Intelligent høreværn

P2 PROJEKT 2011

GRUPPE B345

SCHOOL OF INFORMATION
AND COMMUNICATION TECHNOLOGY
ELEKTRONIK & IT
AALBORG UNIVERSITET

D. 26 MAJ 2011

AALBORG UNIVERSITET

School of Information and Communication Technology
Strandvejen 12-14
Telefon 99 40 97 30
Fax 99 40 97 25
http://www.tnb.aau.dk

Titel: Intelligent høreværn
Tema: Dynamiske elektroniske systemer
Projektperiode: d. 1. feb. - d. 26. maj. 2011.
Projektgruppe: B345
Deltagere:

Bjarni Geir Pétursson

Casper Holst Laustsen

Christian Køcks Lykkegaard

Jacob Møller Hjerrild Hansen

Jesper Bloch Hansen

Per Bruus Nielsen

Hovedvejleder: Per Rubak
Bivejleder: Karl Sperling

Oplagstal: 10
Sidetal: 96
Bilagsantal: 3 siders appendix og 1 CD vedlagt

Synopsis:

Som konsekvens af høreskader og dertil følgende gener, arbejdstab og personlige omkostninger, beskæftiger denne rapport sig med problemstillinger og løsninger til konstruktion af et intelligent høreværn.
Resultater fra informationssøgning, kvalitative samt kvantitative interviews, viser at der er et behov for nytænkning og forbedringer af arbejdsmarkedets anvendelse og holdning til høreværn.
En funktionsdygtig prototype er udviklet og fremstillet. Det tekniske design er dokumenteret ved hjælp af lineært kredsløbsteori, simuleringer, målinger og laboratorieforsøg.
Høreværnet har en elektronisk filtrering, med et pasbånd på 300Hz - 3kHz, hvor øvre knækfrekvens manuelt kan vælges til 2kHz. For at optimere taleforståeligeheden, er filteret designet til at følge Butterworth karakteristikken. Overstiger volumen i ørekoppen 80dB(A), reguleres volumen tilbage til et niveau på 80dB(A). Brugeren kan indstille volumen efter eget ønske, dog ikke højere end et niveau på 80dB(A). Høreværnet begrænser støjimpulser til 98.86dB(C).

Rapportens indhold er frit tilgængeligt, men offentliggørelse (med kildeangivelse) må kun ske efter aftale med forfatterne.

Forord

Denne rapport er udarbejdet af studerende på 2. semester ved Elektronik og IT på Aalborg Universitet. Temaet for dette P2-projekt er "Dynamiske elektroniske systemer"med emnet Intelligent Høreværn. Projektet fokuserer på konstruktionen af et analogt, elektrisk høreværn som opfanger, behandler og afspiller lyd, med det formål, at øge brugen af høreværn, for dermed at undgå høreskader.

Tak til til John Larsen for at medvirke i interview, til medarbejderne på Stiholt A/S for at deltage i spørgeskemaundersøgelsen, og til Junilyd for udlån af lydstudie.

Læsevejledning

Rapporten henvender sig til vejledere og studerende indenfor School of Information and Communication Technology. Rapporten er opbygget i fire sektioner. En indledning, en problemanalyse, en teknisk løsning, samt en konklusion og perspektivering. Indledningen giver en kort introduktion til projektet. I problemanalysen dokumenteres samfundsmæssige konsekvenser af høreskader og problemer vedrørende brug af høreværn i støjfyldt miljø. Problemanalysen berører desuden relevante metoder og resultater, der fører frem til en problemformulering.
I den tekniske løsning beskrives løsningerne der er anvendt, og de metoder, principper og teorier der ligger til grund for løsningen. Den tekniske løsning arbejder direkte udfra problemformuleringen. For overblik er der vedlagt et samlet kredsløbsdiagram på bilag B.0.9
Den sidste sektion er en konklusion på det færdige produkt og en perspektivering af dette.

Igennem rapporten er der kildehenvisninger, som henviser til en litteraturliste bagerst i rapporten, kapitel 12.0.8. Kildehenvisningerne angives efter Harvard-metoden, og teksten refereres ved; [Efternavn, år]. Bøger er angivet med forfatter, titel, udgave og forlag. Internetsider er angivet med forfatter, titel og dato. Internetsider er desuden downloadet og lagt ved på CD, hvor den aktuelle dato fremgår. Figurer, tabeller og ligninger er nummereret i henhold til hvilket kapitel de befinder sig i.

Indhold

1 Indledning **1**
- 1.1 Initierende problem . . . 2
- 1.2 Metoder til problemanalysen . . . 3

I Problemanalyse **5**

2 Den Menneskelige Hørelse **6**
- 2.1 Akustiske grundbegreber . . . 6
- 2.2 Ørets anatomi . . . 7
- 2.3 Ørets følsomhed og grænseværdier . . . 9

3 Konsekvenser af høreskader **12**
- 3.1 Konsekvenser for en høreskadet . . . 12
- 3.2 Brugen af høreværn i støjfyldt miljø . . . 13

4 Eksisterende løsninger **19**

5 Lovgivning og standarder **25**
- 5.1 Lovgivning til høreværn . . . 25
- 5.2 Lovgivning til elektronikdelen . . . 27
- 5.3 Miljø og etiske retningslinier . . . 29

6 Problemformulering **30**

7 Kravspecifikation **31**
- 7.7 Valgt løsning . . . 35
- 7.8 Afgrænsning . . . 35
- 7.9 Anvendt metode til løsningen . . . 35

II Teknisk løsning **38**

8 Systemdesign **39**
- 8.1 Løsningsmuligheder . . . 39
- 8.2 Valgt System . . . 40
- 8.3 Mikrofon og forforstærker . . . 41
- 8.4 Filter . . . 47
- 8.5 Dynamisk regulering . . . 58
- 8.6 Udgangsforstærker . . . 63
- 8.7 Klipper . . . 67
- 8.8 Højttalerenhed . . . 67
- 8.9 Strømforsyning . . . 69

9 Implementering **74**

10 Accepttest **77**

III Konklusion og perspektivering **79**

11 Konklusion **80**

12 Perspektivering **81**

Litteratur **82**

Appendix A Taleforståelighed **88**
A.1 Filterundersøgelse 89

Appendix B Bilag på CD **91**

KAPITEL 1

Indledning

Op mod en sjettedel af Europas befolkning mellem 18 og 64 år lider af nedsat høreevne og/eller tinnitus [Shield, 2006]. De fleste har pådraget sig skaden gennem arbejdslivet, hvor høje lydniveauer fra kilder som buldrende maskiner, højt musik eller andet højlydt støj, er typiske årsager til skaden. Det er støjkilder mange personer må leve med dagligt. Mange har, som konsekvens deraf, problemer med at begå sig i dagligdagen. Det bliver vanskeligere at orientere og koncentrere sig, og kommunikationen med andre personer bliver besværligt.

Tabel 1.1 viser andelen af den europæiske befolkning der lider af større eller mindre grad af hørenedsættelse. Tallene er estimeret på baggrund af undersøgelser fra Sverige, Danmark, Finland, Italien, og Storbritannien. WHO (World Health Organisation) har defineret graden af høretab efter BEHL skalaen (Better Ear Hearing Loss), hvor mildt høretab er 25-40dB BEHL, moderat høretab er 41-60dB BEHL, svært høretab er 61-80dB BEHL og markant høretab er 81+ dB BEHL [Smith, 1991].

	Befolkning i Europa	Mildt høretab	Moderat høretab	Svært høretab	Markant høretab
Antal personer [mio]	450.05	46.81	20.70	3.15	0.9
Procent	100	10.4	4.6	0.7	0.2

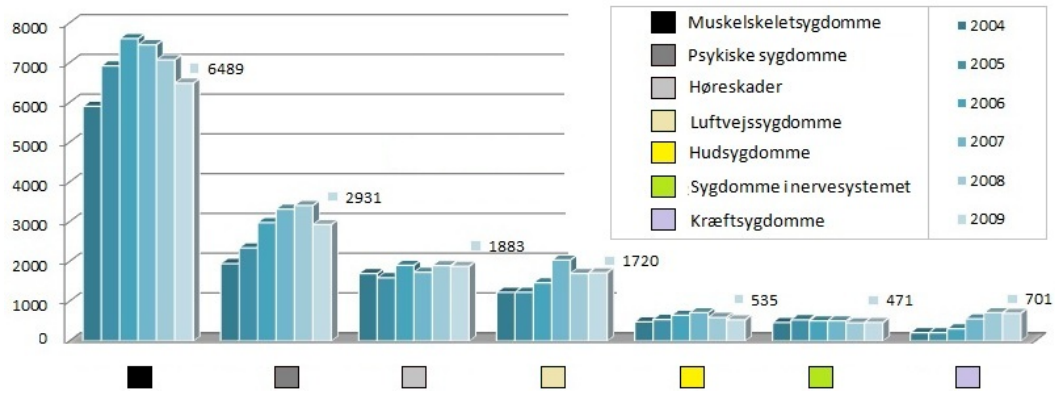
Tabel 1.1: Andel af den europæiske befolkning mellem 18-64 år som lider af høretab og graden af høretab. [Shield, 2006]

Det konkluderes ud fra tabel 1.1, at ca. 16% af den europæiske befolkning lider af større eller mindre grad af høretab. De hyppigste årsager til høretab er alderdom og arbejde i støjfyldte miljøer [Shield, 2006]. Som følge deraf, ses der på hvilken effekt det har på arbejdsmarkedet. [Shield, 2006] konstaterer, at arbejdsløsheden blandt døve og høreskadede personer er 15%, sammenlignet med 6% af den ikke høreskadede befolkning. Det bemærkes særligt, at iblandt de 25-45 årige er 22% af de høreskadede ikke i arbejde. Denne aldersgruppe defineres som særligt økonomisk aktive, hvoraf det følger, at de har fire gange så stor risiko for at blive arbejdsløs som en ikke høreskadet.

Det kan dermed konkluderes, at høreskader har en indvirkning for andelen af personer i arbejde, og forskellen bliver mere markant desto sværere høreskaderne er.

Det er derfor interessant at se på forholdet mellem høreskader og andre skader/sygdomme, og dermed hvilken arbejdsskade der medfører de største konsekvenser på arbejdsmarkedet. Også her viser det sig, at lidelse relateret til øret er repræsenteret talstærkt. Det skal dog bemærkes, ifølge Arbejdstilsynets rapport [Arbejdstilsynet, 2010], at antallet af høreskader er svært at estimere korrekt, da ikke alle høreskader, som følge af arbejde i støjfyldt miljø, anmeldes. Det er derfor sandsynligt, at tallene ligger højere end figur 1.1 viser. Denne viser anmeldelser til Arbejdstilsynet inddelt efter typen af skade. Det bemærkes fra figur 1.1, at høreskader er den tredje mest anmeldte arbejdsskade. Yderligere ses der, at antallet af nye høreskader hvert år ligger stabilt.

Høreskader og andre sygdomme har derfor en økonomisk konsekvens for staten. Denne beregnes i forhold til QALY (Quality Adjusted Life Year), som er et udtryk for den øko-



Figur 1.1: Antal af anmeldte lidelser til Arbejdstilsynet fra 2004 - 2009 [Arbejdstilsynet, 2010].

nomiske værdi af en person per år. Et QALY er baseret på en baseværdi, som er vægtet afhængig af sygdommen, hvilket estimerer omkostningerne for sygdommen per person. Denne baseværdi er i Europa defineret til 44000 euro per person per år [Shield, 2006].

For at finde omkostningerne bruges en faktor mellem $0.05 - 0.25$, afhængig af graden af høreskaden, hvor en højere grad medfører en højere faktor. Omkostningerne inkluderer både omkostninger i forhold til nedsat arbejdsevne for den enkelte, og godtgørelse for skaden. For at beregne de totale omkostninger, ganges faktoren med antallet af personer med samme grad, hvilket igen ganges med de 44000 euro. Tabel 1.2 viser således de samlede årlige europæiske omkostninger for høreskader.

Grad af høreskade	Mild	Moderat	Svær/Markant	Ialt
Omkostninger [mio. euro]	102972	136636	44556	284164

Tabel 1.2: De samlede økonomiske omkostninger for Europa, inddelt efter graden af personens høreskade [Shield, 2006]

.

En teknologi der kan forhindre høreskader, kan være med til begrænse disse omkostninger. De menneskelige konsekvenser og værdier relateret til en høreskade må heller ikke overses.

1.1 Initierende problem

I indledningen er det fremlagt, at en teknologi der kan være med til at forhindre høreskader, kan begrænse antallet af høreskader og dermed begrænse omkostningerne ved høreskader. Det er derfor relevant, at se på følgende problem:

Hvilke faktorer spiller ind når mennesker bliver høreskadet, og hvad kan der gøres for at modvirke disse faktorer?

For at undersøge denne problematik ses på de grundlæggende og umiddelbare begreber omkring lyd, lydens udbredelse, øret og signalvejen til hjernen. I den forbindelse er det relevant, at klarlægge hvornår lyd kan blive skadeligt for øret og for hørelsen. Når lyd bliver

skadeligt, og der alligevel ikke anvendes beskyttelse, påføres mennesker høreskader. Derfor er det interessant, at klarlægge den enkelte persons årsag til ikke at bruge høreværn i en sådan situation. Hvad kan i denne sammenhæng få personen til at anvende sit høreværn, hvis det er til rådighed?

Desuden undersøges konsekvenserne af, at være høreskadet. De nævnte emner vil sammenholdes med teknologier, som er til rådighed til beskyttelse af hørelsen. Ud fra dette opstilles en række krav til løsning af det initierende problem, og dermed dannes der basis for en teknisk problemformulering. Denne løsningsmodel skal naturligvis overholde visse lovkrav, standarder og brugerkrav som også undersøges.

1.2 Metoder til problemanalysen

For at undersøge det initierende problem, bruges der 5 metoder gennem problemanalysen. De 5 metoder er beskrevet i dette afsnit, og det oplyses hvilke afsnit metoden bruges i.

Interessentanalysen
For at finde frem til de interessenter der har indflydelse på det initierende problem, er der udarbejdet en interessentanalyse. Interessentanalysen hjælper med at finde frem til de samfundsgrupper og regulerende midler, der kan påvirke løsningen af problemet. Når interessenterne er fundet, bruges metoden også til at kortlægge deres interesser, indflydelse og ønsker ift. til problemet. Til slut bruges analysen til at prioritere interessenterne efter indflydelse, og kortlægge de interessenter der skal inddrages i problemanalysen. Dermed er interessenterne udgangspunkt for de undersøgelser der er udarbejdet. Interessentanalysen findes under bilag B.0.1.

Skrivebordsanalysen
Skrivebordsanalysen er brugt til at finde sekundære kilder. Skrivebordsanalysen bruges ved, at kilder indeholdende relevant information indsamles. Megen information kan findes ved struktureret læsning i bøger, artikler og netbaseret materiale. I forbindelse med skrivebordsanalysen er det vigtigt at være kildekritisk. Man skal se på forfatteren til kilden, og vurdere om den er troværdig. For at sikre troværdighed kan flere kilder trianguleres. Skrivebordsanalysen anvendes i kapitel 1 til at undersøge problemets omfang, i kapitel 2 til at opbygge baggrundsviden om lyd og øret, i kapitel 4 til at undersøge eksisterende teknologier og i kapitel 5 til at at undersøge retningslinjer og lovgivning til en løsning.

Det semistrukturede kvalitative interview
I problemanalysen benyttes et semistruktureret kvalitativt interview. Et kvalitativt interview har til formål at udlede holdninger og erfaringer fra enkeltpersoner. Det er således vigtigt at være opmærksom på, at der ikke kan udledes en generel tendens fra dette interview. Før interviewet er der udarbejdet en retningslinie, som intervieweren forholder sig til, da interviewet dermed bliver struktureret. Intervieweren har før selve interviewet opnået en faglig viden omkring emnet, hvilket gør intervieweren i stand til at stille uddybende og meningsfulde spørgsmål. En venlig, men klar og opmærksom attitude, er essentiel for at opnå succes med interviewet. Dette er derfor i baghovedet på intervieweren gennem forløbet. Det er og-

så vigtigt at give respondenten tid til at svare på spørgsmålene. Derfor vil intervieweren holde regelmæssige pauser og ikke lægge ordet i munden på respondenten. Dermed bliver respondenten ikke presset til at svare [Kvale, 1997]. Interviewet indeholder personlige oplysninger. Derfor sendes interviewet og afsnittet i rapporten til godkendelse hos respondenten. På denne måde er det verificeret, at interviewet er korrekt analyseret, og at rapporten ikke indeholder uønskede oplysninger eller misforståelser. Det semistrukturede kvalitative interview bruges i afsnit 3.1, til at kortlægge konsekvenserne for en høreskadet.

Det semistrukturede kvantitative spørgeskema
I problemanalysen benyttes et semistrukturetet kvantitativt spørgeskema. Metoden skal være med til, at indsamle empirisk information [Odense Kommune, 2009], samt skabe et overblik over tendensen af det undersøgte. Et spørgeskema udarbejdet efter den semistrukturerede metode, anvendes ved et interview, hvor spørgeskemaet er grundlaget [Odense Kommune, 2009]. Der skal være plads til uddybning af den adspurgtes svar. Ved at have en interviewer til at gennemgå spørgeskemaet, kan eventuelle misforståelser undgås, men respondenten kan indirekte påvirkes af intervieweren [Kvale, 1997][Odense Kommune, 2009]. Det semistrukturede kvantitative spørgeskema bruges i afsnit 3.2.1, til at undersøge brugen af høreværn i et støjfyldt miljø.

Kravspecifikationen
Til udarbejdelse af kravspecifikationen anvendes SPU-håndbogen [Biering-Sørensen et al., 1988]. Kravspecifikationen danner direkte grundlag for udarbejdelsen af accepttestspecifikationen. Problemanalysen danner baggrund for kravene opstillet i kravspecifikationen. Kravspecifikationen skal indholde følgende grupper af krav:

- Indledning
- Generel beskrivelse
- Specifikke krav
- Eksterne grænseflader
- Krav til ydelse
- Kvalitetskrav
- Andre krav

Kravene i hver af disse grupper skal være korrekte, utvetydige, komplette, konsistente, organiseret efter prioritet/vigtighed, verificerbare, modificerbare og sporbare. Således kan de testes i en accepttest, som er udført i kapitel 10.

Perspektivering
En SWOT-analyse bruges oftest som sammenligner mellem to konkurrerende virksomheder. Metoden kortlægger de styrker, svagheder, muligheder og trusler, som virksomheden har ift. konkurrenten, og giver mulighed for planlægning af strategier, der kan forsøge at rette op på eventuelle negative resultater. Det er valgt at bruge SWOT-analysen, ikke til sammenligning af virksomheder, men til sammenligning af teknologier. SWOT-analysen vil kortlægge fordele og ulemper, hvorved der kan tages hensyn til negative resultater og mulige forbedringer kan kortlægges. Produktet kan ligeledes markedsføres på fordelene. Disse fordele og ulemper ønskes kortlagt i perspektiveringen, se kapitel 12.

DEL I

PROBLEMANALYSE

KAPITEL 2

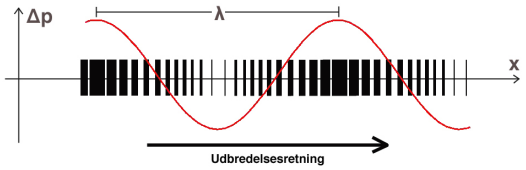
Den Menneskelige Hørelse

Lyd er for mange en abstrakt størrelse, som man hverken kan se eller tage og føle på. Dog benytter de fleste mennesker hørelsen hver dag til at kommunikere og orientere sig. Denne uvished om den fysiske årsag til lyd, kan være medvirkende til uheldige tilfælde hvor folk bliver høreskadet. For at kortlægge eventuelle løsninger til at undgå direkte påvirkning af skadelig lyd, bliver der i dette kapitel klarlagt hvad lyd er. I det følgende vil der blive beskrevet hvordan lyd påvirker øret, hvornår denne påvirkning er skadelig, hvordan lyd måles og med hvilket formål det måles.

2.1 Akustiske grundbegreber

Lyd er trykbølger, som varierer omkring barometerstanden. Barometerstanden er atmosfæretrykket ved havoverfladen. Ved havoverfladen regnes der med et gennemsnitligt tryk på $101.3kPa$ [Holck et al., 2009b].

Dette tryk kaldes en 1 atm (atmosfære). 1 atm er således lydens referencepunkt. Lyden som påvirker membranen/trommehinden i øret, er trykvariationen omkring luftens standardtryk. Denne variation vil i lydens udbredelsesretning bestå af skiftevis en fortætning og en fortynding, og derfor betragtes lyden som en bølge, som kan ses på figur 2.1



Figur 2.1: En ren tone som sinusbølge. Udtrykket $p(x,t) = Acos(\omega t - kx)$ beskriver sammenhængen med [x] som afstand, [t] som tid, [ω] som frekvens og [A] som amplitude. Under bølgen ses et udsnit af trykvariationen i udbredelsesretningen. Bølgetoppen er lig en fortætning [Brixen and Voetmann, 2004].

2.1.1 Lyd som bølger

Som det ses på figur 2.1 er lyd trykbølger. En bølge beskrives ud fra parametrene bølgelængde (λ), hastighed (c), frekvens (f) og amplitude (A). I den sammenhæng skal det nævnes, at lydens hastighed er temperaturafhængig og i atmosfærisk luft gennemsnitligt bevæger sig med en hastighed på 340m/s. For at udregne hastigheden benyttes denne formel:

$$v = 331.5\frac{m}{s} \cdot \sqrt{1 + \frac{t}{273K}} \tag{2.1}$$

Her er t er den målte temperatur i celcius (°C), og $331.5m/s$ er lydens hastighed ved $0°C$ [Dipl.-Ing. Eberhard Sengpiel, 2011]. En bestemt tone defineres ud fra dens frekvens i Hz, altså svingninger pr. sekund. Derudfra kan følgende ligning opstilles, $\lambda = \frac{c}{f}$. Eksempelvis

kan bølgelængden på en 80Hz tone findes således,

$$\lambda = \frac{340\frac{m}{s}}{80\frac{1}{s}} = 4.25m. \tag{2.2}$$

Amplituden [A] udtrykker lydtryksniveauet, se figur 2.1.

2.1.2 dBSPL - enheden for lydtryksniveau

Som nævnt er lyd trykvariationer omkring luftens standardtryk. Når der måles lydtryk, ses der derfor på lydbølgens amplitude. Her ses der på den aktuelle amplitudeværdi, i forhold til den mindste værdi mennesket kan opfatte. Til dette formål anvender man decibelskalaen. Som udgangspunkt arbejdes der med tryk i Pascal, men når der arbejdes med lydtryksniveau, anvendes den nævnte dB-skala som er en logaritmisk omregning af Pascalværdier. Lydtryksniveau (L_p) måles i dBSPL (Sound Pressure Level). Denne skala udtrykkes oftest bare som dB og lydtryksniveau som lydniveau. Denne skala defineres ved, $dB = 20\log(\frac{p}{p_0})$. [$p_0$] er det lydtryksniveau, der er defineret som det svageste, mennesket registrerer ved en 1kHz tone, dvs. at $p_0 = 20\mu Pa$ [Long, 2006]. Denne grænse er således sat som 0dB. Et lyddtryk på 1 pascal kan omregnes til dB således:

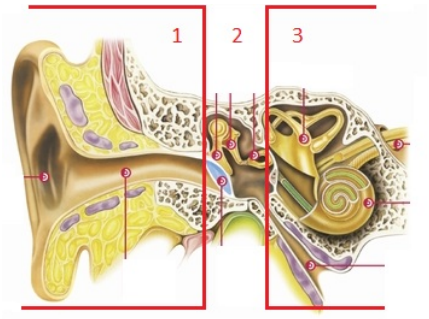
$$20\log(\frac{1Pa}{20\mu Pa}) = 94dB \tag{2.3}$$

Enheden decibel viser således et forhold mellem 2 størrelser og anvendes også i elektriske kredsløb til at udtrykke forstærkninger. En fordobling af lydtryksniveauet svarer til +6dBSPL og en fordobling af spændingsniveauet +6dB. Dermed er der givet en grundlæggende beskrivelse af lyd. Hvordan lyden bliver overført gennem øret til menneskets hjerne, bliver nærmere forklaret i det følgende afsnit.

2.2 Ørets anatomi

Øret er et af menneskets sanseorganer. Høresansen er altid er aktiv. Med en nedsat eller manglende hørelse vil mennesket have svært ved at kommunikere med andre og bevæge sig sikkert rundt i samfundet. Det er muligt at klare sig med nedsat hørelse, og det er også muligt at klare sig med hørelse på kun et øre. Det vil dog være et stort handicap, da de binaurale egenskaber, såsom at retningsbestemme lyde, vil være tabt. Dette afsnit vil beskrive den overordnede virkemåde af øret, og give et indblik i nogle af de skader øret kan påføres ved et for kraftigt lydtryk [Martini et al., 2006].

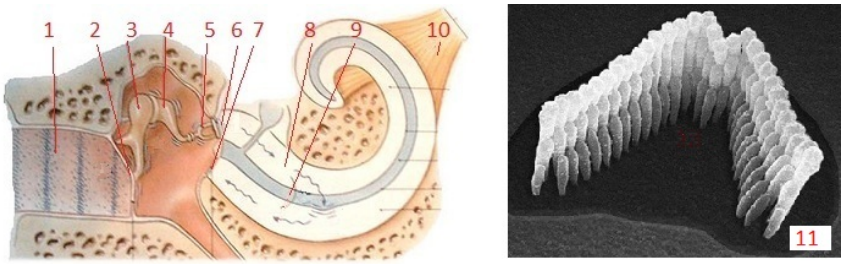
Øret er delt op i tre dele som ses på figur 2.2: Det ydre øre, mellemøret og det indre øre.



Figur 2.2: Ørets inddeling: 1. Ydre øre, 2. Mellemøret, 3. Indre øre [Audionova, 2011]

Det ydre øre består af øremuslingen, som sidder på siden af hovedet og øregangen. Lyden opfanges omkring menneskets hoved med øremuslingen. Lyden ledes af den, ind igennem den ca. 3cm lange øregang ind til mellemøret.

Mellemørets funktion er at transportere og forstærke lyden, som kommer fra det ydre øre. Dette foregår som en mekanisk funktion, der ses på figur 2.3.



Figur 2.3: Ørets indre: 1. Trykændringer, 2. Trommehinden, 3. Hammeren, 4. Ambolten, 5. Stigbøjlen, 6. Ovale vindue, 7. Runde vindue, 8. Cochleartragten, 9. Basilarmembranen, 10. Nerve fra fimrehårene, 11.Fimrehår [Martini et al., 2006; Dangerous Decibels, 2011]

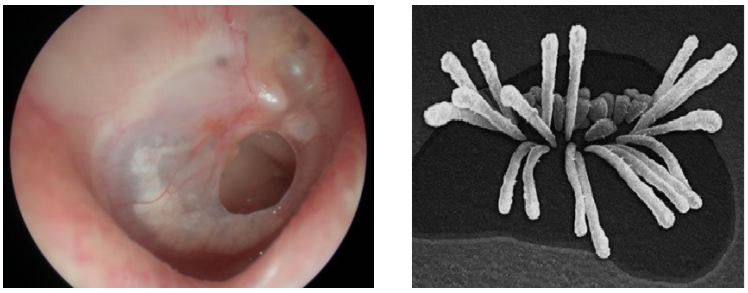
Ved en kronologisk gennemgang af det at høre, er første skridt, at ændringer i lydtrykket, jf. afsnit 2.1, får en membran kaldet trommehinden til at svinge i takt med trykændringerne. Disse svingninger bliver så mekanisk overført i mellemøret af knoglerne: hammeren, ambolten og stigbøjlen igennem det ovale vindue ind i cochleartragten i det indre øre. Grundet en arealforskel, på membranen af trommehinden og det ovale vindue, på 17:1, og en mekanisk forstærkning på 1:3 gange fra knoglerne i mellemøret, er der typisk en forstærkning på 20 gange [Despopoulos and Silbernagl, 2003].

Det indre øres funktion er at omsætte disse svingninger til elektriske signaler, som hjernen kan bearbejde. I cochleartragten, inde i det indre øre, er der fimrehår i basilarmembranen, der virker som en transducer, ses på figur 2.3, som bliver påvirket af trykforskellen mellem det ovale vindue og det runde vindue, ses på figur 2.3. Denne proces får hårene til at bevæge sig frem og tilbage i basilarmembranen og de stimulerer således en nerve, der sender elektriske signaler direkte op til hjernen, der bliver til den lyd mennesket hører.

2.2.1 Akustisk trauma

Øret kan tage skade på flere måder, hvilket resulterer i nedsat hørelse og/eller tinnitus. Tinnitus er vedvarende støj, som den høreskadede person kan høre hele tiden. Dette kan forekomme i større eller mindre grad alt efter skadens omfang, se afsnit 3.1 om konsekvenserne af høreskader.

Ved et for kraftigt vedvarende lydtryk vil fimrehårene i det indre øre bevæges kraftigt og langvarigt, hvilket resulterer i at cellerne udløser en kemisk proces, der danner flere oxidanter end cellen kan tåle. Dette resulterer i at cellen dør. Modsat andre celler i kroppen regenerer fimrehårsceller ikke [Cunningham, 2011]. Resultatet af døde fimrehårsceller er nedsat hørelse. Det er ikke nødvendigvis over hele frekvensspektret, da fimrehårene dækker hver sit frekvensområde. Det er kun dem ved det belastede lydtryk, ved den pågældende frekvens, der bliver berørt. Ved en kraftig lydimpuls kan fimrehårene blive blæst om kuld, som figur 2.4 viser, eller de kan blive blæst helt af. De kan ikke rejse sig eller gro ud igen. Dette kan forårsage tinnitus. En anden form for høreskade, der kan finde sted allerede i mellemøret, er en sprængt trommehinde. Dette forekommer ved voldsomme trykændringer, så som eksplosioner. En sprængt trommehinde ses på figur 2.4. Trommehinden vokser normalt sammen igen, men kan danne arvæv, der nedsætter hørelsen.



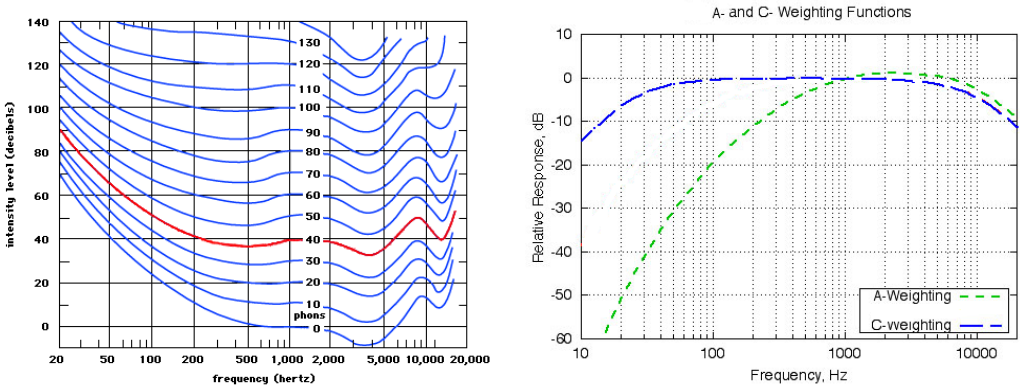
Figur 2.4: Til venstre ses med et otoskop en sprængt trommehinde, til højre beskadigede fimrehår [Raman, 2011; Dangerous Decibels, 2011]

Dette afsnit har givet et indblik i ørets vigtige funktioner, dets virkemåde samt nævnt nogle af de skader dette projekt kan medvirke til at undgå. Næste afsnit giver en nærmere beskrive af hvornår lyd kan blive skadeligt, samt hvornår de nævnte skader kan indtræffe ved støjpåvirkning.

2.3 Ørets følsomhed og grænseværdier

Støj er normalt defineret som uønsket lyd, men i dette afsnit ses der primært på lyd der er skadeligt for det menneskelige øre. F.eks. kan en dryppende vandhane opfattes som støj, hvis man prøver at sove, men er ikke skadeligt for øret. Det menneskelige øre opfatter lydtryksniveauer forskelligt afhængigt af frekvensen. Når der skal måles lydtryksniveau, bruges der derfor filtre der benytter forskellige vægtningskurver. De to mest brugte filtre er dB(A) og dB(C). Disse filtre er lavet ud fra Equal-loudness kurver, se figur 2.5(a).
Equal-loudness kurver viser sammenhængen mellem lydtryksniveauet ved forskellige fre-

kvenser, og hvor kraftigt det opfattes af det menneskelige øre. Til bestemmelse af hvor højt øret opfatter lyden, bruges enheden phon, defineret som $phon = dBSPL$ ved $1kHz$. Phon-skalaen varierer fra dB-skalaen ved alle andre frekvenser, fordi øret ikke opfatter lyd lineært. Phon er således et udtryk for hvor kraftigt, det gennemsnitlige øre opfatter lyden, som et resultat af lydtryksniveauet ved forskellige frekvenser. Som følge af ørets egenskaber, vægtes der forskellige frekvensgange når der måles støj. DB(A)-filteret, som er markeret med grøn på Figur 2.5(b), er designet til at være tilnærmelsesvis ækvivalent med equal-loudnesskurven for 40 phon, som er markeret med rød på figur 2.5(a). Dette betyder at det gengiver et lydniveau der næsten svarer til det øret opfatter, og derfor benyttes et dB(A)-filter ofte til lydmåling [Wolfe, 2010].



(a) Equal-loudness kurver

(b) A- og C- vægtningskurver

Figur 2.5: Equal-loudnesskurver for rene toner for 18-25 årige med normal hørelse [Hall, 2001], sammenlignet med vægtningskurver for dB(A) og dB(C) filtre [Castle Group, 2008]

Figur 2.5(b) viser forstærkningen i dB(A) og dB(C) filtre fra 20Hz - 20kHz. Det ses af grafen for dB(A)-filteret, at forstærkningen er størst i det område menneskets øre er mest følsomt. Dette betyder at den lyd der opfattes højest af øret, gengives højest på dB(A)-skalaen. Grafen for dB(C)-skalaen viser, at den forstærker et bredt spektrum i det hørbare område ca. lineært, hvilket bevirker at dB(C) vægtningen er velegnet til at måle høje lydtryksniveauer, idet equal-loudness kurverne flader mere ud ved høje lydtryksniveauer.

For mennesker mellem 18-25 år er det hørbare frekvensspektrum ca. 20-20kHz [Truax, 1999]. Hørelsen aftager naturligt med alderen. Følsomheden overfor de forskellige frekvenser i dette spektrum er, som vist på figur 2.5(a), ikke lineær. Frekvensspektrummet af menneskelig tale ligger fra 40-10kHz. Grundtonen i den menneskelige tale ligger på ca. 100-400Hz afhængig af individet. Talens grundtone ligger ikke i menneskets følsomme område, derfor er overtonerne til talens grundtone vigtige for taleforståeligheden. Taleforståelse er dog muligt i et begrænset frekvensområde fra 300-3kHz, dette vises under appendiks A.

Risikoen for høreskader afhænger af lydniveauet og eksponeringstiden. Et lydniveau på 85dB(A) giver risiko for høreskader efter 8 timers kontinuerlig eksponering. Tabel 2.1 viser sammenhængen mellem lydniveauet, og eksponeringstiden inden der er risiko for høreskader.

