



# **Binaural ljudupptagning**

Optimering av binaural mannequin-mikrofon

Ludvig Nylund

Examensarbete

Film & TV

2018

|  |  |
|--|--|
| EXAMENSARBETE  |  |
| Arcada   |  |
|  |  |
| Utbildningsprogram:  | Film & TV  |
|  |  |
| Identifikationsnummer:   |  |
| Författare:  | Ludvig Nylund  |
| Arbetets namn:   | Binaural ljudupptagning: Optimering av binaural mannequin-mikrofon       |
| Handledare (Arcada):   | Kauko Lindfors   |
|  |  |
| Uppdragsgivare:  | -  |
|  |  |
| <p>Sammandrag:</p> <p>I arbetet undersöks och utvecklas en binaural mannequin-mikrofon, resultaten redovisas med hjälp av frekvenssvepsmätningar gjorda med programvaran Room EQ Wizard v. 5.18. Mannequin-mikrofonens form och konstruktion ändras i fem olika skeden i experimentet, nya mätningar görs mellan varje skede och jämförs mot tidigare gjorda för att se vad förändringarna resulterar i audiomässigt, och hur de påverkar frekvensresponsen hos mikrofonen. Detta i enlighet med forskningsfrågan, hur påverkar mannequin-mikrofonens utformning, dvs. likhet med människans huvudform, frekvensresponsen. Målet är att arbetet ska resultera i kunskap kring upptagningen av binauralt ljud och insikt i hur konstruktion och form påverkar mannequin-mikrofonens frekvensrespons. Förhoppningarna är också att arbetet ska resultera i en konkret användbar mannequin-mikrofon utrustad med frekvensmatchade 'DPA 4060-BM miniature omnidirectional' mikrofonkapslar, som trots dess passiva konstruktion har en realistisk frekvensupptagning som skapar en trovärdig ljudbild. Experimentets ramar och förväntningar har satts enligt följande: Ett mätresultat för mannequin-mikrofonens frekvensrespons som i spannet 100–18000 Hz vid 83 dBC SPL ligger mellan en helt rak kurva och isofonkurvan (ISO 226:2003, revision av Fletcher-Munsondiagram). Mätningarna i detta experiment visar att de förändringar som gjordes i de fem skedena har en positiv inverkan för att komma närmare en frekvensrespons i enlighet med experimentets mål, men är dock ej tillräckliga för ett slutresultat som faller helt inom de utsatta ramarna. Vidare utveckling av den passiva konstruktionen eller användning av en aktiv DSP processor skulle krävas för att nå målet.</p> |  |
| Nyckelord:   | binauralt ljud, 3D-ljud, mannequin-mikrofon, virtual reality, dummy head |
| Sidantal:  | 37   |
| Språk:   | Svenska  |
| Datum för godkännande:   |  |

|   |  |
|---|--|
| DEGREE THESIS   |  |
| Arcada  |  |
|   |  |
| Degree Programme:   | Film & TV  |
|   |  |
| Identification number:  |  |
| Author:   | Ludvig Nylund  |
| Title:  | Binaural ljudupptagning: Optimering av binaural mannequin-mikrofon |
| Supervisor (Arcada):  | Kauko Lindfors   |
|   |  |
| Commissioned by:  | -  |
|   |  |
| Abstract:   |  |
| <p>This thesis and experiment focuses on refining and developing a binaural dummy head microphone, the results are presented in the form of frequency sweep measurements made with the software Room EQ Wizard v. 5.18. The shape and construction of the dummy head microphone is adjusted in five phases. Measurements are made in between every phase to record the progress and to be able to analyze the effect that the changes result in sonically and how they affect the frequency response of the microphone. This is in accordance with the research question, how the shape and construction of the dummy head, and its resemblance of the human head, affects the frequency response. The goal is to gain more knowledge about recording binaural sound and to give insight into how the construction of the dummy head microphone affects its frequency response. Ideally it will also result in a useable dummy head equipped with a matched pair of 'DPA 4060-BM miniature omnidirectional' lavalier microphones, that with a passive construction, will have a frequency response that gives a realistic and believable soundscape. The following limitations and expectations have been set for this experiment, the frequency response of the final version of the dummy head is to, between 100–18000 Hz at 83 dBC SPL, fall between a completely flat frequency response and the equal-loudness curve (ISO 226:2003, revision of the Fletcher-Munson contour). The measurements show that the changes to the construction made in the five different phases does have a positive effect on getting closer to a frequency response in accordance with the experiments goal, but they are not enough to generate a result that falls fully within the set limitations. Further development and testing of the passive construction or implementation of an active DSP processor would be needed to reach the set goal.</p> |  |
| Keywords:   | binaural sound, 3D-sound, virtual reality, dummy head              |
| Number of pages:  | 37   |
| Language:   | Swedish  |
| Date of acceptance:   |  |

|  |  |
|--|--|
| OPINNÄYTE  |  |
| Arcada   |  |
| Koulutusohjelma:   | Film & TV  |
| Tunnistenumero:  |  |
| Tekijä:  | Ludvig Nylund  |
| Työn nimi:   | Binaural ljudupptagning: Optimering av binaural mannequin-mikrofon       |
| Työn ohjaaja (Arcada):   | Kauko Lindfors   |
| Toimeksiantaja:  | -  |
| <p>Tiivistelmä:</p> <p>Tässä opintonäytteessä tutkitaan ja kehitetään binauraalinen mannequin-mikrofoni. Tulokset esitellään tietokoneohjelman Room EQ Wizardin v. 5.18 avulla. Mikrofonin muoto ja rakenne muunnetaan viidessä eri vaiheessa. Uusia mittauksia tehdään jokaisen vaiheen välillä. Tulos verrataan aikaisempaan vaiheen tulokseen, jotta voidaan nähdä miten muutokset vaikuttavat mikrofonin taajuusvasteeseen. Tämä tehdään tutkimuskysymyksen mukaan; Kuinka mannequin-mikrofonin muotoilu ja ihmispään samankaltaisuus vaikuttaa mikrofonin taajuusvasteeseen? Tavoitteen mukaan, opintonäyte antaisi lisää tietoja binaural-äänityksestä ja selvittäisi mannequin-mikrofonin muotoilun vaikutuksen sen taajuusvasteeseen. Toiveena on, että opintonäyte tuottaisi myös toimivan binauraalinen mannequin-mikrofonin joka passiivinen rakenteensa huolimatta antaisi realistinen äänikuvan käyttämällä mikrofonikapselina stereo pari 'DPA 4060-BM miniature omnidirectional'. Opintonäytteen rajoitukset ja odotukset ovat seuraavat: Mittaustulos, missä mannequin-mikrofonin taajuusvaste alueella 100–18000 Hz ja 83 dBC SPL voimakkuudella on suorana isofoni-käyrän (ISO 226:2003, revisio Fletcher-Munson käyrästä) välillä. Mittaukset näyttävät, että viidessä eri vaiheessa tehneitä muutoksia tuo mikrofonin taajuusvaste lähemmäksi opintonäytteen tavoitetta, mutta tulos ei kuitenkaan riitä. Passiivinen rakenteen lisäkehitys tai aktiivisen DSP-prosessorin lisääntyminen tarvitaan tavoitteen saavuttamiseksi.</p> |  |
| Avainsanat:  | binauraalinen mikrofoni, 3D-ääni, virtuaalinen-todellisuus, mikrofonipää |
| Sivumäärä:   | 37   |
| Kieli:   | Ruotsi   |
| Hyväksymispäivämäärä:  |  |

# INNEHÅLL / CONTENTS

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introduktion .....</b>                              | <b>8</b>  |
| 1.1      | Historik.....  | 8         |
| 1.2      | Binauralteknikens framtidsutsikter .....               | 10        |
| 1.3      | Experimentets mål.....                                 | 11        |
| 1.3.1    | <i>Forskningsfråga</i> .....                           | 12        |
| 1.3.2    | <i>Avgränsningar</i> .....                             | 13        |
| 1.4      | Tidigare forskning och teori .....                     | 13        |
| 1.4.1    | <i>Rikttningsbestämning av ljudkällor</i> .....        | 13        |
| 1.4.2    | <i>Binaural loudness summation</i> .....               | 14        |
| 1.4.3    | <i>Huvudform och HRTF</i> .....                        | 15        |
| <b>2</b> | <b>Metod.....</b>                                      | <b>18</b> |
| 2.1      | Procedur, mätverktyg och dataanalys .....              | 18        |
| 2.2      | Reliabilitet och validitet .....                       | 21        |
| <b>3</b> | <b>Resultatredovisning.....</b>                        | <b>22</b> |
| 3.1      | Skede 1 – prototypmätning.....                         | 22        |
| 3.2      | Skede 2 – isoleringskede .....                         | 24        |
| 3.3      | Skede 3 – slutlig huvudform .....                      | 26        |
| 3.4      | Skede 4 – slutlig version med gummi-ytbehandling ..... | 28        |
| 3.5      | Resultat vägt mot experimentets mål .....              | 32        |
| <b>4</b> | <b>Diskussion .....</b>                                | <b>33</b> |
|          | <b>Källor / References .....</b>                       | <b>37</b> |

## Figurer / Figures

|   |    |
|---|----|
| Figur 1. Harvey Fletchers mannequin, Oscar. (Hooke Audio 2017a). .....  | 9  |
| Figur 2. Georg Neumann Gmbh mannequin-mikrofoner (Kall 2011).....   | 10 |
| Figur 3. Frekvensrespons-mål, inom grönfärgat område 100 – 18000 Hz. (Plot.ly – Haohailiu, DPAMicrophones.com) .....                                      | 12 |
| Figur 4. Tidsskillnadens samt huvudformens inverkan på frekvensupptagning. (Gasson 2014) .....  | 16 |
| Figur 5. Mätutrustningen som används vid experimentet.....  | 18 |
| Figur 6. Mätning av slutlig version av mannequin-mikrofonen. ....   | 19 |
| Figur 7. Prototyp-version V1 från olika vinklar. ....   | 22 |
| Figur 8. Version V2, isolering av skarv för att förhindra bl.a. läckage rakt igenom huvudet.....  | 23 |
| Figur 9. V1 – V2 medeltal av mätningar från alla riktningar. ....   | 23 |
| Figur 10. V1 – V2 mätningar framifrån vid gradtal 0.....  | 24 |
| Figur 11. Version V3, isolering av ihållighet med högdensitets foam-isolering. ....   | 24 |
| Figur 12. V1 – V2 – V3 medeltal av mätningar från alla riktningar. ....   | 25 |
| Figur 13. V2 – V3 mätningar bakifrån, förändring i styrka kring 500-550 Hz samt skillnad i frekvensupptagning framifrån och bakifrån vid V2 mätning. .... | 26 |
| Figur 14. Version V4, huvudformen förbättrad och hårda kanter och vinklar bortslipade. ....   | 26 |
| Figur 15. V1 – V2 – V3 – V4 medeltal av mätningar från alla riktningar.....   | 27 |
| Figur 16. Förändring i frekvensupptagning vid mätningar framifrån mellan V3 och V4. ....  | 28 |
| Figur 17. Version V5, mannequinmikrofonen ytbehandlat med gummimassa Dinitrol 447 Protect Super.....  | 28 |
| Figur 18. Jämförelse av medelkurva från alla olika mätningssessioner från V1 till slutlig version, V5.....  | 29 |
| Figur 19. Jämförelse av V4 och V5 mätningar framifrån.....  | 30 |
| Figur 20. Jämförelse av samtliga mätningar från sidorna (gradtal 90 och 270) på V4 och V5.....  | 30 |
| Figur 21. Detalj av öronplacering samt DPA kapselns positionering i ytterörat. ....   | 31 |

|  |    |
|--|----|
| Figur 22. Samband mellan frekvensupptagning av höga frekvenser och DPA kapselns placering i ytterörat. ....  | 32 |
| Figur 23. Medelkurvor från respektive mätningssessioner i relation till experimentets mål. ....  | 32 |
| Figur 24. Medelkurva från slutligt mannequin huvud V5 (V5_average) i relation till experimentets mål. ....   | 33 |
| Figur 25. Medelkurva från slutligt mannequin huvud V5 (V5_average), justerad +5dB för att närmare motsvara det valda området för experimentets mål. .... | 34 |
| Figur 26. Mätning av multihallen med ECM8000 kalibreringsmikrofon jämfört med medelkurvor från experimentet olika skeden. ....                           | 35 |

# 1 INTRODUKTION

Ordet binaural betyder ”med två öron” (Babylon Translation 2017). En binauralinspelning sker med mikrofoner placerade i öronen på samma sätt som knapphörlurar, eller genom mikrofoner placerade i konstgjorda öron på trumhinnans plats. Ljudet mikrofonerna plockar upp, färgas och påverkas av formen på ytterörat innan de når mikrofonerna. När man efteråt lyssnar på inspelningen med hörlurar kan man med stor noggrannhet riktningsbedömma ljudkällor och upplever ett 360-graders surroundljud.

I detta experiment försöker jag förbättra en prototyp av en mannequin-mikrofon som används för att kunna spela in binauralt ljud. Mannequin-mikrofonen i fråga motsvarar i storlek och till formen ett människohudvud, och har realistiska konstgjorda ytteröron i vilka mikrofoner är monterade.

