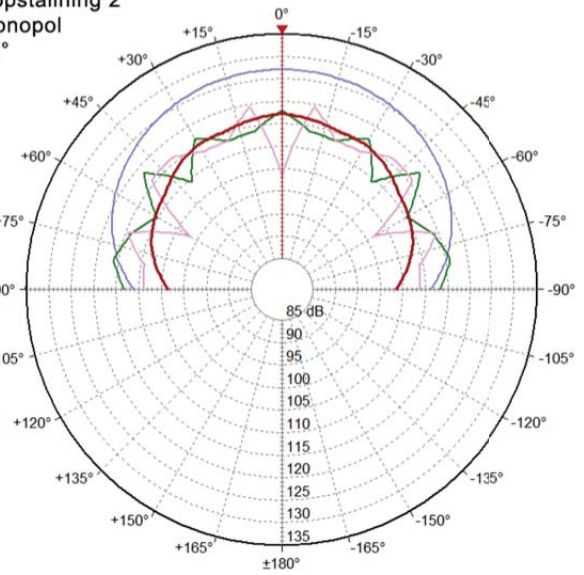


## UPPSTÄLLNING 2: MONOPOL

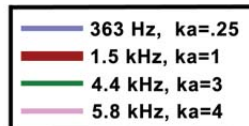
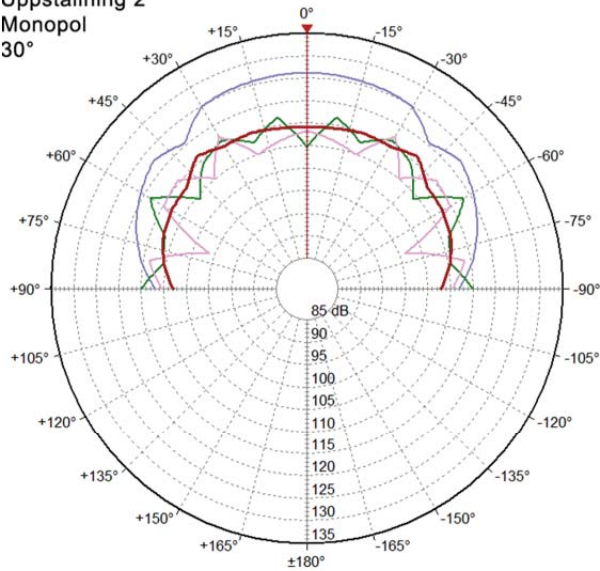
Uppställning 2  
Monopol  
10°