Lydniveau	Eksponeringstid	Eksempel
0dB	-	Laveste hørbare lyd ved 1kHz
60dB	-	Normal samtale
80dB	-	Undergrundsbane
85dB	8 timer	
88dB	4 timer	
91dB	2 timer	Lastbiler
94dB	1 time	
97dB	30 minutter	
100dB	15 minutter	Motorsave, trykluftsbor
115dB	$\sim$ 30 sekunder	
120dB	$\sim$ 7 sekunder	Koncert
140dB	Øjeblikkelig fare	Pistolskud, jetfly
160dB	Øjeblikkelig fare	Raketaffyring

Tabel 2.1: Eksponeringstiden før risiko for høreskader, samt eksempler på kilder til forskellige lydtryksniveauer. Eksponeringstiden er over en arbejdsdag. Tabellen er lavet ud fra [Martini et al., 2006] og [Dangerous Decibels, 2002]

Som det kan ses af tabel 2.1 fører en stigning på 3dB til en halvering af eksponeringstiden, og ved impulser på mere end 140dB(A) er der umiddelbar risiko for høreskader. Ved overeksponering af lydniveauerne i tabel 2.1, er der risiko for at fimrehårene i det indre øre tager skade, se afsnit 2.2. Lydimpulser på over 140dB skaber risiko for sprængte trommehinder, såkaldt akustisk trauma, se figur 2.4. Høreskader der fremkommer som følge af støj betegnes som Noise-Induced Hearing Loss (NIHL) og forekommer først i frekvensområdet 3kHz-6kHz, [Rabinowitz, 2002]. Høretabet vil som regel være symmetrisk på begge ører, men kan blive asymmetrisk som følge af stærke impulser, fx eksplosioner [Rabinowitz, 2002].

Det kan konkluderes at uhensigtsmæssig støjeksponering, og høje lydniveauer kan være skadelige for øret. Det konkluderes også, at øret kan blive skadet på flere måder. I det følgende kapitel vil der undersøges hvilke konsekvenser, det har for en person at blive høreskadet.

KAPITEL 3

Konsekvenser af høreskader

I det moderne arbejdsmiljø arbejdes der ofte i støjfyldte miljøer, hvor støjkilderne er de værktøjer og maskiner som anvendes. En udfordring for en virksomhed kan derfor være at sænke støjeksponeringen for medarbejderne. Der undersøges i dette kapitel hvilke konsekvenser det har for den enkelte, at blive høreskadet. Hvis høreskaden er indtruffet, kan det have sociale konsekvenser for den enkelte. Derfor undersøges der ved interview, af en høreskadet, de personlige konsekvenser af at være hørehandicappet. Desuden undersøges brugen af høreværn på lastbilværkstedet Stiholt. Undersøgelsen indeholder også en frekvensanalyse af typisk anvendte værktøjer.

3.1 Konsekvenser for en høreskadet

For at kortlægge konsekvenserne af det at have en høreskade, er der valgt at udføre et semistruktureret kvalitativt interview med John Larsen. Interviewet er baseret på en længere samtale, der ikke er fuldt fastlagt på forhånd. Nogle afklarende spørgsmål er planlagt på forhånd, bl.a. om respondentens baggrund, den mulige årsag til handicappet samt den subjektive konsekvens. Disse spørgsmål findes under bilag B.0.2. John lever til dagligt med en svær grad af nedsat hørelse og tinnitus. Han har levet med dette handicap siden 2002. Han anvender høreapparat og er indehaver af en lydudlejningsvirksomhed. Han har afvist at gå på førtidspension, men har dog haft længere perioder som sygemeldt. Et referat af interviewet findes under bilag B.0.3 og hele interviewet findes som 3 lydfiler under bilag B.0.4, B.0.5 og B.0.6. Det følgende er et uddrag af referatet fra interviewet. Respondenten har efterfølgende verificeret og godkendt dette indhold ved en mail korrespondance.

Hørehandicappets indvirkning på privatlivet

Da et hørehandicap er et usynligt handicap, har John ikke altid oplevet en passende forståelse fra sin familie, specielt hans kone. John mener derfor, at handicappet har været svært for familien at acceptere og respektere. Det har taget flere år for hans kone at forstå hans handicap fuldt ud, John fortæller: "*Hun har så fair nok været med nogle gange på høreklinik, og selv fulgt med i, hvad der foregår og selv blevet lidt skræmt over det, og har fået mere forståelse den vej*". I hverdagen har høreskaden også den konsekvens, at han kan være nødt til at trække sig tilbage til et sted med ro og koble af fra sine omgivelser. Handicappet har desuden medført en nedsat koncentrationsevne. John nævner, at både venner og familie opfatter ham som en anden person i dag, i forhold til inden handicappet opstod. Han fortæller, hvad hans kone har sagt: "*Hun har sagt til mig, bare hun kunne få den gamle John tilbage*". Det kan desuden nævnes, at John kan have svært ved at håndtere når hans børnebørn larmer. I en sådan situation vil hans høreapparat skrue ned for lyden, så han ikke kan høre hvad der foregår i en eventuel samtale. John forsøger desuden at undgå store forsamlinger, hvor han alligevel ikke kan skelne lyde fra hinanden. Overordnet har Johns handicap resulteret i en generel social tilbagetrækning i forhold til før skaden indtraf.

Høreskadens påvirkning på det professionelle virke

De førnævnte private udfordringer spiller også ind Johns arbejdsdag. Koncentrationsbesværet medfører, at han har svært ved at overskue og holde styr på flere ting på en gang. Dette var tidligere ikke noget problem, men derimod en af Johns kompetencer. Dette har medført en økonomisk konsekvens for ham, da han ikke længere kan være ligeså mange timer på arbejde, som før i tiden. Den konstante støj i Johns ører resulterer ofte i en form for stress. Dette gør, at han må søge ro fra sine omgivelser i løbet af en arbejdsdag. Det gør han gerne da hans psykolog har sagt at selv om 10 mennesker står og afhænger af hans tilstedeværelse, må han sige fra, det råd følger han. Desuden har John måtte ansætte en telefonmedhjælper i sit firma til at varetage opkald, da John selv kan have svært ved at tale i telefon. Dette resulterer også i, at John ikke tager telefonen fra ukendte opkald som han siger: "*Jeg har det ikke godt med at snakke i telefon mere*"og "*Jeg gider ikke at sidde og forklare folk i den anden ende, jeg har satme svært ved at høre*".

Konklusion ud fra interviewet

Det er tydeligt ud fra interviewet, at en høreskade kan være et stort handicap. Et handicap som påvirker både arbejdsevne og det sociale liv i et omfang, som mange har svært ved at forstå.

3.2 Brugen af høreværn i støjfyldt miljø

Problemet med det store antal hørerelaterede arbejdsskader, som er beskrevet i kapitel 1, danner grundlag for undersøgelsen af brugen af høreværn, samt en frekvensanalyse af arbejdsredskaber hos Im. Stiholt A/S i Aalborg.

3.2.1 Adfærdsmønstret på Stiholt

Denne spørgeskemaundersøgelse skal bruges til at kortlægge de udfordringer, der er med de nuværende typer af høreværn. F.eks. kan et høreværn være af nok så høj kvalitet, men fungerer ikke spor, hvis ikke det bliver brugt. Det ønskes derfor undersøgt, hvordan et høreværn bruges i praksis.

Igennem dette afsnit beskrives først spørgsmålet, hvorefter respondenternes svar beskrives. Spørgeskemaet er vedlagt under bilag B.0.7. Til slut vil undersøgelsen som helhed blive gennemgået og resultatet vil blive vurderet. Der er lavet spørgsmål til 3 fokusområder:

- Verificerende spørgsmål
- Uddybende spørgsmål vedrørende høreskader
- Uddybende spørgsmål vedrørende høreværn

De verificerende spørgsmål stilles for at sikre, at de adspurgte er indenfor den målgruppe der ønskes information fra. Hvis personen ikke færdes i et støjfyldt miljø, har personen ikke

grundlag for at udtale sig om brugen af høreværn. Derfor vil sådanne personer ikke have relevans for undersøgelsen.

De uddybende spørgsmål angående høreskader, skal give et indblik i omfanget af høreskader blandt de adspurgte. Dette skal senere bruges til, at vurdere om problemet med høreskader eksisterer.

De uddybende spørgsmål angående høreværn stilles for at give et svar på hvordan høreværnet bruges i praksis.

Verificerende spørgsmål:
Hvilken funktion har du på din arbejdsplads?
Alle respondenter arbejder på samme værksted, heriblandt en dækmontør, flere mekanikere og en smed.

Bruger du dagligt, ugentligt eller færre/aldrig høreværn på din arbejdsplads?
6/7 bruger dagligt eller ugentligt høreværn i forbindelse med deres arbejde. Den sidste 1/7 bruger ikke høreværnet, men arbejder stadig i støjfyldt miljø, hvor høreværn er påbudt. Hovedårsagen er, at høreværnet glemmes eller fordi høreværnet opfattes som ligegyldigt. Dette betyder, at alle de adspurgte har et arbejde hvor de bruger høreværn, eller burde bruge det. Derfor er alle svarende relevante. De 6 respondenter som anvender høreværn jævnligt bliver derefter adspurgt om følgende:

Hvilken type høreværn bruger du?

- 3/6 anvender typen ørekop.
- 1/6 anvender typen øreprop.
- 1/6 anvender begge dele.
- 1/6 anvender DOT-høreværn. (formstøbt øreprop)

Her kan det udledes, at det er ørekoppen der bliver brugt mest på Stiholt. Ingen af de adspurgte har høreværn med elektroniske funktioner indbygget. Det er udelukkende standard høreværn, der bliver brugt på Stiholt.

Hvilken type støj bliver du udsat for på din arbejdsplads?
Der arbejdes primært med trykluftværktøjer og vinkelslibere, og derfor er dette den hyppigste støjtype. Enkelte arbejder også med en aluminiumssav. Det er alle støjtyper der potentielt overstiger den skadelige støjgrænse. Dette betyder, at alle de adspurgte bliver udsat for støj og er derfor stadig relevante for undersøgelsen.

Konklusion på verificerende spørgsmål:
De adspurgte er nu blevet spurgt om emnet 'arbejde i støjfyldt miljø', og falder alle ind under denne kategori. De bliver herefter spurgt om emnet 'høreskader', for at undersøge om de potentielt kan falde ind under statistikken, vist på figur 1.1.

Uddybende spørgsmål omkring høreskader:
Har du prøvet at arbejde uden høreværn i påbudt zone? (Hvordan var det)
6/7 har prøvet at arbejde uden høreværn i påbudt zone. Alle beretter i denne sammenhæng om gener efter arbejdsdagens ophør. Generne er bl.a., susen i ørerne/hovedet, ubehagelig følelse i ørerne og smerte i ørerne. Det betyder, at arbejde uden høreværn i støjfyldt miljø

giver gener allerede samme dag, som eksponeringen har fundet sted.

Har du, eller har du tidligere haft problemer med ørerne/hørelsen?
4/7 af de adspurgte har eller har haft problemer med hørelsen/ørerne, hvoraf 2/4 lider af nedsat hørelse. 1/4 lider af en mild form for tinnitus, hvor der i stille miljøer kan høres en konstant hyletone. 1/4 lider af smerte i ørerne.

Konklusion på uddybende spørgsmål omkring høreskader:
4/7 falder ind under kategorien høreskadede personer på danske arbejdspladser. Høreskader er altså et virkeligt problem. Hertil har 6/7 prøvet at arbejde uden høreværn i påbudt zone, og samme dag oplevet gener ved den store eksponering af støj. Stiholt har altså ansatte, der kunne være med i statistikkerne, jf. figur 1.1.

Uddybende spørgsmål omkring høreværn:
Tilbyder din arbejdsplads dig høreværn, i tilstrækkeligt omfang, til brug i områder, hvor høreværn er påbudt?
Arbejdspladsen tilbyder høreværn til alle medarbejdere.

Har du et personligt høreværn?
Alle adspurgte har et personligt høreværn, og har fået høreværnet betalt af arbejdspladsen.

Giver din arbejdsplads dig mulighed for at vælge imellem forskellige typer høreværn?
Alle kan vælge mellem en standard øreprop og en standard ørekop.

Bruger du altid høreværn i de områder, hvor det er påbudt?

- 1/7 bruger aldrig høreværnet
- 4/7 bruger oftest høreværnet
- 2/7 bruger regelmæssigt høreværnet

Hvor ofte bruger du høreværn i de områder, hvor det ikke er påkrævet, men der stadig er støj?

- 3/7 bruger aldrig høreværnet
- 2/7 bruger sjældent høreværnet
- 2/7 bruger regelmæssigt høreværnet

Hvor stor pris ville du sætte på at dit høreværn indeholder følgende funktioner?
De adspurgte er blevet spurgt om at vægte 5 forskellige funktioner på en skala fra 1-5, hvor 5 er stor pris. Der er taget et gennemsnit af svarene, som ses herunder: De 3 ting de adspurgte vægter højest er:

- Hvis høreværnet var en øreprop (4.5)
- Mulighed for at høre tale, mens støj er dæmpet (4.43)
- Radio i høreværnet (3.57)

Hvorfor bruger du ikke høreværn? (I tilfælde af det ikke bruges)
Der er blevet spurgt om 5 forskellige grunde til at de ikke bruger høreværnet, som vægtes på en skala fra 1-5, hvor 5 er størst. Der er taget et gennemsnit af svarene, hvor de to største grunde er listet herunder:

- Du glemmer at tage høreværnet på (3.5)
- Støjen føles ikke generende (2.0)

Konklusion på undersøgelse af brug af høreværn:
Hovedparten af medarbejderne bruger ikke høreværnet regelmæssig, selvom der arbejdes i et skadeligt miljø. Her er den største årsag glemsomhed. Supplerende svar fra medarbejderne afklarer også, at det er generel ligegyldighed og travlhed, der er den afgørende faktor for, at de ikke benytter høreværnet.

Empirisk information

Det tager ikke mange år, før en påvirkning af skadelig støj kan medføre konsekvenser. En 22-årig mekaniker på Stiholt, lider af dårlig hørelse og smerte i ørerne. Samme mekaniker bruger ikke altid høreværn. Dårlig hørelse har endda kostet ham chancen for at blive optaget i Forsvaret.

Størstedelen af mekanikerne fortæller om daglige episoder, hvor de ikke udsætter dem selv for støj, men det gør derimod kollegaen. Det er svært at håndtere de støjimpulser der kommer fra kollegaen ved siden af, da der ikke advares imod støjen. Hermed er der større risiko for, at høreværnet ikke er ved hånden og derved ikke bliver brugt i støjperioden. Medarbejderne fortæller, at hvis der er travlt, så henter man ikke lige sit høreværn i den anden ende af værkstedet.

Undersøgelsens pålidelighed

Spørgeskemaet stiller spørgsmål der tjekker validiteten. Dog er spørgeskemaet ikke udarbejdet, til at tjekke om de adspurgte svarer pålideligt. Det kan derfor ikke konkluderes, hvorvidt de adspurgte har givet et ærligt svar. Et upålideligt svar kan være anderledes i efterfølgende lignende undersøgelser [Kvale, 1997]. Desuden bygger denne undersøgelse på information fra 7 personer. Derfor kan resultatet ikke bruges som et generelt billede på samfundet, men det antages dog at denne information er væsentlig i udviklingen af en teknisk løsning.

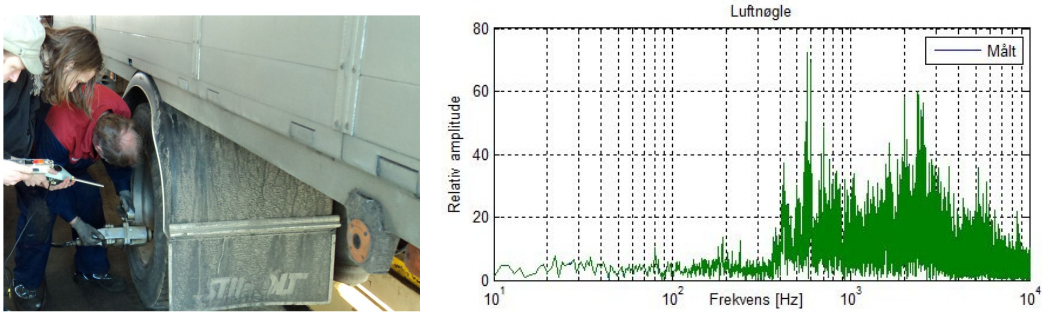
3.2.2 FFT analyse af støj på Stiholt

Nu hvor brugen af høreværn på Stiholt er klarlagt, er det derfor interessant at undersøge hvilken form for støj medarbejderne udsættes for, og i hvilke frekvensområder disse støjkilder er dominerende. Metoden er udelukkende anvendt for at give et indblik i frekvensindholdet i det støjfyldte miljø, med henblik på at definere retningslinier for en filtrering af støjen. Derfor er der i denne del af undersøgelsen afgrænset fra at analysere om det målte lydniveau, er i en størrelsesorden hvor det kan påføre høreskader. Målingerne er optaget i 24 bit, 96kHz. Det anvendte udstyr er beskrevet i tabel 3.1. Disse optagelser danner basis for FFT analysen. Til FFT analysen er anvendt Matlab. De tilhørende figurer viser hver en graf for hvilke frekvenser der er dominerende.

Beskrivelse:	Type:	AAU nr.:
Lydmåler	B & K 2231	08236-00
Kalibrator	B & K 4230	08155-00
Optager	Zoom H4	64694-00

Tabel 3.1: Udstyr brugt til måling af frekvensgang på Stiholt

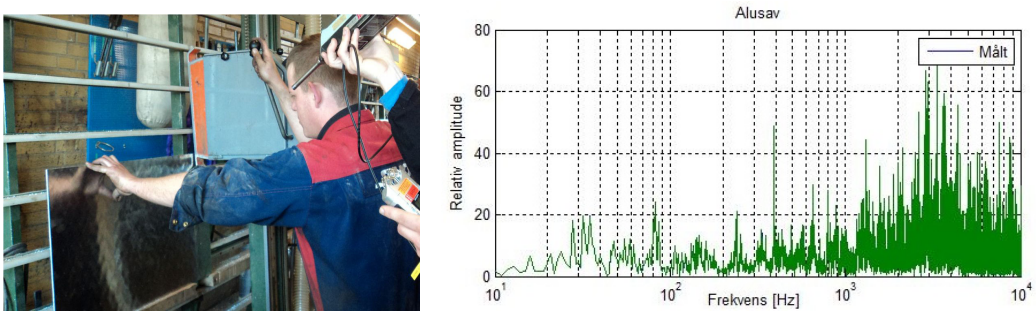
På dette værksted er de frembragte støjkilder oftest skabt af det værktøj som anvendes til reparation af en lastbil. Her kan nævnes et af de mest anvendte værktøjer, luftnøglen. Denne bruges til at montere og afmontere bolte, ofte i forbindelse med hjulskift. Af denne situation er der foretaget en FFT analyse som kan ses på figur3.1(b)



(a) luftnøglen i anvendelse (b) Frekvensindhold af luftnøgle

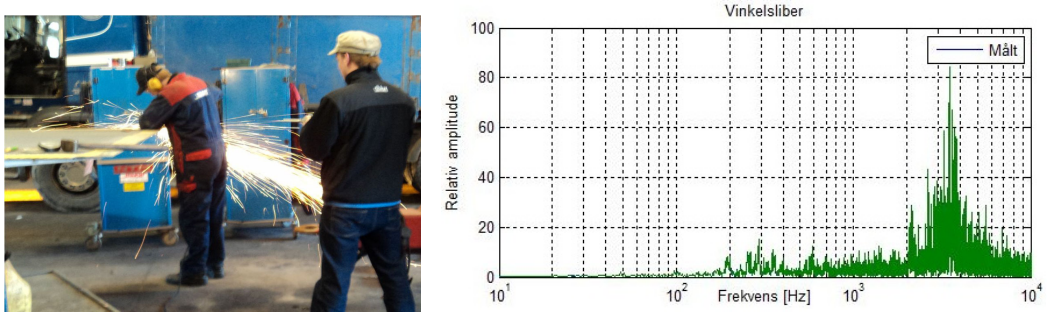
Figur 3.1: Luftnøglens frekvenser er spredt, men dominerer omkring 600Hz og 2.4 kHz

Desuden er der foretaget målinger på andre hyppigt anvendte værktøjer, blandt andet en vinkelsliber som skærer i en metallift, vist på figur 3.3(a), og en metalsav som saver i aluminium, vist på figur 3.2(a).



(a) Aluminiumssaven i brug uden høreværn (b) Frekvensindhold af aluminiumsav

Figur 3.2: Metalsaven i anvendelse. Frekvenserne ligger mest i området fra 3-10 kHz



(a) Vinkelsliberen i anvendelse med høreværn

(b) frekvensgang vinkelsliberen

Figur 3.3: Vinkelsliberens frekvenser er koncentreret mellem 3kHz og 4kHz

Ved en betragtning af FFT analyserne i det frembragte støjmiljø, ses en tendens til et dominerende støjniveau over 2kHz med de anvendte værktøjer. Derfor vægtes mulighederne for at få dette område dæmpet i eventuel filtrering af lyden højt. Der vil nu blive set på hvilke løsninger der findes for at dæmpe støj og dermed være med til at forhindre høreskader.

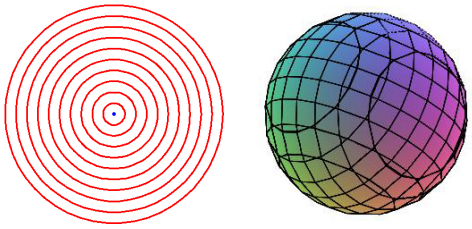
KAPITEL 4

Eksisterende løsninger

For at klarlægge hvilke teknologier og løsninger der findes på markedet i dag, er der foretaget en undersøgelse af nuværende løsninger til støjdæmpning. Principperne i løsningerne bliver forklaret, og teorien bag bliver uddybet. Dermed opnås et godt overblik over hvad en løsning skal indeholde af funktioner og kvaliteter. Resultatet er beskrevet i dette afsnit, og strækker sig fra hvordan man indretter arbejdspladsen således at akustikken er tilpasset, til hvordan et høreværn kan designes.

4.1 Akustisk tilpasning

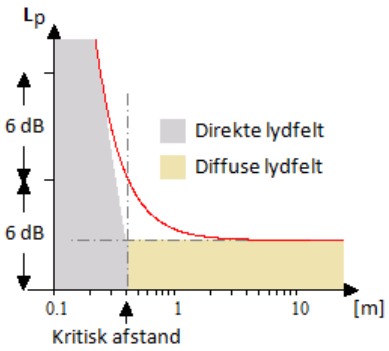
En måde at dæmpe lyden i et støjfyldt lokale på, kan gøres ved korrekt akustisk indretning af lokalet. Teori i dette afsnit er udledt fra [Brixen and Voetmann, 2004] og [Vigran, 2008]. Flere firmaer tilbyder løsninger, som blandt andet behandler stående bølger og efterklang ved design og opsætning af materialer til akustisk tilpasning. For at forstå dette ses der først på teorien bag lydens udbredelse. Først i det frie lydfelt og dernæst lydens udbredelse i et lokale. I et frit lydfelt udbreder lyden sig uden indvirkning af refleksioner og udbredes kugleformet. Figur 4.1(a) og 4.1(b) viser, hvordan lyden udbreder sig i det frie lydfelt. I fri



(a) Betragtet i 2D (b) Sfærisk/kugleformet betragtet udefra i 3D

Figur 4.1: Lydens udbredelse i det frie felt fra en punktkilde

luft aftager lydtryksniveauet som udgangspunkt med 6dB ved en fordobling af afstanden til lydkilden[Long, 2006]. Udendørs kan vinden dog påvirke udbredelsesretningen, hvorimod andre faktorer spiller ind når lyden udbredes indendørs.

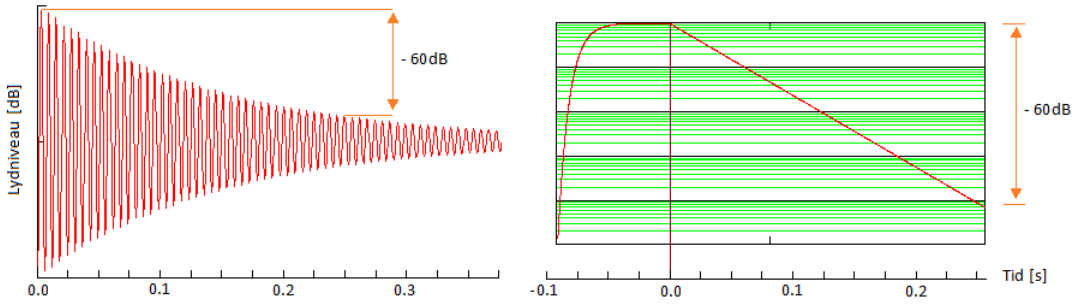


Figur 4.2: Et eksempel på sammenhængen mellem den kritiske afstand, det direkte og det diffuse lydfelt.

Indendørs vil lydens udbredelse påvirkes af overfladerne, primært vægge, loft og gulv, men også diverse inventar. Overfladematerialet vil desuden have indvirkning på om lyden reflekteres eller absorberes i materialet. Ved en meget lav absorptionskoefficient, reflekteres lyden adskillige gange fra alle hårde overflader, og det kan opleves som et diffust lydfelt. Dette fænomen kendes nok bedst fra svømmehaller og sportshaller hvor det kan være svært at vurdere hvilken retning lyden kommer fra, medmindre man står tæt på lydkilden. Det diffuse lydfelt kendetegnes ved 2 ting:

- lydtrykket er det samme i hele lydfeltet
- lyden har en helt tilfældig retningsfordeling pga. alle refleksionerne

Når lydtrykket er det samme i hele det diffuse lydfelt medfører dette et konstant lydniveau, som skal overdøves når f.eks. personer skal føre en samtale. I det diffuse lydfelt vil der eksistere en unødvendig belastning af øret. Ørets belastningsgrænser er nærmere uddybet i afsnit 2.3. Den kritiske afstand er grænsen mellem det diffuse lydfelt og det direkte lydfelt. Figur 4.2 viser sammenhængen mellem lydtrykket og den kritiske afstand. Den røde aftagende kurve, er lydtrykket som funktion af afstanden. Det ses, at lydtrykket aftager næsten som i det frie lydfelt helt tæt på lydkilden, hvorefter det aftager mindre og mindre ved en forøgelse af afstanden til lydkilden, men over den kritiske afstand aftager lydniveauet stort set ikke, da efterklangen her er mere dominerende end den direkte lyd.



Figur 4.3: Efterklangstid, skitseret ved teoretisk impulsrespons. Til venstre ses responsen fra tiden $t = 0$ i et lineært koordinatsystem. Til højre ses responsen med y-aksen logaritmisk, hvor kilden tændes til $t = -0.1$ og slukkes til $t = 0$. [Rindel, 2011]

Det er derfor vigtigt at tilpasse den akustiske efterklang med forskellige absorbenter. Denne dimensionering er frekvensafhængig, fordi forskellige materialer absorberer eller reflekterer lyden forskelligt alt efter materialets densitet, placering, vinkling, overfladeareal og rumfang. Som udgangspunkt vil f.eks. en malet betonvæg reflektere en stor del af lyden i en stor del af frekvensspektret, hvorimod mere porøse materialer som træ og rockwool vil absorbere en større del af lyden. Et lokales efterklangstid er defineret efter Sabines formel 4.1

$$T = \frac{0.16 \cdot V}{A} \tag{4.1}$$

Hvor T er efterklangstiden, V er lokalets rumfang og A er absorptionsmængden i rummet i $m^2 Sab$. Absorptionsmængden er samtlige bidrag fra rummets overflader og kan dermed

noteres efter formel 4.2:

$$A = \sum_{n=1}^{k} \alpha_n \cdot S_n \tag{4.2}$$

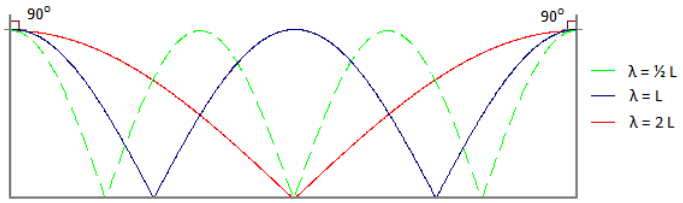
Her er α absorptionskoefficienten, som bestemmes ud fra laboratorieforsøg, og S er overfladearealet. Efterklangstiden er defineret som den tid det tager lydimpulsen at aftage med 60dB. For en lydimpuls vil den teoretiske impulsrespons aftage som det er vist på figur 4.3. Det er normalt for et lokale til beboelse at have en efterklangstid der ligger omkring 300ms. For at dæmpe efterklangstiden mest muligt, kan vægge og loft laves af materiale med høj absorptionskoefficient, hvorved lydimpulsen hurtigere aftager med 60dB. Det absorberende materiale bliver typisk monteret på tre måder [Rockfon, 2011]:

- **Bafler**, som er elementer bestående af absorberende materiale der hænger lodret ned fra loftet.
- **Flåder**, er det samme som baflerne, de monteres blot vandret under loftet og er typisk større.
- **Vægabsorbenter**, som er elementer bestående af absorberende materiale der monteres på væggen.

På figur 4.4 ses de forskellige løsningsmuligheder. Fælles for dem alle er at de skal reducere efterklangen. Akustikken i et lokale afhænger også af de stående bølger. Hvis lokalet består

Figur 4.4: Akustiske løsninger til at dæmpe efterklangen. Fra venstre ses: Flåder, bafler og vægabsorbenter

af parallelle og hårde vægge, og bølgen møder disse overflader i en vinkel på 90 grader, vil der dermed dannes en fast og ujævn niveaufordeling af den givne frekvens mellem disse vægge, som er skitseret på figur 4.5. Dette fænomen vil opstå for alle frekvenser, hvor af-



Figur 4.5: Stående bølger i et rum

standen mellem de lodrette vægge svarer til $0.5 \cdot \lambda$. Står man i et rum, hvor der er stående bølger, kan man derfor opleve disse ujævne frekvensfordelinger. For at fjerne de stående bølger, kan væggene bygges skrå eller med niveauforskel, da spejlingen dermed bliver elimineret. Dette gælder dog ikke for lave frekvenser. Faktorerne beskrevet i dette afsnit er væsentlige, når der skal udføres akustisk tilpasning, hvilket naturligvis er en optimal løsning på støjproblemer. Taget i betragtnig af omfattende ændriger, når denne løsning skal realisreres, betragtes den som relativ dyr [Alpha Akustik, 2011].

4.2 Øreppropper

Et af de mest anvendte produkter til at beskytte mod støjeksponering er øreppropper. De bruges både i erhvervslivet og af private. Til venstre på figur 4.6 ses et par af de mest gængse, et sæt én-gangs skumpropper fra E.A.R., der klemmes sammen og sættes ind i øregangen. Der findes forskellige modeller af disse med forskellige dæmpninger. Dæmpningen måles i et tal kaldet SNR (Simplified Noise level Reduction). Ved en undersøgelse af forskellige høreværnsforhandlere på markedet, er en værdi på 20 til 37dB [Tego, 2011] det mest forekomne. Øreppropper virker som et simpelt akustisk filter, da energien fra lyde bliver reflekteret eller absorberet i skummet og omsat til varmeenergi i stedet. Fordelen er, at de er billige og nemme at bruge, da de ikke skal vedligeholdes, men blot smides ud efter brug. Ulempen er, at de dæmper uliniært, hvilket medfører at taletydeligheden er nedsat. Dette gør det svært at tale sammen. En anden ulempe er, at de kan være ubehagelige at bære over længere tid, da de ikke er tilpasset den enkeltes øregang. Inden for øreppropper, findes der

Figur 4.6: Til venstre: Et sæt billige standard skumpropper[E.a.r. inc., 2011]. Til højre: Et sæt special lavede øreppropper med specifikke filtre indbygget.

også en anden mulighed, som ses til højre på figur 4.6. Dette er et sæt speciallavede øreppropper fra Phonak. Disse er formstøbte til den enkelte. Brugeren vælger selv filtre med forskellige dæmpningsgrader, så de passer til det miljø de skal bruges i. Der er desuden flere muligheder for brugeren, såsom specielle filtre mod kraftige impulser, højfrekvente filtre, lavfrekvente filtre og kombinationer af disse. Specialfremstillede øreppropper har dermed ikke de billigere engangsøreproppers ulempe med at de dæmper uliniært, og ubehaget kan være mindre da de er formstøbte. Ved at se på de forskellige specialfremstillede produkter på markedet findes priser fra 1000 til 3000 kroner, alt efter producent og specielle ønske. De er mest hensigtsmæssige i det miljø, man har fået dem fremstillet til da filtrene er specifikke.

4.3 Ørekopper

Ørekopper placeres omkring hele øret for at absorbere og reflektere de uønskede lyde. Fordelen ved ørekopper fremfor øreppropper er, at de nemt og hurtigt kan påmonteres og afmonteres, når brugeren opholder sig i zoner med påbudt høreværn. Den typiske dæmpning er opgivet ved et SNR tal i en ørekop, denne er undersøgt ved ørekopforhandlere og ligger i næsten samme område som en øreprop, ca. 20-35dB [Tego, 2011] alt efter hvilken model og producent der ses på. En ulempe ved ørekopper er, at de er større og tungere at have på, samt man kan komme til at svede rundt omkring øret. De er ligeledes sværere at opbevare, når de ikke bruges. Prisen for et sæt ørekopper varierer fra få hundrede kroner, til flere tusinde, alt efter hvad man gerne vil have af kvalitet og funktioner indbygget. I de senere år, er flere på arbejdsmarkedet blevet glade for ørekopper med indbygget underholdningsfunk-

Figur 4.7: Et sæt ørekopper, her med en indbygget radio

tioner, såsom radiomodtager, hvilket verificeres i spørgeskemaundersøgelsen i afsnit 3.2.1. Et eksempel på ørekopper med radio ses på figur 4.7. Der findes også eksempler med indbyggede mp3 afspillere, mikrofon og trådløs radiokommunikation mellem ørekopbrugere. Ørekopper er et godt udgangspunkt til at udvikle en intelligent løsning, da der er fysiske muligheder for at indbygge elektronik i selve koppen.

4.4 Intelligente høreværn

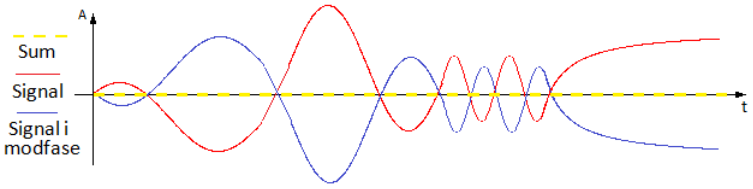
Modsat konventionelle ørekopper der dæmper passivt, vil intelligente høreværn vha. elektroniske filtre, sortere i lyden og dermed dæmpe støjende frekvenser og lade ønskede frekvenser passere. Ørekopper defineres som intelligente når der bruges teknologier, der kan forbedre dæmpningen elektronisk. Dette omtales normalt som aktive ørekopper. De konventionelle øreproppper og høreværn omtales som passive. Der bruges forskellige metoder til at opnå dette. De følgende afsnit vil klarlægge de mest anvendte teknologier.