## 1.1 Historik

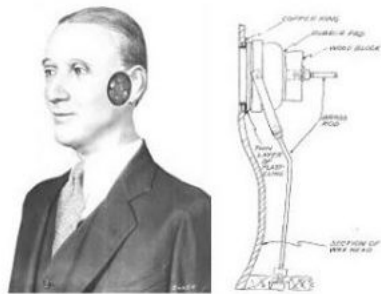
Historien bakom binaural inspelningsteknik går tillbaka till 1881 och Opera Garnier i Paris, Frankrike. Den franska uppfinnaren Clement Ader byggde ett binauralt system med hjälp av telefonsändare, så att man kunde lyssna till operan ca. 2km från scenen genom att hålla två telefonlurar mot respektive öra. Opera Garniers system blev senare kommersialiserat under namnet *Théâtrophone* och användes åren därefter för att sända opera och teaterföreställningar till hotell, caféen, barer och även prenumeranterns hem. (Kall 2011).

Det kom att ta ca. 40 år innan den binaurala tekniken tog nästa steg när en radiokanal i New Haven, Connecticut började sända binaurala sändningar. I detta skede var konventionellt stereoljud inte ännu uppfunnet, så kanalen sände höger- och vänsterljudkanal på olika frekvenser och lyssnaren var tvungen att lyssna genom två separata radioapparater för att ta del av upplevelsen. Under 1920-talet utvecklade samtidigt Harvey Fletcher, som senare kom att bli pionjär inom tvåkanaligt ljud (stereo), en binaural hörapparat för Alfred I. du Pont så att han med hjälp av två telefonlurar kunde



höra styrelsemöten bättre och uppfatta vilken riktning talet kom från. (Hooke Audio 2017a).

I början av 1930-talet blev H. Fletcher chef för akustisk forskning på Bell Laboratories. Han utvecklade där det första mannequin-huvudet 'Oscar' genom att montera mikrofoner i kinderna på en vax-mannequin. Oscar gjorde debut på World's Fair in Chicago 1933 där mässans besökare genom hörlurar kunde lyssna på ljud från mannequinen Oscars perspektiv (Ganz 2008 s. 78 –79). Under 1930-talet skapades också av Kornelis de Boer och Roelof Vermeulen på Phillips i Holland ett liknande mannequin-huvud. Samtidigt lades en grund för det vi idag kan kalla för traditionellt stereoljud när Alan Blumlein inlämnade patenter för stereoinspelningar, stereofilmer och surroundljud. (Hooke Audio 2017a).



Figur 1. Harvey Fletchers mannequin, Oscar. (Hooke Audio 2017a).

År 1972 på 'International Radio and Television Exhibition' mässan i Berlin släppte Georg Neumann GmbH den första kommersiellt tillgängliga mannequin-mikrofonen. Modellen gick då under namnet KU80 (mikrofonen har sedan dess uppdaterats till KU81 och i dagsläget heter modellen KU100). Andra tillverkare så som Sony, JVC och Sennheiser släppte kort efter liknande mannequin-mikrofoner. Under senare delen av 70-talet använde Lou Reed en mannequin-mikrofon designad av den tyska ljudteknikern Manfred Schunk för att år 1978 det första kommersiellt producerade binaurala popalbumet, Street Hassle. (Hooke Audio 2017b).



Figur 2. Georg Neumann GmbH mannequin-mikrofoner (Kall 2011).

Andra produktioner som kan nämnas är bl.a. att under 70-talet sände radiokanalen BBC Radio 4 binaural radio dramen bl.a. en serie om Sherlock Holmes. 1984 skapade den icke vinstdrivande organisationen ZBS Foundation (“Zero Bull Shit”) en 72 minuter lång binaural dramatisering av Stephen Kings roman, Dimman. (Hooke Audio 2017b). År 2000 släppte rockbandet Pearl Jam albumet Binaural där en del av materialet spelats in med mannequin mikrofoner, skivan debuterade på andra plats på Billboard listan och fick därutöver guldcertifikat.

Även om teknikens imponerande och realistiska surroundåtergivning varit intressant ända sedan dess uppkomst, har den kategoriserats som något alternativ. Detta främst för att användningsområdet förblir begränsat p.g.a. att det endast kan upplevas till fullo vid lyssning med hörlurar.

## 1.2 Binauralteknikens framtidsutsikter

I dagsläget när virtual reality-teknik (Oculus Rift, Sulon Cortex, Avegant Glyph m.fl.) är på uppgående och något av en ”hot topic”, blir binaurala inspelningar igen intressanta för att skapa realistiska ambianser så väl som effektljud för diverse virtual reality (VR) upplevelser, Féret (2017) skriver:

But with the rise of virtual reality hardware like the Oculus Rift, Sony’s Morpheus, and Samsung’s Gear—systems dependent on realistic 3D audio to fully immerse their users—binaural audio is on the cusp of a renaissance.

Det kan argumenteras att binaural inspelningsteknik är bland de tidseffektivaste och mest praktiska tillvägagångssättet för att skapa en realistisk och trovärdig surround-ljud upplevelse.

Den binaurala tekniken är relativt litet använd idag och således är också utbudet på inspelningstekniska lösningar, speciellt mannequin-mikrofoner, få och dyra. I detta examensarbete kommer jag att fokusera på optimering av en prototypmikrofon för upptagning av binauralt ljud, en sk. mannequin- eller 'dummy head'-mikrofon.

Vart efter VR-tekniken och dess upplevelser så väl i nöjes- som utbildningsbranschen blir vanligare kommer också mindre produktioner och projekt att kunna finna intresse och möjligheter i att producera material för detta nya mediaformat. Som Kolo (2017) konstaterar i sin artikel för Forbes Agency Council:

In 2018 we will see the costs decrease, better content emerge and more awareness spread, which will propel the VR/AR education market to high growth.

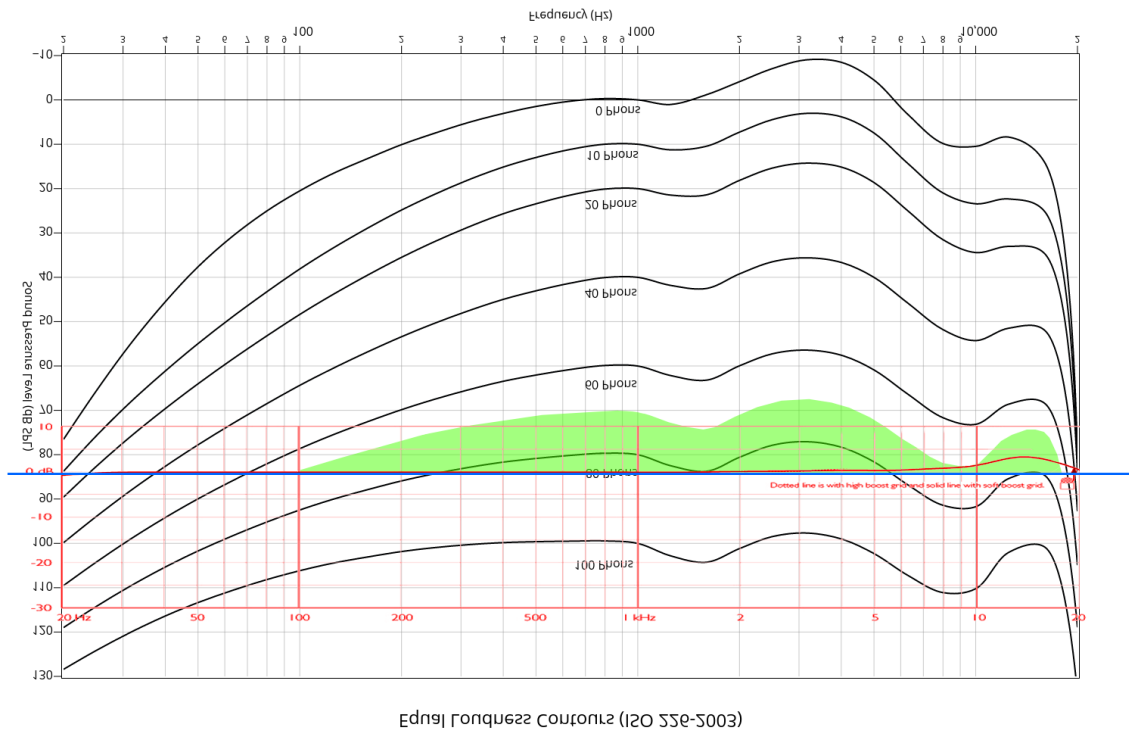
Med en sådan framtidsutsikt kommer också behovet av tids- och kostnadseffektiva lösningar för att göra realistiskt 3D-ljud för dessa VR projekt att bli intressanta och kunna öka.

### **1.3 Experimentets mål**

Målet är att arbetet ska resultera i kunskap kring upptagning av binauralt ljud samt insikt i hur konstruktion och form påverkar hur mikrofonens frekvensrespons. Förhoppningarna är också att arbetet ska resultera i en konkret användbar mannequin-mikrofon, utrustad med ett stereo par av frekvensmatchade 'DPA 4060-BM miniature omnidirectional' mikrofonkapslar, som trots dess passiva konstruktion har en realistisk frekvensupptagning som skapar en trovärdig ljudbild. Detta till trots kan det hända att mätresultaten kommer att visa att mikrofonen bör utrustas med någon form av aktivt DSP-filter som möjliggör exaktare justeringar av frekvensupptagningen för att få ett godtagbart slutresultat. Ifall det senare är fallet kan mikrofonen eventuellt vidareutvecklas i framtida arbeten eller projekt.

### 1.3.1 Forskningsfråga

Hur påverkar mannequin-mikrofonens utformning, dvs. likhet med människans huvudform, frekvensresponsen?



Svart: ISO 226:2003, revision av Fletcher-Munsondiagram  
(upp och ner vänt diagram för att återspejla människoörats frekvensrespons istället för ljudtryck i rum)  
Grön: 100 - 18000 Hz område inom vilket, med passiv konstruktion, mätresultat eftersträvas  
Röd: Frekvensrespons diagram av DPA 4060-BM med softboost grill  
Blå: Rak frekvensrespons från 20 - 20000 Hz (människoörats hörselområde)

Figur 3. Frekvensrespons-mål, inom grönfärgat område 100 – 18000 Hz. (Plot.ly – Haohailiu, DPAMicrophones.com)

Figur 3 är en kombination av ett upp- och nervänt isofonkurvediagram (ISO 226:2003), DPA 4060-BM mikrofonkapslarnas frekvensrespons samt en rak frekvenslinje vid 83 dB SPL ljudtryck. ISO 226:2003 diagrammet är upp- och nervänt för att åskådliggöra människoörats frekvensrespons istället för ljudtryck i rum (Stevens 1986, Izhaki 2018, DoctorProAudio.com).

### 1.3.2 Avgränsningar

Följande ramar sätts för projektet. Målet är att mannequin-mikrofonen, med en passiv konstruktion utan aktivt DSP-filter, vid intervallet 100 – 18000 Hz uppnår en frekvensrespons som ligger mellan en helt rak frekvenslinje och isofonkurvan (ISO 226:2003, revision av Fletcher-Munsondiagram). Se det grönfärgade området i figur 3 ovan.

För att begränsa datamängden och materialet som bör analyseras görs totalt fem mätsessioner. Vid varje session görs åtta enskilda mätningar, en per öra (per kanal) på mannequin-mikrofonen. Mätningarna görs vid positionerna 0°, 90°, 180°, 270° grader runtom mannequin-mikrofonen. Mätresultaten i behov av behandling och analys kommer således att uppgå till totalt 40 stycken.

Man kunde ifrågasätta mätningmetoden i och med att desto fler mätningar inte utförs. Exempelvis görs i detta experiment inte mätningar med högtalaren som spelar upp testsignalen på olika höjd utan endast på en fast höjd på 0,7 meters från golvet. Således testas inte hur bra man kan riktnings- och eller höjdbestämma ljud som tagits upp av mannequin-mikrofonen, något som är en viktig del i målet för en realistisk ljudbild. Detta val har dock gjorts på basen av tidigare forskning som nämns i 1.4.1.

## 1.4 Tidigare forskning och teori

### 1.4.1 Rikttningsbestämning av ljudkällor

Tidigare forskning har visat att den enskilt viktigaste komponenten för att kunna riktningsbestämma ljud vid binaurala inspelningar är formen på ytterörat (på latin: *pinnae*). Michael Gerzon (1975 s.1) tar i artikeln 'Dummy Head Recording' upp ett experiment gjort av D.W. Batteau:

This test was performed both using ordinary omni microphones, and with microphones fitted with accurate replicas of human pinnae, but with no dummy head used in either case. When no pinnae were used, the subjects found it difficult to localize the sounds, assigning them to more-or-less random positions. However, with the pinnae fitted to the microphones, localization was correct with no confusion between front and rear.