Uppställning 2  
Monopol  
20°

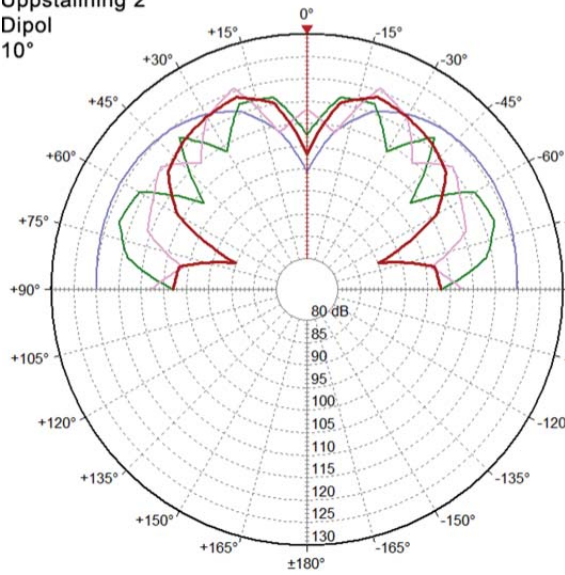


Uppställning 2  
Monopol  
30°

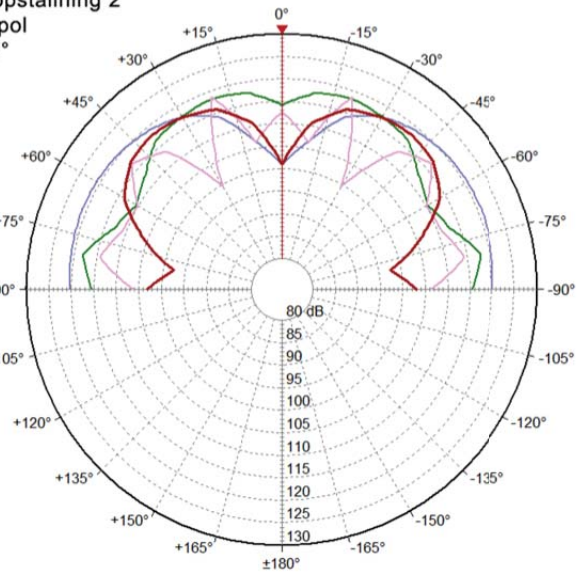


## UPPSTÄLLNING 2: DIPOL

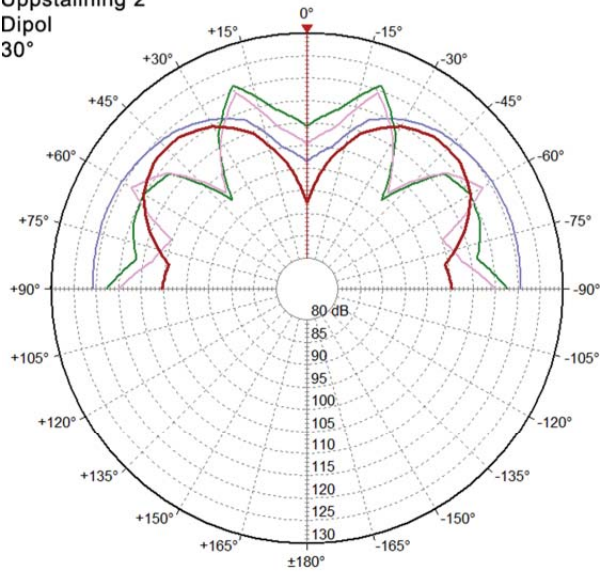
Uppställning 2  
Dipol  
10°



Uppställning 2  
Dipol  
20°



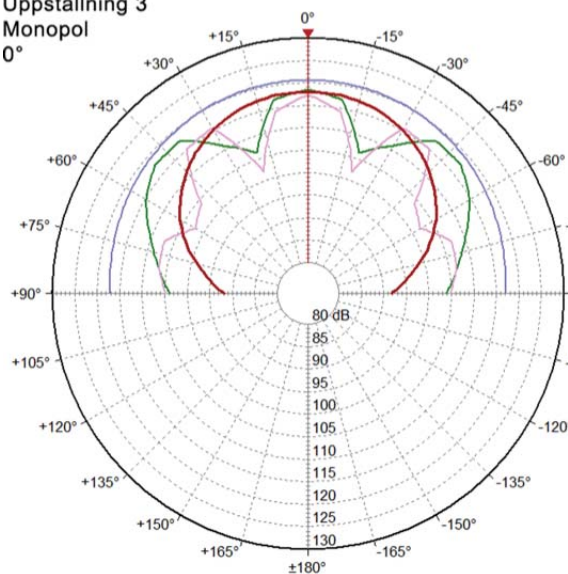
Uppställning 2  
Dipol  
30°



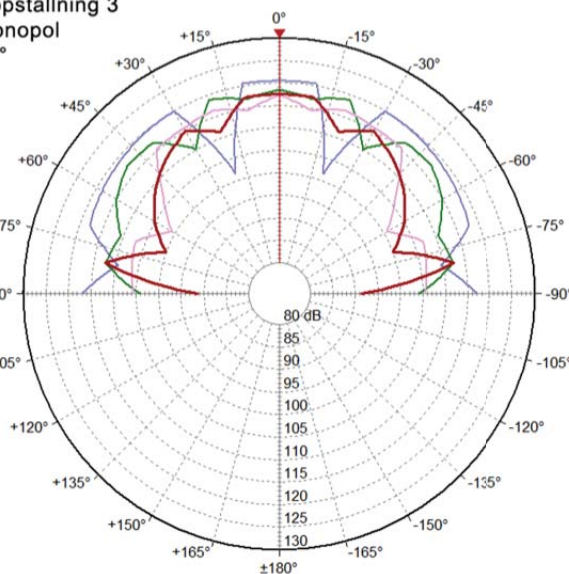


## UPPSTÄLLNING 3: MONOPOL

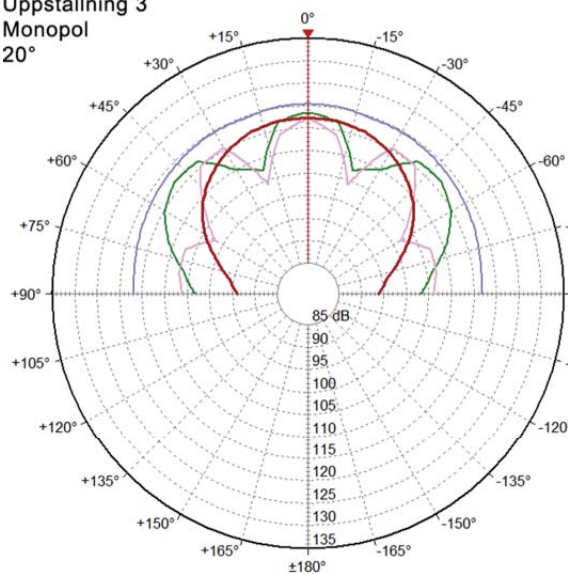
Uppställning 3  
Monopol  
0°



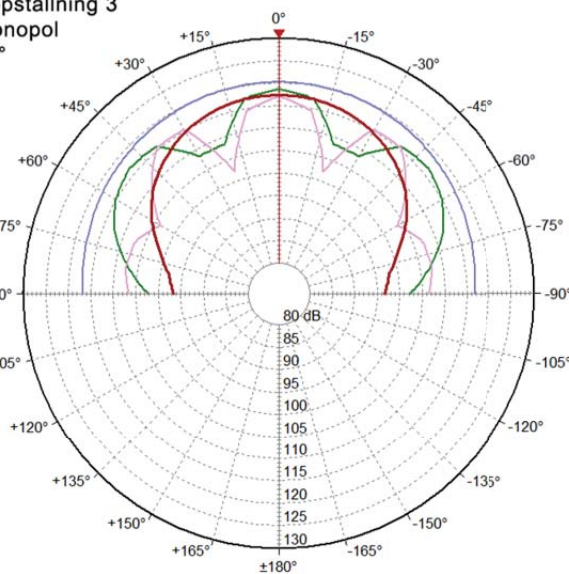
Uppställning 3  
Monopol  
10°



Uppställning 3  
Monopol  
20°

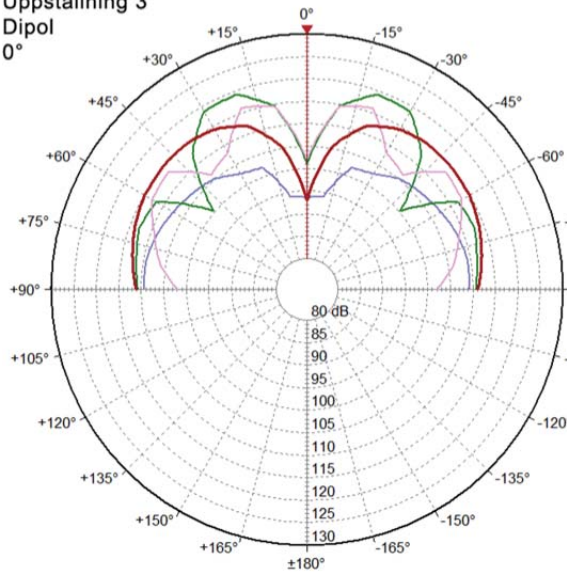


Uppställning 3  
Monopol  
30°

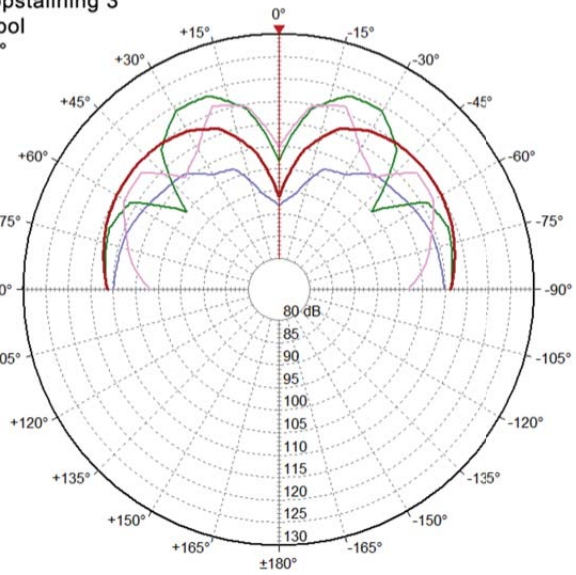


# UPPSTÄLLNING 3: DIPOL

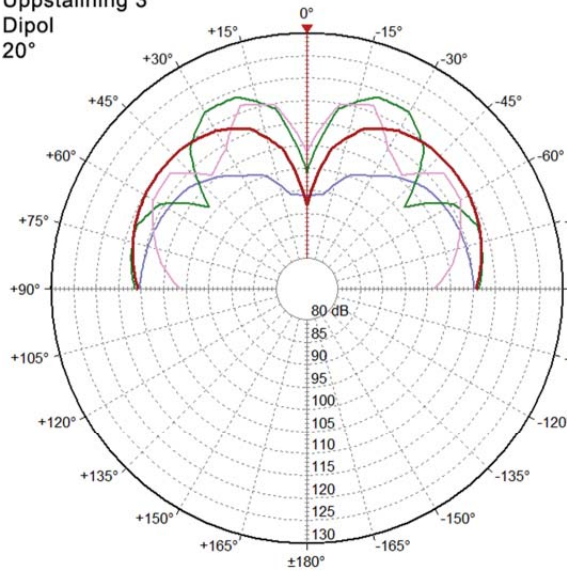
Uppställning 3  
Dipol  
0°



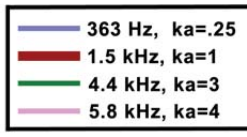
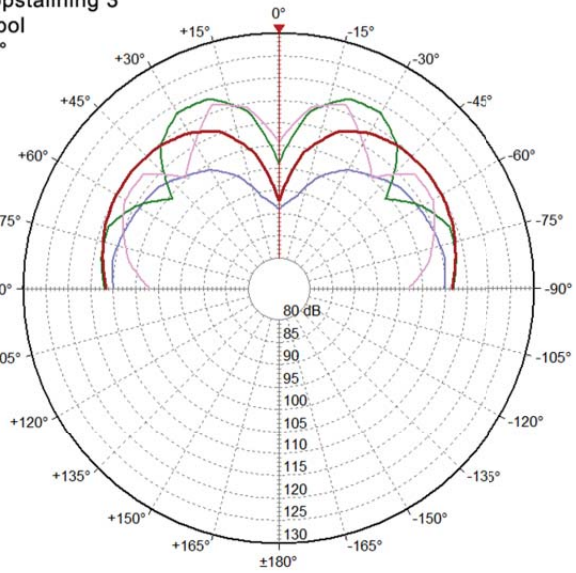
Uppställning 3  
Dipol  
10°



Uppställning 3  
Dipol  
20°

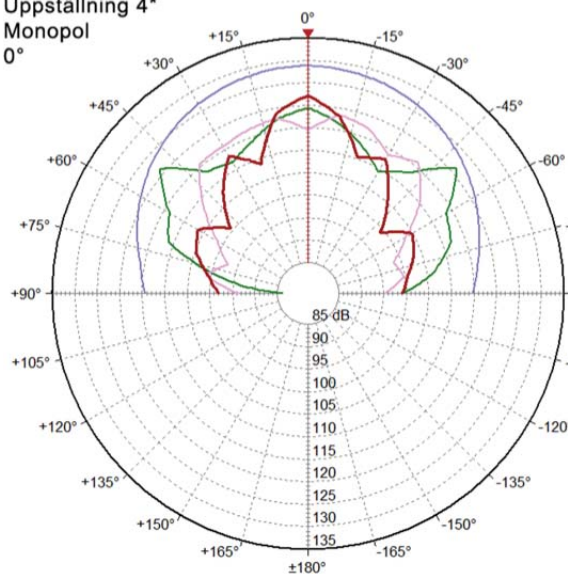


Uppställning 3  
Dipol  
30°

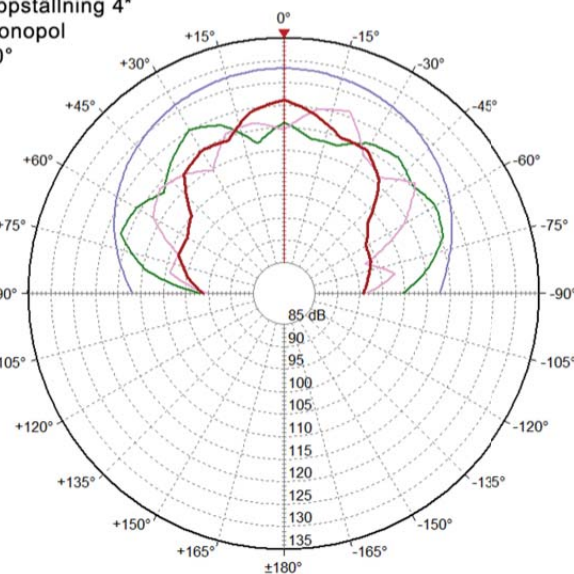


## UPPSTÄLLNING 4: MONOPOL

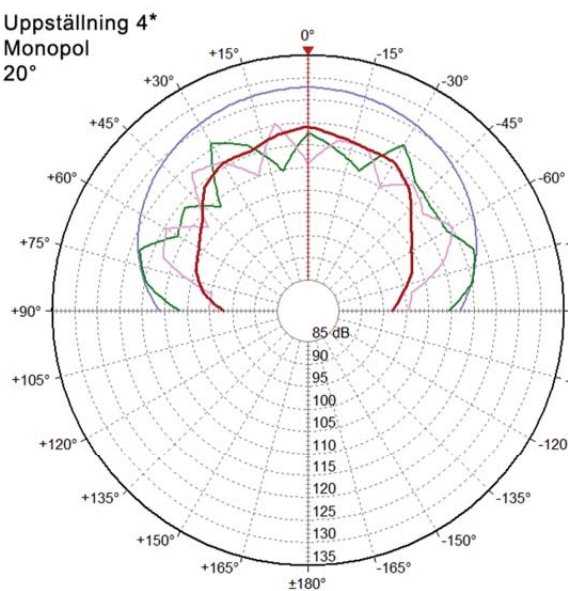
Uppställning 4\*  
Monopol  
0°



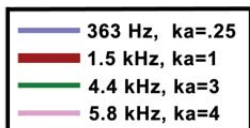
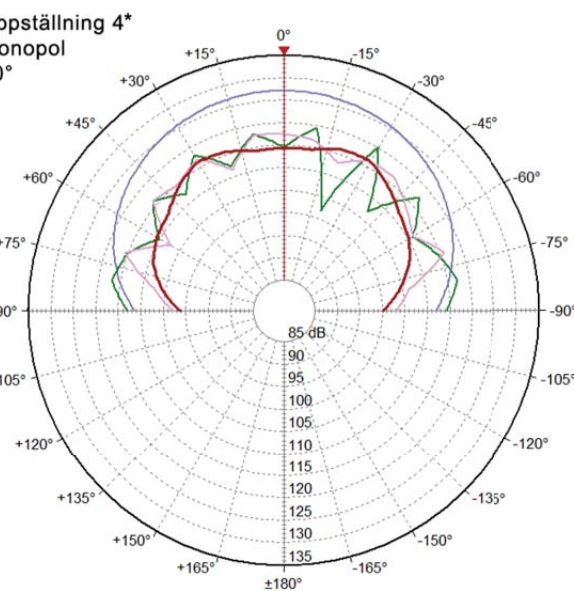
Uppställning 4\*  
Monopol  
10°