4.4.1 Elektronisk filtrering

En måde at lade enkelte frekvenser passere og samtidig dæmpe andre er, at opfange lyd med en mikrofon, behandle signalet med et elektronisk kredsløb, og sende signalet ud igennem en højtaler. Høj- og lavpasfiltre kan designes præcist efter den ønskede frekvensgang. Et eller flere båndpasfiltre kan indbygges imellem høj- og lavpasfilterene. Kredsløbene består typisk af en række frekvensafhængige komponenter, implementeret i et forstærkerkredsløb. Ulemperne er at elektronikken kan fylde meget og ørekopperne kan blive tunge. Ligeledes kræver elektronikken strøm, og det er derfor nødvendigt, at batterier er indbygget i ørekopperne. Det er derfor ikke realistisk med et batteri større end et 9V batteri i hver ørekop, da større batterier vil gøre ørekopper for tunge at bære. Dette sætter begrænsninger for funktionalitet og strømforbrug . Digital-filtrering med en DSP (Digital Signal Processing), er også en mulighed. Princippet er det samme, det foregår blot digitalt. Fordelen ved at benytte en DSP er, at de uønskede frekvenser nemt kan udpeges, vha. en FFT analyse, og efterfølgende præcist filtreres fra. Ved hjælp af eksempelvis tale- eller støj genkendelse kan støj filtreres fra talespektret, hvilket kan gøre det muligt at høre tale i et støjfyldt miljø. Et digitalt system fylder mindre og er nemmere at modificere i forhold til et analogt system. ulemperne kan være AD begrænsninger og beregningstid.

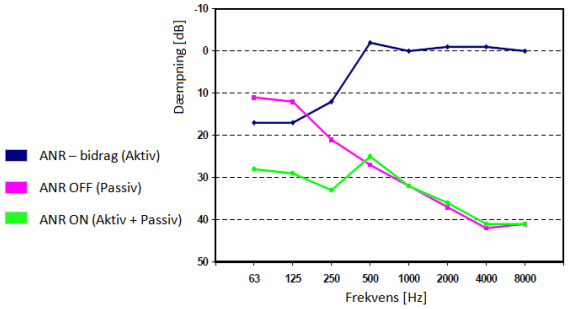
4.4.2 Aktiv støj reduktion

Aktiv støj reduktion (ANR) er en metode til effektivt at dæmpe lyden ved modfasning. Hvis to signaler er til stede på samme tid og betragtes som funktioner, er summen af de to funktioner givet ved den ene kurve summeret med den anden for hver funktionsværdi. På figur 4.8 er der vist to tilfældige signaler, som optræder i modfase med hinanden, hvorved summen er nul. Man vil derfor i princippet kunne opnå en total udfasning. I praksis er



Figur 4.8: Summation af to signaler i modfaser

det en meget vanskelig opgave at opnå total udfasning over hele frekvensbåndet. Især det høje frekvensområde skaber problemer, da en faseforskydning her betyder mere, fordi bølgelængden bliver mindre. Figur 4.9 viser reduktion vha. af ANR teknologi af høj kvalitet [Berger, 2002]. Den blå linje er bidraget fra selve ANR, den røde linje er et konventionelt høreværn. Kombineres begge teknologier opnås den bedst mulige dæmpning, som er skitseret med den grønne linje. Ulempen ved ANR-teknologien er, at den er dyr at implementere.



Figur 4.9: Dæmpningen med ANR og konventionelt høreværn [Berger, 2002]

Den er godt 10 gange dyrere end et konventionelt høreværn [Berger, 2002]. Den kræver desuden batterier og kan derfor gøre høreværnet tungt. Fordelen er dog klar, da den dæmper de dybe frekvenser effektivt.

4.4.3 Trådløs kommunikation

For at optimere kommunikationen mellem to personer der begge bærer høreværn, er det en mulighed at opfange lyden vha. en mikrofon, og derefter transmittere signalet via en trådløs forbindelse til den anden person. Placeres mikrofonen tæt på munden, kan et filter af god kvalitet sortere generende støj fra. Når der er tale om en trådløs kommunikatonen mellem to enheder, relativt tæt på hinanden, benyttes Bluetooth teknologien oftest.
Dermed er de løsninger der typisk er anvendt beskrevet. Det er nu relevant at se på hvilke lovgivningskrav der sættes til en løsning i næste kapitel.

KAPITEL 5

Lovgivning og standarder

Adfærdsmønstre og brugen af høreværn er undersøgt og analyseret på arbejdspladsen Im. Stiholt A/S i afsnit 3.2.2, som i denne sammenhæng antages at repræsentere arbejdspladser generelt. Dette kapitel omhandler derfor relevant lovgivning til høreværn og støj på arbejdspladser og relevante standarder til høreværn og miljøhensyn. Igennem dette kapitel er dB(A) en gennemsnitsværdi over 8 timer målt med et A-vægtet filter, beskrevet i afsnit 2.3, og når der nævnes dB(C) er det lydimpulser målt med et C-vægtet filter, beskrevet i afsnit 2.3.

5.1 Lovgivning til høreværn

Regler relateret til håndtering af støj på arbejdspladsen, sætter specifikke krav til konstruktion af et høreværn. Derfor skal dele af gældende lovgivning for håndtering af støj på arbejdspladsen også gælde for et høreværn. Relevant lovgivning er søgt hos Arbejdstilsynet [Arbejdstilsynet, 2006], som kontrollerer en række lovkrav og vedtægter, som arbejdsgiveren skal sørge for overholdes. Dette gøres gennem en arbejdspladsvurdering, som forkortes APV. Vedtægter beskrevet i dette afsnit er udledt fra Arbejdstilsynets bekendtgørelse nr. 63, samt arbejdstilsynets hjemmeside [Arbejdstilsynet, 2006].

Regler for håndtering af støj

Hvis arbejdspladsens støjniveau overskrider 80dB(A), er det påkrævet at der er høreværn til rådighed på arbejdspladsen. Høreværn er ligeledes påkrævet, hvis spidsværdierne af støjen overskrider 135 dB(C). Hvis det derudover vurderes, at støjniveauet er belastende eller på anden måde generende, skal der ligeledes stilles et høreværn til rådighed. Høreværnet skal til enhver tid vælges således, at det nedsætter risikoen for høreskader mest muligt. Ingen må udsættes for støj svarende til mere end 85dB(A) og 137 dB(C). Hvis arbejdspladsens forhold overskrider dette, *skal* der anvendes høreværn øjeblikkeligt idet arbejdet igangsættes, hvilket er pålagt arbejdsgiveren at sørge for.
Støjen må ikke overdøve eventuelle faresignaler, som alarmsignaler og lyde, der er afgørende for at sikkerheden opretholdes. Ved udarbejdelse af en APV skal der tages særligt hensyn til dette. En APV skal også indeholde hensyntagen til niveau, type og varighed af den støj som medarbejderen udsættes for, og det er således arbejdsgiverens opgave, at have høreværn til rådighed for at dæmpe dette mest muligt.
Ultralyd, som er alt over 18kHz, og infralyd, som er alt under 20Hz, skal enten dæmpes til lavest mulige niveau ved kilden, eller også skal arbejdet planlægges, så det generer medarbejderen mindst muligt. Udsættes man for høje ultralydniveauer i længere tid, kan det give høreskader, hovedpine og medføre træthed. Disse påvirkninger stammer dog typisk fra grænseområdet mellem hvad man kan høre og selve ultralyden, hvilket vil sige fra 16 - 40.000kHz [Arbejdstilsynet, 2005]. Ultralyd kan dæmpes med et konventionelt høreværn. Infralyd er er ikke skadeligt ved lavt lydniveau, men er skadelig så snart lydtrykket øges, og kan medføre stressreaktioner der påvirker det menneskelige organ, herunder hjertet. Da konventionelle høreværn har meget ringe effekt overfor lave frekvenser, er det derfor særligt vigtigt at infralyd dæmpes ved kilden. Infralyd er typisk lavfrekvent støj fra stempelmotorer

eller kompressorer [Jensen, 2004].

Ved overtrædelse af ovenstående punkter, straffes den ansvarlige med enten bødestraf eller op til 2 års fængsel.

Regler for høreværn

Hvis et høreværn anvendes til at overholde ovenstående krav, skal selve høreværnet overholde en række punkter opstillet af arbejdstilsynet. Det understreges dog, at høreværn er en midlertidig løsning, indtil støjniveauet er dæmpet ved kilden. Indebærer arbejdspladsens forhold, at man under længerevarende forløb skal arbejde i et støjniveau der overskrider de nævnte værdier, kan dette kun tillades hvis det er teknologisk umuligt at dæmpe støjen ved kilden, eller hvis arbejdet af den grund bliver unødvendigt besværligt. I sådanne tilfælde er det lovpligtigt, til enhver tid, at anvende høreværn eller andet hjælpemiddel der kan dæmpe støjeksponeringen. For et høreværn gælder følgende lovgivning:

- Dæmpningsværdierne skal fremgå af emballagen.
- Høreværnet skal indeholde en dansk brugsanvisning.
- Høreværnet skal være CE mærket. CE-mærkningen er beskrevet i afsnit 5.2.
- Høreværnet skal godkendes, hvilket indebærer at dæmpningen skal måles i et autoriseret laboratorium.
- Hvis høreværnet er elektronisk og inkluderer en indbygget radio, må denne ikke kunne skrues op til et sundhedsfarligt støjniveau. Afsnit 2.3 beskriver hvad farlig støj indebærer.

Arbejdsgiveren har en række forpligtigelser overfor medarbejderne, som er udledt fra [Arbejdstilsynet, 2009], hvilket har relevans da afsnit 3.2.1 vedrører dette.

- Medarbejderne skal have et personligt høreværn til rådighed, som normalt ikke må deles med andre. Høreværnet skal være anskaffet og betalt af arbejdsgiveren
- Høreværnet skal være tilpasset til miljøet, og må ikke give unødvendige gener.
- Alle medarbejdere skal både instrueres i brugen af høreværn, samt faren ved at undlade brugen af denne.
- Arbejdsgiveren skal sørge for at høreværnet er vedligeholdt efter leverandørens specifikationer.

Udover de her beskrevne relevante lovkrav er der en række standarder, som også er relevante for konstruktion af et høreværn.

Standarder for høreværn

I dette afsnit er der kun medtaget standarder, som påvirker udviklingsforløbet af elektronikken i høreværnet. Det er op til producenten selv at vurdere hvorvidt de givne standarder for høreværnet skal overholdes, og standarderne er ligeledes i de fleste tilfælde frivillige dokumenter [Dansk Standard, 2010]. Det er altså ikke et lovkrav at opfylde dem. Dog åbner

de som regel op for et større eksportmarked. Endvidere er de en stor hjælp i udviklingsforløbet, da der er brugt tid, penge og energi på at udvikle den mest optimale standard, samt det sikres, at produkterne fra forskellige producenter følger en ens standard. Standarderne er udledt fra [Dansk Standard, 2003].

Da øret opfatter variationer i lyden forskelligt, ved forskellige frekvenser, er der i tabel 5.1 givet en standard for dæmpningsfaktoren ved 7 forskellige frekvenser.

Frekvens [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	8000
$(M_f - s_f)$ [dB]	5	8	10	12	12	12	12

Tabel 5.1: Minimumsdæmpning ved fast definerede frekvensområder [Dansk Standard, 2003].

Hvor M_f er gennemsnitsdæmpningen af målt data, og s_f er standardafvigelsen af samme række data. Tilsammen udgør differensen den dæmpning der minimum skal være til stede [Dansk Standard, 2003].

Høreværnet skal overholde alle specifikationer i temperaturområdet$(22 \pm 5)^\circ C$, ved en relativ luftfugtighed på 85%. Kun halvledere i elektronikken er temperaturafhængige, og deres performance ændres næppe indenfor dette temperaturudsving [Dansk Standard, 2003].
Hvis høreværnet tabes på en referenceplade lavet af stål, fra 1.5 meters højde, må høreværnet ikke gå i stykker. Dette sætter krav til indpakningen af elektronikken. Standarden her gælder dog ikke i temperaturområder under $-20^\circ C$, da materialet opfører sig specielt under ekstreme forhold. [Dansk Standard, 2003]

Når puder o.l er fjernet skal høreværnet kunne holde til at ligge i et vandbad med en temperatur på $(50 \pm 2)^\circ C$ i 24 timer. Dette sætter store krav til indpakning af batteri og isolering af printplader [Dansk Standard, 2003].

Dermed er standarder og lovgivning til selve høreværnet beskrevet, hvormed der nu skal fokuseres på lovkrav til selve elektronikken.

5.2 Lovgivning til elektronikdelen

Lovgivning vedrørende elektronik skaber sikkerhed og sammenhæng mellem systemer og deres delsystemer. Brugeren kan således være sikker på, at produktet er testet i henhold til lovgivningen, og at det overholder alle væsentlige krav til sikkerhed og brugsegenskaber.

CE-mærkningen er påkrævet for alt elektrisk udstyr, der skal sælges i Europa. Mærket betyder, at produktet, før det bringes på markedet, opfylder EU's sikkerheds-, sundheds-og miljøbeskyttelseskrav. Ved at placere CE-mærket på et produkt erklærer producenten, på deres eget ansvar, at produktet overholder alle relevante lovkrav, som gælder i Europa.[European Commission, 2011]

For at opnå CE-mærkningen skal følgende relevante punkter overholdes:

• **EMC** (Electromagnetic Compatibility): EMC-Direktivet sikrer at elektromagnetiske emissioner fra elektroniske produkter begrænses, med henblik på at sikre, at det ikke forstyrrer radio- og telekommunikation samt andet elektrisk udstyr. Direktivet regulerer også immunitet for sådant udstyr fra udefrakommende interferens [European Commission, 2004]. Kort sagt kan det udledes fra direktivet, at ingen elektriske apparater må forstyrre hinanden eller lade sig forstyrre. Dette er vigtigt for alle produkter indeholdende elektronik.

• **ATEX** (Appareils destinés à être utilisés en Atmosphères Explosibles): ATEX-Direktivet består af to EU-direktiver ét for producenten og ét for brugeren af udstyret, der beskriver hvilket udstyr der er tilladt i et miljø med en eksplosiv atmosfære. Disse direktiver beskytter medarbejderne mod eksplosionsrisiko i områder med eksplosiv atmosfære [European Commission, 2009]. Derfor må produktet ikke indeholde materialer eller elektronik, der kan skabe en risiko i en eksplosiv atmosfære.

• **R&TTE** (Radiocommunications and Telecommunications Terminal Equipment): R&TTE-Direktivet omfatter alle produkter, der anvender frekvensspektret brugt til radiokommunikation, og alt udstyr der er tilknyttet det offentlige telenet. Direktivet sikrer at udstyret opfylder visse væsentlige krav vedrørende sundhed og sikkerhed, elektromagnetisk interferens (R&TTE hænger sammen med EMC) og radiospektrumanliggender [European Commission, 2010]. R&TTE-direktivet bliver relevant, hvis udstyret skal udsende radiosignaler i forbindelse med implementering med bluetooth kommunikation.

Udover ovenstående har EU også en række standarder, som danner grundlag for beskyttelse af naturen og miljøet. Loven skal sikre, at samfundet udvikler sig med respekt for menneskets livsvilkår, og at dyre- og plantelivet bevares.

• **RoHS** (Restriction of Hazardous Substances Directive): RoHS-Direktivet regulerer elektronikprodukters indhold af visse skadelige stoffer så som bly, kviksølv, cadmium, hexavalent chrom samt polybromerede biphenyler (PBB) og polybromerede diphenylethere (PBDE) [Official Journal of the European Union, 2003].

• **WEEE** (Waste from Electric and Electronic Equipment): WEEE-Direktivet placerer ansvaret til genanvendelse af elektrisk og elektronisk udstyr hos fabrikanten, herunder indsamling, behandling og miljøvenlig bortskaffelse. Formålet med WEE er at reducere elektronisk affald, beskytte befolkningens generelle sundhed samt en beskyttelse af miljøet mod skadelige stoffer. WEEE er indført igennem DPA (Dansk Producent Ansvar), som har til formål at sikre enkle, økonomisk rimelige og retfærdige spilleregler for de berørte markedsaktører [Dansk Erhverv, 2010].

• **REACH** (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemical substances): REACH-Direktivet omhandler produktion og anvendelse af kemiske stoffer og deres potentielle indvirkning på både menneskers sundhed og miljøet. Importøren skal derfor vide præcist hvilke skadelige stoffer produktet indeholder [Dansk Erhverv, 2009].

• **CLP** (Classification, Labelling and Packaging): CLP-Directivet fastsætter regler for klassificering og mærkning af kemikalier. Det har til formål at afgøre, om et stof eller en blanding viser egenskaber, der fører til en klassificering som farlig [Dansk Erhverv, 2008].

• **Batteri Direktivet**: Formålet med direktivet er, at reducere virkningerne på miljøet ved fremstilling, distribution, brug og bortskaffelse af batterier [Dansk Erhverv, 2011].

Dermed er de specifikke regler for elektronikken kortlagt.

5.3 Miljø og etiske retningslinier

For at være på forkant med samfundsudviklingen, vil dette afsnit beskrive nogle retningslinjer, der kan give produktet et samfunds- og miljømæssigt korrekt image.

•**Cradle to Cradle**: Cradle to Cradle (Vugge til Vugge) er et koncept for produktion, forbrug, planlægning og design. Det sætter fokus på affald, og ser alle materielle processer som dele af et lukket kredsløb. Tankegangen handler om at minimere det menneskelige fodaftryk på planeten. Formålet er at designe produktionen således, at når produktet har afsluttet sin brugsperiode, bliver det til næringsstoffer for planeten. Eller således at det kan genbruges i fremtidige generationer af produkter [Vugge til Vugge Danmark, 2010].

•**LCA** (Life Cycle Assessment): LCA (Livscyklusvurdering) er et værktøj til at vurdere de potentielle miljømæssige virkninger af et produkts systemer eller tjenester på alle stadier i dets livscyklus. Dette gælder fra udvinding af ressourcer, gennem produktion og brug af produktet til genbrug, genvinding eller endelig bortskaffelse, dette kendt som "fra vugge til grav"vurdering. Desuden danner vurderingen grundlag for miljømærkning, hvor forbrugeren informeres om, i hvilken grad et produkt påvirker miljøet. LCA kan anvendes i f.eks. strategisk planlægning, produktudvikling og markedsføring [LCA Center, 1997].

•**CSR** (Corporate Social Responsibility): CSR omhandler virksomheders frivillige arbejde med at opfylde nationale og globale udfordringer.
Det kan f.eks. betyde, at virksomheder tager socialt ansvar, og kræver at leverandører overholder menneske- og arbejdstagerrettigheder. Virksomheder skal arbejde systematisk med miljø- og klimaledelse. De skal arbejde for at forbedre medarbejdernes forhold og arbejdsmiljø internt i virksomheden. Ligeledes skal de sørge for at udvikling af nye produkter eller ydelser, indeholder en social eller miljømæssig dimension.
CSR er et bredt begreb, og det kan dække mange forskellige sociale eller globale overvejelser i forbindelse med driften af en virksomhed. Det er frivilligt for danske virksomheder at arbejde med CSR. Det er dog for de største virksomheder i Danmark et lovkrav, at forholde sig til samfundsansvar i deres årsrapport [Erhvervs og Selskabsstyrelsen, 2010].

Metoder som LCA, CSR og Vugge til Vugge, er vigtige for at få en bedre forståelse af produkter og produktionen af dem. Metoderne kortlægger deres påvirkning af miljøet og samfundet, samt hjælper med udvikling af mere miljøvenlige produkter.

KAPITEL 6

Problemformulering

Igennem problemanalysen er det initierende problem i afsnit 1.1 besvaret. Den indsamlede viden anvendes til at opstille kriterier for at udvikle en hensigtsmæssig løsning, og beskrive hvilke krav der skal overholdes. Følgende delkonklusion kan udledes fra problemanalysen.

- Flere medarbejdere på Im. Stiholt A/S beretter om problemer med hørelsen. På trods af dette faktum anvender de ikke høreværnet til beskyttelse. Ved at imødekomme brugernes ønske om at kunne høre tale, vil det givetvis kunne ændre sig.
- Interviewet med John Larsen underbygger, at det har store konsekvenser når skaden først er indtruffet. Dette understreger vigtigheden af at overholde de lovmæssige grænser for gengivelse af lyd.
- Ved undersøgelse i kapitel 4 fremgår det, at en akustisk tilpasning af arbejdspladsen er dyrt. Derfor anses høreværn som en oplagt løsning.
- Kapitel 5, Lovgivning, beskriver krav til støjniveau, der skal overholdes på arbejdspladsen. Hvis ikke det er muligt at dæmpe støjen, er et høreværn et oplagt valg til at overholde lovgivningen.

Den indsamlede viden giver anledning til udvikling af en teknologi, som forebygger at mennesker bliver høreskadet på arbejdsmarkedet. Dette danner grundlaget for den tekniske problemformulering.

Den tekniske løsning II vil derfor bygge på en undersøgelse af følgende spørgsmål:

Hvordan designes et intelligent høreværn, som giver brugeren mulighed for at høre og forstå tale, men samtidigt dæmper støj i støjfyldte miljøer?

For at besvare dette spørgsmål, opsættes en række specifikke retningslinjer og spørgsmål der skal besvares:

- Hvilken teknologi skal anvendes til systemet?
- Hvilken filtrering er optimal i henhold til lydkvalitet og filtrering af støj fra maskiner og andre generende lydkilder?
- Hvordan konstrueres en hensigtsmæssig regulering, der overholder det maximalt fastsatte lydtryk?
- Hvordan designes en strømforsyning, der opfylder behovene til kredsløbets delelementer?

For at opfylde ovenstående punkter opstilles en kravspecifikation i afsnit 7.

KAPITEL 7

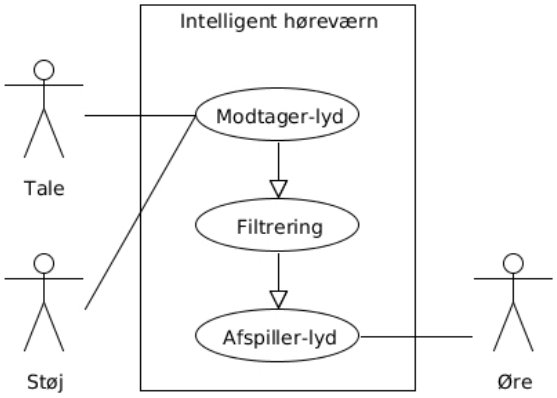
Kravspecifikation

Formålet med den resterende del af denne rapport er, at udvikle en løsning, der behandler problemstillingerne beskrevet gennem problemanalysen. Kravspecifikationen vil beskrive, hvilke kriterier løsningen skal opfylde, på baggrund af problemanalysen. Den tekniske løsning II, bliver udviklet på baggrund af kravspecifikationen. Målet er at udvikle et produkt som forbrugeren vil finde anvendeligt jf. det initierende problem i afsnit 1.1. Produktet vil som udgangspunkt kunne anvendes af alle der opholder sig i støjfyldte miljøer. Kravene vedrørende lovgivning og brugerkrav, tager udelukkende udgangspunkt i arbejdsmarkedet. Kravspecifikationen er udarbejdet ud fra [Biering-Sørensen et al., 1988].

Læsevejledning
Kravspecifikationen er opbygget i 8 afsnit, hvor alle opstillede krav stammer fra problemanalysen. Kravene refererer tilbage til de steder, hvor de er nævnt i analysen. Afsnit 7.1 giver et samlet overblik over systemet ud fra use cases. Afsnit 7.2 beskriver de overordnede specifikke krav til produktet. Afsnit 7.3 beskriver grænsefladerne med udgangspunkt i de opstillede use cases. Afsnit 7.4 beskriver ydelseskrav til produktet. Afsnit 7.5 beskriver kvalitetskravene til produktet. Afsnit 7.6 er de krav der ikke kan placeres i foregående kategorier. I afsnit 7.7 vælges den løsning der er i stand til at opfylde kravspecifikationen. Slutteligt beskrives afgrænsninger i afsnit 7.8 for produktet i forhold til de opstillede krav. I 7.9 beskrives den anvendte udviklingsmodel til den teknsike løsning.

7.1 Beskrivelse af systemets funktioner

For at det er muligt at specificere systemets funktioner, opstilles først et Use Case diagram over systemets hovedfunktioner og derefter selve Use Casene. Systemet gør det muligt at kontrollere hvilke frekvenser der gengives, og med hvilket lydniveau disse gengives, i forhold til den oprindelige lydkilde.



Figur 7.1: Use Case diagram af systemet, med de 3 hovedfunktioner: Modtager-lyd, Filtrering og Afspiller lyd. De 3 aktører som interagerer med systemet ses som Tale, Støj og Øre.

Figur 7.1 indeholder 3 Use Cases. De tager udgangspunkt i en indgangsfunktion (Modtager-lyd), en behandlingsfunktion (Filtrering) og en udgangsfunktion (Afspiller-lyd). Følgende Use Cases viser funktionerne systemet skal håndtere.

Use Case	Modtager-lyd
Description	Lyd fra taler og støjkilde modtages
Assumptions	Der er kun to former for lyd. Disse er tale og støj mellem 20-20kHz.
Actors	Tale, støj & Filtrering.
Steps	1. REPEAT: 1.1. IN PARALLEL 1.1.1. Tale afgiver lyd 1.1.2. Støj afgiver lyd 1.2. Modtag lydsignal 1.3. Konverter lyd til elektrisk signal via. mikrofon 1.4. Videresend signalet på max $\pm 9V$, uændret indenfor 300-3kHz til filtrering. UNTIL Systemet slukkes

Use Case	Filtrering
Description	Signal fra Modtager-lyd filtreres.
Actors	Modtager-lyd & Afspiller-lyd
Steps	1. REPEAT: 1.1. Modtag signal fra Modtager-lyd 1.2. Filtrer signal med et pasbånd fra 300 til 3kHz af mindst 2. orden 1.3. Afsend filtreret signal til Afspiller-lyd med max $\pm 9V$ UNTIL Systemet slukkes

Use Case	Afspiller-lyd
Description	Signal fra Filtrering afspilles og niveau reguleres
Assumptions	Signalet er indenfor et frekvensområde, der kan gengives af en højttaler.
Actors	Filtrering & Øre
Steps	1. REPEAT: 1.1. Modtager signal fra Filtrering 1.2. Forstærke signal til max 80dB lydniveau 1.3. Konverter elektrisk signal til lyd via højttaleren Afspillet lydniveau = optaget lydniveau dog max 85dB(A) og 137dB(C) kortvarigt 1.4. Videresend lyd til Øre UNTIL Systemet slukkes

Ud fra Use Case modellen udledes grænsefladerne, og funktionerne systemet skal indeholde. Alle krav er udarbejdet således, at de kan testes og verificeres i en accepttest i kapitel

10. Disse krav bliver behandlet i afsnit 7.3.

Brugerprofil
Den daglige bruger af høreværnet forventes at være almindelige mennesker på arbejdsmarkedet. Det forventes ikke at brugeren har dybdegående kendskab til produktets virkemåde, men er i stand til at udføre daglig vedligeholdelse, som rengøring og batteriskift.

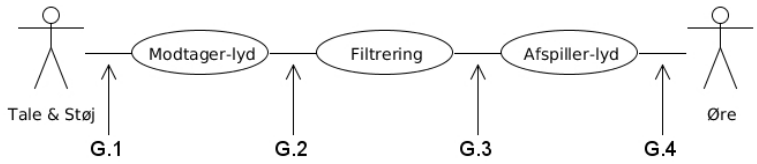
Krav til udviklingsforløbet
Projektet skal afleveres den 26/5 2011. Perioden mellem projektaflevering og eksamen giver muligheder for rettelser og tilføjelser.

7.2 Specifikke krav

- Binaural gengivelse skal være muligt, så brugeren kan retningsbestemme lyde jf. afsnit 2.2 fra højre og venstre.
- Brugerne ønsker et produkt på størrelse med en øreprop samt indbygget radio, jf. afsnit 3.2.1.
- Brugerne ønsker at kunne høre tale med høreværnet på, jf. afsnit 3.2.1.
- Levetiden skal være minimum 2 år, for at leve op til købeloven [Justitsministeriet, 2003].

7.3 Beskrivelse af grænseflader

Ud fra de 3 opstillede use cases kan de overordnede grænseflader defineres som på figur 7.2.



Figur 7.2: Use Case diagram der klarlægger de 4 grænseflader

Kravene til de 4 grænseflader er:

- **G1**: Modtager-Lyd bliver påvirket af lydtryk fra Tale & Støj. Lydtrykket varierer fra 0 til $\pm 1 atm$. Frekvensen variere fra 20-20kHz, som beskrevet i afsnit 2.3.
- **G2**: Kommunikation mellem Modtager-lyd og Filtrering skal være impedanstilpasset med mindst et forhold på 1:10 fra udgang til indgang. De elektriske spændinger må variere max $\pm 9V$. Frekvensområdet ligger fra 20 til 20 kHz.
- **G3**: Kommunikation mellem Filtrering og Afspiller-lyd skal være impedanstilpasset med mindst et forhold på 1:10 fra udgang til indgang. De elektriske spændinger må max variere $\pm 9V$. Frekvensområdet ligger mellem 300-3kHz, uddybet i afsnit 2.3.

- **G4**: Øre modtager lyd fra Afspiller-lyd. Lyden må max gengives med 85dB(A) og 137dB(C) i korte pulser, uddybet i afsnit 5.1. Det skal være muligt at justere volumen til max 80dB, se afsnit 2.3, samt slukke og tænde systemet.

7.4 Krav til ydelse

- Filteret skal have et pasbånd fra 300 til 3kHz med en afskæring på min. 12 dB/okt eller 40 dB/dek for ikke at nedsætte taleforståelsen, jf. forsøg i Appendix A.1.
- Lydniveauet over 8 timer skal være max 80dB(A), jf. tabel 2.1, i afsnit 2.3. Lovgivningen sætter max grænserne fast til 85dB(A) og 137dB(C) i korte pulser jf. afsnit 5.1.
- Ifølge standarden for passive høreværn i afsnit 5.1 skal dæmpningen frekvensmæssigt mindst være:

Frekvens [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	8000
$(M_f - s_f)$ [dB]	5	8	10	12	12	12	12

Tabel 7.1: Minimumsdæmpning ved fast definerede frekvensområder. Hvor M_f er gennemsnitsdæmpningen af målt data, og s_f er standardafvigelsen af samme række data.

- Den passive dæmpning i høreværnet skal ligge mellem 20-37dBSNR (simplified noise level reduction), for at leve op til tilsvarende eksisterende løsninger beskrevet i afsnit 4.7.
- Høreværnet skal benytte to 9V batterier som strømforsyning jf. afsnit 4.4.1.
- Batteriet skal kunne holde en arbejdsdag og gerne mere. Det maximale strømforbrug er bestemt udfra en 12 timers arbejdsdag. Et af de kraftigste 9V batterier på markedet er på 280mAH [Batteribyen, 2011]. Dette giver et strømforbrug på højst:

$$\frac{280mAH}{12H} = 23.33mA \tag{7.1}$$

7.5 Kvalitetskrav

- Høreværnet skal kunne tåle at blive tabt fra 1.5 meters højde ifølge afsnit 5.1.

7.6 Andre krav

- Dæmpningsværdierne skal fremgå på emballagen for det endelige produkt ifølge standarden for høreværn 5.1.
- Der skal være en dansk brugsanvisning ifølge standarden for høreværn i afsnit 5.1.
- Høreværnet skal være godkendt af et autoriseret laboratorium ifølge standarden for høreværn i afsnit 5.1.
- For at produktet må sælges i EU skal det være CE mærket. CE mærkningen er beskrevet i afsnit 5.2.

- Standarden for krav til høreværn skal kun opfyldes inden for temperaturområdet $22°C \pm 5°C$ jf. afsnit 5.1.

7.7 Valgt løsning

Ud fra de kriterier der gennem kravspecifikation er sat op, kan det konkluderes at den optimale løsning vil være en variant af det intelligente høreværn beskrevet i afsnit 4.4, vedrørende eksisterende løsninger. Denne konklusion bunder hovedsagligt i, at der i afsnit 3.2.1 er konkluderet at travlhed og ligegyldighed er en afgørende årsag til at medarbejderne ikke bruger høreværnet. Derudover er det så godt som umuligt at vide hvornår kollegaen ved siden af, uvarslet starter en støjkilde, og dermed udsætter alle i nærheden for potentiel skadelig lydpåvirkning. Det er således vigtigt at medarbejderne kan bære høreværnet over en hel arbejdsdag, uden at være nødsaget til at tage det af. Det skal derfor være komfortabelt at bære, og man skal kunne tale sammen når man bærer høreværnet. Høje lydtryk og støj filtreres og begrænses til niveauer der ikke beskadiger hørelsen.

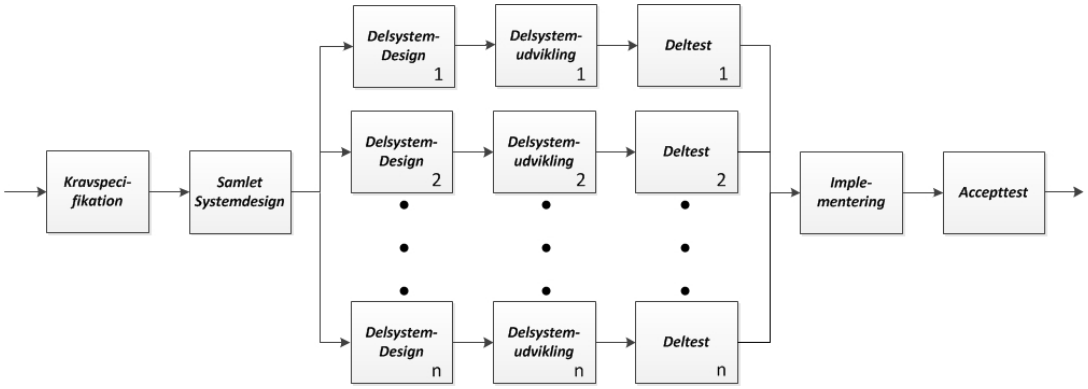
7.8 Afgrænsning

Der bliver udarbejdet en prototype der overholder kravspecifikationen. Kravene vil blive testet i test casene beskrevet i Accepttest i kapitel 10. Nogle af kravene anses som uvæsentlige for en prototype, og der afgrænses derfor fra følgende punkter:

- CE mærkning
- Høreværnet skal være godkendt af et autoriseret laboratorium
- Levetiden skal være minimum 2 år
- Brugerønsker om at produktet er på størrelse som en øreprop og har indbygget radio
- Samtlige kvalitetskrav 7.5
- Udarbejdelse af dansk brugsanvisning
- Udarbejdelse af målinger for den passive dæmpning
- Udarbejdelse af målinger over 8 timer der dokumenterer de 80dB(A) overholdes

7.9 Anvendt metode til løsningen

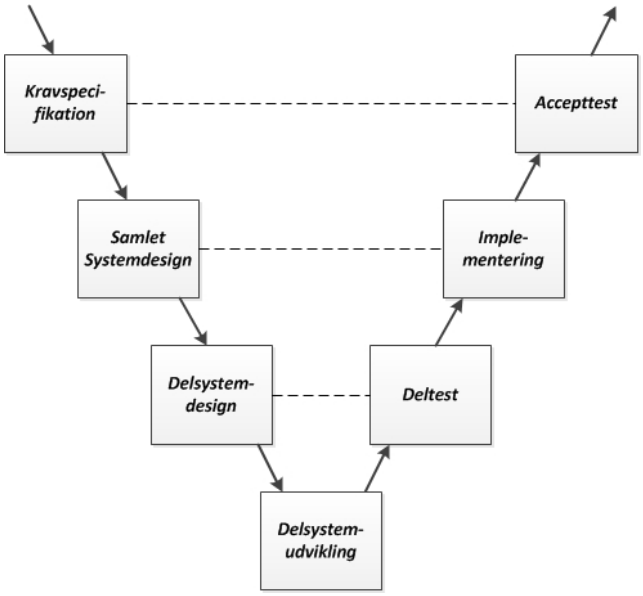
I dette afsnit beskrives de metoder, der er anvendt til udvikling af den tekniske løsning. Metoderne tager udgangspunkt i SPU-udviklingsmodellen og SPU V-modellen [Biering-Sørensen et al., 1988]. SPU står for Struktureret Produkt Udvikling. På figur 7.3 er SPU-udviklingsmodellen skitseret.