Gerzon noterar vidare i sin artikel att detta styrks av ett annat experiment gjort av Roffler & Butler där testpersonens huvud fixeras i en ställning i en statisk position. När ytterörat täcks över med en mask men örongången hålls öppen kan testpersonen inte riktningbestämma ljudkällan: (Gerzon 1975 s.1)

However, Roffler and Butler found that a change of the sound source elevation as little as 5° could be clearly heard. On the other hand, if the subject wore a 'pinna mask' which covered up the pinnae but allowed sound to enter the ears, then no change of elevation could be heard.

Detta visar klart och tydligt på att ytterörat, framom val av mikrofonkapsel, kapselns frekvensrespons eller huvudform, har den största inverkan för att vi ska urskilja och kunna riktningbestämma ljud i en binaural inspelning.

De olika vecken och åsarna i ytterörats utformning reflekterar och bryter ljudvågorna innan de träffar trumhinnan. Detta innebär att ljud färgas olika i ytterörat beroende på riktningen det kommer från. Färgningen påverkar främst frekvenser ovanför 5 kHz och har konstateras vara av stor vikt för att vi skall kunna riktningbestämma ljud. (Gerzon 1975 s. 2-3, Potisk 2015 s. 3).

#### **1.4.2 Binaural loudness summation**

Det finns delade åsikter gällande 'binaural loudness summation'. Carette och Friedman (1974 s. 239) nämner i boken *Psychophysical Judgement and Measurement* att Fletcher och Munson (1933) antog att ett ljud som presenteras binauralt bör bli dubbelt så starkt som om det presenteras monofonisk men att de vidare, i form av strikt empiriskt resultat, upptäckte att intensiteten inte var konstant utan istället ökade från 5 dB till 10 dB över räckvidden 20 till 100 dB ljudtryck. Detta resultat replikerades 1960 av Reynolds och Steven med brus som testsignal, även om de som utgångspunkt ifrågasatte Fletcher och Munsons tidigare resultat, Carette & Friedman, s. 239:

Reynolds and Stevens had initially questioned the Fletcher-Munson results on the stated ground that if loudness is a power of function of intensity, then the binaural-monaural intensity difference should be constant.

Culling och Dare (2016 s. 66) hänvisar i Binaural Loudness Constancy till Cox och Grays (2001) studie vars resultat visar att vid användning av hörlurar på ett respektive båda öronen upplevdes, med icke binauralt ljud, konventionell ökning av ljudstyrka medan vid användning av binauralt inspelat ljud upplevdes ökningen mycket starkare. Vid lyssning med högtalare i öppet rum så är effekten av 'binaural loudness summation' väldigt svag i jämförelse. Culling och Dare konstaterar vidare att detta är den första studien som visar konsistens i ljudstyrka vid monofonisk och binaural lyssning men att experimentet är kliniskt inriktat och svårt att jämföra med konventionella psykofysiska mätningar:

This experiment showed for the first time that the loudness of external sounds may display constancy across monaural and binaural listening modes. However, the methods used were clinically oriented and difficult to compare with conventional psychophysical measurements.

### 1.4.3 Huvudform och HRTF

Huvudform och placeringen av mannequinens ytteröron har enligt tidigare studier en stor inverkan för att det inspelade ljudet vid lyssning genom hörlurar skall upplevas realistiskt. Head-related Transfer Function (HRTF) beskriver å sin sida hur ett öra tar emot och uppfattar ett ljud och dess position, påverkat av diffraktion och reflektion från huvudform, ytteröra, axlar och torso. (Potisk 2015). Gerzon konstaterar i sin artikel att det i binauralinspelningar finns tre huvudsakliga faktorer som inverkar på riktningsbestämning av ljud som inte hittas i vanliga stereo inspelningar: tidsskillnad, huvudform samt ytterörats utformning. Den sistnämnda har redan behandlats i detta arbete i 1.4.1 *Riktningsbestämning av ljudkällor*. Han konstaterar dock att, även om ytterörats form är mycket viktigt, förekommer det olika åsikter om vilken av dessa tre som är den viktigaste (Gerzon 1975). Detta understöds också av Tilen Potisks artikel om Head-Related Transfer Function där författaren konstaterar att tidigare psykoakustiska experiment visar att interaural time difference (ITD), interaural level difference (ILD) samt ytterörats utformning och dess färgning av ljud är de tre viktigaste faktorerna för lokalisering av ljudkällor. (Potisk 2015 s. 3).

Tidsskillnaden som uppstår när ett ljud på högersida når högeröra innan det når vänster öra ger antydning och signaler om riktningen på ljudet (ITD), exempelvis ett ljud som når huvudet rakt från höger når högerörat ca. 0.76ms tidigare än vänsterörat. (Gasson 2014)

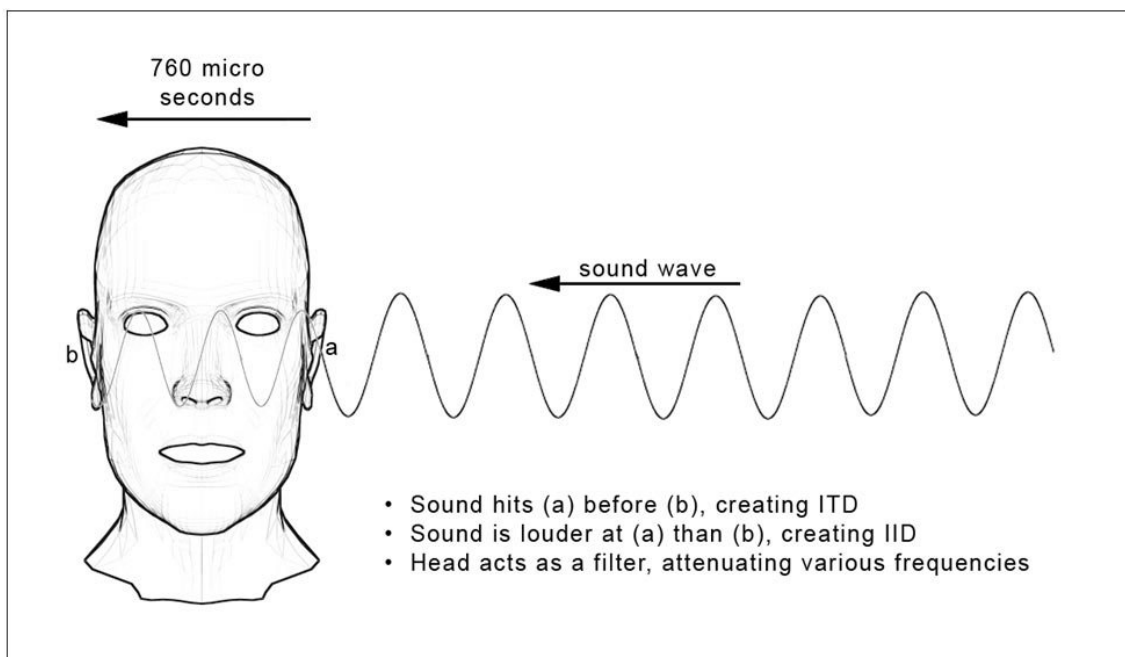
Tidsskillnaden blir dock givetvis olika beroende på personens huvudform och storlek, och således avstånd mellan öronen. Potisk konstaterar att ITD är den dominanta faktorn för rikttningsbestämning för frekvenser under ca. 1.5 kHz, detta påverkas dock av huvudets diameter enligt följande (Potisk 2015 s.3):

The frequency below which the ITD cue is dominant ( $v_c$ ) can be estimated from the average diameter of the head ( $d$ ) and the speed of sound ( $c$ ):

$$v_c = c/d \approx 1.5 \text{ kHz}$$

where we used  $c = 340 \text{ m/s}$  and the average diameter of the human head  $d = 25 \text{ cm}$ .

Tidsskillnaden som enskild faktor kan dock inte ge information om höjd eller skilja på om ljudet ligger framför eller bakom huvudet. (Gerzon 1975 s.1)



Figur 4. Tidsskillnadens samt huvudformens inverkan på frekvensupptagning. (Gasson 2014)

Mikrofontekniken som går under namnet ORTF använder sig endast av denna faktor för att skapa en simplare variant av binaural ljudupptagning. ORTF-tekniken kräver att mikrofonernas kapslar är placerade 17 cm ifrån varandra och riktade i 110 grader. I övrigt rekommenderas rikttningskaraktäristiken vara kardioid till skillnad från omni som används



i en mannequin-mikrofons ytteröron. Ifall avståndet mellan vänster och höger kapsel är större än 17cm blir tidsskillnaden för stor och stereobilden kollapsar till att ljud i inspelningen verkar komma endera rakt från höger eller rakt från vänster. (Gerzon 1975) Avståndet på 17 cm mellan kapslarna simulerar ett normalt öronavstånd hos människan. (Glenn & Gary 2011 s. 271)

Gerzon identifierar att huvudet skapar en akustisk skugga för örat och mikrofonen som ligger längre bort från ljudkällan och att denna skugga endast påverkar frekvenser ovanför ca. 500 Hz. Huvudet och huvudformens inverkan på den binaurala inspelningens kvalitet är dock debatterad och enligt Gerzon är det den minst viktiga av de tre faktorer som han listat, dvs. tidsskillnad, huvudform och ytterörats utformning. (Gerzon 1975 s. 2). Interaural level difference (ILD) inverkar på frekvenser över 1.5 kHz (Potisk 2015 s. 3), i ILDs sammanhang har huvudet och huvudformen betydelse eftersom det som Gerzon beskriver skapar en skugga och således blockerar ljudet från att nå örat på bortre sidan av huvudet.

Gerzons artikel tar vidare upp svagheten och problemet när det kommer till att identifiera en klar center framtill i ljudbilden i en binaural inspelning. Vid lyssning till en binaural inspelning upplevs ofta 'In the head'-effekten (IHL) där lyssnaren upplever svårigheter i att identifiera ifall ett ljud i inspelningen ligger framför eller bakom hen, och det kan kännas som att ljudet är inne i huvudet istället för framför. En av orsakerna till detta har förklarats vara avsaknaden av huvudrörelser hos mannequin-mikrofonen i jämförelse till om personen själv stod på plats och lyssnade. De små rörelserna man gör med huvudet ger vidare ledtrådar åt hjärnan som hjälper att placera ett ljud framför eller bakom lyssnaren, dessa saknas i en binaural inspelning. Gerzon konstaterar att detta delvis har betydelse men att det samtidigt kan bevisas att ytterörats utformning ensamt kan urskilja om ett ljud kommer framifrån eller bakifrån, även om man tar bort huvudet helt och hållet och endast placerar mikrofonen i ett konstgjort ytteröra.

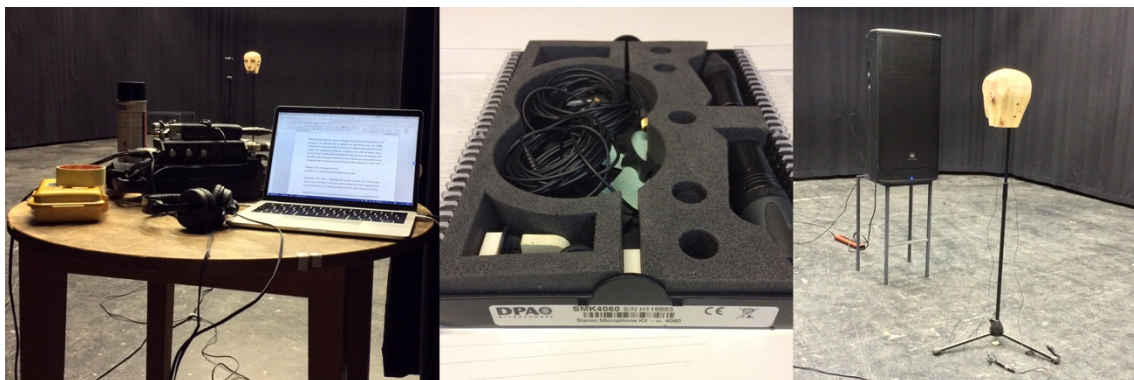
## 2 METOD

### 2.1 Procedur, mätverktyg och dataanalys

I experimentet undersöks med hjälp av frekvensresponsmätningar, prototyp mannequin-mikrofonen i olika skeden av byggnadsprocessen. Mellan mätningssessionerna korrigeras konstruktionen för att förhoppningsvis förbättra och slutligen uppnå en realistisk frekvensupptagning som återger en trovärdig ljudbild i enlighet med utsatt mål som visats i figur 3.

Datainsamlingen sker genom mätningar med logaritmiskt fullspektrum-svep testsignal i ett akustiskt sett, så neutralt och opåverkande rum som möjligt.

Fullspektrum-svepet spelas upp i rummet med en högtalare placerad på 1,0 meters avstånd från mannequin-mikrofonen. Högtalaren står alltid på samma plats i rummet för att ha exakt samma akustiska påverkan av rummet på mätningen från alla olika vinklar. Mannequin-mikrofonen roteras således på samma position så att testsignalen når mikrofonen från fyra olika gradtal ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $270^\circ$ ).



*Figur 5. Mätutrustningen som används vid experimentet.*

Multihallen, rum A211 i Yrkeshögskolan Arcada, används som mätutrymme. Utrymmet är av storleken 7 x 10 meter med en takhöjd på 6 meter, väggarna består av tjock molton väv och är således akustiskt sett ”döda”, golv och tak är av betong.