Uppställning 4\*  
Monopol  
20°



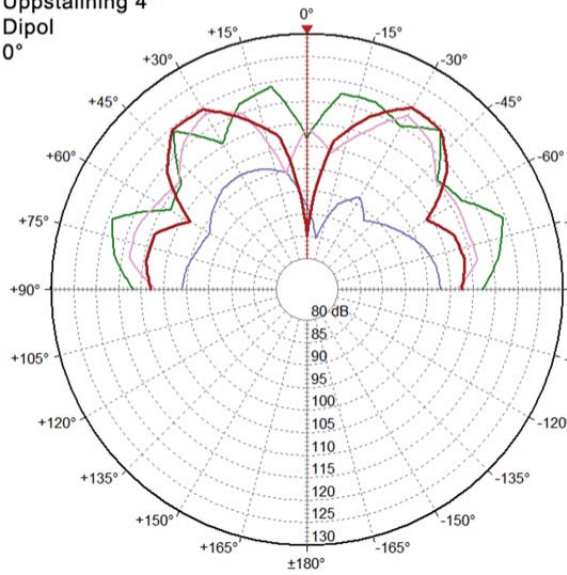
Uppställning 4\*  
Monopol  
30°



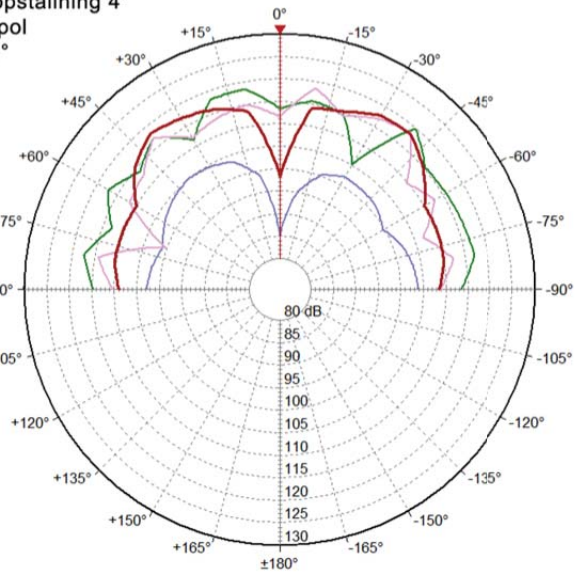


## UPPSTÄLLNING 4: DIPOL

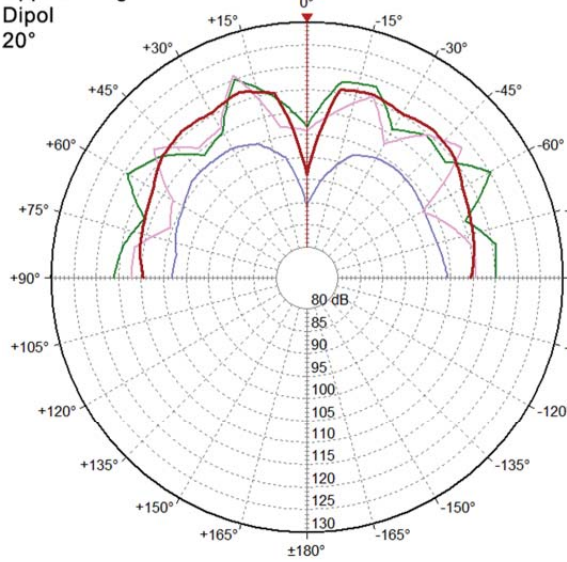
Uppställning 4\*  
Dipol  
0°



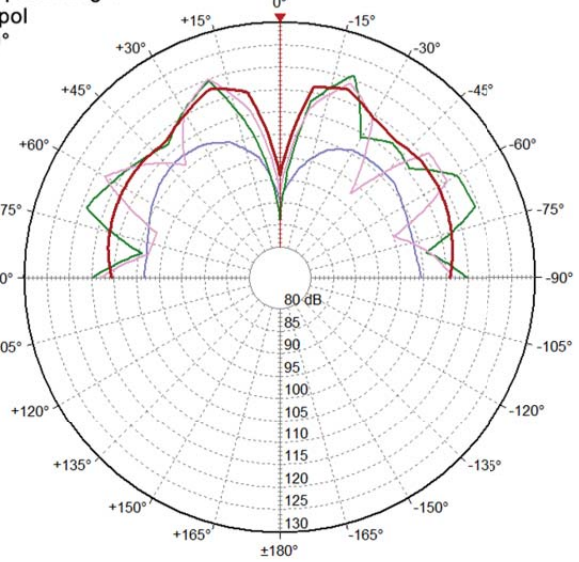
Uppställning 4\*  
Dipol  
10°



Uppställning 4\*  
Dipol  
20°



Uppställning 4\*  
Dipol  
30°





---

# APPENDIX B

---

## INNEHÅLLSFÖRTECKNING

---

---

Visatron FR8.....	ii
Pandora.....	iii
Ritning av högtalare.....	iv
Filter .....	v

# VISATRON FR8

---

# FR 8 - 8 Ohm

Art. No. 2008

---



**8 cm (3,3")** Breitbandlautsprecher mit guten Tieftoneigenschaften, ausgeglichenem Frequenzgang und hohem Wirkungsgrad. Besonders geeignet als Einbaulautsprecher für die Musikwiedergabe sowie zur Bestückung von wirkungsstarken ELA-Zeilen.

**8 cm (3.3") fullrange speaker** with good bass reproduction, balanced frequency response and high efficiency. Especially suitable as built-in speaker for music reproduction and as driver for 100 V network column speakers.

## Anwendungsmöglichkeiten / Typical applications

- Schmale ELA-Zeilen
  - Kontroll-Lautsprecher für elektronische Geräte
  - Deckenlautsprecher in Schienenfahrzeugen und Bussen
  - Elektronische Musikinstrumente
- 
- Narrow network column speakers
  - Control speaker for electronic devices
  - Ceiling-mounted speakers in railway carriages and busses
  - Electronic musical instruments

14.06.2013

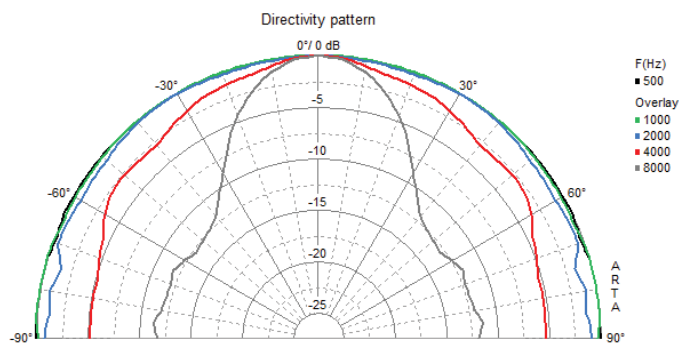
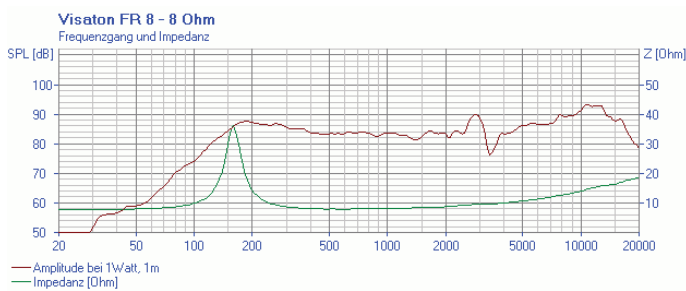
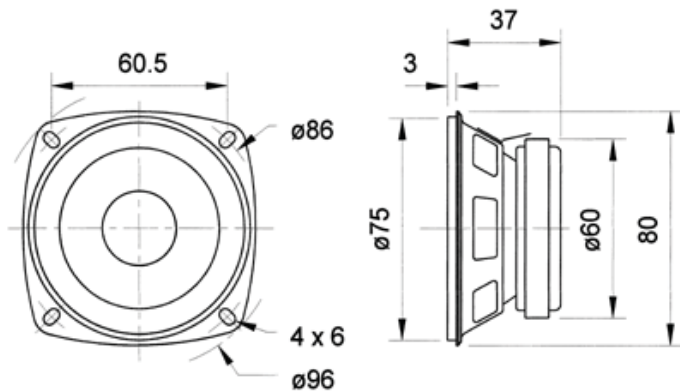
**Eigenschaften / Attributes**

- Feuchtigkeitsimprägnierte Membran
- Metallausführung

- Moisturised cone
- Metal basket

# FR 8 - 8 Ohm

Art. No. 2008



## Technische Daten / Technical data

Nennbelastbarkeit Rated power	10 W
Musikbelastbarkeit Maximum power	15 W
Nennimpedanz Z Nominal impedance Z	8 Ohm
Übertragungsbereich Frequency response	130–20000 Hz
Mittlerer Schalldruckpegel Mean sound pressure level	86 dB (1 W/1 m)
Abstrahlwinkel (-6 dB) Opening angle (-6 dB)	180°/4000 Hz
Grenzauslenkung Excursion limit	+/-2 mm
Resonanzfrequenz fs Resonance frequency fs	150 Hz
Magnetische Induktion Magnetic induction	1,4 T
Magnetischer Fluss Magnetic flux	200 µ Wb
Obere Polplattenhöhe Height of front pole-plate	3 mm
Schwingspulendurchmesser Voice coil diameter	15 mm
Wickelhöhe Height of winding	5 mm
Schallwandöffnung Cutout diameter	75 mm
Gewicht netto Net weight	0,24 kg
Gleichstromwiderstand Rdc D.C. resistance Rdc	7,4 Ohm
Mechanischer Q-Faktor Qms Mechanical Q factor Qms	5,3
Elektrischer Q-Faktor Qes Electrical Q factor Qes	1,38
Gesamt-Q-Faktor Qts Total Q factor Qts	1,09
Äquivalentes Luftnachgiebigkeitsvolumen Vas Equivalent volume Vas	0,7 l
Effektive Membranfläche Sd	