Figur 7.3: SPU-udviklingsmodellen samt delsystemets faser [Biering-Sørensen et al., 1988]

Ud fra kravspecifikationen opbygges et systemdesign. Systemet inddeles således i mindre delsystemer. For hvert delsystem defineres funktioner og grænseflader, så det er muligt at designe, udvikle og teste hvert delsystem seperat. Denne metode gør det lettere hvis systemet skal repareres eller modificeres. Når alle delsystemerne er udviklet og testet, foreligger en implementering hvor delsystemerne integreres trinvist. Til sidst udføres en accepttest, hvor hele systemet testes i forhold til kravspecifikationen i kapitel 7.

I følge SPU skal testaktiviteterne begynde tidligt i udviklingsforløbet. V-modellen på figur 7.4 viser, hvordan testfaserne er knyttet sammen med de egentlige udviklingsfaser.



Figur 7.4: SPU's V-model [Biering-Sørensen et al., 1988]

V-modellen viser dermed hvordan:

- Kravspecifikationen og accepttesten skal udføres i forhold til hinanden. Alle krav skal være målbare og kunne testes. Accepttesten tester det færdige systems funktioner og egenskaber i forhold til kravspecifikationen. Dette testes som en blackbox.

- Samlet systemdesign og implementering skal udføres i forhold til hinanden. Systemet designes med definerede grænseflader således at delsystemerne kan implementeres. Implemtering tester således samspillet mellem delsystemerne, efterhånden som de integreres. Dette udføres som en whitebox test.
- Delsystemdesign og deltest skal udføres i forhold til hinanden. Delsystemdesign fastsætter funktioner til hvert delsystem som kan testes i deltest, vha. whitebox tests.

Der er mange fordele ved at bruge V-modellen til at planlægge testaktiviteterne. Når testovervejelser er med i hele udviklingsforløbet, sikres det at alt kan testes og dermed minimeres fejlraten. Der kan på denne måde opnås en detaljeret oversigt over kommende arbejdsopgaver, hvilket muliggør en bedre planlægning af det restende udviklingsforløb.

Dermed afsluttes problemanalysen - del I. Den Tekniske Løsning - del II, beskriver og dokumenterer dermed sammenhænge, analyser og teorier til besvarelse af kravspecifikation, afsnit 7. Dette gjort ud fra den beskrevne SPU model.

DEL II

TEKNISK LØSNING

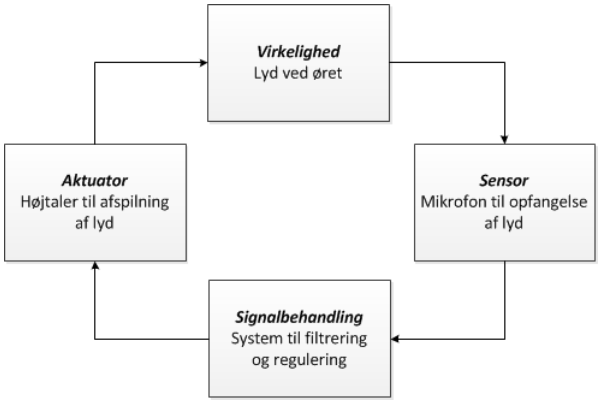
KAPITEL 8

Systemdesign

Der skal designes et system, som kan opfylde kravspecifikationen, kapitel 7. Første del af dette afsnit beskriver mulige løsninger, samt hvilken løsning der er valgt og hvordan disse fungerer. Efterfølgende forelægger en dokumentation af hvert delsystem.

8.1 Løsningsmuligheder

Høreværnet skal kunne opfange et lydsignal, regulere signalet når lydtrykket er for højt, og så afspille signalet igen med mest mulig støj sorteret fra. Dette forsøges udført uden det har indflydelse på taleforståeligheden. En model over princippet i høreværnets virkemåde ses på figur 8.1.



Figur 8.1: Diagram over princippet i systemet

Signalbehandlingen kan laves enten med en DSP, som foretager signalbehandlingen digitalt, eller med et analogt kredsløb. For at vælge hvilken type løsning der skal bruges ses der på fordelene og ulemperne ved hver type.

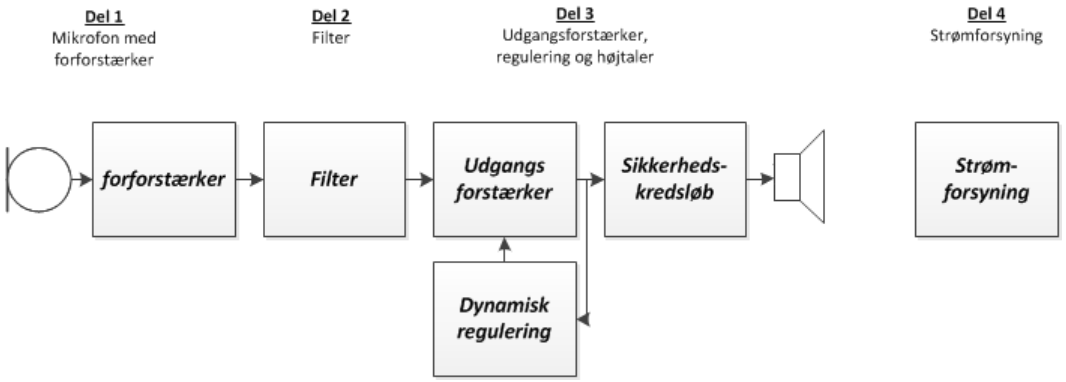
Analogt kredsløb
Et analogt kredsløb behandler elektriske signaler i kontinuert tid. Analoge signaler kan derfor antage alle værdier mellem to grænser, og enhver ændring af signalet har betydning. Fordelene ved analoge kredsløb er, at de bevarer alle informationer i et signal. Ulemper ved analoge kredsløb er, at de er mere udsatte for elektronisk støj, hvilket især er et problem ved småsignaler.

Digitalt kredsløb
En digital løsning ville typisk bestå af en DSP, som behandler diskrete signaler istedet for analoge signaler. Diskrete signaler kan kun antage forudbestemmte værdier, som afhænger af opløsningen på ADC'en (Analogue-to-Digital Converter). Diskrete signaler er derfor mere resistente overfor støj, men til gengæld kan der gå information om signalet tabt på grund af kvantiseringsfejl ved ADC. En fordel ved at bruge en DSP, er at avancerede kredsløb ikke bliver dyrere, men kun øger beregningstiden for DSP'en. I en DSP kan filterkarakteristikker bestemmes med en større frihedsgrad end i analoge kredsløb, idet der ikke skal tages hensyn til komponentværdier. Ulempen ved DSP er at den afleverer et kvantiseret signal.

Kort sagt er analoge kredsløb som regel bedre til behandling af naturlige signaler, mens DSP er bedre til behandling af komplicerede funktioner. Der er derfor valgt at lave systemet som et analogt kredsløb.

8.2 Valgt System

For at give et overblik over systemet udarbejdes først et overordnet blokdiagram, som er vist på figur 8.2. Systemets blokke beskrives og deres krav og funktioner ridses op. Hver blok designes, konstrueres og testes uafhængigt af hinanden. Hver del er testet ved at måle på kredsløbet og sammenligne de målte resultater med beregninger og simuleringer. Med gennemarbejdede grænseflader, kan delene konstrueres parallelt. Herefter integreres de enkelte dele trinvis i implementeringen kapitel 9, efterfulgt af en samlet accepttest i kapitel 10.



Figur 8.2: Blokdiagram over systemet

Del 1 - Mikrofon og forforstærker
Mikrofonen opfanger et varierende lydtryk og omdanner dette til et elektrisk signal. Da forstærkningen i filterdelen - del 2, er afhængig af hvilken filterkarakteristik der vælges, skal forforstærkerens forstærkning afstemmes med filterdelen. Der kræves $200mV$ ud af filteret ved $94dB$. Denne del beskrives i afsnit 8.3

Del 2 - Filter
Filteret skal som følge af kravspecifikationen, afsnit 7.4, have et pasbånd på $300 - 3kHz$, og være af minimum 2.orden. For at forhindre at signaler der ønskes behandlet kommer i nærheden af forsyningspændingen, fastsættes amplituden af signalet til $200mV$ ved $94dB$ efter filteret. Jævnfør afsnit 7.2 pkt. 3, ønsker brugeren at kunne høre tale med høreværnet på. Af appendix A.1 og afsnit 3.2.2 kan det udledes, at en filterafskæring på 2kHz, er formålstjenestelig. Derfor implementeres denne afskæringsfrekvens som en valgmulighed for brugeren. Konstruktionen af filteret er beskrevet i afsnit 8.4.

Del 3 - Udgangsforstærker, regulering og højtaler
Udgangsforstærkeren modtager det filtrerede signal, og forstærker det op, så udgangsniveauet fra højtaleren svarer til lydtrykket ved mikrofonen. Dette skal kun ske så længe niveauet ikke overstiger $80dB$. Udgangsforstærkeren er beskrevet i afsnit 8.6. I tilfældes hvor niveauet overstiger $80dB$ skal den dynamiske regulering aktiveres, og begrænse sig-

nalet så det ikke overstiger 80dB. Den dynamiske regulering er nærmere beskrevet i afsnit 8.5. Derudover skal det være muligt for brugeren selv at justere niveauet, dog stadig til max 80dB. Da den dynamiske regulering ikke kan foregå momentant, skal sikringskredsløbet bruges til at begrænse signalet, mens det reguleres. Desuden beskytter sikkerhedskredsløbet mod korte impulser, som ifølge kravspecifikationen 7.4 ikke må overstige 137$dB(C)$. Sikkerhedskredsløbet beskrives nærmere i afsnit 8.7. Valg af højtalerenhed er beskrevet i afsnit 8.8.

Del 4 - Strømforsyning
Strømforsyningen skal ifølge kravspecifikation 7.4 bestå af to 9V batterier. Strømforsyningen skal forhindre at batterierne aflades helt, og give en indikation når der nås et kritisk niveau. Strømforsyningen beskrives i afsnit 8.9.

Med alle delsystemers funktioner klarlagt, vil den resterende del af dette kapitel beskrive det enkelte systems problematikker og virkemåde.

8.3 Mikrofon og forforstærker

Første led i systemet er transduceren, som opfanger lyd og omdanner lyden til et elektrisk signal. Til dette formål anvendes en Electret Condenser Microphone (ECM) af typen MCE4000. ECM´en er en variant af den konventionelle kondensator mikrofon. Fordelen ved denne er at den har en passende størrelse til at implementere i et høreværn, og desuden har den et af de bedste forhold mellem pris og kvalitet. Den er derfor en af de mest anvendte mikrofontyper på konsumer- og optagelsesmarkedet [STMicroelectronics, 2002].

8.3.1 Kondensatormikrofon

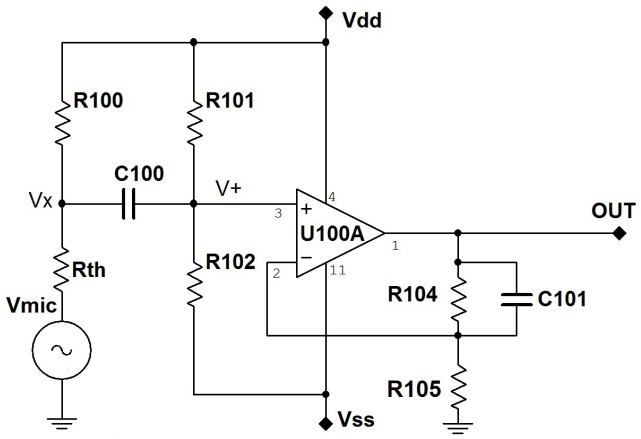
En konventionel kondensatormikrofon består af en elektrisk ledende membran, spændt ud foran en fast elektrode. Når disse påtrykkes en forspænding dannes der et elektrisk felt som på en kondensator. Dette felt spænder membranen op i forhold til bagelektroden. Lydtrykket vil påvirke membranen så afstanden til bagelektroden varieres og dermed ændres kapaciteten i takt med lydfeltet [Brixen and Voetmann, 2004]. Da forspændingen holdes konstant vil mikrofonen afgive en spænding proportional med membranens forskydning fra ligevægtsstillingen. [Raskmark and Jensen, 1998] Dette foregår således:

$$C = \left(\frac{A}{x}\right) \cdot \varepsilon \tag{8.1}$$

Hvor [C] er kapaciteten, [A] er overlapningsarealet af membranen og elektroden, [ε] er dielektrikum og [x] er afstanden mellem pladerne. Da [ε] er konstant vil en afstandsvariation afsætte en varierende kapacitet. Hvis denne betragtes i formel 8.2 [Holck et al., 2009a], hvor ladningen [Q] holdes konstant, vil en kapacitetsvariation afsætte en variende spænding på output:

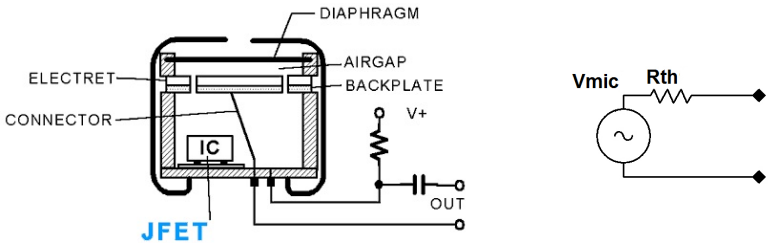
$$V_{pol} = \frac{Q}{C} \tag{8.2}$$

8.3.2 Electret Mikrofon



Figur 8.3: Mikrofonforstærker

ECM´en er opbygget som en kondensatormikrofon med den variation, at kondensatorpladerne ikke skal påtrykkes en forspænding, da disse materialer i forvejen er polariseret. Figur 8.4(a) viser at en JFET er indbygget i mikrofonhylstret. Ledningerne skal ses symbolsk, da membranen vil være forbundet til stel og den aktive bagelektrode forbundet til gate på FET'en. FET'en virker på denne måde som buffer mellem mikrofonens kapacitive elektrode og mikrofonens output. På MCE4000 er drain forbundet til output, og det indbyggede forstærkerled kræver en forsyningspænding.



(a) Opbygning af electret mikrofon [Audio Engineering Society, 2003]

(b) Thevenin ækvivalent af electret mikrofon

Figur 8.4: Diagram over mikrofon

8.3.3 Impedanstilpasning

Mikrofonen vil trække 0.5mA indtil spændingsfaldet er mindre end 1.5V over mikrofonen [Monacor, 2011]. Den har en maksimal outputimpedans [R_{th}] på 2.2$k\Omega$ [Monacor, 2011], som ses på figur 8.4(b). Ifølge Application Note [Panasonic Semiconductor Device Solutions Co., 2011] skal R_{100} have samme værdi som udgangsimpedansen for at følsomheden

er 5mV/Pa. Derfor er $R_{100} = 2.2k\Omega$, hvilket dermed giver en ny udgangsimpedans Z_{out}

$$Z_{out} = R_{th}//R_{100} = \frac{1}{\frac{1}{2.2k\Omega} + \frac{1}{2.2k\Omega}} \Leftrightarrow Z_{out} = 1.1k\Omega \tag{8.3}$$

Med mikrofonspændingen på plads ses der på offsetspændingen på den ikke inverterende indgang på opampen U_{100A}. Der ønskes 0V for at få systemet i balance, hvilket sikres ved at modstandende R_{101} og R_{102} er samme størrelse. Disse fungerer således også som belastningsmodstande. For at undgå signaltab ønskes en indgangsimpedans $Z_{in} = R_{101}//R_{102}$ på cirka 100 gange større end mikrofonens udgangsimpedans Z_{out}, hvilket giver $Z_{in} = 100k\Omega$ Da R_{101} og R_{102} skal have samme størrelse kan de udregnes således:

$$R_{101}//R_{102} = 100\Omega \Leftrightarrow \frac{1}{\frac{1}{R_{101}} + \frac{1}{R_{102}}} = 100k\Omega \tag{8.4}$$

$$\Leftrightarrow \frac{1}{\frac{1}{R_{101}} + \frac{1}{R_{101}}} = 100k\Omega \Leftrightarrow R_{101} = 200k\Omega \tag{8.5}$$

Spændingsdelingen mellen Z_{in} og Z_{out} vil da udtrykke et signaltab på:

$$V_{tab} = 1 - \left(\frac{Z_{in}}{Z_{out} + Z_{in}}\right) = 1 - 0.99 = 1\% \tag{8.6}$$

Dette er dog kun når kondensatoren er kortsluttet.

8.3.4 Overføringsled

Overføringskondensatoren C_{100} fungerer sammen med R_{th}, R_{100}, R_{102} og R_{103} som et 1. ordens højpasfilter, hvorfor overføringsfunktionen V_+/V_{mic} beregnes. Først opsilles en knudepunktsligning i V_x, figur 8.3.

$$V_x\left(\frac{1}{R_{th}} + sC_{100} + \frac{1}{R_{100}}\right) - V_{mic}\frac{1}{R_{th}} - V_+ sC_{100} = 0 \Leftrightarrow V_x = \frac{V_{mic}\frac{1}{R_{th}} + V_+ sC_{100}}{\frac{1}{R_{th}} + sC_{100} + \frac{1}{R_{100}}} \tag{8.7}$$

Herefter opstilles en knudepunktsligning i V_+.

$$V_+\left(\frac{1}{R_{101}//R_{102}} + sC_{100}\right) - V_x sC_{100} = 0 \tag{8.8}$$

Hvor V_x indsættes i knudepunktsligningen for V_+

$$V_+\left(\frac{1}{R_{101}//R_{102}} + sC_{100}\right) - \left(\frac{V_{mic}\frac{1}{R_{th}} + V_+ sC_{100}}{\frac{1}{R_{th}} + sC_{100} + \frac{1}{R_{100}}}\right) sC_{100} = 0 \tag{8.9}$$

V_+/V_{mic} isoleres. $(R_{101}//R_{102})$ benævnes R_p. Først ganges V_+ ind i parentesen, hvorefter ligningen ganges igennem med nævneren af højre brøk.

$$\left(\frac{V_+}{R_p}+V_+sC_{100}\right)\left(\frac{1}{R_{th}}+sC_{100}+\frac{1}{R_{100}}\right)-\left(\frac{V_{mic}}{R_{th}}+V_+sC_{100}\right)sC_{100}=0 \tag{8.10}$$

Parenteserne ganges ud:

$$\frac{V_+}{R_pR_{th}}+\frac{V_+sC_{100}}{R_{th}}+\frac{V_+sC_{100}}{R_p}+\frac{V_+}{R_pR_{100}}+\frac{V_+sC_{100}}{R_{100}}-\frac{V_{mic}sC_{100}}{R_{th}}=0 \tag{8.11}$$

Led med V_+ sættes på fælles brøkstreg. Led med V_{mic} flyttes på den anden side.

$$\frac{V_+sC_{100}R_pR_{100}+V_+R_{100}+V_+sC_{100}R_{th}R_{100}+V_+R_{th}+V_+sC_{100}R_{th}R_p}{R_pR_{th}R_{100}}=\frac{V_{mic}sC_{100}}{R_{th}} \tag{8.12}$$

V_+ sættes udenfor parentes, og der ganges igennem med nævneren af venstre side.

$$V_+(R_{100}+sC_{100}R_{th}R_{100}+R_{th}+sC_{100}R_{th}R_p+sC_{100}R_pR_{100})=V_{mic}sC_{100}R_pR_{100} \tag{8.13}$$

$$\Leftrightarrow \frac{V_+}{V_{mic}}=\frac{sC_{100}R_pR_{100}}{R_{100}+R_{th}+sC_{100}R_pR_{100}+sC_{100}R_{th}R_{100}+sC_{100}R_{th}R_p} \tag{8.14}$$

Med nulpunkt z og pol p, kan et 1. ordens filter beskrives ved ligning 8.15 [Irwin and Nelms, 2008] (Uddybet i afsnit 8.4.2).

$$H(s)=k\cdot\frac{s-z}{s-p} \tag{8.15}$$

Dermed sættes ligning 8.14 på formen som i ligning 8.15. V_+/V_{mic} benævnes $H_1(s)$.

$$H_1(s)=\frac{sC_{100}R_pR_{100}}{R_{100}+R_{th}+s(C_{100}R_pR_{100}+C_{100}R_{100}R_{th}+C_{100}R_pR_{th})} \tag{8.16}$$

Led hvor s indgår, flyttes foran brøken, som konstanten k.

$$H_1(s)=\frac{C_{100}R_pR_{100}}{C_{100}R_pR_{100}+C_{100}R_pR_{th}+C_{100}R_{100}R_{th}}\cdot\frac{s}{\frac{R_{100}+R_{th}}{C_{100}R_pR_{100}+C_{100}R_pR_{th}+C_{100}R_{100}R_{th}}+s} \tag{8.17}$$

C_{100} udgår fra konstanten k.

$$H_1(s)=\frac{R_pR_{100}}{R_pR_{100}+R_pR_{th}+R_{100}R_{th}}\cdot\frac{s}{\frac{R_{100}+R_{th}}{C_{100}R_pR_{100}+C_{100}R_pR_{th}+C_{100}R_{100}R_{th}}+s} \tag{8.18}$$

Ifølge ligning 8.15 bestemmer relation 8.19 derfor overgangsfrekvensen. For ikke at påvirke filter karakteristikken i afsnit 8.4 sættes denne en faktor 3 væk. Dermed skal den dimensio-

neres til $100Hz$.

$$p = \frac{R_{100} + R_{th}}{C_{100}R_pR_{100} + C_{100}R_pR_{th} + C_{100}R_{100}R_{th}} \Leftrightarrow \quad (8.19)$$

$$100 \cdot 2\pi = \frac{2.2k\Omega + 2.2k\Omega}{C_{100} \cdot 100k\Omega \cdot 2.2k\Omega + C_{100} \cdot 100k\Omega \cdot 2.2k\Omega + C_{100} \cdot 2.2k\Omega \cdot 2.2k\Omega} \Leftrightarrow \quad (8.20)$$

$$C_{100} = 15.7nF \quad (8.21)$$

8.3.5 Forstærkerled

Mikrofonen leverer en spænding på 5mV ved et lydtryk på 94dB. Afsnit Dynamisk Regulering 8.5 er dimensioneret til at regulere en spænding på 200mV ved 94dB. Således er det nødvendigt at forstærke signalet. Ligning 8.100 i afsnit Filter 8.4 fastlægger forstærkningen i filterdelen til 6.52 gange. Dermed skal forstærkerkoblingen U_{100}, C_{102}, R_{104} og R_{105} forstærke $A = 200mV/6.52/5mV = 6.13$gange. I tilbagekoblingen implementeres et 1. ordens filter, da frekvenser over $3kHz$ ikke er ønsket. For ikke at ødelægge filterkarekteristikken i afsnit 8.4 designes filteret til at ligge en faktor 3 væk, dermed $9kHz$. Forstærkeren er opbygget som en non-inverting kobling for at opnå en højimpedant kobling, som ikke belaster det foregående trin. Da det er et første ordens ikke-inverterende system, med kun én knækfrekvens vil overføringsfunktionen have en pol og et nulpunkt i henhold til ligning 8.15 [Irwin and Nelms, 2008]. Overføringsfunktionen opstilles:

$$\frac{V_{out}}{V_+} = H_2(s) = \frac{R_{104}//\frac{1}{sC_{102}}}{R_{105}} + 1 = \frac{\frac{1}{\frac{1}{R_{104}}+sC_{102}}}{R_{105}} + 1 = \frac{\frac{R_{104}}{1+sC_{102}R_{104}}}{R_{105}} + 1 = \quad (8.22)$$

$$\frac{R_{104}}{R_{105}(1+sC_{102}R_{104})} + 1 = \frac{R_{104}}{R_{105}(1+sC_{102}R_{104})} + \frac{R_{105}(1+sC_{102}R_{104})}{R_{105}(1+sC_{102}R_{104})} = \quad (8.23)$$

$$\frac{R_{104} + R_{105}(1+sC_{102}R_{104})}{R_{105}(1+sC_{102}R_{104})} \quad (8.24)$$

Da $(R_{104}+R_{105}) \cdot (R_{104}//R_{105}) = R_{104} \cdot R_{105}$ kan ligningen skrives videre som:

$$H_2(s) = \frac{R_{104}+R_{105}}{R_{105}} \cdot \frac{1 + s \cdot (R_{104}//R_{105}) \cdot C_{102}}{1 + sC_{102}R_{104}} = \quad (8.25)$$

$$\frac{R_{104}+R_{105}}{R_{105}} \cdot \frac{(R_{104}//R_{105})C_{102}\left(\frac{1}{(R_{104}//R_{105})C102} + s\right)}{C_{102}R_{104}\left(\frac{1}{C_{103}R_{104}} + s\right)} = \quad (8.26)$$

$$\frac{(R_{104}+R_{105})(R_{104}//R_{105})C_{102}}{R_{105}C_{102}R_{104}} \cdot \frac{\frac{1}{(R_{104}//R_{105})C_{102}} + s}{\frac{1}{C_{102}R_{104}} + s} \Leftrightarrow \quad (8.27)$$

$$H_2(s) = \frac{(R_{104}+R_{105})(R_{104}//R_{105})}{R_{105}R_{104}} \cdot \frac{\frac{1}{(R_{104}//R_{105})C_{102}} + s}{\frac{1}{C_{102}R_{104}} + s} = 1 \cdot \frac{\frac{1}{(R_{104}//R_{105})C_{102}} + s}{\frac{1}{C_{102}R_{104}} + s} \quad (8.28)$$

Overføringsfunktionen er dermed på den ønskede form. En sammenligningen af ligning 8.15 og 8.28 giver p_1, som det ses i ligning 8.29. Med en overgangsfrekvens på $9kHz$ og en

kondensator der vælges til $100nF$, findes R_{104}.

$$p_1 = \frac{1}{C_{103}R_{104}} \Leftrightarrow 2\pi \cdot 9kHz = \frac{1}{C_{103}R_{104}} \Leftrightarrow R_{104} = \frac{1}{2\pi \cdot 100nF \cdot 9kHz} = 176.8\Omega \quad (8.29)$$

Konstanten k skal representere en forstærkning på 6.13 gange. Der tages udgangspunkt i $0Hz$ (DC), hvor det er nemmest at benytte ligning 8.25, hvor $s = j0$ dermed indsættes.

$$H(j0) = \frac{R_{104}+R_{105}}{R_{105}} \cdot \frac{1 + j0 \cdot (R_{104}//R_{105}) \cdot C_{102}}{1 + j0 \cdot C_{102}R_{104}} = \frac{R_{104}+R_{105}}{R_{105}} \quad (8.30)$$

Dette udtryk skal dermed være lig forstærkningen.

$$k = \frac{R_{104}+R_{105}}{R_{105}} \Leftrightarrow 6.13 = \frac{176.8\Omega+R_{105}}{R_{105}} \Leftrightarrow 6.13 = \frac{176.8\Omega}{R_{105}} + \frac{R_{105}}{R_{105}} \quad (8.31)$$

$$6.13 = \frac{176.8\Omega}{R_{105}} + 1 \Leftrightarrow R_{105} = \left(\frac{6.13-1}{176.8}\right)^{-1} \Leftrightarrow R_{105} = 34.5\Omega \quad (8.32)$$

Dermed er komponentværdierne bestemt for forstærkerdelen. Det eftertjekkes at nulpunktet ikke påvirker pasbåndet:

$$z_1 = \frac{1}{(R_{104}//R_{105})C_{102}} = \frac{1}{\frac{176.8 \cdot 34.5}{176.8+34.5}100 \cdot 10^{-}9} = 346.4 \cdot 10^3 rad/s = 55kHz \quad (8.33)$$

Hvilket er langt udover det hørbare område, og nulpunktet er derfor accepteret.

Resultater for forforstærker

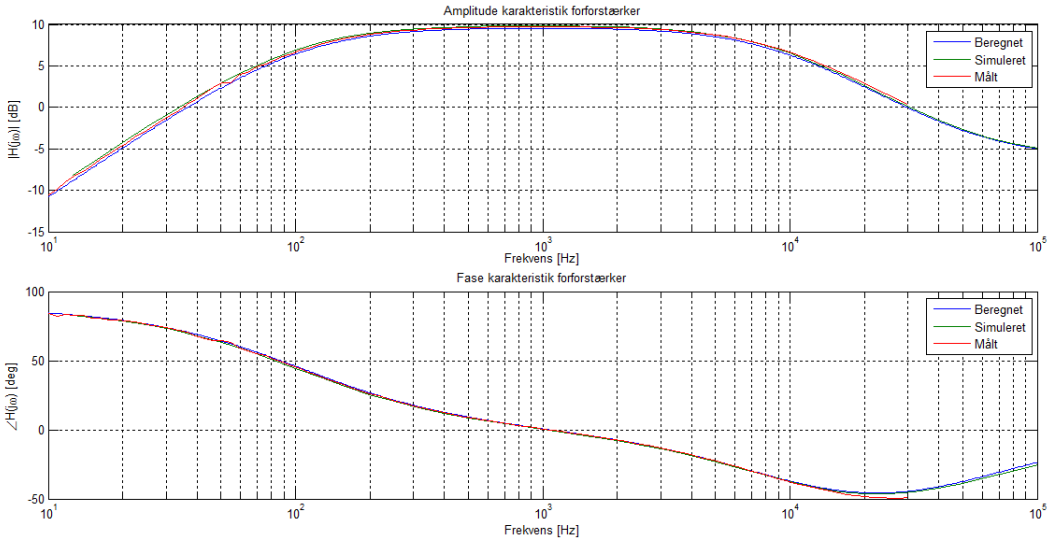
Samlet overforøringsfunkton beregnes, defineret ved $H_{preamp}(s) = H_1(s) \cdot H_2(s)$

$$H_{preamp}(s) = 0.495 \cdot \frac{s}{(100 \cdot 2\pi)+s} \cdot \frac{(55 \cdot 10^3 \cdot 2\pi)+s}{(9 \cdot 10^3 \cdot 2\pi)+s} \quad (8.34)$$

Forstærkningen i pasbåndet findes ved:

$$A_{preamp} = 20 \cdot log(6.13) = 15.7dB \quad (8.35)$$

Figur 8.5 viser et bodeplot over forforstærkeren. Bodeplots konstrueres således, at x-aksen er en logaritmisk frekvensakse og y-aksen er forstærkningen målt i dB. Data til plottet er udregnet i Matlab, simuleret i NI Multisim og målt med NI-PCI-4461 audioanalysator. Det ses at knækfrekvenserne ligger korrekt ved 100Hz og 9kHz. Det noteres at forstærkningen her kun aflæses til $9.7dB$, men den er dimensioneret til $15.7dB$. Dette skyldes at mikrofonens udgangsimpedans er inkluderet i overføringsfunktionen, for at regne nedre knækfrekvens korrekt. Da $R_{100} = R_{th}$ skal denne aflæsning derfor fordobles, hvormed der opnås en forstærkning på $9.7dB + 6dB = 15.7dB$, hvormed forstærkningen stemmer overens med beregningen fra 8.35. Fasekarakteristikken viser et korrekt fasedrej på 45° ved begge knækfrekvenser.



Figur 8.5: Bodeplot over af forforstærkeren

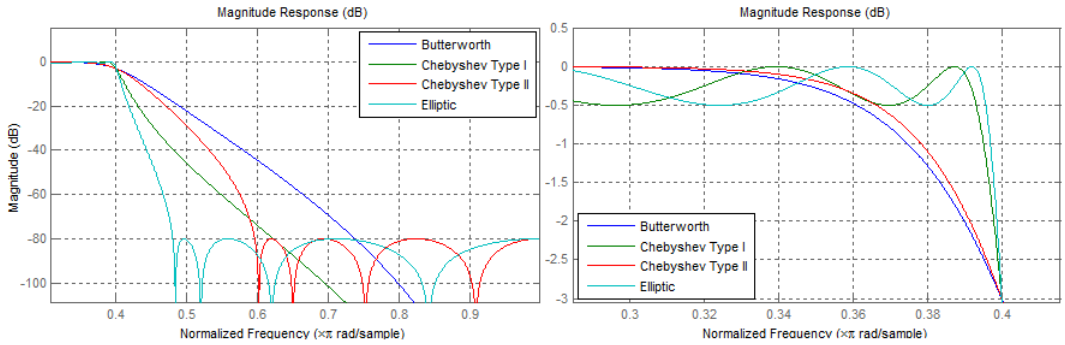
8.4 Filter

I henhold til kapitel 7 kræves minimum et 2. ordens filter, svarende til en dæmpning på 20dB/dekade. Dette filter vil alene sørge for, at dette krav bliver overholdt. Den anvendte IC, [STMicroelectronics, 2001], indeholder 4 stk opamp´s, hvorfor der er nærliggende at udnytte dem alle. Derfor konstrueres et 4. ordens filter. Afsnit 8.3 har en grovfiltrering indbygget, hvormed den samlede filtrering kommer til at bestå af et 5. ordens filter. Dette er positivt, da filterkarakteristikken dermed bliver stejlere.
Der skelnes grundlæggende mellem aktive og passive filtre. Passive filtre består af kombinationer af modstande, kondensatorer og spoler. Fordelen ved den passive løsning er, at den ikke kræver en ekstern forsyning. Ulempen består i håndteringen af lave frekvenser, hvor der bliver behov for store og omkostningsfulde spoler. Den aktive løsning består af modstande, kondensatorer og en aktiv forstærkning, som typisk består af en operationsforstærker. Fordelen i forhold til den passive løsning er at de dyre spoler undgås. Samtidig kan operationsforstærkeren udnyttes til at opnå en forstærkning i kredsløbet [Winder, 2002].

Der findes forskellige typer standardfiltre, hvor nogle af de mest gængse undersøges. Filtrene er simuleret ved hjælp af Matlabs IIR (Infinite Impulse Response) filter design program.