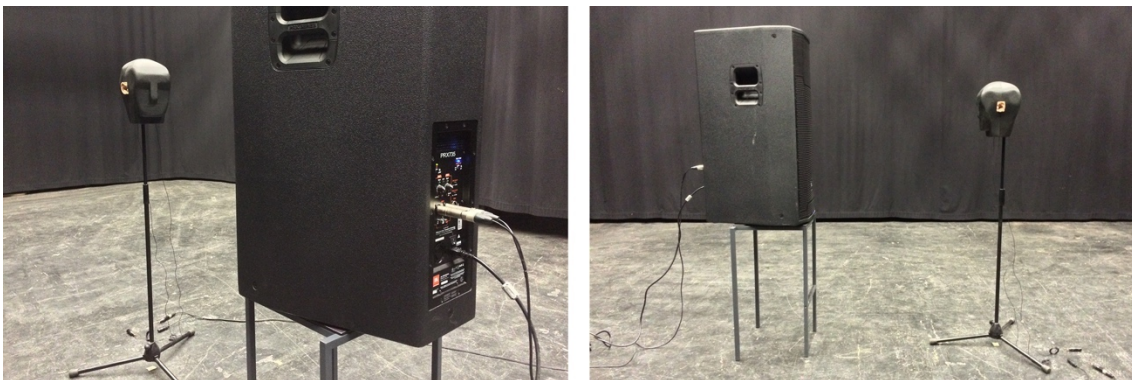
Högtalaren som används för uppspelning av testsignalen är av modell JBL PRX735, placerad med nedre kant på höjden 0,7 meter från golvet. Mannequin mikrofonen står i mitten av rummet på ett stativ med öronen, dvs. mikrofonkapslarna, på 1,3 meters höjd från golvet.

Mätprogrammet som används är Room EQ Wizard version 5.18 (REW). För att ta reda på om eventuella större avvikelser i rummets frekvensrespons bör beaktas vid analys av mätresultaten görs först en kontrollmätning av rummet med en kalibreringsmikrofon (Behringer Measurement Condenser Microphone ECM8000) placerad i mitten av rummet på samma höjd vilket mannequin-mikrofonens mätningars görs, denna mätning redovisas i Figur 26 i relation till de gjorda mätningarna.

Som signalkedja används försteget i en Sound Devices 302 kopplat till en Zoom H5 som agerar interface till datorn. Loopback-kalibrering för signalkedjan görs i REW för att utesluta interface-kedjans frekvensrespons från mätningarna.

REWs ingångs- och utgångsnivåer kalibreras med Clas Ohlson SPL mätare till 83 dB(c) ljudtryck i utrymmet, med hjälp av REWs subwoofer kalibreringssignal (pink noise). Check levels fuktionen i REW justeras så inkommande test signal ligger på -18.0dB.

Utrymmets frekvensrespons mäts med Behringer ecm8000 på samma position som mätningarna för mannequin-mikrofonen görs,



*Figur 6. Mätning av slutlig version av mannequin-mikrofonen.*

Mätresultaten analyseras och jämförs mot det eftersträvade målet, se Figur 3. Efter varje mätsession görs justeringar i material, konstruktion och form för att förhoppningsvis komma närmare målet som satts för experimentet.

Isofonkurvan (ISO 226:2003) ser olika ut vid olika ljudtryck i rum, detta experiments mätningar sker med logaritmiskt fullspektrum frekvenssvop vid 83 dBC SPL. Människoörat uppfattar generellt höga och låga frekvenser lägre än mellanregistrets frekvenser, fenomenet förstärks därtill vid lägre ljudtryck. Från isofonkurvan (ISO 226:2003 revision av Fletcher-Munsondiagram) kan man se att frekvensresponsen för människoörat är rakast möjlig vid 83 dBC SPL (Katz 2002 s. 186–187). Därav används 83 dBC SPL ljudtryck genomgående i experimentet, såväl vid pink noise kalibrering som vid mätningarna med fullspektrum frekvenssvop.

Logaritmiskt fullspektrum frekvenssvop har valts eftersom det tenderar vara det mest exakta och passande vid akustiska mätningar i en tyst miljö. (Room EQ Wizard – Features in detail 2016, Stan et al. 2002 s. 1, Potisk 2015 s. 5)

Mätningarna görs i mono skilt för var öra (var kanal) på mannequin-mikrofonen. Vid analysen av data adderas inte amplituden av frekvensresponsmätningarna från respektive öra utan istället räknas ett medeltal av frekvensresponsen från respektive öra och kanal till en helhet med hjälp av funktionen 'Average the responses' i REW. Medelkurvan som funktionen genererar är det som beaktas som slutlig frekvensrespons för mätningen. Detta ställningstagande grundar sig delvis på tidigare forskning gällande skillnader i upplevelsen av binaurala och monaurala ljudstyrkor som behandlas i kapitel 1.4.2, Binaural loudness summation.

För att ungefärligt motsvara människoörats spektrala upplösning används 1/3 oktavs utjämning, sk. "fractional-octave smoothing" vilket appliceras i mättings och dataanalysprogrammet REW (Bharitkar & Kyriakakis 2006 s. 80, Vercelli 2010, Woodhouse & Davis 2010 s.5). I praktiken innebär 1/3 oktavs utjämning att frekvensresponskurvorna från mätningarna jämnas ut och avrundas för att efterlikna människoörats upplösning.

## 2.2 Reliabilitet och validitet

Mätutrustningen och programvara som används är standard och tillgängliga såväl att hyra som köpa, att återkonstruera samma mätutrymme kan dock vara utmanande. Resultatredovisningen nedan presenterar pga. detta också en mätning av rummet, dvs. rummets frekvensresponskurva är möjlig att ta i beaktan ifall en replikering av mätningen görs, se Figur 26.

Att återskapa en mannequin-mikrofon med exakt samma huvudform som prototypen som detta experiment utgår från är svårt eftersom basen på prototypen är gjord i limträ som är sågat och slipat för hand.

Noteras bör att experimentets validitet lider av att mätutrymmet inte är ett helt neutralt sk. hel- eller halv-ekofritt rum som är avsett för att göra vetenskapliga akustiska test och mätningar. Ett hel-ekofritt rum är helt fritt från reflektioner medan ett halv-ekofritt rum har, lika som rummet som används för detta experimentets mätningar, ett hårt solitt golv. Även om rummet som används, med hårt betong golv och mjuka molton väggar, således efterliknar ett halv ekofritt rum så är det inte lika exakt i konstruktion och inte designat för mätningar. Bl.a. kan möjliga reflektioner från taket kan komma att påverka mätningarna.

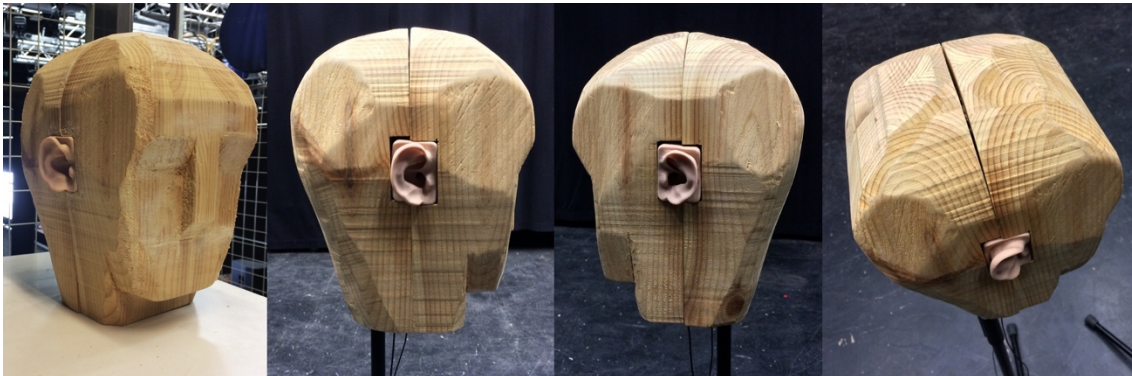
För att få en djupare kunskap i huruvida mannequin-mikrofonens frekvensrespons beteer sig vid ljudkällor såväl närmare samt på längre avstånd kunde mätresultaten som analyseras utökas. Såväl mätningar med testsignalen på nära håll som långa avstånd samt på olika höjd kunde göras och analyseras vidare. Valet att avgränsa mätningarna till endast ett avstånd med ljudkällan på 1,0 meters från mannequin-mikrofonen baserar sig på Potisks artikel där HRTF-mätningar delas in i far-field och near-field mätningar. Ifall avståndet från ljudkällan till den upptagande mikrofonen är större än 1,0 meter kan HRTF anses vara oberoende av avståndet och kategoriseras som far-field, vid avstånd mindre 1,0 meter är HRTF beroende av avståndet och kategoriseras som near-field. Nearfield mätningar är svåra att utföra och i dessa fall lämpar sig inte högtalare med frekvenssvop som testsignal: (Potisk 2015 s. 5)

Near-field measurement is more difficult because you need a near-field point source and so an ordinary loudspeaker is no longer a suitable choice, due to its size, directivity and multiple scattering between source and the subject. Secondly, measurement is much more time consuming since measurements of HRTFs at various distances are required due to the strong distance dependency of the near field. This means that it is almost impossible to obtain a near-field transfer function of a human subject.

För att vidare fördjupa experimentet kunde en kvalitativ utvärdering göras som tillägg till mätningarna. Olika typer av ljud, till exempel musik, ambianser samt tal, kunde spelas in med mannequin-mikrofonen och analyseras och utvärderas med hjälp av ett par utvalda personer som jobbar inom ljudbranschen. Ett tidskrävande tillägg till trots, skulle en sådan subjektiv vinkling som utforskar hur realistiska och trovärdiga inspelningarna upplevs ge mervärde till experimentets slutresultat.

### 3 RESULTATREDOVISNING

#### 3.1 Skede 1 – prototypmätning



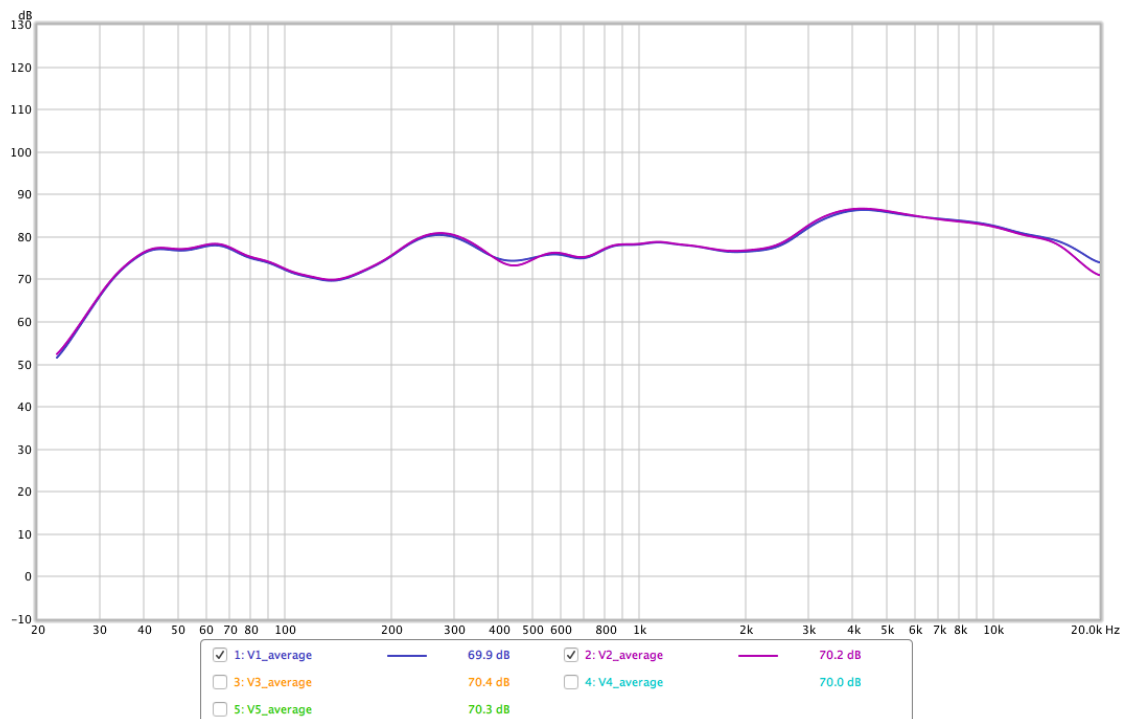
Figur 7. Prototyp-version V1 från olika vinklar.

I skede 1 gjordes mätningar av prototypen (V1) där huvudformen var kantig och skarven mellan främre och bakre del av huvudet ojämn. Mätningarna gjordes enligt procedur beskriven i 2.1 på 1 meters avstånd från högtalaren. Efteråt tätades skarven samt ojämnheter i hålen för de konstgjorda öronen med Casco Woodfiller plastiskt trä, därefter slipades ytorna och huvudet sattes ihop igen för att göra mätningar av V2, nu med tätad och isolerad skarv.