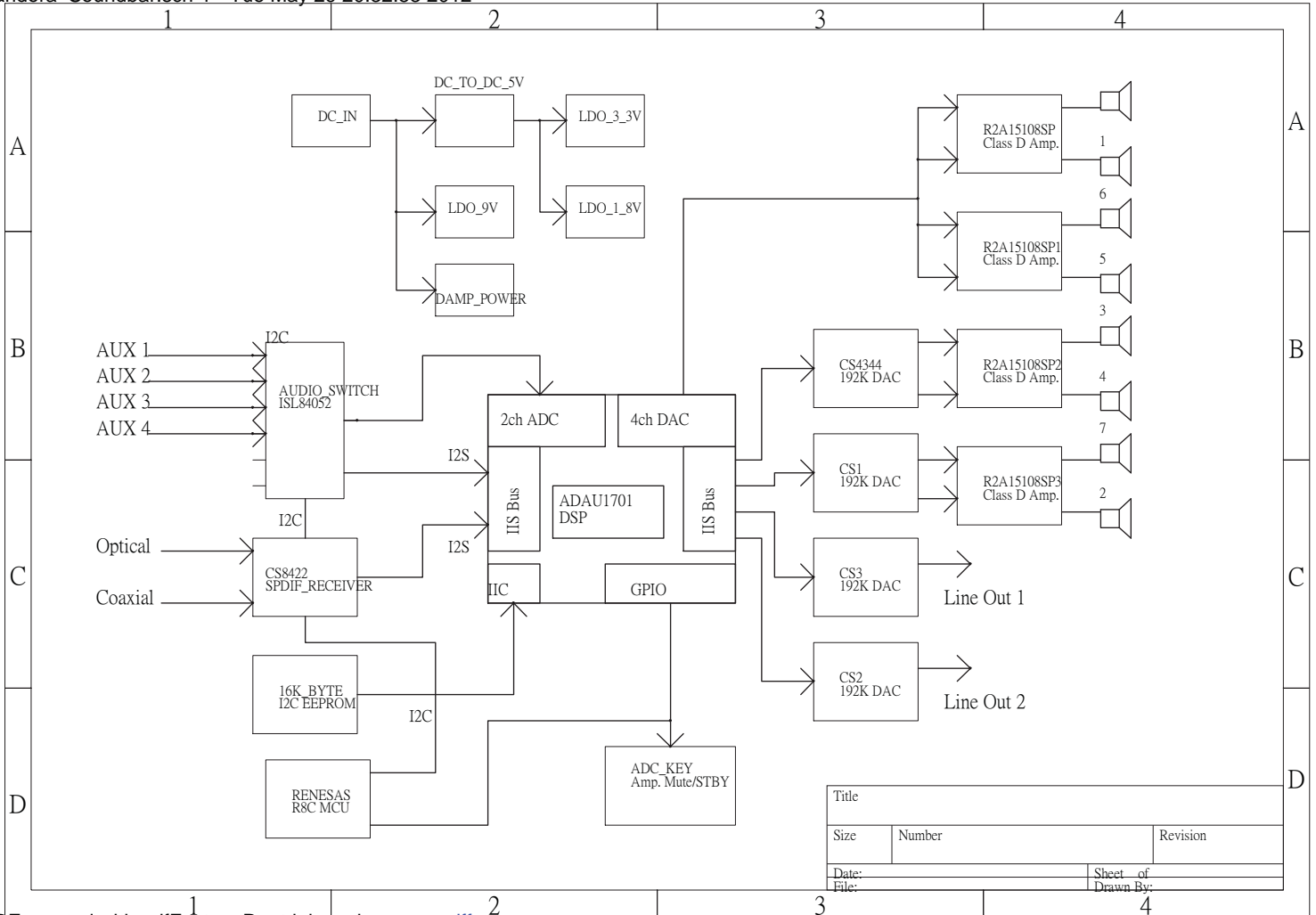
14.06.2013

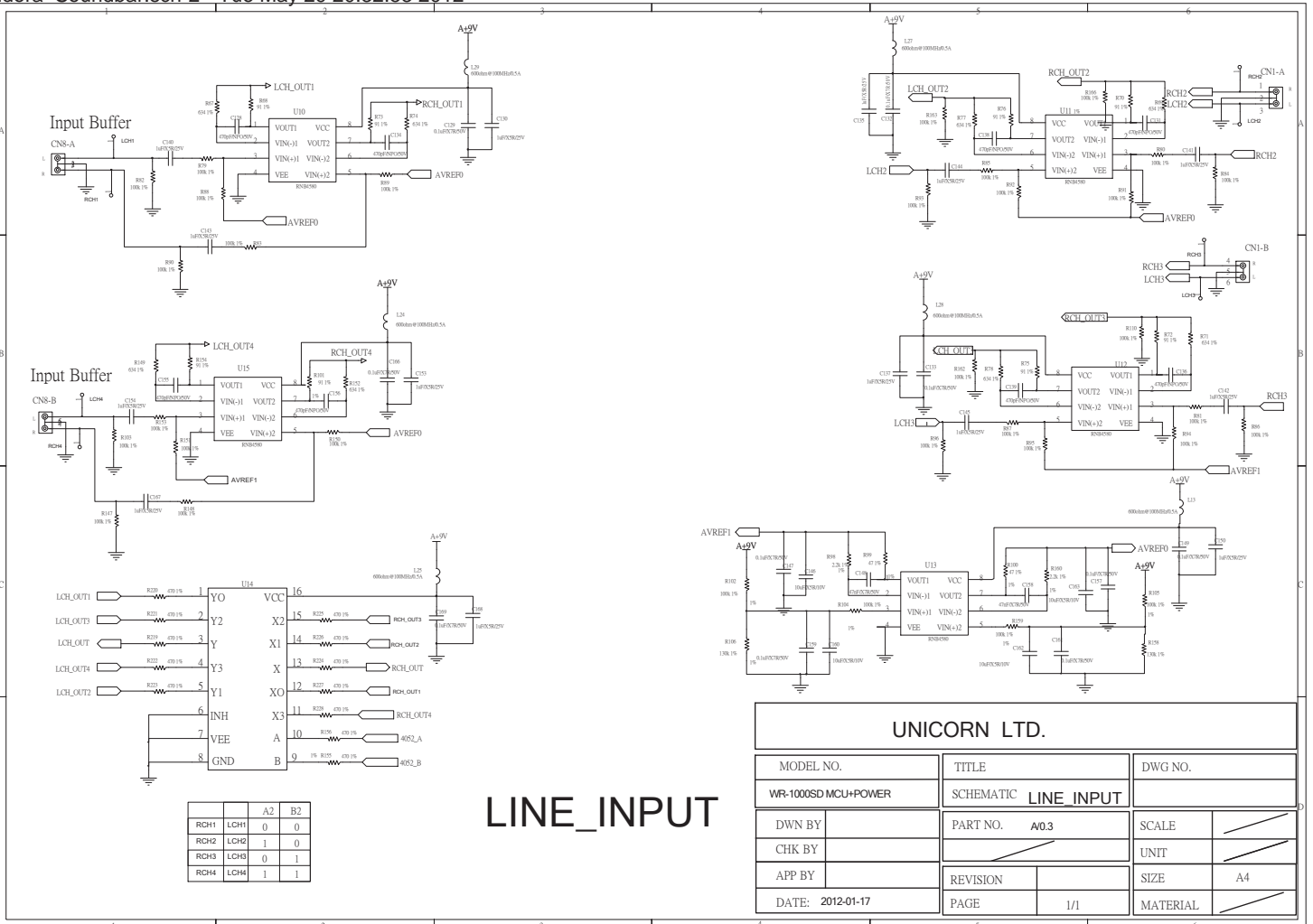
Effective piston area Sd	30 cm <sup>2</sup>
Dynamische bewegte Masse Mms Dynamically moved mass Mms	1,7 g
Antriebsfaktor Bxl Force factor Bxl	2,5 Tm
Schwingspuleninduktivität L Inductance of the voice coil L	0,6 mH
Anschlüsse Connections	4,8 x 0,8 mm (+) 2,8 x 0,8 mm (-)
Temperaturbereich Temperature range	-25 ... 70 °C

# PANDORA

---

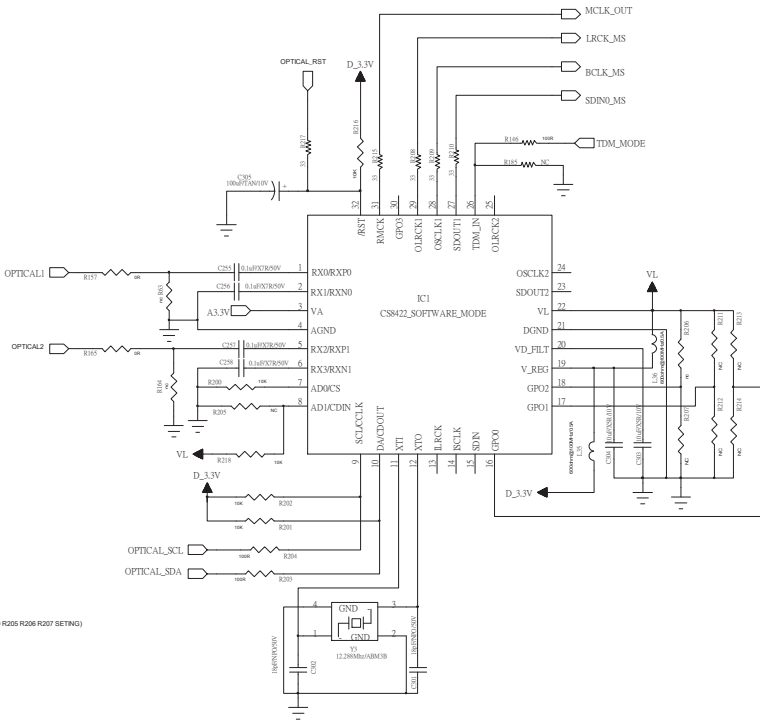






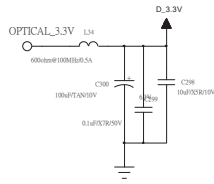
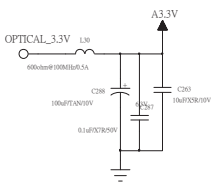
# LINE\_INPUT