- Butterworth respons karakteristikken, figur 8.6, er designet således at den har maksimal flad amplitude respons (Ingen ripple). Polerne er placeret som kompleks konjugerede polpar på enhedscirklen (normaliseret) [Winder, 2002].
- Chebyshev respons (Type 1) karakteristikken, figur 8.6, knækker skarpere end Butterworth. Der opstår dog ripple omkring overgangsfrekvensen og på pasbåndet. Holdes riplen under 0.5dB er den dog ubetydelig i forbindelse med lyd. Polerne er placeret som kompleks konjugerde polpar på en elipse [Winder, 2002].
- Chebyshev respons (Type 2) karakteristikken, figur 8.6, har minimum ripple omring overgangsfrekvensen og på pasbåndet. Der opstår dog ripple på stopbåndet. Denne har ligesom Chebyshev type 1, polerne placeret på en ellipse.

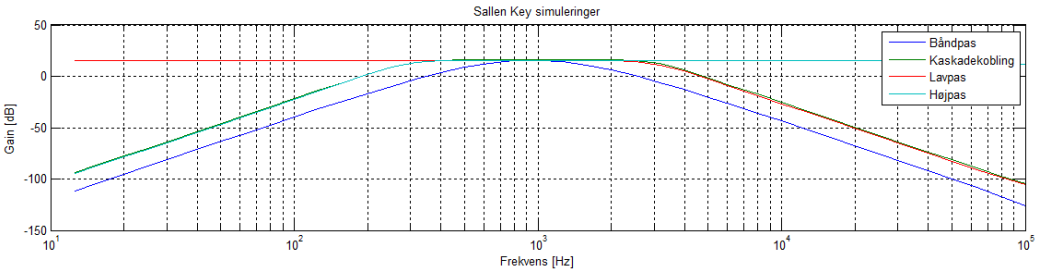
- Elliptic respons karakteristikken, figur 8.6, knækker skarpest af alle filtene ved overgangsfrekvensen. Den har dog ripple over hele pasbåndet og stopbåndet. Polerne er også her placeret på en ellipse.
- Bessel karakteristikken minder om Butterworth. Den knækker dog ikke ligeså skarpt. Dens fordel består i en maksimal lineær faserespons, men da filter-forsinkelsen ikke er hørbar [Winder, 2002], tages denne ikke i betragning og er derfor ikke simuleret. Polerne ligger også her på en cirkel.



Figur 8.6: Matlab simulering af 8. ordens normerede standard filtre med $-3dB$ ved $0.4rad/s$. Venstre: Fokus på stopbånd. Højre: Fokus på pasbånd og f_0.

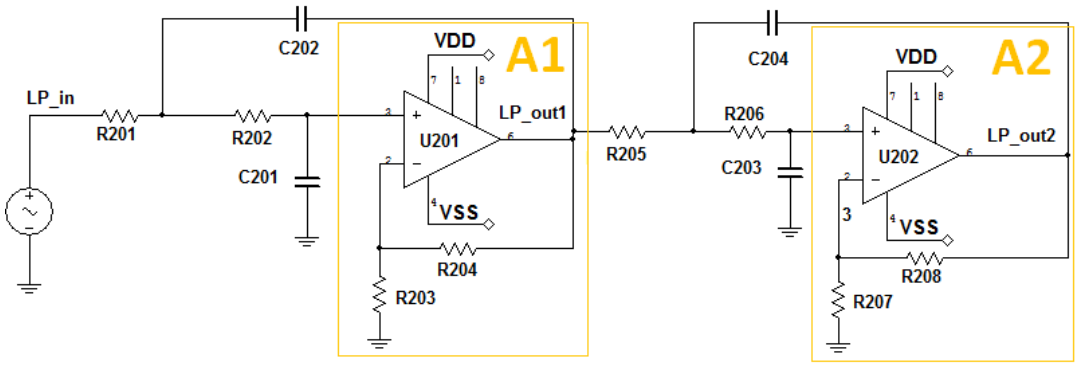
8.4.1 Sallen Key Topologi

Sallen Key topologien er en meget anvendt metode til at lave filtre, og består i sin natur af et 2. ordens aktivt filter, som kan kaskadekobles til højere ordens filtre. Et båndpasfilter opnås således enten ved at kaskadekoble et lavpas og højpas filter eller designe et Sallen Key båndpasfilter. For båndpasfiltret vil amplitude responsen blive mere 'rund', og den skarpe inddeling ved overgangsfrekvenserne kan ikke opnås, hvilket er simuleret på figur 8.7. Dette kan dog opnås med en kaskadekobling af lavpas og højpas. Med kaskadekoblingen som løsning kan filtrene dog påvirke hinanden hvis båndbredden ikke er stor nok. Det ses dog på



Figur 8.7: Sammenligning af sammensatte Butterworth filtre. Alle simuleret som 4. ordens filter

figur 8.7, at det ikke er tilfældet og derfor vælges den aktive kaskadekoblede løsning. Yderligere vælges Butterworth karakteristikken for at undgå ripple, og ligeledes da polerne er placeret på enhedscirklen, hvilket gør designfasen mere overskuelig [Winder, 2002]. Filter udviklingen begynder med lavpassektionen, da denne kan videreføres til højpas.



Figur 8.8: Sallen Key topologi over 4. ordens lavpas filter. Forstærkerblokkene simplificeres til A_1 og A_2

For at bestemme komponentværdier og frekvensrespons skal overføringsfunktionen bestemmes. Derfor er kredsløbsligningerne bestemt ud fra S-domænet. På figur 8.8 er to 2. ordens filtre kaskadekoblet til et 4. ordens filter. Overføringsfunktionen vil derfor være to udtryk med forskellige faktorer multipliceret med hinanden. Der ses derfor kun på den første del her. Kredsløbet designes således at R_{201}, R_{202}, R_{203}, R_{205}, R_{206} og R_{207} er ens, og døbes R i de følgende udregninger. Ligeledes er C_{201}, C_{202}, C_{205}, C_{206} ens og døbes C. Først bestemmes et udtryk for forstærkningen. Dette gøres ved hjælp af en knudepunktsligning ud fra V_-. Opamps betragtes som ideelle hvormed $V_- = V_+$.

$$v_- \left(\frac{1}{R_{203}} + \frac{1}{R_{204}}\right) - LP_{out1}\frac{1}{R_{204}} = 0 \Leftrightarrow v_+ \left(\frac{1}{R_{203}} + \frac{1}{R_{204}}\right) - LP_{out1}\frac{1}{R_{204}} = 0 \tag{8.36}$$

$$\Leftrightarrow \frac{LP_{out1}}{V_+} = R_{204}\left(\frac{1}{R_{203}} + \frac{1}{R_{204}}\right) \Leftrightarrow A_1 = \frac{R_{204}}{R_{204}} + \frac{R_{204}}{R_{203}} \Leftrightarrow A_1 = 1 + \frac{R_{204}}{R_{203}} \tag{8.37}$$

R_{202} og C_{201} kan beregnes som en spændingsdeling, da der ikke løber strøm ind i opamp´en pga. uendelig høj indgangsimpedans.

$$V_+ = V_x \frac{\frac{1}{sC}}{\frac{1}{sC} + R} \Leftrightarrow V_+ = V_x \frac{\frac{sC}{sC}}{\frac{sC}{sC} + RsC} \Leftrightarrow V_+ = V_x \frac{1}{1 + sCR} \tag{8.38}$$

V_x isoleres og det benyttes at $LP_{out1} = V_+ \cdot A_1 \Leftrightarrow V_+ = LP_{out1}/A_1$.

$$V_x = \frac{V_+}{\frac{1}{1+sCR}} \Leftrightarrow V_x = V_+ \frac{1+sCR}{1} \Leftrightarrow V_x = V_+(1+sCR) \Leftrightarrow V_x = \frac{LP_{out1}}{A_1}(1+sCR) \tag{8.39}$$

Der er behov for en ligning mere, som laves med en knudepunktsligning i V_x.

$$V_x \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R} + \frac{1}{\frac{1}{sC}}\right) - LP_{out1}\frac{1}{\frac{1}{sC}} - LP_{in}\frac{1}{R} - V_+\frac{1}{R} = 0 \tag{8.40}$$

V_x og V_+ indsættes. LP_{out1}/LP_{in} isoleres, hvilket er overføringsfunktionen for første del.

$$\left(\frac{LP_{out1}}{A_1}(1+sCR)\right)\left(\frac{1}{R}+\frac{1}{R}+sC\right)-LP_{out1}sC-LP_{in}\frac{1}{R}-\left(\frac{LP_{out1}}{A_1}\right)\frac{1}{R}=0 \tag{8.41}$$

$$\Leftrightarrow \left(\frac{LP_{out1}}{A_1}(1+sCR)\right)\left(\frac{1}{R}+\frac{1}{R}+sC\right)-LP_{out1}sC-\left(\frac{LP_{out1}}{A_1}\right)\frac{1}{R}=LP_{in}\frac{1}{R} \tag{8.42}$$

Der ganges igennem med R:

$$\left(\frac{LP_{out1}}{A_1}(1+sCR)\right)(2+sCR)-LP_{out1}sCR-\left(\frac{LP_{out1}}{A_1}\right)=LP_{in} \tag{8.43}$$

$$\Leftrightarrow \left(\frac{LP_{out1}}{A_1}\right)\left((sCR)^2+3sCR+2\right)-LP_{out1}sCR-\left(\frac{LP_{out1}}{A_1}\right)=LP_{in} \tag{8.44}$$

$$\Leftrightarrow \frac{LP_{out1}(sCR)^2+3sCR+2}{A_1}-LP_{out1}sCR-\frac{LP_{out1}}{A_1}=LP_{in} \tag{8.45}$$

Der ganges igennem med A_1:

$$LP_{out1}\left((sCR)^2+3sCR+2\right)-LP_{out1}sCRA_1-LP_{out1}=LP_{in}A_1 \tag{8.46}$$

LP_{out1} flyttes udenfor parentes:

$$LP_{out1}\left((sCR)^2+3sCR+2-sCRA_1-1\right)=LP_{in}A_1 \tag{8.47}$$

$$\Leftrightarrow \frac{LP_{out1}}{LP_{in}}=\frac{A_1}{(sCR)^2+3sCR-sCRA_1+1} \Leftrightarrow \frac{LP_{out1}}{LP_{in}}=\frac{\frac{1}{C^2R^2}A_1}{s^2+\frac{3}{CR}s-\frac{A_1}{CR}s+\frac{1}{C^2R^2}} \tag{8.48}$$

Ved at samle de sidste led i nævneren, kan overfunktionen endeligt udtrykkes ved:

$$H_1(s)=\frac{LP_{out1}}{LP_{in}}=\frac{\frac{1}{C^2R^2}\cdot A_1}{s^2+\frac{3-A_1}{CR}\cdot s+\frac{1}{C^2R^2}} \tag{8.49}$$

Med overføringsfunktionen på plads betragtes Butterworts polplaceringer. Dermed kan kompionentværdier findes.

8.4.2 Polplacering

Input/output forholdet i et lineært system kan beskrives med følgende relation [Irwin and Nelms, 2008]:

$$b_n\frac{d^ny_0(t)}{dt^n}+b_{n-1}\frac{d^{n-1}y_0(t)}{dt^{n-1}}+\ldots+b_1\frac{dy_0(t)}{dt}+b_0y_0(t) \tag{8.50}$$

$$=a_m\frac{d^mx_i(t)}{dt^m}+a_{m-1}\frac{d^{m-1}x_i(t)}{dt^{m-1}}+\ldots+a_1\frac{dx_i(t)}{dt}+a_0x_i(t) \tag{8.51}$$

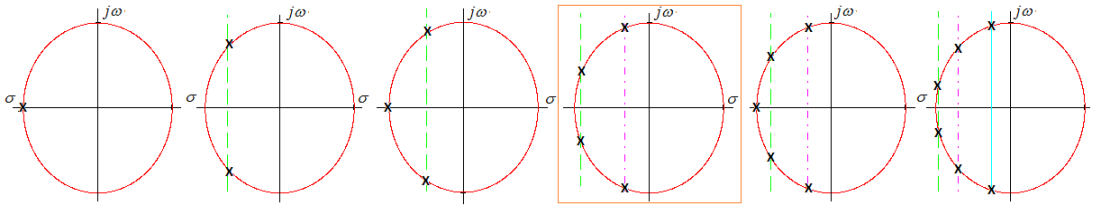
Med Laplace på begge sider, startbetingelser sat til nul og $Y(s)$ uden for parentes giver det:

$$(b_ns^n+b_{n-1}s^{n-1}+\ldots+b_1s+b_0)Y_0(s)=(a_ms^m+a_{m-1}s^{m-1}+\ldots+a_1s+a_0)X_i(s) \tag{8.52}$$

Dermed kan overføringsfunktionen beskrives som et forhold mellem s, med nulpunkter i tæller og poler i nævner:

$$H(s) = \frac{a_m s^m + a_{m-1} s^{m-1} + ... + a_1 s + a_0}{b_n s^n + b_{n-1} s^{n-1} + ... + b_1 s + b_0} = \frac{A_x (s - z_1)(s - z_2)...(s - z_m)}{(s - p_1)(s - p_2)...(s - p_m)} \tag{8.53}$$

Lavpasfilteret består af to 2. ordens aktive filtre kaskadekoblet. To overføringsfunktioner på formen fra ligning 8.53 multipliceret med hinanden, vil dermed beskrive kredsløbet på figur 8.8. Dog med forskellige konstanter. Der er ingen nulpunkter, da det er et lavpasfilter. For et 4. ordens butterworth filter består polerne af to kompleks konjugerede polpar [Winder, 2002]. Dette er vist grafisk på figur 8.9, hvor polplaceringen er designet til at ligge i venstre halvplan for at få en stabil frekvensrespons. Med udgangspunkt i ligning 8.53 kan



Figur 8.9: Butterworth polplaceringer fra 1. - 6. orden. 4. ordens polplacering er markeret

overføringsfunktionen dermed skrives som:

$$H_{LP}(s) = \frac{A_1}{(s - p_{c1})(s - p_{c1}*)} \cdot \frac{A_2}{(s - p_{c2})(s - p_{c2}*)} \tag{8.54}$$

$$\Leftrightarrow H_{LP}(s) = \frac{A_1}{(s - \sigma_1 - j\omega_1)(s - \sigma_1 + j\omega_1)} \cdot \frac{A_2}{(s - \sigma_2 - j\omega_2)(s - \sigma_2 + j\omega_2)} \tag{8.55}$$

$$\Leftrightarrow H_{LP}(s) = \frac{A_1}{s^2 - s\sigma_1 + sj\omega_1 - s\sigma_1 + \sigma_1^2 - \sigma_1 j\omega_1 - sj\omega_1 + \sigma_1 j\omega_1 - j^2\omega_1^2} \tag{8.56}$$

$$\cdot \frac{A_2}{s^2 - s\sigma_2 + sj\omega_2 - s\sigma_2 + \sigma_2^2 - \sigma_2 j\omega_2 - sj\omega_2 + \sigma_2 j\omega_2 - j^2\omega_2^2} \tag{8.57}$$

$$\Leftrightarrow H_{LP}(s) = \frac{A_1}{s^2 - 2Re(p_{c1})s + |p_{c1}|^2} \cdot \frac{A_2}{s^2 - 2Re(p_{c2})s + |p_{c2}|^2} \tag{8.58}$$

Polerne findes ved tabelopslag [Winder, 2002] til:

$$-0.9239 \pm 0.3827j \wedge -0.3827 \pm 0.9239j \tag{8.59}$$

Real-delen af polerne indsættes dermed i ligning 8.58. Længden af polerne er 1, da de er placeret på enhedscirklen.

$$H_{LP}(s) = \frac{A_1}{s^2 + 0.7654s + 1} \cdot \frac{A_2}{s^2 + 1.84785s + 1} \tag{8.60}$$

Da ligning 8.60 beskriver systemet ved en knækfrekvens på $1 rad/s$ (normineret), er det nødvendig at frekvensskalere. Dette opnås ved at dele alle s´er med ω_c [Dorf and Svoboda,

2006].

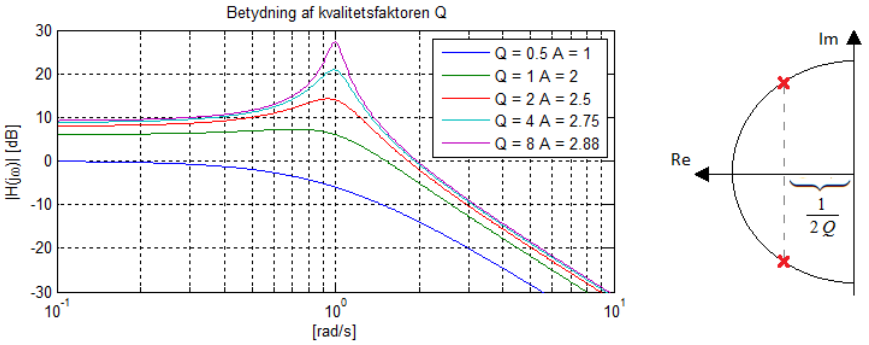
$$H_{LP}(s) = \frac{A_1}{(\frac{s}{\omega_c})^2 + \frac{0.7654}{\omega_c}s + 1} \cdot \frac{A_2}{(\frac{s}{\omega_c})^2 + \frac{1.84785}{\omega_c}s + 1} \tag{8.61}$$

$$\Leftrightarrow H_{LP}(s) = \frac{\omega_c^2 A_1}{s^2 + \omega_c 0.7654 s + \omega_c^2} \cdot \frac{\omega_c^2 A_2}{s^2 + \omega_c 1.84785 s + \omega_c^2} \tag{8.62}$$

Den ønskede form overføringsfunktionen skal antage er [Dorf and Svoboda, 2006]:

$$H_{LP}(s) = \frac{\omega_c^2 A_1}{s^2 + \frac{\omega_c}{Q_1}s + \omega_c^2} \cdot \frac{\omega_c^2 A_2}{s^2 + \frac{\omega_c}{Q_2}s + \omega_c^2} \tag{8.63}$$

Hvor Q indeholder information vedrørende dæmpningsfaktoren, som det er vist på figur 8.10. Polerne nærmer sig imaginær aksen når Q bliver større, og der forekommer et overs-



Figur 8.10: Betydningen af kvalitetsfaktoren Q, skitseret ved et 2.ordens normeret filter.

hoot. Sammenlignes 8.63 med 8.62, ses at $Q_1 = 1/0.7654$ og $Q_2 = 1/1.84785$. Endeligt, hvis ligning 8.63 sammenlignes med ligning 8.49, kan relevante relationer udledes. Relationerne gælder for både første og anden del af lavpasfilteret. Først et udtryk for R:

$$\omega_c^2 = \frac{1}{C^2R^2} \Leftrightarrow \sqrt{\omega_c^2} = \sqrt{\frac{1}{C^2R^2}} \Leftrightarrow \omega_c = \frac{1}{CR} \Leftrightarrow R = \frac{1}{\omega_c C} \tag{8.64}$$

Forstærkningen A udtrykt ved kvalitetsfaktoren Q:

$$\frac{\omega_c}{Q} = \frac{3-A}{CR} \Leftrightarrow \frac{\omega_c CR}{Q} = 3 - A \Leftrightarrow A = 3 - \frac{\omega_c CR}{Q} \tag{8.65}$$

Filteret skal ifølge kravspecifikationen, kapital 7, skære ved 3kHz. Da knækfrekvensen kan styres af enten R eller C, vælges C til 100nF (standardstørrelse) og R beregnes dermed udfra ligning 8.64.

$$R = \frac{1}{C\omega_c} \Leftrightarrow R = \frac{1}{100nF \cdot 2\pi \cdot 3000} \Leftrightarrow R = 530\Omega \tag{8.66}$$

Q er forskellig fra første og anden del af lavpasfilteret. A_1 og A_2 beregnes udfra ligning 8.65:

$$A_1 = 3 - \frac{\omega_c CR}{Q_1} \Leftrightarrow A_1 = 3 - \frac{2\pi \cdot 3000 \cdot 100nF \cdot 530\Omega}{1/0.7654} \Leftrightarrow A_1 = 2.235 \tag{8.67}$$

$$A_2 = 3 - \frac{\omega_c CR}{Q_2} \Leftrightarrow A_2 = 3 - \frac{2\pi \cdot 3000 \cdot 100nF \cdot 530\Omega}{1/1.84785} \Leftrightarrow A_2 = 1.154 \tag{8.68}$$

R_{204} er dermed bestemt af ligning 8.68 og 8.37, og findes til:

$$A_1 = 1 + \frac{R_{204}}{R} \Leftrightarrow \frac{R_{204}}{R} = A_1 - 1 \Leftrightarrow R_{204} = (A_1 - 1)R \Leftrightarrow R_{204} = 654.6\Omega \tag{8.69}$$

R_{208} bestemmes ud fra ligning 8.68 og 8.37

$$A_2 = 1 + \frac{R_{208}}{R} \Leftrightarrow \frac{R_{208}}{R} = A_2 - 1 \Leftrightarrow R_{208} = (A_2 - 1)R \Leftrightarrow R_{208} = 81.6\Omega \tag{8.70}$$

Dermed er alle komponentværdier for lavpassektionen bestemt, og forstærkningen bliver:

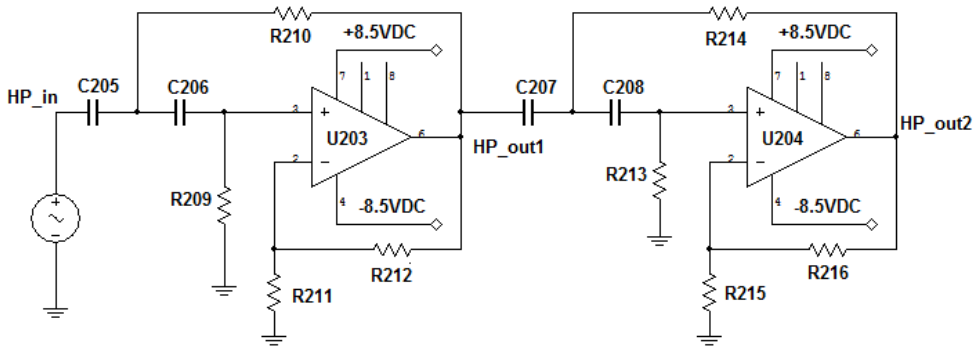
$$A_{LP} = A_1 \cdot A_2 = 2.235 \cdot 1.154 = 2.58 \tag{8.71}$$

Indsættes de beregnede værdier i ligning 8.63, findes overføringsfunktionen for lavpassektionen til:

$$H_{LP}(s) = \frac{(2\pi \cdot 3000)^2 \cdot 2.235}{s^2 + 14428s + (2\pi \cdot 3000)^2} \cdot \frac{(2\pi \cdot 3000)^2 \cdot 1.154}{s^2 + 34831s + (2\pi \cdot 3000)^2} \tag{8.72}$$

8.4.3 Butterworth højpas sektion

Q´et fra lavpassektionen beholdes, da der ønskes samme dæmpningsfaktor. Knækfrekvensen skal være ved 300Hz i henhold til kravsspecifikation 7. Hvis de frekvensfølsomme led på figur 8.8, R_{201}, R_{202}, R_{205}, R_{206}, C_{201}, C_{202}, C_{203} og C_{204} (R og C) byttes rundt, opnås et højpasfilter [Dorf and Svoboda, 2006], vist på figur 8.11.



Figur 8.11: Sallen Key topologi over 4. ordens højpas filter

Den normeret overføringsfunktion for lavpassektionen, ligning 8.60, kan frekvens transfor-

meres [Su, 2002] hvilket medfører overføringsfunktionen for højpas delen:

$$H_{HP}(s) = H_{LP}\left(\frac{\Omega_c}{s}\right) \tag{8.73}$$

$$\Leftrightarrow H_{HP}(s) = \frac{A_1}{\left(\frac{\Omega_c}{s}\right)^2 + 0.7654\left(\frac{\Omega_c}{s}\right) + 1} \cdot \frac{A_2}{\left(\frac{\Omega_c}{s}\right)^2 + 1.84785\left(\frac{\Omega_c}{s}\right) + 1} \tag{8.74}$$

$$\Leftrightarrow H_{HP}(s) = \frac{s^2 A_1}{s^2 + 0.7654\Omega_c s + \Omega_c^2} \cdot \frac{s^2 A_2}{s^2 + 1.84785\Omega_c s + \Omega_c^2} \tag{8.75}$$

$$\Leftrightarrow H_{HP}(s) = \frac{s^2 A_1}{s^2 + \frac{\Omega_c}{Q_1} s + \Omega_c^2} \cdot \frac{s^2 A_2}{s^2 + \frac{\Omega_c}{Q_2} s + \Omega_c^2} \tag{8.76}$$

Komponent relationerne i ligning 8.64 og 8.65 kan også bruges for højpasdelen [Dorf and Svoboda, 2006]. Dette kan vises ved at følge samme fremgangsmåde som i lavpassektionen, hvilket ikke bliver gjort her. Med $\Omega_c = 2\pi \cdot 300$, $Q_1 = 1/0.7654$ og $Q_2 = 1/1.84785$, opnås derved følgende komponentværdier:

$$R = \frac{1}{\Omega_c C} \Leftrightarrow R = \frac{1}{2\pi \cdot 300 \cdot 100nF} \Leftrightarrow R = 5.305k\Omega \tag{8.77}$$

$$A_1 = 3 - \frac{\Omega_c CR}{Q_1} \Leftrightarrow A_1 = 3 - \frac{2\pi \cdot 300 \cdot 100nF \cdot 5.305k\Omega}{1/0.7654} \Leftrightarrow A_1 = 2.2 \tag{8.78}$$

$$A_2 = 3 - \frac{\Omega_c CR}{Q_2} \Leftrightarrow A_2 = 3 - \frac{2\pi \cdot 300 \cdot 100nF \cdot 5.305k\Omega}{1/1.84785} \Leftrightarrow A_2 = 1.15 \tag{8.79}$$

$$R_{212} = (A_1 - 1)R \Leftrightarrow R_{212} = 6.4k\Omega \tag{8.80}$$

$$R_{216} = (A_2 - 1)R \Leftrightarrow R_{216} = 796\Omega \tag{8.81}$$

Alle komponenter er dermed bestemt for højpassektionen. Den samlede forstærkning for denne del bliver dermed:

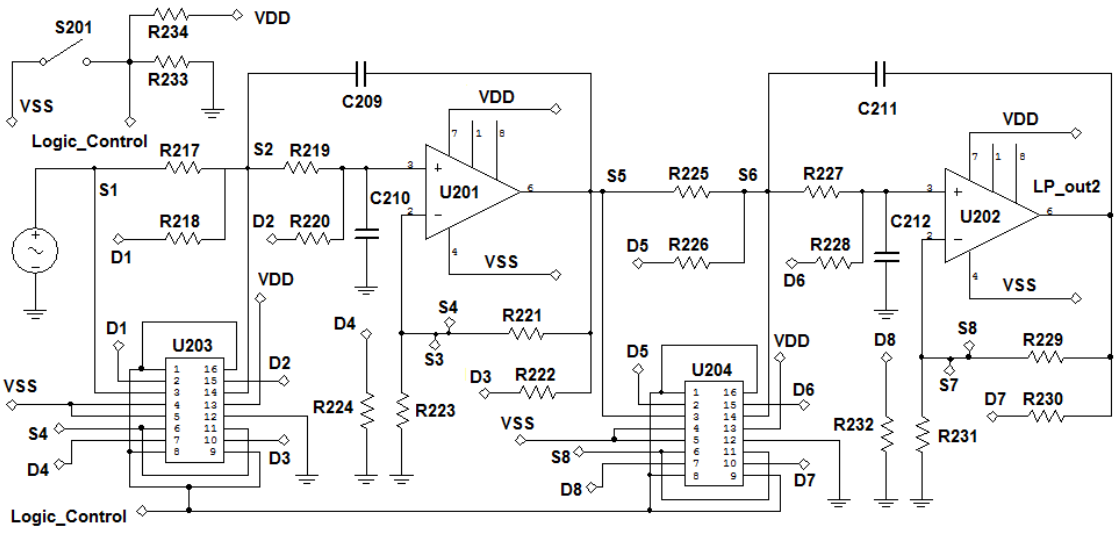
$$A_{HP} = A_1 \cdot A_2 = 2.2 \cdot 1.15 = 2.53 \tag{8.82}$$

Indsættes de beregnede værdier i ligning 8.76 bliver højpas delens overføringsfunktion:

$$H_{HP}(s) = \frac{2.2s^2}{s^2 + 1442.7s + (2\pi \cdot 300)^2} \cdot \frac{1.15s^2}{s^2 + 3483.1s + (2\pi \cdot 300)^2} \tag{8.83}$$

8.4.4 Variabelt lavpasfilter

Appendix A.1, vedr. taleforståelighed, konkluderer at overgangsfrekvensen ved 3kHz kan justeres ned til 2kHz, uden væsentlige informationer i taleforståeligheden går tabt, se evt. FFT analyse A.3. På denne baggrund er filteret konstrueret variabelt med 2 muligheder for justering af den øvre knækfrekvens, 2 og 3kHz. Dermed bliver støjen i pasbåndet 2kHz - 3kH dæmpet med 40dB/dekade, hvilket FFT analysen på Stiholt, kapital 3.2.2 viser er særdeles relevant. For at bevare Butterworth karakteristikken, er det vigtigt at alle modstan-



Figur 8.12: Lavpasfilter med valgfri overgangsfrekvens på 2kHz eller 3kHz

de skifter værdi samtidigt, således at Q´et bevares. Diagrammet er vist på figur 8.12, hvor R_{218}, R_{220}, R_{222}, R_{224}, R_{226}, R_{228}, R_{230}, R_{232} bliver koblet ind parallelt via switch kredsen. Til formålet benyttes en switch, DG444 [Intersil, 2003], hvor producenten garanterer en lav On-modstand på max 85Ω og typisk 50Ω. De fire logiske inputs er sat sammen og styres med spændingsdelingen R_{234} og R_{233}. I afsnit 8.9 er worst case spændingen defineret til $\pm 7.4V$. Ben 12, som er logic reference voltage, er sat til stel. Dermed er en logisk '1' ifølge databladet $\geq 2.4V$ og et logisk '0' $\leq 0.8V$. Dermed skal $Logic_Control$ blot overholde disse værdier. Når den skal være 'high' sættes spændingen til 5V og R_{233} til $50k\Omega$. Dermed kan R_{234} vha. spændingsdeling bestemmes.

$$5V = 7.4V \cdot \frac{50k\Omega}{50k\Omega + R_{234}} \Leftrightarrow 5V \cdot (50k\Omega + R_{234}) = 7.4V \cdot 50k\Omega \Leftrightarrow \quad (8.84)$$

$$5V \cdot R_{234} = 7.4V \cdot 50k\Omega - 5V \cdot 50k\Omega \Leftrightarrow R_{234} = \frac{7.4V \cdot 50k\Omega - 5V \cdot 50k\Omega}{5V} = 24k\Omega \quad (8.85)$$

Når switchen S_{201} er sluttet, vil der dermed ligge $5V$ på $Logic_Control$. Dette medfører at switchtilstanden er Off og modstandene er ikke koblet ind, hvilket medfører en overgangsfrekvens på $2kHz$. Når switchen er afbrudt vil der ligge $-7.4V$ (worst case) og switchen er On, hvilket resulterer i en overgangsfrekvens på $3kHz$.
Med single supply skal DG444´eren forsynes med min. 12V, hvilket ikke er til rådighed. Derfor indsættes negativ forsyning på ben 5 (GND), hvilket dermed vil skabe et samlet spændingsfald på $14.8V$ (worst case).

2kHz Overgangsfrekvens

Komponentrelationerne i ligning 8.64 og 8.65 benyttes til at finde komponentværdier.

$$R_{2kHz} = \frac{1}{\omega_c \cdot C} = \frac{1}{2\pi \cdot 2000 \cdot 100nF} = 795.8\Omega \quad (8.86)$$

A_1 og Q_1 forbliver uændret. Dermed kan R_{221} findes på samme måde som ligning 8.70.

$$A_1 = 1 + \frac{R_{221}}{R_{2kHz}} \Leftrightarrow A_1 - 1 = \frac{R_{221}}{R_{2kHz}} \Leftrightarrow R_{221} = R_{2kHz}(A_1 - 1) \Leftrightarrow R_{221} = 982.8\Omega \quad (8.87)$$

På samme måde finde R_{229}.

$$A_2 = 1 + \frac{R_{229}}{R_{2kHz}} \Leftrightarrow A_2 - 1 = \frac{R_{229}}{R_{2kHz}} \Leftrightarrow R_{229} = R_{2kHz}(A_2 - 1) \Leftrightarrow R_{229} = 121.1\Omega \quad (8.88)$$

Udfra ligning 8.63 bliver overføringfunktionen for lavpasdelen med en overgangsfrekvens på $2kHz$ til:

$$H_{LP_2kHz} = \frac{(2\pi \cdot 2000)^2 \cdot 2.235}{s^2 + 9618.3s + (2\pi \cdot 2000)^2} \cdot \frac{(2\pi \cdot 2000)^2 \cdot 1.154}{s^2 + 23221s + (2\pi \cdot 2000)^2} \quad (8.89)$$

3kHz Overgangsfrekvens

Igen kan komponentrelationerne i ligning 8.64 og 8.65 benyttes. Nu skal drain-source Onmodstanden på 50Ω og parallelkoblingen tages i betragtning. Parallelkoblingernes samlede modstand er kendt fra lavpassektionen i ligning 8.66 til 530Ω og døbes R_{3kHz}. De nye komponentværdier kan bestemmes, hvor $R_{218} = R_{220} = R_{224} = R_{226} = R_{228} = R_{232}$.

$$R_{3kHz} = \frac{1}{\frac{1}{R_2kHz} + \frac{1}{R_{218}+R_{on}}} \Leftrightarrow \frac{1}{R_{3kHz}} = \left(\frac{1}{\frac{1}{R_{2kHz}} + \frac{1}{R_{210}+R_{on}}} \right)^{-1} \Leftrightarrow \quad (8.90)$$

$$\frac{1}{R_{3kHz}} = \frac{1}{R_{2kHz}} + \frac{1}{R_{210}+R_{on}} \Leftrightarrow \frac{1}{R_{3kHz}} - \frac{1}{R_{2kHz}} = \frac{1}{R_{218}+R_{on}} \Leftrightarrow \quad (8.91)$$

$$\frac{1}{\frac{1}{R_{3kHz}} - \frac{1}{R_{2kHz}}} = R_{218} + R_{on} \Leftrightarrow R_{218} = \frac{1}{\frac{1}{R_{3kHz}} - \frac{1}{R_{2kHz}}} - R_{on} \Leftrightarrow R_{218} = 1.54k\Omega \quad (8.92)$$

Den samlede modkoblingsmodstand i 1. forstærkerblok er bestemt i ligning 8.69 ($R_{204} = 654.6\Omega$). R_{222} kan dermed bestemmes på samme måde som ligning 8.92.

$$R_{222} = \frac{1}{\frac{1}{R_{204}} - \frac{1}{R_{221}}} - R_{on} \Leftrightarrow R_{222} = 1.9k\Omega \quad (8.93)$$

For den 2. forstærkerblok er modkoblingsmodstanden bestemt i ligning 8.70 ($R_{208} = 81.6\Omega$). Dermed kan R_{230} bestemmes på samme måde som i ligning 8.93.

$$R_{230} = \frac{1}{\frac{1}{R_{208}} - \frac{1}{R_{229}}} - R_{on} \Leftrightarrow R_{230} = 200.1\Omega \quad (8.94)$$

Overføringsfunktionen er uændret fra ligning 8.72.

$$H_{LP_3kHz} = \frac{(2\pi \cdot 3000)^2 \cdot 2.235}{s^2 + 14428s + (2\pi \cdot 3000)^2} \cdot \frac{(2\pi \cdot 3000)^2 \cdot 1.154}{s^2 + 34831s + (2\pi \cdot 3000)^2} \quad (8.95)$$

8.4.5 Resultater for 4. ordens Butterworth filter

Samlet overføringsfunktion ved $2kHz$, defineret ved $H_{BP_2kHz}(s) = H_{LP_2kHz}(s) \cdot H_{HP}(s)$.

$$H_{BP_2kHz}(s) = \frac{(2\pi \cdot 2000)^2}{s^2 + 9618s + (2\pi \cdot 2000)^2} \cdot \frac{(2\pi \cdot 2000)^2 \cdot 1.154}{s^2 + 23221s + (2\pi \cdot 2000)^2} \tag{8.96}$$

$$\cdot \frac{2.2s^2}{s^2 + 1442.7s + (2\pi \cdot 300)^2} \cdot \frac{1.15s^2}{s^2 + 3483.1s + (2\pi \cdot 300)^2} \tag{8.97}$$

Samlet overføringsfunktion ved $3kHz$, defineret ved $H_{BP_3kHz}(s) = H_{LP_3kHz}(s) \cdot H_{HP}(s)$.