Figur 8. Version V2, isolering av skarv för att förhindra bl.a. läckage rakt igenom huvudet.

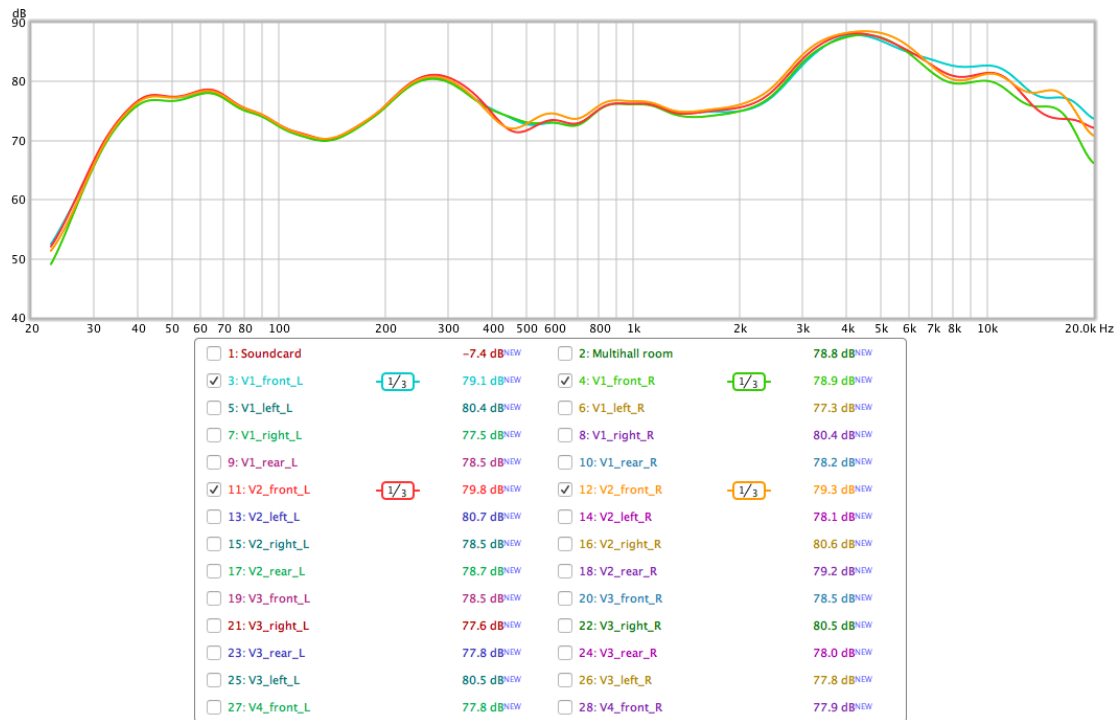
Prototypmätning (V1) jämförd med version 2 med isolerad skarv (V2) gav följande frekvensrespons resultat. Båda medelkurvorna är uträknade i REW från respektive 8 mätningar dvs. 4 riktningar och för bägge öron:



Figur 9. V1 – V2 medeltal av mätningar från alla riktningar.

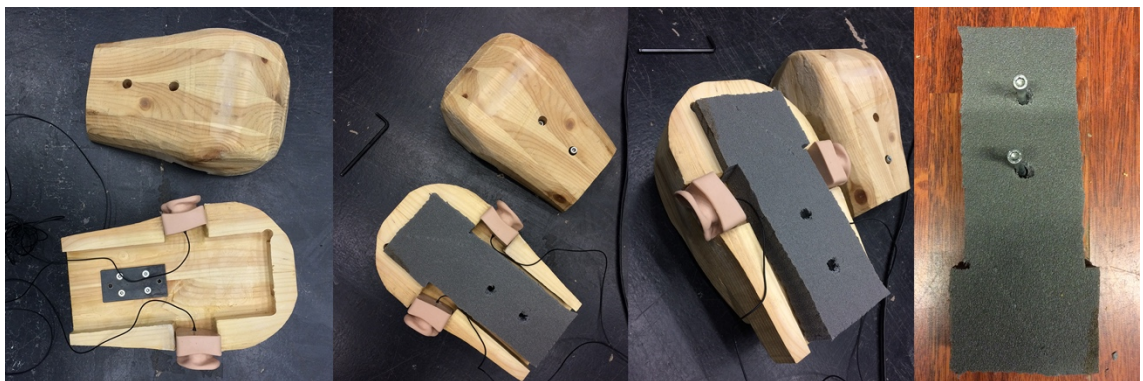
Ser vi vidare på enskilda mätningar för att hitta vid vilket gradtal och vilken vinkel isoleringen av skarven hade den största påverkan så hittas den i mätningarna som gjorts

vid gradtal 0 dvs. framför mannequinmikrofonen, där man efter att skarven tätats kan se en minskning på 2-3 dB vid 450 Hz:



Figur 10. V1 – V2 mätningar framifrån vid gradtal 0.

## 3.2 Skede 2 – isoleringskede



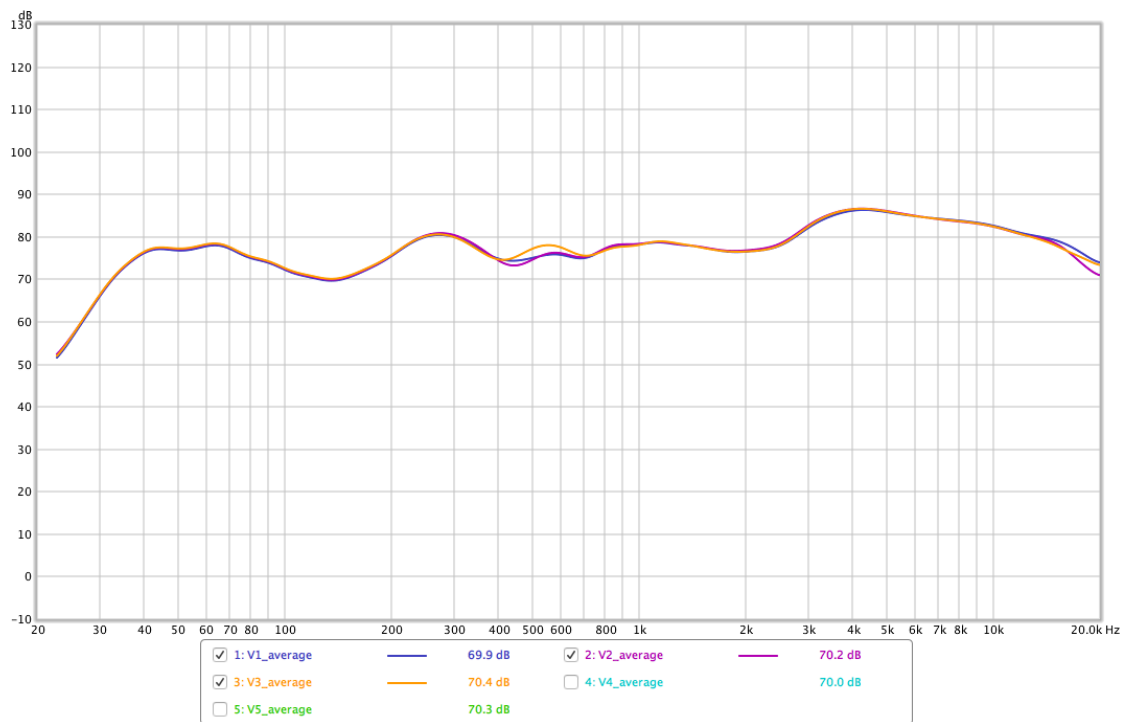
Figur 11. Version V3, isolering av ihållighet med högdensitets foam-isolering.

I skede 2 färdigställs nästa version av mannequin-mikrofonen (V3). Här isolerades ihålligheten inne i huvudet till sin helhet med högdensitets foam-isolering, två smala



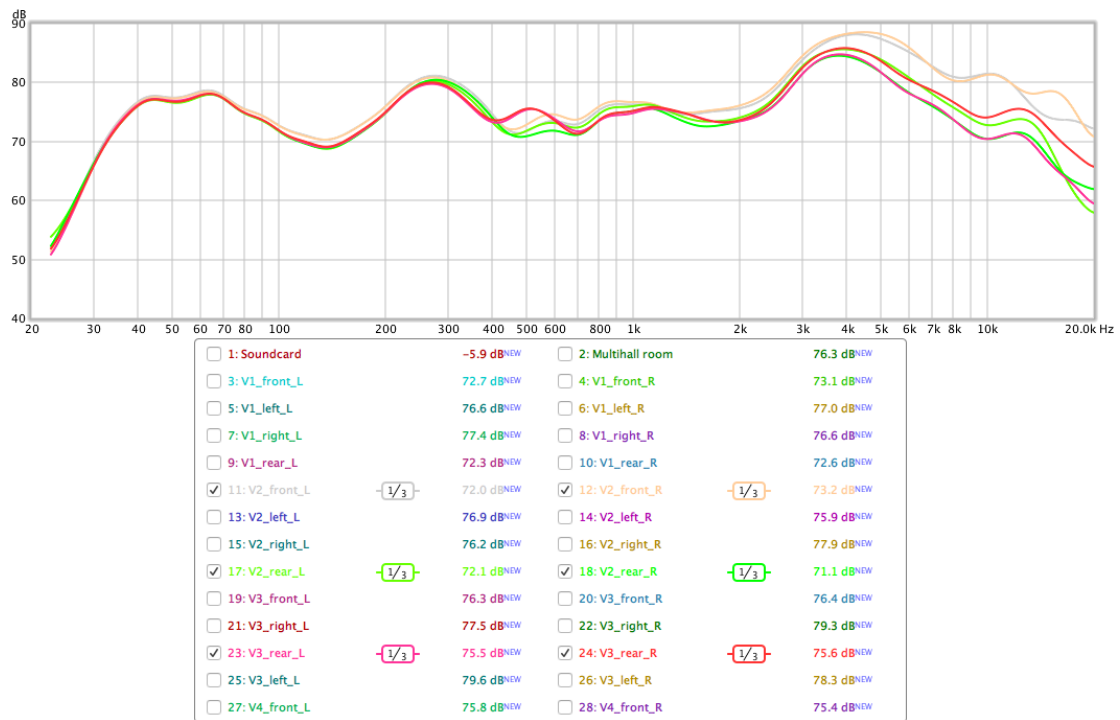
kanaler vid sidorna av ihålligheten och bakom öronen lämnas dock öppna för att lättare kunna montera mikrofoner och kablage.

Sedan görs nya mätningar med isoleringen på plats, dessa jämförs sedan med mätningarna från version 2, mätning med isolerad skarv (V2):



Figur 12. V1 – V2 – V3 medeltal av mätningar från alla riktningar.

Den höjning som kring 500-550 Hz som kan ses på medelkurvan från mätning V3 i Figur 12 ovan förstärks mest vid de enskilda mätningarna bakifrån på mannequinmikrofonen (gradtal 180). I Figur 13 nedan kan man utöver den höjningen mätt bakifrån också urskilja hur ytterörats färgning påverkar och dämpar upptagningen av högfrekvenser från 5 kHz uppåt (Gerzon 1975 s. 2-3, Potisk 2015 s. 3).



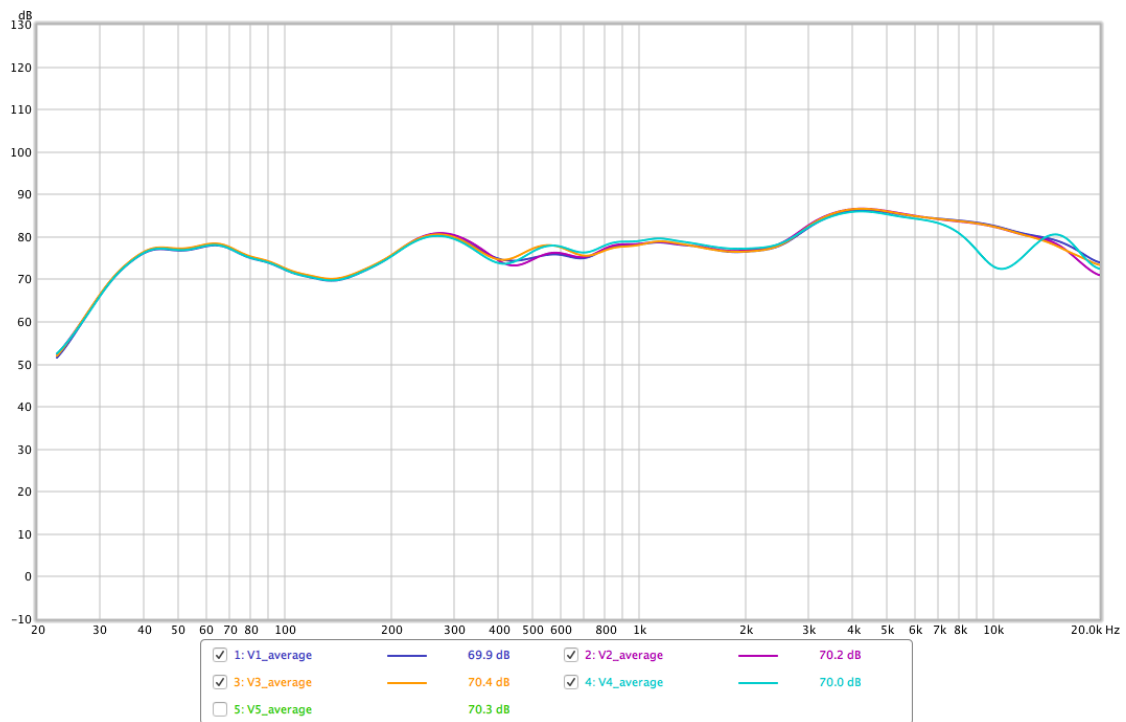
Figur 13. V2 – V3 mätningar bakifrån, förändring i styrka kring 500-550 Hz samt skillnad i frekvensupptagning framifrån och bakifrån vid V2 mätning.