		A2	B2
RCH1	LCH1	0	0
RCH2	LCH2	1	0
RCH3	LCH3	0	1
RCH4	LCH4	1	1

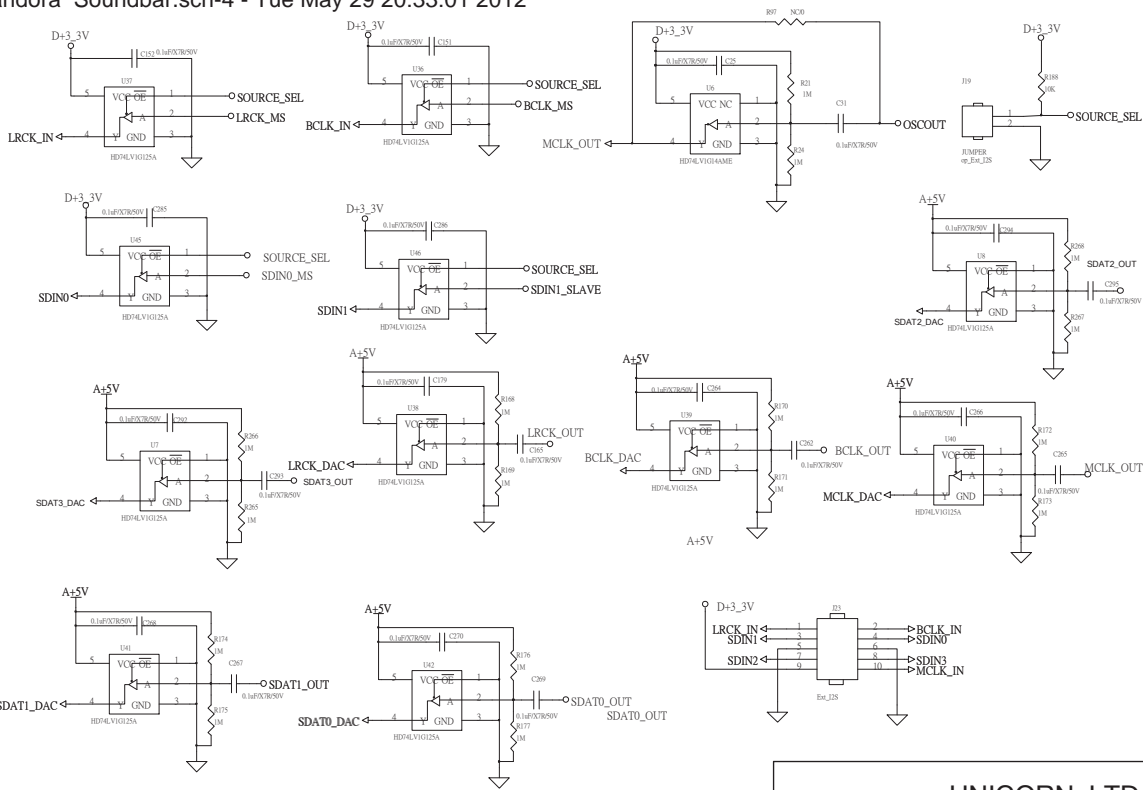


# OPTICAL

IC Mode Address 0010 R200 R205 R206 R207 (SETTING)

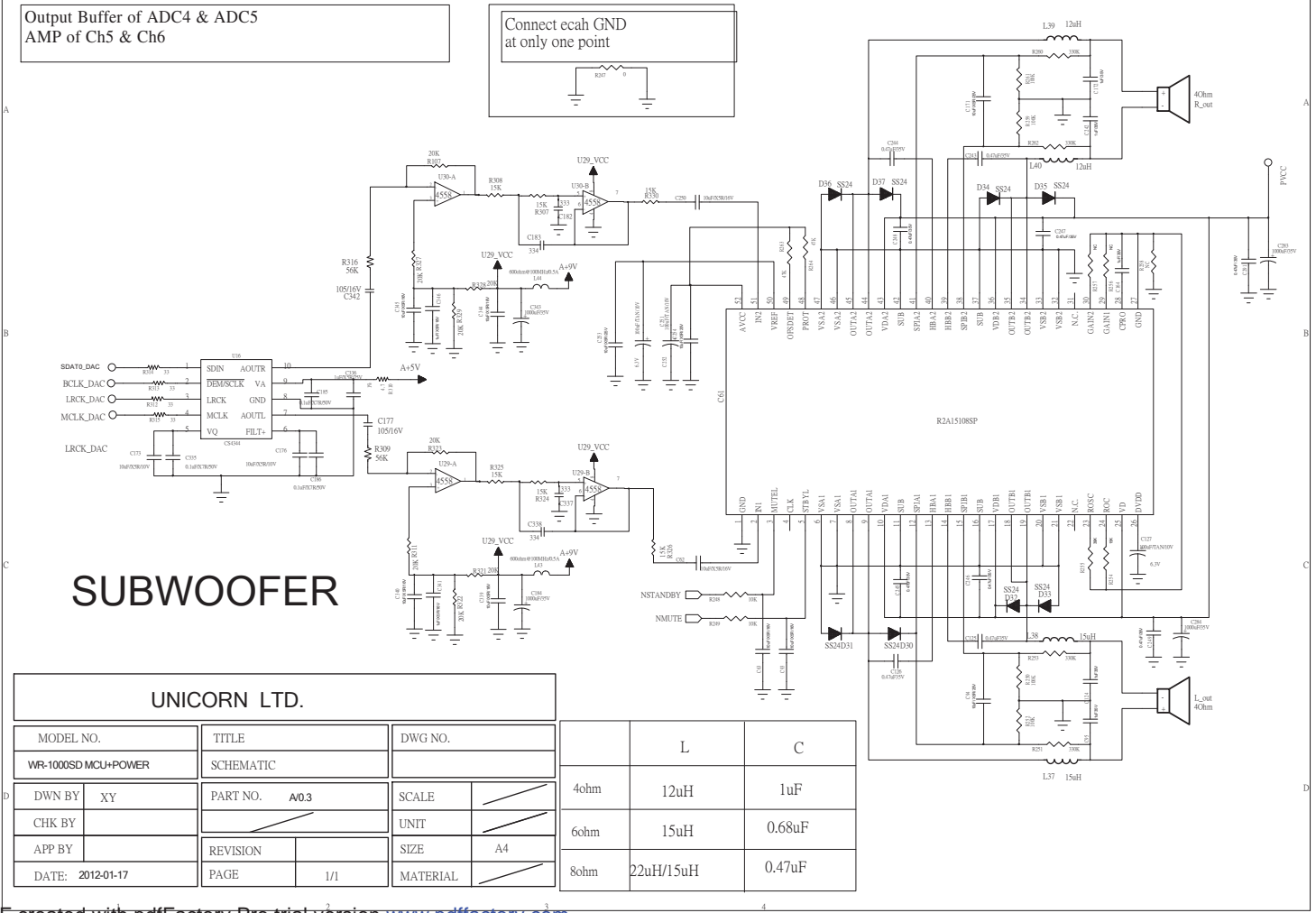


UNICORN LTD.					
MODEL NO.		TITLE		DWG NO.	
WR-1000SD MCU+POWER		SCHEMATIC			
DWN BY	XY	PART NO.	A/0.3	SCALE	
CHK BY				UNIT	
APP BY		REVISION		SIZE	A4
DATE:	2012-01-17	PAGE	1/1	MATERIAL	



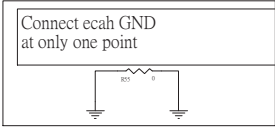
# IIS\_BUFFER

UNICORN LTD.			
MODEL NO.		TITLE	DWG NO.
WR-1000SD MCU+POWER		SCHEMATIC	
DWN BY	XY	PART NO. A/0.3	SCALE
CHK BY			UNIT
APP BY		REVISION	SIZE A4
DATE: 2012-01-17		PAGE 1/1	MATERIAL

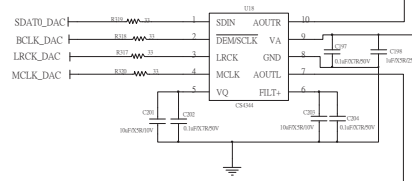


UNICORN LTD.		
MODEL NO.	TITLE	DWG NO.
WR-1000SD MCH+POWER	SCHEMATIC	
DWN BY XY	PART NO. A0.3	SCALE
CHK BY		UNIT
APP BY	REVISION	SIZE A4
DATE: 2012-01-17	PAGE 1/1	MATERIAL

Output Buffer of ADC4 & ADC5  
AMP of Ch5 & Ch6

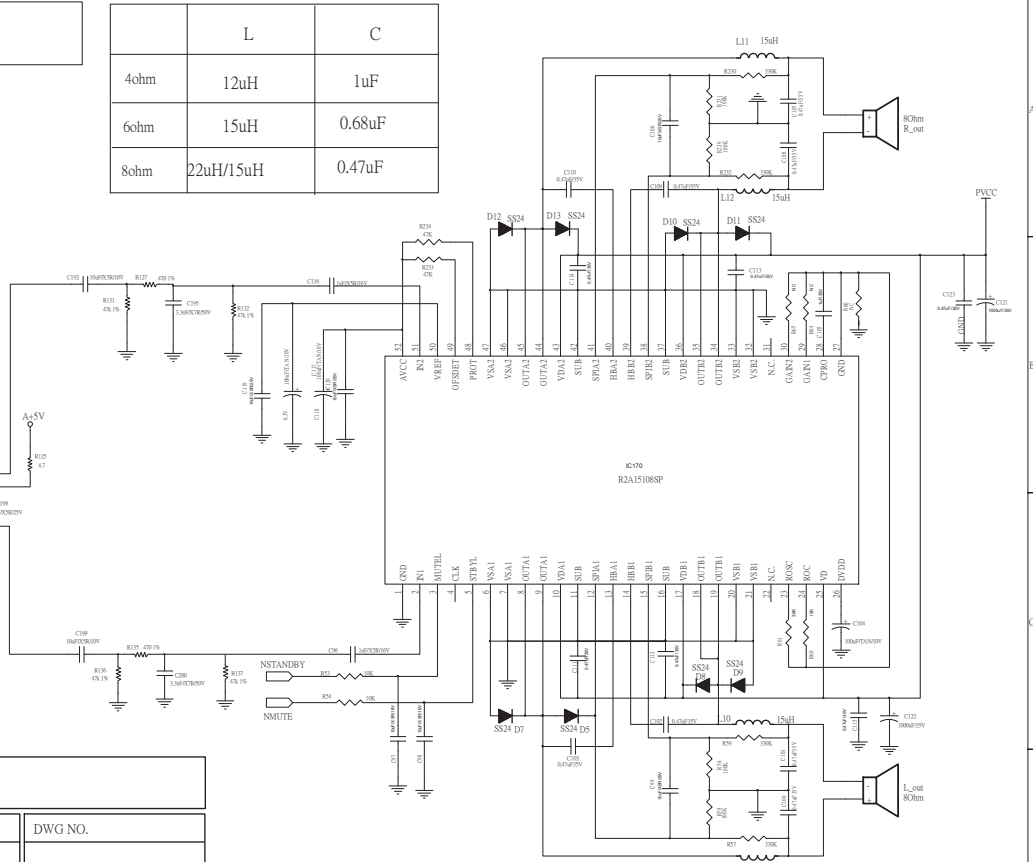


	L	C
4ohm	12uH	1uF
6ohm	15uH	0.68uF
8ohm	22uH/15uH	0.47uF

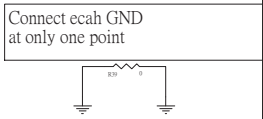


### DAMP3

<b>UNICORN LTD.</b>					
MODEL NO.		TITLE		DWG NO.	
WR-1000SD MCU+POWER		SCHEMATIC			
DWN BY	XY	PART NO.	A0.3	SCALE	/
CHK BY				UNIT	/
APP BY		REVISION		SIZE	A4
DATE: 2012-01-17		PAGE	1/1	MATERIAL	/