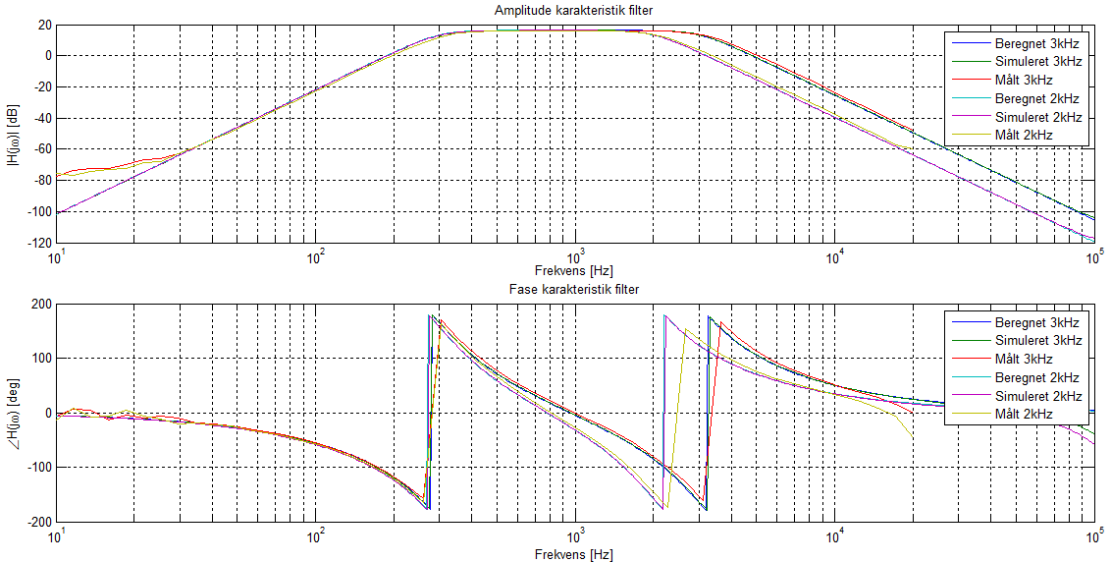
$$H_{BP_3kHz}(s) = \frac{(2\pi \cdot 2000)^2 \cdot 2.235}{s^2 + 9618s + (2\pi \cdot 2000)^2} \cdot \frac{(2\pi \cdot 2000)^2 \cdot 1.154}{s^2 + 23211s + (2\pi \cdot 2000)^2} \tag{8.98}$$

$$\cdot \frac{2.2s^2}{s^2 + 1442.7s + (2\pi \cdot 300)^2} \cdot \frac{1.15s^2}{s^2 + 3483.1s + (2\pi \cdot 300)^2} \tag{8.99}$$

Den samlede forstærkning er identisk ved både $2kHz$ og $3kHz$.

$$A_{BP} = A_{LP} \cdot A_{HP} \Leftrightarrow A_{BP} = 2.58 \cdot 2.53 \Leftrightarrow A_{BP} = 6.53 \tag{8.100}$$

Figur 8.13 viser bodeplots over resultaterne. Data til plottet er udregnet i Matlab, simuleret i NI Multisim og målt med NI-PCI-4461 audioanalysator.



Figur 8.13: Bodeplots over resultater fra filterdelen

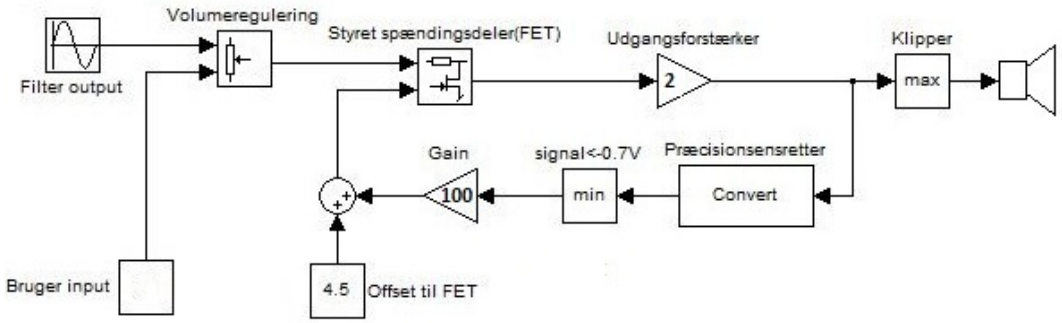
Det ses at båndpasfiltrene knækker af ved henholdvis 2kHz og 3kHz med 80dB pr dekade. Der er små unøjagtigheder ved start og slut i frekvensresponsen, hvilket sandsynligvis skyldes måleudstyrets opløsning. Faserne følges acceptabelt sammen, hvor det også ses at fasedrejningen er forskellig ved 2kHz og 3kHz. Fasedrejningen aflæses ved hver knækfrekvens til 180°, hvilket er korrekt for et 4. ordens filter.

8.5 Dynamisk regulering

Ifølge kravspecifikationen, afsnit 7, må høreværnet ikke udsætte brugeren for lydtryk højere end 85dB(A) og 137dB(C). Til at sikre dette, benyttes en dynamisk reguleringssløjfe, skitseret på figur 8.14. Denne bygges op omkring udgangsforstærkeren. En spændingsstyret spændingsdeler skal således styre niveauet på udgangen, og dermed om nødvendigt neddele signalet fra filtret, afsnit 8.4.

Dette gøres ved at tage udgangssignalet fra udgangsforstærkeren og konvertere det til en DC værdi ved en ensretning. Derefter indsættes en tærskel værdi, som DC-spændingen skal overskride i tilbagekoblingen for at regulere indgangsnivauet. Overskrides den værdi, bliver den forstærket med en faktor 100. Dermed opnås en kraftig regulering. Herefter lægges denne værdi sammen i en summation med et offset-niveau. Således er den spændingsstyrede spændingsdeler åben for signalgennemgang, når tærskel værdien ikke er overskredet.

Overskrides tærskel værdien sendes den ud til reguleringsleddet, -den spændingsstyrede spændingsdeler, som således skruer ned for indgangsnivauet til forstærkeren. Udgangsniveauet vil efterfølgende falde til under den fastsatte tærskel værdi, som var til stede inden regulering tog over. Dermed sikres at der ikke opstår en varierende volumen. Det er således muligt at regulere kredsløbet til ikke at overskride de 80dB(A), fastsat i kravsspecifiktaionen.



Figur 8.14: Reguleringssløjfe der forhindre et for højt niveau på udgangen

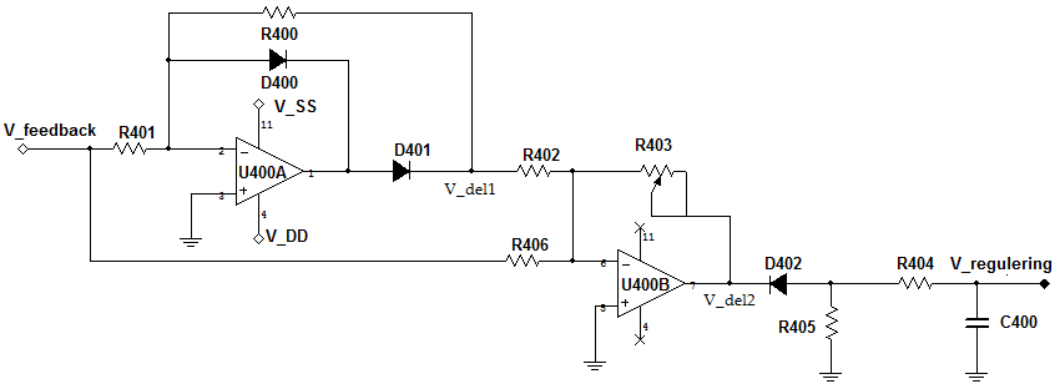
Der er yderligere 2 elementer der ikke direkte indgår i reguleringen.

- Volumekontrollen. Virkemåden forklares sammen med den spændingsstyrede spændingsdeler.
- Klipperen. Er ikke aktiv andet end ved peaks, da den dynamiske regulering har en reaktionstid grundet opladningen af C_{100} på figur 8.15. Ved fejl i kredsløbet fungerer den også som sikkerhed. Beskrivelse af denne finder sted i afsnit 8.7.

Resterende dele af reguleringssløjfen inkluderer: Ensretter, x100 forstærker, summationskobling og den spændingsstyrede spændingsdeler, som beskrives i henholdsvis afsnit 8.5.1, 8.5.2, 8.5.3 og 8.5.4.

8.5.1 Præcisionsensretter

For at styre FET'en, beskrevet i afsnit 8.5.4, skal signalet omdannes fra en AC-spænding til en DC-spænding. Til dette formål bruges en præcisionsenretter, som vist på figur 8.15.



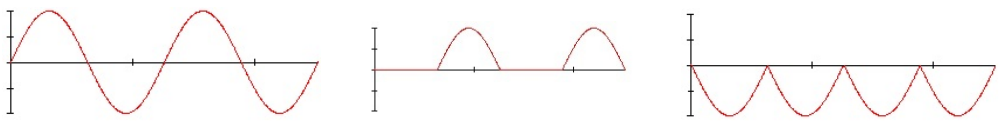
Figur 8.15: Præcisonsensretter kredsløb

Del 1

U_{400A} er koblet som en inverterende forstærker. Dermed vil et positivt input medføre at D_{400} er On, da den er positivt forspændt. D_{401} vil være Off. Dermed vil output være 0V. Når input er negativt vil D_{400} være Off og D_{401} være On. Output kan således beskrives ved ligning 8.101. Det bemærkes, at dioderne kun spærrer for de positive halvperioder, og er uden betydning for de negative. Kredsløbets respons ved høje frekvenser er begrænset af opamp'ens slew-rate, diodernes reverse recovery time og modstandsværdierne. Det vil dog ikke have en større indvirkning på grund af lavspasfilteret beskrevet i afsnit 8.4. Dioderne der benyttes er af typen 1N4148, da de har en kort reverse recoverytime på 4ns, [Hitachi, 2001]. Opampen vælges til TL084 [STMicroelectronics, 2001]. Der ønskes ikke at forstærke signalet, så R_{400} og R_{401} skal derfor være samme størrelse, som vælges til $10k\Omega$.

$$V_{del1} = \begin{cases} -\frac{R_{400}}{R_{401}} \cdot V_{feedback} = -\frac{10k\Omega}{10k\Omega} \cdot V_{feedback} & V_{feedback} < 0 \\ 0 & V_{feedback} > 0 \end{cases} \tag{8.101}$$

Output og input af 1. del er skitseret på figur 8.16(a) og 8.16(b).



(a) Indgangssignal (b) Udgangssignal fra del 1 (c) Udgangssignal fra del 2

Figur 8.16: Eksempel på indgangssignal, og resulterende udgangssignal fra del 1 og 2

Del 2

Anden del af ensretteren er en summationskobling. Indgangssignalet lægges sammen med outputtet fra første del, hvilket giver et udgangssignal, der kan bestemmes af formlen:

$$V_{U400B} = -R_{403} \cdot \left(\frac{V_{del1}}{R_{402}} + \frac{V_{feedback}}{R_{406}} \right) \tag{8.102}$$

Da V_{del1} enten vil være $0V$ eller $-1 \cdot V_{feedback}$, skal V_{del1} vægtes dobbelt af $V_{feedback}$. Dermed opnås det ønskede signal som vist på figur 8.16(c). R_{406} skal derfor være $2 \cdot R_{402}$. R_{402} vælges derfor til $10k\Omega$, hvilket giver R_{406} en værdi på $20k\Omega$. Der skal først reguleres når lydniveauet fra højtaleren overstiger $80dB$, og derfor sidder D_{402} ved udgangen af summationskoblingen. R_{403} er et trimpotentiometer og styrer forstærkningen i summationskoblingen, og dermed størrelsen af $V_{feedback}$ der skal til før D_{402} begynder at lede. D_{402} har reference til stel via R_{405}, hvilket sikrer der løber en lille strøm. Værdien af R_{405} er derfor mindre væsentligt, og vælges til 100Ω. Når højtaleren afspiller med $80dB$ vil $V_{feedback}$ være $80mV$, som er beskrevet i afsnit 8.8. R_{403} kan således findes ud fra ligning 8.102, og beregnes til:

$$V_{U400B} = -R_{403} \cdot \left(\frac{V_{del1}}{R_{402}} + \frac{V_{feedback}}{R_{406}} \right) \Leftrightarrow R_{403} = -1 \cdot \frac{V_{U400B}}{\frac{V_{del1}}{R_{402}} + \frac{V_{feedback}}{R_{406}}} \tag{8.103}$$

Hvor det kun giver mening at betragte signalet når V_{del1} er positiv og $V_{feedback}$ dermed er negativ.

$$R_{403} = -1 \cdot \frac{-700mV}{\frac{80mV}{R_{402}} + \frac{-80mV}{R_{406}}} \Leftrightarrow R_{403} = 175k\Omega \tag{8.104}$$

Udgangssignalet fra U_{400B} skal være på mindre end $-0.7V$ for at D_{402} leder, og dermed regulere signalet. Udgangssignalet for anden del af ensretteren kan dermed beskrives af følgende ligninger:

$$V_{del2} = \begin{cases} 0 & V_{U400B} > -0.7V \\ V_{U400B} + 0.7V & V_{U400B} < -0.7V \end{cases} \tag{8.105}$$

Del 3

Tredje del af ensretteren består af en modstand og en kondensator, som udjævner signalet. Dermed fås tilnærmelsesvis en DC-spænding, men som vil have en ripplespænding, som er bestemt ved formlen 8.106 [Horowitz and Hill, 1989]. V_r er ripplespændingen, V_p er peakspændingen på signalet, C_{400} er størrelsen på kondensatoren og R_{404} er størrelsen på modstanden. De 2 gange frekvensen opstår som følge af, at kredsløbet er en dobbeltensretter, som medfører en fordobling af frekvensen.

$$V_r = \frac{V_p}{2f \cdot C_{400} \cdot R_{404}} \tag{8.106}$$

Som det kan ses af ligning 8.106 vil ripplespændingen være størst ved lave frekvenser, og afhængig af C_{400} og R_{404}+R_{405}. Store værdier af C_{400} og R_{404} vil give en lille ripple, men vil øge reaktionstiden for reguleringen. For at forhinde interaktion skal R_{404} være mindst 5 gange større end R_{405}, og da en større værdi vil give mindre ripple vælges R_{404} til $100k\Omega$.

Der kan accepteres en Gate-Source ripplespænding, afsnit 8.5.4, på max $1mV$. Da der sidder en $100gg$ forstærker imellem FET'en og $V_{regulering}$, må V_r max blive $0.01mV$. Dermed udregnes kondensatoren.

$$V_r = \frac{V_p}{2f \cdot C_{400} \cdot R_{404}} \Leftrightarrow 0.01mV = \frac{1mV}{2 \cdot 300Hz \cdot C_{400} \cdot 100k\Omega} \Leftrightarrow$$
$$C_{400} = \frac{1mV}{2 \cdot 300Hz \cdot 100k\Omega \cdot 0.01mV} \Leftrightarrow C_{404} = 1.667\mu F \tag{8.107}$$

C_{400} skal altså være mindst være på $1.667\mu F$. Dette er ikke en standard kondensator værdi, og C_{400} vælges til $2.2\mu F$, som selv med $\pm 20\%$ tolerance opfylder kravet.

8.5.2 Forstærker x100

For at opnå en faktor 100 skal der laves en forstærker på 100 gg. Der benyttes en ikke-inverterende kobling, vist på figur 8.17(a). R_{308} fastlægges til $90k\Omega$, hvor R_{309} udregnes.

$$A = 1 + \frac{R_{308}}{R_{309}} \Leftrightarrow 1 + \frac{90k\Omega}{R_{309}} = 100 \Leftrightarrow R_{309} = 910\Omega \tag{8.108}$$

Til kredsløbet benyttes en TL084 opamp [STMicroelectronics, 2001], da denne også benyttes andre steder i kredsløbet. Modstandenes høje værdier er valgt for at holde strømmen i kredsløbet inden for operationsforstærkerens operationsområde og strømforbruget lavt.

8.5.3 Summationsled

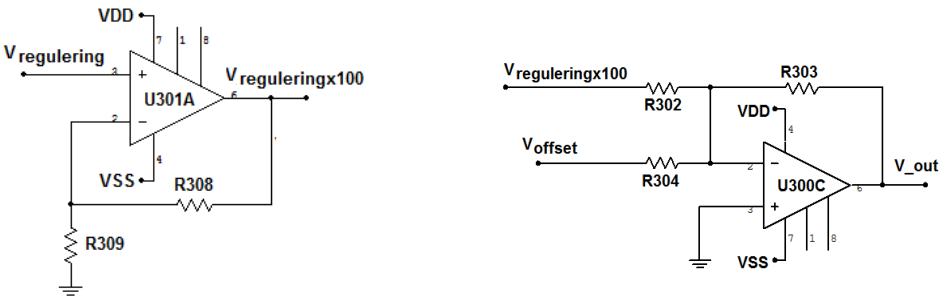
For at summere offset spændingen med den regulerede DC spænding fra ensretteren, bruges en opamp koblet som en summationskobling. Offset er nødvendigt, for at holde FET'en off når signalet ikke skal reguleres. Spændingerne bliver lagt ind på indgangene $V_{regulering}$ og V_{offset}, og bliver summeret og lagt ud på V_{out}. Kredsløbet ses på figur 8.17(b) og kan beskrives med nedestående ligning:

$$-R_{303} \cdot \left(\frac{V_{reguleringx100}}{R_{302}} + \frac{V_{offset}}{R_{304}} \right) = V_{out} \tag{8.109}$$

For at benytte den til det ønskede formål indsættes følgende værdier:

$$-100k\Omega \cdot \left(\frac{0Vtil - 9V}{100k\Omega} + \frac{+4.5V}{100k\Omega} \right) = V_{out} \tag{8.110}$$

De 2 indgangsmodstande, R_{302} og R_{304}, er valgt så inputtet bliver summeret i det samme forhold, da det fremgår af ligning 8.109, at dette forhold bestemmes af forholdet mellem R_{302} og R_{304}. Forstærkningen bestemmes af forholdet mellem de 2 modstande og R_{303}, da



(a) x100 forstærker (b) Summationsled

Figur 8.17: Forstærker og summationsled

der ønskes et forhold på 1:1 er alle valgt til $100k\Omega$ dette gør at udgangsniveauet passer med den benyttede FET. V_{out} bruges til at styre denne FET, derfor er $V_{out} = V_{gs}$ i afsnit 8.5.4. V_{out} kan variere mellem -9V og 0V. Den benyttede opamp er TL084.

8.5.4 Volumekontrol og styret spændingsdeler

For at brugeren kan kontrollere volumen manuelt, indsættes et potentionmeter. Der ønskes ikke interaktion med R_{301}, figur 8.18(a). Derfor indsættes et $10k\Omega$ potentiometer dvs. en faktor 10 lavere end R_{301}. Denne vælges i stereo, så brugeren af ørekoppen kun skal justere volumen et sted. Samtidig bliver volumen ens for begge ører. Indgangsimpedansen vil ikke påvirke filtret, afsnit 8.4, da dets udgangsimpedans er lav. Potentiometeret R_{300} ses på figur 8.18(a). Indgangsspændingen i forhold til udgangsspændingen er giver ved:

$$H_{Volume}(s) = \frac{R_{volume}}{R_{300} + R_{volume}} \tag{8.111}$$

For at den dynamiske regulering, i afsnit 8.5, skal kunne regulere, laves en spændningsstyret spændingsdeler med en FET. Ved at forspænde gate i forhold til source kan modstanden fra drain til source varieres. Dvs. ved at lade den dynamiske regulering styre gate, kan drain-source strækningen anvendes som en spændingsstyret modstand. Denne benævnes R_{ds}. Gate spændingen kan varieres af den dynamiske regulering til over 0V(fuldt on) og -4.5V(off). Da der benyttes en N-kanal J-FET, kobles denne op som en spændingsdeler, med modstand R_{301} på $100k\Omega$ og source til stel. Dette ses på figur 8.18(a). Ved 0V på gate, dvs $V_{gs} = 0$, er FET'en fuldt åben og $R_{ds} \approx 143\Omega$. Ved $V_{gs} = -4.0V$ er FET'en på vej mod off dvs. $R_{ds} \approx 20k\Omega$. Disse værdier kan udledes ud fra dens karakteristik på figur 8.18(b). Dette gøres ved at se på strømmen ΔI_{ds} ved $V_{gs} = 0V$(grønne streger på figur 8.18(b)) og $V_{gs} = -4V$ (blå streger på figur 8.18(b)) i forhold til spændingen ΔV_{ds}. Dette kaldes også den dynamiske modstand, som udtrykkes således:

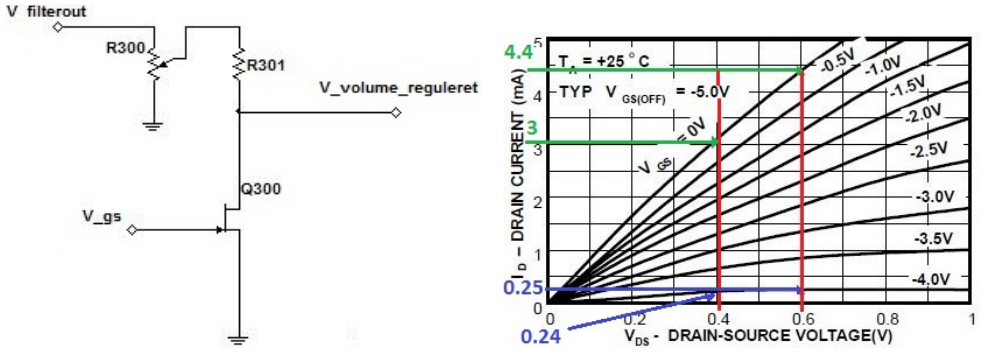
$$R_{ds} = \frac{\Delta V_{ds}}{\Delta I_{ds}} \tag{8.112}$$

$$V_{gs} = 0V \Rightarrow \frac{0.6V - 0.4V}{4.4mA - 3mA} = 143\Omega = R_{ds} \tag{8.113}$$

$$V_{gs} = -4V \Rightarrow \frac{0.6V - 0.4V}{0.25mA - 0.24mA} = 20k\Omega = R_{ds} \tag{8.114}$$

Ovenstående modstandsværdier er udledt ved en $V_{ds} = 0.6V$ og $V_{ds} = 0.4V$. Som det ses på karakteristikken fra databladet, varierer V_{ds} i forhold til I_{ds}. Dette sker ikke ved $V_{gs} = -5V(fuldoff)$ der vil $R_{ds} \to \infty$. Ved at variere modstanden R_{ds} kan spændingen af det indkomne signal til udgangsforstærkeren reguleres ned. Udtrykket for overføringsfunktionen er følgende:

$$H_{Regulator}(s) = \frac{R_{ds}}{R_{301} + R_{ds}} \tag{8.115}$$



(a) FET og volumekontrol

(b) Drain-source karakteristik [Fairchild, 2000]

Figur 8.18: Diagram og FET karakteristik

Til formålet er den beskrevne N-kanal FET af typen 2N5484 [Fairchild, 2000].

8.6 Udgangsforstærker

For at afspille den filtrerede lyd kræves en udgangsforstærker, da en højttalerenhed kræver strøm. En beskrivelse af denne højttalerenhed findes i afsnit 8.8. Ved udregninger vedrørende denne enhed, betragtes den som en 50Ω belastningsmodstand i resten af dette afsnit. Ved et lydniveau på 80dB kommer der en peak spænding ud af filtret på 40mV. For at dette bliver til 80dB i ørekoppen skal højttaleren, tilføres en spænding på 80mV. Dette er undersøgt i afsnit 8.8. Strømmen der skal leveres bliver da max:

$$I_{HT80dB} = \frac{80mV}{50\Omega} = 1.6mA \tag{8.116}$$

Dvs. der kræves en forstærkning på 2gg, og en strøm på mindst 1.6mA skal være tilgængeligt. I resten af kredsløbet er benyttet TL084, derfor vil det være optimalt at benytte denne til udgangsforstærker, så der kun bruges en type opamp i hele kredsløbet. Det ses fra databladet [STMicroelectronics, 2001] at 1.6mA er inden for kredsens grænse, da dens $I_{out(max)} = 40mA$. Da der ikke er et behov for at invertere signalet benyttes en non-inverterende opamp forstærkerkobling. Denne ses på figur 8.19 For at opnå den ønskede

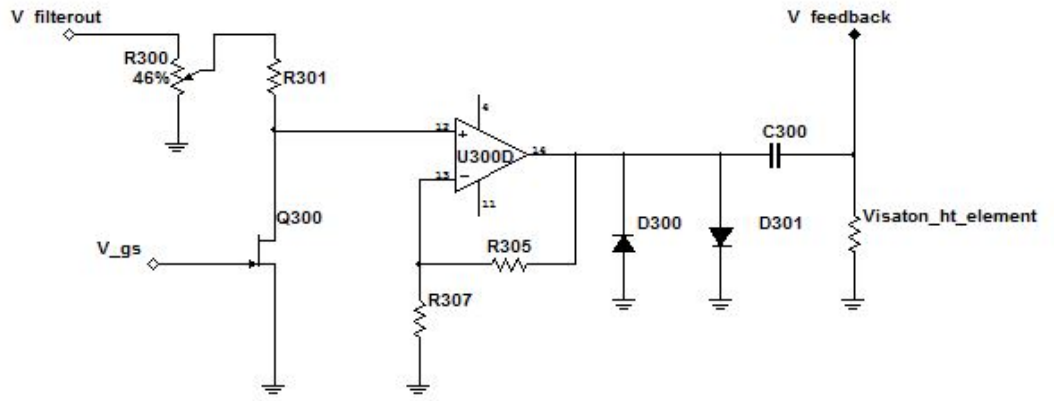
forstærkning på 2gg, vælges værdierne for R_{305} og R_{307} til $10k\Omega$ og $10k\Omega$.

$$A = 1 + \frac{R_{305}}{R_{307}} \Leftrightarrow A = 1 + \frac{10k\Omega}{10k\Omega} = 2gg \tag{8.117}$$

Da der kan forekomme mindre DC-offset's fra tidligere trin i kredsløbet indsættes en overførings kondensator C_{300} på $47\mu F$ på udgangen, så denne forhindre en konstant DC på højttaleren. Dette kombineret med højttalerenheden på 50Ω, udgør en simpel serie forbindelse betragtet med et Laplace billedkredsløb, dette giver et udtryk for overføringsfunktionen for forstærkerkredsløbet der ser således ud:

$$H_{Forstærker}(s) = (1 + \frac{10k\Omega}{10k\Omega}) \cdot \frac{50\Omega}{\frac{1}{sC_{300}} + 50\Omega} \tag{8.118}$$

Den ovenstående værdi på kondensatoren giver en knækfrekvens på 67Hz, dette vil yderligere bidrage til at fjerne lave frekvenser der ikke er vigtige for taleforståeligheden. Dette ses på figur 8.20. De kredsløb beskrevet i afsnit 8.5.4, og afsnit 8.7 kan nu kombineres og sættes sammen til det der ses på figur 8.19, så alt hvad der behandler det indkomne signal fra filter der skal afspilles er samlet.



Figur 8.19: Udgangstrin med input fra filter og output til spændingsdetector i afsnit 8.5.1

Et samlet udtryk for overføringsfunktionen for volumenreguleringen, den spændingsstyrede spændingsdeler, udgangsforstærkeren og højttalerenheden på 50Ω, kan nu sættes sammen til ligning 8.120, da overføringensfunktionerne kan ganges sammen:

$$H_{udgangstrin}(s) = H_{Volume}(s) \cdot H_{Regulator}(s) \cdot H_{Forstærker}(s) \tag{8.119}$$

$$H_{udgangstrin}(s) = \frac{R_{volume}}{R_{300} + R_{volume}} \cdot \frac{R_{ds}}{R_{301} + R_{ds}} \cdot \left(1 + \frac{R_{305}}{R_{307}}\right) \cdot \frac{50\Omega}{\frac{1}{sC_{300}} + 50\Omega} \tag{8.120}$$

For at forsimple dette, kan man opfatte forstærkningen og amplitudereguleringen som en

konstant, der er udtryk for amplituden, denne kaldes A:

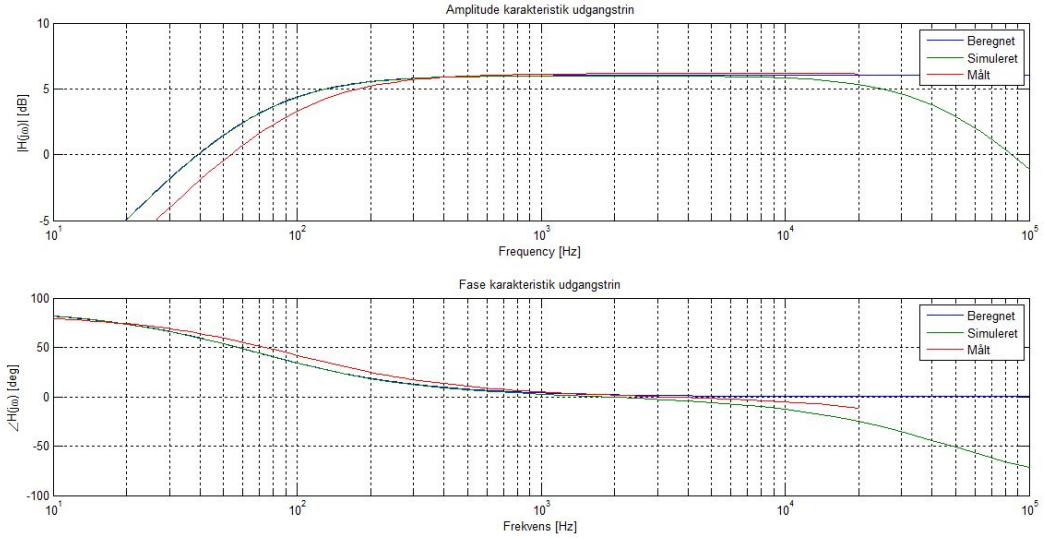
$$\frac{R_{volume}}{R_{300}+R_{volume}} \cdot \frac{R_{ds}}{R_{301}+R_{ds}} \cdot \left(1+\frac{R_{305}}{R_{307}}\right) = A \tag{8.121}$$

Så overføringsfunktionen nu istedet bliver:

$$H_{udgangstrin}(s) = A \cdot 50\Omega \cdot \frac{1}{\frac{1}{sC_{300}}+50\Omega} \tag{8.122}$$

Hvor A afhænger af det indkomne signals grad af regulering, og brugerens indstillingen af volumekontrollen.
I ovenstående udtryk er der set bort fra klipperen, der beskrives i afsnit 8.7. Når denne aktiveres, ved et for højt niveau ledes alt signal fra højttalerenheden til stel, derfor gælder ligning 8.122 ikke i det tilfælde.

I figur 8.20 ses bodeplots for amplitude og fasekarakteristikken for hele udgangstrinnet, både udregnet i Matlab, simuleret i NI Multisim og målt med NI-PCI-4461 audioanalysator. For at udføre dette er faktoren A sat fast til 2 dvs. regulering og volumekontrol er sat til 1:1.



Figur 8.20: Amplitude og fasekarakteristik for udgangstrinnet plottet i Matlab

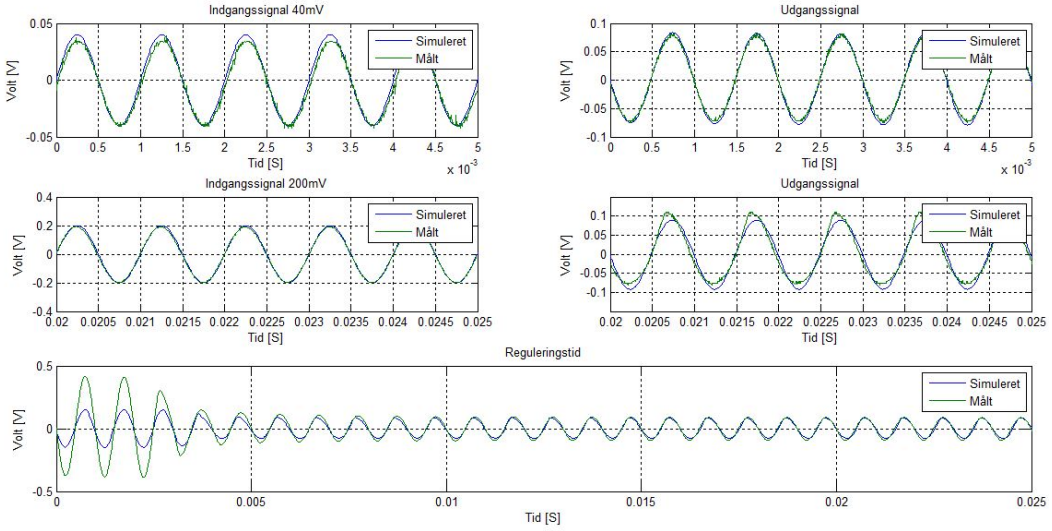
Det ses tydeligt på bodeplottet, at påvirkningen af det ønskede signal er minimal, både fase- og amplitudemæssigt, i det ønskede område 300-3kHz. Forskellen mellem det simulerede, målte og beregnede ved de højere frekvenser, skyldes at opamp'en er betragtet som ideel, og dermed er der ikke taget højde for dens interne kapaciteter ved udregning. I virkeligheden sætter disse begrænsninger og dette afspejler både simuleringen og målingen. På de målte data ses en afvigelse ved knækfrekvensen og forstærkningen ligger lidt højere end beregnet og simuleret. Dette kan tilskrives den anvendte kondensator C_{300} tolerance på $\pm 20\%$ og de anvendte modstande R_{305} og R_{307} i ligning 8.117's tolerancer.