### 3.3 Skede 3 – slutlig huvudform



Figur 14. Version V4, huvudformen förbättrad och hårda kanter och vinklar bortslipade.

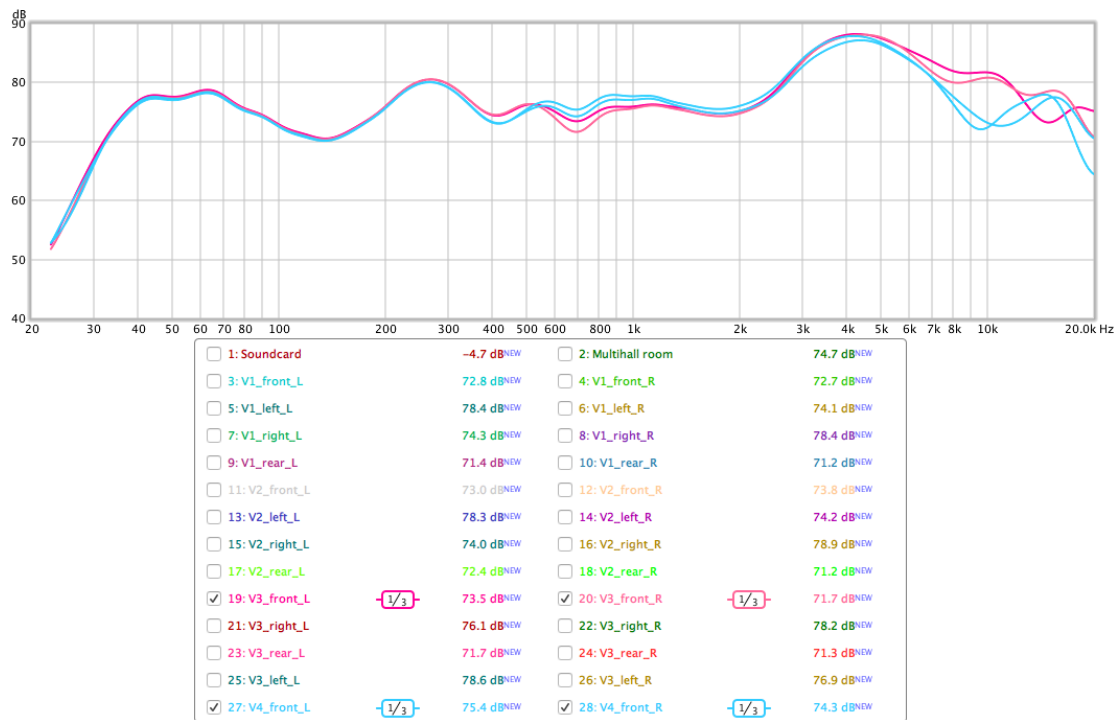
I skede 3 förfinas huvudformen för att närmare motsvara ett människohuvud. Hårda kanter och vinklar slipas ned för att ge en mjukare huvudform och skapar version 4 (V4) av mannequin-mikrofonen. Mätningar av V4 görs med samma mätningssprocedur som tidigare och jämförs mot föregående version (V3).



Figur 15. V1 – V2 – V3 – V4 medeltal av mätningar från alla riktningar

I detta skede ser man en markant förändring i upptagningen av höga frekvenser mellan V3 och V4; en sänkning i form av en grop som börjar kring 6 kHz och uppgår till nästan 10 dB vid 11 kHz har ändrat sedan version 3.

Utöver detta kan man i de enskilda kurvorna mäta framifrån urskilja en liten utjämning på ca. 2dB vid 700 Hz (se Figur 16 nedan), denna utjämning är dock så liten att den vid uträkning av medelkurvan för V4 jämnats ut av mätningarna från andra riktningar.



Figur 16. Förändring i frekvensupptagning vid mätningar framifrån mellan V3 och V4.

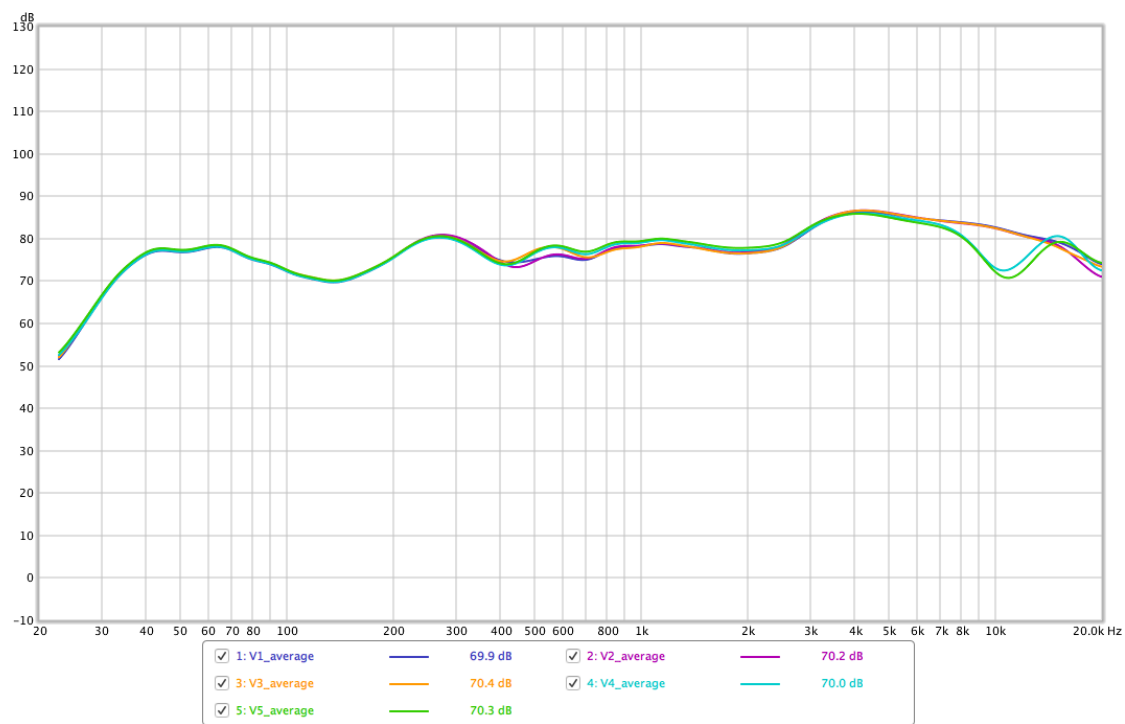
### 3.4 Skede 4 – slutlig version med gummi-ytbehandling



Figur 17. Version V5, mannequimmikrofonen ytbehandlat med gummimassa Dinitrol 447 Protect Super.

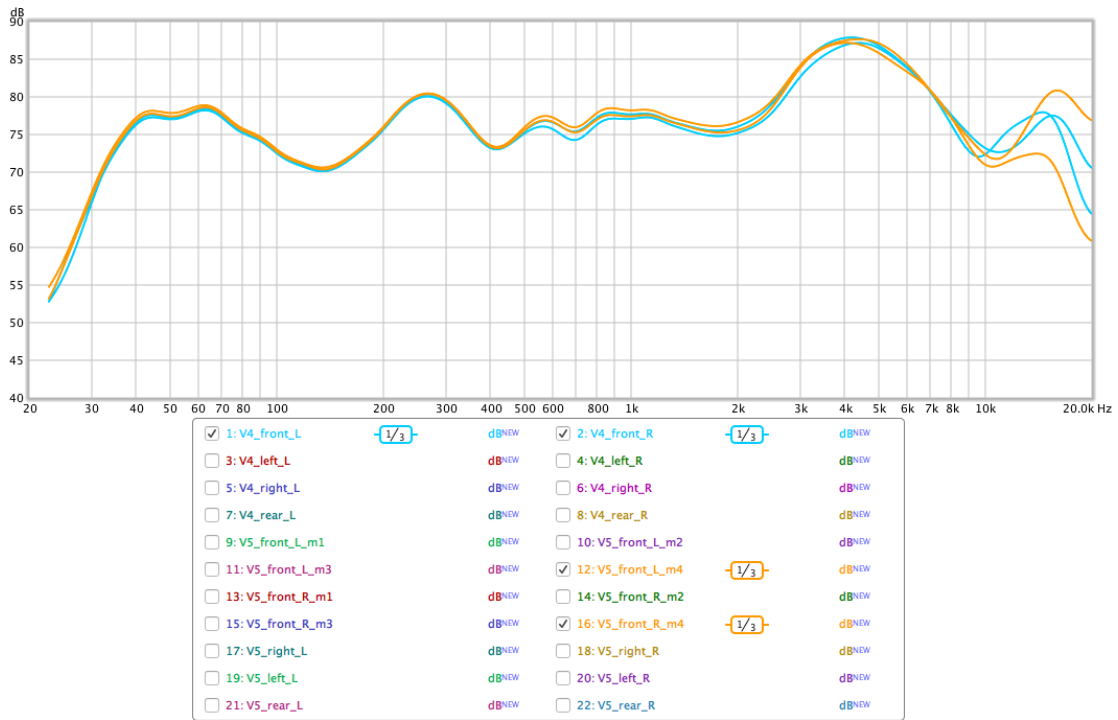
I skede 4 görs de sista förändringarna i konstruktionen, ytbehandling av träytan. För ytbehandlingen används Dinitrol 447 Protect Super som används inom bilindustrin som stenskottsskyddsmassa. Massan är gummibaserad, elastisk och slitstark och ger huvudet en yta som är mjukare än den råa träytan. Mätningarna görs sedan igen enligt samma

procedur som tidigare, som Figur 18 nedan visar har dock ytbehandlingen föga inverkan på frekvensresponsen.



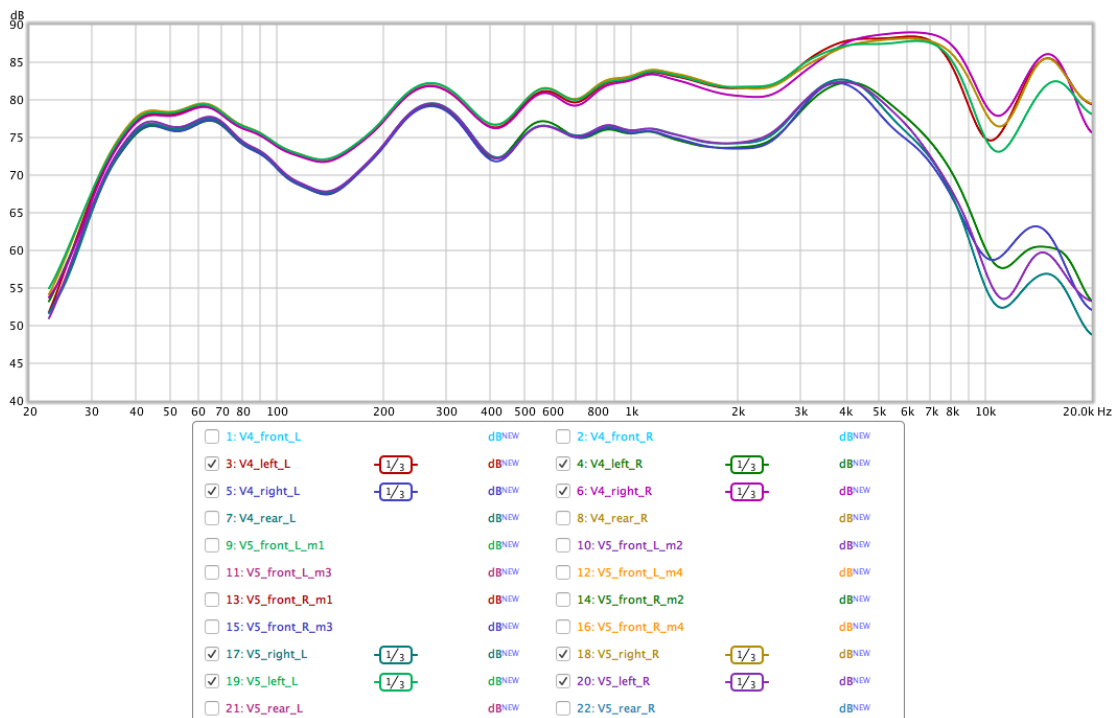
Figur 18. Jämförelse av medelkurva från alla olika mätningssessioner från V1 till slutlig version, V5.