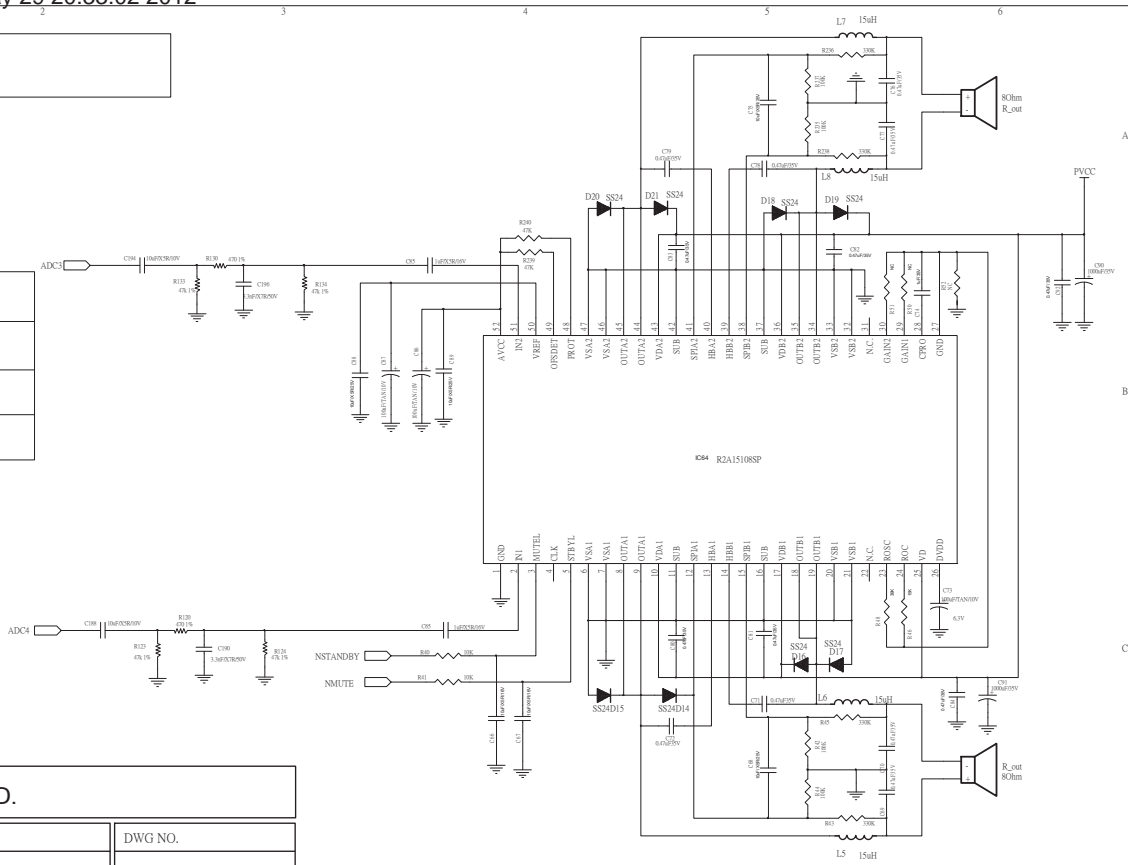


Output Buffer of ADC2 & ADC3  
AMP of Ch3 & Ch4



	L	C
4ohm	12uH	1uF
6ohm	15uH	0.68uF
8ohm	22uH/15uH	0.47uF

**DAMP2**



UNICORN LTD.			
MODEL NO.	TITLE	DWG NO.	
WR-1000SD MCU+POWER	SCHEMATIC		
DWN BY XY	PART NO. A/0.3	SCALE	/
CHK BY		UNIT	/
APP BY	REVISION	SIZE	A4
DATE: 2012-01-17	PAGE 1/1	MATERIAL	/



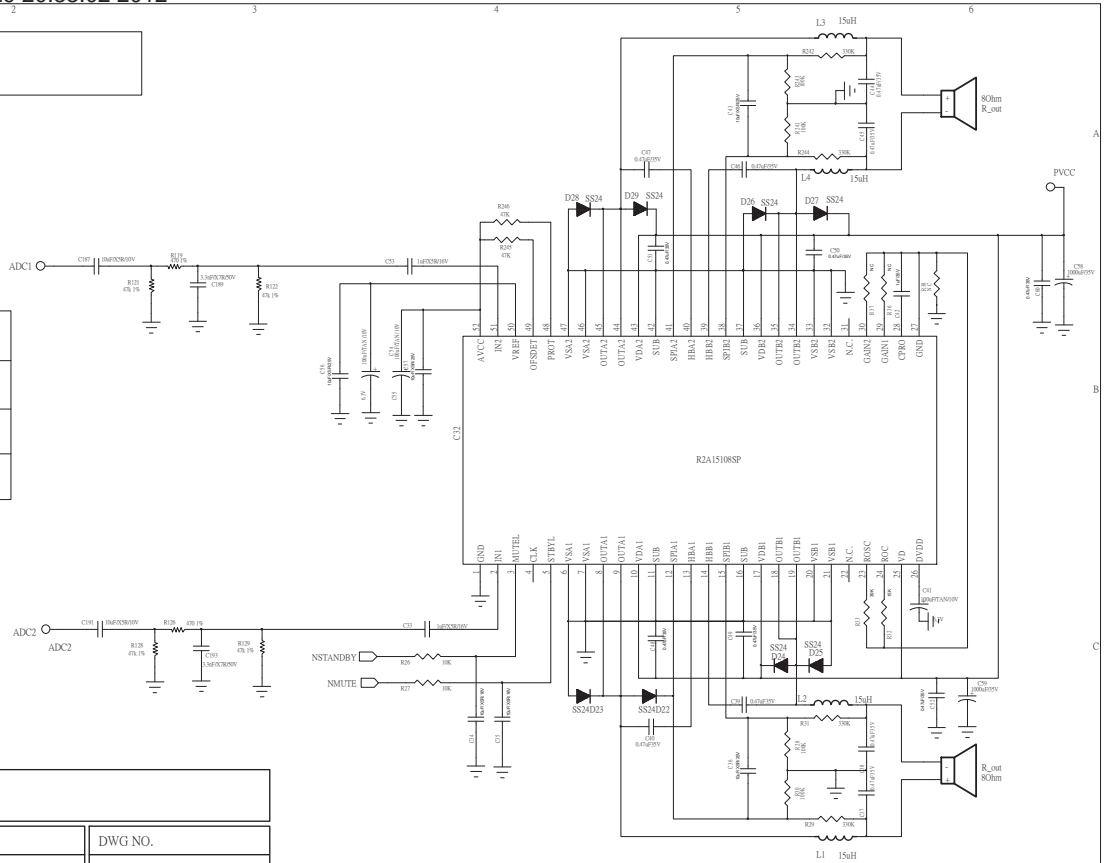
Output Buffer of ADC2 & ADC3  
AMP of Ch3 & Ch4