8.6.1 Reguleret signal

For at verificere at hele reguleringssløjfen virker, så niveauet kan holdes under 80dB i ørekoppen, er der opstillet 2 scenarier testet ved 1kHz da det ligger midt i det ønskede område mellem 300-3kHz.:

- Et 1kHz sinusformet indgangssignalet på 40mV svarende til 80dB optaget af mikrofonen, dette skal afspilles ureguleret, med et niveau på 80mV.
- Et 1kHz sinusformet indgangssignalet på 200mV svarende til 94dB optaget af mikrofonen, dette skal så afspilles reguleret, med et niveau fast sat til 80mV dette kan justeres så det passer til andet end den anvendte højttalerenhed, hvordan det justeres beskrives i afsnit 8.5.1.

På figur 8.21 ses der i tidsdomænet på målt data og simuleret data fra NI Multisim på de 2 scenarier ved 1kHz plottet i Matlab. Anvendt måleudstyr er KH oscillator 4200 AAU nr.:06988, Agilent 54622D scope AAU nr.:52329. Til reguleringstidsmålingen er signalet optaget med et standard pc lydkort grundet at oscilloscopet ikke kan optage i den fastsatte tid med en tilfredsstillende opløsning.



Figur 8.21: Plot 1.1 40mV ind, plot 1.2 80mV ud ureguleret. Plot 2.1 200mV ind, plot 2.2 80mV ud nedreguleret. Plot 3.1 viser reguleringstiden.

Det ses på plot 1.2 at niveauet er upåvirket og forstærket 2 gange. På plot 2.2 ses det at der reguleres ned på udgangen til de fastsatte 80mV. Dette kan justeres ud fra højttalerenhedens følsomhed, så det svarer til de fastsatte 80dB. Plot 3.1 viser, hvor lang tid det tager for reguleringen at regulere ned til de fastsatte 80mV. Reguleringstiden er aflæst på plot 3.1 ud fra de simulerede data og målte data og er ca. 10ms ved de 200mV. Den målte data på plot 3.1 viser, at niveauet i virkeligheden aldrig når de 200mV indgangssignal forstærket 2 gange til 400mV der reguleres inden, tiden de målte data viser det tager at nå 80mV er tæt på de simulerede.

8.7 Klipper

Mellem udgangsforstærkeren, afsnit 8.6 og højtalerenheden afsnit 8.8, er et sikkerhedskredsløb, se figur 8.19. Dette er et klipper kredsløb bestående af to dioder af typen 1N4148 [Hitachi, 2001]. Deres formål er, at begrænse signalet mens det reguleres, samt at klippe signalet hvis reguleringskredsløbet ikke virker. D_{300} er forbundet med anoden i GND og begynder at lede strøm når den har -0.7V over sig, mens D_{301} er forbundet med katoden i GND og begynder at lede når den har +0.7V over sig. Ved forsøg i afsnit 8.8 vises at højtalerens lydniveauet er 94dB ved et signal på 400mV. Et signal på 700mV kan omregnes til dB med følgende ligninger:

$$Signal forhold = \frac{700mV}{400mV} = 1.75gg \tag{8.123}$$

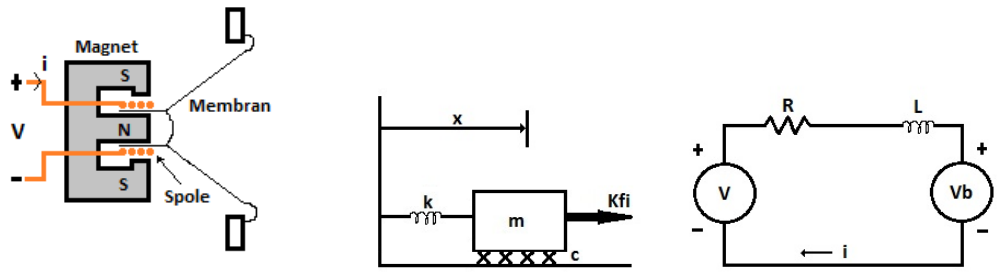
$$dB_{Signal forhold} = 20 \cdot log(1.75) = 4.86dB \tag{8.124}$$

$$dB_{700mV} = 94dB + 4.86dB = 98.86dB \tag{8.125}$$

I ligning 8.125 ses at højtalarens lydniveauet aldrig vil overstige 98.86dB. Dette er acceptabelt fordi i kravespecifikationen, afsnit 7, fremgår det, at lydniveauet fra højtalaren max må være 137dB(C) i en kort impuls.

8.8 Højttalerenhed

For at afspille det signal som mikrofonen, filteret og reguleringen har behandlet, skal der bruges noget, der kan omdanne de elektrisk signaler til et lydtryk øret kan opfatte. Dette afsnit vil beskrive en højttalerenhed, der gør netop dette.



(a) Principtegning af højttaleren-hed (b) Mekanisk model af højttale-renhed (c) Elektrisk ækvivalenskredsløb af højttalerenhed

Figur 8.22: Opbygning, mekaniskmodel og elektrisk ækvivalenskredsløb [Palm, 2005] af en højttalerenhed af samme type som den anvendte Visaton højttaler

På figur 8.22(b) ses en mekanisk model af en højttaler. Denne er lavet udfra figur 8.23(a) der viser, hvordan en højttaler normalt er opbygget. Højttaleren virker ved at en strøm (i) løber gennem en svingspole (L), hvor L er den totale trådlængde. Dette resulterer i en magnetisk kraft kaldet f, $f = BL \cdot i$ hvor B er magnetfeltet. Med $K_f = BL$ er det kraften der påvirker

membranen, og sætter luften i svingning. c er dæmpningen i ophænget af højttaleren der dæmper membranens bevægelser. k er fjederkonstanten og m er massen af membranen og svingspolen. Ud fra dette kan følgende differentialligning opstilles ved hjælp af Newton's anden lov($m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} = \Sigma\, alle\ kræfter$):

$$m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} + c \cdot \frac{dx}{dt} + k \cdot x - K_f \cdot i = 0 \tag{8.126}$$

Kræfterne der er involveret er:

- Drivende elektrodynamisk kraft $= K_f \cdot i$
- Fjederkraft $= -k \cdot x$
- Dæmpendekraft $= -c \cdot \frac{dx}{dt}$

På figur 8.22(c) er et elektrisk ækvivalens kredsløb for højttalerenheden [Palm, 2005]. Ud fra Kirchoff's spændingslov kan følgende opstilles:

$$V_{out} = L \cdot \frac{di}{dt} + R \cdot i + K_b \cdot \frac{dx}{dt} \tag{8.127}$$

K_b er en modsat rettet elektromotorisk kraft der opstår, fordi spolen bevæger sig inde i et magnetfelt. Ligning 8.126 og 8.127 repræsenterer tilsammen en model for en højttaler [Palm, 2005].

8.8.1 Den anvendte højttaler

Den aktuelle højttalerenhed der er bygget ind i ørekoppen, er valgt til at være en Visaton k36. Højtalerens data fra producenten er følgende:

- Følsomhed: 77dB ved 1kHz 1w/1m [Visaton, 2011]
- Impedans: 50Ω [Visaton, 2011]

Følsomheden der er opgivet, er i ørekoppen irrelevant, da den er i friluft. Følsomheden vil ændre sig drastisk når den bliver lukket inde i et lille kammer, og op mod et menneskeligt øre. De akustiske omgivelser ændrer sig derfor. Figur 8.23(a) viser hvorledes den er monteret. Der udføres et forsøg, med en minature mikronfon placeret inde i et øre, med højttaleren i ørekoppen uden om. Mikrofonens output ved 1kHz 94dB er opgivet til at være 5mV. Visaton enheden tilføres et 1kHz sinusformet signal fra en tonegenerator med en spænding der giver 94dB inde i øret dvs. 5mV målt over mikrofonen. Denne spænding kan så aflæses, og spændingen for at spille 94dB er her efter kendt ved 1kHz, se figur 8.23(b) for at se forsøgsopstilligen:

(a) Ørekop (b) Miniature mikrofon

Figur 8.23: Montering af højttalerenheden i ørekoppen, og forsøgsopstilling til at måle lydniveauet i ørekoppen

Resultat:

- Lydtryk i øret målt med mikr0fon: 94dB
- Spænding over Visaton højttaler: 400mV

Anvendt måleudstyr er KH oscillator 4200 AAU nr.:06988 og Agilent 54622D scope AAU nr.:52329.
Målingen ved 1kHz antages at gøre det ud for følsomheden for hele området 300-3kHz. Det ses af databladet at højttaleren [Visaton, 2011] ikke er helt linær i området samt ørekoppen og hovedets udformning vil yderligere bidrage til at gøre den mere ulinær.
Spændingen over højttaleren, for at afgive et lydtryk på 80dB, kan findes således:

$$Dæmpning = 80dB - 94dB = -14dB \tag{8.128}$$

Forskellen regnes om fra dB til gange:

$$-14dB = 10^{\frac{-14dB}{20}} = 0.2gg \tag{8.129}$$

Den målte spænding ved 94dB regnes om til 80dB:

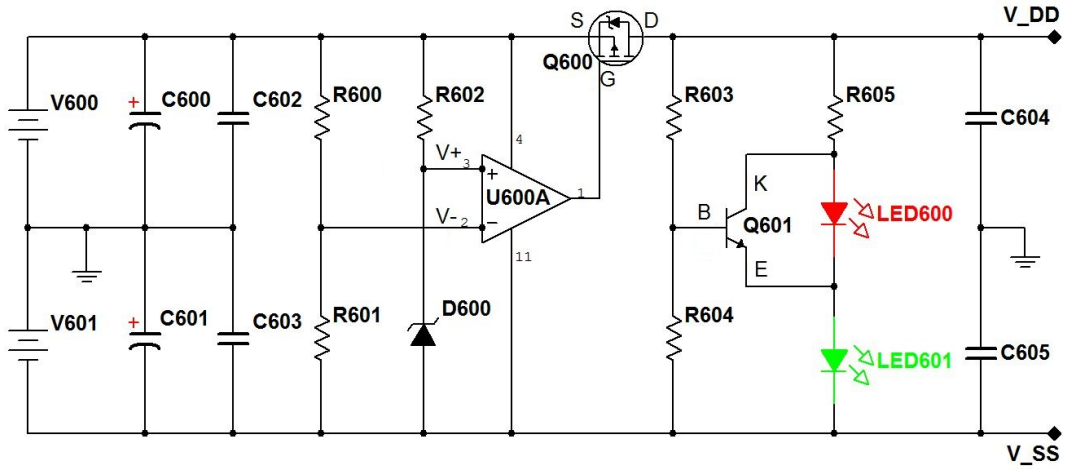
$$Følsomhed80dB = Følsomhed94dB \cdot 0.2 \tag{8.130}$$

$$400mV \cdot 0.2 = 80mV \tag{8.131}$$

Med denne højtalerenhed er det nu muligt at afspille de lyde mikrofonen opfanger, og dens følsomhed er kendt, derfor kan reguleringen indstilles korrekt.

8.9 Strømforsyning

Denne del beskriver strømforsyningen, der ses på figur 8.24. Den leverer $\pm$7.4 til $\pm$8.4V forsynings spænding til hele systemet, og den fastsætter en fast 0V reference i form af GND.



Figur 8.24: Strømforsyningen til systemet

Strømforsyningen kører på to 8.4V NiMH (Nickel-Metal Hydride Battery) batterier. Dens hovedfunktion er at levere en stabil spænding til hele kredsløbet, samt at afbryde kredsløbet når batterierne er afladet ned til 7.4V, samt at vise når høreværnet er tændt og indikere når batteriernes resterende kapacitet er lav.

NiMH batterier er valgt på grund af deres høje kapacitet. De anvendte er af typen NIMH9V280RTU med en kapacitet på 280mAh [Batteribyen, 2011]. Ved at forbinde batterierne, V_{600} og V_{601}, i serie hvor deres midtpunkt er forbundet i stel, kan de levere en spænding på +8.4V (V_{DD}) og -8.4V (V_{SS}).

Over batterierne, placeres to elektrolytkondensatorer C_{600} og C_{601}, samt to afkoblingskondensatorer C_{602} og C_{603}. C_{600} og C_{601} funktion er at opretholde spændingen, hvis der kortvarigt bliver trukket en stor strøm fra strømforsyningen. C_{602} og C_{603} er placeret for at afkoble højfrekvent støj der kan forekomme på V_{DD} og V_{SS}. C_{604} og C_{605} er også afkoblingskondensatorer, og er de fysisk placeret ved forsyningsbenene ved de anvendte opamps i kredsløbet. Værdien for C_{600} til C_{605} er valgt udefra *National Semiconductor Corporation´s Protection Schemes for BI-FET Amplifiers and Switches* [National Semiconductor Corporation, 1995].

NiHM batterierne indeholder 7 x 1.2V celler og på producentens datablad [Texcus, 2010] ses det at når cellerne falder til under 1V, er de fuldsændig afladet. Derfor designes et kredsløb, som slukker for strømmen når batterispændingen falder ned til 7.4V, eller 1.057V pr celle. Dette kredsløb bygges op omkring en opamp (U_{600}), der forbindes som en comparator. Den styrer en Power MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor), Q_{600}, der anvendes som en kontakt.

Opampen der er brugt til comparatoren er en TL084, da den er brugt gennem hele systemet. Der er ikke noget der begrænser at bruge TL084 i denne opstilling. Når en opamp er brugt som en comparator, er den forbundet i open-loop forbindelse. Den arbejder således uden for sit linære forstærkningsområde, og giver enten minimum eller maksimum spænding på udgangen. Når spændingen på V_- er højere end V_+, bliver udgangen $\approx V_{SS}$. Når spændingen på V_+ er højere, end V_-, bliver udgangen $\approx V_{DD}$. Størrelsen af udgangssignalet er begrænset af Vcc og opampens maximale $\pm V_{OPP}$ (Output Voltage Swing). Kredsløbet skal fungere således, at når spændingen mellem V_{DD} og V_{SS} falder ned til 14,8V (7,4V pr batteri) skal

udgangen på opampen, gå fra $\approx V_{SS}$ til $\approx V_{DD}$.

Først er V_+ fastsat til 2.6V (10V-7.4V) med en 10V zenerdiode D_{600}. D_{600} er i serieforbindelse med R_{602}. Den er valgt så dioden mindst får 5mA, som er dens minimum Iz strøm, som den skal bruge for at holde en stabil 10V spænding over sig. Se følgende ligning for størrelsen på R_{602}

$$R_{602} = \frac{V_{DD} - V_+}{Iz} \quad \Leftrightarrow \quad R_{602} = \frac{7.4V - 2.6V}{5mA} = 960\Omega \tag{8.132}$$

Bagefter er R_{600} og R_{601} valgt, så de giver lidt mindre end 2.6V på V_-, når batterierne er afladt til 7.4V. Således vil opampens output være $\approx V_{DD}$. Modstandene er forbundet som en spændingsdeler og størrelsen på R_{600} er udregnet i ligning 8.135. Før den kan udregnes skal R_{601} vælges. R_{601} vælges til 49.9kΩ pga. V_+ indgangen næsten ingen strøm trækker. Derfor kan R_{601} være relativ stor. Ligning for spændingsdeleren er følgende:

$$V_- - V_{SS} = V_{DD} - V_{SS} \cdot \frac{R_{601}}{R_{601} + R_{600}} \Leftrightarrow \tag{8.133}$$

$$R_{600} = \frac{(V_{DD} - V_{SS}) \cdot R_{601} - (V_- - V_{SS}) \cdot R_{601}}{(V_- - V_{SS})} \tag{8.134}$$

Så ved at indsætte værdier fås at R_{600} skal være 24kΩ, se følgende ligning:

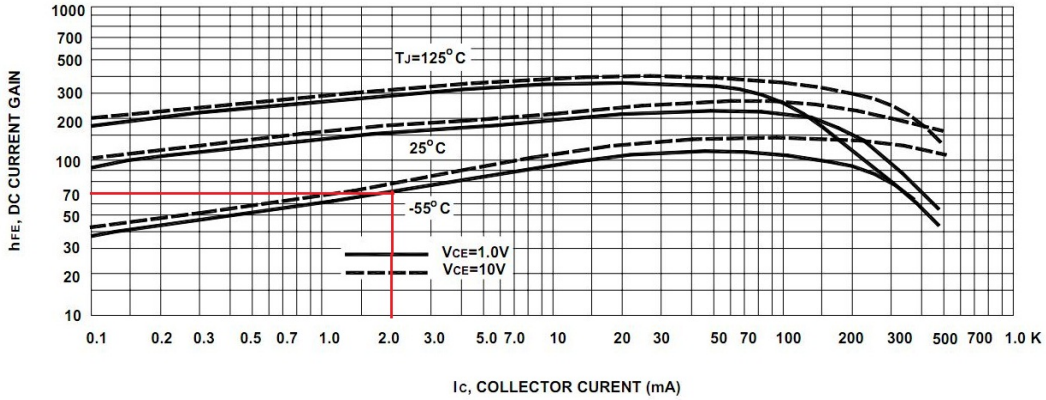
$$R_{600} = \frac{(7.4V - (-7.4V) \cdot 49.9k\Omega - (2.59V - (-7.4V)) \cdot 49.9k\Omega}{(2.59V - (-7.4V))} = 24k\Omega \tag{8.135}$$

Udgangen på opamp U_{600} leverer $\approx V_{SS}$ indtil at batterierne er faldet til 7.4V. Så vil dens udgang blive $\approx V_{DD}$. Udgangen er forbundet Gate på en P-kanal power MOSFET, Q_{600}, og den benyttes som en On/Off kontakt der er styret af spændingen på gate. V_{DD} fra batterierne forbindes til Source og V_{DD} til resten af systemet er forbundet Drain. MOSFETén er af typen IRF9530 [International Rectifier, 2010], og den er valgt pga. dens lave 0.3Ω D-S_{on} modstand, en I_D op til 12A og fordi den kan håndtere V_{G-S} op til ±20V. Da det er en P-Channel, vil den virke som en On-knap når den har en spænding på $\approx V_{SS}$ tilknyttet til gate, og som en Off-knap når gate får en spænding på $\approx V_{DD}$.

Strømforsyningen skal kunne vise, hvornår høreværnet er tændt, og hvornår batterispændingen er for lav. Til det kredsløb bruges en NPN-transistor, to lav-strøms LED-dioder og nogle modstande. Transistoren Q_{601} er af typen 2N2222A [SGS-Thomson, 2010] og den er valgt pga. dens I_K max er relativ større end den minimale strøm der LED-dioderne LED_{600} og LED_{600} skal trække, for at lyse [Kingbright, 2010]. Batteri indikationen ved lav spænding er defineret til 8V, ved at se på afladnings karakteristisken på diagramet for batterierne [TECXUS, 2010]. Transistoren er brugt som en On/Off kontakt ligesom MOSFETén, men forskellen på dem, er at MOSFETén er spændings styret og transistoren er strømstyret. Transistoren skal være On og lede strøm mellem emiter og kolektor, og dermed uden om LED_{600} når batterispændingen er over 8V. Når spændingen er under 8V, skal den være i Off mode, og strømmen vil løbe gennem LED_{600}. På den måde vil en tændt rød lysdiode, vise forbrugeren at batterierne skal skiftes eller oplades.

For at transistoren Q_{601} kan være i On-mode, når batterispændingen er over 8V, skal den

forspændes så at den mindst får $0.6V_{BE}$ og en stor nok I_B. I_B kan udregnes ved at se på den minimale H_{FE} med en I_C på 2mA. 2mA er den strøm der skal få dioderne til at lyse. Se figur 8.25.



Figur 8.25: 2N2222A DC strøm forstærkning[Bytesonic, 2010]

H_{FE} er forholdet mellem strømmen i I_C og I_B. I_B udregnes i følgende ligning

$$I_B = \frac{I_C}{h_{FE}} \quad \Leftrightarrow \quad I_B = \frac{2mA}{70} = 29\mu A \tag{8.136}$$

Når I_B er udregnet, kan I_{R604} findes, da den skal have 10 gange større strøm end I_B [Rasmussen, 2001]. Dermed kan spændingen kan holdes stabil, og sikre at transistoren får nok I_B. Se følgende ligning:

$$I_R = I_B \cdot 10 \quad \Leftrightarrow \quad I_{R604} = 29\mu A \cdot 10 = 290\mu A \tag{8.137}$$

Med V_{BE}=0,6V og V_{LED601}=1,9V [Kingbright, 2010]. Kan R_{604} udregnes:

$$R_{604} = \frac{V_{BE} + V_{LED601}}{I_B} \quad \Leftrightarrow \quad R_{604} = \frac{0.6V + 1.9V}{290\mu A} = 8.62k\Omega \tag{8.138}$$

R_{603} sidder i en serieforbindelse med R_{604}, mellem V_{DD} og V_{SS}. Hvor $V_{R604} = 2,5V$ og $V_{DD} - V_{SS} = 16V$ når batterierne er afladet. Derfor vil $V_{R603} = 13.5V$. R_{603} er udregnet i følgende ligning:

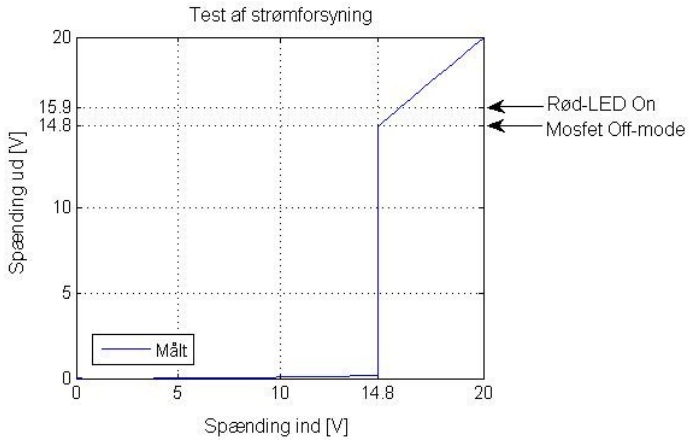
$$R_{603} = \frac{V_{R603}}{I_B + I_{R604}} \quad \Leftrightarrow \quad R_{603} = \frac{13.5V}{290\mu A + 29\mu A} = 43.32k\Omega \tag{8.139}$$

Til sidst mangles blot at udregne R_{605}, som er kollektor modstanden. Dens funktion er at levere den minimale strøm til LED-dioderne, når batterierne er afladet til 7,4V. Det er på det tidspunkt at MOSFETén går i Off mode. Størrelsen på R_{605} udregnes i følgende ligning:

$$R_{605} = \frac{(V_{DD} - V_{SS}) - (V_{LED600} + V_{LED600})}{I_{LED}} \Leftrightarrow \tag{8.140}$$

$$R_{605} = \frac{(7.4V - (-7.4V)) - (1.7V + 1.9V)}{2mA} = 5.6k\Omega \tag{8.141}$$

På figur 8.26 ses målt udgangsspændingen i forhold til en indgangsspænding fra en ekstern strømforsyning. Der bruges en ekstern strømforsyning som skal repræsenterer at batterispændingen falder fra 20V til 0V.



Figur 8.26: Test af strømforsyningen med en ekstern indgangsspænding.

Målet er at teste strømforsyningens funktioner. Anvendt måleudstyr til måling af udgangsspænding er Fluke 37 multimeter, AAU nr.:08315, og figuren er plottet i Matlab. Det fremgår at strømforsyningen lukker ned som den skal ved 14.8V og batteriindikatoren tænder ved 15.9V.

Alle delsystemer fra afsnit 8.2 er designet og testet. Alle dele opfylder kravene og virker efter hensigten. Delene skal dermed integreres, for at sikre at deres funktion bevares i samspil med de andre dele, før der kan udføres en accepttest. Dette gøres i det kommende kapitel.

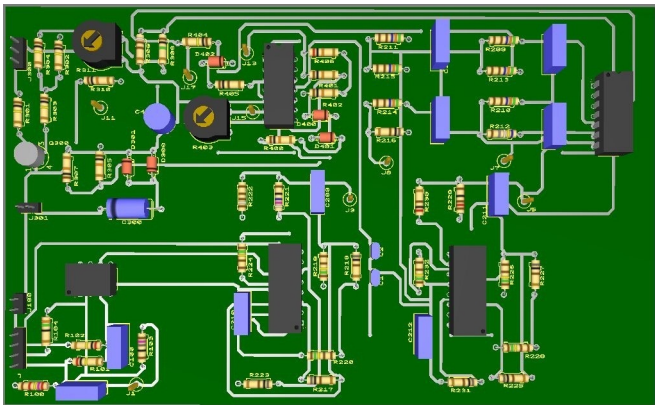
KAPITEL 9

Implementering

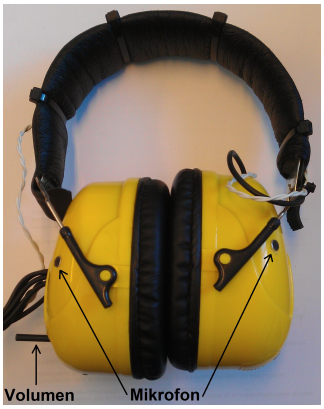
Dette afsnit vil, som beskrevet i afsnit 7.9, skabe sammenhængen mellem de enkelte delsystemer fra systemdesignet og ende ud i en færdig prototype. Dette afsnit vil beskrive implementeringen både mekanisk og elektrisk. På de ovenstående elektriske delsystemer bliver der udført en kontrolmåling. Dermed verificeres det, at samspillet ikke skaber uforudsete problemer. En samlet blackbox test af prototypen udføres i afsnit 10.

9.0.1 Indbygning i ørekopper

Til den aktuelle prototype er der valgt at indkøbe et færdigt sæt ørekopper, der antages at opfylde kravene til den passive dæmpning. Til disse forbindes delsystemerne, så de kan testes som et færdigt produkt i accepttesten 10. Printet beskrevet i sektion 9.0.2 placeres i en testopstilling. Højttaleren sættes ind i ørekoppen, dette er beskrevet i afsnit 8.8. Mikrofonerne placeres på siden af ørekoppen. De indkøbte ørekopper ses på figur 9.1(b).



(a) Venstre kanal komponentplaceringen

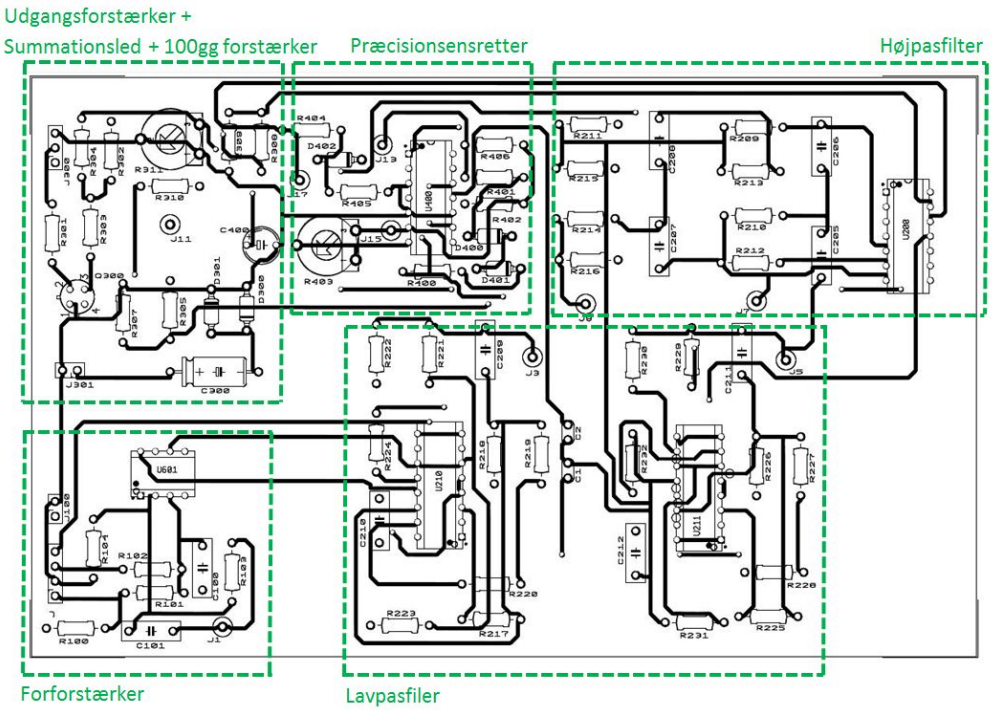


(b) Ørekopperne

Figur 9.1: Figur (a) viser en 3D tegning af venstre kanal komponentplaceringen. Figur (b) viser ørekopperne der er brugt i prototypen. Mikrofonerne er implementeret i siden af hver ørekob, og volumenkontrollen ses nederes til venstre på billede b.

9.0.2 Printudlægning

Systemet er delt op på tre PCB's (Printed Circuit Board): Venstre og højre kanal, samt strømforsyningen. Printet er designet i NI Ultraboard som et dobbeltsidet PCB. Et af printene (venstre kanal) er vist på figur 9.2. Printet er designet således at hvert delsystem nemt kan implementeres og testes hver for sig.



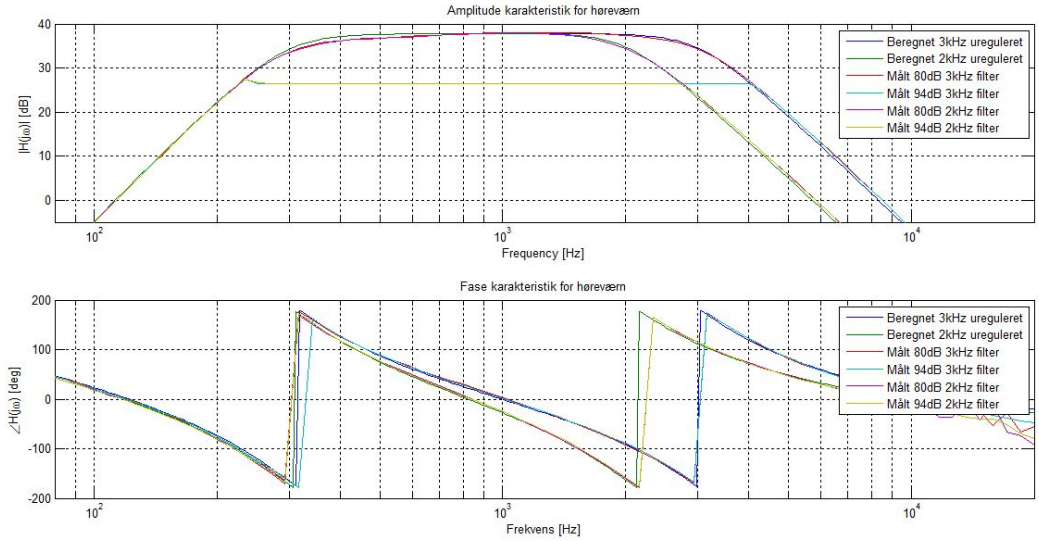
Figur 9.2: Venstre kanals printudlæg. Her ses det, at printet er delt op så hver del kan testes individuelt.

Det komplette diagram er vedlagt som bilag på CD B.0.9. Printudlægning er en process, udført på Aalborg Universitets PCB laboratorium, og inkluderer følgende trin [es.aau, 2009]:

- PCB layoutet udskrives på en transparent.
- Transparenten presses omkring printet under vacuum, og UV belyses.
- Printet skal efter belysningen i en fremkaldertank i ca. 30 sek, hvorefter det skylles med vand.
- Herefter ætses printet i et syrebad i 10 - 30 min. Efterfølgende fjernes fotoresisten og loddelak sprayes udover printet.

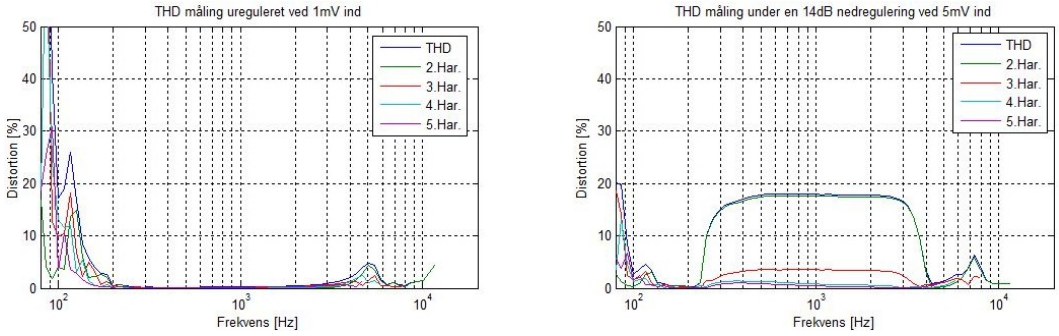
9.0.3 Kontrolmåling

Til sammensætning af delelementerne er der anvendt trinvis integration, for at undgå en "Big bang implementering"[Blanchard and Fabrycky, 2011]. Dette er udført ved at hver delelement, først er testet sammen med den udviklede strømforsyning. Derefter er mikrofonforforstærker og filter testet sammen, efterfulgt af en test med udgangsforstærkeren, klipper og højttaler. Afslutningsvis bliver den dynamiske regulering sluttet til. For at verificere at dette virker ses amplitudekarakteristikken på bodeplottet på figur 9.3.



Figur 9.3: Det ses at systemet opfører sig som forventet, outputtet fra mikrofonen er erstattet af et 1mV(80dB) og et 5mV(94dB) indgangssignal.

Bodeplottet er vist for en kanal, det er lavet med NI-PCI-4461 audioanalysator og plottet i Matlab. Det ses, at der er sammenhæng mellem det målte og beregnede. Ved et for stort signal svarende til 94dB ses det, at reguleringen dæmper signalet 14dB. Ved samme måling blev der udført en THD (Total Harmonic Distortion) måling både ved et signal der ikke skal reguleres og ved et signal der skal reguleres ned:



Figur 9.4: THD måling uden regulering (venstre) og med regulering (højre).

THD målingen angiver forvrængning i % på y aksen, x aksen angiver frekvensen i Hz. Målingen viser en meget lav forvrængning mellem 300-3kHz, når der ikke reguleres. Ved en nedregulering på 14dB, stiger denne til 18%, hvilket kan tilskrives FET'ens ulineære egenskaber.

Udfra dette kan det konkluderes, at integrationen af delsystemerne ikke ændrer betydeligt ved funktionen af systemet, og dermed er der bygget en prototype, som kan accepttestes i forhold til kravspecifikationen i kapitel 7. Accepttesten udføres i næste kapitel, og vil teste funktionerne i en situation der vil simulere det miljø høreværnet er tiltænkt.

KAPITEL 10

Accepttest

For at verificere at den færdigt udviklede protoype fungerer, udføres en accepttest. Testens formål er, at kontrollere at kravsspecifikationen, i kapitel 7, overholdes. Der ses bort fra de afgrænsede krav, som er beskrevet i kravspecifikationens afgrænsning 7.8. Testen er udført som en black box test for det overordnede system. Følgende krav skal testes:

- Binaural gengivelse skal være muligt, således at brugeren kan retningsbestemme lyde fra højre og venstre.
- Pasbåndet i filteret skal være 300-3kHz med en afskæring på min. 12 dB/okt eller 40 dB/dek, for at forbedre taleforståelsen.
- Lydniveauet i ørekoppen må max være 85dB(A) og 137dB(C) i korte pulser.
- Høreværnet skal benytte to 9V batterier som strømforsyning.
- Strømforbruget må max være 23.33mA.

Som beskrevet udfra den anvendte udviklingsmodel i afsnit 7.9 er alle delsystemer testet under systemdesign i kapitel 8. Testen vil bestå af en performance test, for at teste de første 3 krav samt en strømforbrugsmåling.