Ser man närmare på skillnader i mätningarna mellan V4 och V5 rakt framifrån (gradtal 0) kan samma sak konstateras; Ytbehandlingen har en försumbar betydelse för frekvensresponsen. Dock bör noteras att detta experiment inte närmare undersöker eller analyserar huruvida ytbehandlingen påverkar upptagning då det kommer reflektioner och efterklang.

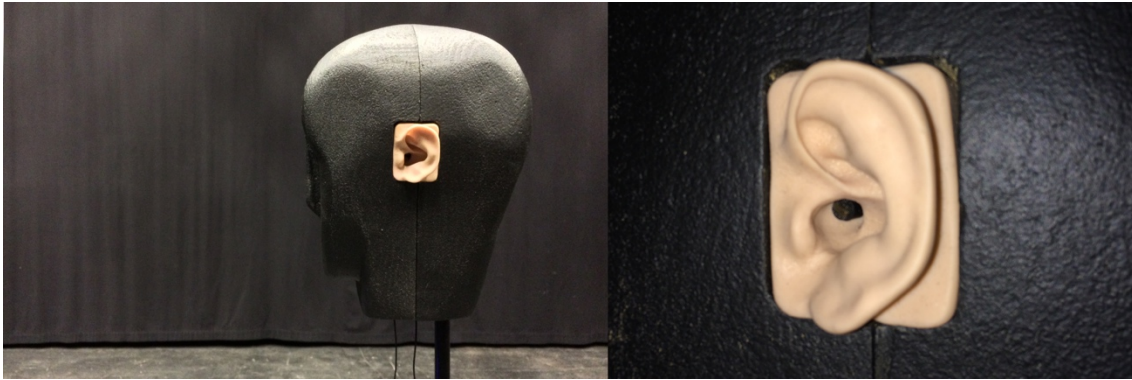


Figur 19. Jämförelse av V4 och V5 mätningar framifrån.

Ser man närmare på mätningarna som görs från sidorna av huvudet för V4 och V5, dvs. vid gradtal 90 och 270, kan man också konstatera att skillnaden före och efter ytbehandlingen har föga effekt på frekvensresponsen.

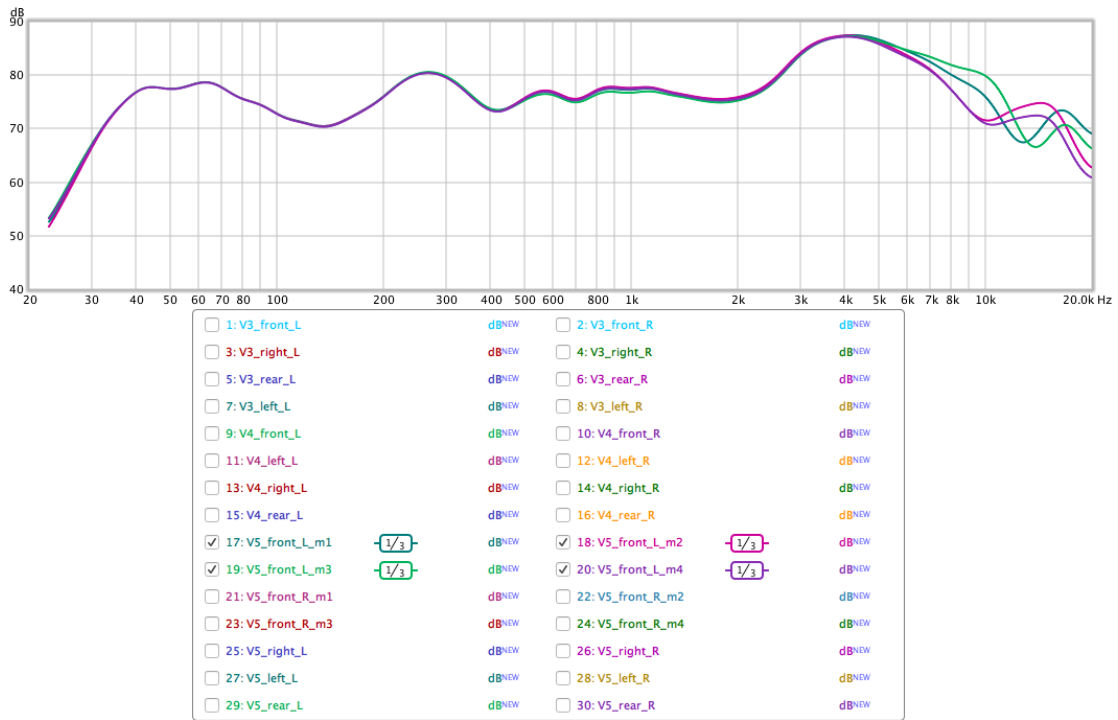


Figur 20. Jämförelse av samtliga mätningar från sidorna (gradtal 90 och 270) på V4 och V5.



*Figur 21. Detalj av öronplacering samt DPA kapselns positionering i ytterörat.*

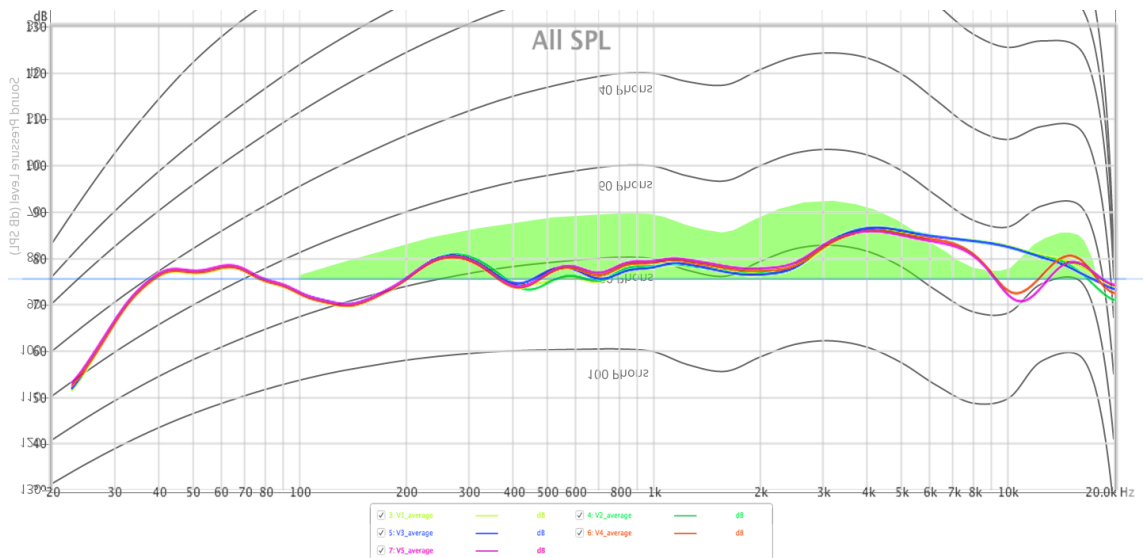
Viktigt att notera på mätningarna ovan är dock den variation som förekommer i frekvensresponsen ovanför 10 kHz. Detta undersöktes vidare och efter att ha justerat mikrofonkapselns placering inne i ytterörat upptäcktes, att den markanta förändring av frekvensresponsen som uppkom efter att huvudformen förbättrats från V3 till V4 (dvs. en sänkning som startade vid 6 kHz och uppgår till ca. 10 dB vid 11 khz) kan flyttas högre och lägre, och ändrar utformning beroende på hur långt in i örat mikrofonkapseln sitter monterad. Generellt kan konstateras att om mikrofonkapseln placeras längre in i ytterörat flyttas sänkningen neråt i Hertz. Detta kan ses i figur 22 där kapseln sitter monterad längre in i ytterörat i mätning nr. 2 (V5\_front\_L\_m2) och nr. 4 (V5\_front\_L\_m4) än i mätning nr. 1 (V5\_front\_L\_m1) och nr. 3 (V5\_front\_L\_m3).



Figur 22. Samband mellan frekvensupptagning av höga frekvenser och DPA kapselns placering i ytterörat.

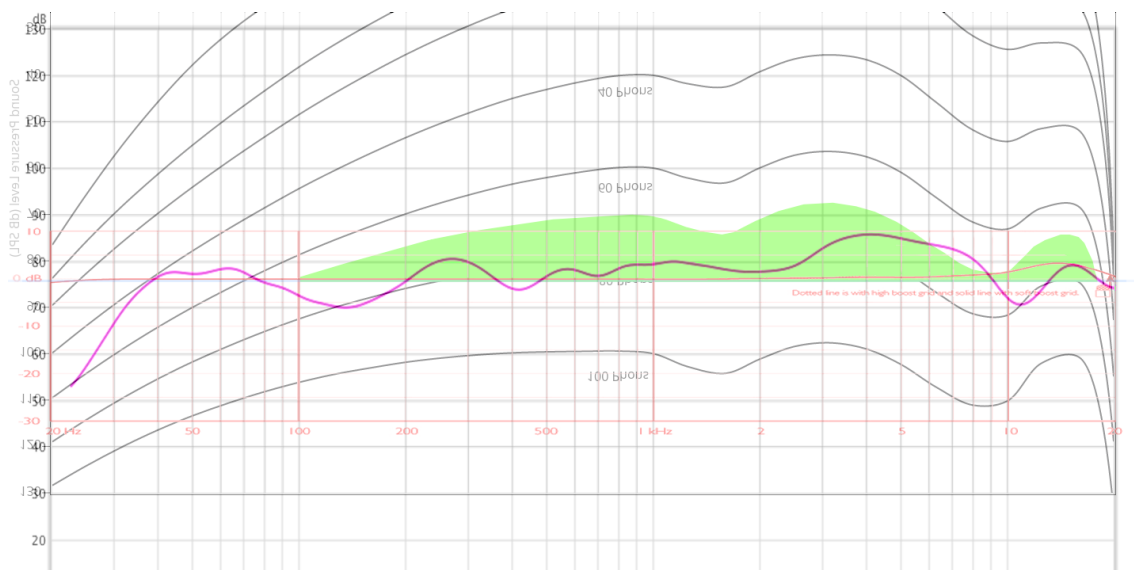
### 3.5 Resultat vägt mot experimentets mål

Slutligen, för att se hur de olika versionerna av mannequin-mikrofonens frekvensrespons faller samman experimentets mål, placeras i Figur 23 mätningarnas medelkurva in på Figur 3 och ger följande resultat:



Figur 23. Medelkurvor från respektive mätningssessioner i relation till experimentets mål.





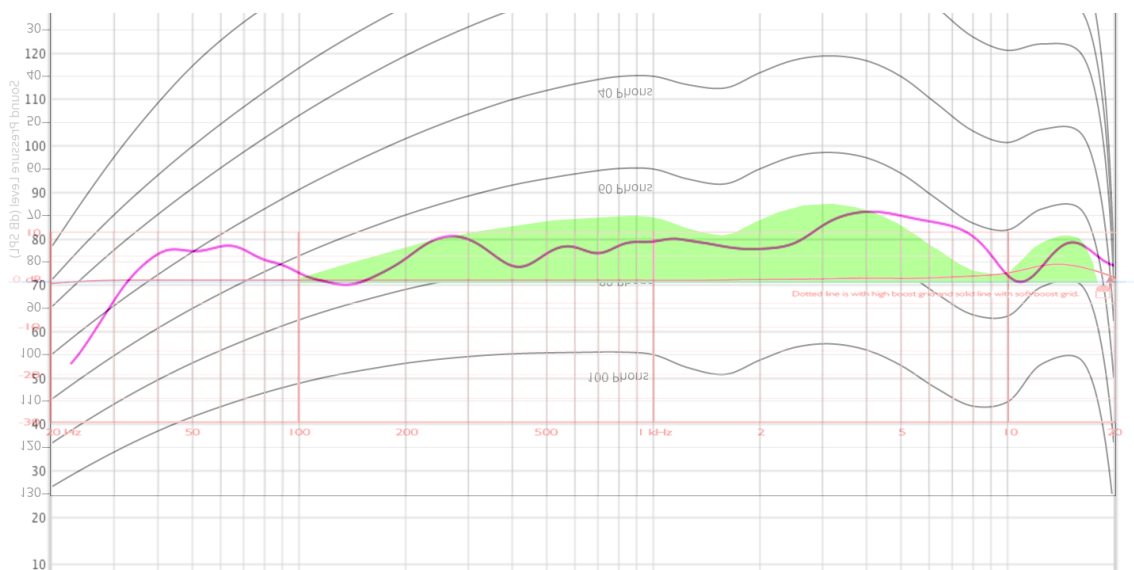
Figur 24. Medelkurva från slutligt mannequin huvud V5 ( $V5\_average$ ) i relation till experimentets mål.

## 4 DISKUSSION

Mätningarna visar att utformningen och konstruktionen av mannequin-mikrofonen har en viss inverkan på frekvensresponsen. Dock förväntade jag mig att skillnaderna mellan V1 och V5 i området 500–5000 Hz skulle vara större och att förändringarna i form och konstruktion skulle ha större effekt. Speciellt förväntade jag mig en större förändring i detta område när huvudformen ändrades mellan V3 och V4, men denna ändring hade sist och slutligen endast en inverkan på upptagning av frekvensområdet 6–16 kHz.