Connect each GND  
at only one point

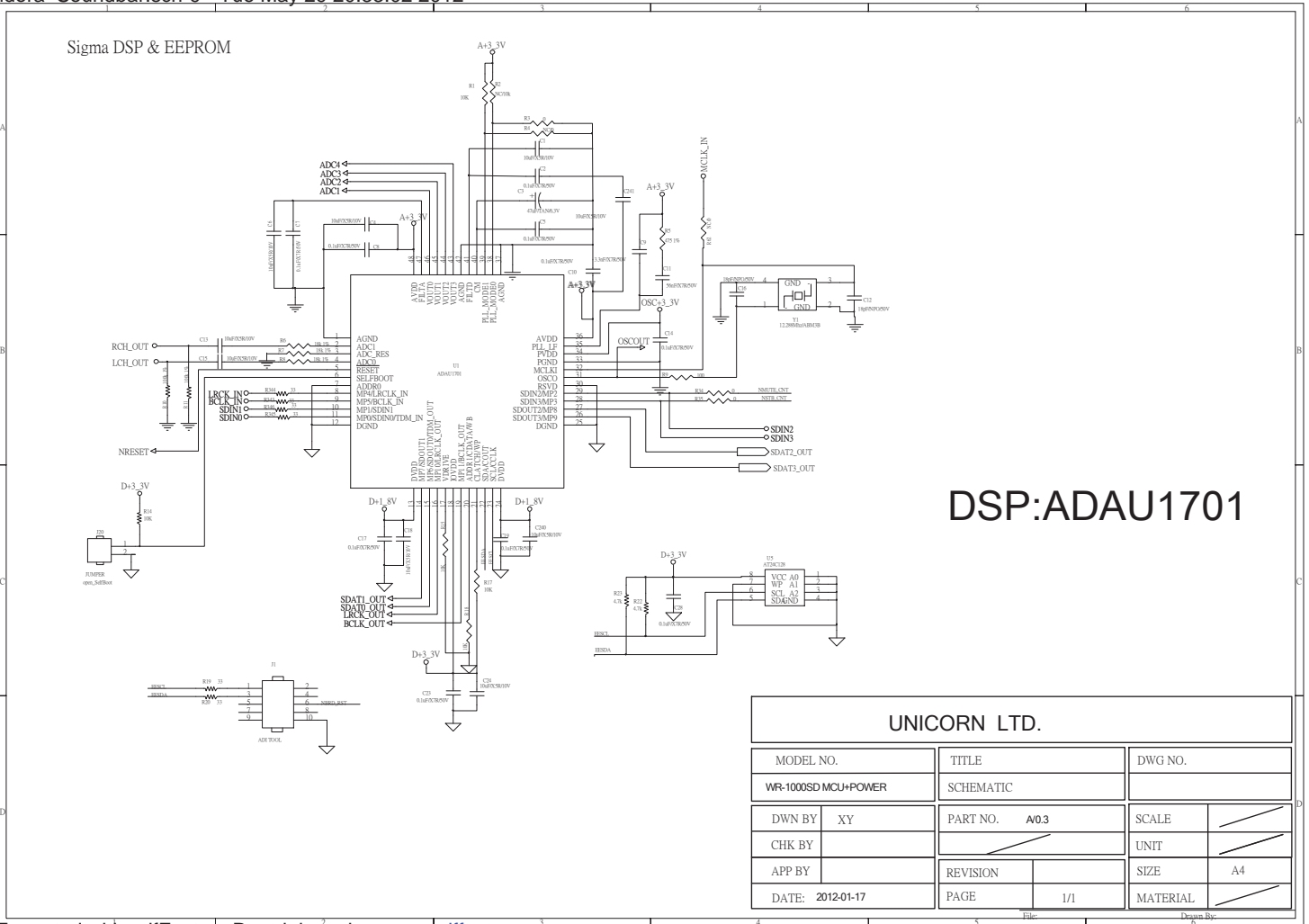


	L	C
4ohm	12uH	1uF
6ohm	15uH	0.68uF
8ohm	22uH/15uH	0.47uF

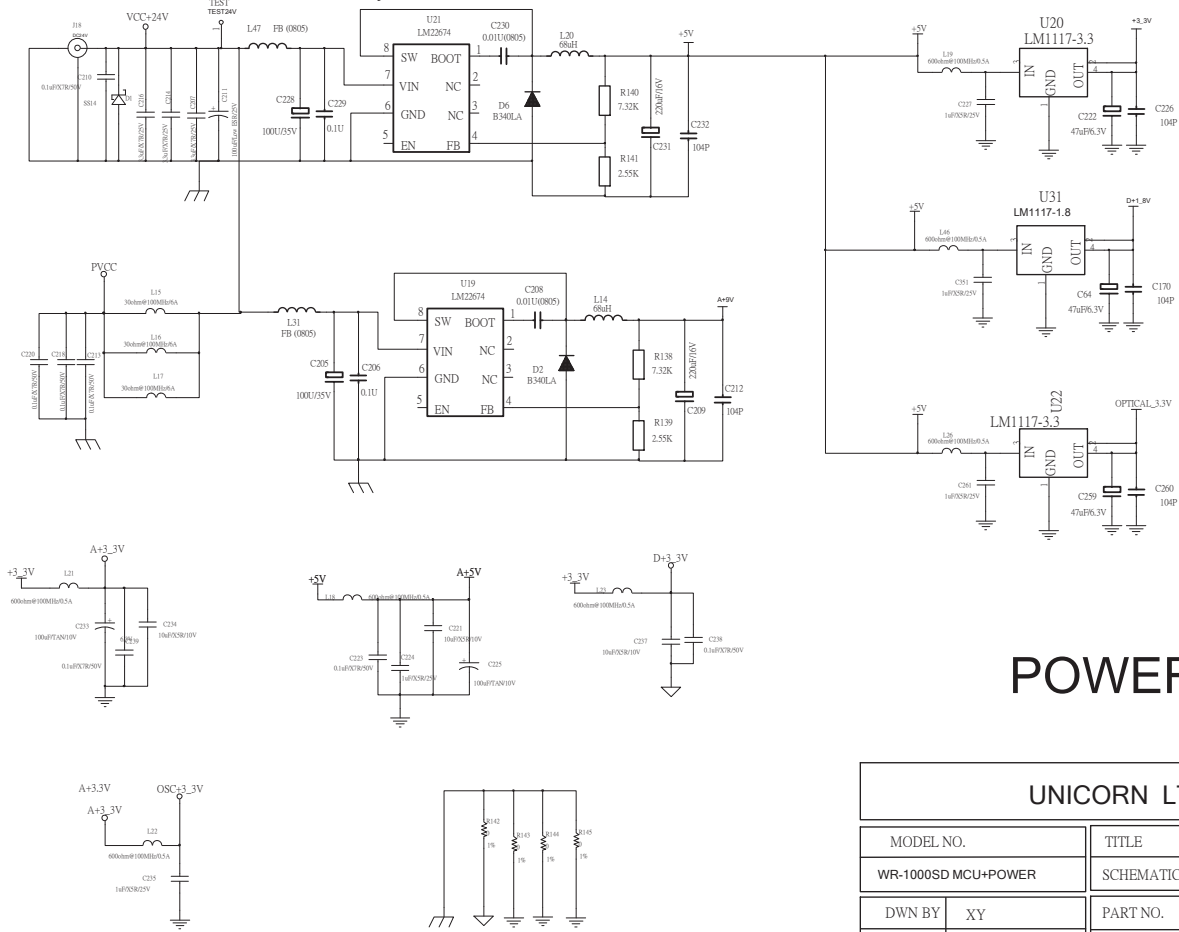
DAMP1



<b>UNICORN LTD.</b>			
MODEL NO.	TITLE		DWG NO.
WR-1000SD MCU+POWER	SCHEMATIC		
DWN BY XY	PART NO.	SCALE	
CHK BY		UNIT	
APP BY	REVISION	SIZE	A4
DATE: 2012-01-17	PAGE	1/1	MATERIAL

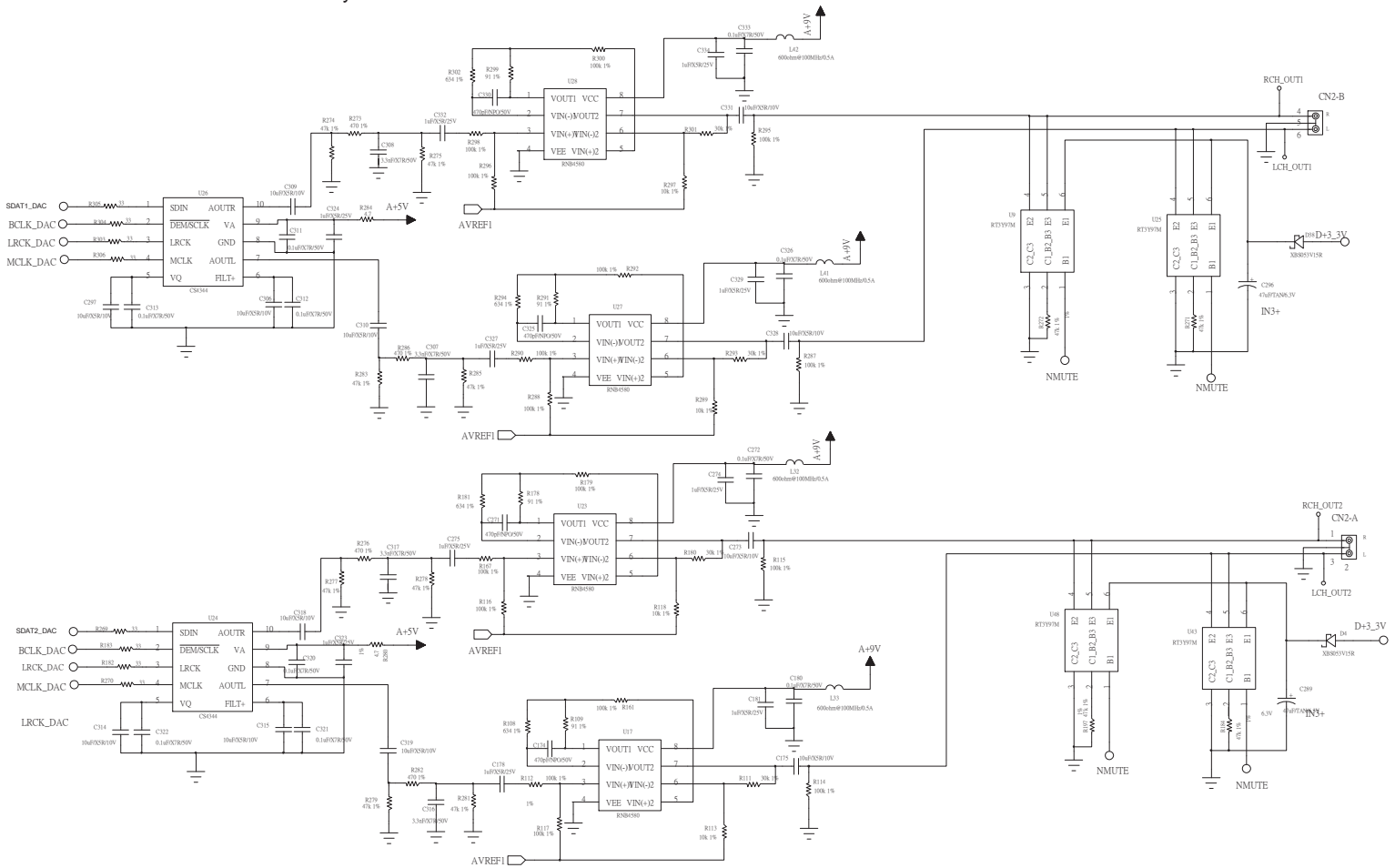


UNICORN LTD.			
MODEL NO.	TITLE	DWG NO.	
WR-1000SD MCU+POWER	SCHEMATIC		
DWN BY XY	PART NO. A/0.3	SCALE	/
CHK BY		UNIT	/
APP BY	REVISION	SIZE	A4
DATE: 2012-01-17	PAGE 1/1	MATERIAL	/