10.0.4 Test cases:

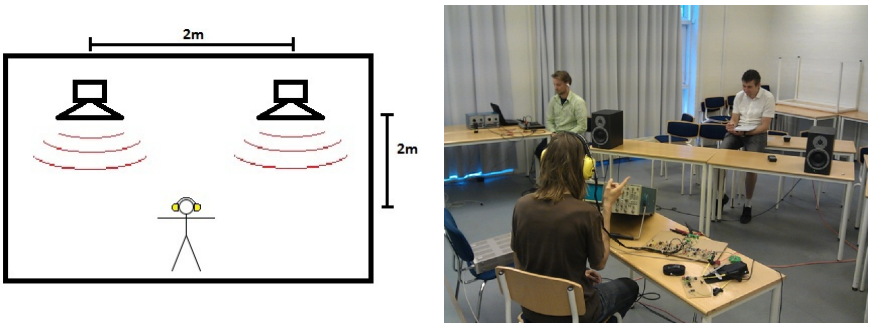
En god verificering af et produkts funktionsdygtighed opnås ved, at teste produktet i det miljø og de situationer hvor produktet skal benyttes [Blanchard and Fabrycky, 2011]. De følgende tests skal teste funktionaliteten i de opstillede use cases i kapitel 7 og afdække de ovenstående krav. Derfor opstilles følgende test cases:

- En testperson får høreværnet på og placeres med en højtaler på højre side og en højtaler på venstre side, se figur 10.1(b). Højtalerne afspiller en 1kHz tone. Først på 80dB(A) og derefter 94dB(A) fra henholdsvis højre og venstre højttaler i forsøgsopstillingen som ses på figur 10.1(a). Personen skal med lukkede øjne kunne udpege, hvilken højttaler der spiller. Formålet er, at teste binaural gengivelse.
  - **Resultat: Bestået**. Ved 10 gentagelser med 2 forskellige personer, kan det konstateres at den højttaler der afspiller lyden, kan udpeges hver gang.
- Samme opstilling som ovenstående test. Nu afspilles blot lyden af en vinkelsliber, alusav og en luftnøgle, som er optaget på Im. Stiholt A/S, jf. 3.2.2. De afspilles ved et niveau på max. 80dB(A) og 94dB(A). Niveauet i ørekoppen måles, som i afsnit 8.8, med en mikrofon og et oscilloskop. Niveauet i ørekoppen må ikke overskride 85dB(A) eller 137dB(C). Formålet er, at teste om reguleringen virker.
  - **Resultat: Bestået**. Af de afspillede lyde kan det måles at niveauet bliver reguleret til 80dB(A)$\pm 3dB$.
- For at teste taleforståeligheden benyttes optaget oplæsning fra en bog, udarbejdet i appendix A jf. filterundersøgelse. Denne afspilles via højttalerne ved max. 80dB(A) og ved 94dB(A). Testpersonen med høreværnet på, skal derefter gengive, hvad der

er blevet læst op. Formålet med niveauerne er, at sikre reguleringen ikke ødelægger taleforståelsen. Dette gøres både ved filterets knækfrekvens på 3kHz og derefter på 2kHz.

Målinger på filteret med pasbånd fra 300 til 3kHz, er i implementeringen testet og opfyldt. Med lavpasdelen af filteret indstillet til 2kHz, er kravet til filteret ikke testet. Dette skyldes at funktionen er en ekstra valgmulighed, som er baseret på forsøg i Appendix A

– **Resultat: Bestået**. Den afspillede tale kan 100% gengives korrekt i begge situationer.



(a) Principtegning af testopstilling.

(b) Den aktuelle testopstilling, hvor retningsbestemmelsen testes.

Figur 10.1: Ovenstående viser den anvendte testopstilling til accepttesten.

10.0.5 Strømforbrugsmåling

Strømforbruget er målt til max. at være: 98mA. Det kan konstateres, at den benytter de specificerede batterier, jf. 8.9.
Anvendt måleudstyr: Fluke 37 multimeter, AAU nr.:08315
Strømforbruget lever ikke op til de fastsatte 23.33mA. I afsnit 12 perspektiveres til, hvordan strømforbruget kan nedsættes.

10.0.6 Begrænsninger

Testen har en række begrænsninger, hvor resultatet er ukendt, disse er:

- Om lyde kan retningsbestemmes i andre afstande end 2m og specifikke vinkler. Samt om der kan kendes forskel på, om lyden kommer forfra eller bagfra.
- Om tale kan forstås ved andre lydniveauer end 80dB(A) og 94dB(A) og ved andre afstande end 2m.
- Om høreværnet kan nedregulere højere lydniveauer end anvendte 94dB(A), da det ikke er testet af sikkerhedsmæssige årsager.

Dermed kan det konkluderes, at det udviklede intelligente høreværn lever op til de opsatte krav. Dette gælder dog ikke strømforbruget, der er ca. fire gange højere end specificeret.

DEL III

KONKLUSION OG PERSPEKTIVERING

KAPITEL 11

Konklusion

Med udgangspunkt i det initierende problem, er der blevet undersøgt hvad der kan gøres for at forhindre høreskader på arbejdsmarkedet. Denne undersøgelse har ledt til problemformuleringen i kapitel 6. Med udgangspunkt i problemformuleringen er der udviklet en teknisk løsning, som giver brugeren mulighed for at høre lyde indenfor taleområdet (300-3kHz). Lyde under 80dB vil blive gengivet uden dæmpning, og øger kommunikationsmulighederne og komforten, set i forhold til det passive høreværn. Denne løsning giver derfor ikke brugeren nogen anledning til at tage høreværnet af, for at lytte. I relation til denne komfort, kan løsningen være med til at forhindre høreskader på arbejdsmarkedet. Den indbyggede regulering sørger for, at lydniveauet aldrig overstiger de lovmæssige grænser for støjeksponering. Der er konstrueret en prototype, som består af 2 kanaler med mikrofon, filter, niveauregulering og højtaler. Mikrofoner og højtalere er bygget ind et høreværn, som ses på figur 9.1(b). Prototypen har følgende egenskaber:

- Der er valgt, at benytte analoge kredsløb som teknologi til løsningen.
- Den kan gengive lyde binauralt, således kan brugeren retningsbestemme lyde.
- Den regulerer lydniveauet ned til 80dB og klipper impulser ved 98.86 dB.
- Den dæmper frekvensområdet udenfor 300-3kHz med mindst 24dB/oktav, ved anvendelse af 4 kaskadekoblede 2. ordens Sallen Key filtre, med Butterworthkarakteristik.
- Det nævnte lavpasfilter kan varieres fra 3kHz til 2kHz.
- Den har en strømforsyning bestående af to 9V batterier og en batteriindikator.

Efter udviklingsfasen er der gennemført en accepttest af produktet på baggrund af kravspecifikationen i kapitel 7. Testen verificerer de ovenstående egenskaber. Under accepttesten måles der et samlet strømforbrug på 98mA. Strømforbruget lever således ikke op til det specificerede forbrug i kravspecifikationen.

Prototypen fungerer som beskrevet i Valgt System, afsnit 8.2. Brugeren kan justere volumekontrollen, tænde og slukke for systemet og derved vælge den aktive dæmpning fra og prototypen benyttes som et passivt høreværn.

Rapporten besvarer problemformuleringen igennem et design af en teknisk løsning i form af en prototype. Denne er testet og ud fra de opnåede resultater, kan det konkluderes at stort set alle krav er opfyldt. I et færdigt produkt vurderes det som værende muligt at opfylde samtlige krav.

KAPITEL 12

Perspektivering

Efter udført implementering og acceptttest kan der opstilles tilføjelser og forbedringer til systemet. Den analoge prototype kan digitaliseres ved konstruering af et digital-signal-processing system. Via en analog-digital-konvertering behandler et DSP-filter lyden digitalt. Lyden bearbejdes ud fra en række algoritmer, der beregner det endelige signal, som der digital-analog-konverteres og sendes til højtaleren. Der er mange muligheder for kompleksiteten af disse algoritmer, sågar separering af tale i støj. Dette kræver en avanceret algoritme, men vurderes som en mulig forbedring, hvis løsningen skal videreudvikles. En sekundær fordel ved et DSP-filter er størrelsen. Det vil være muligt at implementere et DSP-filter i en øreprop, hvilket vil opfylde ønsket fra Stiholts medarbejdere, fra afsnit 3.2.1, om at høreværnet skulle udformes i en øreprop.

12.0.7 Videreudvikling

Skal den udviklede prototype forbedres, kan følgende aspekter overvejes i forbedringsprocessen:

Mekaniske forbedringer

- Elektronikken skal udformes i en sådan størrelse, at det kan implementeres i en eksisterende ørekop.
- Udvikling af letvægts ørekopper tilpasset elektronikken

Elektroniske forbedringer

- Elektronikken kan fremstilles ved brug af SMD-komponenter (Surface Mounted Devices), der samtidigt hjælper på den mekaniske udfordring mht. størrelsen af elektronikkens udformning.
- Indbygning af underholdningsfunktioner såsom radio og lignende.
- Filterets flankestejlheder og afskæringsfrekvenser kan optimeres den enkelte arbejdssituation. Således er det ikke kun værkstedet på Im. Stiholt A/S der kan drage nytte af produktet.
- Strømforbruget skal overholde kravspecifikationen, hvilket indebærer valg af komponenter med mindre strømforbrug. Der kan ligeledes ses på en ny type batterier.

Der er fundet 2 strømbesparende komponenter. En opamp der bruger 1mA [Linear Technology, 2011] mindre strøm end den nuværende, en zener-diode der bruger 50μA [Philips, 2011] istedet for 5mA og derudover et LiPo batteri med 3 gange så stor kapacitet ift. vægten[Hyperion, 2011]. Da kredsløbet kræver 21 opamps og 1 zener-diode, kan strømforbruget sænkes med:

$$(21 \cdot 1mA) + (5mA - 50\mu A) = 24.95mA \tag{12.1}$$

Denne strømbesparelse kan trækkes fra det nuværende strømforbrug. Tages dette resultat ift. en 3 gange så stor strømkapacitet kan den nye funktionstid for ørekoppen findes:

$$\frac{(\text{Nuværende batterikapacitet} \cdot 3)}{(\text{Nuværende strømforbrug} - 24.95mA)} = \text{Antal funktionstimer} \tag{12.2}$$

$$\frac{(280mAH \cdot 3)}{(98\text{mA} - 24.95mA)} = 11.5timer \tag{12.3}$$

12.0.8 SWOT-analyse

Den udviklede prototype sammenlignes med høreværnstypen brugt på Stiholt. Stiholts løsning er sammenlignelig med høreværnet på figur 4.7, dog uden radio. I SWOT-analysen vurderes styrker, svagheder, muligheder og trusler blandt de to typer teknologier, for derved at klarlægge forskellene på den udviklede prototype og den eksisterende løsning.

Strengths:	**Weaknesses:**
Aktiv Støjdæmpning Dæmper alt over 80dB Dæmper ikke tale i støjfrit miljø	Dyrere Vedligeholdelse Batteriskift
Opportunities:	**Threats**:
Udvidelse med nye funktioner Bedre markedsføring	Vedligeholdelsesomkostninger Billigere produkter Elektronik-fejl

(a) SWOT-analyse-matrix for prototype

Strengths:	**Weaknesses:**
Billigere Brugervenligt Billig anskaffelse Ingen vedligeholdelse	Kun passiv dæmpning Dæmper også tale Manglende funktioner
Opportunities:	**Threats:**
Kendt produkt Opfylder nemt lovkrav	Bedre teknologiske løsninger Manglende mulighed for funktionaliteter Ikke attraktivt i miljø med skiftende støjniveau

(b) SWOT-analyse-matrix for passivt høreværn

Figur 12.1: Figuren viser SWOT-analyse-matrixer der sammenligner den udviklede prototype med et høreværn kun indeholdende passiv dæmpning.

Den udviklede prototype har den fordel, at det kan bruges i et miljø med skiftende støjniveauer, præcis som arbejdsmiljøet på Stiholt. Dette bør gøre teknologien bag prototypen mere attraktiv, og løse problemet med de momentale støjimpulser der finder sted på Stiholt. Prototypen kan bæres hele tiden og dæmper kun når der er støj over 80dB, hvilket burde være grundlag for valg af prototypen frem for det passive høreværn. Det er dog vigtigt at holde prisen på prototypen nede, da prisforskellen kan blive problematisk i markedsføringssammenhæng. Det passive høreværn opfylder på en nem og billig måde lovkravet om brug af høreværn i støjfyldte miljøer. Ud fra SWOT-analysen indikeres, at batteriskift er en svaghed. De nævnte forbedringer omhandlende strømforbruget og dertil et design der generelt er mere strømbesparende, vil kunne mindske denne svaghed.

Hvis prototypen skal udarbejdes som færdigt produkt, skal lovgivningen overholdes. Fx. skal EMC-direktivet overholdes, jf afsnit 5.2, da produktet ikke må forstyrre radio- og telekommunikation. Det endelige produkt må ikke indeholde skadelige stoffer så som bly, kviksølv og lign. så der skal tages hensyn til RoHS-direktivet, jf. afsnit 5.2. Når lovgivningen er overholdt skal der tages stilling til etiske og miljøorienterede spørgsmål. Fx. kan der arbejdes med CSR for at opfylde nationale og globale udfordringer, jf. afsnit 5.3.

Litteratur

Alpha Akustik, **2011**. Alpha Akustik. *Produkter til lyddæmpning*, 2011. Downloadet: 24.05.2011.

Arbejdstilsynet, **2006**. Arbejdstilsynet. *Beskyttelse mod udsættelse for støj i forbindelse med arbejdet*, 2006. Downloadet: 21.02.2011.

Arbejdstilsynet, **2010**. Arbejdstilsynet. *Arbejdsbetingede sygdomme*, 2010. Downloadet: 23.02.2011.

Arbejdstilsynet, **2009**. Arbejdstilsynet. *D.5.2 - Høreværn*, 2009. Downloadet: 23.02.2011.

Arbejdstilsynet, **2005**. Arbejdstilsynet. *D.6.5 - Infralyd*, 2005. Downloadet: 08.03.2011.

Audio Engineering Society, **2003**. Audio Engineering Society. *AES CONVENTION PAPER*, 2003. Downloadet: 12.05.2011.

Audionova, **2011**. Audionova. *Ørets anatomi*, 2011. Downloadet: 16.02.2011.

Batteribyen, **2011**. Batteribyen. *E / 9V*, 2011. Downloadet: 21.03.2011.

E.H. Berger, **2002**. E.H. Berger. *ANR in Hearing protection*, 2002. Downloadet: 01.03.2011.

Biering-Sørensen, Hansen, Klim, og Madsen, **1988**. Stephen Biering-Sørensen, Finn Overgaard Hansen, Susanne Klim, og Preben Thalund Madsen. *Håndbog i struktureret - programudvikling*. ISBN: 978-87-571-1046-3, 1. udgave. Teknisk Forlag, 1988.

Blanchard og Fabrycky, **2011**. Benjamin S. Blanchard og Wolter J. Fabrycky. *Systems Engineering and Analysis*. ISBN: 0-13-714843-7, 5. udgave. Pearson education, 2011.

Brixen og Voetmann, **2004**. Eddy Bøgh Brixen og Jan Voetmann. *Praktisk Elektroakustik*. ISBN: 87-91117-10-0, 2. udgave. Musikforlaget FOG, 2004.

Bytesonic, **2010**. Bytesonic. *2N2222hfe*, 2010. Downloadet: 10.05.2011.

Castle Group, **2008**. Castle Group. *What are Frequency Responses?*, 2008. Downloadet: 19.03.2011.

Lisa Cunningham, **2011**. Lisa Cunningham. *Sensory Cell Biology*, 2011. Downloadet: 24.02.2011.

Dangerous Decibels, **2002**. Dangerous Decibels. *Exposure Time Guidelines*, 2002. Downloadet: 23.02.2011.

Dangerous Decibels, **2011**. Dangerous Decibels. *How do loud sounds damage hearing*, 2011. Downloadet: 24.02.2011.

Dansk Erhverv, **2011**. Dansk Erhverv. *Batteries*, 2011. Downloadet: 25.02.2011.

Dansk Erhverv, **2008**. Dansk Erhverv. *Klassificering ved CLP*, 2008. Downloadet: 20.02.2011.

Dansk Erhverv, **2009**. Dansk Erhverv. *Ny REACH-vejledning for handelsvirksomheder*, 2009. Downloadet: 20.02.2011.

Dansk Erhverv, **2010**. Dansk Erhverv. *WEEE og elektronikskrot*, 2010. Downloadet: 20.02.2011.

Dansk Standard, **2003**. Dansk Standard. *Personlige værnemidler - Høreværn*. ISBN: 87-7310-335-7, 1. udgave. Dansk Standard, 2003.

Dansk Standard, **2010**. Dansk Standard. *Derfor koster standarder penge*, 2010. Downloadet: 26.02.2011.

Despopoulos og Silbernagl, **2003**. Agamemnon Despopoulos og Stefan Silbernagl. *Color atlas of Physiology*. ISBN: 3-13-545005-8, 5. udgave. Thieme, 2003.

Dipl.-Ing. Eberhard Sengpiel, **2011**. Dipl.-Ing. Eberhard Sengpiel. *Speed Of Sound In Air*. http://www.sengpielaudio.com/calculator-speedsound.htm, 2011. Downloadet: 10.03.2011.

Dorf og Svoboda, **2006**. R.C. Dorf og J.A. Svoboda. *Introduction to Electric Circuits*. ISBN: 0-471-73042-4, 7th Edition. Wiley, 2006.

E.a.r. inc., **2011**. E.a.r. inc. *Foam earplugs*, 2011. Downloadet: 25.02.2011.

Erhvervs og Selskabsstyrelsen, **2010**. Erhvervs og Selskabsstyrelsen. *Virksomheders samfundsansvar*, 2010. Downloadet: 09.03.2011.

es.aau, **2009**. es.aau. *Print fremstilling*, 2009. Downloadet: 25.05.2011.

European Commission, **2009**. European Commission. *ATEX Guidelines*, 2009. Downloadet: 20.02.2011.

European Commission, **2011**. European Commission. *CE marking*, 2011. Downloadet: 20.02.2011.

European Commission, **2004**. European Commission. *Electromagnetic Compatibility (EMC)*, 2004. Downloadet: 20.02.2011.

European Commission, **2010**. European Commission. *RogTTE-direktivet*, 2010. Downloadet: 25.02.2011.

Fairchild, **2000**. Fairchild. *2N5484*, 2000. Downloadet: 10.05.2011.

Hall, **2001**. Donald E. Hall. *Musical Acoustics*. ISBN: 978-0534377281, 3rd Edition. Brooks/Cole, 2001.

Hitachi, **2001**. Hitachi. *1N4148*, 2001. Downloadet: 02.05.2011.

Holck, Kraaer, og Lund, **2009a**. Per Holck, Jens Kraaer, og Birgitte Merci Lund. *Orbit A HTX*. ISBN: 978-87-616-1398-1, 1. udgave. Systime, 2009a.

Holck, Kraaer, og Lund, **2009b**. Per Holck, Jens Kraaer, og Birgitte Merci Lund. *Orbit B HTX*. ISBN: 978-87-616-1013-3, 1. udgave, 4. oplag. Systime, 2009b.

Horowitz og Hill, **1989**. Paul Horowitz og Winfield Hill. *The Art Of Electronics*. ISBN: 0-521-37095-7, 2. udgave. Cambridge University, 1989.

Hyperion, **2011**. Hyperion. *Hyperion G3 LiPo - Specifications*, 2011. Downloadet: 19.05.2011.

International Rectifier, **2010**. International Rectifier. *IRF9530*, 2010. Downloadet: 06.05.2011.

Intersil, **2003**. Intersil. *DG444_445*, 2003. Downloadet: 15.05.2011.

Irwin og Nelms, **2008**. J. David Irwin og R. Mark Nelms. *Basic Engineering Circuit Analysing*. ISBN: 978-0470-23455-6, 9th Edition. Wiley, 2008.

Jens Jensen, **2004**. Jens Jensen. *D.6.5 - Infralyd*, 2004. Downloadet: 08.03.2011.

Justitsministeriet, **2003**. Justitsministeriet. *Købloven*, 2003. Downloadet: 20.03.2011.

Kingbright, **2010**. Kingbright. *3mmLOWLED*, 2010. Downloadet: 09.05.2011.

Kvale, **1997**. Steinar Kvale. *InterView - En introduktion til det kvalitative forskningsinterview*. ISBN: 87-412-2816-2, 1. udgave. Hans Reitzels Forlag, 1997.

LCA Center, **1997**. LCA Center. *Hvad er LCA?*, 1997. Downloadet: 11.03.2011.

Linear Technology, **2011**. Linear Technology. *LT1097*, 2011. Downloadet: 19.05.2011.

Long, **2006**. Marshall Long. *Architectural Acoustics*. ISBN: 978-0-12-455551-8, 1. udgave. Elsevier Acedemic Press, 2006.

Martini, Ober, Garrison, Welch, Hutchings, og Ireland, **2006**. F. Martini, W.C. Ober, C.W. Garrison, K. Welch, R.T. Hutchings, og K. Ireland. *Fundamentals of anatomy & physiology*. Pearson education, 2006.

Monacor, **2011**. Monacor. *MCE 4000 Electret Mike Capsul*, 2011. Downloadet: 10.04.2011.

National Semiconductor Corporation, **1995**. National Semiconductor Corporation. *Protection Schemes for BI-FET Amplifiers and Switches*, 1995. Downloadet: 10.05.2011.

Odense Kommune, **2009**. Odense Kommune. *Sådan gør du - Interview*, 2009. Downloadet: 11.03.2011.

Official Journal of the European Union, **2003**. Official Journal of the European Union. *DIRECTIVE 2002/95/EC*, 2003. Downloadet: 20.02.2011.

Palm, **2005**. William J. Palm. *System Dynamics*. ISBN: 0-256-11449-8, 2. udgave. Pearson education, 2005.

Panasonic Semiconductor Device Solutions Co., 2011. Panasonic Semiconductor Device Solutions Co. *Electret Condenser Microphone ECM Schematic Diagram*, 2011. Downloadet: 19.05.2011.

Philips, **2011**. Philips. *Voltage Regulator Dioes-datasheet*, 2011. Downloadet: 19.05.2011.

Poulsen, **2001**. Torben Poulsen. *Acoustic Communication - Hearing and Speech*. DTU, 2001.

Peter M. Rabinowitz, **2002**. Peter M. Rabinowitz. *Noise-Induced Hearing Loss*, 2002. Downloadet: 23.02.2011.

R. Raman, **2011**. R. Raman. *Perforation of the right ear drum*, 2011. Downloadet: 16.02.2011.

Povl Raskmark og Ole Kiel Jensen, **1998**. Povl Raskmark og Ole Kiel Jensen. *Modellering af HF komponenter*, 1998. Downloadet: 17.05.2011.

Rasmussen, **2001**. Egon Rasmussen. *Analog*. ISBN: 87-600-0354-5, 2. udgave. Industriens Forlag, 2001.

Jens Holger Rindel, **2011**. Jens Holger Rindel. *Note om rumakustik, udleveret fra vejleder(Per Rubak)*, 2011. Udleveret: 02.05.2011.

Rockfon, **2011**. Rockfon. *Rockfon - produkter*. http://produkter.rockfon.dk/, 2011. Downloadet: 17.05.2011.

SGS-Thomson, **2010**. SGS-Thomson. *2N2222A*, 2010. Downloadet: 09.05.2011.

Shield, **2006**. Bridget Shield. *EVALUATION OF THE SOCIAL AND ECONOMIC COSTS OF HEARING IMPAIRMENT*, 2006. Downloaded: 09.03.2011.

Andrew W Smith, **1991**. Andrew W Smith. *WHO activities for prevention of deafness and hearing impairment in children*, 1991. Downloadet: 09.03.2011.

STMicroelectronics, **2002**. STMicroelectronics. *AN1534 APPLICATION NOTE*, 2002. Downloadet: 10.05.2011.

STMicroelectronics, **2001**. STMicroelectronics. *TL084*, 2001. Downloadet: 02.05.2011.

Su, **2002**. Kendall L Su. *Analog Filters*. ISBN: 1-4020-7033-0, 2th Edition. Kluwer Academic Publishers, 2002.

TECXUS, **2010**. TECXUS. *NIMH9V200RTU*, 2010. Downloadet: 06.05.2011.

Tego, **2011**. Tego. *Høreværnsudvalg*, 2011. Downloadet: 12.04.2011.

Texcus, **2010**. Texcus. *BatteriMinimumSpaending*, 2010. Downloadet: 07.05.2011.

Barry Truax, **1999**. Barry Truax. *HANDBOOK FOR ACOUSTIC ECOLOGY*, 1999. Downloadet: 28.02.2011.

Vigran, **2008**. Tor Erik Vigran. *Building Acoustics*. ISBN: 978-0-415-42853-8, 1. udgave. Taylor and Francis, 2008.

Visaton, **2011**. Visaton. *Visaton KP36 50ohm*, 2011. Downloadet: 13.05.2011.

Vugge til Vugge Danmark, **2010**. Vugge til Vugge Danmark. *Cradle to Cradle*, 2010. Downloadet: 14.03.2011.

Winder, **2002**. Steve Winder. *Analog and Digital Filter Design*. ISBN: 0-7506-7547-0, 2th Edition. Newnes, 2002.

John Wolfe, **2010**. John Wolfe. *dB: what is a decibel*, 2010. Downloadet: 25.02.2011.

APPENDIX A

Taleforståelighed

For en teknisk anvendelse af elektroakustisk udstyr til taletransmission, er det væsentligt at undersøge begrebet taleforståelighed. Derfor betragtes vokalens signalvej neærmere i det følgende.

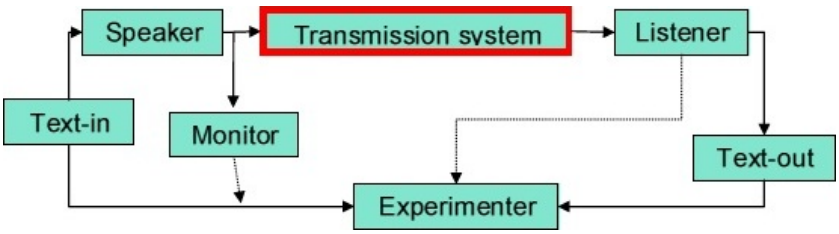
En vokallyd genereres af stemmelæberne, føres op gennem svælg og ud igennem munden og/eller næsen. Transmissionsvejen betragtes som et rør. Afstanden fra stemmelæberne til læberne ved mundhulen på en voksen mand er ca. 17cm. Den laveste resonansfrekvens kaldes første formant, og forekommer ved en fjerdedel af bølgelængden. Dvs. $\frac{340\frac{m}{s}}{4 \cdot 0.17m} = 500Hz$. De næste resonansfrekvenser forekommer ved de ulige harmoniske og bliver 1500Hz og 2500Hz osv. Formanter er vigtige for taleforståeligheden, da formanterne udgør karakteristikken af vokaler og muliggør skelnen mellem vokaler. Formanterne flyttes alt efter hvilken vokal der udtales, da røret ændres for at udsende forskellige vokaler. De 3 mest forskellige vokaler er /i/, /a/ og /u/. Formanterne for disse 3 vokaler ser ud som på tabel A.1.

	/i/	/a/	/u/
1. formant	225	700	250
2. formant	2200	1200	700
3. formant	3000	2500	2200

Tabel A.1: Formant frekvenser i Hz fra vokalerne /i/, /a/ og /u/.[Poulsen, 2001]

Det er muligt at forstå tale med 1. og 2. formant, jf. filterundersøgelse i afsnit A.1.

Taleforståelighed er en kategorisering af, hvor godt lytteren forstår det taleren siger. Hertil er en lang række påvirkninger, der indsættes alt efter situationen. Taleforståelighedstest kan opbygges som på figur A.1:



Figur A.1: Illustration af de elementer, der tager del i en taleforståelighedstest.[Poulsen, 2001]

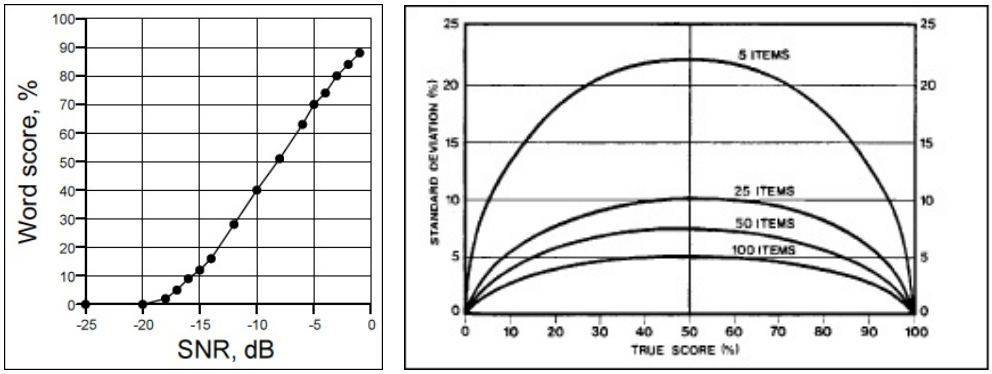
Når taleforståelighed opgøres bruges følgende formel:

$$Taleforstaaelighed(\%) = (\frac{100}{T}) \cdot R \tag{A.1}$$

hvor T er antal ord i testen og R er antallet af korrekte ord.

En lang række faktorer har indflydelse på taleforståelighedstesten. Vigtige faktorer som talerens udtalelse, talehastighed og taleniveau, og lytterens høreevne, træning og ordforråd har indflydelse på resultatet. Testen udføres ved, at en taler læser en række ord eller sæt-

ninger op. Disse ord eller sætninger transmitteres igennem det ønskede system og lytteren forsøger at forstå ordene eller sætningerne, og notere dem. Den test-ansvarlige sammenligner lytterens liste med talerens. Her bruges formel A.1 til at udregne taleforståeligheden. Taleforståelighed er ikke entydig, men vil afhænge af den anvendte metode. Der er således også mange bud på metodevalg, når taleforståeligheden skal kortlægges. Uden at gå i dybden med metoderne, kan nævnes: Artikulations Indeks (AI), Speech Transmission Index (STI) og Rapid STI (RASTI). Den største påvirkning på taleforståeligheden er signal-to-noise ratio (SNR). SNR er forholdet mellem talesignalet og baggrundsstøjen. Hvis man ser på figur A.2(a) ses det tydeligt, at SNR har stor indflydelse: Ændringer i SNR på kun 10dB



(a) Procent rigtige svar som funktion af signal-to-noise ratio

(b) Standard afvigelsen som funktion af den målte score, ved forkellige antal ord

Figur A.2: Figurerne illustrerer hvorledes rigtig-svar-procent kan variere ift. SNR og antal ord i testen.[Poulsen, 2001]

kan ændre taleforståeligheden fra umulig, til acceptabel.

Man skal dog være påpasselig med data fra taleforståelighedstests. Der er lavet en oversigt over standardafvigelsen, se figur A.2(b). Afvigelsen er større des færre ord, der har taget del i testen.

Retningsbestemmelse afgøres ved forskellen mellem lydens ankomst til ørene. Hjernen opfatter tidsforskellen og lokaliserer lydens oprindelse. Retningsbestemmelsen forstyrres ved tildækning af det ydre øre, da ørets udformning har stor indflydelse på retningsbestemmelsen.

Taleforståelighed er afhængig af den anvendte metode, og kan variere selvom testen udføres på samme måde flere gange. Dette appendix er baseret på [Poulsen, 2001].

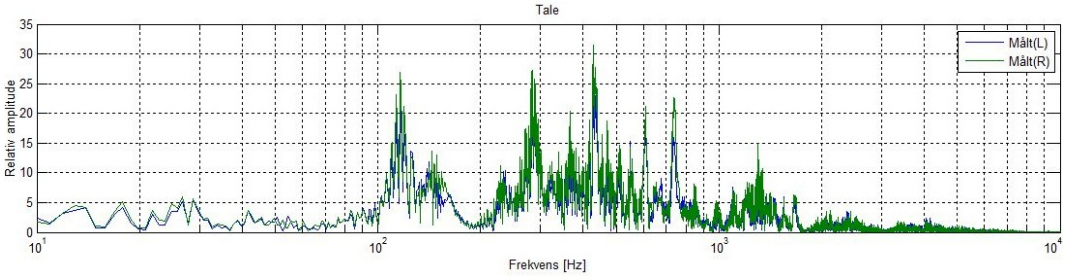
A.1 Filterundersøgelse

Formålet med den følgende undersøgelse er, at undersøge taleforståelighed indenfor frekvensområdet 300-3kHz, og undersøge hvordan et filter vil påvirke de optagede støjkilder fra Stiholt i afsnit 3.2.2.
Til formålet er anvendt Junilyds lydstudie. Dette indebærer et akustisk lyddødt rum og følgende udstyr:

Beskrivelse:	Type:	Beskrivelse:	Type:
Stereo X/Y Mic.	Microtech M930	Studiemonitor	Genelec 1032
Mic. preamp.	Midas XL42	Software	Protools 9
Lydkort	Digi003+	Computer	Mac

Tabel A.2: Udstyr anvendt til filterundersøgelse

Metoden:
En person læser op fra en bog i 1 meters afstand fra mikrofonen, se figur A.4. Lyden bliver optaget og der bliver lyttet på talen. Herefter kan det afgøres, at det er muligt at genkende tale ved yderligere indsnævring af frekvensspektret til 350-1.6kHz med en afskæring på 24dB/oktav. Endvidere er der udført en FFT analyse i Matlab, der viser hvor talespektret i denne situation ligger, som ses på figur A.3. Dette underbygger valget af den variable knækfrekvens mellem 2kHz og 3kHz som ses i afsnit 8.4.4, da det ses at der ikke er dominerende taleindhold i dette område:



Figur A.3: FFT analyse af optaget tale

Figur A.4: Optagelse af tale i studie og efterfølgende forsøg med filtre i forhold til støj optaget på arbejdspladsen Stiholt

Efterfølgende bliver lydfilerne fra Im. Stiholt A/S undersøgelsen i afsnit 3.2.2, sat sammen med den optaget tale. Der bliver på denne måde undersøgt forskellige filterkombinationer, for dermed at finde et godt kompromis mellem tale og støj. For at frasortere støjen fra Stiholt viser et filter på 300-3kHz med minimum 12dB/oktav sig som passende. En option med knækfrekvens ved 2kHz viser sig nyttig ved nogle af støjkilderne. Testresultaterne kan høres i lydfilerne under bilag på CD B.0.8, hvor følgende filer findes:

Ufiltreret:	Tale	Vinkelsliber og tale	Luftnøgle og tale	Alusav og tale
Filtreret:	Tale	Vinkelsliber og tale	Luftnøgle og tale	Alusav og tale

Tabel A.3: Lydfiler på CD

APPENDIX **B**

Bilag på CD

B.0.1 Interessent analyse

B.0.2 Spørgsmål John Larsen

B.0.3 Referat af interview med John Larsen

B.0.4 Lydfil - interview del 1

B.0.5 Lydfil - interview del 2

B.0.6 Lydfil - interview del 3

B.0.7 Spørgeskema til Stiholt

B.0.8 Lydfiler fra filterundersøgelse

B.0.9 Samlet diagram

B.0.10 PCB design