Även om man i mätningar från en specifik riktning ställvis kan urskilja större förändringar, försummas de när man räknar ut de slutliga medelkurvorna. Granskar man figur 23 ovan är skillnaderna i medelkurvan mellan V1 och V5 väldigt små med egentliga avvikelser endast i mellanregistret vid 400–600 Hz.

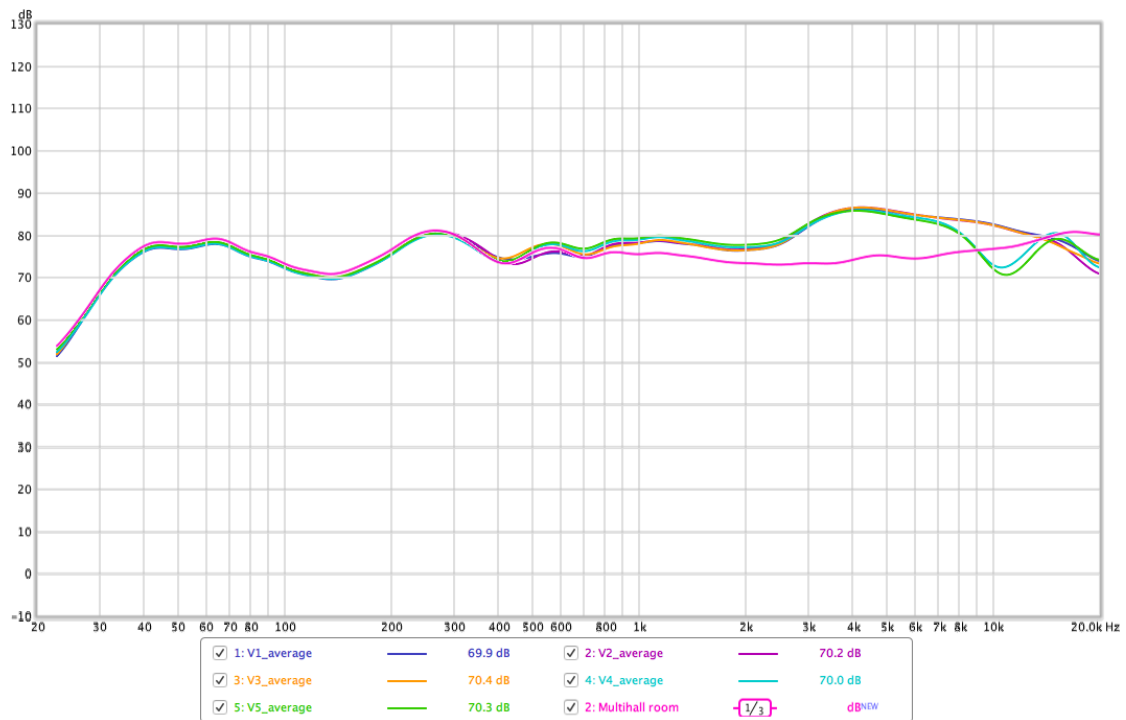
För att väga upp nivåskillanden, som trots att mätningarna gjorts vid 83 dBC SPL uppstår när man ställer mätningarna mot experimentets målområde i figur 24, har medelkurvan, i figur 25 nedan, vilken visar slutlig version V5 av mannequin-mikrofonen höjts med 5 dB.



Figur 25. Medelkurva från slutligt mannequin huvud V5 (*V5\_average*), justerad +5dB för att närmare motsvara det valda området för experimentets mål.

I figur 25 ser att slutlig frekvensrespons, trots att den inte faller helt inom ramarna utsatta för experimentet, ändå är inom relativt nära räckhåll. Frågan är huruvida fortsatta förändringar i konstruktion och placering, speciellt placeringen av mikrofonkapseln i ytterörat, ännu kunde justera upptagningen av höga frekvenser så pass mycket att man kunde få området 4 – 10 kHz att falla inom de utsatta ramarna. Om inte, så kan en som tidigare konstaterats DSP processor kopplas in eller byggas in i huvudet för att på digital väg korrigera detta.

Variationen i det lägre mellanregistret och basen är en del av rummets återgivning och påverkan. Detta kan härledas från de mätningar som gjordes med ECM8000 kalibreringsmikrofonen i början av experimentet, som följer samma mönster som mätningarna som gjorts vid respektive skede av experimentet med mannequin-mikrofonen (Figur 26).



Figur 26. Mätning av multihallen med ECM8000 kalibreringsmikrofon jämfört med medelkurvor från experimentet olika skeden.

Således kan man anta, att även om mätutrymmet inte ger en rak frekvensåtergivning i detta område så torde mannequin-mikrofonen ha en ännu rakare frekvensåtergivning än vad medelkurvorna visar. Det vore intressant att göra en mätning av V5 i ett ekofritt rum för att få en frekvensresponskurva med total avsaknad av rummets påverkan.

Den största oklarheten, vilken också gör att jag inte kan konstatera att V5 av mannequin-mikrofonen är den slutliga versionen, är att det är omöjligt att placera DPA mikrofonkapslarna på samma ställe i bägge öron och också väldigt svårt att montera dem på samma position som tidigare om de plockas bort emellan. Som konstaterades i 3.4 så varierar upptagningen av frekvens ovanför 10 kHz rejält beroende på kapselns position i ytterörat. Öronen som används är gjorda av en typ av flexibelt silikongummi och det finns således ingen möjlighet att göra en fast placering för mikrofonkapseln, placeringen varierar litet från gång till gång pga. det flexibla materialet.

En möjlighet skulle vara att permanent limma fast dem i öronen. Detta borde isåfall göras samtidigt som mätningar utförs för att få exakt och likadan placering i både höger och vänster öra på mannequin-mikrofonen.

Jag anser att som en fortsättning på experimentet och projektet skulle nästa skede vara att fokusera på stereobalansen och försöka hitta ett sätt att kunna replikera en exakt placering av mikrofonkapslarna i ytteröronen, och således få en mer eller mindre identisk frekvensresponskurva för vänster och höger kanal. I och med problemet med placeringen av mikrofonkapslarna är skillanderna mellan vänster och höger kanal ännu för stora. Därefter skulle jag försätta med att samla in subjektiva synpunkter och åsikter gällande kvaliteten på material inspelat med mannequin-mikrofonen och åsikter om hur bra detta upplevs ge en trovärdig representation av verkligheten, förslagsvis i form av en kvalitativ fallstudie.

Baserat på mätresultaten kan konstateras att V5 av mannequin-mikrofonen är närmare isofonkurvan och människans hörsel än prototypen som projektet startade med. Jag anser den också kvalificera som en fungerade, användbar binaural mikrofon. Dock kan den p.g.a. ovan diskuterade punkter däremot ej klassas som färdigställd eller slutgiltig.

## KÄLLOR / REFERENCES

Babylon Translation. 2017, Översättning online [online] Tillgänglig: <http://oversattning.babylon-software.com/engelska/to-svenska/binaural/> Hämtad 18.4.2018

Hooke Audio. 2017a, *The History of Binaural Audio, Part I: The First Experiments, 1881-1939*. [online] Tillgänglig: <https://hookeaudio.com/blog/2017/07/27/the-history-of-binaural-audio-part-1/> Hämtad 14.2.2018

Hooke Audio. 2017b, *The History of Binaural Audio, Part II: The Resurgence, 1940-2000*. [online] Tillgänglig: <https://hookeaudio.com/blog/2017/08/01/the-history-of-binaural-audio-part-ii-the-resurgence-1940-2000/> Hämtad 14.2.2018

Kall, Alex. 2011, *A Brief History of Binaural Audio*. 16. [online] Tillgänglig: <http://www.kallbinauralaudio.com/a-brief-history-of-binaural-audio/> Hämtad 14.2.2018

Ganz, Cheryl. 2008, *Chicago World's Fair: A Century of Progress*, Chicago: University of Illinois Press, s. 78 –79. [online] Tillgänglig: <https://books.google.ca/books?id=GYXD8t4DDoIC> Hämtad 14.2.2018

Kolo, Kris. 2017, *Virtual Reality: The Next Generation Of Education, Learning and Training*, Forbes Agency Council [online] Tillgänglig: <https://www.forbes.com/sites/forbesagencycouncil/2017/12/13/virtual-reality-the-next-generation-of-education-learning-and-training> Hämtad 15.2.2018

Féret, Quentin. 2017, *Binaural Audio : How 3D audio hacks your brain* [online] Tillgänglig: <https://arvrjourney.com/binaural-audio-how-3d-audio-hacks-your-brain-a3de0ceb4196> Hämtad 15.2.2018

*Room EQ Wizard – Features in detail*. 2016. [online] Tillgänglig: <https://www.roomeqwizard.com/features.html> Hämtad 14.2.2018

Stan, Guy-Bart, Embrechts, Jean-Jacques & Archambeau, Dominique. 2002, Sound and Image Department, University of Liege. *Comparison of different impulse response measurement techniques*. [online] Tillgänglig: <http://www.mon-tefiore.ulg.ac.be/~stan/ArticleJAES.pdf> Hämtad 14.2.2018

Katz, Bob. 2002, *Mastering Audio: The Art and The Science*, Miami: Focal Press.

*DPAMicrophones.com – 4060 MINIATURE OMNIDIRECTIONAL MICROPHONE*. [online] Tillgänglig: <https://www.dpamicrophones.com/dscreet/4060-series-miniature-omnidirectional-microphone> Hämtad 12.2.2018

*Plot.ly – Haohailiu: Equal Loudness Contours (ISO 226-2003)*. [online] Tillgänglig: <https://plot.ly/~haohailiu/5> Hämtad 12.2.2018

*DoctorProAudio.com – Fletcher-Munson equal loudness*. [online] Tillgänglig: [http://www.doctorproaudio.com/doctor/temas/ref\\_fletcher\\_en.htm](http://www.doctorproaudio.com/doctor/temas/ref_fletcher_en.htm) Hämtad 12.2.2018

Izhaki, Roy. 2018, *Mixing Audio: Concepts, Practices, and Tools – Third Edition*, , Fig. 2.1. New York: Routeledge [online] Tillgänglig: <https://books.google.fi/books?id=h6Q5DwAAQBAJ> Hämtad 15.2.2018

Stevens, Stanley Smith. 1986, *Psychophysics: Introduction to Its Perceptual, Neural and Social Prospects*, New York: Transaction Publishers, Fig. 18. [online] Tillgänglig: <https://books.google.fi/books?id=i8s3DwAAQBAJ> Hämtad 15.2.2018

Gerzon, Michael. 1975, *Studio Sound, Vol. 17*. [online] Tillgänglig: <https://www.michaelgerzonphotos.org.uk/articles/Dummy.pdf> Hämtad 15.2.2018

Carterette, Edward C. & Friedman, Morton P. 1974, *Psychophysical Judgement and Measurement*, New York: Academic Press Inc., Fig. 18. [online] Tillgänglig: <https://books.google.fi/books?id=i8s3DwAAQBAJ> Hämtad 15.2.2018

Culling, John F & Dare Helen. 2017, *Binaural Loudness Constancy*. [online] Tillgänglig: [https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-319-25474-6\\_8.pdf](https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-319-25474-6_8.pdf) Hämtad 15.2.2018

Gasson, James. 2014, *Binaural Recording*. [online] <https://jamesgasson.wordpress.com/2014/11/15/binaural-recording/> Hämtad 15.3.2018

Glenn D. White, Gary J. Louie. 2011, *The Audio Dictionary: Third Edition, Revised and Expanded*. [online] <https://books.google.fi/books?id=L38MrvScG3gC&pg> Hämtad 15.3.2018

Potisk, Tilen. 2015, *Head-Related Transfer Function*, University of Ljubljana, Faculty of Mathematics and Physics. [online] [http://mafija.fmf.uni-lj.si/seminar/files/2014\\_2015/Seminar\\_Ia\\_Head-Related\\_Transfer\\_Function\\_Tilen\\_Potisk.pdf](http://mafija.fmf.uni-lj.si/seminar/files/2014_2015/Seminar_Ia_Head-Related_Transfer_Function_Tilen_Potisk.pdf) Hämtad 19.3.2018

Bharitkar, Sunil & Kyriakakis, Chris. 2006, *Immersive Audio Signal Processing*, Springer Science+Business Media LLC. [online] Tillgänglig: <https://books.google.fi/books?id=P6ndOChbFZEC> Hämtad 23.3.2018

Vercelli, Marcelo. 2010, *Performance Optimization of Speakers and the Listening Space*. [online] [http://www.eventelectronics.com/downloads/studioeq/101105\\_StudioEQ\\_White\\_paper.pdf](http://www.eventelectronics.com/downloads/studioeq/101105_StudioEQ_White_paper.pdf) Hämtad 23.3.2018

Woodhouse, Jim & Davis B. Evan. 2010, *Notes on Acoustical Measurement for Violin Makers and Researchers* [online]

<http://www2.eng.cam.ac.uk/~jw12/JW%20PDFs/Notes%20on%20acoustical%20measurement.pdf> Hämtad: 23.3.2018