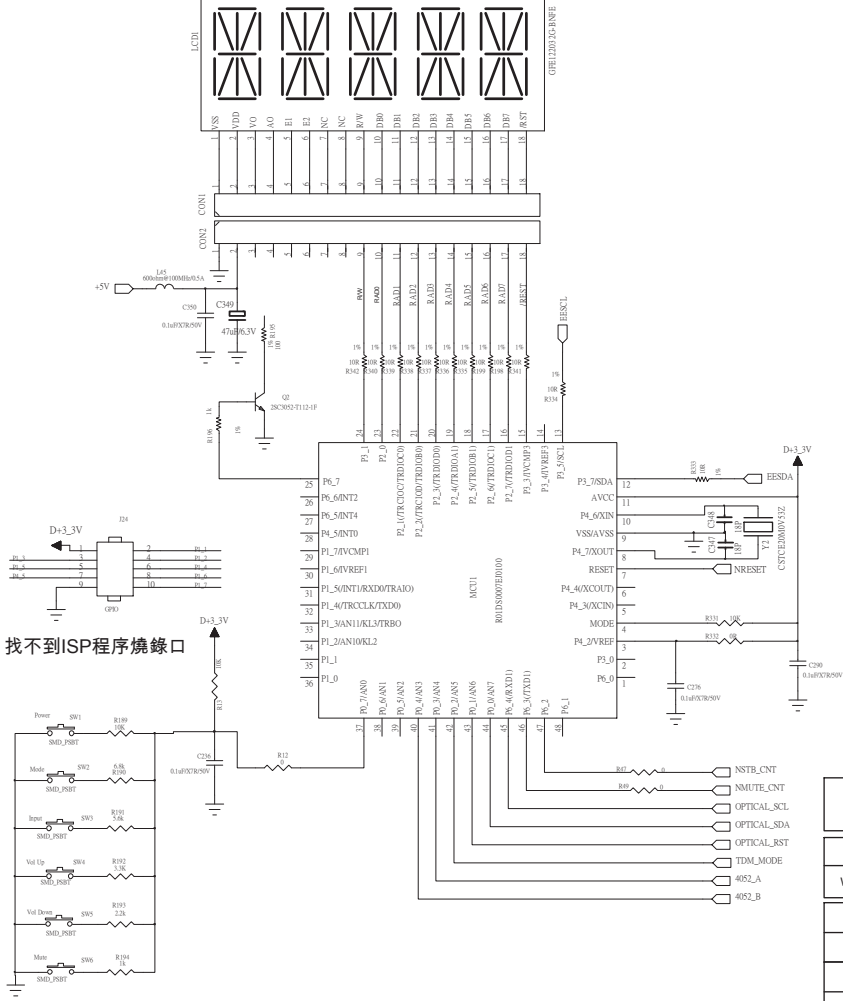


# POWER

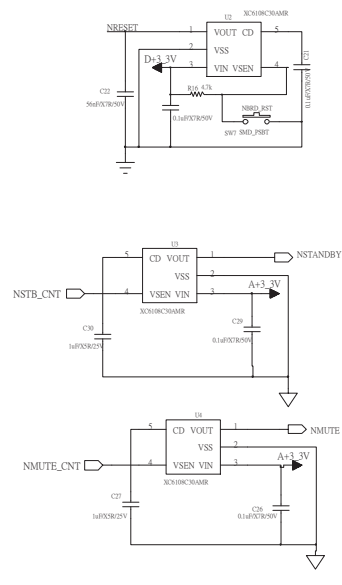
UNICORN LTD.				
MODEL NO.		TITLE		DWG NO.
WR-1000SD MCU+POWER		SCHEMATIC		
DWN BY	XY	PART NO. A/0.3		SCALE
CHK BY				UNIT
APP BY		REVISION		SIZE
DATE: 2012-01-17		PAGE	1/1	MATERIAL



# LINE\_OUTPUT



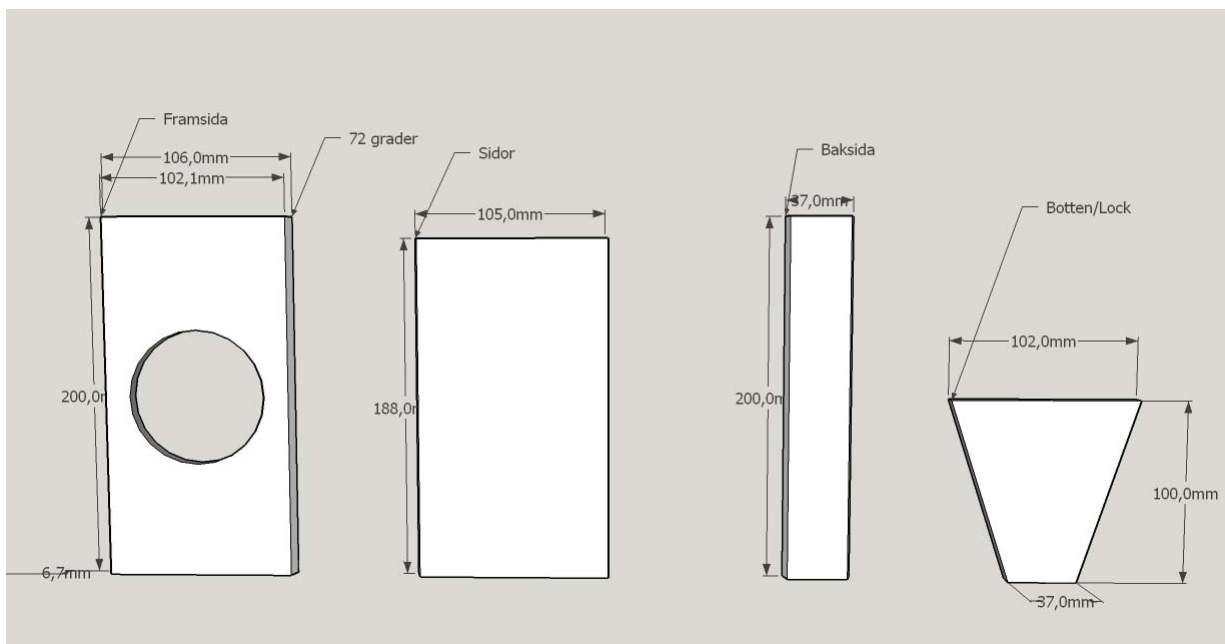
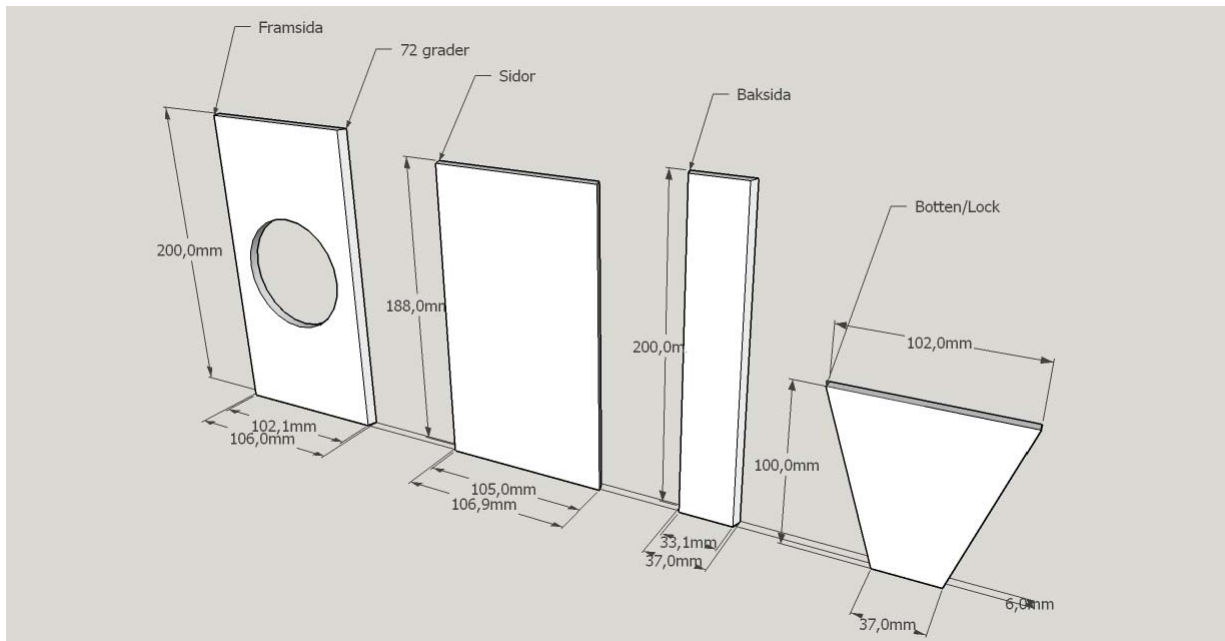
找不到ISP程序燒錄口

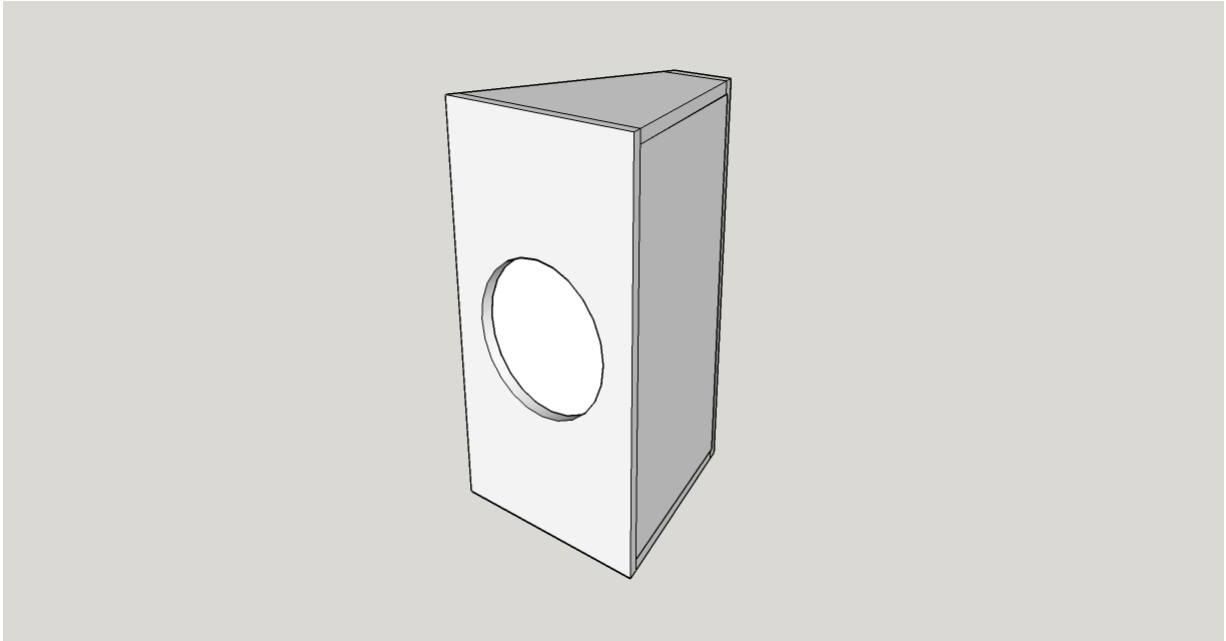


MCU

UNICORN LTD.			
MODEL NO.	TITLE	DWG NO.	
WR-1000SD MCU+POWER	SCHEMATIC		
DWN BY	XY	PART NO.	A/0.3
CHK BY		SCALE	/
APP BY		REVISION	
DATE: 2012-01-17	PAGE	1/1	MATERIAL

# RITNING AV HÖGTALARE





---

## FILTER

---

#	Freq [Hz]	Q	Gain [dB]
1	191.89	1.97	3.83
2	250.49	3.6723	-5.21
3	1930.66	1.6506	-6.28
4	3593.26	1.9655	1.73
5	11245.61	1.4678	-13.11
6	11408.2	8.5132	-6.28
7	13180.66	1.9356	2.39
8	13180.66	1.8732	1.64